球杆系统建模及其闭环控制器的设计

刘诗宇
（西北工业大学 机电学院，陕西 西安 710068）

摘　要：球杆系统是一个典型的非线性不稳定系统，其开环不稳定的特性对于控制理论及方法的研究大有裨益。针对传统的球杆系统，运用拉格朗日法建立系统动力学方程，并通过线性化处理，以状态空间表示法建立系统的数学模型。同时研究了基于线性二次型（LQR）的最优控制，设计系统状态反馈控制器。并提出了轨迹追踪器的设计方法，以达到闭环系统内部稳定、轨迹追踪的效果。在 Matlab 的 Simulink 环境下进行的建模仿真试验，验证了该设计方法的有效性。

关键词：状态反馈　最优控制　线性二次型（LQR）　轨迹追踪
中图分类号：TP273　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002－6886（2018）06－0001－08

Modeling of ball－beam system and its closed－loop controller design

LIU Shiyu

Abstract: Ball－beam system is a classic nonlinear and unstable system. The characteristics like the instability of the open－loop system are beneficial to the studies on control theories and methods. Based on Lagrangian method, the dynamics equations of the ball－beam system is established, then linearization is implemented in order to model the system by state－space representation. The state－feedback controller is designed by LQR（linear quadratic regulator）－based optimal control. A trajectory tracking approach is proposed in order the closed－loop system to realize the stability and trajectory tracking proposes. The design approach is verified by the modeling and simulation of the system under Matlab－Simulink environment.

Keywords: state－feedback control, optimal control, LQR, trajectory tracking

0　引言

在现代控制理论中，球杆系统是一个经典的控制系统研究对象（图 1），由于其非线性特性及开环系统的不稳定性，球杆系统实验装置可应用于控制理论及方法的研究[1]。对于球杆系统的建模过程以及闭环系统控制器的设计，仍有着许多可研究的角度和方法。

文献[2]提出了基于牛顿力学法和基于拉格朗日法的建模过程，并讨论了 PID 控制器的设计过程；文献[3]对系统微分方程在平衡位置点上进行线性化处理，通过极点配置法设计了状态反馈矩阵。这两种控制器的设计方法均较为随机，例如 PID 控制主要依靠调节比例控制 K_p、积分控制 K_i 和微分控制 K_d 这三个参数来决定控制器的性能，其实际值仅通过调试的方法进行选取，过程较为繁琐；而通过极点配置法设计控制器，也仅需将极点配置在复数域的负半平面，以使得闭环系统稳定，而对于实际极点的选择也较为随机，选取不恰当的极点会影响闭环系统的特性。文献[4]、[5]分别提出了最优鲁棒控制器和基于遗传算法的线性二次型控制方法，但文献中提出的模型都经过了明显简化，仿真结果和实际情况会有一定差异。文献[6]提出了基于 LQR 的最优控制器设计，该线性控制器的设计方法具有较强的实际意义，然而文献中对于球杆系统建模及 LQR 最优控制中权重矩阵 Q、R 的研究均过于简化。

本文针对球杆系统的研究现状，基于拉格朗日法重新建立了球杆系统的全量模型，并通过基于线性二次型（LQR）的最优控制，设计了系统状态反馈控制器。此设计过程即选取负反馈矩阵 K_{opt} 的值，

使得闭环系统在内部稳定的前提下，对系统的动势能及驱动器的电能消耗进行优化。另外，本文在状态反馈控制器的基础上，提出了轨迹追踪器的设计方法，并在 Matlab – Simulink 仿真环境下验证了该控制器设计方法的有效性。

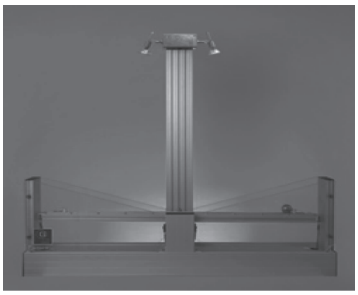


图 1　球杆系统实验平台

1　球杆系统建模

1.1　基于拉格朗日法的建模过程

经典的球杆系统实验平台是由导轨、钢球、皮带、传动轮、伺服电机和电源等组成，其系统简图如图 2。导轨中心固定，两端与皮带相连，伺服电机由带传动方式将驱动轴的转动角转化为导轨的俯仰角变化。导轨旋转中心设置有角度传感器，测量导轨的倾斜角度。导轨上方安装摄像头，以测量小球在导轨上的位置。

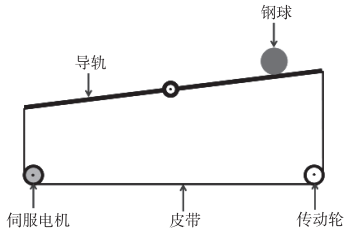


图 2　球杆系统简图

为便于研究计算，本文将按表 1 所示的命名规则对系统各部件参数及变量进行表示。

根据文献[6]，球杆系统的数学模型可通过拉格朗日方程描述。其优势在于通过求解系统的总动能和总势能即可求出系统微分方程，无需对系统各子部分进行建模。为得出系统总动能，首先对小球在导轨上的复合运动进行分析。

如图 3，$(\vec{u_1},\vec{u_2})$ 为小球相对于导轨的相对坐标系，$(\vec{y_1},\vec{y_2})$ 为小球相对于地的绝对坐标系，G 点为小球质心，则有：$\overrightarrow{OG} = r\vec{u}_1 + x\vec{u}_2$。则小球质心 G 沿导轨方向相对于地面的绝对速度可表示为：

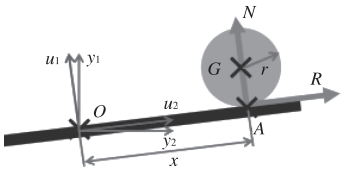


图 3　小球运动及坐标系简图

$$\vec{v} = \frac{\mathrm{d}(\overrightarrow{OG})}{\mathrm{d}t} = \dot{x}\vec{u}_2 + x\dot{\alpha}\dot{\vec{u}}_1 - r\dot{\alpha}\dot{\vec{u}}_2$$
$$= (\dot{x} - r\dot{\alpha})\vec{u}_2 + x\dot{\alpha}\dot{\vec{u}}_1$$

表 1　　系统参数及变量表示

表示符号	系统参数或变量	单位
r_m	电机驱动轴半径	m
I_m	电机转动惯量	kg·m²
θ	电机驱动轴转动角	rad
z_m	电机电枢回路电阻	Ω
k_c	电机转矩常数	N·m/A
k_e	电机反电动势常数	V/rpm
r_p	传动轮半径	m
I_p	传动轮转动惯量	kg·m²
ϕ	传动轮转动角	rad
r	小球半径	m
m	小球质量	kg
I_b	小球转动惯量	kg·m²
ω	小球转动角速度	rad/s
x	小球在导轨上位置	m
l	导轨长度的一半	m
I_r	导轨转动惯量	kg·m²
α	导轨俯仰角	rad

对球杆系统整体做出合理假设如下：1）小球在导轨上作纯滚动运动，忽略小球和导轨之间的滑动及产生的摩擦；2）忽略带传动过程中的能量损失以及皮带的弹性性质所产生的位移和形变。则根据图 4 可得到以下关系：

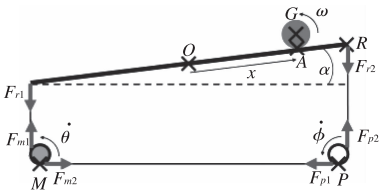


图 4　球杆系统速度关系

系统总动能为：

$$T = \frac{1}{2}m\vec{v}^2 + \frac{1}{2}I_b(\dot{\alpha}+\omega)^2 + \frac{1}{2}I_r\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}I_p\dot{\phi}^2 + \frac{1}{2}I_m\dot{\theta}^2$$

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + r^2\dot{\alpha}^2 - 2r\dot{x}\dot{\alpha} + x^2\dot{\alpha}^2) + \frac{1}{2}I_b\left(\dot{\alpha}^2 + \frac{\dot{x}^2}{r^2} - \frac{2\dot{x}\dot{\alpha}}{r}\right) + \frac{1}{2}I_r\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}I_p\frac{l^2}{r_p^2}\dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2}I_m\frac{l^2}{r_m^2}\dot{\alpha}^2$$

系统总势能可表示为：

$$V = mg(x\sin(\alpha) + r\cos(\alpha)) + cst$$

根据拉格朗日方法,构造拉格朗日因子。则系统运动模型可由拉格朗日微分方程描述:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i$$

其中:q_i 代表广义坐标,即为系统的主要研究变量 x 和 α;Q_i 为广义力,可由虚功原理求解,可设:

$$Q_i = \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ Q_\alpha \end{bmatrix}$$

其中:$Q_x = 0$,由于球杆系统在系统变量 x 上并未受到外力作用,小球在导轨上自由滚动。设 δW 为伺服电机做的虚功,则与电机驱动轴虚位移的关系有:

$$\delta W = C_m \delta\theta$$

其中:C_m 为电机输出力矩。

对直流伺服电机进行建模,直流伺服电机由伺服电压控制,其输入电压信号 U_c、感应电动势 e 及输出力矩 C_m 分别可由下式表示。

$$U_c = \left(L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\right) + z_m i + e$$

$$e = k_e\dot{\theta}$$

$$C_m = k_c i$$

其中:L 代表直流电机电感系数,i 为电机电枢回路通过的电流。此处忽略系统的暂态响应性质,故可忽略 $L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$ 项。有:$C_m = k_c\frac{U_c - k_e\dot{\theta}}{z_m}$。又根据 $\delta\theta = \frac{l}{r_m}\delta\alpha$,代入可得:

$$\delta W = \left(\frac{k_c l}{z_m r_m}U_c - \frac{k_c k_e l^2}{z_m r_m^2}\dot{\alpha}\right)\delta\alpha$$

所以可得广义力:$Q_\alpha = \frac{k_c l}{z_m r_m}U_c - \frac{k_c k_e l^2}{z_m r_m^2}\dot{\alpha}$

根据拉格朗日微分方程,可最终推导出球杆系统的动力学微分方程:

$$(I_b + mr^2)\ddot{\alpha} - \left(mr + \frac{I_b}{r}\right)\ddot{x} - mgr\sin(\alpha) + mr\dot{x}\dot{\alpha}^2 = 0$$

$$\left[I_r + mx^2 + \left(\frac{I_p}{r_p^2} + \frac{I_m}{r_m^2}\right)l^2\right]\ddot{\alpha} + 2mx\dot{x}\dot{\alpha} - mr\dot{x}\dot{\alpha}^2 + xmg\cos(\alpha) + \frac{k_c k_e l^2}{z_m r_m^2}\dot{\alpha} = \frac{k_c l}{z_m r_m}U_c$$

1.2 系统状态空间表示及其线性化

系统动力学微分方程可用矩阵形式表示:

$$\begin{bmatrix} -\left(mr + \frac{I_b}{r}\right) & (I_b + mr^2) \\ 0 & I_r + mx^2 + \left(\frac{I_p}{r_p^2} + \frac{I_m}{r_m^2}\right)l^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -mr\dot{x}\dot{\alpha}^2 + mgr\sin(\alpha) \\ -2mx\dot{x}\dot{\alpha} + mr\dot{x}\dot{\alpha}^2 - mgx\cos(\alpha) - \frac{k_c k_e l^2}{z_m r_m^2}\dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_c l}{z_m r_m} \end{bmatrix}U_c$$

为计算简便,可设:

$$J_1 = -\left(mr + \frac{I_b}{r}\right)$$

$$J_2 = (I_b + mr^2)$$

$$J_3(x) = I_r + mx^2 + \left(\frac{I_p}{r_p^2} + \frac{I_m}{r_m^2}\right)l^2$$

根据文献[7]所阐述的控制系统状态空间表示法,可设系统状态向量:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \alpha \\ \dot{x} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix}$$

故可得到该非线性系统的状态空间表达式:

$$\dot{x}_1 = x_3$$

$$\dot{x}_2 = x_4$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{J_1}(-mrx_1x_4^2 + mgr\sin(x_2)) + \frac{J_2}{J_1J_3(x_1)}\left(2mx_1x_3x_4 - mrx_1x_4^2 + mgx_1\cos(x_2) + \frac{k_c k_e l^2}{z_m r_m^2}x^4 - \frac{k_c l}{z_m r_m}U\right)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{J_3(x_1)}\left(-2mx_1x_3x_4 + mrx_1x_4^2 - mgx_1\cos(x_2) - \frac{k_c k_e l^2}{z_m r_m^2}x^4 + \frac{k_c l}{z_m r_m}U\right)$$

其中系统输入量为直流电机输入的电压信号:$U = \quad U_c$。

为实现对球杆系统线性控制器的研究，对非线性模型进行线性化处理。即可假设在球杆系统平衡位置点附近任意小的区间内，系统状态的导数均趋近于零。令 $\dot{X}=0$ 可得到系统的平衡位置 X_e 和 U_e：

$$\begin{cases} x_{1e}=x_{eq} \\ x_{2e}=0 \\ x_{3e}=0 \\ x_{4e}=0 \\ U_e=\dfrac{mgx_{eq}z_m r_m}{k_e l} \end{cases}$$

由上式可知，系统状态 $x_{1e}=x_{eq}$ 的平衡位置并未确定。即当导轨的俯仰角为 0° 时（导轨保持水平），小球可以在导轨上任意位置保持平衡，电机通过带传动在导轨上施加的平衡力矩，使得小球保持静态平衡。在实际问题中，显然选取 $x_{1e}=0$（小球位于导轨正中心），故 $U_e=0$。

将得到的平衡位置点处的系统状态量代入，对非线性系统进行线性化，可最终得到线性系统的状态空间表达式：

$$\begin{cases} \dot{\delta X}=A.\,\delta X+B.\,\delta U \\ Y=C.\,\delta X+D.\,\delta U \end{cases}$$

其中：$\delta X=X-X_e$，$\delta U=U-U_e$，显然由于平衡位置点的选择，可将线性方程简化为：

$$\begin{cases} \dot{X}=AX+BU \\ Y=CX+DU \end{cases}$$

即在平衡位置附近线性化得到的系统空间状态模型，可用于描述系统在任意位置的运动规律。

此处，矩阵 A、B 描述了系统的运动规律及控制规律，由线性化过程可得到：

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \dfrac{mgJ_2}{J_1\left[I_r+\left(\dfrac{I_p}{r_p^2}+\dfrac{I_m}{r_m^2}\right)l^2\right]} & \dfrac{mgr}{J_1} & 0 & \dfrac{J_2}{J_1\left[I_r+\left(\dfrac{I_p}{r_p^2}+\dfrac{I_m}{r_m^2}\right)l^2\right]}\dfrac{k_c k_e l^2}{z_m r_m^2} \\ \dfrac{-mg}{I_r+\left(\dfrac{I_p}{r_p^2}+\dfrac{I_m}{r_m^2}\right)l^2} & 0 & 0 & \dfrac{-1}{I_r+\left(\dfrac{I_p}{r_p^2}+\dfrac{I_m}{r_m^2}\right)l^2}\dfrac{k_c k_e l^2}{z_m r_m^2} \end{bmatrix},B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dfrac{-J_2}{J_1\left[I_r+\left(\dfrac{I_p}{r_p^2}+\dfrac{I_m}{r_m^2}\right)l^2\right]}\dfrac{k_c l}{z_m r_m} \\ \dfrac{-1}{I_r+\left(\dfrac{I_p}{r_p^2}+\dfrac{I_m}{r_m^2}\right)l^2}\dfrac{k_c l}{z_m r_m} \end{bmatrix}$$

而 Y 为系统输出向量，此处考虑系统为全状态量输出，以便于设计系统的状态反馈控制器。故可得到输出矩阵 C 和 D 的值：

$$C=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},\quad D=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

2 基于 LQR 的状态反馈控制器设计

由文献[7－8]所阐述的状态反馈控制器的设计方法，以及采用基于线性二次型（LQR）的最优控制对控制器环节进行选取的过程，可设计状态负反馈调节输入量：

$$U=-KX+U_c$$

其中：U_c 为系统外部输入量（此处为电机输入的电压信号），K 为待设计的状态反馈增益矩阵。则闭环系统可表示为：

$$\begin{cases} \dot{X}=(A-BK)X+BU_c \\ Y=CX \end{cases}$$

通过对控制器负反馈增益矩阵 K 的选取，使得闭环系统 $A-BK$ 稳定，即矩阵 $A-BK$ 的特征值均具有负实部。则对于文献[3]中提到的极点配置法，只要将 $A-BK$ 的极点配置在复数域的负半平面上，即可得到系统的稳定性。而基于 LQR 的最优控制，在满足闭环系统稳定性的基础上，对系统运动及控制过程进行优化。其过程可描述为，对于能控的线性系统 $\dot{X}=AX+BU$，寻求该系统的最优控制率：$U_{opt}=-K_{opt}X$，使得以下设计的二次型性能指标函数 J 取得极值。

$$J = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{\infty} (X^{\mathrm{T}}QX + U^{\mathrm{T}}RU)\,\mathrm{d}t$$

Q 为半正定的状态加权矩阵,R 为正定的控制加权矩阵。根据文献[9] 所阐述的基于二次型的最优控制设计方法可知,令二次型的性能指标 J 取极小值时,最优控制率可表示为:

$$U_{opt} = -R^{-1}B^{\mathrm{T}}KX$$

其中:K 为 Reccati 方程的常数解,该方程表示为:

$$KA + A^{\mathrm{T}}K - KBR^{-1}B^{\mathrm{T}}K + Q = 0$$

对于本文所研究的球杆系统,设计二次型性能指标函数 J,以优化球杆系统运动过程中的动能、势能以及系统控制过程中所消耗的电能,并且考虑系统主要控制对象 x、α 的控制误差。系统内部的动能和势能可分别表示如下:

$$T = \frac{1}{2}\dot{x}^2\left(m + \frac{I_b}{r^2}\right) + \dot{x}\dot{\alpha}\left(-mr - \frac{I_b}{r}\right) + \frac{1}{2}\dot{\alpha}^2\left(mr^2 + I_b + I_r + \frac{l^2}{r_p^2}I_p + \frac{l^2}{r_m^2}I_m\right)$$

$$V = mg(x\sin(\alpha) + r\cos(\alpha)) + cst \approx_{(\alpha\to 0)} mgx\alpha + cst$$

系统内部消耗的电能可表示为:

$$E = \int UI\mathrm{d}t = \int U\frac{U-e}{z_m}\mathrm{d}t = \left(\int\frac{U^2}{z_m} - \int\frac{U\dot{\theta}k_e}{z_m}\right)\mathrm{d}t$$

$$= \left(\int\frac{U^2}{z_m} - \int\frac{U\dot{\alpha}k_e l}{z_m r_m}\right)\mathrm{d}t$$

并且该控制系统主要目的是通过控制导轨俯仰角 α 从而控制小球在导轨上的位置 x,故可针对系统状态量 x 和 α 设置偏差函数:

$$J_e = x^2 + 0.5\alpha^2$$

由系统消耗电能表达式可知,性能指标中含有系统状态量和输入量的交叉项,式中表示为 $U\dot{\alpha}$ 项。故根据文献[8] 构造带有交叉项的指标函数:

$$J = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{\infty} (X^{\mathrm{T}}QX + 2X^{\mathrm{T}}SU + U^{\mathrm{T}}RU)\,\mathrm{d}t$$

其中:S 为 X^TU 交叉项的加权矩阵。经过简单的矩阵转化,可将上式表示为:

$$J = \frac{1}{2}\int_{t_0}^{\infty} [X^{\mathrm{T}}(Q - SR^{-1}S^{\mathrm{T}})X + (U + R^{-1}S^{\mathrm{T}}X)^{\mathrm{T}} R(U + R^{-1}S^{\mathrm{T}}X)]\,\mathrm{d}t$$

可设 $U' = U + R^{-1}S^{\mathrm{T}}X$,$Q' = Q - SR^{-1}S^{\mathrm{T}}$。则可将上式转化为一般的二次型性能指标函数,且此时原线性系统表示为:

$$\dot{X} = AX + BU = AX + B(U' - R^{-1}S^{\mathrm{T}}X)$$
$$= (A - BR^{-1}S^{\mathrm{T}})X + BU'$$

根据一般形式下最优控制率的解,可得:

$$U' = -R^{-1}B^{\mathrm{T}}KX$$

最终可得最优控制率为:

$$U_{\mathrm{opt}} = U' - R^{-1}S^{\mathrm{T}}X = -R^{-1}(B^{\mathrm{T}}K + S^{\mathrm{T}})X$$

其中 K 为以下 Reccati 方程的常数解:

$$K(A - BR^{-1}S^{\mathrm{T}}) + (A - BR^{-1}S^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}K - KBR^{-1}B^{\mathrm{T}}K + (Q - SR^{-1}S^{\mathrm{T}}) = 0$$

即对于闭环控制系统,最优控制下的状态反馈矩阵为:

$$K_{\mathrm{opt}} = -R^{-1}(B^{\mathrm{T}}K + S^{\mathrm{T}})$$

对于权重矩阵 Q、R、S 的选取,根据前文对系统动势能、消耗电能以及系统状态量 x 和 α 偏差函数的建立,易求得:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2}mg & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}mg & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\left(m + \frac{I_b}{r^2}\right) & -\frac{1}{2}\left(mr + \frac{I_b}{r}\right) \\ 0 & 0 & -\frac{1}{2}\left(mr + \frac{I_b}{r}\right) & \frac{1}{2}\left(mr^2 + I_b + I_r + \frac{l^2}{r_p^2}I_p + \frac{l^2}{r_m^2}I_m\right) \end{bmatrix},\quad R = \frac{1}{z_m},\quad S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{k_e l}{z_m r_m} \end{bmatrix}$$

3 轨迹追踪问题及设计方法

对于轨迹追踪问题，电机输入的电压信号不再作为闭环系统的输入量，而是将参考轨迹作为系统输入。对于本文研究的球杆系统，将系统状态量 x，即小球在导轨上的位置作为参考输入。此时闭环系统反馈控制率可表示为：

$$U = -KX + GX_d$$

其中：X_d 即为系统外部输入的参考轨迹；G 为待设计的补偿增益矩阵；K 为状态反馈矩阵，可通过极点配置法或上文讨论的最优控制法求得，以使得闭环系统满足稳定性要求。则加入轨迹追踪环节的闭环控制系统可由下式和图 5 所示的系统框图表示。

$$\dot{X} = (A - BK)X + BGX_d$$

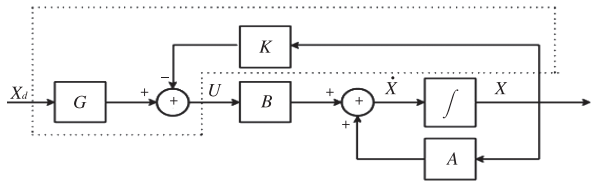


图 5 闭环系统框图

重新构造系统空间状态方程，加入外部参考状态量 X_d，则未加入补偿增益矩阵 G 的开环系统可表示为：

$$\begin{bmatrix}\dot{X}\\ \dot{X}_d\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}A_{11} & A_{12}\\ 0 & A_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\ X_d\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}B_1\\ 0\end{bmatrix}U$$

其中：X 仍为系统的状态向量，$X_d = x_d$ 为针对小球在导轨上的位置 x 而输入的参考轨迹。则根据上文研究的球杆系统可知：$A_{11} = A$，$B_1 = B$。且系统的参考轨迹输入并不会影响系统内部的运动规律，则有：

$$A_{12} = \begin{bmatrix}0\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}$$

若此处 X_d 考虑为系统外部干扰，则矩阵 A_{12} 可通过对扰动与系统运动产生的影响进行建模求得。并且，在本文研究内容中，由于参考输入仅为系统状态 x 需要追踪的一条轨迹，其本身并不需要运动方程描述，故 $A_{22} = 0$。

关于轨迹追踪器的设计过程，首先构造追踪误差：

$$e = \begin{bmatrix}C_{e1} & C_{e2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\ X_d\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0 & \vdots & -1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\ \alpha\\ \dot{x}\\ \dot{\alpha}\\ \cdots\\ x_d\end{bmatrix}$$

并构造系统输出量：$Y = \begin{bmatrix}C_{y1} & C_{y2}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X\\ X_d\end{bmatrix}$

可设系统仍为全状态量输出，且外部参考轨迹 X_d 并不需要输出。故有：

$$C_{y1} = \begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}, C_{y2} = 0$$

根据文献[7]中关于轨迹追踪器的设计方法，可知该线性系统方程可解，当且仅当存在 T_a、F_a 使得：

$$\begin{cases}-A_{11}T_\alpha + T_\alpha A_{22} + A_{12} = -B_1F_\alpha\\ -C_{e1}T_\alpha + C_{e2} = 0\end{cases}$$

可解得：$T_\alpha = \begin{bmatrix}-1\\ \approx 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}$ 且 $F_a = B_1^{-1}A_{11}T_a$。

通过解得的 T_a、F_a 以及前文已设计的状态反馈矩阵 K_{opt}，可求得系统追踪器的状态反馈控制率为：

$$U = -K_{opt}X + (F_a - K_{opt}T_a)X_d$$

即闭环系统轨迹追踪的补偿增益矩阵：

$$G = F_a - K_{opt}T_a$$

4 仿真研究

4.1 状态反馈控制器仿真

下面通过在 Matlab - Simulink 环境下进行的数值仿真来验证上述的基于 LQR 的状态反馈控制器和轨迹追踪器设计方法的有效性。根据文献[10]提供的球杆系统实验平台各参数的实际数值，可得到系统空间状态表示的常数矩阵：

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.069 & -7.007 & 0 & -0.143 \\ -1.715 & 0 & 0 & -3.579 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.120 \\ 2.990 \end{bmatrix}$$

对于 LQR 最优控制中权重矩阵的选取，代入实际数值后可得：

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0.132 & 0 & 0 \\ 0.132 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.019 & -0.001 \\ 0 & 0 & -0.001 & 0.077 \end{bmatrix}$$

$$R = 0.385$$

$$S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -0.230 \end{bmatrix}$$

在实际问题中，闭环系统控制器性能主要考虑的指标是系统状态的稳定性以及对系统外部参考的追踪效果，而对系统消耗的能量要求并不严苛，故可增加 LQR 中对于系统状态权重矩阵 Q 的比重。在此研究实例中，可选取：$Q_s = 500Q, R_s = R, S_s = S$。并借助 Matlab 中 Care 函数（Continuous - time Algebraic Reccati Equation），可求得闭环系统最优控制的状态反馈矩阵：

$$K_{\text{opt}} = [-36.634 \quad 75.635 \quad -29.192 \quad 12.217]$$

对于轨迹追踪问题，将矩阵 $A_{11} = A, B_1 = B$ 中代入实际数值，可求得：

$$F_a = 0.574$$

则补偿增益：$G = F_a - K_{\text{opt}} T_a = -36.060$。

在 Simulink 仿真环境下实现了闭环线性系统，并且关于反馈矩阵 K 的选取，对比了传统的极点配置法和基于 LQR 的最优控制法所设计的闭环系统性能。则对于仿真实验，给定系统输入的电压信号如图 6。

根据文献[3]中提出的极点配置法，选取闭环系统 $A - BK$ 的特征值：

$\lambda_1^d = -500; \lambda_2^d = -2.5 + i; \lambda_3^d = -2.5 - i; \lambda_4^d = -5$

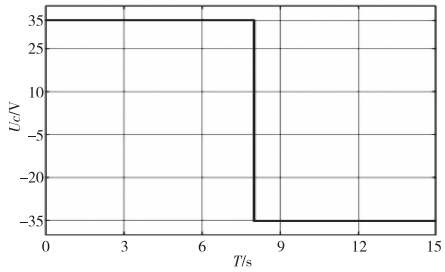


图 6　闭环系统电压输入

则可得到状态反馈矩阵：

$$K = [-865.7 \quad 1718.1 \quad -771.5 \quad 200.3]$$

将两种方法求得的反馈矩阵分别进行仿真实验，给定同样的电压输入信号，观察闭环系统对于小球在导轨上位置 x 的响应。

图 7 展示了对于两种方法求得的反馈矩阵 K，闭环系统关于小球位置 x 相应的输出响应。可知两种设计方法得到的闭环系统均稳定，且响应时间均较短（1.5 s 左右）。然而由于极点配置法求得的反馈增益的值较大，使得系统响应输出量较小，影响了系统对输入信号的敏感度，而降低 K 值的选取又会影响系统的稳定性。在对闭环系统 $A - BK$ 极点的选取过程中，对于共轭复数根实际值的不同选取也会影响系统的震荡性。而根据 LQR 的最优控制所涉及的闭环系统控制器，显然在闭环系统稳定的前提下，系统响应时间较短，超调量较小，并且选取的反馈增益的值也更贴合实际（考虑了对系统能量及电机电能消耗的优化），在实际问题中突显了其设计方法的优越性。

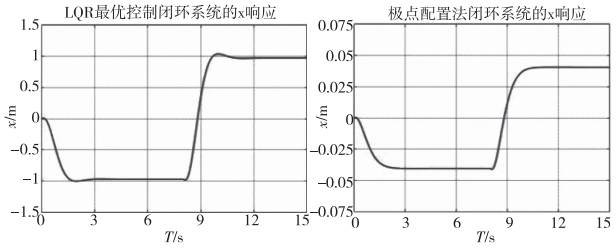


图 7　小球位置输出响应

4.2　轨迹追踪器仿真

在 Simulink 仿真环境下，实现了对闭环系统轨迹追踪器的建模仿真，并给定外部输入的参考轨迹 X_d 如图 8。

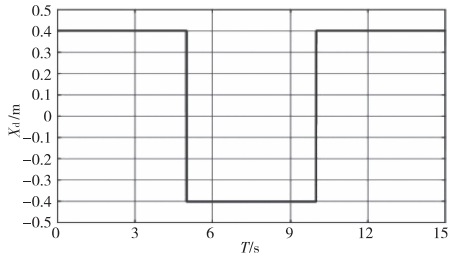


图 8　小球位置 x 的参考轨迹输入

在仿真中，可得到闭环系统对于参考轨迹 x_d 追踪的响应曲线以及球杆系统输入的控制电压 $U = -KX + GX_d$，分别由图 9 和图 10 表示。

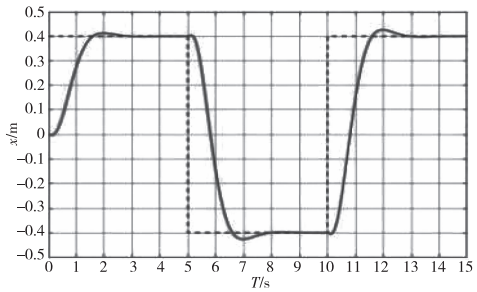


图 9　小球位置 x 的响应曲线

由图 9 可得，闭环系统对轨迹追踪的响应时间约为 2 s，且稳态误差很小。且由图 10 可知，系统控制电压满足实验平台对输入电压的限制（最大电压不超过 35 V），该闭环系统轨迹追踪器的设计得到验证。

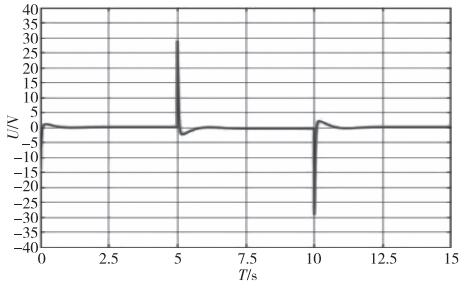


图 10　闭环控制系统输入电压

5　结论

本文在详细分析球杆系统基本原理的基础上，运用拉格朗日法建立了系统的全量数学模型，并对系统的非线性模型进行了线性化处理。针对线性化模型，研究了基于 LQR 的最优控制，设计了系统状态追踪器。并在 Simulink 仿真环境下实现了建模、仿真实验，对比研究了分别通过极点配置法和基于 LQR 的最优控制所得到的闭环系统控制器性能。利用极点配置法设计控制器具有操作简便的特点，但是对于所配置极点的选取具有一定的难度，其随机性会影响控制系统的性能。且此方法并未考虑实际情况，例如在实际问题中，若配置的极点过于远离复数域的原点，会使得控制器反馈增益矩阵 K 的值较大，导致控制器成本过高或系统消耗的能量过大。相反，基于 LQR 的最优控制可在满足闭环系统稳定的前提下，对设计的二次型性能指标函数进行优化，求得反馈增益矩阵的一个优化解。例如在本文所研究的球杆系统中，优化了系统动势能和电机驱动所消耗的电能，且文中探讨的设计过程有效地提出了权重矩阵 Q、R 和 S 的选取方法。显然该设计方法在实际问题中具有更大的优势。

本文在设计状态反馈控制器的基础之上，增加了轨迹追踪器环节，即讨论了补偿增益矩阵 G 的选取过程，使得系统状态量和参考轨迹输入量的误差趋近于零。最终通过 Simulink 仿真结果表明，本文设计的状态反馈控制器及轨迹追踪器达到了理想的设计效果。

参考文献

[1] SALVATORE S, ESPOSITO E, MILLER J. Ball & beam control system[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 30(3): 376 – 388.

[2] 刘阳，万隆君，徐轶群. 浅谈球杆系统的建模与仿真[J]. 中国科技信息，2014，8：159 – 161.

[3] 何朕，王毅，周长浩，等. 球 – 杆系统的非线性问题[J]. 自动化学报，2007，33(5)：550 – 553.

[4] 胖永新，金迪，孟宪东. 球杆系统的建模、仿真与控制器设计[J]. 武汉大学学报(工学版)，2005，38(6)：142 – 146.

[5] 徐琼琼. 基于LQR的球杆系统最优控制器设计[J]. 景德镇高专学报. 2007，22(4)：5 – 6.

[6] 王广熊，杨冬云，何朕. 拉格朗日方程和它的线性化[J]. 控制与决策，2002，17(增刊 2)：7 – 11.

[7] DI – LORETO M. Représentation d'état[Z], Lyon : Institut National des Sciences Appliqués. 2010.

[8] PANG Z H, ZHENG G, LUO C X. Augmented State Estimation and LQR Control for a Ball and Beam System[J]. 2011 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011: 1328 – 1332.

[9] BORNE P, DAUPHIN - TANGUY G, RICHARD J P, et al. Commande et Optimisation des Processus [M]. Paris: Editions Technip, 1990.
[10] Laboratory Experiment Ball and Beam BB50[R]. Laboratory: Ingenieurbüro Gurski - Schramm. Mülheim an der Ruhr, Germany, 2013.

作者简介:刘诗宇(1994 -),男,工学学士、法国工程师双学位,机器人专业硕士研究生,毕业设计阶段从事线性控制系统及现代控制理论的研究与应用。

收稿日期:2018 - 08 - 06

一种高压室巡检机器人移动机构设计

黄荣辉[1],向 真[1],姜 勇[2],傅 博[2],景凤仁[2]
(1. 深圳供电局有限公司,广东 深圳 518001;
2. 中国科学院 沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室,辽宁 沈阳 110016)

摘 要:针对高压配电室内部环境特点及巡检任务需求,提出了一种兼具平稳性高、定位准确及移动速度快的新型轨道式巡检机器人移动机构。介绍了包含差速机构及被动适应导向机构的轨道式移动车体机构构型,分析了移动车体的工作原理及行走过程。以提高运动稳定性为目标,对移动车体及轨道的关键结构参数进行了优化,基于优化结果在 SOLIDWORKS 中完成了移动车体的三维实体建模,然后在 ADAMS 环境下对移动车体进行了过弯运动仿真。仿真结果表明,移动车体具有沿着直轨和弯轨组合轨道上平稳运动的能力,验证了移动车体机构设计的可行性、合理性及可靠性。

关键词:高压配电室 机器人 机构设计 轨道式 移动车体 仿真
中图分类号:TH11 **文献标识码**:A **文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0009 - 07

Design of mobile mechanism for inspection robot of high - voltage distribution room

HUANG Ronghui, XIANG Zhen, JIANG Yong, FU Bo, JING Fengren

Abstract: Aiming at the characteristics of internal environment and the requirement of inspection task in high voltage distribution room, a new rail - type inspection robot with high stability, accurate positioning and fast moving is proposed. The configuration of the rail - type mobile mechanism which consists of differential mechanism and passive adaptive guide mechanism is introduced, and the working principle as well as the working process of the rail - type mobile mechanism is analyzed. In order to improve the stability of motion, the key structural parameters of the mobile mechanism and the rail are optimized. The 3D model of the mobile mechanism is established by SOLIDWORKS based on the optimization. Then the curved motion simulation of the mobile mechanism is carried in ADAMS. The simulation results show that the mobile mechanism has the ability to move smoothly along straight and curved rail, and demonstrate that the rail - type mobile mechanism has the characteristics of feasibility, validity and reliability.

Keywords: high - voltage distribution room, robot, mechanism design, rail - type, mobile mechanism, simulation

在电力系统中,配电系统是生产、输送、分配三大系统的核心之一,配电系统对整个电力系统的安全可靠起着至关重要的作用[1]。高压配电室是电力系统的重要组成部分,保证高压配电室的正常运行越来越受到电力企业的重视。高压配电室的巡检工作在保证高压配电室安全运行方面占有极其重要的位置。传统的巡检方式是巡检人员定期采集大量的运行数据,由于巡检人员素质、技术水平等因素会产生很多问题[2]。而且,当发生突发状况时,工作人员需要对相应设备进行紧急处理,比如当高压开

关柜发生故障但未自动跳闸的情况下，工作人员通过高压开关柜紧急分闸操作杆实现开关柜的紧急分闸操作[3-4]。传统巡检方式占用人员、危险性高。随着互联网与机器人技术的大力发展，电力系统正在向着无人值守方向发展，值班人员的巡检作业任务将被逐渐代替[5]。因此，机器人被提出用于开展高压配电室巡检作业，达到降低劳动强度及危险性，提高作业自动化程度的目的。机器人机构设计是机器人研究的一项关键技术，机器人机构是机器人巡检作业工具的载体，为快速可靠地进行巡检作业提供保障[6]。

电力巡检与维护机器人的研究始于上世纪八十年代[7]，主要包括高压输电线路巡检机器人、绝缘子检测机器人及变电站巡检机器人等[8-10]，但是运用于高压配电室巡检的机器人才刚刚起步。目前，国内已有几家研究机构对高压配电室巡检机器人开展了研究，但是国外还没有相关研究。按行走机构的原理主要分为悬挂轨道式和轮式 2 类，悬挂轨道式机器人稳定性不高，容易发生颤动现象，轮式机器人定位复杂且不准确。苏州震旦科技有限公司研制一种配电室巡检机器人[11]，该机器人由悬挂式轨道、伸缩杆及摄像机等组成，可实现配电室运行状态自动巡检、电流电压仪表读数自动采集及出现异常自动报警等功能。朗驰欣创科技股份有限公司针对电力机房设计研发了电力机房智能机器人巡检系统[12]，分为悬挂轨道式智能机器人和轮式智能机器人，具有智能手动/自动巡检、智能识别各类仪器仪表读数，准确分析烟雾、温湿度等环境信息，局放检测，语音对讲等功能。目前高压配电室巡检机器人主要是利用各种已有设备对开关柜的环境信息进行识别及检测，但是不具有辅助工作人员完成对开关柜进行操作的功能，比如按钮的按压操作、旋钮的旋转操作等。

针对高压配电室的环境特点，基于机器人的总体任务需求，面向各分系统的功能需求进行机构设计，提出了一种新型高压配电室智能巡检机器人机构。这种新型机构由轨道式移动机构和机械臂组成，具有沿着弯曲轨道行走能力，并且具有良好的稳定性与定位功能，方便机械臂末端执行器对开关柜执行相关操作任务。

1 环境描述与任务分析

如图 1 所示，高压配电室由各种开关柜（包括主变柜、馈线柜等）、站用变、安全黄线及墙体障碍等组成。开关柜是一种电气设备，主要作用是在电力系统进行发电、输电、配电和电能转换的过程中，进行开合、控制和保护用电设备。开关柜发生弧光短路故障现象时有发生，引起开关柜内部弧光短路故障的原因很多，比如结构设计不合理、制造质量不佳、设备材料绝缘老化、机械磨损、维护不当和误操作等。尽管开关设备发生内部弧光短路故障的概率不高，但是不能完全排除，一旦发生，会给附近操作人员和设备造成极大危害。开关柜一般集中分布在高压配电室的若干区域，每个区域都标有安全黄线，机器人在非测试和操作状态下应位于黄线外侧。

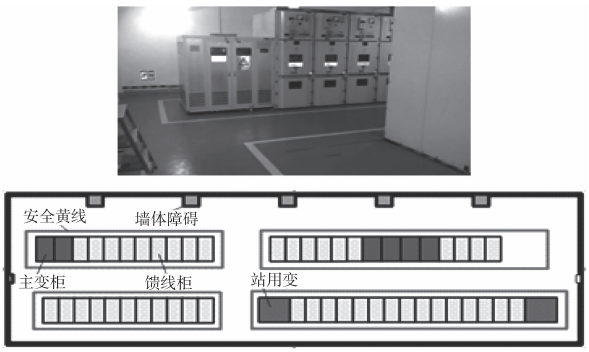


图 1 高压配电室环境

高压配电室的运行状态与人们的日常生活及生产息息相关，对高压配电室的巡检是一项非常重要、繁琐及危险的任务。根据高压配电室巡检的任务需求及高压配电室内部的环境特点，开展高压配电室智能巡检机器人的研制，巡检机器人需要对高压配电室内部的所有开关柜完成以下任务：1）对各种按钮、指示灯及压板状态的识别；2）对具有红外观察窗的开关柜进行红外测温；3）对开关柜上中下部分各自取中及柜体背面上下部分各自取中进行局放检测；4）当开关柜发生故障但未自动跳闸的情况下，实现开关柜的紧急分闸操作。综上，机器人应为移动车体搭载机械臂的形式以实现完整巡检的功能。为了保证机器人能够高效地实现上述功能，移动车体必须具备如下特点：定位快速且准确、运行平稳、移动速度快、可以到达所有作业点。基于上述特点

开展机器人移动车体的机构设计。

2 机构总体方案

2.1 高压室巡检机器人简介

如图 2 所示，机器人由移动车体、机械臂及末端多功能作业工具盘组成。其中，移动车体由万向轮、驱动轮、差速机构及被动适应导向机构组成，保证了机器人可以沿着高压室内的轨道快速稳定移动。万向轮与移动车体直接相连，驱动轮与被动适应导向机构相连且驱动轮之间通过差速器相连，导向机构与车体通过转动副连接。万向轮起支撑作用，驱动轮起支持和提供行驶驱动力的作用，被动适应导向机构的作用是使得移动车体可以沿着弯曲轨道行驶。根据作业任务内容及高压室环境特点，采用 6 自由度的机械臂，使得末端作业工具达到相应的位姿，从而完成巡检工作。末端多功能作业工具盘包含三个成一定角度的作业面，作业面分别安装着可见光摄像机，红外热成像仪，局放检测仪，紧急分闸操作装置，在贴近开关柜检测和操作的过程中，可以避免其他工具与开关柜发生碰撞。机械臂和末端多功能作业工具盘保证了机器人具有携带多个设备并完成给定全部作业任务的能力。

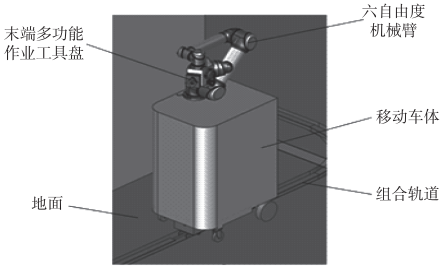


图 2 高压室巡检机器人

2.2 移动车体底盘设计

2.2.1 移动任务描述

由高压室开关柜的布局特点及巡检任务要求可以看出，机器人的运动轨迹简单且固定，结合轨道式移动机构具有轨迹固定、被动转向及驱动方式简单等特点，机器人采用轨道式移动车体技术，轨道布局如图 3，轨道交叉部分通过圆弧过渡。移动车体应具有在直线轨道和弯曲轨道上行驶的能力，并且具有良好的稳定性能。

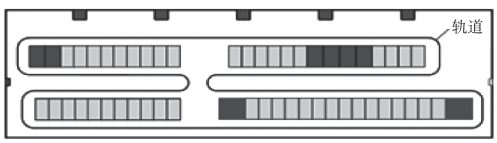


图 3 轨道布局

2.2.2 移动车体底盘构型

图 4 为移动车体底盘机构简图，该机构由行走机构、差速机构及被动适应导向机构组成。行走机构包含两个万向轮 1 和两个驱动轮 7，均关于底盘 9 左右对称。万向轮为被动轮，起支撑作用，既可以绕着轮轴中心进行被动旋转，也可以绕着垂直于底盘的轴线方向进行被动旋转。驱动轮在差速机构 6 的驱动下为移动车体提供前进的动力，同样也起到了支撑的作用。被动适应导向机构由导向轮 5、导向轮轮架 4、弹簧 3 及转向架 2 组成，弹簧使得导向轮在移动车体移动的过程中始终压紧轨道，并且保证转向机构在轨道上可以顺利过弯。4 个导向轮夹紧轨道的设计方法相比 2 个导向轮可以保证移动车体具有更高的稳定性。前后转向架 2 与车体底盘之间通过转动副连接，避免移动车体在过弯时发生卡死现象。差速机构能够使移动车体在过弯的过程中左右驱动轮以不同的速度转动，避免驱动轮发生打滑的现象，并且移动车体只需要一个电机进行驱动，简化了设计。所以该移动机构具有结构紧凑、适应能力强、行走快速且稳定等特点。

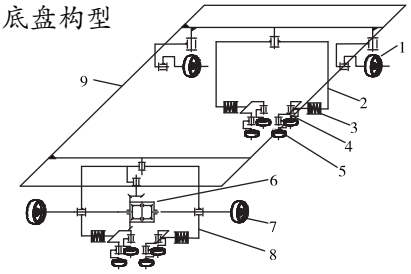


图 4 轨道式移动机构构型

2.2.3 移动车体底盘机构分析

移动车体沿着轨道行走的过程中，导向机构的导向轮与轨道之间的作用关系均包含三个阶段：1）导向轮全部夹着直线轨道；2）导向轮部分夹着直线轨道，部分夹着弯曲轨道；3）导向轮全部夹着弯曲轨道，如图 5。当转向架处于过弯状态时，弹簧被压缩或者拉伸，使得导向轮能够时刻压紧轨道并且避免卡死。阶段 1 情况下可以很容易看出导向轮与轨道之间均始终保持压紧状态，弹簧形变量保持不变，所以阶段 1 属于稳定行驶阶段。通过几何法对阶段 2 和阶段 3 情况下导向轮和轨道之间的接触关系进

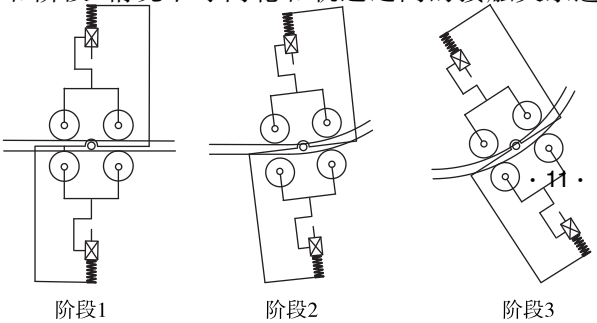


图 5 导向机构运动过程

行分析。阶段 2 中轨道两侧导向轮之间的间距会发生变化，弹簧形变量不断变化，同时会出现只有三个导向轮与轨道接触的情况，即弹簧的形变增量 δ 和导向轮与轨道之间的偏移距离 ξ 会导致移动车体过弯的不稳定性。阶段 3 中导向轮与轨道之间均始终保持压紧状态并且弹簧形变量保持不变，因此阶段 3 也属于稳定行驶阶段，相比于阶段 1，其弹簧被进一步压缩。

阶段 2 过弯分析：通过几何法分析可知，当导向轮部分夹着直线轨道，部分夹着弯曲轨道时，轨道两侧导向轮之间的距离会发生变化，即导向轮 A 与 B 或 C 与 D 之间，且变化量等于弹簧的形变增量；弯轨外侧导向轮 B 与轨道会发生脱离，如图 6。弹簧形变增量及导向轮 B 与轨道之间的偏移距离计算如下：

$$b_1 = -R + \frac{d}{2}$$

$$a_3 = \left(R - \frac{d}{2}\right)\sin\theta$$

$$b_3 = \left(-R + \frac{d}{2}\right)\cos\theta$$

$$k = \frac{-(2R-d)\cos\theta + 2R - d}{\sqrt{4l^2 - ((2R-d)\cos\theta - 2R + d)^2}}$$

$$b_4 = \frac{b_3k^2 + a_3k}{k^2+1} - \frac{\sqrt{(R+m+0.5d)^2(k^2+1) - (b_3^2k^2 + 2ka_3b_3 + a_3^2)}}{k^2+1}$$

$$a_4 = a_3 - k(b_4 - b_3)$$

$$a_2 = \frac{a_4k^2 + (b_1 - b_4)k + a_1}{k^2+1}$$

$$b_2 = \frac{b_1k^2 + (a_1 - a_4)k + b_4}{k^2+1}$$

$$\delta = CD - m = \frac{b_3 - b_4}{\cos\arctan(-1/k)} - m - d \tag{1}$$

$$\xi = \begin{cases} |b_2| - R - m - 0.5d, a_2 < 0 \\ \sqrt{(a_2^2 + b_2^2)} - R - m, a_2 > 0 \end{cases} \tag{2}$$

其中 $A(a_i,b_i)(i=1,2,3,4)$ 为导向轮轮心坐标，k 为轨道同侧导向轮轮心连线的斜率，θ 为导向轮 C 轮心与坐标系原点 O 的连线与 y 轴负方向的夹角，R 为轨道内径，m 为导向轮接触点轨道截面宽度，l 为轨道同侧导向轮轮心间的距离，δ 为弹簧形变增量，ξ 为导向轮 B 与轨道之间的偏移距离。可以看出，导向机构的四个导向轮在阶段 2 与轨道之间不是完全接触状态，这将会导致移动车体的不稳定性，但是阶段 2 在轨道全长中只占据很小的部分，不影响机器人执行巡检任务，而且可以通过优化导向机构及轨道的结构参数提高移动车体的稳定性。

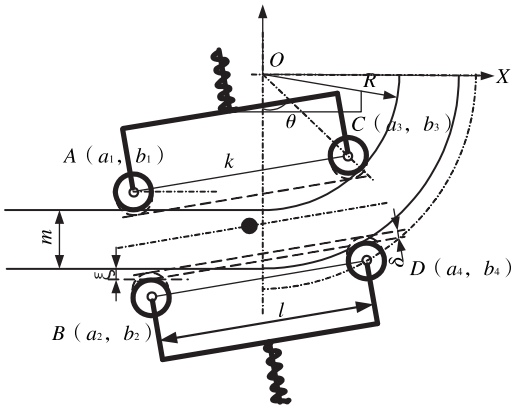


图 6　阶段 2 运动分析

阶段 3 过弯分析：通过几何法分析可知，当导向轮全部夹着弯曲轨道时，轨道两侧导向轮之间的距离为定值，即导向轮 A 与 B 或 C 与 D 之间的距离不变，弹簧形变量保持不变；导向轮均与轨道处于压紧状态，即导向轮 B 与轨道之间的偏移距离恒为 0，如图 7。相比于阶段 1 弹簧的变形增量计算如下：

$$b_1b_2 = Ob_2 - Ob_1 = \sqrt{(R+m+0.5d)^2 - (0.5l)^2} - \sqrt{(R-0.5d)^2 - (0.5l)^2}$$

$$c_1c_2 = m + d$$

$$\delta = b_2c_2 = \frac{b_1b_2 - c_1c_2}{2} = \frac{\sqrt{(2R+2m+d)^2 - l^2}}{4} - \frac{\sqrt{(2R-d)^2 - l^2} - 2m - 2d}{4} \tag{3}$$

$$\xi = 0 \tag{4}$$

基于以上分析结果可知，导向机构的四个导向轮在阶段 3 始终与轨道保持接触状态，弹簧形变量保持不变，弹簧对导向机构的作用反力恒定，移动车

体在阶段 3 可以保持稳定运行。

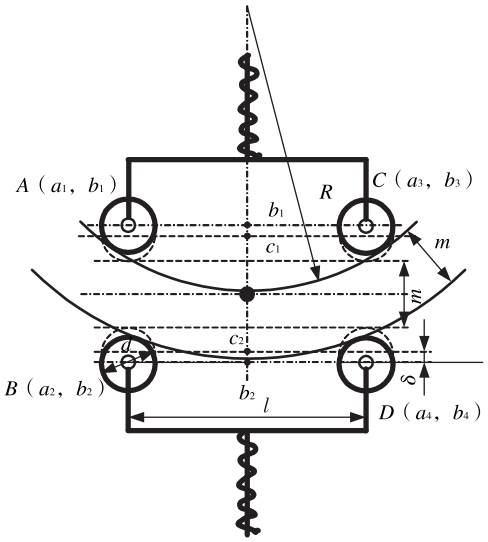


图 7　阶段 3 运动分析

3　移动车体仿真分析

3.1　移动车体及轨道优化仿真

通过对公式(1)～(4)的分析可知,弹簧变形增量 δ 及导向轮 B 与轨道之间的偏移距离 ξ 在阶段 2 过弯过程中是变化的,而在阶段 3 过弯过程中保持不变。δ 和 ξ 的变化会导致车体运动的不稳定性,分别按照(1)和(2)分析轨道内径 R、轨道宽度 m、导向轮半径 d、同侧导向轮间距 l 对移动车体阶段 2 过弯稳定性的影响,仿真结果如图 8 和图 9 所示。可以发现减小导轨宽度、导向轮半径、同侧导向轮间距及增大导轨半径均可以增加车体过弯的稳定性。综合以上分析,轨道内径设计为 490 mm,轨道宽度设计为 20 mm;导向轮半径设计为 40 mm,同侧导向轮间距设计为 80 mm。

3.2　移动车体过弯动力学仿真

采用 ADAMS 多体动力学软件对移动车体过弯过程进行仿真。根据上面的分析及尺寸设计结果,在 SOLIDWORKS 中建立移动车体底盘机构的三维模型。然后导入 ADAMS 软件中,依次添加运动副、载荷、驱动及弹簧,其中差速器输入轴转速的设置使

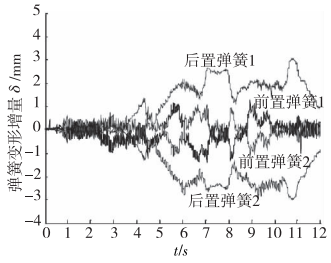
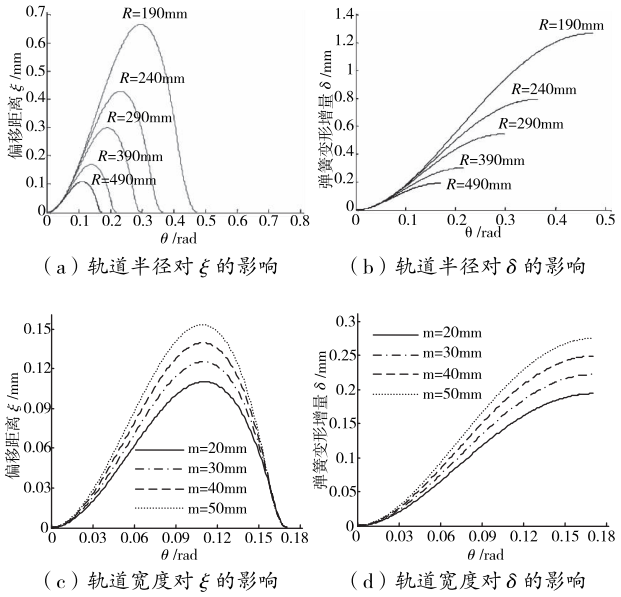


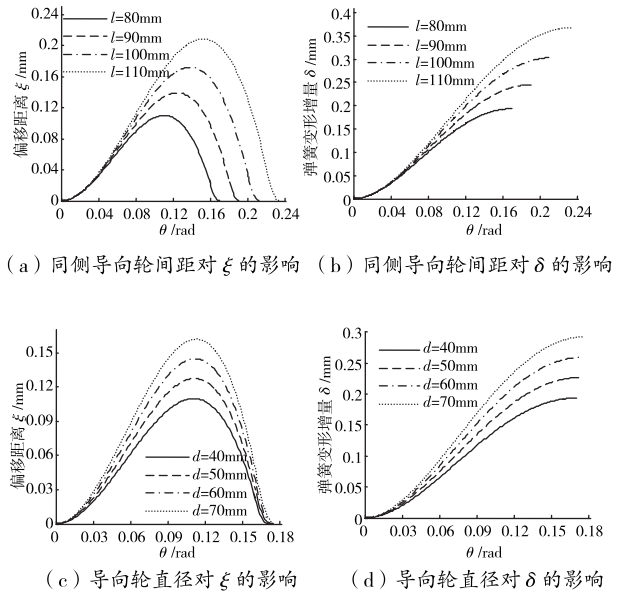
图 10　弹簧变形增量曲线



（a）轨道半径对 ξ 的影响　（b）轨道半径对 δ 的影响

（c）轨道宽度对 ξ 的影响　（d）轨道宽度对 δ 的影响

图 8　轨道参数对平稳性影响



（a）同侧导向轮间距对 ξ 的影响　（b）同侧导向轮间距对 δ 的影响

（c）导向轮直径对 ξ 的影响　（d）导向轮直径对 δ 的影响

图 9　导向机构参数对平稳性影响

得移动车体理论移动速度为 250 mm/s,弹簧的预紧力设置为 100 N,刚度系数设置为 15 N/mm。完成以上步骤后,进行移动车体的动力学仿真。图 10 表示弹簧在车体仿真运动过程中变形增量的变化情况,图 11 表示移动车体的速度变化情况。可以看出,导向机构保证移动车体具备在弯曲轨道上行驶的能力,车体具有较好的稳定行驶能力。

4 机械臂运动学模型

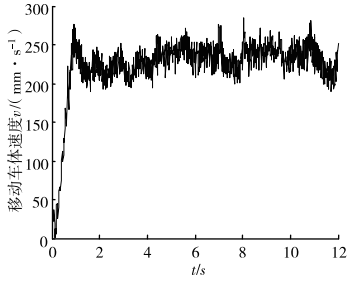


图 11 车体速度曲线

根据机器人的作业任务需求及高压室环境模型,机器人要求具有较大的工作空间并且具有较高的自由度以便完成复杂的检测和操作任务。考虑采用机械臂搭载多功能末端工具盘的设计方案,机械臂保证多功能末端工具盘达到指定的位姿,由多功能末端工具盘完成指定的检测和操作任务。机械臂采用的是 UR5 型六关节机械臂。根据该机械臂的构型和结构参数,通过 Denavit – Hartenber 法建立各连杆的坐标系,如图 12 所示,并推导相应的运动学方程。运动学方程表示为:

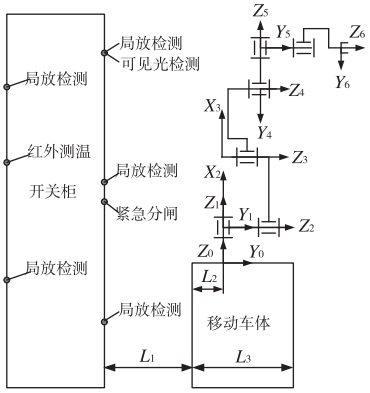


图 12 坐标系建立

$$ {}^{0}_{6}T = {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T\,{}^{3}_{4}T\,{}^{4}_{5}T\,{}^{5}_{6}T $$

式中:

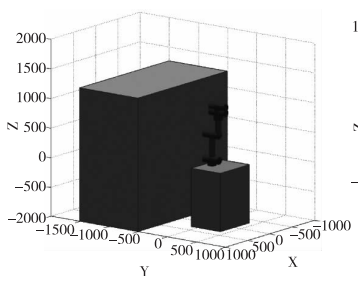
$$ {}^{i-1}_{i}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}d_i \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1}d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

表 1 UR5 机械臂 D – H 参数

i	α_{i-1}/°	a_{i-1}/mm	d_i/mm	θ_{i-1}/°	关节范围/°
1	0	0	0.0892	θ_1	–180 ~ 180
2	–90	0	0	θ_2	–180 ~ 180
3	0	0.425	0	θ_3	–180 ~ 180
4	0	0.392	0.109	θ_4	–180 ~ 180
5	90	0	0.093	θ_5	–180 ~ 180
6	–90	0	0.082	θ_6	–180 ~ 180

5 机械臂运动性能仿真分析

移动车体的结构参数确定为长 650 *mm*,宽 L_3 = 500 *mm*,高 985 *mm*,移动车体距离开关柜 L_3 = 400 *mm*,机械臂底座距离车体侧面 L_2 = 400 *mm*,开关柜高 2250 *mm*。根据机械臂的运动学模型、移动车体及开关柜的结构参数,利用 *Matlab Robotics Toolbox* 工具箱建立机械臂、移动车体及开关柜的三维模型,如图 13 所示,然后基于蒙特卡洛法对机械臂在工作空间中的可操作性进行研究。分析结果如图 14 所示,该图为机械臂在开关柜正面区域的可操作性图,可以看出在该区域内机械臂普遍具有较高的可操作性,满足了机械臂在开关柜正面及背面检测及操作点处的运动性能要求。



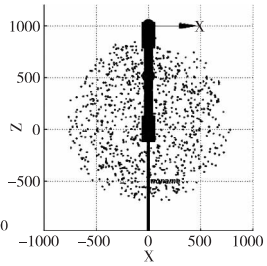


图 13 机器人工作场景 图 14 工作平面可操作性图

6 结束语

面向高压配电室检测和操作任务的实际需求,本文提出了一种新型轨道式高压室巡检机器人移动机构。分析和仿真结果表明,采用被动适应导向机构可实现机器人沿着直弯组合轨道行走,差速机构不仅简化了传动系统的设计,而且避免了移动车体在转弯的过程中驱动轮发生打滑的现象;机械臂在作业区域范围内具有良好的可操作性。与现有的高压室巡检机器人机构相比,本文提出的机构具有结构紧凑、运动速度快且平稳、定位准确且快速等特点,可以完成更多的检测和操作任务,因而具有实用价值。

参考文献

[1] 刘瑶. 220 ~ 500*kV* 无人值班变电站履带式巡视机器人[*D*]. 北京:华北电力大学,2012.

7050 – T7451 铝合金薄壁件铣削仿真建模及试验分析

纪合溪[1],葛茂杰[2],于　健[2],姜　楠[2],孙卫峰[2]
(1. 福建众人机械制造有限公司,福建 宁德 352000;2. 烟台龙源电力技术股份有限公司,山东 烟台 264006)

摘　要:针对铝合金 7050 – T7451 薄壁零件,建立铝合金薄壁件铣削动力学模型,并进一步通过 ABAQUS 软件进行有限元分析,获得铝合金薄壁件铣削加工中铣削应力和应变的分布规律;通过铣削加工试验,获取铣削力数值并与仿真铣削力进行对比,验证模型的准确性。

关键词:仿真建模　Al7050 – T7451　切削力　ABAQUS
中图分类号:TG501　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 – 6886(2018)06 – 0015 – 04

FEA modeling and experimental analysis of milling of 7050 – T7451 aluminum alloy thin – walled part

JI Hexi, GE Maojie, YU Jian, JIANG Nan, SUN Weifeng

Abstract: Aiming at 7050 – T7451 aluminum alloy thin – walled part, the milling dynamics model for aluminum alloy thin – walled part was established. The distribution laws of stress and strain of thin – walled aluminum alloy part in milling process were obtained by finite element analysis with ABAQUS software. Through the milling experiment, the milling force values were obtained. Comparing the simulation value and the experimental value, we can see that the model is accurate.

Keywords: simulation modeling, Al7050 – T7451, cutting force, ABAQUS

[2] 张良程. 10kV 高压用户配电室的巡视检查[J]. 企业技术开发,2016,35(5):107.
[3] 刘钧. 高压配电室常见故障分析检查与处理[J]. 化工管理,2015(28):185.
[4] 吴江,刘成鹏. 高压开关柜常见故障及使用介绍[J]. 大众科技,2004(9):44 – 45.
[5] 杨宗正. 无人值守配电室的实现[J]. 科协论坛,2013(8):41 – 42.
[6] 岳湘,王洪光,姜勇,等. 一种 110kV 输电线路巡检机器人机构研究[J]. 智能系统学报,2016,11(2):155 – 162.
[7] 宋屹峰,王洪光,康文杰,等. 面向断股补修作业任务的电力机器人机构设计[J]. 智能系统学报,2017,12(2):150 – 157.
[8] TOUSSAINT K, POULIOT N, MONTAMBAULT S. Transmission line maintenance robots capable of crossing obstacles: State – of – the – art review and challenges ahead [J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(5): 477 – 499.
[9] PARK J Y, CHO B H, BYUN S H. Development of Automatic Cleaning Robot for Live – line Insulators[C]//International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation and Live – Line Maintenance. Albuquerque, NM, USA, 2006: 1 – 7.
[10] LI S, HOU X. Research on the AGV Based Robot System Used in Substation Inspection[C]// International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, 2007: 1 – 4.

基金项目:本项目获国家自然科学基金重点项目(项目编号:5153000289)和南方电网公司重大科技专项(项目编号:090000KK52150073)资助。

作者简介:黄荣辉(1976 –),黑龙江哈尔滨人,学士,高级工程师,从事输变电技术管理工作。
向真(1989 –),湖北天门人,硕士,工程师,从事输变电技术监督工作。
姜勇(1975 –),辽宁丹东人,博士,副研究员,主要研究方向:机器人控制、电力机器人。
傅博(1987 –),辽宁沈阳人,博士研究生,主要研究方向:软件工程。
景凤仁(1970 –),辽宁沈阳人,学士,高级工程师,主要研究方向:机械设计。

收稿日期:2018 – 06 – 12

0 引言

铝合金的特点是重量轻、刚度好、强度高、耐腐蚀、平整性好，易于制造复杂形态的表面，因此铝合金在汽车、航空、航天、轮船等工业生产中广泛应用。但是，由于薄壁铝合金部件结构复杂，刚性非常低，切削加工时的切削力容易产生较大的铣削余量，造成较差的加工工艺，导致加工变形或颤振。

目前，国内外铝合金薄壁件的理论模型中，Altinas 等[1]在考虑轴向、切向、径向切削力对切削系统稳定性的基础上，建立相关动力学模型。GonZalo 等[2]以切削最优、提高工件表面精度为目的，利用有限元手段，模拟铝合金薄壁结构件的铣削过程，以获得不同阶段的切削动态特性。浙江大学董辉跃等[3-4]则通过用有限元手段，研究装夹对薄壁工件切削加工系统的影响。

本文针对铝合金 7050 - T7451 薄壁零件加工变形为研究背景，建立铝合金薄壁件铣削动力学模型，并进一步建立有限元仿真分析模型，揭示微切削区域塑性变形及切削力变化规律，并进行试验验证。

1 铣削建模关键技术

1.1 铣削动力学模型

铣削动力学模型是建立在刀具和工件刚度的切削稳定性模型，如图 1 所示。

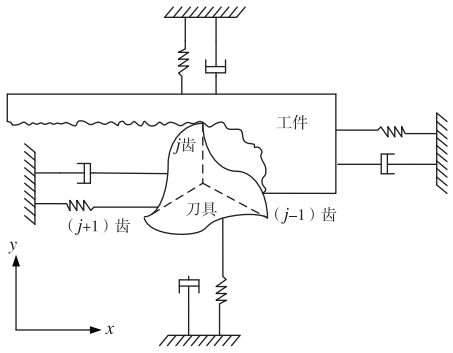


图 1 铣削动力学模型

将铣刀简化为 N 个齿，x 和 y 方向两个自由度，薄壁铣削的动力学方程可以得到：

$$\begin{bmatrix} m_{cx} \\ m_{wx} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{x}_c(t) \\ \ddot{x}_w(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \begin{bmatrix} \eta_{cx} \\ \eta_{wx} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{x}_c(t) \\ \dot{x}_w(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \begin{bmatrix} k_{cx} \\ k_{wx} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_c(t) \\ x_w(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = F_x(t) \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} m_{cx} \\ m_{wx} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{y}_c(t) \\ \ddot{y}_w(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \begin{bmatrix} \eta_{cy} \\ \eta_{wy} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{y}_c(t) \\ \dot{y}_w(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} + \begin{bmatrix} k_{cy} \\ k_{wy} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} y_c(t) \\ y_w(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} = F_y(t)$$

式中：m_{cx}、η_{cx}、k_{cx}、m_{cy}、η_{cy}、k_{cy} 和 m_{wx}、η_{wx}、k_{wx}、m_{wy}、η_{wy}、k_{wy} 为铣刀和工件在 x 与 y 方向的模态、阻尼和刚度特性。总切削力 $F(t)$ 在 x 与 y 方向上的分力可用 $F_x(t)$、$F_y(t)$ 表达。

1.2 动态切屑厚度

第 j 切削刃切削时切屑的动态厚度 $h(\phi_j)$ 可以通过当前刀齿切削时和前一个刀具切削时的位移差计算获得，如式(2)：

$$h(\phi_j) = [\Delta x\sin\phi_j + \Delta y\cos\phi_j]g(\phi_j) \tag{2}$$

式中：ϕ_j 是刀齿 j 的瞬时接触角，$\phi_j = (j-1)\phi_p + \omega t$，$\phi_p$ 是铣刀的齿间角，$\phi_p = 2\pi/N$。

1.3 动态切削力

刀具第 j 齿上的切向力(F_{tj})和径向力(F_{rj})与切深(a_p)及切削厚度(h)成正比：

$$F_{tj} = K_t a_p h(\phi_j), F_{rj} = K_r F_{tj} \tag{3}$$

式中：切削力系数 K_t 和 K_r 为常数。通过在 x 和 y 方向对切削力进行分解，并将所有的切削力单元相加，按矩阵形式表示可得：

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -\sin\phi_j & -\cos\phi_j \\ -\cos\phi_j & \sin\phi_j \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} F_r \\ F_t \end{Bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \end{Bmatrix} = \frac{1}{2}a_p K_t \begin{bmatrix} \alpha_{xx} & \alpha_{xy} \\ \alpha_{yx} & \alpha_{yy} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{Bmatrix} \tag{5}$$

式(5)中：α_{xx}，α_{xy}，α_{yx}，α_{yy} 为时变的动态铣削力系数，且

$$\alpha_{xx} = \sum_{j=0}^{N-1} -g_i[\sin2\phi_j + K_r(1-\cos2\phi_j)]$$

$$\alpha_{xy} = \sum_{j=0}^{N-1} -g_i[(1+\cos2\phi_j) + K_r\sin2\phi_j]$$

$$\alpha_{yx} = \sum_{j=0}^{N-1} g_i[(1-\cos2\phi_j) - K_r\sin2\phi_j]$$

$$\alpha_{yy} = \sum_{j=0}^{N-1} g_i[\sin2\phi_j - K_r(1+\cos2\phi_j)]$$

考虑时间和角速度的变化，因此方程(5)可以表达为时域的矩阵：

$$\{F(t)\} = \frac{1}{2}a_p K_t[A(t)]\{\Delta(t)\} \tag{6}$$

2 有限元模拟

2.1 工件材料的本构模型

采用 Johnson – Cook 剪切失效(shear failure)模型[5],其表达式为:

$$\varepsilon_f^{pl} = \left[d_1 + d_2\exp\left(d_3\frac{\sigma_p}{\sigma_e}\right)\right]\left[1 + d_4\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\times \left[1 + d_5\left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)\right] \quad (7)$$

$$w = \sum\frac{\Delta\varepsilon^{pl}}{\varepsilon_f^{pl}} \quad (8)$$

式中:$d_1 \sim d_5$ 为分离参数,ε_f^{pl} 为材料的临界等效塑性应变,$\Delta\varepsilon^{pl}$ 为等效塑性应变增量,$\dot{\varepsilon}^{pl}$ 为塑性应变率,ε_0 为参考应变率,σ_p 为主应力平均应力,σ_e 为 Mises 应力。

2.2 刀屑摩擦模型

采用库仑摩擦模型[6],在粘着摩擦区内,定义此区域内的摩擦应力为固定值,其数值为等于或略高于极限剪切应力 τ_{max};在滑动摩擦区内,定义此区域的摩擦应力符合库仑摩擦定律,与正应力成正比。其关系如下:

$\tau_f = \mu\sigma_n$ 当 $\tau_f < \tau_{max}$(滑移摩擦区)

$\tau_f = \tau_{max}$ 当 $\tau_f \geqslant \tau_{max}$(粘结摩擦区)

其中,τ_f 为摩擦剪应力;τ_{max} 为材料的最大剪应力;σ_n 为正应力;μ 为摩擦系数,取常规值 0.1。

2.3 几何模型及网格划分

铝合金薄壁工件网格为 C3D8RT 类型,刀具网格为 C3D4T 类型,采用通用显式动力分析步(Dynamic,Explicit),边界条件见图 2,对工件约束 Y、Z 方向的移动自由度 U_2、U_3 及三个方向的旋转自由度 UR_1、UR_2、UR_3,并施加 X 方向的进给速度 v_f = 20 mm/min,刀具的旋转速度 n = 10000 r/min 施加在刀具的参考点 RP 上,如图 3。

2.4 应力和应变的分布规律

图 4 和图 5 为刀具铣削过程中的流动应力、等效塑性应变分布云图,表 1 为铣削过程中各点的流动应力和等效塑性应变数值。在刀具与工件刚开始接触时,最大应力主要集中在刀屑接触区。对比铣削过程切屑和工件中各处的应力和应变,发现工件的流动应力和等效塑性应变数值明显低于切屑,而且工件的应力应变值变化不明显。

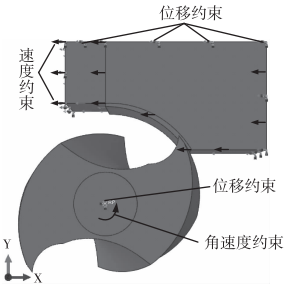


图 2 模型的边界条件

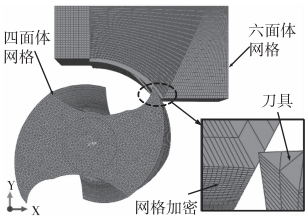


图 3 模型的网格划分

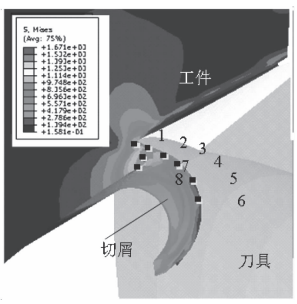


图 4 铣削过程中流动应力

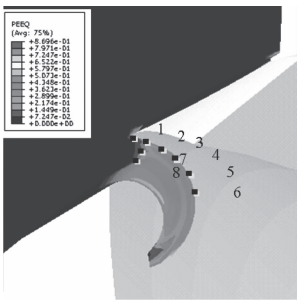


图 5 铣削过程中等效塑性应变

表 1 铣削过程中各点应力应变数值

序号	流动应力/MPa	等效塑性应变
1	1460	0.229
2	1280	0.237
3	580	0.259
4	160	0.253
5	69	0.251
6	88	0.256
7	1165	0.213
8	1086	0.257

3 铣削试验

3.1 试验工件

本试验采用铝合金 7050 – T7451 板材,工件为 30 mm(高度 H)×100 mm(长度 L)×10 mm(厚度 h),铣刀对工件侧壁进行铣削,见图 6。

3.2 刀具参数

铣刀的相关几何参数如表 2。

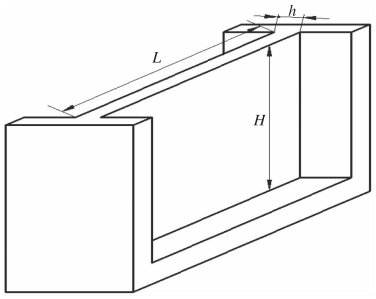


图 6　铣削工件示意图

表 2　　刀具的几何信息表

刀具直径 D_o/mm	芯厚直径 D_i/mm	齿数 z	径向前角 a/deg	螺旋角 c/deg	径向后角 b/deg
20	10	5	10	36	12
轴向后角 A_r/deg	圆角半径 R_c/mm	切削刃圆角半径 r/mm	槽底圆弧半径 R_f/mm	后刀面宽度 Wol/mm	刀具长度 L/mm
10	3	0.04	3	3	60

3.3　试验设备

机床采用 DMG DMC 635V 数控加工中心，利用 YDCB－III05 高频响三维动态测力仪，通过 YE5850 动态应变放大器，由 PCI－9118 数据采集装置进行数据采集。试验设备的连接情况如图 7。

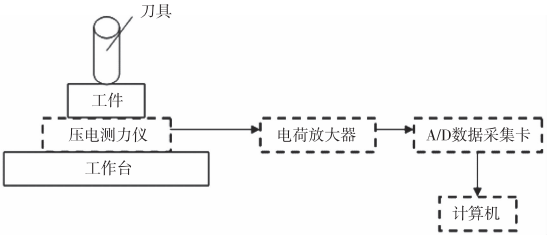


图 7　切削力测试系统组成图

通过铣削实验，对比模拟值和实验值，见表 3，由表 3 可知，F_x 的平均误差为 11.96%，y 向平均误差为 10.72%，z 向平均误差为 21.36%，合力平均误差为 10.18%，除 z 向外，各向误差值均小于 10%，说明预测的值同实验获得的值吻合度高。故此，本文所建立的航空钛合金材料铣削力模型在当前的加工设备下是适用的，尤其所预测的各向铣削力理论值是可靠的。虽然该理论模型是针对具体材料的，但它对其它同类材料而言也是可信的，只需要增加一个修正阐述即可。所以，本研究是具有工程意义的。

表 3　　理论值与实际测量值的比较

结果	参数			
	F_x/N	F_y/N	F_z/N	合力 F/N
模拟值	368	358	125	528.4
实验值	418	401	103	588.3
误差/%	11.96	10.72	－21.36	10.18

4　结论

1）针对铝合金 7050－T7451 薄壁零件，建立铝合金薄壁件铣削动力学模型和有限元铣削模型。

2）通过仿真得到了 X、Y、Z 方向的切削力，通过铣削加工试验，获取铣削力数值并与仿真铣削力进行对比，验证了试验模型的准确性。为后续试验研究（加工效果，加工质量等）做好准备。

参考文献

[1] ALTINTAS Y, CHAN P K. In－process detection of tool suppression of chatter in milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1992, (32): 329－347.

[2] GONZALO O, PEIGNE G. High speed machining simulation of thin－walled components[C]. Fifth International conference on High Speed Machine, 2006, (28): 525－536.

[3] 董辉跃，柯映林，吴群，等. 基于残余应力分布的框类零件装夹方案优选的有限元模拟[J]. 航空学报，2003，24(4)：382－384.

[4] 董辉跃，柯映林. 铣削加工中薄壁件装夹方案优选的有限元模拟[J]. 浙江大学学报(工学版)，2004，38(1)：17－21.

[5] 王虹入，王中秋，张倩，等. 切削法构建铝合金 AL7050－T7451 材料流动应力本构模型[J]. 山东大学学报(工学版)，2012，42(1)：115－120.

[6] ZOREV N N. Inter－relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting [J]. International Research in Production Engineering, 1963：42－49.

作者简介：纪合溪(1984－)，男，山东莒县人，工学硕士，中级工程师，从事机械研发制造等方面工作。

葛茂杰(1986－)，男，山东蓬莱人，工学硕士，中级工程师，从事机械研发制造等方面工作。

收稿日期:2018 – 05 – 23

机械臂拾取装置的模糊控制仿真研究

梁开旭

（长安大学 工程机械学院，陕西 西安 710064）

摘　要：采用模糊控制方法研究机械臂拾取并准确定位电子元件的过程。首先介绍模糊控制方法的概念及基本原理，接着对机械臂拾取系统进行建模和性能分析，最后针对其进行模糊控制的 Matlab/Simulink 仿真研究。结果表明模糊控制可以很好地降低系统超调和控制时间，并准确将电子元件定位。

关键词：拾取装置　模糊控制　Simulink 仿真　调节时间　超调量

中图分类号：TP13　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002－6886(2018)06－0019－04

Research on fuzzy control simulation of robot pickup device

LIANG Kaixu

Abstract: In the manufacture of modern electronic products, the pickup system of robot arm is widely used in the transportation and installation of electronic components. Fuzzy control method is used to study the process of picking up and locating electronic components accurately. Firstly, the concept and basic principle of the fuzzy control method are introduced. Then the robot arm picking system is modeled and analyzed. Finally, the Matlab/Simulink simulation of fuzzy control is carried out. The results show that the fuzzy control can reduce the system overshoot and control time effectively, and locate the electronic components accurately.

Keywords: pickup device, fuzzy control, Simulink simulation, settling time, overshoot

0　引言

在当今制造业中，微电子技术、传感器技术等飞速发展，在提高生产效率的同时也需保障产品的质量，自动化越来越受到企业的重视。工业机械臂作为自动化生产线上的重要部分，将机械化和自动化有机的结合在一起，大大提高了生产自动化、精准化[1]。机械臂拾取装置在电子制造领域较为普遍，为了实现加快生产效率和保证产品质量的目标，机械臂拾取装置在工作过程中需具备快速准确定位的性能。模糊控制是以模糊集理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种智能算法，在工业生产领域的控制上有着广泛的应用[2]。针对机械臂拾取装置的控制性能，应用模糊控制方法对其进行仿真研究，实现快速拾取和准确定位。

1　模糊控制基本原理

模糊控制理论是一种非线性智能控制方法，以模糊集合理论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础，它将模糊数学很好地与控制系统相结合并得以应用[3]。一般用于不需要建立严谨的数学模型的系统，可利用人的经验和知识来很好地控制。该方法是根据控制系统的特点和控制系统的反馈信号与参数输入比较，计算得到误差信号，再将误差信号进行模糊化处理为对应的模糊量，然后根据专家经验和被控系统特点编制模糊控制规则，将信号的模糊量用模糊语言集合的一个模糊向量表示，结合模糊规则进行模糊决策和推理，最后将模糊控制器的输出量作为系统的输入信号加载到被控对象上进行控制。其基本原理如图 1[4]。

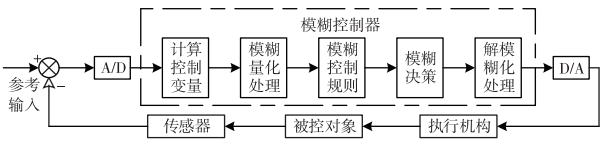


图 1　模糊控制原理框图

模糊控制器的设计是模糊控制方法的应用重点,模糊控制系统的性能主要取决于模糊控制器的结构、所制定的模糊规则、推理算法及模糊决策的方法等因素[3]。具体的设计结合机械臂拾取系统进行详细说明。

2 机械臂拾取装置的建模仿真

2.1 机械臂拾取装置建模

机械臂拾取装置常应用于电子集成芯片的生产线上,利用其将电子芯片和零件放置到电路板上的指定位置,完成安装和焊接。如图 2 所示为机械臂拾取装置的简图,通过机械臂内部输入气体,利用弹簧的压缩驱使机械臂运动,完成拾取工作。假设系统输入气体压力为 P、机械臂质量 $M=0.082$ kg、元件质量 $m=0.023$ kg、弹簧刚度 $k=3.8$ N/m、阻尼系数 $c=0.04$ N/(m·s^{-1})、活塞作用面积 $A=0.002$ m^2。

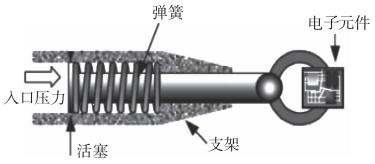


图 2 机械臂拾取装置

设输出位移为 x,对系统进行受力分析,列出系统的动力学方程:

$$kx + b\dot{x} + (M+m)\ddot{x} - PA = 0 \qquad (1)$$

对上式代入数据并进行拉普拉斯变换,得到系统的闭环传递函数[5]:

$$G(s) = \frac{\text{输出}}{\text{输入}} = \frac{X}{P} = \frac{1}{50s^2 + 20s + 2000} \qquad (2)$$

二阶系统的闭环传递函数的标准形式为:

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \qquad (3)$$

由此得到系统的特征方程:

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + 0.4s + 40 \qquad (4)$$

由式(4)可解得系统的固有频率和阻尼比分别为 $\omega_n = 6.3245$ rad/s,$\zeta = 0.0316$,用这两个参数经计算得到系统的调节时间和超调量:

$$t_s = \frac{3}{\zeta\omega_n} = 15s$$

$$M_p = e^{\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100\% = 90.54\% \qquad (5)$$

由此可以看出机械臂拾取系统在工作过程中调节时间过长导致效率很低,超调量过大导致定位不准振动严重。因此我们应用模糊控制方法来进行控制,以优化系统性能指标。

2.2 机械臂拾取装置仿真

针对此机械臂拾取系统建立模糊闭环控制系统,其控制最终的效果是通过调整输入机械臂气体压力的大小,将拾取的电子元件准确地放置在指定的位置点。系统控制信号选择机械臂末端位移的测量信号,然后根据位移测量值与参考值的偏差 e 及偏差变化率 e_c 来控制输入压力 P 的大小,从而控制机械臂拾取元件到达指定位置。在此系统中的模糊控制器的输入量是机械臂位移的偏差 e 和偏差变化率 e_c,输出量 u 是输入气体的压力。假设机械臂拾取元件的运动位移为 500 mm,最大超调量不超过 10%。

位移偏差 e 的论域为选用[-0.5,0.5],定义模糊集为{N Z P},模糊集里的字母 N、Z、P 分别表示参考位移和系统输出位移的偏差为负、偏差为零,偏差为正。位移偏差变化率 e_c 的论域定为[-1,1],定义模糊集也同样为{N Z P},模糊集里的字母 N、Z、P 分别表示机械臂位移偏差变化率为负、位移偏差变化率为零,位移偏差变化率为正。模糊控制器输入变量(位移偏差和偏差变化率)的隶属度函数均选高斯函数。压力 P 的论域为[0,10],定义模糊集为{P_1 P_2 P_3 P_4 P_5},表示压力依次增大,模糊控制器输出量(压力)的隶属度函数选用三角形函数。

模糊控制器的控制规则没有特定必须遵循的原理,它是结合人们学习,试验和长期经验积累而确定的,不同的控制者会有不同的控制规则,但只要规则编制合理都可以达到想要的控制效果。经对机械臂拾取装置的综合分析以及实际生活的经验,就此系统运用 and 逻辑关系编制的模糊控制规则如表 1。

表 1 拾取系统模糊控制规则表

u		e		
		N	Z	P
e_c	N	P_2	P_4	P_5
	Z	P_3	P_3	P_3
	P	P_1	P_2	P_1

在 Matlab/Simulink 中建立基于模糊控制器的机械臂拾取系统的仿真模型如图 3,图 4 为机械臂拾取系统模型。

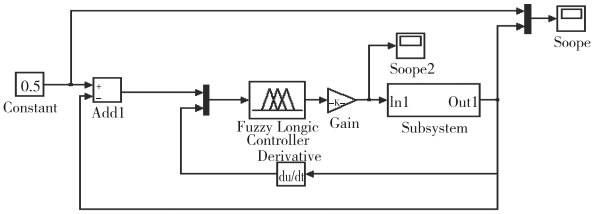


图 3　基于模糊控制的机械臂拾取系统仿真模型

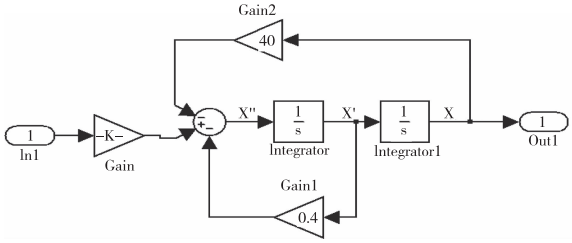


图 4　机械臂拾取系统模型

在 Matlab 中调用其模糊逻辑工具箱,根据之前的分析和控制策略设计机械臂拾取系统的模糊控制器[6]。设计流程为:在 Matlab 命令窗口输入 fuzzy 调出模糊逻辑控制器,建立模糊控制器的输入输出量和控制规则之间的逻辑关系,确定各自适用的隶属度函数以及之前确定的各个变量所对应的论域,根据模糊规则表输入模糊控制规则,完成模糊控制器的设计。最终得到能够全面反映控制器输入位移偏差和位移偏差变化率以及输出压力之间关系的三维曲面视图如图 5,所得到的三维曲面显示越光滑平整其系统的控制效果会越好。

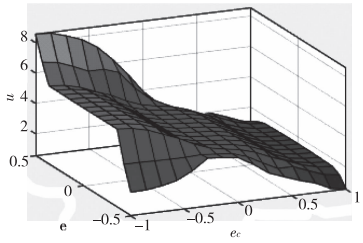


图 5　模糊推理输入输出曲面视图

将模糊控制器导入上述机械臂拾取仿真模型中进行运行仿真,在示波器中得到机械臂拾取系统工作过程的仿真曲线,图 6 为系统位移—时间曲线,图 7 为系统压力—时间曲线。

由图 6 时间—位移曲线可以看出机械臂拾取系统将元件放置到指定位置所需要的时间为 2.3 s,即系统调节时间为 2.3 s,超调量为 $\frac{0.52-0.5}{0.5}\times100\%$ =4%,相对未加入模糊控制之前式(5)的系统调节时间和超调量来说,调节时间 t_s =2.3 s≤15 s,超调量 M_p =4% ≤90.54%,由此可见,系统运用模糊控制之后调节时间和超调量都大大降低了,改善了机械臂拾取系统的性能。图 7 压力—时间曲线表示了系统在调节过程中对机械臂施加压力的跟踪情况,系统最终稳定后所需的压力为 1000 Pa。

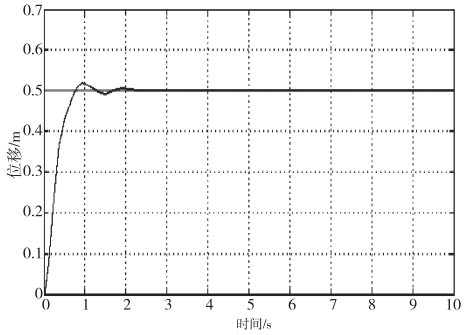


图 6　位移—时间仿真曲线

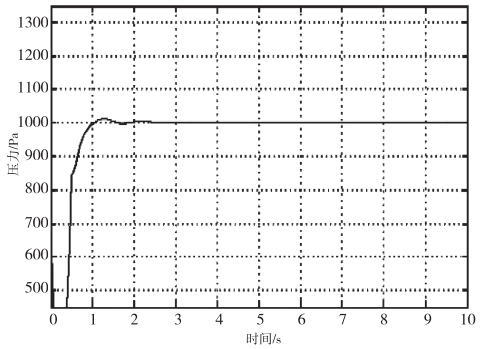


图 7　压力—时间仿真曲线

3　结论

针对机械臂电子拾取装置运用模糊控制法进行工作控制仿真,通过分析仿真曲线图 6 可以看出,对系统运用模糊控制之后系统超调量为 4%,相对而言非常小了,并且系统运行过程中在约 2.3 s 就已经调节就位,系统的调节时间大大减小,这就使得机械臂拾取系统既保证了工作的稳定性又提高了生产效率,说明模糊控制在此系统中的控制效果是比较理想的。系统控制性能的好坏,主要在于模糊控制器各参数的论域、模糊规则及模糊推理的合理性,只要参数的论域、模糊规则确定合理,系统的控制性能完全可以达到更好的效果。

高集成度双传感器微型无刷电机的设计

吴贵川[1,2],杨荣江[1,2],董江峰[1,2]
(1. 贵州航天林泉电机有限公司,贵州 贵阳 550008;2. 国家精密微特电机工程技术研究中心,贵州 贵阳 550008)

摘 要:双传感器微型无刷直流电动机相比普通的无刷直流电机来说增加了一套磁编码器,结构更加复杂、紧凑,同时也可获得更高的控制精度。通过合理的结构布置、电磁仿真计算来增加电机强度、降低各类损耗,使电机能够长时、稳定、高效的工作。

关键词:高集成度 双传感器 无刷电机
中图分类号:TM351 **文献标识码**:A **文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0022 - 04

Design of high integration dual sensor micro brushless motor

WU Guichuan, YANG Rongjiang, DONG Jiangfeng

Abstract: Compared with the ordinary brushless DC motor, the dual - sensor micro - brushless DC motor has a magnetic encoder, which is more complex and compact in structure and can obtain higher control precision. Through reasonable structural layout and electromagnetic simulation calculation, the strength of the motor can be increased and various losses can be reduced, so that the motor can work in a long, stable and efficient way.

Keywords: high integration, dual sensor, brushless motor

0 引言

在各种无人设备和智能化设备飞速发展的今天,电机在其中占据着举足轻重的作用。比如现在很多国家都在研究的服务机器人(Service Robots),而服务机器人最显著地一个特点就是自由度(DOF)较多,而每一个自由度就意味着一个伺服电机系统,通常一个服务机器人的自由度在 15 以上。也就意味着至少需要 15 个以上的电机。而在大部分伺服电机系统中都以无刷机为主。

大部分无刷电机的直流电动机采用的传感器为霍尔传感器,该类型电机的结构简单,性能稳定,成本较低,因此得到了广泛的应用。但同时缺点也很明显,霍尔传感器的精度偏低,而且单个传感器在使用安全上也有一定隐患,如果单个霍尔元器件坏掉整个电机就无法正常使用[1]。因此,为获得较高的控制精度与精确的信息反馈,某些电机在尾部加上一个非接触式磁旋转编码器。该编码器可提供 12 位的分辨率,工作速度快,抗污染能力强,防护等级可达 IP68。这样既提高了控制精度,又防止在某个传感器出问题时电机无法正常使用,大大提高了电机使用的可靠性。

参考文献

[1] 王晨. 基于机械臂的工业生产自动化[J],机器人,2013 (1) :92 - 94.
[2] 韦巍. 智能控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
[3] 章卫国,杨向忠. 模糊控制理论与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004.
[4] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
[5] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2008.
[6] 楼顺天,胡昌华,张伟. 基于 MATLAB 的系统分析与设计 - 模糊控制[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2001.

作者简介:梁开旭(1993 -),男,汉族,甘肃武威人,硕士研究生在读,研究方向:机械电子工程。

收稿日期:2018 - 06 - 06

1 双传感器微型无刷直流电动机设计思路

一般的无刷直流电动机结构简单,控制方式也相对容易,但由于霍尔元器件的限制,控制精度较低,存在一定的安全隐患。永磁同步电机控制精度高但是控制方式相对复杂。为了增加控制精度且不增加控制难度,可增加一个非接触式的磁编码器。由于编码器的结构定转子分体非接触式,编码器转子嵌入电机转尾端,编码器定子与其在轴向分开一定距离,所以该编码器只能装在电机尾端。电机设计时需考虑电机的使用工况,如振动、冲击、工作时长、工作效率等等。需通过合理的结构布置、电磁设计等方式来满足需求。

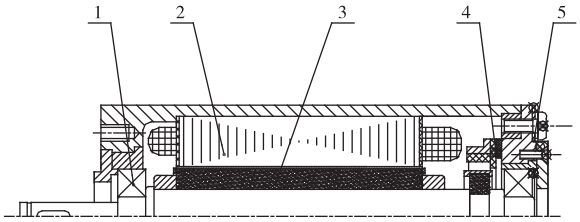
该种电机由于空间紧凑,功率较小,且为长时工作,一般需解决以下问题:

1)电机的结构布置;2)电机铁耗;3)齿槽转矩;4)电机的温升。

2 电机结构的布置

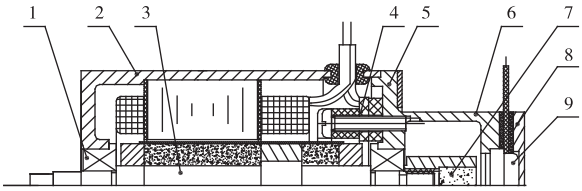
电机尺寸较小,空间非常紧凑,结构布置必须合理,需要将各零部件尺寸都尽量压缩。壳体采用不锈钢结构,保证强度的同时能得到较大的内部空间。磁旋转编码器为非接触式,定转子分开,虽然径向尺寸很小,但轴向尺寸并不小,较占空间。磁旋转编码器的转子为光滑圆柱结构,需固定在电机转子上。电机为双方向旋转,编码器转子固定时需考虑防松装置。该电机是制作专用护套一端将编码器转子固定在其腔体内,另一端通过内螺纹嵌入钢丝螺套固定在电机转子上。霍尔采用立焊结构,霍尔传感器金属面平行于电机轴线,这样可以节省径向空间,同时用专用支架将霍尔元器件固定,作为保护。轴承采用法兰轴承以减小轴向空间的占用。

一般无刷直流电动机结构简图如图 1,主要由定转子、轴承、端盖、霍尔组件等构成,且空间较充裕。图 2 为某型双传感器微型无刷直流电动机结构简图,由图 2 可看出电机在结构上要复杂不少,也更为紧凑。图 3 为与其结构一致的实物图。由图可看出该电机小于 1 元硬币的直径(1 元硬币直径为 25 mm),长度小于 48 mm,额定功率约为 5.5 W,空载时转速可达将近 20000 rpm,且为长时工作,能达到机载设备的各项要求。



1 – 轴承;2 – 定子;3 – 转子;4 – 霍尔组件;5 – 端盖。

图 1 一般无刷直流电动机结构图



1 – 轴承;2 – 定子;3 – 转子;4 – 霍尔组件;5 – 端盖;6 – 后端盖;7 – 编码器桩子;8 – 盖板;9 – 编码器定子。

图 2 某型双传感器微型无刷直流电动机结构图

3 电机损耗

3.1 铜耗

电流通过电机绕组时,由于绕组电阻的原因产生热量,即为铜耗。铜耗的多少直接影响着电机绕组的温升[2]。电机的铜耗为:

$$P_{Cu} = mI^2R \quad (1)$$

式中:m 为电机相数;I 为电机电流;R 为电机电阻。以图 3 电机为例,相数为 3,额定工况下相电流约为 0.25 A,常温下的相电阻为 2.15 Ω,最后结果为 0.4 W,相对输出来说非常小了,所以在此类功率小的微型电机中,铜耗可不用太过关注。

图 3 电机实物图

3.2 铁耗

对于功率不到 10 W 的微型电机,电机的效率是很低。由于铜耗所占的比重很小,相对的,铁耗所占比例就会较高。在设计过程中,铁耗可简化为式 2 计算:

$$P_{Fe} = P_h + P_c \quad (2)$$

式中：P_{Fe} 为铁耗，P_h 为磁滞损耗，P_c 为涡流损耗。

$$P_h = K_h f B_m^{\alpha} \tag{3}$$

式中：K_h 为磁滞损耗系数；对一般硅钢片 α 取 1.6 ~ 2.3；f 为电机磁场的交变频率；B_m 为磁密幅值。建立 Ansoft 模型，磁滞损耗由 Ansoft 计算[3]，电机为分数槽时曲线如图 4。

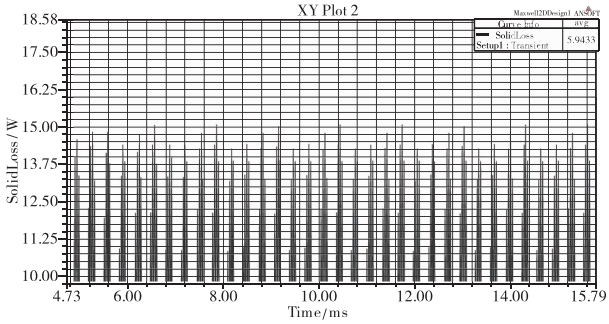


图 4　分数槽时电机的磁滞损耗

图 5 为分数槽时电机的涡流损耗[4]。

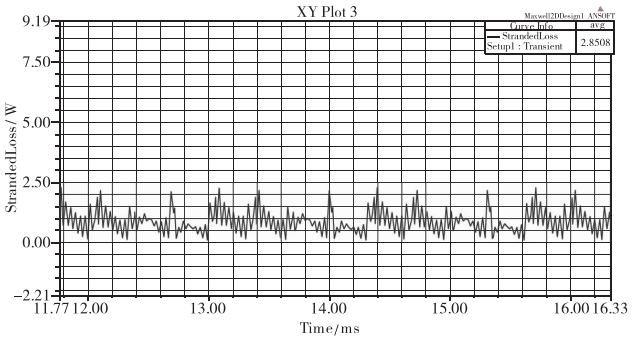


图 5　分数槽时电机的涡流损耗

由图 4、图 5 可看出，分数槽时电机的磁滞损耗和涡流损耗分别为 5.9 W、2.8 W，铁耗过大，达到了 8.7 W，严重影响电机的性能。改为整数槽之后电机的损耗见图 6、图 7。

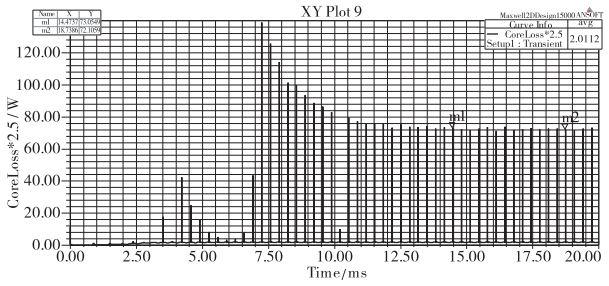


图 6　整数槽时电机的磁滞损耗

改为整数槽之后电机的磁滞损耗和涡流损耗分别为 2 W、0.4 W，铁耗降为 2.4 W，比分数槽时小很多，在可接受范围。假设其他损耗为 0.2 W，则电机的效率约为 6/(6 + 2.4 + 0.4 + 0.2) ≈ 0.667，也就是说效率可达 66.7%。

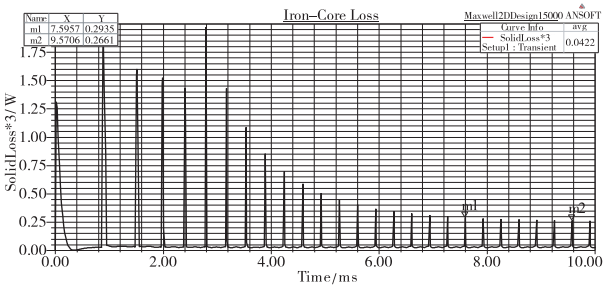


图 7　整数槽时电机的涡流损耗

4　齿槽转矩及其削弱方法

无刷电机的齿槽转矩是电枢铁芯的齿槽与转子永磁体相互作用而产生的磁阻转矩。由于齿槽转矩的存在会增大电机最初的启动转矩，这对一般的电机问题不大，但对于功率不到 10 W 的小电机来说影响就很大了。

齿槽转矩的表达式为：

$$T_{cog} = \frac{1}{2}\Phi_m^2 \frac{\mathrm{d}R}{\mathrm{d}\theta} \tag{4}$$

式中：Φ_m 为永磁磁通，R 为气隙磁阻。式(4) 表明齿槽转矩与永磁磁通的平方成正比关系。可见，如果适当降低磁通密度，可以降低齿槽转矩，但同时也降低了电机的性能。因此，减小 $\mathrm{d}R/\mathrm{d}\theta$ 是抑制齿槽转矩的可行办法。由此得到的可降低齿槽转矩的主要措施有：分数槽绕组、优化磁极极弧和槽口宽、斜槽和斜极、磁极分段错位、磁极偏移等。该电机不能用分数槽，考虑到电机的工艺性，磁钢易碎不易加工等情况，所以将消除齿槽转矩的方法定为电枢斜槽。

转子每一转出现的齿槽转矩基波周期数等于定子槽数 Z 和极数 $2p$ 的最小公倍数 N_c，即一个齿槽转矩基波周期对应的机械角 $\theta_1 = 360°/N_c$。因此，如果定子铁芯的斜槽角和它相等，即可消除齿槽转矩的基波：

$$\theta_{sk} = 360°/N_c \tag{5}$$

该电机为 4 极 12 槽结构，按式(5)计算出斜槽角度为 30°。由于电机的空间限制，定子铁芯的长度只有不到 13 mm，斜槽之后嵌线会难度增加，所以槽满率必须控制在较低的一个范围，嵌线困难时可

考虑采取分段槽契。

5 电机的温升

电机中主要热源有铁耗,铜耗[5]。由于轴承摩擦损耗分析过程分析涉及到耦合场仿真问题,较为复杂,可暂不考虑,主要考虑铁耗,铜耗。工况均假定周围环境温度为70℃,考虑最严酷的散热工况,电机通过机壳表面与空气对流换热和辐射散热[6]。对电机稳态温度进行仿真。该电机为长时工作制,一次工作20000 s,用稳态温度场计算电机稳定后的工作温度,得到各部件最高温度,见表1。

表1 各部件最高温度分布

电机部件	温度/°C
机壳	121.8
电机端盖	118.9
定子轭	127.8
定子齿	128.5
转子表面	129.6
磁钢	129.7
转子铁芯	129.4
前端轴承	128.7
后端轴承	120.8
绕组	129.1

温度曲线及各部分温度分布见图8、图9。

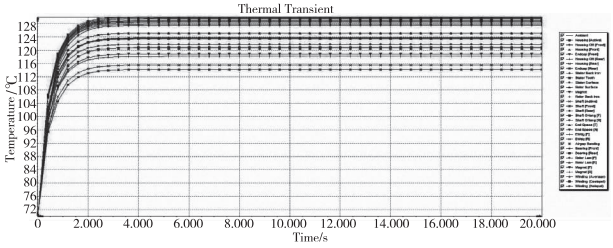


图8 温度曲线

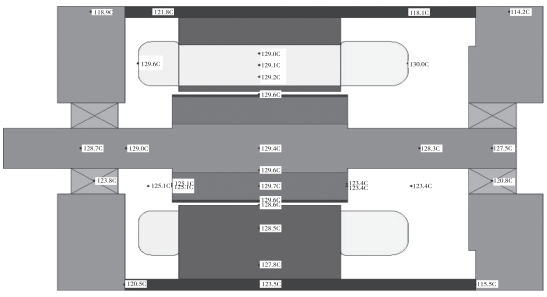


图9 温度分布图

从分析结果可以看出,电机的温度分布中,最高温度产生在绕组部位为130℃。对于一般电机来说完全不是问题,也就是说该电机完全可以满足长时工作的需求。

6 结语

该电机在设计过程中须合理安排好各零部件的结构及尺寸分布,考虑磁旋转编码器转子的防松。由于电机功率小,各种损耗对电机都有可能造成很大影响。目前该类型电机已出了两款,经过试验后性能很好,满完全足GB 1863A－2015及主机提出的功能试验及环境试验要求,在高集成度的同时提高了控制精度,减小了尺寸。

参考文献

[1] 谭建成.永磁无刷直流电机技术[M].北京:机械工业出版社,2011.

[2] 朱志能,崔浪浪,简晓书.宇航高功率密度电机热学模型分析与热试验研究[J].微电机,2017,50(7):25－29.

[3] 邱国平,丁旭红.永磁无刷电机实用设计及应用技术[M].上海:上海科学技术出版社,2015.

[4] 陈萍,唐任远,佟文明,等.高功率永磁同步电动机永磁体涡流损耗分布规律及其影响[J].电工技术学报,2016,30(6):1－9.

[5] 张琪,鲁茜睿,黄苏融,等.多领域协同仿真的高密度用词电机温升计算[J].中国电机工程学报,2014,34(12):1874－1881.

[6] 邰永,刘赵淼.多感应电机全域三维瞬态温度场分析[J].中国电机工程学报,2010,30(30):114－120.

作者简介:吴贵川(1988－),男,电机初级工程师,从事永磁电机设计。

收稿日期:2018－05－11

基于 Matlab 的驾驶舱门泄压板评估和仿真计算方法

徐　佳,王天斌
(中航西飞民用飞机有限责任公司,陕西 西安 710089)

摘　要:在民用飞机驾驶舱门的设计过程中,是否需要在驾驶舱门上安装驾驶舱门泄压板以满足在驾驶舱泄压情况下的最低安全性要求是驾驶舱门设计的重点之一。提出一种计算方法,通过对民用飞机增压舱进行区域划分,建立民用飞机增压舱的一维空气流通的数学模型,并在 Matlab 软件中对数学模型进行仿真计算,根据计算结果判断是否需要安装驾驶舱门泄压板。同时在此计算模型的基础上,提出驾驶舱门泄压板面积的计算方法,为民用飞机驾驶舱门泄压板的设计提供参考依据。

关键词:驾驶舱门　泄压板　补气通道　压差
中图分类号:V223　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0026 - 04

Evaluation and simulation calculation of pressure release plate for cockpit door based on Matlab

XU Jia, WANG Tianbin

Abstract: In the design of civil aircraft cockpit door, whether it is necessary to install pressure relief plates on the cockpit doors is one of the measures to ensure minimum safety requirements in case of cockpit pressure relief. A calculation method is proposed, the one - dimensional mathematical model of air flow in a civil aircraft pressure cabin is established by dividing the area of the pressure cabin. The mathematic model is simulated and calculated in Matlab software. According to the result of calculation, whether or not the cockpit door relief plate needs to be installed is judged. At the same time, on the basis of this calculation model, the calculation method of the area of the cockpit door relief plate is proposed, which provides a reference for the design of the cockpit door relief plate of civil aircraft.

Keywords: cockpit door, pressure relief panel, air supply channel, differential pressure

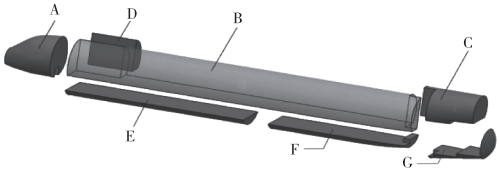
0　引言

现代民用飞机通常将舱室划分为非增压舱和增压舱。非增压舱在整个飞行过程中舱内压力与外界压力相同。增压舱舱内压力通常高于外界压力,其内外压差随飞行高度的增加而增加,在最大飞行高度上达到压差峰值。在飞机运行过程中,增压舱有可能因鸟撞或发动机转子爆裂而出现破孔[1],而导致增压舱泄压。由于驾驶舱面积较小,对压力波动反应迅速,因此驾驶舱出现破孔时较客舱出现破孔时对飞行安全的影响更大。当驾驶舱出现面积较大的破孔时将引起驾驶舱压力急剧降低,而客舱对压力反应较驾驶舱滞后,导致驾驶舱和客舱之间的压差在短时间内急剧增大。当达到驾驶舱门结构承载极限时,驾驶舱门将遭到破坏,破坏产生的冲击力和碎片有可能对飞行机组人员的生命安全造成威胁。为避免驾驶舱门在高压差载荷下破裂,可根据需要在驾驶舱门上选装泄压板以在爆炸减压中对驾驶舱门结构提供保护。然而并非所有的驾驶舱门都需要安装有泄压板对驾驶舱门进行防护。只有当驾驶舱和客舱之间的补气通道不足,在爆炸减压过程中,驾驶舱和客舱之间的压差超过了驾驶舱门的承压限值时,才需要加装驾驶舱门泄压板以增大驾驶舱和客舱之间的补气通道。本文提出一种仿真分析计算方法,该方法基于全机泄压计算模型,对驾驶舱门泄压板设置的必要性和泄压板最优面积进行确定。

1　驾驶舱泄压计算模型建立

为进行驾驶舱泄压计算,首先要建立飞机增压舱模型,对增压舱进行区域划分。飞机增压舱通常

包括有驾驶舱、客舱、设备舱、货舱等,在计算中可将飞机的增压舱室划分为若干个独立的舱室。图 1 为某型民用飞机的增压舱室划分。其中 A 为驾驶舱,B 为客舱,C 为后货舱,D 为前货舱,E 为前设备舱,F 为后设备舱,G 舱为尾舱。



A – 驾驶舱;B – 客舱;C – 后货舱;D – 前货舱;E – 前设备舱;F – 后设备舱;G – 尾舱。

图 1　某型民用飞机舱室划分

当增压舱 A 舱(驾驶舱)出现破孔时,A 舱空气外泄,导致的 A 舱压力急剧下降,其他增压舱室空气通过各舱室间的补气通道直接或者间接向 A 舱补气。由于各舱室容积和舱室间流通面积不同,导致各舱室的压力下降相较于 A 舱有一定的滞后,最终造成各舱室的泄压曲线和各舱室之间的压差变化曲线不同。在计算模型中需要明确各舱室的体积以及各舱室之间的流通面积和流通关系。

2　基本方程建立

根据气体状态方程:

$$PV = nRT \tag{1}$$

式中:P— 舱室内压力,V— 舱室体积,n— 气体物质的量,T— 舱内温度,R— 理想气体常数。

由于驾驶舱发生破孔瞬间,从孔口流出的气体速度非常快,过程进行的时间很短,可以将气流从孔口流出视为一维等熵流动,其伯努利方程为:

$$\frac{K}{K-1}\frac{P}{\rho}+\frac{v^2}{2}=\frac{k}{k-1}RT+\frac{V^2}{2} \tag{2}$$

假设舱内气体初速度为零,上述公式变为:

$$\frac{k}{k-1}RT_1=\frac{k}{k-1}RT_2+\frac{V^2}{2} \tag{3}$$

得到出口速度 v_2 的计算公式为:

$$v_2=\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{P_1\left(1-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right)}{\rho_1}} \tag{4}$$

因为 $\frac{\rho_2}{\rho_1}=\frac{P_2^{1/K}}{P_1}$,代入公式(4)得到两舱之间的补气量为:

$$Q=\rho_2 V_2 A=A\frac{P_1}{\sqrt{T_1}}\sqrt{2\frac{K}{K-1}\frac{1}{R}\left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{2}{K}}-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{K-1}{K}}\right]} \tag{5}$$

式中:Q— 两相邻舱室之间的补气量;A— 两相邻舱室之间的补气面积;P_1— 压力较高的舱室内的舱压;P_2— 压力较低的舱室内的舱压;T_1— 压力较高的舱室内的舱温;R— 气体常数;K— 绝热指数。

由上式可知,当 $P_2=0$ 时,$Q=0$,当 $P_2=P_1$ 时,$Q=0$,故在 $0<P_2<P_1$ 之间,Q 存在有最大值,通过对上式求导,令 $\frac{dQ}{dP_2}=0$,得:

$$P_2=P_1\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{K}{K-1}}=P_{cr} \tag{6}$$

P_{cr} 称之为临界压力,此时得到最大质量流量为:

$$Q_{\max}=A\frac{P_1}{\sqrt{RT_1}}\sqrt{\left(\frac{2K}{K-1}\right)\left[\left(\frac{2K}{K+1}\right)^{\frac{2}{K-1}}-\left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K+1}{K-1}}\right]} \tag{7}$$

当外界环境压力 P_1 小于等于临界压力 P_{cr} 时,两舱之间的补气量将保持 $Q_{\max}$ 不变。当外界环境压力 P_1 大于临界压力 P_{cr} 时,可按式(5)计算两舱之间的补气量。

3　驾驶舱门泄压板必要性的评估

根据上述基本方程以及整机模型的划分,运用 Matlab 软件建立计算流程并进行初始条件的定义。基于 Matlab 软件平台的计算流程如图 2。

计算初始条件的定义中,驾驶舱破孔面积和破损发生高度的确定对计算结果起决定性作用。根据美国联航空管理局在民用飞机补充型号合格审定中的常规做法,当驾驶舱主风挡面积较根据 FAR25.365(e)条[2]计算得到的破孔尺寸大时,FAA 认为主风挡发生破裂的最大高度不超过 8000ft。而在飞机最大巡航高度下发生的破孔,大部分为由于机身结构疲劳破坏造成的。这种情况下破孔尺寸需根据 FAR25.365(e)条计算得到。根据 FAA 对野生动物撞机事件的调查报告[3]中提到在 8000ft 高度上造成主风挡破裂的最主要原因为鸟撞事件,FAA 咨询通告 AC 25 – 20 第 8d 节[4]中认为在鸟撞情况

下主风挡完全丧失可能性非常小，建议取主风挡丧失75% 作为评估条件。通常主风挡破裂边缘为不规则型，需要取流量系数对破损面积进行折算。根据 FAA 25 -20 中建议流量系数选取为 0. 75，实际计算中采用的驾驶舱破损面积为实际破损面积 * 流量系数。而计算中需要输入的各舱室体积和各舱室之间的流通面积可根据飞机模型测量得到。

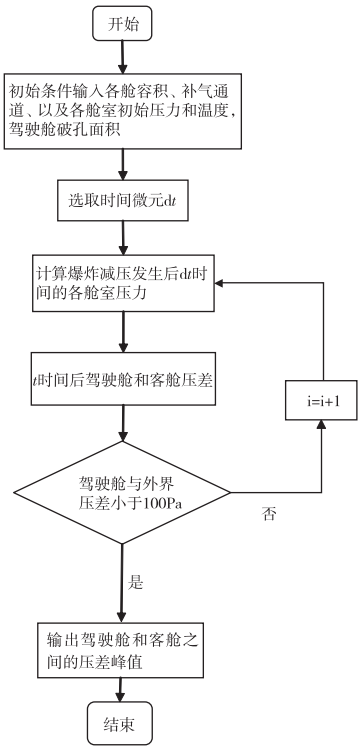


图 2　Matlab 软件平台的计算流程图

在 Matlab 中运行程序可得到各泄压工况下驾驶舱和客舱的泄压曲线。如图 3 所示为某型号民机在 8000ft 高度由于驾驶舱主风挡破裂以及在最大飞行高度 25000ft 下由于机身结构疲劳破损时的驾驶舱和客舱泄压曲线。

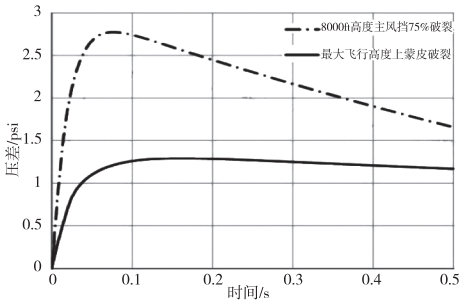


图 3　不同工况下的驾驶舱和客舱压差曲线

由图 3 可知，由于示例飞机最大飞行高度较低，其驾驶舱和客舱压差峰值较 8000ft 高度下主风挡破裂小。在决定是否在驾驶舱门上设置泄压板时，可选取两者中较严酷的压差峰值，与驾驶舱门结构承载能力进行比较。当压差峰值超过驾驶舱门结构压差承载限值时，则需在驾驶舱门上加装泄压板。

4　驾驶舱门泄压板面积计算

当计算表明需在驾驶舱门上加装泄压板时，可采用如图 4 所示计算流程进行泄压板面积的确定。驾驶舱门泄压板面积确定的原则为既能将驾驶舱和客舱的压差限制在驾驶舱门最大承压限值内，又要尽可能减少对驾驶舱门本身的强度削弱影响。计算开始时在程序中输入初始的泄压板面积和驾驶舱门上最大允许的开口面积，通过二分查找算法进行迭代计算，最终输出合适的泄压板面积。为得到更精确的计算结果，对泄压板开启的工作压差以及泄压板的响应时间也应当进行考虑。有效面积相同的泄压板，开启的工作压差越小，响应时间越短，越能在有限时间内降低驾驶舱和客舱两侧的压差。最终通过程序计算结果可得到对驾驶舱门强度削弱影响最小的最优泄压板面积。

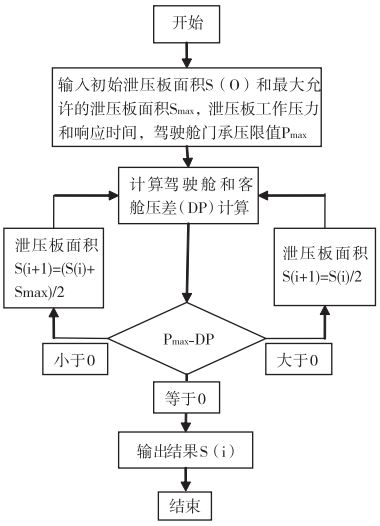


图 4　计算流程图

需要注意的是，采用上述计算得到泄压板面积为有效面积。在实际的工程应用中，由于泄压板多为方形开口，需根据泄压板形状将有效泄压面积转化为几何面积进行设计。

5　结语

本文通过座舱泄压计算为民用飞机是否设置驾驶舱门泄压板提供了判断准则，同时提出了一种驾驶舱门泄压板面积评估和确定的计算方法，为驾驶舱门泄压板的尺寸选择提供了设计依据。本文中所提出的全机泄压计算模型、计算方法以及判断准则除应用于驾驶舱门泄压板的设计外，还适用于民用飞机增压舱内货舱泄压板，货舱压力平衡活门等相似作用的释压口盖尺寸设计和计算。

基于 Redis 与 SSM 的大型设备数据运用系统设计

熊肖磊,王春伟,赵　炯,周奇才
(同济大学 机械与能源工程学院,上海 201804)

摘　要:针对目前大型设备进行数据采集,远程监控,数据处理的趋势,结合以 Web 技术为主的 B/S 架构的广泛应用,提出一种以 SSM(Spring MVC + Spring + Mybatis)框架为 B/S 架构实现基础的大型设备数据运用系统。系统采用分层结构,包括了数据层,应用层和表示层,数据层采用 Redis 和 MySQL 进行实时数据与非实时数据的持久化,使系统具有高效缓存数据的能力,应用层和表示层则依据 SSM 框架进行分模块方式设计,降低系统耦合度,简化开发流程。

关键词:大型设备　数据运用系统　SSM 框架　数据缓存　分层设计
中图分类号:TP277　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0029 - 06

Design of large equipment data application system based on Redis and SSM framework

XIONG Xiaolei, WANG Chunwei, ZHAO Jiong, ZHOU Qicai

Abstract: Aiming at the current trend of data acquisition, remote monitoring and data processing of large equipment, combined with the B/S architecture based on Web technology, a large equipment data application system based on SSM framework is proposed. The system adopts layered structure, including data layer, application layer and presentation layer. The data later uses Redis and MySQL to realize the persistence of real - time data and delayed data, so that the system has the ability to cache data efficiently. And the application layer and presentation layer are designed in modules according to the SSM framework to reduce the coupling degree of the system and simplify the development process.

Keywords: large equipment, data application system, SSM framework, data cache, layered design

0　引言

对于大型设备运行数据采集并加以处理运用,进而实现设备生命周期管理是目前设备管理的研究重点,而本文以盾构设备为例,探讨其数据处理运用系统设计方案与实现。随着地铁隧道掘进技术的逐渐发展完善,一条隧道的掘进过程往往伴随着多台盾构机施工,如此会出现多台盾构分散施工而管理维护困难的问题,于是在管理成本的制约下,需要建立某种系统对盾构设备及施工进程数据进行有效运

参考文献

[1] MARAGAKIS I. Bird population trends and their impact on aviation safety 1999 - 2008 [R]. EASA Safety Report, Germany: European Aviation Safety Agency, 2009.

[2] Federal Aviation Administration. Parts 25, Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes[S]. Washington D C: Federal Aviation Administration, 2013.

[3] CLEARY E C, DOLBEER R A, WRIGHT S E. Wildlife Strikes to Civil Aircraft in the United States1990 - 2014 [R]. Washington D C: Federal Aviation Administration, 2015.

[4] PRATT JD. Rapid decompression of pressurized aircraft fuselages[J]. Journal of Failure Analysis & Prevention, 2006, 6 (6): 70 - 74.

作者简介:徐佳(1987 -),女,工程师,本科,研究方向:民用飞机环境控制、压力调节系统。

收稿日期:2018 - 06 - 16

用,从而实现对盾构有效的监控管理。对此,国内外的盾构生产商,诸如铁建、海瑞克和小松等,都对自家盾构配置了数据采集系统,但大多数无法满足多盾构数据处理运用,多用户访问的情况。文献[1]利用方便开发的组态软件实现监控管理,但不利于后期扩展,其系统需要特定运行环境。文献[5]以C/S 结构实现了多台盾构的集中监控与数据运用,并成功应用在大连地铁 103 和 201 标项目,但随数据量增大,会使数据库访问压力增大。文献[8]实现了网络化盾构自动监控系统,并未满足集中监控目的。文中给出了一种嵌入式网络化盾构自动监控及报表系统,着重阐述了硬件结构与网络协议移植,并未满足多盾构监控目的。

基于 B/S 架构来构建盾构监控与数据运用系统既可实现多台盾构集中监控,数据处理,分析等工作,且无需安装专用客户端,只需通过浏览器即可访问,实现了多盾构多用户的互联网监控管理目的[2]。因此本文则采用 B/S 模式构建盾构机的数据处理运用系统,以 SSM(Spring MVC、Spring、Mybatis)框架作为 B/S 实现的基础与开发辅助。同时考虑到数据量快速增长,采用数据缓存技术实现较快速的数据处理能力,同时提供快速的并发访问。本文利用 Redis 作为内存数据库进行盾构实时数据缓存,并以 MySQL 进行数据同步,将盾构历史数据与固有信息持久化,并且围绕 SSM 框架技术,以分层方式设计系统,实现多盾构快速高效的数据处理运用。

1 相关技术介绍

Redis 作为一种 NoSQL 类型的数据库,具备了 NoSQL 灵活的数据模型;可存储处理非结构化及半结构化数据;良好的可扩展性;快速的读写能力和低廉的成本等特点[3]。NoSQL(Not Only SQL)泛指非关系型数据库,常用于超大规模和高并发的数据存储处理场景中,其根据数据库存储类型分为键值(Key - Value)存储数据库、列式存储数据库、文档性数据库和图形数据库[3]。而 Redis 作为一种开源的 Key - Value 数据存储系统,支持存储的 Value 类型包括了字符串、链表、集合及哈希等类型,并且均支持 push/pop、add/remove 及取交集并集和差集等操作,同时 Redis 会周期性地把更新的数据写入磁盘或者把修改操作写入追加的记录文件,并且在此基础上实现 Master - Slave 同步[4,10]。

SSM(Spring + SpringMVC + Mybatis)框架集由 Spring、SpringMVC、Mybatis 三个开源框架整合而成,常作为数据源较为简单的 web 项目的开发框架[6,9]。其中 SpringMVC 分离了控制器、模型对象、分派器以及处理器程序对象的角色,使其更容易进行定制;Spring 是一个轻量级的控制反转(IoC)和面向切面(AOP)的容器框架,供表现层调用,充当了表现层与持久层间的接口;而 Mybatis 则进行数据的持久化操作,支持普通 SQL 查询、存储过程和高级映射,通过对象关系映射将 Java 对象与数据库中的数据记录相互转换。通过在开源框架配置文件中的引用与项目中依赖包的导入,即可将三个框架整合起来,实现完整的前后端通信流程[6]。

2 系统结构设计

本文旨在利用数据缓存 Redis 和 SSM 集成框架搭建一种适用于盾构机数据处理运用的系统,对此在盾构机数据采集的基础上对系统进行结构的分层设计。整个系统基于 B/S 模式进行开发,而盾构数据通过机载的数据采集器用 PLC 采集得来,需要解包、转换、缓存和持久化。因此整个系统的工作流程是先将机载系统采集的数据解析后进入 Redis,然后按照前端请求进行实时的数据请求响应,同时将盾构固有数据和实时数据同步存储到 MySQL 中,为后续的故障预测、数据分析等大量数据运用处理过程事务提供数据源。所以根据数据流动和功能划分,本文将整个系统软件结构分为数据层、应用层和表示层[9],如图 1。

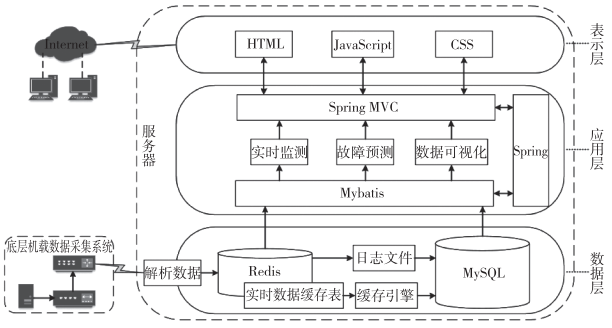


图 1 系统框架结构图

如图 1 所示,数据层将底层盾构机载系统采集的数据在传输到数据中心的服务器后进行解析和存储,提供更加结构化的数据源;应用层则是利用数据库中存储的数据进行模块化的功能处理,诸如状态监测显示、设备关系、故障分析预测等,并使用 SSM 框架进行设计解耦,独立封装各模块功能,对客户端的数据请求给予正确响应;而表示层通过浏览器页面对盾构数据的诸多处理运用结果进行可视化的显示。

3 数据层

在前面提到数据层主要对后续应用层功能表现提供数据支持,即数据层是系统的基础环节,该层通过对底层机载系统采集传输的数据进行解析和存储,并在存储之前做一定程度的预处理,使存储的数据更具有结构性。本文将数据层实现分为两个部分:Redis 实时缓存与 MySQL 持久化,以分别应对实时监测与大数据量分析运用的功能实现。

3.1 Redis 实时数据解析缓存

盾构机在掘进隧道的过程中,需要将采集监测的量按类型分为数字量和模拟量。其中数字量对应某个限位开关的开闭或者千斤顶的伸缩,而模拟量则对应千斤顶压力、电机电压、旋转速度以及注浆压力等具有数值意义的量。同时数据遵循一定的协议格式传输,因此接收到数据之后,同样按照此种协议格式进行解析,通过数据包的起始地址加上偏移量的方法,得出各个测点或者数据量的真实数据,解析过程如图 2。

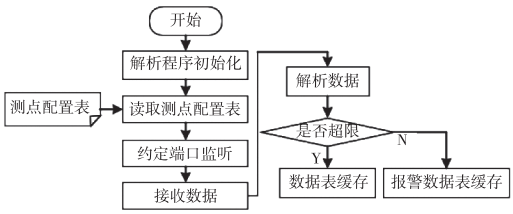


图 2 源数据解析流程

源数据进行解析后按照是否超过上下限进行缓存,对于实时数据的存储则按照测点配置表中的信息进行对号入座,根据底层数据采集的约定协议生成各个测点的配置表,如表 1 与图 3。

表 1 各测点的偏移量对应关系

测点名称	含义	偏移量	数据类型
A1 – A4	土压	D65 – D68	模拟量
A5	俯仰角	D69	模拟量
A8	回转速度	D72	模拟量
……	……	……	……
D33	刀盘左转	A111.8	数字量
D34	刀盘右转	A111.9	数字量
D37	掘进 ON	A111.12	数字量
……	……	……	……

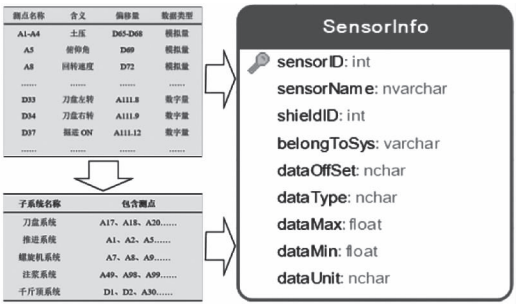


图 3 测点信息配置表

如表 1 所列测点偏移量对应关系,解析程序即按此进行数据包解析,同时生成一项测点信息的配置表存储在数据库中,便于之后作为某台盾构的特征信息查看。在生成测点信息配置表过程中,以各测点所属盾构机子系统分组,如此在后续对盾构机子系统部件进行分析时提供便利,如图 3。

如此实时数据经解析之后便可以进行 Redis 缓存了,在 Redis 缓存中以 Key – Value 的数据形式存储[10],对于实时数据而言,每一个时刻的数据均是有区别的,这种区别存在于每一个传输的数据包上带有的时间戳(TIMESTAMP),于是对于两个实时数据包即可通过 TIMESTAMP 进行区分,并可作为 Key 来标识缓存中的 Value。结合 Key – Value 存储无表概念的特点,实时数据的存储时,以盾构 ID 为 Key,以 hash 作为 Value 存储此台盾构的数据,如此便可以 Key 区分不同盾构的数据。对于 Value 部分的 hash,以 TIMESTAMP 作为 Key,以数据 list 作为 Value,如此便可区分同一盾构不同时刻的数据,在数据 list 中,以 Key – Value 的形式存储各个测点的名称及对应的数值[4]。因此存储结构如表 2 所示。从表 2 中可以看出,根据盾构的标识 ID 及某个时刻的 TIMESTAMP 即可以唯一的确定某台盾构某一时刻

的各个测点的实时数据，根据底层数据发送的时间间隔进行实时数据的解析缓存，并将一段时间内的旧数据同步至 MySQL 中，而后删除，保证内存不被占满。

表 2　　实时数据缓存结构

Key	Value

shieldID
（盾构标识）
	TIMESTAMP :DataList {
	{A1 :a1},{A2 :a2},{… :…},
	{D1 :d1},{D2 :d2},{… :…}
	}

3.2　MySQL 数据持久化

通过前面内容所述，盾构实时数据在经过 Redis 缓存之后，同步持久化至 MySQL 中，用于后续的数据分析工作，而且盾构机的某些固有特征数据也要存储到数据库中，由于这些数据一般是结构化数据，所以可直接利用 MySQL 存储。对于盾构机特征数据和故障记录等并不会由底层数据采集系统传输，而是访问特定的接口得到，而此种访问是以 JSON 字符串作为数据传输的格式，因此在访问特定接口获得盾构机特征数据和故障记录信息的处理流程如图 4。

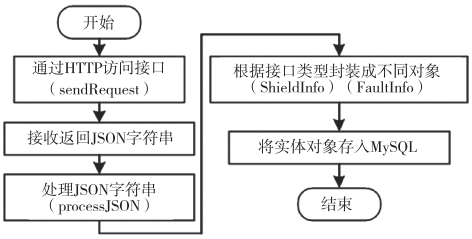
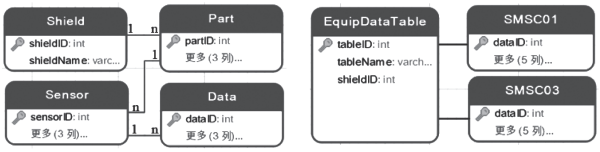


图 4　接口数据处理存储流程

对于实时数据的持久化存储时需要考虑盾构机组成特点和系统的功能需求，然后设计存储的表结构。盾构机是一种集机械、电气和液压系统与一体的大型设备，其结构复杂，系统众多，每个大的部件或者子系统中包含诸多零部件，并且零部件之间存在某种父子关系。所以在设计表结构时考虑零部件的父子关系将其按照树形结构存储，即一台设备包含多个子系统，一个子系统包含多个部件，一个部件包含多个零件或测点，即它们之间是 1：n 的关系；同时考虑到多台盾构的集中监控与数据运用，所有数据存储在一张数据表中会因为记录太多导致查询某台盾构的运行数据时缓慢，因此采用单盾构单表的形式，即单张数据表中只存储一台盾构的运行数据，并使用配置表维护，使各台盾构名称与数据表名关联起来，从而将多台盾构的运行数据分散到多张表中存储，减轻了单张表存储记录过多的压力。于是综合信息后得出其中的关联如图 5。



（a）　　（b）

图 5　盾构运行数据存储表关联示意

如图 5（a），通过配置表中表名字段与盾构数据表名关联，实现数据分散至多表存储，而图 5（b）则是对某台盾构而言的设备、部件、测点和数据的关联示意，如此则实现了树形存储。

4　应用层

应用层主要是以数据层为基础，通过调用数据层向上提供的接口，对该层提供的盾构运行数据和特征数据进行对应的加工处理，实现相应的业务逻辑，并向表示层提供接口，将实现的业务逻辑通过表示层可视化表现。如此处于系统中间层的应用层是系统核心，起着承上启下的作用，系统的功能实现则主要在这层实现。

对于盾构机而言，其在运行过程中积累大量的工程数据，包括关键部件测点的监测参数、掘进隧道的地质数据、设备故障信息和维护信息等，这些数据是监测管理盾构的重要依据。因此对于盾构管理而言，应该是全周期的，即对盾构施工前期、施工中期和施工后期的信息都需要进行管理。而盾构机工作环境较为恶劣，如果出现零件损坏，则势必会影响整个盾构的运行，因此对于盾构数据的处理运用包含了实时数据监测、测点历史统计、故障信息记录以及基于历史运行数据的故障预测与诊断等，便可以时刻关注盾构的健康状态，使得在零部件出现损坏前给出预警，及时更换，从而不会影响整个系统的正常运行。在这些功能的实现上，利用 SSM 框架进行应用系统解耦，以模块独立化的方式开发，简化了开发流程，达到在模块内部可以更加专注于逻辑实现，高

度内聚,而在模块之间专注于接口调用,低度耦合的目的。应用层结构如图6。

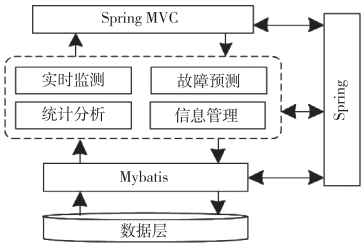


图6 应用层结构示意图

如图6,应用层中包含多个功能模块,并且各模块之间相互独立,通过Spring MVC向表示层提供统一的访问接口,在接收到表示层请求之后,根据Spring MVC的控制器分发请求,直接调用对应的模块进行其中的业务逻辑处理,同时这一过程有着Spring的管理与Mybatis对象关系映射,从而能够完成接收请求,分发请求,业务处理,访问数据源,模型生成,视图填充以及给予响应的完整过程[9]。

在过程实现中,Spring整合Mybatis,进行数据通道、映射与事务的管理,通过在Spring容器中注册DataSource、SqlSessionFactory和MapperScannerConfigurer的实例bean,将数据源属性文件载入,从而加载数据通道和关系映射原则,并制定Mapper接口的扫描路径,使得在访问数据库时自动扫描Mapper接口进行数据的持久化操作,把Java对象与数据表记录映射起来,从而完成在应用层中的对象传递。而Spring MVC则主要加载了请求映射器和适配器的驱动,配置了基于注解@Controller的控制器扫描路径,使得Spring MVC在拦截请求之后,根据拦截路径,自动扫描@Controller类,匹配拦截路径,从而可以执行对应的业务逻辑,调用对应的接口方法,访问对应的数据库表[6]。

之后则是在项目启动文件中设置Spring及Spring MVC的入口文件,从而在系统启动时,框架功能也随之准备就绪,即在web.xml中设置Spring配置文件applicationContext.xml路径以及Spring MVC的请求控制分发器DispatcherServlet和Spring-mvc.xml的路径,并在web.xml中配置好请求拦截HTTP请求的基础路径[9]。

5 表示层

表示层作为系统顶层,主要是将盾构数据处理应用后的结果以某种方式呈现出来,即通过文字、图片、表格和视频等元素构成的网页显示在用户的浏览器上,从而使用户更加直观的感受各种数据处理后的结果。对于表示层而言,其通过应用层取得业务逻辑处理后的结果数据,填充到经过HTML、CSS和JavaScript美化过的页面中,形成最终的网页。但是这样在结果数据变化时,为了体现这种变化,前端表示页面也需要不断刷新载入,这对于实时数据监控显示或者根据条件查询的应用来说很不友好,每次整体页面刷新不仅体验不好,同时也对系统资源造成了浪费,所以就使用AJAX进行页面的局部刷新。通过AJAX[7]向服务端请求数据时,一般有长轮询和短轮询两种方式,其中长轮询就是建立浏览器与服务器之间的链接持续保持下去,多次请求使用同一个连接,而短轮询则是每次请求都会建立新的链接,请求结束后链接也随之中断;但由于长轮询需要服务器维持链接,导致系统资源多余耗费,同时实时数据监控显示间隔在秒级单位,因此本文采用短轮询的方式请求数据。

对于实时监测数据显示,每次AJAX请求为盾构机标识ID和当前时间戳TIMESTAMP,服务器端接收参数之后,从Redis数缓存中查询出数据,并以AJAX请求中常用的JSON数据传输格式返回数据,对实时监测页面进行局部的数据更新,从而达到盾构运行数据实时变化的目的。AJAX数据请求流程如图7。

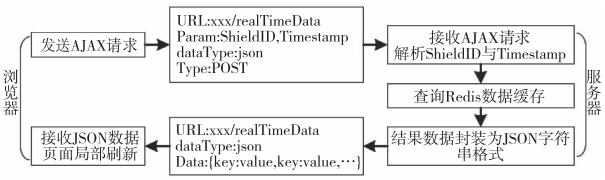


图7 实时数据监测显示页面AJAX请求流程

如图7所示,前端浏览器获取盾构标识ID和当前时间戳TIMESTAMP之后作为参数发起AJAX请求,服务器接收AJAX请求后解析出盾构标识和时间戳参数,并按此查询Redis数据缓存,并将查询结果以JSON格式返回至浏览器,浏览器解析JSON数据,填充页面实现局部刷新。而实现代码如下[7]:

```
$.ajax({ type : "POST",url : "xxx",dataType : "json",
```

data：{"shieldID"：ID,"Timestamp"：Timestamp},

success：function（data）{ …//更新页面部分},

error：function（）{ …//异常处理部分代码}});

实时数据监测页面示意如图 8,图中通过纯数据显示方式将盾构各子系统关键参量的数据变化直接表示,包括了千斤顶系统、刀盘系统、螺旋机系统和注浆与泡沫系统,并结合折线图和仪表板插件强调某些参量的变化趋势与变动情况。

而对于盾构固有特征信息查询或者统计分析、故障统计、地表沉降预测等结果显示同样是基于 AJAX 短轮询实现,即通过不同业务逻辑处理或根据模块配置即可同样原理实现。诸如图 9 所示的故障统计,通过柱状图显示数量,表格显示详细记录。

图 8　盾构运行数据实时监测显示示意图

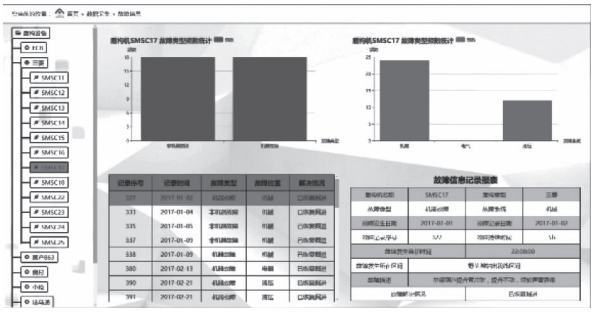


图 9　盾构故障信息统计

6　结论

本文使用 Redis 数据缓存和 MySQL 持久化,对盾构运行数据和结构化特征数据进行存储,并通过 SSM 框架搭建了基于 B/S 模式的盾构数据处理运用系统。系统总体结构分为三层,分别是数据层、应用层和结构层,在数据层中使用 Redis 对实时数据进行缓存,以满足实时监控的要求,并且将历史数据及时同步至 MySQL 中,对后续一系列的数据处理应用提供数据源。虽然目前可以实现多台盾构的集中监控,但为了提供数据处理能力和系统交互能力,后续可进一步搭建 Redis 集群,以应对高并发系统访问;同时在数据处理方面应用机器学习、数据挖掘等方法进一步增强对盾构数据的处理效果,从而能够完整的实现盾构的全生命周期管理。

参考文献

[1] 李伟青. 盾构机同步驱动及远程监控系统的研究与开发[D]. 广州:华南理工大学,2012.

[2] 肖敏,廖少明,周松. 基于 Web 的隧道盾构法施工动态监控系统[J]. 上海交通大学学报,2012,46(1):105－109.

[3] 朱建生,汪健雄,张军锋. 基于 NoSQL 数据库的大数据查询技术的研究与应用[J]. 中国铁道科学,2014,35(1):135－141.

[4] 任嘉栋. 基于 Redis 的统一监控平台的设计与实现[D]. 北京:中国科学院大学,2016.

[5] 孟祥波,徐受天,马强. 基于互联网的盾构实时监测系统开发[J]. 隧道建设,2012,32(2):256－271.

[6] 李洋. SSM 框架在 Web 应用开发中的设计与实现[J]. 计算机技术与发展,2016,26(12):190－195.

[7] 周柱,郎朗. Ajax 技术在 B/S 架构中的数据传输应用研究[J]. 新余学院学报,2016,21(3):109－114.

[8] 沈立新. 盾构机实时远程监控系统技术[J]. 铁道建筑技术,2018(8):34－38.

[9] 邹红霆. 基于 SSM 框架的 Web 系统研究与应用[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版),2017,30(1):39－44.

[10] 邱书洋. Redis 缓存技术研究及应用[D]. 郑州:郑州大学,2015.

作者简介:熊肖磊(1963－),男,硕士生导师,主要研究方向为物流系统、工业控制自动化和机电控制技术。
王春伟(1995－),男,硕士研究生,主要研究方向为设备远程监控,数字管理系统。

收稿日期:2018－06－09

基于 KBE 的施工升降机导轨架快速设计系统开发

朱春阳,王紫媛,李昌冉
(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘　要:为了实现施工升降机导轨架的高效设计,根据导轨架设计特点及现行设计存在的问题,以知识工程(KBE)技术为基础,建立了施工升降机导轨架知识库,研究并开发了导轨架快速设计系统,实现以知识驱动的施工升降机导轨架设计,达到有效积累设计经验知识、提升设计效率和缩短研发周期的目的。通过系统应用实例表明,该系统极大提高了施工升降机导轨架设计效率和质量,具有良好的工程应用价值,为工程机械产品研发设计提供一种智能化思路。

关键词:施工升降机　知识库　KBE　导轨架快速设计系统
中图分类号:TH211 + .6,TP316.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0035 - 05

Development of rapid design system for rail frame of construction elevator based on KBE

ZHU Chunyang, WANG Ziyuan, LI Changran

Abstract: In order to realize the efficient design of the guide rail frame for construction elevator, according to the design features and the problems existing in the current design of the rail frame, based on the Knowledge - Based Engineering (KBE) technology, the knowledge base of the rail frame for construction elevator is established, and the rapid design system for guide rail frame has is researched and developed, which realizes the knowledge - driven design of construction elevator rail frame, achieves the purpose of accumulating design experience knowledge effectively, improving design efficiency and shortening research and development cycle. The system application example shows that the system greatly improves the design efficiency and quality of the guide rails frame for construction elevators, has a good engineering application value. It provides an intelligent way for the design of construction machinery products.

Keywords: construction elevator, knowledge base, KBE, rapid design system for rail frame

在施工升降机运行过程中,导轨架用来支撑和引导吊笼沿着导轨升降。由于导轨架结构复杂,设计参数较多,计算量大,而当前施工升降机的设计仍采用传统的 CAD 技术,运用基本的计算理论及个人经验进行几何设计,缺乏设计规范与知识的支持,所以设计周期长,成本高。本文将 KBE 技术运用到施工升降机导轨架三维设计中,开发施工升降机导轨架快速设计系统,实现知识驱动设计,快速应对市场需求,降低研发成本,为施工升降机的创新设计迈出积极的一步,进而为工程机械设计研发提供实现智能化思路。

1　施工升降机导轨架的设计

1.1　设计特点

导轨架由多个标准节通过螺栓联结而成,用来支撑和引导吊笼沿着导轨升降,完成施工任务,在施工升降机工作过程中,起着至关重要的作用。

研究导轨架结构,主要对标准节结构进行分析[1]。标准节由主弦管、斜腹杆、齿条、角钢框架、螺栓、螺母和销等组成,其端面尺寸有 180 mm × 180 mm、500 mm × 500mm、650 mm × 200mm、650 mm × 650 mm、700 mm × 700 mm、900 mm × 650 mm 等类型,同时,不同的类型的施工升降机,具有不同规格的标准节。因此,其结构十分复杂,参数又多,如果每设计一种导轨架都用三维软件重新建模,需要人工输入的数据很多,工作量大,很容易出错。而各种

标准节主要组成部分基本相同,设计过程中的大部分工作都是重复的。

1.2 现行设计存在的问题

1)在传统的导轨架设计计算时,许多参数的取值都在一定的范围内,设计人员只需参考国家标准并根据经验进行合理选择即可,但在后期分析计算和计算机绘图时,需要重复工作,这无疑导致设计效率低下,造成人力物力的的损耗。

2)当前施工升降机的设计仍然采用传统的 CAD 技术,停留在二维、三维软件的初级使用阶段,运用一些基本的计算理论进行几何上的设计。而安全系统评价、新型方案设计等创新性设计,很大程度上还是依赖于设计者的自身经验和知识,缺乏设计规范与知识的支持,造成设计质量和效率很难再上一个新的台阶。

2 基于 KBE 设计的关键技术

知识工程(KBE)技术是一种面向工程开发全过程的设计方法[2]。企业发展实现信息化进程,KBE 技术是不可或缺的前进动力,其可以在设计、制造生产和维护阶段得到应用,从而提升企业竞争力。

2.1 KBE 系统中知识的获取

知识获取的步骤一般是先认识问题的特征,通过总结、了解、寻找问题求解的相关概念,进行知识梳理,最终建立起知识库系统进行测试。知识的获取方法有手工、自动和半自动知识获取三种方式[3]。其中,半自动知识获取是一种人为输入知识数据和计算机从知识库中获取知识的相结合的过程,NX 软件推出的知识熔接模块能够很好地和数据库结合,实现半自动获取知识过程。施工升降机导轨架的设计知识大都是从设计计算书、标准准则、安全规范书以及试验数据书搜集并通过人工方法输入到计算机数据库中,同时结合知识熔接技术把施工升降机相关的设计规则、原理以及技术专家交流中的经验知识表述出来,存储在知识库中,融入到施工升降机零件设计中,因此本文采用半自动知识获取方法。

2.2 KBE 系统中知识的表示

知识表示利用计算机能够识别的语言表达出来,将客观世界的知识转换为合适的数据形式。知识表示是知识继承的载体,是知识获取和知识推理的首要条件[4]。知识的表示方法多种,本文针对知识熔接技术和数据库技术相结合的工程技术要求,利用基于规则的表示法和面向对象表示法相结合的方法来描述施工升降机相关知识。基于规则的表示法自然灵活、通用性强,允许利用领域知识直接演绎推理,有利于描述一个事件的存在而导致另一个事件的发生并且符合人类的思维模式。但是对于复杂多变的知识概念难以描述。规则表示法分为确定性规则和不确定性规则两种表述形式。施工升降机导轨架的规则知识大都是直线形确定性事件设计,所以本文在施工升降机导轨架设计过程中主要采用确定性规则的表示形式。

面向对象的表示法具有良好的继承性、系统易维护、表达能力强等优点,可以将静态描述特性和动态描述特性的知识同时表达出来和知识的继承的能力,方便知识的存储和修改。对于机械设计而言可以将每个特征看成一个对象,将其中相关的属性规则抽取为可被计算机描述的知识语言。对于一个零件可以归为一个类用 Class 进行表述,将共同特征的属性知识描述类对象之前供类中每一个对象抽取使用。

2.3 KBE 系统中的知识推理

知识推理是实现知识驱动设计的动力核心,针对设计的规则和原理知识被描述为机器语言,根据已知条件利用推理机制推出相对应的结果。按照推理方法,知识推理可分为基于规则的推理(RBR)、基于模型的推理(MBR)和基于实例的推理(CBR)[5]。因为施工升降机相关的设计知识规则和理论已经成熟,趋于稳定状态且比较完善,所以本文采用了基于规则的推理表示方法来描述施工升降机导轨架三维设计规则与事实。基于规则的推理是采用 if – then 形式的推理机制,比较适用于知识体系完整的知识库系统,将知识和理论抽取为具有前后因果关系的规则模式。

2.4 KBE 系统集成技术

本文的 KBE 系统集成技术包括知识集成和系统集成。KBE 系统与之前的传统专家系统相比在产品设计时更加偏重于知识集成,可以实现在产品

设计过程中,充分调动和利用各种知识资源;系统集成方式将 KBE 系统集成到 CAD 系统,增加 KBE 系统的功能,使其变得更加完善。NX 系统为 KBE 系统提供了一个可视化环境,能够利用面向对象语言对设计的三维模型进行建立和修改,利用数据库和电子表格来存储知识信息,以及编辑 Dfa 文件实现知识的传递和规则库的建立。本文为了方便实现知识的集成,采用统一数据库,不需要知识数据的转换,将知识管理系统集成到 NX 系统中,实现知识库中数据的添加、删除和更新以及 KF 模块知识的获取。

3 施工升降机导轨架知识库建立

知识库由数据库、规则库和实例库组合而成,具有信息数据处理和利用的功能。对于施工升降机导轨架快速设计系统,知识库是最核心的一部分,是实现知识为动力的基础。施工升降机零件的知识库结构图如图 1。

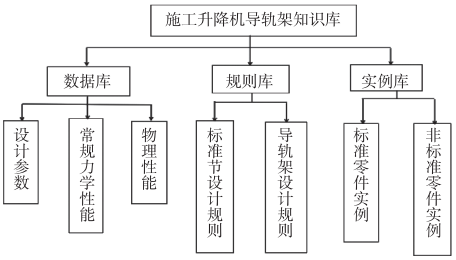


图 1 施工升降机导轨架设计知识库构成图

3.1 工程数据库的建立

工程数据库主要用于存储施工升降机导轨架零件工程数据。数据库主要由导轨架的物理性能、常规力学性能以及几何参数等组成。物理性能主要包括施工升降机导轨架材料、适用范围、弹性模量、泊松比、剪切模量、质量、热处理方式、应用实例等。常规力学性能主要包括屈服强度、重力、强度极限、硬度、工作状态、受力情况等。几何参数主要包括长度、宽度、高度、面积、体积等几何信息。将这些信息存储在 Access 数据库中,用 ODBC 数据库的形式表达,即可实现数据快速传递和共享。

3.2 规则库的建立

规则库是知识库的重要部分,用于存放施工升降机导轨架设计的工程规则[6]。对于设计过程的知识和设计的约束都采用嵌入式源程序法方式表达规则知识。采用基于规则的表达方式将施工升降机零件的相关设计准则和设计方案用 KF 语言描述出来嵌入到 Dfa 文件中。对于施工升降机导轨架的标准节的选取部分规则如下:

规则 1:if(适用范围和技术要求)=(单笼升降机,悬臂高度不超出 4.5m)

then(标准节规格)=(650×200×1508 圆管)

规则 2:if(适用范围和技术要求)=(悬臂高度不超出 7.5m)

then(标准节规格)=(650×650×1508 圆管)

……

3.3 实例库的建立

建立实例库,需要将已有几何参数、力学性能等完善的知识融入到施工升降机导轨架零件中生成实例模型。这些模型主要由 Dfa 文件的实例化建立,少数复杂模型可直接建立零件模型。在 NX/KF 中 Dfa 文件的获取方法有两种,一种是利用 NX/KF 语言直接编辑而成,比如施工升降机标准节的一些零件如主弦管、斜腹杆、螺栓等零件的建立。另一种方法是几何采用机制,利用已建好的导轨架零件模型使用知识融合模块中的 Adoption 来反求零件模型的知识,然后将零件模型转化为 KF 类,用户可以在 KF 导航器中添加数学公式、产生式规则、外部数据库等,进一步修改使其符合 KF 语法规则,然后保存为新的 Dfa 文件。

4 导轨架快速设计系统

4.1 导轨架快速设计系统结构

基于 KBE 的施工升降机导轨架快速设计系统的结构如图 2,主要分为四层,分别是设计知识资源层,设计系统层,集成平台层和用户界面层。设计知识资源层主要是施工升降机导轨架的知识库,包括实例库、数据库和规则库。设计系统层是施工升降机导轨架系统的开发工具,是设计实例模型的核心、知识驱动的动力载体和系统实现运行的中流支柱。集成平台层实现以 NX 软件为平台,将其他的系统集成到 NX 平台中,方便系统操作。用户界面层将用户分为知识领域专家、设计人员和系统管理人员,

知识领域专家负责将设计过程中的知识进行知识表示,不断扩充知识库;设计人员通过交互界面使用系统,辅助整个设计任务的完成;系统管理员负责整个系统的正常运营。

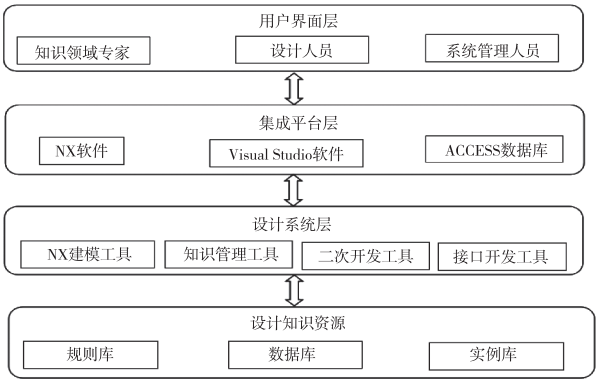


图 2　系统结构框架

4.2　系统用户界面的开发

(1)用户菜单界面

在 NX 软件平台,利用 Menu Script 工具编辑满足用户的菜单样式。设计人员用记事本创建和编辑扩展名为 *. men 的文件,即可得到相应的菜单形式。

本文利用 Menu Script 工具对施工升降机导轨架系统进行菜单界面设计,在 stratup 文件中创建 caidanlan. men,结合施工升降机导轨架实例设计菜单脚本程序,得到施工升降机导轨架系统菜单界面如图 3。

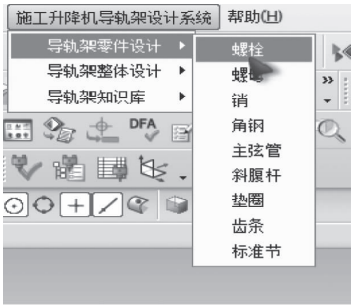


图 3　模块下拉菜单

(2)用户操作界面

NX 的 UI Styler 应用模块提供给用户可视化建立 NX 风格对话框的功能。用户可根据需求选择合适的控件,在属性编辑器中设置对话框名称和提示信息实现数据传输,同时调整控件位置,实现合理布局。本文对于施工升降机导轨架零件的设计界面采用 UI Styler 中提供的 UI 样式编辑器定制系统操作界面对话框。所创建系统界面对话框见下节实例。

4.3　系统应用实例

以 SC 型施工升降机导轨架的组成部件标准节的设计为例,说明该系统的实现过程。运行施工升降机导轨架设计系统,点击菜单栏导轨架零件设计中的标准节,即可加载标准节设计操作界面如图 4,运行结果如图 5。选择需要建立的标准节类型,生成三维实体模型。

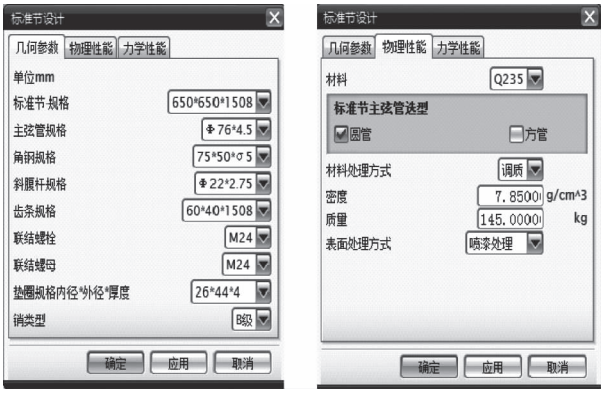


图 4　标准节设计对话框

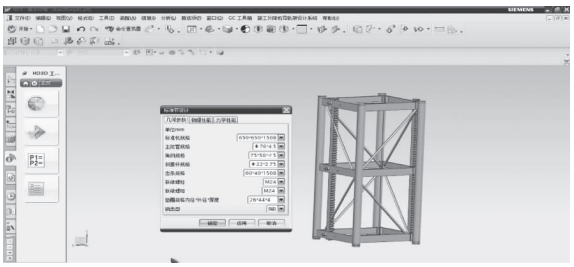


图 5　标准节设计实例

标准节相关知识分为三类,第一类是几何参数,包括标准节规格、主弦管规格、角钢规格、斜腹杆规格、齿条规格、联结螺栓、联结螺母以及垫圈规格等,选择所需这些零件的规格建立标准节模型。第二类是物理性能,选取设计所需材料,读取知识库中相对应材料的密度、质量、热处理方式,为力学计算打下基础。第三类力学性能,针对上述两类知识的选取,计算得到相关的力学知识,节约计算时间。

5　结论

本文针对施工升降机导轨架知识的特点,充分获取现有的设计知识建立知识库,结合知识工程技术,开发基于 KBE 的施工升降机导轨架快速设计系

加强型切口翅片设计

张　轩,沈　鹏
(贵州永红换热冷却技术有限公司,贵州　惠水　550600)

摘　要:以理论分析和试验验证为依据,在普通型切口翅片的基础上,设计出了满足强度和性能要求高的加强型切口翅片。

关键词:换热器　翅片　模具　力学性能　换热性能
中图分类号:TG76　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0039 - 03

Design of reinforced incisional - fins

ZHANG Xuan ,SHEN Peng

Abstract: Based on theoretical analysis and experimental verification,a reinforced incisional - fin which meets the requirements of strength and performance is designed on the basis of the common incisional - fin.

Keywords:heat exchanger,fin,mould,mechanical property,heat transfer performance

0　引言

铝质板翅式换热器是一种高效、紧凑的换热器,在风力发电、工程机械、空气压缩机以及航空换热等领域有广泛的应用。在实际设计过程中,根据不同使用工况的需要,在部分特殊应用领域,换热器性能既要满足换热效率的要求,又要满足产品的重量限制要求。虽然通过优化该换热器的槽板型材、长短封条以及钎接复合板的用材状况,产品重量有所下降,但是不能够满足设计要求,因此必须通过减薄换热器的翅片厚度,来减轻产品重量[1-2]。

统。通过标准节实例验证,本文设计开发的系统,实现了在设计过程中获取知识,动态扩充知识库等功能,极大地方便了设计人员建立三维模型和积累知识,缩短了施工升降机导轨架的开发周期,提高了设计效率。

参考文献

[1]　刘亚飞.施工升降机结构分析计算系统与研究[D].西安:长安大学,2017.
[2]　罗能武.基于知识工程的麻花钻三维设计研究及开发[D].长沙:湖南大学,2008.
[3]　钟秀琴,符红光,余莉,等.基于本体的几何学知识获取及知识表示[J].计算机学报,2010,33(1):167 - 174.
[4]　年志刚,梁式,麻芳兰,等.知识表示方法研究与应用[J].计算机应用研究,2007 ,24(5):234 - 236.
[5]　MUNGER T R. The Development of Representation - Based Methods for Knowledge Engineering of Computer Network[D]. Santa Cruz: University California,2016.
[6]　陈昆,陈沛,陈定方,等.基于知识的模具设计专家系统的研究与开发[J].武汉理工大学学报,2009 ,31(4):551 - 554.

作者简介:朱春阳(1994 -),男,陕西咸阳人,长安大学工程机械学院在读硕士,研究方向:计算机辅助设计技术。

收稿日期:2018 - 06 - 26

翅片减薄之后满足了产品重量以及性能的需求，却增加了生产制造的难度，如果翅片设计不合理，在实际钎焊过程中，将导致产品垮塌，增加生产制造的难度。因此，如何增加减薄翅片的强度十分关键，这也是铝质板翅式换热器生产制造的关键工艺技术之一。

1 设计思路

如图 1 为常用的某切口型翅片，它是一种用量较大且成熟的翅片，大量应用于工程机械以及空气压缩机等领域。铝质板翅式换热器的应用中，其优点是换热效率高[3]，其缺点是强度偏低。因此，在特殊使用状况下，既要保证效率高，又有重量限制时，就需要使用加强型的切口翅片。

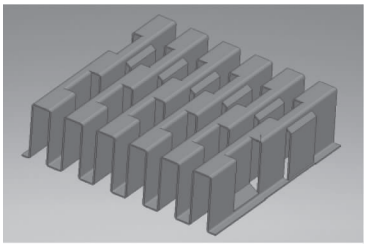


图 1 常规切口翅片视图

加强型切口翅片设计的基本原则是满足换热性能指标，尤其是风阻指标，即“对翅片换热性能影响最小”为基本原则。如图 2 所示，是一种满足要求的加强型切口翅片，通过减少切口、在平翅片处形成三角拐点及在平翅片处错位形成加强筋（即在翅片上加加强筋）的办法实现[4]。从图 2 可看出，原翅片平翅片处节距 N 的平直段被改为两段节距为 N/2 相互错位的平直端，从而在该处形成了一段加强筋。考虑到在板冲成型过程中形成折弯的距离和工艺的可行性，错位量控制在 1.2 ~2 倍料厚，否则材料将在折弯处开裂，工艺不可行。

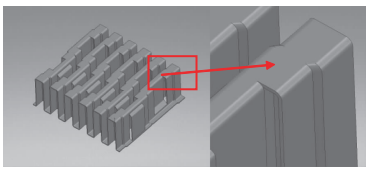


图 2 加强型切口翅片及局部放大视图

2 普通切口型翅片与加强型切口翅片力学性能与换热性能对比

2.1 力学性能对比

为了验证所选翅片加强方式的效果，使用模拟分析的方法，对切口型翅片进行力学性能对比分析。

分析方法：对同等面积（24.325 mm × 23.5 mm）的切口型翅片施以同样大小的力（600 N），以比较它们的应力及位移，模拟效果如图 3（常规切口翅片的应力及位移）和图 4（加强型切口翅片的应力及位移）。

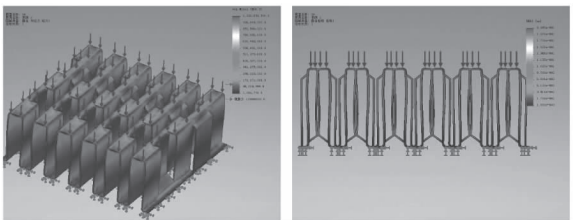


图 3 常规切口翅片的应力及位移

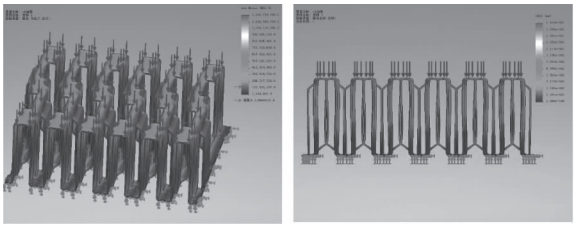


图 4 加强型切口翅片的应力及位移

通过分析得到关键数据如表 1（普通型切口翅片和加强型切口翅片力学数据表）。

表 1 普通型切口翅片和加强型切口翅片力学数据表

分析结果	翅片类型	
	普通切口型翅片	加强型切口翅片
分析面积/mm²	571.64	571.64
压力/N	600	600
最大应力/MPa	1021.7	1234.7
最大位移/mm	0.205	0.167

由表 1 数据分析可知：在相同的外力作用下，普通型切口翅片最大应力为 1021.7 MPa，最大位移为 0.205 mm，而加强型切口翅片在此外力作用下最大应力为 1234.7 MPa，最大位移为 0.167 mm，表明加强型切口翅片的抗倒伏能力明显加强，达到了提升翅片抗倒伏能力的目的。

2.2 换热性能对比

以相同厚度的材料生产同样结构的换热器两台，分别为 A、B，其中产品 A 使用普通型切口翅片，

产品 B 使用加强型切口翅片，其他零件相同，进行性能测试，性能主要测试三个关键指标，即换热效率（油侧标准放热量）、气阻和噪声。

测试的工况油流阻为 139 L/min、迎风面风速 10 m/s、液气温差 40℃，环境温度 24.5℃，测试的数据如表 2（普通型切口翅片和加强型切口翅片产品换热性能数据表）。

表 2　普通型切口翅片和加强型切口翅片产品换热性能数据表

产品类型	性能指标		
	油侧标准放热量 Φ_o/kW	气阻/Pa	噪音/dB(A)
A	31.627	773.22	78
B	34.336	779.09	80

由表 2 数据分析可知：

①相同环境温度和测试工况下，由于加强型翅片增加了扰流效果，换热器的油侧标准放热量由 31.627 kW 增加到 34.336 kW，换热功率相应提升了 8.57%；

②相同环境温度和测试工况下，产品的气阻由 773.22 Pa 增加到 779.09 Pa，气阻增加了 0.76%，对比效率增加比例和测量误差，该指标满足要求；

③噪声由 78 dB(A) 增加到 80 dB(A)，增加了 2.56%，增加后的数据满足客户的噪声指标，可以接受。

3　模具设计要点

加强型切口翅片是在普通切口型翅片的基础上局部改动优化所得，关键要点在凸凹刀齿的配合上，既要形成加强筋起到加强作用，又要使错位在铝材的可延伸范围内，不至于形成新的切口，反而降低了翅片的强度[5-6]，如图 5 和图 6 所示关键控制点。

根据生产实践，参考图 5 和图 6，普通型和加强型切口型翅片模具的设计要点如下：

①凸凹刀齿和平刀齿之间，无间隙配合，切两个刀齿之间的错位尺寸超过 2 倍的材料厚度以上，便于形成切口；

②加强型切口翅片以平刀齿为基础，按照一分为二的方式，形成 1.2～2 倍的料厚错位，便于形成加强筋，起到强化效果。

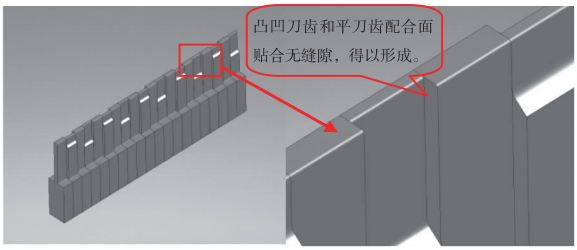


图 5　普通型切口翅片凸凹刀齿和平刀齿配合视图

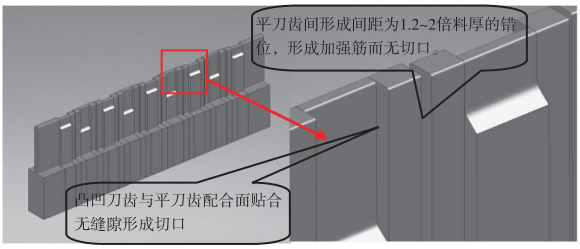


图 6　加强型切口翅片凸凹刀齿和平刀齿配合视图

4　结论

通过理论分析和试验验证，使用加强型切口翅片能够替代普通切口翅片，使用在对强度和性能要求高的特殊场合。

参考文献

[1] 钱颂文. 换热器设计手册[M]. 北京：化学工业出版社，2002.

[2] 余建祖. 换热器原理与设计[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2006.

[3] 沈鹏，张轩. 切口翅片弯曲模设计[J]. 现代机械，2014，5(41)：41－44.

[4] 王校培. 冲压设计资料[M]. 北京：机械工业出版社，1983.

[5] 许发樾. 冲压模具应用实例[M]. 北京：机械工业出版社，1999.

[6] 孙训方，方孝淑，关来泰. 材料力学 II[M]. 北京：高等教育出版社，2002.

作者简介：张轩(1982－)，男，在职研究生学历，高级工程师，主要从事铝质板翅式换热器生产加工制造以及生产运营。

收稿日期：2018－05－16

广角度太阳光智能跟踪系统

刘明强,刘　进,龙海芳,刘　迅,张正祥
(贵州省电子工业研究所,贵州　贵阳 550004)

摘　要:描述了一种在光热发电中使用的低成本、广角度太阳光智能跟踪系统,系统包括控制部分和传感器部分。传感器部分由粗调和精调两级光敏电阻构成,粗调阶段通过五位置的四象限光敏电阻对比实现;精调阶段通过四象限光敏电阻对比实现。控制部分由双轴传动、限位控制、手动调整、电机驱动、光感采集控制和通信构成。系统通过粗调、精调、双轴传动和闭环控制实现对太阳从日出到日落无盲区智能跟踪。系统具有跟踪精度高、反应灵敏、系统稳定、没有动作、成本低、安装、调试简单和易于维护等优点。

关键词:四象限　双轴传动　H 桥驱动　闭环系统
中图分类号:TN98　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0042 - 04

Wide - angle solar intelligent tracking system

LIU Mingqiang, LIU Jin, LONG Haifang, LIU Xun, ZHANG Zhengxiang

Abstract: A low - cost and wide - angle solar intelligent tracking system for photo - thermal power generation is described. The system consists of the control part and the sensor part. The sensor part is composed of two stage photosensitive resistors—coarse tuning and fine tuning. The coarse tuning stage is achieved through the comparison of four quadrant photosensitive resistors in five positions; the fine tuning stage is achieved through the comparison of four quadrant photosensitive resistors. The control part is made up of double shaft driving, limit control, manual adjustment, motor driving, light sensation acquisition control and communication. The system realizes intelligent tracking for the sun from sunrise to sunset without blind area through coarse tuning, fine tuning, double shaft driving and closed loop control. The system has the following advantages: high tracking accuracy, sensitive response, stable system, no action, low cost, easy installation and debugging, and easy maintenance.

Keywords: four - quadrant, double shaft driving, driven by H bridge, closed - loop system

0　引言

在能源与环境问题成为当今世界面临的两个重要挑战时,充分利用取之不尽,用之不竭的太阳能将成为人类必然的选择。目前太阳能利用,主要有太阳能直接利用(太阳能热水器)、将太阳能转变为电能(光热发电、光伏发电)等,要有效提高太阳能利用率,光跟踪系统必不可少。目前太阳光跟踪系统都需要根据安放点的经纬度等信息计算一年中的每一天的不同时刻太阳所在的角度,将一年中每个时刻的太阳位置存储到 PLC、单片机或电脑软件中,都要靠计算该固定地点每一时刻的太阳位置以实现跟踪。且大多采用的是电脑数据理论,需要地区的经纬度数据和设定,一旦安装,就不便移动或装拆,每次移动完就必须重新计算参数、设定数据和调整各个参数;原理、电路、技术、设备都比较复杂的太阳光跟踪系统,非专业人士不能够随便操作。

1　感光元件

感光器件主要分为两类:1)光敏电阻;2)光敏电池。

光敏电阻,是利用半导体的光电效应制成的一种电阻,其阻值随入射光的强弱而改变,具有以下特点:光谱响应宽;测试光强范围宽,即可对强光响应,也可对弱光响应;无极性区分,使用方便,成本低,寿命长;灵敏度高,工作电流大,可达数毫安[2]。

光电池是一种直接把光能转换成电能的半导体器件。其特点是:光生电动势在光照为2000 lx时趋向饱和,即强光不敏感;作为测控元件使用时其特性随温度而变化,温度漂移较大,需采取温度补偿措施或保持温度恒定,设计相对复杂[3]。

2 硬件设计

系统硬件采用控制部分和光感采集部分分离设计,控制器部分主要由限位控制、手动调整、自动跟踪、开关控制量、传感器控制、供电部分、处理器和上行通信部分组成;光感采集部分由采集部分、通信供电部分和处理器部分组成。

控制器部分采用IP65设计,外部采用一个5芯防水航空接头与传感器连接,5芯信号分别为电源正、电源负、外壳接地、数据正、数据负;一个供电开关;两路(水平方位和仰角高度)手动调整开关;两个防水接线孔。

光感采集部分采用IP66设计,外部使用一个5芯防水航空接头与控制器连接,5芯信号分别为电源正、电源负、外壳接地、数据正、数据负;其供电部分采用DC 5V供电,防止由控制器提供经导线(不同长短、大小)造成的供电不稳,内部2.5V~5.5V输入,输出5V的电源重生供电处理,其工作时间由控制器决定,如在夜晚将对其断电,次日日出前重新通电对日进行监测。其系统框图如图1。

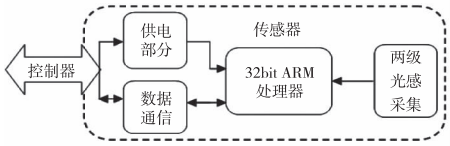


图1 光感采集框图

2.1 广角度光感设计

感光器件选择。自然光照强度,黑夜为:0.00~0.02lx;月夜:0.02~0.3lx;阴天室内:5~50lx;阴天室外:50~500lx;晴天室内:100~1000lx;夏季中午太阳光下:30000~300000lx。根据使用环境要求,感光器件选用光敏电阻。

感光器结构:采用两个四象限区域,通光的直线传播,实现对太阳光广角度和精准跟踪。如图2、3,当光线射入广角度光线感知范围时,由“五个位置-四象限”粗调结构实现广角度光线感知,如图3和4所示,将器件“粗上”和“粗上1”采用最大值法形成一个象限,参与器件“粗下”、“粗东”和“粗西”组成四象限结构。“粗上”和“粗下”组成垂直高度角粗调感应对比,实现向下75°,向上165°,即垂直高度角240°广范围感知;“粗东”和“粗西”组成水平方位角粗调感应对比,实现向东75°,向西75°,即水平方位角150°广范围感知。输出光强对比信号,由控制器处理并控制伺服机构,驱动装置进行姿态调整使其进入精调范围,粗调阶段完成。

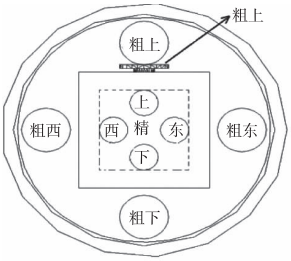


图2 光感分布图(俯视)

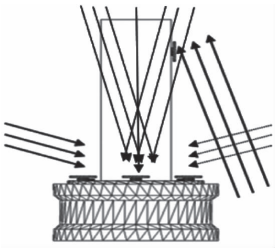


图3 光线感知范围图(左视)

当光线直接射入(或经粗调后射入)精调光线感知范围时,粗调停止,进入精调阶段。如图3和4所示,由“四象限”精调结构实现光线精准感知,“精上”和“精下”组成垂直高度角精调感应对比,实现向下20°,向上20°,即垂直高度角40°范围内的精准感知;“精东”和“精西”组成水平方位角精调感应对比,实现向东20°,向西20°,即水平方位角40°范围精准感知。输出光强对比信号,由控制器处理并控制伺服机构,驱动装置进行姿态调整使其精准跟踪太阳。

2.2 控制部分设计

系统采用“可设时段+闭环系统”方式设计。可设时段,指在不同的地区春夏秋冬四季跟踪开始和停止的时段可以设置[6]。闭环系统,是指系统处于跟踪时段内,由感光部分采集当前跟踪位置信息→控制部分根据位置信息处理是否要姿态调整:①不调整→进入时间间隔(根据精度要求设定)→感光部分采集当前跟踪位置信息;②要调整→根据位置信息处理情况,驱动双轴传动装置进行一次水平方位和垂直高度姿态调整→感光部分采集当前跟踪位置信息[4-5]。其系统框图如图4。

限位设计。系统设计四路限位开关,分别是东、西和上、下限位,均采用常闭设计。通过光电隔离,

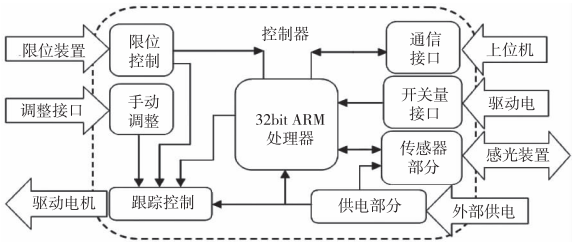


图 4　系统框图

采用微小信号控制大电流，高优先级硬件控制电机驱动使能。当外部限位装置没安装时，内部限位端口处于开路状态，所对应电机驱动是被禁止的。

电机驱动部分。两路（水平和俯仰）H 桥驱动直流电机，通过 H 桥的通、断组合状态来实现用两线控制直流电机的正反转，如图 5，Q1、Q4，Q2、Q3 都截止时，电机处于静止状态；当 Q1、Q4 截止，且 Q2、Q3 导通时，电机往一个方向转动；当 Q2、Q3 截止，且 Q1、Q4 导通时，电机往另一个方向转动。处理器通过基础的日期时间、传感器信号、限位状态和手动控制状态来控制 H 桥的通断组合，实现对两电机的驱动，完成对日跟踪。在这过程中一定要注意 Q1、Q4、Q2、Q3 截止和导通的时序，严禁 Q1 和 Q2 或 Q3 和 Q4 同时导通的情况。

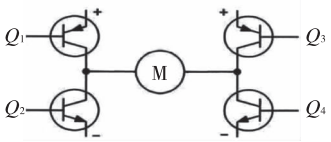


图 5　H 桥示意图

2.3　传动部分

选用双轴回转式减速器，有刷直流行星减速电机，回转式减速器精度≤0.08°，减速比 580∶1，额定电压 DC 24V，额定输出转速为 0.048 rpm，1 秒约转动 0.228°，将其转动周期设为 100 ms 时，转动角度约 0.02°，其最小调整分辨率约为 0.02°，保证了伺服调整精度[1]。太阳每秒转过角度（360° +360°/365）/（24 * 60 * 60）=0.00418°。如要满足精度为 0.1°时，在跟踪上的情况下约 22 s 必须调整姿态。

3　软件设计

软件设计包括：传感器固件；控制器固件；上位机软件。

3.1　传感器固件

传感器固件，其功能相对较少，主要功能有光信号采集和数据传输，采用无系统设计，对于数据采集使用 DMA 自动循环方式。具有结构紧凑、容量小、效率高、稳定等优点。

3.2　控制器固件

控制器固件，其功能相对较多，主要功能为传感器信号采集、上位机通信、自动跟踪处理、手动跟踪处理、按键设置处理、显示处理和参数设置保存等，采用 μC/OS II（是一个可以基于 ROM 运行的、可裁剪的、抢占式、实时多任务内核）系统平台进行设计。主要创建 4 个任务来实现本系统功能，见图 6 流程图。

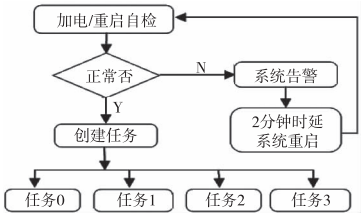


图 6　流程图

任务 0：主要执行上位机通信、接收传感器数据处理、主动向上位机上传信息控制和读取设置参数。

任务 1：主要执行显示处理、参数设置、主动采集传感器数据控制和传感器数据数字滤波处理。

任务 2：主要执行自动跟踪处理、维护处理和异常天气接口处理。

任务 3：主要执行各种运行标志设置/清零，时钟读取和看门狗处理。

3.3　上位机软件

上位机软件，采用基于. net 架构的平台“Microsoft Visual Studio 2008”进行设计，主要功能包括跟踪系统各种参数读取和设置、远程监控、远程跟踪控制和通信日志记录。其主要功能界面分为三个：“常规显示”、“参数设置”和“通信日志”。

4　结论

经过实验数据、现场测试数据和修正，以及现场试运行验证，本系统能够对太阳实现实时跟踪，精度高，反应灵敏，快速定位，系统稳定，没有误动作。实现成本低，安装、调试简单，易于维护。主要在光热、以及光伏发电等太阳能应用领域，有较大市场，能显著提高太阳能的利用率。

参考文献

[1]　李燕斌，谭阳，王海泉，等. 一种新的光伏发电跟踪控制方法研究[J]. 电源技术，2015，39(2)：322－324.

传统制梯形槽电枢冲片法的不足及完善措施

蒋　昕[1,2]，张　宇[1,2]，张跃江[1]

（1. 贵州航天林泉电机有限公司，贵州 贵阳 550003；2. 国家精密微特电机工程技术研究中心，贵州 贵阳 550003）

摘　要：以一台某型号无人机用舵电机为例，阐述了传统作圆求点制梯形槽电枢冲片法，通过对比以作圆求点法所制梯形槽与以 Ansoft 计算所得理想梯形槽差异，分析差异对电机槽满率、热负荷、磁密、负载效率等性能的影响。结果表明，以作圆求交点法所制梯形槽比理想梯形槽槽满率高、绕线工艺性差、电机热负荷大、电枢齿部磁密高，电机额定点负载效率低。最后，提出以作平行线求交点法制理想梯形槽电枢冲片的完善措施。

关键词：作圆求点法　梯形槽 Ansoft　差异　作平行线求交点法

中图分类号：H02K15/02　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002－6886(2018)06－0045－05

Insufficiency and improvement measures of traditional manufacturing method of trapezoidal slot armature stamping

JIANG Xin，ZHANG Yu，ZHANG Yuejiang

Abstract：Taking a rudder motor of a certain type of UAV as an example，the traditional method of making trapezoidal slot armature stamping－circle for point method is described. The trapezoidal slot made by the circle method and the ideal trapezoidal slot calculated by Ansoft are compared. The influence of the difference between the two on the performance of motor slot fulling factor，heat load，magnetic density and load efficiency is analyzed. Compared with the ideal trapezoidal slot，the trapezoidal slot made by circle intersection method has the advantages of high slot fulling factor，poor winding process，large thermal load，high magnetic density of armature teeth and low load efficiency at rated points. Finally，the improvement measures for making trapezoidal slot armature stamping by parallel line intersection method are proposed.

Keywords：circle for point method，trapezoidal slot Ansoft，difference，parallel line intersection method

0　引言

电枢梯形槽的选择对电动机槽满率、损耗、效率、启动转矩、空载电流、额定转速等性能影响很大[1-2]。梯形槽主要有梨形槽和梯形槽（图 1）。梨形槽冲模制造简单，但槽面积较梯形槽小。在同款电机设计中，槽满率、绕组并绕根数、并联路数一定，槽面积越大、可选择线径越大，电机热负荷越小，故一般常用梯形槽。

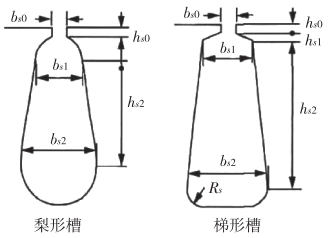


图 1　定子梯形槽

[2]　陈中儒. 光电传感器—光电池[J]. 科技资讯，2008(6)：12－13.

[3]　王彦华，刘希璐. 光敏电阻器原理及检测方法[J]. 装备制造技术，2012(12)：101－104.

[4]　郑恩让，李明勇，宁铎. 双模式互补高精度太阳跟踪系统的设计[J]. 自动化与仪表，2013，28(2)：16－19.

[5]　刘剑，李彤，陈兆华. 太阳能电池板自动跟踪系统[J]. 现代建筑电气，2016，7(2)：58－61.

[6]　刘文，周旺平，王国栋. 基于 DSP 的斜轴式太阳跟踪系统[J]. 电子技术应用，2014，40(5)：24－27.

作者简介：刘明强（1981－），男，本科，中级，研究方向：嵌入式系统、测量控制。

刘进（1964－），男，本科，副高，研究方向：计算机应用、工业控制。

收稿日期：2018－07－26

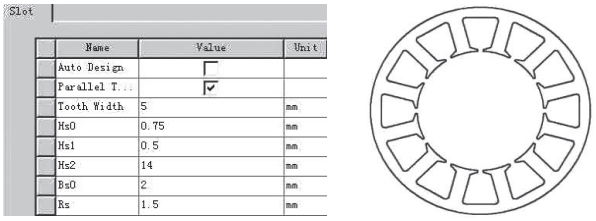
考察以往永磁无刷直流电机产品，电枢冲片梯形槽均是以 Ansoft 计算所得理想梯形槽参数为基础，利用传统作圆求交点法所制。经分析，由传统作圆求交点法所制梯形槽与实际 Ansoft 计算所得理想梯形槽存在较大差异，现以一台某型号无人机用永磁无刷直流舵电机（基本参数如表 1）为例，先阐述传统作圆求点制电枢冲片梯形槽法；然后对比理想梯形槽找出差异，再分析差异对电机槽满率及性能的影响，最后，提出以作平行线求交点法制理想梯形槽电枢冲片的完善措施。

表 1　永磁无刷直流舵电机电磁结构参数

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	1.2	电枢铁芯长/mm	57
额定转速/rpm	3000	斜槽个数/个	1
额定电压/V	25	气隙长度/mm	1
极数	6	极弧系数	0.85
槽数	18	永磁材料	XG28/20
电枢外径/mm	100	剩磁/T	1.08
电枢内径/mm	55	磁钢厚度/mm	4

1　传统作圆求交点制梯形槽法

图 2（a）、（b）分别是所述永磁无刷舵电机梯形槽参数及 Ansoft 计算所得理想梯形槽示意图。



（a）槽型参数　　（b）示意图

图 2　理想梯形槽

利用传统作圆求交点法制梯形槽电枢冲片：

（1）先令定子冲片内圆直径为 ϕa，$\phi a = 55$ 作圆，再分别以 $\phi b = \phi a + 2Hs_0 = 56.5$、$\phi c = \phi b + 2Hs_1 = 57.5$、$\phi d = \phi c + 2\ Hs_2 + 2Rs = 88.5$ 作圆，然后以 $\phi e = 100$ 作冲片外径，最后作中心线 A、B，并交于点 O，其中中心线 A 交 ϕa 于 u 点（如图 3）。

（2）以 O 为基点，将 A 中心线逆时针复制旋转 10°，得 C 线，交 ϕd 圆于 v 点；再以 $Bs_0/2$ 一半槽口宽作 C 线的平行线 D，分别与 ϕa、ϕb 圆交于 m、n 两点（如图 4）。

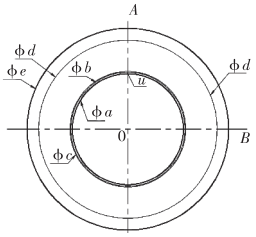


图 3

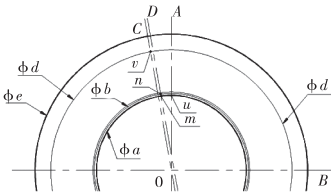


图 4

（3）以 TW/2 一半齿宽作 A 线平行线 E，分别交 ϕc、ϕd 于 x、y 两点（如图 5）。

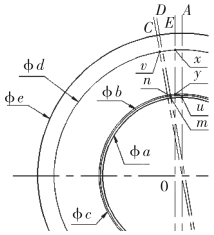


图 5

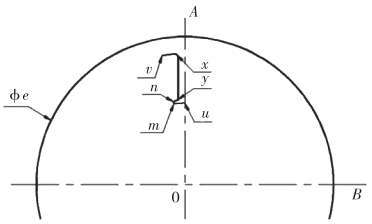


图 6

（4）保留 um 弧线，连接 mn 线段，ny 线段，yx 线段，保留 xv 弧线，再将除 A、B 中心线及 ϕe 圆以外的线删除，再在 x 处倒 $Rs = 1.5$ 的圆角，得图 6。

（5）以 A 线为中心线，对 umnyxv 线镜像，再以 O 为基点，对 umnyxv 线及其镜像线进行阵列，最后按设计尺寸标注得电枢冲片工程图 7。图 8 是按上述传统作圆求交点法所制梯形槽电枢冲片实物图。

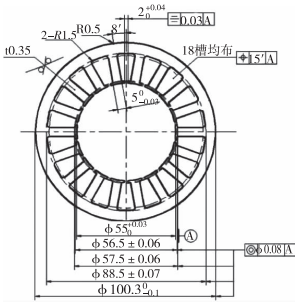


图 7

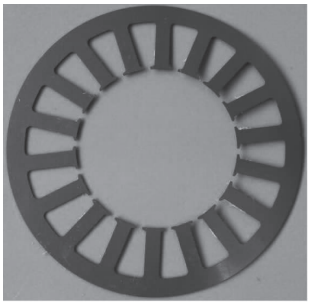


图 8

2　传统作圆求交点法所制梯形槽与实际梯形槽参数对比

局部放大传统作圆求交点法所制单个梯形槽，并测量相关主要参数，如图 9。

对比以传统作圆求交点法所制梯形槽参数与理

想梯形槽参数(如表2),可知,以作圆求交点法所制梯形槽参数中圆角半径 R、槽口宽 Bs_0 及槽口高与理想梯形槽尺寸相同,极靴高 Hs_1 和槽深 Hs_2 比理想梯形槽尺寸偏小。具体对比梯形槽可知,如图10,理想梯形槽是平底槽,而作圆求交点法所制梯形槽非平底槽。

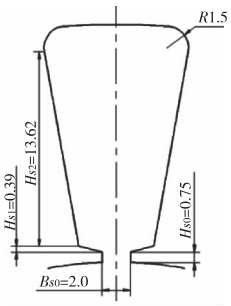


图9 作圆求交点法所制梯形槽参数

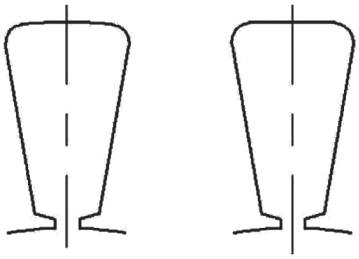


图10 梯形槽对比图

表2 梯形槽参数对比

参数	理想梯形槽	传统作圆求点法所制梯形槽	差值
Bs_0	2.0	2.0	0
R	1.5	1.5	0
Hs_0	0.75	0.75	0
Hs_1	0.5	0.39	0.11
Hs_2	14.0	13.62	0.3

3 分析差异对电机槽满率及性能的影响

3.1 槽满率对比

在所设线径、并联支路数、并绕根数等其他相关参数一定的情况下,将理想梯形槽参数与传统作圆求交点法所制梯形槽参数分别代入 Ansoft 仿真建模计算槽满率,所得结果如图11、图12。

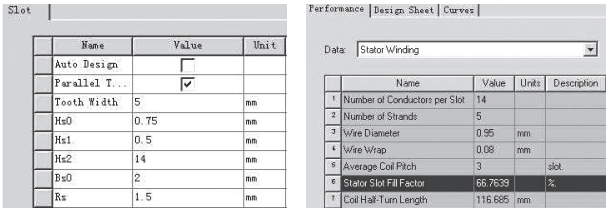


图11 理想梯形槽参数及仿真结果

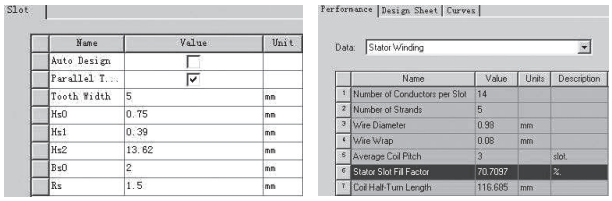


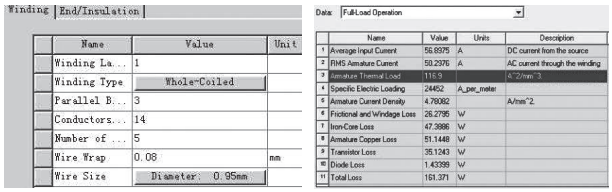
图12 以传统作圆求交点法所制梯形槽参数及仿真结果

对比图11和图12,以理想梯形槽参数计算所得槽满率约66.76%,而以传统作圆求交点法所制梯形槽参数所得槽满率约70.7%,两者相差3.82%。

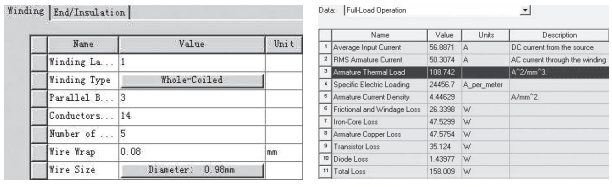
考虑到实际绕线过程中,槽满率越高,绕线工艺性越差,绕线越困难,而以传统作圆求交点法所制梯形槽电枢冲片槽满率经验值一般不超过68%,对比以上槽满率数据可知,若以理想梯形槽参数所制电枢槽满率可达到70.7%,留余取整得70%,此时,电枢绕组可选择规格较粗的漆包线以使热负荷降低。

3.2 热负荷对比

热负荷是衡量电机发热程度的重要参数,热负荷越高,铜耗越高,相同条件下温升越高。现以理想梯形槽参数为基础,以并绕根数、并联支路数、绕组层数等参数为常量,分别选择梯形槽电枢冲片槽满率为66.76%和70%时漆包线线径,并计算热负荷,结果分别如图13(a)、(b)。



(a) 槽满率为66.76%



(b) 槽满率为70%

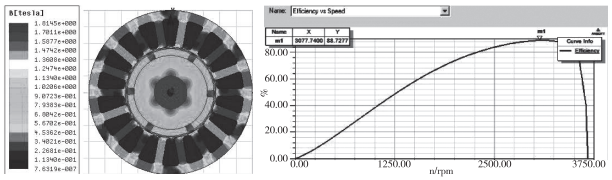
图13 最大线径与热负荷值

根据 Ansoft 计算结果,当槽满率为66.76%时,可选择线径为0.95 mm的漆包线,此时热负荷为116.9;当槽满率为70%时,可选择线径为0.98 mm的漆包线,此时热负荷为108.7。对比可知,热负荷

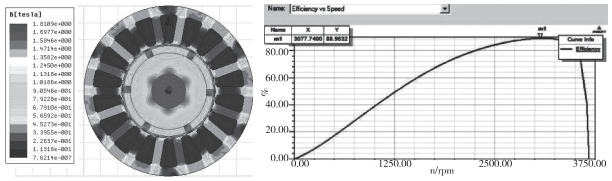
降低了 7%。

3.3 磁密及负载效率对比

在所设所选磁钢性能、漆包线规格、气隙长度等其他相关参数相同的情况下,分别将理想梯形槽参数与传统作圆求交点法所制梯形槽参数代入 Maxwell 建模计算电枢齿部、电枢轭部磁密及电机负载效率图,如图 14(a)、(b)。



(a) 理想梯形槽



(b) 作圆求交点法所制梯形槽

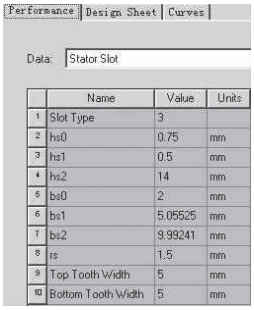
图 14 电枢磁密云图及电机负载效率图

对比图 14(a)和(b)可知,在所设所选磁钢性能、漆包线规格、气隙长度等其他相关参数相同的情况下,两种梯形槽电枢轭磁密基本相同,数值均在 1.6 T 之间内,而由于传统作圆求交点法所制梯形槽电枢齿极靴高度是 0.39 mm 小于理想梯形槽电枢齿部极靴高度 0.5 mm,故以传统作圆求交点法所制梯形槽所得电枢齿部磁密最高是 1.58 T 大于理想梯形槽带电枢齿部磁密 1.56 T(但均在经验值 1.7 T 之内),故此时,在额定点,以传统作圆求交点法所制梯形槽电机效率为 88.72%,而理想梯形槽电机效率为 88.96%,两者相差 0.24%。

综上,以 Ansoft 计算所得理想梯形槽参数为基础,利用传统作圆求交点法所制电枢冲片梯形槽参数与理想梯形槽参数存在差异,若用此种梯形槽电枢冲片,会增大电机电枢槽满率,降低绕线工艺性,延迟产品生产周期,增大电机热负荷及电机电枢齿部磁密,降低电机额定点负载效率。根据相关文献电枢梯形槽不同还会对电机启动电流,启动转矩等性能产生影响[3-4],故用正确的方法制电枢梯形槽,使所制梯形槽参数与理想梯形槽参数相符,对提升电机性能意义重大。下面将阐述以作平行线求交点制理想梯形槽电枢冲片法。

4 作平行线求交点制理想梯形槽电枢冲片法

1)以 Ansoft 计算所得最终理想梯形槽参数为基础(如图 15),分别令电枢冲片内圆直径为 ϕa,外圆直径为 ϕb,并以 $\phi a = 55$、$\phi b = 100$ 作圆,再作中心线 A、B,并交于点 O(如图 15)。



	Name	Value	Units
1	Slot Type	3	
2	hs0	0.75	mm
3	hs1	0.5	mm
4	hs2	14	mm
5	bs0	2	mm
6	bs1	5.05525	mm
7	bs2	9.99241	mm
8	rs	1.5	mm
9	Top Tooth Width	5	mm
10	Bottom Tooth Width	5	mm

图 15

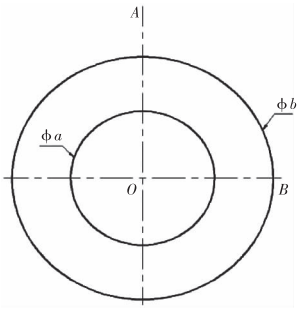


图 16

2)以 O 为基点,将 A 中心线顺时针复制旋转 10°,得到 C 线,交 ϕa 于点 u;以 $bs_0/2$ 一半槽口宽作 C 线平行线 D,交 ϕa 圆于 v 点;以 $bs_1/2$ 和 $bs_2/2$ 分别作 A 线平行线 E 和 F(如图 16)。

3)以 v 点为起点沿 C 线作线段 $vm = Hs_0 = 0.75$,再通过点 m 作 B 线平行线 G;沿 D 线分别以 $Hs_0 + Hs_1 = 1.25$、$Hs_0 + Hs_1 + Hs_2 = 15.25$ 和 $Hs_0 + Hs_1 + Hs_2 + Rs = 16.75$ 为间距作 G 线平行线 J、K、L,其中 J 线交 E 线于 n 点,K 线交 F 线于 x 点,L 线交 A 线分别于 y 点(如图 17)。

4)以 $Rs = 1.5$ 作 L 线与 F 线的倒角,并连接线段 mn、nx;保留弧线 uv、冲片外圆 ϕb、中心线 A、B 和 vmnxy 线,删除其余线,得图 18。

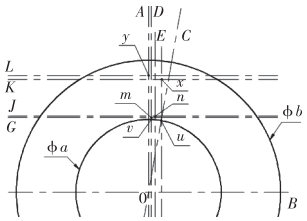


图 17

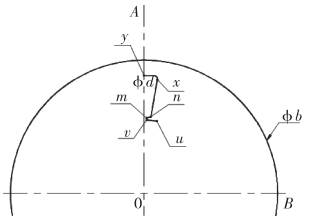


图 18

5)以 A 线为中心线,对 vmnxy 线镜像,再以 O 为基点,对 vmnxy 线及其镜像线进行阵列,最后按电机设计尺寸标注得电枢冲片工程图 19。图 20 是按上述作平行线求交点法所制理想梯形槽电枢冲片实物图。

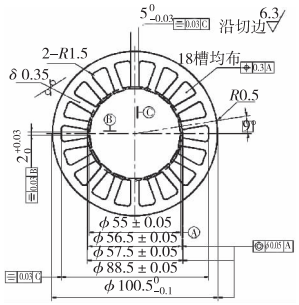


图 19

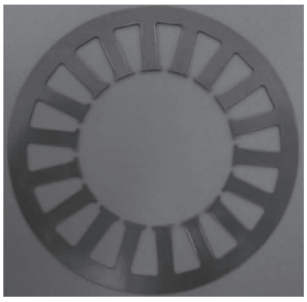


图 20

局部放大以作平行线求交点法所制单个梯形槽，并测量相关主要参数，如图 21。

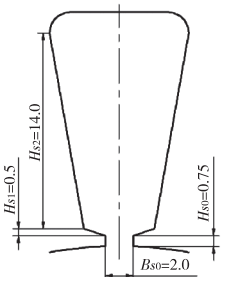


图 21　作平行线求交点法所制梯形槽参数

对比以作平行线求交点法所制梯形槽参数与实际梯形槽参数（如表 3），可知以作平行线求交点法所制梯形槽参数与理想梯形槽参数完全相符，故为保证梯形槽电机槽满率、绕线工艺性及电机性能，建议采用以 Ansoft 计算所得理想梯形槽参数为基础，利用作平行线求交点法制梯形槽电枢冲片。

表 3　　梯形槽参数对比

参数	理想梯形槽	作平行线求点法所制梯形槽	差值
Bs_0	2.0	2.0	0
R	1.5	1.5	0
Hs_0	0.75	0.75	0
Hs_1	0.5	0.5	0
Hs_2	14.0	14.0	0

5　结论

本文以一台 1.2 kW 某型号无人机用永磁无刷直流舵电机为例，阐述了传统作圆求点制电枢冲片梯形槽法；然后对比理想梯形槽找出差异，经分析差异对电机槽满率、热负荷、磁密、负载效率等性能的影响，得出以下结论：

1）以传统作圆求交点法所制梯形槽参数所得槽满率比以理想梯形槽参数计算所得槽满率高，考虑实际以传统法制电枢槽满率经验值一般不超过 68%，若以理想梯形槽参数所制电枢槽满率可达到 70.7%，留余取整为 70%，故若以理想梯形槽参数制电枢槽满率经验值上限可设为 70%，此时，电枢绕组可选择规格较粗的漆包线以降低电机热负荷。

2）当以 70% 为上限，以理想梯形槽参数制梯形槽电枢可选择比以传统法所制梯形槽电枢规格较粗的漆包线，而电机热负荷可降低 7%。

3）在所设所选磁钢性能、漆包线规格、气隙长度等其他相关参数相同的情况下，以传统作圆求交点法所制梯形槽电枢齿部磁密高于理想梯形槽带电枢齿部磁密；在额定点，以传统法所制梯形槽电机效率比理想梯形槽电机效率低 0.24%。

考虑传统作圆求交点制梯形槽法的不足皆是因为传统法所制梯形槽参数与理想梯形槽参数不相符，故本文最后提出以作平行线求交点制理想梯形槽电枢冲片法的完善措施，以此种方法所制梯形槽参数与理想梯形槽参数完全相符。建议在电机研制生产中，将以作平行线求交点制梯形槽电枢冲片法替代传统制梯形槽电枢冲片法，以降低电机槽满率和热负荷，缩短电机研制周期，提高电机运行效率。

参考文献

[1] 孙建龙，李进才，胡欣，等. 槽形对永磁无刷直流电动机的影响[J]. 上海电机学院学报，2013，16(6)：354－358.

[2] 任钦，李帅，原庆兵. 极数与槽型对无刷直流电机损耗的影响[J]. 中国科技论文在线，http://www.paper.edu.cn.

[3] 张晓宇. 定子槽口系数对永磁无刷直流电动机转矩波动的影响[J]. 防爆电机，2012，47(6)：17－21.

[4] 张学成，杨向宇，曹江华. 不等厚磁极对永磁无刷直流电动机性能分析[J]. 微特电机，2014，42(2)：9－13.

[5] 王继强，王凤翔，鲍文博，等. 高速永磁电机转子设计与强度分析[J]. 中国电机工程学报，2005，25(15)：140－145.

[6] 许贞俊，史忠震. 基于 ANSYS 的无刷直流电机转轴的模态分析[J]. 现代机械，2013(4)：29－31.

[7] HONG D K，WOO B C，LEE J Y，et al. Ultra High Speed Motor Supported by Air Foil Bearings for Air Blower Cooling Fuel Cells [J]. IEEE Transactions on Magnetics，2012，48(2)：871－874.

作者简介：蒋昕（1989－），男，汉族，湖南永州人，本科，中级设计师，研究方向：电机、自动化。

收稿日期：2018－07－04

飞机着陆试验中起落架缓冲功能检查方法

汪文君,杨全伟,唐　宁
(中国飞行试验研究院 飞机载荷与强度室,陕西 西安 710089)

摘　要:着陆试验中飞机以起落架最严重的受载状态着陆,需要加强起落架结构、强度和缓冲功能的检查。目前,起落架结构和强度均有合适的检查方法,但其缓冲功能的检查还没有合适的方法。基于此,探索了一种基于飞行实测载荷和缓冲器行程等数据检查起落架缓冲功能的方法。首先分析了起落架缓冲系统的受力,介绍了起落架载荷实测的原理;然后推导了根据实测载荷、缓冲器行程等数据,检查起落架缓冲功能的方法;最后,将该方法应用于某型飞机着陆试验中。结果表明,该方法检查出了起落架缓冲功能异常,确定了功能异常时的起落架状态,为起落架缓冲功能异常分析提供了重要的数据,并为起落架缓冲系统完善和优化设计提供了依据。

关键词:着陆试验　载荷实测　缓冲功能　静压曲线
中图分类号:V217 + .32　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0050 - 04

Inspection method of landing gear buffering function in aircraft landing test

WANG Wenjun, YANG Quanwei, TANG Ning

Abstract: In landing test, the landing gear of aircraft is subjected to the most serious load, it is necessary to strengthen the check of landing gear structure, strength and buffering function. At present, landing gear structure and strength have appropriate inspection methods, but there is no appropriate method to check the buffering function. A method of checking landing gear buffering function based on flight measured load and buffer stroke data is explored. Firstly, the force of landing gear buffering system is analyzed, and the principle of landing gear load measurement is introduced. Then, the method of checking the landing gear buffering function is deduced according to the measured load, buffer stroke and other data. Finally, the method is applied to a certain type of aircraft landing test. The results show that the method checks out the abnormal buffering function of the landing gear, determines the state of the landing gear when the function is abnormal, provides important data for the analysis of the abnormal buffering function of the landing gear, and provides a basis for the perfection and optimization design of the landing gear buffering system.

Keywords: landing test, load measurement, buffering function, static pressure curve

0　引言

飞机起落架主要用于吸收飞机起飞、着陆及滑行时的动能,其内部为缓冲器。起落架载荷试飞[1]的目的是检查起落架的结构强度,着陆试验是其中的重要试飞科目。与正常着陆过程中拉飘飞机以较小的下沉速度着陆不同,强度试飞着陆试验要求飞行员操纵飞机最终以最大使用下沉速度着陆,处于起落架的严重受载状态。

为了保障着陆试验科目的安全实施,飞机着陆后需要加强检查,包括结构、强度和功能的检查。目前,结构和强度均有合适的检查方法,但功能检查更多依赖于定期缓冲器压力测量,并不能满足着陆试验的频繁检查要求。如何根据实测的着陆数据,检查起落架缓冲器功能,提前确认可疑情况,目前还没有合适的方法。

本文以支柱式起落架为列,介绍了一种基于实测载荷和起落架行程等数据的起落架功能检查方法,能确认起落架的缓冲功能是否正常;如果缓冲功能异常,还能诊断功能异常时的缓冲器行程和受载,以为进一步的故障分析提供依据。

1 起落架缓冲系统受力分析

飞机起落架缓冲系统广泛采用油气式缓冲器[2]，主要由外筒、活塞杆、柱塞、油针和密封件等组成。当起落架受到撞击压缩时，气体的作用相当于弹簧，吸收能量；油液通过限流孔使缓冲支柱阻力增大，并摩擦生热消耗能量，使得作用到机体上的载荷减小，同时飞机撞击后很快平稳下来。

油气式起落架缓冲系统的内部分解受力[3-5]见图1，图中：F_s 是缓冲系统的轴向力，是由空气弹簧力 F_a、油液阻尼力 F_h、内部摩擦力 F_f 和结构限制力 F_t 所组成，具体见公式(1)。

$$F_s = F_a + F_h + F_f + F_t \tag{1}$$

对于支柱式起落架，外筒和活塞杆套接在一起形成缓冲支柱，起落架的支柱轴线和缓冲系统的轴线重合，即缓冲系统的轴向力与起落架支柱的轴向力重合。

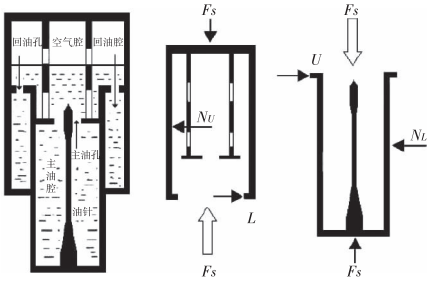


图1 缓冲器受力分析

1.1 空气弹簧力

不考虑油液可压缩，也不考虑缓冲器腔体的体积膨胀，则空气弹簧力[6]：

$$F_a = \left[P_0\left(\frac{V_0}{(V_0 - AS)}\right)^{\gamma} - P_{AMB}\right]A \tag{2}$$

式中：P_0 为空气腔初始压强；V_0 为空气腔初始体积；A 为活塞杆外截面面积；S 为起落架缓冲系统行程；γ 为空气多变指数；P_{AMB} 为大气压强。

1.2 油液阻尼力

缓冲器油孔液压阻力源于油液流过油孔时油孔两侧的压力差。缓冲器主油腔油孔为变油孔，且有侧油孔，则油液阻尼力[7]：

$$F_a = \begin{cases} \dfrac{\rho A_{FL}^3 \dot{s}}{2C_d^2 A_{ori}^2}|\dot{s}| + \dfrac{\rho A_s^2 (A_s - A_{orisc})\dot{s}}{2C_d^2 A_{orisc}^2}|\dot{s}|, & \dot{s} \geqslant 0 \\ \dfrac{\rho A_{FL}^3 \dot{s}}{2C_d^2 A_{ori}^2}|\dot{s}| + \dfrac{\rho A_s^2 (A_s - A_{orise})\dot{s}}{2C_d^2 A_{orise}^2}|\dot{s}|, & \dot{s} < 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中：ρ 为油液密度；C_d 为油液缩流系数；A_s 为油液流入回流腔腔体的截面积；A_{orise} 为反行程回油腔油孔截面积；A_{orisc} 为正行程回油腔油孔截面积；A_{FL} 为活塞杆内部截面积；A_{ori} 为油孔静截面积；式中的 A_{FL} 和 A_{ori} 均为缓冲器行程 S 的函数。

1.3 内部摩擦力

仅考虑由缓冲器内部压力引起的摩擦力[8]：

$$F_f = \pi\mu_b D_b H_b \left[P_0\left(\frac{V_0}{(V_0 - AS)}\right)^{\gamma} - P_{AMB}\right]\frac{\dot{s}}{|\dot{s}|} \tag{4}$$

式中：μ_0 为缓冲器内部摩擦系数；D_b 为轴套直径；H_b 为轴套高度。

1.4 结构限制力

将缓冲器外筒视为弹性体，则缓冲器外筒结构限制力表达式为：

$$F_t = \begin{cases} K_l(-s), & s < 0 \\ 0, & 0 \leqslant s < s_{\max} \\ K_l(s - s_{\max}), & s \geqslant s_{\max} \end{cases} \tag{5}$$

式中：K_l 为缓冲器轴向拉压刚度；$s_{\max}$ 为缓冲器最大行程。

2 起落架载荷实测

起落架载荷实测一般采用应变法[10-11]。飞机飞行前，在起落架主要受力部位加装合适的应变计，在其缓冲器上加装线位移传感器，以测量起落架的结构应变和缓冲器位移。接着进行地面校准试验：首先将起落架固定安装在专门研制的固定台架上，安装连接方式与实际工作状态基本相同；其次，根据起落架在使用中的受载情况，通过加载作动器对起落架分别施加航向、垂向、侧向等载荷及其各向载荷的组合情况；最后，根据校准试验数据，利用多元线性回归方法分别建立了起落架的三向载荷方程。

飞机飞行结束后，将飞行时记录的结构应变和缓冲器行程代入载荷方程，即可获得起落架实际受到的结构载荷。

通过以上分析可以看出，应变法实测是等效于加载点的载荷，包括实际飞行中作用于起落架上的外载荷和起落架系统本身的惯性载荷，即作用于起落架加载点的结构载荷。

3 起落架缓冲功能检查原理

对于支柱式起落架，缓冲系统的下部由活塞杆、

刹车装置和机轮组成，其中刹车装置和机轮的质量等效在活塞杆的机轮轴中心。以活塞杆为受力分析对象，其上端主要承受来自于缓冲系统的轴向力和来自于外筒的支反力，支反力垂直于缓冲系统轴向；其下端主要承受来自于轮胎的垂向、航向和侧向力，受力分析见图 2。

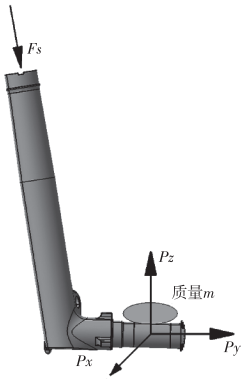


图 2　活塞杆受力分析

将活塞杆所受到的力均投影至缓冲器的轴线上，并根据牛顿第二定律可得：

$$F_s - P_z\cos(\alpha) - P_y\cos(\beta) - P_x\cos(\gamma) = ma_s \quad (6)$$

其中：α、β 和 γ 分别为 P_z、P_y、P_x 与缓冲系统轴线之间的夹角。

如果 $\gamma = 90°$，则 $\alpha + \beta = 90°$，式(6) 可以转化成：

$$F_s - P_z\cos(\alpha) - P_y\sin(\alpha) = ma_s \quad (7)$$

同理将三向加速度投影至缓冲系统轴线方向：

$$a_s = -a_z\cos(\alpha) - a_y\sin(\alpha) \quad (8)$$

把式(8) 代入式(7)：

$$F_s - P_z\cos(\theta) - P_v\sin(\theta) = m[-a_z\cos(\theta) - a_v\sin(\theta)] \quad (9)$$

$$\Rightarrow F_s = (P_z - ma_z)\cos(\theta) + (P_v - ma_v)\sin(\theta) \quad (10)$$

其中：$P_{z实测} = (P_z - ma_z)$、$P_{y实测} = (P_y - ma_y)$。

根据应变法起落架载荷测载原理可知，$P_{z实测}$ 和 $P_{y实测}$ 分别为应变法实测的轮轴中心 Z 向和 Y 向的结构载荷。

因此，飞机飞行结束后，将实测应变和缓冲器行程带入载荷方程，可获得作用于起落架轮轴中心的结构载荷，将其分别按式(7)投影至缓冲支柱轴线方向可得缓冲系统的轴向力。

同时，根据实测的缓冲器位移计算其一阶导数，将其带入式(3)可获得缓冲系统的油液阻尼力。

将缓冲器轴向力减去阻尼力，获得气弹力和摩擦力；绘制“缓冲系统行程—气弹力和摩擦力”曲线，与静压曲线进行对比，根据两条曲线的差异情况确定起落架缓冲功能是否异常，如果异常，根据异常出现的起始点确认异常时的缓冲器行程，并记录起落架载荷。

4　应用实例

某飞机起落架采用外八式布局，主起落架均为支柱式起落架，其中，主起落架缓冲系统航向偏角为 0°；缓冲系统侧向偏角为 7.9°。该飞机进行着陆试验时，以正常着陆重量、最大使用下沉速度 3.0 m/s 着陆后，需要确定着陆过程中起落架缓冲功能是否正常，为下一阶段飞机飞行提供依据。

以右主起落架缓冲功能检查为例：

首先，将着陆试验实测的应变和缓冲器行程数据代入标定试验获得的载荷方程中，计算出起落架轮轴处承受的结构载荷，包括垂向、航向和侧向结构载荷，绘制出实测起落架载荷的时间历程曲线见图 3，图中：P_z、P_x 和 P_y 分别为右主起的垂向、航向和侧向载荷。

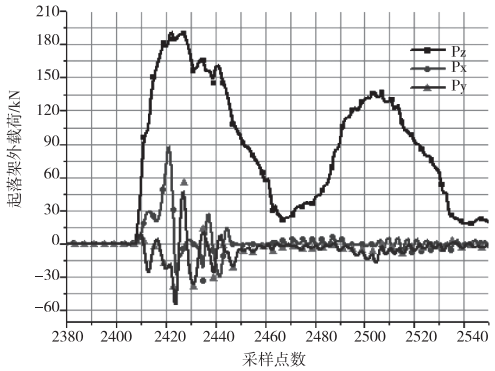


图 3　飞机着陆后主起落架实测载荷

再次，将起落架实际受到载荷按式(10)分别投影至缓冲器轴线方向，其中 $\gamma = 90°$、$\alpha = 7.9°$，可以获得缓冲系统轴向载荷，其变化曲线如图 4，图中：F_s 为右主起缓冲系统轴向载荷。

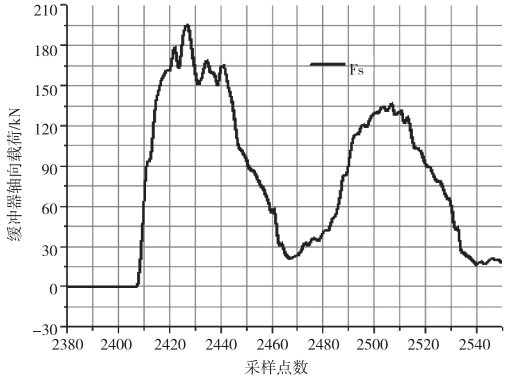


图 4　主起落架缓冲器的载荷

再次,根据实测缓冲器行程计算缓冲器行程的一阶导数,将得到的缓冲器行程的一阶导数带入起落架缓冲器油液阻尼计算公式(3)中,计算出缓冲器的阻尼力,并根据式(1)用起落架缓冲系统轴线方向上的载荷减去缓冲器油液阻尼力,获得到缓冲器的空气弹簧力和内部摩擦力。

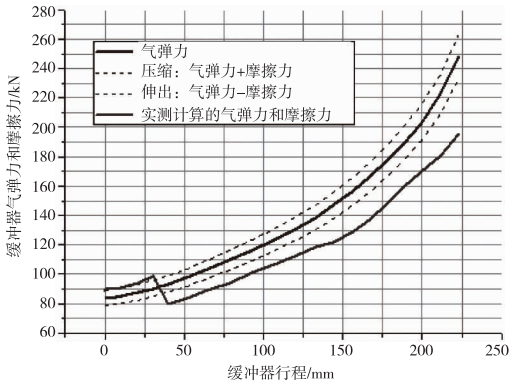


图5 缓冲器行程-气弹力和摩擦力对比图

最后,以实测缓冲器行程为X轴,缓冲器的气弹力和摩擦力为Y轴,绘制出"缓冲器行程—气弹力和摩擦力"曲线,并与静压曲线放置一起,此处只绘制了第一个压缩行程,如图5。从图中可以看出,在缓冲器行程0~30 mm时,实测"缓冲器行程—气弹力和摩擦力"与压缩行程得静压曲线基本一致,可以肯定此时起落架的缓冲功能是正常的;在缓冲器行程30~40 mm时,实测"缓冲器行程—气弹力和摩擦力"与压缩行程的静压曲线差异明显,实测的气弹力和摩擦力随行程增加反而变小了,可判断起落架缓冲功能此时出现了异常。异常时的缓冲器行程为30 mm、垂向载荷为100 kN、航向载荷为30 kN、侧向载荷为-30 kN;在缓冲器行程40 mm以后,实测"缓冲器行程—缓冲器气弹力和摩擦力"与压缩行程得静压曲线产生了明显差异。

飞行数据处理结束后,本文作者所在的项目组将以上情况通知了该型飞机的机务维修大队,机务维修大队进行了缓冲器压力测量,测量结果显示:右主起缓冲系统压力不足,起落架缓冲系统发生了漏气故障。

5 结论

针对着陆试验中飞机起落架缓冲功能检查并没有合适方法的问题,本文探索了一种基于飞行实测载荷和缓冲器行程等数据绘制实测的"缓冲器行程—气弹力和摩擦力"曲线,并将其与标准静压曲线进行对比,以判断起落架缓冲功能正常与否的方法。试验应用结果表明,该方法能根据实测试飞数据判断起落架的缓冲功能,满足了着陆试验中起落架缓冲功能的频繁检查需求,为试验的安全实施提供了保障;同时该方法还能确定缓冲功能异常时的起落架状态,为起落架缓冲功能故障分析提供了重要的数据,并为起落架缓冲系统的完善和优化设计提供了依据。

参考文献

[1] 国防科学技术工业委员会. GJB67.4A-2008 军用飞机结构强度规范第10部分:飞行试验[S]. 北京:国防科学技术工业委员会军标出版发行部,2008.

[2] 牟让科,胡孟权. 飞机非对称着陆和滑跑载荷分析[J]. 机械科学与技术,2000(s1):72-74.

[3] 陈立平,张云清,任卫群,等. 机械系统动力学分析及ADAMS应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[4] 晋萍. 飞机起落架动态性能仿真分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2003.

[5] 陈文华,贺青川,张旦闻. ADAMS2007机构设计与分析范例[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

[6] 刘晖,顾宏斌,吴东苏. 基于高速开关阀的起落架着陆冲击载荷控制[J]. 机械科学与技术,2007,26(8):1055-1058.

[7] 顾宏斌,丁运亮,吴云生,等. 油液压缩性对减摆器工作特性的影响[J]. 南京航空航天大学学报,1999,31(6):626-633.

[8] LICHTAROWIZC A, DUGGINS R K, MARKLAND E. Discharge coefficients for incompressible Non-cavitating flow through long orifices[J]. Journal of Mechanical Engineering Science,1965,7(2):210-219.

[9] 孙世峰. 某型飞机起落架的着陆动态性能研究[D]. 吉林:吉林大学,2009.

[10] 杨全伟,何发东,汪文君,等. 飞机起落架载荷测量中的线性变换与鲁棒性[J]. 应用力学学报,2013,30(4):308-612.

[11] 克利亚奇科 M P,阿尔纳乌托夫 E B. 飞机强度飞行试验(静载荷)[M]. 汤吉晨,译. 西安:航空航天部《ASST》系统工程办公室,1992.

作者简介:汪文君(1984-),男,硕士研究生,研究方向:飞机载荷与强度。

杨全伟(1972-),男,硕士研究生,研究方向:飞机载荷与强度。

唐宁(1989-),男,硕士研究生,研究方向:飞机载荷与强度。

收稿日期:2018-08-22

基于 ANSYS Workbench 的直通式截止阀流道的分析

陈　鹏[1]，张　寒[1]，罗　双[2]，樊学良[1]，陈廷兵[3]
（1. 成都大学 机械工程学院，四川 成都 610106；2. 成都创奇汽车制造有限公司，四川 成都 611830；
3. 成都工业学院 机械工程学院，四川 成都 610031）

摘　要：以直通式截止阀为模型进行研究，在阀体中利用阀芯的跨度来控制阀道中介质的流量，达到控制阀门出口的流体压力的目的。运用 SolidWorks 对直通式截止阀的结构进行建模，并运用 ANSYS Workbench 软件中的 Fluid Flow（Fluent）和 Fluid Flow（CFX）模块对其流道的压力进行分析，当介质在相同压力的情况通过不同开度的流道分析流道压力的变化情况，从而获得其压力图和流线图，为提高和优化截止阀内流道结构和性能提供理论依据。

关键词：直通式截止阀　ANSYS Workbench　压力　开度
中图分类号：TB 657　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1002－6886（2018）06－0054－03

Analysis of flow channel of straight－through globe valve based on ANSYS Workbench

CHEN Peng，ZHANG Han，LUO Shuang，FAN Xueliang，CHEN Tingbing

Abstract： Taking the straight－through globe valve as the model，the span of the spool in the valve body is used to control the flow of the medium in the valve passage，as to control the fluid pressure at the valve outlet. The structure of straight through globe valve is modeled by SolidWorks. Fluent and CFX modules in ANSYS workbench software are used to analyze the pressure in the flow passage. By analyzing the change of flow pressure under different opening degrees，the pressure chart and streamline diagram are obtained. It provides a theoretical basis for improving and optimizing the structure and performance of the globe valve.

Keywords：straight－through globe valve，ANSYS workbench，pressure，opening

0　引言

直通式截止阀在生活和工业生产中已经得到了广泛的运用，其应用在流体的控制中耐磨性与密封性较好，开闭容易，易操作，产品的生产难度不高，方便维护，在中低压与高压管道中都可以使用。直通式截止阀工作原理：利用阀杆压力，让阀瓣密封面与阀座密封面紧密结合，阻止流体介质在阀道之中流通，同时也可以用来调节流体流量的大小。由于截止阀内流道液体会对截止阀壳体造成冲击与腐蚀，所以通过对截止阀内部的复杂流道流场进行数值模拟，分析阀门内部流场压力的特性变化，从中得出流体介质会对阀体具体哪一部分造成损伤。

1　研究内容

截止阀内部的流场数值研究分析已成为该领域研究的热点，以我们所建立的截止阀模型为研究对象，选取截止阀在常温，低压（PN16），公称压力 DN 为 50 的条件下进行截止阀内部流场的数值分析。首先要对手动直通式截止阀进行结构上设计，利用 Solidworks 进行三维建模，然后将其中的流道模型导入 ANSYS 软件进行我们所需要的分析计算。运用其中的 Fluent、CFD 模块来模拟通过阀道的介质在阀道中所产生的漩涡、水锤等介质状况进行准确的分析，为介质对阀道的冲击预测和防范及流道的结构优化提供一些理论基础。

2 直通式截止阀的模型建立

为了更直观地了解直流式截止阀的结构形式与运动状态，为接下来的流场分析提供模型，首先对于我们所设计直流式截止阀进行三维建模，构成一个完整的阀体结构。所建立的直通式截止阀模型如图1。

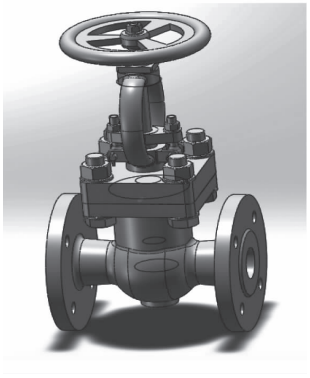


图1 阀体结构图

对直通式截止阀结构进行三维建模之后，通过剖面图可以直观清晰的了解到截止阀体腔内流道的结构。现参考装配体剖面图，单独对截止阀体腔内流道进行三维建模，针对阀瓣的不同开度。分别建立如图2：直通式截止阀阀瓣的阀开度分别为公称直径0%（1 mm）、15%、30%、45%时的四种流道状态外部结构相同的三维模型。

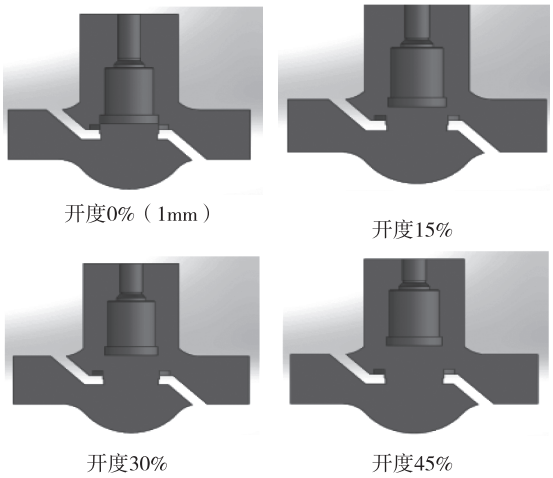


图2 流道外观图

3 直流式截止阀流体场分析

3.1 直流式截止阀网格划分

在ANSYS软件中用来分析流体运动的是Fluent模块，对直通式截止阀的结构分析不是运用其几何模型，而是需要对其几何模型进行网格划分。首先根据机械结构尺寸利用SolidWorks三维软件绘制出该结构的三维模型。然后由几何模型的外观形状来看，在该分析中的网格划分应采用Gambit模块网格的划分方式，因为Gambit模块网格常用在圆或圆弧模型，同时Gambit模块根据自己的运算可生成复杂流道[1]。在网格划分时，因阀体底部区域受力较大则需要对底部局部地方进行网格细化，故在该区域的网格划分相对要密集一些，划分后的内部流场如图3。

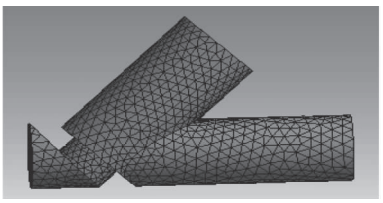


图3 直流式截止阀生成的网格

3.2 确定流体边界条件

分析结果是否准确取决于流体边界条件的设置。该流体的仿真运用的是Fluent模块，由于仿真时设置的流体状态是在理想状态下。在该阀体中流过的介质选用水，其密度为1000 kg/m^3，动力黏度设置为0.001055 kg/ms，公称压力为1.6 MPa，流体进入的阀体是湍流状态，则需要运用$k-e$模型。入口的速度条件设置为1.5 m/s，出口为自由出口，壁面条件为静止壁面[2-3]。

3.3 Fluent计算设置

首先进入Fluent的计算编辑模块，选择计算单位，然后进行参数设置，再一个就是设置求解器，在求解器设置中需要选择Pressure-Based（基于压力法求解器），使用压力修正算法，擅长求解不可压缩流动；在Velocity Formulation中选择Absolute（绝对速度）；在Time中选择Steady（稳态）。截止阀中的介质在里面流动时，由于阀体内部结构的复杂性，将会使速度在阀体中有较多的变化，形成湍流。因此，本文选用湍流模型对流体场进行分析。而选用标准$k-e$模型因为其是湍流模型中应用最广的模型，其具有较高的稳定性、经济性和精度[4]。计算结果如图4。

4 Fluent流场分析结果比较

阀体在不同开度情况下所受力不同，且不同的开度在一定条件下也控制着阀体流量的大小，所以要对直通式截止阀的流道进行有限元分析，研究阀

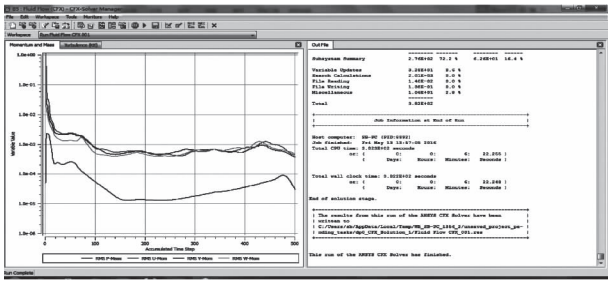
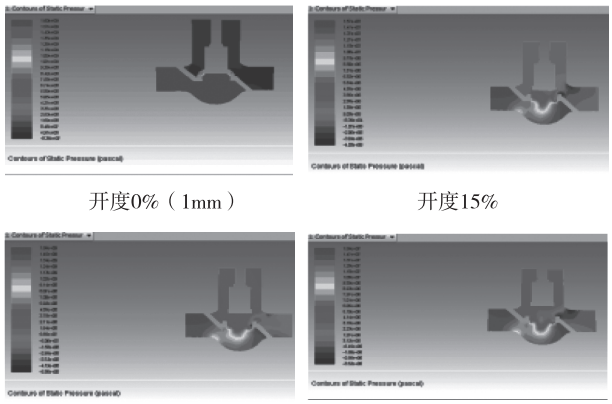


图 4　计算结果的残差曲线

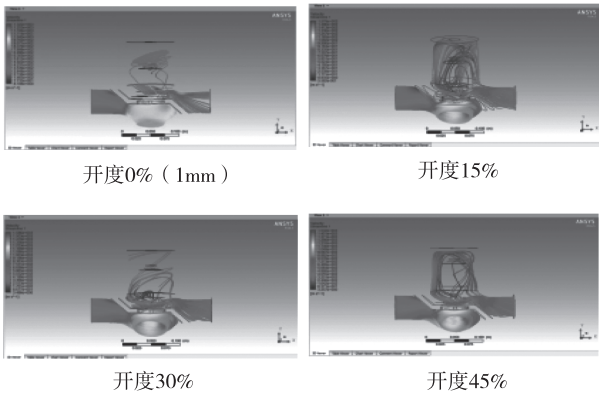
体流道的具体受力情况，可以从截止阀的压力图和流线图的对比中看出趋势和规律。



开度0%（1mm）　开度15%

开度30%　开度45%

图 5　压力图对比



开度0%（1mm）　开度15%

开度30%　开度45%

图 6　流线图对比

通过对流道的有限元分析可以看出：在阀瓣开启时，流道所受压力最大，随着开度逐渐增加，阀道流速逐渐增加，流道所受力逐渐减小，在开度达到15%～30%时，流速达到最大，再继续增加开度，对流速的影响可以忽略不计，但通过比较 4 种状态可以看出，阀瓣开度越大，阀瓣上压力的结集范围越小。在流线图中也可以清晰看出流体在阀体底部形成涡流，流体在流道中的运动路线也可以找到。这为流道的受力分析，流体冲击的预测和防范及流道的结构优化提供了一些基本的理论基础。

5　结论

对阀体的流道进行了简单的有限元分析，从结构分析中可以看出阀体的进出位于同一水平线上，但是流体介质在通过阀座时会与该水平线呈现出一定的夹角，这样会改变介质在阀体中的平稳状态。通过 Fluent 软件的分析可以得出在不同开度的情况下介质对阀体的压力，随着开度的增加对阀道的压力减小，从而减少了对阀瓣压力的冲击，同时通过分析可以得出压力在阀壁应力集中的位置。该结果可为阀体的结构设计提供理论数据的支持。

参考文献

[1]　丁欣硕，凌桂龙. ANSYS Workbench 14.5 有限元分析案例详解[M]. 北京：清华大学出版社，2014.

[2]　陈瑜，魏文鹏，张立祥，等. 基于 Fluent 的截止阀壳内流道流场分析[J]. 煤矿机械，2013，34(10)：90－91.

[3]　张双德，张希恒，赵卿. 直通单座调节阀阀芯形面优化设计[J]. 阀门，2010(4)：5－7.

[4]　易金玲，贾跃虎，王晓娟，等. 基于 Fluent 的径向柱塞泵内流道流场分析[J]. 流体传动与控制，2012(2)：28－30.

作者简介：陈鹏(1989－)，硕士，从事机电一体化技术研究。

收稿日期：2018－07－04

基于应变法的非常规细长拉杆飞行载荷实测技术

李志蕊，吴　波，高腾龙
（中国飞行试验研究院 飞机所，陕西 西安 710089）

摘　要：操纵舵面铰链力矩测量是飞机飞行载荷实测的重要部分，传力拉杆（连杆）载荷实测是铰链力矩测量关键手段。以某型飞机舵面拉杆载荷测量为例，提出基于应变法的非常规细长拉杆飞行载荷实测技术，并将其用于该机定型试飞中。结果表明，该方法可有效用于非常规细长拉杆飞行载荷实测；如果选择合适的应变改装位置，类似结构可只进行单向载荷校准试验。

关键词：飞行载荷实测　铰链力矩　应变法　非常规细长拉杆
中图分类号：V217 + .32　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002 - 6886(2018)06 - 0057 - 04

Flight load measurement technology of unconventional slender rod based on strain method

LI Zhirui，WU Bo，GAO Tenglong

Abstract：Hinge moment measurement of control surface is an important part of new type aircraft flight load measurement. The measurement of force transfer rod load is the key measure of hinge moment measurement. Taking the load measurement of an aircraft rudder rod as an example，the flight load measurement technology of unconventional slender rod based on strain method is put forward and applied to measure flight load at certain aircraft. The results show that the method can be effectively used to measure the flight load of unconventional slender rod. Only a unidirectional load calibration test is needed for similar structures，if a suitable strain modification location is selected.

Keywords：flight load measurement，hinge moment，strain method，unconventional slender rod

0　引言

飞行载荷实测是验证飞机结构完整性、完成新机定型必须进行的试验项目。飞机载荷测量主要方法有：应变法、压力法及其他成熟的方法，还可以使用加速度计、热测试设备及外挂外载荷测试。压力测量法不方便实施且耗费较高，通常采用应变电桥测量法来测量飞行载荷[1]。应变法主要思想是通过地面校准试验来建立应变电桥与加载载荷之间的对应关系（即载荷模型），飞行中将实测应变代入载荷模型，即可得到飞行实测载荷。

飞机操纵舵面铰链力矩测量是飞机飞行载荷测量的一部分，飞机操纵舵面铰链力矩是舵面气动性能的重要参数，可以通过理论计算和风洞试验的方法获得。由于舵面位于安定面后缘，气动力复杂，受到的影响因素较多，难以计算准确；另一方面，风洞试验中由于试验流场难以模拟真实流场而导致模型难以完全模拟实物。因此飞行载荷实测操纵舵面铰链力矩变得非常重要[2-3]。目前针对铰链力矩的测量主要采用间接法[4-5]。首先通过在飞机操纵舵面传力件上粘贴应变计电桥，通过脱机校准建立应变计电桥与校准载荷之间的关系（即载荷模型），将飞行实测应变代入载荷模型测得传力件载荷，再通过传力件与舵面铰链轴之间的几何关系，推导得出操纵舵面铰链力矩。

本文以某型飞机操纵舵面舵机拉杆为例，详述应变法进行非常规细长拉杆飞行载荷实测技术。

1　舵面结构分析

某飞机活动舵面机构主要由舵机、舵机拉杆和传动接头等部件组成，如图 1，舵机拉

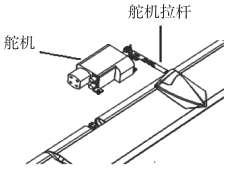


图 1　飞机舵面结构

杆为主要传力件。飞行时,拉杆沿轴向运动带动舵机,从而引起舵面的上下偏转。

2 应变电桥改装

通过结构分析可知,飞行中该拉杆主要承受轴向拉压载荷,要测得拉杆拉压载荷,需要在拉杆上粘贴垂直组合应变计。常规等截面细长拉杆一般在拉杆中间对称粘贴应变计,对侧组桥即可。该机拉杆属于非常规细长拉杆,结构如图 2。拉杆结构左右对称,由螺纹杆、耳环套筒(内含螺纹)、连接螺栓等组成,其中螺纹杆直径 6 mm,套筒直径 14 mm,图中标出了套筒内部螺纹区域。

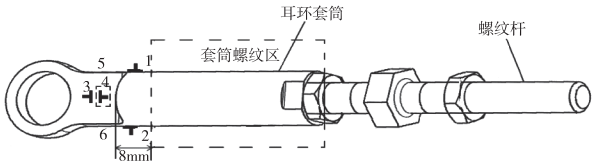


图 2 拉杆结构及应变计位置示意图

该拉杆结构中间螺纹杆不适合粘贴应变计;耳环套筒螺纹段与螺纹杆相对位置不固定,受载时套筒传力路径不固定。此外,受尺寸和结构限制,5 号、6 号点受尺寸限制,无法进行应变电桥改装工作。因此,适合粘贴应变片的位置为 1 号—4 号点,其中 1 号和 2 号点位于套筒实心区域,位置对称,3 号和 4 号点分别位于腹板的正面与反面,位置对称。

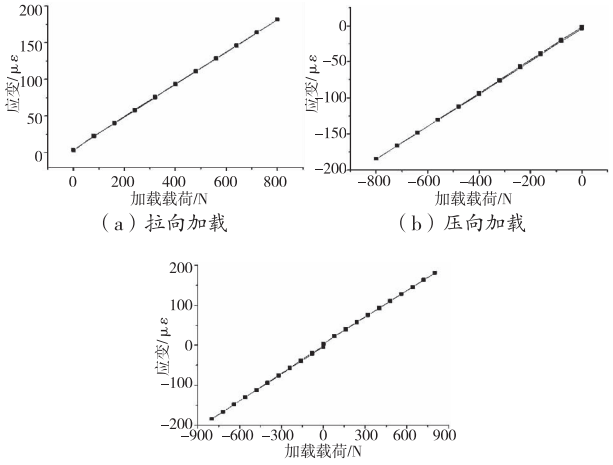
图 3 载荷校准试验

应变改装中,在 1 号和 2 号粘贴应变计电桥组全桥,记为电桥①。3 号和 4 号点粘贴应变计电桥,记为电桥②。应变计电桥改装采用的是 90°垂直应变计,每组内含有 2 个方向互成 90°的应变计,两组应变计组成 1 个惠斯通全桥。应变改装时采用对侧组桥的方法,可有效消除其他载荷和温度的影响,并增大应变计响应的输出量级[6]。

3 地面校准试验

地面校准试验时,将加装了应变计电桥的拉杆采用专门研制的约束装置安装在拉压试验机上进行载荷校准试验(图 4),试验分拉向加载和压向加载两种,校准载荷沿拉杆轴向施加。每种校准载荷施加两次,从 0 开始,分十级施加到最大校准载荷(本次试验,拉向最大校准载荷为 800 N,压向最大校准载荷 -800 N),然后分十级卸载到 0,试验中同时记录应变电桥响应和校准载荷。

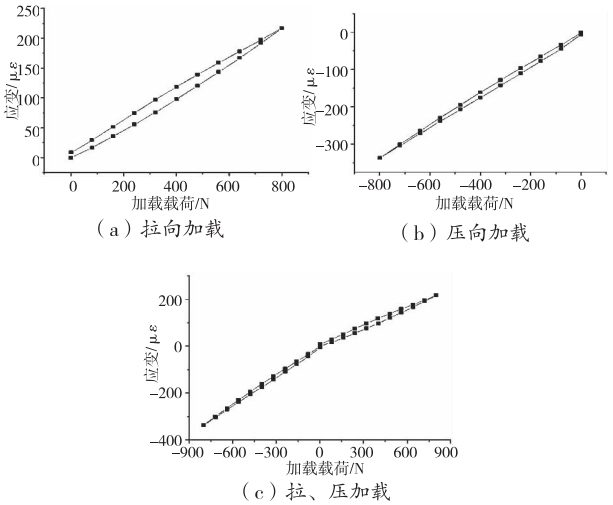
图 4 为载荷校准试验过程中应变电桥①随加载载荷的变化曲线。图 5 为载荷校准试验过程中应变电桥②随加载载荷的变化曲线。



(a)拉向加载 (b)压向加载

(c)拉、压加载

图 4 电桥①加载载荷 - 应变响应关系



(a)拉向加载 (b)压向加载

(c)拉、压加载

图 5 电桥②加载载荷 - 应变响应关系

从图 4 可以看出,在载荷校准试验中,电桥①的响应随拉向和压向校准载荷都呈现出良好的线性相关性。从图 5 可以看出,电桥②在拉向载荷校准中,呈现较差的线性相关性;在压向载荷校准试验中,线性相关性较好。

为更好说明电桥响应,给出量化考核结果。典型的用于评定应变计电桥载荷校准结果好坏的手段是响应系数。该系数定义为[7]:

$$\eta = \frac{\varepsilon}{F} \tag{1}$$

式中:ε 为应变计电桥输出,单位 $\mu\varepsilon$;F 为施加校准载荷,单位 N;η 为电桥响应系数,单位 $\mu\varepsilon$/N。

同时,试验数据的线性相关性用线性相关系数 R 大小来判断,该值在 $-1 \sim 1$ 范围内。当 $|R|$ 越接近 1 线性质量越好。线性相关系数 R 的计算公式为:

$$R = \frac{n\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i F_i - \sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i \cdot \sum_{i=1}^{n}F_i}{\sqrt{n\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i\right)^2}\cdot\sqrt{n\sum_{i=1}^{n}F_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}F_i\right)^2}} \tag{2}$$

通过线性拟合得到两个电桥的响应系数和线性相关性如表 1。

表 1　　线性拟合结果

电桥编号	拉向加载		压向加载		拉、压加载	
	响应系数	相关系数	响应系数	相关系数	响应系数	相关系数
①	0.222	0.9999	0.228	0.9999	0.231	0.9998
②	0.267	0.9929	0.414	0.9986	0.345	0.9926

从表 1 拟合数据可看出,电桥①对拉向载荷和压向载荷的响应都很灵敏,且响应系数相当;拉向和压向数据合并进行拟合时,相关系数为 0.9998,满足测载要求,拟合曲线如图 5(c)所示。由此可知,电桥①对拉向加载和压向加载响应情况一致,在有限的试验条件下,只进行单向加载试验,即可满足测载要求。

电桥②在拉向载荷校准试验中,响应灵敏但线性相关性较差;在压向载荷校准试验中,响应灵敏且线性相关性较好。分析原因,是在拉向加载时,载荷主要从两侧缘条传向套筒,由于该处距离螺栓较近,受应力集中影响,电桥②位置受载不均匀,故响应灵敏但线性较差;压向加载中,载荷主要经耳片穿向套筒,故②电桥响应很灵敏,但受一定的应力集中影响,所以线性略差。

由此可知,1 号和 2 号点改装为该非常规细长拉杆载荷测量的最佳应变计电桥改装位置,并可推算出该拉杆拉压载荷方程为:

$$F_f = 4.329 * \varepsilon \tag{3}$$

式中:F_f 为拉杆飞行实测载荷,ε_f 为拉杆飞行实测应变。

4　飞行实测结果

飞行中,将测得的拉杆飞行实测应变代入式(3),可得到拉杆实测载荷。再引入拉杆与舵面间距离,即可得到舵面铰链力矩。本文仅以拉杆载荷为例进行说明。图 6 为某机动过程中,该拉杆载荷的时间历程变化曲线。

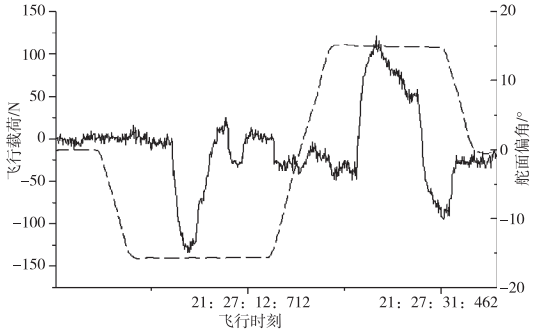


图 6　飞行载荷实测

图中可以看出,机动过程中,该拉杆受到明显的拉压载荷作用,通过舵机作用,引起舵面上偏和下偏,与实际飞行情况一致。

5　结论

1)本文提供的基于应变法的飞行载荷实测技术可有效用于舵面拉杆的飞行载荷测量;

2)该类型的非常规细长拉杆,应变电桥改装位置的选择非常重要,如果选择合适的应变电桥改装位置,能保障拉向和压向受载规律一致,在条件限制时可只进行单向的载荷校准试验。

(下转第 78 页)

基于多层次本体的航空制造业领域知识表达模型的构建*

刘　航,杜　江,白　瑀
(西安工业大学 机电工程学院,陕西 西安 710021)

摘　要:航空制造业领域知识数量庞大,种类繁多,而对此类技术文件却又缺乏从知识层面进行有效管理。本文依据航空制造业领域知识的技术特征,构建航空制造业领域知识多层次分类体系。基于"多层次本体"研究了航空制造业领域知识的知识建模方法。建立了从知识关联层面对航空制造业领域知识进行统一描述的知识体系,并利用本体描述语言 OWL 对其进行描述。为从领域知识层面开展面向服务型航空工业设计、生产、制造的航空制造业领域知识动态管理系统提供理论和方法基础。

关键词:多层次本体　知识表达　OWL　航空制造业
中图分类号:TP 391　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0060 - 05

Construction of aviation manufacturing field knowledge expression model based on multi - level ontology

LIU Hang, DU Jiang, BAI Yu

Abstract: Aviation manufacturing industry has a large amount of knowledge, but such technical documents are lack of effective management from the knowledge level. According to the technical characteristics of knowledge in the field of aviation manufacturing, a multi - level classification system of knowledge for aviation manufacturing industry is constructed. The knowledge modeling method of aviation manufacturing is studied based on multi - level ontology. A knowledge system describing knowledge in aviation manufacturing domain from knowledge correlation level is established, and described by ontology description language OWL. It provides the theoretical and methodological basis for developing the domain knowledge dynamic management system of design, production and manufacturing of service - oriented aviation industry from the domain knowledge level.

Keywords: multi - level ontology, knowledge representation, OWL, aviation manufacturing

随着信息量和数据量的急剧增长,人们在海量的数据中寻求知识越来越困难。航空工业生产活动综合了新材料、新工艺、新技术等高技术产业和国家支柱性产业。如何有效地对航空制造业领域知识进行管理,使用户快速方便地获取知识,甚至某技术问题的解决方案,是当前航空制造业领域知识管理亟需解决的问题。

知识建模是知识共享与重用的基础,是进行知识管理的关键,对航空制造业领域知识的分类是对其所包含知识进行管理的基础,可为从事本行业的人提供理论指导,以使纷繁复杂的知识得以依类整理,各有归属,从而建立起次序化、规范化、系统化的知识世界。本文从航空制造业领域知识分类入手建立面向知识层面的多层次、多维度的航空制造业领域知识表达模型[1],为航空制造业领域知识管理系统的构建奠定基础。对航空工业进行快速高效的设计制造生产活动起着至关重要的作用。

1　航空制造业领域知识的归类

知识的分类是知识管理的基础,对航空制造业领域知识的分析分类是对其进行知识建模的关键。由于航空制造业领域知识本身的复杂性和多样性,导致航空制造业领域知识中所包含的知识,随着时间的推移及工业技术水平的发展,产生大量冗余失效的文件。由于其动态性、多样性、复杂性,航空制造业领域知识所产生的知识之间存在着大量相互影

响、相互促进的因素，使它们之间存在错综复杂的关联。航空制造业领域知识的这些现状，迫切需要对其所包含的知识进行整合分类，以促进其知识的重用、分享及合理利用。

对于航空制造业领域知识的分类，是通过对技术内容的概括及某些特征的概念进行逻辑分类和系统排列而构成，构建航空技术分类模型，为使用者提供设计准则、技术支持及决策依据，能够最大化利用航空制造业领域知识。对于航空技术多领域知识的分类，从航空技术的属性、用途、学科及主题着手，需要多层次多维度的进行分类归纳，构建描述预先定义好的属性、学科或概念的分类规则，按照航空制造业领域知识的适用范围和来源、原理和功能、描述对象等多个方向进行划分，建立如图 1 的航空制造业领域知识分类模型。

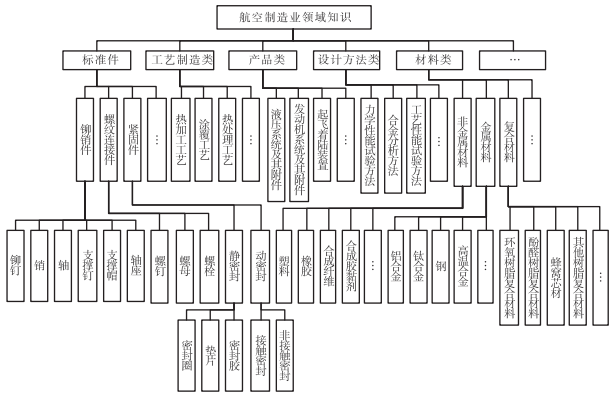


图 1　航空制造业领域知识分类模型

2　基于多层次本体的航空制造业领域知识表达

本体（Ontology）源自于哲学范畴，是一个概念框架，随着人工智能的发展，人们赋予它新的含义，Neches[2] 认为：“本体定义了组成主题领域的词汇表的基本术语及其关系，以及结合这些术语和关系来定义词汇表外延的规则”。Gruber[3] 提出“本体是概念化的明确规范”，他指出我们可以通过定义一组表示术语来描述程序的本体，定义将话语世界中的实体名称与描述名称意义的可读文本以及约束解释的公式公理相结合。Studer[4] 认为本体概念包括概念化、明确、形式化和共享四个方面。Swartout[5] 认为“本体是一个为描述某个领域而按继承关系组织起来作为一个知识库的骨架的一系列术语”。

知识表达是识别和理解知识的关键，对于航空制造业领域知识的知识表达，要实现对航空工业领域生产制造知识的快速有效的重用、共享。针对航空工业知识结构复杂、知识类型多样、种类繁多，以及航空技术动态性、多样性、复杂性的特点，基于多层次本体对航空制造业领域知识进行知识表达，既能表示出不同种类知识的共性，又能表示出相同种类知识的个性，以保证在知识表达的准确定性，实现知识的共享和传递。利用本体对知识进行表达可赋予知识信息明确的语义环境，建立概念层次清晰、结构合理、概念间属性关系明确的组织网络[6]。可有效地将领域知识组织起来，使计算机可以更好地理解和处理信息，实现知识的共享与集成，为知识的共享与重用奠定基础。

2.1　知识的描述

航空制造业领域知识描述本体模型可用四元组表示：{C，A，R，I}。其中：C 表示领域内知识的集合；A 表示领域内知识属性的集合；R 表示知识间关系的集合，是领域中概念之间的关联作用；I 表示知识实例的集合。

知识集合 C 是知识对象的集合，表示采用框架定义的类或概念的集合，包括类或概念的名称，关系集合等；属性集合 A 是知识表达的依据，是对航空制造业领域知识分类的描述，是航空制造业领域知识表达的核心要素，包括特征属性、性能属性，状态属性、层次属性等；知识的关系集合 R 代表了知识间的关联关系，包括概念关系、属性关系、技术应用关系等，是构建知识表达本体的基础，实例集合 I 代表知识的对象，是知识集合 C 和属性集合 A 的具体化。

2.2　属性特征的提取

属性特征代表了航空制造业领域知识的性质，是对航空制造业领域知识最基本的反应，具有类型和数据两种性质，类型是将构成航空制造业领域知识各数据系统统一地分配各个知识单元的规则，对于航空制造业领域知识的特征内容如表 1。

因此，航空制造业领域知识属性特征可表示为：

$$R=\sum_{n=1}^{n}\sum_{j=1}^{j}\{r_j^n\}$$

其中：R 表示航空技术领域知识集；r 表示航空制造业领域知识的知识特征要素；n 表示航空制造业领域知识的种类；j 表示航空制造业领域知识的特征数量。

表 1　航空制造业领域知识的属性特征

属性特征类型	说明	特征要素	功能特征	管理特征
材料属性	航空工业生产活动中所用到的材料信息	种类、牌号、性能、组成		
产品特征	航空工业产品信息集合	结构、设计要求、几何数据		
工艺特征	原材料或半成品加工成产品的方法、技术的相关信息	应用，条件、技术方法	在航空工业中的作用、用途，应用环境，以及所满足的属性	制订单位作者版本标准号约束
技术特征	航空工业设计、制造、生产等所用到的技术方法信息	对象、功能、数据		
标准件	标准零部件	结构、参数、功能		

2.3　概念关联关系的描述

本体概念一般用类来表示，类与类间依据其属性形成映射来描述两类之间的关系。航空制造业领域知识所包含的若干特征可用描述逻辑可表达为 Features ⊆ Aeronautical manufacturing field knowledge，其中最基本的元素是概念（Concept）和关系（Relation）。概念可以被理解为某领域知识的某一子集，关系表示概念间的关联和联系。根据航空制造业领域知识的特点，依据其分类、概念和属性，每个类里的元素依据概念进行拆分，得到相关的子元素及其属性[7]。由于航空制造业领域知识的概念数量庞大，关系复杂等特点，为解决本体间的异构问题，建立基于概念及属性的层次结构关系时，各子元素间应通过属性形成映射关系，建立基于本体的航空制造业领域知识知识表达模型，其本质是概念与概念通过属性所形成的关联关系[8]，可记为：

$$\mathrm{map}\,A \xrightarrow{\text{property}} B$$

航空制造业领域知识不仅包含多领域的文本知识，还包括公式、图形，表格等多种知识载体，因此对于航空制造业领域知识表达模型的建立，需要建立面向多领域的通用模型，既要做到对知识的精确表达，还要明确各知识间的关联关系，清晰地反映知识的网络体系结构，从多方面、多维度描述概念之间的关系。从语义角度来看，可将本体中概念的基本关系分为五种，如表 2。

表 2　航空制造业领域知识本体中概念的基本关系

关系名	关系描述
part – of	某一概念属于另一概念一部分的关系
kind – of	概念之间从属关系
instance – of	实例与概念之间的关系
attribute – of	某一概念是另一个概念的属性
transfer – of	概念间的调用关系

航空制造业领域知识本身的属性可以通过其包含、相关或互动的数据所描述。因此蕴含不同的信息的知识元（Ke，构成知识结构的最小元素，最基本的原子概念）形式、结构、属性各不相同，在聚合为知识族后，利用相似度对航空制造业领域知识关联进行判断[9]。为了判断知识元的相似度，本文应用加权欧几里德距离衡量知识元 Ke_i 和 Ke_j 间的区别度，即：

$$D_{i,j}^{Ke} = \sqrt{\sum_{k=1}^{K}(\sigma_k^{Ke} \mid r_{ik} - r_{jk} \mid)^2} \;\Big|\; \forall i,j \in [1,2,\cdots,T], \forall k = [1,2,\cdots,K]$$

其中，k 是知识元的信息数量；σ_k^{Ke} 是相似度系数，控制知识元在向量空间内的整体分布；r_{ik} 和 r_{jk} 分别表示 Ke_i 和 Ke_j 的第 k 条属性特征；T 是加权系数。

用 $\mathrm{Sim}(Ke_i, Ke_j)$ 表示知识元相似度，如下：

$$\mathrm{Sim}(Ke_i, Ke_j) = \cos\theta$$

$$= \sum_{i=1,j=1}^{n} T \frac{\sum_{i=1}^{n} r_{ik} \times r_{jk}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^{n} r_{ik}^2)(\sum_{j=1}^{n} r_{jk}^2)}} \;\Big|\; \forall i,j \in [1,2,\cdots,n]$$

其中：相似度在数值上反映为 $0 \leqslant Sim(Ke_i, Ke_j) \leqslant 1$。

所有 $\mathrm{Sim}(Ke_i, Ke_j) \mid \forall i,j[1,2,\cdots,n]$ 构成一个模糊等价关系，也可表现为一个对称的相似度矩阵：

$$R^{Ke} = [\mathrm{Sim}(Ke_i, Ke_j) \mid \forall (Ke_i, Ke_j) \in n \times n]$$

根据所建立的模糊等价关系，定义阈值 δ，依据航空制造业领域知识概念的特征集合与某一属性特征集合在空间内的距离，与阈值 δ 进行比较。形成概念间的映射关联关系[10]。

3 基于多层次本体建立航空制造业领域知识集成模型

航空制造业领域知识模型可从结构－行为－功能三方面建立立体的多层次本体模型。结构描述了航空制造业领域知识的基本内容和要素，是航空制造业领域知识的基本组成；行为是结构与功能的关联映射，表示航空制造业领域知识中某个参数随环境或对象的改变而导致另一个参数的改变；功能是指航空制造业领域知识的应用场合、对象等，也是对航空制造业领域知识的属性描述。结构是行为建立的基础，功能的描述建立在行为的构造上。

对于航空制造业领域知识模型的构建，应遵循概念化、明确、形式化和共享四个方面，基于航空制造业领域知识的特点，对其本体构建流程包括：基于航空制造业领域知识的分类获取数据、确定本体的目的和领域、检验本体可否重用、分析数据并提取概念特征及其关系、建立初始本体、本体的验证分析、建立本体模型[11]。

航空制造业领域知识的结构包含其所包含的知识成分的关联关系和关联形式，因此需要从领域知识的分类层次、信息数据、知识元结构等构成知识结构的基础出发，构建系统知识模型，其过程如图 2。

对航空制造业领域知识进行收集、分析和描述，构建航空制造业领域知识本体，分析其中概念集间的关联关系，在此基础上建立航空制造业领域知识知识层次结构，将领域知识进行划分，生成知识元，构建拓扑知识结构，并与航空技术领域本体对应关联，在微观知识元的基础上建立知识模型。

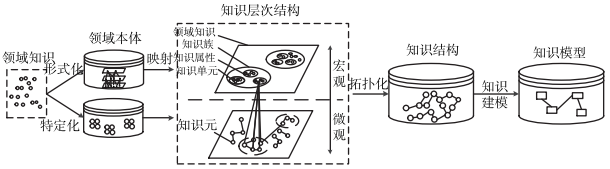


图2 基于多层次本体的航空制造业领域知识模型构建过程

按照航空制造业领域知识的分析归纳，按照分类规则，针对不同种类的知识类型，在分析各类航空制造业领域知识类、概念、属性等关系的基础上，通过定义类和属性，依据属性提取知识概念，对其进行关联分析，依据关联规则，形成关联网络[12]。依据概念、属性、关联关系，对其进行知识要素分析提取，将知识以概念的形式进行提取，通过描述框架表示出来，建立概念集，通过不同的概念集将不同类型的知识分类，详细完整地描述概念，按照概念与属性，构造如图 3 所示航空制造业领域知识的知识本体框架。

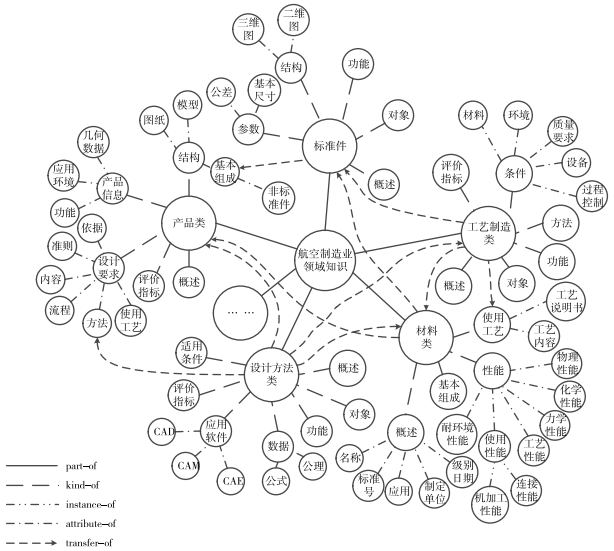


图 3 基于多层次本体的航空制造业领域知识知识模型

在航空制造业领域本体中，包含设计方法类知识、材料类知识、工艺制造类知识、智能品类知识等顶层概念。以材料类知识为例，通过集成其属性特征，用本体描述语言 OWL 对其进行描述，本体片段如下：

1）类的描述：

```
<owl:Class rdf:ID="材料类">
  <rdfs:subclassof rdf:"#航空制造业领域知识"/>
  <复合材料 rdf:ID="复合材料"/>
</owl:Class>
```

2）属性的描述

```
<owl:ObjectProperty rdf:ID=" hasSubProperty "
```

<rdfs:domain rdf:resource = "# Performance " />

<rdfs:range rdf:resource = "# Performance-Descriptor"/ >

……

</owl:ObjectProperty >

< owl:ObjectProperty rdf:ID = " hasComposition" >

<rdfs:subPropertyOf rdf:resource = "#Composition" />

< rdfs:range rdf:resource = " #Material-Structure" />

……

</owl:ObjectProperty >

3)约束的描述

<owl:onProperty rdf:resource = " #ConditionsOfUse "/ >

……

<owl:Restriction >

4)实例的描述

<环氧树脂复合材料 rdf:ID = “SC - 13G 玻璃纤维增强塑料” >

……

<环氧树脂复合材料 >

4 结束语

航空制造业领域知识作为航空工业生产活动的载体所积累的技术知识的总结,通过对航空制造业领域知识的用途、属性、学科及主题的归纳总结,对其定义分类,进而基于本体建立航空制造业领域知识知识模型,建立面向知识层面的多层次、多维度的航空制造业领域知识知识模型框架,并利用本体描述语言 OWL 对其进行描述。这是构建航空制造业领域知识的知识管理系统的重要一步,也是实现航空工业产品设计、制造、生产向智能化、信息化、服务化发展的重要途径。

参考文献

[1] 张善辉,杨超英,刘震宇. 基于本体的机械产品设计知识嵌入方法[J]. 计算机集成制造系统,2010,16(11):2385 - 2391.

[2] NECHES R,FIKES R E,GRUBER T R,et a1. Enabling technology for knowledge sharing[J]. Ai Magazine,1991,12(3):36 - 56.

[3] GRUBER TR. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications [J]. Knowledge Acpuisifion, 1993, 5(2): 199 - 220.

[4] STUDER R, BENJAMINS V R, FENSEL D. Knowledge engineering: principles and methods [J]. Data and Knowledge Engineering,1998. 25(1 - 2): 161 - 197.

[5] SWARTOUT W,TATE A. Guest editors´introduction: ontologies[J]. IEEE Intelligent Systems,1999,14(1):18 - 19.

[6] 袁磊,张浩,陈静,等. 基于本体化知识模型的知识库构建模式研究[J]. 计算机工程与应用,2006,42(30):65 - 68.

[7] 赵建勋,张振明,田锡天,等. 本体及其在机械工程中的应用综述[J]. 计算机集成制造系统,2007,13(4):727 - 737.

[8] 王发麟,廖文和,郭宇,等. 复杂机电产品线缆信息本体表达与存储分析[J]. 图学学报,2015,36(3): 376 - 383.

[9] 黄德才. 数据仓库与数据挖掘教程[M]. 北京:清华大学出版社,2016.

[10] 孙煜飞,马良荔,郭晓明,等. 本体映射中元素名称相似度计算方法研究[J]. 小型微型计算机系统,2015,36(9):2009 - 2014.

[11] 胡玉杰,李善平,郭鸣. 基于本体的产品知识表达[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(12):1531 - 1537.

[12] 王岁花,张晓丹,王越. OWL 本体关系数据库构建方法[J]. 计算机工程与科学,2011,33(12): 143 - 147.

基金项目:以航空领域国家和行业技术标准信息增值为目标的研究生数字化设计能力培养方法研究(XAGDYJ180224);陕西省教育厅专项科研计划项目(整体式刀具虚拟设计关键技术研究)(16JK1388)。

作者简介:刘航(1991 -),男,西安工业大学机电学院硕士研究生,研究领域为信息化制造,计算机集成制造。
杜江(1971 -),男,博士,西安工业大学机电学院副教授。
白瑀(1975 -),博士,西安工业大学机电学院副教授。

收稿日期:2018 - 07 - 23

基于 ANSYS 的摩天轮模态及地震响应谱分析

赵九峰
（河南省特种设备安全检测研究院，河南 郑州 450000）

摘　要：应用 ANSYS 有限元分析软件建立摩天轮的有限元模型，对其进行模态分析，提取前 10 阶的频率和模态振型，得出结构的自振特性。采用地震振型分解响应谱法，计算结构在不同地震方向作用下动力响应。计算结果表明地震作用下摩天轮满足强度要求，研究结果可为摩天轮结构的抗震设计提供参考。

关键词：摩天轮　模态分析　响应谱　抗震性能　ANSYS
中图分类号：TH311.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002－6886(2018)06－0065－04

Modal analysis and seismic response spectrum analysis of Ferris wheel based on ANSYS

ZHAO Jiufeng

Abstract: The finite element model of the Ferris wheel is established by ANSYS, and the modal analysis is carried out. The first 10 order frequencies and modal shapes are extracted, and the natural vibration characteristics of the structure are obtained. Seismic response spectrum method is used to calculate the dynamic response of structures in different seismic directions. The results show that the strength of the wheel meets the requirement under earthquake. The research results can provide reference for seismic design of the wheel.

Keywords: Ferris wheel, modal analysis, response spectrum, seismic behavior, ANSYS

0　引言

摩天轮是当今游乐场中必不可少的游乐设施之一，根据轮盘结构形式，其结构可以分为三大类：刚性桁架体系，即轮盘全部采用桁架结构体系；刚柔相结合形式混合体系，即轮盘用一定数量拉索或拉条代替刚性桁架轮辐；柔性体系，即轮盘中所有的轮辐构件由柔性缆索替代[1]。本文研究对象为 42 m 高的某摩天轮，其结构为刚性桁架体系形式，在 ANSYS 软件中对摩天轮结构进行抗震分析。

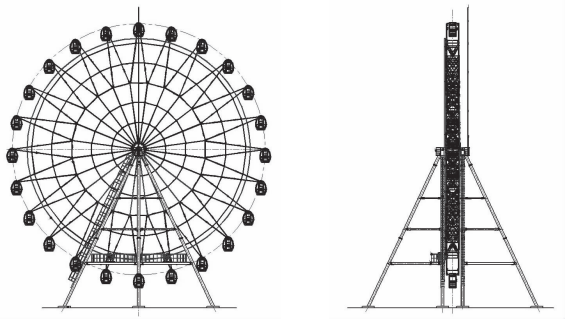
结构的抗震分析，一般使用等效静力法或响应谱法。采用简化方法计算时，可以使用等效静力法。将其地震的加速度效应使用恒定加速度载荷的方法进行等效，该算法计算出的结构响应较大，属于偏保守算法。响应谱法是一种准静态分析法，一般用于计算第一阶固有频率小于 33 Hz 的结构，其将结构响应进行一定的组合后计算响应的最大值[2]，相对等效静力法，计算代价更大，其计算精度较高。采用地震响应谱理论进行结构的抗震设计，能够方便地把动力问题简化为类似静力问题，因而在行业内得到广泛认可，所以至今仍是各国抗震规范主要采用的方法。

本文对一摩天轮结构建立有限元模型，进行结构模态分析，提取前 10 阶的频率和振型，得出摩天轮桁架结构的动力特性；在不同方向地震作用下，采用振型分解响应谱法计算结构的地震响应[3]，验算摩天轮结构在地震载荷作用下是否满足抗震要求。

1　有限元模型

本文研究对象为 42 m 高的摩天轮。轮外将装挂 24 个透明吊厢，大盘的直径为 37 m，总质量为 55 t。摩天轮结构示意图如图 1。

根据 GB50011－2010《建筑抗震设计规范》，对摩天轮进行结构的抗震计算时，采用振型分解响应谱法[4]。响应谱分析计算结构各阶振型在给定载荷频谱下的最大响应，这一最大响应是响应系数和



（a）正视图　　（b）左视图

图 1　摩天轮结构示意图

振型的乘积，这些振型最大响应组合在一起就给出了结构的总体响应。因此摩天轮地震响应谱分析需要先计算结构的固有频率和振型，首先进行模态分析。

摩天轮结构采用响应谱法进行的地震计算时，所有材料的非线性特性均失效；轿厢及轿厢活载荷按照《抗震规范》要求，取："轿厢自重 +0.5 × 轿厢活载"作为重力载荷代表值，采用集中质量单元 MASS21 模拟，其余结构采用空间梁单元 BEAM188 模拟[6]。建立的摩天轮大盘有限元模型如图 2。

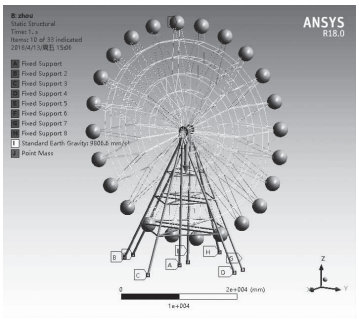


图 2　摩天轮大盘有限元模型

2　模态分析

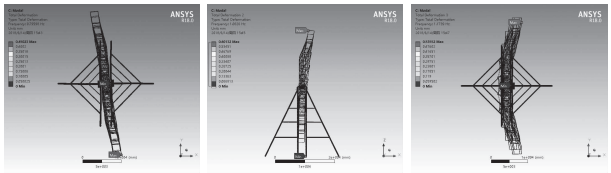
模态分析是动力学分析的基础，结构的模态能够直接反映出结构自身刚度和结构布置的特性，是结构地震分析的基础。抗震分析的第一步是对结构进行模态分析，提取自振频率和振型，得到结构的基本动力特性。

一般地随着结构频率的增加，各个振型在地震总反应中的贡献将迅速减小，故结构的最大地震反应由频率最低的几个振型控制，高阶模态对结构的地震响应往往影响不大[5]。通过模态分析计算摩天轮结构的前 10 阶固有频率和振型，各阶频率计算结果如表 1。

表 1　　模型的前 10 阶固有频率/Hz

阶数	固有频率	阶数	固有频率
1	0.796	6	1.331
2	1.083	7	1.425
3	1.174	8	1.488
4	1.201	9	1.558
5	1.261	10	1.600

1 ~ 3 阶振型见图 3。摩天轮一阶振型左右弯曲，二阶振型前后弯曲，三阶振型绕旋转中心扭转。三阶之后，频率增大，不再考虑。



（a）第一振型　　（b）第二振型　　（c）第三振型

图 3　结构前 3 阶振型

3　地震响应谱分析

3.1　地震响应谱

地震释放的能量以波的形式向各个方向传播，引起地面晃动。地面的强烈震动使设备产生加速度，故设备所受到的地震影响程度可用地面加速度来表示。地震的响应谱是根据一次地震中强震仪记录的加速度时程曲线计算得到的谱，也就是具有不同周期和一定阻尼的单质点结构在地震地面运动影响下的最大反应与结构自振周期的关系曲线。在工程上，通常可分为位移、速度、加速度三种响应谱，一般而言，响应谱分析的激励采用的是加速度谱。

地震响应谱是单质点体系对某个实际地震加速度的最大反应和体系的自振特性之间的函数关系，在水平方向地面运动分量作用下，单质点体系质量为 m 的质点所受到的水平地震作用力：

$$F(t) = ma(t) \tag{1}$$

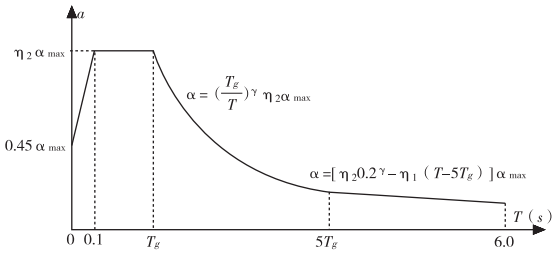
其中：a— 水平地震加速度。

抗震设计中，通常只需地震作用的最大值，其值可表示为：

$$F = ma_{\max} = (W/g)a_{\max} = (a_{\max}/g)W = \alpha W \tag{2}$$

其中：W— 质点的质量；g— 重力加速度；α— 水平地震影响系数。

《抗震规范》规定的反应谱即为 $\alpha = a_{max}/g$ 和体系自振周期 T 之间的关系，α 曲线即为地震影响系数曲线，地震影响系数曲线如图 4[4]。



α – 地震影响系数；a_{max} – 地震影响系数最大值；η_1 – 直线下降段的下降斜率调整系数；γ – 衰减指数；T_g – 特征周期；η_2 – 阻尼调整系数；T – 结构自振周期

图 4　地震影响系数曲线

抗震设防烈度为 8 度，按罕遇地震设计基本地震加速度值为 0.20g，设计地震属于第一组，场地类别为Ⅱ类，则 $T_g = 0.4$s。阻尼比取 0.02，地震影响系数曲线的阻尼调整系数按 1.0 采用，竖直地震载荷对整个结构的动力响应影响较小，一般情况下，只考虑水平向地震作用[5]，故分别在结构的两个水平主轴方向计算地震作用。由图 3 求得加速度谱值如表 2。

表 2　　地震水平加速度响应谱

频率/Hz	加速度/(m/s^2)
0.2	0.27
0.46	0.36
0.5	0.37
2.5	1.57
5	1.57
10	1.57
30	1.0
100	0.79

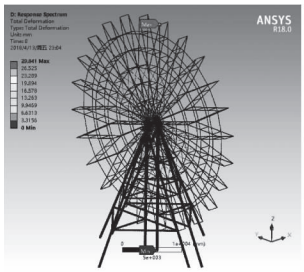
3.2　谱分析结果

响应谱分析一般作为结构的抗震分析，在得知当地的地震响应谱曲线后，根据结构进行抗震计算，计算结构在指定的地震加速度曲线下是否存在较大的应力、弯矩及位移，从而通过对结构进行局部的加强来增加结构的稳定性。

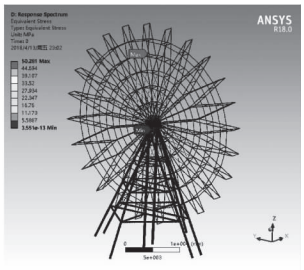
在水平轴向和水平径向地震作用下，摩天轮的最大位移分别为 30 mm 和 6 mm，远小于《抗震规范》规定的弹性位移限值 H/300 = 140 mm，满足设计要求。图 5(a)、(c)所示为地震作用下摩天轮的位移云图。

根据 GB8408 – 2008《游乐设施安全规范》规定，地震载荷组合，仅计算永久载荷和地震载荷，表明地震分析时，为非工作状态；地震载荷组合不应使结构产生永久变形，表明以材料的屈服强度作为评价指标[7]。

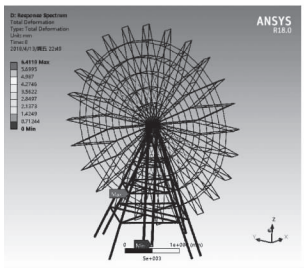
摩天轮的最大应力分别为 50 MPa 和 22 MPa，小于材料的屈服极限(主体材料 Q235B/20#)。各部件均未发生永久变形，即结构的最大应力未达到屈服强度。摩天轮的强度满足设计要求。图 5(b)、(d)所示为地震作用下摩天轮的应力云图。



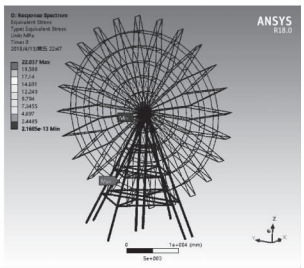
(a) 水平轴向地震位移云图



(b) 水平轴向地震应力云图



(c) 水平径向地震位移云图



(d) 水平径向地震应力云图

图 5　地震响应谱分析结果

4　结论

采用响应谱法对某摩天轮进行抗震分析，计算地震作用下摩天轮的动力响应，计算结果表明：

1)摩天轮受轴向水平地震影响较大，地震力主要集中在大盘外圈部位。

2)在地震载荷作用下，摩天轮的位移和强度满足设计要求，整体结构均未出现屈服，不发生断裂，

某型汽车座椅翻转装置的拉力试验夹具设计

陈宗毅,周锡林
(贵州华阳汽车零部件有限公司,贵州 贵阳 550009)

摘 要:为实现汽车座椅翻转装置的强度试验,设计了应用于拉力试验机上汽车座椅翻转装置的拉力试验夹具,通过运用经典力学理论与静态强度有限元分析相结合的方式,对夹具进行了校核设计。以试验的方式,验证了此设计的可行性。

关键词:拉力试验机 翻转装置 拉力试验夹具
中图分类号:TH122 **文献标识码**:B **文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0068 - 03

Design of tensile testing fixture for a car seat turnover device

CHEN Zongyi, ZHOU Xilin

Abstract: The tensile testing fixture for a car seat turnover device was designed in order to test the strength of the car seat turnover device. The strength of the fixture was checked by combining the classical mechanics theory and the finite element static strength analysis. At last, the feasibility of the design was verified by experiment.

Keywords: tensile testing machine, turnover device, tension testing fixture

0 引言

座椅翻转装置的强度不仅对汽车的整体安全性影响很大,同时对于乘车人的安全也起着重要的作用。为保证车辆在行驶过程中发生突发事故时,乘车人能顺利通过翻转座椅逃生,座椅翻转装置需要进行强度试验。

依据 GB/T 14167 - 2013《汽车安全带安装固定点、ISOFIX 固定点及上固定点系统》中对于座椅翻转装置的试验要求,需沿平行于车辆纵向中心平面并与水平线成向上 10° ±5°的方向施加载荷[1]。

试验方法采用拉力试验机,设计了一套满足试验要求的夹具,对翻转装置进行试验。

且结构仍保持弹性,结构变形较小,说明结构的抗震性能良好。

参考文献

[1] 游桂模,丁洁民,杨晖柱. 柔性摩天轮结构抗震性能研究 [J]. 振动与冲击,2013(12):76 - 83.
[2] 刘笑天. Ansys Workbench 结构工程高级应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2015.
[3] 李坤,田兴运,苏雷,等. 基于 ANSYS 的支撑框架结构地震响应谱分析 [J]. 四川建筑科学研究,2012(6):193 - 197.
[4] 国家住房和城乡建设部. GB 50011 - 2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
[5] 孔剑,朱召泉,董顾春. 基于 ANSYS 的港闸门地震响应谱分析 [J]. 四川建筑科学研究,2014(2):206 - 208.
[6] 朱礼敏,宋涛,马明. 天津慈海桥摩天轮结构的抗震性能分析 [J]. 建筑结构,2008(2):70 - 73.
[7] 国家质量监督检验检疫总局. GB 8408 - 2008 游乐设施安全规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

作者简介:赵九峰(1981 -),男,河南平顶山人,工程师,检验师,硕士研究生。主要从事游乐设备设计计算,结构仿真与载荷响应研究。

收稿日期:2018 - 06 - 26

1 设备与夹持方式

拉力试验机是一种常用的力学检测设备，是保证材料拉伸、压缩、弯曲、撕裂、剥离等试验顺利进行的基础检测设备。其主要结构为工作台、计算机控制系统、动力传动系统、测力机构、传感器等[2]。操作者只需将需检测的零件和夹具安放于拉力试验机上，并操纵计算机控制界面，即可开始检测。

本文中试验采用的拉力试验机是 30 t SANS 拉力试验机(图 1)。

图 1 拉力试验机

图 2 拉力试验机夹持方式

图 2 是拉力试验机的夹持方式，采用 V 形钳口块，由上下油缸推动钳口夹具夹紧[3]。其中 V 形钳口块的材料是 20Cr。

为防止夹持过程中，出现打滑，剥皮等现象，经测量 V 形钳口块的硬度为 HRC 58，夹具被夹持部位不能超过其硬度值，且需滚花加工，增加夹持的摩擦力。

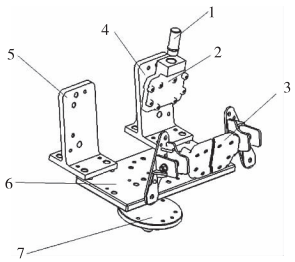
2 夹具设计

2.1 试验要求

根据翻转装置的试验要求，翻转装置受持续增加的载荷，要达到 70000 N，以 1.3 倍的安全系数计算，夹具需设计满足 91000 N 的强度。

2.2 夹具结构

夹具的结构如图 3。根据拉力试验机的空间尺寸，确定安装板的外形尺寸 560 mm × 260 mm × 30 mm。拉力试验机的上部夹头，夹住拉杆；拉力试验机的下部夹头，夹住支撑柱的圆杆部分。拉杆和支撑柱的圆杆部分直径均为 Φ36 mm。



1 - 拉杆；2 - 连接板；3 - 翻转装置(左右件)；4 - 右安装座；5 - 左安装座；6 - 安装板；7 - 支撑柱。

图 3 夹具结构

夹具的安装方式：支撑柱通过 6 个 M12 紧固螺钉与安装板连接；左安装座与右安装座分别通过 4 个 M20 紧固螺钉与安装板连接；翻转装置(左右件)与安装板通过 2 个 M12 螺钉连接；产品(左右件)安装手掌采用连接板通过 8 个 M8 紧固螺钉连接；拉杆上加工了 M36 的螺纹，与连接板螺纹连接。

2.3 夹具强度校核

为满足夹具可承受 91000 N 的载荷，需要对夹具进行强度校核。夹具的空间力系如图 4。

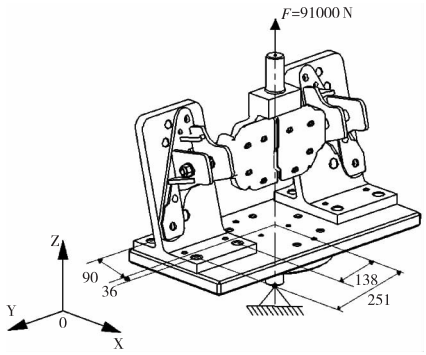


图 4 空间力系

拉力试验过程中，试验机下部夹头夹持夹具保持固定，上部夹头夹持夹具往 +Z 方向持续提拉，使载荷不断达到 91000 N。

夹具在 Y 方向上左右对称，左安装座和右安装座在 Y 方向的紧固螺钉支反力产生的力矩大小相等，旋转方向相反。不会对整个夹具产生较强破坏。故本文只讨论空间力系在 X 轴方向产生的力矩和反力。

对于整个空间力系，最薄弱的零件是拉杆和支撑柱，薄弱截面也就是拉杆和支撑柱直径截面。

结构件受力情况往往包含了几种基本变形[4]。单独提出拉杆和支撑柱进行受力分析。拉杆的受力不仅受到拉力试验机的拉力 F 和反力 F'(大小与拉力 F 相等)，而且受到左安装

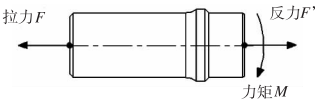


图 5 拉杆受力分析

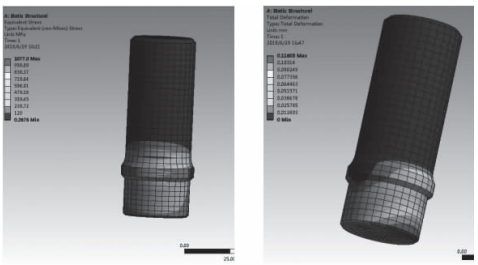
座与右安装座对拉杆产生的力矩 M，如图 5。

其中力矩 M 的计算：

$$M = F \times L = 91000 \times \left(\frac{90+36}{2} - 36 \right) = 2457000 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

同理，支撑柱也受到左安装座与右安装座的力矩，由于拉杆和支撑柱同轴，故力矩大小相等。

对拉杆进行静态强度有限元分析。对拉杆施加相应的边界条件，边界条件如前面所述的拉杆受力分析。得到拉杆的应力云图和变形云图（图 6）。

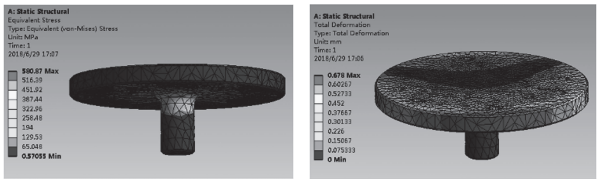


应力云图　　变形云图

图 6　拉杆静态强度分析云图

从图 6 可以看出，拉杆在过渡圆角处的应力最大，达到 1077.8 MPa。拉杆采用合金结构钢 SCM435 材料，如果夹具硬度过低，在进行拉力试验时，易造成夹具的破坏[5]，根据 GB/T 1172－1999[6]，将此材料调质至硬度 HRC 38 左右，抗拉强度可以达到 1200 MPa，大于计算所得的最大应力值。拉杆在此载荷作用下，最大变形位于拉杆与连接板螺纹连接的根部，最大变形量仅仅为 0.1 mm。

同样，对支撑柱做静态强度有限元分析，由于支撑柱是用 6 个 M12 螺钉紧固于安装板上，故边界条件施加在 6 个螺钉的安装孔上 。静态强度分析得到的结果是（图 7）：支撑柱的最大应力值为 580.9 MPa，最大应力位于过渡圆角根部；支撑柱的最大变形量为 0.6 mm。



应力云图　　变形云图

图 7　支撑柱静态强度分析云图

从静态强度分析的结果可以得到，最薄弱的零件可以满足试验 91000 N 的强度要求，故整副夹具可以满足试验强度。

3　试验验证

将座椅翻转装置装上夹具，进行试验。载荷持续加载至 70000 N，翻转装置变形量达到 24.5 mm。图 8 为最大载荷下试验结果，夹具没有变形，也没有断裂和裂纹，说明夹具的刚度和强度均满足试验要求。

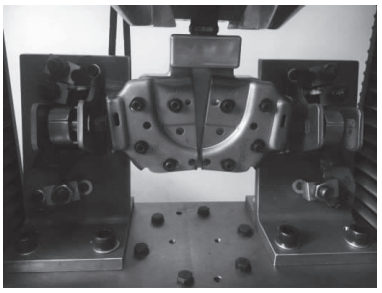


图 8　最大载荷下试验结果

4　结论

在该翻转装置的受力情况下，运用经典力学理论对设计的夹具进行了校核设计，并且运用有限元分析手段，对薄弱的零部件进行了静态强度分析。最终，通过试验验证了设计的可行性。

参考文献

[1] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 14167－2013 汽车安全带安装固定点、ISOFIX 固定点及上固定点系统[S]. 北京：中国标准出版社，2013.

[2] 李海帆，王国淑，于喜海，等. 拉力试验机的过载保护方案[J]. 机床与液压，2017，45(16)：203－204.

[3] 王开宇，屠金辉. 微机控制拉力试验机钳口的改进[J]. 金属制品，2006(2)：54－55.

[4] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京：高等教育出版社，2007.

[5] 王晓丹. 浅谈螺栓拉力试验的影响因素[J]. 品牌与标准化，2017(4)：78－79＋84.

[6] 国家质量技术监督局. GB/T 1172－1999 黑色金属硬度及强度换算值[S]. 北京：中国标准出版社，1999.

作者简介：陈宗毅（1989－），男，硕士，工程师，主要从事汽车零部件开发设计。

收稿日期：2018－07－05

煤矿压风系统在线监控平台的设计与实现

李开来
（山西西山煤电股份有限公司东曲矿，山西 古交 030200）

摘　要：针对所研究矿井压风机组无远程监控功能的现状，首先分析了其机组设备的功能和参数，然后确定了远程监控平台改造的目标和基本结构。在此基础上，分别提出了针对现场设备层和 PLC 控制层中相关硬件的改造方案，随后介绍了上机位监控软件的开发和功能设置等。研究内容对煤矿压风系统在线监控平台的设计与改造具有积极参考价值。

关键词：煤矿　压风系统　远程监控　空压机
中图分类号：TD774　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1002－6886(2018)06－0071－03

Design and implementation of on－line monitoring platform for coal mine compressed－air system

LI Kailai

Abstract: Aiming at the present situation that the mine air compressor unit has no remote monitoring function, firstly the function and parameters of unit equipment are analyzed, and then the target and basic structure of the remote monitoring platform reconstruction are determined. On this basis, the transformation plan of the relevant hardware in the field equipment layer and PLC control layer is put forward respectively, and then the development and function setting of monitoring software for upper computer level are introduced. The research has reference value for the design and transformation of the online monitoring platform of the mine compressed－air system.

Keywords: coal mine, compressed－air system, remote monitoring, air compressor

0　引言

煤矿压风系统主要由空气压缩机、风包、冷却水系统、压缩空气管网、高低压控制系统等组成，其中空气压缩机是主要的做功单元，可将电能转化为空气压力能，从而为以压缩空气为动力来源的喷浆机、凿岩机等井下设备提供动力。同时，随着井下安全生产需求的提高，风动钻机的使用可大幅降低由电钻电气故障导致的瓦斯和煤尘爆炸事故的发生率，同时风动扳手等工具的使用也可有效降低井下工人的劳动强度，提高生产效率。尤其近年来，广泛用于井下人员安全自救的“压风自救系统”的使用，使得压缩空气的应用环境更为广泛，因此压风系统的运行稳定性要求越来越高[1－3]。

由于压风系统各设备需连续、高负荷运转，因此其故障率相对较高，故障排除的及时性要求也较高，其运行状态对井下正常采掘作业具有举足轻重的影响，因此及时、全面地掌握风压系统运行工况及各特征参数的动态变化特性，对提高压风系统运行效率和工作稳定性具有重要的现实意义。

1　压风机组在线监控需求分析

1.1　机组现状

东曲矿风机房共配置 3 台 TM1500 三星离心式空气压缩机，排气量 200 m^3/min，排气压力 0.8 MPa，电机功率≤1360 kW，正常工况使用一台工作，遇紧急或高峰状况，两台全开，其余一台常备。冷却方式为水冷，循环水泵为 3 台，一用两备。机组采用三星电子公司 N700PLUS 系列 PLC 进行控制。由于购进时间较长，因此目前仅具有井下风压的自动调节功能，仍需在现场进行启、停操作，且各设备独立运行，无法实现数据共享和远程监控等。一方面，为

保证机组工作性能稳定,需派专人进行巡检,且在开机工况下检测手段受限;另一方面,无法对机组各设备的运行数据进行有效分析,从而对设备的使用寿命和耗能评估造成影响[4-6]。因此,迫切需要通过增设传感器、更新电控软硬件设施等方式,来实现对空压机、冷却泵、开关柜等压风机组设备特性的在线监控。

1.2 改造目标

针对当前压风机组现状,此次改造的技术目标如图 1,主要包括四点:

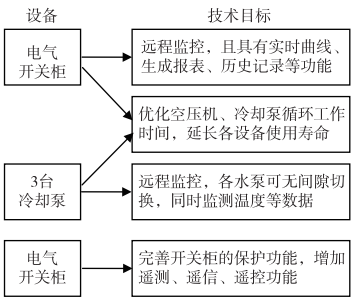


图 1 压风机组改造的技术目标

第一,对于 3 台空气压缩机,建立远程后台监控平台,能够准确的故障跳闸,具有实时曲线、生成报表、历史记录、故障录播等功能;

第二,对于 3 台冷却泵,通过远程后台监控系统,能够实现各水泵无间隙切换,同时可以监测水泵运行的温度、电流、压力等数据。

第三,对于电气开关柜,通过更新高低压开关柜设备,完善开关柜的保护功能,增加遥测、遥信、遥控功能;

第四,优化空压机、冷却泵循环工作时间,延长各设备使用寿命。

在实现以上技术目标同时,还希望通过该系统提高压风机组的整体工作稳定性,降低故障发生率,缩短故障时间,降低人员和设备运营成本。

2 压风系统在线监控平台的结构设计

压风系统在线监控平台的总体结构如图 1,采用分层结构,包括管理监控层、PLC 控制层和现场设备层三部分:

1)管理监控层,主要利用原有监控室的 PC 端等设备,通过网络与 PLC 控制层连接,可实现对空压机、冷却泵运行参数的远程监控、以及对以上设备的循环优化控制等功能;

2)PLC 控制层,其中的 PLC 芯片是整个系统的核心,一方面负责监测和控制来自现场传感器的开采或模拟信号;另一方面,负责将处理后的数据发送至上机位和执行器,保证上机位对现场数据的掌控,以及执行器按预设命令准确动作;

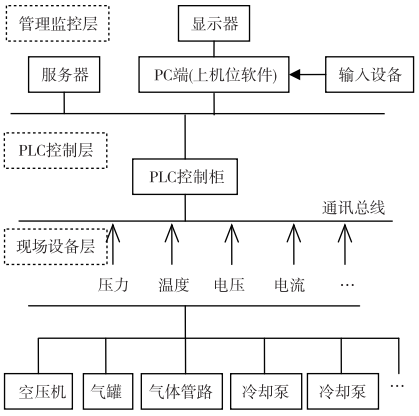


图 2 压风系统在线监控平台的总体结构

3)现场设备层,通过增设温度传感器、压力传感器、电流互感器、接近开关等元件,可对空压机、水泵等设备的运行参数进行实时采集。

3 监控系统硬件设置

3.1 现场设备层

监控系统的基础硬件主要包括现场传感器、动作执行器、信号传输线路等。其中,现场传感器和动作执行器需根据实际设备配置状况,通过局部改造,增加监控功能,具体如下:

1)空压系统

三星 TM1500 式空压机内置传感器齐全,仅需对其内置的通讯端口进行数据采集,然后将温度、压力、电压、电流等数据传输至数模转换模块,最终上传至 PLC 控制器及上机位。由此可实现对排气温度、气体压力、主电机功率等项目的监测;

在风包内增设气体温度、压力传感器、电磁球阀等,控制气体压力不超过 6.5 MPa,温度不超过 120℃;

2)冷却系统

与空压机相似,可直接对冷却泵内置的通讯端口进行数据采集,然后对电机功率、温度等进行监测。在此基础上,冷却系统改造主要是在冷却水管路上增加水压和水温传感器、电磁阀等,实现对上水压力、冷却水温度的监测,以及对管道通路的远程控制。另外,分别在热水池和冷水池配置液位传感器。

3)电气开关柜

通过更新开关柜内部分设备,增加输出接口电

路,使其具备对高压开关柜和励磁柜内相关电参数的监测和输出功能。

3.2 PLC 控制层

对应各部分新增传感器等设备,一方面,对原 PLC 控制柜进行改造,增加水冷系统等部分的数据采集和处理模块;另一方面,对控制芯片进行重新编程,拓展其监测范围和功能。其次,在柜体内增加以太网模块,保证 PLC 控制层与上机位的数据通信,从而为现场设备的远程监控提供基础。通过对 PLC 控制柜的改造,其主要结构和功能如图 3,PLC 芯片可对传感器的数字和模拟信号进行处理,并按照预定程序,向继电器发出动作信号,同时控制指示灯状态。另外,及时将各种数据和处理结果经由交换机传输至上机位。

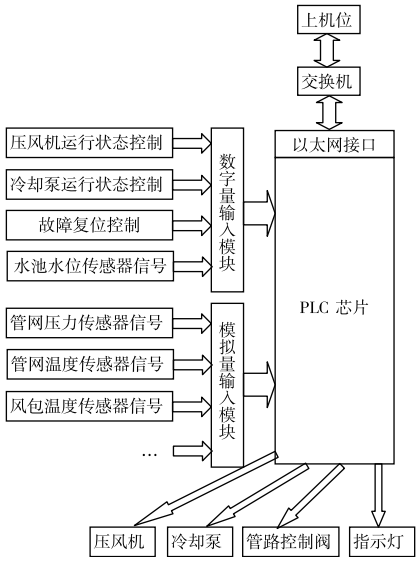


图 3 PLC 控制层硬件组成及功能

4 上机位监控软件开发

设备运行自动化和无人值守机房是现代化工业生产的重要发展方向,而上机位监控软件是压风机组在线监控平台的重要组成部分,可实现对现场运行设备的远程集中监测与控制。上机位软件利用 WINCC 组态软件编程实现,其集成性、可编程性较好。通过调用专用模块,可方便实现所编制软件与 PLC 控制层的通信。上机位软件的主要功能包括:监控画面显示、运行参数控制、历史数据查询与汇总等,具体如下:

1)监控画面显示。监控画面主要显示 3 台空压机和冷却泵的运行状态,另外可显示管网压力、气体温度等重要参数。另外,监控画面可对设备故障进行报警,提示管理人员进行维护等操作。

2)运行状态控制。上机位软件具有对现场设备的远程控制能力,可进行空压机的启停操作,但为保证工作状态稳定,一般运行自动控制系统,仅在维修作业、调试等环节,对其进行手动控制。另外,在获得操作权限后,还可对设备工作时间、供气压力、冷却循环能力等参数进行远程设置。

3)历史数据查询与汇总。上机位软件可对 PLC 控制层上传的数据进行分类存储,并在需要的时候进行检索、查询和对比,并最终以图表形式呈现,方便集中管理。

5 结论

压风系统是煤矿生产保障的重要组成部分,本文针对矿压风机组无远程监控功能的现状,首先分析了其机组设备的功能和参数,然后确定了远程监控平台改造的目标和基本结构,在此基础上,分别提出了针对现场设备层和 PLC 控制层中相关硬件的改造方案,随后介绍了上机位监控软件的开发和功能设置等,本文研究内容对煤矿压风系统在线监控平台的设计与改造具有积极参考价值。

参考文献

[1] 李德瑜,孙成国,于洋. 矿用压风机远程监控系统的应用[J]. 煤矿机械,2017,38(6):134-136.

[2] 彭波. 矿用压风机组无人值守技术改造与应用[J]. 世界有色金属,2017(06):35-36.

[3] 何敏,韩进,李昊,等. 面向数字化矿山要求的压风机房综合监控系统设计[J]. 煤炭工程,2017,49(2):20-22.

[4] 赵增选,付文超. 空压机自动化监控系统的方案设计[J]. 科技与企业,2016(05):70+72.

[5] 刘跃,袁文琦,李栋,等. 基于 OPC 和 LabVIEW 的压风机组远程监控系统设计[J]. 煤炭工程,2015,47(2):25-27.

[6] 张大伟. 基于 PLC 的煤矿压风机智能监控系统[J]. 矿山机械,2015,43(2):142-144.

作者简介:李开来(1980-),男,山西侯马人,2015 年毕业于东北大学,本科学历,主要从事煤矿机电采方面工作。

收稿日期:2018-06-12

可编程步进控制器在整流子点焊机中的应用

金　强[1],王　亮[2],方春华[1]
(1. 江苏航空职业技术学院 文理学院,江苏 镇江 212000;2. 江苏航空职业技术学院 工程学院,江苏 镇江 212000)

摘　要:整流子点焊机是电机制造行业应用最广泛的关键制造设备之一,是电机的整流子与线圈绕组进行分度焊接的专用焊接设备,本文着重介绍了可编程步进控制器 STC－01Z 在整流子点焊机控制系统中的应用,阐述了整流子点焊规范和工艺流程,分析了影响整流子焊接性能的主要因素,介绍了基于可编程步进专用控制器的全数控整流子点焊机控制系统及其程序设计,分别给出了不带衰减功能和带衰减功能的整流子焊接程序实例,该系统具有技术先进,操作简便,焊接稳定的特点,它的使用进一步提高了整流子点焊机整机的性能,实现了整流子焊接自动化。

关键词:步进控制器　电机　整流子　焊接
中图分类号:TP29　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002－6886(2018)06－0074－05

Application of programmable step controller in commutator spot welder

JIN Qiang, WANG Liang, FANG Chunhua

Abstract: The application of programmable stepping controller STC－01Z in the control system of commutator spot welder is introduced emphatically. The specification and process flow of commutator spot welder are described. The main factors affecting the welding performance of the commutator are analyzed, and control system and program design of full－NC commutator spot welder based on the programmable step dedicated controller are introduced. Examples of commutator welding procedures with attenuation function and without attenuation function are given respectively. The system has the characteristics of advanced technology, simple operation and stable welding. Its use improves the performance of the commutator spot welder and realizes the automation of commutator welding.

Keywords: step controller, motor, commutator, welding

0　引言

整流子点焊机广泛应用于微型电机行业,它主要用于将不同规格的微型电机转子整流子换向片与漆包线绕组引线(不必去除表面绝缘层)进行焊接[1],本文着重介绍了基于可编程步进专用控制器的全数控整流子点焊机控制系统及其程序设计,并且给出了不带衰减和带衰减功能的整流子焊接程序实例,该系统能够自动完成电枢夹紧、预热、焊接、分度及松开的全过程。

1　基于步进控制器的整流子点焊机控制系统设计

1.1　整流子点焊规范及工艺流程

点焊规范参数包括焊接电流、焊接时间、电极压力和电极端面尺寸。在电极的材料、端面形状和尺寸选定之后,焊接电流、焊接时间和电极压力将主要决定点焊接头的质量[2]。对于传统的气压和液压式点焊机,其气阀或液压阀的调节响应速度较慢,因此一般只通过减压阀来调节和稳定电极压力,在焊接过程中不再对电极压力进行实时反馈控制,因此点焊控制的主要任务是实现焊接时间和焊接电流的稳定。

整流子焊接机属于点焊机的范畴,焊接电流和焊接时间是影响焊接性能的主要因数,由于焊接电流一般在焊接前已根据焊接规范设定好,焊接进行中不再调整,当整流子片数比较多时,随着焊点片数的增加,前面焊点的余热大,如果还是按照之前的焊

接时间进行焊接,焊接热量就非常大,会造成整流子漆包线因过热而损坏,这就需要焊机在焊接过程中,随着焊点数的增加,能够自动实现焊接时间的减少。本设计采用引进美国技术生产的步进控制器、步进电机驱动器驱动步进电机,可对任意等份整流子分度,分度时只需按动按钮改动一个数据即可,并且可以根据整流子的片数多少调用带衰减和无衰减的焊接程序。

整流子焊接工艺过程如下:

1)接通电路,水路,打开焊接控制器电源开关,此时电源指示灯亮。

2)根据所焊整流子的大小选择适当的焊接规范。

3)根据所焊整流子的等分数,修改设定可编程控制器的分度程序数据。

4)调节上电极的高低和位置,对准整流子焊接部位。

5)按下气动夹紧按钮,快装夹头松开,把电机转子轴头放入快装夹头内,松开按钮,电机转子轴头被自动夹紧。

6)按下启动按钮,设备将自动按预先设定的焊接规范和分度数自动进行焊接,焊接结束后自动返回原始位置。

7)操作者按下气动夹紧按钮,快装夹头松开,这时取下工件,整流子焊接工序全部完成。

1.2 控制系统设计

如图 1 所示,该电路所用元器件有美国技术生产的三相反应式步进电机 90BC340CH[3],北京斯达特机电科技生产的步进电机驱动器 SH-3F090M[4],可编程步进专用控制器 STC-01Z[5]、小型断路器 DZ47-63、中间继电器 KA、KA1、三个按钮开关(启动、紧急停止、夹紧)。步进控制器的输入有启动和紧急停止按钮,输出有控制步进电机分度转动的脉冲信号 CP、方向信号 DIR、驱动信号 OPTO,还有两路线圈输出,分别控制中间继电器 KA 和 KA1 的输出,中间继电器 KA 的一个常开触点作为焊接控制器的焊接启动信号,中间继电器 KA1 的一个常开触点控制电磁阀 DF,从而控制机头气缸和下电极气缸动作,夹紧按钮控制电磁阀 DF1 工作,从而控制夹紧气缸动作,气动原理如图 2 所示。完整的整流子焊接控制过程如下:1)按下夹紧按钮,DF1 通电,将整流子松开,装上待焊的整流子后松开按钮,整流子被夹紧;2)按下可编程步进控制器 STC-01Z 启动按钮,输出 1 使 KA1 线圈得电,KA1 常开触点闭合,电磁阀 DF 得电,将上、下电极夹紧加压,延时一定时间后,输出 2 使线圈 KA 得电,KA 常开触点闭合,从而触发焊接控制器启动,按设定好的焊接规范进行焊接,焊完一点后,按照控制程序,线圈 KA1 失电,上、下电极松开,由步进控制程序判断焊点的个数,如未焊完,步进驱动器驱动步进电机自动转位,转位后重新使线圈 KA1 得电,上下电极夹紧加压,延时后,KA 得电,焊接控制器启动,如此循环,直到焊完所有的焊点,步进电机回到原点,整个焊接过程由步进控制程序自动完成,焊接结束自动归零,没有分度误差,同时提高了生产效率。

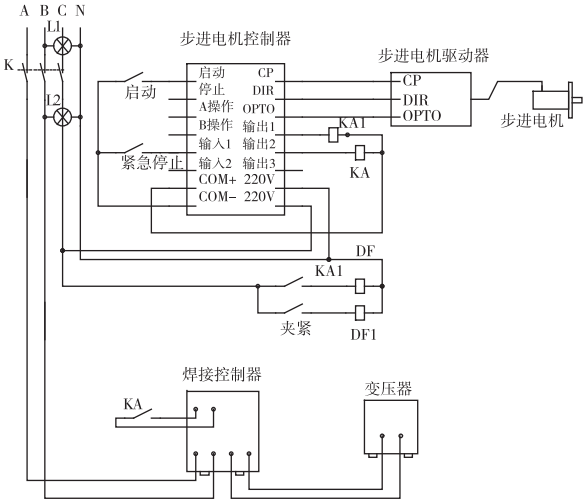


图 1 整流子点焊机控制系统结构图

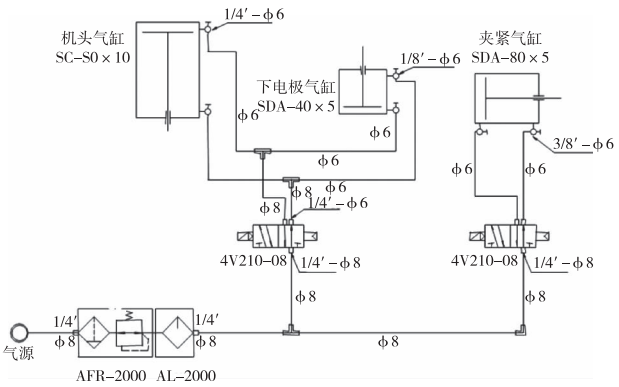


图 2 整流子点焊机气动原理图

1.3 步进控制程序设计

图 3 所示为整流子点焊机的焊接循环图。

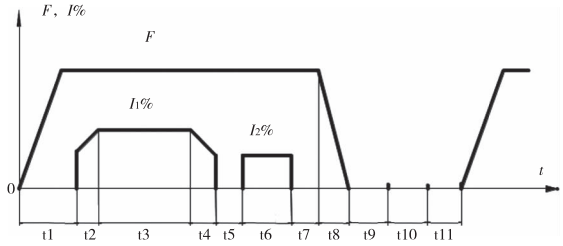


图 3 整流子点焊机焊接循环图

图 3 中 $t1 \sim t8$ 阶段分别为预压、预热、焊接、缓冷、通电间隙、回火、维持、休止过程，其中 $t2 \sim t4$ 阶段可合并作为第一次通电过程，$t6$ 阶段可作为第二次通电过程，根据需要两次通电也可合并为一次通电，在 $t1 \sim t7$ 阶段一直加压，直到焊接休止 $t8$ 阶段以后压力才去除，$t9 \sim t11$ 分别为步进电机转位前上、下电极松开时间，转位时间，上、下电极夹紧时间，其中 $t2 \sim t7$ 为焊接控制器的焊接控制时间，其值应小于或等于步进控制器通过延时程序给出的通电时间。当整流子的片数较少时，每片焊点的焊接时间主要由焊接控制器时序控制，此时步进控制程序无衰减功能，每个焊点的通电时间不变，焊接时间为焊接控制器事先设定的值。以下给出一个为不带衰减功能的整流子点焊程序实例：

```
00  CNT - 0          //计数器清零
01  OUT 1NNN         //输出 1 导通，上、下电极夹紧
02  DELAY 100        //预压，延时 100ms
03  OUT N1NN         //输出 2 导通，焊接启动
04  DELAY 300        //延时 300ms，焊接时间
05  OUT 00N0         //输出 1、2 不导通，上、下电极松开，一个焊点完成
06  CNT - 1          //计数器加 1
07  J - CNT 12 022   //计数器超过 22，则跳转到 12 行，蜂鸣器长声报警，焊接结束
08  J - BIT 12 1 0   //输入 1 紧急停止按钮按下，跳转到 12 行，焊接结束
09  SPEED 29000      //赋值速度 29kHz
10  G - LEN 1566     //设定步长，1566 表示焊点数为 22 时，步长为 1566
11  JUMP 01          //跳转到 01 行，焊接下一点
12  OUT NNN1         //蜂鸣器长声报警，焊接结束
13  END
```

实例中，步进控制器 STC - 01Z 的参数设定为：JF = 1000，HL = 4000，HF = 1000 ，BF = 1000，CC = 0000，NA = * * * *，NB = * * * * ，由于三相反应步进电机 90BC340CH 步距角为 1.5°，步进驱动器 SH - 3F090M 的细分数设定为 40，则步长的计算公式为：

步长 = (360°/1.5° * 40)/焊点数 = 9600/焊点数（细分数 40，减速比为 1∶ 1）

当外设减速比为 1∶ 3.59 时，步长 = 9600/22 * 3.59 = 1566。

当整流子片数较多时，为减少前面焊点的余热对后面焊点焊接的影响，如果将焊接控制器启动后的通电时间（即图 3 中的 $t2 \sim t7$）按照每焊几个焊点就减少一定周波（1 周波 = 20 ms）的焊接时间，就可实现热量自动衰减的功能。以下给出一个带衰减功能的程序实例，其中整流子片数为 60，细分数为 40，步进控制器输出 1 的延时时间为 300 ms，用于上下电极夹紧，输出 2 的时间也就是焊接时间，从第 10 个焊点到 40 个焊点，每隔 5 个焊点按 800 ms、760 ms、720 ms、680 ms、640 ms、600 ms、500 ms 递减，第 40 至第 50 个焊点按 400 ms，第 50 至第 60 个焊点按 300 ms 时间焊接，程序如下：

```
00  CNT - 0          //计数器清零
01  OUT 1NNN         //输出 1 导通，上、下电极夹紧
02  DELAY 300        //预压，延时 300ms
03  OUT N1NN         //输出 2 导通，启动焊接
04  DELAY 800        //延时 800ms，焊接时间
05  OUT 00N0         //上、下电极松开，焊接完毕
06  CNT - 1          //计数器加 1
07  JUMP 63          //跳转到 63 行，焊接最前面 10 点，判断计数器值是否超过 60
08  OUT 1NNN         //输出 1 导通，上、下电极夹紧
```

```
09  DELAY 300      //延时 300ms
10  OUT N1NN       //输出 2 导通,线圈 KA 得电,启动焊接第 11 点
11  DELAY 760      //延时 760ms
12  OUT 00N0
13  CNT - 1
14  JUMP 63
15  OUT 1NNN
16  DELAY 300
17  OUT N1NN
18  DELAY 720      //延时 720ms
19  OUT 00N0
20  CNT - 1
21  JUMP 63
22  OUT 1NNN
23  DELAY 300
24  OUT N1NN
25  DELAY 680      //延时 680ms
26  OUT 00N0
27  CNT - 1
28  JUMP 63
29  OUT 1NNN
30  DELAY 300
31  OUT N1NN
32  DELAY 640      //延时 640ms
33  OUT 00N0
34  CNT - 1
35  JUMP 63
36  OUT 1NNN
37  DELAY 300
38  OUT N1NN
39  DELAY 600      //延时 600ms
40  OUT 00N0
41  CNT - 1
42  JUMP 63
43  OUT 1NNN
44  DELAY 300
45  OUT N1NN
46  DELAY 500      //延时 500ms
47  OUT 00N0
48  CNT - 1
49  JUMP 63
50  OUT 1NNN
51  DELAY 300
52  OUT N1NN
53  DELAY 400      //延时 400ms
54  OUT 00N0
55  CNT - 1
56  JUMP 63
57  OUT 1NNN
58  DELAY 300
59  OUT N1NN
60  DELAY 300      //延时 300ms
61  OUT 00N0
62  CNT - 1
63  J - CNT 85 060    //计数器超过 60,则跳转到 85 行
64  J - BIT 85 1 0    //如果输入 1 导通,紧急停止按钮闭合,则跳转到 85 行
65  SPEED 29000    //赋值速度 29KHz
66  G - LEN 160       //电机步长为:9600/60 =160
67  J - CNT 69 010    //计数器超过 10,则跳转到 69 行
68  JMP 01         //否则跳转到 01 行,继续焊接下一点,通电时间为 800ms
69  J - CNT 71 015    //计数器超过 15,则跳转到 71 行
70  JUMP 08        //否则跳转到 08 行,继续焊接下一点,通电时间为 760ms
71  J - CNT 73 020    //计数器超过 20,则跳转到 73 行
72  JUMP 15        //否则跳转到 15 行,继续焊接下一点,通电时间为 720ms
73  J - CNT 75 025    //计数器超过 25,则跳转到 75 行
74  JUMP 22        //否则跳转到 22 行,继续焊接下一点,通电时间为 680ms
75  J - CNT 77 030    //计数器超过 30,则跳转到 77 行
76  JUMP 29        //否则跳转到 29 行,继续焊接下一点,通电时间为 640ms
```

```
77  J - CNT 79 035      //计数器超过 36,则跳转到 79 行
78  JUMP 36             //否则跳转到 36 行,继续焊接下一点,通电时间为 600ms
79  J - CNT 81 040      //计数器超过 40,则跳转到 81 行
80  JUMP 43             //否则跳转到 22 行,继续焊接下一点,通电时间为 500ms
81  J - CNT 83 050      //计数器超过 50,则跳转到 83 行
82  JUMP 50             //否则跳转到 50 行,继续焊接下一点,通电时间为 400ms
83  J - CNT 87 060      //计数器超过 60,则跳转到 87 行,回到起点
84  JUMP 57             //否则跳转到 57 行,继续焊接下一点,通电时间为 300ms
85  OUT NNN1            //蜂鸣器长声报警
86  DELAY 300           //延时 300ms
87  GOTO 00000000       //回到原点
88  END
```

在实际使用中,步进控制器需要配合焊接控制器协调工作,当整流子片数比较少时,其焊接热量主要由焊接控制器精确控制,焊接过程中无须调整设定好的焊接时间,焊接一气呵成,步进控制程序启动焊接控制器后,通电时间无变化。当整流子片数比较多时,在焊接进行时,为了防止余热对后面焊点的影响,需要减少焊接时间,而每次手工调整焊接时间既不现实也不方便,通过设计带衰减功能的步进控制程序,实现了不间断连续焊接,保证了焊点前后一致性,提高了生产效率。

2 结论

基于可编程步进控制器的整流子点焊机控制系统,具有技术先进,操作简便,焊接稳定的特点,该系统的使用进一步提高了整流子点焊机整机的性能,实现了整流子焊接过程自动化。

参考文献

[1] 梁志锋.微型电机转子整流子焊接工艺探讨[J].机械工程师,2001,1,37 - 38.

[2] 张勇等.电阻焊控制技术[M] 西安:西北工业大学出版社,2014.

[3] 步进电机和驱动器说明书[Z].北京:北京欣斯达特控制有限公司,2010.

[4] STC - 01Z 型步进电机控制器说明书[Z].北京:北京斯达微步控制有限公司,2010.

[5] SH 系列步进电机驱动器使用说明书[Z].北京:北京欣斯达特控制有限公司,2010.

基金项目:2017 年度院级课题资助项目(JATC17010201)。

作者简介:金强 (1970 -),男,硕士,高级讲师.研究领域:控制工程。

王亮 (1979 -),男,硕士,讲师,研究领域:计算机应用。

方春华 (1973 -),女,本科,讲师,研究领域:计算机应用。

收稿日期:2018 - 06 - 12

(上接第 59 页)

参考文献

[1] 中国人民解放军总装备部. GJB67. 10A - 2008 军用飞机强度和刚度规范 第十部分:飞行试验[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2008.

[2] 孔德永,吴桂馥.舵面铰链力矩的估算[J].空气动力学学报,2005,23(2):263 - 266.

[3] FRY E B. Flight measurements of hinged - plate wing - spoiler hinge moments[R]. NASA,1983 1. 15:44343.

[4] 何发东.飞机舵面铰链力矩飞行实测技术研究[J].科学技术与工程,2005,11(31):7835 - 7837.

[5] 范华飞,李俊,李志蕊.短连杆飞行载荷实测技术[J].航空工程进展,2015,6(4):447 - 451.

[6] M. JI. 克利亚奇科,著.飞机强度飞行试验(静载荷)[M].汤吉晨,译.西安:航空航天部《ASST》系统工程办公室,1992.

[7] JENKINS J M,DEANGELIS V M. A Summary of Numerous Strain - Gage Load Calibrations on Aircraft Wings and Tails in a Technology Format[R]. NASA Technical Memorandum 4804,1997.

作者简介:李志蕊(1987 -),女,硕士,工程师。主要研究方向:飞机载荷与强度规范、飞行试验。

吴波(1990 -),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行载荷与强度规范、飞行试验。

高腾龙(1993 -),男,硕士,助理工程师。主要研

究方向:飞行载荷与强度规范、飞行试验。

收稿日期:2018 – 08 – 14

基于 LabVIEW 的变压器运输在线监测系统设计

吕　安[1],熊树生[2▲],徐宏飞[1],姜振军[3],罗　源[2],周彩玲[4]

(1. 黄山派尼尔科技发展有限公司,安徽 黄山 245000;2. 浙江大学 能源工程学院,浙江 杭州 310027;
3. 浙江江山变压器股份有限公司,浙江 江山 324100;4. 浙江大学 工程师学院,浙江 杭州 310015)

摘　要:基于 LabVIEW 软件开发平台开发的在线监测变压器运输设备运行状态的管理系统,主要包括了控制台、通讯服务器、运输监测终端、本地操作工具、显示界面、手机服务器、手机终端以及短信猫等。其中通讯服务器通过 TCP 协议网络采集运输监测终端的数据并进一步上传至控制台,而本地操作工具用于拷贝和擦除终端数据。控制台将过滤解析后的数据存储至数据库并通过 web 发布到 Internet 上,同时将数据转为共享变量以供手机服务器调用,手机服务器通过 TCP 协议连接管理多个手机终端并提供数据查询功能。系统运用了物联网、TCP 传输等关键技术,以数据传输模块和数据解析处理模块为中心,最终实现数据查询、超限报警等功能,提高了变压器运输质量和预警力度。

关键词:在线监测　变压器运输　LabVIEW　TCP 协议　web 发布

中图分类号:TM403.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0079 - 05

Design of transformer transportation on - line monitoring system based on LabVIEW

Lü An, XIONG Shusheng, XU Hongfei, JIANG Zhenjun, LUO Yuan, ZHOU Cailing

Abstract: This system is an online monitoring management system of the transformer transportation equipment running status based on LabVIEW. It mainly includes control centre, communication server, transportation monitoring terminal, local operation tool, display interface, mobile communication server, mobile terminal and short message cat. The communication server collects the data of the transportation monitoring terminal through the TCP protocol network and uploads it to the control centre further, while the local operation tool is used to copy and erase the terminal data locally. The control centre will filter the parsed data and then store them in the database, and publish the data to Internet via the Web publishing, and convert data to shared variables for mobile communication server calls. The mobile communication manages multiple mobile terminals through TCP protocol and provides data query function. Taking data transmission module and data analysis and processing module as the centre, this system uses the internet of things, TCP transmission and other key technologies to realize data query, over - limit alarm and other functions, which improves the quality of transformer transportation and early warning.

Keywords: on - line monitoring, transformer transportation, LabVIEW, TCP protocol, Web publishing

0　引言

电力对人们日常生活有着极其重要的作用。将电能从发电站传输到每家每户的过程中,为了降低能量损耗往往采用高压电线传输的方式,同时需通过变压器将高压电能降压为常压(220V)电能,因此变压器是电力系统中不可或缺的重要电器之一。而变压器在运输过程中必然受到道路颠簸和环境的影响,如果保护措施不当则可能导致变压器元器件发生结构损伤变形或绝缘部分受潮导致短路,进而使变压器寿命减少甚至元器件被烧毁或损坏[1]。这不仅会影响供电系统的布置,延长电网建设时间,而且将增加额外的经济损失。且生产厂家与用户较难从传统的变压器运输在线监测系统中了解变压器的当前地理位置、行驶速度、环境温度和湿度、三相电压、低压回路电流等的详细信息[2]。

为了时刻监测变压器在运输过程中的状态并处理突发状况,本文针对本项目涉及的大型变压器的

运输现状[3]，结合行驶速度、冲击加速度、油温、电压电流等参数，开发了基于 LabVIEW 平台的物联网技术、TCP 传输技术、共享变量技术等为一体的变压器在线监测系统。

1 在线监测系统构成

对比分析了现存的几类大型变压器运输监测方案，结合本项目的具体情况，确定了以下方案：本系统主要由控制台、通讯服务器、手机服务器、本地操作工具四部分构成，系统整体结构如图 1。系统的前台包括显示界面和手机终端上的实时数据显示、历史数据查询和报警信息显示以及设置报警阈值，后台包括各部分连接和监权、数据采集解析、实时报警和数据库存储等。

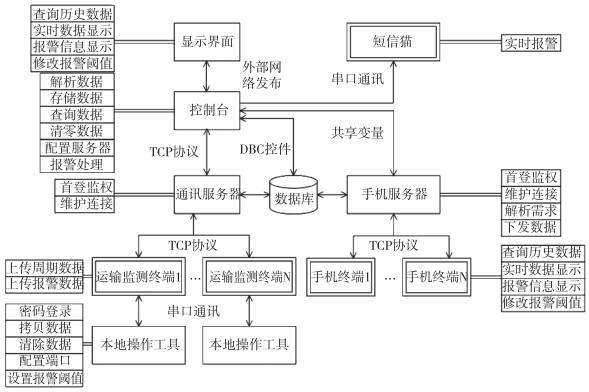


图 1 系统结构组成

变压器终端需要监测的状态参数包括：本体油温、油压、环境温湿度、本体三轴加速度、芯体接地电流、低压回路电流和三相电压，运输车辆需要监测的信息包括车辆当前地理位置、车辆行驶速度。通过传感器采集上述信息，经由变送器汇总并转化为 4－20A 电流信息，在就地存储备份的同时通过 TCP 协议打包远程传输至通讯服务器。变压器终端还通过北斗定位技术将车辆实施地理位置信息反馈至远端通讯服务器，保证了地理位置无死角定位。为时刻监测变压器终端是否工作，控制终端每分钟向服务器发送一次单字节的心跳包，确保终端的变送器仍在正常工作。

通讯服务器对于首次登入的运输终端进行监权，识别与数据库中的终端识别码是否匹配，建立连接。而后通过 TCP 协议以轮巡的方式采集多个终端的数据并上传至控制台，其中采集的数据包括周期数据（温度、地理位置、电压电流等）和报警数据（周期数据超过报警阈值时发送报警信息）。在连接过程中，每隔一分钟接收一次运输监测终端上传的心跳包，根据心跳包的有无判断故障所在。服务器的端口通过控制台进行配置。

本地操作工具用于本地拷贝和擦除终端数据等。测试电脑在安装本地操作工具后，通过 RS232 串口直接与变压器终端相连。工作时采用指令/应答的方式，命令帧与应答帧一一对应，所有通讯通过打包的方式传递。利用 LabVIEW 中功能强大的 VISA（vitual in strument software architecture）的各种模块实现数据的转移[4]。在用户名密码登陆成功后，可实现拷贝数据、擦除终端数据、配置连接端口以及设置报警阈值的功能。显示界面如图 2。

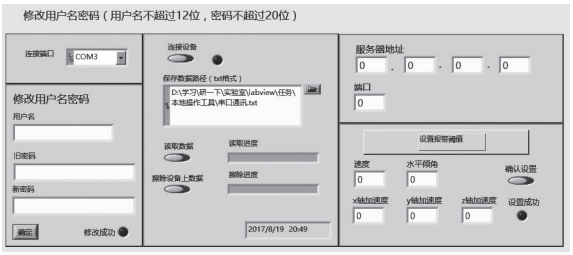


图 2 本地操作工具显示界面

控制台接收通讯服务器传来的 TCP 协议格式打包的数据，将其过滤解析后通过 OBD 组件存储至数据库并通过 web 发布到 Internet 上，同时将数据转为共享变量以供手机服务器调用。控制台将提供查询历史数据、滚动显示实时数据、显示报警信息、显示当前连接终端数和设置报警阈值等功能。当接收到报警信息时，控制台会将信息通过短信猫发送至用户手机，并优先通过手机服务器下发至每个手机终端。

手机服务器通过 TCP 协议管理多个手机终端。同通讯服务器一样，对首次登录的手机终端进行监权，成功连接后，通过轮巡的方式依次接收每个手机终端的请求数据包，按照事先约定的 TCP 协议中不同命令请求发送相应的应答数据包。手机终端可实现功能包括查询历史数据、显示实时数据、显示报警信息以及修改报警阈值等。

2 LabVIEW 平台介绍

本系统是借助 LabVIEW 平台搭建的在线监测

系统。LabVIEW 是由美国国家仪器公司(NI)开发的一款适用于多操作系统的基于图形程序的虚拟仪器仪表开发平台,应用范围覆盖了工业自动化、测试测量、嵌入式应用、计算机仿真等众多领域[5]。LabVIEW 的程序由前面板和程序框图组成。前面板集合了用户输入和显示控件,相当于传统仪器的面板;程序框图中用功能模块和适当的连线构成控制流程图,其中每个功能模块均为封装好的子程序(子 VI),即图形化代码。程序的执行顺序依据数据流走向决定,从而控制前面板中的对象[6]。

2.1 基于 LabVIEW 的 TCP 协议

如同人的语言,计算机之间必须使用相同的通讯协议才能进行通信,共同遵守一组通信标准,才能在网络中互通信息。我们日常使用的因特网正是基于 TCP/IP 协议所建立的,是目前使用最为广泛的协议。

TCP 采用网络服务器和客户端的方式进行通信。服务器主要负责发送数据至多个客户端或者从多个客户端读取数据,同样,客户端可以向所对应的服务器发送请求并获取所需数据。服务器与客户端传输是双向的,区别在于服务器可同时连接多个客户端。

TCP 协议的通信过程为:服务器端必须首先通过指定 IP 地址以及端口名建立侦听,等待客户端响应连接;然后客户端向对应的服务器所设定的 IP 地址和端口发出连接请求;待服务器与客户端成功建立连接后,双方方可通过读写函数控件收发数据,完成数据传输时,需先从客户端断开连接后服务器才能断开连接。

本系统中的手机服务器与通讯服务器将通过 TCP 协议进行对外通讯。所使用的 TCP 协议规定的数据包格式如下:

一个完整的数据包应由起始符、命令单元、识别码、数据加密方式、数据单元长度、数据单元和校验码组成,数据包结构和定义见表 1 所示。除数据单元长度可变,剩余部分固定为 24 字节。多字节构成的数据,统一按照高字节在后,低字节在前的顺序编码和取用。

2.2 基于 LabVIEW 的网络发布

系统运行过程中,需要将数据呈现给变压器厂商以及客户,除了通过手机客户端的方式,还可以将程序发布到 Internet 上。在服务器进行外网发布系统并打开控制台程序的情况下,用户可在指定网站登入后,看到显示界面并获得其控制权。

WEB 发布的流程包括:启用 LabVIEW 选项中远程前面板服务器,配置根目录、TCP/IP 端口、使用记录文件、浏览器访问控制权等;再通过 Web 发布工具配置内嵌模式、网页说明内容、URL 网址内容等,到此步完成内网发布步骤;通过 netsh 命令实现端口映射,使服务器上固定外网 IP 端口转接到内网 IP 指定端口,实现在任意电脑上输入用外网 IP 替换

表 1　　数据包结构和定义

起始字节	定义	数据类型	描述及要求
0	起始符	STRING	固定为 ASCII 字符‘&’‘&’,用“0x26,0x26”表示
2	命令标识	BYTE	命令包:命令标识为 0x01/0x02 等命令,应答标志为 0xFE;
3	应答标志	BYTE	应答包:命令标识不变,修改应答标志 0x01 成功;0x02 失败。
4	终端识别码	STRING	终端识别码是识别移动终端的唯一标识,由 17 位字码构成。包含 0 ~ 9、A ~ Z
21	数据加密方式	BYTE	0x01:数据不加密;0x02:数据经过 RSA 算法加密;0x03:数据经过 AES128 位算法加密;“0xFE”表示异常,“0xFF”表示无效,其他预留(当前不加密)
22 ~ 23	数据单元长度	BYTE	数据单元长度是数据单元的总字节数,有效值范围:0 ~ 65535,高字节在后,低字节在前。
24 ~	数据单元		详见变压器状态参数
倒数第 5	校验码	BYTE	采用 BCC(异或校验)法,校验范围从命令单元的第一个字节开始,同后一字节异或,直到校验码前一字节为止,校验码占用一个字节
倒数 3/4	结束符	BYTE	固定为 ASKII 字符‘*’‘*’十六进制为 0x2A 0x2A
倒数 1/2	结束标记	BYTE	0x0D 0x0A 表示换行和回车,方便服务器端进行字符串处理

内网 IP 后的 URL 指定网址即可访问显示界面。

3 在线监测系统设计

由于篇幅限制，本文着重介绍在线监测系统的数据传输模块和数据解析处理模块两部分。数据传输模块主要在通讯服务器与手机服务器中得以体现。而数据解析处理模块以控制中心处理数据为例。

3.1 数据传输模块

通讯服务器的数据流主要从变压器终端流向通讯服务器，相比于手机服务器的协议内容较少。因此本文以手机服务器为例，更好地描述该模块。

第一章系统结构介绍中有提到手机服务器的功能，主要是监权、根据手机端的请求包做出应答、接收并下发报警数据。手机服务器的软件流程图如图3，包括初始化、状态确认、接收上行数据、发送下行数据、下发报警数据和停止六个部分。初始化中设定 TCP 端口并建立监听以及初始化状态参数；根据停止键是否按下进入状态确认或是停止部分；状态确认中需要把监听到的新手机端加入现有手机客户端数组，若有连接的手机端则进入收发数据部分，否则返回判断是否按下停止键；收发数据根据数据流可划分接收手机端的请求数据、向手机端发送应答数据以及直接下发实时数据和报警数据。根据 TCP 协议规定，手机端发送的请求数据包一次包含一种命令，可发送的命令包括登入、登出、查询历史数据和修改报警限值。

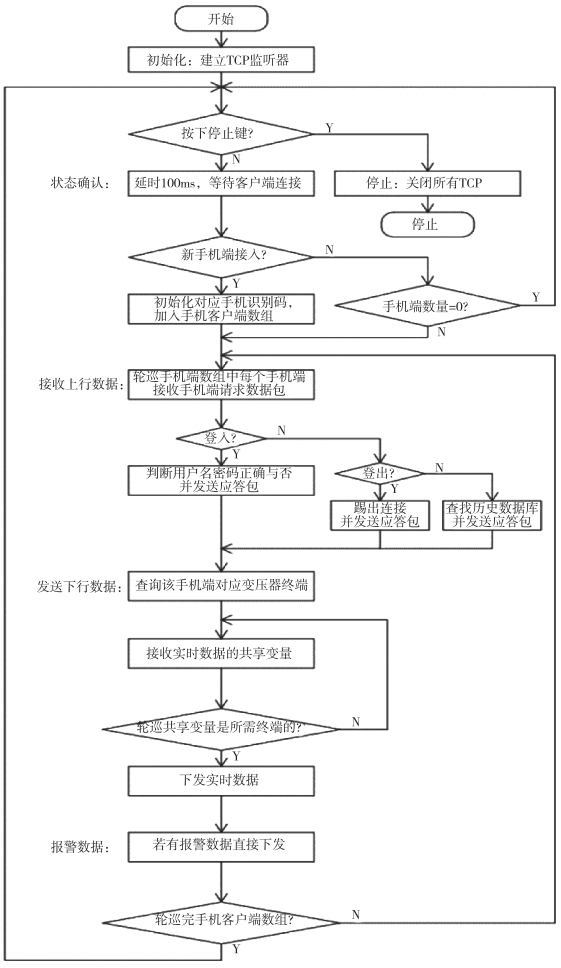


图 3 手机服务器流程图

3.2 数据解析处理模块

在接收外部传来的 TCP 数据包后，应该在保证数据包格式正确的情况下，对数据包进行解析处理以获得所需数据。数据包格式错误表明本次数据发生偶然性错误或是该连接本身发生错误，系统将丢弃该帧数据或严重时将直接断开该连接并且报错。本节以控制中心的数据解析处理为例，如图4。当

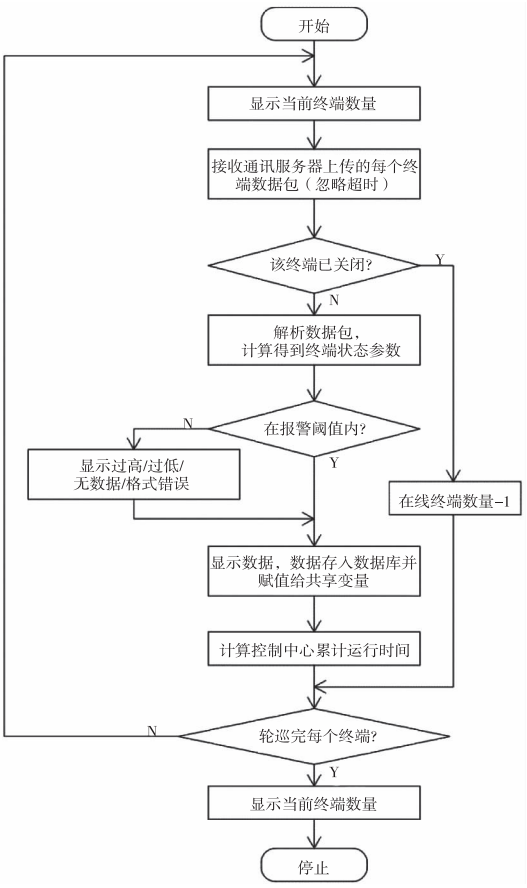


图 4 数据解析处理模块

控制中心接收到终端的 TCP 数据包时,需要进行转义处理来过滤解包、异或校验判断数据包完整性,而后截取状态参数部分,根据 TCP 协议倒推计算出状态参数具体数值,判断该数值是否在报警阈值内,若是,将正常显示该数值、存入数据库并赋值给共享变量;否则将依据实际情况显示报警信息并下发至手机服务器。解析过程封装在数据解析小程序中,由主程序调用,如图 5。用户在安装 LABVIEW 或者安装插件 LABVIEW run - time engine 之后,即可通过 IE 浏览器访问服务器发布的显示界面网页。部分网页如图 6 所示,可直观地看到当前运行的终端数量、地理位置、报警信息以及指定终端的状态参数。此外,该网页功能还包括通过设定时间范围查询显示指定终端的历史数据、以表格形式滚动更新当前数据、修改状态参数的报警上下限值。

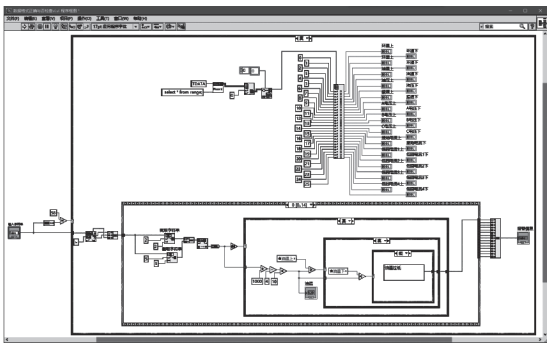


图 5　数据解析子程序框图

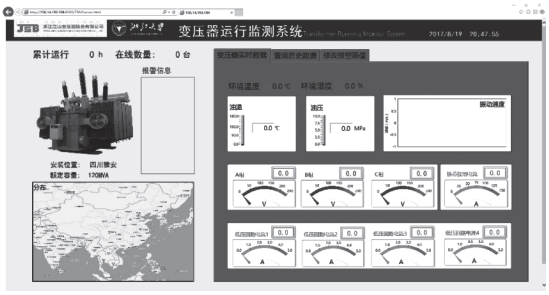


图 6　显示界面网页

4　结论

变压器在电力系统中有着不可替代的作用。为了时刻监测变压器在运输过程中的状态并处理突发状况,项目开发了基于 LabVIEW 平台的物联网技术、TCP 传输技术、共享变量技术等为一体的变压器在线监测系统。

本文首先整体介绍了系统的组成结构和工作原理,然后简要说明了系统的开发平台 LabVIEW 和相关技术的特点,最后着重分析了在线监测系统的数据传输模块和数据解析处理模块两部分,并展示了最终的网页成果。

本系统实现了运输监测网络化、透明化,运输数据多层共享。用户、变压器厂商和运输公司能够共同在线监督变压器当前状态,提高变压器运输质量和预警力度,从而采取有效的预防措施,将进一步提升变压器运输过程的安全系数。

参考文献

[1] 刘公平. 配电变压器运输、安装和使用应注意的事项[J]. 农村电工,2003,11(8):31.

[2] 秦伟,李笋,李川,等. 基于无线网络技术的电力变压器运输远程监测系统[J]. 变压器,2016,53(6):29 - 34.

[3] 张国兵,张文亮. 特高压变压器运输冲击加速度控制与安全裕度评估[J]. 高电压技术,2010,36(1):290 - 295.

[4] 马敏,杨胜伟. 基于 LabVIEW 的气体监测系统串口通讯设计[J]. 自动化与仪表,2016,31(11):43 - 46.

[5] 陈树学,刘萱. LabVIEW 宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2011.

[6] 高占凤,杜彦良,刘玉红,等. 基于 LabVIEW 的远程数据采集与传输系统[J]. 微电子学与计算机,2007,24(3):102 - 104.

作者简介: 吕安(1973 -),男,汉族,安徽歙县人,总经理,工程师,现就职于黄山派尼尔科技发展有限公司,主要从事高低压配电系统方面的研究。

通讯作者: 熊树生(1971 -),男,汉族,福建周宁,副所长,副教授,现就职于浙江大学能源工程学院,研究方向为新能源的车用及多元化利用、生物质的资源化利用及物联网相关研发。

收稿日期: 2018 - 05 - 28

基于模糊控制的混合臂高空作业车工作斗调平控制系统研究

周　攀,侯　帅,曾致豪,王凯丽,周　静,付　耀,宋　超
(长安大学 工程机械学院,陕西 西安 710064)

摘　要:为使混合臂高空作业车在全举升空间实现工作斗的调平,结合混合臂高空作业车结构及作业特点,提出基于模糊控制的混合臂高空作业车工作斗调平控制系统方案,并设计出模糊 PID 控制器。采用 Simulink 软件建立基于混合臂高空作业车工作斗调平控制系统的模糊 PID 控制系统仿真模型,分析了采用常规 PID 控制策略与采用模糊 PID 控制策略的调平控制系统特性。研究结果表明:模糊 PID 控制在稳定性、快速性及精确性方面优于常规 PID 控制,确保了全举升空间范围内的控制系统性能,为混合臂高空作业车工作斗的调平提供了一种有效的方法。

关键词:模糊 PID 控制　混合臂高空作业车　工作斗调平　仿真　性能
中图分类号:TP2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1002 - 6886(2018)06 - 0084 - 05

Study on leveling control system of working platform of mixing - jib aerial working truck based on fuzzy control

ZHOU Pan, HOU Shuai, ZENG Zhihao, WANG Kaili, ZHOU Jing, FU Yao, SONG Chao

Abstract: In order to achieve the leveling of the working bucket in the full - lifting space of the mixing - jib aerial working truck, and in combination with the structure and operation characteristics of the mixing - jib aerial working truck, a s scheme of leveling control system for working bucket of the mixing - jib aerial working truck was put forward, and the fuzzy PID controller was designed. The Simulink software was used to establish the simulation model of the fuzzy PID control system based on the leveling control system of the working bucket of the mixing - jib aerial working truck. The characteristics of the leveling control system using the conventional PID control strategy and the fuzzy PID control strategy were analyzed. The research results show that the fuzzy PID control is superior to the conventional PID control in terms of stability, rapidity and accuracy, ensuring the performance of the control system in the full - lift space range, and providing an effective method for the leveling of the working bucket of the mixing - jib aerial working truck.

Keywords: fuzzy PID control, mixing - jib aerial working truck, work bucket leveling, simulation, performance

0　引言

混合臂高空作业车在高空作业中应用领域广泛,如建筑工地、消防、维修等工况复杂的场合,而混合臂高空作业车工作斗的调平技术至关重要,其工作臂较长,响应性较差,在举升过程中易发生抖动,造成工作人员在高空作业时不安全。因此,研究混合臂高空作业车工作斗调平至关重要。石家庄铁道大学的高兰用 PLC 控制调平油缸,设计了模糊 PID 控制系统;长安大学的雷晓顺等人针对阀控液压马达系统设计了模糊控制系统[1-2]。上述研究为混合臂高空作业车工作斗调平提供了理论依据,也为模糊 PID 控制系统提供了新思路。

1　混合臂高空作业车结构、作业特点及调平要求

1.1　混合臂高空作业车结构

混合臂高空作业车结构如图 1。

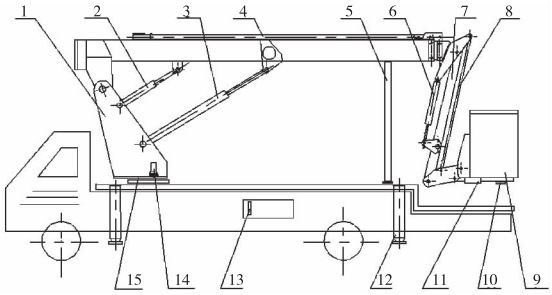
1.2　混合臂高空作业车作业特点

结合臂架结构及举升幅角变化,该高空作业车工作斗调平控制系统的特点如下:

1)工作斗结合伸缩臂、折叠臂的旋转,配合转

台的回转,其作业空间较大。

2)工作斗相对于伸缩臂、折叠臂变幅可反向转动,适应于复杂、非结构性环境。



1－转台;2－平衡油缸;3－伸缩臂变幅油缸;4－伸缩油缸;5－伸缩臂支架;6－折叠臂变幅油缸;7－折叠臂;8－平衡拉杆;9－工作斗;10－角度传感器;11－调平油缸;12－支架;13－油箱;14－回转机构;15－回转支承。

图 1　混合臂高空作业车结构

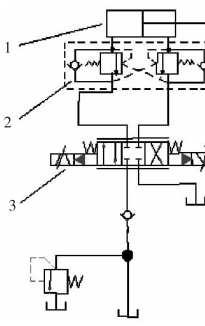
3)混合臂高空作业车在举升过程中由同 1 个 PLC 控制器控制,即伸缩臂、折叠臂和工作斗的三个输入间为互锁关系,提高了工作斗的平稳性和可靠性[3]。

1.3　调平要求

基于上述混合臂高空作业车的作业特点,对工作斗调平控制系统的要求为:稳定性高、响应快速、精度高(参考高空作业车国家标准,规定该调平控制系统工作斗与水平面的夹角不超过 5°)。

2　混合臂高空作业车调平控制系统方案

综合考虑混合臂高空作业车工作斗调平所需具备的精确性、快速性和稳定性,选用电液比例调平机构。伸缩臂、折叠臂旋转的角度 α、β 之和与工作斗旋转的角度 ω 大小相等,方向相反,但实际上 $|\omega| \neq |\alpha+\beta|$,允许工作斗与水平面之间的角度在 5°范围。工作斗上安装有角度传感器,角度传感器将检测到的角度信号输入给主控制器 PLC,信号经控制器处理后驱动电液比例换向阀 3,控制电液比例换向阀 3 的阀口开度和换向,然后压力油经平衡阀 2 作用给调平油缸 1,调平油缸 1 中活塞杆伸长或缩短,工作斗正转或反转,工作斗转动角度与工作斗角度传感器检测到的信号成比例。电液比例调平原理如图 2。混合臂高空作业车工作斗调平控制系统的控制原理如图 3。



1–调平油缸;2–平衡阀;3–电液比例换向阀。

图 2　电液比例调平原理

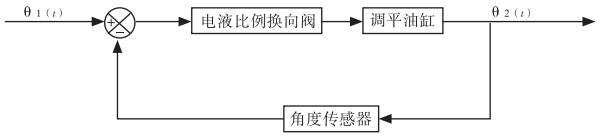


图 3　混合臂高空作业车工作斗调平控制系统的控制原理

3　混合臂高空作业车工作斗调平控制系统建模与仿真

3.1　混合臂高空作业车工作斗调平控制系统建模

通常将电液比例阀视为一个由二节振荡环节和二节比例环节组成[4],其传递函数为:

$$G_1(s) = \frac{X_v(s)}{I(s)} = \frac{K_v}{\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\delta_v}{\omega_v}s + 1} \tag{1}$$

式中:X_v— 电液比例阀的阀芯位移;I— 输入电液比例阀的电流;K_v— 电液比例阀的增益;ω_v— 电液比例阀的固有频率;δ_v— 电液比例阀的阻尼比系数。

调平控制系统在工作时,调平油缸的传递函数为[1]:

$$G_2(s) = \frac{K_m/A_m}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h}s + 1\right)} \tag{2}$$

式中:K_m— 电液比例阀的流量增益;A_m— 负载有效流量面积;ω_h— 压力油固有频率;δ_h— 压力油的阻尼比系数。

角度传感器在有效空间为一比例环节[1],其传递函数为:

$$G_0(s) = \frac{\Psi(s)}{\theta(s)} = K_0 \tag{3}$$

式中:K_0— 等效比例系数,取 $K_0 = 1$。

调平控制系统的开环传递函数为:

$$G_m(s) = \frac{K_v K_m/A_m}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h}{\omega_h}s + 1\right)\left(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\delta_v}{\omega_v}s + 1\right)} \tag{4}$$

调平控制系统的闭环传递函数为：

$$G(s)=\frac{K_vK_m/A_m}{s\left(\frac{s^2}{\omega_h^2}+\frac{2\delta_h}{\omega_h}s+1\right)\left(\frac{s^2}{\omega_v^2}+\frac{2\delta_v}{\omega_v}s+1\right)+K_0K_vK_m/A_m} \tag{5}$$

表 1　　系统基本参数

名　　称	参数
电液比例阀增益 K_v/(m/(s·A))	$4.6\cdot10^{-4}$
电液比例阀阻尼比系数 δ_v	0.7
电液比例阀固有频率 ω_v/(rad/s)	66
电液比例阀流量增益 K_m/(m^2/s)	2.3
压力油固有频率 ω_h/(rad/s)	407
压力油的阻尼比系数 δ_h	0.2
负载有效流量面积 A_m/m^2	$4.7\cdot10^{-3}$

系统基本参数如表 1 所示。代入数据得，控制系统框图如图 4。

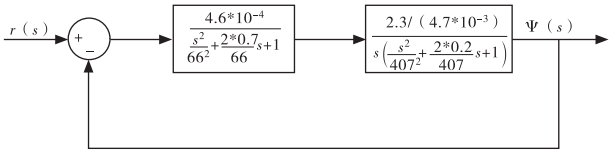


图 4　控制系统框图

3.2　混合臂高空作业车工作斗调平控制系统仿真

调平控制系统 Bode 图如图 5，相位裕度和幅值裕度均为正，该调平控制系统是稳定的。由 Simulink 仿真可得出控调平制系统单位阶跃响应曲线（图 6），调平控制系统能达到稳定状态，但响应较慢，需设计模糊 PID 控制器。

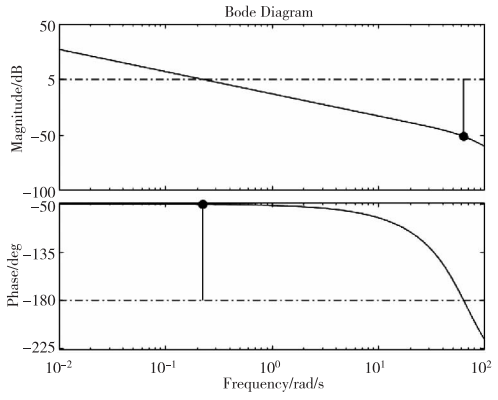


图 5　调平控制系统 Bode 图

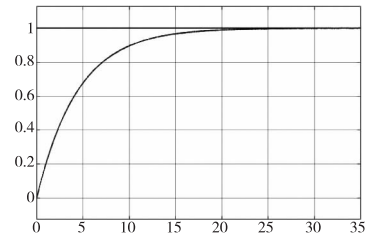


图 6　调平控制系统单位阶跃响应曲线

4　混合臂高空作业车工作斗调平控制系统模糊 PID 控制器设计

混合臂高空作业车工作斗模糊 PID 调平控制系统原理图如图 7。调平控制系统在运行中，不断检测 e 和 ec，根据模糊控制原理对 3 个参数在线修改以满足不同 e 和 ec 时对控制参数的要求，从而使得混合臂高空作业车工作斗在满足该调平控制系统要求的精度下平稳，快速的调平。

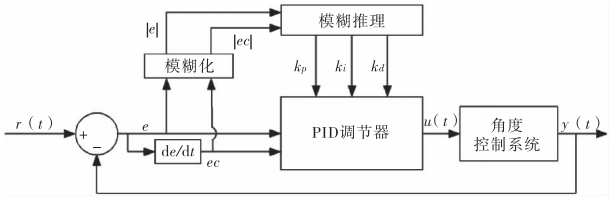


图7　混合臂高空作业车工作斗模糊 PID 调平控制系统原理

4.1　确定混合臂高空作业车调平控制系统模糊规则

模糊 PID 控制器以角度偏差 e 和角度偏差变化率 ec 作为输入，变量 k_p，k_i，k_d 作为输出，将 e，ec，k_p，k_i，k_d 的模糊子集设为{负大、负中、负小、零、正小、正中、正大} = {NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB}，角度偏差 e、角度偏差变化率 ec 和 k_p 的论域均为{−6，−4，−2，0，2，4，6}，k_i 和 k_d 的论域均为{−3，−2，−1，0，1，2，3}。NB、PB 为 S 型函数，其它为 trimf 函数。根据已有 PID 控制系统的设计经验，得模糊控制参数调节器对 PID 参数的调整规律[1]：

1）当角度偏差 | e | 较大时，k_p 取值较大，k_d 较小，k_i 为零；

2）当角度偏差 | e | 和角度偏差变化率 | ec | 中等大小时，k_p 取值较小，k_i 和 k_d 适中；

3）当角度偏差 | e | 较小时，k_i 和 k_p 取值较大；

4）当角度偏差变化率| ec | 较小时，k_d 中等大小；

5）当角度偏差变化率 | ec | 较大时，k_d 取值较小。

根据经验可得 k_p，k_i，k_d 的模糊规则表分别如表 2、表 3、表 4。输入变量 e 和 ec 与输出变量 k_p 的隶属度函数如图 8，输出变量 k_i 和 k_d 的隶属度函数如图 9。

表 2　　Δk_p 的模糊规则表

ec \ e / Δk_p	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 3　　Δk_i 的模糊规则表

ec \ e / Δk_i	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

表 4　　Δk_d 的模糊规则表

ec \ e / Δk_d	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	ZO	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	PS	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

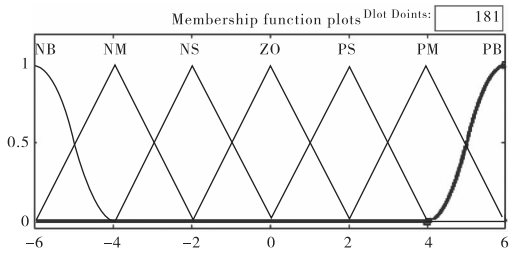


图 8　e、ec、k_p 的隶属度函数曲线

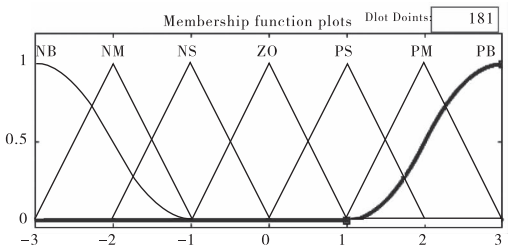


图 9　k_i 和 k_d 的隶属度函数曲线

4.2　混合臂高空作业车工作斗调平控制系统仿真

根据混合臂高空作业车工作斗调平控制系统数学模型，建立混合臂高空作业车工作斗调平控制系统的模糊 PID 仿真模型如图 10，其模糊 PID 调平控制系统单位阶跃响应曲线如图 11。

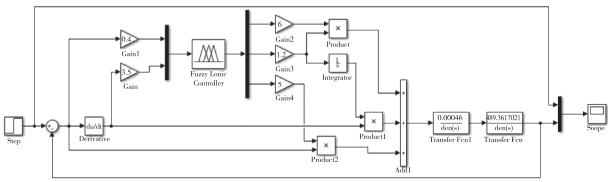


图 10　模糊 PID 调平控制系统仿真模型

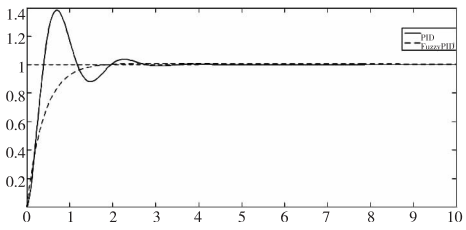


图 11　模糊 PID 调平控制系统单位阶跃响应曲线

4.3　混合臂高空作业车工作斗角度控制系统仿真分析

由图 11 可知，模糊 PID 调平控制系统在 2 s 以内就能达到稳定，而且没有超调，而常规 PID 控制在将近

注塑温度及衰减时间对改性聚丙烯注塑件气味、VOC 的影响

姜思维

(重庆化工职业学院,重庆 401228)

摘　要:通过研究改性聚丙烯(PP)注塑件在不同注塑温度和衰减时间下气味、VOC 的变化规律,寻找降低 PP 注塑件气味、改善 VOC 水平的方案。

关键词:改性聚丙烯　注塑温度　衰减时间　气味　VOC

中图分类号:TQ325.1　　**文献标识码**:B　　**文章编号**:1002-6886(2018)06-0088-03

Effect of injection temperature and decay time on odor and VOC of modified polypropylene injection molded parts

JIANG Siwei

Abstract: By studying the changes of odor and VOC in modified polypropylene (PP) injection molded parts at different injection temperature and decay time ,searching the ways to reduce odor and improve VOC level of PP injection molded parts.

Keywords: modified polypropylene, injection temperature, decay time, odor, VOC

0　引言

随着汽车行业的发展,汽车已经由奢侈品变为大众化产品,消费者对汽车的需求也从功能性转化为舒适性,车内空气质量成为消费者关注的热点之一。车内空气质量主要通过会产生危害的挥发性有

4 s 时才能达到稳定,且超调量将近 40%,仿真结果表明模糊 PID 控策略在混合臂高空作业车工作斗调平控制系统性能上优于常规 PID 控制策略,该模糊 PID 调平控制系统满足要求,可用于实际需求。

5　结束语

结合混合臂高空作业车结构及作业特点,提出了基于模糊控制的混合臂高空作业车工作斗调平控制系统,构建出混合臂高空作业车工作斗基于模糊控制的调平控制系统,设计出模糊 PID 控制器,以保证全举升空间的调平控制系统性能。采用阶跃输入工况下对混合臂高空作业车工作斗调平控制系统进行仿真研究,仿真结果表明模糊 PID 控制较常规 PID 控制快速性、稳定性及精确性高,验证了基于模糊控制的混合臂高空作业车工作斗调平控制系统的有效性和合理性。

参考文献

[1] 高兰. 基于 PLC 的高空作业平台调平控制系统研究[D]. 石家庄铁道大学,2016.

[2] 雷晓顺,侯帅,秦璇,等. 电液比例阀控液压马达系统的模糊 PID 恒速控制[J]. 流体传动与控制,2016(1):42-46+49.

[3] 曹学鹏,焦生杰,程磊,等. 基于小臂-作业平台联动的自动调平机制[J]. 长安大学学报(自然科学版),2014,34(4):184-190.

[4] 曹学鹏,程磊,焦生杰,等. 机电液融合控制型调平系统的稳定性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2013,38(3):746-751.

作者简介:周攀(1991-),男,陕西汉中人,硕士研究生,研究方向:机电液一体化。

收稿日期:2018-07-02

机化合物(VOC)含量以及消费者对车内气味的主观感受来评估。由于汽车内饰零部件很多都是 PP 注塑件,如何降低 PP 注塑件的气味和 VOC,成为汽车零部件厂家重点研究的课题之一。

在 PP 的注塑加工过程中,由于机械力、热、氧对材料的作用,PP 的分子链断裂产生烷基自由基,由于环境中氧的存在,这些烷基自由基通过链增长、链支化及链终止等反应形成醛、酮、羧酸、酯、γ-内酮、水等小分子物质[1],这些小分子物质会对注塑件的气味、VOC 造成很大的影响。但小分子物质在存储过程中会随着时间而衰减[2]。因此,通过对注塑温度和衰减的研究,寻找小分子物质产生和衰减的规律,对车内空气质量的管控有着重要的意义。

1 实验部分

1.1 主要原料和设备

金发科技股份有限公司某牌号 PP;海天注塑机;AGILENT 7890A 气相色谱仪;AGILENT 1200 液相色谱仪;10L 气味采样袋;烘箱。

1.2 实验方法

1.2.1 气味实验

将试验样板放入容量 1 L 的气味瓶中密闭,然后放入 80℃烘箱中恒温 2 h。取出气味瓶冷却至室温,然后由 5 个评价人员进行气味等级评价,取出现次数最多的等级作为最终结果(可以取两个等级的中间值,如 2.5 级、3.5 级)。

表 1 气味评判标准

评判标准	等 级
基本感觉不到	1 级
可感觉到,浓度低,不刺激	2 级
可感觉到,浓度高,不刺激	3 级
刺鼻气味	4 级

1.2.2 VOC 实验

首先对采样袋空白背景样品采集;然后将试验样板放入容量 10 L 的采样袋中,充入 60% 氮气,密闭后放入 65℃烘箱中恒温 2 h。使用采样泵和捕集管收集样品,采用气相色谱和液相色谱分别对挥发性有机组分和醛酮进行测定。通过数据处理获取常规 VOC 八项物质的浓度[3]。

1.3 实验方案

1.3.1 方案一

分别选择注塑温度 180℃、190℃、200℃、210℃、220℃、230℃、240℃、250℃,使用 PP 材料注塑 100 mm × 100 mm × 3 mm 的试验样板若干。将制作好的样板在标准实验室(湿度:53%,温度:23℃)中自然放置 3 天,然后测试气味、VOC。

1.3.2 方案二

将 230℃条件下制作好的样板在标准实验室(湿度:53%,温度:23℃)放置 3 d、5 d、7 d、10 d、15 d、20 d、30 d、60 d、90 d,然后测试气味、VOC。

2 结果与讨论

2.1 不同注塑温度对 PP 注塑件气味、VOC 的影响

如表 2 所示,对 PP 注塑件 VOC 八项物质进行检测,主要检出物为甲醛和乙醛,其它物质由于含量较低无法检出(ND)。造成该结果的原因是 PP 材料在高温下会发生热氧化降解,其主要产物为醛类小分子化合物。从图 1 中可以看出,随着注塑温度升高,甲醛和乙醛含量增大,当温度高于 210℃时,热氧化降解加强,产生的醛类物质开始大量增加。如表 2 所示,随着注塑温度升高,PP 注塑件的气味越来越大,主要为焦糊味,注塑温度超过 210℃后,焦糊味越来越浓,逐渐无法接受。所以在 PP 材料注塑加工过程中,把加工温度控制在在 210℃以下,有利于降低 PP 注塑件的气味、VOC。

表 2 不同注塑温度 PP 注塑件的气味、VOC 测试结果

注塑温度	气味	VOC 数值/(μg/m³)							
/℃	等级	苯	甲苯	乙苯	二甲苯	苯乙烯	甲醛	乙醛	丙烯醛
180	2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	23.38	ND
190	2.5	ND	ND	ND	ND	ND	24.18	21.51	ND
200	2.5	ND	19.1	ND	ND	ND	29.83	16.25	ND
210	3	ND	ND	ND	ND	ND	13.58	34.18	ND
220	3	ND	ND	ND	2.58	0.59	29.52	48.13	ND
230	3	ND	12.89	ND	ND	ND	39.44	88.25	ND
240	3.5	ND	ND	ND	ND	ND	35.62	102.92	ND
250	3.5	ND	ND	ND	ND	ND	29.19	132.48	ND

2.2 衰减时间对 PP 注塑件气味、VOC 的影响

如表 3 所示,PP 注塑件气味在第 20 天的时候强度降低,之后稳定在2.5级,主要是由于残存在

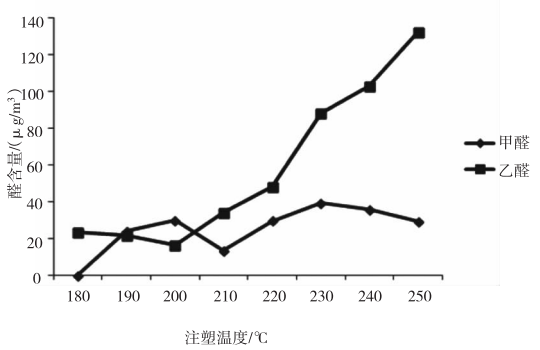


图 1　甲醛、乙醛含量与注塑温度的关系

PP 注塑件表面的小分子物质随着时间延长逐步挥发，之后与空气中的小分子达成平衡，在没有高温的作用下，趋于稳定状态。如图 2 所示，随着时间的延长，甲醛、乙醛含量逐步降低，在 15 ~ 20 d 的时候，残留在 PP 注塑件表面的醛类物质随空气流通挥发，然后是热氧化降解的醛类物质随着时间的延长慢慢释放，直至检测不到。所以，在标准实验室条件下，PP 注塑件放置 20 d，气味、VOC 可以达到一个较好的状态。

表 3　PP 注塑件不同衰减时间的气味、VOC 测试结果

衰减时间	气味	VOC 数值/(μg/m³)							
/d	等级	苯	甲苯	乙苯	二甲苯	苯乙烯	甲醛	乙醛	丙烯醛
3	3	ND	12.89	ND	ND	ND	39.44	88.25	ND
5	3	ND	7.41	ND	ND	0.34	35.125	67.85	ND
7	3	ND	10.92	ND	ND	ND	39.675	64.8	ND
10	3	ND	13.9	ND	0.76	1.09	31.925	48.625	ND
15	3	ND	ND	ND	2.49	3.08	24.325	39.525	ND
20	2.5	ND	ND	ND	ND	ND	21.254	36.128	ND
30	2.5	ND	12.88	ND	ND	ND	61.42	22.32	ND
60	2.5	ND	23.85	ND	ND	ND	ND	ND	ND
90	2.5	ND	ND	2.32	ND	ND	ND	ND	ND

3　结论

综上，降低 PP 注塑件的气味、VOC，可以采用以下方法：

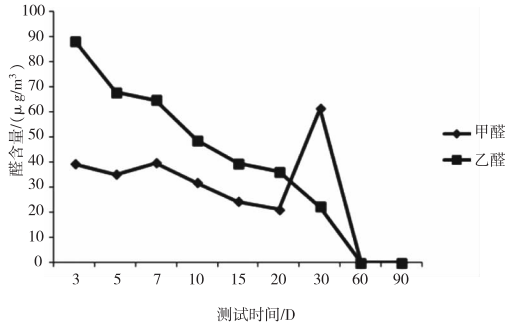


图 2　甲醛、乙醛含量与衰减时间的关系

1）采用低温注塑，建议控制在 210℃以内。

2）通过延长零件放置时间，在标准实验室条件下可放置 20 天，也可以通过提高存储环境温度加快挥发或增加通风量加强空气流通的方式加快小分子物质的排出。

通过以上两种方法，可以有效控制小分子物质的产生，并及时排出产生的小分子，从而提升 PP 注塑件的气味、VOC 水平，改善车内空气质量。

参考文献

[1]　康鹏，金滟，蔡涛. 聚丙烯中挥发性有机物释放行为的研究[J]. 合成树脂及塑料，2010，27(1)：60 - 63.

[2]　马辉，陈文波. 车内有害气体(VOC)现状研究[J]. 汽车工艺与材料，2008(8)：13 - 14.

[3]　国家环境保护局. 车内挥发性有机物和醛酮类物质采样测定方法：HJ/T400 - 2007[S]. 北京：中国环境科学出版社，2008.

作者简介：姜思维，女，硕士研究生，讲师，重庆化工职业学院化学工程学院，研究方向：精细化工、高分子材料。

收稿日期：2018 - 06 - 06

2018 年《现代机械》总目次

★现代制造、工艺装备★

气体静压高速电主轴稳定性研究 …… 黄泽中,尹 洋,李 佳,吴 东,王翔毅 1(1)

车削 AISI420 不锈钢切削力预测模型构建…… 占 刚 1(7)

直流式低速风洞壳体有限元分析 …… 曾 麒,周 锐,王华奥 1(11)

基于 UG 和 Matlab 的“S”轨迹无碳小车设计与运动学仿真研究 …… 孙一平 1(15)

孔径比对直流互击式喷注器雾化特征的影响 …… 李子阳,李家春,刘 忠(19)

超高速气体静压电主轴支承结构的优化设计 …… 吴 东,尹 洋,黄泽中,李 佳,王翔毅 1(23)

大型振动筛加强梁动态受力分析和寿命预测 …… 卢世坤,刘初升,高 迟,王凤平,王 明,张凤翔,吕 琳 1(28)

基于卷积神经网络的六足机器人环境自适应方法研究 …… 傅汇乔,留沧海,唐开强,江 浩 2(1)

超高速空气电主轴动态特性的有限元分析 …… 吴 东,朱军帅,黄泽中,王翔毅,龚怡强 2(7)

两臂一篮式钢拱架安装机研究及有限元分析 …… 元 伟,李家春,何 雪,陈跃威 2(11)

基于 OpenGL 车削仿真系统的开发与研究 …… 娄志超,赵先锋,史红艳,姜雪婷 2(15)

基于机电一体化的爆胎训练装置设计及可靠性分析 …… 宋洪健,熊树生,罗 源 3(1)

航天用内置式永磁同步电机设计和仿真分析 …… 谭 耳,赵 飞,葛发华,覃万健 3(4)

AZ91D 镁合金电子设备耐腐蚀性复合表面处理工艺技术 … 汤曹勇 3(9)

燃料电池城市客车动力系统匹配与仿真研究 …… 李惠林,周 凯,何 锋,颜廷坤 3(13)

高速平衡下大型储能飞轮转子系统的影响系数法研究 …… 张秀华,尹 宏,姚 宏,溥 江,苏亚锋 3(18)

基于对偶数的球型手腕运动学参数识别 …… 王戴丰,张永顺,林宏旭 3(21)

造桥机支承托架轻量化设计研究 …… 王建波,朱益民,吕帅帅 3(28)

TZJ24 型装载机工作装置的作业工况构建与分析 …… 董逸君,周丽红,刘钰如,蔡 容 3(31)

机床切削颤振试验与分析 …… 张文祥 3(35)

过盈连接组件超声辅助压装减摩分析 …… 张伟超,娄志峰,王兴远,王晓东 4(1)

基于 Fluent 的金属粉末气体输送喷嘴结构设计及优化 …… 邵志龙,蒋 玮 4(6)

液压挖掘机动臂势能回收技术现状及展望 …… 占 刚,杜希亮,吴业强 4(11)

基于深度学习的机械设备健康管理综述与展望 …… 周奇才,沈鹤鸿,赵 炯,熊肖磊 4(19)

金属层合板激光圆弧扫描弯曲成形试验研究 …… 王高烽,王续跃 5(1)

基于 Fluent 平台的新型车辆液力缓速器研究 …… 王阳洋,罗 冲 5(6)

一种上下肢协调康复机器人的机构设计与分析 …… 叶小灿 5(10)

Φ73 水力振荡器振动建模以及碟形弹簧优化设计 …… 许福东,董 立,谭 超 5(16)

一种导轨直线度与平行度测量系统的研究与应用 …… 王明海,娄志峰,黄余彬,王 跃 5(20)

基于 Cruise 的重载纯电动牵引车的传动系统参数匹配 …… 刘苗苗,查振元,李计星,王新宇 5(25)

错位悬挂式自行车停放系统的设计开发 …… 谈文浩,安 军,唐东炜,何穗东,黄茂淮,陈家耀,陈文伟 5(31)

基于 LSTM 循环神经网络的盾构机故障预测系统设计 …… 周奇才,王益飞,赵 炯,熊肖磊,沈鹤鸿 5(35)

球杆系统建模及其闭环控制器的设计 …… 刘诗宇 6(1)
一种高压室巡检机器人移动机构设计 …… 黄荣辉,向 真,姜 勇,傅 博,景凤仁 6(9)
7050 – T7451 铝合金薄壁件铣削仿真建模及试验分析 …… 纪合溪,葛茂杰,于 健,姜 楠,孙卫峰 6(15)
机械臂拾取装置的模糊控制仿真研究 …… 梁开旭 6(19)

★设计、研究、分析★

一种用于故障隔离的参数区间包络线计算方法 …… 李泽滔,何梦林,B. Dahhou1(31)
不同阀芯结构节流阀流阻特性研究 …… 黄 凯,王华奥,李争齐 1(35)
关于吊具连接环裂纹形成原因的研究分析 …… 贾海龙,邵健帅,于 军,张国栋 1(40)
基于 AMESim 的发动机散热器散热性能研究 …… 张 斌,韩 磊,张秉坤,袁 征 1(44)
航空螺旋桨载荷测量遥测盘结构可靠性分析 …… 郭海东,牛宏伟,文 敏 1(48)
曲柄滑块机构多元相关质量特性稳健设计方法 …… 唐小康,陈 涤,蒋文芝 1(53)
真空夹具设计应用及静力接触有限元数值模拟 …… 梁国伟,吴晓君,花 磊 1(57)
电磁拔销器非接触式信号反馈装置研究 …… 杨荣江,赵 飞,戴志立 1(61)
直流式风洞风扇段三维流场特性分析 …… 易小军,张 磊,邓 磊,周 锐 1(65)
磁极卡板弯曲成形机构的设计与分析 …… 李 润,闫 昊,张晓洪,黄泽中 1(71)
基于 Pro – E 和 ANSYS 的超低温球阀数值模拟分析 …… 王阳阳,贾 晨,王丽荣 1(74)
一种环形转子整形机的设计及分析 …… 闫 昊,李 润,秦小屿,陈 鹏,陈 康 1(78)
复杂腔体件表面磁控溅射镀膜关键技术的研究 …… 王德山,陈尤旭,胡兵兵 1(80)
基于专利分析的液压挖掘机技术成熟度研究 …… 黎显滔,李翔龙,王友国 2(20)
ATR 发动机建模及特性分析 …… 于 洋,杨 阳 2(25)
某长外涵道形式的尾喷管特性数值计算分析 …… 杨 阳,于 洋,高莎莎 2(32)
YW – 1020 型全自动深压纹机的有限元分析与优化 …… 李建功,郝国凯 2(36)
基于 POLYFLOW 的汽车密封条挤出口模逆向设计研究 …… 熊巧巧 2(41)
基于“可控涡”的小流量斜流压气机气动设计研究 …… 高 磊,高丽敏,徐浩亮 2(45)
拉臂式自装卸装置与车辆底盘匹配的分析 …… 张文佳,付景顺 2(51)
起落架载荷脱机校准试验技术研究 …… 张海涛,李亚南,张鹏程,闫文辉 2(55)
基于物联网的变压器远程监测系统开发 …… 周 超,何文华,熊树生,周彩玲,翁遇冰,叶子青 2(59)
基于 ANSYS Workbench 龙门架横梁受力分析 …… 唐小康,罗世强,郑克峰,吴 东 2(63)
行星传动柔性销均载特性分析 …… 贺 伟 3(42)
参数图解法与仿真分析法在连杆机构设计中的应用 …… 王相平 3(45)
基于 ANSYS 的电磁轨道炮 C 型固体电枢有限元分析 …… 李 刚,刘培培 3(48)
液压配气机构凸轮柱塞接触应力研究 …… 岳 进 3(52)
基于 PLC 的预应力智能张拉系统研究 …… 熊巧巧,杨肖委,周 鹏 3(57)
新型污泥干燥装置的研发 …… 王 欣,赵 洲 3(62)
基于 Abaqus 的有限元薄壁结构静强度分析方法研究 …… 冯 峰 3(65)
水电站泄洪洞钢模台车门架三维有限元分析 …… 严沾谋,谭守林,杨清华 3(69)
不同湍流模型下空中加油吊舱尾流场对比分析 …… 郝毓雅,张志强 3(72)
采煤机截割电机动态特性研究 …… 李三旦 3(77)
基于流场仿真的室内靶场通风评估 …… 朱高贵,庄震宇,唐军军,刘 达,姜年朝 3(81)
基于改进型 Thevenin 模型的锂电池 SOC 估算研究 …… 刘 玥 3(84)
基于 CFD 的某车型外流场分析及车身改进 …… 李争齐,王华奥,黄 凯 3(90)

自走式苗期地膜收膜辊有限元模态及试验分析 …… 韦建玉,张纪利,张大斌,卢 健,刘祖国,黄志俊 4(41)
自由膜式空气弹簧非线性有限元分析 …… 陈昊森,唐华平,王胜泽,李云召 4(46)
列车用排障器静动态特性分析及结构改进 …… 陶长焱,李文泰,米承继,周陶乐,肖文涛,贺 明,徐军伟 4(51)
一种三自由度并联平台运动学研究 …… 卢今伟,张 雷,苏东风 4(55)
炉膛结构参数对 CFB 锅炉颗粒相浓度分布的影响研究…… 连晓芳 4(59)
一种无刷直流起动电机控制器设计 …… 曾庆军,郑 浩,郑自伟,卓 亮 4(63)
永磁同步电机带霍尔及增量式编码器的伺服控制 …… 蔡华祥,刘兴中,程 静,唐 杨 4(67)
基于 Matlab/Simulink 的区间二型自组织模糊逻辑控制器工具箱 …… 张 辈,薛 玉,邱望标,谢建兴 4(71)
钛合金轴类大锻件压方的质量影响因素数值模拟 …… 吴玉忠 4(76)
采煤机截割齿静力学特性分析 …… 李 桃 4(80)
旋翼无人机方舱结构设计 …… 孙 健 4(83)
电动客车动力电池散热分析与优化设计 …… 张 斌,袁 征,韩 磊 4(86)
动车组受电弓虚拟拆装培训系统开发研究 …… 赵方雨,程冠达,韩子健,马思群,刘宇婧,黄楚钧,王 雪 4(90)
基于 ADAMS 的单梁吊具吊索受力不均问题研究分析 …… 马广亮,邵健帅,马跃峰 5(41)
高速永磁电机转子静力学与模态分析研究 …… 路文开,张 卫,葛发华,张登平 5(46)
高超声速翼型气动特性设计与研究 …… 孙祥程,葛 畅 5(49)
基于物—场模型的飞行模拟器运动系统结构优化设计 …… 池卿华 5(54)
考虑轴承支撑刚度和齿轮轴变形的内啮合齿廓修形研究 … 张湘林,沈裕文,杨世平 5(58)
应急救援排障工程车作业动臂轻量化研究 …… 杜希亮,占 刚,贺福强,陈 念 5(64)
基于模糊控制的隧道射流风机变频器应用和仿真 …… 刘 柱,卢剑锋,王一达 5(69)
铝制散热器焊缝接头开裂分析 …… 马秀勤,张秉坤,袁 征,郭 松 5(73)
发射平台摆杆机构可靠性分析 …… 赵劲彪,潘玉竹,黎定仕,贾永涛 5(76)
导阀参数对先导式溢流阀动态特性的影响 …… 张 磊,付娟娟,陈 帆 5(80)
高空作业车风振响应的频域特性分析 …… 蒋红旗,李顺才 5(84)
基于 ANSYS Workbench 的集中动力动车组污物箱仿真分析 …… 程景胜,甘信富 5(88)
高集成度双传感器微型无刷电机的设计 …… 吴贵川,杨荣江,董江峰 6(22)
基于 Matlab 的驾驶舱门泄压板评估和仿真计算方法 …… 徐 佳,王天斌 6(26)
基于 Redis 与 SSM 的大型设备数据运用系统设计 …… 熊肖磊,王春伟,赵 炯,周奇才 6(29)
基于 KBE 的施工升降机导轨架快速设计系统开发 …… 朱春阳,王紫媛,李昌冉 6(35)
加强型切口翅片设计 …… 张 轩,沈 鹏 6(39)
广角度太阳光智能跟踪系统 …… 刘明强,刘 进,龙海芳,刘 迅,张正祥 6(42)
传统制梯形槽电枢冲片法的不足及完善措施 …… 蒋 昕,张 宇,张跃江 6(45)
飞机着陆试验中起落架缓冲功能检查方法 …… 汪文君,杨全伟,唐 宁 6(50)
基于 ANSYS Workbench 的直通式截止阀流道的分析…… 陈 鹏,张 寒,罗 双,樊学良,陈廷兵 6(54)
基于应变法的非常规细长拉杆飞行载荷实测技术 …… 李志蕊,吴 波,高腾龙 6(57)
基于多层次本体的航空制造业领域知识表达模型的构建 … 刘 航,杜 江,白 瑀 6(60)
基于 ANSYS 的摩天轮模态及地震响应谱分析 …… 赵九峰 6(65)

★试验分析★

基于应变法飞机起落架舱门载荷实测研究 …… 张海涛,张鹏程,李亚南 1(83)
三坐标在工件测绘中的应用技巧 …… 孙 健 1(87)

飞机抖振试飞方法研究 …… 李　阳,樊征兵 2(77)
一种可变刚度的载荷校准试验调试台架 ……
…… 张鹏程,余建虎,张海涛 2(81)

★现场经验★

地铁车辆司机室车门故障的一种解决方案 ……
…… 陈桥松,高国昶 1(89)
基于 PLC 和 HMI 控制的旋摆冲击磨操作系统的改进设计
…… 程行知,申小刚,潘小康,田文海,韩玉香 2(84)
精密电机有溶剂漆真空压力浸渍工艺研究及应用 ……
…… 张胜兰,陈雪勇,黎　波,陈　强 2(88)
城轨不锈钢车辆鼓型侧墙弧焊工艺研究 ……
…… 李　林,陈　亚 2(92)
某型立式加工中心刀库设计 …… 丁　力,肖　菲 3(117)
基于 ABAQUS 的采煤机截割部电机过载保护装置研究……
…… 宋　英 3(120)
基于工程训练的惯性避障小车设计 ……
劳俊达,李日辉,李德荣,龙　璋,刘冠灵,张立群 3(123)
煤矿井下电缆短路保护技术研究 …… 刘　强 4(35)
电力载波中的过零检测电路研究 … 廖　华,廖前伟 5(92)
居民用电环境噪声干扰分析 …… 廖前伟 5(95)
煤矿井下电缆故障定位技术研究 …… 李卫涛 5(98)
某型汽车座椅翻转装置的拉力试验夹具设计 ……
…… 陈宗毅,周锡林 6(68)
煤矿压风系统在线监控平台的设计与实现 ……
…… 李开来 6(71)
可编程步进控制器在整流子点焊机中的应用 ……
…… 金　强,王　亮,方春华 6(74)

★自动控制★

一种水果售货机的控制系统设计 ……
…… 杨秀芝,华文林,杨春杰,董春法 1(91)
基于滑模观测器的永磁同步电机转子角度估算的研究 ……
…… 夏立峰 3(112)
基于 FX3U 和触摸屏的三轴伺服控制系统设计 ……
…… 张　航 4(27)
迭代学习控制在某机械系统中的应用研究 ……
…… 程　静 4(31)
基于 LabVIEW 的变压器运输在线监测系统设计 ……
吕　安,熊树生,徐宏飞,姜振军,罗　源,周彩玲 6(79)
基于模糊控制的混合臂高空作业车工作斗调平控制系统研究 ……
周　攀,侯　帅,曾致豪,王凯丽,周　静,付　耀,宋　超 6(84)

★材料科学★

基于 Voronoi 模型的钽材料孔隙率与弹性模量辨识 ……
…… 钟望坤,夏鸿建,马　杰 2(67)
烧结温度对 ZnO 压敏陶瓷电性能的影响……
…… 夏昌其,钟春燕,李自立 2(71)
烧结后生物陶瓷预热切削性能的分析 ……
…… 章芳芳,陈前亮 2(73)
纳米球金刚石润滑油在摩擦副中的实验及应用 ……
…… 李家诚 4(38)
注塑温度及衰减时间对改性聚丙烯注塑件气味、VOC 的影响
…… 姜思维 6(88)

★计算机应用★

非正交五轴联动数控机床后置处理技术研究与应用 ……
…… 徐任红,王昭碧 3(95)
基于 NSGA – II 快递智能仓库多目标优化问题研究 ……
…… 周　涛,罗仁蔚 3(100)
基于 CATIA 航空标准件模板参数化建模方法研究……
…… 陈　蓓,曹　岩,杜　江,乔　虎 3(104)
面向云服务的智能监测诊断模型研究与开发 ……
…… 刘　晗,徐　斌,张　庆,胡剑威 3(108)

★其　　它★

总目次 …… 6(91)