

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.020

一种绕线伺服张力器建模及其 H_∞ 仿真控制研究^{*}

赵鹏飞, 胡国清^{*}, 孙奇伟, 焦 亮
(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要:针对异形线圈绕制时速度波动造成的张力波动问题,为了降低张力波动幅度,设计出了一种伺服张力控制装置并研究了其控制方法。在分析跳辊上、下游绕线长度和跳辊上绕线速度的基础上,建立了该张力器的张力数学模型,并分析了各扰动对张力的影响程度。研究了 H_∞ 控制方法在异形线圈绕线过程中的控制应用和 design 方法,以及权函数的选择方法。利用 Matlab 工具箱设计得到了 H_∞ 控制器,使扰动至张力传递函数 H_∞ 范数最小,并设计 PI 控制器进行了对比,分析了闭环控制系统中扰动至张力的幅频特性,并在不同频率、不同速度正弦信号扰动输入下对控制系统进行了仿真分析。研究结果表明,该伺服张力器能有效控制张力波动幅度,与 PI 相比 H_∞ 控制方法能适应不同频率的扰动,且其张力波动幅度仅是 PI 控制下的 1/3。

关键词:异形线圈;张力模型;张力控制; H_∞ 控制

中图分类号:TH39;TP271.4

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)07-0878-05

Modeling and H_∞ control simulation of servo coil winding tensioner

ZHAO Peng-fei, HU Guo-qing, SUN Qi-wei, JIAO Liang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Aiming at the tension fluctuation caused by the speed fluctuation when winding the special-shaped coil and in order to reduce the tension fluctuation, a servo control tensioner was designed and the control method was studied. Based on the analysis of the wire length of the upstream and downstream of the dancer and the winding speed on the dancer, the mathematical model was established and the influence magnitude of each disturbance to the tension was analyzed. The control application and design method of the H_∞ controller in the special-shaped coil winding process were studied and the selection method of weight function was researched. In order to minimize the H_∞ norm of the transfer function from the disturbance to the tension, the H_∞ controller was designed using the Matlab toolbox, and the PI controller was designed for compare, also the amplitude-frequency characteristic of the disturbance to tension in the closed loop control system was analyzed and the control system was simulated use sinusoidal signal at different frequency and speed. The results indicate that the servo tensioner can effectively control the amplitude of tension fluctuation and compared with PI the H_∞ control method can adapt to disturbance of different frequency and tension fluctuation range is only 1/3 of the PI.

Key words: special-shaped coil; tension model; tension control; H_∞ control

0 引 言

伺服张力器是一种绕线时用于漆包线张力控制的装置,避免张力过大或过小,一般通过反馈张力臂转角信号,然后伺服马达主动送线,绕制的线圈也通常是圆

形,但生产中常存在方形、正六边形、椭圆等各种异型线圈^[1],在绕制这种线圈时漆包线张力剧烈波动,并且速度越高,波动越大,目前绕制这种线圈时速度非常低。很多研究者建立了卷绕数学模型^[2-5],并研究了跳辊和收放辊的数学模型^[6-9]。但用异形骨架绕制异形线圈时,系统中某些物理量随绕线速度变化,且与线圈

收稿日期:2016-02-22

基金项目:广东省产学研资助项目(2012B091100109)

作者简介:赵鹏飞(1991-),男,河南商丘人,硕士研究生,主要从事伺服张力器及机电一体化方面的研究。E-mail:pfzhao1991@hotmail.com

通信联系人:胡国清,男,教授,博士生导师。E-mail:gqhu@scut.edu.cn

形状密切相关,而绕线过程中线圈直径不断增加,漆包线还要跟随排线装置进行轴向往复移动,由此造成异形线圈数学模型难以建立。

与其他控制方法相比, $H\infty$ 控制方法具有针对干扰进行设计的特性,使干扰至误差的传递函数 $H\infty$ 范数最小,这样干扰对输出误差的影响降至最低,并且 $H\infty$ 控制器能够根据干扰的特性进行设计,对干扰更有针对性,适合张力控制^[10-11]。

本研究针对绕制异形线圈设计一种伺服张力器,并建立其张力数学模型,为了减小线圈绕制时的张力波动,运用 $H\infty$ 控制方法,针对绕制时的速度等扰动设计 $H\infty$ 控制器进行张力控制并进行仿真。

1 张力器及其模型

1.1 伺服张力器

伺服张力器设计如图 1 所示。

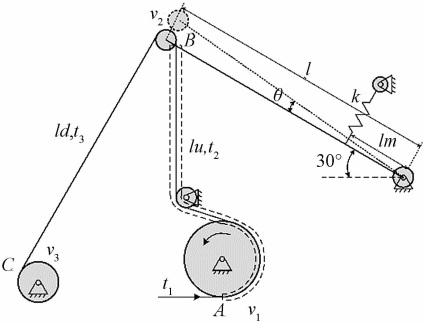


图 1 绕线伺服张力器

漆包线依次经过 A 点处驱动轮, B 点处的跳辊, 缠绕在 C 点处的线圈骨架上, 不但能通过调节弹簧位置来调整张力, 而且弹簧也防止异形线圈绕制时的突然加减速对张力造成剧烈影响, 张力臂转角位置易于测量, 通过测量张力臂位置并反馈给控制器, 控制器输出信号控制送线速度 v_1 , 进而控制张力 t_3 。

张力器各参数意义及所取数值如表 1 所示, 其中异形线圈凸起数是指线圈凸起的棱角数, 例如正六边形线圈凸起数为 6。

1.2 跳辊上下游漆包线模型

笔者选取跳辊上游的漆包线, 如图 1 中虚线框内所示, 对其应用质量守恒定律得:

$$\frac{d}{dt}\left[\int_0^{l_u(t)} \rho(x,t)A(x,t)dx\right] = \rho_A(t)A_A(t)v_1(t) - \rho_B(t)A_B(t)v_2(t) \quad (1)$$

式中: ρ —漆包线密度, x —该段漆包线中某点与起点 A 的距离。

表 1 张力器参数

参数	值	单位
A (铜线截面积)	$1.13e-8$	m^2
E (弹性模量)	90	Gpa
$v_0(v_{10}, v_{20}, v_{30})$	10	m/s
l_{u0} (跳辊上游线长)	0.4	m
l_{d0} (跳辊下游线长)	0.6	m
l (张力臂长)	0.1	m
l_m (弹簧力臂)	100	m
k (弹簧刚度)	0.016	N/m
R_d (跳辊半径)	0.016	m
J_d (跳辊转动惯量)	$6.2e-6$	$kg \cdot m^2$
J_a (张力臂转动惯量)	0.01	$kg \cdot m^2$
T (电机惯性时间常数)	0.01	s
B_d (跳辊阻尼系数)	0	--
B (张力臂阻尼系数)	0	--
R (线圈骨架半径)	0.016	mm
N (异形线圈凸起数)	1	个
t_1, t_2, t_3 (各段线的张力)	--	N

在张力臂偏离平衡位置 θ 角度的瞬态位置,如图 1 所示,不考虑包角变化,因为张力臂不会大幅度偏转, θ 很小,可得:

$$l_u(t) \approx l_{u0} + \frac{\sqrt{3}}{2}l\theta(t) \quad (2)$$

跳辊上 B 的速度既包括由跳辊本身的角速度引起的 v_d 分量,又包括由张力臂引起的 $l\dot{\theta}$ 分量,由此得 B 点垂直向上的速度分量为:

$$v_2(t) \approx v_d(t) + \frac{\sqrt{3}}{2}l\dot{\theta}(t) \quad (3)$$

将式(2) 和式(3) 代入式(1) 中,得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left[\int_0^{l_{u0}+\frac{\sqrt{3}}{2}l\theta(t)} \rho(x,t)A(x,t)dx\right] &= \rho_A(t)A_A(t)v_1(t) - \\ &- \rho_B(t)A_B(t)(v_d(t) + \frac{\sqrt{3}}{2}l\dot{\theta}(t)) \end{aligned} \quad (4)$$

由材料力学有^[11]:

$$\frac{\rho A}{\rho_u A_u} = \frac{1}{1 + \varepsilon} \quad (5)$$

其中: u —没有应变的量,也可以表示为:

$$\frac{\rho(x,t)A(x,t)}{\rho_u A_u} = \frac{1}{1 + \varepsilon(x,t)} \quad (6)$$

将式(6) 代入式(4),得:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\left[\int_0^{l_{u0}+\frac{\sqrt{3}}{2}l\theta(t)} \frac{\rho_u A_u}{1 + \varepsilon(x,t)}dx\right] &= \frac{\rho_u A_u}{1 + \varepsilon_A(t)}v_1(t) - \\ &- \frac{\rho_u A_u}{1 + \varepsilon_B(t)}(v_d(t) + \frac{\sqrt{3}}{2}l\dot{\theta}(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

驱动轮上漆包线应变与位置有关,但是驱动轮上的漆包线长度与整个 l_u 段相比较小,其他位置应变相同,在此用 $\varepsilon_B(t)$ 代替积分项中的 $\varepsilon(x,t)$,消去 $\rho_u A_u$ 。

由于 ε 很小, 令 $1/(1+\varepsilon) = 1-\varepsilon$, 代入并整理(7) 得:

$$\dot{\varepsilon}_B(t) = \frac{-1}{l_u + \frac{\sqrt{3}}{2}l\theta} [v_1(t)[1-\varepsilon_A(t)] - [v_d(t) + \sqrt{3}l\dot{\theta}(t)][1-\varepsilon_B(t)]] \quad (8)$$

平衡状态方程为:

$$v_{10}(1-\varepsilon_{10}) - v_{20}(1-\varepsilon_{20}) = 0 \quad (9)$$

对式(8) 线性化、略去二阶微小量, 令 $1-\varepsilon = 1$, 得增量形式方程:

$$\dot{\varepsilon}_B = \frac{-1}{l_u} [V_1 - v_{10}\varepsilon_A - V_d + v_{d0}\varepsilon_B - \sqrt{3}l\dot{\theta}] \quad (10)$$

方程(10) 乘以 AE 得:

$$T_2 = \frac{-1}{l_u} [AE(V_1 - V_d) + v_{d0}T_2 - v_{10}T_1 - \sqrt{3}AEl\dot{\theta}] \quad (11)$$

用同样的方法对跳辊下游的漆包线进行建模, 可得到其数学模型:

$$T_3 = \frac{-1}{l_d} [AE(V_d - V_3) + v_{30}T_3 - v_{d0}T_2 - 2AEl\dot{\theta}] \quad (12)$$

1.3 跳辊模型

跳辊受张力 t_2 和 t_3 作用, 可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B_d}{J_d} & -\frac{r_d^2}{J_d} & \frac{r_d^2}{J_d} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{AE}{l_{u0}} & -\frac{v_{20}}{l_{u0}} & 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}lAE}{l_{u0}} & \frac{AE}{l_{u0}} \\ -\frac{AE}{l_{d0}} & \frac{v_{20}}{l_{d0}} & -\frac{v_{30}}{l_{d0}} & 0 & \frac{2lAE}{l_{d0}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}l}{2J_a} & -\frac{l}{J_a} & -\frac{kl_m^2}{J_a} & -\frac{b}{J_a} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{v_{10}}{l_{u0}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{AE}{l_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} vol \\ T_1 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (18)$$

2 控制器设计

由于线圈处的模型难以建立, 本研究把线圈处骨架简化为普通圆棍, 将异形骨架和排线的影响当做干扰, 设计控制器减小干扰对张力的影响。

2.1 H_∞ 控制方法

由式(15) 可以得出, 当弹簧位置确定以后, 平衡位置的张力也即确定。在测量量只有转角时, H_∞ 控制方法能对张力进行控制, 而且其能根据干扰特点设计控制方法减小干扰对控制输出量的影响。

由系统输入-输出信号之间的关系可知, 输出信号的2-范数的上确界为输入信号的2-范数与系统 H_∞ 范数的乘积。 H_∞ 标准控制问题可以描述为: 找一个真实有理的控制矩阵 K , 在控制器镇定系统 G 的情况下,

$$J_d \dot{v}_d = (t_3 - t_2)R_d^2 - B_d v_d \quad (13)$$

线性化得:

$$J_d \dot{V}_d = (T_3 - T_2)R_d^2 - B_d V_d \quad (14)$$

1.4 张力臂模型

由图1 中可以看出, 张力臂平衡位置的张力 T_0 与弹簧压缩量 x_0 的关系为:

$$(T_0 + \frac{\sqrt{3}}{2}T_0)l = kx_0l_m \quad (15)$$

由张力臂受力可得:

$$J_a \ddot{\theta} = -t_3l - \frac{\sqrt{3}}{2}t_2l + k(x_0 - l_m\theta)l_m - B\dot{\theta} \quad (16)$$

式(16) 减去平衡方程(15) 线性化得:

$$J_a \ddot{\theta} = -T_3l - \frac{\sqrt{3}}{2}T_2l - kl_m^2\theta - B\dot{\theta} \quad (17)$$

1.5 系统模型

本研究将电机模型简化为惯性环节, 用 vol 代表电机电压信号。将式(11, 12, 14, 17) 写为状态空间表达式, 并设状态变量 $x_1 = V_d, x_2 = T_2, x_3 = T_3, x_4 = \theta, x_5 = \dot{\theta}, x_6 = V_1$, 可得:

使从输入到输出的传递矩阵的 H_∞ 范数极小化^[12], 即:

$$\min_K H(G, K)_\infty$$

H_∞ 控制器设计方法如图2 所示。

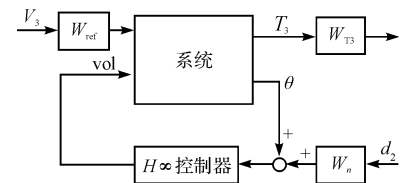


图2 H_∞ 控制器设计方法

V_3 —干扰输入; T_3 —输出; d_2 —传感器噪声, 控制器输出电压控制送线速度, 进而控制被控量; W_{ref}, W_{T3} —加权系数, 选择加权系数时要考虑信号的带宽和幅值; W_{T3} —张力 T_3 的加权系数, 可以通过设置加权系数让期望频率区域的扰动输出最小; W_{ref} 的选择要考虑扰动输入特性, 可以根据不同的输入来设计相应的控制器来抑制干扰

2.2 张力干扰及其频率

由式(18)中的输入矩阵可知, T_1, V_3 的系数分别为 v_{10}/l_{u0} 和 AE/l_{d0} ,由表(1)中参数可知 $AE/l_d = 1\,017$,而 v_{10}/l_u 随着绕线速度增长,在 $v_{10} = 10\text{ m/s}$ 高速的情况下 $v_{10}/l_{u0} = 16.67$,可知 T_1 远小于 V_3 对系统造成的影响,所以扰动主要是异形线圈的影响。在绕线的过程中线圈的直径不断增加,有 $R_{\max}, R_{\min}$,速度也在一定范围内变化,有 $V_{\min}, V_{\max}$ 。异形线圈凸起数为 N ,从而输入扰动的频率可以由下式得出:

$$w_{\max} = \frac{NV_{\max}}{R_{\min}}, w_{\min} = \frac{NV_{\min}}{R_{\max}} \tag{19}$$

绕线过程中排线架往复运动也造成扰动,该频率与异形线圈造成的扰动频率相比很低,因此只考虑 $w_{\max}$ 最高频率,选择:

$$w_{\text{ref}} = k_{\text{ref}} \frac{w_{\max}}{s + w_{\max}}$$

在此假设 $V_{\max} = 10\text{ m/s}$,其中 $R_{\min} = R$,由此得 $w_{\max} = 625\text{ rad/s}$,留一定裕度,选择:

$$w_{\text{ref}} = k_{\text{ref}} \frac{1}{0.0015s + 1}, w_{T3} = k_{T3} \frac{210\pi}{210\pi s + 1}$$

2.3 控制器设计

本研究现在在 $v_0 = 10\text{ m/s}$ 高速情况下针对异形线圈的 V_3 扰动设计张力 H^∞ 控制器,并设计PI控制器,与之做对比分析。

本研究利用Matlab鲁棒控制工具箱和图2方法设计 H^∞ 控制器,并根据系统频率特性图调整并最终设置参数 $k_{\text{ref}} = 1\,211, k_{T3} = 200$,最终得到张力控制器 H^∞ 为:

$$H^\infty = \frac{3.77e20s^7 + 1.03e24s^6 + 1.03e27s^5 + 4.45e29s^4}{s^8 + 4.19e6s^7 + 7.98e11s^6 + 7.69e16s^5 + 4.3e21s^4} \\ + \frac{9.66e31s^3 + 3.25e36s^2 - 1e36s - 7.68e35}{+ 3.33e28s^3 + 5.78e31s^2 + 3.02e34s - 5.39e35} \tag{20}$$

并调整PI参数,在保证系统稳定的前提下使干扰至张力幅频特性尽量降低,得控制张力 T_3 的PI控制器 $K(PI)$ 为

$$K(PI) = 12 + \frac{5}{s} \tag{21}$$

将控制器和原系统组成闭环控制系统,原系统和加上 $H^\infty, K(PI)$ 控制器后的干扰 V_3 至张力 T_3 的幅频特性如图3所示。

由图3知,在 $w_{\max}$ 之前的频率范围,设计了 H^∞ 控制器的系统幅频特性相较原系统基本都有降低,

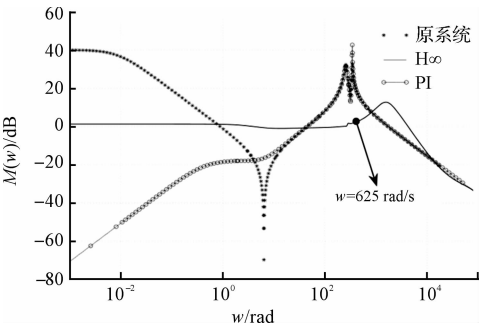


图3 干扰至张力幅频特性

$K(PI)$ 控制器使系统低频段幅频特性值减小,但高频段幅频特性值基本无变化。

3 仿真及结果分析

为了验证 H^∞ 控制器的控制效果,本研究对系统进行时域仿真,验证控制器是否能够在 $w_{\max}$ 以内的频率范围内有效抑制干扰。

在绕制各种异形线圈时,扰动 V_3 与线圈形状密切相关且呈周期波动,在此用正弦信号作为扰动输入,设输入扰动 $V_3 = 0.1(1 - \cos\omega t)$,单位 m/s ,在两种控制方法下,分别输入频率 $0.2\pi, 50\pi, 200\pi$ 的干扰 V_3 ,并把模型中 v_0 分别改为低中高速 $0.2\text{ m/s}, 5\text{ m/s}, 10\text{ m/s}$ 进行时域输出仿真。 0.2π 扰动下的张力输出如图4所示。

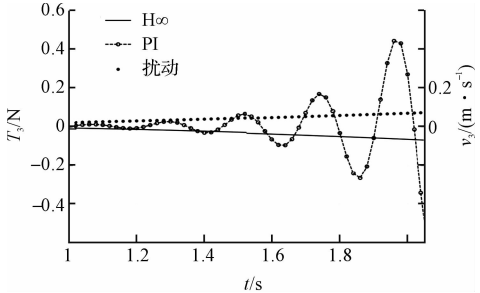


图4 0.2π 扰动下的张力输出

50π 扰动下的张力输出如图5所示。

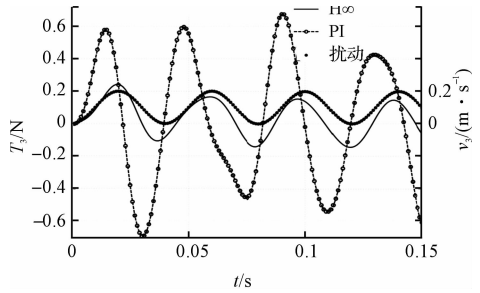


图5 50π 扰动下的张力输出

200π 扰动下的张力输出如图6所示。

从图(4~6)可以看出,伺服张力器能有效控制张

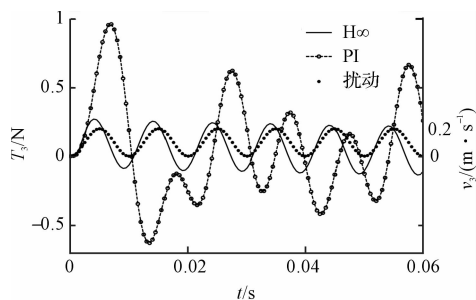


图 6 200 π 扰动下的张力输出

力波动,在频率 200 π 、幅值 0.2 m/s 的速度扰动下,伺服张力器控制下的张力幅值仅为 0.25 N, H_∞ 控制器能适应不同频率、不同速度的异形线圈绕制时的速度波动,其控制下的张力波动仅为 PI 控制器的 1/3,而 PI 控制器适应性差,输入低频扰动时已不能保持稳定。

4 结束语

本研究针对异形线圈绕制设计了一种伺服张力器,并将 H_∞ 控制方法应用于张力控制。仿真结果表明,该伺服张力器能有效控制张力波动, H_∞ 控制器能适应不同频率、不同速度的扰动,控制效果强于 PI 控制器,适合应用于异形线圈绕制时的张力控制,为提高异形线圈绕制质量和效率提供了一种方法。

本研究中的控制器是在 $v_0 = 10$ m/s 高速绕线情况下的设计,将来可以利用鲁棒控制方法设计更加完善的控制器,文中控制器非常复杂,控制器简化的影响有待研究,今后将针对控制器简化和实验进行研究。

参考文献 (References):

- [1] 赵晓东,董 哲,王 敏. 全自动绕线机的研制[J]. 电子专用备,2010,39(11):41-45.
- [2] Shin K H, Tension Control [M]. Atlanta, GA: Tappi Press,2000.

- [3] Koc H, Knittel D, Mathelin M d, et al. Modeling and Robust Control of Winding Systems for Elastic Webs [J]. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY,2002,10(2):198-199.
- [4] 何金保. 卷绕张力系统鲁棒控制策略的研究[D]. 上海: 上海大学机电工程与自动化学院,2009.
- [5] ANDO Y, SAITO T, KOGURE S, et al. Control of tension device for coil winding[C]// IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. USA: IEEE,2009:2749-2753.
- [6] KANG H K, LEE C W, SHIN K H, et al. Modeling and Matching Design of a Tension Controller Using Pendulum Dancer in Roll-to-Roll Systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2011,47(4):1559-1561.
- [7] PAGILLA P R, DWIVEDULA R V, ZHU YONG LING, et al. Periodic Tension Disturbance Attenuation in Web Process Lines Using Active Dancers[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2004, 125 (3): 361-371.
- [8] PAGILLA P R, SIRASKAR N B, DWIVEDULA R V. Decentralized Control of Web Processing Lines [J]. IEEE transactions on control systems technology,2007,15(1): 107-109.
- [9] GASSMANN V, KNITTEL D, PAGILLA P R, et al. Fixed-Order H_∞ Tension Control in the Unwinding Section of a Web Handling System Using a Pendulum Dancer[J]. IEEE transactions on control systems technology,2012,20(1): 175-180.
- [10] 孙 哲,吴震宇,武传宇,等. 织机经纱张力自适应滑模控制器的设计与仿真[J]. 机电工程,2015,32(8):1125-1127.
- [11] 李 超,王 岚. 基于模糊滑模控制的导弹电液伺服机械吕实物仿真研究[J]. 液压气动与密封,2013(1):29-32.
- [12] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,2004.
- [13] 苏宏业. 鲁棒控制基础理论[M]. 北京:科学出版社,2010.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

赵鹏飞,胡国清,孙奇伟,等. 一种绕线伺服张力器建模及其 H_∞ 仿真控制研究[J]. 机电工程,2016,33(7):878-882.

ZHAO Peng-fei, HU Guo-qing, SUN Qi-wei, et al. Modeling and H_∞ control simulation of servo coil winding tensioner[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(7):878-882.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>