

文章编号: 2095-2163(2020)03-0101-05

中图分类号: TP273

文献标志码: A

基于卷对卷系统的张力滑模变结构控制

杨 航, 王朝立

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 张力控制技术在锂电池生产和轧钢等卷对卷设备运行中显得十分重要, 是很多控制设备的基础技术之一, 其性能直接影响产品的质量和生产的效率。针对张力控制系统存在的非线性、时变等问题, 通过研究张力控制系统的动态特性, 建立了卷对卷系统张力的数学模型。选择了滑模变结构控制策略, 结合变速趋近律和指数趋近律的方法设计了一种新的控制律。削弱了采用一般的滑模变结构控制方法难以避免的系统抖振问题, 提高了目标跟踪精度, 有效减少了张力误差。以二轴张力控制系统为研究对象进行仿真分析, 在 Matlab 平台上建立张力控制系统的数学仿真模型, 分析了该系统的响应特性和跟踪性能。仿真结果表明系统可以快速准确地跟踪方波与正弦信号, 并能有效抑制简单滑模变结构控制的抖振问题, 验证了所设计的控制方法的有效性。

关键词: 卷对卷系统; 张力控制; 滑模变结构控制; 计算机仿真

Tension sliding mode variable structure control of roll-to-roll systems

YANG Hang, WANG Chaoli

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

【Abstract】 Tension control technology is very important in the operation of roll-to-roll equipment. It is one of the basic technologies of many control equipment. Its performance directly affects the quality of products and the efficiency of production. Aiming at the problems of non-linearity and time-varying in tension control system, the mathematical model of tension in winding system is established by studying the dynamic characteristics of tension control system. The sliding mode variable structure control strategy is selected, and a new control law is designed by combining variable speed reaching law and exponential reaching law. It reduces the chattering problem which is difficult to avoid by using the general sliding mode variable structure control method, and improves the tracking accuracy of the target. The two-axis tension control system is taken as the research object for simulation analysis. The mathematical simulation model of tension control system is established on Matlab, and the response characteristics and tracking performance of the system are analyzed. The results show that the system can track square wave and sinusoidal signal quickly and accurately, and can effectively suppress the chattering problem of simple sliding mode variable structure control, which verifies the effectiveness of the proposed control method.

【Key words】 roll-to-roll systems; tension control; sliding mode variable structure control; computer simulation

0 引言

张力控制广泛运用于锂电池生产、轧钢、造纸和纺织等工业生产中, 各类卷材中的张力值直接影响产品的质量。在卷绕系统中, 卷材的张力波动对卷绕过程影响较大, 因此, 张力控制的核心问题是在卷绕的过程中使卷材中的张力保持恒定^[1]。传统的 PID 控制由于系统结构简单, 控制参数便于整定等优点, 广泛运用于实际的张力控制系统之中。但是, 卷对卷张力控制系统具有较强的时变性, 同时外部干扰具有较强的鲁棒性, 是一个复杂的非线性系统^[2-4]。由此, 传统 PID 控制方法难以实现高精度

的张力控制, 不能满足实际的生产需要。

滑模变结构控制是一种特殊的非线性控制方法, 主要针对复杂的非线性系统, 表现为控制的不连续性, 系统根据当前的状态有目的地变化, 可以迫使系统沿着预设的“滑动面”的状态轨迹运动^[5-7]。这种滑动的状态是根据实际控制需要进行设计, 同时和系统的参数和扰动不相关。在实际控制中, 变结构控制在滑动状态下存在高频抖振, 这种抖振会使系统的超调量过大, 影响控制的精度和系统的动态性能, 同时系统中的高频未建模的抖振会使系统产生振荡或失稳^[8-10]。因此, 消除抖振是滑模变结构

基金项目: 国家自然科学基金(61374040, 61503205)。

作者简介: 杨 航(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 非线性控制; 王朝立(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 非线性控制、机器人控制、模糊控制等。

通讯作者: 王朝立 Email: clwang@usst.edu.cn

收稿日期: 2019-11-13

研究的一个不可忽视的问题。李琳等人^[11]设计了基于变速趋近律的滑模控制器,但是简单的滑模控制无法完全避免抖振现象,在实际的卷绕过程中效果不理想。中国工程院院士高为炳在变结构控制理论研究中首次提出了趋近律、品质控制、切换模式分类等新概念,提出了一种消除抖振的方法^[12]。国外一些学者提出了一种新的指数趋近律,使系统的状态点沿滑模面滑动的过程中控制增益逐渐减小,有效地减小了抖振^[6-7,13-15]。游林儒等人^[16]通过锂电池卷绕系统中的方形卷针的角速度辨识模型设计了恒角速度的张力控制策略,但是由于简化了系统模型,使得张力控制存在较大的误差。

本文针对张力系统的非线性,采用滑模变结构控制,设计了一种新的趋近律,使控制状态在有限时间到达滑模面并削弱的系统的抖振,提高系统的控制性能。

1 卷对卷系统的数学模型

卷对卷系统的张力控制系统简图如图1所示。该系统由伺服电机、张力传感器和张力控制器组成。可以看出,张力系统的工作原理是通过张力检测器实时检测张力的实际输出值,并且与给定的目标张力值进行实时比较,通过设计好的张力控制器调节电机的输出转矩,从而控制系统张力的稳定输出。系统的输出为放卷电机的转矩 M_1 和 M_2 , 系统的输入量为张力检测器的输出值 T 和弹性物体在滚轴的圆周切线方向的速度 V_1 和 V_2 。

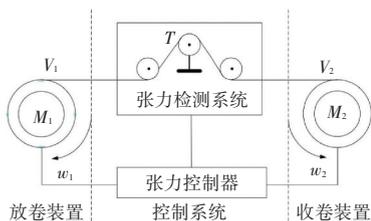


图1 卷绕系统结构图

Fig. 1 Structure of winding system

由动态力矩平衡原理,放卷轴的动力学平衡方程为:

$$\frac{d}{dt}(J_1\omega_1) = TR_1 - M_1 - B_1\omega_1, \quad (1)$$

收卷轴的 dynamics 平衡方程为:

$$\frac{d}{dt}(J_2\omega_2) = M_2 - TR_2 - B_2\omega_2, \quad (2)$$

其中, J_1 和 J_2 分别为系统伺服电机和滚轴上的总转动惯量; ω_1 和 ω_2 分别表示放卷轴和收卷轴的角速度; R_1 和 R_2 分别表示放和收辊子的半径; B_1 和 B_2

分别表示放和收系统中的阻尼系数; M_1 和 M_2 分别表示放和收电机的输出转矩; T 表示系统中的张力。

同时,角速度和线速度存在如下关系:

$$\omega_1 = \frac{V_1}{R_1}, \quad \omega_2 = \frac{V_2}{R_2}, \quad (3)$$

针对放卷机构,放卷辊子的转动惯量由2部分组成,即:卷绕芯轴的转动惯量 J_0 和卷绕滚轴上的圆柱形卷材上的转动惯量 J_{1R} , 实际上这两者也都是半径 R_1 的函数。考虑到转动惯量与物体的半径有关,而放卷辊的半径随时间变化的。系统工作时, J_0 是一个定值,取决于从滚轴的材质。所以可以通过计算 J_{1R} 来计算滚轴的总的转动惯量 J_1 , 假设卷材的密度是 ρ , 卷材的宽度是 b , 放卷滚轴没有缠绕材料前的初始半径为 R_0 , 一般 $R_1 > R_0, R_2 > R_0$ 。 J_{1R} 的推导如下:

$$J_{1R} = \int_{R_0}^{R_1} R_1^2 d(m) = \int_{R_0}^{R_1} R_1^2 d(\rho V_1) = \int_{R_0}^{R_1} R_1^2 d(\rho \pi R_1^2 b) = 2\rho\pi b \int_{R_0}^{R_1} R_1^3 dR_1 = \frac{1}{2}\rho\pi b(R_1^4 - R_0^4), \quad (4)$$

则滚轴的总的转动惯量 J_1 为:

$$J_1 = J_0 + J_{1R}, \quad \frac{dJ_1}{dt} = \frac{dJ_{1R}}{dt} = 2\rho\pi b R_1^3 \frac{dR_1}{dt}, \quad (5)$$

其次,放卷滚轴半径随时间变化的,根据阿基米德螺旋线方程^[17],在放卷过程中,假设滚轴轴芯转过的角度为 θ_1 , 卷材的厚度为 h , 滚轴上的半径变化可以进行如下推导:

$$R_1 = R_0 - \frac{h}{2\pi}\theta_1, \quad (6)$$

记转角 θ_1 对时间 t 求导为 $\frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1$ 。方程(6)

对时间 t 求导可得:

$$\frac{dR_1}{dt} = -\frac{h}{2\pi} \cdot \frac{d\theta_1}{dt}, \quad (7)$$

由于 $\omega_1 = \frac{V_1}{R_1}$, 经过计算可以得到:

$$\frac{dR_1}{dt} = -\frac{h}{2\pi R_1} V_1, \quad (8)$$

角速度 ω_1 对时间 t 求导可得:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{d(V_1/R_1)}{dt} = \frac{(dV_1/dt) \cdot R_1 - V_1 \cdot (dR_1/dt)}{R_1^2} = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{dV_1}{dt} - \frac{V_1}{R_1^2} \cdot \frac{dR_1}{dt}, \quad (9)$$

将公式(4)~(5)、(8)~(9)代入张力动力学平衡方程(1)后,可以得到放卷机构上张力 T 的方程如下:

$$T = \frac{B_1 V_1}{R_1^2} + \frac{M_1}{R_1} + \left[-\frac{3}{4} \rho b h + \frac{h J_0}{2 \pi R_1^4} - \frac{\rho b h}{4} \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^4 \right] V_1^2 + \left[\frac{J_0}{R_1^2} + \frac{\rho b \pi R_1^2}{2} - \frac{\rho b \pi R_0^4}{2 R_1^2} \right] \frac{dV_1}{dt}, \quad (10)$$

从张力方程可以清楚地看出,放卷系统的张力受以下几个因素的影响:放卷的速度、滚轴的半径、滚轴的惯性、滚轴轴芯的半径、卷材的密度和厚度以及放卷辊轴的摩擦系数。事实上,除了放卷速度和滚轴的半径以外,这些因素都是由材料和力学性能决定的常数。因此,张力被认为是线速度和滚轴的半径的多项式,证明了张力系统是一个非线性的时变控制对象。

同理,可以推导出收卷机构上张力 T 的方程如下:

$$T = -\frac{B_2 V_2}{R_2^2} + \frac{M_2}{R_2} - \left[-\frac{3}{4} \rho b h + \frac{h J_0}{2 \pi R_2^4} - \frac{\rho b h}{4} \left(\frac{R_0}{R_2} \right)^4 \right] \cdot V_2^2 - \left[\frac{J_0}{R_2^2} + \frac{\rho b \pi R_2^2}{2} - \frac{\rho b \pi R_0^4}{2 R_2^2} \right] \frac{dV_2}{dt}, \quad (11)$$

为了方便运算,将放卷机构和收卷机构的方程简化表示,记:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= -\frac{3}{4} \rho b h + \frac{h J_0}{2 \pi R_1^4} - \frac{\rho b h}{4} \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^4 \\ \xi_2 &= -\frac{3}{4} \rho b h + \frac{h J_0}{2 \pi R_2^4} - \frac{\rho b h}{4} \left(\frac{R_0}{R_2} \right)^4 \\ \phi_1 &= \frac{J_0}{R_1^2} + \frac{\rho b \pi R_1^2}{2} - \frac{\rho b \pi R_0^4}{2 R_1^2} \\ \phi_2 &= \frac{J_0}{R_2^2} + \frac{\rho b \pi R_2^2}{2} - \frac{\rho b \pi R_0^4}{2 R_2^2} \end{aligned}$$

由于 $R_1 > R_0, R_2 > R_0$, 故有:

$$\frac{J_0}{R_1^2} \leq \phi_1 \leq \frac{J_0}{R_1^2} + \frac{\rho b \pi R_1^2}{2}, \quad \frac{J_0}{R_2^2} \leq \phi_2 \leq \frac{J_0}{R_2^2} + \frac{\rho b \pi R_2^2}{2}, \quad (12)$$

因此式(10)和式(11)可重写为:

$$\frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{\phi_1} \left(T - \frac{B_1 V_1}{R_1^2} - \frac{M_1}{R_1} - \xi_1 V_1^2 \right), \quad (13)$$

$$\frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{\phi_2} \left(-T - \frac{B_2 V_2}{R_2^2} + \frac{M_2}{R_2} - \xi_2 V_2^2 \right), \quad (14)$$

根据胡克定律^[18]可知,卷绕系统张力的表达式为:

$$T = \frac{EA}{L} \int (V_1 - V_2) dt, \quad (15)$$

其中, E 为卷材的弹性模量; A 为卷材的横截面积; L 为放卷滚轴和收卷滚轴之间的距离。

最后,根据式(13)~(15),得出描述系统的动力学方程为:

$$\begin{cases} \dot{T} = \frac{EA}{L} (V_1 - V_2), \\ \dot{V}_1 = \frac{1}{\phi_1} \left(T - \frac{B_1 V_1}{R_1^2} - \frac{M_1}{R_1} - \xi_1 V_1^2 \right), \\ \dot{V}_2 = \frac{1}{\phi_2} \left(-T - \frac{B_2 V_2}{R_2^2} + \frac{M_2}{R_2} - \xi_2 V_2^2 \right), \end{cases} \quad (16)$$

其中, \dot{T} 表示张力的导数; \dot{V}_1 表示放卷线速度的导数; \dot{V}_2 表示收卷线速度的导数。

下面考虑对于给定的控制力矩 M_2 和在系统参数时变未知的情况下,如何设计控制力矩 M_1 使得张力 T 满足实现给定的要求。

2 基于趋近律方法的滑模控制器设计

滑模运动包括趋近运动和滑模运动两个过程,系统从任意初始状态趋向切换面,直到到达切换面的运动叫做趋近运动。

常用的传统趋近律主要有以下几种:

- (1) 等速趋近律: $\dot{s} = \varepsilon \operatorname{sgn}(s), \varepsilon > 0$; 其中,常数 ε 表示系统的状态趋近切换面的速率。
- (2) 指数趋近律: $\dot{s} = \varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks, \varepsilon > 0, k > 0$; 在指数趋近律中,为了保证快速趋近的同时削弱抖振,应在增大 k 的同时减小 ε 。
- (3) 幂次趋近律: $\dot{s} = -k |s|^\alpha \operatorname{sgn}(s), k > 0, 0 < \alpha < 1$ 。
- (4) 一般趋近律: $\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - f(s), \varepsilon > 0$ 。

但是,由于滑模变结构控制存在抖振,使得上述传统的趋近律滑模控制器的应用受到了一定的限制,其中的一个主要原因在于趋近律的趋近速度不能很好反映出系统当前状态与滑模面的情况。

本文对上述传统的趋近律方法进行了改进,提出了一种新的趋近律方法,新型的趋近律滑模控制与上述传统趋近律滑模控制的主要区别在于:一方面,使用了不同的趋近律函数;另一方面,该趋近速度能很好地反映出系统当前状态与滑模面的距离,即趋近速度随着 $|s|$ 的大小进行调节。 $|s|$ 大,表明其距滑模面远,应加大趋近速度; $|s|$ 小,表明其距滑模面近,为了降低抖振,应降低趋近速度,以使系统能平滑到达滑模面。一般的滑模控制器设计分为2个步骤:设定滑模面,设计控制率。

滑模控制器的目的是使张力波动维持在较小的

值,假设 T_d 和 \dot{T}_d 为给定的张力和给定张力的变化率。

定义 e 和 \dot{e} 分别为张力误差和张力的变化率:

$$e(t) = T - T_d, \quad \dot{e}(t) = \dot{T} - \dot{T}_d$$

定义滑模面为:

$$s = ce(t) + \dot{e}(t), \quad (17)$$

其中, c 为大于0的常数。

定义候选 Lyapunov 函数为: $V = \frac{1}{2}s^2$, 则 $\dot{V} = s \cdot \dot{s}$ 。

将张力系统的一阶微分方程代入,可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= c\dot{e} + \ddot{e} = c \frac{EA}{L}(V_1 - V_2) + \frac{EA}{L}(\dot{V}_1 - \dot{V}_2) = \\ &c \frac{EA}{L}(V_1 - V_2) + \frac{EA}{L} \left(\frac{1}{\phi_1} \left(T - \frac{B_1 V_1}{R_1^2} - \frac{M_1}{R_1} - \xi_1 V_1^2 \right) - \right. \\ &\left. \frac{1}{\phi_2} \left(-T - \frac{B_2 V_2}{R_2^2} + \frac{M_2}{R_2} - \xi_2 V_2^2 \right) \right) = \\ &- \frac{EA}{L\phi_1 R_1} M_1 + c \frac{EA}{L}(V_1 - V_2) + \\ &\frac{EA}{L} \left(\frac{1}{\phi_1} \left(T - \frac{B_1 V_1}{R_1^2} - \xi_1 V_1^2 \right) - \right. \\ &\left. \frac{1}{\phi_2} \left(-T - \frac{B_2 V_2}{R_2^2} + \frac{M_2}{R_2} - \xi_2 V_2^2 \right) \right) = \\ &G(t)M_1 + H(t), \end{aligned} \quad (18)$$

其中,

$$G(t) = - \frac{EA}{L\phi_1 R_1}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} H(t) &= \frac{EA}{L} \left(\frac{1}{\phi_1} \left(T - \frac{B_1 V_1}{R_1^2} - \xi_1 V_1^2 \right) - \right. \\ &\left. \frac{1}{\phi_2} \left(-T - \frac{B_2 V_2}{R_2^2} + \frac{M_2}{R_2} - \xi_2 V_2^2 \right) \right), \end{aligned} \quad (20)$$

由式(12)可知, $G(t)$ 有正的常值上下界,且 $H(t)$ 可以被已知函数界定。因此假设:

$$G_1 \leq |G(t)| \leq G_2, \quad |H(t)| \leq \bar{H}(T, V_1, V_2), \quad (21)$$

这里, G_1, G_2 为已知正数, $\bar{H}(T, V_1, V_2)$ 为已知函数。

设计一种新的滑模控制器,即:

$$M_1 = - \frac{\varepsilon}{G_1} \text{sgn}(s) (1 - k^{|s|}) + \frac{\bar{H}}{G_1} \text{sgn}(s), \quad (22)$$

其中, $\varepsilon > 0, k > 1$ 。

代入方程可以得到:

$$\dot{s} = G(t)M_1 + H(t) = -G(t) \cdot \frac{\varepsilon}{G_1} \text{sgn}(s) (1 -$$

$$k^{|s|}) + G(t) \cdot \frac{\bar{H}}{G_1} \text{sgn}(s) + H(t), \quad (23)$$

则可推得:

$$s \cdot \dot{s} = -G(t) \cdot \frac{\varepsilon}{G_1} |s| (1 - k^{|s|}) + G(t) \cdot$$

$$\frac{\bar{H}}{G_1} |s| + H(t) \cdot s \leq G_1 \cdot \frac{\varepsilon}{G_1} |s| (1 - k^{|s|}) - G_1 \cdot$$

$$\frac{\bar{H}}{G_1} |s| + \bar{H} \cdot |s| = \varepsilon \cdot |s| (1 - k^{|s|}) \leq 0. \quad (24)$$

可以证明, $|s|$ 是单调递减的,且有限时间收敛到零。再根据式(17)可知在滑动面上有 e 和 \dot{e} 收敛到零。综上所述可以得到如下定理。

定理 假设式(21)成立,取 $\varepsilon > 0, k > 1$ 以及

张力设定值 T_d 和设定值变化率 \dot{T}_d , 对于时变不确定系统(16),设计控制率(22)可以使得闭环系统满足 e 和 \dot{e} 收敛到零。

上述分析过程就是该定理的详细证明。

3 系统仿真

为了验证上述控制方法,利用 Matlab 软件对设计的控制器进行系统仿真。仿真参数设计为 $c = 10, \varepsilon = 10, k = 1.5$, 卷对卷系统的参数设计为 $\rho = 1400 \text{ kg/m}, b = 0.1 \text{ m}, h = 0.00005 \text{ m}, J_0 = 0.01 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, R_0 = 0.025 \text{ m}, B_f = 0.412 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$ 。在不考虑其他外部扰动的情况下,当张力设定值采用方波输入时,得到如图2和图3所示的方波响应随动曲线和张力的误差曲线。从图3可以看出,张力信号上升时间1s,超调量较小,满足了卷绕机张力控制的快速响应特性和高控制精度。为了更好地反映控制器的跟踪特性,采用频率为0.75、振幅为0.5的正弦信号作为输入信号,张力正弦误差曲线如图4所示,运行得到正弦响应曲线,如图5所示。从图5可以看出,张力的输出值可以在相对较快的时间内跟随张力的预期值。

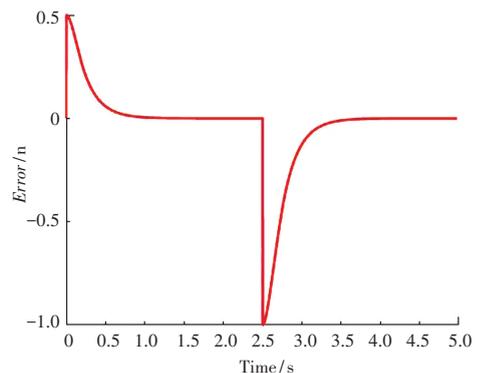


图2 张力方波误差曲线

Fig. 2 Error curve of tension square wave

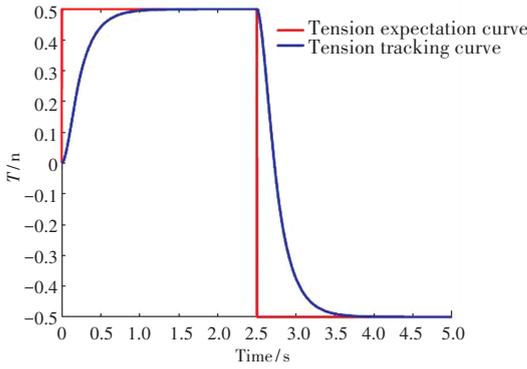


图3 张力方波响应曲线

Fig. 3 Response curve of tension square wave

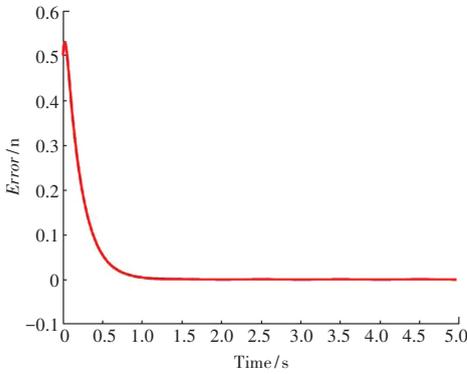


图4 张力正弦误差曲线

Fig. 4 Error curve of tension sine

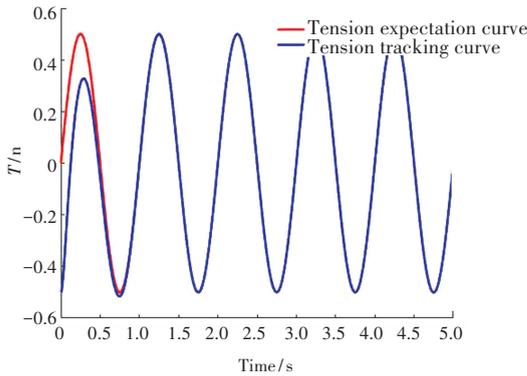


图5 张力正弦响应曲线

Fig. 5 Response curve of tension sine

4 结束语

张力控制是卷对卷系统的重要组成部分,以锂电池卷绕机作为研究对象,建立了一个涵盖多种扰动因素的放卷系统张力动力学模型。张力控制是卷对卷系统的重要组成部分,本文提出了一种用于时变不确定放卷系统张力的滑模变结构控制器设计方法。针对传统滑模变结构控制中存在的高频抖振问题,采用一种新的趋近律的方法设计滑模变结构控制器,不仅可以使系统在有限时间内到达画面,还可

以有效地抑制高频抖振。运用李雅普诺夫稳定性理论,对整个系统进行了稳定性分析。通过仿真实验表明,在放卷张力控制系统中,滑模变结构控制具有响应速度快,控制精度较高的动态特性。同时所设计的控制方法具有较好的鲁棒性和跟踪性能。仿真结果也验证了所设计方法的有效性。

参考文献

[1] 杨梅,续明进. 基于 MATLAB 的卷筒纸印刷机张力控制系统的建模与仿真[J]. 包装工程,2011,32(7):22.

[2] 吴东苏,闵松,万淑芸,等. 基于滑模变结构控制的高精度交流伺服系统的设计与仿真[J]. 计算技术与自动化,2001,20(3):23.

[3] 彭书华,李华德,苏中. 非线性摩擦干扰下的电动舵机滑模变结构控制[J]. 信息与控制,2008,37(5):637.

[4] 刘金琨,孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展[J]. 控制理论与应用,2007,24(3):407.

[5] LIU Le, FANG Yiming, LI Xiaogang, et al. Tensiometer-free control for a speed and tension system of reversible cold strip mill based on Hamilton theory[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1):165.

[6] HOU Hailiang, NIAN Xiaohong, XIONG Hongyun, et al. Robust decentralized coordinated control of a multimotor Web-winding system[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(4):1495.

[7] VALENZUELA M A, BENTLEY J M, LORENZ R D. Sensorless tension control in paper machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2):294.

[8] 孟彦京,周斌,刘圆圆. 基于模糊自适应 PID 算法的复卷机退纸辊张力控制[J]. 中国造纸,2011,30(2):41.

[9] 何金保,郭帅,何永义,等. 基于遗传优化的张力模糊控制[J]. 控制理论与应用,2009,26(3):243.

[10] 李伟,王友权,董继先,等. 基于自调整内模控制法的复卷机张力控制的设计与仿真[J]. 包装工程,2016,37(11):149.

[11] 李琳,林炯辉,邹焱熹. 基于滑模变结构的张力控制系统设计[J]. 机械设计与制造,2016(4):175.

[12] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真:基本理论与设计方法[M]. 3版. 北京:清华大学出版社,2015.

[13] 孙洋,黄民,李启光. 基于惯性滤波的开卷机卷径计算与 MATLAB 仿真[J]. 机械工程师,2015(9):18.

[14] SHI Hongmei, YU Zujun. Design of PMSM position servo system based on fuzzy adaptive PI control [J]. Advanced Materials Research, 2013, 706-708(1):737.

[15] HAN Yu, LIU Le, FANG Yiming, et al. Backstepping control for the speed and tension system of reversible cold strip rolling mill based on command filter [C]// Proceedings of the 36th Chinese Control Conference. Dalian, China: Control theory Committee of China Automation Society, 2017:1016.

[16] 游林儒,杨秀春. 基于锂电池卷绕机张力控制系统[J]. 控制工程,2011,18(6):890.

[17] 王虎符,王文格. 阿基米德螺线的插补算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,1996(1):8.

[18] 陈毅辉. 高精度卷绕机张力控制系统的研究[D]. 镇江:江苏大学,2006.