

包装机拉膜机构纠偏装置鲁棒控制系统设计

刘静, 卢峰

(1.重庆科创职业学院, 重庆 402160; 2.西安文理学院, 西安 710000)

摘要: **目的** 为提高包装生产线纠偏机构控制精度, 改善产品外观, 提高产品合格率, 结合转矩观测器和积分型滑模变结构算法设计一种纠偏装置控制系统。**方法** 在分析纠偏装置结构的基础上, 以纠偏伺服电机为研究对象, 提出一种电机控制方法。负载转矩观测器和积分型滑模控制器不但可以解决负载扰动对控制系统性能的影响, 而且可以减小滑模控制器的抖振幅度, 饱和函数则可以进一步减小系统抖振。通过实验验证所述方法的可行性和有效性。**结果** 实验结果表明, 所述控制方法基本无超调量, 达到稳定状态约耗时 0.5 s; 采用所述纠偏装置, 包装薄膜跑偏量最大值只有 0.70 mm, 包装合格率均在 97%以上。**结论** 在保证产品质量前提下, 纠偏装置鲁棒控制系统可以提高产品合格率和包装生产线工作效率。

关键词: 纠偏装置; 负载转矩观测器; 积分型滑模控制器; 永磁同步电机

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)19-0212-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.19.027

Design of Robust Control System for Rectifying Device of Film Drawing Mechanism of Packaging Machine

LIU Jing, LU Feng

(1. Chongqing Creation Vocational College, Chongqing 402160, China; 2. Xi'an University, Xi'an 710000, China)

ABSTRACT: The work aims to design a control system of the rectifying device combining torque observer and integral sliding mode variable structure algorithm to improve the control precision of the rectifying mechanism of packaging production line, and improve the appearance and qualified rate of product. On the basis of analyzing the structure of rectifying devices and taking rectifying servo motor as the research object, a motor control method was put forward. The load torque observer and the integral sliding mode controller could not only solve the effect of load disturbance on the performance of the control system, but also reduce the chattering amplitude of the sliding mode controller. In addition, the saturation function could further reduce the system chattering. The feasibility and effectiveness of the proposed method were verified by experiments. The experimental results showed that the control method basically had no overshoot, and it took about 0.5 s to reach the stable state. By adopting the rectifying device, the maximum deviation amount of the packaging film was only 0.70 mm, and the qualified rate of the packaging was above 97%. On the premise of ensuring product quality, the robust control system of rectifying devices can improve the qualified rate of products and the working efficiency of packaging production lines.

KEY WORDS: rectifying device; load torque observer; integral sliding mode controller; permanent magnet synchronous motor

目前,自动纠偏装置在诸多行业中的应用比较广泛,例如:印刷、包装、造纸、纺织等,其主要作用就是保证卷边整齐。以包装印刷生产线为例,受运转速度快、材料易变性、部件多等因素影响,包装材料很容易出现“跑偏”现象,将导致包装材料收放不整齐,降低包装产品的质量^[1-4]。为解决此类问题,需要设计一种精准、高效的自动纠偏装置来实现柔性包装材料的在线检测和调整,进而提高包装生产线的自动化水平。大多数情况下,纠偏装置的关键部件就是电机,其中永磁同步电机使用较多、应用前景最好。因此,纠偏装置控制问题归根到底是电机的高性能控制。

最近几年,在永磁同步电机驱动领域,一些现代控制技术的应用越来越普遍,例如:滑模变结构控制、神经网络控制、自适应反步控制、预测控制等^[5-9]。这些方法可从不同方面提高永磁同步电机控制系统性能。其中,滑模变结构控制易于实现且响应速度快、收敛效果好,受到广大研究人员的关注。Mynar 等^[10]为解决 PMSM 的速度控制问题,在传统滑模控制器的基础上引入了一种新型趋近律,可减小系统抖振;为进一步提高系统鲁棒性,同时设计了一种观测器来估计扰动。阚卫峰等^[11]以 PMSM 电流环控制为研究对象,提出了一种滑模电流控制器,该控制器具有一定补偿能力,可改善控制系统抖振现象,电流响应速度较快、跟踪精度较高。Zhang 等^[12]基于分数阶微积分设计了一种永磁同步电机滑模控制器,可解决电机速度控制的非线性问题,可减小抖振。

本文在现有研究的基础上,设计一种永磁同步电机滑模控制器,并将其应用到包装生产线纠偏装置,以期提高纠偏装置控制精度,提高包装生产线自动化水平。

1 纠偏装置

在包装过程中,包装薄膜“跑偏”的原因比较多,例如:料辊、牵引辊、中间辊的圆柱度不够、表面粗糙度不一致等;安装精度不够,料辊、牵引辊、中间辊之间轴线并不平行;相邻两辊之间包装膜速度不一致;个别辊子不够灵活,包装膜两侧所受阻力不一致;包装膜厚度不均匀;机械振动、设备磨损等。如上所述,导致包装薄膜“跑偏”的原因是比较多的,即使包装机械的加工精度和装配精度足够高,也很难避免“跑偏”现象。因此,设计一种合适、高效的纠偏装置和控制系统是很有必要的。

纠偏装置如图 1 所示,通过检测传感器捕获包装薄膜位置;采用图像处理、模数转换等方法可将包装薄膜实际位置发送至纠偏控制系统;控制系统通过比较实际位置和设定位置可以得到包装薄膜位置偏移量;通过纠偏算法可将位置偏移量转换为对应驱动信号,并将其传送给电动执行器;电动执行器驱动纠偏

装置执行纠偏动作以确保包装薄膜恢复到设定位置。一旦包装薄膜“跑偏”,在永磁同步电机作用下纠偏辊会旋转一定角度,产生一个横向摩擦力使包装膜回到设定位置。为提高纠偏控制系统性能,检测传感器精度要足够高,市面上大部分检测传感器的精度、速度均比较高,完全可以满足要求;纠偏辊的响应速度和运动精度要足够高,主要取决于永磁同步电机的控制。因此,文中重点讨论纠偏装置驱动电机的控制问题。

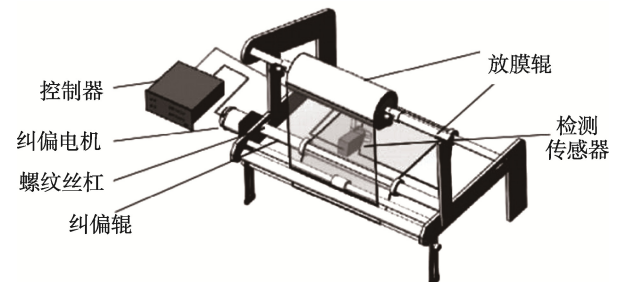


图 1 纠偏装置
Fig.1 Rectifying device

参考相关文献^[13-15],可得到永磁同步电机数学模型,即:

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega_r \psi_d + \frac{d\psi_d}{dt} \\ u_q = Ri_q - \omega_r \psi_q + \frac{d\psi_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_r \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = n_p \psi_r i_q \quad (3)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (4)$$

式中: u_d 为 d 轴电压分量; u_q 为 q 轴电压分量; R 为定子电阻; i_d 为 d 轴电流分量; i_q 为 q 轴电流分量; ω_r 为转子角速度; ψ_d 为 d 轴磁链分量; ψ_q 为 q 轴磁链分量; L_d 为 d 轴电感分量; L_q 为 q 轴电感分量; ψ_r 为永磁体磁链; T_e 为电磁转矩; n_p 为电机转子极对数; T_L 为负载转矩; B 为摩擦因数; J 为转动惯量。

2 电机控制器设计

2.1 滑模面设计

电机状态变量可定义为:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_r^* - \omega_r \\ x_2 = \int_{-\infty}^t x_1 dt = \int_{-\infty}^t (\omega_r^* - \omega_r) dt \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω_r^* 为电机期望转速; ω_r 为电机实际转速。

结合式 (3)、式 (4) 并对式 (5) 求导可得:

$$\begin{cases} x_1' = -\omega_r' = -\frac{n_p}{J} \psi_r i_q + \frac{B}{J} \omega_r + \frac{1}{J} T_L \\ x_2' = x_1 = \omega_r^* - \omega_r \end{cases} \quad (6)$$

为减少滑模控制的高频噪声,可在常规滑模面的基础上加入状态积分量,因此积分滑模面 s 可定义为:

$$s = x_1 + cx_2 \quad (7)$$

积分初始值 I_0 可定义为:

$$I_0 = \int_{-\infty}^0 x_1(\tau) d\tau = -\frac{x_0}{c} \quad (8)$$

式中: x_0 为 x_1 初始状态; c 为不小于零的积分常数。

对于式 (7), 若令 $s = 0$ 并求导则有:

$$x_1' = -cx_1 \quad (9)$$

式 (9) 表明速度误差会逐渐趋近于 0, 因此可通过选择系数 c 来预先设定滑模面的动态特性。

2.2 控制律求取

由式 (6) 和式 (7) 可以得到:

$$s' = x_1' + cx_1 = -\frac{n_p}{J}\psi_r i_q + \frac{B}{J}\omega_r + \frac{1}{J}T_L + cx_1 \quad (10)$$

为提高系统的动态特性,可根据指数趋近律完成控制器设计。对应指数趋近律可描述为:

$$s' = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (11)$$

式中: ε 、 k 均为正常数。

由式 (10)、式 (11) 可以得到:

$$-\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks = -\frac{n_p}{J}\psi_r i_q + \frac{B}{J}\omega_r + \frac{1}{J}T_L + cx_1 \quad (12)$$

式 (12) 变换则有:

$$i_q = \frac{J}{n_p\psi_r} \left[cx_1 + \frac{B}{J}\omega_r + \frac{1}{J}T_L + \varepsilon \operatorname{sgn}(s) + ks \right] \quad (13)$$

如前文所述,如何合理解决抖振问题就是滑模控制器设计的关键。指数趋近律就能够比较好地解决滑模抖振问题。在远离切换面时,提高系统趋近速度,减小响应时间;在接近切换面时,系统趋近速度接近于 0,可减弱系统抖振,因此可将式 (13) 中的函数 $\operatorname{sgn}(s)$ 用饱和函数 $\operatorname{sat}(s, \delta)$ 代替。

饱和函数 $\operatorname{sat}(s, \delta)$ 可描述为:

$$\operatorname{sat}(s, \delta) = \begin{cases} 1 & s > \delta \\ s/\delta & |s| < \delta \\ -1 & s < -\delta \end{cases} \quad (14)$$

那么式 (13) 可调整为:

$$i_q = \frac{J}{n_p\psi_r} \left[cx_1 + \frac{B}{J}\omega_r + \frac{1}{J}T_L + \varepsilon \operatorname{sat}(s, \delta) + ks \right] \quad (15)$$

2.3 负载转矩观测器设计

式 (15) 中负载转矩 T_L 为未知变量且很难准确测量,设计一种负载转矩观测器可监测其变化。将式 (4) 调整为式 (16)。

$$T_e - T_{LS} = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (16)$$

式中: T_{LS} 为负载转矩。永磁同步电机控制系统可描述为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (17)$$

式中: 状态变量 $\mathbf{x} = [\omega \quad T_{LS}]^T$; 输出变量 $\mathbf{y} = \omega$;

输入变量 $\mathbf{u} = T_e$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1/J \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = [1/J \quad 0]^T$;

$\mathbf{C} = [1 \quad 0]^T$ 。

永磁同步电机的状态观测器可表示为:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{L}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}$ 为 $\mathbf{x}$ 估计值, $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{\omega} \quad \hat{T}_{LS}]^T$; $\hat{\mathbf{y}}$ 为 $\mathbf{y}$ 估

计值; $\mathbf{L}$ 为反馈矩阵, $\mathbf{L} = [l_1 \quad l_2]^T$ 。

观测器误差方程可表示为:

$$\mathbf{e}' = \mathbf{x}' - \hat{\mathbf{x}}' = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\mathbf{e} \quad (19)$$

从式 (19) 可以看出,如果矩阵 $(\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})$ 的特征值均含有负实部,那么状态误差 $\mathbf{e}$ 便会趋近于 0,因此需要将式 (19) 极点配置在左半平面。

综上所述,如果将 $\hat{T}_{LS}$ 代入式 (15) 就可以得到:

$$i_q = \frac{J}{n_p\psi_r} \left[cx_1 + \frac{B}{J}\omega_r + \frac{1}{J}\hat{T}_{LS} + \varepsilon \operatorname{sat}(s, \delta) + ks \right] \quad (20)$$

结合负载转矩观测器和积分型滑模控制器不仅可以解决负载扰动对控制系统性能的影响,而且可以减小滑模控制器的抖振幅度,饱和函数则可以进一步减小系统抖振。

3 实验研究

3.1 实验一

实验平台选用北京灵思创奇科技有限公司开发的“低功率交流用磁同步电机控制实验平台”,具体型号为 LINKS-ES-PMSM-01。该实验平台包括实时仿真机 (Links-Box-02)、多功能采集卡 (Links-IPC-DAQ-04)、同步电机对拖平台 (Links-PMSM-01)、电机驱动箱 (Links-PMSM-Drive Box) 等。实验平台如图 2 所示。



图 2 实验平台
Fig.2 Experiment platform

永磁同步电机参数如下: 转动惯量为 $0.003\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 永磁体磁链为 0.29 Wb , 定子相电阻为 $0.93\text{ }\Omega$, 定子电感为 0.003 mH , 磁极对数为 4。控制器参数如下: $c=5$ 、 $k=3$ 、 $\varepsilon=0.2$ 。实验设计如下: 最开始电机转速设定为 400 r/min ; 10 s 后电机转速调整为 700 r/min ; 在 $t=20\text{ s}$ 时, 电机转速突变到 $1\,000\text{ r/min}$ 。分别在空载和负载变化的情况下开展上述实验, 其中负载变化情况为初始时刻电机转矩为 $4\text{ N}\cdot\text{m}$; 在 $t=14\text{ s}$ 时, 转矩突变为 $8\text{ N}\cdot\text{m}$; 在 $t=18\text{ s}$ 时, 转矩恢复到 $4\text{ N}\cdot\text{m}$ 。永磁同步电机转速响应曲线如图 3 所示。

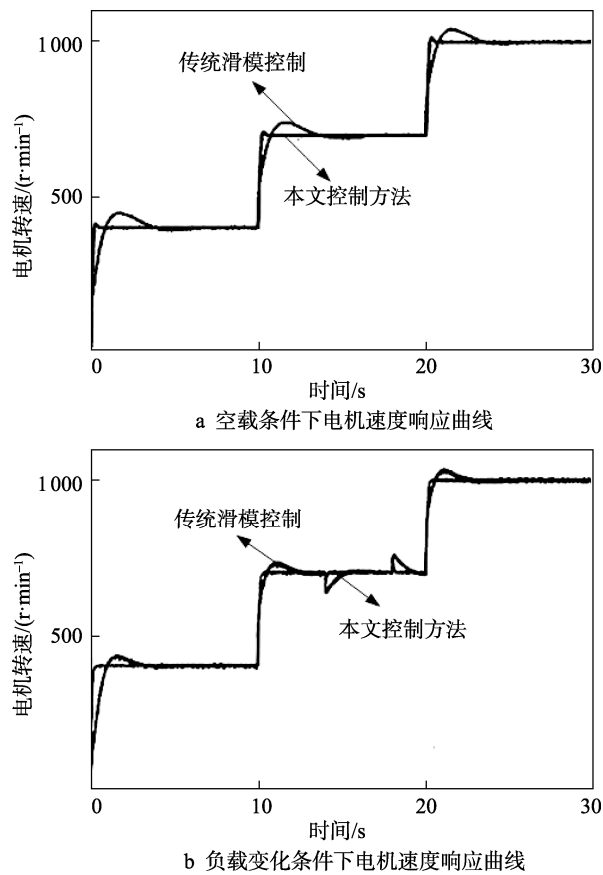


图 3 永磁同步电机转速响应曲线
Fig.3 Speed response curves of permanent magnet synchronous motor

从图 3 可以看出, 传统滑模控制的超调量约为 50 r/min , 达到稳定状态耗时约 4 s ; 本文控制方法基本无超调量, 达到稳定状态耗时约 0.5 s 。实验结果表明, 与传统滑模控制相比, 本文控制方法能够快速无超调地响应给定转速; 当负载变化时, 所述滑模控制器可以准确观测、快速跟踪负载扰动, 减小干扰因素对系统的影响, 提高系统的鲁棒性。

3.2 实验二

进一步地, 将文中所述滑模控制器移植到包装生产线纠偏装置中, 并进行相关实验验证。包装生产线如图 4 所示。



图 4 包装生产线
Fig.4 Packaging production line

实验条件如下: 包装质量分别设定为 10 、 30 、 50 g , 包装薄膜速度分别设定为 100 、 150 、 200 mm/s 。每次实验均进行 100 次包装, 通过计算包装合格率来验证算法优劣。实验结果如表 1 所示。

从实验结果可以看出, 采用所述纠偏装置时, 包装薄膜跑偏量平均值的最大值只有 0.70 mm , 包装合格率均在 97% 以上。如果不采用纠偏装置, 包装薄膜跑偏量平均值的最大值可以达到 5.11 mm 。当拉膜速度为 200 mm/s 时, 很难将跑偏量控制在 2 mm 以下, 包装合格率达不到 70% 。实验结果表明, 文中所述纠偏装置可以减小包装薄膜跑偏量、提高产品合格率。

表 1 实验结果
Tab.1 Experimental results

组别	实验条件		非纠偏		纠偏	
	拉膜速度/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	包装质量/g	偏移量平均值/mm	合格率/%	偏移量平均值/mm	合格率/%
1	100	10	1.52	91	0.55	100
2	100	30	1.58	90	0.56	100
3	100	50	1.65	90	0.58	99
4	150	10	2.56	82	0.60	99
5	150	30	2.74	80	0.62	98
6	150	50	2.81	80	0.63	98
7	200	10	4.66	69	0.68	98
8	200	30	4.85	65	0.68	97
9	200	50	5.11	64	0.70	97

通过对比发现包装质量对跑偏量影响不大,但随着拉膜速度增加,跑偏量逐渐变大,且合格率也会降低,因此需要采用纠偏装置来提高整个包装生产线的合格率和自动化程度。

4 结语

以包装生产线纠偏装置控制系统设计为研究对象,重点解决纠偏装置驱动电机——永磁同步电机的控制问题。结合转矩观测器和积分型滑模控制器设计了一种纠偏电机控制器,实验结果表明,所述控制方法能够较好地解决传统滑模控制器的抖振问题,提高了其响应速度和控制精度。采用纠偏装置能够明显减小包装薄膜跑偏量,提高产品合格率。下一步可从干扰因素影响作用入手,重点分析不同干扰因素对控制精度的影响程度,以进一步提高系统的控制精度。

参考文献:

- [1] 周继彦,余正泓. 基于图像处理的柔性材料自适应纠偏系统设计[J]. 包装工程, 2017, 38(13): 189-194.
ZHOU Ji-yan, YU Zheng-hong. Design of Adaptive Rectification System for Flexible Materials Based on Image Processing[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(13): 189-194.
- [2] 陈耀欢,任德均,邓霖杰,等. 基于机器视觉的纠偏检测系统[J]. 机电工程技术, 2014, 43(11): 86-88.
CHEN Yao-huan, REN De-jun, DENG Lin-jie, et al. System of Deviation Detector Based on Machine Vision[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2014, 43(11): 86-88.
- [3] 阎龙,江伟,史耀耀. 复合材料布带缠绕纠偏控制系统设计[J]. 宇航学报, 2012, 33(8): 1171-1176.
YAN Long, JIANG Wei, SHI Yao-yao. Design of the Rectification Control System for Composites Tape Winding[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(8): 1171-1176.
- [4] 陆兵,束梅玲. 基于机器视觉的软包装边缘测量及纠偏系统[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(7): 2005-2007.
LU Bing, SHU Mei-ling. Soft Package Edge Measurement and Correction System Based on Machine Vision[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(7): 2005-2007.
- [5] YU J, CHEN B, YU H, et al. Neural Networks-Based Command Filtering Control of Nonlinear Systems with Uncertain Disturbance[J]. Information Science, 2018(426): 50-60.
- [6] 罗慧,尹泉,孙明明. 交流伺服系统参数辨识方法综述[J]. 伺服控制, 2012(1): 27-29.
LUO Hui, YI Quan, SUN Ming-ming. Review of AC Servo System Parameter Identification Method[J]. Servo Control, 2012(1): 27-29.
- [7] 朱磊,温旭辉,赵峰,等. 永磁同步电机弱磁失控机制及其应对策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18): 67-72.
ZHU Lei, WEN Xu-hui, ZHAO Feng, et al. Control Policies to Prevent PMSMS from Losing Control under Field-Weakening Operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 67-72.
- [8] 张晓光,孙力,赵克. 基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 111-116.
ZHANG Xiao-guang, SUN Li, ZHAO Ke. Sliding Mode Control of PMSM Based on a Novel Load Torque Sliding Mode Observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(3): 111-116.
- [9] 王子昭,费骏韬,史林军,等. 永磁同步电机电流控制策略比较分析[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(5): 64-71.
WANG Zi-zhao, FEI Jun-tao, SHI Lin-jun, et al. Comparative Analysis on Current Control Methods of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(5): 64-71.
- [10] MYNAR Z, NESELY L, VACLAVEK P. PMSM Model Predictive Control with Field Weakening Implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8): 5156-5166.
- [11] 阚卫峰,陈渠,齐仲安. 基于扰动补偿的表贴式PMSM滑模电流控制研究[J]. 微特电机, 2019, 47(2): 52-55.
KAN Wei-feng, CHEN Qu, QI Zhong-an. SPMSM Sliding Mode Current Control Based on Disturbance Compensation[J]. Small & Special Electrical Machines, 2019, 47(2): 52-55.
- [12] ZHANG Xiao-guang, SUN Li-zhi, ZHAO Ke, et al. Nonlinear Speed Control for PMSM System Using Sliding-Mode Control and Disturbance Compensation Techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1358-1365.
- [13] ZHANG Xiao-guang, LI Zheng-xi. Sliding Mode Observer-Based Mechanical Parameter Estimation for Permanent-Magnet Synchronous Motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(8): 1.
- [14] 孙继卫,刘秀敏,郭亚男. 基于扰动观测器的永磁同步电机复合滑模控制[J]. 电气传动, 2018, 48(2): 14-18.
SUN Ji-wei, LIU Xiu-min, GUO Ya-nan. Composite Sliding Mode Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Disturbance Observer[J]. Electric Drive, 2018, 48(2): 14-18.
- [15] 周华伟,于晓东,刘国海,等. 基于内模的圆筒永磁直线电机滑模速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3382-3390.
ZHOU Hua-wei, YU Xiao-dong, LIU Guo-hai, et al. Sliding Mode Speed Control of Cylindrical Permanent Magnet Linear Motor Based on Internal Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3382-3390.