

# PID 双闭环在吸盘机械手位置控制系统中的应用

蔡清清, 王景存, 文冬

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

**摘要:** 针对步进电机实际应用中会出现失步或过冲现象导致的速度和位置控制不准问题, 结合吸盘机械手移动定位问题, 设计了一种基于 PID 双闭环算法的步进电机位置控制系统。该系统由 STM32 控制器、光电编码器、槽型光电开关以及 LV8729 驱动电路等组成。在软件上研究了以 PID 双闭环算法为基础, 探究了步进电机位置的闭环控制方法, 并在实际项目中验证了系统控制方案的可行性和良好的控制性能。

**关键词:** 步进电机; 吸盘机械手; PID 双闭环算法; 位置控制

**中图分类号:** TP 241.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)02-0054-06

**doi:** 10.12177/emca.2019.157

## Application of PID Dual-Closed-Loop in the Position Control System of Suction-Type Manipulator

CAI Qingqing, WANG Jingcun, WEN Dong

(College of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of speed and position control inaccuracy caused by out of step or overshoot in the practical application of stepper motor, considering the suction-type manipulator moving positioning problem, a position control system of stepper motor based on PID dual-closed-loop algorithm is designed. The system consists of STM32 controller, photoelectric encoder, slot type photoelectric switch and LV8729 driving circuit. Based on the PID dual-closed-loop algorithm, the software realization of the closed-loop control method of stepper motor position is studied. The feasibility and good control performance of the system control scheme are verified in practical application.

**Key words:** stepper motor; suction-type manipulator; PID dual-closed-loop algorithm; position control

## 0 引言

随着劳动力成本的不断上升, 工业领域的机械手凭借稳定性好、适应面广、效率高等特点, 成为了工业自动化生产的理想工具之一<sup>[1]</sup>。柔软而有弹性的吸盘可以很方便地实现如工件的吸持、脱开、传递等搬运功能, 并确保不损坏其作用对象<sup>[2]</sup>。本文研究的吸盘机械手结合上述特点, 已实际应用到研发项目“全自动发票报销封装一体机”当中, 用于抓运票据。

随着驱动技术、电力电子技术、计算机通信技

术以及电子设计自动化(EDA)技术的发展, 步进电机控制系统已经进入到一个崭新的台阶<sup>[3]</sup>。对步进电机的要求已不再是为吸盘机械手提供动力而已, 还需对其进行精准的位置定位和合适的加减速曲线设计。为此, 本文设计了一种 PID 的位置速度双闭环的控制方法, 实现了吸盘机械手平稳加减速和精确定位。

## 1 吸盘机械手结构介绍

### 1.1 吸盘机械手实物结构

全自动发票报销封装一体机的吸盘机械手实

收稿日期: 2019-11-20; 收到修改稿日期: 2019-12-26

作者简介: 蔡清清(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为嵌入式软件开发。

物图如图 1 所示。其中,整个吸盘机械手通过 X 步进电机在移动臂滑轨上面移动,并通过 S 步进电机来控制其升降。

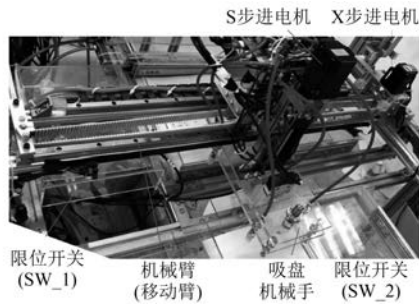


图 1 吸盘机械手实物图

为了使吸盘机械手能准确吸到票据,必须确保其能快速并准确到达指定目标位置,从而保证整个报销过程的高效性和准确性。为此,本文将吸盘机械手在移动臂上移动单独作为一个控制系统,设计了一种 PID 双闭环算法来控制机械手的平稳加减速和精确定位。

### 1.2 吸盘机械手系统总体结构

吸盘机械手系统主控核心使用 ST 公司的 STM32F103ZET6 控制器。该控制器采用 ARM32 位的 Cortex-M3 为内核,最高频率 72 MHz,拥有 512 kB 的 Flash 存储器、8 个定时器、5 个串口<sup>[4]</sup>;系统的动力部分(X 步进电机)采用 42 步进电机,工作电压为 24 V,输出转矩为 1.2 N·m;电机驱动部分采用 LV8729 驱动模块控制,该驱动的输出电流为 1.46 A,可驱动电压范围为 2.5~48 V。

STM32F103ZET6 控制器主要负责捕获步进电机编码器的值,执行 PID 控制算法,输出对电机的控制使能、方向和脉冲信号,处理限位开关信号,并将状态信息通过串口实时发送到上位机。图 2 所示为系统总体结构图。编码器为光电编码器,主要作用是负责监测步进电机运行的速度和位置。驱动器主要作用是将 STM32 CPU 输出的频率信号转化成步进电机所需的驱动信号,并设置细分数。上位机通过串口与该系统的控制板相连,STM32 接收上位机的命令并通过 PID 位置速度双闭环控制算法最终控制吸盘机械手运行的位置和速度。其中,编码器电路、电机驱动电路(LV8729)、限位开关电路均为常用的电路,本文不再赘述。

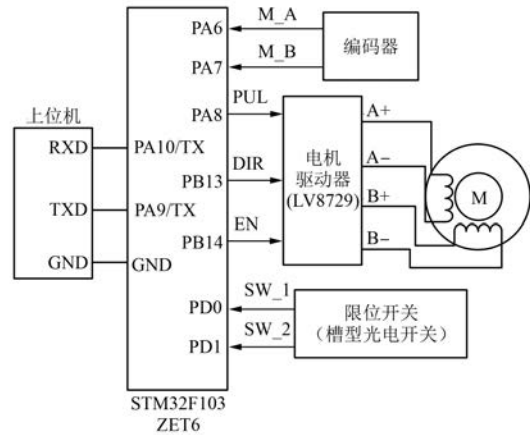


图 2 系统总体结构图

## 2 吸盘机械手系统软件设计

### 2.1 吸盘机械手位置和速度的确定

#### 2.1.1 吸盘机械手位置的确定

STM32F103ZET6 控制器的高级定时器和通用定时器均自带编码器接口,系统使用通用定时器 TIM3 输入通道口 TI1 和 TI2 作为编码器的接口,从而直接使用硬件对编码器进行计数。

在使用时将 TIM3 配置为正交编码器计数模式,且在 TI1 和 TI2 的上升沿捕获。自动重装载值  $A_r$  为 65 535,根据步进电机运行方向,或是 0~ $A_r$  计数,或是  $A_r$ ~0 计数,并且设置 URS 寄存器仅允许溢出才会产生一次更新中断。 $O_v$  用于记录电机旋转过程中编码器计数寄存器 CNT 溢出的次数,电机正转溢出, $O_v$  的值自加 1;反之, $O_v$  的值自减 1。 $C_n$  表示当前计数寄存器 CNT 的计数值,那么捕获编码器所走的脉冲值  $C_n$  为

$$C_n = O_v \times A_r + C_c \quad (1)$$

编码器单圈线数为 600,为了提高编码器的计数精度,将编码器 4 倍频处理,那么步进电机旋转一圈,编码器的计数值  $E_s$  为 2 400。

在该系统中,X 步进电机实际旋转一圈带动吸盘机械手运行的距离  $M_p$  为 5 mm,那么机械手运行的距离  $D_c$  为

$$D_c = C_n \times \frac{M_p}{E_s} \quad (2)$$

#### 2.1.2 吸盘机械手速度的确定

系统采用滴答定时器 20 ms 对编码器的值进行一次采样, $L_n$  用于记录上一个 20 ms 的  $C_n$  的值,那么 20 ms 内采样的值为  $M_{sf}$ 。为了避免采样值

出现负数,对计算结果取绝对值:

$$\begin{aligned} M_{sf} &= |C_n - L_n| \\ L_n &= C_n \\ S &= S + M_s \end{aligned} \quad (3)$$

将每 20 ms 内的  $M_s$  进行累加到变量  $S$ , 1 s 内累积 50 次, 那么当前 1 s 内吸盘机械手的速度  $V_c$  为

$$V_c = S \times \frac{M_p}{E_s} \quad (4)$$

每 1 s 将  $D_c$ 、 $V_c$  的值发送到上位机上显示, 用来记录当前 1 s 内吸盘机械手所在的位置和速度, 发送完后把  $S$  的值清零。

### 2.2 PID 双闭环算法的设计

常用的电机控制算法有 LQR、模糊控制、PID 等。LQR 的控制对象是现代控制理论中以状态空间方程给出的线性系统, 需要通过 MATLAB 计算最优反馈增益矩阵  $K = lqr(A, B, Q, R, N)$  [5]。模糊控制依赖于模糊规则表的制定, 模糊规则表则根据专家或自己在调试系统时的控制经验决定。模糊控制适用于非线性系统, 鲁棒性好 [6]。PID 是一种常规的反馈闭环控制, 具有算法简单、控制可靠、鲁棒性较好等特点 [7]。P 越大鲁棒性越好, 若鲁棒性增强则会出现强烈的抖振现象; 反之若减小抖振现象则系统的鲁棒性会降低。因此鲁棒性和抖振是一对矛盾 [8-9]。在达到控制目的的前提下, 由于 PID 算法的简易性, 本文选用 PID 双闭环的稳态控制方法。

该套系统采用 PID 双闭环控制系统的模型, 如图 3 所示。

吸盘机械手目标位置设定值  $D_s$  为机械手实际需要运动的位移, 将其转化为目标位置的编码器值  $D_T$ :

$$D_T = D_s \times \frac{E_s}{M_p} \quad (5)$$

吸盘机械手目标速度设定值  $V_s$  为机械手实际稳定运动的最高速度。因为编码器的采样周期为 20 ms, 所以需要将其转化为 20 ms 内的目标速度的编码器值  $V_T$ :

$$V_T = V_s \times \frac{E_s}{50 \times M_p} \quad (6)$$

与位置 PID 相比, 增量式 PID 不需要累加,

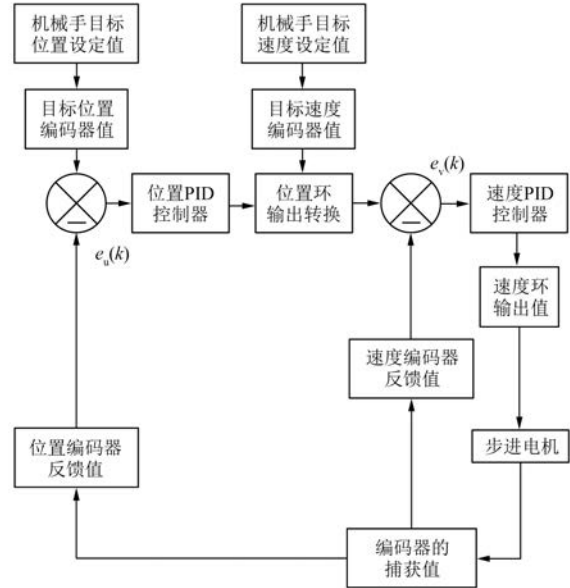


图3 位置、速度双闭环控制

控制增量  $\Delta U_k$  的确定仅与最近 3 次的采样值有关, 容易通过加权处理获得比较好的控制效果, 并且在系统发生问题时, 增量式不会严重影响系统的工作。因此, 该系统使用增量式 PID 算法, 其中位置环 PID 和速度环 PID, 均采用如下计算式:

$$\begin{cases} e_k = T_v - C_v \\ \Delta U_k = K_p [e_k - e_{k-1}] + \\ \quad K_i e_k + K_d [e_k - 2e_{k-1} + e_{k-2}] \\ e_{k-1} = e_k \\ e_{k-2} = e_{k-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $T_v$  为位置速度双闭环目标编码器的值,  $T_v$  位置环为  $D_T$ , 速度环为  $V_T$ ;  $C_v$  为位置速度双环的当前编码器的反馈值,  $C_v$  位置环的值为  $C_n$ , 速度环的值为  $M_{sf}$ ;  $K_p$  为比例系数;  $K_i$  为积分系数;  $K_d$  为微分系数;  $e_k$  为目标编码器值  $T_v$  与当前编码器值  $C_v$  的偏差;  $e_{k-1}$  为记录上一次偏差;  $e_{k-2}$  为记录上上一次的偏差, 相邻三组偏差计算一次输出的增量。

当出现双闭环来控制步进电机时, 只能使用其中一环的输出作为另外一环的输入, 本文把位置环的输出作为速度环的输入。位置速度 PID 算法是每 20 ms 执行一次, 每次执行算法均会累积各自的  $\Delta U_k$ :

$$\begin{cases} D_E = D_E + \Delta U_{k_d} \\ V_E = V_E + \Delta U_{k_v} \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $D_E$ 、 $V_E$  分别为位置环输出值和速度环输出值。

假设一开始位置目标设定值  $D_S$  为正, 表示电机将要正转走到目标位置。某个采集时刻  $D_E > 0$ ,  $M_{dir}$  为 CW; 反之,  $M_{dir}$  为 CCW。因为电机运行的速度没有正负之分, 但位置有正负, 所以位置环的输出值作为速度环的输入值之前需要取绝对值:

$$D_E = |D_E| \quad (9)$$

位置环的输出作为速度环的输入, 需要限制位置环的输出值不会超过速度环目标编码器的值  $V_T$ 。

如果  $D_E > V_T$ , 则有:

$$D_E = V_T \quad (10)$$

那么, 可以把  $V_T$  的值赋给  $D_E$ , 最终把  $D_E$  作为速度环输入的目标编码器值, 以控制电机实际的转速。

当调节达到目标位置时, 这时候步进电机已经非常慢了, 为了减少超调, 当  $V_E \leq 0.1$  时, 可以将速度环的输出值清零。

## 2.3 步进电机驱动控制

### 2.3.1 输出比较脉冲产生原理

结合图 4 介绍输出比较产生脉冲的原理: 输出比较即为翻转输出, 初始化设置了通道的脉冲数为  $T_p$  (即 500), 在起动定时器运行后, 定时器从 0 开始计数, 到达  $T_p$  (即 500) 值时就会产生中断, 可以翻转 PUL 通道引脚, 并且执行 DelayCal 函数, 在函数内, 读取当前定时器计数值保存在变量  $c$  (此时该值为 500), 并设置新的比较值为  $c + T_p$  (即  $500 + 500 = 1000$ )。然后, 定时器继续计数, 计数值到 1000 时, 又产生中断, 翻转 PUL 通道引脚, 并把比较值设置为  $1500 (1000 + T_p)$ , 如此循环执行, 最终的效果也就在定时器通道引脚输出持续的脉冲信号。因为一个完整的脉冲周期, PUL 引脚通道电平需要翻转 2 次, 所以一个完整的脉冲信号为  $2 \times T_p$ , 即改变  $T_p$  值便可以改变脉冲信号频率。

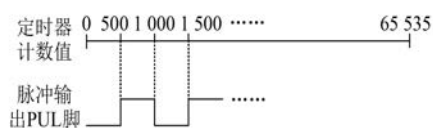


图 4 PUL 引脚脉冲产生原理图

### 2.3.2 步进电机运动控制

步进电机旋转一圈需要 200 个脉冲, 步距角

为  $1.8^\circ$ 。为了提高步进电机的步距精度, 将驱动器的细分数调为 16 细分, 即步进电机步距角变小, 此时旋转一圈  $M_S$  需要 3200 个脉冲。

通过速度环的输出值  $V_E$ , 可以计算出步进电机的频率:

$$M_F = V_E \cdot \frac{M_S}{E_S} \quad (11)$$

如果  $M_F$  为 0, 关闭电机的使能信号, 电机停止运行。如果  $M_{dir}$  为 CCW, 步进电机将开始反转; 反之为 CW, 电机开始正转。

定时器 TIM1 的系统时钟为 72 MHz, 这里进行 4 分频处理, 驱动电机 TIM1 的实际时钟频率  $T_F$  为 18 MHz, 那么每 20 ms 采样 TIM1 的时钟频率为

$$F_U = \frac{T_F}{50} \quad (12)$$

则 TIM1 每个脉冲的计数值为

$$S_D = \frac{F_U}{M_F} \quad (13)$$

根据输出脉冲产生原理, 一个完整脉冲需要翻转 PUL 引脚电平 2 次, 那么 PUL 通道脉冲的设定值为

$$T_P = \frac{S_D}{2} \quad (14)$$

最终通过改变  $T_p$  的大小, 来调整脉宽的大小, 从而改变步进旋转的快慢。

## 2.4 PID 控制流程图

图 5 所示为吸盘机械手在运动过程中, 整个 PID 位置速度双闭环的调整流程图。其中, 每 20 ms 对编码器的值进行一次采样, 每 1 s 把机械手的实际位置  $D_c$  和实际速度  $V_c$  的值发送到上位机。

## 3 试验测试验证

实际测试过程, 所给的位置目标值和速度目标值分别为吸盘机械手需要运动到的位置和所达到最高平稳速度。测量设定机械手位置的目标值为 300 mm, 机械手运行的最高速度为 20 mm/s。

### 3.1 吸盘机械手位置环的测试

位置环的输出作为速度环的输入, 因此先调位置环, 然后再调速度环。首先把速度环设为纯比例调节 ( $P_v = 0.1$ ), 然后来调节位置环, 位置环

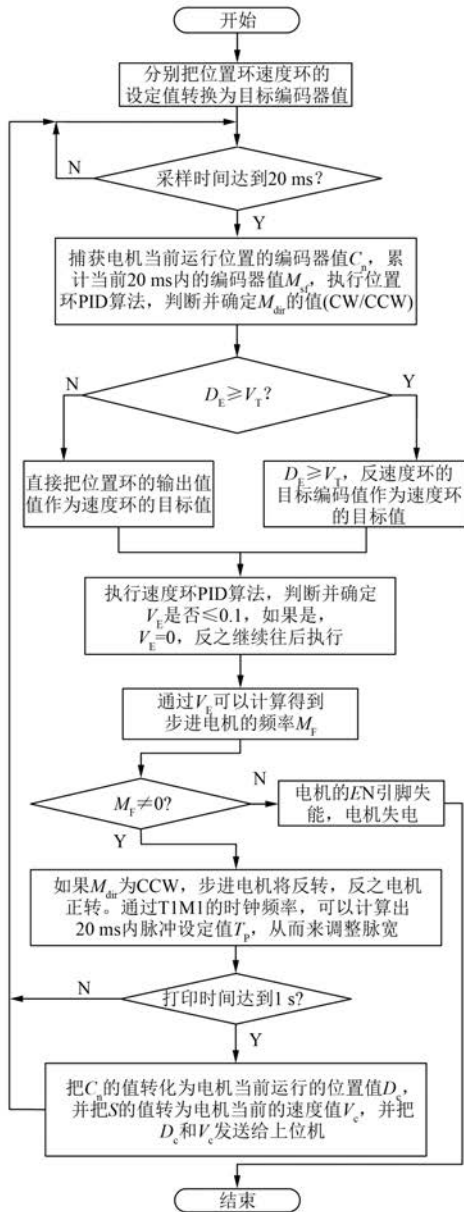


图5 PID调整流程图

的初始比例  $P_u = 0.001$ 。  $P$  的值逐渐增大, 位置环经过反复  $P$  调节, 取其中 3 组代表性的数据绘制, 如图 6 所示。

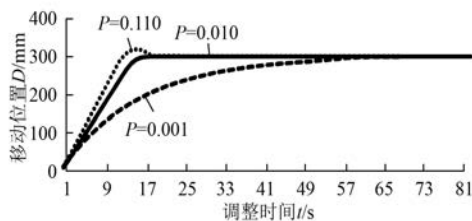


图6 位置环比例调节

从图 6 可知, 当  $P_u = 0.001$  时, 吸盘机械手到达目标位置的调整时间比较长; 当  $P_u = 0.010$  时, 机械手运行到目标位置的调整过程较为理想;  $P_u$  继续增大, 当  $P_u = 0.110$  时, 电机会越过目标位置 300 mm, 然后开始往回走到目标位置。从实际的调节结果分析可知, 电机的位置环调节使用纯  $P$  调节即可达到目标位置。

### 3.2 吸盘机械手速度环的测试

调节速度环之前, 固定位置环纯比例调节 ( $P_u = 0.01$ ), 然后调节速度环, 用同样的方法逐渐调整  $P_v$  的系数, 取其中 3 组代表性的数据绘制曲线, 如图 7 所示。

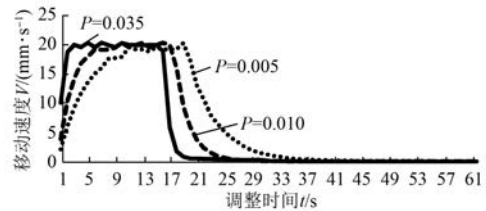


图7 速度环比例调节

从图 7 可以看出,  $P_v$  越大, 吸盘机械手运行到目标速度的调整时间越短。从实际测量的数据发现  $P_v$  取 0.035 时, 机械手可以较快达到目标速度 20 mm/s。由图 7 还可以知道, 机械手达到目标速度却不能稳定, 存在稳态误差。为了消除稳态误差, 需要引入积分调节。固定速度环比例参数  $P_v$  为 0.035, 调节积分参数  $I_v$  (起始参数为 0.001), 反复调整  $I_v$ , 当  $I_v$  取到 0.005 时, 采集数据绘制曲线如图 8 所示。

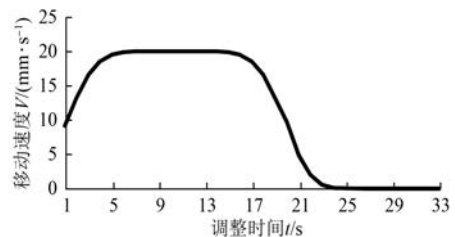


图8 速度环比例积分调节

对比图 7、图 8 可知, 积分参数  $I_v$  的引入, 基本速度环的稳态误差可以完全消除, 吸盘机械手在此之后并在减速之前一直以 20 mm/s 的速度来匀速运行。因此, 速度环使用 PI 调节可以使吸盘机械手快速稳定到目标速度。

### 3.3 吸盘机械手 PID 双环验证

为了清晰了解吸盘机械手整个运行调节过程中的情况,取一套整定稳定的电机双闭环调节的数据,以机械手运行过程中的位置数据作为横轴,速度数据作为纵轴,绘制位置-速度曲线,如图9所示。

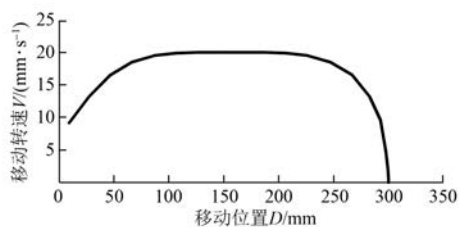


图9 吸盘机械手位置-速度曲线

从图9可以得出,机械手刚运动有一个起动速度  $9.16 \text{ mm/s}$ ,在  $100 \text{ mm}$  之前,机械手基本上可以稳定在  $20 \text{ mm/s}$ ;在  $200 \text{ mm}$  之后,机械手开始减速;最终在  $300 \text{ mm}$  处,其速度逐渐减到0。

## 4 结 语

本文结合实际研发项目,设计并制作了基于PID双闭环的吸盘机械手位置控制系统。首先,介绍了吸盘机械手系统的总体结构;然后,在软件方面介绍了吸盘机械手位置速度的确定、PID双闭环算法以及步进电机驱动器脉冲产生的方式;最后,分别对位置环和速度环进行整定调节。测试结果表明,吸盘机械手能在快速、稳定而且准确

的情况下最终达到目标位置。该套系统设计已经运用于实际开发的项目,还可以运用到更多的控制领域。

### 【参考文献】

- [1] 张玉华.一种玻璃板装卸机械手的真空系统设计[J].福建农机,2019(3): 31.
- [2] 徐佳伟,王收军,葛为民,等.吸盘机械手机构设计与运动学分析[J].制造业自动化,2017,39(11): 145.
- [3] 周明安,朱光忠,宋晓华.步进电机驱动技术发展及现状[J].机电工程技术,2005,34(2): 16.
- [4] 佟远,张莎.基于PID双闭环的旋转倒立摆控制系统[J].测控技术,2016,35(8): 85.
- [5] 刘满禄,韩帅,张俊俊,等.基于两轮自平衡小车的  $H_{\infty}$  和 LQR 控制方法对比研究[J].机械设计与制造,2019(5): 245.
- [6] 刘峰.基于模糊控制的单极旋转倒立摆系统设计[J].科技创新导报,2014,11(4): 83.
- [7] 侯涛,牛宏侠,董海鹰.单极倒立摆复合控制设计与实现[J].微计算机信息,2007,23(1): 80.
- [8] XU R, OZGUNER U. Sliding mode control of a class of under actuated system[J]. Automatica, 2008, 44(1): 233.
- [9] ASHRAFIUON H, ERWIN R S. Sliding mode control of under actuated multibody systems and its application to shape change control[J]. International Journal of Control, 2008, 81(12): 1849.
- [4] 谢之光,侯世英,唐治德,等.NPC三电平逆变器最优虚拟电压矢量控制[J].电力系统自动化,2017,41(18): 95.
- [5] 张晓华,葛兴来.基于SHEPWM的三电平NPC逆变器中点电位平衡控制算法[J].电力系统自动化,2017,41(16): 144.
- [6] 高巧玲.兆瓦级高压电励磁同步电机无速度传感器矢量控制应用研究[J].电子测量技术,2018,41(10): 97.
- [7] 胡志涛,李兴鹤.级联型高压变频器输出电压观测器研究与实现[J].电源学报,2016,14(5): 137.
- [8] 谢战洪,李海霞,王笑非,等.级联H桥型高压变频器中脉冲编解码技术研究[J].电气传动,2015,45(2): 3.
- [9] 刘计龙,肖飞,麦志勤,等.IF控制结合滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器复合控制策略[J].电工技术学报,2018,33(4): 919.
- [10] 马大俊,胡存刚,王群京,等.三电平ANPC逆变器中点电压平衡的VSVPWM控制策略[J].电气传动,2017,47(9): 29.
- [11] 肖烨然,刘刚,宋欣达,等.基于改进滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器L/F起动方法[J].电力自动化设备,2015,35(8): 95.

(上接第48页)