

基于滑模控制的地铁塞拉门电机控制系统设计

张晨¹, 陈辉², 梁昕¹

(1. 南京机电职业技术学院, 江苏 南京 211306;

2. 今创集团有限公司, 江苏 常州 213011)

摘要: 针对城市地铁塞拉门无刷电机控制系统应用, 提出一种基于普通传感器+滑模控制器(sliding mode controller, SMC)的控制方法。所提出的方法改进了传统矢量控制方法中获取电机转子角度信号再对电机相电流解算不能满足实际需求的问题, 也无需选用高精度传感器从而带来成本高的问题。所提方法首先是利用普通霍尔传感器精确测量出实时的信号; 其次再结合SMC方法对电流电压数据计算进行处理。最后对所提出的控制方法进行仿真实验。通过实验表明, 该控制方法使电机的速度超调量明显降低, 有效提升了电机的转速响应速度。

关键词: 地铁塞拉门; 无刷电机; 霍尔传感器; 滑模控制算法

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)04-0011-05

System Design of the Motor Control for a Subway Plug Door Based on Sliding-mode Control

ZHANG Chen¹, CHEN Hui², LIANG Xin¹

(1. Nanjing Vocational Institute of Mechatronic Technology, Nanjing 211306 China;

2. KTK Group Co., Ltd., Changzhou 213011 China)

Abstract: A control method based on common sensor + sliding mode controller (SMC) is proposed for the application of brushless motor control system of urban subway plug door. The proposed method improves the problem that the traditional vector control method needs to accurately detect the imprecise motor rotor angle signal in the settlement of the motor phase current, and also does not need to select high precision sensors thus bringing the problem of high cost. This method firstly uses a common Hall sensor to accurately measure the signal in real time, secondly, it then combines the SMC method to process the current and voltage data calculation. Finally, the proposed control method is simulated and the simulation results show that the proposed method is effective for motor speed response and speed overshoot amount.

Keywords: subway plug door; brushless motor; hall sensor; sliding mode control algorithm

0 引言

国内塞拉门技术已经过近30年的发展历程, 这一过程中, 塞拉门经历了技术革新、性能提升和故障率的降低, 成为了现代地铁车辆的重要组成部分。近年来, 地铁因便利快捷性令其受到人们认可, 加上国内各大城市纷纷加速对地铁项目的建设, 使得地铁的迅猛发展间接促使塞拉门控制技术迎来新的变革。同时随着地铁运行速度的加快, 地铁车辆的关键部件——车门, 在密封性和安全性等方面的标准也随之提升。

塞拉门系统由两大关键要素构成: 机械门体结构与先进的控制系统。作为连接车厢内外的重要通道, 塞拉门的控制系统扮演着至关重要的角色。一旦该控制系统

出现故障, 将直接导致乘客无法正常进出, 进而造成车站拥堵, 严重影响地铁车辆的准时发车, 甚至可能扰乱整个轨道交通系统的运行安排。鉴于此, 确保塞拉门控制系统的稳定运行显得尤为重要。它不仅关乎乘客的出行体验, 更是地铁运营效率与线路顺畅运行的坚实保障。因此, 我们必须高度重视塞拉门控制系统的稳定性, 以确保地铁车辆的安全、高效运行^[1]。

当前, 在常规的地铁塞拉门电机驱动系统中, 无刷直流电机被普遍采纳为核心组件。其控制策略通常涵盖两种主要途径: 一是基于六步换相技术的直接控制, 该方式通过精确调控电机相电流的切换顺序, 实现电机的平稳转动但是缺点是控制转矩脉动偏大; 二是运用矢量控制策略, 该策略需要深入电机内部电磁关系的调控, 通过精确解析并控制电机定子电流的大小和方向, 进而达到对电机转矩和速度的精细调节^[2-4], 但依据六个转子位置信

*基金项目: 江苏省青蓝工程项目 (KY202209)

收稿日期: 2023-11-24

号还远不够达到实现控制需求,同时单单选用高精密的传感器势必也会大大提升成本的可能。这两种方法各有侧重,在一定程度上不能同时满足电机运行的高效性,也达不到地铁门系统对于稳定性和安全性的严格要求。因此,对于此问题,本文提出一种基于霍尔传感器联合和滑模控制算法相结合的混合控制方法。第一步,先利用霍尔传感器精确测量出实时的霍尔信号;第二步,再结合SMC算法处理采集的电压电流数据并估算出转子角度;第三步,对数据进行校正处理。最后对所提出的控制方法进行仿真实验,该方法明显控制了电机的速度超调量,同时对转速响应也有效提升。

1 转子位置检测估算设计

一般在城市地铁塞拉门系统中,大多选择无刷直流电机,通常驱动电机内含精度不高的普通霍尔传感器。霍尔传感器一般是根据不同位置变化从而得到变化的电压信号^[5-6],这样就可以实现控制电机目的。

在本设计中,塞拉门驱动电机内含的霍尔元件之间的间隔电角度均为120°。在无刷电机实际旋转工作中,霍尔元件遵循每更改一次状态的间隔角度为60°,在一个周期360°内并且状态会跳变6次,因此利用传感器可以得到6次较精准的转子位置信号,霍尔元件输出波形如图1所示。

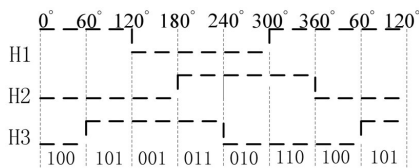


图1 霍尔元件输出波形

2 无刷直流电机模型建模

为便于分析本文中的无刷直流电机(BLDC)数学模型,在进行模型建立之前,我们预设了一系列前提条件^[7-11],以便更高效地推进研究。文中以两相导通、星形连接的三相六状态运行为例:

建模假设条件:

- (1) 无刷直流电机定子满足结构三相对称
- (2) 电机绕组Ke为正弦波,气隙磁场为梯形波
- (3) 电机涡流损耗忽略影响

根据文献[12]-文献[14],本文选择如下电机控制模型:

$$\dot{i} = -\frac{Ke}{L}w - \frac{R}{L}i + \frac{U}{L} \quad (1)$$

$$\dot{w} = -\frac{f}{J}w + \frac{K_T}{J}i - \frac{T_L}{J} \quad (2)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = K_T i \quad (3)$$

电机模型机械运动方程:

$$T_e - T_L - f = J \frac{dw}{dt} \quad (4)$$

上述公式中其他具体参数见详表2。

表2 模型参数表示

参数	含义	参数	含义
U	定子电压	K _e	反电动势
R	电阻	w	机械角速度
L	电感	J	转动惯量
i	电流	f	阻尼系数
T _e	电磁转矩	T _L	负载转矩
K _T	转矩常数		

根据上文中的电机控制模型,定义一个旋转速度误差变量x,则得到x=w*-w;式中w表示实际转速,预定旋转速度用w*表示,再令u=i,则得到误差微分方程如下:

$$\dot{x} = -\dot{x} = \frac{f}{J}w - \frac{K_T}{J}i + \frac{T_L}{J} \quad (5)$$

对公式(5)进一步化简:

$$\dot{x} = -\frac{f}{J}x - \frac{K_T}{J}u + \frac{T_L}{J} + \frac{f}{J}w^* \quad (6)$$

设A=-f/J, B=K_T/J, D=T_L/J + f/J w*,则对公式(6)继续化简得到如下方程为:

$$\dot{x} = Ax - Bu + D \quad (7)$$

3 滑模控制器设计

在设计滑模控制器时,我们一般会着重考虑两个核心组成部分:切换函数S(x)与滑模控制律u±(x)^[15]。切换函数的设计对于系统状态的监控和切换时机的把握至关重要,它决定了控制策略如何根据系统当前状态进行动态调整。而滑模控制律则是实现控制目标的关键,它依据切换函数的输出,通过一系列算法计算出控制输入,以驱动系统状态沿着预定的滑模面运动。这两部分相互作用,共同确保了滑模控制器在面对各种不确定性和扰动时,仍能保持优异的鲁棒性和控制性能。

在搭建电机控制系统的过程中,电机模型方程式均呈现为一阶微分方程的形式。为了进一步提升滑模控制器的精准度和响应性,我们在设计切换函数时,特别考虑了参考速度与实际速度之间可能存在的累积偏差。为实现这一修正,在切换函数中引入了一个积分项,如下公式:

$$s(x) = m \int_0^t x(\tau) d\tau + x \quad (8)$$

式中,m>0,且m的增大影响控制器的响应速度变大;能够有效地对速度偏差进行积分处理,从而更全面地反映系统的动态特性,但必须在适当范围内进行参数值控制,

否则过大的值会导致滑模系统出现抖动。

为了在系统有效运行期间保持其处于滑模面上,采用以下控制律对滑模控制器进行设计:

$$u = u_{eq} + u_d \quad (9)$$

上式控制律包含两个部分中,分别为等效部分为 u_{eq} , 切换部分为 u_d ; 同时令式(8)为0, 则得到:

$$u_{eq} = \frac{(A+m)}{B}x \quad (10)$$

由于系统控制器易受到干扰等外部因素的影响,使其鲁棒性能会受到影响。为了应对这一问题,在前文所述的控制策略中加入了切换机制,可以起到减少干扰因素对控制器的稳态影响。此外,在设计控制器时,引入了趋近律的控制,便于控制系统在进行运动时能够更好地实现趋向滑模面。在趋向滑模面的运动过程中容易出现抖振现象,则要求运动过程相对平稳;因此为实现这一效果,在设计趋近律时可考虑选择指数趋近律。综上所述,在控制函数中加入指数趋近律作为优化方案。

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - ks, k > 0, \varepsilon > 0 \quad (11)$$

上式中:指数趋近项为主要控制趋近速度的参数项,表示为 $-ks$;当该控制项中的某一参数增大时,趋近速度会相应加快,系统到滑模面的时间大大缩短。为了确保控制过程能尽快到达滑模面,同时沿着滑模面滑动进入稳态,为了进一步优化控制效果,采用等速趋近率 $\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s)$ 作为控制策略的核心部分,但由于等速趋近项中的符号函数其不连续的开关特性会引起抖动问题,将使用饱和函数替代符号函数饱和函数的引入不仅能够有效平滑控制信号,减少抖动现象,还能在保持控制精度的同时,提升系统的稳定性和鲁棒性,从而更好地满足实际工程应用的需求。

$$\text{sat}(s, \Delta) = \begin{cases} \text{sign}(s) & |s| > \Delta \\ \text{sign}(\lambda s) & |s| \leq \Delta \end{cases} \quad \lambda = \frac{\pi}{2\Delta} \quad (12)$$

上式中, Δ 是一个正常数,用来表示滑模边界层。

在该控制系统中,为了确保运动路径的稳定性和准确性,采用一种称为准滑模控制的方法。该方法的核心在于,将系统的运动轨迹严格限制在理想滑动模态的一个紧密邻近区域内。这个特定的邻近范围,实质上定义了一个围绕滑动模态切换面的边界层^[4],它作为控制系统的一个重要参数,对于保证系统状态在受到外部扰动时仍能迅速回归并保持在预定轨迹上,同时对滑模控制方法引起的抖振现象也能有效降低。

则进一步得到控制器:

$$u = u_{eq} + u_d = \frac{A+m}{B}x - \varepsilon \cdot \text{sat}(s, \Delta) - ks \quad (13)$$

4 稳定性分析

为确保塞拉门电机系统的控制器设计既适用又高效,且验证滑模控制器的存在性与到达性至关重要。这一过程不仅证实了控制器的稳定性,还进一步保证了其在实际运行中的可靠性。依据相关定理,当满足 $\dot{v} = 0$ 条件时,系统滑模运动点能够满足在有限时间内从状态空间的任意起始位置抵达切换面 $S=0$ 。

为了验证滑模控制器的有效性与稳定性,选定了一个 Lyapunov 函数 $v = 1/2s^2$ 进行验证,该函数需具备特定的性质以确保分析的准确性。同时,为确保系统控制器能够持续稳定运行,还需进一步满足以下列出的条件:

$$\dot{v} = s\dot{s} < 0 \quad (14)$$

根据式(11),式(14)可以改写为:

$$\dot{v} = s\dot{s} = s(-\varepsilon \text{sign}(s) - ks) = -s\varepsilon \cdot \text{sat}(s, \Delta) - ks^2 \quad (15)$$

根据饱和函数特性,有如下分析:

(1) 当 $|s| \leq \Delta$ 时,需要讨论 $0 \leq s \leq \Delta$ 和 $-\Delta \leq s < 0$ 两种条件下的情况:

首先当 $-\Delta \leq s < 0$ 时,根据公式(12)和公式(15)得到 $s < 0, \text{sat}(s, \Delta) < 0$ 则得到: $s \cdot \text{sat}(s, \Delta) > 0$, 从而得到 $\dot{v} < 0$ 。

当 $0 \leq s \leq \Delta$ 时,根据上述公式(12)和公式(15)得到, $s \cdot \text{sat}(s, \Delta) \geq 0$, 因此得到 $\dot{v} < 0$ 。

(2) 当 $|s| > \Delta$, 可以将公式(15)简化为 $\dot{v} = -\varepsilon \cdot |s| - ks^2$, 根据条件, ε 是正常数, k 也为正常数,则可以推导 $-\varepsilon \cdot |s| - ks^2 < 0$, 即 $\dot{v} < 0$ 。

因此,分析结果可证明设计的控制器系统满足 Lyapunov 稳定性要求。

5 仿真分析及结论

地铁塞拉门中电机控制原理示意图如图2所示。

上述控制系统将选用三种控制方法验证其效果,分别为普通滑模控制(方法1)、指数积分滑模控制(方法2)以及用饱和函数代替的指数积分滑模(方法3);同时在仿真中所选用的驱动地铁塞拉门的电机模型参数如下: U_n 为 110 V; 电机内部的极对数 $P=5$; 电机的定子电阻 $R=2.52 \Omega$; 转动惯量 $J=0.0015 \text{ kg/m}^2$; 定子电感 $L=2 \text{ mH}$, 摩擦系数 $f=0.0001 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$; 额定工作电流小于等于 1.5 A。

图3、图4为三种控制方法下的仿真转速响应波形对比。其中,图3波形反映了恒定负载和恒定转速分别为 3 Nm 和 300 rad/s 情况下的波形比较。根据仿真结果显示,采用方法1需要较长的时间才能到达稳定状态,且速度超调量有 2.6% 左右,并且在负载启动阶段以及过程中都伴有显著的抖振现象;相比之下,方法2的速度超调量较小,仅约为 1%, 优于方法1,且到达稳定时间也短于方法1;方法1和方法2中抖振现象都较明显。在方法3中可

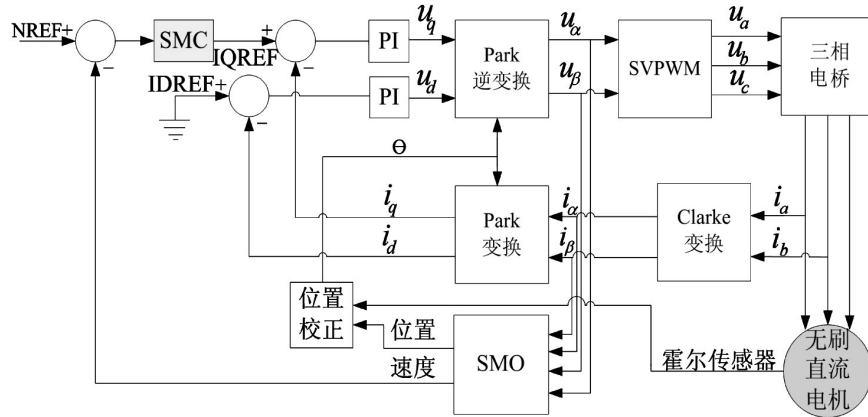


图2 塞拉门滑模控制 Simulink 示意图

以清楚看出速度超调基本没有,抖振现象也减低到最小,至稳定的时间也最少。图4中当负载恒定时,三种方法的起始速度从0.01 s时 300 rad/s 递增到 313 rad/s 的转速响应波形对比。当速度增加到 313 rad/s 时,方法1的速度超调量大约在 1.6%,方法2为 1%,方法3也基本无超调量,可以很好地实现速度跟踪效果。

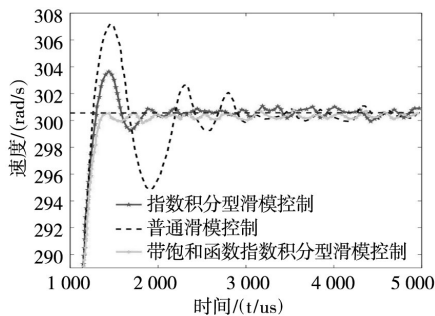


图3 恒定负载&恒定速仿真图

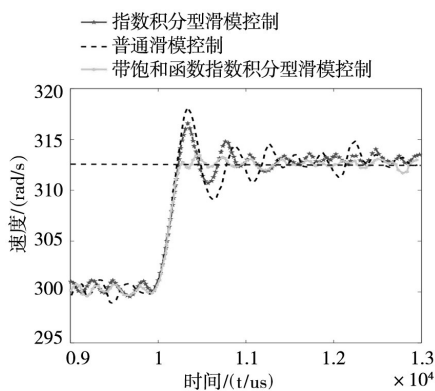


图4 恒定负载变速仿真图

6 实验结果分析

依据前面理论分析的仿真结果,将对塞拉门控制系统进行相关测试,系统测试实验平台如图5所示,验证门控系统电机驱动功能调试。

本实验中所测试的塞拉门型号为E32,门控系统控制

器中采用三相全桥控制电路,采用示波器检测塞拉门正常运行时的电机电压、电流波形,如图6、图7所示。



图5 系统测试实验平台

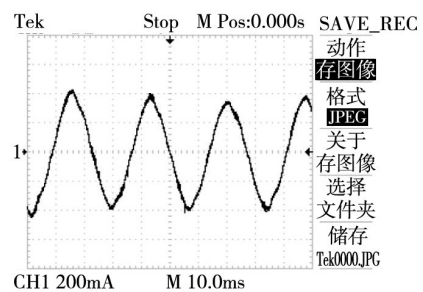


图6 电机相电流波形

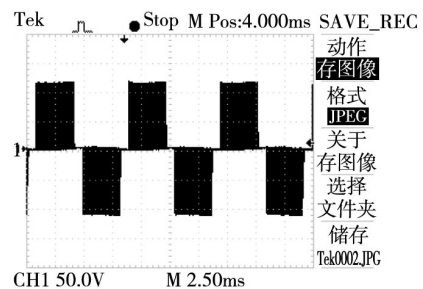


图7 电机相电压波形

由于试验系统中电机为星形连接方式,因此本实验系统利用测量三相输出端口信号代替直接测量电机内部中性点;所测试相电流波形图6所示,波形图中测得电流值在0.8 A左右,小于额定电流,并且从波形图中可看出电流曲线平滑,无明显毛刺,说明正弦性较好,电机运行平

(下转第 163 页)