

基于负载转矩观测的矿用牵引电机积分滑模控制*

韩天亮¹, 缪仲翠^{1,2}, 党建武¹, 余现飞¹, 张文宾¹

(1. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为了改善电机牵引电机速度控制性能, 提高系统抗扰性能和对参数变化的鲁棒性, 提出了在控制系统的速度控制器中用积分滑模代替传统 PI 控制。设计了负载转矩观测器对负载转矩实时观测, 将观测值加入到控制中, 提高了在负载突变时的速度控制能力。仿真表明, 负载转矩观测器能快速、准确地观测负载转矩, 带负载观测的滑模转速控制对负载扰动和转子电阻有较强的鲁棒性, 有效地抑制了滑模控制的固有抖振。

关键词: 矿用机车; 积分滑模面; 负载转矩观测器

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)04-0001-07

Based on Load Observation Integral Sliding Mode Control of Mine Traction Motor*

HAN Tianliang¹, MIAO Zhongcui^{1,2}, DANG Jianwu¹, YU Xianfei¹, ZHANG Wenbin¹

(1. Department of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control Ministry Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to improved the speed control performance of the tractor motor and system's anti-disturbance as well as the robustness to the parameter change, the PI control strategy of the control system was replaced by the integral sliding mode control strategy. Aiming at load changes in the running process of the electric locomotive, the load torque observer was designed to observe the load torque in real-time, the observed value was integrated into the control strategy and improved the speed of the load mutation control. It could also improve the dynamic and static characteristics of traction motor. Simulation experiments showed that the load observer could quickly and accurately follow the load changes. The sliding mode speed controller with load observation kept the locomotive speed stable when the working conditions were complex, and the dynamic and static performances of the locomotive and the anti-jamming performance were improved.

Key words: mine electric locomotive; integral sliding surface; load observer

0 引言

矿用机车(简称电机车)是矿山地面与井下巷道重要运输工具之一, 发展已有一百多年历史, 在我国也有 50 多年发展史。电机车牵引主要经历了直流串励电机串电阻、直流串励电机斩波调速和交流异步变频调速 3 个阶段^[1]。交流异步

电机具有结构简单、运行可靠、适应恶劣环境等优点, 交流异步电机作为牵引设备在逐渐取代直流牵引电机^[2-3]。电机车工作环境恶劣、工况复杂, 不仅处于频繁起停、制动、加速等状态, 还要适应上下坡、颠簸等路况, 这就要求电机车应具有起动转矩大、过载能力强等牵引特性^[4]。

尽管电机车速度控制常选用 PI 控制, 但异步

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61461023); 甘肃省教育厅项目(2016B-036)

作者简介: 韩天亮(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

缪仲翠(1971—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电机控制。

电动机本身是一个强耦合、高阶、非线性和多输入多输出的被控对象,当系统受到干扰时常规 PI 控制并不能满足高性能的控制要求^[5-6]。随着电力电子技术及微处理器的发展,现代控制理论逐步应用到了电机控制领域,如模糊控制^[7-8]、神经网络控制^[9-10]、模型预测控制方法及其改进^[11]、滑模变结构控制^[12-13]等。滑模变结构控制(Sliding Mode Control, SMC)与常规控制策略的根本区别在于控制的不连续性,即具有一种使系统“结构”随时间变化的开关特性。正是这种开关特性使系统具有较好的鲁棒性,对控制对象的数学模型精度要求不高,对参数摄动和外部扰动具有强鲁棒性等优点,日益成为电机控制领域的研究热点^[12]。文献[13]用滑模控制对六相感应电机进行了控制。文献[14]设计了非奇异快速终端滑模控制作为永磁同步电机的速度控制器。文献[15]对滑模指数趋近律进行了改进,有效抑制了永磁同步电机控制系统的抖振,提高了系统的动、静态特性。同时学者们将 SMC 和其他先进控制结合并取得了较好的效果,文献[16]将神经网络与 SMC 相结合应用到了高超声速飞行器控制,对执行机构的参数进行简化的同时提高了系统的鲁棒性。文献[17]将模糊控制与 SMC 相结合对导弹制导进行了控制,有效地克服了滑模抖振的同时降低了打击时间。

SMC 也应用于电机车的控制中,文献[18]将 SMC 直接转矩控制系统应用于电机车控制,利用滑模变结构控制克服了直接转矩控制起动转矩脉动大的缺点,使其满足电机车起动转矩大、转矩响应速度快和调速平滑的实际生产要求。

尽管 SMC 取得了较好的研究成果,但是 SMC 的强抗扰性是通过增大切换增益来实现的,而滑模切换增益的增大会增强滑模固有抖振现象,降低系统控制性能^[19]。电机车工作环境恶劣,负载变化频繁,带载重,常在 5‰坡道上停车、起动,因此电机车在实际运行中会有较严重的负载干扰。在电机车实际运行中,负载转矩的突变是影响电机车运行性能的关键因素之一,且负载转矩通常不易测量。在 SMC 中,为了解决抖振与抗扰性能相矛盾的问题,可以通过对扰动观测等方法进行补偿以减小滑模增益幅值,提高 SMC 控制系统抗扰

性能的同时削弱抖振现象^[11]。文献[20]设计 Kalman 滤波器对负载转矩进行观测,提高了系统的抗负载干扰能力。文献[21]针对永磁同步电机负载扰动问题,提出 Luenberger 状态观测器,对负载转矩进行前馈补偿。

本文针对电机车牵引特性和实际运行环境特点,提出用积分 SMC 作为速度控制器以提高电机车牵引电机的静、动态性能。根据电机车的实际运行环境设计了负载转矩观测器对牵引电机的负载转矩进行了实时在线观测,并将负载转矩观测值加入到 SMC 控制中,设计了一个基于负载扰动观测和控制的积分型 SMC 控制系统,以提高和改善电机车牵引性能,并通过仿真验证了其有效性。

1 牵引电机数学模型

电机车的牵引电机为三相异步电动机。为了简化电机模型,作如下假设:(1)电动机的磁动势沿气隙圆周正弦分布;(2)忽略磁路饱和,各绕组的自感和互感都恒定;(3)忽略铁损的影响。在按转子磁链定向的同步旋转坐标系(mt 坐标系)中建立牵引电机的数学模型^[22]。

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{p^2 L_m}{J L_r} i_{st} \psi_r - \frac{p}{J} T_L \\ \frac{d\psi_r}{dt} = -\frac{1}{T_r} \psi_r - \frac{L_m}{T_r} i_{sm} \\ \frac{di_{sm}}{dt} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \psi_r - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} i_{sm} + \omega_1 i_{st} + \frac{u_{sm}}{\sigma L_s} \\ \frac{di_{st}}{dt} = -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega \psi_r - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} i_{st} - \omega_1 i_{sm} + \frac{u_{st}}{\sigma L_s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω ——转子角速度;

p ——电机极对数;

L_m ——定子、转子互感;

J ——电机的转动惯量;

L_r, R_r ——转子电感、转子电阻;

i_{sm}, i_{st} ——定子电流励磁分量和转矩分量;

ψ_r ——转子磁链;

T_L ——负载转矩;

T_r ——转子电磁时间常数, $T_r = L_r / R_r$;

σ ——漏磁系数, $\sigma = 1 - L_m^2 / L_s L_r$;

ω_1 ——同步角速度。

牵引电机的运动方程:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J}(T_e - T_L) \quad (2)$$

式中: T_e ——电机的电磁转矩。

在按转子磁链定性的同步旋转正交坐标系中,由于 m 轴和转子磁链矢量重合,则:

$$\begin{aligned} \psi_{rm} &= \psi_r \\ \psi_{rt} &= 0 \end{aligned}$$

为了保证 m 轴和转子磁链矢量重合,必须使:

$$\frac{d\psi_{rt}}{dt} = 0$$

则在 mt 坐标系中的电磁转矩方程:

$$T_e = p \frac{L_m}{L_r} i_{st} |\psi_r| \quad (3)$$

$$|\psi_r| = \frac{L_m}{T_e p + 1} i_{sm} \quad (4)$$

2 牵引电机负载观测器设计

2.1 负载特性

矿用牵引机车运行工况复杂,运行环境恶劣,相对于干线牵引机车,矿用牵引电机车负载变化更加频繁,同时运行轨道条件差。矿用牵引电机车的负载主要分为基本阻力负载和附加阻力负载。基本阻力负载主要是零部件之间、机车动轮与轨道钢轨之间的摩擦和冲击力等产生的。附加阻力负载包括坡道阻力负载、弯道阻力负载和机车起动时的附加阻力负载^[22-24]。

由于电机车本身结构简单,机车运行过程中的频繁起停、加减速等都容易引起机械部件的碰撞,这种碰撞相当于基本阻力负载突然增大。除此之外,电机车的运行轨道常有 5% 的坡道,当机车在坡道上运行时,将会受到机车重力沿轨道方向的分力影响,即坡道阻力,如图 1 所示^[25]。根据牛顿力学,在坡道上将机车重力分解成与轨道垂直的力 N 和轨道坡度平行的力 F ,此时力 F 就是坡道的附加阻力负载^[26-27]。

作为电机车牵引电机控制系统的阻力负载与运行环境及条件关系密切,变化复杂,很难精确计算或进行测量,因此本文设计负载转矩观测器进行实时观测。

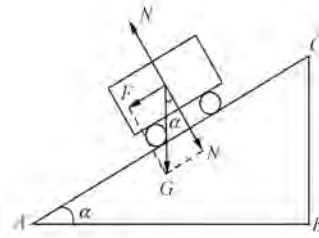


图 1 坡道阻力示意图

2.2 负载转矩观测器设计

针对电机车复杂的负载变化,为了提高电机车牵引电机控制系统的抗负载扰动能力,用降维状态观测器实时观测负载转矩的变化,将观测的负载转矩值反馈给速度调节器,提高在负载变化时的速度控制性能。

负载转矩的变化率在控制周期内可以忽略不计,即 $\dot{T}_L = 0$ 。选牵引电机转速和负载转矩为状态变量,状态方程如式(5)所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (5)$$

其中,状态变量 $x = [\omega \quad T_L]^T$, 输出变量 $y = \omega$, 输入变量 $u = T_e$, 状态方程系数矩阵 A 、 B 、 C 分别为 $A = \begin{bmatrix} 0 & b \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $B = [a \quad 0]^T$, $C = [1 \quad 0]$ 。

将 A 、 B 及 u 代入式(5)可得:

$$\begin{cases} \dot{\omega} = aT_e + bT_L \\ \dot{T}_L = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中: $a = p/J$, $b = -p/J$

本文设计降维观测器来对负载转矩 T_L 进行观测。

根据式(5),以电机转速 ω 和负载转矩 T_L 为观测对象,构造降维观测器方程如式(7)所示:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (6)$$

式中: k_1, k_2 ——观测器观测值;

$$L = [k_1 \quad k_2]^T;$$

k_1, k_2 ——反馈增益。

令观测器的观测误差 e_1, e_2 分别为

$$e_1 = \omega - \hat{\omega}$$

$$e_2 = T_L - \hat{T}_L$$

由式(7)可得观测器的误差方程如式(8)所示,其状态方程如式(9)所示:

$$\dot{e} = x - \dot{\hat{x}} = (A - LC)e \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k_1 & b \\ -k_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据现代控制理论知识可知,矩阵(A-LC)的特征值具有负实部,系统的状态误差将会逐渐趋近于零,反馈增益矩阵L可以通过极点配置确定。

3 速度滑模控制器设计

为了解决滑模控制抗负载干扰和本身抖振的矛盾,本文将设计的负载转矩观测器的负载转矩值实时地加入到速度控制器中,以对抗负载扰动。

3.1 滑模面的设计

为减少系统的稳态误差,在减弱高频信号干扰的同时削弱滑模控制固有的抖振现象。本文采用积分型滑模面:

$$s = x(t) + c \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau \quad (10)$$

其中,c为大于零的常数。c值越大,转速响应就越快。但是过大的c值容易产生过大的超调。

滑模控制器是以转速误差x(t)为输入信号,其表达式如式(11)所示:

$$x(t) = \omega^* - \omega \quad (11)$$

式中:ω*——系统给定转速;

ω——系统实际转速。

在滑模面上,s要在有限的时间内趋近于零,即s=0。将式(11)代入式(10)再对滑模面s求一阶导数ds/dt=0,可得:

$$s = -\dot{\omega} + c(\omega^* - \omega) \quad (12)$$

将式(1)代入式(12)得:

$$s = -\dot{\omega} + c(\omega^* - \omega) = c(\omega^* - \omega) + aT_L + bT_e \quad (13)$$

其中,a=p/J,b=p/J。

3.2 控制律的设计

不同的控制律可以改变滑模趋近运动的动态品质。趋近律有很多种,本文采用指数趋近律,该趋近律可以在改善趋近运动品质的同时保证在有限时间内到达滑模面^[14]。控制律表达式如式(14)所示:

$$s = -\varepsilon \text{sgn}(s) - ks \quad (14)$$

其中:ε>0,k>0,s=-ks 指数趋近项,其解为s=s(0)e^{-kt}。

指数趋近律中趋近速度从一较大的速度逐步减小到零,不仅能够缩短趋近时间而且使运动点到达切换面的速度很小^[14],从而能减小抖振。

结合式(13)、式(14)可得:

$$T_e = \frac{1}{b} [c(\omega^* - \omega) + aT_L + \varepsilon \text{sgn}(s) + ks] \quad (15)$$

为了保证快速趋近滑模面的同时削弱抖振,应该在k增大的同时减小ε。

为了证明控制器的稳定性,选取李雅普诺夫函数:

$$V(s) = \frac{1}{2} s^2$$

由滑动模态的可达性条件可知:

$$s\dot{s} = s(-\varepsilon \text{sgn}(s) - ks) = -\varepsilon \frac{s^2}{|s|} - ks^2 \quad (16)$$

当ε>0,k>0时,ss<0,由李雅普诺夫稳定性理论可知,系统是稳定的。

将负载转矩观测值T_L引入到积分SMC速度控制器中,由式(15)可得:

$$T_e = \frac{1}{b} [cx(t) + a\hat{T}_L + \varepsilon \text{sgn}(s) + ks] \quad (17)$$

式(17)将负载转矩观测值加入到转速SMC控制器中,当负载转矩发生变化时,转速控制器能及时地对负载变化作出响应,减小负载对控制系统的影响。

4 仿真

异步牵引电机矢量控制结构如图2所示,系统采用带转矩内环的转速与磁链双闭环级联控制。转矩ATR及磁链调节器ApsiR分别采用了常规PI控制策略,速度调节器采用本文提出的带负载转矩观测的积分SMC策略。为了验证本文所设计的速度控制器的有效性,将本文控制策略与普通PI控制进行了对比分析。

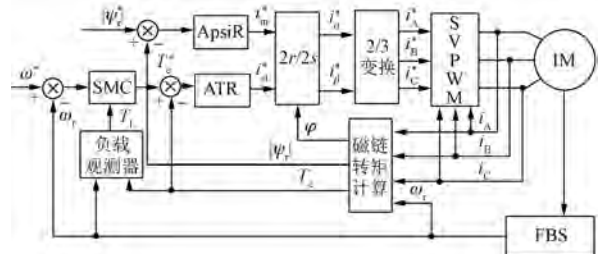


图2 异步牵引电机矢量控制框图

根据图 2 以 MATLAB/Simulink 为平台搭建电机矢量控制系统的仿真模型。仿真过程中异步电机控制系统相关参数如表 1 所示。

表 1 异步牵引电机参数

参数名称	参数值
额定电压/V	380
额定频率/Hz	50
额定转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	1 400
定子电阻 R_s/Ω	0.435
转子电阻 R_r/Ω	0.816
互感 L_m/H	0.069 3
定子自感 L_s/H	0.071
转子自感 L_r/H	0.071
极对数 p	2
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	0.19

4.1 观测器仿真

系统加入负载观测器后,可以对牵引电机的负载转矩变化情况实时观测。设牵引电机稳定运行时带有 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的基本阻力负载,在 0.35 s 时负载突然增加,并在 0.45 s 时负载减小,为了进一步验证牵引电机突加重载(超过额定负载)时负载观测器的性能,在 0.55 s 时模拟机车重载运行加入 $90 \text{ N} \cdot \text{m}$ 负载。图 3 是负载观测器对牵引电机负载转矩变化的观测波形。由图 3 可以看出,负载转矩观测器能准确、实时地观测到负载转矩的变化,即使在超过额定负载时,负载观测器也能准确地对负载变化进行观测。

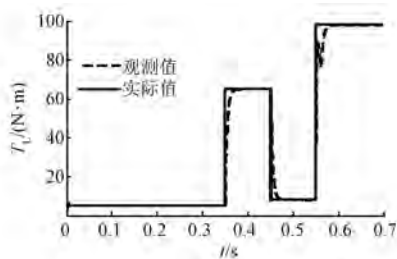


图 3 负载转矩观测值和实际值

在验证了负载转矩观测器的合理性之后,将负载转矩观测值补偿到积分滑模转速控制器,以提高系统控制性能。

4.2 空载变速运行

异步牵引电机在给定转速为 $1\,000 \text{ r/min}$ 时

空载起动,在空载运行时受到基本阻力负载。基本阻力负载随着速度的增大从 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 增大到 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$,在 0.27 s 时电机速度达到给定转速。当运行到 0.4 s 时转速增加至牵引电机额定转速 $1\,400 \text{ r/min}$,牵引电机变速运行时的转速/转矩响应曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,电机起动后电磁转矩降为基本阻力负载 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时,普通 PI 的电磁转矩有较大的波动,这样会增加电机轴的机械磨损,而积分 SMC 转矩平滑无超调。相应地,电机转速上升到给定转速时普通 PI 控制的速度有波动,而积分 SMC 比较平稳。

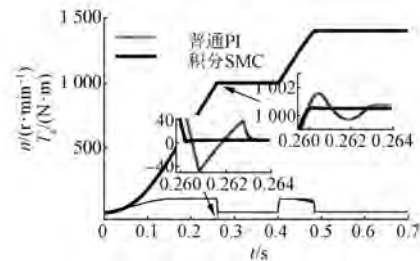


图 4 牵引电机变速运行时的转速/转矩响应曲线

4.3 空载起动突加、减负载

通过突加、减负载模拟电机运行过程中的道路颠簸、基本阻力突然增加时的工况。牵引电机在额定转速运行时突加、减负载时的转速、电磁转矩仿真波形如图 5 所示。在 $t=0 \sim 0.34 \text{ s}$ 为牵引电机起动阶段, 0.34 s 时达到额定转速并开始匀速运行,此时电机转矩降为基本阻力负载转矩 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。在 $t=0.4 \text{ s}$ 时突加负载 $68 \text{ N} \cdot \text{m}$ (包括额定负载与基本阻力负载),转速有所下降之后迅速回升至额定转速附近。在 $t=0.55 \text{ s}$ 时,负载突然减小,电磁转矩迅速减小至基本阻力负载 $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

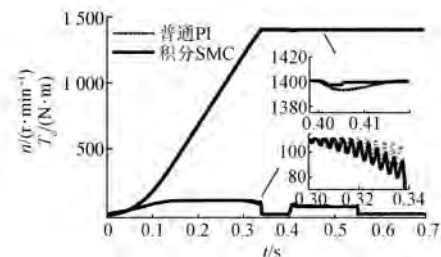


图 5 突加减负载时的转速/转矩响应曲线

从图 5 可以看出,牵引电机突加负载时,积分 SMC 转速动态降落小且迅速恢复至给定值,而普通 PI 控制虽然能够恢复但是恢复时间较长且转

速动态降落值较大。从电磁转矩波形可以看出,控制策略在 0.33 s 时电磁转矩响应波动较小并且响应快。因此,带负载观测器的积分 SMC 策略对负载转矩的突变能及时地调整,较普通 PI 控制有较强的抗负载干扰能力。

4.4 低速重载运行

低速重载运行是电机车在实际运行中常见工况。首先设牵引电机带基本阻力负载 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 低速起动,稳定运行在 $500 \text{ r}/\text{min}$ 。在 0.4 s 突加 1.5 倍的额定负载 $90 \text{ N}\cdot\text{m}$,图 6 为两种控制策略的转速响应和电磁转矩响应曲线。

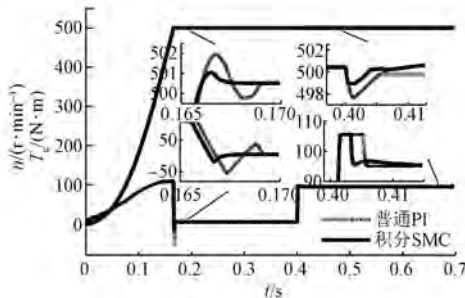


图6 低速重载运行时的转速/转矩响应曲线

从图6可以看出,积分SMC在转速达到给定值时较普通PI控制超调小并且能够快速稳定,电磁转矩迅速降为基本阻力负载并且波动小。在 0.4 s 突加负载时,积分SMC策略转速降落小,电磁转矩响应快。仿真结果表明,牵引电机在低速时突加 1.5 倍额定负载可以实现重载运行,在积分SMC策略下电磁转矩响应迅速,牵引电机转速平稳。

4.5 逐级加速运行

实际运行中,电机车转速控制一般是多挡位控制,起动时把挡位控制手柄由0位推到1挡位,使机车慢慢起动,待全部车辆都起动后,再将控制手柄均匀推到2、3等位置,使机车均匀加速到运行的速度,因此对于牵引电机的转速是逐级增加的。在仿真时,根据不同的时间给定不同的转速来模拟电机车起动并运行,逐级加速的转速/转矩响应曲线如图7所示。速度变化过程中普通PI控制转速存在超调,在达到给定转速时转矩存在脉动,而积分SMC转速平滑,消除了转矩响应的脉动现象。

4.6 重载起动爬坡运行

由于电机车运行地形较复杂,运行轨道一般

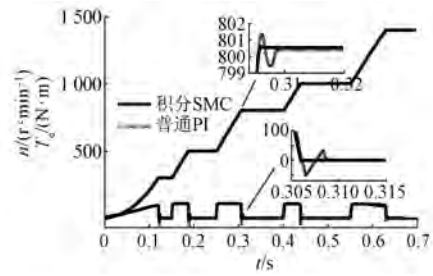


图7 逐级加速的转速/转矩响应曲线

会有坡道,有时电机车会停留在坡道上,这样电机车会有爬坡运行工况。图8为模拟矿用电机车在低速重载爬坡时牵引电机的响应曲线。牵引电机带 1.5 倍额定负载(包括额定负载和附加阻力负载),起动时电机电磁转矩无法克服负载转矩,需要机械刹车装置的配合,否则会倒转,如在 $t=0\sim 0.14 \text{ s}$ 区间由于机械刹车保持在0转速。当电磁转矩克服负载转矩之后,机械刹车装置释放,电机车开始爬坡运行。

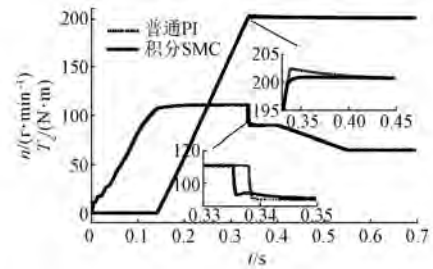


图8 低速重载爬坡运行时的转速/转矩响应曲线

从图8可知, 0.14 s 时电磁转矩克服负载转矩,电动机开始恒转矩升速,当转速达到给定转速 $200 \text{ r}/\text{min}$ 电磁转矩迅速下降至负载转矩,此时电机车开始在坡道匀速运行。电机车在 0.4 s 时到达坡道顶部,装载车辆依次到达,随着装载车辆依次到达坡道顶部,电机车附加阻力负载逐渐减小。在 0.55 s 时,最后一辆装载车运行至坡道顶部,电机车爬坡运行结束并且以恒定转速匀速运行。从图8可以看出,牵引电机在 0.35 s 达到给定转速时,积分SMC策略转速超调小,电磁转矩响应迅速并且快速达到稳定。牵引电机在负载变化时能够平稳运行,转速基本保持不变,转矩能够迅速跟随负载变化。由此验证了带负载观测器的积分SMC策略响应速度快、稳定性好,并具有良好的抗负载干扰性。

4.7 转子电阻变化

牵引电动机运行过程中内部参数(如电阻、

电感)易受工作环境、温度、磁饱和等因素影响而发生变化,当电机参数变化时会影响电机的控制性能。为了验证本文的控制策略对参数变化的鲁棒性,对转子电阻变化对控制系统影响进行了仿真验证。

假设电机转子电阻变化为原来的 2 倍,电机车低速重载与转速逐级增加响应曲线如图 9 和图 10 所示。

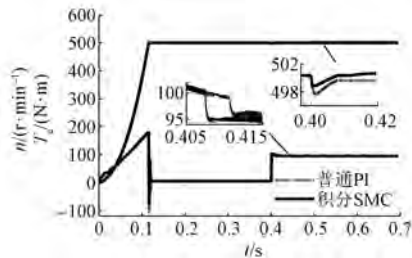


图 9 转子电阻变化时低速重载转速/转矩响应曲线

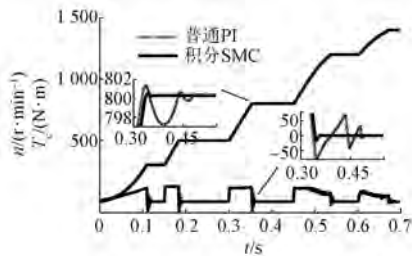


图 10 转子电阻变化时逐级加速转速/转矩响应曲线

图 9 中,在 0.4 s 时突加负载,积分 SMC 较普通 PI 控制策略转速降落小且能够恢复到原来的转速。积分 SMC 电磁转矩响应较快。图 10 中,在转速变化过程中,积分 SMC 转速及电磁转矩响应基本无超调,而普通 PI 控制的转速和电磁转矩都有较大的波动。说明积分滑模控制对参数变化比普通 PI 有较强的鲁棒性。

5 结 语

针对电机车工作环境恶劣、运行工况复杂而引起的调速问题,提出将积分 SMC 策略应用到电机车转速控制器中,同时由于电机车负载变化复杂,用降维负载观测器对电机车运行过程中负载转矩进行实时观测,并将观测值加入到积分滑模速度控制器中,提高了系统在负载变化时的转速控制能力,弥补了转速控制和抗负载干扰不能兼顾的缺点。

通过对电机车不同运行工况的仿真表明,该负载转矩观测器能够较好地观测负载转矩;而带负载观测的积分滑模速度控制器提高了在负载变化时的转速控制性能,并有效地抑制了系统的抖振,提高了系统的动态性能。当转子电阻发生变化时,带负载观测器的积分 SMC 具有良好鲁棒性。

【参考文献】

- [1] 宗剑,阮毅,徐立波. 矿山牵引电机车控制系统的仿真[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(8): 14-18.
- [2] FITZGERALD A E, KINGSLEY C, UMANS J S D. 电机学[M]. 6 版. 刘新正, 苏少平, 高琳, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [3] 杨耕, 耿华, 王焕钢. 一种考虑感应电机动态效率的转矩控制策略[J]. 电工技术学报, 2005, 20(7): 93-99.
- [4] 栗忠魁, 阮毅, 宗剑, 等. 直流架线式矿用电机车变频调速控制系统的设计[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(5): 27-30.
- [5] 幸权, 唐猛, 张兵. 基于负载观测的抗扰动伪微分反馈策略电机控制[J]. 信息与控制, 2015, 44(2): 142-146.
- [6] 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.
- [7] LOKROTO A, ZIDANI Y, DOUBABI S. Fuzzy logic control contribution to the direct torque and flux control of an induction machine [C] // Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2011 International Conference on, IEEE, 2011: 1-6.
- [8] UDDIN M, RADWAN T, RAHMAN M. Performance of fuzzy-logic-based indirect vector control for induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(5): 1219-1225.
- [9] KABACHE N, MOULAHOU S, SEBAA K. Neural network based input output feedback control of induction motor [C] // 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Brasov, Romania, 2012: 578-583.
- [10] TAJNE K, SRIVASTAVA P. Comparative performance analysis of vector controlled induction motor drive for neural controller and dsp implemented PI controller [C] // International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT), Rajkot, India, 2012: 274-281. (下转第 43 页)

4 结 语

本文采用的带遗忘因子递推最小二乘法参数估计的方法对 PID 参数进行校正。在电流控制方面具有较好的鲁棒性和稳定性,能很快适应速度的变化,对 PID 参数进行调整,从而提高了速度的自适应性和抗干扰能力。该算法计算量小,结合 TMS320F2812 DSP 芯片运算速度快,可以与其他对电流有更高要求的高级算法结合使用,取得更好的效果,因此对此作深入的研究具有重要价值。

【参考文献】

- [1] 宋绍楼,丁永峰,范永锋.三相异步电机的模糊自适应 PID 控制系统[J].计算机系统应用,2012,12(7): 119-122.
- [2] 蒋新华.自适应 PID 控制(综述)[J].信息与控制,1988,17(5): 41-49.
- [3] 李玲瑞,许鸣珠,高旭东.基于自适应 PID 的永磁同步电机电流控制[J].微特电机,2016,44(10): 58-61.
- [4] 王瑞明,尤小军.鲁棒自适应 PID 控制的感应电机伺服系统[J].电力系统及其自动化学报,2008,20(4): 107-112.
- [5] 张承进,程金路.高性能感应电机电流控制方法分析与比较[J].控制工程,2006,13(2): 97-101.
- [6] 付华,冯爱伟,徐耀松.基于自适应 PID 控制器的异步电机矢量控制[J].辽宁工程技术大学学报,2006,25(1): 73-75.
- [7] 张典林.永磁同步电机智能 PID 控制[D].天津:天津大学,2007.
- [8] 国珍.改进遗传算法在无刷直流电机调速系统 PID 参数优化中的应用[J].组合机床与自动化加工技术,2013(7): 90-91.
- [9] 任勇.一种抗强干扰自适应 PID 控制算法[D].哈尔滨:黑龙江大学,2012.
- [10] 赵建华,沈永良.一种自适应 PID 控制算法[J].自动化学报,2001,27(3): 417-420.
- 收稿日期: 2017 -08 -29
-
- (上接第 7 页)
- [11] 齐昕,周晓敏,马祥华,等.感应电机预测控制改进算法[J].电机与控制学报,2013,17(3): 62-69.
- [12] 刘金琨.滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [13] FNAIEC M A, BETIN F, NAHID B, et al. Control position of a faulted Six Phase Induction Machine (6PIM) using sliding mode control [C] // Electrotechnical Conference, 2008 Melecon 2008 the IEEE Mediterranean, IEEE, 2008: 502-507.
- [14] 侯利民,蔡柯,李勇,等.无速度传感器 PMSM 混沌运动的非奇异快速终端滑模控制[J].信息与控制,2016,45(6): 666-670.
- [15] 毛亮亮,周凯,王旭东.永磁同步电机变指数趋近律滑模控制[J].电机与控制学报,2016,20(4): 106-111.
- [16] 王建敏,董小萌,吴云洁.高超声速飞行器 RBF 神经网络滑模变结构控制[J].电机与控制学报,2016,20(5): 103-110.
- [17] 赵国荣,韩旭,胡正高,等.基于模糊滑模方法的双舵控制导弹制导控制一体化[J].控制与决策,2016(2): 267-272.
- [18] 赫广杰.矿用电机车滑模变结构直接转矩控制系统的研究[J].煤矿机电,2014(5): 41-43.
- [19] 刘颖,周波,方斯琛.基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J].中国电机工程学报,2010,30(9): 80-85.
- [20] 郑泽东,李永东,肖曦,等.永磁同步电机负载转矩观测器[J].电工技术学报,2010,25(2): 30-36.
- [21] 李政,胡广大,崔家瑞,等.永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J].中国电机工程学报,2014,34(3): 431-437.
- [22] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统:运动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [23] 王鑫,李铁鹰.基于改进灰色预测自校正 PID 控制的矿车直流调速系统设计[J].煤炭技术,2014,33(8): 178-181.
- [24] 缪仲翠,党建武,张鑫.基于励磁电流的感应电机速度滑模观测[J].控制工程,2016,23(11): 1719-1724.
- [25] 冯晓云.电力牵引交流传动及其控制系统[M].北京:高等教育出版社,2009.
- [26] 宋雷鸣.动车组传动与控制[M].北京:中国铁道出版社,2007.
- [27] 郭世明.机车动车牵引交流传动技术[M].北京:机械工业出版社,2012.
- 收稿日期: 2017 -09 -27