

解决城轨车辆电机空转的非奇异终端滑模控制

韩 清, 余朝刚

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201600)

摘要: 针对城市轨道交通车辆行驶中出现轮对打滑的控制问题, 使用一种非奇异终端滑模控制方法, 基于城轨车辆永磁同步电机数学方程, 建立永磁同步电机矢量控制模型, 参考非奇异终端滑模控制策略, 模拟列车控制系统应对打滑的控制步骤; 在 Matlab 环境下建立仿真模型, 仿真结果表明, 与传统 PID 控制相比, 采用非奇异终端滑模控制, 牵引电机可以在更短的时间内到达给定值, 且对于扰动具有鲁棒性, 轨道车辆在轮对发生打滑的情况下可以更快更稳定地恢复到平稳运行区。

关键词: 城轨车辆; 永磁同步电机; 打滑; 非奇异终端滑模

A Non-singular Terminal Sliding Mode Control Method for Idling of Urban Rail Vehicle

Han Qing, Yu Chaogang

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

Abstract: Aiming at the slip problem of rail vehicle which often appears when train running, nonsingular terminal sliding-modes are used for rail vehicles. Based on the mathematical equations of permanent magnet synchronous motor, established the vector control model. referred to the nonsingular terminal sliding-mode control strategy and imitated the response to the slip problems. The simulink model was founded by Matlab. The results show that, the output torque can reach the given values in a shorter period of time than that of a traditional PID control strategy, which controled by nonsingular terminal sliding mode. And system is robust with respect to the disturbances. Rail vehicle can reach stable operation region more faster and stable in the case of slipping.

Keywords: urban rail vehicle; PMSM; slip; nonsingular terminal sliding-mode

0 引言

城市轨道交通已成为各大城市缓解公共交通压力的主要手段^[1]。列车安全问题也成为研究者关注的焦点。轨道车辆的运行依赖于列车牵引力, 而列车牵引力的粘着系数受环境气候、列车速度、轨面状况以及机车构造等因素影响, 一旦粘着力发生破坏将发生打滑, 这将使轮轨间发生剧烈摩擦, 严重擦伤轨道表面, 危及乘车安全。最近国内某城市轨道交通某号线由于轨道表面油污导致打滑事故频发, 严重影响到轨道交通乘车安全, 本文从控制策略上探讨解决此类问题。

轨道车辆电机控制系统大部分采用 PID 控制^[2], 虽然能达到轨道车辆正常运行要求, 但是在打滑发生后列车 ATO 系统立即迅速并深度削减给定转矩, 粘着力恢复后先增大给定转矩到一定数值, 然后缓慢增加到此路况下的最大转矩。传统 PID 控制出现较大超调量以及较长调节时间^[3-5]。滑模控制具有相应迅速、鲁棒性好等优点, 采用非奇异终端滑模控制。永磁同步电机高功率、体积小以及高功率密度特点符合轨道车辆

对于列车牵引系统特性要求。永磁同步电机代替传统异步电机是轨道车辆发展的必然趋势^[1], 因此研究对象采用永磁同步电机。

1 城轨车辆永磁同步电机牵引参数计算

城轨车辆轮轨打滑与轮轨粘着系数密切相关, 粘着系数无法直接只算得出, 建立在大量实验基础上, 分析结合经验得到^[6-7]。牵引电机输出转矩恒定, 轨道车辆最大牵引力 F_q 为^[6]:

$$F_q = G[(1+r)a + W_q * g]$$

式中, G 为列车总重量; r 为轨道车辆列车回转系数; a 为 0~80 km/h 轨道车辆平均加速度; W_q 为单位启动转矩; g 为重力加速度。假设列车动车数为 N , 每辆动车有 4 台牵引电机, 动轮直径为 D , 传动效率为 η , 齿轮箱传动比为 μ 则每台电机所承受的牵引力^[6-7]:

$$F_c = \frac{F_q}{4N} (\text{kN})$$

每台电机输出转矩为:

$$T_c = \frac{F_c}{2\mu\eta} (\text{kN} \cdot \text{m})$$

以上分析了轨道车辆电机牵引工况下的电机输出转矩计算方法, 针对此工况下的牵引电机输出转矩仿真分析。

2 城轨车辆永磁同步电机非奇异终端滑模设计

城轨车辆用表面式 PMSM 在 d-q 坐标系下数学模型^[8]为:

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-07-02。

基金项目: 上海市研究生教育创新学位点引导布局与建设培育项目 (13SC002); 上海科促会联盟计划 (2013057); 上海工程技术大学研究生科研创新专项项目 (A-0903-13-01129)。

作者简介: 韩 清 (1990-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事永磁电机控制技术方向的研究。

余朝刚 (1967-), 男, 副教授, 主要从事工业自动化工程、自动化电子装置方向的研究。

$$\begin{cases} \dot{i}_d = (-R_s i_d + L p \omega i_q + u_d) / L \\ \dot{i}_q = (-L p \omega i_d - R_s i_q - p \varphi_f \omega + u_q) / L \\ \dot{\omega} = (1.5 p \varphi_f i_q - B \omega - T_L) / J \\ \dot{\theta} = \omega \end{cases}$$

式中, u_d , u_q , i_d , i_q 分别为定子电压和电流的 d , q 轴分量, L 和 R_s 为绕组等效电感和电阻, φ_f 为每对磁极磁链, p 为磁极对数, ω 和 θ 分别为电机转子的角速度和角位置, T_L 为负载转矩, J 为转动惯量, B 为摩擦系数。

转速环采用非奇异终端滑模控制方法, 设给定转速信号为 ω^* , 处处二阶可导。定义误差方程为 $e_w = \omega^* - \omega$ 。本文为了提高电机的转矩响应速度以及鲁棒性, 转速环采用一种非奇异终端滑模面^[9]:

$$S_w = e_w + \frac{1}{\beta} \dot{e}_w^{p/q}$$

式中, $\beta > 0$, p 和 q 为正奇数, 且 $1 < p/q < 2$ 。

$$\dot{S}_w = \dot{e}_w + \frac{p}{\beta q} \dot{e}_w^{(p/q-1)} \dot{e}_w$$

根据非奇异终端滑模设计原理, 同时为了加快滑模收敛的时间以及削弱抖振, 引入指数趋近律^[9], i_q^* 的控制方程为

$$i_q^* = \frac{J}{1.5 p \varphi_f} \left(\int_0^t \beta \frac{q}{p} \dot{e}_w^{(2-p/q)} + (l_1 + \eta_1) \operatorname{sgn} S_w + \mu S_w d\tau + \dot{\omega}^* + B \omega / J \right)$$

选取 Lyapunov 函数 $v_w(t) = 0.5 S_w^2(t)$ 可以证明所使用非奇异终端滑模的稳定性。

定义交轴电流误差方程为 $e_q = i_q^* - i_q$ 参照非奇异滑模设计原理^[9], 选取滑模面:

$$s_q = e_q + \frac{1}{\beta_1} \dot{e}_q^{p_1/q_1}$$

式中, $\beta_1 > 0$, p_1 和 q_1 为正奇数, 且 $1 < p_1/q_1 < 2$ 。同样的推理方法得到 u_q 等效控制方程, 为了加快滑模面的收敛采用指数趋近律代替传统等效控制。 u_q 控制律为:

$$u_q = L \dot{i}_q^* + L p \omega i_d + R_s i_q + p \varphi_f \omega + L \int_0^t \left[\beta_1 \frac{q_1}{p_1} \dot{e}_q^{(2-p_1/q_1)} + (l_2 + \eta_2) \operatorname{sgn} s_q + \mu_1 s_q \right] d\tau$$

直轴电流控制律采用 $i_d^* = 0$ 控制策略^[10], 定义直轴电流误差方程为: $e_d = i_d^* - i_d = -i_d$ 。选取如下滑模面^[9]:

$$s_d = e_d + \frac{1}{\beta_2} \dot{e}_d^{p_2/q_2}$$

式中, $\beta_2 > 0$, p_2 和 q_2 为正奇数, 且 $1 < p_2/q_2 < 2$ 。同理得到 u_d 等效控制方程, 为了加快滑模面的收敛采用指数趋近律代替传统等效控制。 u_d 控制律为:

$$u_d = R_s i_d - L p \omega i_q + L \int_0^t \left[\beta_2 \frac{q_2}{p_2} \dot{e}_d^{(2-p_2/q_2)} + (l_3 + \eta_3) \operatorname{sgn} s_d + \mu_2 \right] d\tau$$

选取合适 Lyapunov 函数可以证明所使用交直轴电流控制律的稳定性。

3 仿真研究

针对 AW3 满载情况下四动两拖编组城轨列车仿真研究, 列车各项指标^[6]如下:

$$G_T = 62.6 \text{ t}; G_M = 58.6 \text{ t}; a = 0.591 \text{ m/s}^2; W_q = 5 \text{ N/KN}; N = 4; D = 0.805 \text{ m}; \eta = 0.975; \mu_c = 6.9;$$

由上式得到每台牵引电机需要的输出转矩为 $0.96 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 为牵引电机恒转矩工况下的输出转矩。仿真针对的城轨车辆用

永磁同步电机, 具体参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机参数

参数	数值
额定功率/kW	180
定子电阻/ Ω	2.875
电枢电感/mH	3.3
电机转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.011
磁链常数/(wb)	0.8
极对数	3

所使用非奇异终端滑模参数如下:

转速环: $p = 7; q = 5; \beta = 500; l_1 = 900; \eta_1 = 100; \mu = 110 \text{ 000}$;

交轴电流环: $p_1 = 7; q_1 = 5; \beta_1 = 100; l_2 = 200; \eta_2 = 20; \mu_1 = 50$;

直轴电流环: $p_2 = 5; q_2 = 3; \beta_2 = 100; l_3 = 0.1; \eta_3 = 0; \mu_2 = 1$;

对比使用的 PID 参数参考传统 Anti-reset Windup 方法^[11], 所使用的系统参数如下。

转速环: $k_{p1} = 0.5; \tau_{i1} = 10; k_{c1} = 0.00036$;

交轴电流环: $k_{p2} = 80; \tau_{i2} = 23$;

直轴电流环: $k_{p3} = 117; \tau_{i3} = 58$;

仿真条件如下: 牵引电机以输出转矩 $960 \text{ N} \cdot \text{m}$ 正常运行, 此时假定轮轨间粘着力破坏, 检测装置检测到轮对的打滑趋势, 牵引电机控制系统深度削减给定转矩到 $500 \text{ N} \cdot \text{m}$, 轮轨粘着恢复后增加给定转矩到 $800 \text{ N} \cdot \text{m}$, 之后缓慢增加给定转矩到 $900 \text{ N} \cdot \text{m}$ (假定此时达到此路况下粘着力临界)。此时, 列车在不发生空转的情况下, 达到了最大输出转矩。传统 PID 控制和非奇异终端滑模控制效果对比如图 1 所示。

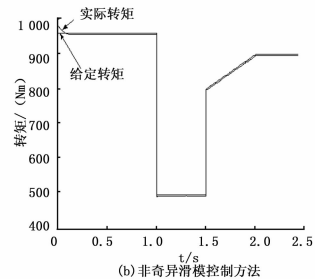
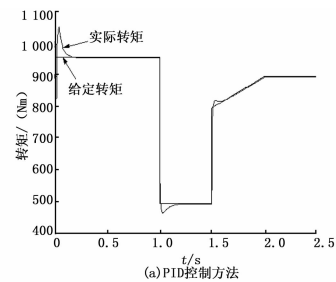


图 1 PID 与非奇异终端滑模控制效果对比

图 1 对比可知: 传统 PID 可以得到基本正确的输出转矩, 电机启动阶段出现明显的超调量, 非奇异终端滑模控制超调量小且调节时间短。给定转矩发生突变后, PID 控制输出转矩出现明显超调, 且调节时间较长。相比之下, 采用非奇异终端滑模控制方法, 电机启动阶段超调量小且调节时间短。给定转矩发生突变后, 非奇异终端滑模控制输出转矩跟踪给定转矩快速且准确, 几乎没有超调, 调节时间显著短于 PID 控制方法。

计的速度特征提取算法与改进自回归预测方法, 计算简单、方法实用、精度较高, 并且具有自适应性, 具有较高的工程实践价值。

参考文献:

[1] 蔡远文, 同江, 姚静波, 等. 我国航天自动测试系统体系结构研究 [J]. 装备学院学报, 2012 (6): 1-5.
 [2] 蔡远文, 张迎新, 陈胜, 等. 运载火箭多路测试信息采集处理系统的设计与实现 [J]. 导弹与航天运载技术, 2004 (6): 12-15.
 [3] 程龙, 蔡远文, 李岩. 弹箭遥测信息自动判读系统的研制

[J]. 弹箭与制导学报, 2008 (4): 71-73.
 [4] 李岩, 蔡远文. 基于 1553B 总线的新型运载火箭测试技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2005 (9): 964-966.
 [5] 陈以恩. 遥测数据处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
 [6] 杨位钦, 顾岚. 时间序列分析与动态数据建模 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988.
 [7] 刘次华. 随机过程 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.
 [8] 刘辉, 田红旗, 李燕飞. 基于小波分析法与滚动式时间序列法的风电场风速短期预测优化算法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2010 (1): 370-375.

(上接第 119 页)

模控制策略, 牵引电机输出转矩能更好地跟踪给定转矩, 给定转矩发生突变时输出转矩几乎不出现超调, 电机输出转矩一直跟随给定值。且在转矩恢复阶段, 传统 PID 控制存在着一定误差, 而非奇异终端滑模更好地控制了这些误差量。图 2 为非奇异滑模控制下城轨车辆牵引电机定子电流 i_d 和 i_q :

由图 2 可以看出: 由于使用 $i_d^* = 0$ 控制策略, 牵引电机直轴电流 i_d 在运行时间内始终为 0。交轴电流 i_q 在启动过程中超调量下, 调节时间短。在应对空转过程中, 给定转矩突变, i_q 仍然精确跟踪给定电流, 超调量很小, 调节时间非常短。

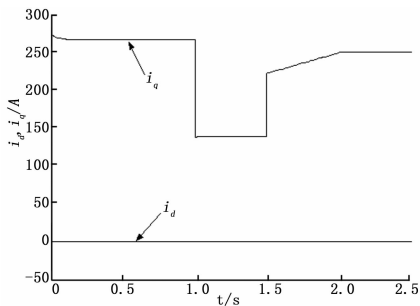


图 2 牵引电机定子电流 $i_d i_q$

由图 3 可以看出: 牵引电机转速在很短时间内精确到达给定值, 转速跟踪平稳基本无超调。给定转矩突变时, 牵引电机转速出现波动, 但在很短时间内回复到给定转速, 牵引电机转矩缓慢上升过程中, 转速存在小范围波动, 表明所使用非奇异滑模对于扰动具有一定的鲁棒性。图 4 为非奇异终端滑模面。

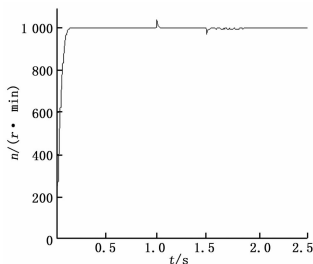


图 3 牵引电机输出转速

由图 4 可知: 所使用的非奇异滑模可以在有限时间到达 0 点, 控制量平稳抖动较小, 可以满足城轨车辆永磁同步电机的控制需求。可以看出, 与传统 PID 控制相比, 非奇异终端滑模具有相应速度快、超调量小、鲁棒性好等优点, 可以用来实现对于城轨车辆列车打滑问题的控制。

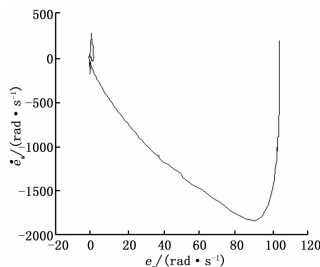


图 4 非奇异终端滑模面

4 结论

针对城轨车辆运行中出现轮对空转问题, 使用一种非奇异终端滑模控制方法, 模拟列车 ATO 控制系统检测打滑后的处理方法, 仿真结果表明, 采用非奇异终端滑模控制策略, 牵引电机能更好地跟踪输出转矩。在处理打滑过程中, 给定转矩短时间内发生突变, 非奇异滑模控制策略可以使电机输出转矩超调小, 调节时间短, 可以应对城轨车辆运行中的打滑问题, 对于城轨车辆牵引控制系统改进具有一定的理论价值。

参考文献:

[1] 王曰凡. 永磁同步传动的城市轨道交通新型车辆 [J]. 城市轨道交通研究, 2011, 14 (6): I0002-I0002.
 [2] 城市轨道交通电力牵引 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
 [3] 徐英雷, 李群湛, 许峻峰. 城轨车辆永磁同步电机牵引系统研究现状与发展前景 [J]. 电机与控制应用, 2009, 36 (5): 7-10.
 [4] 盛义发, 喻寿益, 桂卫华, 等. 轨道车辆用永磁同步电机系统弱磁控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (9): 74-79.
 [5] 冯江华. 轨道交通永磁同步牵引系统研究 [J]. 机车电传动, 2010 (5): 15-21.
 [6] 谢宏诚, 乌正康, 谢维达. 城市轨道交通车辆牵引仿真计算 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2005, 28 (5): 20-22.
 [7] 王振滨, 陆正刚, 余鹿廷. 城市轨道交通车辆牵引仿真分析研究 [J]. 上海电机学院学报, 2009, 12 (1): 78-83.
 [8] 郑剑飞, 冯勇, 陆启良. 永磁同步电机的高阶终端滑模控制方法 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26 (6): 697-700.
 [9] 刘金珉. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
 [10] 连琨, 刘艳萍, 高美卿. 永磁同步电动机矢量控制 [J]. 电机与控制应用, 2010, 37 (12): 52-55.
 [11] 邱黎辉, 阙沛文, 毛义梅. 模糊 PID 控制在中央空调系统中的应用研究 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (1): 57-59.