

# 低地板有轨电车用盘式永磁电机直驱技术

孙效杰, 陆正刚, 张 劲

(同济大学 铁道与城市轨道交通研究院, 上海 201804)

**摘要:** 针对低地板有轨电车用传统牵引电机布置不便、传动效率低等现状, 提出一种盘式永磁电机直驱独立车轮方案。电机整体悬挂于构架外侧, 使得电机质量为簧上质量。由尺寸方程估计电机基本尺寸后, 再使用编写的电机 CAD (Computer-aided Design) 程序设计 60 kW 电机以满足有轨电车牵引需求。采用基于滑模观测器的无位置传感器矢量控制方式对电机进行牵引控制。根据车辆导向控制特点, 分别对转向架同侧电机和两侧电机进行差速控制。在 MATLAB/Simulink 平台下搭建电机控制模型, 仿真结果表明, 电机控制响应快、鲁棒性高; 多个电机协调导向性能好, 适应直道和弯道线路的控制需求。

**关键词:** 低地板有轨电车; 盘式永磁同步电机; 计算机辅助设计; 滑模观测器; 导向控制

**中图分类号:** TM351; U270.33

**文献标志码:** A

## Disc PMSM-direct-drive for Low Floor Tramcar

SUN Xiaojie, LU Zhenggang, ZHANG Jin

(Institute of Railway and Urban Rail Transit, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To overcome the disadvantages of conventional motor in low floor tramcar with difficult installation arrangement and low transmission efficiency, a new solution was proposed with disc permanent magnet synchronous motor (PMSM)-direct-drive and independent rotating wheels. The disc PMSM was overhung in the bogie frame with elastic suspension, which made them as the sprung mass. A 60kW disc PMSM was designed under developed motor Computer-aided Design (CAD) program to meet the traction power demand, after estimating the overall dimensions according to the size equation of motor. Sensorless vector control based on the sliding mode observer(SMO) was adopted in speed control and torque control of PMSM. The same side and both side motors will control speed difference under the steering control strategy of tramcar. Finally, motor control model was set up

in MATLAB/Simulink to check the control strategy. The simulation results show that the PMSM control based on SMO has rapid and robust response. Multi-motors with good steering performance adapt to the the straight or curve track well.

**Key words:** low floor tramcar; disc permanent magnet synchronous motor (PMSM); computer-aided design (CAD); sliding mode observer(SMO); steering control

低地板有轨电车广泛使用独立车轮, 目的是降低地板高度, 方便乘客上下。但同时又引入两方面的问题: ①电机如何驱动独立车轮; ②使用独立车轮的车辆导向性能差, 如何改善。

ADtranz 公司(已被 Bombardier 收购)的 GTxN 系列有轨电车、Alstom 公司的 Citadis 系列 Arpège 和 Solfège 转向架等都采用单个电机通过机械横轴驱动左右车轮; Siemens 公司的 Combino 和 Combino Plus 以及 Avenio, Ansaldo Breda 公司的 Sirio, Kinki Sharyo 公司的 Jtram 和 Crotram 公司的 TMK2200 牵引电机纵向通过螺旋圆锥齿轮驱动同侧前后车轮。中国长春客车股份有限公司研制的 100% 低地板有轨电车采用类似技术<sup>[1]</sup>。上述采用机械结构方式实现车轮间的耦合关系, 改善车辆导向性能。

CAF 公司的 Urbos3, ADtranz 公司的 Eurotram 和 Incentro 以及 Variotram, Duewag 公司(已被 Siemens 收购)的 R3.1, Skoda 公司的 ForCity, 这些低地板有轨电车均采用单个电机驱动单个独立车轮的模式。其中 Urbos3 和 Incentro 的电机沿纵向悬挂于转向架的端部, 电动机的扭矩通过齿轮箱的斜齿轮和伞齿轮带动车轮旋转。Eurotram 横向布置的电动机通过平行齿轮驱动车轮。

收稿日期: 2013-05-13

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2009BAG11B02)

第一作者: 孙效杰(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为轨道车辆系统集成与控制。E-mail: sxjlm2003@163.com

通讯作者: 陆正刚(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道车辆系统集成与控制。

E-mail: luzhenggang@tongji.edu.cn

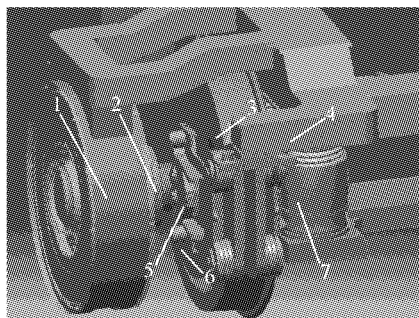
Variotram 车轮外侧使用交流外转子直接驱动电动机,车轮轮箍与电动机座固定连接为一体。R3.1 采用内转子轮毂电机技术,转子通过行星太阳轮驱动车轮。ForCity<sup>[2]</sup>则是外置架悬式 PMSM(永磁同步电机)通过爪形联轴器直接驱动车轮。

上述采用电气控制方式实现车轮间的耦合,相对于机械耦合方式,结构更简单,但也存在如下问题:采用齿轮传动的效率低,结构复杂;轮毂电机方案最大的缺陷在于为了将电机转为簧上质量,必须采用结构复杂的弹性车轮技术;外置径向电机通过联轴器驱动独立轮,其轴向尺寸大,布置困难。

本文提出一种采用盘式 PMSM 直接驱动独立车轮技术方案。盘式永磁电机作为牵引电动机,兼有 PMSM 和盘式电机(又名轴向电机)的优势。电机整体悬挂于构架外侧,通过弹性万向节直接驱动独立车轮。根据列车运行阻力和运行速率估算牵引电机功率和转速,使用开发的电机 CAD(Computer-aided Design)程序设计一台 60kW 盘式 PMSM。基于 SMO(滑模观测器)的无位置传感器 PMSM 矢量控制技术搭建电机控制模型。结合车辆牵引控制和导向控制要求,对电机转速转矩控制和多电机协调控制进行仿真,以验证控制方法和策略。

## 1 盘式 PMSM 直驱方案

本方案使用的牵引电机为三相盘式 PMSM(图 1),直接驱动独立车轮,与传统的集中电机驱动方式相比,主要优点是:①简化了机械传动装置,驱动系统结构更为简单紧凑,传动链短、传动效率高;②对整车结构布置影响较小,车体空间利用率高;③驱动控制系统的响应速度快、准确性高,便于整车动力性能的匹配优化。



1—盘式永磁同步电机;2—万向节;3—独立车轮;4—构架;5—制动夹钳;6—制动盘;7—系悬挂

图 1 盘式永磁电机直驱独立车轮方案

Fig.1 Plan of disc PMSM-direct-drive wheel

永磁电机具有结构简单、体积小、质量轻、损耗小、效率高等优点。盘式电机轴向尺寸短、结构紧凑、硅钢片利用率高。盘式永磁电机作为牵引电机兼有永磁电机和盘式电机优势。电机整体悬挂于构架外侧,通过弹性万向节直接驱动独立车轮,避免车轮的摇头与横移运动对电机输出的影响。

因电机布置在车轮外侧,占据了常见车轮外侧轴上布置制动盘的空间,若仍选用轴盘方案,则制动盘只能布置在车轮内侧轴上,或者非动力转向架上。布置在车轮内侧轴上会造成此部分空间无法做成低地板;布置在非动力转向架上,使得制动比例低,给制动系统设计带来困难。因此本方案使用轮盘制动解决上述问题。

## 2 电机设计

### 2.1 轻轨列车

根据《轻轨交通车辆通用技术条件》(CJ/T5021—1995)、《城市轻轨交通铰接车辆通用技术条件》(GBT 23431—2009)和《低地板有轨电车车辆通用技术条件》(CJ/T417—2012),参考国内外有轨电车编组型式,本文的有轨电车参数见表 1。列车采用两动一拖的 3 节编组,每节车辆下有 1 个转向架。其中 AW2 载荷工况指列车可站面积按 6 人·m<sup>-2</sup>的乘员载重(乘员每人 60 kg)加上座席坐满的乘员载重,再加上空车重量。

表 1 有轨电车技术参数

Tab.1 Main parameters of tramcar

空车质量/t	最高运行速率/(km·h <sup>-1</sup> )	平均运行速率/(km·h <sup>-1</sup> )	平均启动加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	最小水平曲线半径/m
39	70	25~36	1	25(空载), 50(AW2)
列车长度/m	轴重/t	车轮直径/mm	乘员/人	最大坡度/%
27	10	660(新轮), 600(磨损到限)	52(座席), 210(AW2)	3.5

### 2.2 电机功率估算

列车总阻力

$$F = 9.81m[102(1 + \gamma)a + \omega_0 + \omega_j + \omega_q] \quad (1)$$

式中: $F$  为列车总阻力, N;  $m$  为列车总质量, t;  $\gamma$  为考虑车辆旋转部件惯性的系数,取 0.1;  $a$  为启动加速度,取平均启动加速度 1 m·s<sup>-2</sup>;  $\omega_0$ ,  $\omega_j$ ,  $\omega_q$  分别为列车基本阻力系数、附加阻力系数和启动阻力系数, kg·t<sup>-1</sup>。

根据表 1 的列车技术参数结合式(1)计算列车

总阻力. 列车总质量  $m$  按 AW2 工况计算, 估算出牵引电机功率, 再依据电机直驱车辆的运行速率与电机转速之间关系式获得电机转速. 参考城市轨道交通车辆牵引逆变器的技术参数确定电机的线电压范围. 有轨电车用牵引电机参数见表 2, 满足 10 t 轴重车辆牵引需求.

表 2 牵引电机主要参数

Tab.2 Main parameters of PMSM

额定功率/ kW	转速/(r · min <sup>-1</sup> )		频率/ Hz	线电压/ V
	额定	最高		
60	400	700	0~120	0~500

### 2.3 电机设计

轴向磁通电机尺寸方程<sup>[3]</sup>为

$$T = K_e K_i K_p A B_g \eta (1 - \lambda^2) \frac{1 + \lambda}{8} D_0^3 \quad (2)$$

式中:  $T$  为电机输出转矩;  $K_e, K_i, K_p$  分别为电势系数、电流波形系数和电功率波形系数;  $A$  为线负荷;  $B_g$  为气隙磁密的最大值;  $\eta$  为电机效率;  $\lambda$  为电机定子铁心内外径之比;  $D_0$  为电机定子铁心外径.

电机的总外径为  $D_{\text{tot}} = D_0 + 2W_{\text{cu}} + 2H_{\text{frame}}$ , 式中  $W_{\text{cu}}$  为定子绕组端部径向厚度,  $H_{\text{frame}}$  为定子机座厚度. 电机总轴向尺寸为  $L_{\text{tot}} = 2(L_{\text{PM}} + g + L_s + L_{\text{sup}}) + L_r$ , 式中  $g$  为气隙的轴向长度,  $L_s$  为定子铁心的轴向长度,  $L_{\text{sup}}$  为电机端盖的轴向长度,  $L_r$  为转子铁心的轴向长度,  $L_{\text{PM}}$  为转子永磁体的轴向长度.

$$L_{\text{PM}} = \frac{2\mu_r B_g K_e g}{B_r - B_g K_F K_\sigma} \quad (3)$$

式中:  $\mu_r$  为永磁磁钢材料的相对回复磁导率;  $B_r$  为永磁磁钢材料的剩磁密度;  $K_F$  为盘式气隙磁密分布系数;  $K_e$  为气隙卡氏系数,  $K_\sigma$  为永磁磁路的漏磁系数.

$$K_\sigma = \frac{\Phi_r}{\Phi_g}$$

式中:  $\Phi_r, \Phi_g$  分别为转子永磁磁钢产生的总磁通和气隙主磁通.

由式(2)、式(3)估计电机的主要尺寸和永磁体的主要尺寸后, 即可采用基于 MATLAB/GUI 软件开发的永磁同步电机 CAD 程序(见图 2, 其中  $L_{\text{rot}}, L_{\text{sta}}$  分别为转子和定子长度,  $D_{\text{in}}, D_{\text{out}}, D_{\text{tot}}$  分别为电机的内径、外径和总直径)进行电机设计, 电枢绕组和磁路的计算流程见图 3. 若结果不合理, 应调整永磁体尺寸及工作点再重新计算. 如此循环, 直到满意为止.

最终设计出一台 60 kW 盘式 PMSM, 电机参数为: 定子电阻  $R_s = 0.142 \Omega$ , 定子直轴电感  $L_d = 5.35$

mH, 定子交轴电感  $L_q = 5.35$  mH, 电机转动惯量  $J_m = 0.988 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 转子磁链  $\Psi_f = 0.98$  Wb, 极对数  $p = 8$ .

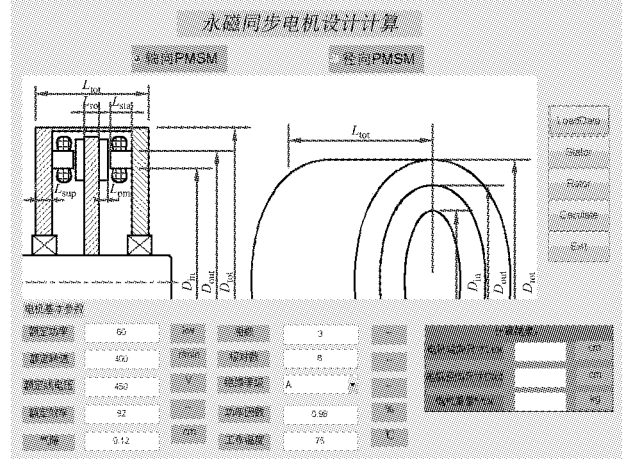


图 2 基于 MATLAB/GUI 的永磁电机 CAD 程序界面  
Fig.2 The CAD program interface for designing PMSM based on MATLAB/GUI

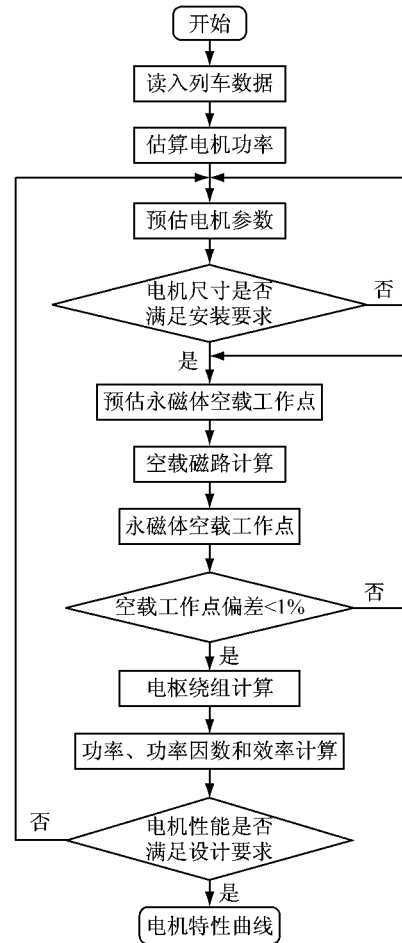


图 3 永磁电机 CAD 程序流程  
Fig.3 The flow chart of developed program for designing PMSM



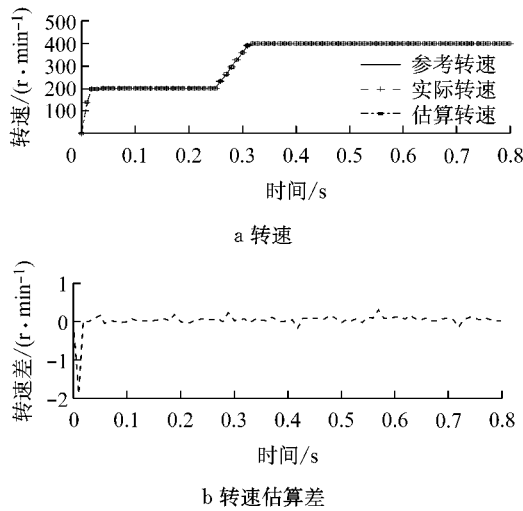


图5 电机转速响应

Fig.5 Response of motor speed

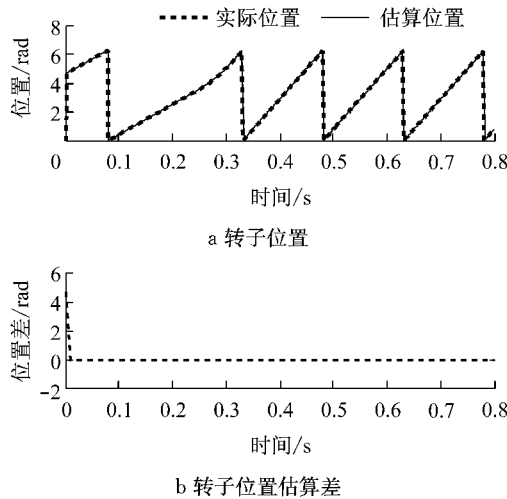


图6 电机转子位置

Fig.6 Position of motor rotor

## 4 多电机控制

四电机驱动转向架将车辆的牵引与导向控制变成对电机的控制。车辆主动导向控制一般采用车轮转速差、横移量和摇头角等为反馈量,而速差作为简单、易测的物理量被广泛应用<sup>[6-8]</sup>。对于电机驱动的车轮,其转速与电机转速之间存在比例关系(直驱时比例系数为1,而齿轮传动时比例系数为传动比),可通过获取电机转速进而推算出车轮转速以及转速差。在PMSM的仿真已经证明了SMO可以较为精确地估算出电机转子转速,因此导向控制系统可不需要转速传感器。

转向架每一台PMSM使用单独的一个牵引逆变器进行独立控制。同侧电机采用偏差耦合控制,用于实现前后电机转速同步。两侧电机使用速差反馈

控制,控制左右车轮的转速差,目的在于保证车辆在直线上行驶时左右同步,恢复自导向能力;曲线行驶时,形成速差使得车轮趋于径向位置,减小冲角和磨损。多电机控制策略见图7,图中 $T_i (i=1\sim 4)$ 分别为电机1~4的负载转矩; $\omega^*$ 为给定角速度; $\omega_i (i=1\sim 4)$ 分别为电机1~4的角速度。使用最简单的PI(比例积分)控制,控制目标为

$$\Delta\omega^* = \frac{2bv}{Rr_0} \quad (7)$$

式中: $b$ 为轮对横向跨距的1/2; $v$ 为车辆运行速率; $R$ 为线路曲线半径; $r_0$ 为车轮半径。此时车轮横移量 $y_w=0$ ,轮对沿轨道中心线行驶。如何获得线路信息是这种控制方法的关键。因为城市轨道交通车辆行驶的路线比较固定,所以方便使用地面应答装置或GPS(全球定位系统)为车辆提供线路信息,特别是基于多传感器容错信息融合算法的定位技术,使得车辆定位精度高,获取线路信息准确高效<sup>[9]</sup>。

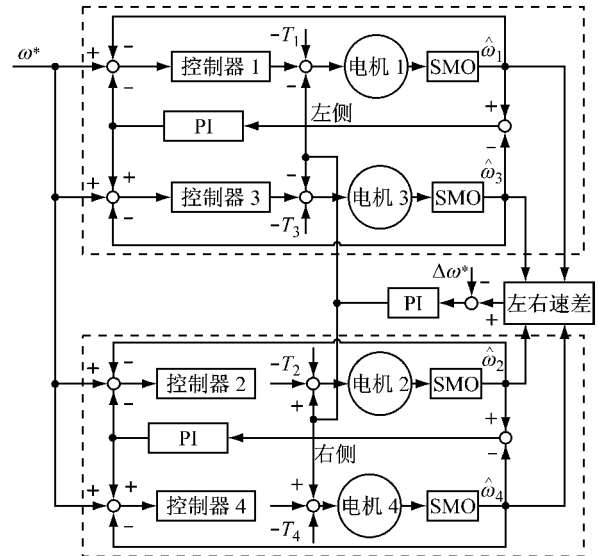


图7 同一转向架上电机控制策略

Fig.7 Scheme of steering control of power bogie

根据图7控制策略搭建多电机控制模型,开展在直道和曲线不同工况下的控制仿真,2种工况下电机的控制比例系数 $K_P$ 和积分系数 $K_I$ 取相同,均为 $K_P=70, K_I=5\ 000$ 。

图8是负载转矩 $T_1$ 在阶跃变化过程中的各个电机转速同步响应。图9是目标速差 $\Delta n^*$ 为 $17.36\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ (车辆以 $36\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 通过超小半径25 m曲线时)电机的转速动态响应。图8和图9中, $n_i (i=1\sim 4)$ 分别为电机1~4的转速。仿真表明,多电机协调控制策略可适应不同的线路环境,系统响应快速且稳定。

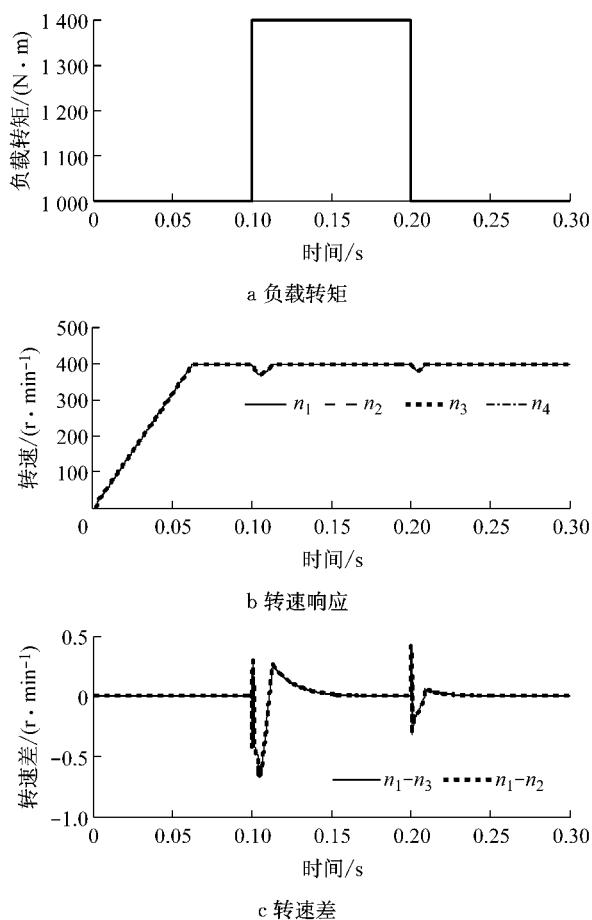


图 8 多电机阶跃负载下的同步性能

Fig.8 Synchronism of multi-motors under step load

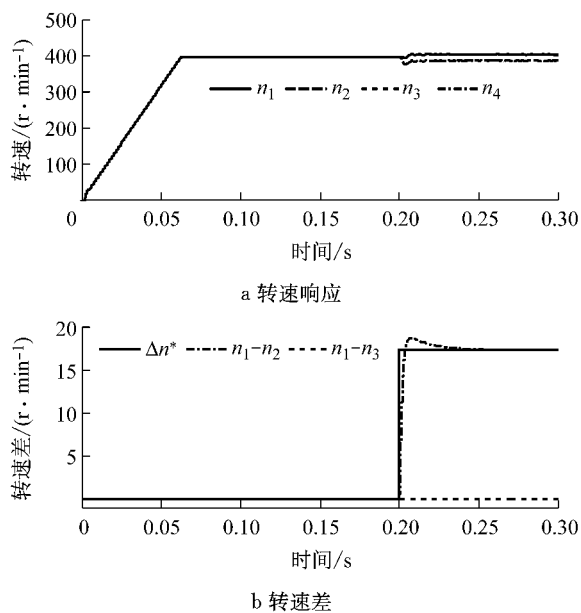


图 9 多电机给定速差下响应

Fig.9 Speed difference response of motors at a reference speed

## 5 结论

提出了有轨电车用盘式 PMSM 直驱独立轮方案,通过弹性联轴器驱动车轮,避免车轮的摇头与横移运动对电机输出的影响;车辆走行部具有结构紧凑、传动效率高等优势;设计了一个满足一般有轨电车牵引功率需求和安装尺寸要求的盘式永磁电机,并基于该电机参数开展无位置和转速传感器的矢量控制和多个电机的协调控制仿真研究,结果验证了控制方案的可行性。

## 参考文献:

- [1] SHEN Maosheng, DIAO Lijun, MEI Ying, *et al.* Design and control of 100% low floor light rail vehicle traction system[C]// Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin: IEEE, 2008: 1-5.
- [2] Peroutka Z, Zeman K, Krus F, *et al.* New generation of full low-floor trams: control of wheel drives with permanent magnet synchronous motors [C]//Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose: IEEE, 2009:1833-1840.
- [3] Aydin M, Huang S R, Lipo T A. Design and 3D electromagnetic field analysis of non-slotted and slotted TORUS type axial flux surface mounted permanent magnet disc machines[C]//Electric Machines and Drives Conference Cambridge. [S. l.]: IEEE, 2001: 645-651.
- [4] Elbuluk M, Li C. Sliding mode observer for wide-speed sensorless control of PMSM drives[C]//Industry Applications Conference. Salt Lake City: IEEE, 2003: 480-485.
- [5] 尚喆, 赵荣祥, 窦汝振. 基于自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 23.  
SHANG Zhe, ZHAO Rongxiang, DOU Ruzhen. Research on sensreless control method of PMSM based on an adaptive sliding mode observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3):23.
- [6] Pérez J, Busturia J M, Goodall R M. Control strategies for active steering of bogie-based railway vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2002, 10(9): 1005.
- [7] Mei T X, Goodall R M. Practical strategies for controlling railway wheelsets independently rotating wheels [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2003, 125(3): 354.
- [8] Perez J, Busturia J M, Mei T X, *et al.* Combined active steering and traction for mechatronic bogie vehicles with independently rotating wheels[J]. Annual Reviews in Control, 2004, 28(2): 207.
- [9] 刘江, 蔡伯根, 唐涛, 等. 低成本列车组合定位系统容错算法设计[J]. 铁道学报, 2011, 33(1): 39.  
LIU Jiang, CHAI Bogen, TANG Tao, *et al.* Fault-tolerant algorithm design of low-cost integrated train positioning system [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(1): 39.