

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.006

轮毂电机驱动型电动汽车动力系统研究*

孟庆华 许 进 王东峰
(杭州电子科技大学机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: 对轮毂电机驱动型电动汽车的动力系统进行了研究。首先分析了轮毂电机驱动型电动汽车行驶时的受力情况,然后以某型号轮毂电机驱动型电动汽车为样车选取了轮毂电机和蓄电池,采用 ADVISOR 建立了轮毂电机驱动型电动汽车动力系统模型,并对其进行了仿真分析。仿真结果验证了所选取的轮毂电机及蓄电池均满足设计要求。最后利用自行设计的电动汽车骨架样车进行了实验,验证了仿真的合理性。
关键词: 电动汽车 轮毂电机 动力系统 仿真分析
中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)08-0033-05

Power System of Electric Vehicle Driven by In-wheel Motors

Meng Qinghua Xu Jin Wang Dongfeng
(School of Mechanical Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A power system of electric vehicle driven by in-wheel motors was studied. First, force conditions of the running electric vehicle driven by in-wheel motors were analyzed. Then, the in-wheel motors and lead-acid batteries were selected with a certain type electric vehicle driven by in-wheel motors as a sample. A power system model of electric vehicle driven by in-wheel motors was built and simulated based on ADVISOR. The simulation result showed that the selected in-wheel motors and lead-acid batteries could meet the design requirement. Finally, the electric frame car designed was tested to prove the reasonableness of the simulation.
Key words: Electric vehicle In-wheel motors Power system Simulation analysis

引言

目前研发的电动汽车由于受到传统燃油汽车设计思路束缚,其结构仅在传统汽车基础上改装而成,未能充分发挥电机驱动应有的各种技术优势,性价比难以实现突破性提高。通过对各种电动汽车动力传动机构的分析比较,采用轮毂电机驱动方式是最能充分发挥电动汽车电机驱动的优势技术。轮毂电机具有较好的布置灵活性,可以采用前驱、后驱以及全驱多种布置方式。相对于采用其他方式驱动的车辆,轮毂电机驱动型电动汽车在动力匹配、底盘结构等多个方面具有独特优势:①将传统的动力机械硬传输转化为电力软传输,省去了机械式的变速器、离合器传动轴、差速器、驱动桥等部件。

②能够实现对电机所在车轮的直接控制,提升汽车底盘的可操控性,实现“电子主动底盘”,并提升车辆的安全性。③更加节约能源。④使汽车造型设计更加灵活以及系统化设计更加便捷^[1~5]。本文首先分析轮毂电机驱动型电动汽车行驶时的受力情况,并以某型号两后轮独立轮毂电机驱动型电动汽车为样车选取轮毂电机和蓄电池,最后采用 ADVISOR 建立轮毂电机驱动型电动汽车动力系统模型,对其进行仿真分析。

1 两后轮独立驱动的轮毂电机驱动型电动汽车动力学分析

为了简化轮毂电机驱动型电动汽车的动力学分析及控制策略,目前研究人员均将四轮电动汽车简

收稿日期: 2012-07-09 修回日期: 2012-08-10
* 国家自然科学基金资助项目(51105124)和浙江省重点科技创新团队资助项目(2011R50008)
作者简介: 孟庆华,副教授,博士,主要从事机械检测与故障诊断、电动汽车设计研究,E-mail: mengqinghua@gmail.com

化为两轮汽车模型进行研究。针对目前广泛采用的两轮模型的横向和横摆运动方程,本文进行了修订,修改后的方程为^[6~10]

$$mv(\beta + \phi) = 2C_f \left(\delta - \frac{a}{v} \phi - \beta \right) + 2C_r \left(\frac{b}{v} \phi - \beta \right)$$

(1)

$$I_z \omega_r = 2aC_f \left(\delta - \frac{a}{v} \phi - \beta \right) - 2bC_r \left(\frac{b}{v} \phi - \beta \right) + M_z$$

(2)

其中

$$M_z = K_r \phi + K_v v + K_\delta \delta$$

(3)

式中 I_z ——车辆绕 z 轴的转动惯量
 β ——车辆质心处的侧偏角
 ϕ ——车辆横摆角 δ ——转向轮转角
 C_f, C_r ——考虑轮胎和悬架特性的前、后轮处侧偏刚度
 a, b ——质心到前轴和后轴距离
 v ——车辆车体速度 ω_r ——横摆角速度
 M_z ——电动汽车由于内外两侧驱动力不同而产生的侧偏力矩

其中由于 K_v 较小,可以取 $K_v \approx 0$,则式(3)变为

$$M_z = K_r \phi + K_\delta \delta$$

(4)

$$K_r = -\frac{1}{I_z w} k_{22}$$

其中

$$T_X = a_{11} + a_{22} \quad D_X = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}$$

$$K_\delta = -\frac{1}{I_z w} k_\delta^*$$

$$k_\delta^* = \frac{a_{12} e_1 k_{11} + (a_{12} e_2 - a_{11} e_1) k_{12} - a_{11} e_2 k_{22} + f_u a_{11}}{D_X + \frac{a_{12} k_{12} - k_{22} a_{11}}{I_z^2 w}}$$

$$f_u = \frac{u}{l(1 + ku^2)}$$

$$k_{11} = \frac{1}{2a_{12}^2} \left[T_X + \left(2D_X + 2a_{22}^2 - \frac{1}{I_z^2 w} \right) k_{22} - \frac{1}{I_z^2 w} (a_{11} + 3a_{22}) k_{22}^2 + \left(\frac{1}{I_z^2 w} \right)^2 k_{22}^3 \right]$$

$$k_{12} = \frac{1}{2a_{12}} \left(\frac{k_{22}^2}{I_z^2 w} - 2a_{22} k_{22} - 1 \right)$$

$$k_{22} = I_z^2 w \left(T_X + \sqrt{T_X^2 - 2D_X + \frac{1}{I_z^2 w}} + \sqrt{D_X^2 + \frac{1}{I_z^2 w} a_{11}^2} \right)$$

$$a_{11} = -2 \frac{C_r + C_f}{mu} \quad a_{12} = 2 \frac{bC_r - aC_f - u}{mu}$$

$$a_{21} = 2 \frac{bC_r - aC_f}{I_z u} \quad a_{22} = -2 \frac{b^2 C_r + a^2 C_f}{I_z u}$$

$$b_1 = 0 \quad b_2 = \frac{1}{I_z} \quad e_1 = \frac{2C_f}{m} \quad e_2 = \frac{2aC_f}{I_z}$$

式中 u ——车体速度沿汽车纵向的分量
 w ——车轮角速度

$$M_z \text{ 还可以表示为}$$

$$M_z = \frac{B}{2} (F_{xro} - F_{xri})$$

(5)

其中

$$F_{xro} = F_x + \frac{M_z}{B}$$

(6)

$$F_{xri} = F_x - \frac{M_z}{B}$$

(7)

式中 B ——轮距
 F_{xro} ——外侧后驱动轮产生的驱动力
 F_{xri} ——内侧后驱动轮产生的驱动力
 F_x ——转向前车辆直线行驶时的驱动力
汽车在直线行驶时的驱动力方程为

$$F_x = mgf \cos \alpha + \frac{C_d A}{21.25} u^2 + mgs \sin \alpha + \delta' m \frac{du}{dt}$$

(8)

式中 m ——汽车总质量 f ——滚动阻力系数
 C_d ——空气阻力系数 α ——道路坡度
 A ——汽车迎风正面投影面积
 δ' ——考虑汽车旋转部件转动惯量(车轮)的汽车质量换算系数
 du/dt ——汽车行驶加速度

则内、外侧两个驱动轮的驱动扭矩为

$$T_{mo} = F_{xro} r_w$$

(9)

$$T_{mi} = F_{xri} r_w$$

(10)

式中 r_w 为车轮的滚动半径,在保证轮胎压力正常范围之内可以认为车轮滚动半径等于车轮的名义半径。

2 轮毂电机及电池的选择

轮毂电机的选择首先应确定电机的类型,本文采用永磁无刷直流电机。首先根据表 1 中最高车速、最大爬坡度以及加速度,计算确定出待选电机的功率。根据负载情况,计算出待选电机应满足的扭矩要求^[11~12]。

(1) 轮毂电机功率
电动汽车匀速行驶时轮毂电机输出功率为

$$P_A = \frac{1}{\eta} \left(\frac{fG \cos \alpha}{3\,600} + \frac{C_d A u^3}{21.15 \times 3\,600} + \frac{G u \sin \alpha}{3\,600} \right)$$

(11)

由于本文采用外转子式轮毂电机,因此传动效率 η 取 1,滚动阻力系数 f 取 0.015,空气阻力系数取 0.25,根据车辆宽度和高度,其迎风面积为 1.2 m^2 。

电动汽车以最高速度行驶在平坦路面上时 u 为 60 km/h , α 取为 0。根据式(11)计算,此时轮毂电机输出功率为 6 kW ,因此电动汽车所需轮毂电机的

表 1 整车参数

Tab. 1 Vehicle parameters

参数	数值
续航里程/km	80
长×宽×高/mm×mm×mm	2 695×1 559×1 542
乘坐人数	2
轴距/mm	1 870
整车装备质量/kg	880
最小转弯半径/m	6
最高车速/km·h ⁻¹	60
最大爬坡度/(°)	25~30
制动刹车距离/m	6
系统结构驱动方式	双后轮驱动
变速装置	自动变速装置
驻车制动形式	手操纵,作用于后轮
电池	铅酸蓄电池
充电时间/h	7
电力系统	12 V DC
额定转矩/N·m	≥53.82×2
空载电流/A	≤4.5
额定效率/%	≥86

最大功率应大于 6 kW。由于设计中采用的是双轮后驱结构,因此单个轮毂电机的功率应大于 3 kW。

(2) 轮毂电机扭矩

轮毂电机的扭矩应能满足驱动力的要求。在汽车启动时,驱动力应大于滚动阻力、空气阻力以及坡道阻力之和。当汽车加速行驶时,驱动力应大于等于滚动阻力、空气阻力、坡道阻力以及加速阻力之和。而电机提供的输出驱动力应大于驱动力,但同时应能满足车辆驱动的附着条件。在计算中通常驱动轮所承载的重力乘以一个附着系数 φ 得到输出驱动力的允许最大值, φ 与轮胎、路面条件有关,通常取为 0.8。

$$T_{\max} \geq \frac{2r_w}{\eta} \left(fG \cos \alpha + \frac{C_d A u^2}{21.15} + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \right)$$

(12)

$$T_{\max} \leq \varphi \frac{2r_w}{\eta} \theta G$$

(13)

式中 θ ——驱动轮载荷分布系数

计算时, α 应取最大爬坡角度,驱动轮半径为 0.29 m。则单个轮毂电机的最大扭矩应大于 177.18 N·m,小于 293.32 N·m。取过载系数为 3,则额定扭矩应大于 59.06 N·m,小于 97.77 N·m。

综上所述,在满足功率及转速要求的基础上,根据电机规格,选择 2 个额定功率为 3.7 kW、额定转速为 600 r/min、额定扭矩为 90 N·m 的轮毂电机作为整车的驱动部件。轮毂电机的驱动电压为 72 V。

(3) 电池的选择

选择电池的类型为铅酸蓄电池,该种电池技术

较为成熟,维护简单,具有较高性价比。在选取电池组电压时,根据轮毂电机的驱动电压进行匹配,并且应保证电池组能够满足轮毂电机的电压变化要求。电池组的电压选为 72 V,采用 6 块单块电压为 12 V 电池串联而成^[13~14]。

在选择电池容量时,应考虑能满足行驶里程参数要求以及在行驶过程中其他车载电器消耗的电能。电池组能量 W 应满足

$$W = \left[P_1 + \frac{u}{3\,600\eta} \left(Gf + \frac{C_d A u^2}{22.15} \right) \right] \frac{S}{u}$$

(14)

式中 P_1 ——车载电器使用功率

S ——行驶里程

根据计算,选择单个电池的容量为 120 A·h。

3 动力系统建模与仿真

ADVISOR 是 1994 年在 Matlab 和 Simulink 软件环境下开发的车辆仿真软件。经 ADVISOR 分析的结果已被大量的实践证明拥有良好的可靠性与实用性。现在世界范围内有许多汽车企业、研究机构以及高校都在使用 ADVISOR 进行汽车特别是电动汽车的仿真研究^[15]。

3.1 定义车辆

(1) 整车定义

根据表 1 整车参数以 EV1 车型为基础,对 VEH_EV1.m 文件进行编辑修改。整车滑行质量(整车除去电动机、电池、传动系的质量)取 550 kg。空气阻力系数取 0.19。迎风面积取 1.2 m²。前轴载荷占整车质量的百分比取 0.4。轴距取 1.86 m。整车质心高度取 0.35 m。整车最大质量(含乘客以及货物)取 1 080 kg。

(2) 电池定义

能量存储模块系统根据功率总线的功率需求,通过电池组电压/内阻模块、功率限制模块和电流值计算模块 3 个子模块,计算出功率总线实际得到的功率,并通过 SOC 算法子模块计算得到 SOC 值变化曲线。根据选择电池的具体参数,对 ESS_Pb12.m 文件进行编辑修改。ess_max_ah_cap 电池容量随 SOC 值以及温度的变化取[100 110 120]。ess_module_num 为电池组包含电池个数,取 6。ess_module_mass 为单体电池的质量,取 25 kg。

(3) 电机定义

在该模块中,程序根据转子所需转矩和转速,通过电机转速预估程序在参考电机输出功率 Map 图的基础上计算得到电机所需的输入功率。再根据电机输入功率求出转子可得到的驱动转矩和转速。ADVISOR 中没有轮毂电机驱动型电动汽车的模型,

故对现有的电动汽车模型进行修改。根据电机的外转子结构对传动部件参数进行调整,将电机参数相应设置为单个轮毂电机的两倍。根据选择电机的参数,以 MC_PM16.m 文件为基础进行修改。定义电机的转矩范围,mc_map_trq = [-180 -150 -120 -90 -60 -30 0 30 60 90 120 150 180];电机转速范围,mc_map_spd = [0 100 200 300 400 500 600 750];电机最大电流,mc_max_crrnt = 140 A;电机最低工作电压,mc_min_volts = 70 V;电机质量,mc_mass = 18 kg。

(4) 定义变速器

轮毂电机驱动型电动汽车不存在机械式的减速器和变速器,所以在定时变速器时可以将该部件的质量定义为 0,传动总效率定义为电机和车轮连接的传动效率。

(5) 定义车轮

该模块存在两路运算路线,一路是根据下级模块的需求计算得到上级模块的需求,模型从车轮所需的驱动力和转速通过牵引力控制接口和轮胎滑移率模块计算传动系应提供的转矩和转速;另一路由上级模块发出的功率计算到下级模块,得到实际的功率,根据传动系提供的转矩和转速通过前/后制动控制接口和轮胎滑移率等模块计算出车轮获得的扭矩和转速。定义车轮滚动半径,wh_radius = 0.29 m;定义轮胎转动惯量,wh_inertia = $40 \times wh_radius^2/2$;定义轮胎的滚动阻力系数,wh_1 st_rrc = 0.009 38。

3.2 循环工况的选择

本次仿真采用 3 种城市典型路况主流循环工况的联合仿真,其速度时间曲线如图 1 所示。

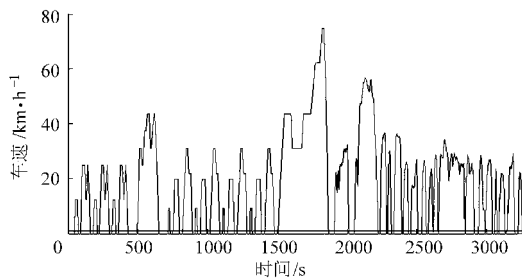


图 1 联合仿真工况

Fig. 1 Combined simulation conditions

在 3 种工况的联合工况下循环周期为 3 256 s,行驶里程为 27.09 km,平均速度为 29.94 km/h,平均加速度为 0.53 m/s^2 ,其间停车 37 次。

选择 Acceleration Test,通过 Accel Options 设置加速度区间,测试车辆的加速性能。本次仿真中选择 3 个加速性能测试区间,分别为 0 ~ 60、30 ~ 60、0 ~ 40 km/h。

选择 Gradeability Test,通过 Grade Options 设置车速,测试车辆在某一速度下的最大爬坡角度。本次仿真测试车辆在 40 km/h 恒速下的最大爬坡角度。

以 CYC_CONST_65 为基础进行修改,将其 M 文件中的 VEL 值改为 40,并将循环次数设为 40 次,以测试车辆在 40 km/h 恒速下的续航里程。选择 CYC_ECE_EUDC 工况,循环次数设置为 10 次,测试车辆在典型城市路况下的续航里程。

3.3 仿真结果

建立车辆模型,设置好循环路况之后,进行计算仿真。3 种典型城市路况下车辆的动力学仿真结果及车辆加速、爬坡数据如图 2 所示。得出本车动力性能能够很好地适应城市路况。

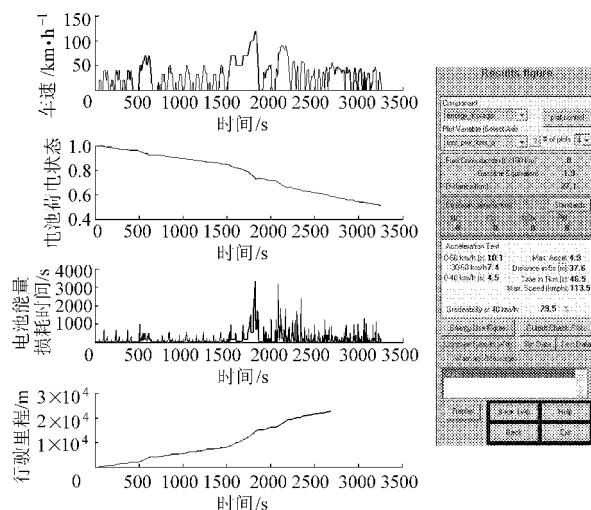


图 2 整车动力学仿真结果

Fig. 2 Dynamic simulation result of electric vehicle

车辆从静止到额定最大车速的加速时间为 10.1 s,车辆在 40 km/h 的恒速下的最大爬坡角度为 29.5° ,均能满足设计要求。

在 CYC_ECE_EUDC 工况下进行连续 10 次的仿真,得到车辆速度及里程随时间曲线如图 3 所示,在此工况下汽车的最大续航里程为 90.8 km,满足设计要求。

综上所述,经过仿真分析说明,经计算选定的整车部件能够达到设计要求,整车动力学分析计算过程是正确合理的。

4 实验验证

利用作者自行设计的轮毂电机两后轮独立驱动的电动车骨架样车进行了实验,所用的电动汽车骨架样车如图 4 所示。实验结果如表 2 所示。

以上结果优于设计参数和仿真结果,主要是由于采用的骨架样车没有车身,空气阻力小。但实际

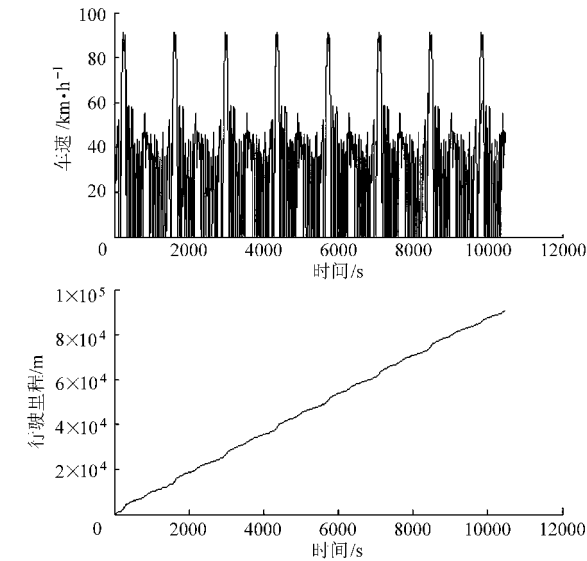


图3 电动汽车 EUDC 工况下的续航里程
Fig.3 EUDC condition mileage of electric vehicle

运行结果接近于仿真结果,验证了仿真的合理性。

5 结论

(1) 针对两后轮独立驱动的轮毂电机驱动型电动汽车进行了整车动力学分析,建立了电动汽车行驶时的动力学方程。

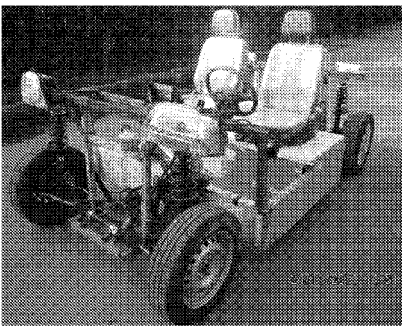


图4 电动汽车骨架样车
Fig.4 Electric frame car

表 2 电动汽车实际运行结果
Tab.2 Running result of electric vehicle

参数	数值
0 ~ 60 km/h 加速时间/s	9.2
最大爬坡度/(°)	30
最大续航里程/km	98

(2) 通过对电动汽车的动力学分析,对电动汽车各动力部件进行了选择与匹配。

(3) 在 ADVISOR 下根据理论分析计算建立了整车动力学模型并进行了仿真。仿真结果表明,整车动力系统的设计能够满足参数要求,证明了整车动力学分析的正确性。

参 考 文 献

1 褚文强,辜承林. 电动车用轮毂电机研究现状与发展趋势[J]. 电机与控制应用,2007,34(4):1~5.
Chu Wenqiang, Gu Chenglin. Application status and developing tend of in-wheel motors used for electric automobile[J]. Electric Machines & Control Application, 2007,34(4):1~5. (in Chinese)

2 王良模,柏卫军. 双电机分散驱动轮式电动汽车仿真[J]. 农业机械学报,2007,38(1):193~194.
Wang Liangmo, Bai Weijun. Simulation of electric vehicle driven by two in-wheel motors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(1):193~194. (in Chinese)

3 Kim Donghyun, Shin Kyeongho, Kim Youngkwang, et al. Integrated design of in-wheel motor system on rear wheels for small electric vehicle[J]. World Electric Vehicle Journal, 2011, 4(1):597~602.

4 王猛,孙泽昌,卓桂荣,等. 电动汽车制动能量回收系统研究[J]. 农业机械学报,2012,43(2):6~10.
Wang Meng, Sun Zechang, Zhuo Guirong, et al. Braking energy recovery system for electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):6~10. (in Chinese)

5 程博,李雪,叶敏,等. 电动汽车控制系统与弱磁扩速研究[J]. 农业机械学报,2012,43(10):8~13.
Cheng Bo, Li Xue, Ye Min, et al. Control system and flux-weakening algorithm of electric vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10):8~13. (in Chinese)

6 Zhang Chunxiang, Wang Zaizhou, Wang Zhongliang, et al. Research torque control precision of in-wheel-motor for electric vehicle[J]. Journal of Beijing Institute of Technology: English Edition, 2011,20(2):115~118.

7 郭海龙,李礼夫. 混联式 HEV 发动机输出转矩实时测算方法[J]. 农业机械学报,2011,42(10):30~34.
Guo Hailong, Li Lifu. Engine output torque real-time calculation for parallel-serial HEV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(10):30~34. (in Chinese)

8 Yin Dejun, Omae Manabu, Shimizu Hiroshi, et al. Active stability control strategy based on maximum transmissible torque estimation[J]. Journal Automotive Safety and Energy, 2011,2(1):34~38.

9 Esmailzadeh E, Gooarzi A, Vossoughi G R. Optimal yaw moment control law for improved vehicle handling[J]. Mechatronics, 2003, 13(7):659~675.

10 Feng C S, Chen S L. Stochastic stability of Duffing - Mathieu system with delayed feedback control under white noise excitation [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2012, 17(10):3763~3771.

25(17):121~126.

Liu Yi, He Yikang, Qin Feng, et al. Investigation of rotor saliency-tracking based sensorless vector control drive for PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(17):121~126. (in Chinese)

- 8 Nakashima S, Inagaki Y, Miki I. Sensorless initial rotor position estimation of surface permanent-magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000,36(6):1 598~1 603.
- 9 Jang J H, Ha J I, Ohto M, et al. Analysis of permanent-magnet machine for sensorless control based on high-frequency signal injection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004,40(6):1 595~1 604.
- 10 张立红. 基于高频注入法的永磁同步电机无传感器控制系统研究[D]. 天津:天津大学,2008.
Zhang Lihong. Investigation of sensorless control system for permanent magnet synchronous motor based on high frequency signal injection method[D]. Tianjin:Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- 11 Jeong Y, Lorenz R D, Jahns T M, et al. Initial rotor position estimation of an interior permanent magnet synchronous machine using carrier-frequency injection methods[C]//IEMDC'03. IEEE International Electric Machines and Drives Conference,2003,2:1 218~1 223.
- 12 Parasiliti F, Petrella R, Tursini M. Sensorless speed control of salient rotor PM synchronous motor based on high frequency signal injection and Kalman filter[C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics,2002,2:623~628.
- 13 韦克康,周明磊,郑琼林,等. 基于复矢量的异步电机电流环数字控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6):89~94.
Wei Kekang, Zhou Minglei, Zheng Qionglin, et al. Discrete-time current controller for induction motors based on complex vector [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6):89~94. (in Chinese)
- 14 刘家曦. 无传感器内嵌式永磁同步电机转子磁极位置检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
Liu Jiaxi. Research on IPMSM sensorless rotor position estimation [D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- 15 秦峰. 基于电力电子系统集成概念的 PMSM 无传感器控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
Qin Feng. Investigation of sensorless control for PMSM based on the concept of power electronic system integration [D]. Hangzhou:Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- 16 吴志红,武四辈,朱元,等. 车用内置式永磁电动机转矩多参数统一控制方法[J]. 农业机械学报,2012,43(6):30~34.
Wu Zhihong, Wu Sibe, Zhu Yuan, et al. Torque control method of multi-parameter integrated for IPMSM in vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(6):30~34. (in Chinese)
- 17 吴志红,王双全,朱元,等. 车用永磁同步电动机电流环偏差解耦控制系统[J]. 农业机械学报,2011,42(12):18~24.
Wu Zhihong, Wang Shuangquan, Zhu Yuan, et al. Current loop deviation decoupling control system of permanent magnet synchronous motor in vehicle application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(12):18~24. (in Chinese)

(上接第 37 页)

- 11 何洪文,余晓江,孙逢春,等. 电动汽车电机驱动系统动力特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6):136~140.
He Hongwen, Yu Xiaojang, Sun Fengchun, et al. Study on power performance of traction motor system for electric vehicle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(6):136~140. (in Chinese)
- 12 Wongun Kim, Kyongsu Yi, Jongseok Lee. Drive control algorithm for an independent in-wheel motor drive vehicle [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(6):1 573~1 581.
- 13 Moselev P T. The advanced lead—acid battery consortium—a worldwide cooperation brings rapid progress[J]. Journal of Power Sources,1999,80(1~2):1~6.
- 14 Han J, Kim D, Sunwoo M. State-of-charge estimation of lead-acid batteries using an adaptive extended Kalman filter [J]. Journal of Power Source, 2009, 188(2):606~612.
- 15 Wipke B, Cuddy M R, Burch S D. ADVISOR 2.1: a user friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach[J]. Vehicular Technology, 1999,48(6):1 751~1 761.