

微型纯电动汽车的系统构型与关键参数设计*

谷靖, 欧阳明高, 卢兰光, 李建秋

(清华大学汽车工程系, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

[摘要] 本文中为微型纯电动汽车选定了轮毂电机驱动方式, 并研究其构型和参数设计。首先构建了由整车控制器、电机控制器和电池管理系统组成的分布式控制系统以及能量回馈制动与液压制动协调配合的并联复合制动系统。然后进行关键部件的参数设计, 先确定整车目标性能参数, 再根据车辆动力学计算与 Matlab/Simulink 仿真结果, 确定轮毂电机和动力电池的性能参数并进行选型。最后通过仿真与整车试验验证整车性能满足设计指标。

关键词: 微型电动汽车; 轮毂电机; 系统构型; 分布式控制系统; 参数设计

System Configuration and Key Parameters Design of a Micro Electric Vehicle

Gu Jing, Ouyang Minggao, Lu Languang & Li Jianqiu

Department of Automobile Engineering, Tsinghua University, State Key Laboratory of Automobile Safety and Energy, Beijing 100084

[Abstract] In this paper an in-wheel motor drive is chosen for a micro electric vehicle with its system configuration and key parameters design investigated. Firstly a distributed control system consisting of vehicle control unit, motor control units and battery management system and a parallel compound braking system coordinately matching the energy feedback braking with hydraulic braking are configured. Then the parameters of key components are designed. Based on the objective performance parameters of vehicle defined, the parameters of in-wheel motors and power battery are determined according to the results of vehicle dynamic calculation and Matlab/Simulink simulation. Finally the simulation and vehicle test verify that the vehicle performance meets the design indicators.

Keywords: micro electric vehicles; in-wheel motor; system configuration; distributed control system; parameter design

前言

随着能源和环境危机的加剧, 新能源汽车被认为是解决交通问题的有效方案^[1]。纯电动汽车由于具有高效无污染等优点, 成为各国汽车制造商的研究重点。但与传统汽车相比, 有限的续航里程和高昂的成本仍然是制约纯电动汽车发展的瓶颈。

麦肯锡和上海市政府对电动汽车潜在消费者的一项调查表明, 76% 的人平均每天行驶里程小于 75km^[2]。因此, 汽车制造商应该首先开发续航里程能满足大多数驾驶人需求的具有价格吸引力的电动车, 而不是各方面都要求与传统汽车匹敌的电动车

型。在当前的电池技术条件下, 续航里程能满足大部分人日常出行需求的纯电动汽车应该成为电动汽车大规模产业化的切入点^[3]。

基于上述分析, 本文中选择了轮毂电机驱动的微型纯电动汽车作为研究目标。首先对微型纯电动汽车进行系统构型设计, 开发了由整车控制器、电机控制器和电池管理系统组成的分布式控制系统, 并设计了能量回馈制动与液压制动协调配合的并联复合制动系统。在关键零部件参数的设计上, 确定整车的目标性能参数, 包括动力性和续航里程指标, 采用车辆动力学计算和 Matlab/Simulink 仿真的方法确定轮毂电机和动力电池的性能参数, 并进行选型。最后, 由于受到试验设备和场地的限制, 整车性能参数的

* 国家 863 计划项目(2008AA11A126)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-10-0498)资助。

原稿收到日期为 2011 年 9 月 5 日, 修改稿收到日期为 2011 年 11 月 4 日。

验证采用仿真与车辆试验相结合的方式,证明所设计的车辆满足性能指标的要求。

1 微型纯电动汽车的系统构型

1.1 轮毂电机与分布式控制系统设计

电动汽车可以采用单电机和轮毂电机直接驱动等形式。与使用单电机的传统驱动型式相比,轮毂电机直接驱动可以省略包括减速器、差速器和传动轴等机械部件,因此降低了机械损耗。每个轮毂电机的驱动/制动转矩可以快速、精确和独立地控制,使车辆的稳定性得到增强^[4-5]。采用轮毂电机驱动,可使汽车的设计过程获得更大的自由。各大汽车厂商纷纷开发轮毂电机驱动技术,并将其视为未来的汽车驱动方案^[6]。

4个轮毂电机分别由4个电机控制器控制,整车控制器(VCU)、电机控制器(MCU)和电池管理系统(BMS)通过TTCAN总线组成了一个分布式控制系统,如图1所示。

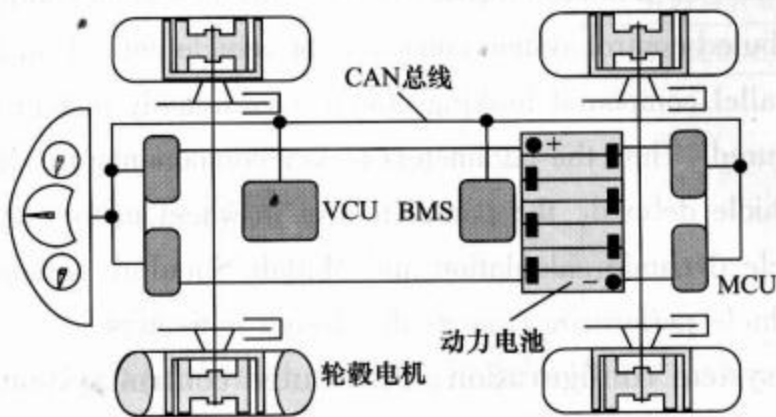


图1 微型电动车结构示意图

整车控制器根据驾驶员操作、整车状态传感器输入和其余各系统通过CAN网络反馈的信息,执行整车控制算法,给各部件发送控制命令,协调各部件的工作。4个电机控制器根据整车控制器的命令,对电机进行闭环控制,并实时向整车控制器反馈电机及其控制器的状态信息。电池管理系统根据整车控制器的命令和电池自身状态,对电池进行管理和维护,并向整车控制器反馈状态信息。

整车控制器的控制算法框图如图2所示,主要分为基本管理模块和上层控制算法模块两部分。基本管理模块中包括输入信号处理、驾驶员需求解释、系统故障诊断和控制信号输出等部分。上层控制算法模块中充分利用4个轮毂电机独立驱动的优势,实施纵向动力学控制、横向动力学控制、转矩分配和整车状态监控道路识别等先进的算法,以提高整车

的经济性、操控性和安全性。

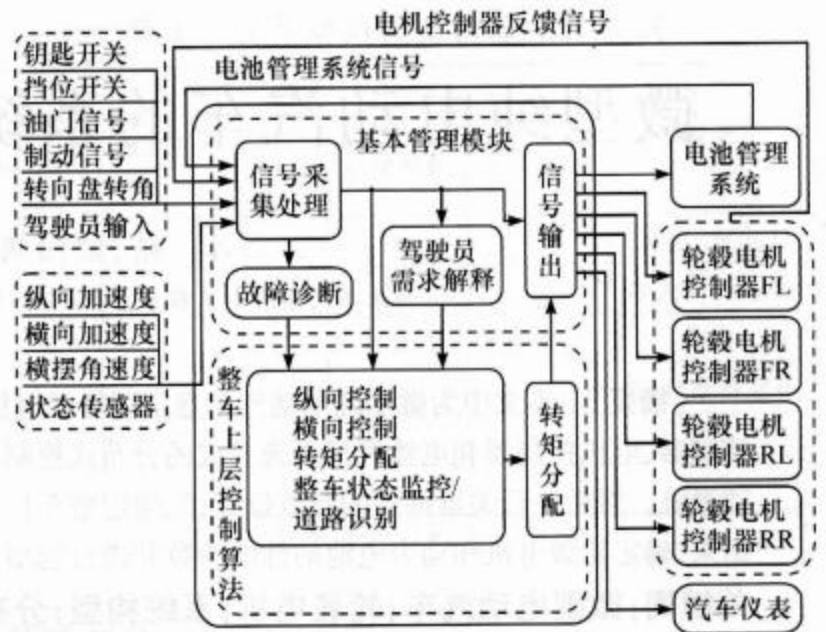


图2 整车控制器控制算法框图

1.2 并联复合制动系统设计

电动汽车可通过能量回馈制动回收部分能量,提高能量利用效率。但能量回馈制动有时会无法提供足够的制动力(如电池SOC很满或车速很低时),因此需要液压制动系统来保证制动的安全性和可靠性。

能量回馈制动与液压制动的协调配合对电动车的能量利用效率有很大影响,一般分为并联和串联两种方式。串联协调制动方式需要独立控制能量回馈制动和液压制动的制动力,须设计复杂的液压制动系统,如丰田的Prius^[7]。本文中设计的微型电动车采用较为简单的并联协调制动方式,只能控制电机的能量回馈制动,而液压制动力不可控。

为了最大限度地回收制动能量,将液压制动的踏板空行程取得较大,这样在初始踏板行程中只有纯电制动,当继续踩下踏板时,能量回馈制动与液压制动共同作用,产生制动力,使车辆减速。液压制动与能量回馈制动的关系如图3所示。

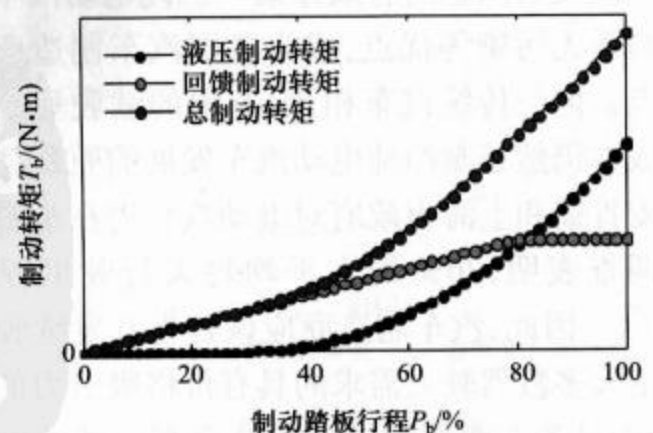


图3 液压制动与能量回馈制动之间的协调配合

由于液压制动力大小与制动踏板行程之间的关系受到制动管路的弹性和制动液动态过程等因素的影响,并不存在一一对应的关系,只是定性说明,而能量回馈制动力受电池 SOC 和电机转速的影响,在不同工况下所能提供的制动性能会出现不同,导致驾驶员的制动感受会出现差异,这也是并联协调制动相对于串联协调制动的劣势。

2 驱动系统设计

根据微型纯电动汽车的市场定位和需求确定整车的性能指标,包括动力性指标和续航里程指标,然后确定轮毂电机和动力电池的性能参数。

根据车辆动力学由整车的动力性指标可计算得到电机的参数,首先确定整车质量,其中电池质量由续航里程决定,而续航里程与电机的效率直接相关。为简化设计过程,先根据经验估计动力电池的质量,在电机选型完成之后,再通过 Matlab/Simulink 对车辆的续航里程进行仿真,验证确定的动力电池参数是否合理,并进行动力电池选型。电池质量估计值可以适当大一些以预留动力性裕度。

2.1 整车性能参数

微型纯电动汽车的设计目标是面向中小城市的短途纯电动交通解决方案,整车的最高车速被设置为 50km/h,其余参数如表 1 所示。

表 1 整车目标性能参数

最高车速 $u_{\max}/(\text{km/h})$	>50
最大爬坡度 $i/\%$	>20
0-40km/h 加速时间 t_{40}/s	<10
续航里程 S/km	>80

2.2 轮毂电机驱动系统参数设计

车辆纵向动力学公式如下:

$$F_d = F_r + F_g + F_w + F_a \quad (1)$$

$$F_r = (m_v + m_{\text{cap}} + m_b) g f \cos \alpha \quad (2)$$

$$F_g = (m_v + m_{\text{cap}} + m_b) g \sin \alpha \quad (3)$$

$$F_w = \frac{1}{2} C_d A \rho u^2 \quad (4)$$

$$F_a = (\delta m_v + m_{\text{cap}} + m_b) \frac{du}{dt} \quad (5)$$

$$T_d = F_d r \quad (6)$$

式中: F_d 为驱动力; F_r 为滚动阻力; F_g 为坡道阻力; F_w 为空气阻力; F_a 为加速阻力; m_v 为车辆空载质量(不包括电池); m_{cap} 为最大载质量; m_b 为动力电池

质量; f 为滚动阻力系数; α 为坡道角度; C_d 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度; u 为车辆行驶速度; δ 为旋转质量换算系数; T_d 为总驱动转矩; r 为车轮滚动半径。

通过广泛收集各汽车厂商开发的电动汽车的数据可知,电动汽车的能耗大致与车辆的整备质量成正比,每吨整备质量对应的 100km 能耗约为 10 ~ 14kW·h,根据微型电动汽车的整备质量,可以假设微型电动车的 100km 能耗为 7.5kW·h,取电池组能量密度为 70W·h/kg,根据 80km 的设计续航里程,估计电池质量为 86kg,取 100kg。微型电动车设计载两人,最大载质量取 150kg,其余整车性能仿真参数如表 2 所示,参数的选取基于相似车型收集的数据以及项目前期研发的结果。

表 2 整车性能仿真参数

整备质量(不包括电池) m_v/kg	450
电池质量 m_b/kg	100
最大载质量 m_{cap}/kg	150
车轮滚动半径 r/m	0.25
滚动阻力系数 f	0.015
车辆迎风面积 A/m^2	1.4
空气阻力系数 C_d	0.4
空气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.225 8
旋转质量换算系数 δ	1.03

根据上述参数计算在不同坡度下整车匀速行驶时的车辆行驶阻力,如图 4 所示。据此得出对电机的转矩需求,如图 5 所示。

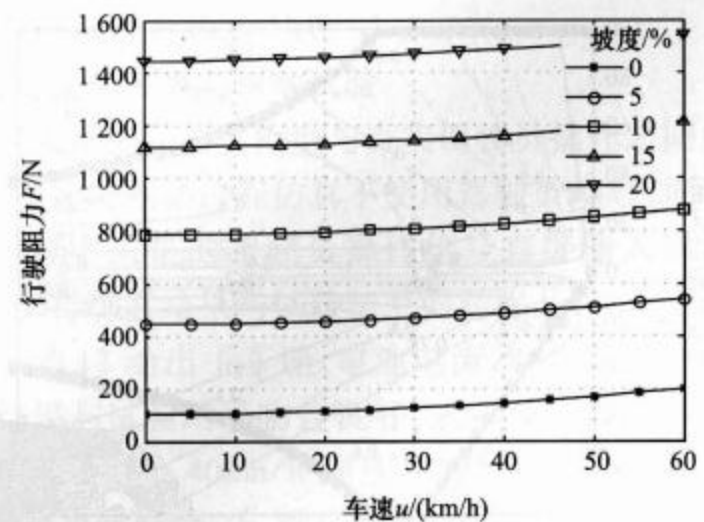


图 4 不同坡度车辆匀速行驶情况下的行驶阻力

根据上述计算结果,为保证最大爬坡度 20% 的要求,4 个轮毂电机的最大总输出转矩应不小于 362N·m;为保证车辆最高车速 50km/h 的要求,电机转速为 530r/min 时的总输出转矩应大于 70N·m。

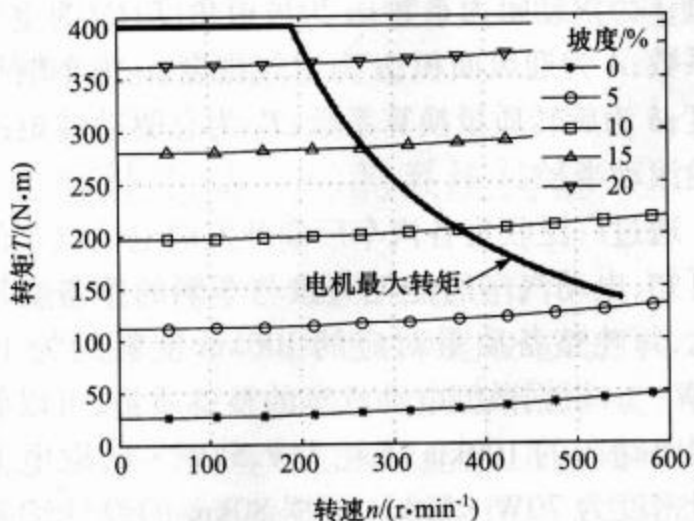


图5 不同坡度车辆匀速行驶情况下的电机转矩需求

考虑一定的动力性冗余,将电机最大总输出转矩设定为400N·m,最大功率输出设定为8kW。

根据计算所得的电机性能指标对电机进行选型,所选的电机性能参数如表3所示。对其效率进行测试,得到逆变器与电机的效率MAP图如图6所示,其中粗实线为电机的最大输出特性,负转矩表明电机处于能量回馈模式。

表3 电机性能参数

电机类型	永磁同步电机
额定功率 P_r /kW	1
最大功率 P_{max} /kW	2
额定转矩 T_r /(N·m)	20
最大转矩 T_{max} /(N·m)	100
额定转速 n_r /(r·min ⁻¹)	500
最大转速 n_{max} /(r·min ⁻¹)	600

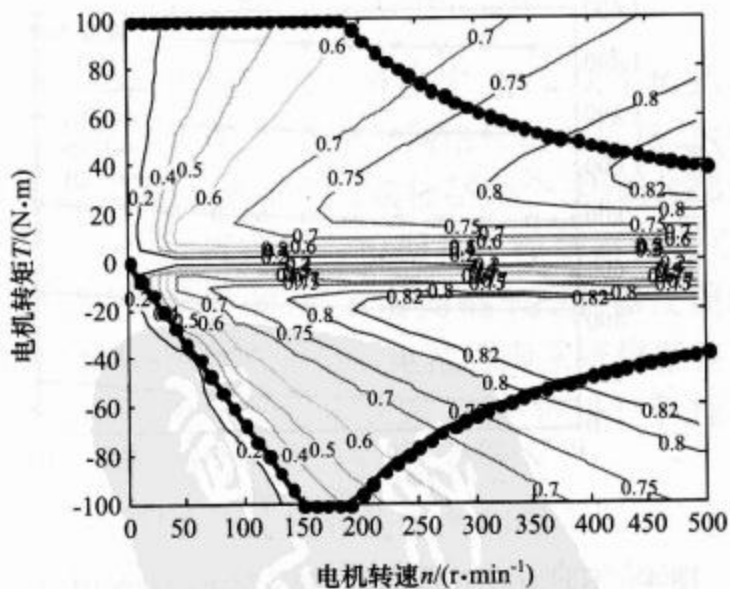


图6 轮毂电机效率MAP图

3 动力电池容量设计

续驶里程受到电机效率、能量回馈制动策略、道

路循环工况和电池性能等因素的影响,须通过道路工况循环仿真的方法来确定。在Matlab/Simulink中搭建整车系统模型,以验证续驶里程是否满足设计指标,并根据仿真结果进行动力电池的选型。

3.1 整车系统模型

整车系统模型由驾驶员模型、整车控制算法、车辆动力学模型、电机模型和动力电池模型等部分组成,如图7所示。

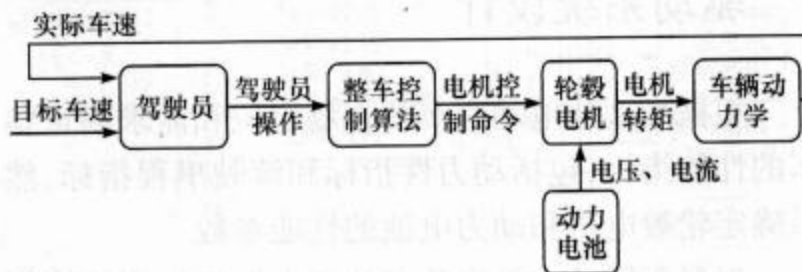


图7 整车系统仿真模型

驾驶员模型模拟驾驶员对加速踏板和制动踏板的操作,本质上为PI控制器。整车控制算法模块执行根据驾驶员输入、按照整车控制算法给出控制命令。车辆动力学模型根据式(1)~式(6),并采用表2中的参数,模拟整车在道路上的运动。电机模型仿真轮毂电机对整车控制器的转矩命令的响应,由于电机转矩响应很快而且准确,其动态过程可以忽略,电机的效率通过图6的效率MAP查表得到。动力电池模型采用文献[8]中的PNGV模型,仿真精度较高,仿真中所用的电池为锰酸锂电池,额定电压为48V,容量为150A·h。

3.2 整车城市道路工况仿真

续驶里程的仿真基于乘用车城市典型工况循环,由于微型电动车的最高车速仅为50km/h,因此将乘用车城市典型工况循环的车速按50/74的比例缩小。为保证电池寿命,设定当电池SOC下降到25%时停止仿真。图8为一个循环的仿真结果,可

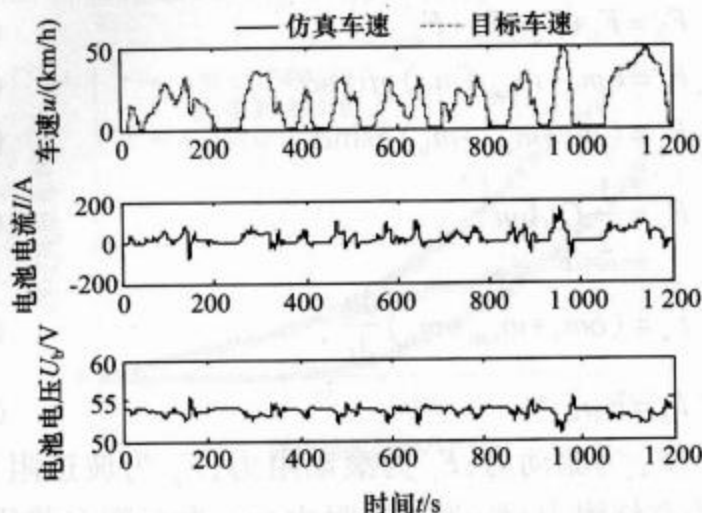


图8 城市工况循环仿真

以看出实际车速对目标车速的跟踪情况良好。仿真结果显示,车辆在城市道路循环工况下的续驶里程为 87.7km,满足设计要求。

根据仿真结果对动力电池进行选型,如表 4 所示,对电池组实际参数进行测试,电池组的开路电压特性见图 9。由于实际电池质量低于预估值,因此整车动力性以及续驶里程性能应该优于设计值。

表 4 电池性能参数

电池类型	锰酸锂
电池电压 U_b/V	48
额定容量 $C_b/(A \cdot h)$	150
电池质量 m_b/kg	90

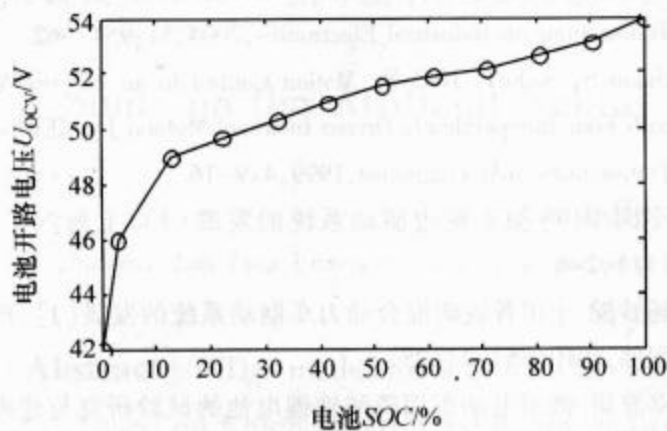


图 9 电池组开路电压特性

4 微型纯电动汽车性能验证

通过仿真与实车试验的方法验证整车性能是否满足设计指标。由于受场地限制,只能进行加速与制动试验。通过试验结果与仿真结果的对比还可验证整车模型的精度,从而说明仿真结果的可信度,弥补实车试验受到限制的缺憾。

4.1 整车动力性能仿真

首先进行加速性能仿真,道路坡度为 0,结果如图 10 所示,0-40km/h 加速时间为 7.5s,可实现最高车速 51.2km/h,满足设计要求。

车辆爬坡能力的仿真结果如图 11 所示,表明车辆在 20% 的坡度上能实现 24.3km/h 的车速,不过加速过程比较缓慢,而且由于车辆一直在大转矩工况下运行,电机效率偏低。

4.2 整车续驶里程仿真

由于最终选定的电池质量比预估值少 10kg,须对模型参数进行修正,重新仿真。

仿真结果表明,车辆在城市道路循环工况下的

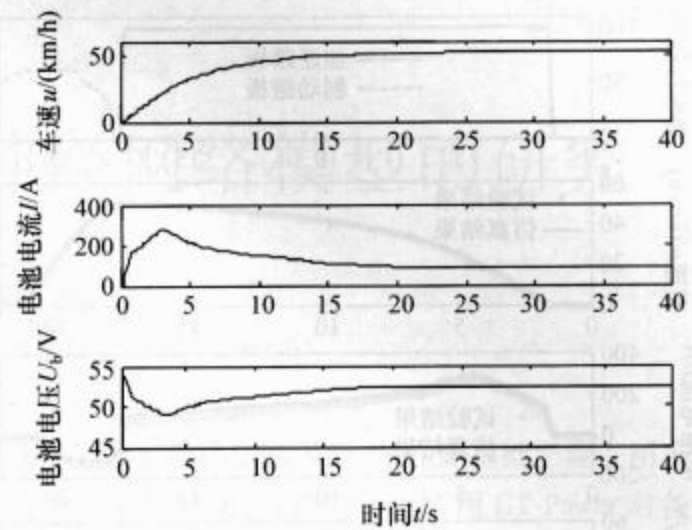


图 10 车辆加速性能仿真

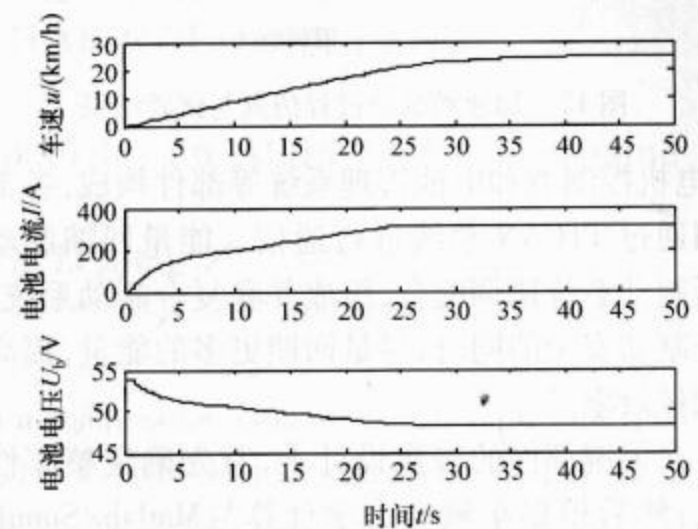


图 11 车辆爬坡性能仿真

续驶里程为 89.4km,整个行驶过程中,电池释放能量 6.3kW·h,能量回馈 0.6kW·h,即能量回馈制动回收了约 9.5% 的能量,最终能耗为 5.7kW·h,折合 100km 能耗为 6.5kW·h。

4.3 整车加速与制动试验

为避免驾驶员模型与真实驾驶员操作之间的差异,加速与制动过程仿真不使用驾驶员模型,而将试验过程中采集的驾驶员操作信号直接输入到模型中,进行仿真结果与试验结果的对比。

图 12 给出了车速、电池电流和电压的曲线,仿真结果与试验结果吻合良好,表明模型具有较高的精度;整车 0-40km/h 加速时间约为 7.6s,车速在 17s 时达到 50km/h,满足性能指标要求。

5 结论

进行了轮毂电机驱动的微型纯电动汽车的系统构型以及关键部件参数设计。轮毂电机驱动的微型纯电动汽车采用分布式控制系统架构,由整车控制

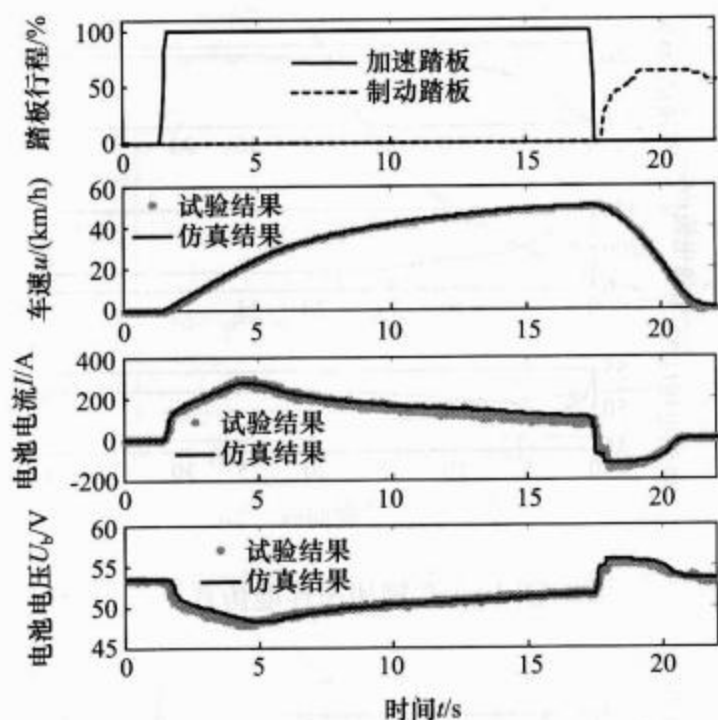


图12 加速和制动过程仿真与试验结果

器、电机控制器和电池管理系统等部件构成,各部件之间通过 TTCAN 总线进行通信。能量回馈制动与液压制动系统协调配合,组成并联复合制动系统,在保证制动安全的同时,尽量回馈更多的能量,提高整车能量效率。

在关键部件的参数设计上,首先确定整车性能参数;然后根据车辆动力学计算与 Matlab/Simulink

仿真,确定轮毂电机和动力电池的性能参数并进行选型;最后通过仿真与整车试验的方法验证整车性能满足设计指标。

参考文献

- [1] Chan ChingChuen. Outlook of Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles[J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2011, 2(1): 12-24.
- [2] Woetzel J, Sha Sha, Zhang Haimeng. Electric Vehicles in Megacities-Shanghai Charges Up[R]. Shanghai: McKinsey & Company, 2010.
- [3] 杨裕生,陈清泉,陈立泉,等. 关于我国电动车的技术发展路线建议[J]. 新材料产业, 2010(3): 11-17.
- [4] Hori Y. Future Vehicle Driven by Electricity and Control-Research on Four-wheel-motored "UOT Electric March II" [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51: 954-962.
- [5] Sakai S, SadoH, Hori Y. Motion Control in an Electric Vehicle with Four Independently Driven In-wheel Motors[J]. IEEE-ASME Transactions onMechatronics, 1999, 4: 9-16.
- [6] 宁国宝. 电动车轮边驱动系统的发展[J]. 上海汽车, 2006(11): 2-6.
- [7] 杨妙樑. 丰田普锐斯混合动力车制动系统的发展[J]. 汽车与配件, 2010(35): 23-25.
- [8] 邵静玥. 微型电动车用磷酸铁锂电池的试验研究与建模仿真[D]. 北京:清华大学, 2008.

(上接第6页)

4 结论

(1) 建立了混合动力城市客车驱动系统模型, 主要包括整车纵向动力学模型、发动机模型、锂电池模型和电机模型等。

(2) 将所建立的驱动系统模型下载至整车控制器中与能量管理策略同时实车实时运行, 对模型进行实车验证。结果表明, 所建立的模型精度较高, 这也为后续的能量管理策略优化和动力系统匹配提供了较好的模型平台。

参考文献

- [1] Jeong Yu-seok. Modeling and Simulation of Electric Drive System for Series Hybrid Electric Vehicle[C]. INTELEC 2009, 2009 International Telecommunications Energy Conference, 18-22 Oct. 2009, Incheon, South Korea.
- [2] Joshi Ajinkya S, Shah Nirav P, Chris Mi. Modeling and Simulation of a Dual Clutch Hybrid Vehicle Powertrain[C]. 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 7-10 Sept. 2009, Dearborn, MI, USA: 1666-1673.
- [3] 浦金欢, 殷承良, 张建武, 等. 混合动力轿车的控制策略与建模[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(11): 1917-1921.
- [4] 张翔, 赵韩, 钱立军, 等. 混合动力轿车的建模与仿真[J]. 计算机仿真, 2005, 22(1): 233-237.
- [5] 浦金欢, 严隽琪, 殷承良, 等. 并联式混合动力汽车控制策略的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1543-1547.
- [6] 王庆年, 刘志茹, 王伟华, 等. 混合动力汽车正向建模与仿真[J]. 汽车工程, 2005, 27(4): 392-394.
- [7] 朱诗顺, 任永乐, 郭猛超, 等. 多轮驱动混合动力车辆的建模与仿真[J]. 汽车工程, 2009, 31(9): 829-833.
- [8] 秦大同, 邓涛, 杨阳, 等. 基于前向建模的 ISG 型 CVT 混合动力系统再生制动仿真研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(5): 618-624.
- [9] 徐梁飞, 卢兰光, 李建秋, 等. 燃料电池混合动力系统建模及能量管理算法仿真[J]. 机械工程学报, 2009, 45(1): 141-147.
- [10] 余志生. 汽车理论(第4版)[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [11] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学(第6版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.
- [12] GB/T 19754-2005 重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.