

电动汽车道路工况模拟测试平台

周美兰, 张小明, 刘占华, 张宇

(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 针对电动汽车路况模拟问题, 搭建了一个能真实再现电动汽车道路工况的模拟测试平台。该测试平台采用电机对拖测试方式, 加载电机选用能够正反双向加载电力测功机; 平台使用两个单独控制器实现对电机控制, 依靠上位机发送相关控制指令给控制器来模拟实际中电动汽车行驶道路工况, 实验平台既能满足电机稳态测试需求又能完成瞬态连续循环路况测试。测试表明, 平台响应时间快, 测得数据同理论结果相比, 实验结果均在允许的误差范围之内, 能源利用率也达到80%以上, 说明所搭建的平台不仅满足了模拟测试的要求而且节能效果也非常明显。

关键词: 电动汽车; 道路工况; 模拟测试; 电机对拖; 控制器

DOI: 10.15938/j.jhust.2018.01.015

中图分类号: TM912; U469.72 文献标志码: A 文章编号: 1007-2683(2018)01-0081-06

Simulation Test Platform of Road Conditions for Electric Vehicle

ZHOU Mei-lan, ZHANG Xiao-ming, LIU Zhan-hua, ZHANG Yu

(School of Electrical and Electronics Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the problem of simulating road conditions of the electric vehicle, a test platform is set up to simulate the road conditions of the electric vehicle. The simulation test platform adopts the towed mode to simulate the road conditions of the electric vehicle. Bidirectional electric dynamometer is used for loading motor. The platform uses two separate controllers to achieve the control of the motor, relying on host computer to send the relevant control commands to the controller to simulate the actual driving road conditions of the electric vehicle. Test platform not only can meet the steady-state testing requirements of the motor but also can complete the test of the transient and continuous cycling road. The test shows that the experimental results are all in the allowable error range compared with the theoretical results. The response time of testing platform is faster and the energy utilization rate also reaches more than 80% indicating that the platform achieve the requirements of the simulation test and energy saving effect of the test platform is also very obvious.

Keywords: electric vehicle; road conditions; simulation test; towed motor; controller

收稿日期: 2016-05-27

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(F2016022, E201302).

作者简介: 周美兰(1962—), 女, 博士, 教授, 硕士研究生导师;

刘占华(1991—), 男, 硕士研究生.

通信作者: 张小明(1988—), 男, 硕士研究生, E-mail: 361478138@qq.com.

0 引言

随着全球能源危机加剧,大量排放废气引起温室效应以及近些年来国内出现的越来越多雾霾天,人们对新能源的关注也愈发强烈^[1]。纯电动汽车因“零排放、无污染、低能耗”,受到社会各界对其极大兴趣,政府也出台各种政策加大电动汽车推广力度^[2]。电动汽车日渐兴起,国内外对电动汽车路况模拟平台设计研究更加深入,设计测试平台操作起来更简单、精确、环保^[3-5];电动汽车驱动系统做为评价电动汽车性能^[6-8]优劣重要标准之一,科研高校进行了平台试验方法和快速评价方法研究^[9],室内模拟电动汽车行驶道路工况台架测试台就是测试评价电动汽车驱动系统性能平台,搭建的测试平台给检测电机驱动性能、能量再生制动回收策略^[10-11]提供了很好验证方式,模拟运行的实验数据也给研发人员优化设计方案提供了一定的参考价值。本文测试平台采用能够满足瞬时、双向加载特性的直流电力测功机实现负载加载^[12],电力测功机相较传统磁滞、磁粉、电涡流测功机,不仅体积缩小不少而且在驱动电机带动其发电运行时还能将能量回馈到电网中,使能源利用效率能达到80%以上;平台既能满足电机稳态测试需求又能完成瞬态连续循环路况测试,不仅能够实现实时准确地给驱动电机加载,还能控制其作为电动机带动驱动电机发电运行,模拟汽车刹车制动能量再生状态过程。整个测试平台操作便捷、安全可靠、测试准确、能量利用率高,相较于常见测试平台,本实验测试平台优势还是很明显的。

1 电动汽车驱动系统动力学模型分析

1.1 电动汽车道路行驶受力分析

电动汽车在道路上行驶时会受到多种阻力作用,正常行驶时主要受到地面的滚动摩擦阻力 F_f ,空气阻力 F_w ,爬坡时的坡道阻力 F_i ,加速运行时还需要克服由于汽车自身质量产生的阻碍加速惯性力 F_j ^[13]。

汽车道路行驶时,所提供的驱动力及所受的各个阻力如图1所示:

电动汽车行驶时由动力电池提供克服各种阻力所需能量,电能通过电机经由机械转轴转化为驱动车轮转动的驱动力,电机输出到车轮上的转动与地面之间摩擦力相互作用产生使汽车向前运行的牵

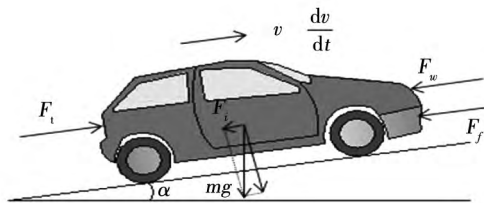


图1 电动汽车道路行驶受力分析

引力。

根据电机功率公式 $Tn = 9.55P$ 可得:

$$T = \frac{9.55P}{n} \quad (1)$$

式中: T 是电机输出电磁转矩; n 电机转速; P 电机输出功率,单位 kW。

电动汽车行驶过程中,汽车与空气对流产生对汽车阻力,大小与速度成正比关系。

阻力大小 F_w 为:

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

式中: ρ 是空气密度; C_d 空气阻力系数; A 是汽车迎风面积; V 是汽车行驶速度。

汽车爬坡时会额外受到坡道阻力作用,坡道的坡度越大汽车受到的阻力就越大。

爬坡时的坡道阻力 F_i 为:

$$F_i = mg \sin \alpha \quad (3)$$

式中: m 汽车总重量; g 重力加速度; α 路面坡度角。

汽车道路行进时,受到地面对车轮摩擦阻力才得以使汽车前行。摩擦阻力大小与汽车同地面间的滚动摩擦系数有关。

滚动摩擦阻力 F_f 为

$$F_f = mg C \cos \alpha \quad (4)$$

式中: m 汽车总重量; g 重力加速度; C 是滚动摩擦系数; α 路面坡度角。

汽车加速时需要克服自身重量产生的惯性力,其值大小与速度变化率相关。

加速惯性力 F_j 为:

$$F_j = m \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

1.2 电动汽车运动方程分析

运动方程由牛顿第二定律可得:

$$F_t - F_f - F_w - F_i = F_j = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (6)$$

而

$$F_t = \frac{T_e i_g i_o \eta}{r} \quad (7)$$

式中: T_e 电机输出转矩; i_g 变速器传动比; i_o 主减速器传动比; η 机械传动效率; r 车轮半径。

将式(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、(7)代入式(6)

可得:

$$\frac{Te i_g i_o \eta}{r} = \frac{1}{2} \rho C_d A V^2 + m g \sin \alpha + m g C \cos \alpha + m \frac{d v}{d t} \quad (8)$$

$$T_e = \frac{r \left(\frac{1}{2} \rho C_d A V^2 + m g \sin \alpha + m g C \cos \alpha + m \frac{d v}{d t} \right)}{i_g i_o \eta} \quad (9)$$

电动汽车的车速与电动机转速的转换关系如下所示:

$$v = 0.377 \frac{n r}{i_g i_o} \quad (10)$$

式中: v 汽车车速; n 电机转速; r 车轮半径; i_g 变速器传动比; i_o 主减速器传动比。

电动机转速与电动汽车的车速转换关系所示:

$$n = 2.653 \frac{v i_g i_o}{r} \quad (11)$$

式中: n 电机转速; v 汽车车速; r 车轮半径; i_g 变速器传动比; i_o 主减速器传动比。

2 测试平台道路工况模拟的硬件设计

道路工况模拟测试平台硬件结构与真实搭建测试台架如图 2、3 所示,主要包括以下几个部分: 蓄电池管理系统、被测电机控制系统、测功机控制系统、上位机通讯与数据采集控制系统。

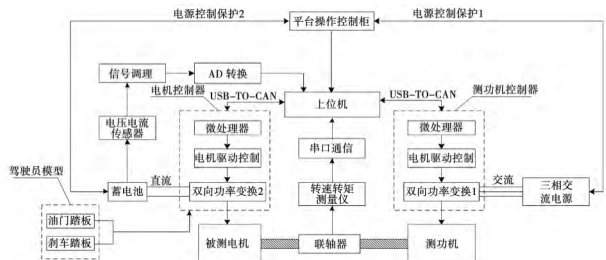


图 2 道路工况模拟测试平台硬件结构图

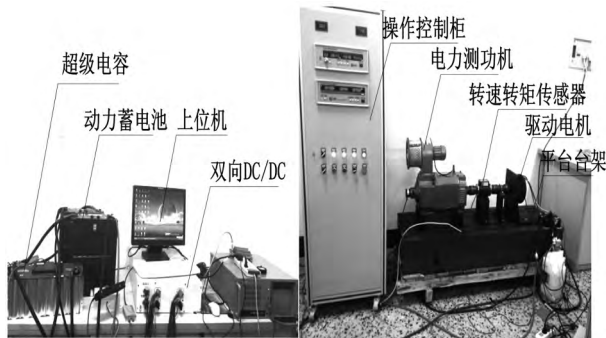


图 3 对拖式电动汽车道路工况模拟测试台

根据实验室条件整个测试平台模拟测试的是一种观光用的小型电动车一个模型。蓄电池方面选用功率密度高、使用寿命长的磷酸铁锂电池,其额定输出电压 24 V;实验用的驱动电机是由两块电池串联输出 48 V 供电。为了验证电动汽车复合储能及能量控制策略,平台还采用了双向 DC/DC 与超级电容串联再与电池并联连接方式。

被测电机即驱动电机控制器采用直流输入交流输出模式驱动电机运转,其内部功率变换器^[4]能量是可以双向流通的,满足处于发电状态时可将能量回馈给电池。驱动电机是一种有位置无刷直流电机,位置传感器把磁极位置信号转变成数字信号传到 DSP 处理单元,然后处理器发出驱动信号驱动功率管通断;控制器实现控制方式有恒转速、恒转矩、恒功率输出模式。其具体相关参数如表 1。

表 1 电机性能参数

对象	额定功率/ kW	额定电压/ V	额定转速/ (r/min)	额定电流/ A	额定转矩/ (N·m)
被测电机	5	48	3 500	180	14
加载电机	7.5	440	2 980	19.6	16.5

测功机是一种电力测功机,实验室选用直流调速控制装置实现测功机一系列调控,其内部功率变换器能量也是可以双向流通的,满足处于发电状态时可能量回馈给电网。控制器控制实现方式有恒转速、恒转矩、恒功率输出模式。配合驱动电机控制模式可以测试不同情况下驱动电机性能。其具体参数如表 1。

此外还有数据采集卡、转速转矩传感器、RS232 串口通信线,USB-TO-CAN 数据转换器,研华工控机,数字显示与电源开关操作柜,可以亲身操控的驾驶员模型等。

3 测试平台道路工况模拟实现过程

测试平台实现道路工况模拟主要依靠被测电机控制系统、功率加载电机控制系统协调配合^[3],选定一段汽车行驶路况信息,依照电动汽车运动方程、汽车车速与电机转速转换方程,计算出每时刻汽车车速对应的电机转速^[4]以及每时刻测功机应当给驱动电机加载的阻转矩,然后上位机以时间为基准同时分别给两个控制器发送转速、转矩命令,以此来模拟现实中电动汽车行驶道路工况,控制器也可以通过系统设置单独实现控制,实现对电机多方面动

静态测试需求。实验平台既能满足电机稳态测试需求又能完成瞬态连续循环路况测试。

上位机通过 USB-TO-CAN 通讯^[7]转换器与两个电机控制器建立互通联系,控制系统可以设置两个电机不同控制方式以实现不同测量目的,但两个电机控制方式不能设置相同,上位机测试界面既可以定点设置测定驱动电机运动状态又可以连续模拟路况变化。测试过程如图4所示:

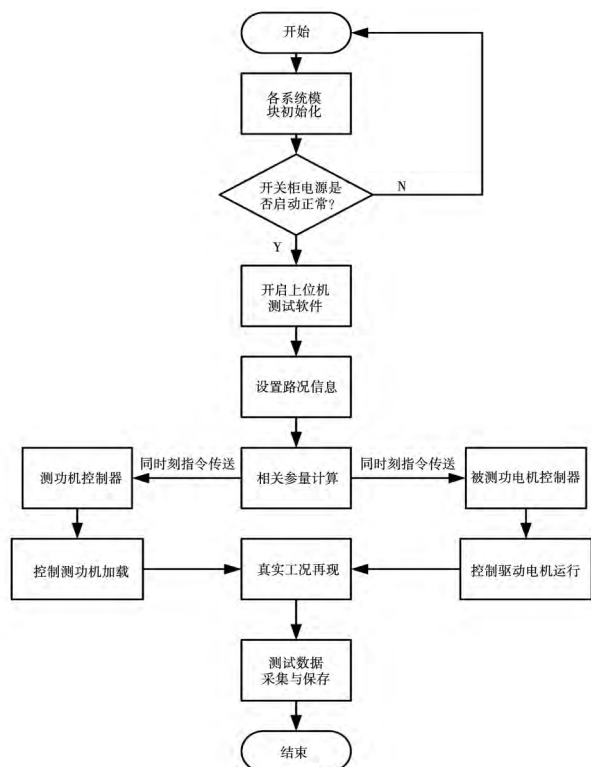


图4 测试平台道路工况模拟实现软件流程图

4 测试平台道路工况模拟测试及结果分析

4.1 电动汽车爬坡能力模拟测试

根据选用的被测电机及测功机加载电机性能指标,测试平台适合模拟汽车的基本参数^[8]取值如表2。

表2 模拟汽车参数

整车质量/ kg	传动比	车轮半径/ cm	空气阻力系数
400	10.25	25	0.30
传动效率	滚动摩擦系数	空气密度/ kg/m ³	迎风面积/ m ²
0.97	0.01	1.23	1.5

坡路是汽车行驶过程中常见路况,汽车应具有一定爬坡能力,随着坡路角增大汽车所承受坡道阻力也就越大,设置电机转速 970 r/min,对应汽车车速 8.9 km/h,以此来测试汽车稳速爬不同坡度路况能力。依据平台选定驱动电机额定输出转矩 14 N·m,能够模拟坡度从 0 到 12% (约 6.7°),相应加载阻力从 1.5 N·m 到 13.2 N·m,测功机设定加载点的加载阻力从初始 2 N·m 每隔 6 s 增加一个单位牛顿阻力直到 13 N·m。测得实验数据及参数变化曲线如图5、6所示:

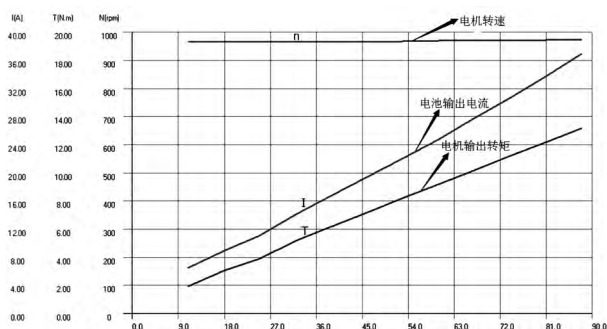


图5 汽车爬坡能力测试过程中驱动电机输出转矩与电流曲线

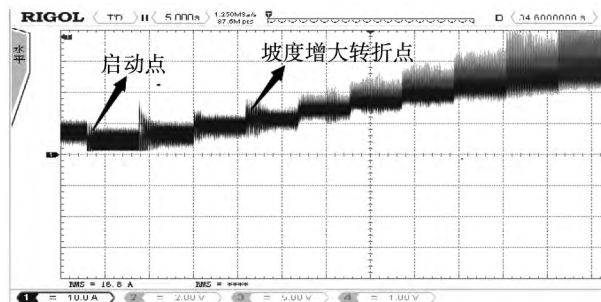


图6 电流探头测得电池输出电流变化曲线

图5中可以看出,电机转速基本稳定没有太大波动,随着加载阻力增大,被测电机输入电流、输出转矩随着同趋势增大变化,加载最大转矩大概对应模拟坡度 14%,选用输出转矩更大电机克服更大坡度角;图6中可以看出每个坡度增大转折点处电流都会有增大波动而后趋于稳定。

4.2 电动汽车加速模拟测试

电动汽车平地加速时候除受到摩擦阻力、风阻等阻力外,还要克服本身车重所产生惯性力即加速阻力 $m \frac{dv}{dt}$,为了确保汽车速度连续性,在确定时间内选取尽量多测试点,32 s (热身时间 7 s) 内由 8.3 km/h 增大到 17.5 km/h,基本上是 1.5 s 对应一个速度点,对应转速由 900 r/min 加到 1 900 r/min,根据式(6)汽车运动方程算出所受阻力由 3.8 N·m 增

到 $5.4 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。测得参数变化曲线如图7所示:

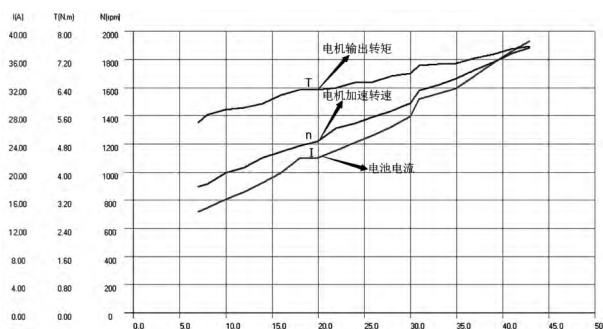


图7 加速模拟测试驱动电机转速转矩与电流曲线

按照设定模拟汽车从 8.3 km/h 加大到 17.5 km/h ,加速过程中汽车会相应输出比阻力大的驱动力去实现汽车加速;图5可以看出加速时候驱动电机转矩、转速、电流都呈现出上升一个趋势,这是电机实现加速必要变化过程。

4.3 电动汽车再生制动回馈模拟测试

电动汽车在刹车制动、减速时候会拖动电机发电运行,这种回馈能量的有效回收利用成为提升电动汽车续航里程关键,测试平台选用双向加载的电力测功机拖动被测电机运转来模拟测试电动汽车制动减速过程中能量回馈变化。测试选用一段中国城市标准减速路况模拟,依照路况设定电机转速由 2956.0 r/min (对应车速 27.2 km/h)下降到 151.8 r/min (对应车速 1.4 km/h),中间对应24个采集点,每隔 5 s 记录一个点相关参数信息。测得参数曲线如图8所示:

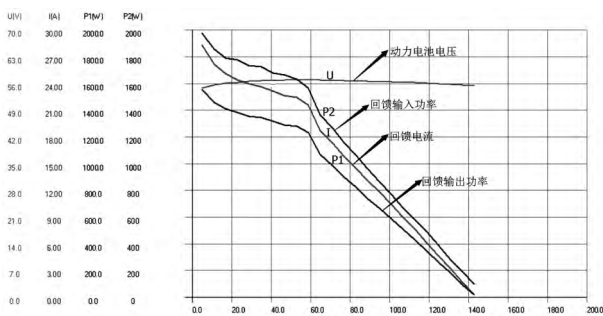


图8 汽车再生制动回馈测试转矩与转速变化曲线图

由测功机拖动驱动电机减速转动模拟汽车减速,制动回馈测试即模拟汽车刹车制动过程,测试中驱动电机处于刹车状态;由于测功机可以实现双向加载,测功机拖动电机模拟汽车刹车后减速运行瞬态过程,图6中可以看出,制动回馈过程中电池电压会有一个短时间升高,伴随转速下降,电机输出回馈给电池的电流、功率相应减小。

4.4 电动汽车连续制动回馈路况模拟测试

汽车在正常行驶过程中,会频繁地减速、刹车制

动,测试平台循环路况内连续控制测功机加载电机正反加载方向模拟汽车这种频繁地减速、刹车制动。为了更好看出反向加载时运行状态,连续两个点设为反向加载运行。开始时正向启动驱动电机,测功机给驱动电机提供正向加载阻力,下个时刻测功机给电机施加反向阻力矩(拖动驱动电机发电运行),反向拖动驱动电机运行时驱动电机自动进入制动状态,测功机拖动电机运转,直至达到稳速运行。测得参数曲线如图9、10所示:

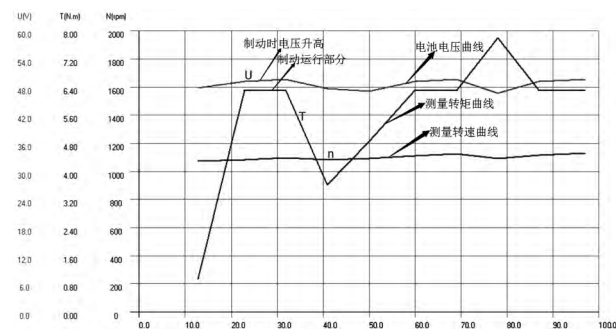


图9 连续制动回馈路况模拟测试参量变化曲线

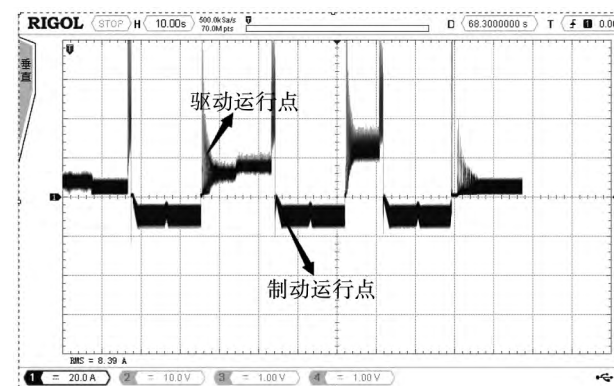


图10 电流探头测得电池电流输出示波器变化曲线

曲线坐标由于软件设置问题没有负值,所以图中看不出参数正负变化,为了更好看出反向加载时运行状态,连续两个点设为反向加载运行,图9中反向加载转矩连续两个点是一直线,从电池电压变化曲线也可以看出,每当负载电机反向加载时候电池电压都会有个明显上升趋势,也可以从图10电流探头测得电池输出电流示波器图形中看出正负,驱动时蓄电池供电电流为正,制动回馈时蓄电池供电电流为负。

5 结论

搭建的对拖式电动汽车道路工况模拟测试平台,既能满足电机稳态测试需求又能完成瞬态连续循环路况测试,模拟测试平台软件测试系统将两个

控制器通讯传输集合在一个测试界面上,配合集成电源操作控制柜使得加载电机与驱动电机响应时间同传统测试平台相比提升 20% 左右,并且控制也很精确,能够实现驱动电机多方面性能测试需求;平台采用的能量双向流通变流电路设计,能源综合利用率^[9-20]也能达到 80% 以上。测试实验结果因受到各方面因素影响同理论结果比较虽有一定误差,但都在允许误差范围之内,达到整个测试要求的标准,测试结果也为后续研发人员优化设计方案提供了一定的依据。

参考文献:

- [1] 史丹. 全球能源格局变化及对中国能源安全的挑战 [J]. 中外能源, 2013, 18(2): 4.
- [2] 辛凤影, 王海博. 电动汽车发展现状与商业化前景分析 [J]. 国际石油经济, 2010(7): 20-24.
- [3] 付翔, 王红雷, 黄斌, 杨玉强. 电动汽车驱动系统测试台架设计 [J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(5): 571-574.
- [4] 满敏, 陈凌珊, 何志生. 电动汽车动力测试平台与整车模拟试验 [J]. 上海工程技术大学学报, 2014, 28(1): 31-34.
- [5] 朱靖, 陈舒燕, 余朝刚. 基于 LabVIEW 的电动汽车驱动系统测试平台设计 [J]. 化工自动化及仪表, 2015(2): 199-202.
- [6] 孙海龙, 顾力强. 纯电动汽车电驱动系统硬件在环仿真试验台架开发 [J]. 传动技术, 2014, 28(4): 19-26.
- [7] 邹宇鹏. 纯电动汽车整车性能测试与研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [8] 王健. 纯电动汽车整车性能测试与研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [9] 罗永平, 聂彦鑫. 国内外电动汽车测试评价技术发展现状及趋势 [J]. 汽车与配件, 2011(15): 18-21.
- [10] 卢东斌, 欧阳明高, 谷靖, 李建秋. 电动汽车永磁同步电机最优制动能量回馈控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 83-90.
- [11] 周美兰, 毕胜尧, 张昊. 电动汽车再生制动系统的建模与仿真 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2013, 18(5): 98-102.
- [12] 姚元丰, 刘子龙. 电动汽车负载模拟加载系统 [J]. 系统仿真技术, 2014, 10(3): 177-182.
- [13] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [14] 刘强, 刘和平, 彭东林. 电动汽车用高性能电流型 trans-Z 源逆变器特性研究 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(5): 75-79.
- [15] 焦晓红, 李帅. 永磁同步电机驱动电动汽车速度自适应控制 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(11): 83-89.
- [16] 冯桂宏, 李庆旭, 张炳义, 等. 电动汽车用永磁电机弱磁调速能力 [J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 55-61.
- [17] 黄万友, 程勇, 纪少波. 基于 CAN 总线的纯电动汽车动力总成试验台测控系统的开发 [J]. 汽车工程, 2012, 34(3): 266-271.
- [18] 周美兰, 张昊, 卢显淦. 混合动力电动汽车的动力系统参数设计与仿真 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 8(4): 36-39.
- [19] FROBERG A., NIELSEN L. Efficient Drive Cycle Simulation [J] // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(3): 1442-1452.
- [20] 刘忠途, 伍庆龙, 宗志坚. 基于台架模拟的纯电动汽车能耗经济性研究 [J]. 中山大学学报, 2011, 50(1): 44-48.

(编辑: 王 萍)