

纯电动汽车用直流无刷轮毂电机试验台架的研究与开发*

董铸荣^{1,2}, 梁松峰¹, 田超贺²

(1. 深圳职业技术学院 汽车与交通学院, 广东 深圳 518055;

2. 北京交通大学 机电控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 为解决应用于纯电动汽车上的轮毂电机测试和试验的问题,将虚拟仪器技术应用于轮毂电机性能测试与再生制动试验台的设计中。开展了试验台组成结构、测控系统工作原理的分析,设计了测控系统电路,推导了电机转速、电机扭矩、电流、电压的测量计算公式,提出了电机再生制动试验方法及试验数据的计算公式;在此基础上采用LabVIEW开发了测控系统软件,并进行了实际运行实验。实验结果证明,该试验台设计较为合理,能够将电机的性能测试试验与再生制动试验合二为一,满足了电动汽车轮毂电机相关研究的需求。

关键词: 电动汽车; 无刷轮毂电机; 试验台架; 性能测试; 再生制动

中图分类号: TH39; U463

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)10-1187-04

Study and development of test-bed for brushless DC hub-motor used in EV

DONG Zhu-rong^{1,2}, LIANG Song-feng¹, TIAN Chao-he²

(1. Department of Automotive and Transportation Engineering, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen 518055, China;

2. School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to solve the problems of performance testing and regenerative braking experiment for hub-motor of electric vehicle (EV), the virtual instrument technology was applied to design the test-bed for hub-motor of EV. After the analysis of the composition of the test-bed and the theory of constitution of the observer and control system, the peripheral circuit was designed. Computational formula for motor rev, motor torque, electric current, electric tension was deduced. The method of regenerative braking experiment and computational formula was presented. On this basis, LabVIEW was presented to develop software for the observer and control system. The experimental data results show that the design of the test-bed is reasonable. Hub-motor performance test and motor regenerative braking test are realized on this test-bed. It can meet the demand of experiments of hub-motor of EV.

Key words: electric vehicle(EV); brushless hub-motor; test-bed; performance test; regenerative braking

0 引言

面对环境污染和能源危机两大难题,电动汽车因其清洁无污染、能量来源多样化等优点,正得到逐步的推广。电动汽车一般使用电机进行驱动,驱动的方式有中置电机驱动、轮毂电机驱动等,根据驱动力的分配又可分为前驱、后驱、四驱等^[1]。采用轮毂电机四轮独立驱动方式的电动汽车,既消除了传动中的机械磨损与功率损耗,又减少了车辆体积和重量,因此在高性能的电动汽车中得到了应用,是电动汽车发展的

收稿日期: 2012-04-17

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(S2011010002534)

作者简介: 董铸荣(1975-),男,福建福州人,副教授,博士研究生,主要从事汽车检测、新能源汽车技术方面的教学与研究。E-mail: aronong@szpt.edu.cn

一个重要方向^[2-3]。

电机的性能对电动汽车来说至关重要,电机的各种特性曲线是电动汽车设计者进行驱动设计的依据^[4],因此,应用于电动汽车的轮毂电机必须具备详尽的测试信息,以证明其特性,方便用户的选型与使用。目前电动汽车用的轮毂电机由于各厂家、研究机构采用的车轮轮毂不同,设计思路各异,导致轮毂电机没有统一的制式标准,虽然电机厂家提供了性能参数,但与实际性能差别较大。因此需要电机使用者进行详细地试验,以获取真实的电机性能参数,才能为开发电动车辆提供基础数据。

另一方面,电动汽车的续驶里程较短,无法与传统内燃机汽车相比,是电动汽车在研究和开发过程中需要解决的关键问题^[5]。要解决这一问题,研究者除了要在电池技术上有所突破之外,合理地使用和节约车载能源就成为电动汽车在研制和开发过程中的一项重要课题^[6],再生制动技术便在此基础上逐渐发展起来,并成为了研究热点。而电动汽车再生制动能量回收试验是电动汽车试验的一个分支,目前国内外相关研究报道还不多见^[7]。

本研究应用虚拟仪器技术,设计并实现一种电动汽车轮毂电机再生制动试验台架。

1 试验台架组成与工作原理

本研究设计了一种电动汽车用轮毂电机试验台,它由试验台架和测控系统组成,可应用于电动汽车轮毂电机的测试,模拟汽车起动或者停止时所具有的惯性;能够测试出电机的转速、输出扭矩、电流、电压这4个参数用于涉及电机的各种特性曲线的绘制;提供的信号均为0~10 V标准信号,适合于连接各类工控设备以实现自动测试,同时,试验台也提供了调节旋钮以及电压表、电流表等显示设备,也可以以手动的方式进行测试。

试验台架组成如图1所示,台架侧视图如图2所示,试验台架由安装基体、滚筒A、滚筒B、飞轮、磁粉制动器、转矩转速传感器、角速度传感器、测控系统以

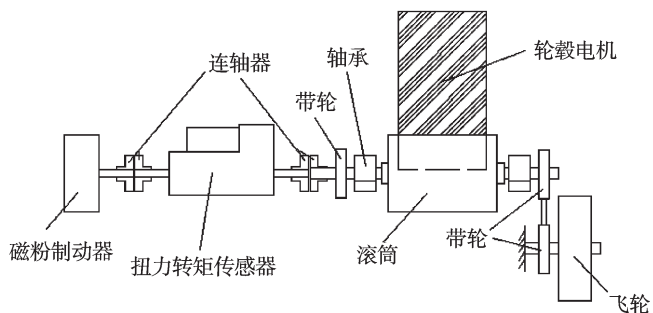


图1 试验台架组成

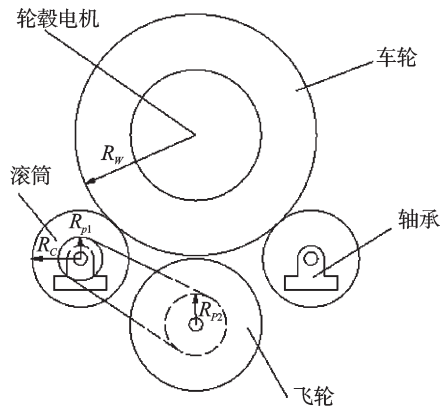


图2 台架侧视图

及一系列连接传动元件等组成。其中转矩、转速传感器用于检测由磁粉制动器产生的制动转矩,以用于计算电机的输出扭矩;角速度传感器用于检测飞轮的转速,用于计算对应的角加(减)速度;磁粉制动器用于产生制动力阻碍转子的旋转运动,模拟车辆机械制动器的作用;滚筒用于接收来自车轮的驱动力或阻力,并承受车轮压紧的力量;飞轮用于模拟行驶惯性。

试验台测控系统采用开放式结构,本研究根据虚拟仪器的硬件组成方案及特点,确定测控系统采用的硬件模块,构建试验台测控系统的硬件总体结构。测控系统采用基于PCI总线(数据采集卡)和串口总线的硬件结构,选取美国NI公司生产的NI-PXI-1042Q主机(上位机)加PCI数据采集卡的方式来构建虚拟仪器^[8-10],使用LabVIEW进行软件编程。外围信号测控电路主要由传感信号采集、执行信号输出、动力电流切换等部分组成,其系统组成如图3所示。

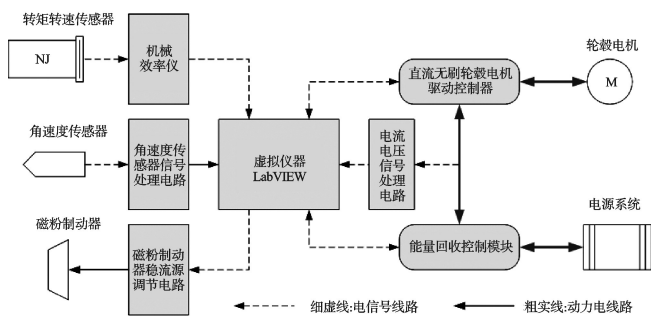


图3 测控系统组成

在测试电机性能时,测控系统控制“能量回收控制模块”将“电源系统”的电流输送给“直流无刷轮毂电机驱动控制器”,轮毂电机运行,测控系统可采集到转速、输出扭矩、电流、电压等信号,获得各种特性曲线,如“在某一电压下的转速-扭矩特性”、“在某一电压下的转速-电流特性”、“在不同工况下的效率变化”、“过载能力”等等。不同的场合需要不同的特性。

在进行电机再生制动试验时,测控系统切换电流方向,本研究将轮毂电机制动时产生的电流通过“能量

回收控制模块”输送给“电流系统”,同时根据电机再生制动控制策略的要求调节磁粉制动器与电机再生制动之间的关系,使之达到最优化目标。测控系统可同时采集到各个所需数据,用于验证控制策略的优劣。

2 测量数据处理

2.1 电机转速的测量

在试验台中,被测试的轮毂电机转速可以通过电机的霍尔信号检测出来,假设被测试的轮毂电机内贴的磁钢片数量为 K ,则电机每转一圈霍尔信号线将输出 K 个周期的脉冲。因此,研究者通过检测霍尔信号的周期 c 便可获得电机的实时转速,公式如下:

$$n = \frac{60f}{K} = \frac{60}{Kc} \quad (1)$$

式中: f —霍尔信号的频率。

2.2 电机输出扭矩的测量

在试验台中,被测试的轮毂电机产生的扭矩 M_m 分配到以下几个对象中:

(1) 车轮的旋转需要扭矩的支持,以 M_w 来表示这一扭矩;

(2) 两个滚筒(形状、质量一样)的旋转需要扭矩的支持,以 M_c 来表示这一扭矩;

(3) 飞轮的旋转需要扭矩的支持,以 M_f 来表示这一扭矩;

(4) 磁粉制动器产生了阻力,需要扭矩以抵消,以 M_b 来表示这一扭矩。

也就是说,轮毂电机产生的扭矩可以用以上4项扭矩的求和来表示:

$$M_m = M_w + 2M_c + M_f + M_b \quad (2)$$

在4项扭矩中: M_b 由扭力转矩传感器直接测出, M_w 、 M_c 、 M_f 由各自的转动惯量 I 与角加速度 α 计算出:

$$M_w = I_w \times \alpha_w \quad (3)$$

$$M_c = I_c \times \alpha_c \quad (4)$$

$$M_f = I_f \times \alpha_f \quad (5)$$

式中: I_w 、 I_c 、 I_f —车轮、滚筒、飞轮的转动惯量,均可由各自的质量与形状获得。

然而,三者的角加速度(α_w 、 α_c 、 α_f)需要实时测量才能获取,并且它们有一定的关系。

车轮的角加速度 α_w 与轮毂电机的角加速度 α_m 是一样的,因为两者同属于一个做定轴旋转的刚体。 α_m 可以由轮毂电机的转速求出:

$$\alpha_w = \alpha_m = \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{d(\frac{2\pi n}{60})}{dt} = \frac{\pi}{30} \frac{dn}{dt} \quad (6)$$

式中: ω_m —轮毂电机的角速度, n —轮毂电机转速,可以由式(1)获得,再使用数值微分法求出其导数。

α_c 、 α_f 与 α_w 成正比,它们间的关系推导如下:

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_c} = \frac{d\omega_w/dt}{d\omega_c/dt} = \frac{d(v_w/R_w)/dt}{d(v_c/R_c)/dt} = \frac{R_c}{R_w} \times \frac{dv_w/dt}{dv_c/dt} \quad (7)$$

式中: ω_c —滚筒的角速度, v_w —车轮边沿线速度, R_w —车轮半径(如图2所示), v_c —滚筒边沿线速度, R_c —滚筒半径(如图2所示)。

因为车轮压紧滚筒,可忽略两者之间的打滑,有:

$$v_w = v_c \quad (8)$$

由式(7)与式(8)可以得到下式:

$$\frac{\alpha_w}{\alpha_c} = \frac{R_c}{R_w} \times \frac{dv_w/dt}{dv_c/dt} = \frac{R_c}{R_w} \times \frac{dv_c/dt}{dv_c/dt} = \frac{R_c}{R_w} \Rightarrow \alpha_c = \alpha_w \times \frac{R_w}{R_c} \quad (9)$$

同理有:

$$\alpha_f = \alpha_c \times \frac{R_{p1}}{R_{p2}} = \alpha_w \times \frac{R_w}{R_c} \times \frac{R_{p1}}{R_{p2}} = \alpha_w \times \frac{R_w R_{p1}}{R_c R_{p2}} \quad (10)$$

式中: R_{p1} —与滚筒相连的皮带轮的半径, R_{p2} —与飞轮相连的皮带轮的半径。

综上所述,电机的输出扭矩可以由下式求出:

$$\begin{aligned} M_m &= M_w + 2M_c + M_f + M_b = \\ &= I_w \alpha_w + 2I_c \alpha_c + I_f \alpha_f + M_b = \\ &= I_w \alpha_w + 2I_c \alpha_w \frac{R_w}{R_c} + I_f \alpha_w \frac{R_w R_{p1}}{R_c R_{p2}} + M_b = \\ &= M_b + (I_w + \frac{2R_w}{R_c} I_c + \frac{R_w R_{p1}}{R_c R_{p2}} I_f) \alpha_w = \\ &= M_b + \frac{\pi}{30} (I_w + \frac{2R_w}{R_c} I_c + \frac{R_w R_{p1}}{R_c R_{p2}} I_f) \frac{dn}{dt} \end{aligned} \quad (11)$$

2.3 电压的测量

轮毂电机为直流电源供电,其电压的测量原理比较简单,如图4(a)所示。图中的分压电路可将测量的电压降低至可检测范围0~10 V,再传送至数据采集

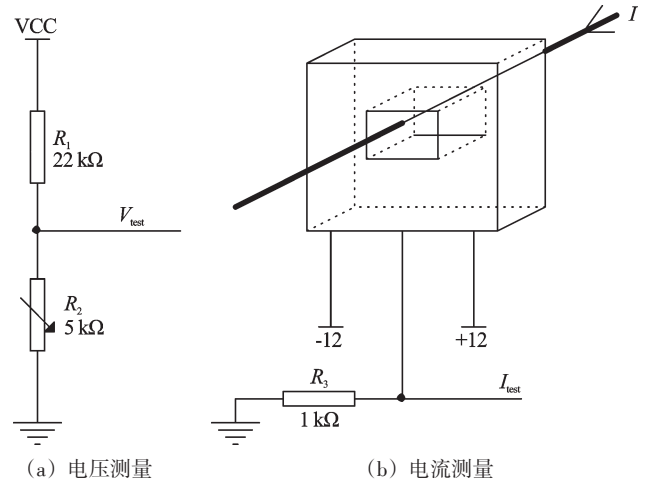


图4 电压、电流的测量

卡。电动汽车用的轮毂电机电压范围很大,从48 V~200 V不等。

容易得出,待求电压 V_{cc} 与测的电压的关系为:

$$V_{cc} = V_{test} \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (12)$$

对于不同的轮毂电机电源,在电机静止状态下,本研究使用万用表测出其静态电压 V_{cc0} ,然后调节 R_2 ,使得 V_{test} 为 $V_{test0} = 10\text{ V}$ 。也就是说,调节好 R_2 后,有:

$$V_{cc0} = 10 \times \frac{R_1 + R_2}{R_2} \Rightarrow \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{V_{cc0}}{10} \quad (13)$$

调好 R_2 后,分压电路的分压系数便为一固定值,则轮毂电机工作时的动态电压可由下式算出:

$$V_{cc} = V_{test} \frac{R_1 + R_2}{R_2} = V_{test} \frac{V_{cc0}}{10} \quad (14)$$

式中: V_{cc} —待求电压, V_{test} —测得电压, V_{cc0} —在电机静止状态下,轮毂电机电源电压。

2.4 电流的测量

轮毂电机的供电电流通过霍尔式电流传感器测量获得,如图4(b)所示。传感器的输出信号与被测量的电流大小呈线性关系,其量程为100 A,对应输出50 mA,通过1 k Ω 电阻 R_3 转换为电压信号,因此,电流的计算公式如下:

$$i = \frac{100}{50} \times \frac{I_{test}}{1} = 2I_{test} \quad (15)$$

2.5 再生制动试验

电池组驱动无刷电机,通过车轮和摩擦轮的转矩传递带动飞轮机构旋转,当电机达到一定转速时本研究切断电源,让飞轮通过车轮带动电机旋转,能量回收电路导通。试验中的控制信号由虚拟仪器主机通过数据卡发出。电机控制器和能量回收控制模块接收到控制信号后,本研究根据制定的控制策略对再生制动进行相应的控制,采集飞轮转速、储能装置端电压和充电电流等,用于验证试验台和控制策略的合理性。

本研究测量馈电试验开始前飞轮的角速度 ω_1 和馈电试验结束时的角速度 ω_2 ,同时测量在馈电过程中电源两端的电压和输入电源的电流和时间^[11]。能量计算公式如下:

$$W_1 = \frac{1}{2} J (\omega_1^2 - \omega_2^2) \quad (16)$$

式中: J —飞轮惯量。

馈电效率计算如下式:

$$\eta_{reg} = \frac{W_2}{W_1} \quad (17)$$

式中: W_2 —馈电试验中输给电源的能量。

3 试验案例

综合以上设计思路,本研究编制了LabVIEW软件程序,由于篇幅所限,不予赘述,软件界面如图5所示。

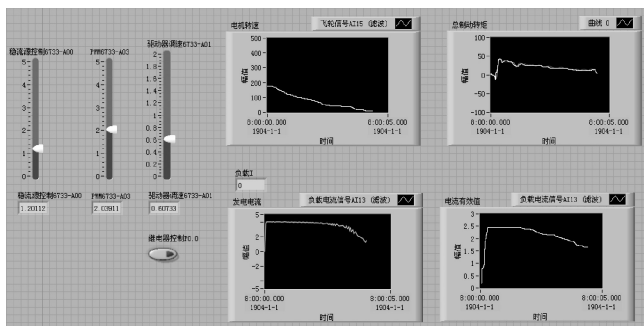


图5 测控软件程序计算机界面

为验证试验台的性能和电机再生制动时的工作特性,本研究进行了永磁直流无刷轮毂电机再生制动试验(仅有再生制动力,无机械制动力)。首先电池组驱动电机旋转,达到某转速(举例试验 $n = 110\text{ r/min}$)的同时带动滚筒和飞轮旋转;切断电源,使整个旋转装置依靠惯性继续旋转。测控系统切换到能量回收状态,采集电机转速、反馈电流、制动力矩等参数,得到的曲线如图6所示。

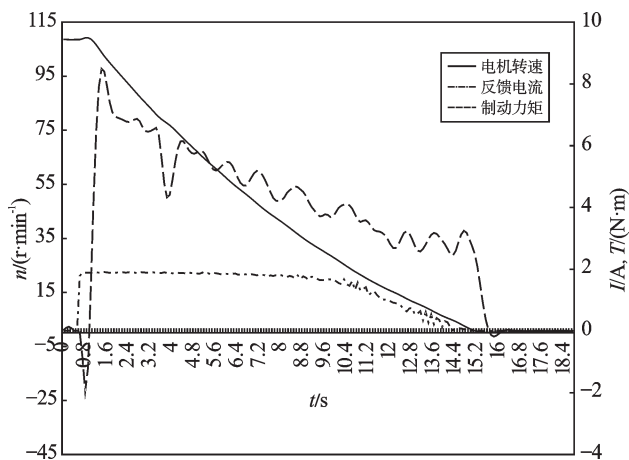


图6 试验测试曲线

由试验数据曲线可以看出,试验台方案切实可行,能够获取较好的数据用于后续对控制策略的分析。

4 结束语

该试验台将电机性能测试试验、电机再生制动试验合二为一,本研究采用“虚拟仪器+LabVIEW”的方式,设计开发了轮毂电机测试试验台架测控系统的硬件系统和软件环境,提高了硬件集成度和性能,简化了电路,有效提高了系统的稳定性和可靠性。

本研究通过试验台的实际运行,验证了试验台架

(下转第1201页)

的稳定运行。然后程序进入一系列的判断选择结构,例如当快速返回功能被选中时,执行快速返回功能,执行完成或终止时返回到下一个选择结构;没有选中时程序往下执行下一个功能模块的判断。当程序执行到退出系统判断结构时,如果为“真”就执行退出程序,如果为“假”就返回到快速返回功能选择结构。这样程序就不断地对各个功能模块进行判断和执行,实现了系统的加工功能。由于是顺序执行,在程序运行的过程中只能执行一个功能模块,能够大大降低实际加工中的误操作。

3 结束语

本研究通过工业计算机、LabVIEW 和运动控制卡完成了对数控双铣头机床控制系统的构建,在完成了数控双铣头机床控制系统程序编制后,经过安装、调试,两把铣刀可以用一把铣刀加工,也可以同时加工。经过实际的加工验证,用两把铣刀加工时与现有的单铣头数控铣床相比,能够缩短加工时间2 h左右,明显提高了加工效率;而且加工系统的工作界面简单、易懂,容易上岗操作。经过一段时间的加工后,也暴露出了很多有待改进的地方,例如两把铣刀加工的最大范围偏小、螺距变化函数适应性不广等。

参考文献(References):

- [1] 毕超,曹利,李翱,等. 平行双螺杆挤出机的螺杆几何学[J]. 塑料,2011(4):81-83.
- [2] 陈永广. 基于IPC的螺杆双铣刀专用数控系统的开发[D]. 江门:五邑大学机电工程学院,2010.
- [3] 徐茂东,郑对元,肖武. Labview 8.5 常用功能与编程实例精讲[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [4] 王成元,夏加宽,孙宜标. 现在电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [5] 李珊. 变螺距变槽深变槽宽螺杆的数学模型分析[J]. 机电工程技术,2009,38(5):29-30.
- [6] 章尽莹. 螺杆的内旋包络铣削法及其数控加工的数学建模[J]. 机械研究与应用,2005,18(5):56-58.
- [7] 周春雷. 包络法加工复杂曲面中刀具通用几何模型研究[J]. 机电工程技术,2010,39(10):80-81.
- [8] 余雷. 变导程螺旋包络运动分析[J]. 江苏机械制造与自动化,2000(1):20-22.
- [9] 陈树学,刘萱. LabVIEW 宝典[M]. 北京:电子工业出版社,2011.
- [10] 孙伟,范成岩. 基于变螺距螺纹加工的普通机床改造[J]. 机床与液压,2006(1):167-168.
- [11] 徐志鹏. 一种基于运动控制卡的数控专用机床[J]. 微计算机信息,2008(16):188-189.

[编辑:李辉]

(上接第1190页)

设计及其测控系统控制方式的可行性,说明了利用虚拟仪器技术开发轮毂电机测试试验台的测控系统具有方便、快速等优点。研究者根据试验数据的分析结果可以方便地在LabVIEW上实时调整控制策略,而LabVIEW与Matlab等仿真软件之间有很强的兼容性,可以建立完整的建模-仿真-试验开发途径。同时该试验台作为开发平台,便于扩展,是一个开放式试验系统。

参考文献(References):

- [1] 钱立军,赵韩,高立新. 电动汽车开发的关键技术及技术路线[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2002,25(1):14-18.
- [2] 柴陆路,刘洲辉,罗寥. 轮毂电机式纯电动汽车平台的建立[J]. 汽车工程师,2009(9):28-30.
- [3] 张希明,陈立铭,倪光正. 一种基于TMS320F2812的电动汽车电驱动系统[J]. 机电工程,2008,25(3):61-63.
- [4] 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):136-139.

- [5] 王婷. 混合动力电动汽车控制策略的优化研究[D]. 北京:北京交通大学运输自动化研究所,2009.
- [6] 陈庆樟,何仁. 汽车再生制动系统电机制动力分配[J]. 江苏大学学报,2008,29(5):394-397.
- [7] 赵会强. 电动汽车制动能量回收试验台技术研究[D]. 西安:长安大学汽车学院,2007:3-7.
- [8] 蒋新文,张宁,杨三序. 基于虚拟仪器技术的测控系统[J]. 微型计算机信息,2007,23(12-1):30-31.
- [9] 董铸荣,梁松峰,贺萍. 基于虚拟仪器的汽车变速器计算机测控系统的设计[J]. 微型计算机信息,2012,28(4):31-33.
- [9] 王子瑞,孙敬敬,王林. 基于LabVIEW虚拟仪器的双通道信号采集与分析系统设计[J]. 机电工程技术,2011,40(8):42-45.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB/T18488. 2-2006 电动汽车用电机及其控制器第2部分试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2007.

[编辑:张翔]