

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.04.016

实时可编程双向模拟负载研究

刘 珺, 李雪峰

(华东交通大学 电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 各项研究往往需要进行试验用负载并希望它能具备实时动态模拟负载能力, 在不同的应用场合往往采用不同的技术方案。进行电动汽车能量管理研究需要一款可实时变化的动态具备能量双向流动能力的负载以模拟各种工况的实际负载需求。利用二端口阻抗变换特性, 可以将某一定值阻抗变换为期望阻抗, 并采用实时控制得到实时变化的期望阻抗。采用电力电子技术构建了一款具备能量双向流动能力的复合模拟负载。实时可编程双向模拟负载分为两部分, 纯耗能子系统与能量储存子系统。纯耗能子系统由定值功率电阻及其对应的 DC-DC 变换器构成, 通过对 DC-DC 变换器的控制使功率电阻以一定的规律消耗能量, 用以模拟汽车在运行过程中的消耗能量。能量储存子系统由超级电容和其相对应的双向 DC-DC 变换器构成, 通过对双向 DC-DC 变换器的控制, 使超级电容以一定的规律储存或释放电能, 模拟汽车在运行过程中的动能变化。系统采用层级控制方案, 控制器为上层, 而两个子系统充当执行层为下层。两个子系统通过控制器的有序控制, 有机结合构成了完整的具备能量双向流动能力的动态实时可编程电子负载。实时可编程双向模拟负载系统结构简洁、成本较低、控制灵活。最后通过试验验证表明此方案可很好地实时模拟电动汽车的负载, 满足需求。

关键词: 汽车工程; 阻抗变换; 电力电子模拟负载; 电动汽车; 实验台; 动态编程; 超级电容

中图分类号: U469.72

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2018)04-0123-06

Study on Real-time Programmable Bi-directional Simulation Load

LIU Jun, LI Xue-feng

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: Researches always need some experiment loads to simulate the real-time dynamic loads. The different technical schemes are used to the different application situations. The research on energy management of electric vehicle requires an experiment load with real-time dynamic energy bidirectional flow capability to simulate the actual load demands of various working conditions. With the two-port's impedance transformation characteristics, fixed-value impedance can be transformed to expected-value impedance. And real-time variable expected impedance can be gotten by real-time control. Power electronic technology is introduced to construct a composite simulated load with energy bidirectional flow capability. The real-time programmable bidirectional simulation load is divided into pure energy consumption subsystem and energy storage subsystem. The pure energy consumption subsystem is composed of a fixed value power resistor and its corresponding DC-DC converter. The power resistor should consume energy with a certain rule by controlling the DC-DC converter, which simulates the energy consumption of the vehicle during operation. The energy storage subsystem is composed of an ultra capacitor and its corresponding bidirectional DC-DC converter. The ultra capacitor should store or release energy with a certain rule by controlling the bidirectional DC-DC converter. The subsystem simulates the changed kinetic energy of the vehicle during operation. The

收稿日期: 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51467006); 江西省科技厅工业支撑项目(20151BBE50110)

作者简介: 刘珺(1975-), 男, 江西丰城人, 工学博士. (jimliujun@163.com)

system adopts layer control, the controller is the upper layer, and the 2 subsystems act as the lower layer (executive layer). The 2 subsystems become a dynamic real-time programmable electronic load with energy bidirectional flow ability by the orderly control of the controller. The real-time programmable bidirectional simulation load system takes on a concise structure, low cost and flexible control. Experiment shows that the proposed scheme can well simulate EV dynamic load demands in real-time.

Key words: automobile engineering; impedance transformation; power electronic simulation load; electric vehicle; test bench; dynamic programming; ultra capacitor

0 引言

电动汽车有着众多各具特色的研究^[1-3], 电动汽车试验研究中, 模拟负载不可或缺, 模拟负载研究是进行相关研究的基础, 当模拟负载可良好地模拟负载动、静态特性时, 相关研究的试验结果更有实际意义。

对于电子负载有众多研究。华北电力大学^[3]提出一种能量回馈型电力电子负载主电路拓扑, 拓扑由四象限变流器构成, 网侧采用并联的结构, 用以提高电流等级; 负荷侧采用串联结构, 以提高电压等级, 拓扑是一个完全可逆的结构, 能够实现功率的双向流动。山东理工大学^[4]采用两级 PWM 变换器设计了一种适用于各种交性模拟功能, 后级 PWM 变换器采用电压、电流双闭环控制实现能量回馈功能。华中科技大学^[5]采用能量回馈型交流电子负载, 提出了前级 PWM 变换器采用单电流滞环控制, 实现负载特改进重复控制策略, 用于电力电子负载电流控制器设计, 通过串联校正调整控制对象幅频、相频特性, 重复控制器可提高系统稳态性能, P 控制器保障其动态响应速度。南京电子技术研究所^[6]介绍了由 Boost 变换电路、高频隔离电路及逆变并网电路组成的电能回馈直流电子负载。清华大学^[7]基于电力电子变换器建立了馈能型直流电子负载模型并进行了仿真, 利用 S 函数实现对输入电流的恒流控制, 并针对不同的直流母线电容值进行了仿真研究, 但没有进行试验验证。文献[8]运用多通道 AD 技术控制工作在线性状态的 MOSFET 上的电流, 实现电子负载的恒流、恒压、恒功率和恒电阻等功能。

空军雷达学院^[9]研究了一种电子负载可模拟 RLC, 主电路拓扑采用 AC/DC/AC 结构, 设计 1 款 kVA 交流电子负载试验样机, 可实现单相测试电源的各种阻抗特性模拟, 并将吸收能量以接近单位功率因数回馈电网。此模拟负载相对简单, 为交流 RLC 负载模拟。华南理工大学^[10]研究了一款能馈型直流电子负载, 采用同步整流 Boost + 双推挽升压 +

全桥高频逆变为主电路拓扑, 提出了直线逐步逼近曲线的负载曲线模拟方法。电路拓扑为三级结构, 结构相对复杂, 负载曲线模拟也略显粗糙。彭方正研究小组^[11]提出了一种基于 Z 源变换器的零电压电子负载, 研究重点在软开关。University of Tennessee^[12]为了模拟多地区电力系统场景动态研究了一款负载模拟器, 将恒定阻抗、恒定电流和恒功率模型用于静态负载类型, 将三相异步电动机模型用于表示动态负载类型。负载模拟器可进行有功无功动态模拟, 此系统比较复杂并具备很好的负载模拟性能。江苏大学^[13]设计了电动汽车机电复合回馈制动模拟实验台, 以超级电容吸收的电机回馈能量, 研究人员认为模拟实验台较好地实现了电动汽车机电复合回馈制动过程, 并可用于评估控制策略的有效性。广西大学^[14]介绍了以磷酸铁锂电池组 + 超级电容的纯电动汽车及双向电能转换试验平台, 该平台进行关键部件的性能测试、能量管理测试、运行工况测试等且能与电网进行双向电能转换。北京交通大学^[15]提出一种采用电流型 PWM 整流器实现的电能回馈型电子模拟功率负载系统。

美国 North Carolina State University^[16]采用电机/测功机上进行制动试验, 制动控制器集成到电动汽车硬件在环测试平台控制器, 进行了实时验证。德国 Scienlab electronic systems GmbH^[17]采用硬件在环实验台进行了电动汽车的充电系统研究。Universiti Kebangsaan Malaysia^[18]提出一款实验台模型评价多源轻型电动车能量管理系统的性能。电路包含可以驱动任何直流负载的直流斩波器并连接 dSPACE DS1104 数字信号处理器进行实时数据采集。葡萄牙 Univ. of Coimbra^[19]介绍了用于小型电动汽车设计的实验台, 对电动汽车动力总成进行了电机功率驱动、电机、齿轮箱和轮胎效率等测试。斯洛伐克共和国 Technical University of Košice^[20]采用测功机构成了机械测试实验台, 测功机驱动控制基于动态仿真的机械负荷 (DEML) 策略并在 Rt - lab 仿真平台上执行。奥地利林茨约翰·开普勒大学与意大利

米兰理工大学^[21]合作研究了轻型柴油发动机台架的控制策略, 负载采用测功机方案。意大利 Istituto Motori^[22]研究电池加超级电容器的电动城市交通推进系统。西南交通大学^[23]提出采用超级电容器作为再生减震器进行能量收集以提高电动汽车电池耐力, 在仿真和台架试验表明能源再生减震器是有益且有前途的。

从各项研究上看, 模拟负载在不同的应用场合采用不同的技术方案。进行电动汽车试验研究时, 需进行各类工况试验以验证方案可行性, 由于汽车的运行工况复杂, 进行能量与功率等研究时需要一个能实时变化且可能量双向流动的负载。为了解决电动汽车试验平台所需的负载需求, 研究人员采用复合模拟电子负载解决方案, 运用 DC-DC 变换器技术来构建直流阻抗变换器, 通过控制变换器的占空比 D 进行实时阻抗变换, 得到实时变化的期望负载。

1 工作原理

1.1 二端口阻抗变换

二端口网络即可进行阻抗转换, 如能对其输入、输出电压进行控制, 即可完成输入、输出阻抗的阻抗变换, 二端口阻抗变换如图 1 所示。

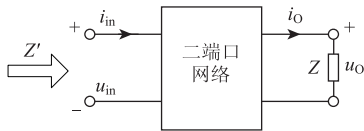


图 1 二端口阻抗变换

Fig. 1 Two-port impedance transformation

由二端口网络特性可知:

$$u_o = k u_{in}, \quad (1)$$

$$i_o = i_{in}/k, \quad (2)$$

$$Z' = \frac{u_{in}}{i_{in}} = \frac{u_o/k}{i_o/k} = Z/k^2, \quad (3)$$

式中, u_{in} 为输入电压; u_o 为输出电压; i_{in} 为输入电流; i_o 为输出电流; k 为二端口输入与输出电压之比; Z 为实际阻抗; Z' 为等效阻抗。

由于二端口的应用可有效实现输入输出阻抗变换, 将一个实际阻抗值为 Z 的阻抗等效变换为 $Z' = Z/k^2$ 。因此, 如 k 能进行动态随意调节, 即能实现阻抗可编程, 完成动态阻抗跟踪。

1.2 电力电子阻抗变换

对于 Buck 电路, 由 Buck 电路的性质可知:

$$V_o = D \times V_{in}. \quad (4)$$

由式 (3) 可得,

$$Z'_{\text{Buck}} = Z/D^2, \quad (5)$$

同理, 对于 Boost 电路, 有:

$$Z'_{\text{Boost}} = (1-D)^2 Z, \quad (6)$$

式中, Z'_{Buck} 为 Buck 变换器的等效阻抗, 其值大于实际阻抗 Z ; Z'_{Boost} 为 Boost 变换器的等效阻抗, 其值小于实际阻抗 Z 。

通过以上分析可知, 选择合适的电力电子电路, 合理地控制占空比 D 就能得到变比可调的阻抗变换器, 得到所期望的阻抗。

2 模拟负载系统

2.1 模拟负载系统结构

电动汽车实验台模拟负载系统框图如图 2 所示, 驱动电机与负载电机同轴联结。负载电机及其后的变换器单元构成模拟负载系统, 它具备实时变化能力及能量双向流动能力。当驱动电机工作于电动机状态时, 负载电机工作于发电机状态, 实时改变负载电机的负载即可模拟变化的负载系统。当车辆运行于回馈制动的工况时, 负载系统将所贮存的能量释放 (模拟车辆的动能回收), 负载电机运行于电动机状态, 而驱动电机工作于发电机状态, 并控制驱动系统回收能量。

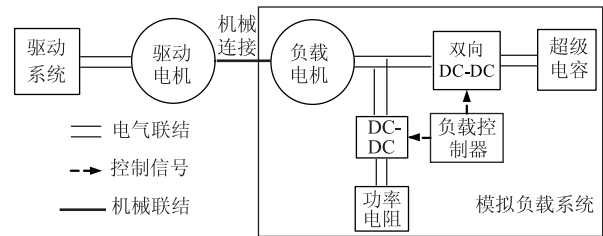


图 2 模拟负载系统框图

Fig. 2 Block diagram of simulated load system

模拟负载系统由两部分组成: 一是用固定值的功率电阻及其对应的 DC-DC 变换器所构成的纯耗能子系统, 通过对 DC-DC 变换器的控制, 使功率电阻以一定的规律消耗能量, 用以模拟汽车在运行过程中的消耗能量; 二是超级电容和其相对应的双向 DC-DC 变换器所构成的能量储存子系统, 通过对双向 DC-DC 变换器的控制, 使超级电容以一定规律储存或释放电能, 模拟汽车在运行过程中的动能变化。

实验台需要模拟电动汽车的动态负载, 用纯耗能子系统模拟电动汽车的能耗。研究采用 Buck 阻抗变换器方案, 其结构框图如图 3 所示。

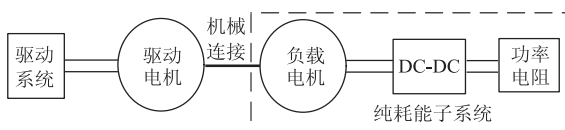


图3 纯耗能子系统

Fig. 3 Pure energy consumption subsystem

2.2 能量储存子系统

能量储存子系统采用基于超级电容的模拟负载系统，具备能量储存与释放能力，用于模拟汽车的动能变化，其结构框图如图4所示。

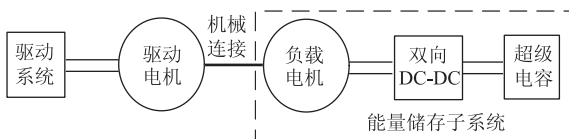


图4 能量储存子系统

Fig. 4 Energy storage subsystem

因为车辆运行时的动能为：

$$E = 0.5mV^2, \quad (7)$$

超级电容存储的能量为：

$$E_{UC} = 0.5C_{UC}U_{UC}^2, \quad (8)$$

式中， m 为车辆的总质量； V 为车速； C_{UC} 为超级电容的电容量； U_{UC} 为超级电容的电压。

因为 $E = E_{UC}$ 即 $mV^2 = C_{UC}U_{UC}^2$ ，因而：

$$U_{UC} = CV, \quad (9)$$

式中常数 $C = \sqrt{m/C_{UC}}$ 。

能量储存子系统的控制目标即为超级电容的电压，当它工作于 Boost 工况时给超级电容充电，用以模拟汽车加速时的动能增加。而当它工作于 Buck 工况时超级电容放电模拟汽车减速，其中当它向纯耗能子系统放电时仅模拟耗能型减速过程，用于驱动负载电机时则对应于车辆回馈制动工况。

2.3 电动汽车实验台

电动汽车系统实验台系统结构框图如图5所示，从结构上来说，由驱动系统和负载系统构成。

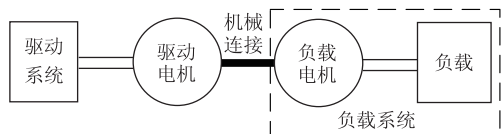


图5 电动汽车实验台系统结构框图

Fig. 5 Block diagram of electric vehicle test bench system

驱动系统的主要功能是以一定的方式和策略为整个试验系统提供电能，以降低能耗为目的，研究和测试各种能量管理策略与控制方法；机械系统主要用来完成电能-机械能-电能的转化，测试和

研究汽车在运行过程中各种机械量的变换规律。系统在控制系统的调节作用下，可以按照既定的规律来控制能量的流动，进而可以模拟车辆在运行过程中动能和热能的转化规律。负载系统按照试验工况需要模拟实时变化的动态负荷，最终使整个系统通过控制动态负载大小得以实现控制负载转矩的目的。

在负载电机转速一定的条件下，

$$e = C_e \phi n, \quad (11)$$

式中， C_e 为电机电势常数； ϕ 为电机磁感应强度； n 为电机转速。

电机平衡方程式为：

$$u = e_a - i_a R_a; \quad (12)$$

电机出口电压为：

$$u = i_a Z'; \quad (13)$$

电机扭矩为：

$$T = C_T \phi i_a. \quad (14)$$

式中， e_a 为电机电势； i_a 为电机电流； u 是电机输出电压； Z' 为等效负载阻抗； T 为电机扭矩； C_T 为电机转矩常数。

由式(11)~(14)得：

$$T = C_T \phi \frac{C_e \phi n}{R_a + Z'}. \quad (15)$$

由式(15)可知电机转速 n 一定时，通过改变负载阻抗 Z' 的大小，即合理地控制占空比 D 可以改变负载电机的转矩，从而实现转矩负载的模拟。

研究中使用阻抗变换器最终达到完成控制负载电机转矩的功能，也就是通过控制负载电机的负荷阻抗大小达到控制电机负载电流并最终控制电机转矩的目的，其控制框图如图6所示。

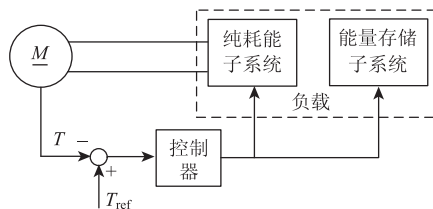


图6 负载系统控制框图

Fig. 6 Block diagram of load system control

图6中， T_{ref} 为参考扭矩，它是随时间变化的动态变量，事先已知，采用离线表格方式给出； T 是负载电机的实际扭矩。

3 试验结果

采用所述负载系统进行锂离子电池/超级电容

能量系统 UDDS 工况测试, 结果如图 7 所示, 图中虚线为参考值而实线为实际跟踪值。

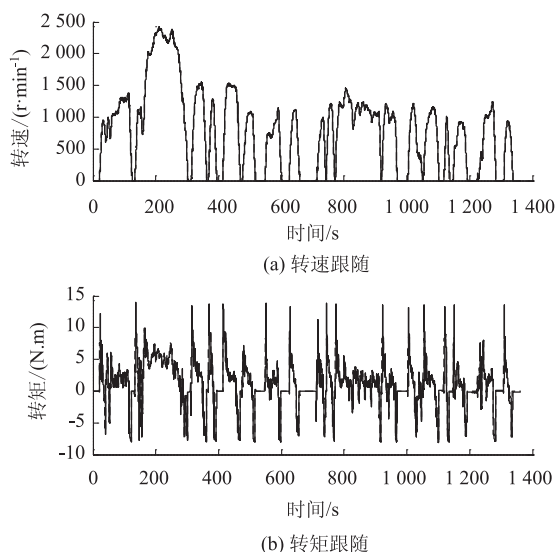


图7 蓄电池/超级电容能量系统 UDDS 工况测试
Fig.7 Battery/super capacitor energy system
UDDS condition test

UDDS 工况测试在各类汽车工况试验中相对复杂, 从试验结果看, 动态可编程负载系统能很好地进行负载模拟以用于电动汽车工况运行试验。

4 结论

试验表明该方案电路拓扑简单、控制效果良好且成本低廉。通过阻抗变换器可以使固定阻抗负载成为能随时间动态变化的负载, 并最终实现控制负载扭矩的目的, 是一种很好的低成本解决方案。直流阻抗变换器除了可以用于电动汽车试验负载之外, 还可以用在其他要求负载能变化的诸多场合。

参考文献:

References:

- [1] 张缓缓, 向绪爱, 叶克宝. 基于稳定性的四轮独立驱动电动汽车转矩分配策略研究 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (5): 141-146.
ZHANG Huan-huan, XIANG Xu-ai, YE Ke-bao. Research of Torque Allocation Strategy of Four-wheel Independent Driving Electric Vehicle Based on Stability [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (5): 141-146.
- [2] 胡东海, 何仁, 俞剑波, 等. 基于电液复合制动系统的电动汽车再生制动控制策略研究 [J]. 公路交通科技, 2014, 31 (3): 148-152, 158.
HU Dong-hai, HE Ren, YU Jian-bo, et al. Research of

Regenerative Braking Control Strategy of Electric Vehicle Based on Electro-hydraulic Hybrid Brake System [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31 (3): 148-152, 158.

- [3] 余卓平, 肖振宇, 冷搏, 等. 分布式驱动电动汽车操纵稳定性控制评价体系 [J]. 华东交通大学学报, 2016, 33 (5): 25-32.
YU Zhuo-ping, XIAO Zhen-yu, LENG Bo, et al. Control Evaluation System Testing of Distributed Drive Electric Vehicle Handling Stability [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33 (5): 25-32.
- [4] 单任仲, 肖湘宁, 尹忠东, 等. 能量回馈型电力电子负载的控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (18): 62-66.
SHAN Ren-zhong, XIAO Xiang-ning, YIN Zhong-dong, et al. Control Method of Energy Feedback Power Electronic Load [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2010, 30 (18): 62-66.
- [5] 张厚升, 赵艳雷. DSP 控制的能量回馈型交流电子负载设计 [J]. 电力自动化设备, 2011, 31 (12): 110-113.
ZHANG Hou-sheng, ZHAO Yan-lei. Design of Energy-feedback-type AC Electronic Load Controlled by DSP [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31 (12): 110-113.
- [6] 王成智, 邹旭东, 许赞, 等. 采用改进重复控制的大功率电力电子负载 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (12): 1-9.
WANG Cheng-zhi, ZOU Xu-dong, XU Yun, et al. Improved Repetitive Control Scheme for Power Electronic Load [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29 (12): 1-9.
- [7] 陈强, 鞠文耀, 贾中璐. 电能回馈直流电子负载的设计与实现 [J]. 电力电子技术, 2011, 45 (7): 108-110.
CHEN Qiang, JU Wen-yao, JIA Zhong-lu. Design and Realization of Energy Feedback Type DC Electronic Load [J]. Power Electronics, 2011, 45 (7): 108-110.
- [8] 刘超, 叶朝锋, 徐云, 等. 应用于电源测试的馈能型电子负载仿真研究 [J]. 电源技术, 2012, 36 (10): 1546-1548.
LIU Chao, YE Chao-feng, XU Yun, et al. Simulation Research on Energy Recycling Electronic Load for Power Supply Testing [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36 (10): 1546-1548.
- [9] 莫熙, 周伟, 窦晓波, 等. 基于 STM32 的程控直流电子负载设计 [J]. 电测与仪表, 2014, 51 (18): 85-91.

- MO Xi, ZHOU Wei, DOU Xiao-bo, et al. STM32 Based Programmable DC Electronic Load Design [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2014, 51 (18): 85 – 91.
- [10] 贾月朋, 任稷林, 祁承超, 等. 能量回馈型单相交流电子负载的研究 [J]. *电力电子技术*, 2011, 45 (6): 91 – 93.
- JIA Yue-peng, REN Ji-lin, QI Cheng-chao, et al. Research on Single AC Electronic Load with Energy Feedback [J]. *Power Electronics*, 2011, 45 (6): 91 – 93.
- [11] 沈栋. 可编程式能馈型直流电子负载研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- SHEN Dong. Research of Programmable Energy Feedback Type DC Electronic Load [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [12] ROSAS-CARO J C, PENG F Z, CHA H, et al. Z-Source-Converter-Based Energy-Recycling Zero-Voltage Electronic Loads [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 56 (12): 4894 – 4902.
- [13] WANG J, YANG L, MA Y, et al. Static and Dynamic Power System Load Emulation in a Converter – Based Reconfigurable Power Grid Emulator [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, 31 (4): 3239 – 3251.
- [14] 刘志强, 汪浩磊, 陈建兵, 等. 电动汽车机电复合回馈制动模拟实验台设计 [J]. *机械设计*, 2016 (11): 39 – 43.
- LIU Zhi-qiang, WANG Hao-lei, CHEN Jian-bing, et al. Test Bench Design of Electro-mechanical Compound Regenerative Braking in Electric Vehicles [J]. *Journal of Machine Design*, 2016 (11): 39 – 43.
- [15] 宋绍剑, 林庆芳, 林小峰. 一种纯电动车及双向电能转换试验平台 [J]. *系统仿真学报*, 2015, 27 (7): 1601 – 1608.
- SONG Shao-jian, LIN Qing-fang, LIN Xiao-feng. Experiment Platform for Pure Electric Vehicles and Bi-directional Power Conversion [J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27 (7): 1601 – 1608.
- [16] 刘志刚, 和敬涵. 基于电流型 PWM 整流器的电子模拟负载系统研究 [J]. *电工技术学报*, 2004, 19 (6): 74 – 77.
- LIU Zhi-gang, HE Jing-han. Design and Realization of Energy Feedback Type Electronic Power Load Based on Current-Type PWM Rectifier [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2004 (6): 74 – 77.
- [17] FAJRI P, LEE S, PRABHALA V A K, et al. Modeling and Integration of Electric Vehicle Regenerative and Friction Braking for Motor/Dynamometer Test Bench Emulation [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65 (6): 4264 – 4273.
- [18] POPOV A, TYBEL M, SCHUGT M. Power Hardware-In-The-Loop Test Bench for Tests and Verification of EV and EVSE Charging Systems [C] // *IEEE International Electric Vehicle Conference 2014*. Dallas, USA: IEEE, 2014: 17 – 19.
- [19] HANNAN M A, AZIDIN F A, MOHAMED A, et al. Test Bench Model and Algorithms for Multi-Sources Light Electric Vehicle Energy Management System [C] // *IEEE Industry Applications Society Meeting*, 2015. Dallas, USA: IEEE, 2015: 1 – 8.
- [20] SILVA M, GONCALVES A P, MARQUES J, et al. Modelling an Electric Vehicle Powertrain on Bench [C] // *Vehicle Power and Propulsion Conference 2015*. Chicago: IEEE, 2015: 1 – 6.
- [21] KYSLAN K, ĎUROVSKÝ F. Control of a Test Bench for Dynamic Emulation of Mechanical Loads [J]. *Procedia Engineering*, 2012, 48 (1): 352 – 357.
- [22] PASSENBRUNNER T E, FORMENTIN S, SAVARESI S M, et al. Direct Multivariable Controller Tuning for Internal Combustion Engine Test Benches [J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 29 (6): 115 – 122.
- [23] CAPASSO C, VENERI O. Laboratory Bench to Test ZEBRA Battery Plus Super-Capacitor Based Propulsion Systems for Urban Electric Transportation [J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 1956 – 1961.
- [24] ZHANG Z, ZHANG X, CHEN W, et al. A High-Efficiency Energy Regenerative Shock Absorber Using Supercapacitors for Renewable Energy Applications in Range Extended Electric Vehicle [J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 177 – 188.