

不同工况下燃料电池混合驱动测试系统设计及构建

杨洁, 孙术发*, 唐华林, 葛安华, 邢涛, 马超
(东北林业大学工程技术学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要:为了研究燃料电池在不同工艺环境下的放电特性, 该方案通过自行搭建燃料电池测试平台, 采用理论计算、计算机建模仿真与实验相结合的方法, 确定燃料电池的最佳工作性能。在燃料电池放电性能研究的基础上, 提出以燃料电池作为装卸搬运设备的动力, 设计驱动系统搭建及实验方案, 研究不同工况下燃料电池的供电耐久性, 并提出相应的混合动力方案及控制策略, 为燃料电池应用于装卸搬运设备提供基础技术支持。

关键词:燃料电池; 装卸搬运设备; 不同工艺环境; 不同工况; 混合动力

中图分类号: TM911.42

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)05-0210-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.05.048

Design and construction of fuel cell hybrid drive test system under different operating conditions

YANG Jie, SUN Shu-fa*, TANG Hua-lin, GE An-hua, XING Tao, MA Chao

(College of Engineering & Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to study the discharge characteristics of fuel cells in different process situations, the optimum working performances of fuel cell is determined through combining theoretical calculation, computer modeling and simulation, and tests, based on self-built fuel cell test platform. Through studying the discharge performance of fuel cell, this paper proposes to use fuel cell as the power for handling equipment and puts forward the design drive system and the experimental scheme. The power supply durability of fuel cell under different working conditions are studied and the corresponding hybrid schemes and control strategies are put forward, which provides with basic technical support for fuel cell used in handling equipment.

Key words: fuel cell; handling equipment; different process environment; different working conditions; hybrid

随着我国国民经济的发展, 物流业也在蓬勃发展, 装卸搬运作业作为物流运输中的关键一环, 对物流系统的作业效率影响很大。常用的装运搬卸设备有各类叉车、堆高机、起重机、输送分拣机等, 目前此类设备的动力主要是内燃机和蓄电池。例如现阶段我国市场上使用比较多的内燃叉车, 动力是内燃机, 虽然其功率强劲, 应用范围也比较广, 但能源紧缺、排气和噪声污染等问题十分严重^[1], 且随着工业技术的不断进步, 室内搬运的场合越来越多, 传统的内燃叉车对人类健康危害很大^[2]。目前内燃叉车的替代品主要是以蓄电池为能量来源的电动叉车。电动叉车虽然能量利用率高, 维护性能好, 无噪音排放, 使用成本低^[3], 但存在充电时间长, 空间占用大, 且废旧燃料电池对环境造成污染等问题。高效、无噪声、无污染的燃料电池叉车逐渐崭露头角, 成为美、日巨头企业及众多学者研究热点。

燃料电池能直接将化学能转化为电能, 不受卡诺循环限制, 效率是内燃机效率的3倍^[4-6]。其中, 质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 工作温度较低, 在 60~80℃, 发电效率高 (LHV) (40%~60%), 启停速度快 (<1 min), 功率密度高, 内部结构紧凑, 污染零排放^[7-9], 在便携式发电、移动式发电以及固定式发电领域均有广阔的应用前景^[10]。

高建华等^[11]针对温度对 PEMFC 的影响提出了温度波动模型, 并利用流体动力学软件 (Fluent) 进行仿真计算得出该模型能够较准确地预测 PEMFC 性能。徐梁飞等^[12]通过构建燃料电池/蓄电池“能量型”混合动力构型, 并对整个混合系统进行仿真, 研究燃料电池耐性衰减机理并制定相应的能量管理策略。李飞强等^[13]以城市客车为研究对象, 在 AMESim 软件平台上搭建燃料电池-动力电池仿真

收稿日期: 2017-10-24

基金项目: 中央高校基金科研业务费专项资金项目 (2572016CB12)

作者简介: 杨洁 (1996-), 女, 硕士生; 孙术发 (1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为物流智能设备、新能源制造, 通讯联系人, 0451-82191248, sssfang@163.com。

模型,并选择中国典型城市公交循环工况进行AMESim/Simulink联合仿真,验证模型的准确性。薛凯强等^[14]设计了一种以锂电池为主要动力的燃料电池混合系统,在Simulink平台上建模仿真验证了该模型及能量管理策略的准确性。黄明宇等^[15]对ADVISOR软件中的燃料电池车型进行二次开发,实现了燃料电池和动力电池混合动力场地车适用的循环工况的仿真,并搭建控制策略验证模型。

燃料电池是一个水管理和热管理相耦合的复杂系统,性能受温度、压力、湿度等因素影响,且装卸搬运设备运行工况复杂,因此研究不同工艺环境、不同工况下燃料电池的供电耐久性,并提出相应的混合动力方案及控制策略显得尤为重要。目前众多学者侧重通过建模仿真研究燃料电池工作性能和混合动力能量控制策略,本文中设计了一种不同工况下燃料电池混合驱动测试系统的搭建方案。

1 燃料电池混合驱动系统构建方案

为了研究不同工艺环境、不同工况燃料电池(PEMFC)混合驱动系统稳定性,制定相应的混合动力

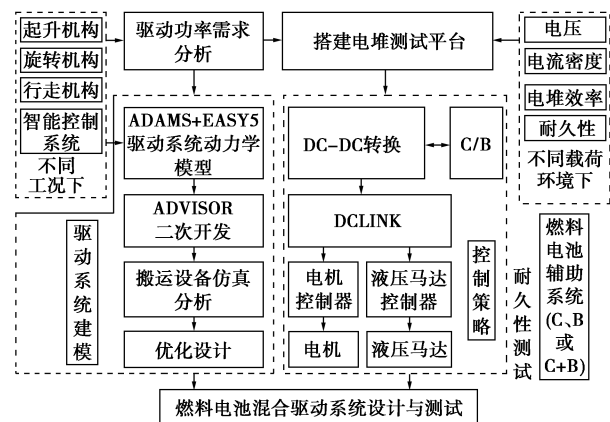


图1 技术路线

力能量管理策略,从而构建燃料电池(PEMFC)混合驱动系统,整体实验设计方案及技术路线如图1。

2 不同工艺环境下 PEMFC 放电性能测试

PEMFC系统中,水管理与热管理相耦合,导致其特性复杂,电池性能受空气流量、电堆反应温度、湿度等多方面因素影响,因此测试不同环境下PEMFC放电特性并制定相应的控制策略显得尤为重要,其控制目标是在当前电流输出下使电堆输出电压最高,功率最大。采用建模、计算机仿真和实验相结合的方式研究PEMFC在不同环境下的放电特性。实验设计流程如图2。

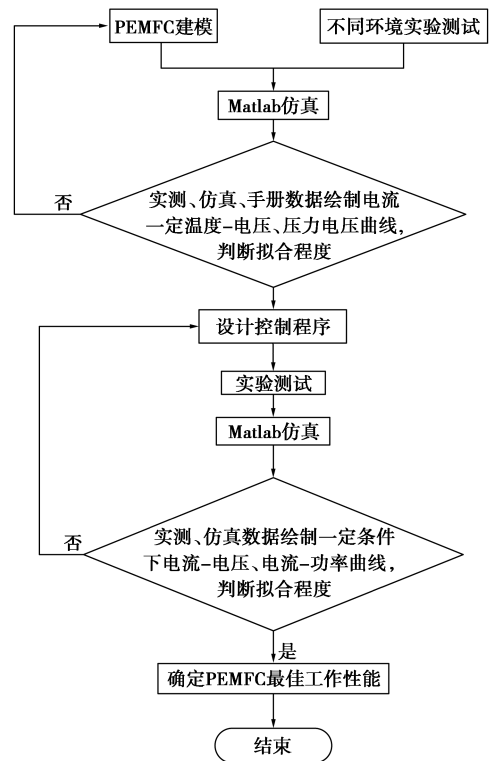


图2 PEMFC性能测试方案

(上接第209页)

- [6] 刘俊峰,刘源,李学忠.杂多酸催化甲醇液相合成二甲醚[J].石油化工,2006,35(10):924-926.
- [7] Lei Z G, Zou Z W, Dai C N, et al. Synthesis of dimethyl ether (DME) by catalytic distillation[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(14): 3195-3203.
- [8] Dadgar F, Myrstad R, Pfeifer P, et al. Direct dimethyl ether synthesis from synthesis gas: The influence of methanol dehydration on methanol synthesis reaction[J]. Catalysis Today, 2016, 270: 76-84.
- [9] Saravanan K, Ham H, Tsubaki N, et al. Recent progress for direct synthesis of dimethyl ether from syngas on the heterogeneous bi-functional hybrid catalysts[J]. Applied Catalysis B: Environmental,

2017, 217: 494-522.

- [10] Wei Q H, Yang G H, Gao X H, et al. A facile ethanol fuel synthesis from dimethyl ether and syngas over tandem combination of Cu-doped HZSM35 with Cu-Zn-Al catalyst[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 316: 832-841.
- [11] 秦祖赠,刘瑞雯,纪红兵,等.二氧化碳的活化及其催化加氢制二甲醚的研究进展[J].化工进展,2015,34(1):119-126.
- [12] Inayat A, Ghenaï C, Naqvi M, et al. Parametric study for production of dimethyl ether (DME) as a fuel from palm wastes[J]. Energy Procedia, 2017, 105: 1242-1249.
- [13] 聂兆广,刘殿华,应卫勇,等.双功能混合催化剂上含氮合成气一步法制二甲醚的本征动力学模型[J].计算机与应用化学, 2003, 20(5): 662-666. ■

2.1 PEMFC 建模仿真

目前 PEMFC 建模常用经验模型、机理模型、电化学稳态模型以及电化学动态模型^[16]。根据已建立的 PEMFC 经验模型,燃料电池电压经典公式为^[17-18]:

$$V_{cell} = E_{nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con}$$

式中, E_{nernst} 为能斯特电动势; V_{act} 为活化极化过电压; V_{ohmic} 为欧姆极化过电压; V_{con} 为浓差极化过电压。

根据 PEMFC 的性能影响因素可知,温度和反应气体压力的变化对于 PEMFC 的性能有较大的影响。考虑燃料电池状态变化的过程性,在经验模型的基础上,建立相应的电化学动态模型、两极气体流道模型和热模型,对 PEMFC 的电压从理论上进行逻辑推理,可以找出电流一定条件下电压的主要影响因素。

由于 PEMFC 处于动态变化过程中,因此对 PEMFC 进行实时控制是保证电堆良好输出性能的关键措施。目前 PEMFC 常用的控制策略有预测控制、模糊逻辑控制、PID 控制以及组合控制等。

2.2 PEMFC 放电性能测试平台

自行搭建 PEMFC 测试平台,测试不同环境下 PEMFC 放电特性。测试平台系统结构包括 H_2 、 O_2 供给系统, H_2 、 O_2 加湿系统,温度监测系统,数据收集与监测系统 4 个部分^[19]。PEMFC 监测系统设计如图 3。

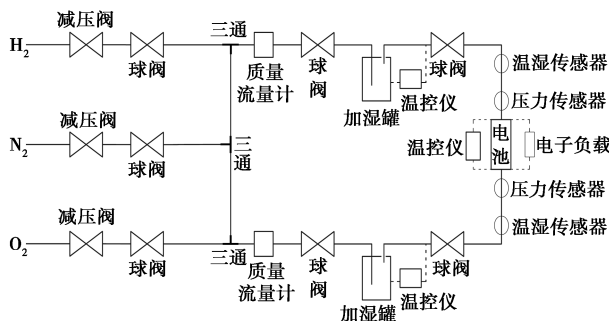


图 3 PEMFC 测试系统设计图

整个测试系统需要测试和监控大量物理参数,表 1 列出了涉及到的物理参数以及选用的测量仪器的技术参数。

表 1 物理参数及测试仪器参数

物理参数	仪器	型号	测量范围	输出信号	精度
H_2 流量	质量流量计	LZB-10	100~1000 L/h		
O_2 流量	质量流量计	LZB-15	0.25~2.5 m ³ /h		
H_2 加湿温度	温控仪	GET2-IRC18W	-200°~1600°	4~20 mA	0.5%
O_2 加湿温度	温控仪	GET2-IRC18W	-200°~1600°	4~20 mA	0.5%
入口 H_2 温度	温度传感器	JWSK-6AC	0~100°	4~20 mA	0.5%
入口 O_2 温度	温度传感器	JWSK-6AC	0~100°	4~20 mA	0.5%
电池温度	温控仪	GET2-IRC18W	-200°~1600°	4~20 mA	0.5%
入口 H_2 湿度	湿度传感器	JWSK-6AC	0~100%	4~20 mA	2%
入口 O_2 湿度	湿度传感器	JWSK-6AC	0~100%	4~20 mA	2%
入口 H_2 压力	压力传感器	JYB-KO-GW	0~0.8 MPa	4~20 mA	0.2%
入口 O_2 压力	压力传感器	JYB-KO-GW	0~0.8 MPa	4~20 mA	0.2%
放电电压	电子负载	PLZ70UA	0~165 V	RS232/GPIB	0.01 mV
放电电流	电子负载	PLZ70UA	0~16.5 A	RS232/GPIB	0.01 mA

H_2 、 O_2 供给系统:该系统主要用来输送反应所需的 H_2 、 O_2 以及 N_2 ,其中 N_2 用于实验开始前及结束后对管道的吹扫。整个系统由氢气罐、氧气罐、减压阀、质量流量计构成,其中质量流量计选用 LZB-10 和 LZB-15 2 种型号,具体技术参数见表 1。打开氢气罐和氧气罐,用减压阀调节至合适压力,然后调节质量流量计旋钮,使气体流量适中。

H_2 、 O_2 加湿系统:该系统主要是一个不锈钢圆桶,不锈钢圆桶内装有纯水,采用鼓泡加湿。整个圆

桶完全密封,气体从圆桶顶部的一条管路进入圆筒的底端,从顶部的另一条气路回到 H_2 、 O_2 供给系统。由于燃料供应系统中采用的气体质量流量计是单向的,所以在加湿系统前安装球阀,防止特殊情况气体逆流回质量流量计,造成质量流量计的损坏。在不锈钢桶外部装有液位计,可以在不打开圆桶的情况下观察水位,防止频繁打开圆桶导致系统气密性降低。在不锈钢圆桶外部包上电加热圈,通过调节对不锈钢圆桶内纯水的加热温度,使气体达到不

同的加湿程度。

温度监测系统:该测试系统的温度显示和控制系统主要是指气体加湿系统中的温度控制以及电池的温度控制。在气体加湿系统中安装有温控仪,其中温控仪输出信号4~20 mA,型号GET2-IRC18W,可以控制调节加湿液体的温度至测试所需要的温度并显示读数。

数据收集与监测系统:该测试系统为可编程电子负载,可以采集电流、电压等电信号,并可以通过电脑进行控制。

测试平台控制软件采用LabVIEW进行设计,可以实现对电堆运行状态、电堆温度等同时进行控制的目的。当采用不同的控制方法时,可以通过改变控制参数,观察参数改变时U-I曲线的差异,探究某一种控制方法的最佳控制参数。

3 不同工况下 PEMFC 放电特性测试

以 PEMFC 作为装卸搬运设备的动力,研究测试不同工况下燃料电池放电特性,根据功率动态响应曲线确定混合方案。在驱动系统中加入蓄电池(B)或者超级电容(C)构成混合动力,制定能量管理策略。拟采用模拟工况测试结合软件建模仿真方法进行研究,实验设计方案流程如图4。

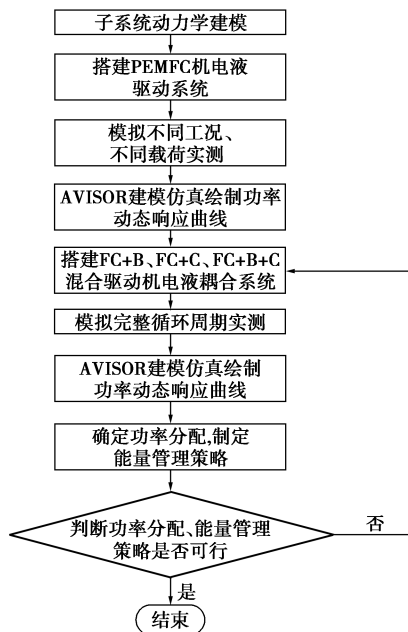


图4 不同工况下 PEMFC 放电特性测试方案

3.1 机电液耦合驱动系统建模

首先在 Pro/E (Pro/Engineer) 或直接在 ADAMS (机械系统动力学自动分析, automatic dynamic analysis of mechanical systems) 中进行叉车各驱动子

系统三维建模,然后根据计算结果和仿真结果对驱动机构进行载荷加载和施加约束,经后处理得出驱动系统的速度、位移、加速度等动力学参数,将参数带入到动力学模型中,在控制系统和多学科动态系统的仿真软件 EASY5 中设计控制元件、搭建控制系统、设计液压元件、构建液压系统,经仿真得到机电液耦合动力学模型,图5为机电液协同仿真方案。

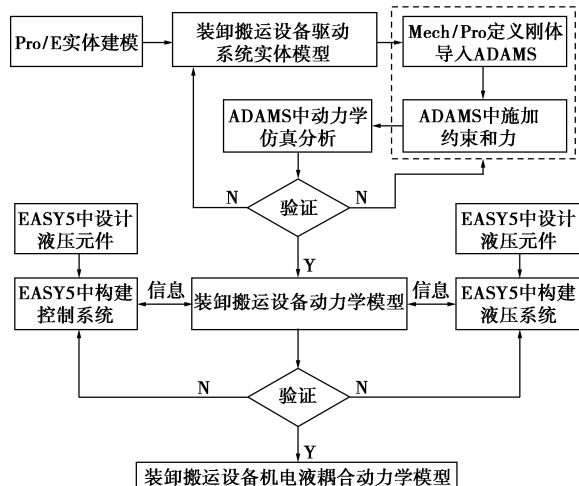


图5 机电液协同仿真方案

通过动力学建模分析,得出电机所需的输入功率,搭建燃料电池驱动系统平台,如图6。

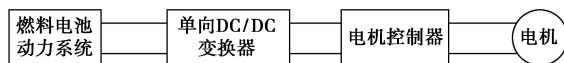


图6 燃料电池机电液耦合驱动系统

3.2 不同工况下 PEMFC 放电特性测试

叉车完整工作周期通常包括下面几个基本动作^[20]:①空载行驶;②垂直货叉;③起升货叉;④低档前行;⑤带货起升;⑥倾斜货叉;⑦低档后退;⑧带货下降;⑨载货行驶;⑩起升货物;⑪低档前行;⑫垂直货叉;⑬下放货物;⑭低档后退;⑮下放货叉;⑯倾斜货叉。

叉车工作电机由牵引电机与油泵电机2部分组成,叉车行走爬行主要由牵引电机完成,油泵电机负责完成叉车货叉提升。利用搭建的燃料电池驱动系统,模拟叉车不同工况、不同载荷运行情况,结合 ADVISOR (由美国可再生能源实验室在 MATLAB 和 SIMULINK 软件环境下开发的高级车辆仿真软件) 建模仿真,绘制燃料电池功率动态响应曲线。模拟以下工况:静止提升(0.5、1.0 t);行走(低速、中速、高速,0、0.5、1.0 t);整个循环周期。

根据燃料电池动态响应曲线,构建混合动力驱

动系统:燃料电池加蓄电池(FC+B)、燃料电池加超级电容(FC+C)或者燃料电池加蓄电池加超级电容(FC+C+B),模拟叉车整个循环周期,结合 ADVISOR 建模仿真,绘制混合动力功率动态响应曲线,制定相应的能量管理策略。

3.3 燃料电池混合驱动机电液耦合系统测试平台

燃料电池混合驱动机电液耦合系统测试平台包括 5 个部分:计算机模拟能量管理控制器、PEMFC 系统、DC/DC 变换器、辅助能源及电子负载^[21],功能框图如图 7。

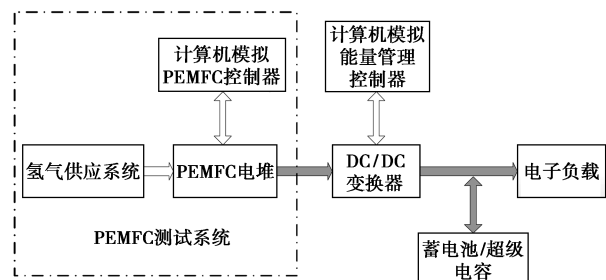


图 7 PEMFC 混合动力叉车模拟系统平台功能框图

“计算机模拟能量管理控制器”是一台可以编程的上位 PC 机,不仅可以采集系统参数,还可以编写系统能量管理程序,通过对 DC/DC 变换器进行控制,进行混合动力系统的能量分配。

4 结论

提出了燃料电池混合驱动测试系统设计思路和构建方案。目前 PEMFC 有经验模型、机理模型、电化学稳态模型以及电化学动态模型等多种建模方法,放电性能受温度、压力等多种因素影响。搭建了 PEMFC 测试平台,并设计了一种不同工艺环境下 PEMFC 放电性能测试方案,该方案通过理论计算、计算机建模仿真和实验测试,可以确定 PEMFC 的建模方案和最佳放电性能及控制策略。在以上研究基础上,搭建燃料电池驱动系统平台并设计不同工况下 PEMFC 放电特性测试方案。该方案可以对不同工况下装卸搬运设备进行测试和仿真,研究燃料电池驱动系统的稳定性,并进一步对混合驱动系统进行测试和仿真,制定相应的能量管理策略。该驱动系统的构建为燃料电池应用于装卸搬运设备提供基础技术支持,研究成果对将来研制并推广燃料电池自行式装卸搬运设备具有重要的意义。

参考文献

[1] 李进卫. 叉车现代技术的发展趋势[J]. 建筑机械, 2015, (6):

22-29.

- [2] 胡星晔. 国内叉车行业现状及其市场需求分析[J]. 机电技术, 2103, (6): 136-138.
- [3] 陆刚. 电动叉车的技术发展趋势[J]. 物流技术与应用, 2007, (7): 90-92.
- [4] 王菊, 朱心怡. 国内外燃料电池汽车示范与应用情况综述[J]. 太阳能, 2017, (8): 31-34.
- [5] 冯小保, 黄明宇, 问朋朋, 等. 燃料电池车及车用燃料电池的发展现状及展望[J]. 化工新型材料, 2013, 41(1): 1-4.
- [6] 郭海龙, 张永栋, 张胜宾, 等. 基于电池循环寿命的纯电动汽车变速器传动比的优化研究[J]. 森林工程, 2017, 33(5): 108-112.
- [7] Williamson S S, Emadi A, Larminie J. Comparative assessment of hybrid electric and fuel cell vehicles based on comprehensive well-to-wheels efficiency analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 856-862.
- [8] O'Hayre R, Cha S, Colella W, et al. Fuel cell fundamentals 2nd edition [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2009: 22-45.
- [9] 王昕灿, 吕立亚, 吴松松, 等. 一种新型动力电池状态监测系统的设计[J]. 森林工程, 2015, 31(2): 135-138.
- [10] Miller M, Bazylak A, Berning T. A review of polymer electrolyte membrane fuel cell stack testing [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(2): 601-613.
- [11] 高建华, 刘永峰, 裴普成, 等. 温度波动对质子交换膜燃料电池的影响[J]. 可再生能源, 2017, 35(8): 1150-1155.
- [12] 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): 141-153.
- [13] 李飞强, 柴结实, 王宗田, 等. 燃料电池-动力电池电混混合动力客车的仿真分析[J]. 客车技术与研究, 2017, (3): 1-4.
- [14] 薛凯强, 赵青山. 混合动力系统的控制系统设计与仿真[J]. 电源技术, 2017, 141(6): 867-870.
- [15] 黄明宇, 张政, 邓佳文, 等. 基于 ADVISOR 的氢电混合动力场地车仿真模型开发[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(5): 1041-1048.
- [16] Crisalle Oscar Dardo, 韩闯, 吴莉莉, 等. 质子交换膜燃料电池建模与控制研究进展[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2015, 36(6): 61-65.
- [17] Biao N, Oproescu M H, Raceanu M, et al. Efficient energy control strategies for a standalone renewable/fuel cell hybrid power source [J]. Energy Conversion and Management, 2015, (90): 93-110.
- [18] Zhan Yuedong, Guo Youguang, Zhu Jianguo, et al. Power and energy management of grid/PEMFC/battery/supercapacitor hybrid power sources for UPS applications [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015, (67): 598-612.
- [19] 吴曦. 质子交换膜燃料电池测试系统设计与单电池建模[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [20] 王鑫. 混合动力叉车动力装置参数匹配与能量控制策略研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2012.
- [21] 张德玉. 燃料电池/蓄电池混合动力叉车电源系统设计[D]. 成都: 西南交通大学, 2015. ■