

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.09.005

基于 FPGA 的太阳能充电系统的研究与设计

程红丽¹, 张耕川²

(1. 西安科技大学 通信与信息工程学院, 西安 710054, 2. 西安三星(中国)半导体有限公司, 西安 710065)

摘要:针对高压输电线路污秽监测系统中光伏供电系统的特殊要求,设计了适合于小功率太阳能电池快速为超级电容器充电的系统。本设计采用 BUCK-BOOST 电路作为充电电路的主拓扑结构,并采用新颖的 MPPT 跟踪方法,即加权变步长电压滞环扰动观察技术,由现场可编程门阵列实现控制。运用 Matlab/Simulink 对电路和控制策略进行仿真验证,并完成了充电系统的制作和测试。测试结果表明:该充电系统采用小功率太阳能电池,在正常天气条件下,均能够在较短时间内完成为 2F 和 5F 超级电容器组的充电工作。与课题组之前的研究成果相比,本设计有效缩短了充电时间,提高了太阳能的利用率。

关键词:升/降压变换电路;光伏;最大功率点跟踪技术;超级电容器;现场可编程门阵列

中图分类号:TK513

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)09-034-06

Research and design of a solar charging system based on FPGA

CHENG Hongli¹, ZHANG Gengchuan²

(1. School of Communication & Information Engineering, Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, China; 2. Samsung (China) Semiconductor Co. Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to meet the special application requirements of photovoltaic power system for contamination monitoring system in high voltage transmission line, this paper presents a charging system suitable for fast charging of supercapacitor with low-power solar cells. This design uses BUCK-BOOST circuit as the main charging circuit topology, uses a novel MPPT tracking method, Weighted Variable-Step Voltage-Hysteresis Perturbation & Observation MPPT(WV P&O MPPT), and achieves control by FPGA. The system's configuration and control strategy are theoretically verified by Matlab/Simulink, and the production and testing of the charging system are completed. Test results show that the charging system uses low-power solar cells and charges 2F and 5F super capacitors under normal weather conditions, and all of these charging works can be finished during a relatively short time. Compared with the previous research of our task force, this design effectively reduces the charging time and improves the utilization of solar energy.

Key words: BUCK-BOOST; photovoltaic; MPPT; super capacitor; FPGA

跨入 21 世纪后,常规能源匮乏以及化石能源对环境的破坏迫使人们大规模地开发和利用绿色新能源。在众多新能源中,太阳能以其储量丰富、分布广泛、清洁、经济、可用性强等优点得到了人类的大力发展。与太阳能电池相结合的充电技术正处于快速发展阶段,且已经取得了许多研究成果^[1-4]。但是,如何选用更加合理的硬件拓扑结构与更加优越的 MPPT(最大功率点跟踪)技术相结合以提高太阳能电池的利用效率,仍然是科研工作的研究目标。目前,在国内外对于光伏充电技术的研究中,多采用 BUCK、BOOST 电路作为主充电拓扑结构,且储

收稿日期:2014-08-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277149)

作者简介:程红丽(1966-),女,西安科技大学教授,主要从事微电子学及电路与系统的研究,(E-mail)chhl@xust.edu.cn。

能设备也多以蓄电池为主,考虑到蓄电池的充电特性,使得光伏充电系统难以实现充分利用太阳能电池为储能设备充电的目标。本设计的充电系统,每次充电的对象为端电压可能已经放电到0V超级电容器,充电电路在充电过程中既有充电初期的降压工作状态,也有充电后期的升压工作状态,因此,文献[5-7]所述的设计方案不能满足本设计的应用要求。

笔者根据高压输电线路污秽监测系统中光伏供电系统的具体要求,设计了一个为超级电容器充电的光伏充电系统,根据负载要求,要在短时间内为不同容量的超级电容器从端电压0V充电到35V。根据太阳能电池的输出端电压和充电过程中超级电容器端电压的关系,在选择充电电路结构时,采用了BUCK-BOOST电路结构,并运用新颖的加权变步长电压滞环扰动观察MPPT技术较准确地跟踪了太阳能电池的最大功率点,实现了对超级电容器阵列的快速充电。此外,超级电容器具有良好的快速充放电特性,且充放电速度对于超级电容器的寿命影响极小,因此,本设计充电过程中完全采用MPPT充电方式,当超级电容器充电到额定电压值时,采用浮充充电工作方式^[8-10]。

1 系统组成

设计的太阳能充电系统主要由太阳能电池、BUCK-BOOST开关变换电路、FPGA控制器、储能负载组成,系统组成框图如图1所示。

实验选用的太阳能电池在25℃、AM(Air Mass)1.5、1 000 W/m²条件下测试,其参数信息为:开路电压22.41 V、短路电流0.62 A、峰值电压17.9 V、峰值电流0.56 A、最大功率12.1 W。由于在充电过程中超级电容器的端电压存在低于和高于太阳能电池输出电压的不同情况,本系统采用BUCK-BOOST型开关变换器作为充电主拓扑,可以满足整个充电过程的转换关系。控制器选用Altera公司推出的Cyclone II EP2C8Q208C8N型号的FPGA控制器。FPGA具备的并行语句处理能力,可以提高控制系统的运行速度,此外,可以后期定制集成化,降低系统成本。储能设备选用具有高功率密度的超级电容器,根据不同的容量要求选用不同数量的阵列组合,本设计中分别为2F/40V和5F/40V的超级电容阵列。

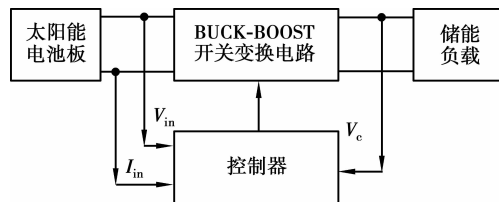


图1 高效太阳能充电系统的主要组成

2 系统控制

2.1 太阳能电池的MPPT技术

太阳能电池是一种非线性电源,在给定的外部环境下,随着端口电压的变化,太阳能电池的输出电流和输出功率都会出现非线性变化。MPPT技术就是要让太阳能电池在光照强度和环境温度同时变化的条件下,仍然能够稳定地工作在最大功率点处。从本质上讲,MPPT技术就是实现了使太阳能电池内阻与负载阻抗相等(即阻抗匹配),各式各样的变换电路都是通过改变负载的等效阻抗来实现阻抗匹配。

BUCK-BOOST开关变换电路正常工作时,其输出电压 V_o 、输入电压 V_i 与占空比 d 之间满足下式:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{d}{1-d} \quad (1)$$

变换电路的输入功率(即太阳能电池输出功率)为 P_i ,输出功率为 P_o ,转换效率为 η ,则有如下关系式:

$$\frac{R_i}{R_L} = \frac{\frac{V_i^2}{P_i}}{\frac{V_o^2}{P_o}} = \eta \frac{(1-d)^2}{d^2} \quad (2)$$

其中, R_i 为从变换电路输入端看进去的等效电阻, R_L 为负载电阻。由公式(2)可得:

$$R_i = \frac{\eta(1-d)^2 R_L}{d^2} \quad (3)$$

由式(3)可以得出,通过改变占空比 d 的值,就可以实现对负载等效阻抗的变换,以达到阻抗匹配的目的。

2.2 MPPT的控制策略

扰动观察法是一种传统的MPPT技术,它以结构简单、测量参数较少、实现容易而被广泛应用。但是,

扰动步长取值过大时,会在最大功率点附近过大震荡而引起能量浪费;扰动步长取值过小时,跟踪最大功率点的速度又会太慢。这就无法做到对跟踪精度与速度的兼顾。为了改善这种不足,观察如图 2 所示太阳能电池的 $U-P$ 曲线可以看出,在电压变化量 ΔV 不变的情况下距离最大功率点 P_{max} 越近,功率变化量 ΔP 越小。这是因为 $U-P$ 曲线上离最大功率点越远处,曲线斜率的绝对值 K 越小,而最大功率点处的 K 就是零。利用这一曲线特性,可以将 K 引入扰动观察 MPPT 技术,作为固定步长的权值。此外,还可以进一步将 $U-P$ 曲线分为: K 大于 0.2 以及 K 小于 0.2 的两个部分,分别设定不同的固定步长。这样可以在距离最大功率点较远处以大步长快速接近最大功率点,距离最大功率点近到一定程度后改用小固定步长以加强到达最大功率点后的 MPPT 精度。

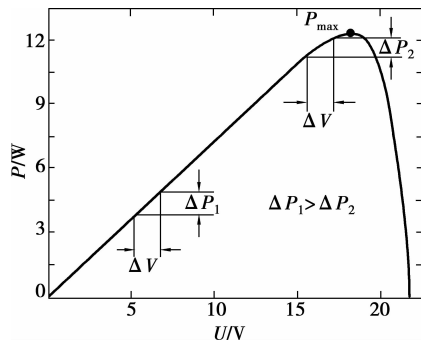


图 2 太阳能电池的 $U-P$ 特性曲线

本实验中超级电容器的初始电压值为零,与开关变换器输入端电压(即太阳能电池的输出电压)相差很大。滞环控制方式瞬态响应特性好,能及时调节开关通断时间,更为快速有效地控制整个电路,确保了 MPPT 技术稳定地工作。因此,采用电压滞环控制技术。

综合仿真和分析结果,本设计采用了加权变步长电压滞环扰动观察 MPPT 技术,即通过将开关变换电路输入端电压(即太阳能电池输出电压)设定为可变滞环值,让滞环整体进行扰动,观察太阳能电池输出功率的变化情况。同时,滞环电压的扰动步长是通过综合当前工作点对应权值以及相应曲线斜率下固定步长值后得出的。这种 MPPT 技术,更大地兼顾了速度与精度,使整个系统能够更加高效地完成充电任务。加权变步长电压滞环扰动观察 MPPT 技术流程图如图 3 所示。

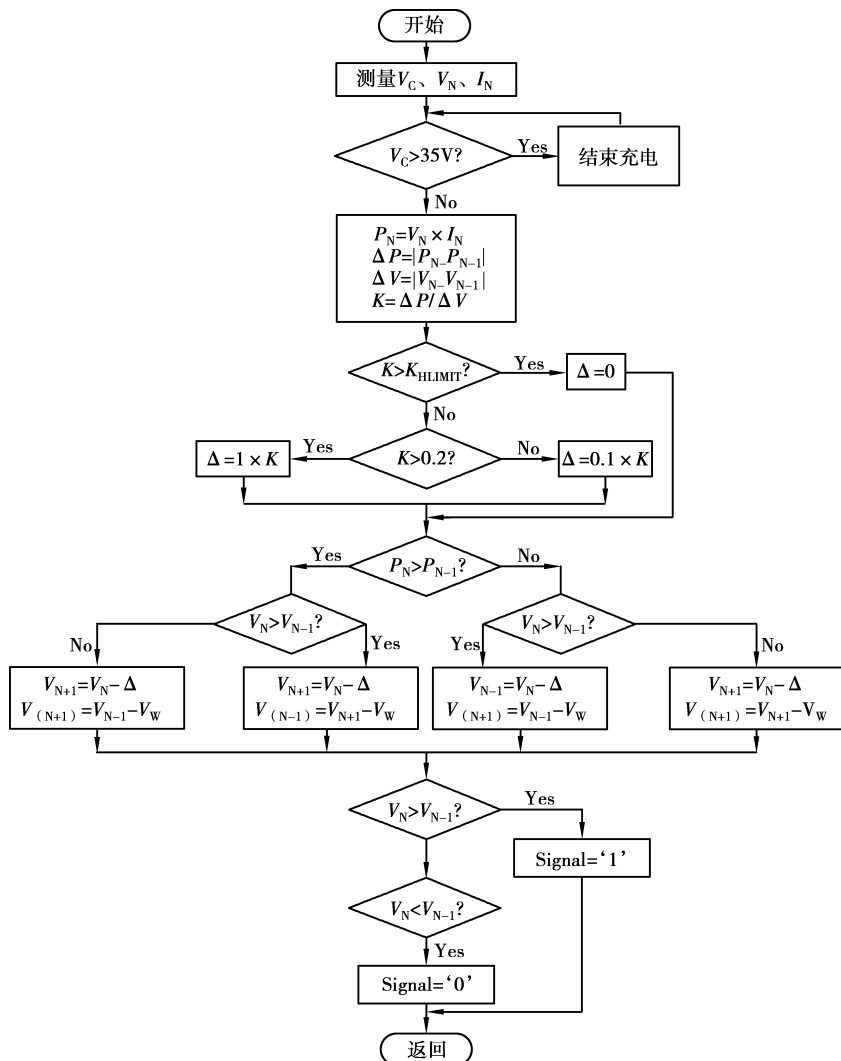


图 3 变步长电压滞环扰动观察法控制流程图

图3中, V_C 为超级电容器端电压; V_N 为现态开关变换电路输入端电压(滞环上限); I_N 为现态开关变换电路输入电流; P_N 为现态开关变换电路输入功率; P_{N-1} 为前态开关变换电路输入功率; Δ 为电压扰动步长; V_{N+1} 为后态开关变换电路输入电压(滞环上限); $V_{(N+1)-}$ 为后态开关变换电路输入电压(滞环下限); V_w 为滞环宽度; K_{HLIMIT} 为设定的权值上限。

需要指出的是,在控制过程中,并不必关心开关占空比与当下开关变换器输入输出电压关系是否契合。其原因主要在于,如果占空比与电路输入输出电压关系相矛盾,则此时BUCK-BOOST开关变换电路就会无法正常工作,MPPT功能失效,表现为输出功率开始下降,那么控制器就要开始改变开关的通断时间以维持整个系统的最大功率输出,也就是说整个系统是具有自适应性的,它本身就不会允许占空比与电路输入输出电压关系相矛盾的情况发生^[11-15]。

2.3 基于FPGA的系统设计

图4为本太阳能充电系统的数字控制部分原理图,由图可见,本系统控制部分由分频模块、A/D控制模块、逻辑矢量-整型量转换模块、基于MPPT的PWM波生成模块组成。共计有外部输入端17个,外部输出端2个,CLKIN为系统时钟输入端,CLKOUT1~CLKOUT4为分频模块为A/D控制模块、逻辑矢量-整型量转换模块、基于MPPT的PWM波生成模块、A/D转换器输出的时钟信号输出端;datain1~datain2为对太阳能电池的输出电压、输出电流数据的采样信号输入端,PWM为经过MPPT算法处理后输出的BUCK-BOOST变换器开关信号输出端。

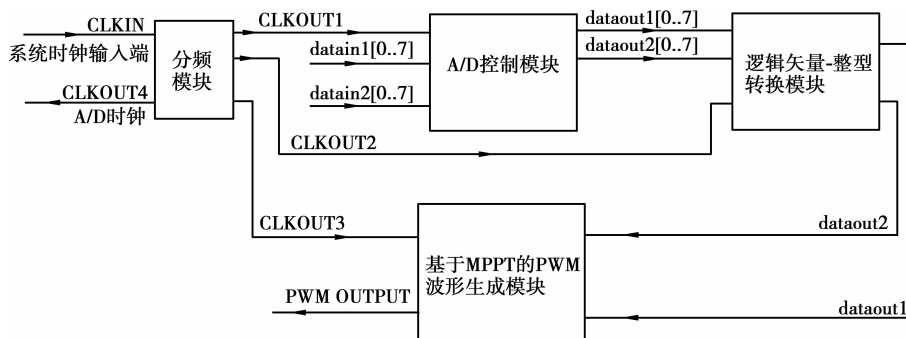


图4 太阳能充电系统数字控制部分原理图

3 仿真与实验验证

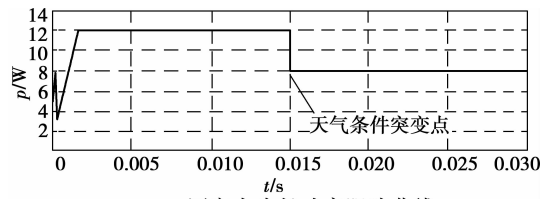
3.1 MPPT技术的仿真分析

本设计运用Matlab/Simulink完成仿真,仿真电路主要由太阳能电池模块、充电主电路、MPPT算法及控制电路、储能电容等组成,在离散模式下以100 kHz频率工作。

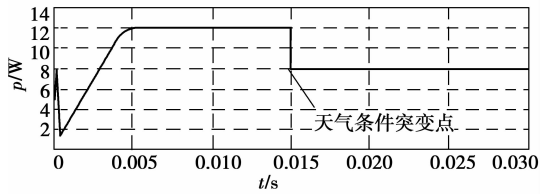
通过对固定大步长、固定小步长和加权变步长功率跟踪技术仿真分析可知,固定大步长功率跟踪在速度稍占优势的情况下,却极不精准,跟踪到最大功率点后,在其附近有很大的震荡,浪费了能量,如图5(a)所示;固定小步长功率跟踪虽然在精准度方面有所改观,但是跟踪到最大功率点需要的时间长了许多,如图5(b)所示。加权变步长功率跟踪技术能够同时达到快速跟踪最大功率点和精准地稳定在最大功率点的要求,跟踪曲线图如图5(c)所示。为了体现本设计运用MPPT算法具有很好的瞬态响应特性,故仿真时天气条件采用突变方式,而没有采用与实际相符的渐变方式。

用最大功率12.1 W的太阳能电池板,为1F超级电容器从0 V至40 V充电,充电过程中超级电容器端电压的增长曲线如图6所示。整条曲线非常平滑,没有毛刺和间断,且呈非常快速的上升趋势。

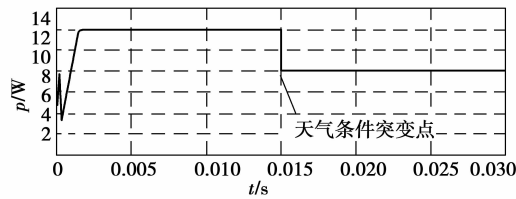
以上仿真结果证明了本设计拥有实现快速精准的MPPT技术的能力,达到了高效利用太阳能电池板为储能设备全过程充电的目的。开关变换电路的占空比与其输入输出电压关系之间矛盾的情况并未发生过,也印证了先前对于系统控制上自适应性的推断。



(a) 固定大步长功率跟踪曲线



(b) 固定小步长功率跟踪曲线



(c) 加权变步长功率跟踪曲线

图 5 功率跟踪曲线图

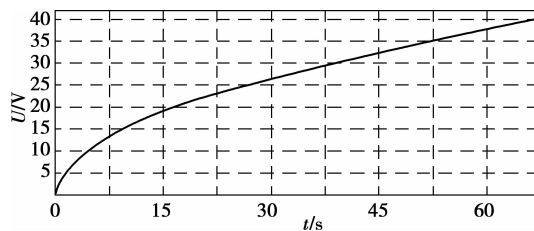


图 6 充电过程中超级电容器的端电压上升曲线

3.2 实验验证

本设计完成了用规格 10W/17.9V 太阳能电池为 2F 和 5F 两种超级电容器阵列充电的实验。

实验 1: 为 2F 超级电容器充电, 自 2014 年 3 月 12 日 10:30 开始充电, 至 10:53 超级电容器阵列电压达到 35 V。表 1 是各个时刻的超级电容电压值对照表。

表 1 超级电容电压数值表(2014 年 3 月 12 日;天气:多云,22 ℃)

时间	10:30	10:32	10:34	10:36	10:38
端电压/V	0	6	10	15	19
时间	10:41	10:44	10:47	10:50	10:53
端电压/V	23	26	30	33	35

实验 2: 为 5F 超级电容器充电, 自 2014 年 3 月 12 日 11:06 开始充电, 至 12:08 超级电容器阵列电压达到 35 V。表 2 是各个时刻的超级电容器电压值。

表 2 超级电容电压数值表(2014 年 3 月 12 日,多云,22 ℃)

时间	11:06	11:07	11:08	11:09	11:10	11:11	11:12	11:13	11:14:	11:15
端电压/V	0	4.3	7.5	9.5	11.3	12.7	14.0	15.2	16.2	17.1
时间	11:16	11:20	11:23	11:26	11:29	11:32	11:35	11:38	11:41	11:43
端电压/V	18.1	20.8	22.2	23.7	24.9	26.0	27.0	28.0	28.5	29.1
时间	11:48	11:51	11:54	11:57	12:00	12:05	12:08			
端电压/V	30.2	31.0	31.6	32.3	33.1	34.1	35			

由表1、表2可以看出,在天气状况良好的情况下,用规格为10 W/17.9 V的光伏电池为2 F或5 F的超级电容阵列充电,都可以满足在短时间内实现充电到35 V的设计目标。

此外,随着充电过程的进行,开关波形占空比会随着输入输出电压关系而实时调整,整个充电过程能够连续进行,没有出现不能正常充电的情况。开关波形如图7、图8所示。

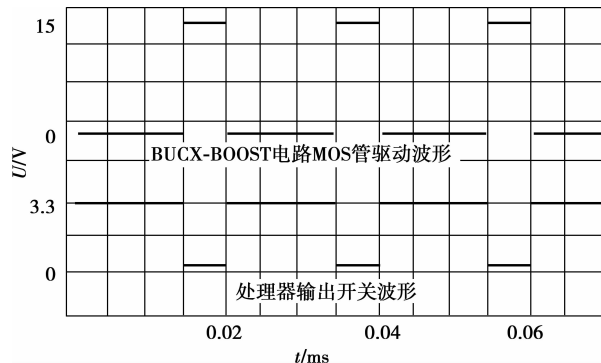


图7 超级电容器阵列充电到12 V时的开关管驱动波形

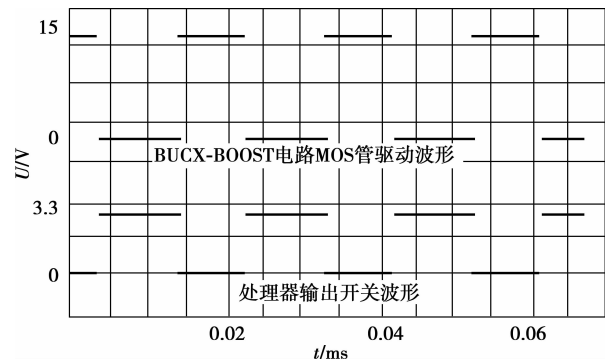


图8 超级电容器阵列充电到25 V时的开关管驱动波形

本设计的实验结果与文献[16]的实验结果相比较,有效缩短了充电时间,提高了充电效率。

4 结 语

仿真和实验验证表明,本设计所采用的BUCK-BOOST硬件拓扑结构和加权变步长电压滞环扰动观察MPPT技术相结合的设计方法,能够实现高效利用太阳能电池充电的目的,与常规方法相比,体现了一定的优越性,有效缩短了充电时间,保证了光伏供电系统的稳定性和可靠性。

参考文献:

- [1] 郭丕斌,王婷. 能源技术创新促进煤炭资源型经济转型的作用机制分析[J]. 重庆大学学报:社会科学版,2013,19(6):36-41.
GUO Pibin,WANG Ting. Mechanism analysis of energy technology innovation to promote coal resource-based economies transformation [J]. Journal of Chongqing University: Social Science Edition,2013,19(6):36-41.
- [2] Darren M B,Matt B. photovoltaic technologies [J]. Energy policy, 2008,36(12):4390-4396.
- [3] Paul P. Residential solar photovoltaic market stimulation: Japanese and Australian lessons for Canada [J]. Renew Sustain Energy Rev,2008,12 (7):1944-1958.
- [4] Edwin K. The global pv market; fasten your seatbelts analyses of market demand to 2010 [R]. Valecia,Spain;SolarPlaza,2008.
- [5] 陈丽,王英健. 基于 Buck 变换器的光伏发电系统 MPPT 控制 [J]. 计算技术与自动化,2010,29(2):28-31.
CHEN L,WANG J Y. The MPPT control for photovoltaic generating system based on a buck converter [J]. Computing Technology and Automation, 2010,29(2):28-31.
- [6] 王昊. 基于 Boost 变换器的光伏 MPPT 跟踪器设计 [J]. 机电元件,2012,32(2):8-11.
Wang Hao, Design of Photovoltaic MPPT Tracker Based on Boost Converter [J]. Electromechanical Components, 2012, 32(2):8-11.
- [7] Lei S, Hai p, Xu D X, et al. The photovoltaic charging station for electric vehicle to grid application in smart grids[C]// Proceedings of 2012 IEEE 6th International Conference on Information and Automation for Sustainability(ICIAFS2012), September 27-29, 2012, Beijing, Piscataway: IEEE Press,2012:279-284.
- [8] Norian K H. Equivalent Circuit Components of Nickelcadmium Battery at Different States of Charge [J]. Journal of Power Sources,2011,196(11): 5205-5208.
- [9] Sharma P,Bhatti T S. A review on electrochemical doublelayer capacitors [J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(12): 2901-2912.
- [10] 王洪礼,何志琴,李德菊. 超级电容器与蓄电池性能的比较分析 [J]. 现代机械,2013(3):63-65.
WANG Hongli, HE Zhiqin, LI Deju. The comparative analysis of super-capacitor and battery performance [J]. Modern Machinery,2013(3):63-65.

(下转第76页)