

直流与间歇高频谐振脉冲叠加式铅酸蓄电池 修复仪

魏芝浩,王春芳

(青岛大学电气工程学院,青岛 266071)

摘要:为了修复因硫化而报废的铅酸蓄电池,设计了一台输出直流电压与间歇高频谐振电压脉冲叠加式铅酸蓄电池修复仪。给出了修复仪的系统电路结构,介绍了其工作原理;详述了间歇式高频脉冲修复电路的原理,列写了修复电路的状态方程并进行了分析;设计了以 PIC16F887 单片机为核心的控制系统,介绍了控制器的特点;设计了以线性光耦 HCNR201 为核心的电压检测电路和电流检测电路及其 PWM 驱动电路;针对不同体积的硫酸铅晶体所需的能量不同,提出了一种变占空比的控制策略。实验结果表明,所设计的铅酸蓄电池修复仪能够较好地修复因硫化而报废的铅酸蓄电池,满足设计要求。

关键词:铅酸蓄电池;硫化;修复;高频谐振

Lead-acid Battery Repairing Instrument with Superimposition of DC and Intermittent High-frequency Resonant Pulses

WEI Zhihao, WANG Chunfang

(College of Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: To repair the scrapped lead-acid batteries due to vulcanization, a lead-acid battery repairing instrument with superimposition of DC and intermittent high-frequency resonant pulses was designed. The repairing instrument's system circuit structure was given, and its working principle was introduced; the principle of repairing circuit with intermittent high-frequency pulse was elaborated in detail, and the state equation of the repairing circuit was formulated and analyzed; the control system was designed with the core of PIC16F887 microcontroller, and the characteristics of the controller were introduced; a voltage detection circuit and a current detection circuit were designed with the core of a linear optocoupler HCNR201, and a pulse width modulation(PWM) drive circuit was designed; considering that different sizes of lead sulfate crystals require different energy, a variable duty cycle control strategy was proposed. Experimental results showed that the designed lead-acid battery repairing instrument can satisfactorily restore the scrapped lead-acid batteries resulting from vulcanization, which meets the design requirement.

Keywords: lead-acid battery; vulcanization; repairing; high-frequency resonance

铅酸蓄电池在使用过程中由于过放电或放置时间较长在其极板上会产生一些大小不一的硫酸铅晶体,从而使蓄电池溶液的溶解度减小,造成蓄电池容量下降甚至报废^[1-3]。针对蓄电池的极板硫化问题,常用的修复方式有大电流修复法^[4]、正负脉冲修复法^[5-6]及高频脉冲修复法^[7-8],大电流修复法不能修复硫化的蓄电池,且容易造成极板软化,导致蓄电池永久失

效;正负脉冲修复法可以防止蓄电池的硫化,但对已经硫化的蓄电池修复效果不佳;而高频脉冲修复法能够很好地消除铅酸蓄电池的硫化^[9]。

本文针对高频脉冲修复法,设计了一种新型修复仪。该修复仪以 PIC 单片机为控制核心,根据报废电池容量的人工设定值及电池损坏程度的自动检测值,将蓄电池修复过程分为 4 个修复阶段,在不同阶段系统进行相应的工作,对蓄电池进行修复。

1 修复仪的系统结构

所设计的修复仪结构如图 1 所示,该修复仪由输出 15 V 的开关稳压电源、间歇式高频脉冲修复电路及控制电路组成。15 V 直流电与高频谐振电路产生的脉冲波叠加后通过控制电路被用于蓄电池的修复,控制电路是以单片机 PIC16F887 为控制核心,同时由按键选择、电压检测电路、电流检测电路、充放电控制电路、驱动电路、LCD 显示电路、蜂鸣器及指示灯组成。当用户根据被修复的蓄电池的容量大小,通过按键选择设定好容量后,按下启动按键,由单片机控制继电器 KM_1 开通或关断,从而控制修复仪是否工作;电压、电流检测电路把检测到的电压、电流信号传送给单片机,单片机通过 AD 转换后在 LCD 上显示电压、电流的大小,便于用户实时监测蓄电池的状态^[10-11];驱动电路控制高频谐振电路中开关管的开通关断,单片机产生 20 kHz 变占空比的 PWM 控制波形,该控制波形经驱动电路放大后直接驱动开关管;LCD 显示电路用来显示修复仪的修复电压、修复电流、修复进度及修复时间;当蓄电池出现反接、修复失败时,单片机会控制指示灯亮同时会使蜂鸣器发出鸣叫进行报警。

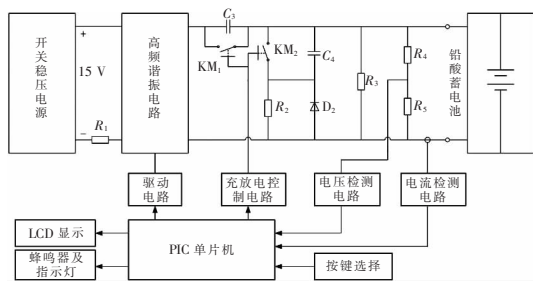


图 1 修复仪结构

Fig.1 Structure of repairing instrument

2 间歇式高频脉冲修复电路

2.1 修复电路原理

间歇式高频脉冲修复电路如图 2 所示,主要由两级构成:前级为 15 V 的开关稳压电源,通过改变开关稳压电源的限流电阻来控制其输出电流的大

小,从而修复不同容量的铅酸蓄电池;后级为高频谐振电路和放电电路,高频谐振电路产生丰富频率的谐波信号,此信号同硫酸铅晶体发生共振,从而可以击碎各种形状的硫酸铅晶体,达到修复目的^[12-16]。该修复系统的高频谐振电路是由两个相同的修复单元并联组成,可以产生与硫酸铅晶体发生共振的间歇高频谐振脉冲,继电器 KM_1 控制修复仪是否工作,小阻值电阻 R_2 和蓄电池构成放电回路,继电器 KM_2 控制修复仪是否放电,蓄电池定时放电有助于提升修复效果。

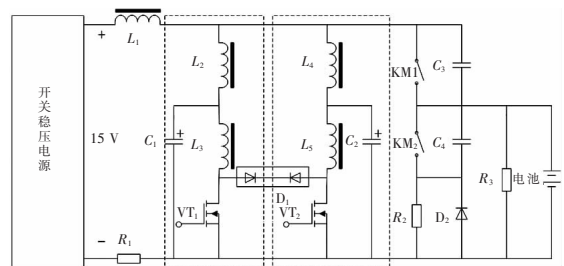


图 2 间歇式高频脉冲修复电路

Fig.2 Repairing circuit with intermittent high-frequency pulse

2.2 修复电路的状态分析

高频谐振电路可由若干个修复单元并联组成,修复单元的数量决定着修复仪所能修复蓄电池的容量范围。修复单元的结构如图 3 所示,对含有一个修复单元的高频谐振电路进行状态分析如下。

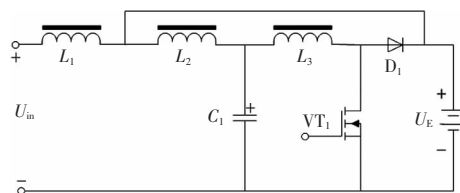


图 3 修复单元结构

Fig.3 Structure of repairing unit

状态 1:按下启动按键,使修复仪启动,开关稳压电源的输出电压 U_{in} 给电容 C_1 进行充电,同时为蓄电池进行充电,其状态方程为

$$U_{in} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + L_2 \frac{di_{L2}}{dt} + U_{C1} \tag{1}$$

$$U_{in} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} + U_E \tag{2}$$

式中: i_{L1} 和 i_{L2} 为电感 L_1 和 L_2 的电流; U_{C1} 为电容 C_1

的电压; U_E 为蓄电池两端的电压。

状态 2:开关管 VT_1 导通,二极管 D_1 反向截止,电感 L_3 和电容 C_1 构成回路发生谐振,同时开关稳压电源为蓄电池进行充电,其状态方程为

$$U_{C_1} = L_3 \frac{di_{L_3}}{dt} \quad (3)$$

式中, i_{L_3} 为电感 L_3 的电流。

状态 3:开关管 VT_1 关断,电感 L_3 上的电流不能突变,通过二极管 D_1 进行续流,电容 C_1 和电感 L_3 为蓄电池充电,同时电感 L_2 和电感 L_3 构成回路,其状态方程为

$$U_{C_1} = L_3 \frac{di_{L_3}}{dt} + U_E \quad (4)$$

$$L_2 \frac{di_{L_2}}{dt} + L_3 \frac{di_{L_3}}{dt} = 0 \quad (5)$$

状态 2 和状态 3 的不断切换使高频谐振电路产生尖峰电压,从而得到了频率丰富的高频谐波。

当开关管的驱动波形占空比变大时,修复仪输出到蓄电池两端的电压谐波尖峰相应变大,同时高频谐波的能量也随之变大,据此提出了变占空比的控制策略,即硫酸铅晶体的不同大小击碎时所需的能量不同。可根据蓄电池的修复进度选择不同的占空比,考虑到主电路中电容的耐压,因此占空比的选择范围为 5%~15%。

3 控制系统设计

3.1 控制器设计

选用 PIC16F887 单片机作为控制器,其具有 40 引脚、8 位 CMOS 闪存、最高频率 8 MHz 内部振荡器、35 个可单独控制的 I/O 引脚、4 个可输出 10 位 PWM 的 I/O 引脚,完全能够满足控制系统的要求,此外还具有功耗低、性价比高、编程简单等特点。

3.2 检测电路设计

3.2.1 电压检测电路

为了实现主电路与控制电路的电气隔离,防止主电路中的高频谐波进入到单片机控制系统中,造成单片机的损坏和较大的测量误差,从而设计了以高精

度线性光耦 HCNR201 为核心的电压检测电路^[7]。电压检测电路如图 4 所示。修复仪的输出电压经分压电阻分压后送到电压检测电路的输入端 U_{in} 处,然后经过电压检测电路电气隔离之后,其输出端 U_o 接到单片机的 AD 转换端口上。

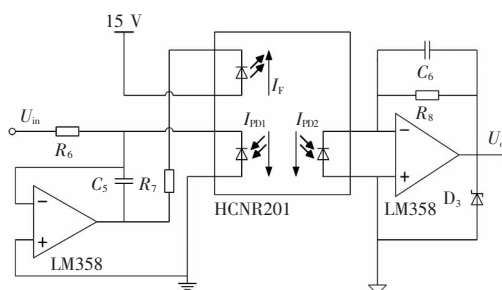


图 4 电压检测电路结构

Fig.4 Structure of voltage detection circuit

HCNR201 是一种高精度线性光耦,且满足下列关系

$$I_{PD1} = K_1 I_F \quad (6)$$

$$I_{PD2} = K_2 I_F \quad (7)$$

$$K_3 = I_{PD2} / I_{PD1} \quad (8)$$

式中: I_{PD1} 、 I_{PD2} 分别为输入、输出二极管的电流; I_F 为发光二极管的电流; K_1 、 K_2 分别为输入、输出二极管的电流传输比; K_3 为线性光耦的传输增益,其中线性光耦 HCNR201 的 K_3 大约为 1 ± 0.05 。由运放的“虚断”和“虚短”,可推出输出与输入的关系即电压增益为

$$U_o / U_{in} = K_3 (R_8 / R_6) \quad (9)$$

由式(9)可知电压检测电路的电压增益只与电阻 R_8 和 R_6 的比值有关。所设计的电压检测电路需满足:当输入电压为 0~3 V 时,输出电压 U_o 线性对应为 0~3 V,故取电阻 R_6 与 R_8 相等,即电压增益等于 1。由实验可得电压检测电路输入电压与输出电压的对应关系如表 1 所示。利用 Mathcad 将以上数据绘制成插值曲线,如图 5 所示。

由表 1 和图 5 可知,输出电压增加到 3.59 V

表 1 输入电压与输出电压对应关系

Tab.1 Relationship between input and output voltages V

U_{in}	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0	3.5	3.8	4.0
U_o	0.48	0.95	1.42	1.90	2.84	3.36	3.59	3.59

时,线性光耦达到了饱和,此时再增加输入电压,输出电压将保持不变;同时在 0~3 V 范围内,输出电压与输入电压呈线性关系,且电压增益大约为 1。故所设计的电压检测电路符合设计要求。

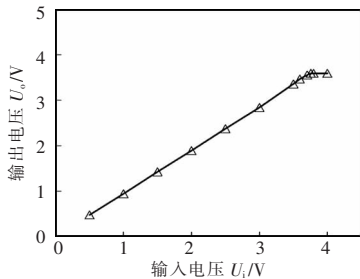


图 5 电压增益曲线

Fig.5 Voltage gain curve

3.2.2 电流检测电路

电流检测是通过检测采样电阻 R_1 的压降实现,与电压检测电路的差别仅是增加了同向比例放大器,对采样电阻 R_1 的电压信号进行放大。电流检测电路如图 6 所示。采样电阻 R_1 上的电压送到电流检测电路的输入端 U_{in} 处,先经过同向比例放大器放大后,然后通过线性光耦实现电气隔离,其输出端 U_o 接到单片机的另一个 AD 转换端口上。

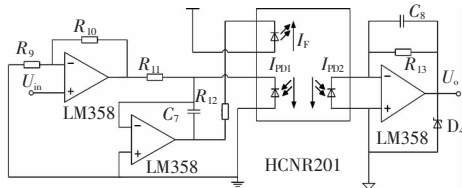


图 6 电流检测电路结构

Fig.6 Structure of current detection circuit

4 实验验证

基于以上分析,制作了 1 台占空比可变、可修复不同容量铅酸蓄电池的直流与间歇高频谐振脉冲叠加式修复仪样机,其开关频率为 20 kHz,占空比可调节范围为 5%~15%,可修复铅酸蓄电池的容量范围为 20~400 Ah,主电路具体参数如表 2 所示。

直流与间歇高频谐振脉冲叠加式铅酸蓄电池修复仪对一台容量为 100 Ah 的报废蓄电池进行修复实验,其中修复周期为 23 h。修复过程按时间划

表 2 样机参数

Tab.2 Parameters of prototype

$L_1/\mu\text{H}$	L_2/mH	$L_3/\mu\text{H}$	L_4/mH	$L_5/\mu\text{H}$	$C_1/\mu\text{F}$	$C_2/\mu\text{F}$
350	6.75	142	6.75	142	100	100

分为 4 个阶段:第 1 阶段为第 0~3 h,此阶段根据铅酸蓄电池的容量大小来设定开关稳压电源的限流电阻从而控制其输出电流;第 2 阶段为第 3~4 h,在第 3 h 将开关稳压电源的限流电阻设为最小值,即开关稳压电源的输出电流为最大值;第 3 阶段为第 4~10 h,在第 4 h KM_1 关断, KM_2 开通 2 s,铅酸蓄电池进行大电流放电,同时测量其放电电压,也称为 RUN 电压,如果 RUN 电压大于设定电压,则修复仪继续修复蓄电池,否则停止修复;第 4 阶段为第 10~23 h,第 10 h 与第 4 h 的工作过程相同,在第 23 h 测量 RUN 电压,用来判断铅酸蓄电池是否修复成功。修复仪在修复过程中驱动电压 U_{gs} 及输出电压 U_o 波形如图 7 所示。

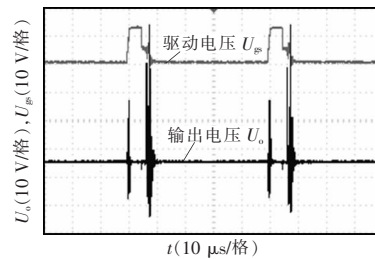


图 7 驱动电压及输出电压波形

Fig.7 Waveforms of drive voltage and output voltage

在进行铅酸蓄电池修复时,先根据蓄电池的容量对修复仪进行容量设定。修复仪首先采用 15% 的占空比针对体积比较大的硫酸铅晶体,然后分别在第 4、10 h,把开关管的占空比分别调节为 10%、5%。在修复过程中每隔 0.5 h 记录一次修复电压和修复电流,并在第 4、10、23 h 测量蓄电池的 RUN 电压,利用 Matlab 画出上述参数的变化曲线如图 8(a) 所示,在对铅酸蓄电池多次修复之后,然后进行蓄电池的放电实验,每隔 15 min 记录一次放电电压和放电电流,铅酸蓄电池的放电电压减小到 10.8 V 时停止放电,其放电曲线如图 8(b) 所示。由图 8(b) 可知,蓄电池持续放电 7.5 h,其平均放电电流为 11 A,

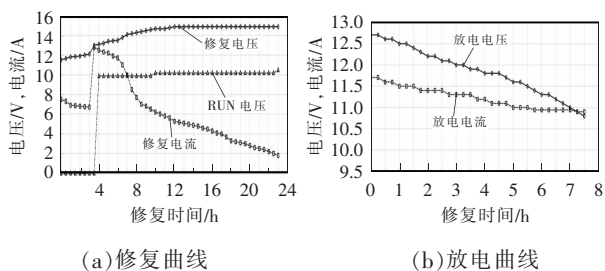


图8 修复曲线与放电曲线

Fig.8 Repairing and discharge curves

可计算得到蓄电池容量修复到约80 Ah, 修复达到了总容量的80%。

5 结语

本文设计了1台直流与间歇高频谐振脉冲叠加式铅酸蓄电池修复仪,分析了修复原理及修复过程,进行了铅酸蓄电池的修复实验和放电实验。实验结果表明:该修复仪具有对蓄电池损伤较小、修复效果较好等特点,修复前铅酸蓄电池的容量为30%,修复后可达到总容量的80%以上;同时该修复仪具有操作简单、显示直观、集成了人工智能等特点,对于节能环保、发展低碳经济有着重要意义,应用前景十分广阔。

参考文献:

- [1] Fernandes N T D, Demonti R, Andrade J D, et al. Control strategy for pulsed lead acid battery charger for stand alone photovoltaics[C].//IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference. Fortaleza, 2015: 1-6.
- [2] 雷映. 高频谐振式铅酸蓄电池修复系统的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2012.
Lei Yi. Research on high frequency resonant repair system of lead-acid battery[D]. Qingdao: Qingdao University, 2012 (in Chinese).
- [3] 刘瑞静, 李涛涛, 蒋义然. 基于单片机的铅酸蓄电池修复系统研究[J]. 电源技术, 2015, 39(7): 1462-1464.
Liu Ruijing, Li Taotao, Jiang Yiran. Research of lead-acid battery recovery system based on single-chip microcomputer[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(7): 1462-1464(in Chinese).
- [4] 张海鹏, 张安明, 程峥华. 大型铅酸蓄电池的低压大电流修复技术研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015, 12: 45-49.
Zhang Haipeng, Zhang Anming, Cheng Zhenghua. Research on regeneration technology with low voltage and huge currents for big lead-acid batteries[J]. Low Voltage Apparatus, 2015, 12: 45-49(in Chinese).
- [5] 朱光辉, 侯振义. 一种铅酸蓄电池脉冲修复充电电路研究[J]. 电源技术, 2011, 35(9): 1090-1094.
Zhu Guanghui, Hou Zhenyi. A pulse maintenance charge circuit for lead-acid battery[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2011, 35(9): 1090-1094(in Chinese).
- [6] 李强, 张永超, 雷映. 基于 PIC 单片机的蓄电池修复系统[J]. 电工技术, 2012(2): 62-66.
Li Qiang, Zhang Yongchao, Lei Yi. PIC microcontroller-based battery repair system[J]. Electrotechnical, 2012(2): 62-66(in Chinese).
- [7] 雷映, 王春芳, 张永超. 高频谐振式铅酸蓄电池修复系统的研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(4): 29-31.
Lei Yi, Wang Chunfang, Zhang Yongchao. Research on high frequency resonant repair system of lead-acid battery [J]. Power Electronics, 2012, 46(4): 29-31(in Chinese).
- [8] Praisuwan N, Khomfoi S. A seal lead-acid battery charger for prolonging battery lifetime using superimposed pulse frequency technique[C]. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, 2013: 1603-1609.
- [9] 王宜志. 铅酸电池硫化修复技术综述[J]. 山东工业技术, 2014(4): 215.
Wang Yizhi. Lead-acid battery repairing technology vulcanization Review[J]. Shandong Industrial Technology, 2014(4): 215-215(in Chinese).
- [10] 尚丽平, 王顺利, 李占锋, 等. 基于放电试验法的机载蓄电池 SOC 估计方法研究[J]. 电源学报, 2014, 12(1): 61-65.
Shang Liping, Wang Shunli, Li Zhanfeng, et al. Airborne battery SOC estimate method study based on discharge test method[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(1): 61-65(in Chinese).
- [11] 周奇, 罗培. 模糊 C 均值聚类在蓄电池 SOC 预测中的应用[J]. 电源学报, 2014, 12(4): 99-104.
Zhou Qi, Luo Pei. Application of fuzzy clustering method in predicting batteries SOC[J]. Journal of Power Supply, 2014, 12(4): 99-104(in Chinese).
- [12] Szabó L, Pitič D, Pop O. The voltage response of lead-

- proach for real-time model-based state-of-charge estimation of lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2015, 283(4): 24-36.
- [5] 马兹林, 冒晓建, 王俊席. 修正 RC 模型混合动力车用氢镍蓄电池 SOC 预测[J]. 电源技术, 2012, 36(7): 966-968. Ma Zilin, Mao Xiaojian, Wang Junxi. The modified RC model of hybrid prediction for nickel hydrogen battery SOC[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 36(7): 966-968(in Chinese).
- [6] 吴池. AH 计量法在 MATLAB 环境下对锂离子电池 soc 的估算[D]. 天津: 天津大学, 2007. Wu Chi. Estimation of SOC for lithium ion battery by AH measurement method in MATLAB environment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007(in Chinese).
- [7] 冯光. 基于 EKF 的锂离子电池 SOC 估算的建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013. Feng Guang. Based on EKF modeling and simulation of lithium ion battery SOC estimation[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013(in Chinese).
- [8] Du Jiani, Liu Zhitao, Chen Can, et al. Li-ion battery SOC estimation using EKF based on a model proposed by extreme learning machine[C]. Industrial Electronics and Applications, 2012: 1651-1656.
- [9] Wei Kexin, Chen Qiaoyan. States estimation of Li-ion power batteries based on adaptive unscented Kalman filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 445-452.
- [10] 俞云锋, 沈锦飞. 基于 EKF 的锂电池状态估算策略[J]. 电源技术, 2014, 38(2): 237-238. Yu Yunfeng, Shen Jinfei. Based on EKF for lithium battery state estimation strategy[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(2): 237-238(in Chinese).
- [11] 王笑天, 杨志家, 王英男. 双卡尔曼滤波算法在锂电池 SOC 估算中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1732-1738. Wang Xiaotian, Yang Zhijia, Wang Yingnan. Double kalman filtering algorithm in the application of lithium battery SOC estimation[J]. Journal of Instruments and Meters, 2013, 34(8): 1732-1738(in Chinese).
- [12] 张廷, 胡社教. 基于改进 Thevenin 模型锂电池 SOC 估算方法[J]. 电源技术, 2015, 39(11): 2400-2402. Zhang Ting, Hu Shejiao. Based on the method of improving Thevenin model for lithium battery SOC estimation[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(11): 2400-2402(in Chinese).
- acid battery through pulses charging with variable frequency and duty cycle[C]. International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Pilsen, 2016: 254-256.
- [13] Freitas D C C, Moraes J L D, Neto E C, et al. Battery charger lead-acid using IC BQ2031[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(1): 32-37.
- [14] Hua C C, Syue Z W. Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery[C]. IEEE International Power Electronics Conference, Sapporo, 2010: 1478-1483.
- [15] Elsayed A T, Lashway C R, Mohammed O A. Advanced battery management and diagnostic system for smart grid infrastructure[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 897-905.
- [16] Qian Ping, Guo Maopai. Design of pulse charger for lead-acid battery[C]. International Conference on Electric and Electronics (EEIC), Nanchang, 2011: 897-901.
- [17] 谭颖琦, 范大鹏, 陶溢. 基于线性光耦 HCNR200 的 DSP 采集电路设计与实现[J]. 电测与仪表, 2006, 43(486): 46-48. Tan Yingqi, Fan Dapeng, Tao Yi. Design and implementation of DSP acquisition circuit based on linear optocoupler HCNR200[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006, 43(486): 46-48(in Chinese).

(上接第 123 页)



张方亮

作者简介:

张方亮(1989-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:电池状态监测与控制, E-mail:zfliang1030@foxmail.com。



魏芝浩

作者简介:

魏芝浩(1990-),男,硕士研究生,研究方向:电能变换技术及新能源开发技术, E-mail:hankwei0722@163.com。

王春芳(1964-),男,中国电源学会高级会员,通信作者,博士,教授,研究方向:电能变换技术及新能源开发技术, E-mail:qduwcf@163.com。