

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802099

用于电池储能装置的双向 DC-DC 变换器设计

王瑾 黄刚 刘彩云 黑鸿中

(太原工业学院 电子工程系 太原 030008)

摘要: 针对传统方法由两个单向 DC-DC 变换器构成的电池储能装置,存在效率较低、功能少、重量较大、电路复杂等问题,设计了一个双向 DC-DC 变换器可实现对锂电池高效率的恒流充电和恒压放电。主控单元以 STC12C5A-60S2 单片机为核心,采用同步整流 Buck-Boost 电路,驱动部分以 IR2104 为中心控制功率 MOS 管。恒压充电范围 1~2 A,电流步进值不大于 0.1 A,电流控制精度不低于 5%,充电效率大于 95%;恒压放电电压 30 ± 0.5 V,放电效率大于 90%;充放电过程可控转换,具有过充保护功能。实验结果表明,整个设计样机实现电路简单,充放电效率高,重量不超过 500 g,具有一定的实际应用价值。

关键词: 双向 DC-DC 变换器;高效率;Buck-Boost;IR2104

中图分类号: TN710;TP242.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Design of bi-directional DC-DC converter for battery storage device

Wang Jin Huang Gang Liu Caiyun Hei Hongzhong

(Department of Electronic Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China)

Abstract: In order to solve the problem of low efficiency, low function, large weight and complex circuit, a bidirectional DC-DC converter is designed to realize the high efficiency of constant current charging and constant voltage discharge for lithium batteries. The main control unit is based on the STC12C5A-60S2 microcontroller and uses a synchronous rectifier Buck-Boost circuit. The drive part controls the power MOS tube with IR2104 as the center. Constant voltage charging range 1~2 A, current step value not more than 0.1 A, current control accuracy not less than 5%, charging efficiency greater than 95%. The constant voltage discharge voltage is 30 ± 0.5 V, and the discharge efficiency is greater than 90%. The experimental results show that the whole design prototype has simple circuit, high charging and discharging efficiency, and no more than 500 g in weight, and has a certain practical application value.

Keywords: bidirectional DC-DC transformation; high efficiency; Buck-Boost; IR2104

0 引言

现如今,储能系统的重要性越来越突出,双向 DC-DC 变换器作为新能源技术中的重要组成部分,以可实现能量的双向传输、体积小、重量轻等优势,应用在电动自行车、电动汽车、航天航空、工业控制、通信网、风电并网系统等新能源电控领域^[1-3]。提高双向 DC-DC 变换器的工作效率,优化电路结构,增强系统适应性成为储能变流的研究热点。近年来,国内外的研究学者在双向 DC-DC 变换器领域取得了大量的研究成果,文献[4]以带隔离的 LC 谐振式 DC-DC 变换器为研究对象,提出移相控制的 DC-DC 变换器控制策略,实现零电压开通,提高了系统效率,减小了关断损耗;文献[5]针对非隔离性变换器存在变压比小的缺点,设计了具

有电气隔离特点的半桥三电平推挽式双向 DC-DC 变换器,实现大变压比充放电;文献[6]设计了基于 Z 源网络的双向 DC-DC 变换器,降低了开关器件电压应力,减小了输入输出电流波纹更好地满足市场需求;文献[7]对整个双向 DC-DC 变换器的拓扑结构进行了深入的理论分析,指出现有拓扑结构适用场合和存在的问题,并为研究新型拓扑结构提出建议;文献[8]提出对传统的全桥 LLC、谐振变换器进行改进,通过在初级侧增加补偿电路以减少系统中的环流能量损耗,实现提高充放电装置的效率。综合上述文献研究结果和市场应用情况,双向 DC-DC 变换器依然存在系统效率低、电路结构复杂、体积大及适应性不强等问题。针对上述问题,本文设计了一个双向 DC-DC 变换器,可恒流充电,充电电流 1~2 A,步进值 0.05 A,充电电压超过

24 V $\pm$ 0.5 V 停止充电;同时可恒压放电,放电电压 30 V $\pm$ 0.5 V,变换器能够明显提高锂电池的充放电效率。

1 系统设计方案

系统实现 5 节串联 18650 锂电池充放电。主要由 5 个模块组成,分别为变换器主电路和驱动电路模块、显示控制模块、电流和电压采样模块、辅助电源模块和按键模块。系统总体结构如图 1 所示。

2 系统硬件电路设计

2.1 变换器主电路和驱动电路设计

变换器主电路如图 2 所示,变换器主电路采用同步整流 Buck-Boost 电路,为双向半桥电路结构^[9-10]。将普通 Buck 电路的二极管改换成功率 MOS 管,在变换器的两端均接入滤波电容。由于 Buck 电路和 Boost 电路的对偶关

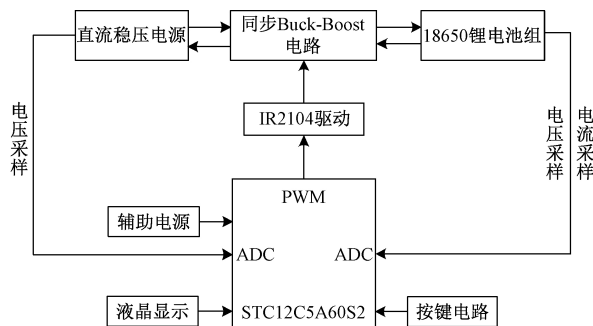


图 1 系统总体设计

系以及 MOS 管的双向导电性,使得电路从一端看是同步 Buck 电路,另一端看是同步 Boost 电路。当电路工作在 Buck 模式时,电路对蓄电池充电;当电路工作在 Boost 模式时,电路对蓄电池放电。

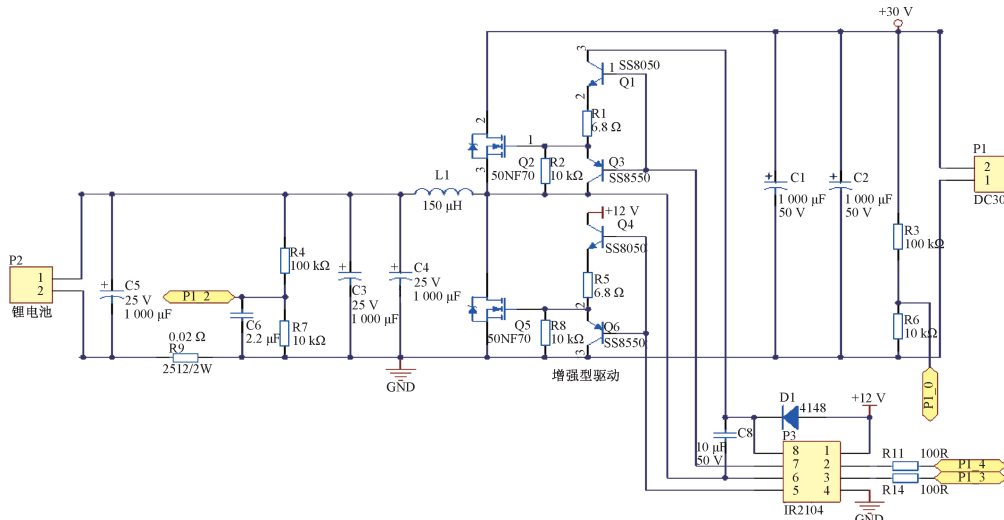


图 2 变换器主电路

电路选取低导通内阻的功率 MOS 管 80NF70 和低输入电容,降低 MOS 管导通过程中的损耗,选取低磁导率的铁硅铝作为电感磁芯,降低功率传输过程中的能量损耗,提高传输效率。

2.2 显示控制电路设计

显示控制电路如图 3 所示,显示控制电路的核心是单片机,通过单片机内部 8 路 10 位 AD 来采集反馈控制信号电压和电流。当电路设定为充电模式时,单片机会将反馈信号电流的真实值和设定值对比,通过调节 PWM 的占空比,改变功率 MOS 管的导通时间,缩小 2 个电流值的差值完成恒流充电^[11-12]。当电池的充电电压超过设定值 24 V 时,单片机停止输出 PWM 信号,电路进入过充保护状态。当变换器设定为放电模式时,以输出电压为反馈信号,通过与预设 30 V 对比,来调节 PWM 的占空比,完成恒压放电^[13]。

显示部分采用 LCD1602 液晶显示屏,主要显示蓄电池

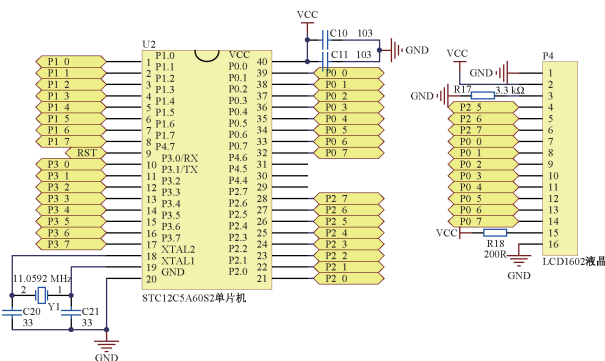


图 3 显示控制电路

的充电电流、充放电电压、按键设定的充电电流值和当前变换器处于的工作模式。

2.3 电流采样电路设计

电流采样电路如图 4 所示,通过采样电阻实现电流检

测。电路中采样电阻选用 $0.02\ \Omega$, 采样电阻的输出端串联 $1\ \text{k}\Omega$ 电阻与 OP07 的同向输入端相连, OP07 的输出端与单片机的两个采样引脚相连, 一路用于电流显示, 另一路用于电路反馈。电流流过采样电阻产生压降, 通过检测压降值计算电流的大小, 完成对电流的采样。

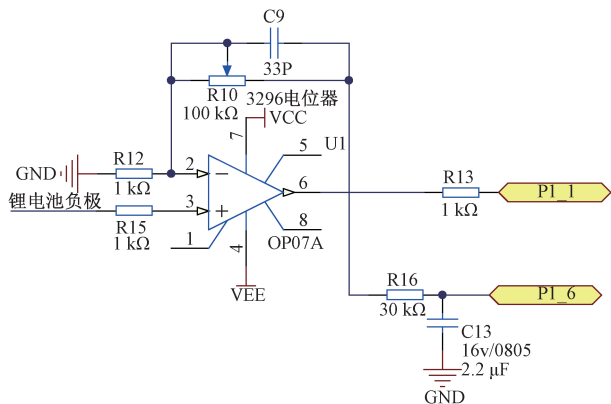


图 4 电流采样电路

2.4 辅助电源电路设计

辅助电源需为系统中增强型驱动电路提供 $12\ \text{V}$ 电压, OP07 提供 $\pm 5\ \text{V}$ 电压, 单片机提供 $5\ \text{V}$ 电压。电路设计如图 5 所示, 通过线性稳压电源 LM7812 将 DC-DC 变换器直流电源端的大电压转换为 $12\ \text{V}$ 电压, 通过 ASM1117 转换为 $5\ \text{V}$ 电压, 再通过 ICL7660 转换为 $-5\ \text{V}$ 。电路整体驱动效果强、重量轻、性能稳定, 且无需另外提供电源适配器。

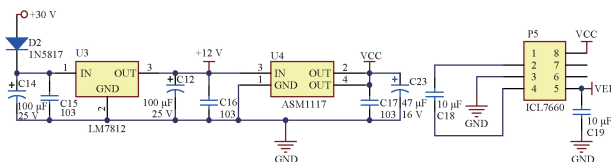


图 5 辅助电源电路

2.5 按键电路

按键电路如图 6 所示, 采用 4 个独立按键, 实现对蓄电池充放电过程的程控转换, 充电电流的步进值为 $0.05\ \text{A}$ 。4 个按键分别与单片机的 P2.0、P2.1、P2.2、P2.3 口连接, 实现相应功能, S2 为电池充电功能按键, S3 为放电功能按键, S4 为输出电流加大按键, S5 为输出电流减小按键。

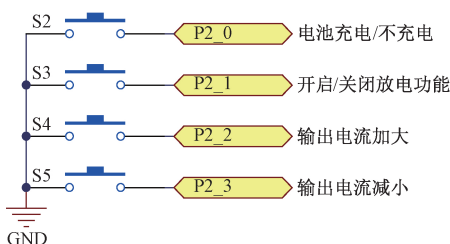


图 6 按键电路

3 系统软件设计

系统程序流程如图 7 所示, 包括系统数据初始化、ADC 电压电流采样、PWM 调制、LCD1602 显示和按键控制等。

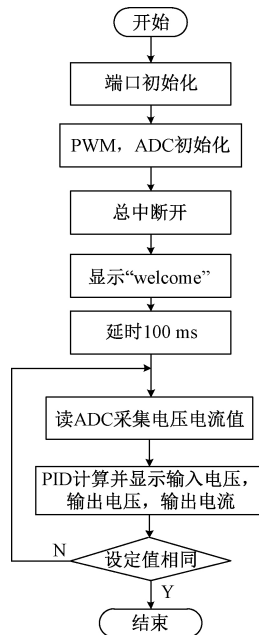


图 7 系统程序流程

采用平均值算法通过 ADC 实现电压和电流采集, 此算法可以减小电流和电压的突变值, 使数据更加接近真实值。首先, 采集 50 个电流或电压值, 记录采集数据的时间, 算出平均值。然后, ADC 子程序采用 PID 算法将采集的电压电流进行闭环反馈控制^[14], 当检测到输出电压或者电流波动时, 快速调用 PWM 程序, 调节输出电压和电流到设定的规定值^[15]。

4 系统实物测试

系统实物如图 8 所示, 系统电路采用双面 PCB 设计, 整个实物电路板重量小于 $450\ \text{g}$ 。

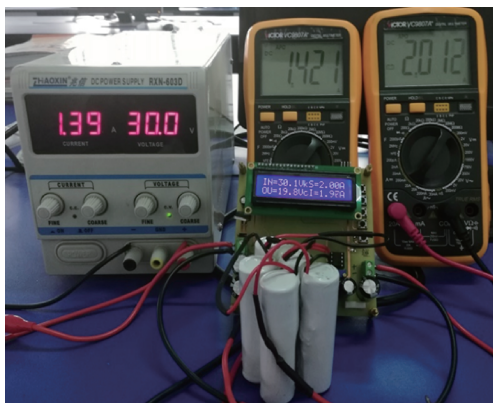


图 8 系统测试实物图

4.1 输入 30 V 恒流充电控制精度测试

测试方法为将直流稳压电源输出电压 $U_s=30\text{ V}$,负载为 5 节 18650 电池组串联,通过按键增加电流值,记录实测值与现实值,测试数据如表 1 所示。

表 1 电流控制精度测试表

电流设定值/A	电流实测值/A	控制精度/%
1.00	1.00	0
1.10	1.09	1.0
1.20	1.20	0
1.30	1.29	1.0
1.40	1.39	1.0
1.50	1.49	0.6
1.60	1.62	1.2
1.70	1.68	1.1
1.80	1.80	0
1.90	1.91	0.5
2.00	2.01	0.5

由表 1 可得,充电电流控制精度误差不超过 2%。造成充电电流误差的主要原因是系统的软件设计不够成熟,而且在电流控制精度要求很高时,单片机速度较慢不符合要求,所以电流虽然在规定的范围内,但是仍然有一定的波动量,可以通过改进控制算法,选用运行速度较快的 DSP 芯片控制,以达到更好的效果。

4.2 充电电流变化率和效率测试

测试方法为设定充电电流为 2 A,调节直流稳压电源 U_2 在 32、30、24 V 时记录输出电流,测试数据如表 2 所示。

表 2 充电电流变化率测试

输入电压/V	输出电流实际值/A
24	1.98
30	2.00
32	2.01

经测试,充电电流变化率: $S_{I_1} = \left| \frac{I_{I_1} - I_{I_2}}{I_1} \right| \times 100\% = \left| \frac{1.98 - 2.00}{2.00} \right| = 1\%$, 满足应用需求。

4.3 充电电路变换器效率测试

测试方法为调节 $U_2=30\text{ V}$, $I_1=2\text{ A}$,测量输入电流 I_2 和输出电压 U_1 ,由计算公式 $\eta_1 = \frac{P_1}{P_2} \times 100\% = \frac{U_1 I_1}{U_2 I_2} = 96.4\%$ 。测试数据如表 3 所示。

由表 3 可得,充电效率高达 96.4%。影响效率的主要原因是元器件有一定的功耗,如果成本允许可以选用超低功耗的功率管和液晶显示屏,降低不必要的功耗损失来提高效率。

表 3 充电效率测试

输入电压/V	输入电流/A	输入功率/W	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/W	充电效率/%
U_2	I_2	P_2	U_1	I_1	P_1	η_1
30	1.37	41.1	19.8	2	39.6	96.4

4.4 输入 30 V 恒流充电显示精度测试

测试方法为直流稳压电源输出电压 $U_s=30\text{ V}$,负载为 5 节 18650 电池组串联,通过按键增加电流值,记录实测值与显示值,测试数据如表 4 所示。

表 4 电流显示精度测试表

电流显示值/A	电流实际值/A	电流显示精度/%
0.99	1.00	1.0
1.08	1.09	0.9
1.19	1.20	0.8
1.28	1.29	0.7
1.39	1.39	0
1.50	1.49	0.7
1.60	1.62	1.2
1.67	1.68	0.5
1.78	1.80	1.1
1.88	1.91	1.6
1.97	2.01	2.0

4.5 过充保护测试

设定充电电流为 2 A,充电输出电压超过 24 V 时,系统自动对锂电池停止充电,实现过充保护。

4.6 恒压放电及效率测试

测试方法为按键控制使变换器处于放电模式,保持输出电压 U_2 在 30 V 左右,测量输入电流、输入电压和输出电流,由公式 $\eta_2 = \left| \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} \right| \times 100\% = \frac{30.1\text{ V} \times 0.98\text{ A}}{18.7\text{ V} \times 1.75\text{ A}} = 90.21\%$ 计算得到变换器效率。测试数据如表 5 所示。

表 5 放电效率测试

输入电压/V	输入电流/A	输入功率/W	输出电压/V	输出电流/A	输出功率/W	充电效率/%
U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	η_1
18.7	1.75	32.7	30.1	0.98	29.5	90.2

可得结论,经测试放电效率 90.21%。影响放电效率的因素和影响充电效率的因素相同,可以通过选用超低功耗的功率管和液晶显示屏来提高放电效率。

5 结 论

本文设计了一个以同步整流 Buck-Boost 拓扑为核心,

用于电池储能装置的双向 DC-DC 变换器。上述实验结果表明,在输入电压 30 V 情况下,对锂电池 1~2 A 范围内实现恒流充电,电流步进值小于 0.01 A,显示的充电电流值精度不低于 2%,电流控制精度超过 5%,误差小于 2%,充电效率大于 95%。放电模式下,输出电压可保持带负载情况 30 V,放电效率大于 90%,充放电过程可编程,系统电路实物 450 g。本系统与传统两个单向 DC-DC 变换器构成的电池储能装置相比,引入同步整流技术,使得整机体积小、质量轻、效率高、使用方便,完全能够应用于实际锂电池的充放电。但是,系统在实际应用过程中电流值在设定的范围内会有较小的波动量,需要进一步优化系统软件。

参考文献

- [1] 孙文,林平,卢冶,等.用于电动汽车的双向 DC/DC 变换器控制设计[J].电力电子技术,2012,46(7):40-42.
- [2] INOUS S, AKAGI H. A bidirectional DC-DC converter for an energy storage system with galvanic isolation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007,22(6):2299-23066.
- [3] 张明锐,李元浩,欧阳丽,等.基于混杂系统 DC-DC 变换器的永磁风电并网系统直流母线电压稳定控制[J].电工技术学报,2015,30(4):62-69.
- [4] 武琳,刘志刚,洪祥.隔离式双向全桥 DC-DC 变换器的功率控制特性比较与分析[J].电工技术学报,2013,28(10):179-187.
- [5] 郑宏,朱文,沈思伦,等.一种新型双向直流变换器拓扑与控制策略研究[J].信息技术,2018(2):72-77.
- [6] 徐忠良,刘军,黄森,等.一种改进型的交错并联双向 DC/DC 变换器[J].上海电机学院学报,2017,20(4):232-236.
- [7] 陈亚爱,梁新宇,周京华.双向 DC-DC 变换器拓扑结构综述[J].电气自动化,2017,39(6):1-6.
- [8] 史永胜,王雪丽,李娜,等.用于蓄电池储能的双向 DC-DC 变换器的实现[J].电子器件,2018,41(2):329-332.
- [9] 庄元明.双向全桥 DC-DC 变换器研究[D].南京:南京师范大学,2007.
- [10] 张晨,凌跃胜.双向全桥 DC-DC 变换器故障智能检测系统设计[J].现代电子技术,2018,41(5):144-148.
- [11] 张占松.开关电源的原理与设计[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [12] 焦尚彬,刘晨,王俊辉.基于 FPGA 的开关电源模糊滑模控制器研究[J].电力电子技术,2014,48(4):31-33.
- [13] CHO I, KIM Y, MOON G. A half-bridge LLC resonant converter adopting boost PWM control scheme for hold-up state operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2014,29(2):841-850.
- [14] GUO Y, ZHANG C, WANG Z, et al. Study on the method of fuzzy PID control for DC/DC converter[C]. International Conference on Information Networking and Automation, IEEE, 2010:V1-329-V1-332.
- [15] 曹旭.双向 DC/DC 变换器的数字控制研究与设计[D].武汉:武汉理工大学,2013.

作者简介

王瑾,硕士,主要研究方向为图像处理、测控。

E-mail:1344510503@qq.com