

1-8-2019

## Bi-directional DC-DC Converter for Battery Energy Storage

Kun Xia

*Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Xinwei Hong

*Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Yuan Yin

*Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Anghui Chen

*Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Bi-directional DC-DC Converter for Battery Energy Storage

### Abstract

**Abstract:** A topology of *non-isolated* bi-directional DC-DC converter is proposed. The converter adopts the *synchronous rectifier* half bridge buck-boost circuit as the foundation using the voltage and current double closed-loop control method to achieve the function of the lithium batteries charging and discharging. The working principles of the DC-DC converter are analyzed under *the charging mode, discharging mode and parallel supply mode*. The simulation model for the converter circuit is established in Matlab/Simulink circumstance and the system experiment is built. The simulation and experiment verifies the feasibility and the reliability of the converter. The simulation results show that *the efficiency of power conversion* is over 95%.

### Keywords

bi-directional dc-dc converter, synchronous rectifier control, half bridge buck-boost, power transformation, efficiency

### Recommended Citation

Xia Kun, Hong Xinwei, Yuan Yin, Chen Anghui. Bi-directional DC-DC Converter for Battery Energy Storage[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(8): 3219-3228.

## 用于电池组储能的双向 DC-DC 变换器研究

夏鲲, 洪信炜, 袁印, 陈昂辉

(上海理工大学电气工程系, 上海 200093)

**摘要:** 提出了一种非隔离式双向 DC-DC 变换器拓扑, 该变换器拓扑以同步整流的半桥升降压电路为基础, 加入电压电流双闭环控制实现锂电池组的充电和放电。详细分析了该 DC-DC 变换拓扑在充电、放电和并联供电模式下的工作原理。在 Matlab/Simulink 下建立了电路模型, 并完成了系统实验, 仿真和实验验证了该变换电路的可行性和可靠性。实验结果表明, 该变换器电能转换效率能保持在 95% 以上。

**关键词:** 双向 DC-DC; 同步整流; 半桥升降压; 电能转换; 效率

中图分类号: TM461.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 08-3219-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201808049

## Bi-directional DC-DC Converter for Battery Energy Storage

Xia Kun, Hong Xinwei, Yuan Yin, Chen Anghui

(Department of Electrical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** A topology of *non-isolated* bi-directional DC-DC converter is proposed. The converter adopts the *synchronous rectifier* half bridge buck-boost circuit as the foundation using the voltage and current double closed-loop control method to achieve the function of the lithium batteries charging and discharging. The working principles of the DC-DC converter are analyzed under *the charging mode, discharging mode and parallel supply mode*. The simulation model for the converter circuit is established in Matlab/Simulink circumstance and the system experiment is built. The simulation and experiment verifies the feasibility and the reliability of the converter. The simulation results show that *the efficiency of power conversion* is over 95%.

**Keywords:** bi-directional dc-dc converter; synchronous rectifier control; half bridge buck-boost; power transformation; efficiency

## 引言

电池作为一种广泛使用的直流电源, 具有供电可靠, 电压稳定, 体积小, 移动方便等优点, 在电力, 通信, 交通和日常生活等众多领域有着广泛的应用, 如何对其进行可靠高效的充放电一直是研究

热点<sup>[1-2]</sup>。双向 DC-DC 变换器是一种新型的电力电子变换器<sup>[3-5]</sup>, 在保持变换器两端的直流电压极性不变的情况下<sup>[6]</sup>, 根据需要可改变工作电流的方向<sup>[7]</sup>, 实现能量的双向传输, 功能上起到了两个单向变换器的作用<sup>[8]</sup>。在实际场合中可以大幅度减轻系统的体积、重量及成本, 具有重要的实际应用价值<sup>[9-10]</sup>。

本文设计了一种锂电池组储能充放电的双向 DC-DC 变换器。该变换器拓扑以同步整流的半桥升降压电路为基础, 有效提高了电能变换效率, 系



收稿日期: 2016-11-07 修回日期: 2017-02-23;  
基金项目: 宁波市科委重大科技攻关项目(2012B10031);  
作者简介: 夏鲲(1980-), 男, 上海, 博士, 副教授,  
研究方向为电机及其控制、电力电子与电力传动;  
洪信炜(1992-), 男, 上海, 硕士生, 研究方向为电力  
电子与电力传动; 袁印(1989-), 四川, 硕士, 研究方  
向为电力电子与电力传动。

<http://www.china-simulation.com>

• 3219 •

统通过软件控制电路工作模式,对充电电流和电池组端电压进行实时采样、监测、调节,采用电流电压双闭环控制算法,确保控制精度。同时加入了电路保护功能,提高了系统的稳定性。

## 1 双向 DC-DC 变换器工作原理

双向 DC-DC 变换器可以在保持变换器两端直流电压极性不变的情况下,根据应用需要改变电流的方向,实现能量的双向流动<sup>[11-12]</sup>。与传统的采用两套单向 DC-DC 变换器的方案相比,双向 DC-DC 变换电路用双向开关代替单向开关,用同一个变换器实现能量的双向传输<sup>[13-14]</sup>,降低了成本,提高了电能转换效率<sup>[15-16]</sup>。

本文设计的双向 DC-DC 变换器的系统原理框图如图 1 所示。

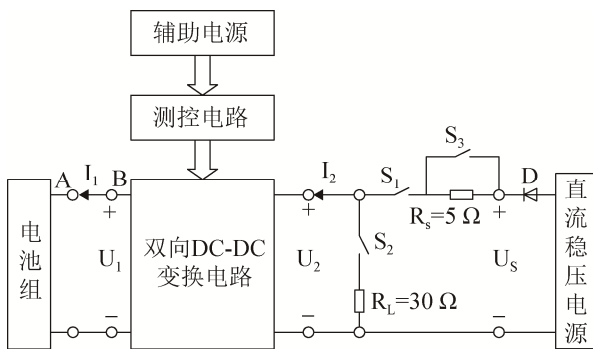


图 1 系统原理框图

Fig.1 System principle diagram

系统电路从功能上可以分为:双向 DC-DC 变换电路(主电路),测控电路和辅助电源几个部分。图 1 中电池组由 5 节锂离子电池(18650 型,容量 3 000 mAh)串联组成,电池组额定端电压为 22 V。直流稳压电源输出端电压  $U_s$  在 24~36 V 内变化。双向 DC-DC 变换器主电路  $U_1$  侧接电池组,  $U_2$  侧接直流稳压电源或负载,控制 3 个开关  $S_1$ 、 $S_2$  和  $S_3$  的开关状态,便可控制系统电路运行在充电,放电和并联供电 3 种不同工作模式。可见,双向 DC-DC 变换器是电池组和直流稳压电源之间的一个开关控制装置,具有双向升降压功能,变换器左侧到右侧为升压变换,右侧到左侧为降压变换。

## 1.1 工作原理

双向 DC-DC 变换器主回路如图 2 所示。其中  $U_1$  为电池组端电压,  $C_1$  为电池组滤波电容,  $U_2$  为直流母线电压,  $C_2$  为母线电容,  $L$  为储能电感。MOSFET  $Q_1$  和  $Q_2$  组成半桥电路。 $D_1$  和  $D_2$  为  $Q_1$  和  $Q_2$  的体二极管,作续流二极管使用。 $Q_3$  通断控制电路充电电流的采样。 $Q_4$  的体二极管  $D_4$  能够在电池充满电时隔离电路,起到保护作用。整个变换电路采用同步整流控制方式,选用导通电阻较小的 MOSFET,能够有效降低器件损耗,提高电能转换效率。

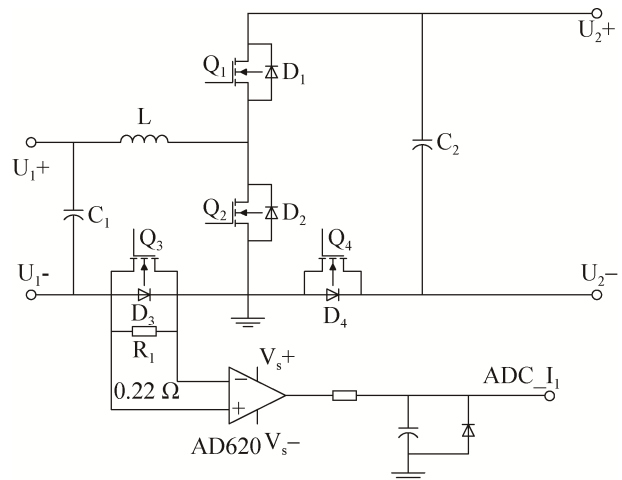


图 2 主电路拓扑

Fig.2 Power circuit topology

该双向 DC-DC 变换器包括以下三种主要工作模式。如图 3 所示。

### 1.1.1 充电模式

系统处于充电模式时,  $S_1$ 、 $S_3$  闭合,  $S_2$  断开,  $U_2$  侧接直流稳压电源。稳压电源  $U_s$  与  $Q_1$ 、电感  $L$ 、 $Q_2$  以及电池组  $U_{bat}$  构成了一个 Buck 变换电路,能量从主电路右侧传递到左侧。此时  $Q_3$  断开,电流流经采样电阻  $R_1$  构成回路,系统通过放大采样电阻  $R_1$  的端电压,实时检测充电电流的大小以保证恒流充电。当  $Q_1$  导通,  $Q_2$  关断时,  $Q_4$  导通,电流流向如图 3(a)所示。当  $Q_1$  关断,  $Q_2$  导通时,  $Q_4$  关断,电感电流通过  $L$  和  $Q_2$  续流,如图 3(b)所示。

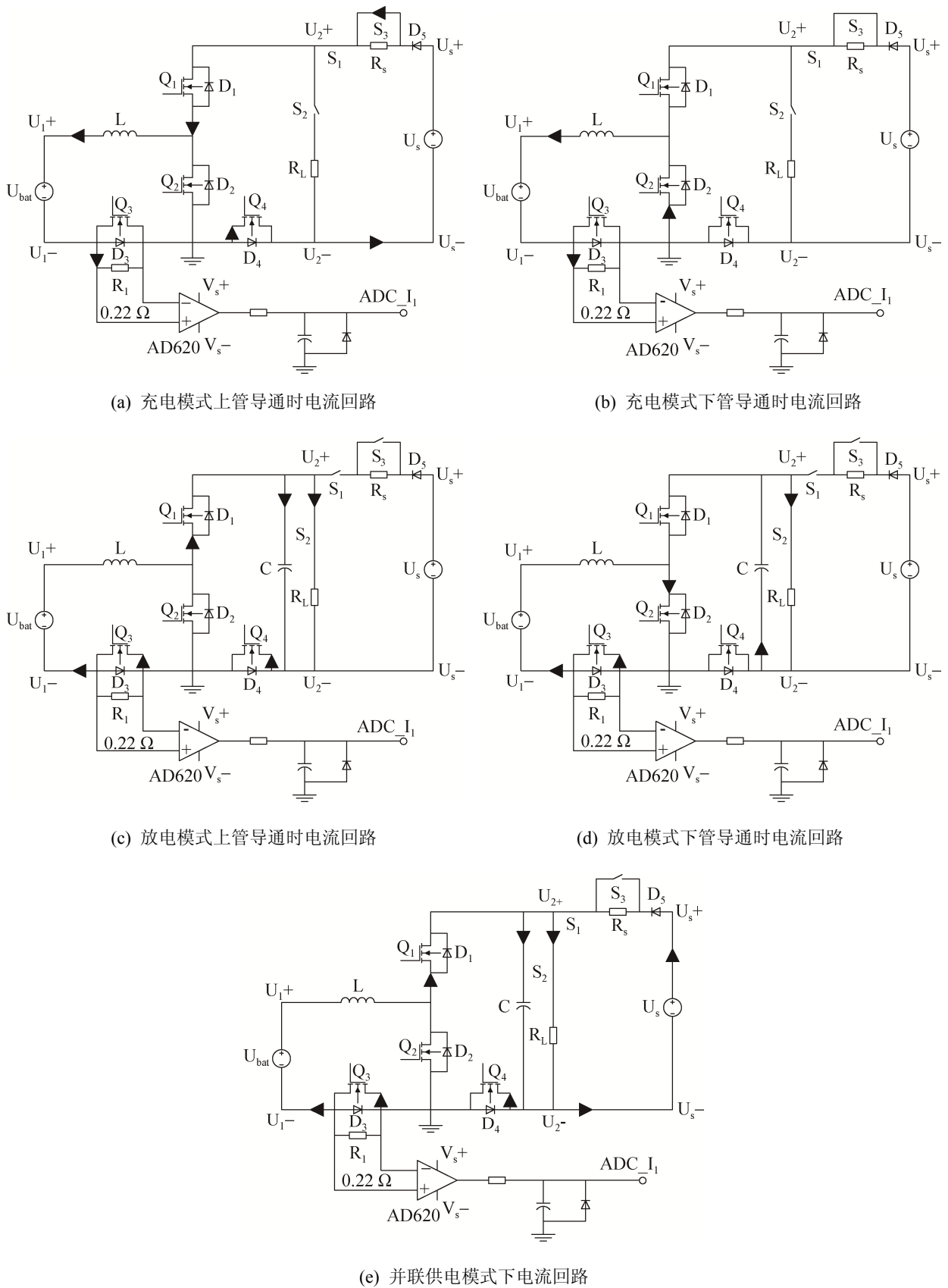


图 3 3 种不同模式下电路工作状态

Fig.3 Working states during three different circuit modes

<http://www.china-simulation.com>

### 1.1.2 放电模式

系统处于放电模式时,  $S_1$ 、 $S_3$  断开,  $S_2$  闭合,  $U_2$  侧接负载。电池组  $U_{bat}$  与  $Q_2$ 、电感  $L$ 、 $Q_1$  以及负载  $R_L$  构成了一个 Boost 变换电路, 能量从主电路左侧传递到右侧。此时  $Q_3$  导通, 以减小损耗, 提高电池组放电效率。当  $Q_1$  导通,  $Q_2$  关断时,  $Q_4$  导通,  $U_{bat}$  给电阻  $R_L$  供电, 并给电容  $C$  充电, 电流流向如图 3(c)所示。当  $Q_1$  关断,  $Q_2$  导通时,  $Q_4$  关断, 电感电流通过  $L$  和  $Q_2$  续流, 同时电容  $C$  给  $R_L$  供电, 如图 3(d)所示。

### 1.1.3 并联供电模式

系统处于并联供电模式时,  $S_1$ 、 $S_2$  闭合,  $S_3$  断开, 电池组  $U_{bat}$  和稳压电源  $U_s$  并联给  $R_L$  供电, 并联供电模式下电路工作状态如图 3(e)所示。在并联供电模式下电路实时测量电池组电压  $U_{bat}$ , 当电池电压偏低、小于阈值  $U_{bat}-\Delta U$  时, 系统将自动进入充电模式; 当电池电压偏高、大于阈值  $U_{bat}+\Delta U$  时, 系统将自动进入放电模式; 其中  $\Delta U$  一般设定为  $0.5 V$ 。

本电路中采样电阻  $R_1$  与 MOSFET  $Q_3$  并联的结构可以有效提高双向 DC-DC 变换器的转换效率。当系统处于充电模式时断开  $Q_3$ , 采样电阻  $R_1$  正常工作, 仅在充电模式下测量充电电流的大小, 以形成闭环、保持恒流充电, 而在其他工作模式下  $Q_3$  均处于导通状态, 减少了回路损耗。

## 1.2 控制方法

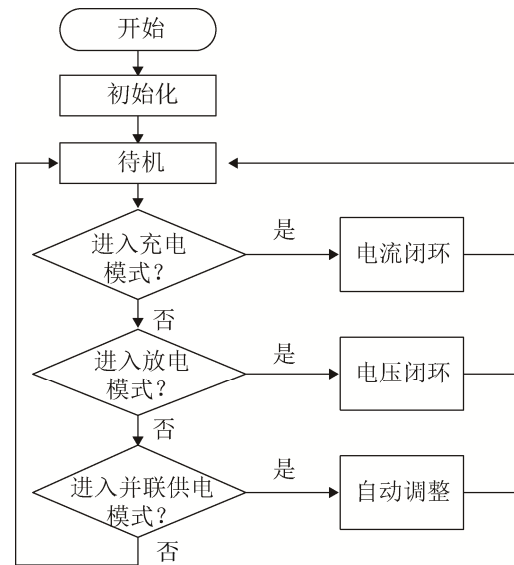
电路采用互补 PWM 方波控制半桥开关管的导通和关断, 在不同电路工作模式下, 通过不同的闭环控制算法对电压电流进行调节, 控制算法流程图如图 4(a)所示。在充电模式下, 电路加入电流闭环控制使其工作在恒流充电状态下; 在放电模式下, 电路加入电压闭环控制使其工作在恒压放电状态下; 在并联供电模式下, 系统根据电池组电压大小自动选择工作模式, 能量处于双向流动状态。

互补 PWM 闭环控制原理图如 4(b)图所示。系统经过采样得到电流/电压信号, 将此信号与基准信号 Ref 进行比较放大生成误差函数  $e(t)$ , 经过闭

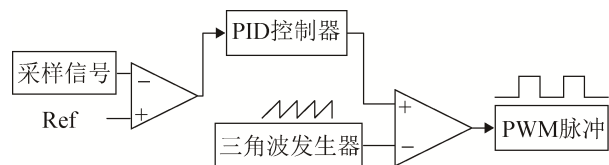
环控制器得到反馈信号并与三角波比较后得到调制后的脉冲控制信号, 将其作为开关信号实现电路的闭环控制。

同时, 电路中加入了过充和过放保护, 使系统可以及时退出上述三种工作模式, 根据电池组当前状态主动选择合理的工作模式进行切换, 确保电池组的正常使用。

系统首先在单片机中设定电池组端的过充电压保护值为  $24 V$  和过放电压保护值为  $16 V$ 。在变换器工作状态下实时采样电池组端电压值, 当在充电模式下电池组电压高于过充电压保护值时便退出充电模式; 当在放电模式下电池组电压低于过放电压保护值时便退出放电模式; 当在并联供电模式下时, 根据电池组当前电量状态进行充电模式和放电模式的切换。



(a) 控制算法流程图



(b) PWM 闭环控制框图

图 4 控制算法流程以及 PWM 闭环控制图

Fig.4 Control algorithm flowchart and block diagram of PWM closed-loop control

## 2 Matlab 仿真分析

### 2.1 电流闭环 Buck 电路

本文提出的双向 DC-DC 变换器在充电模式下为带电流闭环控制的 Buck 电路, 当电源电压在 24~36 V 范围变化时, 可保持充电电流在 2A。为保持电流恒定, 在 Buck 电路中加入电流负反馈, 在 Simulink 下搭建的仿真模型如图 5 所示。图 5 中虚线框部分为电流闭环控制模块。选用开关器件为 MOSFET, 开关频率 10 kHz, 电感  $L$  为  $7.8 \times 10^{-3}$  H, 电容  $C$  为  $5 \times 10^{-4}$  F, 电阻  $R$  为  $5 \Omega$ 。通过电流反馈, 将电流信号通过 PWM 闭环控制开关管的导通, 保持充电电流恒定输出。

设定电源电压值为 30 V, 参考充电电流值为 2 A, 调制后的开关信号波形占空比约为 0.333。调制生成的 PWM 开关脉冲信号如图 6(a)所示, 输出电压以及输出电流波形如图 6(b)和图 6(c)所示。

系统实时采样充电电流, 根据设定电流值进行闭环调节, 实现对电池的恒流充电方法。图 6(d)所示为当电源电压发生变化时的充电电流曲线。在  $t=0.2$  s 与  $t=0.4$  s 时改变电源电压的幅值大

小, 电流经过闭环控制后很快地重新达到了预期设定的充电电流值。

仿真结果表明: Buck 电路通过电流闭环控制后能有效控制充电电流大小, 验证了该双向 DC-DC 变换器能够工作在恒流充电状态。

### 2.2 电压电流双闭环 Boost 电路

为使双向 DC-DC 变换器在放电模式下能够保持输出电压稳定在 30 V, 在 Boost 电路中同时加入了电压负反馈和电流负反馈。在 Simulink 下搭建了电压电流双闭环控制的 Boost 电路如图 7 所示。图 7 中虚线框部分为电压电流双闭环控制模块。其中, 电感和阻容参数与 Buck 电路中保持一致。与电流闭环 Buck 电路控制方法相似, 通过电压与电流的双反馈, 电流和电压双闭环 PWM 控制开关管导通, 使负载端电压保持恒定。

设定电池组电压值为 21 V, 参考输出电压值为 30 V。调制生成的 PWM 开关脉冲信号如图 8(a)所示, 输出电压以及输出电流波形如图 8(b)~(c)所示。

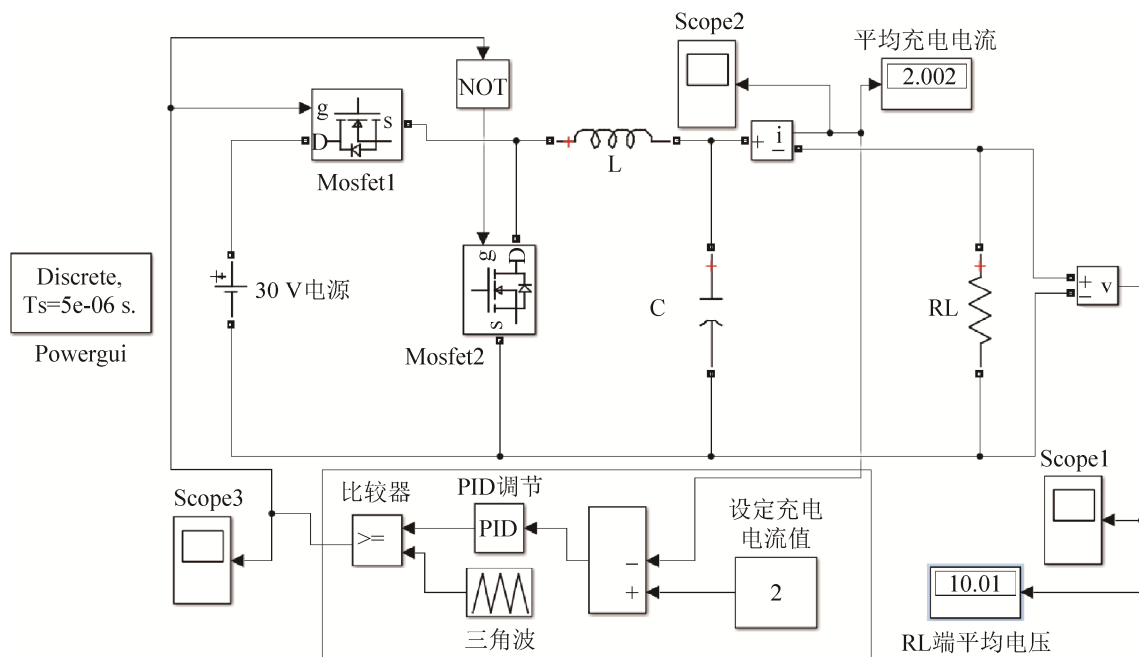


图5 电流闭环控制的 Buck 电路仿真模型

Fig.5 Simulation model for buck circuit with current closed loop control

系统实时采样负载电压和电流,根据设定电压值进行电压电流双闭环调节,保证负载端电压能够保持不变,达到恒压放电要求。图6(d)所示为当电池组电压在合理放电电压范围内发生变化时的负

载电压曲线。在 $t=0.2\text{ s}$ 与 $t=0.4\text{ s}$ 时改变电池组电压的幅值大小,负载电压经过闭环控制后很快地重新达到了预期设定的放电电压值。

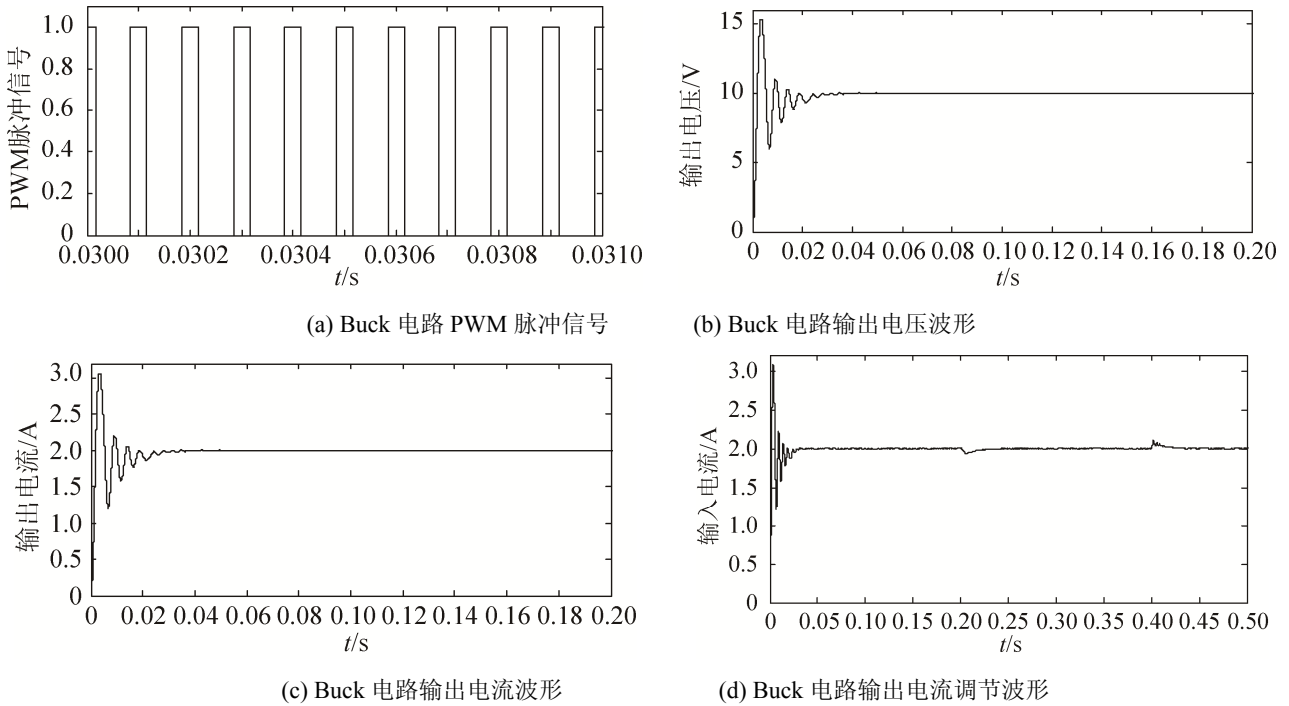


图6 Buck 电路输出电压及输出电流波

Fig.6 Waveform of voltage and current in buck circuit

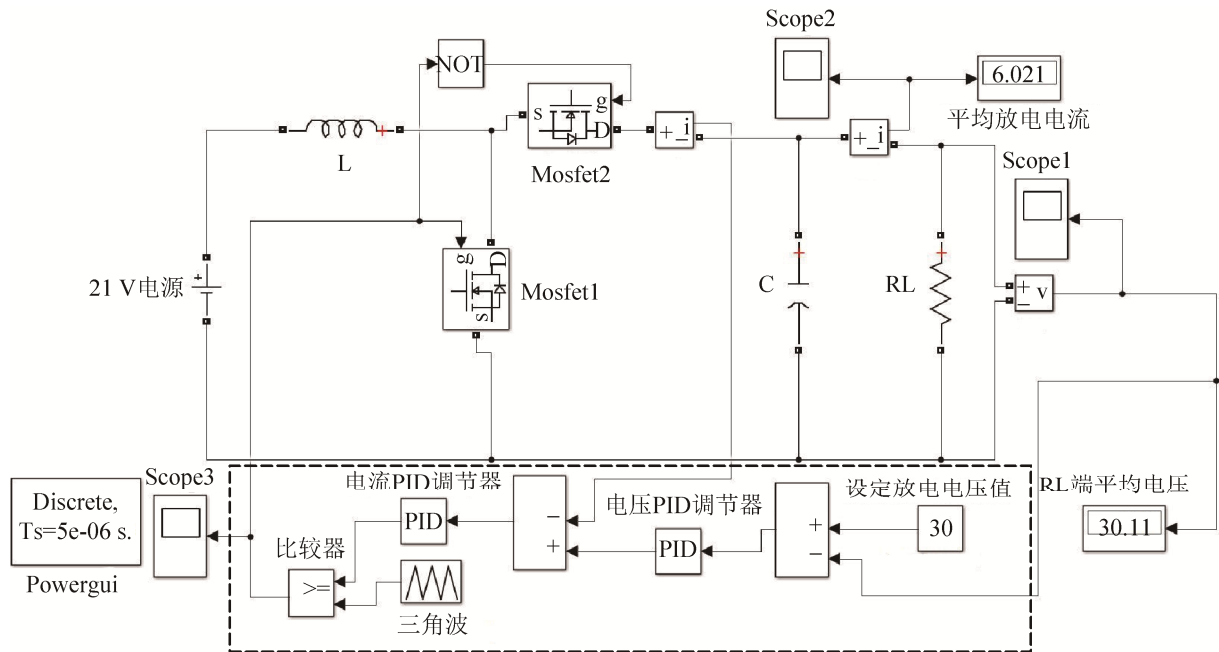


图7 电压电流双闭环控制的 Boost 电路仿真模型

Fig.7 Simulation model for boost circuit with voltage and current closed loop control



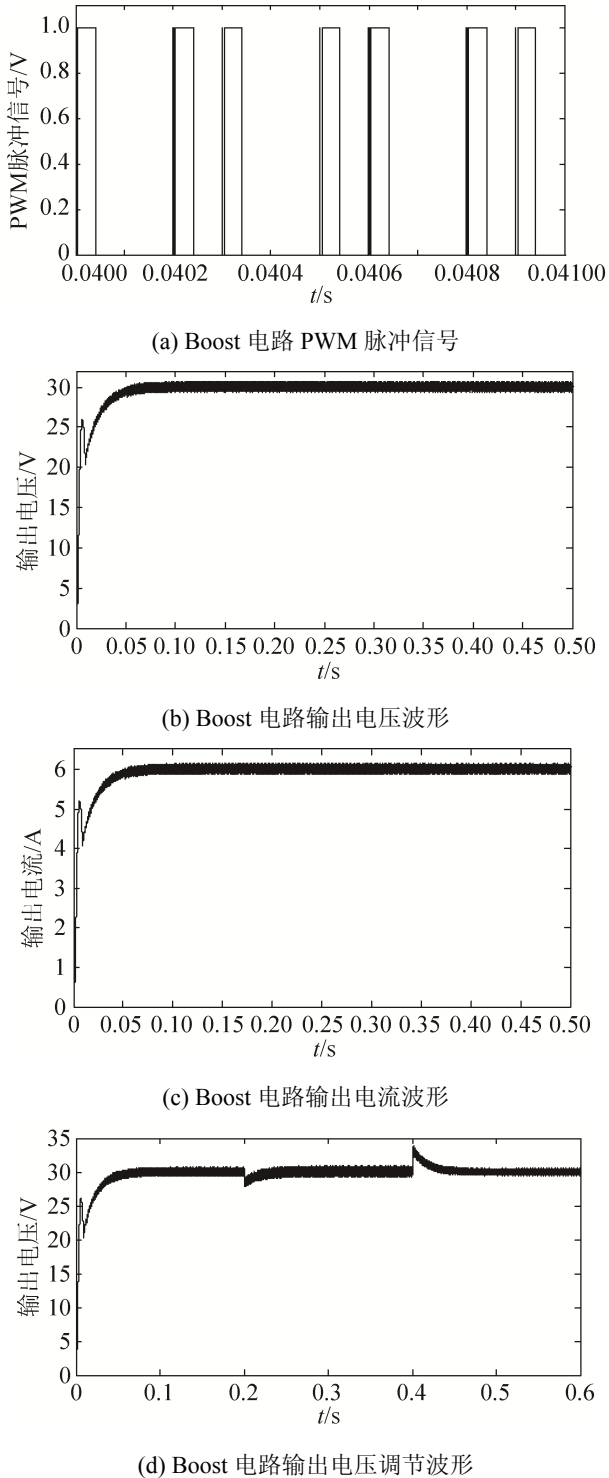


图 8 Boost 电路输出电压及输出电流波形

Fig.8 Waveform of voltage and current in boost circuit

仿真结果表明: Boost 电路通过双闭环控制后的负载电压能够保持恒定, 验证了该双向 DC-DC 变换器能够工作在恒压放电状态。

### 3 实验结果

系统实验平台如图 9 所示, 采用半桥式升降压电路, 主控芯片为 STM32F103ZET6, 配备了 TFT 液晶显示屏显示系统参数。使用两台直流稳压电源, 一台为系统中的直流稳压电源  $U_s$ , 另一台为系统各元件的供电辅助电源, 测量仪器为双通道数字示波器。

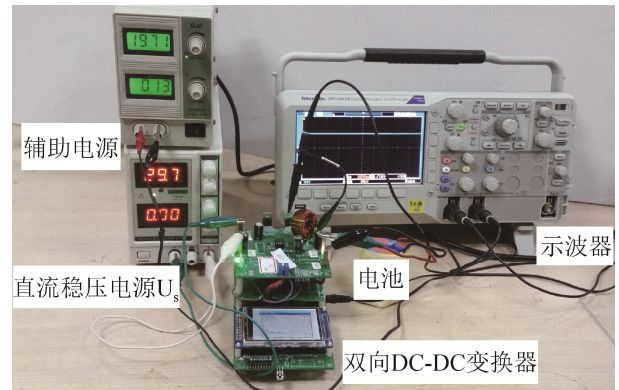


图 9 系统实验平台

Fig.9 System experimental platform

#### 3.1 充电电流精度实验

令系统工作在充电模式, 电源  $U_s$  对电池组进行充电。设定电源电压  $U_s=30\text{V}$ , 充电电流  $I_{10}$  在 1-2A 范围内步进可调, 步进值为 0.1A, 实际所测充电电流值如表 1 所示。

表 1 充电电流控制精度检测( $U_s=30\text{V}$ )

Tab.1 Precision detection of current control ( $U_s=30\text{V}$ )

设定值 $I_{10}/\text{A}$	检测值 $I_1/\text{A}$	电流控制精度 $e_{ic}/\%$
1.0	0.998 4	0.160 0
1.1	1.097 6	0.218 2
1.2	1.197 2	0.233 3
1.3	1.296 8	0.246 2
1.4	1.397 6	0.171 4
1.5	1.497 7	0.153 3
1.6	1.597 3	0.168 8
1.7	1.696 7	0.194 1
1.8	1.796 6	0.188 9
1.9	1.896 1	0.205 3
2.0	1.996 5	0.175 0

设定充电电流  $I_{10}=2\text{A}$ , 调节直流电源电压  $U_s$ , 实际所测充电电流值如表 2 所示。

表 2 充电电流控制精度检测( $I_1=2\text{A}$ )  
Tab.2 Precision detection of current control ( $I_1=2\text{A}$ )

电压 $U_s/\text{V}$	电流 $I_1/\text{A}$	电流控制精度 $e_{ic}/\%$
36	1.994 9	0.255
30	1.994 7	0.265
24	1.994 9	0.255

同时计算出在不同设定充电电流  $I_{10}$  下的电流控制精度  $e_{ic}$ , 如式(1)所示并将结果于表 1 与表 2 中显示。

$$e_{ic} = \left| \frac{I_1 - I_{10}}{I_{10}} \right| \times 100\% \quad (1)$$

实验结果表明: 在恒压和变压下的充电电流精度均能达到 10 mA 以下, 系统能实现对电池组的恒流充电。

### 3.2 系统效率检测实验

仍然令系统工作在充电模式, 电源  $U_s$  对电池组进行充电。设定  $U_s=30\text{V}$ ,  $I_1=2\text{A}$ , 在同一实验参数下重复 100 次充电实验取测量均值, 测得电池组端电压  $U_1$  及电源端电压  $U_s$  和电池组电流  $I_1$  及电源电流  $I_2$  如表 3 所示。充电效率  $\eta_1$  可由式(2)~(3)计算可得。

充电效率

$$\eta_1 = \left| \frac{P_1}{P_s} \right| \times 100\% \quad (2)$$

$$P_1 = U_1 \times I_1; \quad P_s = U_s \times I_s \quad (3)$$

再令电路工作在放电模式下, 电池组对负载  $R_L$  进行放电。设定负载电压  $U_2=30\text{V}$ , 在同一实验参数下重复 100 次放电实验取测量均值, 测得电池组端电压  $U_1$  及负载端电压  $U_2$  和电池组电流  $I_1$  及负载电流  $I_2$  如表 4 所示。放电效率  $\eta_2$  可由式(4)~(5)计算可得。

放电效率

$$\eta_2 = \left| \frac{P_L}{P_1} \right| \times 100\% \quad (4)$$

$$P_1 = U_1 \times I_1; \quad P_L = U_L \times I_L \quad (5)$$

表 3 充电模式系统效率检测

Tab.3 System efficiency measurement in charging mode

参数	电池组端	电源端
平均电压 $U/\text{V}$	$U_1=20.759$	$U_s=29.168$
平均电流 $I/\text{A}$	$I_1=1.9965$	$I_s=1.4817$
平均功率 $P/\text{W}$	$P_1=41.444$	$P_s=43.218$
充电效率 $\eta_1/\%$	$\eta_1=95.72$	

表 4 放电模式系统效率检测

Tab.4 System efficiency measurement in discharging mode

参数	电池组端	负载端
平均电压 $U/\text{V}$	$U_1=16.577$	$U_L=29.992$
平均电流 $I/\text{A}$	$I_1=1.8469$	$I_L=0.9853$
平均功率 $P/\text{W}$	$P_1=30.616$	$P_L=29.550$
放电效率 $\eta_2/\%$	$\eta_2=96.52$	

实验结果表明: 电池组充放电平均效率均可以达到 95% 以上。

### 3.3 并联供电模式实验

令系统工作在并联供电模式, 电源  $U_s$  和电池组同时工作。调节电源电压  $U_s$  在 32~38 V 范围内变化, 测量负载两端电压  $U_2$ , 并计算得出电压差值绝对值  $|\Delta U|$ , 见表 5。实验结果表明: 系统能够自动转换工作模式并且负载电压  $U_2$  能够稳定在 30 V。

表 5 并联供电模式下负载电压检测

Tab.5 Load voltage measurement in stabilizing mode/V

$U_s$	$U_2$	$ \Delta U $
32	30.09	0.09
33	30.07	0.07
34	30.02	0.02
35	29.97	0.03
36	30.01	0.01
37	29.95	0.05
38	29.98	0.02

### 3.4 过充保护功能检测实验

在充电模式下令  $I_1=2\text{A}$ , 设定当电池组端电压  $U_{1th}=24\text{V}$  时电路停止充电, 观察停止充电时电池组电压  $U_1$  的值, 并计算电压差值绝对值  $|U_1 - U_{1th}|$ , 取其中 7 次实验结果, 如表 6 所示。

实验结果表明: 系统检测到  $U_1$  将要达到 24 V 时便停止充电, 具有过充保护功能。

表 6 过充保护功能检测

Tab.6 Load voltage measurement in stabilizing mode

试验次数	停充时 $U_1$ (V)	$ U_1 - U_{1th} $ (V)
1	23.97	0.03
2	23.99	0.01
3	23.98	0.02
4	23.96	0.04
5	23.97	0.03
6	23.99	0.01
7	23.98	0.02

## 4 结论

本系统采用同步整流双闭环控制方式的半桥电路实现了双向 DC-DC 变换。运用 Matlab/Simulink 对不同工作模式下的能量流向分别进行了仿真, 分析了不同模式下的控制算法。实验平台验证了系统能够对电池组进行恒流充电, 以及在并联供电模式下保持电压稳定并具有过充保护功能和 95% 以上的充放电效率。仿真和实验结果表明, 该双向 DC-DC 变换器原理正确, 工作稳定可靠, 输出稳压稳流精度高, 具有良好的控制性能。

## 参考文献:

- [1] 何秋生, 徐磊, 吴雪雪. 锂电池充电技术综述[J]. 电源技术, 2013, 37(8): 1464-1466.  
He Qiusheng, Xu Lei, Wu Xuexue. Review of lithium battery charging technology[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(8): 1464-1466.
- [2] 李立, 刘刚. 多电池组储能系统双向 DC-DC 变换器的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 90-94.  
Li Li, Liu Gang. Development of bi-directional DC-DC converter in multiple battery energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 90-94.
- [3] 张相军, 刘冠男. 软开关双向 DC-DC 变换器控制模型[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(11): 89-96.  
Zhang Xiangjun, Liu Guannan. Bidirectional DC / DC converter control model analysis based on super capacitor[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(11): 89-96.
- [4] 李春华, 朱新坚, 吉小鹏, 等. 光伏系统中蓄电池管理策略研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(11): 2378-2382.

- Li Chunhua, Zhu Xinjian, Ji Xiaopeng, et al. Study on battery management strategy in photovoltaic system[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(11): 2378-2382.
- [5] Yang M K, Lee S J, Choi W Y. High-efficiency non-isolated dynamic voltage restorer using soft-switching dc-dc converter for parallel-voltage compensation[J]. 2015 IEEE Energy Conversion and Exposition (S2329-3721), 2015: 2407-2412.
- [6] 童亦斌, 吴峰, 金新民, 等. 双向 DC/DC 变换器的拓扑研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(13): 81-86.  
TONG Yi-bin, WU Tong, JIN Xin-min, et al. Study of Bi-directional DC/DC Converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(13): 81-86.
- [7] Chen G, Cheng Q, Wang H, et al. Study on bi-directional energy transfer of EV charging station on micro-grid operation[C]//Intelligent Control and Automation. IEEE. Shenyang, 2014: 5517-5522.
- [8] 张方华, 朱成花. 双向 DC-DC 变换器的控制模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 46-49.  
Zhang Fanghua, Zhu Chenghua. The controlled model of bi-directional DC-DC Converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 25(11): 46-49.
- [9] 易芳, 吴敏琦, 易灵芝. 风能混合储能系统的并联控制研究[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(5): 1120-1124.  
Yi Fang, Wu Minqi, Yi Lingzhi. Parallel control study of wind hybrid energy storage system[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(5): 1120-1124.
- [10] 廖志凌, 阮新波. 一种独立光伏发电系统双向变换器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 97-103.  
Liao Zhiling, Ruan Xinbo. Control Strategy for Bi-Directional DC/DC Converter of a Novel Stand-Alone Photovoltaic Power System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 97-103.
- [11] 陆治国, 祝万平, 刘捷丰, 等. 一种新型交错并联双向 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 39-46.  
Lu Zhiguo, Zhu Wanping, Liu Jiefeng, et al. A Novel Interleaved Parallel Bidirectional DC/DC Converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12): 39-46.
- [12] 沈正斌, 李鹏, 盘宏斌, 等. 钒液流储能变流器双向 DC/DC 四阶段控制策略[J]. 电力电子技术, 2016, 50(2): 23-27.  
Shen Zhengbin, Li Peng, Pan Hongbin, et al. Four-stage Control Strategy of Bidirectional DC/DC in Vanadium

- Flow Energy Storage Converter[J]. Power Electronics, 2016, 50(2): 23-27.
- [13] 吴红飞, 陆珏晶, 石巍, 等. 一族非隔离双向直流变换器[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(9): 65-71.  
Wu Hongfei, Lu Juejing, Shi Wei, et al. A Family of Non-isolated Bi-directional DC-DC Converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(9): 65-71.
- [14] 王冕, 田野, 李铁民, 等. 应用于储能系统的双向 DC-DC 变换器研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 66-71.  
Wang Mian, Tian Ye, Li Tiemin, et al. Study of Bidirectional DC-DC Converters Applied to Energy Storage System[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(8): 66-71.
- [15] Wang K, Lee F C, Lai J. Operation principle of bi-directional full-bridge DC/DC converter with unified soft-switching scheme and soft-starting capability[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth IEEE. New Orleans, 2000: 111-118.
- [16] Rathge C, Mecke R. Converter for energy storage integration in photovoltaic plants[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. IEEE Xplore, 2002: 959-963.

### 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊（光盘版）电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心，发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》，《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》（2017 版）采用的统计源期刊为 20192 种，涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种，ESCI 期刊 5578 种；增补期刊 1762 种。参照中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标，计算期刊影响力指数(CI)，对国内 6210 种学术期刊排序，遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10%为国际影响力品牌学术期刊。TOP5%以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10%之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。