

基于现场总线的高隔离度可调直流电源 嵌入式控制器设计

蒋存波, 焦 阳, 杨家志, 王怀红, 孔祥丽

(桂林理工大学, 广西 桂林 541004)

摘要: 模块级联是用于绝缘实验所需的高性能对称双极型矩形波脉冲电源的一种方法, 为实现级联, 需要有能够协调工作的高隔离度直流电源; 设计出嵌入到各电源的板级嵌入式控制器 BEC (Board-level Embedded Controller), 使各 BEC 作为从节点利用 RS485 接口和 ModBus 协议与嵌入式主控制器 EHC (Embedded Host Controller) 构成一个主从式现场总线网络, 并在主节点 EHC 的控制下协调工作; 利用 BEC 内的 STM32F103C8 处理器产生隔离 DC-DC 桥的互补 PWM 控制信号和高隔离输出电压, 并进行电流和输出电压的隔离检测; 由基于电流切换的变参数增量式数字 PI 算法来确定脉冲宽度值, 产生 Buck 调压电路的闭环 PWM 控制信号, 实现输出电压的调压和稳压控制; 实验结果表明该嵌入式控制器能够满足级联式对称双极型矩形波脉冲电源对高隔离度可调直流电源的需要。

关键词: 嵌入式系统; 隔离开关电源; 现场总线; 智能控制

Design of Adjustable High Isolation DC Power Embedded Controller Based on Fieldbus

Jiang Cunbo, Jiao Yang, Yang Jiazhi, Wang Huaihong, Kong Xiangli

(Guilin University of Technology, Guilin 541000, China)

Abstract: The multi-module cascade is a method used for insulation test which need a pulse power supply of high-performance, symmetrical, and bipolar. In order to cascade, it needs a high isolation DC power which can coordinated control. Designing the BEC (Board-level Embedded Controller) that which have embed to each power. As slave nodes, each BEC should utilize the RS485 connection and Modbus protocol with EHC (Embedded host controller) to constitute a master-slave fieldbus network, and working under the control of master node. Utilizing the BEC's STM32F103C8 processor to generate a complementary PWM controller signs which can isolate DC-DC bridge, and check the electric current, output voltage under isolation. Through the variable parameters incremental digital PI algorithm which based on the current switch to determine the value of pulse width to generate the closed loop PWM control signal of Buck regulating circuit, realizing voltage regulation and stabilization of output voltage. Experimental results show that the embedded controller can satisfy the cascading symmetrical bipolar rectangular wave pulse power supply for high isolation adjustable DC power supply needs.

Keywords: embedded system; isolating switching power supply; fieldbus; intelligent control

0 引言

脉冲电力绝缘加速老化寿命实验需使用连续的高压对称矩形波脉冲电源^[1-2], 要求脉冲电源具有很短的脉冲上升/下降时间, 并且矩形波脉冲波形要好, 脉冲上升下降时间、脉冲幅值、脉冲频率和占空比等脉冲参数要稳定并准确。当前利用一个逆变桥直接产生所需电压幅值的高性能对称矩形波电源还有困难, 而用 n 个幅值在 600 V 以内的高性能脉冲同步逆变模块级联, 却是产生满足以上高性能脉冲电源的一种有效方法^[3]。本文介绍了一种基于 RS485 接口和 ModBus 协议的高隔离度直流电源板级嵌入式控制器的设计方案。

1 高隔离可调直流稳压电源及嵌入式控制器

本课题要求使用的对称双极型矩形波脉冲电源, 脉冲幅值

收稿日期: 2015-03-25; 修回日期: 2015-05-07。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51167004); 广西自然科学基金资助项目(2011GXNSFA018022, 2013GXNSFBA019250)。

作者简介: 蒋存波(1962-), 男, 广西桂林人, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事嵌入式系统及应用、自动检测与控制装置、计算机应用方向的研究。

在 3~6 kV、脉冲频率在 1~20 kHz、空载脉冲电压上升时间在 100~300 ns, 试样等效电容 100~1 000 pF, 能够长期连续工作。虽然可用一个逆变桥产生幅值 600 V 以内的高性能对称双极型矩形波脉冲, 但直接产生 6 kV 及以上幅值的连续高性能脉冲还有困难。利用脉冲变压器升压可以获得所需要的电压幅值的脉冲, 但经过变压器后脉冲波形变差不能完全满足加速电老化寿命实验要求。利用 n 个幅值为 U_{PK} ($U_{PK} \leq U_{PKM}$) 的可调同步脉冲逆变模块 SPIM (Sync Pulse Inverter Module) 级联可获得幅值 $U_P = \sum U_{PK}$ 的高性能电源 ($0 < U_{PK} \leq U_{PKM}$)。一种级联式对称双极型高压矩形波电源如图 1 所示。

嵌入式主控制器 EHC 和 m 个板级嵌入式控制器 BECK ($k=1, 2, \dots, m$) 利用 RS485 接口构成主从式现场总线网络, 其中 EHC 为主控节点, 所有 BEC 为从节点, 使用 ModBus 协议的 ASCII 报文格式传输信息^[4]。EHC 通过参数设置命令报文去设置指定模块的电压值 U_{HK} ($60 \leq U_{HK} \leq 600, k=1, 2, \dots, m$), 通过参数读取命令报文要求指定的 BEC 将自己的输出电压检测值和状态信息传送给 EHC, 通过特殊的广播报文发送启动和停止命令。

为实现 m 个 SPIM 级联, 要有 m 个隔离电压不低于 $2 m \times U_{PKM}$ 的独立可调高隔离直流稳压电源模块 HIP 为每个

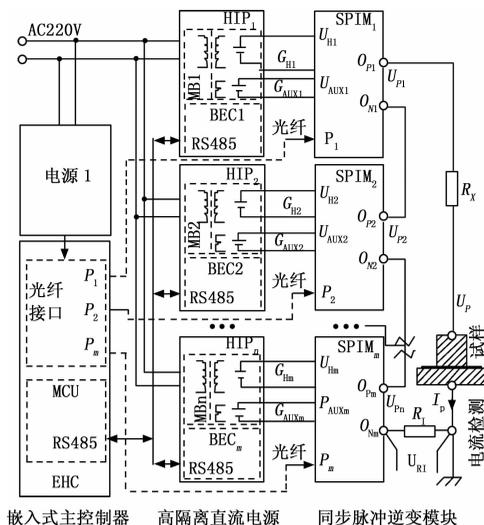


图 1 一种级联式对称双极型高压矩形波电源

SPIM 提供高隔离的直流电源 U_{HK} 和高隔离辅助电源 U_{FK} ^[5]。虽然变压器加电动调压器可产生符合条件的电压,但其体积大,各绕组之间的耦合电容较大,这对逆变脉冲会产生不利影响。而使用隔离型开关电源与 Buck 调压电路结合,可以产生耦合电容小的高隔离可调直流稳压电源。一种应用于级联式对称双极型高压矩形波电源的高隔离度可调直流稳压电源如图 2 所示。

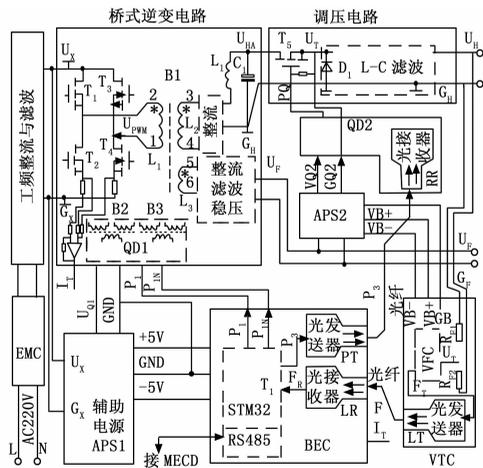


图 2 高隔离度可调直流电源原理图

桥式逆变电路在 BEC 产生的互补 PWM 信号 P1 和 P1N 控制下,将工频整流后的直流电压 U_X 逆变为脉冲电压 U_{PWM} ,再由高隔离脉冲变压器 B1 隔离传送到副边。B1 副边升压绕组 L2 的输出脉冲经整流滤波得到约 650 V 的直流电压 U_{HA} ,降压辅助绕组 L3 输出的脉冲经整流滤波得到约 24 V 的辅助直流电压 U_A 。 U_{HA} 由 Buck 调压电路进行调压和稳压得到输出电压 U_H 。电压 U_H 由电阻 R_{F1} 和 R_{F2} 分压得到电压检测信号 $U_T = U_H/100$,电压检测电路 VTC 中的 VFC 将 U_T 线性转换为频率信号 F_T ,光发送器 LT 转换成的光信号通过光纤隔离传送到 BEC 的光接收器 LR。LR 将光纤传送的光脉冲转换为电脉冲 F_R 并送到 BEC 中的嵌入式处理器的外部计数脉冲输入端,然后通过测量脉冲频率和周期实现对 U_H 的高隔离度检测并获

得其检测信号 U_{HF} 。Buck 回路的电流 I_{L2} 与 DC-DC 桥电流 I_T 相关联,为简化电路利用 I_T 作为负载电流近似值进行控制算法参数切换。一种基于现场总线网络的高隔离度直流电源级联嵌入式控制器电路如图 3 所示。

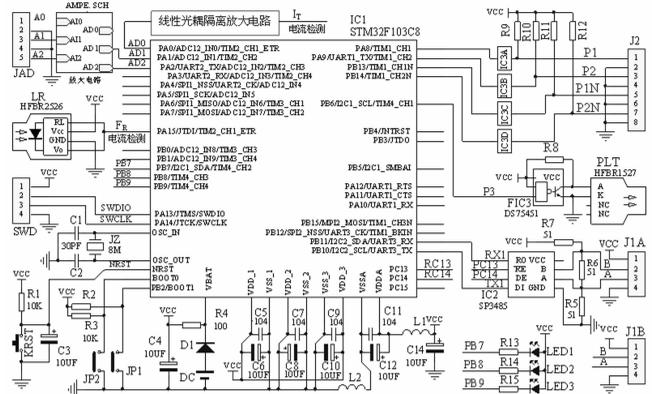


图 3 板级嵌入式控制器 BEC 电路原理图

BEC 以 STM32F103C8 为核心^[6],开启 Watchdog 功能。利用 TIM1 产生频率为 50 kHz 含 $1 \mu s$ 死区的互补 PWM 控制信号 {TIM1_CH1, TIM1_CH1N},该组信号经 OC 门 IC3 驱动后得到 {P1, P1N} 并由 J2 送到 DC-DC 逆变桥驱动电路, {P1, P1N} 经脉冲变压器隔离驱动后作为桥臂 4 个功率场效应管 {T1, T2, T3, T4} 的栅极控制信号。利用 TIM4-CH1 (PB6) 产生频率为 100 kHz 的 Buck 电路调压 PWM 控制信号 P3,该信号经光发射器 PT 转换成光信号,并由光纤传送到光耦器件隔离作为的 Buck 电路 T5 栅极控制信号,由此实现对输出电压 U_H 的调压和稳压控制。光接收器 LR 将光纤传送来的输出电压检测电路 VFC 光脉冲转换为同频率电脉冲 F_R ,将 F_R 送到 STM32F103C8 的 TIM2-CH1-ETR 计数输入引脚,通过检测 F_R 的频率和周期得到输出电压的高隔离度检测信号 $U_{HF} = U_T$ 。BEC 接收 EHC 发送给自己的电压并设置命令报文,取出电压设定值 U_{HK} ,以 U_{HF} 作为电压反馈信号,通过执行控制算法程序控制 P3 的脉冲宽度,实现输出电压的闭环控制。

2 软件设计

控制软件主程序流程框图如图 4 所示。

利用 10 ms 定时读取 T2 在 10 ms 内对 VFC 脉冲 F_R 的计数值 N_{FR} ,依据 F_R 的频率与 U_H 的关系 $f_{FR} = 1000 U_H$,电压 U_H 的检测值 $U_{HF} = N_{FR}/10$ (V),最大技术误差为 2 个脉冲 (0.2 V)。利用 8 组 FIFO 队列记录电流检测的 AD 值,并进行平均值滤波作为本次电流检测值 I_T 。

2.1 报文定义

使用 ModBus 协议的 ASCII 报文格式,选择功能码 F_C = 65 (41H) 作为普通命令与应答报文,报文格式如表 1 所示。

报文传送的方式只允许主节点与各从节点 BEC 传送报文。普通命令报文由 EHC 主动发出,用 SA 对从站进行寻址,需要被寻址的从站进行应答,错误应答或者超时 (200 ms) 未应答 EHC 将进行重发,最大重发次数设定为 10 次。针对 CV 值不同, PV 和 SV 具有不同的含义,如表 2 所示。

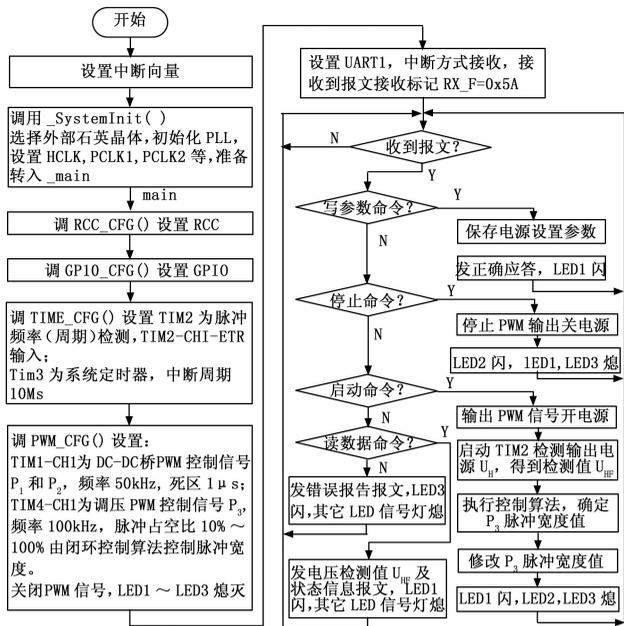


图 4 控制器主程序流程框图

表 1 写参数命令报文

含义	开始标记	从站地址 SA	功能码 FC	数据域字段(11 字符)				校验信息	结束符
				命令值 CV	参数值 PV	状态值 SV	备用		
字符数	1	2	2	1	4	2	4	2	2
十六进制值	3A	10~2F	41	0~F	0000~FFFF	00~FF	0000~FFFF	LRC 校验字	回车换行
ASCII 符号或值	3A	HEX 符对应的 ASCII	34H 31H	对应的 ASCII 码	对应的 ASCII 码	对应的 ASCII 码	对应的 ASCII 码	HEX 符对应的 ASCII	0DH 0AH

表 2 FC=41H 报文各参数含义

报文功能	CV	参数 PV 作用	状态字 SV 作用
普通命令	0	电压设定值 U_{HK}	重复次数, =0 为首发, 最多重复 15(F) 次
普通命令应答	1	0000	0: 成功应答 1: 格式错 2: 参数值超限 3: LRC 错 其它未用
数据请求命令	2	0000H	0000H
数据应答	3	被寻址的 BEC 模块的电压检测值 U_{HF}	被寻址 BEC 模块的状态字

其它取值暂不使用

启动和停止命令使用 SA=00 的广播地址发送广播命令。广播命令格式如表 3 所示。

表 3 广播命令报文格式

含义	开始标记	从站地址 SA	功能码 FC	数据域字段(11 字符)				校验信息	结束符
				命令值 RUN	参数值 PV	状态值 SV	备用		
字符数	1	2	2	1	4	2	4	2	2
十六进制值	3A	00	42	5 或 A	0000	00	0000	LRC 校验字	回车换行
ASCII 符号或值	3A	30H 30H	34H 32H	35H 或 41H	四个 30H	二个 30H	四个 30H	HEX 符对应的 ASCII	0DH 0AH

BEC 收到广播命令后, RUN=5 H 为启动命令, RUN=0 AH 为停止命令, 其它值为非法值, 广播命令不需要应答。

2.2 PWM 控制信号的产生

TIM1 通道 1 产生频率约为 50 kHz 具有约 1 μs 死区的 DC-DC 桥互补 PWM 控制信号 P1 和 P1N。设置 TIM4_ARR=720, 用 TIM4_CCR1 控制脉冲宽度, 用 TIM4 通道 1 产生频率约为 100 kHz, 占空比 0~98% (TIM4_CCR1=0~700) 的 Buck 电路 PWM 控制信号 P3。在收到 EHC 的启动命令后允许 P1、P1N、P3 输出, 否则强制为 0。

2.3 控制算法

利用输出电压 U_H 的检测值 U_{HF} 作为输出电压负反馈信号, 通过控制算法确定 Buck 变换电路 PWM 控制信号 P3 的脉冲宽度 (占空比 D) 构成电压负反馈控制系统, 实现对输出电压 U_H 的调压与稳压控制。

使用 Buck 变换器用于调压与稳压控制具有非线性, 也可使用 PID 控制、滑膜控制、模糊控制等控制算法^[8-10]。如图 5 所示。对于脉冲电加速老化绝缘寿命的实验, 由限流电阻 R_X 、试样等效电容 C_{IS} 、试样绝缘电阻 R_{IS} 构成的负载网络通过同步脉冲逆变模块 SIPM 接到电源 U_H , SIPM 环节可以近似为增益为 $K_2=1$ 的比例环节。绝缘电试样等效电容 C_{IS} 在实验过程中基本维持不变, 绝缘电阻 R_{IS} 在实验初期很大且基本维持常数, 随着老化的发展绝缘性能逐步劣化, R_{IS} 下降漏电流 i_{RIS} 增大, 且电阻 R_{IS} 和漏电流 i_{RIS} 变得不稳定, 因此往往通过检测漏电流值及其变化趋势进行实验终点判别。本电源由 T5 组成的 PWM 开关可以用增益为 $K_1=100$ 的比例环节近似, LC 滤波电路 $f_{LC}(\cdot)$ 可以用二阶线性模型近似, R_2 为 L_2 、 T_3 等回路元件的等效电阻且 $R_2 \approx 2 \Omega$, 反馈系数 $K_F=1$ 。电感 $L_2=33 \text{ mH}$, $C_2=4 * 1500 \mu\text{F}$ 。电感 L_2 被分解为 $L_{2A}=25 \text{ mH}$ 、 $L_{2B}=6 \text{ mH}$ 、 $L_{2C}=2 \text{ mH}$ 3 个电感的串联, 用 0.8 mm 直径漆包线在 KS184-125A 铁硅铝磁环上绕制, 当电流小于 0.5 A 时, 3 个电感磁芯均不饱和, 总电感 $L_2=33 \text{ mH}$, 当电流 $0.5 < I_E < 1 \text{ A}$ 时 L_{2A} 进入非线性区电感量下降, 这时总电感 $L_2 > 10 \text{ mH}$, 当电流 $1 < I_E < 1.5$, L_{2A} 趋向饱和且 L_{2B} 也开始进入饱和区电感量减小, 这时总电感 $L_2 > 3 \text{ mH}$ 。这样既保证了不同电流对滤波电感的要求, 又可避免使用过大的磁芯。考虑试样负载影响后 Buck 电路的传递函数可用公式 (1) 近似表示。

$$G_O(S) = \frac{U_H(S)}{U_{HP}(S)} \approx$$

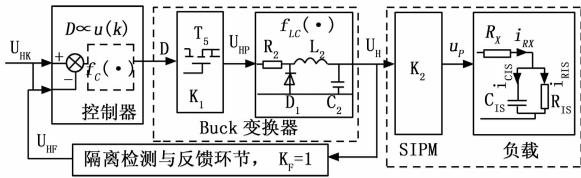


图 5 输出电压闭环控制 Buck 变换电路

$$\frac{1\ 000\ C_S S + 1}{6L_2 C_S S^3 + 198S^2 + 0.012S + 1} \quad (1)$$

其中受电流影响 L_2 在 3~33 mH 之间变化, 不同试样会导致 C_S 在 100~2 000 pF 之间变化。为适应对象参数的变化, 使用公式 (2) 的增量式数字 PI 算法。

$$\Delta u_A(k) = K_P [\Delta e(k) + \frac{T_I}{T} e(k)] \quad (2)$$

为避免过大波动进行限幅处理, 利用公式 (3) 进行限幅, 选择限幅值为 $\Delta U_M = 0.1 U(k-1)$ 且 $\Delta U_M \geq 5$ 。

$$\Delta u(k) = \begin{cases} \Delta u_A(k), & |\Delta u_A(k)| \leq \Delta U_M \\ +\Delta U_M, & \Delta u_A(k) > \Delta U_M \\ -\Delta U_M, & \Delta u_A(k) < -\Delta U_M \end{cases} \quad (3)$$

为适应参数 L_2 随电流 i 变化, 按式 (4) 依据电流检测值 I_T 选择 K_P 和 T_I 值。

$$\begin{cases} K_P = \begin{cases} K_{P1}, & 0 \leq I_T < 0.5 \\ K_{P2}, & 0.5 \leq I_T < 1.0 \\ K_{P3}, & 1.0 \leq I_T < 2 \end{cases} \\ T_I = \begin{cases} T_{I1}, & 0 \leq I_T < 0.5 \\ T_{I2}, & 0.5 \leq I_T < 1.0 \\ T_{I3}, & 1.0 \leq I_T < 2 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

其中 K_{PJ} 、 T_{IJ} ($J=1, 2, 3$) 在理论分析的基础上通过实验确定并存储在 BEC 的 Flash 中。选择 700 为限幅值对控制信号 $u(k)$ 进行限幅处理, 控制 P3 的占空比大约在 0~98% 之间, 控制信号由公式 (5) 计算:

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k), 0 < u(k) \leq 700 \quad (5)$$

将 $u(k)$ 作为脉冲宽度 TON (或占空比 D) 的控制信号, 直接送到寄存器 TIM4_CCR1。控制程序作为一个独立函数模块, 使用 C 语言编写。

3 实验系统性能测试

通过对高频脉冲电源的输出波形进行测量, 图 6 给出了频率 $f=20$ kHz, 占空比 50% 情况下的峰峰值为 1.2 kV, 2.4 kV, 3.6 kV 时的方波电压脉冲输出波形。

由图可以看出, 本系统输出的双极性方波电压脉冲波形的上升沿和下降沿较陡, 并且其末端过冲与震荡现象基本消除, 而且输出电压连续并且可调。满足关于加速老化绝缘寿命实验的电压, 频率以及波形性能的要求。

4 结语

本板级嵌入式控制器 BEC 能够作为从节点利用 RS485 接口和 ModBus 协议与嵌入式主控制器 EHC 连接成一个现场总线网络。能在 EHC 控制下协调工作, 产生隔离开关电源所需



图 6 高频方波脉冲输出波形

要的互补 PWM 控制信号 P1 和 P1N。利用 TIM2-CH1-ETR 在 100 ms 内对光纤隔离的 VFC 计数得到高隔离输出电压 U_H 的高隔离检测值 $U_{HF} = U_H$, 利用数字式增量 PI 控制算法控制 Buck 调压电路 PWM 控制信号 P3 的脉冲宽度实现输出电压 U_H 的调压和稳压控制。通过 DC-DC 桥电流检测值 I_T 切换三组不同的 PI 参数以适应对象参数的变化。实验测试表明该系统满足级联式对称双极型高压矩形波电源及其绝缘加速老化寿命试验的需要。稍感不足的是电源输出电压存在幅值为 5 V 左右低频波动。

参考文献:

- [1] 叶强, 吴广宁, 张雪原, 等. 高压脉冲方波下聚酰亚胺薄膜老化寿命模型 [J]. 电工技术学报, 2009, 3: 7.
- [2] 蒋存波, 曾莎, 闫军部, 等. 一种绝缘寿命测试用高压方波脉冲电源的研制 [J]. 电测与仪表, 2012, 49 (9): 91-96.
- [3] 佟来生, 吴广宁, 刘曦, 等. 基于连续高压脉冲方波的绝缘老化寿命模型 [J]. 电工技术学报, 2006, 21 (8): 44-47.
- [4] Wheeler J C G. Effects of Converter Pulses on the Electrical Insulation in Low and Medium Voltage Motors [J]. Electrical Insulation Magazine, IEEE, 2005, 21 (2): 22-29.
- [5] Jiang C B, Guo D, Jin H. Several Issues on the Designment of Pulse Electrical Stress aging Test Device of Insulation Materials [A]. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE) [C]. 2011/9/16-2011/9/18, 362-366.
- [6] 林涛, 赵秀峰, 王志强, 等. 基于 STM32 的高压断路器标准信号发生仪的研制 [J]. 电测与仪表, 2013, 50 (6): 88-92.
- [7] 张波, 张振仁, 等. 基于 Modbus 协议的 C51 软件编程 [J]. 电测与仪表, 2005, 42 (8): 58-60.
- [8] 刘庆鹏. 基于线性反馈控制 Buck 变换器的研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2012.
- [9] 桑绘绘, 杨奕, 沈彩琳. 基于 PID 控制的 Buck 变换器仿真系统设计 [J]. 南通大学学报 (自然科学版), 2011, 10 (1): 24-28.
- [10] 陈江辉, 邓红雷, 王健敏, 等. 单 Buck 逆变器布尔型滑模控制研究 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15 (7): 71-76.