文章编号：2095-2163(2019)03-0223-06　　中图分类号：TN86　　文献标志码：A

# 基于变流器的能量回馈装置设计实现

张　芳，熊和虎，于飞龙，倪晓昌，王利强
（天津职业技术师范大学 电子工程学院，天津 300222）

**摘　要**：电源在人们社会生活当中随处可见，随着社会的发展，能源问题日趋严重，节能与能量回馈方面有着很大的研究意义。本文就直流转换成交流供给负载，再将负载上的交流转换成直流反馈到交流的输入端子，实现能量的反馈使用。装置主要分为 2 个部分，第一部分是 DC-AC 转换，该部分主要以 STC12C5A60S2 单片机为核心，通过自然数查表法控制硬件 PWM 模块生成 SPWM 脉冲信号，采用单极性调制方案驱动单相全桥逆变电路，输出经 LC 低通滤波器滤波，便可在负载上得到稳定的正弦波交流电。第二部分也以 STC12C5A60S2 单片机为核心调制 PWM 脉冲信号，经过 MOS 管驱动 IIR2104 芯片控制整个 BOOST 升压电路。单片机内部自带的 10 位 ADC 能通过电流电压检测实时反馈电流和电压数值，通过反馈值调整输出的 PWM 脉冲的占空比，形成电压闭环控制系统。按键能设置输出电流从 0.1 A 到 2 A 的限度。

**关键词**：逆变；BOOST 升压；单片机；SPW

# Design and implementation of energy feedback device based on converter

ZHANG Fang, XIONG Hehu, YU Feilong, NI Xiaochang, WANG Liqiang
(School of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**【Abstract】** Power supply is everywhere in the social life. With the development of society, energy problem is becoming more and more serious. Energy conservation and energy feedback have great research significance. In this paper, DC is converted into AC supply load, and then AC on load is converted into DC and fed back to AC input terminal for realizing energy feedback. The device is mainly divided into two parts. The first part is DC-AC conversion. The core of this part is STC12C5A60S2 MCU. The hardware PWM module is controlled by natural number table lookup method to generate SPWM pulse signal. The single-phase full-bridge inverter circuit is driven by unipolar modulation scheme. The output is filtered by LC low-pass filter, and stable sinusoidal AC can be obtained on the load. The second part also uses STC12C5A60S2 MCU as the core to modulate the PWM pulse signal. The whole BOOST circuit is controlled by IIR2104 chip driven by MOS transistor. The 10-bit ADC in the MCU can detect the real-time feedback current and voltage values by current and voltage, and adjust the duty cycle of the output PWM pulse by the feedback value to form a closed-loop voltage control system. The button can set the limit of output current from 0.1 A to 2 A.

**【Key words】** inverter; BOOST; MCU; SPW

## 0　引　言

随着社会的电气化转变，电源的使用日趋广泛，对电源的要求也在提高，与之相适应，电源的形式与设计更是层出不穷。对于工科类院校而言，注重培养学生的实践能力已然成为其办学宗旨之一。电源的设计在学生的课题任务中也是一个研发的重点与难点。研究可知，目前电源的发展规模正在不断扩大，尤其在如今以创新带动技术进步的环境下，故而对电源技术的学习与研究则将紧随社会发展的步伐。如蓄电池，就其本身而言是把化学能转化为电能的装置，并不能够实现功率的转换。针对此现象，恒流源设计也与此相类似。

为响应节能减排的国策号召，本文研究将以能量回馈为设计目标，实现将多余的能量反馈到第一部分的输入端，使电源的总输出功率降到最低[1]。即将前端电路输出的交流电变为直流电，再把输出的直流电与变流器 1 的电源输入端并接，和直流电源一起给整个系统供电。

## 1　方案论证

### 1.1　设计要求

(1) DC-AC 转换电路输出 50 Hz、25 V ±0.25 V、2 A的单相正弦交流电。

**基金项目**：国家级大学生创新创业项目(CZ1704030136)；教育部产教协同育人项目(XJJW0804)；天津市十三五应用型专建项目。

**作者简介**：张　芳(1995-)，女，本科生，主要研究方向：电子科学与技术；倪晓昌(1974-)，男，博士，教授，硕士生导师，主要研究方向：光电信号采集与处理。

**通讯作者**：倪晓昌　　Email：nixichang@tiu.edu.cn

**收稿日期**：2019-02-08

(2)在(1)基础上实现输出交流电的频率范围(20~100 Hz)可调,步进 1 Hz。

(3)为实现能量的反馈,变流器输出电流 $I_1$ = 1 A。

(4)调节电路,使变流器 1 输出 $I_1$ = 2 A,计算直流电源输出功率 $Pd$(越小越好)。

### 1.2 系统设计

通过 7805 将电源电压降压为 5 V 给单片机供电。逆变电路输入电压为 12 V,4 个 MOS 管组成 H 桥逆变电路,对角轮流导通,再由单片机控制 IR2104 去控制 MOS 管开关的时间(频率)实现逆变 SPWM 正弦脉冲调制波形,最后再通过滤波输出。正弦波通过整流桥,正弦波转为正轴半波,通过滤波,波形变得平缓,转为直流电压,通过 BOOST 升压电路,电压增大。LM358 检测输出端电压,并将该信号传递给单片机,单片机判断输出的电压大小。当电压小时,控制 IR2104 控制半桥的开关打开,进行升压;当电压大时,控制关闭半桥。逆变电路中的按键可控制输出波形的频率。直流电路中的按键控制输出电流的大小,在负载不变的情况下电流越大,其功率就会增大,反馈回去的电路中能量越大,就会使直流电源的输出功率越小。系统设计框图如图 1、图 2 所示。

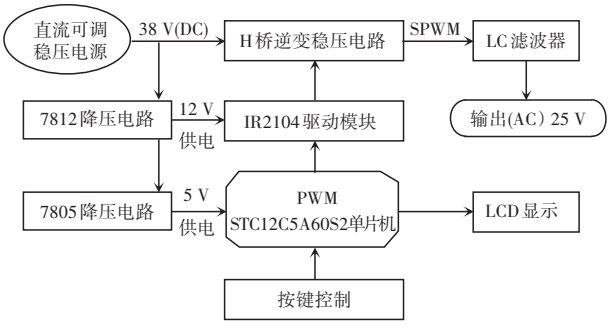


图 1 变流器 1 框图

Fig. 1 Flow diagram of converter 1

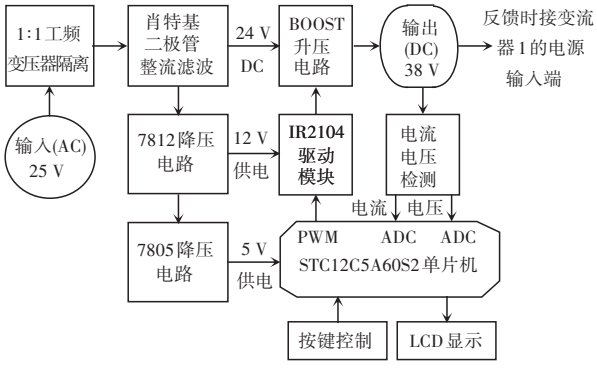


图 2 变流器 2 框图

Fig. 2 Flow diagram of converter 2

## 2 理论分析与计算

### 2.1 BOOST 升压电感计算分析

对于 BOOST 与 BUCK 来说,两者间的区别在于一个是升压,一个是降压。所谓升压就是指在 BOOST 电路中输入电压一定时,输入电压相对于输出的固定电压要更高,而降压恰恰相反,输入电压比输出电压高[1]。在本设计中采用 BOOST 升压电路。

在升压斩波电路工作时,如果电路中电感值比较大,电路中的电容也相对较大。那么当三极管或者 MOS 管处于导通状态时,电源给电感充电,此时的充电电流值可为恒定电流值,负载可由电容供电。因为电容值较大,就可以输出恒定的电压,该电压记为 $U_0$。设三极管或者 MOS 管处于导通时间为 $T_1$,则当其处于截止状态时通过对电路的分析可知此时的电源和电感同时给电容充电,且给负载提供电压;若设截止时间为 $T_2$,则电感释放的能量为 $(Uo - E)I_1T_2$,其中 $E$ 为电源能量,$I_1$ 为输出的恒定电流值。

当电路处于稳定的工作状态时,电感储存能量和释放能量在一周期内是相同的。

### 2.2 滤波电容电感的选择

电流的纹波因子 $r$ 是一个基本的参数,考虑电源的电路因素,假设纹波因子为 0.4 就是最佳值。因为 $r$ 会影响到其它参数,且纹波因子 $r$ 与电感 $L$ 的某些参数有关,所以将 $r$ 确定之后,分析电路便可得到电感 $L$。

考虑到滤波的最佳效果,研究时就要求在电路中的等效电阻应为最小值,这样电路的等效模型可为电感、电容、电阻串联的简单电路,此时该电路的谐振频率可由如下公式求得[1]:

$$WL = 1/WC; \tag{1}$$

$$W = 2 * PI * f; \tag{2}$$

$$f = 1/(2PI * LC). \tag{3}$$

### 2.3 SPWM 调制

脉冲宽度调制(PWM)技术使得逆变电路的结构简化。对于控制技术来讲,脉冲宽度技术代替原有的相位控制技术,PWM 技术可以更加有效地进行谐波抑制,并且其多方面的优点使得电路表现出更高的可靠性[2]。

在实际的应用中,还常常用到正弦 PWM(SPWM)。SPWM 就是会在半个周期内输出宽窄不同的矩形脉冲,而每个正弦下的面积可由一个矩形面积来等效代替,所以当输出的脉冲宽度最大时,所对应的正弦值也是最大,与此相对应的脉冲间的间

隔较小，否则反之。本设计中通过 SPWM 技术来控制反馈电路中的输入电压，实现能量反馈闭环系统，达到本次研究的设计目的。

## 3　系统硬件设计

### 3.1　主控系统

本设计采用 STC12C5A60S2 单片机，其拥有 36 个 I/O 口，并且配有 2 路 PWM 输出、8 路 10 位 ADC 模数转换。每个 I/O 有弱上拉、强上拉、高阻、开漏等 4 种模式可供选择，其内置上电复位电路，具有抗静电、抗干扰、低功耗、低成本等各种优点。单片机最小系统如图 3 所示。

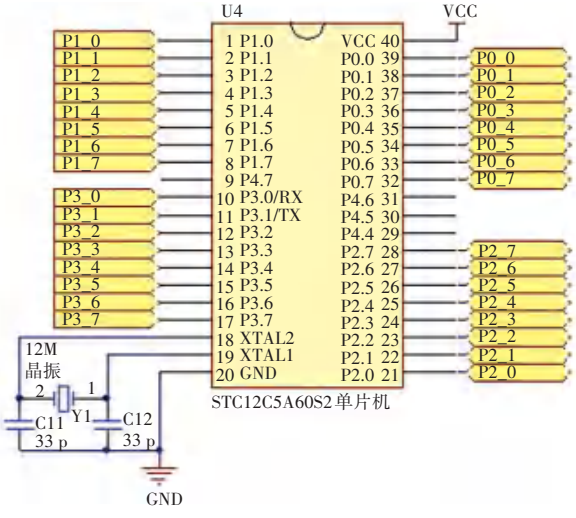


图 3　单片机最小系统

Fig. 3　Minimum system of single chip microcomputer

### 3.2　单片机电源电路

电源提供的电压为 30 多伏，而信号处理芯片、MOS 管、单片机等都需要 12 V 和 5 V 供电。故电路利用 LM7812 将电源电压降为 12 V，再由 LM7805 降为 5 V[3]。为防止 7812 稳压管被烧坏，在 7812 接入电源时接入 2 个稳压二极管，每个稳压管管降为 5.1 V，10.2 V 的电压降不会导致稳压管正向电流过大而被烧坏。该电路主要是将电源电压降为5 V，可供单片机使用。电源降压电路设计即如图 4 所示。

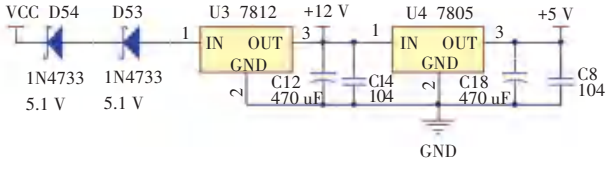


图 4　电源降压电路

Fig. 4　Power supply step-down circuit

### 3.3　H 桥 MOS 管与显示屏的选择

整流桥中使用的场效应管选为 IFR540，其电压范围为 2.0~4.0 V，在场效应管导通的情况下可控电压为±20 V。特别指出的是，使用时应该注意最大电压不可超过规定范围。

考虑到显示器设计的显示内容较为简单，而 LCD1602 有着操作便捷、显示电路技术较为成熟，且驱动电压较小等多方面优点，故而研究中的显示屏选择了 LCD1602。

### 3.4　按键电路

单片机通过检测按键来控制调整输出电流的频率，非编码式按键命令响应快，接口简洁。3 个按键可根据实际需求与单片机的 3 个 IO 口对应来实现相应的功能。本次研究中的电路设计如图 5 所示。

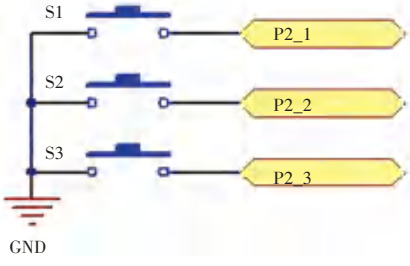


图 5　按键电路

Fig. 5　Button circuit

### 3.5　逆变电路

在逆变电路中，H 桥中的 4 个 MOS 管、2 对对角管轮流导通，可使输入的直流电在通过 H 全桥后变为方波。单片机通过调制 PWM 来控制 IR2104 半桥驱动器对 MOS 的开关时间（频率），MOS 管的开关越快，最后输出的 SPWM 脉冲调制波形的频率越大。可用外接按键来加减频率的大小。当 Q1、Q4 闭合，Q2、Q3 断开，$Up2 = Uin$；当 Q2、Q3 闭合，Q1、Q4 断开，$Up2 = -Uin$，当以频率 $fs$ 交替切换开关 Q1、Q4 和 Q2 、Q3 时，则在负载上获得交变电压波形（正负交替的方波），其周期 $Ts = 1/fs$，这样，就将直流电压变成了交流电压。交流电压含有各次谐波，若要得到正弦波电压，则可通过滤波器滤波获得。在这里，选用 MOS 管做桥，是因为这种设计相对于二极管会更加稳定[4]。逆变电路如图 6 所示。

### 3.6　桥式整流滤波

利用二极管的单向导电性，桥式整流将交流电压转为正轴半波电压，再通过滤波器后，电压变得平缓，基本接近直流电压。桥式整流滤波电路的设计则如图 7 所示。

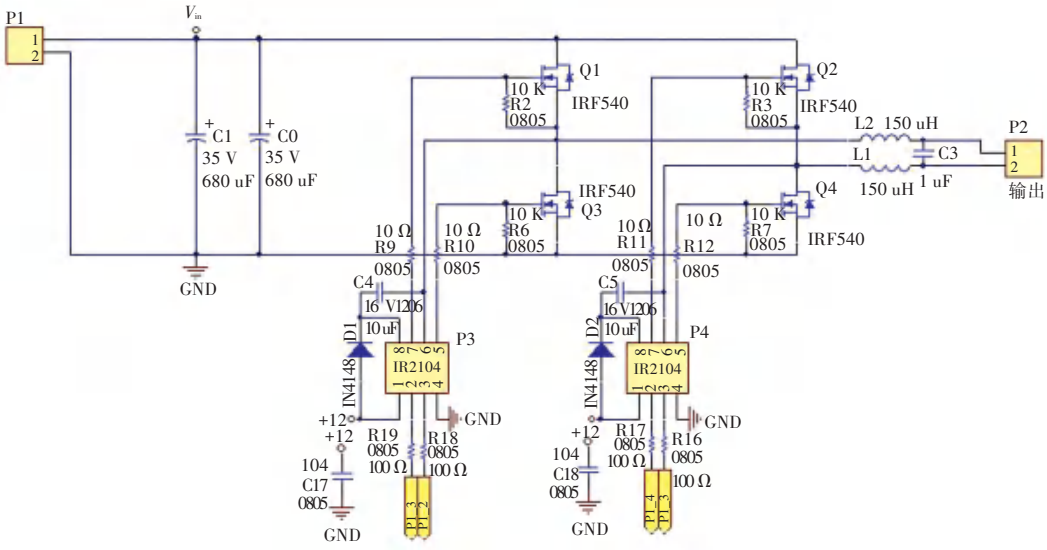


图 6 逆变电路

Fig. 6 Inverter circuit

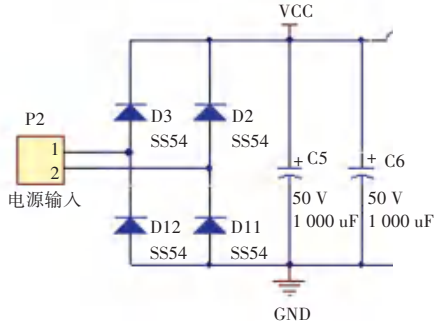


图 7 桥式整流滤波电路

Fig. 7 Bridge rectifier filter circuit

## 3.7 BOOST 升压电路

电感 L1 两边的电流不能发生突变，当 Q1、Q2 关闭时，输出端电压即为整流后的直流电压；当 Q1 开关闭合，Q2 断开，电感右侧电压就会降低，电容放电形成小电流，电感阻止电流减小，使向右方向电流增大，随之电压增大；当 Q1 断开，Q2 闭合，由于电感的电流保持特性，流经电感的电流不会马上变为 0，而是缓慢地由充电完毕时的值变为 0。而原来的电路已断开，故而电感只能通过新电路放电，即电感开始给电容充电，电容两端电压升高，此时电压已经高于输入电压了[1]。本次设计中，BOOST 升压电路如图 8 所示。

## 3.8 连接器

为了使得逆变部分和能量反馈部分互不干扰，使用变压器将 2 部分相连接，本设计中采用的变压器耗能为 1 W，利用已有的 220 V-双 24 V 的变压器进行设计改造，即拆开中间抽头，各分出 2 条线，接入到逆变部分的输出和能量反馈部分的输入，使得相互之间做到了电气隔离。

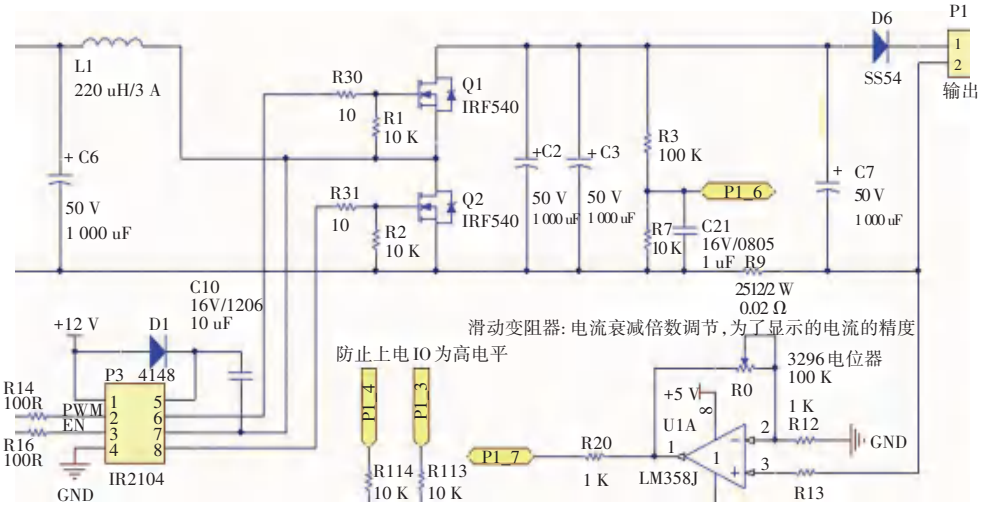


图 8 BOOST 升压电路

Fig. 8 BOOST circuit

## 4　系统软件设计

### 4.1　变流器 1 程序框图

初始化，扫描键盘是否被按下，根据按键增加或减小进行 SPWM 频率调制，继而输出正弦波，再次返回进行扫描。逆变部分程序框图设计如图 9 所示。

### 4.2　变流器 2 程序框图

初始化，扫描检测电路的电压大小信息，单片机自身进行 A/D 转换，此后辅以 PWM 调制，继而输出直流电压，再次返回进行扫描，形成反馈回路。能量反馈部分程序框图如图 10 所示。

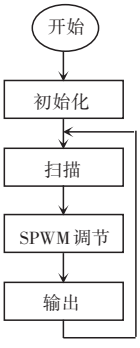


图 9　逆变部分程序框图

Fig. 9　Block diagram of inverter part

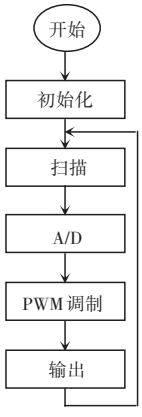


图 10　能量反馈程序框图

Fig. 10　Energy feedback program block diagram

## 5　系统测试

经测量 DC-AC 转换电路输出的单相正弦交流电为：$U$ = 25.08 V，$I$ = 2 A，$f$ = 50 Hz；按下频率按键，频率在 18～100 Hz 变化时，DC-AC 转换电路的输出范围为：$U$ = 25 V±0.25 V，$I$ = 2 A±0.03 A；电源输出频率为：$Pd = UI$ = 0.28 A * 35 V = 9.8 W；馈能系统的功率为 50 W，故可求得系统转换效率为：(50-9.8)/50 * 100% = 80.4%。

电流曲线图如图 11 所示。按 BOOST 电源板上的电流加减键，测量 DC-AC 转换板输出端电流 A2 见表 1。

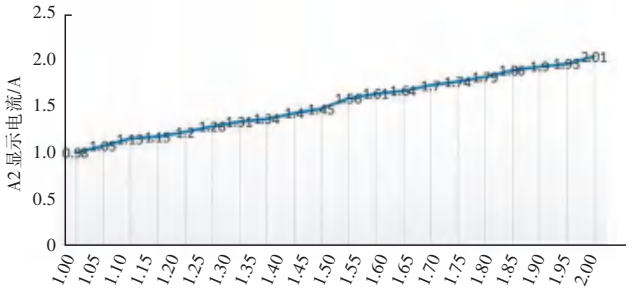


图 11　电流曲线图

Fig. 11　Current curve

表 1　输出端电流

Tab. 1　Output current　　/A

| 按键设定电流 | 1.00 | 1.05 | 1.10 | 1.15 | 1.20 | 1.25 | 1.30 | 1.35 | 1.40 | 1.45 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A2 显示电流 | 0.98 | 1.05 | 1.13 | 1.15 | 1.20 | 1.26 | 1.31 | 1.34 | 1.40 | 1.45 |
| 按键设定电流 | 1.55 | 1.60 | 1.65 | 1.70 | 1.75 | 1.80 | 1.85 | 1.90 | 1.95 | 2.00 |
| A2 显示电流 | 1.56 | 1.61 | 1.64 | 1.70 | 1.74 | 1.79 | 1.86 | 1.90 | 1.93 | 2.01 |

## 6　结束语

本文全面研究了 BOOST 升压电路和正弦波逆变器的基本结构、驱动原理以及软硬件的设计实现。对于采用 STC12C5A60S2 单片机为主控芯片的正弦波逆变器，其电路硬件结构简单，功能较为完善。本文的系统设计主要实现了如下功能：

(1)通过按键可设定电路输出的工作方式，调整输出频率、电流等。

(2)采用单片机作为主控芯片增强了整个系统的智能控制性。

(3)程序采用模块化设计，为二次开发提供了便利条件。

(4)馈能装置将电源功率降到了理想指标，甚至超过了预估要求。

虽然如此，本系统仍亟待后续改进，用以提高系统的稳定性和实用性。未来的工作重点可表述为：

(1)场效应管轻微发热，主要是采用 LOD 供电所致，后期可改为开关电源供电。

(2)PCB 板是在实验室里自制的，稳定性差，后期可改为网上打样。

(3)逆变装置可换为闭设计。

(4)BOOST 升压电路的输入部分可采用 APFC 设计，可以提高供电质量，降低线路损耗。

(下转第 231 页)