

高功率因数电源

指导教师：王归新

队员及年级：陶鑫（2006 级）、吴小斐（2006 级）、莫显聪（2006 级）

学校及院系：三峡大学电气信息学院

摘要：该系统采用 TI 公司专用 APFC 整流控制芯片 UCC28019 作为控制核心，构成电压外环和电流内环的双环控制，构建了有源功率因数校正（APFC）的高功率因数整流电源。其中，电流内环作用是使网侧交流输入电流跟踪电网电压的波形与相位；电压外环为输出直流电压控制环，外环电压调节器的输出控制内环电流调节器的增益，使输出直流电压稳定。系统采用 ATmega16 单片机进行监控，完成输出电压的可调以及相关测量参数显示功能，系统通过 ATmega16 单片机以及其外围器件实现系统功率因数、输出电压、电流的实时测量、人机交互、输出过流保护等功能。实际测试表明，采用 UCC28019 作为本系统的 APFC 芯片完全达到或超过题目要求的所有指标。

关键词：APFC，UCC28019，过流保护，功率因数

Abstract (English): Our work is a high power factor commutated power with the function of Active Power Factor Correction. The special APFC commutated control chip UCC28019 is the core of this system, and the regulation is accomplished in two loops: The inner current loop shapes the AC input current to match waveform and phase of the sinusoidal AC input voltage; The outer voltage loop regulates the output DC voltage which determines the internal gain parameters for maintaining a final steady-state output DC voltage. The MCU ATmega16 is designed to realize adjustable output voltage and show the sensed parameters. Our system also has functions of Over-current Protection, Human-computer Interaction, the real time sense of the output voltage, current and the power factor by using Atmega16 and its external components. According to the actual experience, the system exactly or even surpass all the goals required by the theme by using UCC28019 as the APFC chip.

Keyword: PFC, UCC28019, Over-current Protection, Power Factor

一、方案设计

1.1 总体方案设计

根据题目要求，隔离变压器输出工频电压有效值为 $18 \pm 3V$ ，经桥式整流滤波后得到直流电压约为 $18 \sim 26V$ ，要求输出电压范围在 $30 \sim 36$ 之间稳定可调，主电路为 BOOST 电路，校正控制部分采用 PFC 芯片 UCC28019。由此可得，低压工频电先经过一个 EMI 网络，再进行全桥整流，通过有源功率因数校正器，使得功率因数得到校正，输出电压得到稳定。单片机采样系统输入电流、电压，实现功率因数的检测；通过霍尔和电阻采样网络分别采集输出电流信号和电压信号送到单片

机,实现输出电流、电压的检测。题目要求设计为输出电压可调,本系统中由 PS2 键盘设定输出值,然后通过改变电压环反馈的指令电平来改变输出直流电压。一般设计中采用 DA 给定指令电平,但本系统采用单片机输出 PWM,经过二次滤波得到直流分量,从而得到指令电平,即由 PWM 占空比控制输出直流电压。在系统调试过程中发现此方案完全可靠,并且稳定精确,完全可以实现电压的稳定可调输出。单片机在检测到输出电流超过 2.5A 时,发出指令电平对 UCC28019 进行封锁并通过继电器断开主电路,当电路重新启动后检测到输出电流正常时,电路恢复完成过流保护。液晶用来显示被检测量的值和一些关键参数,辅助系统调试。

1.2 TI 芯片的选择

1.2.1 APFC 主控芯片的选择

鉴于设计要求,为了有效的减少高次谐波,提高功率因数,本设计采用 TI 公司新开发的专用 APFC 芯片 UCC28019。此芯片振荡频率由内部固定为 65KHZ,这样可以有效的避免外界的干扰,提高振荡频率的稳定性。该芯片输出 PWM 波最大占空比为 97%,8 脚灌电流(峰值电流)为 2.0A,拉电流(峰值电流)为 1.5A,输出电压最大为 12.5V,可直接驱动 MOSEFT。另外,该芯片还具有输入过流、输入过压、欠压等多种保护功能,用在 BOOST 电路中能很好地进行有源功率因数校正,被校正电路功率因数趋近于 1,完全满足系统设计的要求。

1.2.2 TLC372 的选择

鉴于题目要求及本电路的特点,为了计算方便,测量功率因数可以通过测量输入电流和输入电压的相位差(设为 φ),再取 $\cos\varphi$,即为功率因数。输入电流、电压信号经波形转换器得到方波信号,单片机可以通过检测两方波信号的上升沿的时间差,从而得到输入电流和输入电压的相位差 φ 。本设计中比较器采用 TI 公司生产的 TLC372 作为波形转换器的核心。TLC372 工作电压范围广,功耗低,高输入阻抗,响应速度快,驱动能力强。在实际应用中,该芯片完全满足题目要求,我们真正体会到了它优良的性能。

1.3 控制方案分析及实现方案

主电路的输出直流电压信号 V_o 和基准电压 V_r 比较后,送入电压误差放大器 VEA,得到 VCOMP 引脚电压该电压决定了 GMI 网络的增益和 PWM 比较器的参考三角波的斜率。输入电流经采样电阻转化为电压信号,电压信号经放大器放大送入 GMI 网络以实现输入平均电流的采样,得到的信号与三角波进行比较得到特定占空比的 PWM 波。特定占空比的 PWM 波保持输出电压稳定。

UCC28019 的控制框图如图 1:

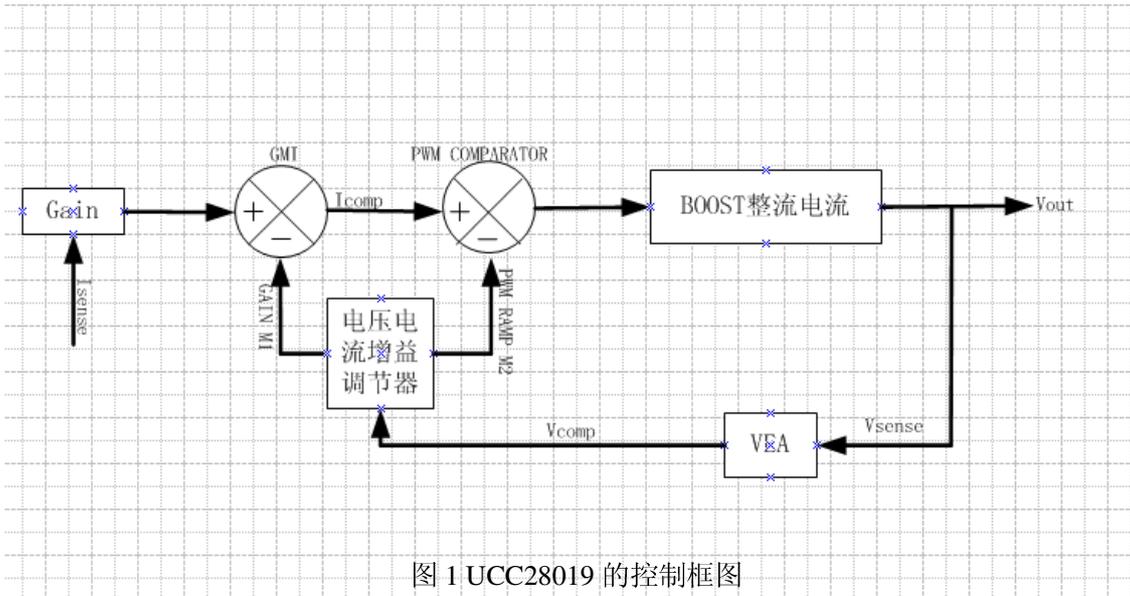


图 1 UCC28019 的控制框图

二、系统实现

2.1. 系统框图如图 2 所示

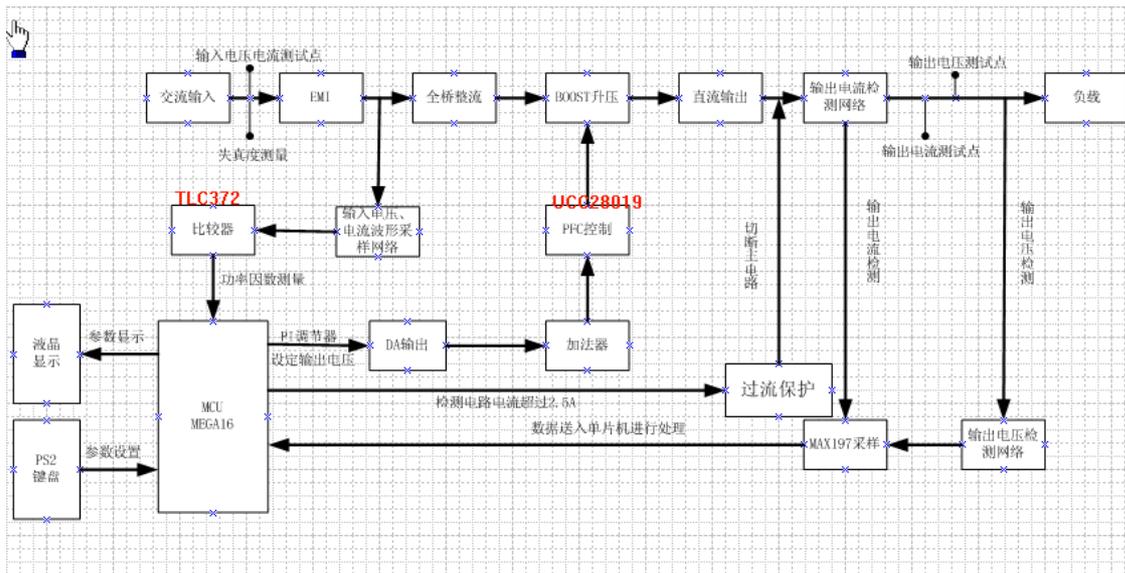


图 2 系统结构框图

2.2 主回路器件的选择及参数计算

2.1.1 开关管的选择

在本设计中，最大输出电压为 36V，开关管最大实际漏源电流为 5.75A，但是考虑到实际电压电流尖峰和冲击，电压电流耐量分别取 2.5 和 2 倍裕量故开关管的最大耐压应大于 90v，最大导通电流应大于 12A。基于上述要求，本设计采用 $V_{ds}=200V$, $I_d=30A$, $R_{ds}=85m\Omega$ 的 MOSEFT 管 IRF250. 这完全满足设计要求。

2.1.2 续流二极管的选择

由于本电路采用 BOOST 拓扑结构，因此续流二极管的选择非常重要。在电路中受输出大电容的影响，续流二极管应满足最大整流电流大于 12A，最大反向电压大于 72V，受储能电感及开关管的影响，续流二极管的反向恢复时间要尽量小。鉴于此要求，本设计采用 MOSEFT 中的反向快恢复二极管作为续流二极管，它的反向恢复时间完全达到设计要求，实际使用效果不错。

2.1.3 电感的参数计算：

本电路采用 BOOST 拓扑结构，BOOST 电路工作在电流连续工作模式（CCM）。根据 BOOST 电路输出电压表达式，可得 PWM

$$D = 1 - \frac{V_I}{V_O} \quad (1-1)$$

最大占空比 D_{max} 发生在输入直流电压最低（18V）而输出直流电压最高（36V）的时候，最小占空比 D_{min} 发生在输入直流电压最高（26V）而输出直流电压最低（30V）的时候，则根据电流临界连续条件求得电感值为

$$L \geq V_{OUT} \times D \times \frac{1-D}{f_{SW(1\%)} \times I_{RIPPLE}} = \frac{36 \times 0.5 \times 0.5}{65kHz \times 0.2 \times 7.618} = 90.85\mu H \quad (1-2)$$

实际储能电感采用 108uH.其中， $f_{SW(1\%)}$ 为芯片的振荡频率， I_{RIPPLE} 为纹波电流， V_{OUT} 为最大输出电压。

2.1.4 输入滤波电容的参数计算：

根据 BOOST 电路的工作特点，输入电容的作用为滤除由储能电感、整流电路产生的高次谐波，则有

$$C_{in} = \frac{I_{RIPPLE}}{8 \times f_{sw} \times V_{in_RIPPLE(max)}} = \frac{0.2 \times 7.618}{8 \times 65kHz \times 0.06 \times \sqrt{2} \times 15} = 2.302\mu F \quad (1-3)$$

实际采用 2.2uF. 其中， f_{sw} 为 UCC28019 的振荡频率， $V_{in_RIPPLE(max)}$ 输入纹波电压， I_{RIPPLE} 为输入峰值电流。

2.1.5 输出电容的参数计算：

考虑到负载电流可能达到 3A，滤波电容计算如下：

$$C_{OUT(min)} = 2 \times P_{OUT} \times \frac{t_{HOLDUP}}{V_{OUT}^2 - V_{OUT_HOLDUP(min)}^2} = \frac{2 \times 72W \times 20ms}{36^2 - 30^2} = 7272.7\mu F \quad (1-4)$$

实际采用 8000uF. 其中， p_{OUT} 为最大输出功率， V_{OUT} 为最大输出电压， $V_{OUT_HOLDUP(min)}$ 为最低输出电压， t_{HOLD} 为交流电的周期。

2.1.6 电流取样电阻的参数计算：

根据输入直流检测信号送到 PFC 芯片的 ISENSE 脚，则取样电阻计算公式

$$R_{SENSE} = \frac{V_{SOC}}{I_{L_{PEAK(max)}} \times 1.25} = \frac{0.66V}{8.3798 \times 1.25} = 0.063\Omega \quad (1-5)$$

实际采用康铜丝做采样电阻，阻值为 0.055Ω 。其中， $I_{L_{PEAK(max)}}$ 为电感的峰值电流， V_{SOC} 为 VSENSE 脚的最低正常工作电压。

2.1.7 UCC28019 其它外围器件参数的计算：

$$C_{ICOMP} = \frac{gmiM_1}{K \times 2\pi \times f_{IAVG}} = 910pF$$

实际采用 $1000pF$ ，其它器件选用如下：

$$C_{vins} = 0.47\mu F \quad C_{vcomp} = 4.7\mu F \quad R_{vcomp} = 36k \quad C_{vcom_p} = 0.22\mu F$$

其主电路电路图如图 3 所示

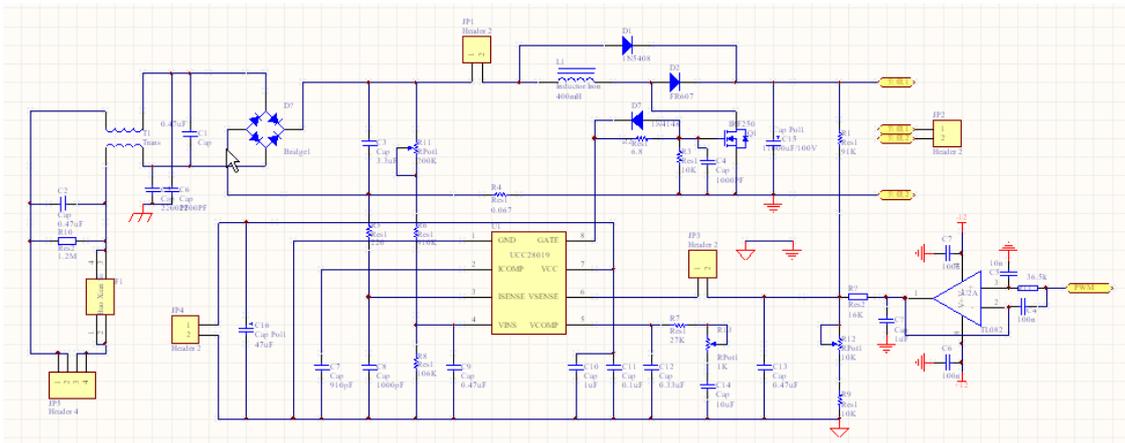


图 3 主电路电路图

2.3 检测与保护电路的设计与参数计算

2.3.1 输入电压、电流检测电路设计：

对输入电流、电压进行采样，是为了计算两个信号之间的相差，进而求得功率因素，对检测到两个信号的波形要求很高，故我们在输入检测电路中通过高精度的电流互感器 TR2123C 和电压互感器 TUS1980-02 分别对输入电流、电压信号进行比较，输出信号送到比较器进行比较得到具有相位差的两个方波送入单片机进行处理最终得到功率因数的测量值和信号频率。与霍尔传感器和光耦检测相比，该方案电路制作简单，要求成本较低。有关电路图详见附录。

2.3.2 输出电压、电流检测电路设计：

输出测量电路要求能够在一定精度范围内检测到输出电压、电流值。为了满足题目中所给的精度要求，用精密霍尔传感器 HS-20A-P 对输出电流进行采样和输

出电压则直接用电阻分压网络进行采样取得。有关电路图详见附录。

2.3.3 输出过流保护电路的设计:

系统要求有过流保护功能,输出电流为 2.5A 时电路自动保护。鉴于此要求,采用 UCC28019 芯片内部的封锁功能,由单片机检测过流并控制芯片引脚 ICOMP 的电平,但考虑到这样的封锁对象仅仅限于 UCC28019 本身,电路的输出电压依然为整流后的 25V 左右的电压,依然可能存在大电流,对整个系统有很大的潜在威胁。因而,本系统在主电路中加入继电保护,当单片机检测输出过流时,将发出指令电平通过继电器来切断主回路,达到保护负载的功能。经实际测试,当单片机再次检测输出电流正常时,释放电平,电路可重新恢复。

2.3.4 辅助电源的设计

辅助电源对整个系统的工作十分重要,本系统采用三端稳压芯片设计。电路设计简单,三端稳压构成的线性电源纹波小,输出电压稳定,抗干扰能力强。辅助电源输出+12V, ±15V, 5V

2.4 数字设定及显示电路设计

本系统中的人机接口包括键盘和液晶显示器。考虑到题目要求输出电压进行键盘设定和步进调整,需要大量按键(如 0~9 数字键, +、- 键, 取消、确认键等), PS2 键盘的小键盘区刚好满足此要求, 又 PS2 键盘通过 PS2 协议与单片机进行串行通信, 接口简单, 易于实现, 因此采用 PS2 键盘作为系统输入设备。题目又要求能显示输出电压、电流的测量值等系统信息, 为了更好的美化显示界面, 采用控制器为 RA8803 的 240×128 带国标字库液晶显示器。液晶显示器通过并行数据总线与单片机进行通信。具体接口电路请参见附录中相关部分。

2.5 PCB 设计技巧

在本系统的 PCB 板制作中,对 UCC28019 芯片周围元器件的布局及布线尤其重要。元器件应尽量靠近 PFC 芯片,由芯片各引脚上电容的地线所形成的总信号地应集中在芯片的正下方。另外,信号地与主电路的地线应在开关管的射极连接。这样就可以避免大电流地(主地)和小电流地(信号地)冲撞在一起,以至引起对芯片工作的影响。

三、 软件设计

3.1 软件设计及流程图

软件部分采用 ATMEL 公司生产的 AVR 系列单片机 ATmega16 作为主控芯片,对硬件电路的相关参数进行测量同时参与输出电压的调节,实现数控可调电压输出。对于功率因素等相关参数的测量,我们采用霍尔和互感器为主要检测器件的硬件检测电路得到相关数据通过 AD 送入单片机进行软件算法处理最终得到想要的数

据送到液晶显示;对于实现输出电压可调,我们通过键盘设置给定值,经单片机

输出 PWM 波后二次滤波转化为最终的给定模拟量，再将模拟量送到电压环的外接器，实现输出电压稳定可调。系统软件流程图如下（图 4）所示

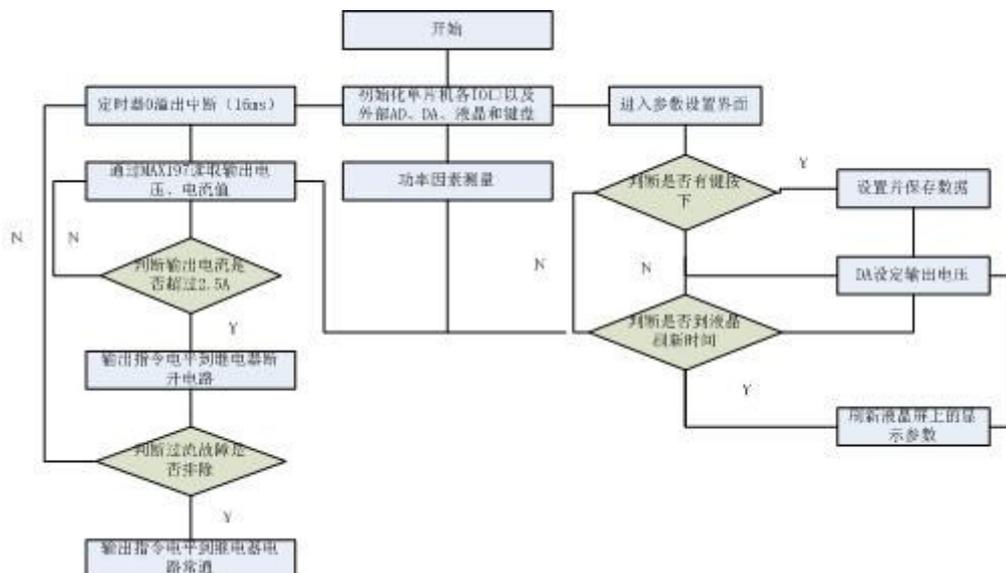


图 4 系统软件流程图

3.2 编程感想及软件设计注意事项。

根据题目设计要求设计的软件部分难度较其他设计题目而言相对简单，主要设计到的内容是人机交互界面的设置和一些外部参数的测量，没有相当复杂的算法。比赛的过程中花费在软件设计的时间不应该太多，否则在有限的时间内整个作品很难达到预期的理想效果。我觉得平时在训练的过程中应该做好相关模块的准备，到比赛过程中才会有更多的时间去进行系统调试与优化，提高作品整体的设计水平。

四、系统测试

4.1. 测试仪器：

| | |
|------------------|-------------------|
| TDS1002 双通道示波器×1 | MS8215 万用表×4 |
| UT805 万用表×1 | GAD-201G 失真度分析仪×1 |
| FLUKE318 电流钳形表×1 | |

4.2. 测试方案及数据

4.2.1 电压调整率测试

采用 100 Ω/3A 可调滑线变阻器作负载，待系统进入额定状态（输出电流为 1.2A）时，改变输入电压，用 UT88B 数字万用表监测输出负载电压。记录数据如下表 1 所示。

表 1 输出电压测试数据

| | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 输入电压(V) | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 |
| 输出电压(V) | 35.99 | 36.00 | 36.01 | 36.00 | 36.02 |

根据相关公式可计算出电压调整率：

$$S_U = \left| \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} \right| = \left| \frac{U_{o2} - U_{o1}}{19 - 15} \right| = \left| \frac{36.02 - 35.99}{4} \right| = 0.75\%$$

4.2.2 负载调整率测试

负载采用 100 Ω/3A 可调滑线变阻器，待系统进入额定状态（输入电压保持恒定 18V 不变）时，调节滑线变阻器，改变输出电流，用 UT88B 数字万用表监测输出负载电压。具体数据参见表 2

表 2 输出电压测试数据

| | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|
| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 输出电流(A) | 0.5 | 1 | 1.5 | 2 |
| 输出电压(V) | 36.00 | 35.90 | 35.78 | 35.69 |

由上表可根据以下公式求得负载调整率：

$$S_I = \left| \frac{\Delta U_o}{U_o} \right| = \left| \frac{U_{o2} - U_{o1}}{36} \right| = \left| \frac{36.00 - 35.69}{36} \right| = 0.86\%$$

4.2.3 输出电压可调测试

输出电压可调测试方案：采用 100 Ω/3A 可调滑线变阻器作负载，待系统进入额定状态，输入电压保持恒定 18V 不变（输出初始电流设定为 2A）时，用 UT88B 数字万用表监测负载电压。通过键盘输入设定电压，具体数据记录在表 3 设定电压栏。按确认键后读出数字万用表显示的电压，具体数据参见表 3）。

表 3 输出电压可调测试数据（输出电流为 2A）

| | | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 设定电压 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 |
| 实际电压 | 30.00 | 32.01 | 34.02 | 36.01 | 37.98 |

4.2.4 输入功率因数测试

负载采用 100 Ω/3A 可调滑线变阻器，使系统达到额定状态，输入电压和电流均为正弦波。在交流输入段串联一采样电阻，用示波器分别测系统输入电流电压波形，读出其相位差。根据本题的特点，可以用 U_2 、 I_2 之间相位差 φ 的余弦 $\cos\varphi$

作为功率因数。功率因数测试数据如表 4 所示。

表 4 功率因数测试数据

| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 功率因数 | 0.996 | 0.990 | 0.997 | 0.992 | 0.993 |

4.2.5 失真度测试

采用 $100\ \Omega/3\text{A}$ 可调滑线变阻器作负载，使系统达到额定状态，输入电流为正弦波。改变输入电压，用 GAD-201G 失真度分析仪检测失真度，记录数据于下表 5。

表 5 失真度测试数据

| 测试次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------|------|------|------|------|------|
| 失真度(%) | 5.5% | 5.3% | 6.0% | 5.8% | 5.4% |

4.2.6 过流保护动作电流测试

过流保护测试方案：用 UT88B 监视负载电流，负载采用 $100\ \Omega/3\text{A}$ 可调滑线变阻器，当输出电流为 2.5A 时，继电器和 PFC 主控芯片同时工作，低电路进行封锁，从而实现过流保护。过流时电流测试如下表 6 所示。

表 6 过流电流测试数据

| | | | |
|-------|-------|-------|-------|
| 输出电流值 | 2.48A | 2.51A | 2.49A |
| 能否自恢复 | 能 | 能 | 能 |

由表说明本系统过流保护作用明显，并可自恢复到正常状态。

五、结果及性能分析：

5.1 指标分析

经测试可知，本系统可达到以下性能指标：

- 电路中的功率因素高于 0.98，检测误差绝对值小于 2%。
- 输出电压通过 PS2 键盘设置在 28~38V 可调；
- 采用 12 位 AD 对输出电压电流进行检测，误差绝对值远小于 2%；
- 输出电流在大于 2.5A 实现自动保护；
- 变压器副边电流波形失真度小于 5%。

综合分析各项指标的测试结果并与设计指标进行比较发现，本系统的各项设计参数均能达到甚至超过设计指标，由于实验室市电电压本身存在 2%畸变，我们的失真度测试可达到 5%的设计指标。功率因数理论上可达 100%，但由于实际中 BOOST 电感在低频工作环境下仍然对电流波形有一定影响故测量中的功率因数不可能达到理论上的 100%。

5.2 误差分析

在测试过程中，我们发现实验室市电电压的失真度达到 2%，这直接导致我们所测的电流失真度偏高。另外，地线干扰以及信号线过长所带来的干扰对整个系

统都有一定的影响。

5.3 方案的优化与改进

电路工作时，交流电经桥式整流后并不能得到很平滑的波形，仍存在一定的误差。而 UCC28019 内部工作原理是：电流调节为平均电流采样模式，跟踪电压波形的电流波形经滤波放大后与三角波比较，所以整流后失真电压波形引起纹波误差，这个误差将导致输出 PWM 波误差。若芯片在设计上能将此误差考虑在内，设计效果会更好。

参考文献：

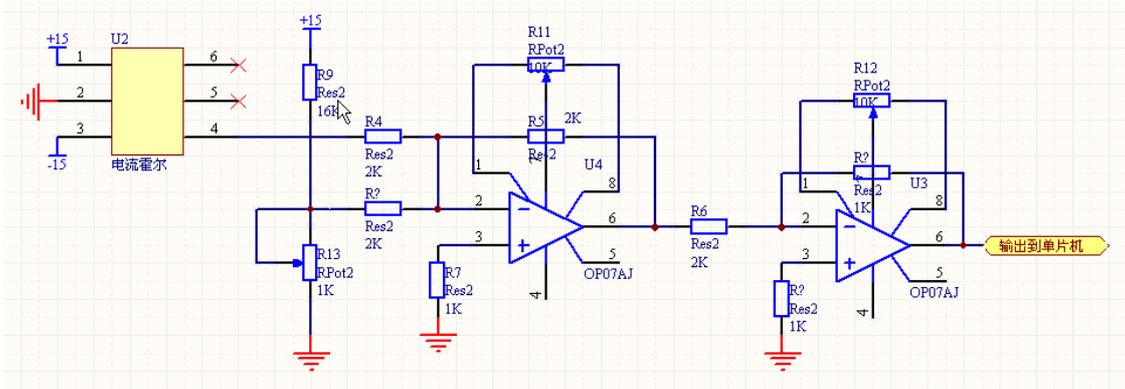
1. Marty Brown. 《开关电源设计指南》 [M]. 北京:机械工业出版社. 2004
2. 全国大学生电子设计竞赛组委会. [M]. 《第四届全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编 (1999)》. 北京:2001
3. 高吉祥等. 《全国大学生电子设计竞赛培训系列教程-模拟电子线路设计》. [M]. 北京:电子工业出版社. 2007
4. 施保华等编. 《计算机控制技术》. [M]. 武汉:华中科技大学出版社. 2007

附：部分电路原理图及软件源代码

附页

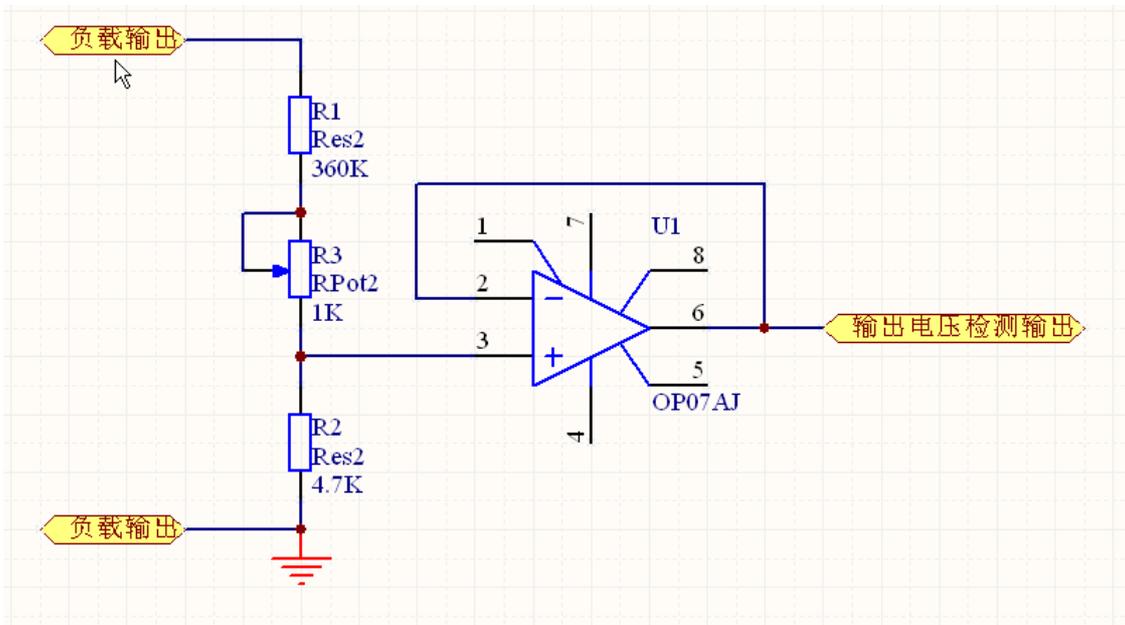
完整电路图

1. 输出电流检测



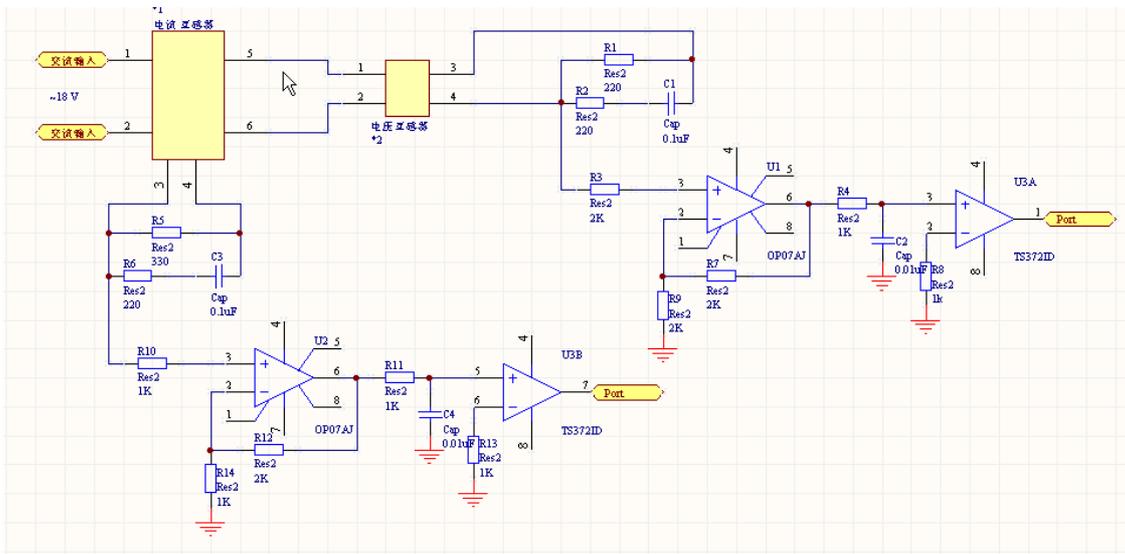
附图一 输出电流检测

2. 输出电压检测



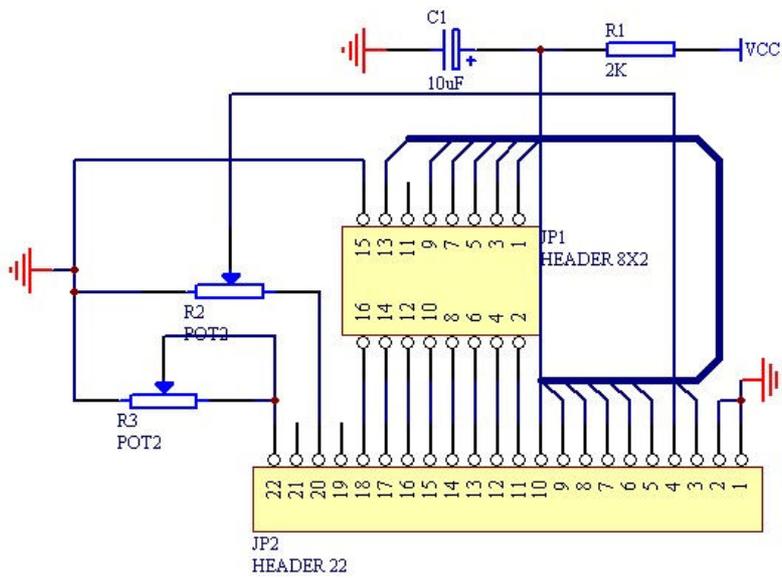
附图二 输出电压检测

3. 输入电流电压检测电路



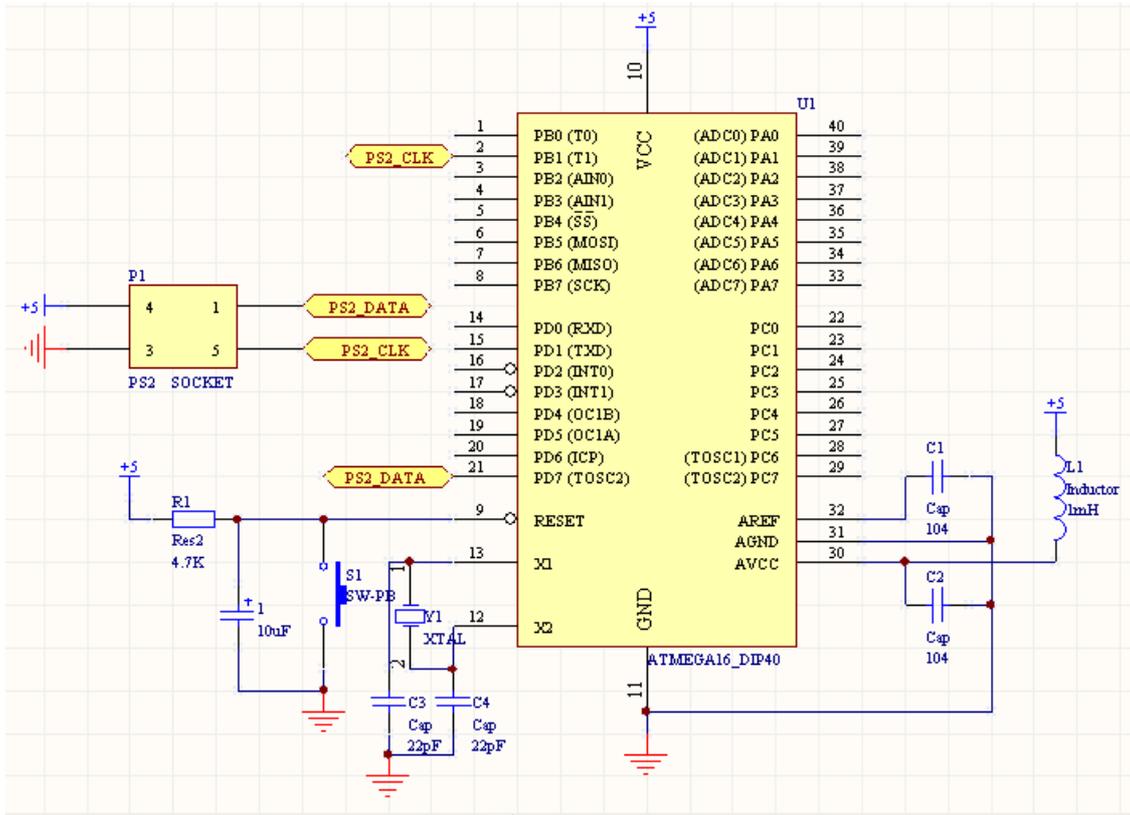
附图三 输入电流电压检测电路

4. 液晶显示器接口电路



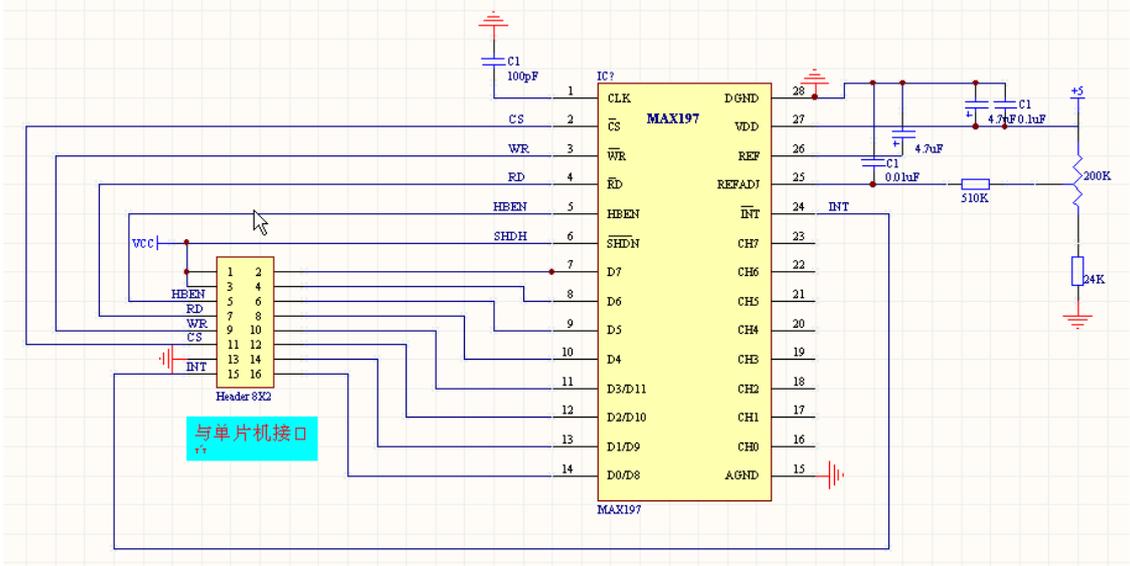
附图四 液晶显示器接口电路

5. 键盘接口电路



附图五 PS2 键盘接口电路

6. A/D



附图六 MAX197 (A/D 转换电路)

部分程序代码:

1. 测功率因数:

输入电压、电流接外部中断口和定时器输入捕捉口

```
unsigned ant phase_ftime(void)
{
    TIMSK=0x20;
    MCUCR|=0x03;
    MCUCSR|=0x00;

    #asm("sei");
    //当电压超前电流时
    while(PIND.6);
    while(!PIND.6);    //等待一个电压波形
    TCNT1=0;
    TIMSK=0x00;
    TCCR1A=0x00;
    TCCR1B=0xC2;
    GICR|=0x40;        //使能外部中断 0
    while(PIND.2);
    GICR&=0xBF;        //禁能外部中断 0, 得到中断时间即为相位差
    if(aa>5000|aa<=5)  aa=0; //时间差误差校正
    return aa;
}
```

```
float power_factor()
{
    float temp;
    TIMSK=0x20;
    MCUCR|=0x03; //外部中断 0 的上升沿触发使能
    MCUCSR|=0x00;

    #asm("sei");
    //当电流超前于电压时

    while(PIND.2);
```

```

while(!PIND. 2); //等待一个电流波形
TCNT1=0;
TIMSK=0x20; //输入捕捉中断使能
TCCR1A=0x00;
TCCR1B=0xC2; //上升沿输入捕捉、8分频 0.5us
//在电压波形出现上升沿进行捕捉,捕捉值即为相位差

while(PIND. 2);
TIMSK=0x00; //中断得到一个时间
if(bb==0) bb=phase_ftime()=
if(flag_cap==0 || bb>=5000)
    bb=0;
if(bb<=5) bb=0;
GICR|=0x40;
while(!PIND. 2);
delay_us(5);
GICR&=0xFB;
if(aa>40016 || aa<39960) aa=40000;//周期检测校正
// phase[0]=bb; //相位
// phase[1]=aa; //周期

zhouqi=aa/2000; //以 ms 为单位
temp=bb/aa;
temp=cos(temp);
// #asm("cli");
DDRD. 2=1;
PORTD. 2=0; //停止测量,复位外部中断口
return temp;

}

```

作品照片

