

单相 AC-DC 变换电路

作者：刘许洋 黄志召 吴嘉珉

辅导老师：钟洪声 崔红玲

摘要：采用 TI 公司的功率因数校正芯片 UCC28019 为核心，设计制作了 BOOST 有源功率因数校正电路，完成了 AC-DC 变换的功能，并且结合 STM32F103ZET6 单片机，设计制作了功率因数测量和调整电路，实际显示模块可以显示电路的功率因数和输出电压电流等功能。功率因数校正结果高达 0.99，完全符合功率因数校正的要求，并且测量的功率因数误差小。系统具有输出过流、欠压保护功能。整个系统实测稳定性高，达到了设计要求。

关键词：功率因数校正；AC-DC 变换；STM32F103ZET6；

Abstract: Based on the power factor corrector chip UCC28019 manufactured by TI corporation, an active power factor corrector circuit applying boost is designed. The circuit can finish converting from AC to DC power supply mode. Adopting the microcontroller STM32F103ZET6, the power factor measurement and adjustment functional circuit has also been made to meet the desired function, e.g. showing the power factor and the output voltage and current on the screen. The adjusted power factor is 0.99, which is very high and completely meet the requirement with small error obtained by measurement. The system has output over-current and under-voltage protection. The system is stable and can meet all the demands.

Key words : power factor corrector ; AC-DC conversion ; STM32F103ZET6;

一、方案设计和论证

1、AC-DC 电路的论证与选择

方案一：有源功率因数校正电路

利用专用功率因数校正芯片电路实现单相 AC-DC 电路。一般功率因数校正电路为 Boost 拓扑，该电路可以实现单相 AC-DC 变换，并且可以实现功率因数校正的要求，而且功率因数校正后，功率因数接近 1，该方案可以实现功率因数校正和 AC-DC 变换的要求，方案原理比较简单，而且电路简单，但是在输入交流电压接近 30V 的时候，由于该电路是 Boost 拓扑，不能达到让输出稳定在 36V 的要求，所以只能采用衰减输入电压的方法，但是会使得电路效率降低。有源功率因数校正电路基本原理图如图 1 所示。

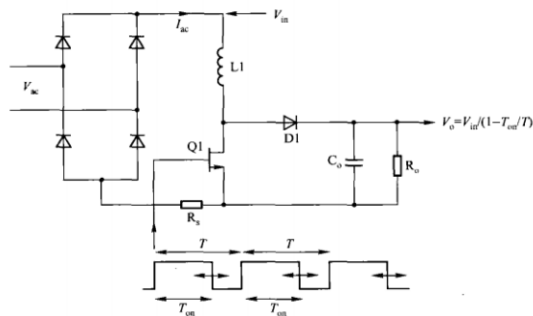


图 1 有源功率因数校正电路原理图

方案二：AC-DC 电路和有源功率因数校正电路并联或串联

分为两个拓扑，不同的输入电压对应不同的拓扑工作。检测输入电压，当输入电压低于 25.2V 的时候，有源 Boost 功率因数校正电路，该电路可以实现校正功率和稳定输出电压的要求。当输入电压高于 25.2 的时候，普通的 AC-DC 电路工作，该电路可以只要可以实现降压就可以满足稳定输出 36V 的要求。该电路可以实现题目的大部分要求，但是电路分为两个拓扑，需要切换，而且两个拓扑，制作和调试的压力都比较大，电路稳定性不高。

综合考虑以上两种方案，并且结合小组成员实际情况，选择方案一。

2、测量功率因数模块的论证和选择

方案一：FFT 算法

借助 FFT（快速傅里叶变换）原理，分析输入电流波形的谐波。基于数字信号处理中的采样定理，利用 STM32F103VET6 的内部高速 ADC，对输入电流进行跟踪采样，并对采样信号进行 FFT，分析信号的谐波信息，确定信号的功率因数。该测量方法主要借助于 FFT，硬件电路简单，并能准确地测量出功率因数。

方案二：有功功率比视在功率

利用有功功率比视在功率的方法可确定功率因数的大小。该功率因数测量电路应用两路高速 ADC 分别对输入电压、输入电流进行采样，在一定的周期内进行相应的积分运算。在时间控制上需严格设置，才能准确地测量一个周期的电压、电流信号，也就是说，两路高速 ADC 在控制上需要同时采样，要求很高，难以控制。

综合上述两种测量方案，可选择方案一，可准确而简单地实现功率因数的测量。

3、调整功率因数模块的论证和选择

方案一：调整电流和电压波形的相位

将电路中的电流信号通过变换，由单片机采集，然后输出跟该信号同频不同相的信号，再将该信号加入功率因数校正电路，这样功率因数校正的就是移相后的电流波形，从而导致电路中的电压波形和电流波形相位发生改变，从而改变功率因数。

方案二：在电流波形上叠加谐波

将电路中取样电阻上的电流信号和单片机产生的奇次谐波进行叠加，再将该信号送入校正芯片的电流采样端，干扰正常的校正信号，这样可以实现调整功率因数的目的。

分案分析和论证：功率因数计算公式： $PF = \cos(j)*g$ ， $\cos(j)$ 为基波电流波形和电压波形相位差的余弦值， g 为电流波形畸变因数，其表达式为

$$g = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 \dots}}$$

I_1 、 I_2 、 I_3 分别为电流基波的一次谐波、二次谐波、三次谐波。从功率因数的计算公式可以看出功率因素主要跟电压波形和电流波形的相位差以及电流波形的畸变因数有关，实际电路中电流波形和电压波形的相位一般都是相同的，功率因数的影响因素主要由电流波形畸变引起。调整电流波形和电压波形的相位差可以调整功率因数，但是前提是在电流波形失真非常小的情况下。综合考虑两种方案的优缺点，选择方案二。

二、电路设计和参数计算

1、主拓扑电路的参数计算

利用 UCC28019 功率因数校正芯片设计 AC-DC 变换电路，该芯片内部振荡频率固定为 65KHz，固定频率可以有效的避免外界的干扰，提高振荡器的稳定性。该芯片输出的 PWM 占空比最大为 97%，GATE 脚拉灌电流峰值分别为 1.5A 和 2A，输出最大电压为 12.5V，可以直接驱动功率 MOS，另外，该芯片内部具有输入过流、输入过压、欠压等保护，并且该芯片特别适合 Boost 功率因数校正电路，校正的功率因数接近于 1，完全满足题目功率因数校正大于 98%的要求。输出设计的 Boost 电路的参数计算如下：

(1) BOOST 电感的计算：

$$I_{L_PEAK(max)} = I_{IN_PEAK(max)} + \frac{I_{RIPPLE}}{2} = 6.985A + 1.397A / 2 = 7.683A$$

(2) 在最坏的情况下，占空比为 50%时计算电感的最小值：

$$L_{BST(min)} = \frac{V_{OUT}D(1-D)}{f_{SW(typ)}I_{RIPPLE}} = \frac{36V * 0.5(1-0.5)}{65KHz * 1.397A} = 99\mu H$$

实际考虑到过大电流的时候电感的感值会下降，因此实际绕制的电感为 240uH。

(3) 采样电阻的计算：

$$R_{SENCE} = \frac{V_{SOC}}{1.25 * I_{L_PEAK(max)}} = \frac{0.66V}{1.25 * 7.683A} = 0.068\Omega$$

实际取 $R_{SENSE} = 0.05\Omega$ ，采用 BWL 类型模压电阻，这种电阻分布电感小，对电路分布参数的影响小。

实际的有源 Boost 功率因数校正电路如图 2 所示：

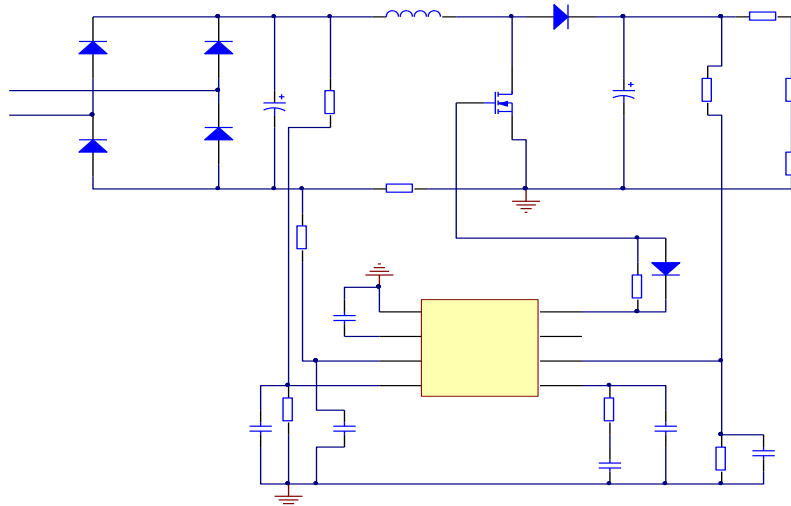


图 2：有源功率因数校正电路图

2、功率因数测量电路

单片机测量变压器输出的电流波形，该电流信号必须与变压器隔离，因此采用电流互感器取样。由于单片机的 AD 基准为正电压，因此采用信号必须为正值，所以实际的电流波形要叠加一个直流偏移量。另外需要对电流信号进行滤波处理。电路如图 3 所示。

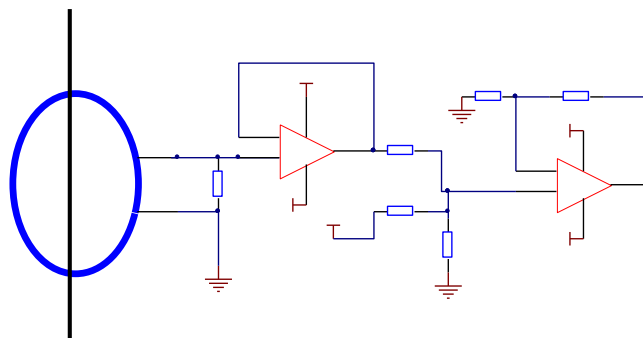


图 3：功率因数测量电路

3. 功率因数调整电路

功率因数调整电路采用在 UCC28019 的 3 脚叠加谐波，3 脚为 Isense 引脚，该引脚检测电路的电流波形，芯片内部通过处理，改变 PWM 波形，使电流波形跟踪电压波形，从而达到迫使电流波形和电压波形同频同相。但此时校正的波形是叠加了单片机 DA 输出谐波的电流波形，这个波形与实际电路中的电流波形不同，从而与电压波形也不同，这样即达到了调整功率因数的目的。实际调试过程中先用函数发生器输出波形来调试，找到可调点的频率和幅度，最终由单片机 DA 输出全波，实现了调整功率因数的目的。实际电路图如图 4 所示。

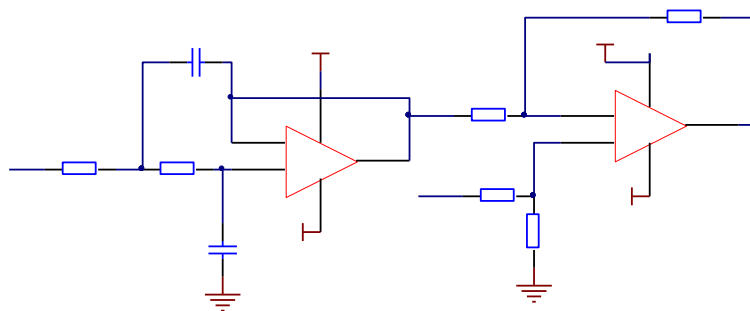


图 4 功率因数调整电路

4、过流保护电路

过流保护电路：输出电流采样采用霍尔传感器 ACS712-5A，ACS712 其只有 $1.2\text{m}\Omega$ 内部电阻，左侧大电流引脚（PIN1-4）与右侧低电压引脚（PIN5-8）最小绝缘电压为 2100V ，由于采样与测量分开，因此测量时不必担心共模电压的影响，适合高边采样。该电流检测芯片灵敏度高， $V_{\text{OUT}} = 2.5 + 0.185 \cdot I$ ，因此需要加后级放大，配合运放即可构成增益可调的电流检测电路，实际制作时调节到合适范围即可。

5、软件设计

系统的程序主要由两部分构成：主函数循环，中断服务程序。流程框图如图 5 所示。

系统主函数主要应用于人机交互，检测并显示系统各模块的参数，如功率因数、参数设定等。中断服务程序主要由定时器中断、ADC 中断和端口中断三部分组成。两个定时器 TIM6 和 TIM7 中断负责更新 ADC 采样数据和 DAC 输出波形；ADC 中断负责读取内存存放的测量值；端口中断用于键盘检测，设定功率因数。

由于系统采用了 FFT（快速傅里叶变换）测量功率因数，对程序设置要求极高，采样速度快。并且系统采用闭环微调功率因数，使得系统反应性高，控制精准。

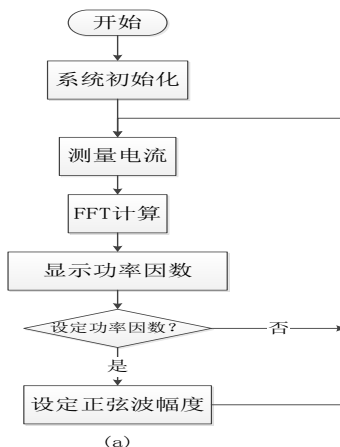


图 5 程序流程框图

三、测试方法和测试结果

1、基础部分

(1) 测试方法：调节负载电阻为 18Ω ，输入交流电压 24V，用电压表测量输出电压。测试结果如下表 1 所示：

输入电压/V	输出电压/V	输出电流/I	误差电压/V
24.0	36.02	2.020	0.02

表 1 额定功率输出测试结果

(2) 测试方法：固定输入交流电压 24V，调整负载电阻，使输出电流在 0.2A~2.0A 范围内变化，用五位半万用表测试输出电压。测试结果如表 2 所示：

输入电压/V	输出电流/A	输出电压/V
24.0	0.2	36.070
24.0	0.5	36.081
24.0	1.0	36.090
24.0	1.5	36.021
24.0	2	36.010

表 2 负载调整率测试表

(3) 测试方法：首先调整输出电流为 2A，固定输出电流不变，然后调整输入电压从 20V 到 30V 变化，测量输出电压。测试结果如表 3 所示：

输入电压/V	输出电压/V
20	36.07
30	36.01

表 3 电压调整率测试表

(4) 测试方法：调整输出到额定功率，观察测量电路显示的功率因数，记录单相电参数测量仪的功率因数。测试结果如表 4 所示：

显示 PF	实测 PF
0.998	0.997

表 4 功率因数测量电路测试表

(5) 测试方法：调整输入电压为 24V，固定输入电压，缓慢调整负载电阻，增大输出电流，记录系统关段的动作电流。测试结果如表 5 所示：

输入电压/V	输出电压/V	过流保护动作电流/A
24.0	36.03	2.497

表 5 过流保护测试表

2、发挥部分

(1) 测试方法：调整自耦变压器使输入电压为 24V，调整负载电阻使输出电流为 2A，输出电压为 36V。记录单相电参数测量仪显示的功率因数。

测试结果：在额定功率下，AC-DC 变换电路交流输入侧功率因数为 0.997。

(2) 测试方法：调整自耦变压器使输入电压为 24V，调整负载电阻使输出电流为 2A，输出电压为 36V。记录单相电参数测量仪显示的输入功率，用万用表测试输出电压和电流并记录。测试结果如表 6 所示：

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	效率/%
24.0	3.36	80.64	36.03	2.020	90.25

表 6 AC-DC 变换电路效率测试表

(3) 测试方法：通过按键设定功率因数，设定后等待 5s，待系统稳定后记录单相电参数测量仪的功率因数。测试结果如表 7 所示：

功率因数设定值	仪器测量值	作品测量值
0.800	0.811	0.823
0.850	0.842	0.843
0.900	0.904	0.912
0.950	0.964	0.966
0.990	0.997	0.997

表 7 调整功率因数测试表

四、讨论

本作品以功率因数校正芯片 UCC28019 以及 STM32F103ZET6 处理器为核心，采用有源功率因数校正 Boost 电路，实现了 AC-DC 变换电路的设计和功率因数校正的功能，利用在电流波形上叠加谐波的方法实现了调整功率因数的功能。AC-DC 变换电路在额定功率下的效率大于 90%，由于时间原因未能达到题目要求 95%的效率。