论文编码：TP39

首都师范大学
Capital Normal University

首都师范大学本科毕业设计论文

冗余并联开关电源系统设计
——硬件制作

The Design of Redundant Parallel Switching Power Supply System

论文作者_____
院　　系　信息工程学院
专　　业　电子信息工程
学　　号_____
指导老师_____

完成日期　2013 年 4 月 15 日

首都师范大学信息工程学院

摘　　要

开关电源是利用现代电子技术，控制开关管开通和关断的时间比率，维持稳定输出电压的一种电源，开关电源由脉冲宽度调制（PWM）控制 IC 和 MOSFET 构成。开关电源以小型、轻量和高效率的特点被广泛应用几乎所有的电子设备，是当今电子信息产业飞速发展不可缺少的一种电源方式。

目前，开关电源高频化是其发展的方向，高频化使开关电源小型化，灵活化，并使开关电源进入更广泛的应用领域，特别是在高新技术领域的应用。另外开关电源的发展与应用在节约能源及保护环境方面都具有重要的意义。

在开关电源模块化设计过程中采用单片机控制技术具有可靠性高、易于并联扩展，灵活性高等优点，是开关电源系统实现功率扩展和冗余设计的重要途径。目前，应用 N+m 型冗余并联结构的电源已成为提升供电能力和电源可靠性、降低成本的一项重要途径。

电源系统可由多个电源模块并联构成，所以重要的是要保证各并联的模块的负载均衡，本文重点分析了常用的并联均流控制方法工作原理和特点，对比各种均流控制方法的优劣，基于最大电流均流控制法之上，以集成开关降压稳压器 LM2678-adj 和 MSP430F 系列单片机为例，提出了一种应用于小功率设备的可变电压的冗余多模块并联电源设计方案，并制作了电源样机，通过各项实际测试结和软件仿真证明了此设计结构合理，性能良好，可实现多模块间均流控制并且通过备份模块的开启可保证电源系统的冗余度，满足实际应用的需要。

关键词：开关电源；均流控制；冗余系统；MCU；开关降压稳压器件

首都师范大学信息工程学院

Abstract

Switching power supply is used for provide stable voltage by modern electronic technology and switch time ratio of turn-on and turn-off. The switching power supply is consist of PWM control IC and MOSFET, it's famous for its characteristics of light weight and high efficiency and it be widely used in all electronic equipment, also it is indispensable to power mode under the today's electronic information industry.

At present, high-frequency switching power supply is the direction of its development, and high frequency, flexibility, miniaturization makes this technology can be used in wider range of applications, especially in high-tech fields. In addition, the development in switching power supply has a great significance in environment protection.

SCM control technology has became good choice in the process of switching power supply modular design, for its high reliability, easy to parallel extension, flexibility advantages. At present, the N+m type structure of parallel switching power supply has became a important way to improve power's reliability and reduce costs.

This paper analyzes principles and traits of parallel current sharing structure. Then a design of redundancy parallel current sharing structure is introduced, which is based on integrated buck chip LM2678-adj and microcontroller MSP430. The design has good fault-tolerant ability, and its output voltage can be adjusted easily. The capability and feasibility of this design has been verified by the simulation and experiment.

Key words: Switching Power Supply ; Current-sharing ; Redundant System ; MCU

首都师范大学信息工程学院

目　录

第一章 绪论 1
1.1 引言 1
1.2 开关电源的研究背景 1
1.3 研究意义 2
1.4 发展现状 3
1.5 论文的主要内容 3
第二章 开关电源理论 5
2.1 概述 5
2.2 PWM 调制原理 5
2.2.1 BUCK 降压型变换器结构 6
2.2.2 BOOST 型升压变换器结构 8
2.2.3 应用及分析 11
2.3 模块化的开关电源 12
2.3.1 传统及常用开关电源 12
2.3.2 单片集成开关电源器件 13
第三章 开关电源并联均流控制系统 14
3.1 常用并联均流技术分析及对比 14
3.1.1 主从模块均流法 16
3.1.2 平均电流均流控制法 17
3.1.3 热应力自动均流法 17
3.1.4 强迫均流法 18
3.1.5 最大电流均流法 19
3.2 冗余结构分析 21
3.2.1 电源模块的可靠性分析 21
3.2.2 备份模块数量的分析 22
3.2.3 冷备份与热备份 23
第四章 并联开关电源设计 24
4.1 集成开关稳压器件 24
4.2 电源电路元器件选择与参数计算 25
4.2.1 电感的选择与参数计算 25
4.2.2 外围元件选择与计算 27
4.2.3 电路设计要点及提高效率 29
4.3 基于最大电流均流控制法的并联设计 30
4.3.1 并联结构电源组成及样机技术指标 30
4.3.2 均流控制主回路设计 31
4.3.3 系统供电设计 34
4.4 冗余备份模块设计 36
4.4.1 2+1 备份结构 36
4.4.2 备份模块与故障模块的切换 37
4.5 整体电路结构及原理图与系统保护和效率提高 38
第五章 软件控制程序设计与样机实验结果评估 42
5.1 软件程序框图及设计流程 42
5.1.1 软件编译环境及工程配置 43
5.1.2 程序主要模块设计 45
5.1.3 电源整控制体结构框图 52
5.2 样机实验结果评估与比较 54

首都师范大学信息工程学院

5.2.1 输出电压测试与分析 54
5.2.2 均流控制测试与分析 54
5.2.3 故障/备份模块切换测试 55
5.2.4 电源连续/非连续工作状态分析 56
5.2.5 功率/效率测试与分析 58
5.2.6 结温工作点测试与分析 59
5.2.7 电路保护/损坏测试 60
5.3 结论与讨论 61
第六章 总结与设想 62
参考文献 64
本科期间发表论文 66
收获体验及致谢 67
附录 1 实验样机实物图 68

首都师范大学信息工程学院

第一章 绪论

1.1 引言

电源是任何电子系统的心脏，它的稳定与否直接关系着整体系统能否高效正常的运行，因此对于电源的设计在当今对功率有着更要要求的时代愈发显得重要，目前，高效率、高可靠、结构紧凑型式的电源设计一直是人们追求的目标，针对与工业生产，科研等领域采用集成开关电源模块实现稳压并通过并联供电增大功率的电源设计无疑是一种较好的设计选择，同时采用此种办法可以兼顾电源的冗余度。因为电源模块间相互独立工作，每一小部分只承担其中一部分的功率，而不是采用单一大功率的电源，在此种情况下，若其中任一模块出现故障，整个供电系统不会立即供电中断，其余的模块可分担由于故障模块所产生的功率输出缺失，而备用模块在微控制器（如单片机）的控制下可以迅速切入供电，恢复正常使用，这种电源的设计方式已经渗透到了很多领域。

1.2 开关电源的研究背景

开关电源是利用现代电力电子技术，控制开关管开通和关断的时间比率，维持不乱输出电压的一种电源，开关电源一般由脉冲宽度调制（PWM）控制 IC 和 MOSFET 构成。开关电源和线性电源比拟，二者的本钱都跟着输出功率的增加而增长，但二者增长速率各异。线性电源本钱在某一输出功率点上，反而高于开关电源，这一点称为本钱反转点。跟着电力电子技术的发展和立异，使得开关电源技术也在不断地立异，这一本钱反转点日益向低输出电力端移动，这为开关电源提供了广阔的发展空间。开关电源高频化是其发展的方向，高频化使开关电源小型化，并 使开关电源进入更广泛的应用领域，特别是在高新技术领域的应用，推动了高新技术产品的小型化、轻便化。另外开关电源的发展与应用在节约能源、节约资源及保护环境方面都具有重要的意义。开关电源中应用的电力电子器件主要为二极管、IGBT 和 MOSFET。作为开关电源尤其独立的特点，需要注意其三个特征如下：

1、开关：电力电子器件工作在开关状态而不是线性状态

2、高频：电力电子器件工作在高频而不是接近工频的低频

3、直流：开关电源输出的是直流而不是交流

关于开关电源与传统的线性电源相对比如下表 1.1 中所见：

首都师范大学信息工程学院

表 1 线性电源与开关电源对比

	线性稳压电源	开关电源
工作电压波形	正弦波	矩形波
调整管工作状态	线性放大	开关
稳压调整对象	三极管内阻 r_{ce}	脉冲宽度(T_{on})
效率	低 40～50 %	高 80～95 %
损耗	大	小
效率与电网电压	有关 ～220V ↑→η ↓	几乎无关
保护电路	加入困难、 不灵敏、可靠性差	易加入且灵敏、可靠
变压器	笨重的工频变压器、效率低 体积、重量、损耗大	轻巧求高频脉冲变压器 体积、重量、损耗小
滤波 电容器	由于工作频率低 需大容量电容	工作频率高 ,滤波电容 可以选得小(约 1/ 300)
输出直流纹波	小	大
适用于	低档设备 例:黑白电视机/ 单色显示器	高档设备 例:彩电、彩显

1.3 研究意义

人们在开关电源技术领域是边开发相关电力电子器件，边开发开关变频技术，两者相互促进推动着开关电源每年以超过两位数字的增长率向着轻、小、薄、低噪声、高可靠、抗干扰的方向发展。开关电源可分为 AC/DC 和 DC/DC 两大类，DC/DC 变换器现已实现模块化，且设计技术及出产工艺在海内外均已成熟和尺度化，并已得到用户的认可，但 AC/DC 的模块化，因其自身的特性使得在模块化的进程中，碰到较为复杂的技术和工艺制造瓶颈，目前还存在着较大的空白[1]。

因此，模块化是开关电源发展的总体趋势，可以采用模块化电源组成分布式电源系统，可以设计成 N+1 冗余电源系统，并实现并联方式的容量扩展。采用模块化设计的开关电源系统在某些应用中已取代集中式电源供电系统。随着微电子技术的发展和广泛应用以及新型半导体电力开关器件的不断涌现，开关电源的小型化、智能化、模块化设计成为可能。在传统的开关电源系统中，一般由单个电源组件为一个或多个电子设备提供电源，当电源发生故障或失效时，会影响整个设备或系统的正常工作。采用多个电源模块并联供电，使供电系统具有一定的冗余度，当供电系统中的一个或几个模块出现故障时，不会影响整个系统的正常工作，在系统工作的同时，可以维修、更换出现故障的电源模块，使系统的可靠性大大提高。因此，多个电源模块并联供电方式，可以增加电源的容量，提高供电的质

量和供电系统的可靠性。

1.4 发展现状

1955 年美国的科学家罗那(GH．Royer)首先研制成功了利用磁芯的饱和来进行自激振荡的晶体管直流变换器。此后，利用这一技术的各种形式的精益求精直流变换器不断地被研制和涌现出来，从而取代了早期采用的寿命短、可靠性差、转换效率低的旋转和机械振子式换流设备。由于晶体管直流变换器中的功率晶体管工作在开关状态，所以由此而制成的稳压电源输出的组数多、极性可变、效率高、体积小、重量轻，因而当时被广泛地应用于航天及军事电子设备。由于那时的微电子设备及技术十分落后，不能制作出耐压高、开关速度较高、功率较大的晶体管，所以这个时期的直流变换器只能采用低电压输入，并且此种变换器转换的速度也不能太高。60 年代，由于微电子技术的快速发展，高反压的晶体管出现了，应用于 DC／DC 的 PWM 功率变换技术出现了很大的发展口，直流变换器可以直接由市电经整流、滤波后输入，不再需要工频变压器降压了，从而极大地扩大了它的应用范围，并在此基础上诞生了无工频降压变压器的开关电源。省掉了工频变压器，又使开关稳压电源的体积和重量大为减小，开关稳压电源才真做到了效率高、体积小、重量轻。70 年代以后，与这种技术有关的高频，高反压的功率晶体管、高频电容、开关二极管、开关变压器的铁芯等元件也不断地研制和生产出来，使无工频变压器开关稳压电源得到了飞速的发展，并且被广泛地应用于电子计算机、通信、航天、彩色电视机等领域，从而使无工频变压器开关稳压电源成为各种电源的佼佼者。

1.5 论文的主要内容

1、开关电源理论基础，PMW 调制等。

2、并联开关电源的理论分析，及并联模块化电源的使用方法。

3、常见的保持负载均衡的均流控制方法介绍与分析选择。

4、本设计所采用的方法，以及基于集成稳压开关芯片的设计。

5、计算机软件仿真分析、冗余备份设计方法、焊接制作注意点。

6、分析实验结果，与仿真结果对、论文总结、提出今后设想。

本文介绍并分析了几种常用的并联均流控制方法的工作原理和基本特点，如主从均流控制法，平均电流均流控制法，最大电流均流控制法，强迫均流控制法，热力均流控制法等，分析了各并联均流控制方法的优缺点及适用范围，并给出了并联运行系统的基本电路和控制方法。

首都师范大学信息工程学院

在此基础之上利用集成降压稳压器件 LM2678—ADJ 结合最大的电流均流控制法，和冗余电源结构的设计。MSP430 单片机的作为状态监控设备和冗余备份模块开启的设备。设计了一种小型开关电源模块及其并联系统样机，给出了硬件电路设计方法及控制方法，并给出了电源模块样机的实验结果。

首都师范大学信息工程学院

第二章 开关电源理论

2.1 概述

脉冲宽度调制是一种模拟控制方式，其根据相应载荷的变化来调制晶体管栅极或基极的偏置，来实现开关稳压电源输出晶体管或晶体管导通时间的改变，这种方式能使电源的输出电压在工作条件变化时保持恒定，是利用微处理器的数字信号对模拟电路进行控制的一种非常有效的技术。

PWM 控制技术以其控制简单，灵活和动态响应好的优点而成为电力电子技术最广泛应用的控制方式，也是人们研究的热点。由于当今科学技术的发展已经没有了学科之间的界限，结合现代控制理论思想或实现无谐振软开关技术将会成为 PWM 控制技术发展的主要方向之一，随着电子技术的发展，出现了多种 PWM 技术，其中包括：相电压控制 PWM、脉宽 PWM 法、随机 PWM、SPWM 法、线电压控制 PWM 等，而在镍氢电池智能充电器中采用的脉宽 PWM 法，它是把每一脉冲宽度均相等的脉冲列作为 PWM 波形，通过改变脉冲列的周期可以调频，改变脉冲的宽度或占空比可以调压，采用适当控制方法即可使电压与频率协调变化。可以通过调整 PWM 的周期、PWM 的占空比而达到控制充电电流的目的。

2.2 PWM 调制原理

脉宽调制（PWM）基本原理：控制方式就是对逆变电路开关器件的通断进行控制，使输出端得到一系列幅值相等的脉冲，用这些脉冲来代替正弦波或所需要的波形。也就是在输出波形的半个周期中产生多个脉冲，使各脉冲的等值电压为正弦波形，所获得的输出平滑且谐波少。按一定的规则对各脉冲的宽度进行调制，即可改变逆变电路输出电压的大小，也可改变输出频率[2]。

在采样控制理论中有一个重要的结论，即冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上，其效果基本相同。冲量指的是窄脉冲的面积。这里所说的效果基本相同。是指该环节的输出响应波形基本相同。如把各输出波形用傅里叶变换分析，则它们的低频段特性非常接近，仅在高频段略有差异。根据上面理论我们就可以用不同宽度的矩形波来代替正弦波，通过对矩形波的控制来模拟输出不同频率的正弦波。例如，把正弦半波波形分成 N 等份，就可把正弦半波看成由 N 个彼此相连的脉冲所组成的波形。这些脉冲宽度相等，但幅值不等，且脉冲顶部不是水平直线，而是曲线，各脉冲的幅值按正弦规律变化。如果

首都师范大学信息工程学院

把上述脉冲序列用同样数量的等幅而不等宽的矩形脉冲序列代替，使矩形脉冲的中点和相应正弦等分的中点重合，且使矩形脉冲和相应正弦部分面积（即冲量）相等，就得到一组脉冲序列，这就是 PWM 波形。可以看出，各脉冲宽度是按正弦规律变化的。根据冲量相等效果相同的原理，PWM 波形和正弦半波是等效的。对于正弦的负半周，也可以用同样的方法得到 PWM 波形。

在 PWM 波形中，各脉冲的幅值是相等的，要改变等效输出正弦波的幅值时，只要按同一比例系数改变各脉冲的宽度即可，因此在交－直－交变频器中，整流电路采用不可控的二极管电路即可，PWM 逆变电路输出的脉冲电压就是直流侧电压的幅值。根据上述原理，在给出了正弦波频率，幅值和半个周期内的脉冲数后，PWM 波形各脉冲的宽度和间隔就可以准确计算出来。按照计算结果控制电路中各开关器件的通断，就可以得到所需要的 PWM 波形。

简而言之，PWM 是一种模拟信号电平进行数字编码的方法，通过高分辨率计数器的使用，方波的占空比被调制用来对一个具体的模拟信号的电平编码，PWM 信号仍然是数字的，因为在给定的任何时刻。满幅值的直流供电要么为（ON）要么为（OFF）,电压或电流源是以一种通（ON）或断（OFF）的重复脉冲序列被加到模拟负载上去的。电路通的时候即是直流供电接通到负载上的时候。

下图中显示了三种不同的 PWM 信号。如图 2.1 所示，(a)为一个占空比为 10%的 PWM 输出，即在信号周期中，十分之一的时间为通路状态，而其余 90%的时间为间断状态。同理，(b)和(c)图分别显示的是占空比为 50%和 90%的 PWM 信号输出，这三种 PWM 输出编码分别为满输出的 10%, 50%和 90%的三种不同的模拟信号值。

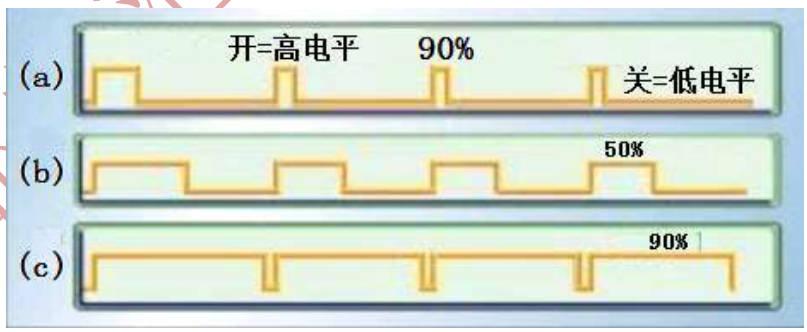


图 2.1 不同的 PWM 信号对比图

通常所用的 PWM 电路结构分为升压型电路 BOOST 结构和降压型 BUCK 结构型电路，以及降压升压型变换器（BUCK-BOOST）和升压降压型（CUK）,下面我们来具体分析常用的 BOOST 型和 BUCK 型的结构。

2.2.1 BUCK 降压型变换器结构

Buck 变换器是一种输出电压平均值 Vo 小于或等于输入电压 Vin 的直流变换器，该变换器主要由全控型开关管 T、电感元件 L、电容器 C 和续流二极管 D 构成，如图 2.2 所示，给出了它的电路拓扑图：

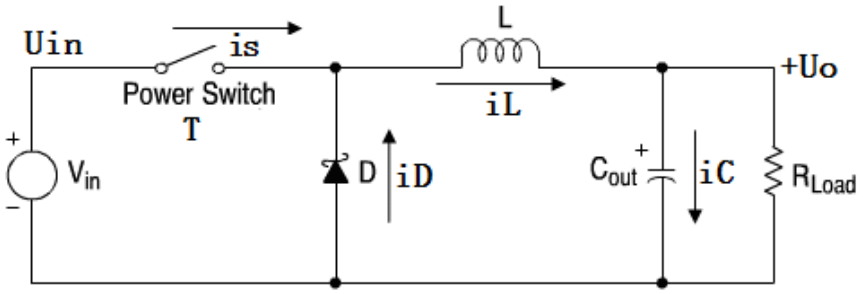


图 2.2 电路拓扑图

从电路可以看出，电感 L 和电容 C 组成低通滤波器，此滤波器设计的原则是使 us(t) 的直流分量可以通过，而抑制 us(t) 的谐波分量通过；电容上输出电压 uo(t)就是 us(t) 的直流分量再附加微小纹波 uripple(t)。电路工作频率很高，一个开关周期内电容充 放电引起的纹波 uripple(t) 很小，相对于电容上输出的直流电压 Uo 有下式：

$$\left|U_{uripple}\right|_{\max} << U_o \tag{2.1}$$

由于电容电压宏观上可以看作恒定。电路稳态工作时，输出电容上电压由微小的纹波和较大的直流分量组成，宏观上可以看作是恒定直流，这就是开关电路稳态分析中的小纹波近似原理。

当一个周期内电容充电电荷高于放电电荷时，电容电压升高，导致后面周期内充电电荷减小、放电电荷增加，使电容电压上升速度减慢，这种过程的延续直至达到充放电平衡，此时电压维持不变；反之，如果一个周期内放电电荷高于充电电荷，将导致后面周期内充电电荷增加、放电电荷减小，使电容电压下降速度减慢，这种过程的延续直至达到充放电平衡，最终维持电压不变。这种过程是电容上电压调整的过渡过程，在电路稳态工作时，电路达到稳定平衡，电容上充放电也达到平衡，这是电路稳态工作时的一个普遍规律。下面对这一过程进行简要分析。

在开关管 T 导通期间，电感 L 的两端电压为 Uin-Uo，电感电流线性增加，同时电感储存能量，此时电感中的电流：

$$L = \frac{d_{iL1}}{dt} = U_{in} - U_o \Longrightarrow \mathrm{i}_{L1} = \int \frac{U_{in} - U_O}{L} dt \tag{2.2}$$

当 t=0 时，$i_{L1} = I_{L\min}$,由此可知在开关管 T 导通期间，电感 L 中的电流为

$$i_{L1} = \frac{U_{in} - U_o}{L} t + I_{L\min} \tag{2.3}$$

当 T=Ton 时，电感中的电流达到了最大值 ILmax :

$$I_{L\max}=\frac{U_{in}-U_o}{L}t_{on}+I_{L\min} \tag{2.4}$$

在开关管 T 截至期间，电感此时转变为释放能量，释放的电压值与电容两端的电压 Uo 相等，则此时的电感中的电流为：

$$L\frac{d_{iL2}}{dt}=-U_o \Longrightarrow i_{L2}=\int\frac{-U_o}{L}dt\ ; \tag{2.5}$$

当 T=Ton 时，$i_{L2}=I_{L\max}$,则有：

$$i_{L2}=\frac{-U_o}{L}(t-t_{on})+I_{L\max} \tag{2.6}$$

当 t=Ts 时，上式可变为：

$$i_{L2}(T_s)=\frac{-U_o}{L}(T_s-T_{on})+I_{L\max} \Longrightarrow i_{L2}(T_s)=\frac{-U_o}{L}t_{off}+\frac{U_{in}+U_o}{L}t_{on}+I_{L\min} \tag{2.7}$$

根据（3），可分析出 BUCK 结构的变换器一般有三种工作状态：

1、当 t=Ts 时，若 $i_{L2}=0$ 则 $t_{off}=\frac{L}{U_o}I_{L\max}$

此状态时开关管 T 截至，电感上的电流为零，此时电路工作在临界态：

2、当 t=Ts， 若 $i_{L2}<0$ 则 $t_{off}>\frac{U_{in}-U_o}{U_O}t_{on}$

开关管 T 截至前，电感电流为零，此时由电容 C 来放电维持电压：

3、当 t=Ts， 若 $i_{L2}>0$ 则 $t_{off}<\frac{L}{U_o}I_{L\max}$

在此时电感电流大于零，电感在开关管导通期间储存能量，截至期间释放能量，使得输出电压稳定，根据上述分析：

$$i_{L2}(T_s)=\frac{-U_o}{L}t_{off}+\frac{U_{in}-U_o}{L}t_{on}+I_{L\min}=I_{L\min} \tag{2.8}$$

根据上式可解得：

$$\frac{t_{on}}{t_{off}}=\frac{U_O}{U_{in}-U_O} \Longrightarrow U_O=\frac{t_{on}}{T_s}U_{in} \tag{2.9}$$

2.2.2 BOOST 型升压变换器结构

The boost converter，或者叫 Step-up converter，是一种开关直流升压电路，它可以是输出电压比输入电压高。Boost 变换器是一种输出直流电压平均值 Vo 高于输入电压 Vin 的单管非隔离直流变换器，该变换器主要由开关管 T、电感 L 和电容 C 组成。下图给出了它的电路拓扑图。

首都师范大学信息工程学院

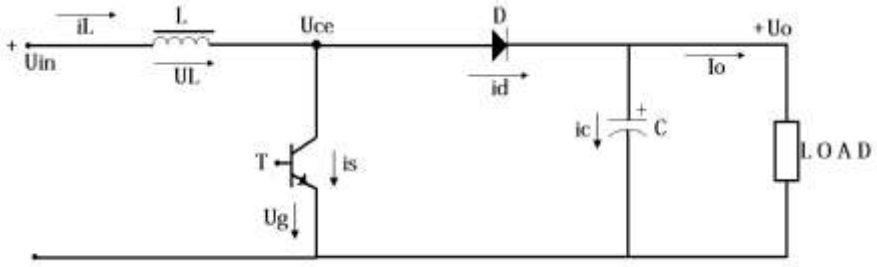


图 2.3 Boost 变换器主回路拓扑

假设开关（三极管或者 MOS 管）已经断开了较长时间，所有的元件都处于理想状态，电容电压等于输入电压。分当开关管导通时和关闭时两个部分来说明这个电路。

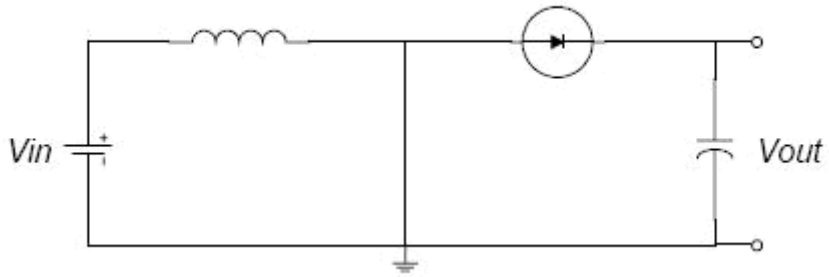


图 2.4 开关管导通过程示意图

由开关管导通过程示意图可知，当开关管 T 导通时，UL=Uin，电感 L 中的电流呈线性上升，电感储存能量，二极管 D 因承受反压而截止，其反压为 Uo。在开关管 T 导通期间(Ton)内，电容 C 放电提供负载电流 Io。当开关管 T 断开时，电感 L 由于自感电势导致极性颠倒，于是电感 L 上的电压与输入电压 Uin。叠加后，使二极管 D 导通向负载供电，同时给电容 C 充电，因此在负载上得到一个比输入电压 Uin。高的输出电压 Uo。控制开关管 T 的导通时间或开关频率，即可调节输出电压。

在 T(on)期间：开关管 T 导通，电源电压 Uin 加在电感 L 上，此时的电感电流就是开关管 T 的电流，则有：

$$L\frac{diL1}{dt}=U_{in}=L\frac{di_s}{dt}\quad ,\quad i_{L1}=\frac{1}{L}\int U_{in}dt \tag{2.10}$$

当 t=0 时，$i_{L1}=I_{L\min}$，由此得开关管 T 闭合时候的电感电流为：

$$i_{L1}=\frac{U_{in}}{L}t+I_{L\min} \tag{2.11}$$

当 t=t(on)时刻，即开关管 T 导通完毕时，电感电流上升到最大值则有：

$$I_{L\max}=\frac{Uin}{L}t_{on}+I_{L\min} \tag{2.12}$$

总体来讲：在充电过程中，开关闭合（三极管或者 MOS 管导通），等效电路如图二，

开关（三极管）处用导线代替。这时，输入电压流过电感。二极管防止电容对地放电。由于输入是直流电，所以电感上的电流以一定的比率线性增加，这个比率跟电感大小有关。随着电感电流增加，电感里储存了一些能量。

T(off)期间：在 T(off)阶段，开关管 T 截至，这是电源电压 Uin 和电感 L 上的电压之和等于输出电压 Uo,二极管 D 导通，由于 Uo>Uin,因此开关管 T 截至时的电感电流下降，则有：

$$U_{in}=U_L+U_O=L\frac{di2}{dt} \tag{2.13}$$

$$i_{L2}=\frac{1}{L}\int(U_{in}-U_O)dt \tag{2.14}$$

当$t=t_{on}$时，$i_{L2}(t_{on})=I_{L\max}$，可退出开关管 T 截止的 T（off）时间内，电感的电流为：

$$i_{L2}=\frac{U_{in}-U_o}{L}(t-t_{on})+I_{L\max} \tag{2.15}$$

由此可得 BOOST 变换器的三种工作状态。

1. 即当 t=Ts 时，电感电流刚好等于零，说明开关管 T 导通期 T0。内电感储存的能量，在开关管 T 截止期 T（off）内刚好释放完，这种临界工况下电感的最小电流 IL(min)=0。

2. 在 t=Ts 之前，若电感电流已经为零，电容 C 上电压纹波较大，作为开关稳压电源，我们要尽量避免这种情况的出现。

3. 在 t=Ts 时，电感电流在开关管 T 截止期间内降到最小值但大于零。在一个开关周期内，在 T（on）中电感的储能等于在 T(off)中电感释放的能量，这样连续不断地供给负载电流，即：IL(min)>0，输出电压波纹小电源工作稳定。

则有：

$$i_{L2}(T_s)=\frac{U_{in}-U_O}{L}(Ts-t_{on})+I_{L\max}=\frac{U_{in}-U_o}{L}t_{off}+\frac{U_{in}}{L}t_{on}+I_{L\min}=I_{L\min} \tag{2.16}$$

可得：

$$\frac{T_{on}}{T_{off}}=\frac{U_{in}-U_o}{U_{in}} \tag{2.17}$$

设：

$$\alpha=\frac{T_{on}}{T_s}=\frac{U_{in}-U_o}{U_{in}} \tag{2.18}$$

可得输出电压：

$$U_O=\frac{U_{in}}{1-\alpha} \tag{2.19}$$

根据上述数学分析，可得$\alpha>0$，所以 Uo 大于 Uin，即此种结构的变换器称之为 BOOST 结构变换器（升压变换器）。

总体来说，当开关断开（三极管或者 MOS 管截止）时的等效电路。当开关断开时，由于电感的电流保持特性，流经电感的电流不会马上变为零，而是缓慢的由充电完毕时的

首都师范大学信息工程学院

值变为零。而原来的电路已断开，于是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。升压完毕。升压过程可理解为一个电感的能量传递过程。充电时，电感吸收能量，放电时电感放出能量。如果电容量足够大，那么在输出端就可以在放电过程中保持一个持续的电流，如果这个通断的过程不断重复，就可以在电容两端得到高于输入电压的电压。

2.2.3 应用及分析

脉宽调制 PWM 是开关型稳压电源中的术语。这是按稳压的控制方式分类的，除了 PWM 型，还有 PFM 型和 PWM、PFM 混合型。脉宽宽度调制式（PWM）开关型稳压电路是在控制电路输出频率不变的情况下，通过电压反馈调整其占空比，从而达到稳定输出电压的目的。

PWM 软件法控制充电电流：该方法的基本思想就是利用单片机具有的 PWM 端口，在不改变 PWM 方波周期的前提下，通过软件的方法调整单片机的 PWM 控制寄存器来调整 PWM 的占空比，从而控制充电电流。该方法所要求的单片机必须具有 ADC 端口和 PWM 端口这两个必须条件，另外 ADC 的位数尽量高，单片机的工作速度尽量快。在调整充电电流前，单片机先快速读取充电电流的大小，然后把设定的充电电流与实际读取到的充电电流进行比较，若实际电流偏小则向增加充电电流的方向调整 PWM 的占空比；若实际电流偏大则向减小充电电流的方向调整 PWM 的占空比。在软件 PWM 的调整过程中要注意 ADC 的读数偏差和电源工作电压等引入的纹波干扰，合理采用算术平均法等数字滤波技术。

PWM 在推力调制中的应用：脉宽调制发动机控制方式是在每一个脉动周期内，通过改变阀门在开或关位置上停留的时间来改变流经阀门的气体流量，从而改变总的推力效果，对于质量流率不变的系统，可以通过脉宽调制技术来获得变推力的效果。

脉宽调制通常有两种方法：第一种为整体脉宽调制，对控制对象进行控制器设计，并根据控制要求的作用力大小，对整个系统模型进行动态的数学解算变换，得出固定力输出应该持续作用的时间和开始作用时间；第二种为脉宽调制器，不考虑控制对象模型，而是根据输入进行“动态衰减”性的累加，然后经过某种算法变换后，决定输出所持续的时间。这种方式非常简单，亦能使输出作用几乎相同。

脉宽调制控制技术结构简单、易于实现、技术比较成熟，俄罗斯已经将其成功地应用于远程火箭的角度稳定系统控制中。但是当调制量为零时，正反向的控制作用相互抵消，控制效率明显比变流率系统低。而且系统响应有一定的滞后，其开关的频率必须远大于本身的固有频率，否则不但起不到调制效果，甚至会发生灾难性后果。

首都师范大学信息工程学院

在 LED 中的应用：在 LED 控制中 PWM 作用于电源部分，脉宽调制的脉冲频率通常大于 100Hz，人眼就不会感到闪烁。

2.3 模块化的开关电源

现今，电子产品设计和研发人员正面临着很大的挑战，如降点电子产品的成本，缩短设计周期，以及提高电子产品的性能，通用性和高卡可靠性等一系列问题。现有的电子设计技术，设计人员大多采用分离元器件和参数型电源设计，因此开发一款新的电子产品时需要经过很多复杂的参数计算和较长时间的开发周期，而目前的趋势为应用可靠的模块化电源集成电路，DC/DC 模块电源在此则成为了不可或缺的一项重要技术，因其电源体积小，连接方便，性能可靠，系统设计人员正确合理地选用 DC/DC 模块电源可以大大简化电路设计和调试，缩短产品设计周期，提高产品性能的高可靠性和系统总体设计水平。

2.3.1 传统及常用开关电源

现代开关电源有两种：一种是直流开关电源；另一种是交流开关电源。开关电源内部结构一般我们常用的为直流开关电源，其功能是将电能质量较差的原生态电源（粗电），如市电电源或蓄电池电源，转换成满足设备要求的质量较高的直流电压（静电）。直流开关电源的核心是 DC/DC 转换器。因此直流开关电源的分类是依赖 DC/DC 转换器分类的。也就是说，直流开关电源的分类与 DC/DC 转换器的分类是基本相同的，DC/DC 转换器的分类基本上就是直 流开关电源的分类。

直流 DC/DC 转换器按输入与输出之间是否有电气隔离可以分为两类：一类是有隔离的称为隔离式 DC/DC 转换器；另一类是没有隔离的称为非隔离 式 DC/DC 转换器。

隔离式 DC/DC 转换器也可以按有源功率器件的个数来分类。单管的 DC/DC 转换器有正激式（Forward）和反激式（Fly back）两种。双管 DC/DC 转换器 有双管正激式（Double Transistor Forward Converter），双管反激式（Double Transistor Fly back Converter）、推挽式（Push-Pull Converter）和半桥式（Half-Bridge Converter）四种。四管 DC/DC 转换器就是全桥 DC/DC 转换器（Full-Bridge Converter）。非隔离式 DC/DC 转换器，按照有源功率器件的个数，可以分为单管式、双管式和四管式三类。

单管 DC/DC 转换器共有六种，即降压式（Buck）DC/DC 转换器，升压式（Boost）DC/DC 转换器、升压降压式（Buck Boost）DC/DC 转换器、Cuk 型 DC/DC 转换器、Zeta 型 DC/DC 转换器和 SEPIC 型 DC/DC 转换器。在这六种单管 DC/DC 转换器中，Buck 和 Boost 式 DC/DC 转换器是基本的，Buck-Boost、Cuk、Zeta、SEPIC 式 DC/DC 转换器是从

成都师范大学信息工程学院

中衍生出来的。双管 DC/DC 转换器有双管串接的升压式（Buck-Boost）DC/DC 转换器。四管 DC/DC 转换器常用的是全桥 DC/DC 转换器。

隔离式 DC/DC 转换器在实现输出与输入电气隔离时，通常采用变压器来实现，由于变压器具有变压的功能，所以有利于扩大转换器的输出应用范围，也便于实现不同电压的多路输出，或相同电压的多种输出。

在功率开关管的电压和电流定额相同时，转换器的输出功率通常与所用开关管的数量成正比。所以开关管数越多，DC/DC 转换器的输出功率越大，四管式比两管式输出功率大一倍，单管式输出功率只有四管式的四分之一。非隔离式转换器与隔离式转换器的组合，可以得到单个转换器所不具备的一些特性。

2.3.2 单片集成开关电源器件

单片开关电源自 20 世纪 90 年代中期问世以来便显示出强大的生命力，它作为一项颇具发展前景和影响力的新产品，引起了国内外电源界的普遍关注。单片开关电源具有高集成度、高性价比、最简外围电路、最佳性能指标等特点，现已成为开 发中、小功率开关电源、精密开关电源及开关电源模块的优选集成电路。目前，单片开关电源正朝着短、小、轻、薄、节能、安全的方向发展。目前，国外许多著名的 IC 厂家都在大力开发低功耗、节能型单片开关电源集成电路，National Instruments 的 LM25XX 系列即是一例。由于上述产品采用了先进的节能技术和制作工艺，因此被誉为“绿色芯片”(Green Chip)。LM25XX 系列适用于电池充电器、电源适配器，或机顶盒、DVD、CD、CVCR(摄录像机)、电视 / 监视器的备用电源，并可作为 PC 机外部设备、便携式电子装置及家用电器中微控制器(MCU)的电源。此外，它还被应用到通信、网络等领域。

嵌入式控制系统的 MCU 一般都需要一个稳定的工作电压才能可靠工作。而设计者多习惯采用线性稳压器件(78xx 系列三端稳压器件)作为电压调节和 稳压器件来将较高的直流电压转变 MCU 所需的工作电压。这种线性稳压电源的线性调整工作方式在工作中会大的“热损失”(其值为 V 压降 ×I 负荷)，其工作效 率仅为 30%～50%。加之工作在高粉尘等恶劣环境下往往将嵌入式工业控制系统置于密闭容器内的聚集也加剧了 MCU 的恶劣工况，从而使嵌入式控制系 统的稳定性能变得更差。

而开关电源调节器件则以完全导通或关断的方式工作。因此，工作时要么是大电流流过低导通电压的开关管、要么是完全截止无电流流过。因此，开关稳压电源的功耗极低，其平均工作效率可达 70%～90%。在相同电压降的条件下，开关电源调节器件与线性稳压器件相比具有少得多的“热损失”。因此，开关稳压电源可大大减少散热片体积和 PCB 板的面积，甚至在大多数情况下不需要加装散热片，从而减少了对 MCU 工作环境的有害影响。

首都师范大学信息工程学院

第三章 开关电源并联均流控制系统

现代科研生产中对电源的效率，灵活性，可靠性，有着更高的要求。一般来说目前的单机电源已经可以提供很大的功率，但是随着技术的发展对电源提供电能的要求越来越高，若系统只依靠单独电源供电，可靠性便会大打折扣，而且由于系统只有单一电源供电，即使电源出现故障也不可脱机维护，使得系统的可靠性大大降低，所以单一的大功率电源供电方法已经逐步的被淘汰。趋之而来的是采用多模块的小功率电源通过并联的方法来一起供电来达到增大功率的目的，这样做不仅灵活性有很大改善，并且同时电源的冗余度可以得到有效的保证，因为在多模块并联的系统中，模块之间独立工作，若其中某一模块出现故障，不会导致供电中断，可对此故障模块进行脱机维护，在此期间由其余正常模块保持系统的运转。

但是，由于每个模块的外特性均有差别，不可简单的将电源模块并联使用，在此过程中很可能会有产生电流分配不均，模块过载，等诸多隐患。这时需采用均流技术使得模块之间负载均衡。同时结合 N+M 冗余结构实现容错，带电热插拔能力以便于随时进行维护，又不影响电源的持续工作。

3.1 常用并联均流技术分析及对比

系统中每个功率器件的外特性不相同，当电流变化量为 ΔI 时，输出电压降低 ΔV，输出电阻 R=ΔV/ΔI,也称输出电压调整率。若其中某模块输出阻抗明显小于其余模块，则大部分电流将由输出阻抗低的模块承担，造成模块间负载不均衡，所以需要使用均流方法来改善这一情况[3]。

均流控制技术就是改变电源的输出特性，与线性电源相同，开关电源有如下外输出特性：Uo= f(Io)。定义 R 为开关电源的输出阻抗，其包括开关电源模块连接到负载的导线或电缆的电阻。空载时，模块输出电压为 Uomax，当电流变化 ΔI 时，负载电压变化量为 ΔU，故得该模块的输出电阻为 R=ΔU/ΔI。对电源模块来说，当电流增加了 ΔI 时，其输出电压降落了 ΔU。因此 R=ΔU/ΔI 也代表了开关电源的输出电压调整率。开关电源的负载电压 Uo 与负载电流 Io 的关系为：

$$U_O = U_{O\max} - R_{io} \tag{3.1}$$

由下图 3.2 中可见，当负载电流 Io=Io1+Io2 时，负载电压为 Uo，按两个模块的外特性分配负载电流 Io，由于斜率不相等，两台电源的电流分配也不相等；当负载电流增大到

首都师范大学信息工程学院

Io'=Io1'+Io2' 时，负载电压为 Uo' 。由图 2.1 可见，模块 1 外特性斜率小，即输出阻抗小，分配电流的增长量比外特性斜率大的模块 2 增长量大。这样两台 DC/DC 电源并联时输出阻抗低的变换器将提供大部分电流，从而造成并联运行时的不均流。因此，若要实现两电源模块间的均流，就应设法调整模块 1 的外特性斜率（即输出阻抗），使之与模块 2 接近，这样就可使两个模块的电流分配基本均匀[4]。

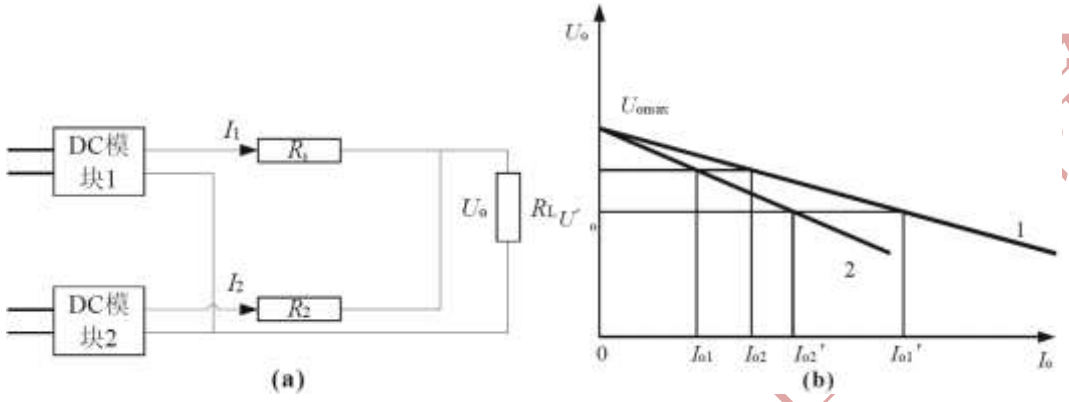


图 3.1 两台并联开关电源的外输出特性示意图

并联均流控制技术性能的优劣可用均流控制误差或电流不平衡度来衡量，通常要求在 50%～100%的额定负载范围内，所有模块的均流误差 CSerror 的百分比不得超过 5%。均流控制误差 CSerror%的定义如下：

$$CS_{err}\% = \frac{\max[I_i - I_j]}{\sum_{k=1}^{n} I_k / n} \tag{3.2}$$

式子中 n =并联模块的数量;

Ik 为第 k 个模块的输出电流;

Max[*Ii- Ij*] =所有模块的输出电流;

通常来讲，均流控制方法分为两大类[7]，即下垂均流控制法（亦称输出阻抗法），和有源均流法，如下图 3.2 中所示，有源均流控制法的特征是基于均流控制母线 CSB 的，母线连接所有的并联模块，并提供电流参考信号，其中有源均流法可以细分为主从均流控制法，平均电流控制均流法，自主均流（亦称最大电流自动均流控制法）等。下面详细的介绍并分析目前最常用的几种有源均流控制方法[5] [6]。

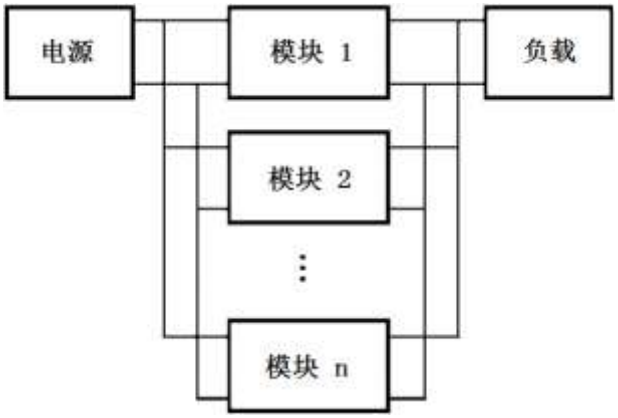


图 3.2 下垂均流控制法示意图

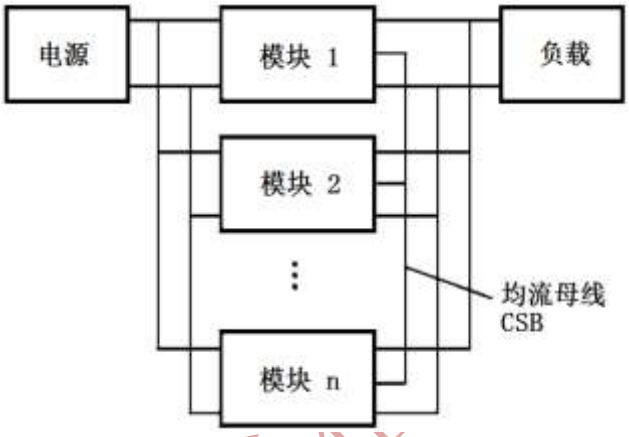


图 3.3 有源均流控制法示意图

3.1.1 主从模块均流法

在主模块均控制流法中，人为指定一个为主模块来控制电压，迫使其它的模块像电流源一样工作，由于误差电压和负载电流成比例，此方法便于电流控制。若设计时能确保系统的模块在设计上保持高度一致，则误差放大器会迫使所有模块均输出等量电流来达到负载均衡这一目的,如下图 3.4 中所示[8] [9]。

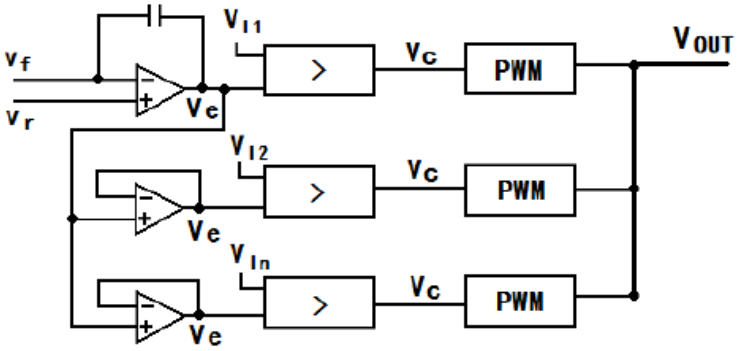


图 3.4 主从模块均流控制法示意图

特点为结构简洁，无须外围控制电路，且简单易懂，但其余模块间均需与主模块相连，与主模块通信，使连线复杂，容易产生噪声，尤其若主模块故障，系统将直接崩溃，有悖

于冗余电源设计初衷。所以主从模块均流控制法只能用于电源模块间的均流，但是不能应用于冗余系统[10]。

3.1.2 平均电流均流控制法

平均电流均流法，此方法无需外部控制器，只需一条均流母线和各电源模块连接即可。如图 3.5 所示，均流控制器比较母线和各模块的电流信号输出并 Uc ，Ur'为基准电压 Ur 和均流控制器 Uc 的综合，它与反馈电压 Uf 比较放大后产生电压误差 Ue,来控制功率器件，从而达到均流的目的。以两个模块（n=2）并联，其中 VI1，VI2 分别为模块 1 和 2 的电流举例，当流入母线电流为零时[12]，有下式:

$$(VI1-V_b)/R+VI2-V_b)/R=0$$
$$V_b=(VI1+VI2)/R \tag{3.3}$$

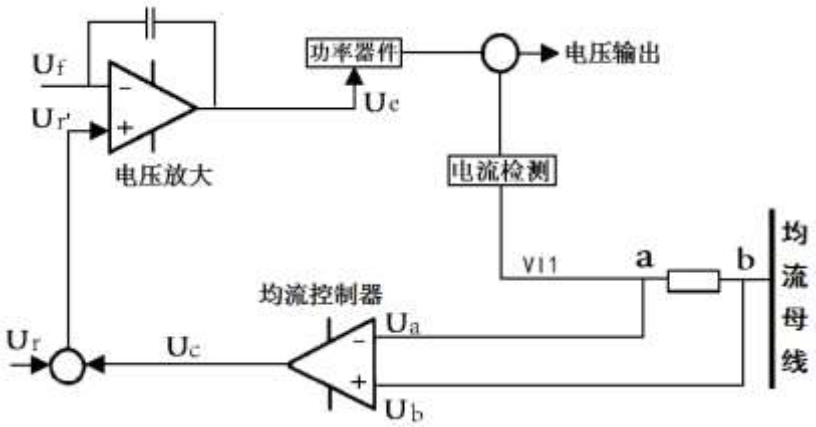


图 3.5 平均电流均流控制法示意图

平均电流均流控制法可以精确的实现均流，且此结构电路设计简单，无需很多的外围器件[13] [14]。但在实际应用中，若均流母线发生短路或接在母线上的任一模块不能工作时，由于其平均值的结构特点，会导致母线的电压下降，促使各模块电压下降，结果造成故障。

3.1.3 热应力自动均流法

热应力自动均流法，也是一种按平均值自动均流的一种方法。图中10所示为热应力法均流控制电路的原理图，按照每个模块的电流和温度（即热应力）自动均流。模块的负载电流和温度经过检测放大后，输出电压Uik，满足下式[15]：

$$Uik=rIkT\alpha \tag{3.4}$$

式中r、α为常数；T——模块温度；Ik——模块K的输出电流。

因此，每个模块的电流和温度可以决定模块之间的电流分配。电压Uik加到一个电阻电桥的输入端，电桥的输出（a、b两点）接比较器的输人端，同时b点接均流母线。母线电压Ub与几个模块的平均电压信号rIk成正比。

$$U_b \propto (U_{I1} + U_{I2} + ... + U_I)/n \tag{3.5}$$

模块k的UIk值经过R3、R4分压电路，在相应的均流控制器的a点，产生电压Ua，它反映了模块k的IkTα值。Ua与Ub经过窄频带比较器比较，若Ua < Ub，则R5中的电流增大，误差放大器的输出电压Ue发生变化，模块的输出电压上升，输出电流增大，使Ua接近于Ub。当均流母线有故障时，电阻R5限制了Ua偏离Ub的最大偏差，以保持系统的正常工作。

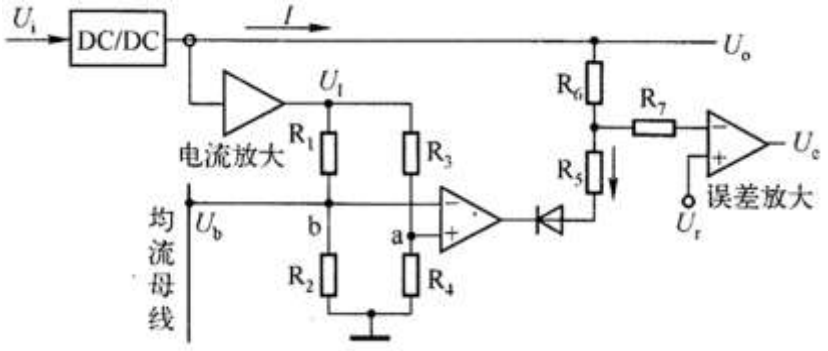


图 3.6 热应力均流控制法示意图

并联系统中各个模块在电源框中所处的位置不同，热对流情况和散热条件也不同，结果有的模块温度高，有的模块温度低。但按热应力自动均流可以在设计电源柜时，不必考虑各模块的布置。此外，由于回路频带窄，对噪声不敏感，设计时也无须考虑电源对噪声的屏蔽。但是由于此方法受外界温度影响比较大，所以抗环境干扰能力交差，切系统较为复杂，目前应用并不广泛，这里只做简要介绍[16]。

3.1.4 强迫均流法

强迫均流控制法，意思为通过监控模块实现强迫均流。一般来说实现方式主要有软件控制和硬件控制两种。软件控制是通过软件计算，比较模块电流与系统平均电流，然后最终通过 MCU 控制，来实现系统均流。再调整模块电压，使其电流与平均电流相等。软件方式易于实现，均流控制精确度高，但其瞬态响应比较差，调节时间长[17] [18]。

硬件控制方式原理如图 3.7 所示，取样电压 Us 与系统基准电压 Ur 相比较产生误差电压 Ue,该电压送至每个模块，与模块电流相比较，调节模块参考电压，从而改变输出电压，调节输出电流，实现均流。这样，每个模块都相当于电压控制的电流源。这种均流方式精度高，动态响应好，可控制模块多，可以很方便的组成冗余系统。

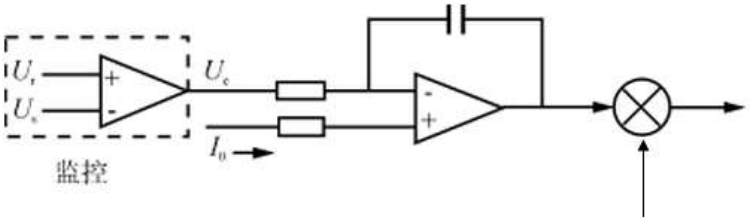


图 3.7 强迫均流法控制法硬件控制原理图

对这种硬件强迫均流方法的一种改进就是所谓的 PWM 强迫均流法。工作原理如图 3.8 所示。

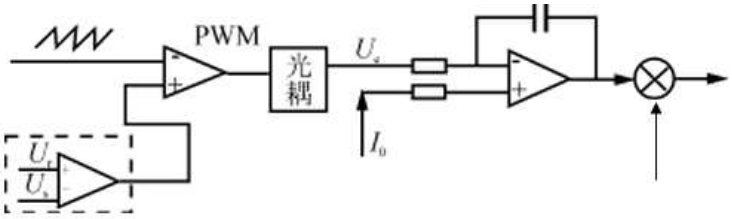


图 3.8 PMW 强制均流控制法

强迫均流依赖监控模块，如果监控模块失效，则无法均流，这一点使用时应注意。在强迫均流中，每个监控系统监控的模块数可达 100 个，参数设置好后（即使模块电压相差较大，如 1V 或更大）不需任何调整，均流精度高于 2.5%,负载响应快（在几百毫秒内），且无振荡现象。

3.1.5 最大电流均流法

相比前面所述的前几种目前较为常用的均流方法，最大电流法与它们最大的不同之处在于此方法中，通过电流最大的模块自动成为主模块，而不是人为指定某一个某块为主模块，此方法与平均电流法的最大区别在于将图 3.9 中 a,b 间的电阻改换为二极管，如图 13 所示：因二极管具有单向导通性，所以在电路中只有最大电流的模块才可使二极管导通，所以均流控制总线（Bus line）上的电压为最大的电流模块所转换成为的电压，之后总线上的电压将成为参考电压，其余的所有模块将参考此电压来进行反馈，从而调节每个模块自己的电流输出[20]。

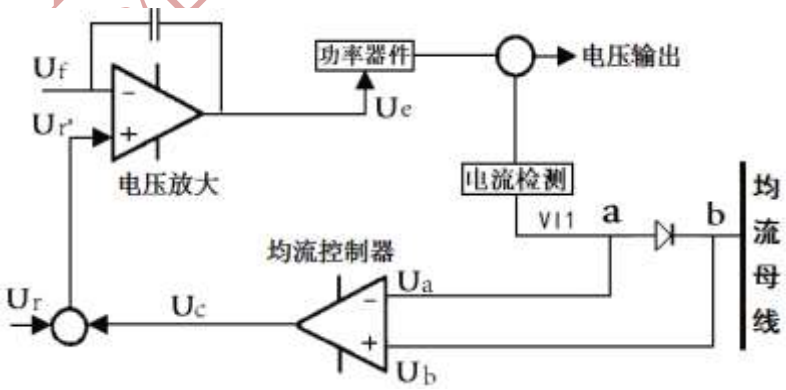


图 3.9 最大均流法示意图

总体来说，最大电流均流法是一种电压型控制方法，它主要通过调整输出电压的大小来调整输出的电流大小，将上图转换为控制数学模型，可得最大电流控制法的系统控制图如图 3.10 所示[21]：

首都师范大学信息工程学院

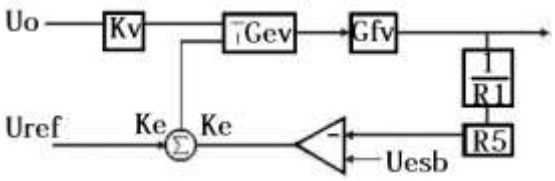


图 3.10 最大电流控制法的系统控制图

上图中 Kv 为电压反馈系数，Rs 为电流采样系数，R1 为输出电压比输出电流的洗漱，Ucsb 为均流母线基准电压，Gev 为反馈电压 PI 调节函数，Ke 为均流控制信号和电压基准加成时的系数，Gfv 为驱动信号和功率级综合函数，主要和电源输入电压 U 输出负载和驱动电路相关。由上述控制模型我们可得：

$$U_o = \frac{(U_{csb}K_c + U_{ref}K_e)G_{ev}G_{fv}}{1+(\frac{R_s}{R_1}K_c + K_u)G_{ev}G_{fv}} \tag{3.6}$$

$$I_o = \frac{(U_{csb}K_c + U_{ref}K_e)G_{ev}G_{fv}}{1+(\frac{R_s}{R_1}K_c + K_u)G_{ev}G_{fv}} \bullet \frac{1}{R_1} \tag{3.7}$$

在此过程中，对于非最大输出电流模块电源而言，Uo 与均流母线电压和基准电压基本呈线性关系，提高基准电压便可提高输出电压，若提高母线电压，同时也会提高各个模块的输出电压和输出电流。

由于各个模块中输出电流最大的模块表现在母线上的电压和电流采样信号相同，均流控制器输出信号为零，输出电压由电压基准 Uref 来决定，即：

$$U_o = \frac{U_{ref}K_eG_{ev}G_{fv}}{1+K_uG_{ev}G_{fv}} \tag{3.8}$$

$$I_o = \frac{U_{ref}K_eG_{ev}G_{fv}}{1+K_uG_{ev}G_{fv}} \bullet \frac{1}{R_1} \tag{3.9}$$

在此系统中，由于通过调整输出电压来实现系统的均流，故最大电流法可实现的均流范围较宽。图 3.11 为最大电流法并联工作示意图。

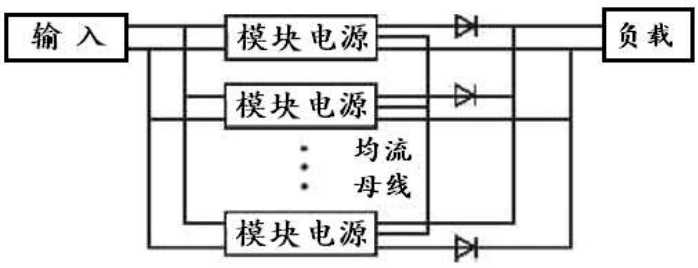


图 3.11 并联工作示意图

与平均电流均流法相比，自动均流法准确度要更高，而且不仅如此它的电路结构简单，可看出，最大电流法兼顾了主从模块法和平均电流法的特点，均流效果很好，且最重要的

首都师范大学信息工程学院

是此种结构避免了主从模块法中若主模块失效导致系统瘫痪的隐患，目前得到了广泛的应用[22]。

不足的是，在民主均流法中，由于二极管的参与，在二极管的两端会产生一定的压降，导致二极管两端的电压不统一，不能准确的反映出模电的电流大小，所以系统经常会以牺牲主模块的精度来换取从模块和系统的稳定。目前有很多种方法来消除二极管两端所产生的压降，如利用电压跟随器（voltage follower）等，都可以有效的解决这一问题[22]。

3.2 冗余结构分析

在上文中已经提到过，冗余结构(Redundant structure)和目前并联开关电源系统有着密不可分的关系，是确保电源系统可靠度的重要途径，本节将对冗余度进行论证。

3.2.1 电源模块的可靠性分析

一个完整的电源系统有 n 个电源模块，这个电源系统按 $N+k$ 的方式进行设计（n=N+k,N 为保证正常供电必需的数量，k 为热备份数量，n 为模块总数量），这时可以计算热备份模块数量 k 对系统可靠性的影响。

（1）n 个电源模块系统，k=0,N=n 时，系统的(平均无故障时间)MTBF(N+0)无热备份模块的可靠度为：

$$R_{N+0}(t) = R_S(t)^n \tag{3.10}$$

其 MTBF（N+0）为 ：

$$MTBF_{N+0} = \int_0^{\infty} R_S(t)^n dt = \frac{1}{n} MTBF_0 \tag{3.11}$$

（2） n 个电源模块系统，k=2,N=n-2 时，系统的(平均无故障时间)MTBF(N+2)，k=2 时，系统的可靠度为：

$$R_{N+2}(t) = R_{N+1}(t) + (\frac{n}{2}) R_s(t)^{n-2}[1 - R_s(t)]^2 \tag{3.12}$$

其 MTBF（N+2）为：

$$MTBF_{N+2} = \int_0^{-} R_{N+2}(t)dt = (\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2}) MTBF_0 \tag{3.13}$$

（3）n 个电源模块系统，按 N+k 方式设计，n=N+k 时，系统的 MTBF(N+k)系统的可靠度为

$$R_{N+2}(t) = R_{N+(k-1)}(t) + (\frac{n}{k}) R_s(t)^{n-k}[1 - R_s(t)]^2 \tag{3.14}$$

其中 MTBF（N+k）为：

首都师范大学信息工程学院

$$MTBF_{N+2}=\int_0^{\infty}R_{N+k}(t)dt=(\frac{1}{n}+\frac{1}{n-1}+\frac{1}{n-2}+.....+\frac{1}{n-k})MTBF_0 \quad (3.15)$$

通过上述论证，可得出，若设计 N+m 型冗余结构，当 n=N+m 时，系统的可靠性为：

$$R_{N+m}(t)=R_{N+(m-1)}(t)+(\frac{n}{m})R_s(t)^{n-m}[1-R_s(t)]^m \quad (3.16)$$

$MTBF_{N+m}$（平均无故障运行时间）为：

$$\int_0^{\infty}R_{N+m}(t)dt=(\frac{1}{n}-\frac{1}{n-1}.....\frac{1}{n-m})MTBF_0 \quad (3.17)$$

以 3 模块并联供电举例：设一电源系统的 n=N+m=3，单个模块的可靠性 R=90% 则有：

$$\overline{R}(故障率)=1-0.9=0.1$$
$$R_{系统}=1-0.1^3=0.999=99.9\% \quad (3.18)$$

可看出系统中的冗余模块使系统的稳定性大幅提高。

3.2.2 备份模块数量的分析

根据上述对可靠性的计算分析，可得到 n 个电源模块组成的系统中，保证 N 个模块正常运行的可靠度 R（N+k）(t),对于不同模块数量 n(如 3~10)，不同的备份数量 k(0~9)个，在电源系统可靠度 Rp(t)=1 的情况下，电源模块不同热备付数量对可靠性的影响特性曲线图为：

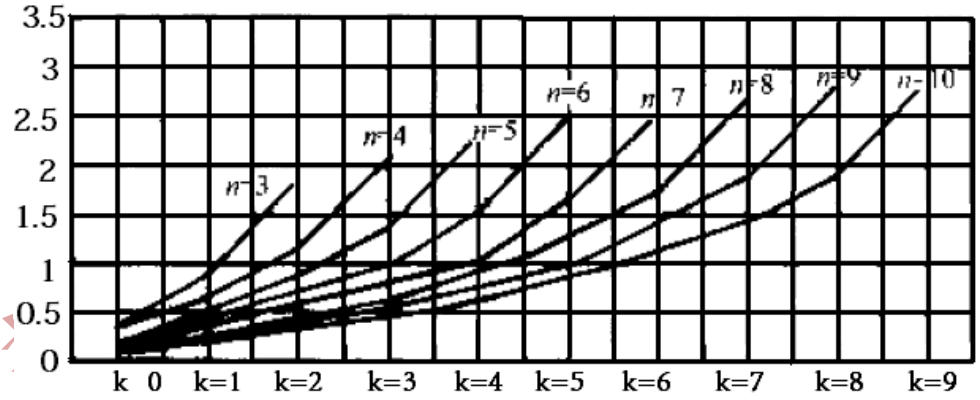


图 3.12 电源模块数量不同对 n(可靠性)的影响曲线

根据上述对开关电源可靠性指标 MTBF 的分析计算，可得出下列结论：

①. 电源模块的可靠度工艺指标，元器件质量等诸多因素有关。从提升电源模块可靠性的角度看，电源模块使用的元器件数量越少越好，尤其是应尽量减少用失效率较高的如电容等元器件。

②. 对于由 n 个模块组成的高频开关电源系统，电源按 N+k 方式设计，n=N+k，在模块总数不变的情况下，保证正常供电必须的模块数量 N 越少，热备份模块数量越多，系统

的 MTBF（N+k）越长。

③. 对于由 n 个模块组成的高频开关电源系统，在模块总数 n 不变的情况下，热备份模块数量为 k 的系统较热备份模块数量为 k-1 系统平均无故障时间长。

④. 对于开关电源系统，系统可靠性按 N+k 热备份方式设计，备份模块数值多少与电源系统的可维修时间，电网的供电质量，电源负荷的重要程度等因素均有关系，对于用户而言，如果可以保证电源系统的维修时间小于蓄电池的带载放电时间，这时采用 N+1 方式，一半可以保证电源系统的正常供电，否则应该考虑增加热备份模块的数量。

2+1 模式：从上述论证不难看出冗余模块 m 的值看似越大越好，但是在长期的实践过程中，人们发现若无限度的加大冗余模块数量，会使多模块处于轻载，，甚至停滞等情况，造成资源浪费，而且多模块的系统会带来连接更为复杂，维护成本高等问题，所以要适量考虑冗余模块的数量才可。

上文提到 2+1 模式的冗余结构可靠性为 99.9%，所以目前 2+1 模式已被广泛接受，既避免了 1+1 模式中因切换电源所产生的供电中断隐患，也可以将系统的成本降到最低，性价比高，本文采用 2+1 结构作为冗余设计方案，后续将详细介绍。

3.2.3 冷备份与热备份

对于备份模块的备份方式通常有两种，即冷备份和热备份。

冷备份：正常情况下该备份模块不接入电路，处于闲置状态。当原模块出现故障后，备用模块得到信号后立即启动。其优点为：冷备份的模块由于不接入系统所以不会消耗多余的能量。缺点为：模块从得到信号到完成启动正常工作，需要一定响应时间，容易出现供电暂时中断，降低了精密系统的可靠性，对精密仪器损伤较大。

热备份：启动后所有模块均处于接入状态，只是由特定模块进行供电，冗余模块空载。当出现故障后，由备份模块接管供电，同时原模块退出，优势为：响应速度快，供电中断的时间很短，影响较小,使用较为广泛。缺点为：由于备份模块长期运行在系统中，会造成一定的能量损耗和器件劳损，需定期检查备份模块的情况并更换。

首都师范大学信息工程学院

第四章 并联开关电源设计

4.1 集成开关稳压器件

传统的线性稳压电源，如常用的三端稳压器件 7800 系列，以其纹波小，成本低，供电稳定，响应速度快等被人们广泛应用。但很多情况下需要稳定度较高的电流和功率输出，虽然 7800 系列可以通过外部电路进行扩流来满足这一需求，但是因其调整管工作在线性区，所以自身功耗很大，效率大打折扣，从而目前这个在逐渐的被集成开关电源器件所取代。集成开关稳压器件的调整器工作于开关切换状态，因而效率很高，且功率密度大，电流输出能较好。

如 LM2xxx 系列是美国国家半导体公司生产的输出降压开关型集成稳压电路，它内含固定频率振荡器（252kHz）和基准稳压器（1.23V），并具有完善的保护电路，包括电流限制及热关断电路等，该器件只需极少的外围器件便可构成高效稳压电，其中以 LM2678 为例，它是线性三端稳压器件（如 78xx 系列端稳压集成电路）的替代品。具有可靠的工作性能、较高的工作效率和较强的输出电流驱动能力，内部框图如图 4.1 所示[24]。

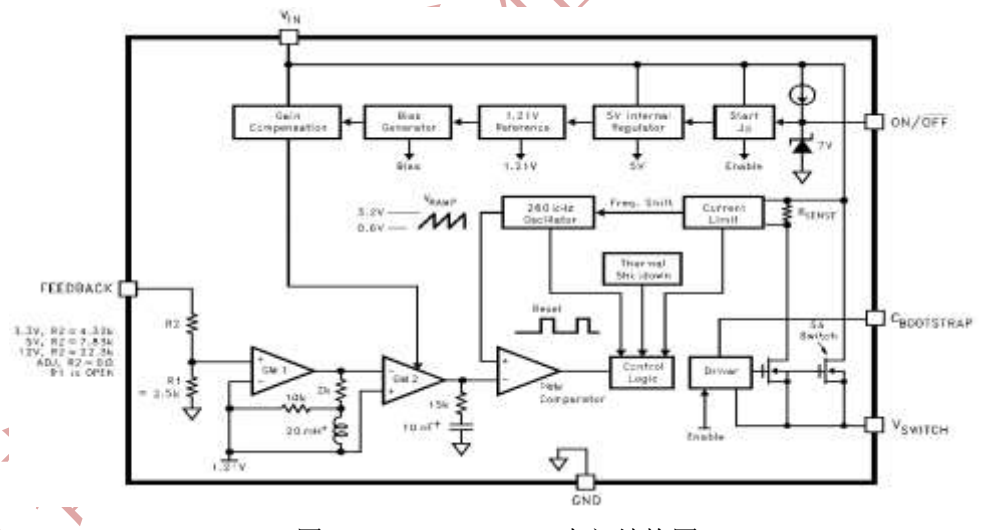


图 4.1 LM2678-ADJ 内部结构图



图 4.2 LM2678-ADJ 芯片管脚图

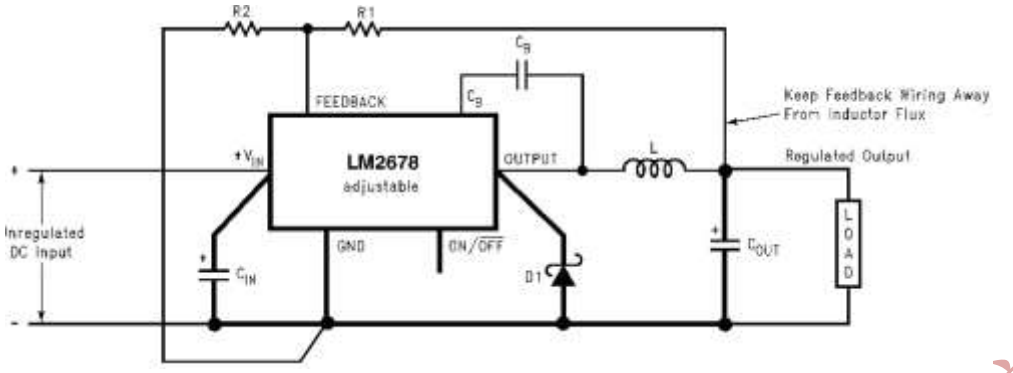


图 4.3 LM2678-ADJ 应用图

通过与其它品牌和型号方案采用 LM2678HV—ADJ（可调电压）单片开关降压稳压器作为功率器件。应用如图 4.1 所示，其内部含频率补偿电路和固定频率的振荡器，所需外围器件只有 4 个，且使用的为标准电感器，输出控制包括电流限制和热关闭，极大简化了电源设计，芯片自身稳定性较强，且成本较低。

4.2 电源电路元器件选择与参数计算

选择适当的 DC/DC 器件固然重要，但是一个完整的电源设计同时也必须有相配应的外围器件，在开关电源中一般需要肖特基二极管，高频电容、合适阻值及材料的电感、大功率均流电阻，输入输出滤波电路等，下面将详细对每个部分进行分析。

4.2.1 电感的选择与参数计算

电感的选择与分析：电感是开关电源中常用的元件也是最重要的元器件之一，由于它的电流、电压相位不同，所以一般来说损耗极小，具有很高的储能效率。电感常为储能元件，也常与电容一起用在输入滤波和输出滤波电路上（被称之为 LC 滤波电路），用来电流里的杂波。电感同时也被也被称之为“扼流圈”，其特点是流过其上的电流有“很大的惯性”。可以这么理解，由于磁通连续特性，电感上的电流必须是连续的，否则在电流断路的瞬间，在电感上将会产生很大的电压尖峰[25] [26]。

但是，电感为磁性元件，也存在有磁饱和这一问题。在一些情况下系统中允许电感饱和，也有的应用允许电感从一定电流值的时候开始进入饱和状态，当然很多情况下不允许电感出现饱和，这要求在具体线路中进行区分。

一般情况下，电感工作在“线性区”，此时电感值为一常数（C），且不随着端电压与电流而变化。但是，开关电源存在一个不可避免的问题，即电感的绕线将导致两个分布参数(也称为寄生参数)，1 .可避免的绕线电阻，2. 另与绕制工艺、材料有关的分布式杂散电容。杂散电容在低频时影响不大，但随频率的提高而渐显出来，当频率增长到某个值以上

首都师范大学信息工程学院

时，电感也许变成电容特性了。如果将杂散电容“集中”为一个电容，则从电感的等效电路可以看出在某一频率后所呈现的电容特性下面对电感进行一些参数分析计算。

1. 若电感 L 中通过的电流为 I 时，此时电感储存的能量为：

$$E = 0.5 * L * I^2 \tag{4.1}$$

2. 在一个开关电源的周期中，电感电流的变化即纹波电流峰峰值与电感两端电压的关系为：

$$V = (L * di) / dt \tag{4.2}$$

根据上式我们可得出，纹波的大小跟电感值有关。

3. 下面对电感的充放电过程进行简要的分析。

类似于电容的充放电过程一样，电感也有类似的充压和放压过程。不同于电容的是，电容上的电压与其电流的积分（安．秒）成正比，而与之相反的是对于电感来说它的电流与电压的积分（伏．秒）成正比，同时反向电压使得点流线性下降。

所以，准确的计算出电感的值对于选择适合的电感的电容以达到减小纹波来说至关重要。

降压型开关电源电感选择：

对于降压型开关电源选择电感时候，主要要注意到确定输入电压的范围（最大），输出电压，已经开关管的频率，器件的占空比，纹波电流等。在本电源设计中。

1. 输入电压大约在 18V~30V 之间。
2. LM2678-ADJ 的开关频率为 252KHZ。
3. 可调范围拟定在 5V~15V 之间（具体值由输入电压的高低决定），
4. 输出电流随负载而变化，大致维持在 2A~5A 之间。

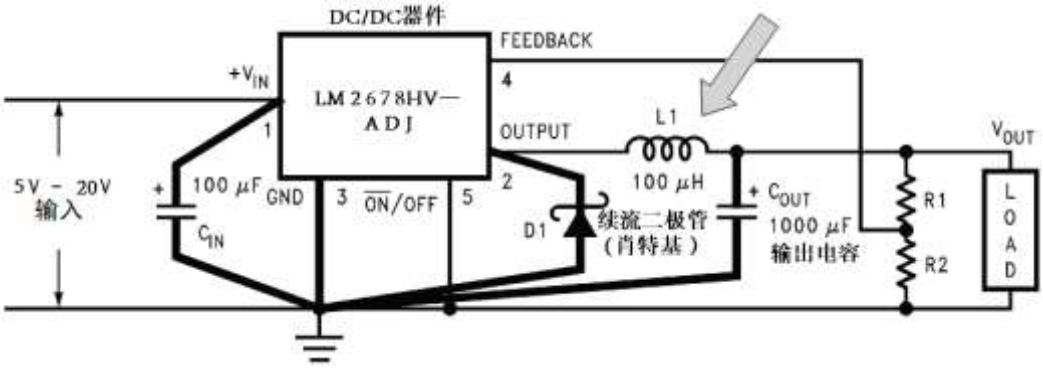


图 4.4 降压型开关电源电路图

在此设计中，成品的样机设置为，输入 18V（由 220V 市电经过变压器降至 18V）提供系统，并且可允许变压器输出的电压有±2V 的误差。

输入电压最大值 Vin(max)，输入为 18V，允许误差范围为 10%，因为供电为交流电，

不同于直流电，应取其有效值，所以最大值应该为：

$$V_{in(\max)} = 18V \times \sqrt{2} \times (1+10\%) = 25V \tag{4.3}$$

所得 $\boldsymbol{E \cdot T}$ 应为:

$$ET = (V_{in} - V_{out} - V_{sat}) \frac{V_{out} + V_D}{V_{in(\max)} - V_{sat} + V_D} \cdot \frac{1000}{260} (V \cdot \mu s) = 22.79V \cdot \mu s \tag{4.4}$$

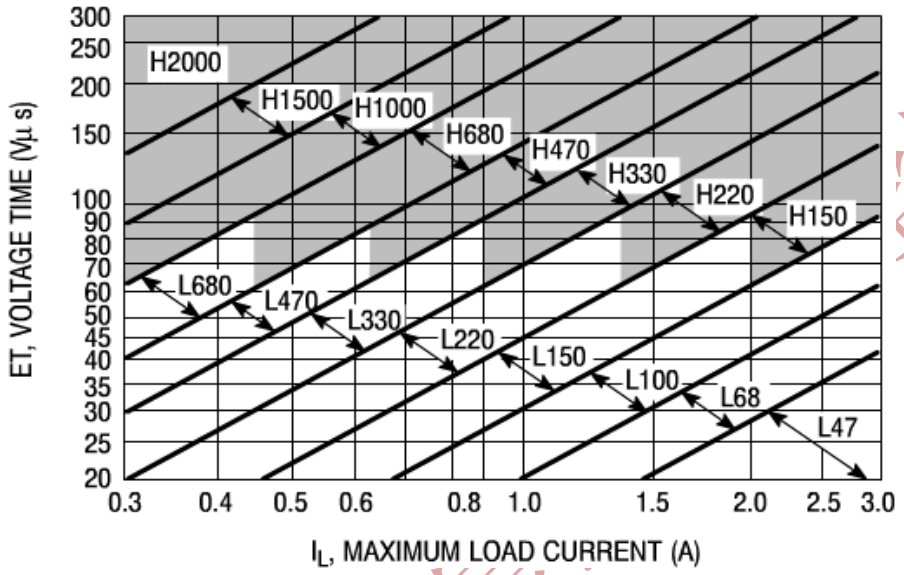


图 4.5 电感选择指南示意图

根据电感选择指南示意图 4.5，可知，若在电流设定为 2A，E · T 值为 22.79V · us 时，电感约为 47uH。

一般而言，电感的值越大，输出纹波就会越小小，但是并不意味着越大越好，因为过大的电感值会导致电源的动态响应相应变差，所以电感值的选择可以根据电路的具体应用要求来调整以达到理想效果。开关频率的提高可以让电感值变小，从而让电感的尺寸变小，这样可以有效的节省电路板空间，因此，目前的开关电源有往高频发展的趋势，以适应电子产品的体积越来越小的要求。

电感的材料：电感的分类：

1. 一般分类：固定电感、可变电感。

2. 按导磁体性质分类：空芯线圈、铁氧体线圈、铁芯线圈、铜芯线圈。

3. 结构分类：单层线圈、多层线圈、蜂房式线圈。

4. 工作频率分类：高频线圈、低频线圈。

经过各方面考虑如电路需要，成本等，最终本电源设计选用的高频磁芯电感。

4.2.2 外围元件选择与计算

1. 肖特基二极管的特性：肖特就二极管，又简称为肖特基势垒二极管 SBD（Schottky

Barrier Diode）是近年来间世的低功耗、大电流、超高速半导体器件。其反向恢复时间极短（可以小到几纳秒，正向导通压降仅 0.4V 左右，而整流电流却可达到几千安培。这些优良特性是快恢复二极管所无法比拟的。

2. 肖特基二极管结构：肖特基二极管在结构原理上与 PN 结二极管有很大区别，它的内部是由阳极金属（用钼或铝等材料制成的阻挡层）、二氧化硅（SiO2）电场消除材料、N-外延层（砷材料）、N 型硅基片、N+阴极层及阴极金属等构成，如图 22 所示。在 N 型基片和阳极金属之间形成肖特基势垒。当在肖特基势垒两端加上正向偏压时，肖特基势垒层变窄，其内阻变小，反之则变大。

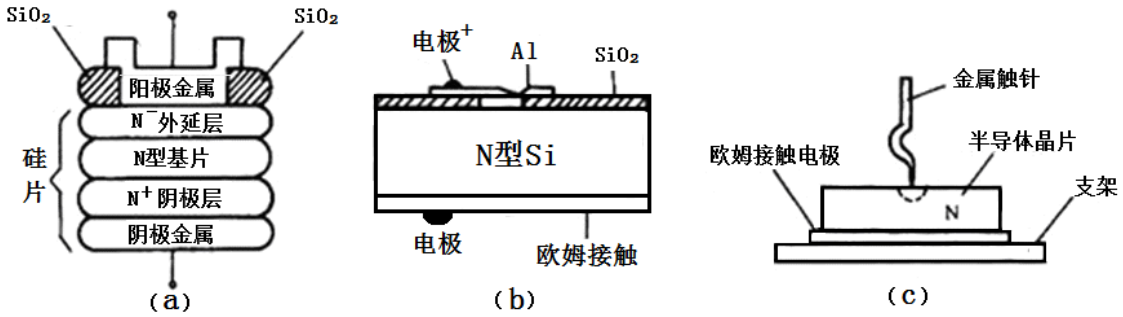


图 4.6 肖特基二极管结构图

肖特基二极管和快恢复二极管区别：前者的恢复时间比后者小一百倍左右，前者的反向恢复时间大约为几纳秒，更加适用于高频的的开关电源。前者的优点还有低功耗，大电流，超高速等，可获得较高的开关速度,同时也能得到较高的耐压，目前快恢复二极管主要应用在逆变电源中做整流元件。

方案选用肖特基二极管特性(D1)：一般来说，钳位二极管额定值必须比可能流经二极管的最大点流至少大 1.2 倍。而对于在系统中工作的二极管，对其最不利的工作条件是过载或输出短路。经过再三考虑，本设计选用肖特基二极管 CHN928。（max=10A，电压上限 40V）

3. 输出电容的选择（Cout）：对于开关电源来说，选择合适的电容是至关重要的，开关电源的频率远高于普通的频率，因此要选用高频电容才可。正常情况下市电 50Hz 工频电路中使用的普通电解电容器，其脉动电压频率为 100Hz，充放电时间是毫秒数量级。而开关电源中的输出滤波电解电容器，其锯齿波电压频率高达数十 kHz，甚至是数兆 Hz，这时电容量并不是其主要指标，衡量高频铝电解电容优劣的标准是“阻抗-频率”特性，要求在开关电源的工作频率内要有较低的等效阻抗，同时对于半导体器件工作时产生的高频尖峰信号具有良好的滤波作用。

普通的低频电解电容器在 10kHz 左右便开始无法满足开关电源的使用要求。而开关

电源专用的高频铝电解电容器有四个端子，正极铝片的两端分别引出作为电容器的正极，负极铝片的两端也分别引出作为负极。电流从四端电容的一个正端流入，经过电容内部，再从另一个正端流向负载，从负载返回的电流也从电容的一个负端流入，再从另一个负端流向电源负端。

为了得到稳定工作状态，和可接受的纹波电压，对比芯片资料手册说明，和实验室测试结果，最终选定采用 6800uF，50V 的电解电容。

4.2.3 电路设计要点及提高效率

回路设计中的注意事项：功率器件需搭配良好的外围器件以及合理的线路布局才能保证可靠工作。下面具体分为几点来谈。

1. 电感：电感工作电流不应超过其额定值，否则会导致电感饱和，电感饱和会使电感值迅速降低，其电流急剧增加，储存能量能力降低，甚至会导致开关管、二极管等器件的损毁，要注意不同电感的饱和特性。

2. 输入电容：为提高环路工作的稳定性，需要在输出端放置一个输出电容器来滤波，这个电容应该用很短的线连接在 LM2678 附近，一般来说使用标准铝电解电容就足够了，但是为了减小输出纹波保证环路的稳定性，要选用低 ESR（Equivalent Series Resistance ，等效串联电阻）电容。由于 ESR 取决于多种因素，如电容的值，电压额定值，电容器的物理尺寸和结构类型等，一般来说，低值低电压（10V 以下）电解电容的 ESR 比较高。用较低值的电容器（220uF~680uF）输出纹波电压典型值是(50mV~150mV),而采用较高值的电容能把输出纹波电压降低到(20mV~50mV)左右。

输出纹波电压=（ΔIIND（电感纹波电流振幅））COUT(ESR)　　(4.5)

为了进一步减小纹波电压，也可以把几个标准的电解电容器并联使用，或使用高级（高频，低压，低 ESR）电容。这种电容可以把纹波电压减小到 10mV 或 20mV，但是在连续工作方式中，电容器的 ESR 小于 0.03Ω，会引起电路工作不稳定，钽电容能有很低的 ESR。但是必须仔细计算它的值，因其具有良好的低温特性，可以把它和电解电容并联使用。

3. 肖特基二极管：需要二极管在开关截至时为电感电流提供回路，选用肖特基二极管，开关速度快，正向压降低。布线：如图 5 中所示输入电容，功率地，二极管，输出电容都以粗线画出，这些线尽量越短越好，并采用单点接地来尽可能的消除干扰。

4. 输出电压纹波和瞬态：开关电源的输出电压中一般会含有 1%左右的等于开关频率的矩形齿纹波，其峰点上还有一个短的电压尖峰。输出纹波电压主要是电压调整器锯齿纹波电流和输出电容 ESR 的乘积。电压尖峰的出现是因为快速的开关动作和输出滤波

首都师范大学信息工程学院

的电容器的寄生电感，为了减少电压尖峰，可以使用特殊的低电感电容，且电容器引线要尽量短。

5. 反馈连接：若系统采用 LM2678（不可调）其反馈端必须和开关电源输出端相连接。如果使用可调型（本系统中采用）应该将两个电位器接在 LM2678 器件附近，以免引起噪声。

6. 散热片设计与结温考虑：很多情况下，由于 LM2678 较高的效率所以不需要散热片就可以将结温保持在允许的范围内，若判定模块是否需要散热片需要从以下几个方面来考虑：

应用中的最大环境温度，最大允许结温如 LM2575 为 120℃,所以在实际应用过程中应安全起见选择有可能出现的最大温度低约 20%左右的温度

LM2678 的总功率耗散可用下式求出：

$$P_D = (v_{IN}(I_Q) + V_O / V_{IN})(I_{LOAD})(V_{SAT}) \quad (4.6)$$

其中 IQ 为静态电流和 VSAT 为饱和电压，VIN 为施加的最小输入电压，VO 为经过调整的输出电压，VLOAD 是负载电流。未使用散热器时，结温由下式所决定：

$$\Delta T_J = (P_D) \bullet (\theta_{JA}) \quad (4.7)$$

把结温和最大环境温度相加得出实际工作温度：

$$T_J = \Delta T_J + T_A \quad (4.8)$$

经过计算，若此电源满功率工作的情况下，其 **TJ** 值大于其最大允许结温值，且此系统中为 3 模块供电，所以采用厚铝片来达到散热的效果，并在旁边结合风扇进行散热。

4.3 基于最大电流均流控制法的并联设计

根据上述对常用的并联结构电源均流控制方法的分析，结合目前主流的均流设计方法，考虑到均流精确度，电路复杂度，设计制作难度等方面，最终本方案确定以最大电流均流法为系统的核心控制方法。

4.3.1 并联结构电源组成及样机技术指标

对于一个冗余并联开关供电系统本设计大致分为以下几大部分：

1. 主 DC/DC 集成稳压模块（LM2678-ADJ 稳压器件，包括备份部分）。
2. 配套电源外围电路（电阻电容电感二极管等）。
3. A/D 及 D/A 摸设计，显示及控制模块。
4. 均流控制模块、电压电流信号采集、反馈模块。

首都师范大学信息工程学院

5. 全局电流电压监控模块。

6. 系统保护模块（过热，过流等以为情况）。

样机主要技术参数指标：

1. 功率：单独 DC/DC 器件为上线功率设定 40W，整体为 80W。

2. 效率：随着电压输出值的变化会有略微变化，整体至少保证≥78%。

3. 输出电压：样机以输出 8V 为例（实际可调），误差≤4% 。

4. 样机输出电压建议控制范围：5(V)——15（V）。

5. 大功率电阻模拟电器：大功率负载至少≥2Ω，滑动变阻器 2Ω—20Ω

6. 功率器件开关频率约等于 252K（HZ）。

7. 输出电压调整率：用调压器从 220V 降至 200V 以模仿用电高峰期时候的电压供应不足。结果表明 220V~210V 过程中输出电压基本稳定（小幅波动），210V 以下时，输出电压有明显下降。

8. 均流：两路电路并联供电，两路电流最大误差控制在≤5%以内。

4.3.2 均流控制主回路设计

控制主回路电路结构：依据上述要求，设计了基于最大电流均流控制法的电路结构，如图 4.7 所示为并联电源控制主回路电路结构示意图：

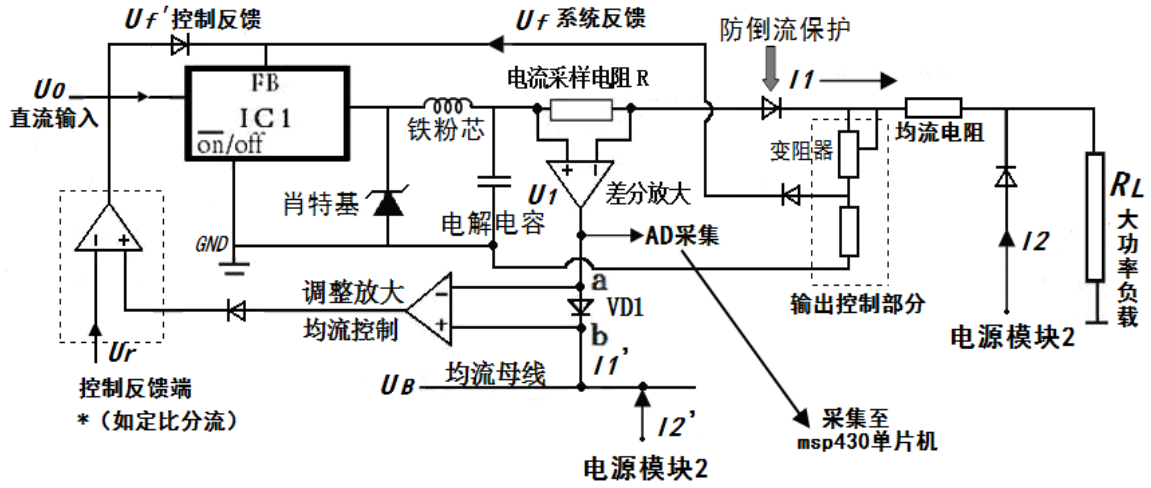


图 4.7 并联电源控制主回电路结构示意图

下面来详细解释此结构，首先在集成开关稳压器 LM2678-adj 的输出端串连 0.1Ω 的高精度采样电阻 R，进行电流采样，通过此过程来将电流信号转换成所需的电压信号，在此过程中，集成算放大器的电阻值要满足 R1=R2=R3=R4,这样，运放输出的电压与流经采样电阻的电流成正比[27] [28]。

当集成稳压器的电流经过运算放大器转化成为电压信号之后经过放大滤波　并经过

一个二极管接到均流控制母线上。此时，若每个模块的电流均衡，则每个流经二极管通向均流控制母线的电压信号大小均相同，所以此时各个二极管均截止，母线电压为平均电压，在情况下 2 个模块同时并联正常供电（负载均衡）。若此时模块二(I2)的电流突然增大，则相对应采样得到的模块一的电压则 UI1'< UI2'的电压，由于电压差的原因，此时 VD2 由截止状态变为导通状态，又由于二极管的单项导通性，母线电压根据较大的模块的电压信号调整，故变为 UB=UI2'。又因 UI2' >UI1',所以 VD1 截止，模块二成为主模块（最大模块均流），模块一通过 b 点将电压信号传至均流控制器，此时，均流控制器比较模块一的电压 Ua 和母线电压 UB 来进行调整放大，反馈至 LM2678 的 FB 端。于此同时反馈电压 Uf 流经二极管与均流反馈信号汇合，两个反馈信号综合后再与稳压器内部的基准电压 Uref 进行误差放大，使模块一的输出电压增加，导致电流增加，并最终达到均流控制的目的。

电流信号采样电路：为了精确的获得主回路中电流的值大小，设计了以下电路来满足这一需求，如图 4.8 所示。

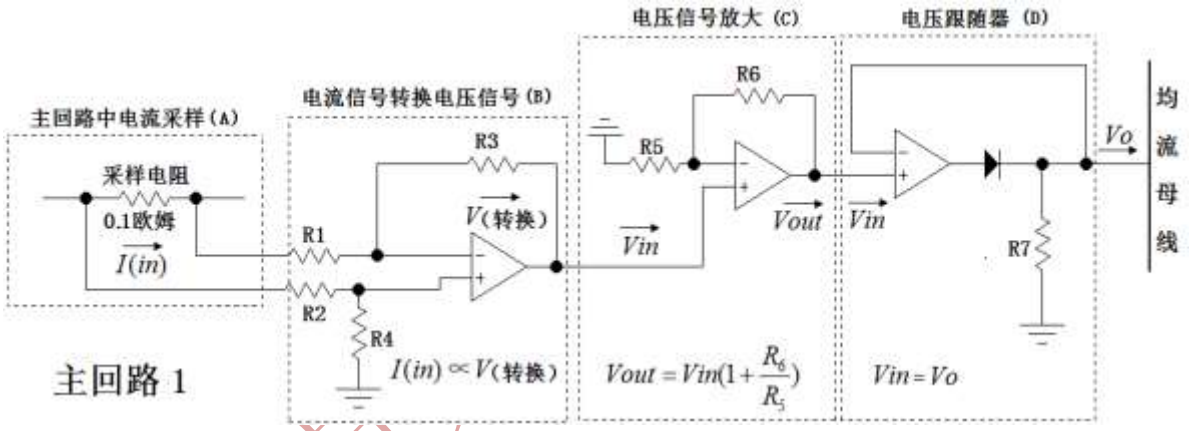


图 4.8 电流信号采集转换电路

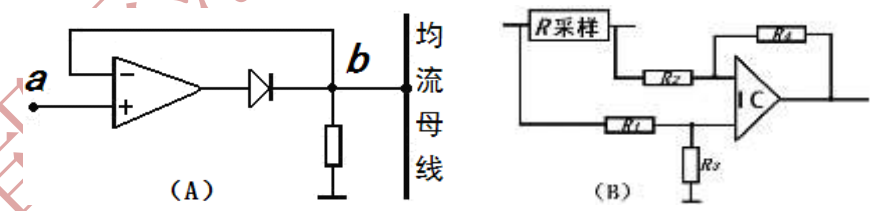


图 4.9 电压跟随器与电流采集模块

如图 4.8 所示，此电路分为电流信号转换成电压信号、电压信号放大、电压跟随器这四大部分。首先，在主回路中串联 0.1 欧大功率电阻进行采样，由于在电阻两边存在压差，所以在图中 25（B）中令 R1=R2=R3=R4 即可得到与实际电流信号成正比例的电压信号值。

但是此时的电压信号较为微弱所以需要在图中 24（C）的部分将此信号放大，其放大倍数关系图中以给出，即：Vout=Vin(1+R6/R5)，此时以放大的模块需连接到均流母线，但是由于普通的二极管两端存在有正向压降，所以对均流母线上的电压精度影响较大，所以

在电压信号放大之后要通过连接电压跟随器来解决正向压降这一问题。如图 4.9 所示，为电压跟随器与电流采集模块示意图[30]。

均流控制电路：当经过处理过的反映电流值的电压信号通过电压跟随器连接到均流母线上时，需经过均流控制电路来实现均流，图如 4.10 均流控制部分电路图所示[31] [32]：

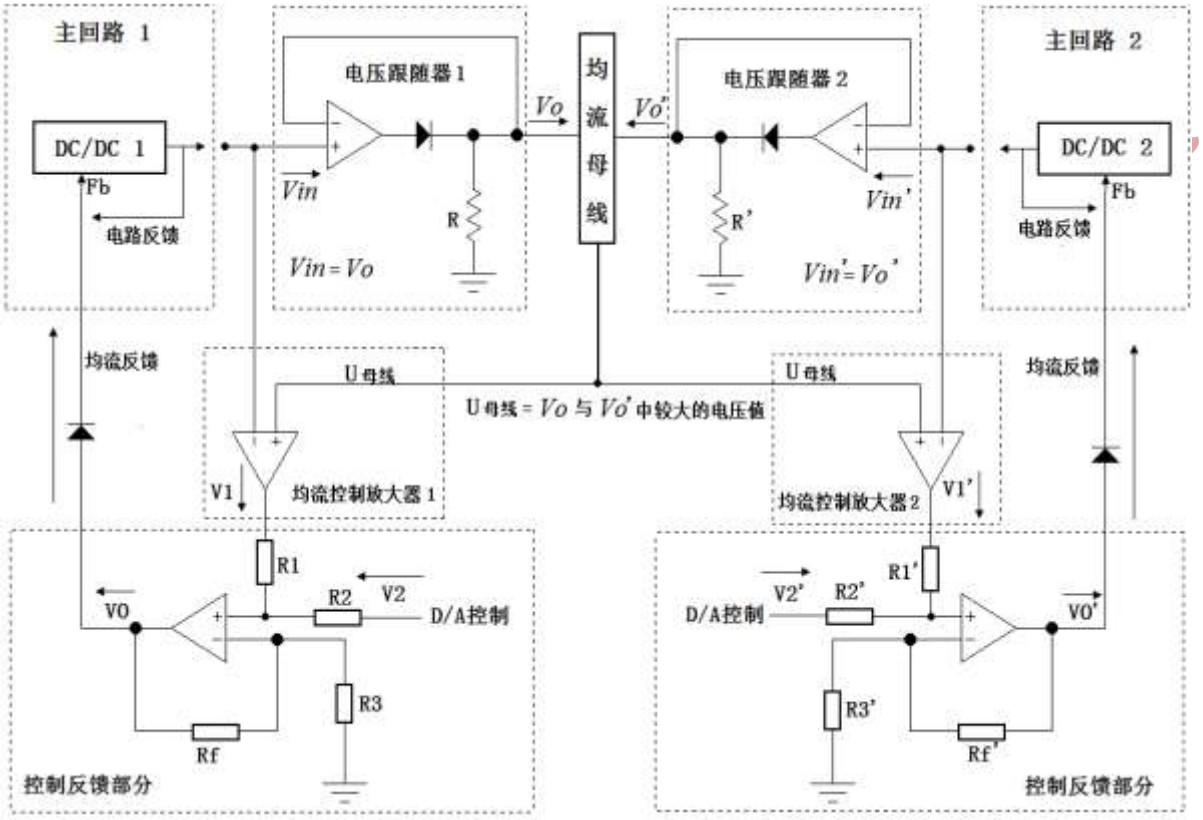


图 4.10 均流控制电路图

详细的说明整体均流控制系统主回路中的几个重要点。

1. A/D 采集点：图中经过运算放大器产生的电压（电流）信号，非为两用，其一作为均流控制信号提供到均流控制总线，同时另一方面通过分压滤波处理后传输到 msp430 单片机的 p6 口，以满足总体系统的监控。本系统中 ADC 未采用单独芯片，由于 msp430F14X 系列具有片内置的高精度 12—bit AD 转换，所以直接将电路中采集到的电压信号传入的 P6.0 至 P6.2 口即可，需要注意的是由于电路中采集的电压较大需要在接入单片机之前进行分压，以确保单片机不会被烧毁。

2. 控制反馈端：经过均流控制器输出的信号若直接反馈至集成稳压器件的 Fb 端，其效果为通过条件功率器件的输出电压来进行电流的均流控制，若在此叠加进人为控制信号 Ur(如经过单片机控制过的 D/A 信号)，则可人为控制反馈信号，以达到定比分流的目的，使得在不同的情况下由 DC/DC1 和 DC/DC2 承担不同的电流。

3. 电压跟随器：系统每个模块通过一个二极管来连接到均流控制总线（Bus line）但

实际中没有理想的二极管，在传递电流信号的同时二极管两边也会同时产生正向压降，这样会对均流控制精度有较大的影响，须要同时采用所示的电压跟随器来减小影响。

4. 输出控制部分：因为本设计采用的是据 LM2678-ADJ 可调输出电压稳压器，所以在电路中采用可调设计，根据其电压输出计算公式：

$$V_{OUT}=V_{REF}(1+\frac{R_2}{R_1}) \quad \text{可得：} \quad R_2=R_1(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}}-1) \tag{4.9}$$

REF=1.236V

所以此处采用高精度的滑动变阻器和一普通碳膜电阻串联，从中取得电压控制信号来调整稳压器的输出电压。

5. 电源电路：电源来自 220V 市电，经过变压器降压，降至输出 18V，经过 RS508 集成整流桥整流，再经过电容滤波后，电压升至≈24V（空载）。同时也将整流之后的直流电源供给三端集成稳压器 7805（5V），7905(-5V), 7815(+15V), 7915(-15V), 及其 LM1117 为集成运算放大器，msp430 单片机供电，构成一个完整的供电系统。

6. DAC 部分：若在此系统中实现电流的定比分流功能，需引入 DA 转换模块，拟采用 DAC5571 芯片，此款芯片的通信模式采用 IIC 结构（即单总线）电路结构十分简单，且芯片小巧，8 位精度高速 DA。

电路图如 4.11 下所示。

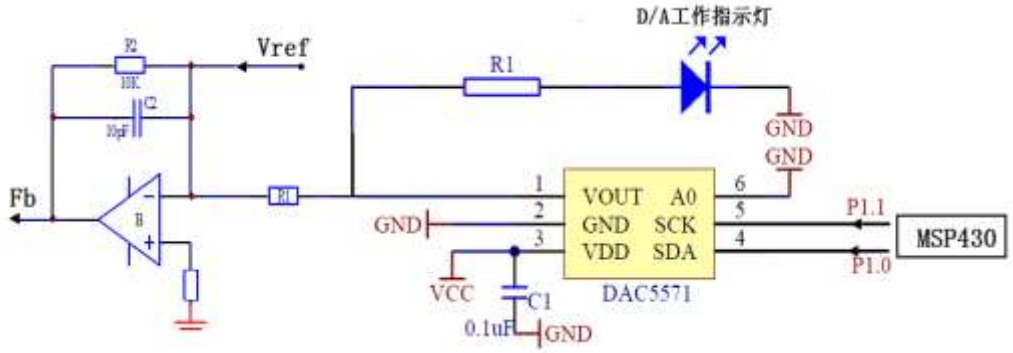


图 4.11　vDAC 定比分流反馈控制电路

需注意因为基于 IIC 总线的要求，所以在上述电路原理图中的 P1.1 和 P1.0 出要分别搭配两个上拉电阻连接到 VCC。

4.3.3 系统供电设计

在并联电源设计中，采用的集成运算放大器，报警器，单片机，液晶等均需要供电，所以需要完整的供电系统。下面从前置降压整流滤波电路，三端稳压模块，和整体供电示意图具体介绍：

前置变压整流部分：由于直接从 220V 市电取电，所以需要前置降压整流滤波部分。方案选用 220V~18V 变压器。由于输入为交流电，所以电压随时间从零到最大值不断变化，则其有效值低于其峰值，大约为峰值的 0.707 倍，所以意味着市电中所取得的 220V 电压，其峰值应为 220V/0.707≈311V,经过整流桥 RS508 后，此时电压与未整流一样仍从零开始不断变化，但是在滤波电容的作用下，当　电压瞬时值大于某个值时，电源不仅向负载供电，同时也向电容中储存能量，当电压瞬时值小于时，电容开始放电，使得电路中负载的电压与电容器两端的电压基本相等。所以在此设计中由于变压器之后为为输出 18V，经过整流滤波后理论值应为 18V/0.707≈25V,实际上输出值大约为 24V 左右。下图为整流滤波电路图 28 及其整体前置供电部分示意图 4.13[35]。

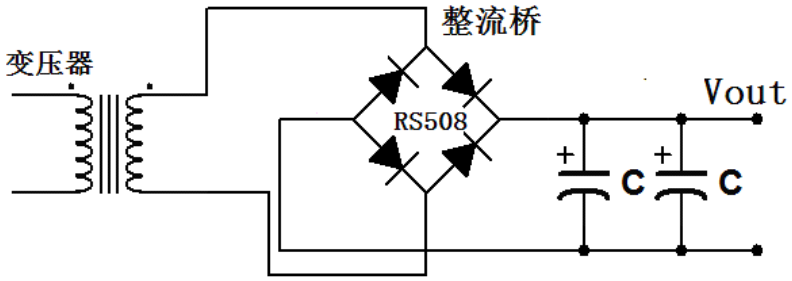


图 4.12 前置变压整流滤波部分电路图

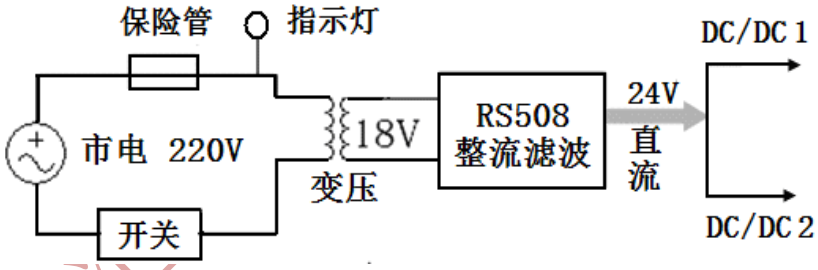


图 4.13 前置供电模块示意图

注：在变压器之前为了保证安全，接入了保险管，按钮开关等。

稳压器件部分：上述部分的输出一路直接为 DC/DC 电源模块供电，一路则为周边器件（如均流控制部分，风扇模块，显示部分，单片机最小系统等）这些模块芯片需要的电压大致分为 (3.3V,±5V,±15V) 所以设计一个模块为分压模块，这个模块里集中了 LM78/79(05,15,1117 等集成三端稳压器件)，经过此模块的降压处理便可满足系统内不同电压的需求。电路下图 4.14 所示：

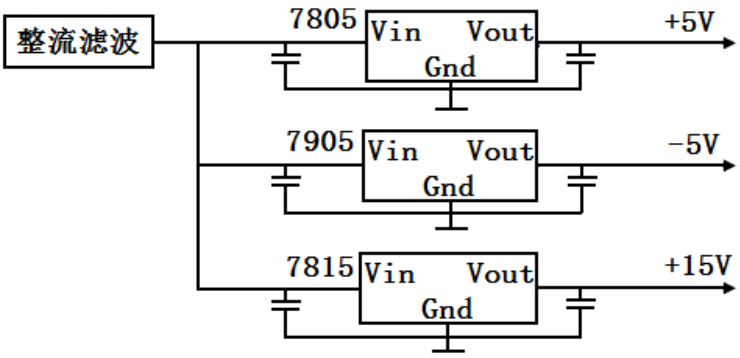


图 4.14 稳压模块电路图

综合上述所示，将个部分综合起来，就构成了下图中所示的整体供电系统，系统供电示意图如 4.15 所示：

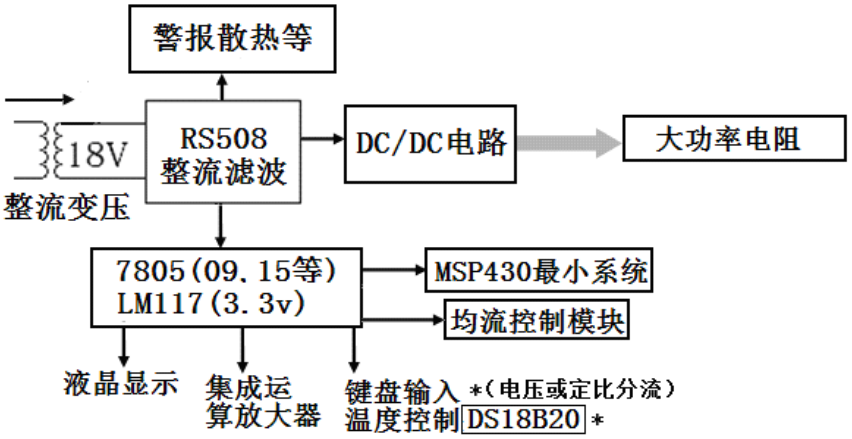


图 4.15 整体供电系统示意图

4.4 冗余备份模块设计

前文已论述过，采用冗余结果对提高系统的可靠度有着至关重要的意义，针对此电源设计，采用性价比较高的 N+1（2+1）模式冗余。即 2 模块在系统中为主要模块为系统供电，另一完全相同的模块作为备份模块。

4.4.1 2+1 备份结构

二分之一功率备份：对于电源模块来说，越大的功率其成本也会随之增大，且大功率的模块若失效，对系统的影响也较大。在开关电源中，电源的效率随着负载率上升而上升，但是当超过一定限度时效率便会下降。如图 4.16 所示为一 24V/10A 开关电源模块的负载率与效率关系曲线。

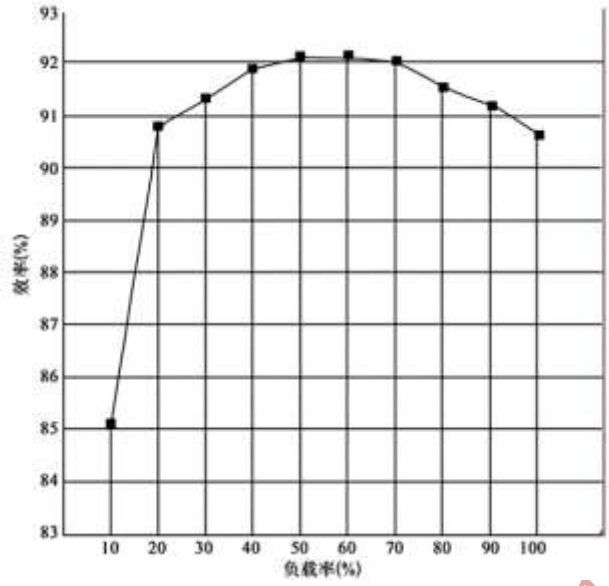


图 4.16 负载率与效率关系曲线

所以本设计中，假设用户的电器功率为 80W，而两电源模块分别提供 40W 的功率，备份模块也提供 40W 的功率，即二分之一功率备份。好处在于每个模块无需承担全部电量，这样若出现模块失效的情况时，至少有模块还可继续进行维持供电，以满足在备份模块介入供电之间这一供电“盲期”，即保证了电源系统的可靠性，同时又使得单个电源模块的负载率得到了良好的控制。

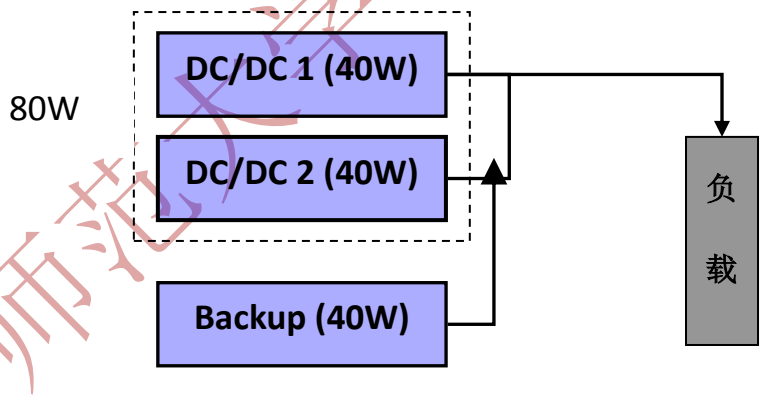


图 4.17 2+1 型冗余供电模式示意图

4.4.2 备份模块与故障模块的切换

在系统正常运行的情况下，由 msp430 单片机进行总体状况监控。对各个支路电流电压循环监测。 若系统中任意主模块出现问题导致短论，断路等现象，会体现在 A/D 端口并由单片机检测出来，所以，在事先在程序中设置好的系统可允许的过流过压的范围（如若输出值设定为 8V，则允许范围可设定在 6.5~9.5V 之间），若误差出现在范围内则依靠均流控制模块自行调整（或引入 D/A 反馈人工调整），若发现出现很大的电压或电流波动，则由单片机发出指令驱动备份模块的 ON/OFF 控制端所接入的电平由低电平转化为高电平

首都师范大学信息工程学院

备份的模块介入供电，同时相应的出现问题的模块 ON/OFF 控制端口由高电平转至低电平意味着此故障模块退出供电系统。

4.5 整体电路结构及原理图与系统保护和效率提高

1. 为了保护电源系统不受意外情况而损坏，设计中采用了一下几种方法来保护电路同时也使得电源系统的效率提高。

①. 防倒流保护：即使有均流控制的存在，但是由于可能会产生意外的情况导致模块间的电压不同，最终出现倒流，芯片烧毁等严重现象，所以要在多模块汇总前串连如具有反向击穿电压较高的大电流二极管。

②. 输入端滤波：由于输出电流中含有杂波，本设计中采用简单的 L-C 滤波电路加在输出端来消除杂波，可将原有的输出纹波降到十分之一。

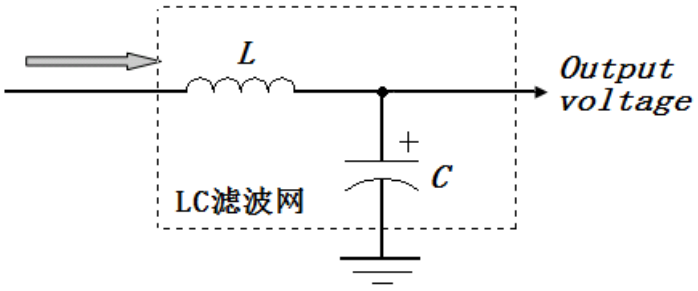


图 4.18 输出纹波滤波器

③. 假负载技术：对于开关电源来说忌讳空载运行，而调试的过程中往往会出现未连接负载的情况，针对此情况本设计采用假负载的方式可以保证每一路在负载开路时保持约 100mA 的输出工作电流，以避免开关稳压电源输出端不能开路的弊病。通过这个方法可以有效的保护电源。

④. 采用单点接地焊接：为了保证高频开关电源的工作正常，减小外界对其的电磁干扰以便于实现双路电源的并联供电，又因在高频的情况下，任何不必要的冗余导线均可成为电阻，所以电路采用单点接地法，并结合空间结构设计，尽可能的保证工作稳定。

⑤. 线路布局：

（1）、 由于主模块 DC-DC 中存在电感，快速切换电流会引起电压瞬变，因此在电路布局的开始就考虑了电感和接地回路最小，并尽可能的单点接地。此模块主要为模拟电路，采用大面积铺地。

（2）、 需注意芯片和开关管需要产热，且电容的引线不能太长，尤其是高频旁路不能有较多的引线。所以在有功率器件的地方要配有大面积的散热片，并且若需要的话可以

结合风扇制冷。

2. 整体电路结构图：综上所述，设计并制作了基于最大电流均流控制法的三路（一路为备份模块）的冗余并联开关电源，系统由 220V 市电直接供电，通过变压器降至 18V 为整体电源供电。整体分为几大部分:

①、变压器整流滤波部分。

②、稳压模块部分，为单片机最小系统及电路中各个模块供电。

③、单片机最小系统，为控制核心。

④、1602 液晶显示部分。

⑤、18B20 温度传感部分、风扇模块便于散热。

⑥、输入输出滤波消抖。

⑦、均流控制部分。

⑧、整体系统过流、开关保护部分。

⑨、键盘输入部分。

⑩、D/A 转换反馈控制部分。

整体电路结构示意图，如图 4.19 所示：

首都师范大学信息工程学院

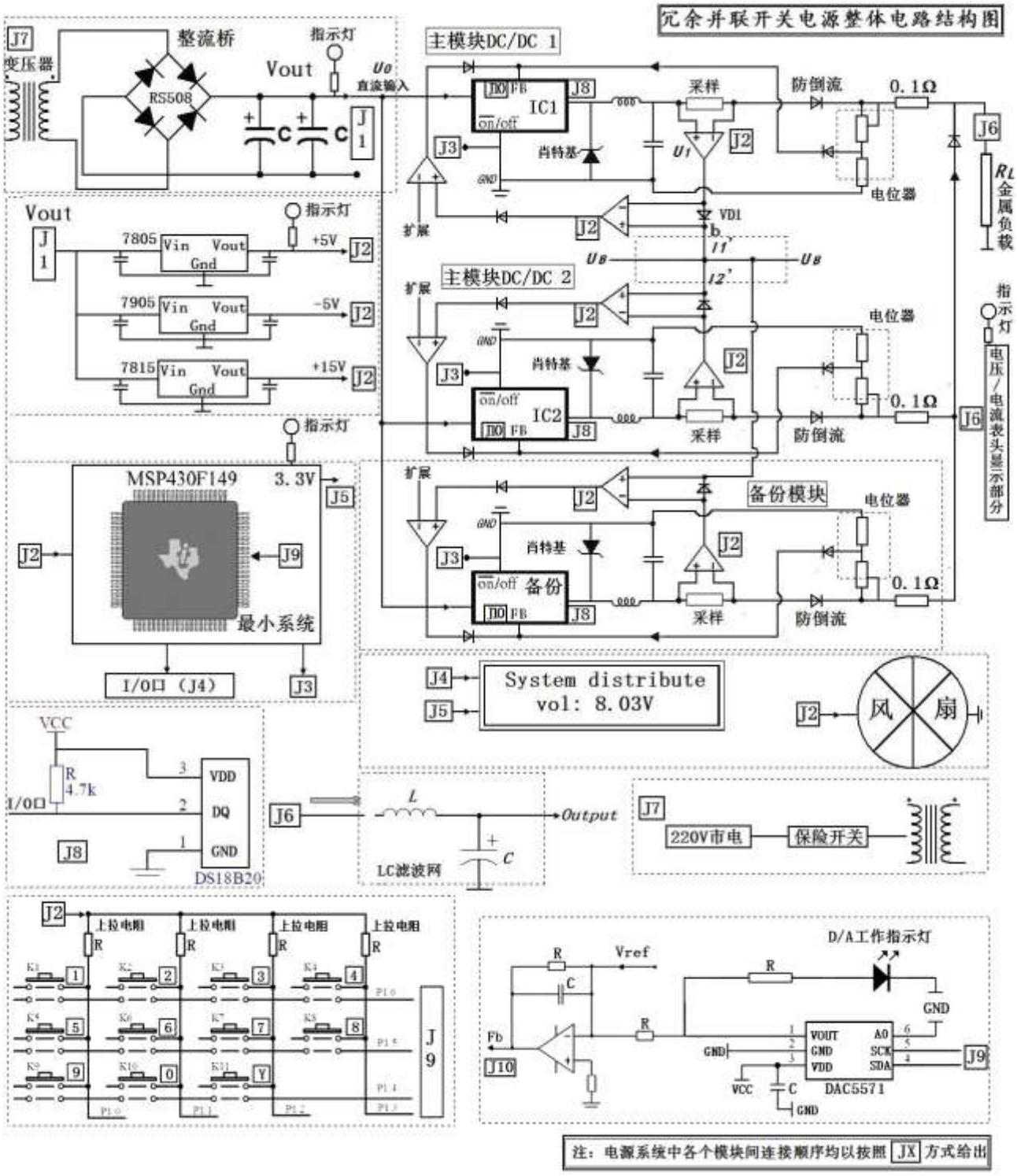


图 4.19 整体电路结构示意图

下图 4.20 为 MSP430F149 单片机最小系统电路原理图，此设计包含有 LM1117 稳压器件为 MSP430F149 单片机提供 3.3V 稳定电压，JTAG 下载端，复位电路，晶振电路，I/O 扩展槽以方便与均流系统及功率器件通信。

Protell 原理图如图 4.20 所示。

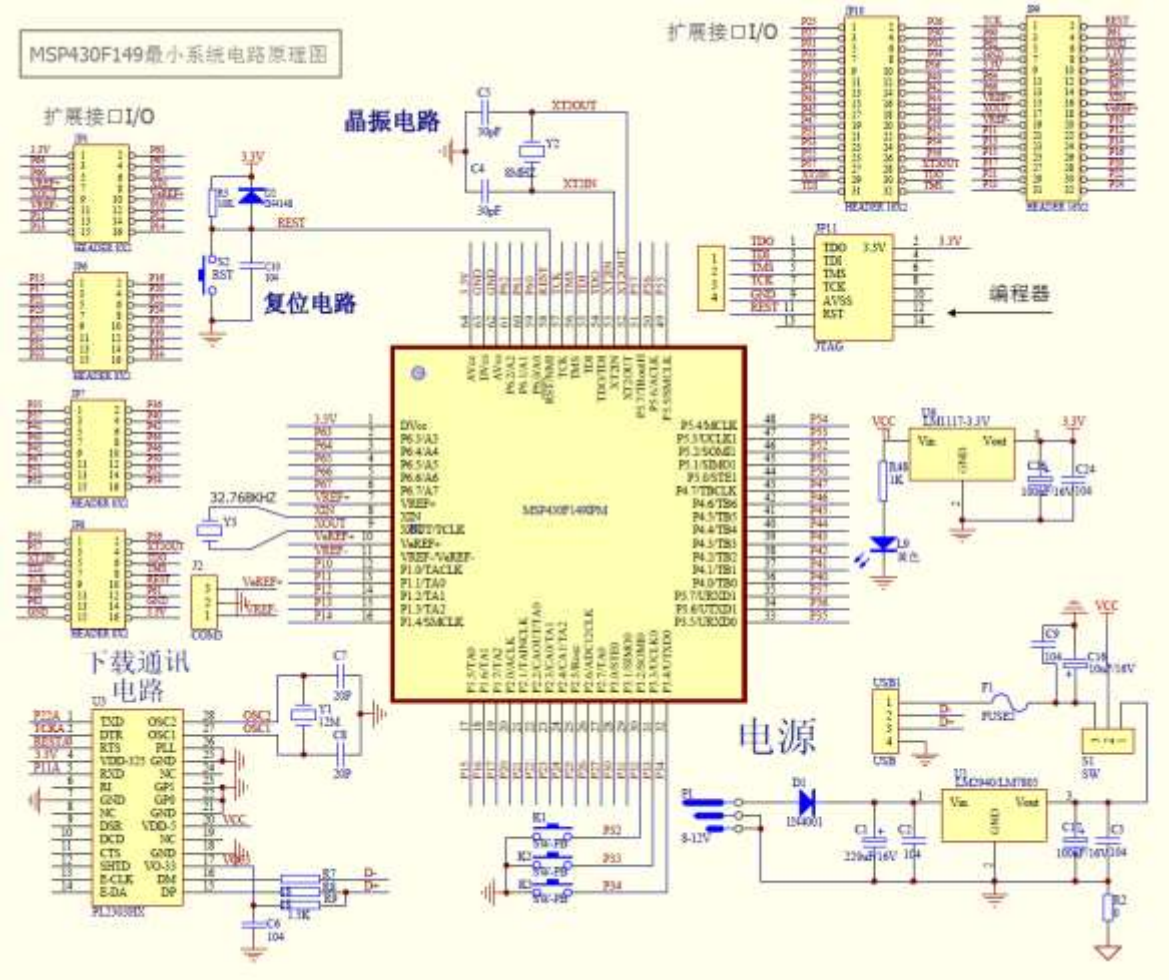


图 4.20 单片机最小系统电路原理图

首都师范大学

第五章 软件控制程序设计与样机实验结果评估

在本章中，详细阐述了此设计的软件控制部分的工作方法和程序流程图，并且给出了总体的并联电源系统框图。

最后通过样机测试，对比均流控制前与均流控制后的效果、并模拟某主模块的故障来唤醒备用模块接入系统供电来证明了此设计的合理和优势。

5.1 软件程序框图及设计流程

根据上述硬件设计描述，设计出了系统的软件程序控制流程框图，如图 5.1 所示：

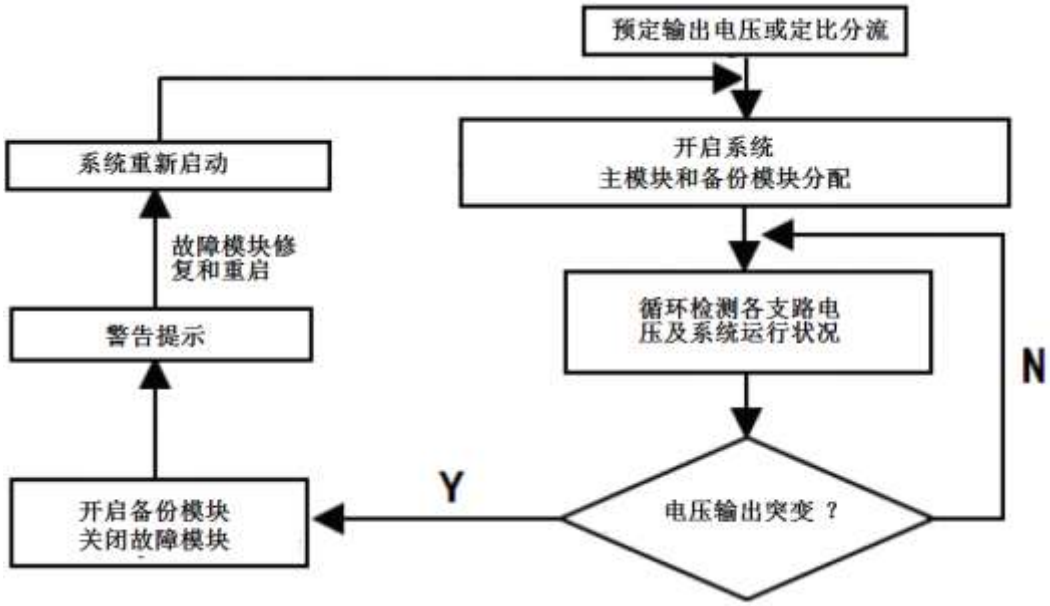


图 5.1 软件控制程序流程图

为了保持稳定的持续性供电，系统采用 N+1 冗余结构，特点为 N 个模块并联供电，其中任意一模块出现故障不影响系统运行，同时由单片机检测并发出指令，使备用模块启动，故障模块退出[36]。

此软件流程具体运行过程为：以 3 个模块为例进行 2+1 结构设计,其中“2”为输出功率所需的模块数，“1”为备份模块的数量。控制程序设计框图如图 37 所示，正常情况下，系统上电工作，根据程序 LM2678 的开关控制端对应的 I/O 保持低电平，此时因开关端为低电平有效，正常工作。备份模块所对应的 I/O 口输出高电平，使得备份模块处于接入但不工作状态（即为热备份）。由于 LM2678 具有 TTL 关闭能力，备份模块处于低功耗备用状态。

此时主 1、主 2 模块并联均流供电，MCU 处于监控状态，循环监测各支路的电压值。

当主模块 1 或 2 出现故障（变化超出允许变化范围），单片机检测到支路电压突变，备份模块的开关端对应的 I/O 口输出低电平，备份模块介入供电，故障模块对应的 I/O 口接入高电平，退出供电，冗余备份模式如下图 38。此过程中由于单片机响应速度很快，同时备份模块已处于接入状态，启动迅速，出现电压波动很小，系统基本平稳运行[38] [39]。

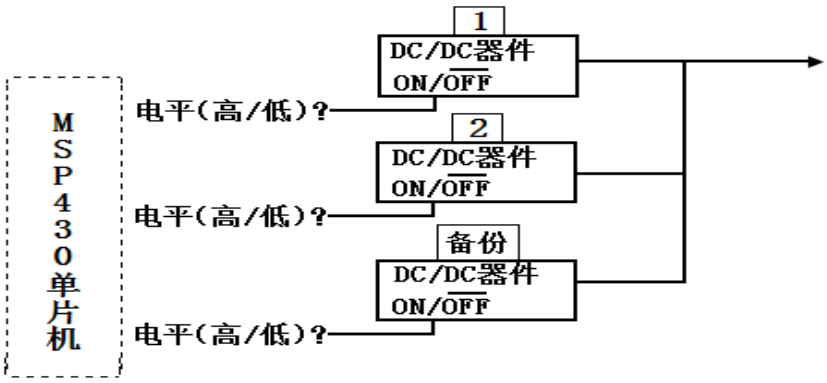


图 5.2 冗余备份模式示意图

5.1.1 软件编译环境及工程配置

本设计采用的单片机为 TI 公司的 MSP430 型单片机，是一款超低功耗并较为先进的单片机，很适合应用于需要长时间工作的场合，在 MSP430 系列中有很多种型号，它们是由一些基本功能的模块按照不同的应用目标组合而成。MSP430 系列的 CPU 采用 16—bit 精简指令系统，集成有 16 位寄存器和常数发生器，因而能发挥最高的代码率。它同时采用了数字振荡器（DCO），从而使得冲低功耗模式到换新模式的转换时间小于 6 微秒[42] [43]。

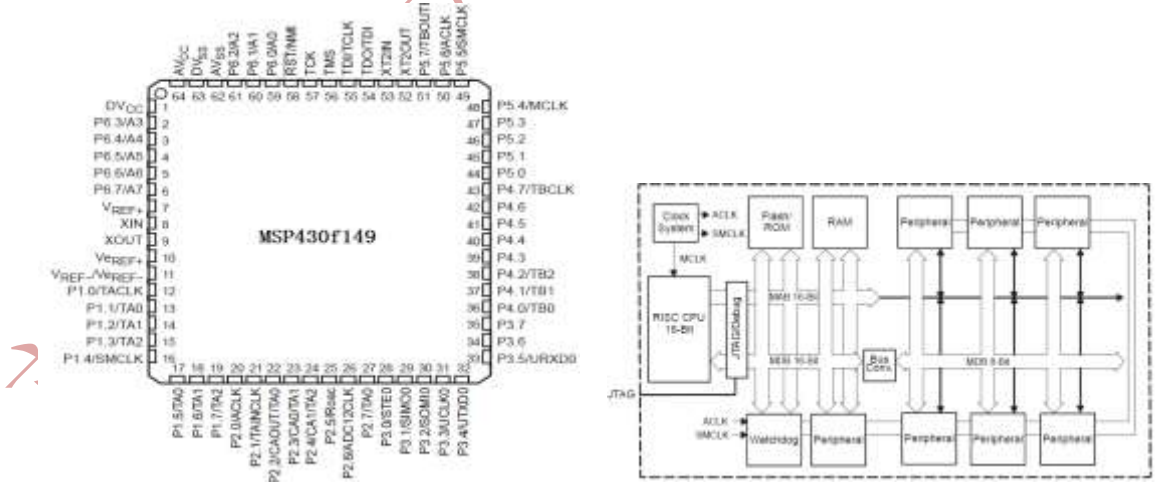
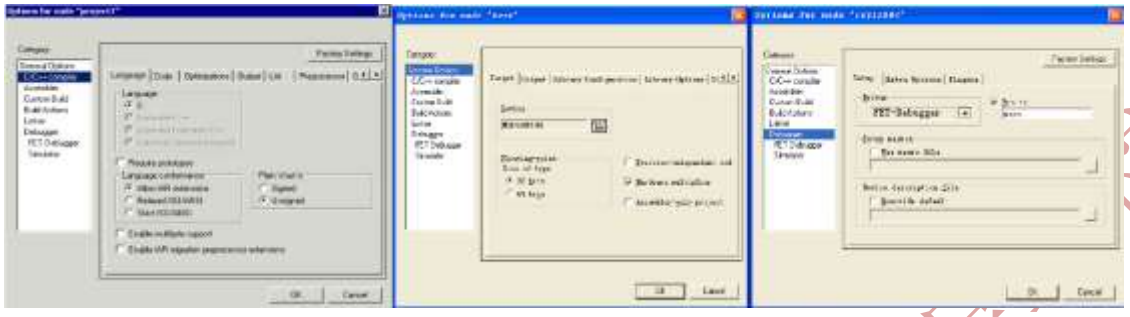


图 5.3 图为 MSP430F149 芯片示意图与内部框图

在本系统的 C 语言编译环境采用 IAR 软件。IAR Systems 是全球领先的嵌入式系统开发工具和服务的供应商。嵌入式系统的设计、开发和测试的每一个阶段，包括：带有 C/C++ 编译器和调试器的集成开发环境(IDE)、实时操作系统和中间件、开发套件、硬件仿真器以

及状态机建模工具。

IAR 编译开发软件以其强大的通用性，良好的人机交互界面，多功能的调试工具，方便的使用方法被广泛应用于技术人员的开发，包括对 MSP430. ARM,等均有良好的支持。下面具体介绍下相应的环境配置[44]。



1　　2　　3

图 5.4 编译环境工程配置步骤

大致过程如下：

1、创建一个新的项目，选择 Project>Create New Project。选择 Empty project。

2、选择 File>Save Workspace，将当前的工作空间(Workspace)保存，以后直接打开工作空间就可以了。系统会为每个 Workspace 单独保存一套配置信息。

3、需要设置项目选项(Project Options)。选择 Project>Options 或者单击右键选择 Options，可以看到一个对话框，如图 40(1)。

4、单击 Device 下方文本框右侧的图标按钮，本系统选择 msp430f149，此时可以看到如图 40(2)所示的画面。

5、第二步，单击 Category 下面的 Debugger，看到如图 40(3)所示的画面。单击 Driver 选择 FET Debugger 后，通过仿真器将 PC 上的软件与开发板上的 MCU 进行连接，然后就可以进行硬件仿真了。

6、单击选择 Texas Instrument LPT-IF，如图 5.4(3)所示。然后单击“OK”就完成了设置。

首都师范大学信息工程学院

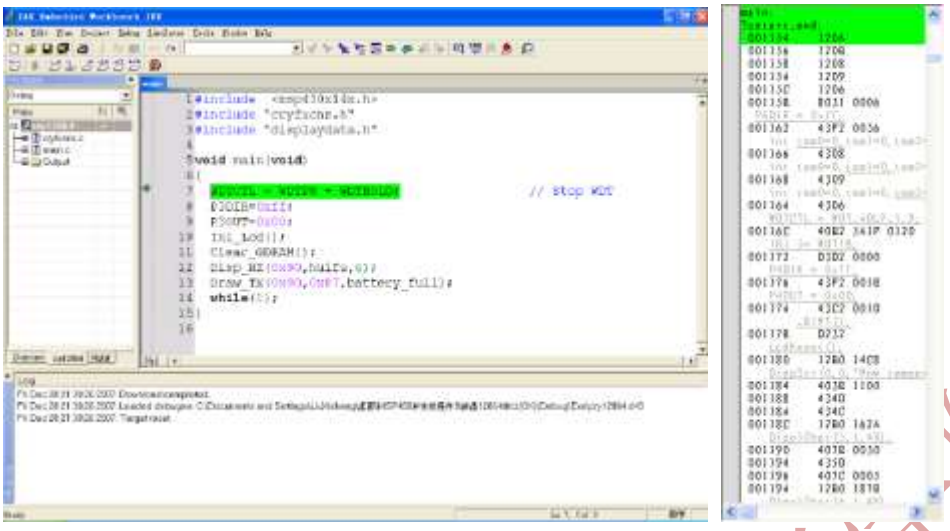


图 5.5 全速运行程序图

当程序编写成功后，点击运行，并且全速仿真（GO），即可实现代码下载硬件电路仿真验证。

5.1.2 程序主要模块设计

上述控制程序由 C 语言编写。主程序中主要分为初始配置，时钟配置，ADC 转换，DAC 转换，1602 液晶显示，I/O 口电平控制，低功耗 LMP 等[45] [46]。

ADC 部分：未采用片外 AD 芯片，而是直接采用 MSP430F149 单片机内部的 12 位 ADC 转换功能。该 ADC 模块将模拟的电压转换成为 12-bit 的数字值贮存起来，在这个模块中采用了两个参考电平（VR 和 VR-）来明确高低电平的变化，最终转换成的 NADC 最大值的输出（0FFFh）取决于输入的信号电压是否等同或高于参考电压 VR+，或者小于等于 VR-。所以，则有电压转换为数字的公式：

$$N_{ADC} = 4095 \times \frac{V_{in} - V_{R-}}{V_{R+} - V_{R-}} \tag{5.1}$$

由于在 ADC 采样过程中，采集到的 N*ADC* 值不一定每一次均准确，所以在此中断函数中求 32 次平均值，相当于做了一次平滑滤波以减小误差，此程序采用的是 ADC12 寄存器的多通道多次转换，最终将求的值传送到液晶模块去输出。

在此在本系统的循环检测过程需要对 P6.0、6.1、6.2 三路端口进行循环采样，所以需要将所采集的值储存在 ADC12MEM0, ADC12MEM1，ADC12MEM2 三个寄存器中，之后对每一路采集到的电压进行平滑滤波（取平均值），若发现某一路出现电压突变单片机将控制此故障模块退出同时开启备份模块（之前可通过矩阵键盘设置故障值），其单路 AD 转换过程如下图 5.6 所示。

首都师范大学信息工程学院

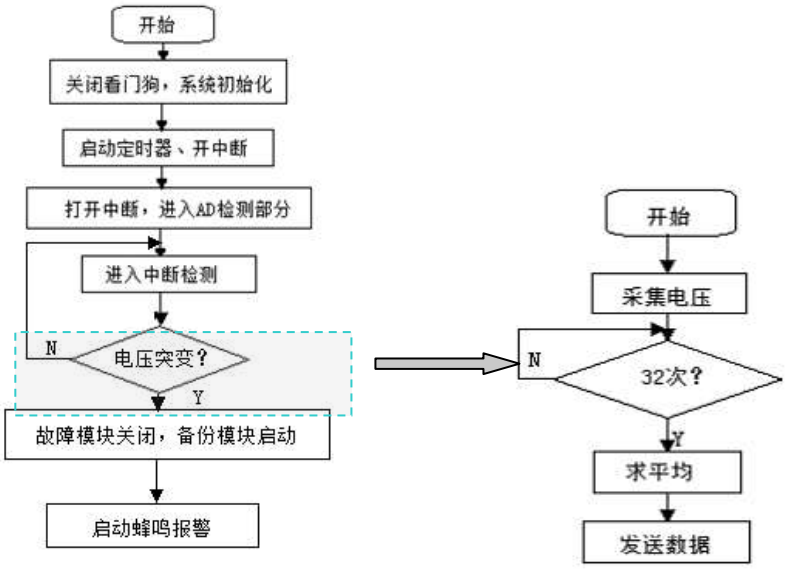


图 5.6 单路 AD 转换过程示意图

本设计需要同时对三路 ADC 进行检测，设计中，停止看门狗然后对 ADC 进行不同的设置，设置 P6 口为检测口，打开 ADC12 、A0、A1、A2 三个端口进行检测，并先将 A3 口设定为停止采样，当主模块出现故障的时候 A3 端口将介入监测过程，程序流程如图 5.7 所示。

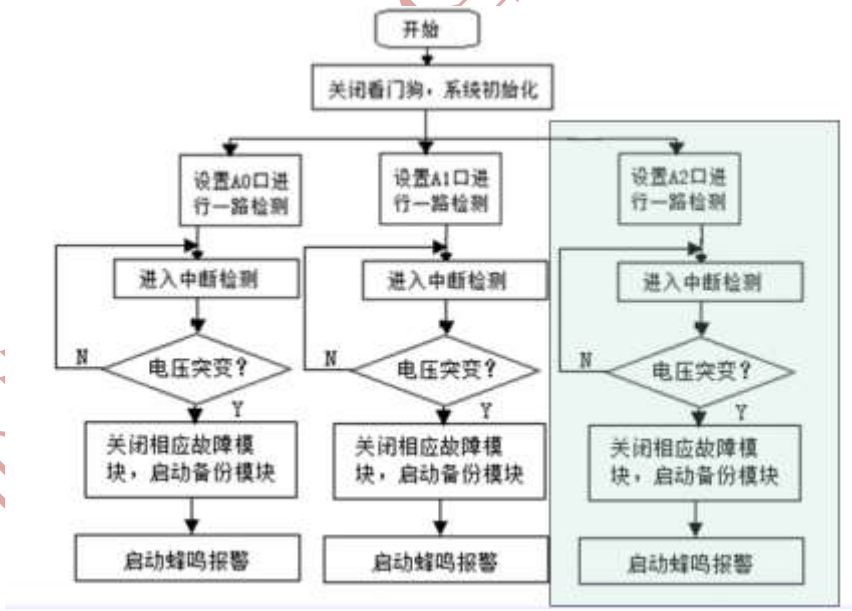


图 5.7 多路 AD 状况监控

1602 液晶显示：采用最常用的 16×2 工业字符液晶，使用方便，灵巧。最常用的 1602LCD 的意思为可以显示 2，每行 16 个字符液晶模块显示字符和数字。其控制端口和基本控制指令如表 5.1 所示。

表 5.1 1602 液晶模块控制端口

编号	符号	引脚说明	编号	符号	引脚说明
1	VSS	电源地	9	D2	Data I/O
2	VDD	电源正极	10	D3	Data I/O
3	VL	液晶显示偏压信号	11	D4	Data I/O
4	RS	数据/命令选择端（H/L）	12	D5	Data I/O
5	R/W	读/写选择端（H/L）	13	D6	Data I/O
6	E	使能信号	14	D7	Data I/O
7	D0	Data I/O	15	BLA	背光源正极
8	D1	Data I/O	16	BLK	背光源负极

读状态：输入：RS=L, RW=H, E=H　　输出：D0～D7=状态字

写指令：输入：RS=L, RW=L, D0～D7=指令码, E=高脉冲　　输出：无

读数据：输入：RS=H, RW=H, E=H　　输出：D0～D7=数据

写数据：输入：RS=H, RW=L, D0～D7=数据, E=高脉冲　　输出：无

需注意到，因为 1602 识别的是 ASCII 码，所以可以采用 ASCII 码直接赋值，比如在单片机程序中直接用字符型常量或变量赋值，例：“ABC123”。

LCD1602 的运行过程为先接收 ADC 数据，将其转换成坐标函数，然后读取子函数将函数转换，显示字符。

下图 5.9 为系统中所采用的 1602 液晶的结构原理图与接口 PCB 版图。此系统中选用的 1602 模块电压值为 3.3V。分别连接到 MSP430 单片机的 P4.0—P4.7 以及 P3.0—P3.2。

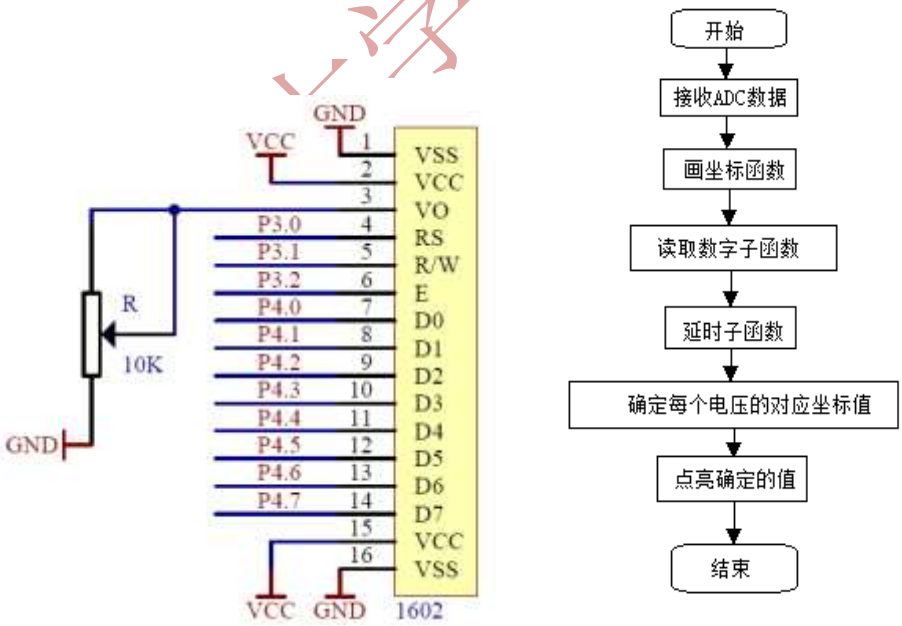


图 5.8 1602 液晶显示接口原理图及软件流程图

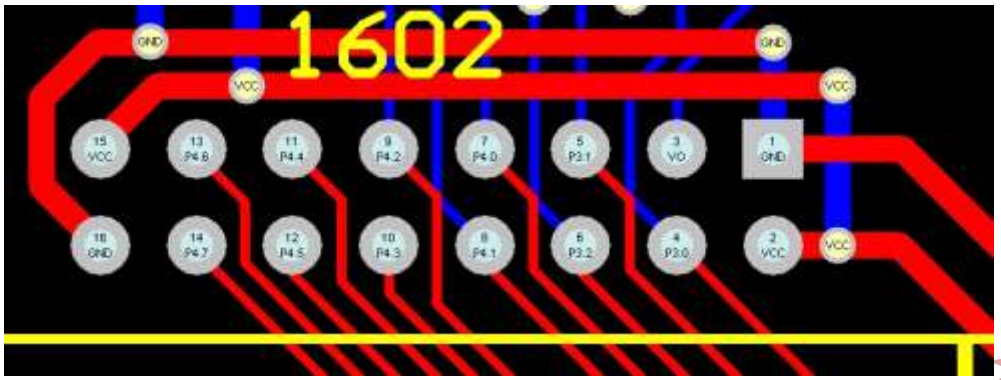


图 5.9 系统 1602 液晶显示模块 PCB 图

DAC 转换：为了实现均流控制，所以在程序中需引入 DAC 转换程序，将单片机综合中的结果转换成电压值来反馈 Vref 端口从而获得均流控制效果。设计采用 TI 公司的 DAC5571 芯片，此款芯片基于飞利浦公司的 IIC 总线（串行通信总线协议）DA 转换芯片，IIC 总线可支持多机通信，所以通过对芯片 A0 端口的控制可以在一条总线上放置多个 DAC5571，应用此种通信协议至于两根线（即 SCK,和 SDA）即可完成，十分简便[47]。其芯片内部结构示意图如下图 5.10 所示。

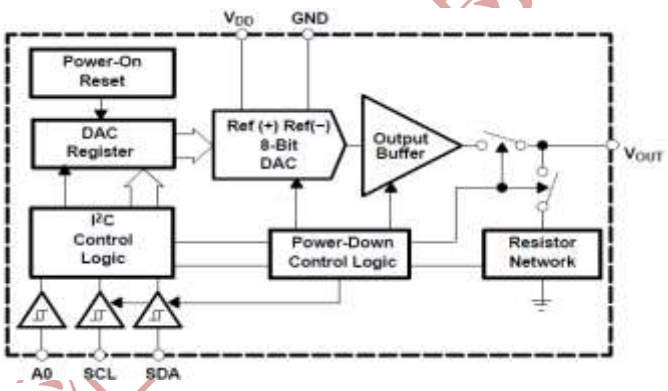


图 5.10 DAC5571 内部结构图

其内部工作为一排电阻串，单片机将编码传输到 DAC5571 内部的寄存器中，然后通过判定内部电阻串的开关管来决定哪个节点上的电压被传送到输出集成运算放大器上。图 5.11 为所示其电阻串结构示意图。

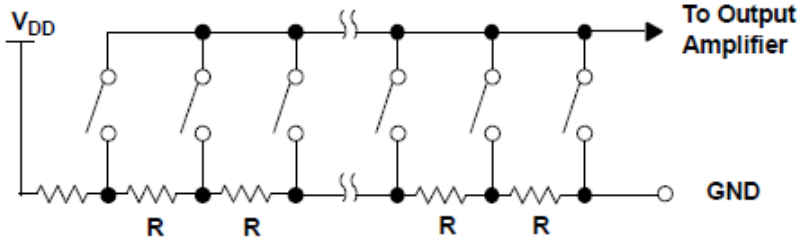


图 5.11 DAC5571 芯片内部电阻串示意图

其电压转换输出关系为：

$$V_{OUT} = V_{DD} \times \frac{D}{256} \tag{5.2}$$

D 为控制输出量，因为芯片为 8 位精度，所以 D 的最大值为 256，且此款芯片没有内部参考电压直接从 VDD 中提取电压，这样的设计可以占用更小的体积。

下图 5.12 为具体的 DAC 定比分流程序控制框图，通过对反馈的加法器端进行单路电压控制来达到模块间定比分流的效果，软件框图如图 5.12 所示。

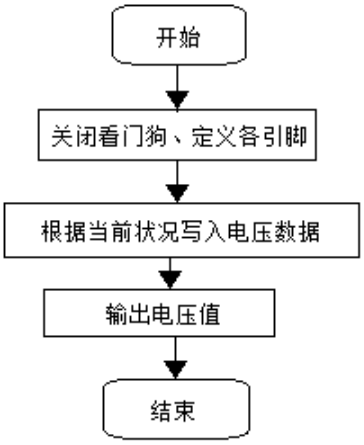


图 5.12　DAC 控制流程框图

基于 DS18B20 结温工作点检测设计：DS18B20 是一款小巧的温度传感器（12bit 分辨率），它通过单总线协议与 MCU 进行通信，硬件连接十分简洁，它具有如下特性：测温范围-55℃～+125℃，并且在-10℃～+85℃范围内具有±0.5℃的精度，其内部框图如下图 5.13 所示[48]。

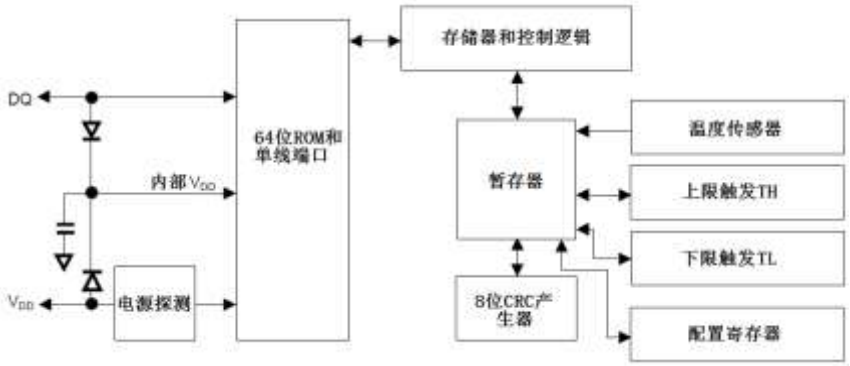


图 5.13　内部结构框图

MCU 与 DS18B20 的连接关系示意图如图 5.16 所示。通过图可知 MCU 与 DS18B20 的 DQ 端连接，通过在 MCU 的 IO 端口模拟 1-Wire 协议的时序就能实现对 DS18B20 的读写了。在测温系统中由于 1-Wire 的应用所以可以挂在多个芯片来测温，单片机通过读写芯片内部所特有的 ID 号来进行读写。

根据此芯片特性可得其测温步骤框图 5.14 所示：

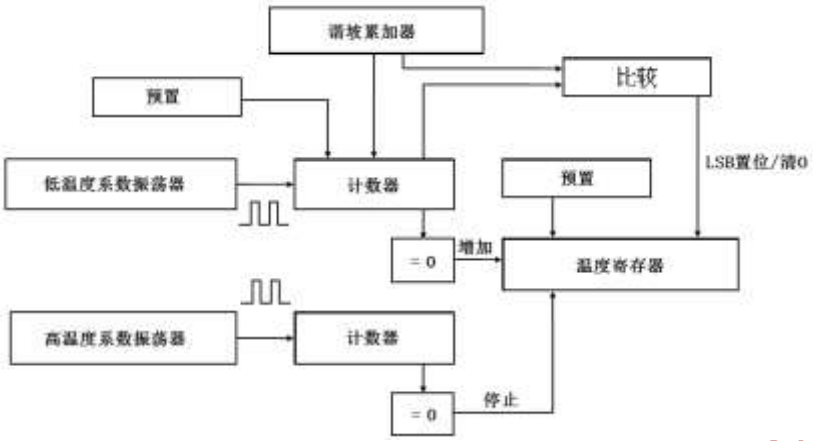
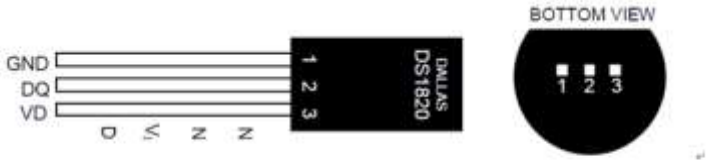


图 5.14 测量温度步骤图



引脚 8 脚 SOIC	引脚 PR35	符号	说明
5	1	GND	地
4	2	DQ	单线应用的数据输入 / 输出引脚
3	3	V_{DD}	可选 V_{DD} 引脚

图 5.15 DS18B20 拐角及外形图

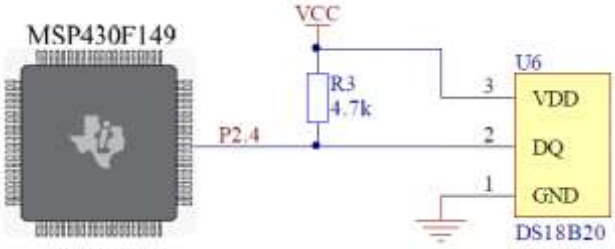


图 5.16 18B20 与 msp430 单片机连接及芯片管脚示意图

在温度转换过程中，DS18B20 在闸门开通期间内低温系数振荡器经历的时钟周期的个数计数来进行对温度的测量，在此期间闸门开通期由高温度系数振荡器决定，同时计数器给予对应于-55 ℃ 的基数，如果在门开通期结束前计数器先到达零，则意味着高于-55 ℃，同时计数器用斜率累加器来对振荡器的温度特性进行补偿。

斜率累加器用于产生高分辨率的温度测量值，因此为了获得所需的分辨率，计算器的数值及处于每一个温度时候的计数个数应明确。DS18B20 可提供 0.5 ℃ 的的分辨率，温度读数以 16 位的二进制补码形式提供。下表 5.2 为输出数据对应实际测量值的关系。

下图 5.17 为 DS18B20 的软件程序流程图。

表 5.2 温度/输出数据关系表

温度	数字输出（二进制）	数字输出（十六进制）
+125℃	00000000 11111010	00FAh
+25℃	00000000 00110010	0032h
+1 / 2℃	00000000 00000001	0001h
+0℃	00000000 00000000	0000h
-1 / 2℃	11111111 11111111	FFFFh
-25℃	11111111 11001110	FFCEh
-55℃	11111111 10010010	FF92h

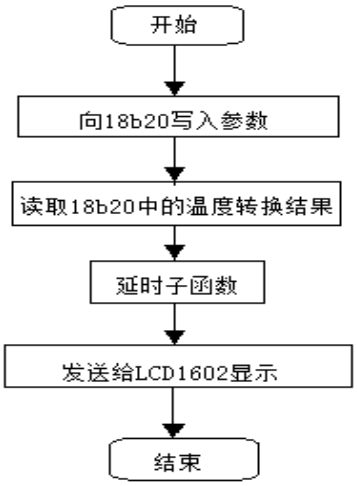


图 5.17 DS18b20 程序控制流程图

设置启动备份模块的条件设计（键盘输入）：在系统中由于设置了备份模块，所以对备份模块的开启条件需要进行定义。若当 DC/DC1 的输出电压大于或小于理论控制范围（如 20%）。所以在进入系统循环扫描之前可以通过键盘输入设置系统允许的故障误差范围。其软件控制流程图如图 5.18 所示。

在此程序中采用循环扫描的方式进行读取键值的操作，从图 5.19 中可看出图中键盘每个键值分别为 1 至 0，“Y”键为确认，若摁下此键则为设置完毕，程序跳出键盘扫描程序，从而进入系统监控程序。

首都师范大学 工程学院

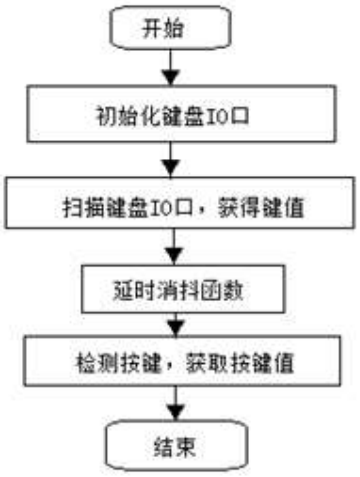


图 5.18 键盘输入程序流程图

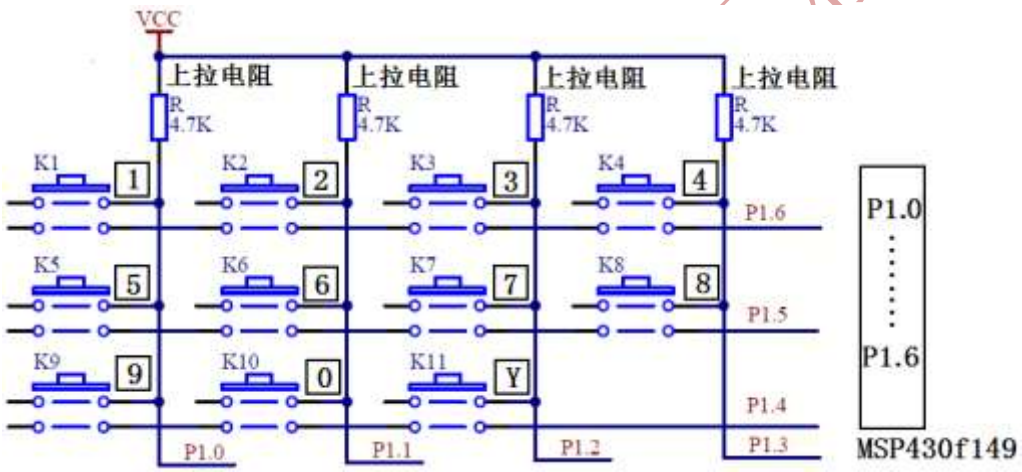


图 5.19 键盘扫描电路原理图

5.1.3 电源整控制体结构框图

在前几章中已经从主回路设计、电路结构的硬件设计和软件控制程序流程这两大块对基于集成 DC/DC 稳压器的冗余并联系统做了具体介绍和分析，图 5.20 为系统的整体架构示意图，图 5.21 为整体系统工作状况监控流程图，图 5.22 为工作状况监控过程中的 1602 液晶显示照片。

首都师范大学 程学院

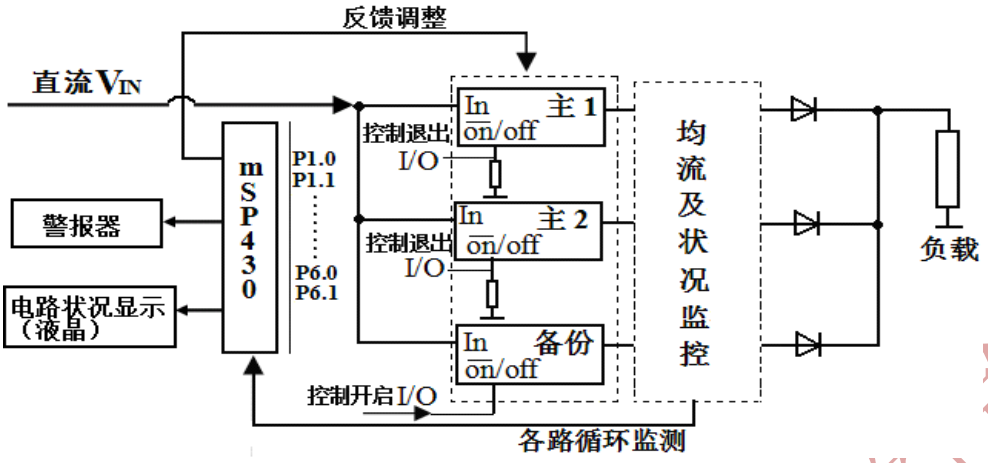


图 5.20 系统的整体架构示意图

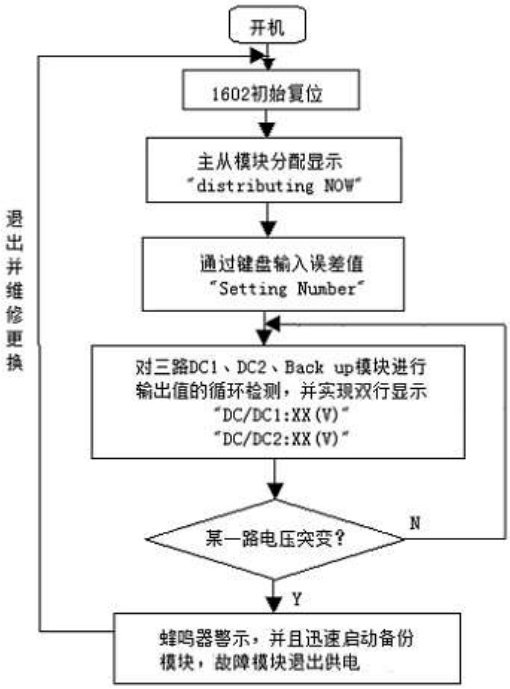


图 5.21 为整体系统工作状况监控流程图



图 5.22 1602 液晶显示工作状况

从图中可以看出，控制系统主要分为：

1. 主（1，2，备份）DC/DC 集成稳压电路。2. 基于最大电流均流控制法的均流控制电路。3. 防倒流、短路、过载，报警等保护部分。4. 冗余备份模块。5. 电源系统监控，温度调节，功率数据显示。6. Msp430f149 的集成最小系统。

5.2 样机实验结果评估与比较

依据设计方案，制作了以 LM2678-ADJ 为功率器件的三路并联的电源模块（一路备份）并接入大功率负载。对其进行电压，均流控制，主模块/备份模块切换，功率/效率，结温工作点等进行详细测试，下面对每一项测试进行介绍。

5.2.1 输出电压测试与分析

电压测试：依据设计方案，制作了以 LM2678-ADJ 为功率器件的三路并联的电源模块（一路备份），接入阻值为 20Ω 的金属负载，据 LM2678-ADJ 电压计算公式，其中：

$$V_{OUT} = V_{REF}(1+\frac{R_2}{R_1}) \quad \text{可得：} \quad R_2 = R_1(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1) \tag{5.3}$$

Vref = 1.23V。

表 5.3 不同输出电压对比

设定输出电压	负载电压（V）	U1（V）	U2(V)	实际与理论差
5（V）	4.95	5.05	5.07	1.3%
8（V）	7.93	8.10	8.08	1.0%
15（V）	14.9	15.1	15.1	0.7%

以上电压值由电子万用表测得（精读为 1/100），由于 0.1Ω 均流电阻两端压降，所以负载电压略小于电源输出电压。由于电源系统设置了一组电压和电流（表头）所以可大致看出。如图所示：注（图 5.23 中显示的值测得时，负载采用滑动变阻器≈2.3Ω）



图 5.23 电压表、电流表表头显示

注：从表中可得出此电源稳压效果较好，由于测试过程中采用的实验室直流电源 36V 和 100W（36V）的较大功率变压器，所以测试中三个值（5V,8V,15V）均离 36V 有较大差距，并且 BUCK 结构的电路须有较大的压差才可，故输出电压稳定，若使用 220V~18V（40W）的小变压器，则发现在 15V 时电压不稳定，且当滑动变阻器低于 7Ω 时，供电极为不稳定，电压下降很快。

5.2.2 均流控制测试与分析

首都师范大学信息工程学院

分别测试在输出 12V，8V 时的 2 条支路电流（负载为大功率负载 5Ω, 2Ω）。

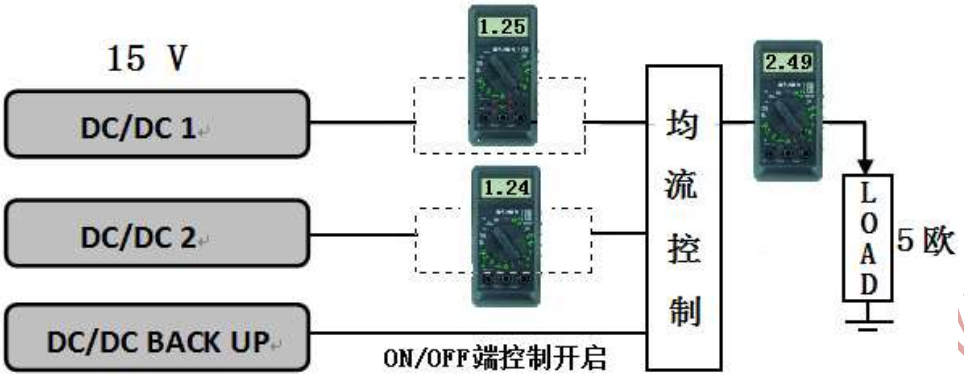


图 5.24 各支路电流均流测试示意图

实验中发现两路的电压（未使用均流控制）的区别并不大，基本维持在 1%~1.5%左右和 5.2.1 中只测试电压值精读相近。但是测量各支路电流和干路电流发现，系统几乎只由一路供电，而另一模块输出电流极小，明显负载不均衡。使用均流控制前后对比效果明显，见下表 5.4 和 5.5：

表 5.4 均流控制前

输出电压值	*I1*(A)*和 U1*(V)		*I2*(A)*和 U2*(V)		两路误差
15V（5Ω）	2.78 A	15.12 V	0.10 A	14.95 V	> 90%
8V(2Ω)	3.98 A	8.15V	0.15 A	7.98 V	> 90%

表 5.5 均流控制后

输出电压值	I1(A)*和* U1(V)		I2(A)*和* U2(V)		两路误差
15（V）/5Ω	1.46 A	15.11 V	1.49 A	15.09 V	1.9%
8（V）/2Ω	1.94 A	8.12 V	2.05 A	8.15 V	2.8%

5.2.3 故障/备份模块切换测试

测试一模块出现故障: 输出 15V 的情况下，将模块一的输出切断，测时候切断模块的输出电路如图 5.25。

首都师范大学信息工程学院

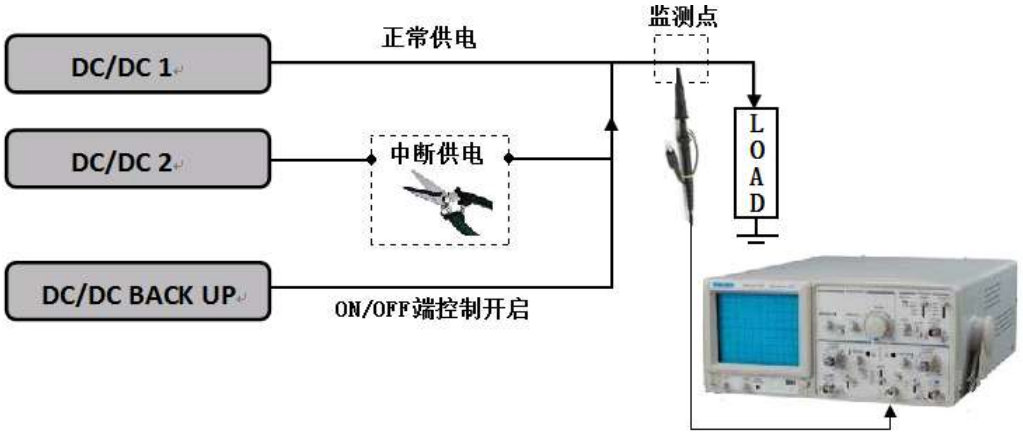


图 5.25 故障模块切换示意图

模块三（Back up）可在短时间内介入供电，模块一退出。如图 5.26 示波器截图所示，此时设置输出状态为 15V 稳压，由于单片机处于检测状态，检测到模块故障到启动备份模块需要一定时间，会出现小幅电压波动（模块二正常工作）。由于备份模块处于热备份状态，且 MSP430 和 LM2678 的 ON/OFF 控制端响应速度很快，所以电压波动只有大约 15mS，之后可继续平稳运行，起到了容错的作用。由于故障模块一已退出工作，进行维修更换后，重新启动复位 MSP430 单片机，可回到正常状态，备份模块状态恢复。

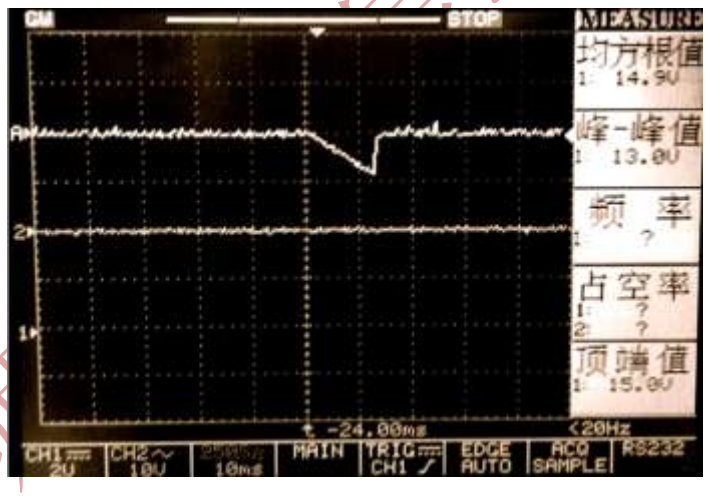


图 5.26 电压波动示波器截图

5.2.4 电源连续/非连续工作状态分析

实验过程中，给样机设置不同的输出电压，保持负载不变。从示波器中可看出此电源出现了两种不同的工作状态即输出为 8V 时候的“连续”工作状态，和输入电压为 14V 时候的“非连续（亦称间歇式）”工作状态，下面就两种工作方式做简要分析。

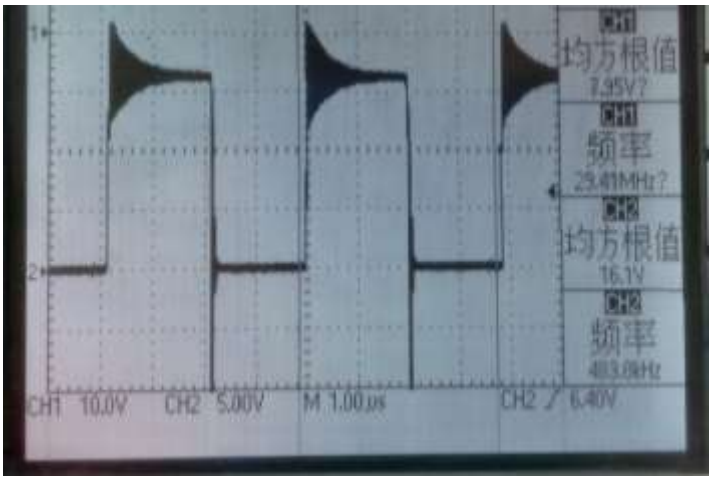


图 5.27 连续型工作模式

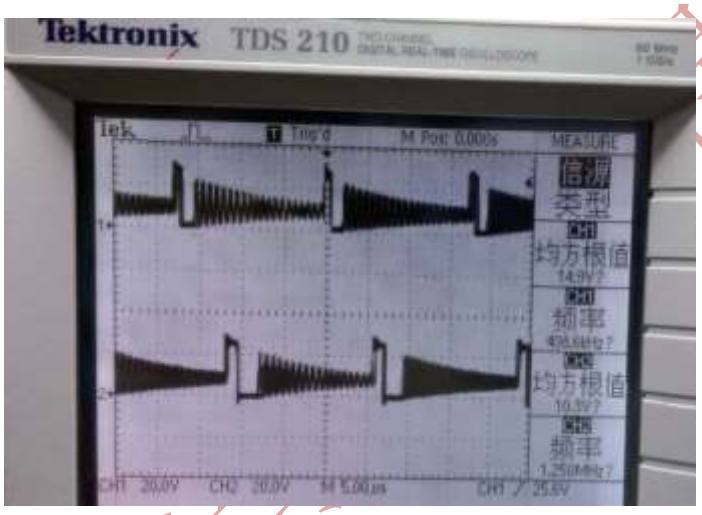


图 5.28 非连续/间歇型工作模式

连续/非连续工作模式特点与分析：连续模式的特点为开关管在每个开关周期都是从非零的能量储存状态开始震荡的[49]。相反，间歇工作模式中储存在开关器件中的能量在每个开关周期完毕前都要释放掉，由下图 5.29、5.30 中可看出两者的区别。

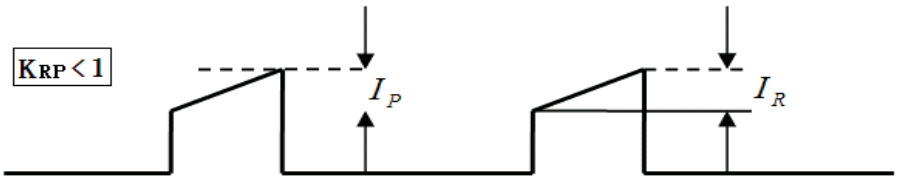


图 5.29 连续型工作模式

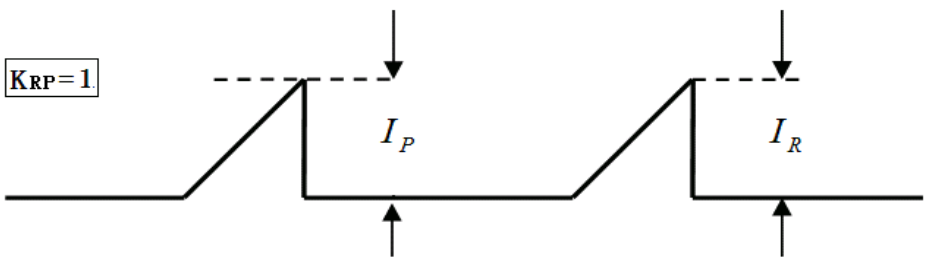


图 5.30 间歇型工作模式

图 5.29 中，连续模式的开关电流不是从零点开始而是从一定的幅度开始增长，当达到峰值时，迅速回到零点，可得其脉动电流（*IR*）与峰值电流（*IP*）的比例关系（K*RP*）满足下式：

$$K_{RP}=\frac{I_R}{I_P}<I_P 即 K_{RP}<1.0 \tag{5.4}$$

同理如图 5.30 所示，间歇工作模式的开关电流是从零开始上升到峰值，然后迅速跌回到零点。可得其脉动电流（*IR*）与峰值电流（*IP*）的比例关系（K*RP*）满足下式：

$$K_{RP}=\frac{I_R}{I_P}=I_P 即 K_{RP}=1.0 \tag{5.5}$$

所以利用（*IR*）与（*IP*）的关系。可以判定开关稳压器件的工作模式，（K*RP*）的范围在（0~1.0）间。若 K*RP*=1.0 则可判定模式为不连续工作模式，反之则判定为连续工作模式。在理想情况下，我们可以认为 *IR*=0，K*RP*=0，如图 5.31 所示，系统此时处于绝对的连续工作模式，此时电压波形为绝对的矩形波形。Δ*IR* 近乎为零。但此种情况现实中不会出现，脉动电流通常都会存在。

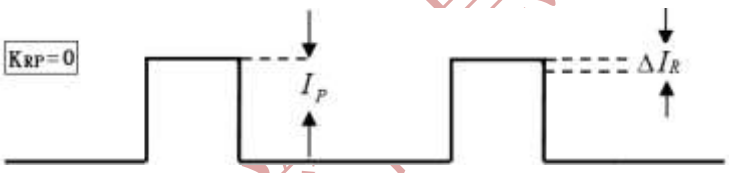


图 5.31 绝对连续工作模式

事实上，连续模式和间歇模式没有一个明确的指标去判定，一般可认为若 K*RP* 值较小则可判定此时的状态为基本连续工作模式且有较大的电感量，此时集成稳压器处于轻载状态，可适当降低开关稳压器的功率。反之表示连续程度较差，初级电感量较小，需要更换具有较大功率的开关稳压器件。联系到此实验过程中发现由于此项测试时使用 220V~18V 变压器，输出 8V，和 15V，并且保持金属负载阻值不变。

由于 18V~8V 的压差比 18V~15V 的压差大很多，所以根据上述工作模式的理论分析判断出，8V 的电源工作在“连续”模式中，而 15V 的电源工作在“间歇”模式下。

连续/非连续对效率的的影响：一般来说，在同样条件下，相对连续的工作模式的功耗小于间歇工作模式。也就意味着在此样机设计过程中，若输出电压与输入电压相对压差较大，在此情况下电源的效率会大于相对压差较小的工作模式，在之后的 5.2.5 节工作效率测试中会具体说明。

5.2.5 功率/效率测试与分析

将 18V（50W）的变压器的输入端串如电流表，在接入电路。在输入端已设置电流电

压表头可容易计算出功率即：

根据：

$$P_{\text{变压器输入功率}} = U_{18V\text{输入}} \times I_{\text{前置串如}} \tag{5.5}$$

$$P_{\text{实际输出端}} = U_{\text{表头读出}} \times I_{\text{表头读出}} \tag{5.6}$$

则有：

$$\eta = \frac{P_{\text{实际输出功率}}}{P_{\text{变压器输入功率}}} \times 100\% \tag{5.7}$$

即此系统效率为下表所示：

表 5.6 系统效率表

设定电压	输入功率	输入电压/电流	输出功率	输出电压/电流		效率
（8V）2Ω	37.6 W	18 V	2.2 A	32.4 W	8.1 V	4 A	≈86 %
(12V) 3Ω	50 W	18 V	2.78 A	39.7 W	11.7 V	3.4A	≈79 %

功率数据分析：一般来说，电压损失的功率为整流滤波部分，功率管部分，及以热能形式散失的功率。所以在 BUCK 结构的回路中，输入电压尽量要做到与输出电压保持相对较大的压差。

上一节(5.2.4)中已经对电源工作连续性做了分析，从此处也可看出，当输出为 12V 时，系统相对输出 8V 时相对处于“间歇”型供电模式，此点也成为影响其工作效率的一个重要因素之一，所以在设计过程中尽量保持设计参数能使得电源工作在相对连续的模式下。

5.2.6 结温工作点测试与分析

对于单个 LM26768-ADJ 模块做成的 DC/DC 模块用采用小散热板（模拟散热效果不佳），并且接入直流电源 15V，5Ω 金属负载，即功率 45W。将一 DS18B20 芯片隔金属片与导热硅胶贴至此稳压器，接通电源后约 15 至 20 分钟之间，测得输出 15V 电压开始波动，此时液晶模块显示温度为 85℃。

继续通电至温度为 90℃ 左右时，发现电压明显下降，并伴有明显波动，不可再正常运行。虽然芯片资料上提供此款芯片的结温为 120℃，但是实际过程中不可按此上限运行。需配置良好的散热板才可。根据上述所述在系统中接入风扇为整体散热，当电源接通时，同时风扇启动。下图 68 中为采用小散热片时的单个 DC/DC 回路，及 DS18B20 温感图。

首都师范大学信息工程学院

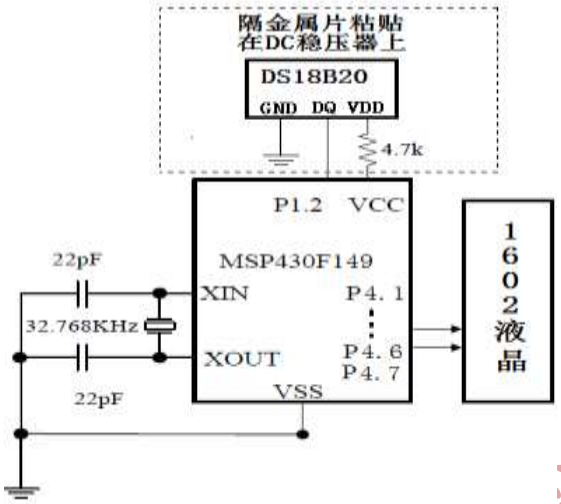


图 5.32 温度测试显示电路图

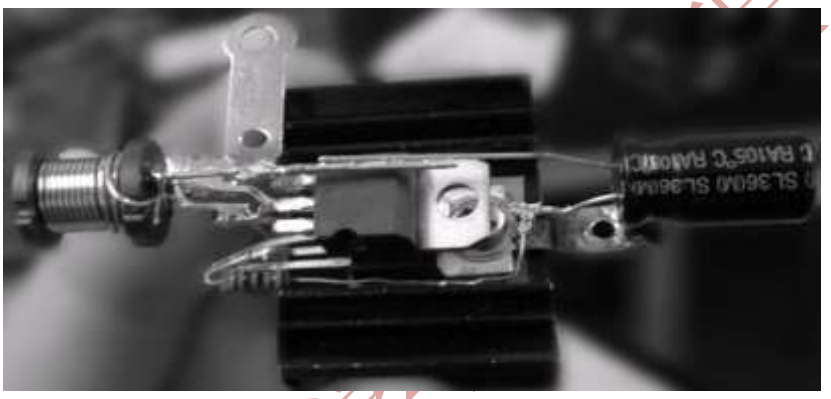


图 5.33 采用小散热片时的单个 DC/DC 回路

5.2.7 电路保护/损坏测试

为了保护电路中不会出现过载/短路等现象，在 220 转 18V 变压器前段设置 5A 保险管，同时在变压器与 DC/DC 回路间可考虑加入 5A 自恢复保险丝，如图 5.34 所示。

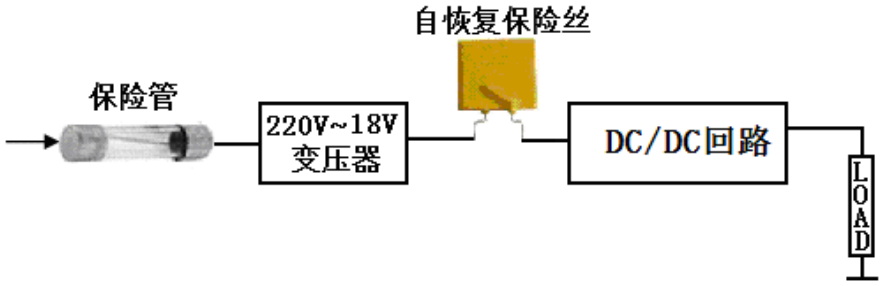


图 5.34 电路保护示意图

测试中若调节负载电阻的大小，当整体电源系统的电流大于 5A 时，负载两端电压降为零，自恢复保险丝起到了保护负载的目的。

5.3 结论与讨论

从上述实验结果中可以看出，在使用最大电流均流控制法的前后，各支路的电流有着的明显的区别，从明显的负载不均衡到基本均衡误差小于 5%可看出均流控制法对改善负载不均衡的效果。

讨论并分析了由于输入功率不同所出现的两种工作模式（连续型模式和间歇型工作模式），以及对工作状态的设置建议。

在断路实验中，由于对主回路 1，2 进行实时监测，且此时 Back up 模块处于接入电路的热备份状态中，所以当检测到回路 2 短路情况时候，可以迅速的通过 I/O 口的高低电平变化来启动备用模块接入供电，同时故障模块退出，起到了容错的作用。

在电路保护短路测试中，由于在 220V~18V 变压器的前端，和输出电路中加入了保险管和自恢复保险丝所以当随着负载电阻的减小，电流增大的过程中出现了保险丝熔断的情况，较好的保护了电路。

结温工作点测试过程中，由于温度的提高导致功率器件的工作指标不正常，同时建议选用体积较大的散热片或者结合风扇散热来保证正常的工作状态。

首都师范大学信息工程学院

第六章 总结与设想

本文首先介绍了现代开关电源技术的理论和应用，对常用的 BUCK,BOOST 型变换器的原理进行了分析。之后详细分析并介绍了常用的均流控制方法，针对每种均流控制方法进行了评价，阐述了冗余电源的设计思想。并再此基础上提出了基于集成开关电源器件和 msp430 单片机的冗余并联电源的软件和硬件设计方案。并通过实验验证此系统的有效性，可实现较好的多路均流控制效果，较高精读的电压输出，以及故障模块备份与切换还有整体运行的实时监控。本文的主要工作如下：

1、在查阅各类文献的基础上，综述了研究背景及意义，当前国内外的开关电源研究现状，其后对开关电源理论基础，并联电源系统等进行了分析。

2、介绍了常用的几种并联均流控制方法，并详细对每种控制方法进行了详细的 介绍和优劣点分析。

3、在此基础之上阐述了冗余电源结构的理论，并且提出了针对与本系统中的“2+1”冗余并联均流控制结构设计。

4、设计了基于最大电流均流控制法应用与 LM2678-ADJ 集成稳压器件的并联电源系统，并且在 msp430 单片机的监控下实现了系统的“2+1”冗余结构使得系统具备容错功能。

5、对电源系统的整体设计做了优化，如元器件的选择，散热设计，参数分析，减小输出误差，电路布线等方面，提高了电源的整体效率和可靠性。

6、对样机进行了包括，均流控制，模拟故障，功率/效率，结温工作点，工作方式等方面的测试。并对实验结果进行了详细分析并提出了预防和改进措施。

7、由 220V 市电直接供给，系统内设计了完整的供电结构，方便使用。具有一定的实用价值。

8、在输出端口设有输出功率指示表和各个模块的工作状态指示灯，方便使用者实时观测并检查系统工作情况。

然而，本文只是对此电源系统进行了较为基本的设计，主要任务为提出了应用于集成稳压器的冗余并联控制方法和设计思路，而常用的集成开关稳压器件主要替代传统的线性稳压器件来进行较小规模的供电，如控制系统，显示系统，传感或通信系统的供电，所以相对功率较小（单个器件一般不超过 100W）。若要在工程中实际应用，并且做到了良好的人机交互，并实现数控，还需要有很多工作要做

内容如下：

首都师范大学信息工程学院

1. 本设计中集成稳压器的功率较小，即使双路供电提供的功率与实际工程应用中的百瓦甚至千瓦仍有较大差距，若进一步设计可选用具有较大功率输出开关 MOS 管以替代本设计中的集成开关稳压器件。
2. 论文中提到了定比分流的设计方法，但是未涉及在定比分流的情况下各个支路若电流不同时候所带来的问题的解决方法。
3. 通过提高程序的算法效率来提高电路运行状况监控模块的反映速度，使得单机对电路能保证具有实时监控性。
4. 文中对电压调整的设计采用的是电位器，若要进行精确的控制并具有良好的人机交互性可采用数字电位器或者键盘输入。
5. 体积较大，导线器件较多，容易导致工作不稳定，可靠性得不到保证。若能使用 PCB 板，整体系统的可靠性将会得到较大的提升。

首都师范大学信息工程学院

参考文献

[1] 周金明. 开关电源的模块化设计与并联技术研究[C], 华中科技大学硕士论文,2005

[2] 张占松，蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京, 电子工业出版社,2001

[3] Jinkun, SunA current sharing control strategy of paralleled DC-DC converter based on simple model. 2010 International Conference on Optics, Photonics and Energy Engineering, v1, p 288-291

[4] 周志敏.模块化 DC/DC 实用电路[M]. 北京：电子工业出版社,2004

[5] 张军明,谢小高,吴新科.DC/DC 模块有源均流技术研究[J],中国电机工程报,Vol 25, 32-38.2005

[6] 刘晓东,姜婷婷,方炜.DC/DC 变换器并联均流技术[J],安徽工业大学学报,Vol 30,54-59,2013

[7] Siri K, Lee C Q. Current distribution control for parallel connected converters I&II[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1992, 28(3): 829-851.

[8] Herbert H.C. Tse, Chi K. Parallel-connected buck converters under a master-slave current sharing scheme IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, v 2, p 708-713, 2000

[9] Rajagopalan, J.; Xing, K.Manners, Bruce. Modeling and dynamic analysis of paralleled dc/dc converters with master-slave current sharing control ,NASA Technical Memorandum, n 107186, Mar 1996

[10] Panov, Y. Analysis and design of N paralleled DC-DC converters with master slave current-sharing control United States); IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC, v1, p 436-442, 1997

[11] Lee, Keunmyung, Modeling and analysis of multichip module power supply planes, IEEE transactions on components and manufacturing technology. Part B, Advanced packaging, v 18, n 4, p 628-639, Nov 1995

[12] 杨汝. 平均电流模式的控制电路设计[J],电子电力技术, 2002,VOL 36:66-69

[13] 李敏.电源并联系统数字化均流的研究[J],通信电源技术,2007,VOL24(2): 13-14

[14] 符赞宣，瞿文龙，张旭，平均电流模式 DC/DC 变换器均流控制方法[J],2003, Vol.43 337~340, 2003

[15] Zhang Bo, Dongyuan Qiu.Analysis and design of an automatic current sharing control based on average-current mode for parallel boost converters, source: IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, v2

[16] Xiao, Wen-Xun, Zhang, Bo. Improved automatic current-sharing control based on average current mode for parallel buck converters.; Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, v 27, n 13, p 64-69, May 5, 2007

[17] Lloyd D. Average current mode control of switching power supplies [R] .Unit rode application note, U140, Texas,1999.356-369.

[18] Yuri Jovanovic, Milan M. Measurement of paralleled DC/DC converters with average current sharing control IEEE Transactions on Power Electronics, v 23, n 6, p 2942-2948, 2008

[19] 杨汝. 平均电流模式的控制电路设计[J],电子电力技术, 2002,VOL 36:66-69

[20] 高承博,赵龙章. 一种新型开关电源的并联均流技术的实现方法[J].通信电源

[21] 周伟成,周永忠,张海军.最大电流均流技术及应用[J]，电力电子技术. Vol 42:45-51, 2008

[22] 李明,戴栋. 自主均流控制的并联 Buck 变换器稳定性分析[J], 中国电机工程学报, Vol 28, 2008 pp 7-15

[23] 丘东元,张波,改进式自主均流技术的研究[J],电工技术学报,Vol 20, 2005

[24] LM2678—date sheet NS Customer Support Center

[25] 沙占友，庞志锋. 开关电源外围元器件选择与检测[M],中国电力出版社,2009

[26] Colonel WM.T(美). 变压器与电感器的设计手册[M]. 中国电力出版社，2009,vol26(6):35-37

首都师范大学信息工程学院

[27] 袁冰,来新泉,叶强. 集成于降压型 DC-DC 变换器的电流采样电路[J]. 半导体学报，vol 29, 2008
[28] 张华，邱红，宋智.由于电阻精度引起差分放大电路误差的分析[J]. 现代电子技术. 2007，257(18): 181~182.
[29] 王焕民,李世芬. 高阻抗低温漂运算放大器在电流测量中的应用[J]，济南大学学报.Vol.4, 2004
[30] Bruce Carter, Ron Mancini（美），运算放大器权威指南[M]，人民邮电出版社[M]，2010
[31] 童诗白,华成英.模拟电子技术基础[M](第 4 版).北京：高等教育出版社,2007
[32] 董玉冰. Multisim 9 在电工电子技术中的应用[M],北京.清华大学出版社,2008
[33] 沙占有,王彦朋,马洪涛，开关电源优化设计[M]，中国电力出版社,2013
[34] 王延才.电子线路辅助设计 Protell99SE[M],高等教育出版社,2004
[35]（日）户川，宗光华，高玉萍.实用电源电路设计—从整流电路到开关稳压器[M],科学出版社,2006
[36] Ouyang, Fan Zhang, Liangfeng; Li, Gang. Analysis of power supply module faults for microprocessor protection devices Electric Power Automation Equipment, v 31, p 150-153, July 2011
[37] Wu K.I. Chen, Y.H. Current sharing control strategy based on MCU, IEEE Transactions on Industrial Electronics, v 59, p 701-713, February 2012
[38] 基于 MSP430 的电源管理与控制，微控技术设计网, www.microcontrol.com
[39]Arbetter Barry , Maksimovic, Dragan,Control method for low-voltage DC power supply in battery-powered systems with power management, PESC Record- IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, v2, p 1198-1204, 1997
[40] Yuan, De-Fu, Li Bang-Feng, Discussion of power supply reliability innovative management model, Power System Protection and Control, v 38, n11, p 99-103, June 1, 2010
[41] Roy, Allen. Choosing a power supply for N + m redundant apps, (Power-One, Camarillo, CA) Source: Electronic Products (Garden City, New York), v 50, n3, March 2008
[42] Msp430x1xx family User's Guide Copyright 2006, Texas Instruments
[43] Msp430x1xx Mixed Signal Microcontroller Texas Instruments, Copyright 2007
[44] 徐爱钧. IAR 嵌入式系统编程与实践[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006.
[45] 沈建华. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与实践[M].北京：北京航空航天大学出版社,2007
[46] 谭浩强 C 程序设计（第二版）,清华大学出版社[M]，北京, 2006.
[47] Texas Instruments DAC5571.datesheet, www.ti.com, 2007
[48] Dallas Semiconductor 18B20.datesheet, www.dalsemi.com , 2007
[49] 沙占友,王书海,孟志永. 单片开关电源工作模式的设定及反馈理论分析[J],电源技术应用,Vol 5, 175-179
[50] 邱关源.电路[M],北京：高等教育出版社，第五版
[51] 胡寿松.自动控制原理简明教程[M].北京：科学出版社，2007

首都师范大学信息工程学院

本科期间发表论文

[1] Ran Li, rui Ding, zijian Min. Design of Redundant Parallel Power Supply Based on integrated DC/DC Modules, 4th IEEE International Conference on Mechanical and Electronics Engineering， vol 5, p 568-575

[2] 李然,闵子建,李永刚,基于微控制器的冗余并联开关电源设计[J],宇航计测技术,2012, vol 32,

[3] 李然,李延节,李昱青，基于 MSP430 的智能恒温箱设计,首都师范大学学报（自然科学版）[J]. (已录用)

[4] 李延节,李然，尉爽生，基于 SPARC V8 架构的三机冗余仿真系统的设计[J],航天控制. (已录用)

首都师范大学信息工程学院

收获体验及致谢

通过此次为期一年多的毕业设计，让我对开关电源和冗余并联电源有了较为深入的了解，同时对超低功耗单片机的使用，模拟数字电路电路混合设计，传感器应用，电路的焊接制作与调试等方面有了显著的提高，在完成论文的过程中由被动学习慢慢的转变成了主动的去探索，去发现，积累了很多宝贵的知识和经验，受益匪浅。

在此过程中，我要衷心感谢我的导师闵子建，在电源设计与调试这一不仅需要有强大的理论基础，更需要多年的经验作为支撑的领域，您严谨的治学态度，丰富的实践经验，灵活的设计思路，让我由衷的敬佩。并在整个毕业设计过程中闵老师在百忙中不辞辛苦给予了我心细的指导，使我受益颇深。

感谢我的科研立项导师袁慧梅老师，是您让我有了对电子系统综合设计的理解，通过电子设计自动化技术和 VHDL 语言的课程的学习，初步掌握了计算机辅助设计电路这一目前应用十分广泛的技术。

感谢赵晓旭老师，在您的帮助下使我确定了大学努力的方向，并在四年中克服了学习和生活中的许多问题。

感谢丁瑞老师，通过对全国电子竞赛的准备让我对电子设计产生了浓厚的兴趣，并在您的指导下我进入了 Msp430 单片机的世界。

感谢李永刚老师，是您对开关电源的深入浅出的分析，对自动控制技术的深刻理解，多年的工程实践经验，让我对这一目前应用最为广泛的电源技术产生了深厚的兴趣。

弹指间，美好的大学习四年即将过去，光阴似箭，岁月如梭。值此论文完成之际，向长久以来帮助、支持、教导过我的所有老师和同学表示衷心的感谢。即将走过的四年里从一个对未知领域畏惧与无知到对各种仪器电路的熟练使用和分析，从对专业课程的无知与迷茫到在学术期刊上发表论文，一路走来，付出了很多的努力，虽离精通差的很远，结果也算差强人意。在工程实践与设计实验室渡过了美好又充实的四年，相信这四年的大学生活将影响我今后的人生轨迹，使我受益终生。

最后，感谢各位参加论文评审和答辩的各位老师，祝你们身心健康，工作顺利。

首都师范大学信息工程学院

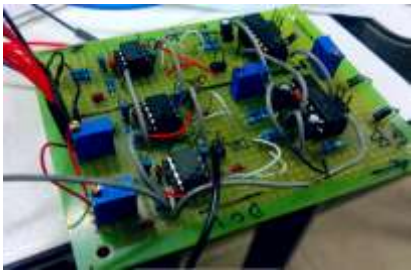
附录 1　实验样机实物图

电源样机实物照片

I: 整体电源照片：



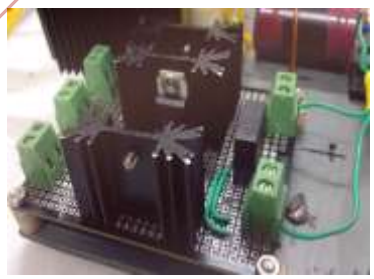
II:均流控制模块



III:功率输出回路（3 路）



IV: 系统供电部分



V: MSP430 控制及显示模块



V: 主模块 DC1 和 DC2



VI: 输出滤波消噪(LC)部分



VII：输出显示电压电流表头



VIII: 整流滤波部分



IX：5V 散热风扇



主要软件程序模块代码

控制程序主要由以下几个子程序构成：

1. AD 循环监控程序。

2. 键盘输入设置误差允许。

3. DA 反馈控制程序。

4. 键盘输入设置误差允许。

5. 键盘输入设置误差允许。

6. 开机系统主从模块分配。

7. 故障/备份模块切换控制。

8. 液晶显示控制程序。

2.1 A/D—系统状况监控及模块切换

```
**********************************
功能描述：MCU 的片内 ADC 对 P6.0、6.1、6.2 三个 I/O 端口进行电压监测。
**********************************
#include    <msp430x14x.h>
static unsigned int results[4];
#define      Num_of_Results      32
Trans_val1, Trans_val2, Trans_val3;
void main(void)
{
   WDTCTL=WDTPW+WDTHOLD;
   P6SEL=0x0F;
ADC12CTL0=ADC12ON+MSC+SHT0_2;
   ADC12CTL1=SHP+CONSEQ_1;
   ADC12MCTL0=INCH_0;
   ADC12MCTL1=INCH_1;
   ADC12MCTL2=INCH_2;
   ADC12MCTL3=INCH_3+EOS;
   ADC12IE=0x08;
   ADC12CTL0|=ENC;
   while(1)
   {
     ADC12CTL0|=ADC12SC;
   _BIS_SR(LPM0_bits+GIE);
   }}
**********************************
#pragma vector=ADC_VECTOR
__interrupt void ADC12ISR (void)
 {
   results[0] = ADC12MEM0;
   results[1] = ADC12MEM1;
   results[2] = ADC12MEM2;
   _BIC_SR_IRQ(LPM0_bits);
}
 ********************************** 功 能 ：ADC 中断服务函数，在这里用多次平均的计算模拟电压数值
 **********************************
 #pragma vector=ADC_VECTOR
__interrupt void ADC12ISR (void)
 { uchar i;
   unsigned long sum;
   int index;
   static uint index = 0;
   results[index++] =ADC12MEM0;
   if(index == Num_of_Results)
    { i=0; long sum = 0;index = 0;
      for(i = 0; i < Num_of_Results; i++)
         { sum += results[i];}
          sum>>= 5;
          Trans_val1=sum;}
    If(Truans_val1>Truans_val1*1.5||Truans_val1<Truans_val1*0.5)
   P6OUT=0x01;
   static uint index = 0;
   results[index++] =ADC12MEM1;
   if(index == Num_of_Results)
      { i=0;
        long sum = 0;
        index = 0;
    for(i = 0; i < Num_of_Results; i++)
    {sum += results[i];}
     sum>>= 5;
     Trans_val2=sum;}
    If(Truans_val2>Truans_val2*1.5||Truans_val2<Truans_val1*0.5)
   P6OUT=0x02;
   static uint index = 0;
   results[index++] =ADC12MEM2;
   if(index == Num_of_Results)
   {
   i=0;
   long sum = 0;
   index = 0;
     for(i = 0; i < Num_of_Results; i++)
     {
       sum += results[i];}
       sum>>= 5;
      Trans_val3=sum;}}
If(Truans_val3>Truans_val3*1.5||Truans_val1<Truans_val1*0.5)
     P6OUT=0x04;
```

2. 2 1602 液晶模块显示：

功能描述：通过对液晶模块初始设置，读写等操作最终实现将系统信息显示。

```
**********************************
#include <msp430x14x.h>
#include "cry1602.h"
typedef unsigned char uchar;
typedef unsigned int    uint;
**********宏定义***********
#define DataDir          P4DIR
#define DataPort         P4OUT
#define Busy          0x80;
P3OUT&=~BIT0;
#define SET_RS P3OUT|=BIT0;
#define CLR_RW P3OUT&=~BIT1;
#define SET_RW P3OUT|=BIT1;
#define CLR_EN P3OUT&=~BIT2;
```

首都师范大学信息工程学院

```
#define SET_EN P3OUT|=BIT2;
*********************************
功能：让液晶从某个位置起连续显示 N 字符
*********************************
void DispNChar(uchar x,uchar y, uchar n,uchar *ptr)
{ uchar i;
  for (i=0;i<n;i++)
{
   Disp1Char(x++,y,ptr[i]);
   if (x == 0x0f)
   {x = 0; y ^= 1;
  }}}
*********************************
向液晶输入显示字符位置的坐标信息
*********************************
void LocateXY(uchar x,uchar y)
{     uchar temp;
      temp = x&0x0f;
      y &= 0x01;
      if(y)
     temp |= 0x40;
      temp |= 0x80;
      LcdWriteCommand(temp,1);}
*********************************
功能：在某个位置显示一个字符
*********************************
void Disp1Char(uchar x,uchar y,uchar data)
  {
     LocateXY( x, y );
      LcdWriteData( data );
  }
*********************************
功能：对 1602 液晶模块进行复位操作
*********************************
void LcdReset(void)
{    CtrlDir |= 0x07;
     DataDir    = 0xFF;
      LcdWriteCommand(0x38, 0);
      Delay5ms();
     LcdWriteCommand(0x38, 0);
      Delay5ms();
     LcdWriteCommand(0x38,0);
Delay5ms()LcdWriteCommand(0x38,1);
      LcdWriteCommand(0x08, 1);
      LcdWriteCommand(0x01, 1);
      LcdWriteCommand(0x06, 1);
      LcdWriteCommand(0x0c, 1); }
*********************************
功能：向液晶模块写入命令
*********************************
voidLcdWriteCommand(uchar cmd,uchar chk)
{
   if (chk) WaitForEnable();
        CLR_RS;
      CLR_RW;
      _NOP();
     DataPort= cmd;
       _NOP();
SET_EN;
_NOP();
_NOP();
CLR_EN;       }
*********************************
功能：向液晶显示的当前地址写入显示数据
void LcdWriteData( uchar data )
{     WaitForEnable();
     SET_RS;
       CLR_RW;
     _NOP();DataPort = data;
       _NOP();
         SET_EN;                    _NOP();
      CLR_EN; }
```

2.3 键盘输入扫描设置误差程序：

```
Init_Keypad();
while(1)
{Key_Event();
If (key_Flag == 1)
{    if(key_val==11)
    { break; }
       key_Flag = 0;
if(z==1)
{    Dispbuf[1] = key_val;
     Dispbuf[0] =0;
     tem1=key_val;
     zhi=key_val;}
       if(z==2)
 {    tem0=tem1;
      tem1=key_val;
 zhi=tem0*10+tem1;
 Dispbuf[0] = tem0;
    Dispbuf[1] = tem1;}
    z++; }}
*********************
uchar key_Pressed;设置函数全局变量
uchar key_val;
uchar key_Flag;
Ucharkey_Map[]=
{1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16};
*********************************
功能：初始化扫描键盘的 IO 端口
void Init_Keypad(void)
{    P1DIR = 0xf0;
       P1OUT |= 0xf0;
     key_Flag = 0;
     key_Pressed = 0;
     key_val = 0;}

*********************************
功能：扫描键盘的 IO 端口，获得键值
*********************************
void Check_Key(void)
{uchar row ,col,tmp1,tmp2;
```

西南师范大学信息工程学院

```
tmp1=0x80;
for(row=0;row<3;row++)
{P1OUT=0xf0;
P1OUT-=tmp1;
tmp1>>=1;
if((P1IN&0x0f)<0x0f)                    { tmp2=0x01;
     for(col=0;col<4;col++)
   { if((P1IN&tmp2)== 0x00)
   {key_val=key_Map[row*4+col];
    if(key_val==10)
   { key_val=0;}
   return; }
   tmp2<<= 1; }
       }
    }
   }
**********************************
功能：延时约 15ms，完成消抖功能
**********************************
void delay()
{    uint tmp;for(tmp = 12000;
     tmp > 0;tmp--);
}
**********************************
功能：检测按键，并获取键值
**********************************
void Key_Event(void)
{uchartmp;
  P1OUT&=0x00;                                  tmp =
    P1IN;
 if  ((key_Pressed  ==  0x00)&&((tmp  &  0x0f)  <
     0x0f))
   {key_Pressed=1;
      delay();
      Check_Key(); }
 else if
      ((key_Pressed==1)&&((tmp    &    0x0f)    ==
      0x0f))
      { key_Pressed = 0;
         key_Flag = 1; }
         else {_NOP();}}
```

2.4 D/A 转换程序，定比分流控制

```
typedef unsigned char uchar;
typedef unsigned int    uint;
#define SCL_H P1OUT |= BIT1
#define SCL_L P1OUT &= ~BIT1
#define SDA_H P1OUT |= BIT0
#define SDA_L P1OUT &= ~BIT0
#define SCL_out P1DIR |= BIT1
#define SDA_in    P1DIR &= ~BIT0
#define SDA_out P1DIR |= BIT0
#define SDA_val P1IN&BIT0
#define TRUE     1
#define FALSE     0
**********************************
功      能：设置 IIC 对应 IO 为输出方
**********************************
void Set_IO(void)
{
      SCL_out;
      SDA_out;
       SCL_H;
       SDA_H;}

**********************************
功能：延时约 100us 的时间
**********************************
void dela(void)
{
   uchar i; for(i = 0;i < 15;i++)
   _NOP();
   }
**********************************
功能：完成 IIC 的起始条件操作
**********************************
void start(void)
{SCL_H;
 SDA_H;
 dela();
 SDA_L;
 dela();
 SCL_L;
 dela();}
**********************************
功能：完成 IIC 的终止条件操作
**********************************
void stop(void)
{SCL_H;
SDA_L;
dela();
SDA_H;
dela();}
**********************************
功能：检查从机的应答操作
**********************************
uchar check(void)
{     uchar slaveack;
       SDA_in;
       SCL_H;dela();
       slaveack = SDA_val;
       SCL_L;
      dela();
       SDA_out;
       if(slaveack)
       return FALSE;
      else return TRUE;}
**********************************
功能：向 IIC 总线发送一个 1
void write1(void)
{     SDA_H;
      dela();
       SCL_H;
       dela();
```


首都师范大学信息工程学院

```
        SCL_L;
        dela();}
*********************************
功能：向 IIC 总线发送一个 0
*********************************
void write0(void)
{       SDA_L; dela();
        SCL_H; dela();
        SCL_L;     dela();}
*********************************
功能：向 IIC 总线发送一个字节的数据
*********************************
void write1byte(uchar wdata)
{uchar i;
  for(i = 8;i > 0;i--)
    {if(wdata & 0x80)
  write1();
  else write0();
  wdata <<= 1;}}
```

2.5 结温工作点检测:DS18B20

温度检测程序

```
*********************************
```

程序功能：结温工作点测试：读取 DS18B20 进行温度测量以后的结果并在 1602 液晶上显示

```
*********************************
```

观察显示温度数值(主程序)。

```
*********************************
#include    "msp430.h"
#include    "BoardConfig.h"
#include    "cry1602.h"
#include "DS18B20.h"
uchar dN[6];
void Disp_Numb(uint temper);
********主函数*************
void main( void )
{       uchar i;
     WDTCTL=WDTPW+ WDTHOLD;
        BoardConfig(0xb8);
        BCSCTL1&=~XT2OFF;
  Do
  { IFG1&=~OFIFG;
     for (i = 0xFF; i > 0; i--); }
     while((IFG1&OFIFG));
        BCSCTL2 |= SELM_2 + SELS;
        TACTL |= TASSEL_2 + ID_3;
        _EINT();
        LcdReset();
        DispStr(0,0,"Temperature is:");
        while(1)
        {    Disp_Numb(Do1Convert());
             Disp1Char(4,1,dN[5]+0x30);
             Disp1Char(5,1,dN[4]+0x30);
             Disp1Char(6,1,0x2e);
             Disp1Char(7,1,dN[3]+0x30);
             Disp1Char(8,1,dN[2]+0x30);
             Disp1Char(9,1,dN[1]+0x30);
             Disp1Char(10,1,dN[0]+0x30);
        } }
*********************************
函数名称：Disp_Numb
功能：将从 DS18B20 读取的 11bit 温度数据转换成数码管显示的温度数字
*********************************
void Disp_Numb(uint temper)
{    uchar i;
  for(i = 0;i < 6;i++)
    dN[i] = 0;
    if(temper & BIT0)
     {
            dN[0] = 5;
            dN[1] = 2;
            dN[2] = 6 }
      if(temper&BIT1)
      {     dN[1] += 5;
            dN[2] += 2;
            dN[3] += 1;}
      if(temper & BIT2)
      {     dN[2] += 5;
            dN[3] += 2;
            if(dN[2] >= 10)
            {     dN[2] -= 10;
                  dN[3] += 1;}}
      if(temper&BIT3)
        {dN[3] += 5;}
      if(temper & BIT4)
        {dN[4] += 1;}
      if(temper & BIT5)
        {dN[4] += 2;}
      if(temper & BIT6)
        {dN[4] += 4;}
      if(temper & BIT7)
      {     dN[4] += 8;
            if(dN[4] >= 10)
            {dN[4] -= 10;
             dN[5] += 1;
       }}
      if(temper & BIT8)
      {     dN[4] += 6;
            dN[5] += 1;
            if(dN[4] >= 10)
          {dN[4] -= 10;
           dN[5] += 1; }}
      if(temper & BIT9)
      {     dN[4] += 2;
             dN[5] += 3;
            if(dN[4] >= 10)
            {
                  dN[4] -= 10;
                  dN[5] += 1;
             }
            }
      if(temper & BITA)
```


西南师范大学信息工程学院

```
    {       dN[4] += 4;
            dN[5] += 6;
            if(dN[4] >= 10)
            {     dN[4] -= 10;
                  dN[5] += 1;}
            if(dN[5] >= 10)
            {dN[5] -= 10;}}}
**********************************
DS18B20.C 文件
**********************************
typedef unsigned char uchar;
typedef unsigned int    uint;
#define DQ1 P2OUT |= BIT4
#define DQ0 P2OUT &= ~BIT4
#define DQ_in P2DIR &= ~BIT4
#define DQ_out P2DIR |= BIT4
#define DQ_val (P2IN & BIT4)
**********************************
功能：实现 N 个微秒的延时
void DelayNus(uint n)
{     CCR0 = n;
     TACTL |= MC_1;
     while(!(TACTL & BIT0));
     TACTL &= ~MC_1;
     TACTL &= ~BIT0; }
**********************************
功能：对 DS18B20 进行复位操作
**********************************
uchar Init_18B20(void)
{ uchar Error;
  DQ_out;   _
  DINT();
  DQ0;
  DelayNus(500);
  DQ1;
  DelayNus(55);
  DQ_in;
  _NOP();
  if(DQ_val)
  {Error = 1; }
  else{ Error = 0; }
  DQ_out;
  DQ1;
_EINT();
  DelayNus(400);
return Error;}
**********************************
功能向 DS18B20 写入一个字节的数据
**********************************
void Write_18B20(uchar wdata)
{     uchar i;
      _DINT();
      for(i = 0; i < 8;i++)
       { DQ0;
        DelayNus(6);
        if(wdata & 0X01)
        DQ1;
        else DQ0;
        wdata >>= 1;
        DelayNus(50);                    DQ1;
         DelayNus(10); }
      _EINT();}
**********************************
功能从 DS18B20 读取一个字节的数据
**********************************
uchar Read_18B20(void)
{     uchar i;
      uchar temp = 0;_DINT();
      for(i = 0;i < 8;i++)
       { temp >>= 1;DQ0;
         DelayNus(6);
        DQ1;DelayNus(8);
         DQ_in;
        _NOP();
         if(DQ_val)
        temp |= 0x80;
         DelayNus(45);
         DQ_out;
         DQ1;
         DelayNus(10); }
        _EINT();
        return temp;}
**********************************
功能：发送跳过读取产品 ID 号命令
**********************************
void Skip(void)
{Write_18B20(0xcc);}
**********************************
功能：发送温度转换命令
**********************************
void Convert(void)
{Write_18B20(0x44);}
**********************************
功能：发送读 ScratchPad 命令
**********************************
void Read_SP(void)
{Write_18B20(0xbe);}
**********************************
功能：从 DS18B20 读取温度转换结
**********************************
uint ReadTemp(void)
{    uchar temp_low;
uint    temp;temp_low = Read_18B20();
temp = Read_18B20();
temp = (temp<<8) | temp_low;
return    temp;
}
**********************************
功能：   DS18B20 完成一次温度转换
**********************************
uint Do1Convert(void)
{uchar i;
Do
{i = Init_18B20(); }
```

首都师范大学信息工程学院

```
  while(i);
  Skip();
Convert();
  for(i = 20;i > 0;i--)
DelayNus(60000);
  do{i = Init_18B20();}
  while(i);
  Skip();
  Read_SP();
  eturn ReadTemp();
  }
```

首都师范大学信息工程学院