

# 抗辐照电源系统设计与测试

张伟

(华中师范大学 物理科学与技术学院 武汉 430079)

**摘要:** (高能物理电子学读出系统的重要性) 在高能物理电子学读出系统中供电电源是非常重要的一个组成部分, 对电源也提出了抗辐照、低噪声、多通道、具有一定的输出电流和电压能力的要求。(别人的研究现状) 鉴于此, 我们设计了一种抗辐照 16 通道输出的电源系统。该电源系统由两块一样的电源板级联而成, 根据接入控制器的方式不同自动识别主从板。每一个电源通道具有上电死锁、电压电流监测, 过流保护等功能。首先介绍了整个系统的框架, 然后以设计框架为基础分析系统硬件各个模块的工作原理及实现方法。最后, 对整个电源系统进行测试, 并分析测试结果和测试软件的设计。经测试证明, 该电源系统具有良好的抗辐照能力, 输出电压电流均满足设计要求。

**关键字:** 电源; 抗辐照; 电压; 电流;

## Radiation-hardened power supply system design and testing

Wei Zhang

(Central China Normal University College of physics science and technology Wuhan 430079)

**Abstract:** Power supply is a significant important component in the electronic readout system of high energy physics. There are some requirements for power supply such as radiation-hardened, low noise, multichannel output, and voltage and current output capacity. In view of this, we designed a radiation-hardened power system with sixteen channels output. Two identical power supply boards are cascaded in this power supply system, which can automatically recognize the master board that is connected to the controller from the slave board. Each power supply output channel have latch-up during power-on, output voltage and current monitoring, over-current protection and so on. Firstly, we introduce the structure of the entire system, then we analyze operating principle and realization method for every module of system hardware. Finally, we test the entire power supply system and analyze the testing results, then give the structure of software for testing. The testing results verify that the power supply system has prominent radiation-hardened capacity and the output voltage and current meet the designing requirements for the electronic readout system in high energy physics.

**Keyword:** Power supply; radiation-hardened; voltage; current;

## 1 引言

高能物理是研究组成物质和射线的基本粒子以及它们之间相互作用的物理学的一个分支。由于大部分的基本粒子在一般条件下不存在或不单独出现, 只有使用粒子加速器在能高能相撞的条件下才能生产和研究它们。因此研究高能粒子碰撞后特性的数据获取系统一般工作在一定剂量的辐照的条件下, 在数据获取系统中电源是非常重要的一个组成部分。通常要求数据获取系统的供电电源需要具备一定的抗辐照能力、较低的

噪声、上电死锁、实时监测每个通道的输出电压及电流等功能。

目前在高能物理数据获取系统中, 对于多通道大电流 (1-2A) 输出的电源一般采用 DC-DC 方案。但 DC-DC 解决方案存在两个问题, 第一相对于 LDO 来说 DC-DC 输出纹波过大, 第二 DC-DC 存在反馈环路, 易使辐照的影响导致输出不稳定。另外, DC-DC 占用 PCB 面积也比 LDO 大。

正是基于高能物理数据获取系统中这些特殊的要求和当前高能物理数据获取系统中存在的这些缺点, 本文致力于研究开

发一种抗辐照、低噪声、上电死锁、多通道输出等功能的电源系统。首先根据需求提出了设计方案，并分析各个功能模块的工作原理及实现方法。最后，经过测试将测试结果与设计理论值进行对比。

2 系统概况

本文设计的电源系统及测试平台如图 1 所示，该电源系统由两块一样的电源板组成。每块电源板有 8 路的正电源输出，电压输出范围为 1.5V - 2.5V 步长 1 mV，1 路负偏压输出，输出范围为 0V - 4.9V 步长为 1 mV 和三路温度测量通道。两块电源板之间通过 IIC 总线连接，当其中一块接到控制器上时，该板为主板，则另外一块板为从板。两块电源板通过级联可以实现 16 路正电源的输出，2 路负偏压的输出和 6 路温度测量通道。每块电源板上的可控芯片都选用 IIC 接口，通过与控制器的连接来修改该板上的 IIC 地址，从板上的 IIC 地址不变，来实现主从电源板的识别。

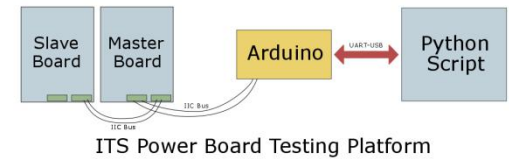


图 1 电源系统及测试平台

测试过程中我们采用 Arduino Mega 2560 MCU 作为主控制器，PC 端用 python 脚本通过 USB-UART 与 Arduino Mega 2560 MCU 进行通信。Mega 2560 MCU 主要负责 IIC 器件的读写操作，python 脚本主要负责接收用户输入的命令并将其解析成对应的 IIC 指令送给 Mega 2560 MCU。

3 系统硬件

本文设计的电源系统集成了 16 通道正电压输出、2 通道负偏压输出、6 通道温度监测。每个正电压输出通道都有上电死锁、电压电流监测、输出电流阈值设定、手动及软件复位死锁状态。

3.1 正电源输出通道

设计要求正电源电压输出范围为 1.5 - 2.5V，电流输出能力最大为 2A。电源芯片选用 Microchip 公司的 MIC39152 LDO，MIC39152 是一款具有输出使能端的可调线性低压差调节器，拥有低电压大电流输出能力，外部只需要少量的元件即可工作。MIC39152 具有一定的抗辐照能力，在一定剂量的辐照条件下也能正常的工作。

图 2 为第 1 通道正电源输出通道的原理图，每个正电源通道主要有上电死锁、电压电流监测、手动及软件复位输出死锁状态、软件置位输出死锁状态。上电死锁是指电源板上电后各个正电源输出通道的输出为高阻状态，这样可以防止上电输出不稳定对后端的读出系统造成不可恢复的损害。如图 2 中所示，U9 为可调 LDO，通过调节 10K 数字电位器来实现输出电压的变化，数字电位器输出分别接到 POT\_A\_CH1 和 POT\_B\_CH1。R36 为通道 1 的电流检测电阻 (50 mOhm)，通过差分运放 U10 将电流检测电阻上的差分电压进行放大再通过缓冲器 (U5) 后送给 ADC 进行采样。另外，采样电阻低电压端的输出电压直接送给 ADC 进行电压采样测出该通道的输出电压值。U11 为带输出死锁功能 (Latch) 的比较器，当 Latch 输入端为高电平时，AD8611

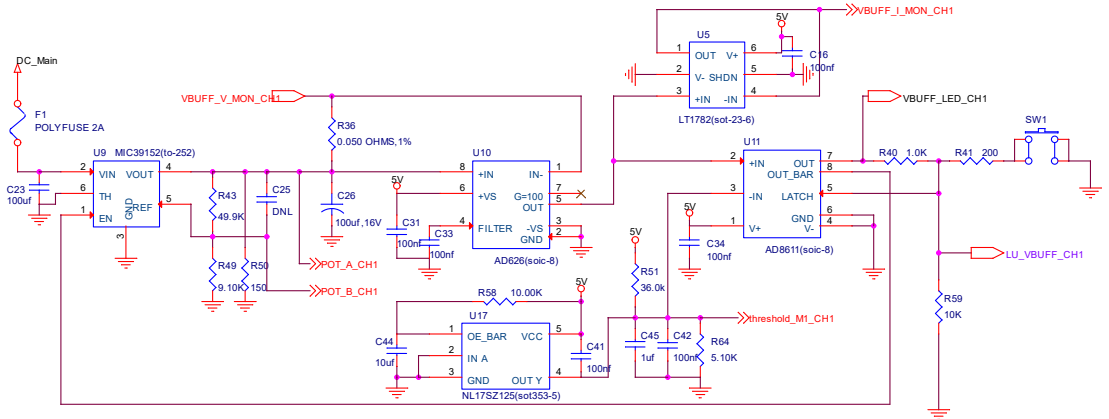


图 2 单个正电源输出通道原理图

牌死锁状态，U11 的输出和互补输出都保持 Latch 之前的值不变。该电路直接将比较器的输出作为 Latch 端的输入信号，比较器的互补输出端被连接到 LDO 的使能端。当比较器 (U11) 的同相输入端电压高于比较器的反相输入端电压时，比较器输出端为高电平，互补输出端为低电平。因为 Latch 端直接连接到比较器的输出所以比较器被死锁。LDO 的 EN 引脚为低电平非使能，U11 的互补输出端直接连接到 LDO 的 EN 引脚，当 U11 的互补输出端输出低电平时 LDO 输出高阻态，这样就达到了输出死锁的功能。

LDO 的输出电压满足如下公式：其中  $R_p$  为可调数字电位器的阻值，变化范围为 0-10 kOhm， $V_{ref}$  为 LDO 内部参考源电压，典型值为 1.24V。

$$V_{out} = \left[ \frac{49.9 \times (R_p + 2)}{49.9 + R_p + 2} + 9.1 \right] \times \frac{V_{ref}}{9.1}$$

当  $R_p$  的值调节为 0 Ohm 时,  $V_{out}=1.502V$ ,  
当  $R_p$  的值调节为 10 kOhm 时,  $V_{out}=2.558V$ 。  
从以上推导可以看出, 正电压输出通道的输出  
电压值的理论计算满足我们的设计要求  
(要求输出范围为 1.5V - 2.5V)。

电流的测量首先经过 50 mOhm 电阻进行取样, 将电流转换为电压, 再经过差分运放进行 10 倍放大后通过一级缓冲器送给 ADC 进行采样。正电源通道的输出电流满足如下公式:

$$I_{out} = \frac{V_{sample}}{10 \times 0.05}$$

$I_{out}$  为通道的输出电流值,  $V_{sample}$  为 ADC 测量的电压值。

U11 的 Latch 状态可以被手动或软件复位, 手动复位是通过 SW1 轻触按键来实现。当 U11 的输出为高电平时, Latch 状态有效, 通过按下 SW1 轻触按键可以将 Latch 引脚从高电平变为低电平从而复位 Latch 状态。软件可以置位和复位 Latch 状态通过外部 IO 扩展芯片 (PCF8574) 来实现, 当向 IO 扩展芯片连接到 LU\_VBUFF\_CH1 的 IO 口写入低电平时复位 Latch 状态。反之, 写入高电平时置位 Latch 状态。

如图 2 中所示, Threshold M1 CH1 是

DAC 设置电流阈值的接入点, 上电时 DAC 输出为高阻态, U17 为一单稳态触发器, 当 OE\_BAR 为低电平时, OUT\_Y 为低电平。当 OE\_BAR 为高电平时, OUT\_Y 输出为高阻。上电过程中, 由电容(C44)和电阻(R58)的组成充电回路, 使 OE\_BAR 先为低电平慢慢变为高电平。OUT\_Y 输出由低电平变为高阻态。由以上分析可知, 上电过程中 OUT\_Y 输出为低电平, DAC 的输出状态为高阻态, 所以上电过程上 U11 的反相输入端为低电平, U11 的同向输入端在上电过程中任何的扰动信号都将使 U11 的输出为高电平, 使 latch 端被置位, LDO 的使能端为低电平, LDO 输出为高阻态, 这样可以避免上电过程中 LDO 输出不稳定而损坏探测器芯片。

### 3.2 负偏压输出通道

图3为负偏压输出通道的原理图。负偏压输出通道主要由DAC、射极跟随器和输出级运放组成。DAC主要功能是提供一个正的电压变化范围。其中射极跟随器具有关闭功能,当射极跟随器被关闭时其输出为高阻态。输出级运放为一个电流输出的反向比例放大电路,其增益为约为1.96。

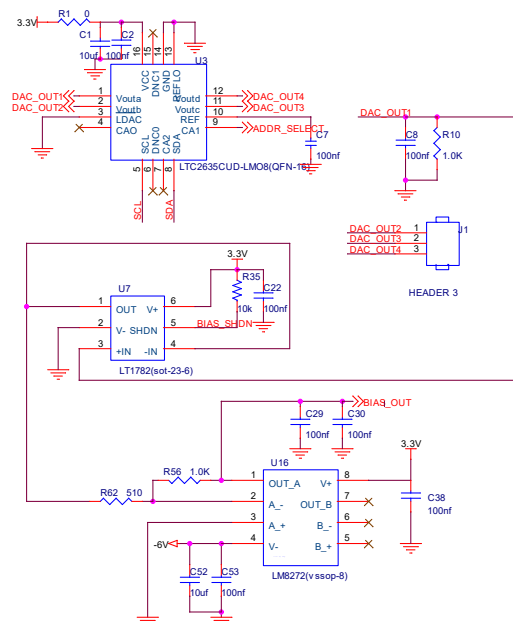


图 3 负偏压输出通道

负偏压输出通道的输出电压如下表达式:

$$V_{bias} = \frac{D_{code}}{255} \times 2.048 \times (-1.96)$$

其中,  $V_{bias}$  为负偏压通道的输出电压值,  $D_{code}$  为写入 DAC 的数字值。由上式可知,  $V_{bias}$  的变化范围为 0V - 4.9V。

### 3.2 温度测量通道

该电源系统具有三个温度测量通道, 每个通道可以实时监测各个测试点的温度。温度测量通道由 PT100、电阻温度探测器芯片组成。PT100 可以直接将温度值转化为相应的电阻值, 再通过电阻温度探测芯片 (MAX31865) 将相应的电阻值转化为与之对应的温度。

MAX31865 采用 SPI 接口与外部进行通信, 由于电源板上采用的是 IIC 协议与控制器进行通信, 在 IIC 与 SPI 芯片之间我们采用 IIC-SPI Bridge 芯片 (SC18IS602) 进行桥接。每个 SC18IS602 可以同时接入四个 SPI 接口器件, 每个器件拥有独立的片选信号 (SSx), 共用数据和时钟信号 (SDI, SCK)。IIC-SPI 桥接芯片直接挂载到电源板的 IIC 总线上。MAX31865 采用四线测电阻的原理来测量 PT100 两端的电阻值减小导线上电阻带来的误差。温度测量通道原理图如图 4 所示。

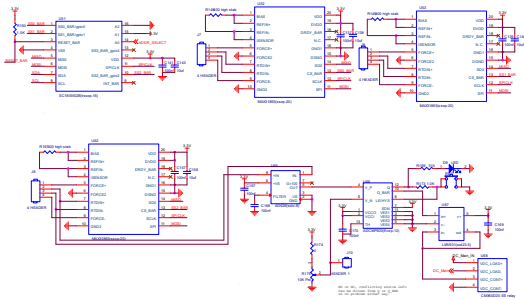


图 4 温度测量通道原理图

其中一路温度测量通道用来控制固态继电器的通断。固态继电器主要用于每个电源板上 8 路 LDO 供电的控制。当温度传感器 PT100 检测到温度过高时, 温度传感器两端电压增加, 通过差分运放 (U65) 放大后于设置的阈值进行比较, 当温度传感器两端的电压经过放大后高于设定的阈值时, U67 大电流输出运放输出高于电平, 使固态继电器断开。反之, 则固态继电器接通。

## 4 系统测试

### 4.1 电源系统测试平台

电源系统测试平台如图 1 所示, 该测试系统主要由三部分组成: 被测电源板系统、Arduino MCU 控制器各 PC 端 Python 脚本。被测电源板系统由两块一样的电源板组成, 两块电源板之间通过扁平双绞线进行连接, 两块板子之间通过 IIC 协议进行通信。Arduino MCU 控制器作为 PC 端与电源板之间通信的桥梁, 主要负责 IIC 命令的读写操作。PC 端 Python 脚本提供了良好的人机交互接口。Python 脚本将输入的控制命令解析成对应的 IIC 指令, 并通过相应的协议机制把 IIC 指令传送给 Arduino MCU 控制器。

### 4.2 正电源输出通道电压输出测试

正电源输出通道电压输出测试步骤如下: 首先从把 0-255 (写入数字电位器的数字值) 依次写入数字电位器。每次写入一个数字值后延时一会再通过该通道电压测量的 ADC 读回该通道的测量电压值。接下来, 再把 0-250 以 25 为步进值依次写入数字电位器, 同样每次写入一个数字值后延时一会再用万表测量该通道的输出电压值。最后将理论输出电压值 ( $V_{out}$ ), ADC 测量输出电压值和万用表抽样测量输出电压值绘制在同一张图中进行对比。

图 5 为正电源输出通道 1 (通道编号为 1-16) 的输出波形图。图中 x1 轴表示写入到数字电位器的数字值, 变化范围为 0-255。

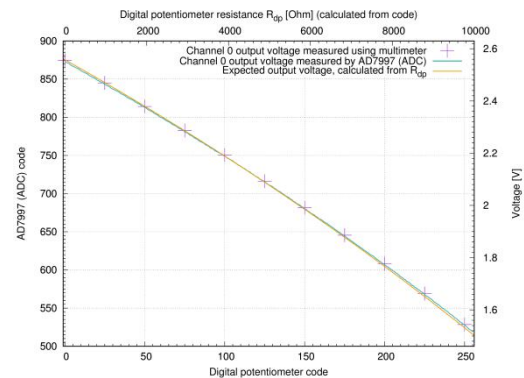


图 5 正电源输出通道 0 输出电压

x2 轴表示数字电位器接入的真实电阻值。y1 轴表示通道 0 ADC (AD7997) 采样到的数字值。y2 轴表示实际输出电压值。



紫色十字点表示万用表测量的电压值，绿色线表示电压监测 ADC 测得的 1 通道的输出电压值，黄色曲线表示该通道的理论输出值。从图中可以看出通道 0 的理论输出值、ADC 采样值和万用表测量值具有高度的一致性，说明通道的输出电压具有较好的性能。（受限于篇幅原因，这里只列举了一个通道的输出值，其它通道的输出电压也满足这样的一致性。）

#### 4.3 正电源输出通道电流输出测试

正电源通道输出电流的测试首先在每个输出通道上接一个 1.2 Ohm 的负载。设置较高的输出电压阈值，给数字电位器写入 0-255 的数字值并通过电源板上的电流监测电路测量其输出电流。同时，通过万用表间隔测量其输出电流。图 6 为通道 0 的电流输出测试结果。

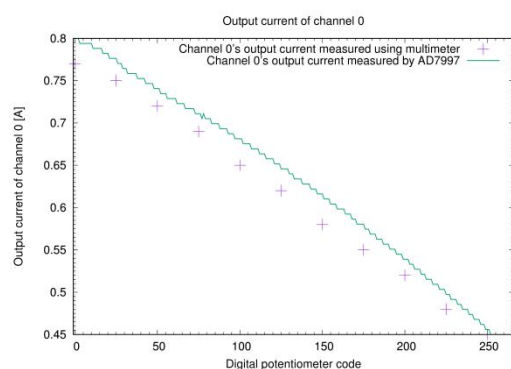


图 6 正电源输出通道 0 输出电流

图中 x 轴表示写入数字电位器的数字值，y 轴表示实际输出电压值。紫色十字点表示万用电表的测量的电流值，图中绿线表示电流监测通道测量的电流值。（此处需要分析两都之间差别的原因。）

#### 4.4 负偏压输出测试

负偏压输出电路的原理已经在 3.2 节中做过详细介绍。通过向 DAC 写入 0-250 并每隔 25 变化一次的数字值，用万用表测量负偏压输出通道的电压。图 7 为负偏压输出通道的电压

图中横轴表示写入 DAC 的数字值，纵轴表示负偏压输出通道的电压值。蓝线表示理论的期望输出值，紫色十字点表示万用表

的测量值。从图中可以看出实际的测量值与理论期望的输出值具有高度的一致性，说明电路的设计满足预期的设计目标。

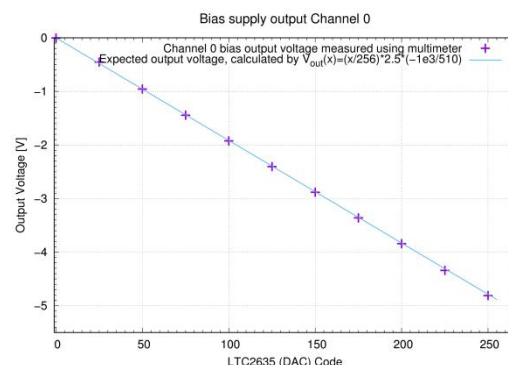


图 7 负偏压通道 0 电压输出

#### 4.5 温度模块测试

（这一部分由于封装出问题，后来又重新做了转接板。转接板还在华师，要等梅元带回来后再做测试。）

### 5 测试软件结构及流程图

系统的测试软件主要包含两部分：Arduino MCU 控制程序和 Python 控制命令行输入。在 MCU 内部使用状态机来实现与 PC 间数据的正确接收和对任意的 IIC 器件的读写操作。图 8 为 Arduino MCU 程序的流程图。

(流程图稍后补上)

Python 脚本的结构可以分为三个组成部分：控制命令输入、命令解析和命令的写入。

### 6 结论

从以上对电源系统的分析和测试可以看出，该电源系统各方面的指标均满足最初设计要求，可以实现高能物理电子学读出系统的应用。

### 参考文献