

# 多路主从电源系统设计与测试

张伟 韩春龙 黄光明

(华中师范大学物理科学与技术学院 武汉 430079)

**摘要:** 高能物理实验中电源系统是电子学读出系统重要的组成部分。高能物理实验的特点要求供电电源系统除了有一定的输出电压、电流等基本能力外,还要具有多通道输出、结构灵活、抗一定剂量辐照和低噪声等特点。鉴于此,设计了一种16路输出的主从电源系统。该电源系统由两块相同的电源板通过差分I<sup>2</sup>C总线级联而成,通过控制器与电源板连接方式自动定义主从。每一个正电压输出通道具有上电死锁、输出电压电流阈值设定和监测、过流保护等功能。测试结果表明,该电源系统能够实现主从电源板的自动识别,其输出电压、电流及噪声均满足设计要求。该电源系统在高物理实验中有较好的应用与借鉴价值。

**关键词:** 电源系统;主从识别;上电死锁;多通道

**中图分类号:** TM93; TN7      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 140.4599

## Multi-channel master-slave power supply system design and test

Zhang Wei Han Chunlong Huang Guangming

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

**Abstract:** Power supply system in high energy physics experiments is an important part of the electronics readout system. In addition to, the characteristics of high energy physics experiments request the power supply system that not only has the fundamental capacity of output voltage and current but also has the capacity of multi-channel output, flexible structure, resisting a dose of radiation and low output noise. In view of this, this paper aims to design a master-slave power supply system with 16 output channels. The power supply system is consisted by two identical power board cascaded by differential I<sup>2</sup>C bus, master and slave board are automatically defined by way of controller and power supply board connection. Each positive output channel has latch-up during power up, the output voltage current threshold setting and monitoring, over-current protection, and other functions. Test results show that the power supply system can realize the automatic identification of master-slave board, output voltage, output current and low output noise can meet the requirements of design. The power supply system has good application and reference value in the high physics experiments.

**Keywords:** power supply system; realize master-Slave; latch-up; multi-channel

## 0 引言

目前,ALICE实验中的中间轨迹系统(ITS)正在进行升级<sup>[1]</sup>;其中,为读出电子学系统供电的电源是此次升级的重点。升级前的多通道电源系统采用DC-DC方案,但其存在两个较为明显的缺点:1)相比于LDO来说,DC-DC输出纹波过大<sup>[2]</sup>;2)DC-DC存在反馈环路<sup>[3]</sup>,易受辐照影响导致其输出不稳定。另外,占用PCB面积也比较大,结构不够灵活,给生产和安装带来不便<sup>[4]</sup>。

正是基于升级前ITS高速读出电子学系统供电电源所存在的不足,本文设计了一款具有结构灵活、抗一定剂量辐

照、低噪声、上电死锁、多通道输出等功能的主从电源系统。

## 1 系统概况

本文设计的多通道主从电源系统及测试平台如图1所示。

该电源系统由两块相同的电源板构成<sup>[5]</sup>。每块电源板有8个的正电压输出通道和1个的负偏压输出通道以及3个温度测量通道。正电压通道的电压输出范围为1.5~2.5V,最小步长为4mV;负偏压通道的电压输出范围为0~-4.9V,最小步长为19mV。采用PT100作为温度测量传感器<sup>[6-7]</sup>,监控温度阈值为80℃。每块电源板上的可读

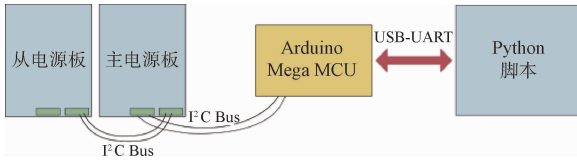


图 1 主从电源系统及测试平台

写芯片采用 I<sup>2</sup>C 接口与控制器通信,两块电源板之间通过差分 I<sup>2</sup>C 总线级联,通过控制器与电源板连接方式自动定义主从电源板。

在测试过程中选用 Arduino Mega 2560 MCU 作为控制器,其主要负责 I<sup>2</sup>C 器件的读写操作和与 PC 进行通信。PC 端用 Python 脚本通过 USB-UART 与控制器进行通信。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 I<sup>2</sup>C 指令送给控制器。

## 2 系统硬件设计

本文设计的主从电源系统集成了 16 个正电压输出通道、2 个负偏压输出通道、6 个温度监测通道。每个正电压输出通道都具有上电死锁、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等功能。

### 2.1 自动主从识别的硬件设计

每块电源板上的可读写芯片都通过 I<sup>2</sup>C 接口进行通信,所有的 I<sup>2</sup>C 器件都有一个共同的地址选择引脚(ADDR\_SELECT)。默认情况下,地址选择引脚通过上接电阻接到正电源。当控制器接到其中一块电源板时,会将 ADDR\_SELECT 引脚拉为低电平,从而修改该电源板上所有 I<sup>2</sup>C 器件的地址,另外一块电源板的 ADDR\_SELECT 引脚仍保持高电平,则其上所有 I<sup>2</sup>C 器件的地址保持不变,这样就实现了自动定义主从电源板的功能。电源板结构产如图 2 所示。

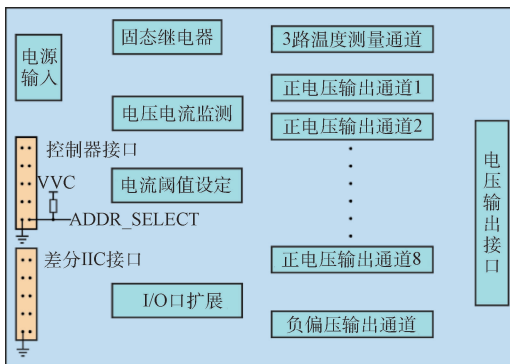


图 2 电源板结构框图

### 2.2 正电源输出通道

根据负载要求,每路正电源电压输出范围为 1.5~2.5 V,最大输出电流为 2 A。电源转换芯片选用 Microchip 公司的 MIC39152 LDO, MIC39152 是一款有输

出使能的可调线性低压差稳压器,且具有一定的抗辐照能力,在一定剂量的辐照的条件下也能正常的工作,这为整个主从电源系统的抗辐照能力提供了有力保障。

图 3 所示为单个正电源通道的原理,每个正电源输出通道主要有 4 部分组成:电压调节、电流采样、上电死锁和置位/复位/读死锁状态。

电压调节部分主要是通过数字电位器<sup>[8]</sup>来调节输出电压。数字电位器连接到 POT\_A\_CH1 和 POT\_B\_CH1,该通道的输出电压可以用如下公式表达:

$$V_{out} = \left[ \frac{R2 \times (R_p + R7)}{R2 + R_p + R7} + R3 \right] \times \frac{V_{ref}}{R3} \quad (1)$$

式中:  $R_p$  为可调数字电位器的阻值,其变化范围为 0~10 k $\Omega$ ,  $V_{ref}$  为 LDO 内部参考源电压,典型值为 1.24 V。当  $R_p$  从 0  $\Omega$  变化到 10 k $\Omega$  时,  $V_{out}$  从 1.502 V 变化到 2.558 V。从以上推导可以得出,正电源输出通道的电压输出值满足设计要求。

电流采样电路的工作原理<sup>[9]</sup>可以简要用如下公式表达:

$$I_{out} = \frac{V_{sample}}{A_u \times R8} \quad (2)$$

$I_{out}$  为通道的输出电流值,  $V_{sample}$  为 ADC 测量的电压值,  $A_u$  为 U4 运放的增益系数(  $A_u = 10$  ),  $R8$  为采样电阻。

正电压输出通道的死锁状态可以被手动和软件复位。如图 3 中置位/复位/读死锁状态虚线框所示,通过按下轻触开关实现手动复位死锁状态,向 LATCH 引脚写入低电平实现软件复位死锁状态;读 LATCH 引脚的电平可以知道该通道的状态(是否死锁)。

正电源通道的上电死锁功能<sup>[10]</sup>主要是通过虚线框“上电死锁及设定电流阈值”内的 U1 来实现的。上电期间 U1 会持续输出一段时间的低电平再变为高阻态;而与 Threshold\_CH1 相连的 DAC 在上电后输出为高阻态,这样就实现了正电源输出通道在上电期间保持死锁状态。DAC 输出模拟电压值给 Threshold\_CH1 连接点实现电流阈值的设定。

### 2.3 负偏压输出通道

负偏压输出通道的原理如图 4 所示,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可调的正电压;当射极跟随器使能输出端(SHDN)接高电平时,射极跟随器正常工作;反之,输出为高阻态。输出级运放具有大电流输出能力,其增益约为 -1.96。

负偏压通道的输出电压如下表达式:

$$V_{bias} = \frac{D_{code}}{255} \times V_{ref} \times A_u \quad (3)$$

式中:  $V_{bias}$  为负偏压通道的输出电压值,  $D_{code}$  为写入 DAC 的数字值。  $V_{ref}$  为 LTC2635 的内部参考电压,其典型值为 2.048 V;  $A_u$  为输出级运放的增益系数,约为 -1.96。由式(3)可知,  $D_{code}$  在 0~255 变化时,  $V_{bias}$  从 0~-4.9 V 变化。

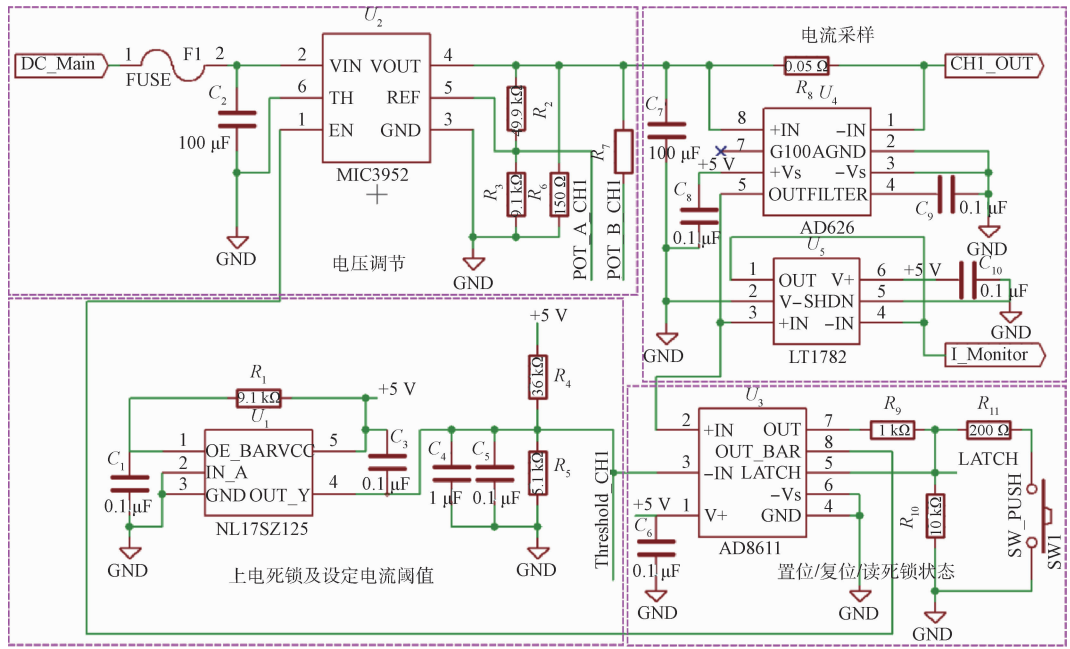


图 3 单个正电源输出通道原理

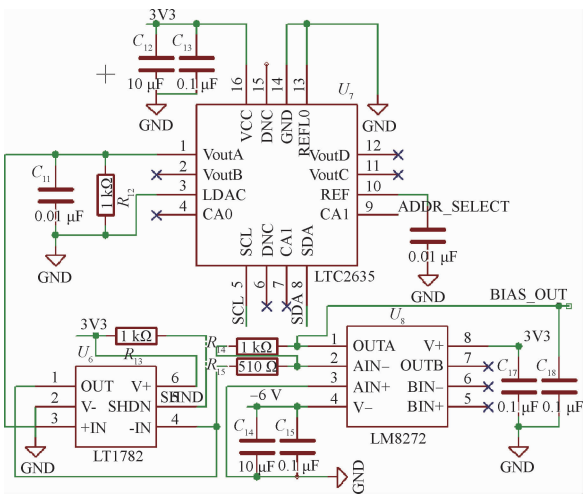


图 4 负偏压输出通道原理

### 3 系统测试

#### 3.1 电源系统测试平台介绍

电源系统测试平台如图 1 所示,该测试系统主要由 3 部分组成:被测主从电源系统、控制器和 PC 端 Python 脚本。两块电源板之间采用 I<sup>2</sup>C 协议进行通信。控制器作为 PC 端与主从电源系统之间通信的桥梁,主要负责接收 Python 脚本的控制命令和发送 I<sup>2</sup>C 读写指令。PC 端 Python 脚本提供了良好的人机交互接口,将用户输入的控制命令解析成对应的 I<sup>2</sup>C 指令,并通过相应 USB-UART 转换方式<sup>[1]</sup>准确的将 I<sup>2</sup>C 指令传送给控制器读写 I<sup>2</sup>C 设备。

#### 3.2 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:依次向数字电位器写入 0~255 的数字值,同时用万用表和电压监测 AD 测量输出电压值。理论输出电压值  $V_{out}$ 、ADC 测量电压值和万用表间隔测量电压值如图 5 所示。

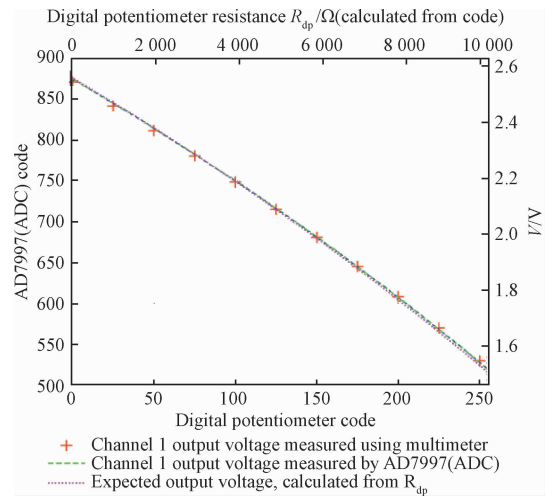


图 5 正电源输出通道 1 输出电压

图 5 中  $x_1$  轴表示写入到数字电位器的数字值; $x_2$  轴表示数字电位器接入的真实电阻值; $y_1$  轴表示第 1 通道 ADC(AD7997) 采样到的数字值; $y_2$  轴表示实际输出电压值。

从图 5 中可以看出通道 1 的理论输出电压值、ADC 监测电压值和万用表间隔测量电压值具有高度的一致性,说明该通道的输出电压满足设计要求,其他通道测试亦

满足。

### 3.3 正电源输出通道电流输出测试

正电压通道输出电流的测试首先在每个输出通道上接一个  $1.2\ \Omega$  的负载。设置较高的输出电流阈值,给数字电位器写入  $0\sim 255$  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,用万用表间隔测量其输出电流。图 6 所示为第 1 通道的电流输出测试结果。

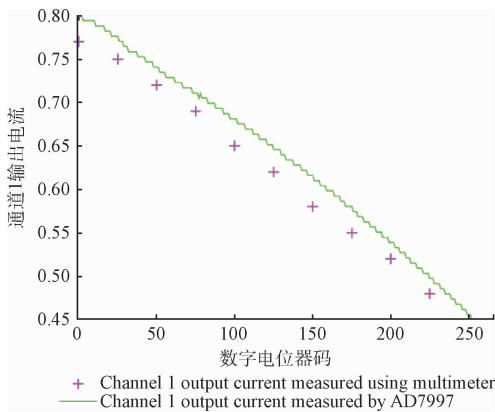


图 6 正电源输出通道 1 输出电流

图 6 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。从图 6 中可以看出,万用表测量电流值与 DAC 监测的电流值存在一定的偏移,主要是由于差分运放的失调电压导致<sup>[12]</sup>。这种线性误差可以通过软件较准消除<sup>[13]</sup>。

### 3.4 负偏压输出测试

如图 4 所示,负偏压输出通道的测试方法如下:向 DAC(LT2635)写入  $0\sim 250$  的数字值并以 25 为步进,用万用表测量负偏压输出通道的电压。测试结果如图 7 所示。

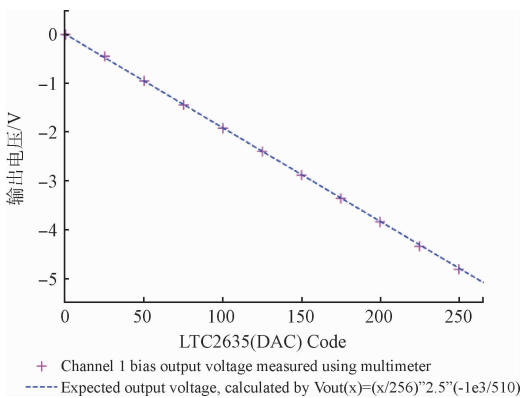


图 7 负偏压通道 1 电压输出

图中  $x$  轴表示写入 DAC 的数字值,  $y$  轴表示负偏压输出通道的电压值。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。

## 4 测试软件设计

系统的测试软件主要包含两部分:Arduino MCU 控制器程序和 Python 脚本<sup>[14]</sup>。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 I<sup>2</sup>C 器件的读写操作。图 8 所示为控制器程序的流程<sup>[15]</sup>。

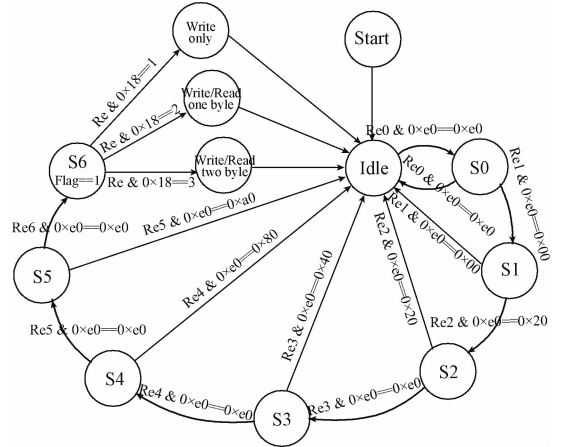


图 8 控制器程序流程

PC 端 Python 脚本实现命令解析并与控制通信,其结构可以分为 3 个组成部分:控制命令接收、命令解析和控制器通信。

## 5 结 论

提出了主从结构的电源系统,并在硬件电路上实现,具有体积小、可扩展、便于后期维护的特点。由测试结果可知,主从电源系统各项设计指标均满足设计要求和 ITS 升级的要求。同时,采用具有一定抗辐照功能的 LDO 提高了整个电源系统的抗辐照能力和稳定性。对其它高能物理电子学读出系统的电源供电有其借鉴价值。

## 参考文献

- [1] MAGER M. ALPIDE, the monolithic active pixel sensor for the ALICE ITS upgrade [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2015, 824 (7): 434-438.
- [2] 石启杰. 基于 Royer 振荡器的超低噪声电源设计[J]. 机电工程技术, 2016(z2): 281-283.
- [3] 陈涛彭, 政达. 高性能升压型 DC-DC 电源变换器的设计与实现 [J]. 国外电子测量技术, 2016, 35 (6): 55-58.
- [4] 马福星, 程旭, 马璐, 等. 新型矿用直流开关电源 [J]. 煤矿机械, 2010, 31(6): 123-124.
- [5] 安云鹏, 赵锦成, 刘金宁. 分布式电源联合供电分层控制策略研究 [J]. 国外电子测量技术, 2016(3): 58-62.

- [6] 凌菁,滕召胜,张凯旋.基于 Pt100 的红外干燥箱动态温度补偿方法研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(4):542-549.
- [7] 刘岩俊.基于 DSP 的嵌入式温度测量系统设计与实现[J].国外电子测量技术,2014,33(1):78-81.
- [8] 曾繁玲.双数字电位器 DS1267 及典型应用[J].中国集成电路,2007(4):81-84.
- [9] 黄闽海.LM324 四运放实用电路的设计[J].福建轻纺,2002(8):26-29.
- [10] 戴惠明,陈群超,陈金伙.基于 Latch 的 CMOS 动态比较器的研究[J].中国集成电路,2011(5):44-48.
- [11] 陈永波,洪永强,杨嘉.采用 USB-UART 转换方式实现 DSP 与 PC 机的 USB 通信[J].厦门大学学报:自然科学版,2005,44(3):359-362.
- [12] 黄强,滕召胜,唐亨,等.电子分析天平温度漂移补偿算法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(9):1987-1995.
- [13] 梁陈婕.单节锂电池线性充电系统的研究与设计[J].电子世界,2015(14):192-194.
- [14] 王国强,张贝克.基于 Python 的嵌入式脚本研究[J].计算机应用与软件,2010(3):107-109.
- [15] 冯爽.关于数据流程图画法原则的研究[J].河北科技大学学报,2012,33(4):343-346.

### 作者简介

张伟,1989 年出生,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统应用。

E-mail:stone2510346@126.com