



## 多通道高纯锗探测器高压保护系统设计

张惊蛰 李文凯 王小睿 马林波 张博 肖金凤 刘美洋 苟想想 赵久瑶 师成成

### Design of Multi-channel High Voltage Protection System for High Purity Germanium Detector

ZHANG Jingzhe, LI Wenkai, WANG Xiaorui, MA Linbo, ZHANG Bo, XIAO Jinfeng, LIU Meiyang, GOU Xiangxiang, ZHAO Jiuyao, SHI Chengcheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.40.2023017>

#### 引用格式:

张惊蛰, 李文凯, 王小睿, 马林波, 张博, 肖金凤, 刘美洋, 苟想想, 赵久瑶, 师成成. 多通道高纯锗探测器高压保护系统设计[J]. 原子核物理评论, 2023, 40(4):589–598. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2023017

ZHANG Jingzhe, LI Wenkai, WANG Xiaorui, MA Linbo, ZHANG Bo, XIAO Jinfeng, LIU Meiyang, GOU Xiangxiang, ZHAO Jiuyao, SHI Chengcheng. Design of Multi-channel High Voltage Protection System for High Purity Germanium Detector[J]. Nuclear Physics Review, 2023, 40(4):589–598. doi: 10.11804/NuclPhysRev.40.2023017

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于 $^{10}\text{B}_4\text{C}$ 转换体的多层多丝正比室中子探测器模拟

Simulation of a Novel Neutron Detector Based on Multi-layer MWPC with  $^{10}\text{B}_4\text{C}$  Convertor

原子核物理评论. 2019, 36(1): 71–77 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.01.071>

#### 基于开关电容阵列ASIC芯片的多通道波形数字化系统设计

Multi-channel Waveform Digitization System Utilizing Switched Capacitor Array ASICs

原子核物理评论. 2017, 34(4): 755–761 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.04.755>

#### SiPM高压电源研制与验证

Development and Verification of SiPM High Voltage Power Supply

原子核物理评论. 2021, 38(1): 66–72 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020048>

#### 重离子治癌加速器束诊探测器运动控制系统设计

Design and Development of Motion Control System for Heavy Ion Medical Machine Beam Diagnostics Detector

原子核物理评论. 2019, 36(4): 433–440 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.36.04.433>

#### CEE实验中TOF探测器数据获取系统的设计

Design of Data Acquisition System for TOF Detectors in the CEE Experiment

原子核物理评论. 2021, 38(3): 301–310 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020070>

#### ALICE实验内径迹系统探测器升级

Inner Tracking System Upgrade for the ALICE Experiment

原子核物理评论. 2020, 37(3): 734–741 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2019CNPC51>

文章编号: 1007-4627(2023)04-0589-10

## 多通道高纯锗探测器高压保护系统设计

张惊蛰, 李文凯, 王小睿, 马林波, 张博, 肖金凤, 刘美洋, 苟想想, 赵久瑶, 师成成

(兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050)

**摘要:** 高纯锗探测器是目前核谱学实验中测量 $\gamma$ 射线最常用的探测设备之一, 工作时对其高压施加具有严格的条件限制, 需要进行监测和控制。基于人工观测的传统监测方式效率低且响应慢, 往往会造成探测器不同程度的损坏。为此将高纯锗探测器内温度变化的实时监测转化为对Pt100阻值变化的实时测量, 设计实现了高压模块控制器, 构建了高纯锗探测器高压保护系统。对高压模块控制器的硬件和逻辑进行了设计并研究了降噪算法, 最后进行了电路测试。经测试, 高纯锗探测器高压保护系统在探测器温度高于高阈值时, 能够实时自动切断高压, 在探测器温度低于低阈值时, 能够实时自动恢复高压, 满足高纯锗探测器工作中施加高压需要实时保护的需求。

**关键词:** 高纯锗探测器; 高压保护; Pt100传感器; 模数转换; FPGA

**中图分类号:** TL8; TM93; TP29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.40.2023017

### 0 引言

高纯锗 (High-Purity Germanium, HPGe) 探测器是目前核谱学实验中测量 $\gamma$ 射线最常用的探测设备之一, 它能有效地测量大于100 keV的 $\gamma$ 射线, 能量分辨率比NaI高几十倍。HPGe探测器是由一块掺杂的锗晶体(N型或P型)及电子学部件构成<sup>[1-4]</sup>。在正常工作中需要在锗晶体上施加高压, 以收集射线作用于锗晶体上产生的电子对<sup>[5]</sup>。高纯锗探测器的禁带宽度只有0.665 eV, 如果工作温度过高就会导致锗晶体内电子因温漂产生过大的漏电流(热噪声), 漏电流不仅会导致探测器的能量分辨率恶化, 而且会损坏前置放大器的场效应管。经实验测定, 漏电流在高于-163 °C时显著上升, 所以在实验前, 锗晶体、前置放大器输入级的场效应管和电荷灵敏级的反馈元件必须放置在液态氮中冷却6~8 h, 直到温度低于-163 °C时才能施加高压, 否则巨大的漏电流会立刻损坏场效应管, 所以为了保护探测器, 需要时刻关注探测器中锗晶体所在的环境温度, 当温度超过-163 °C时切断高压。传统方法是利用示波器实时监测探测器主运放输出波形, 如果发现几伏反向击穿脉冲或基线上有不规则的脉冲跳动, 说明漏电流较大, 引起了局部击穿, 需要立即切断高压<sup>[6-7]</sup>。利用示波器观察反

向击穿脉冲再通过手动关闭高压这一过程, 需要实验人员实时观察并作出较快的反应, 由于这一过程时间较长, 往往造成场效应管损坏。

市面上通用的温度监测报警系统监测范围通常在-55~125 °C, 与所需监测的高纯锗探测器内部环境的温度范围不一致, 且通用温度监测报警系统的精度一般为 $\pm 2$  °C, 达不到探测器对温度监测的精度要求。所以本文旨在研制一种高精度、高灵敏度的多通道实时自动高压保护系统, 通过监测HPGe探测器内部温度变化, 在温度达到设定阈值时能做到自动准确地切断探测器外加高压, 当温度低于设定阈值后能自动恢复探测器外加高压, 以实现保护HPGe探测器的目的。

### 1 测量原理及高压保护控制方案

#### 1.1 测量原理

Pt100是一种公认的高精度测温标准传感器, 其物理、化学性质都非常稳定, 具有精度高、稳定性好、性能可靠的特点<sup>[8]</sup>。Pt100的电阻和温度成一定函数关系, 被广泛应用于-200~850 °C范围内的温度测量, 可测固体、液体、气体等多种形态物体的温度。在理想情况下, 其电阻阻值与温度关系式如式(1)所示:

$$R_T = \begin{cases} R_0(1 + AT + BT^2), & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 850^\circ\text{C} \\ R_0[1 + AT + BT^2 + C(T - 100)T^3], & -200^\circ\text{C} \leq T \leq 0^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2023-02-21; 修改日期: 2023-04-08

作者简介: 张惊蛰(1982-), 男, 甘肃兰州人, 高级工程师, 工学博士, 从事核电子学、高速数据获取与传输以及测控技术方面的研究工作;  
E-mail: zhangjzh@lut.edu.cn

式中： $A=3.908\ 02\times 10^{-3}$ ； $B=-5.775\times 10^{-7}$ ； $C=-4.183\times 10^{-12}$ ； $R_0$ 为Pt100在0℃时的电阻值，为100Ω； $T$ 为摄氏温度； $R_T$ 为 $T$ 温度时对应的电阻值<sup>[9-11]</sup>。

本设计根据Pt100的温度-阻值函数关系，通过对其阻值的测量来监测锗晶体的温度变化。从表1可以看出，Pt100的温度-阻值变化率很小，只有0.4Ω/℃左右，环境噪声会对输出结果造成很大影响。假如只以-163℃单一阈值作为触发通/断的标准，就要求保护装置具有极高的采样精度和灵敏度。为了降低设计成本并提高保护装置的可靠性，在选择触发保护的高阈值温度时保留2℃的余量，即在温度达到-165℃时输出控制信号，使高压模块切断高压输出。当锗晶体温度低于-170℃时，真空腔内由于没有游离粒子即可触发恢复施加高压，所以触发恢复高压的低阈值温度选择-170℃。5℃的阈值差提高了系统分辨能力，也为探测器提供了缓冲空间。由表1可知高低阈值温度对应的阻值变化仅2Ω左右。同时，Pt100的工作电流要小于5mA，所以，如何精确地采集到Pt100的阻值的变化以及提升系统抗干扰

表 1 阈值温度对应Pt100阻值

$T/^\circ\text{C}$	-170	-169	-168	-167	-166	-165	-164	-163
$R_T/\Omega$	31.28	31.70	32.12	32.54	32.96	33.38	33.80	34.22

能力是本设计的难点所在。

### 1.2 高压保护控制方案

HPGe探测器高压控制方案如图1所示，其中锗晶体浸泡在充满液态氮的腔体内，Pt100与锗晶体处于相同的环境，通过接头引线至高压模块控制器，进行阻值采样。高压模块的输出接口(CH)和探测器高压输入接口相连，高压模块选用CAEN公司的N1470高压模块，该模块的高压输出通过硬件接口INTLcK控制。当接口的1和2、3和4引脚短路时，高压模块内部处于锁定状态，停止高压输出。当接口的1和2引脚断路、3和4引脚短路时，高压模块内部会自动解锁，恢复高压输出。控制方案中利用跳线使3和4引脚保持短接，通过高压模块控制器来控制1、2引脚的接通和断开，以达到控制高压模块切断和恢复输出高压的目的<sup>[12]</sup>。

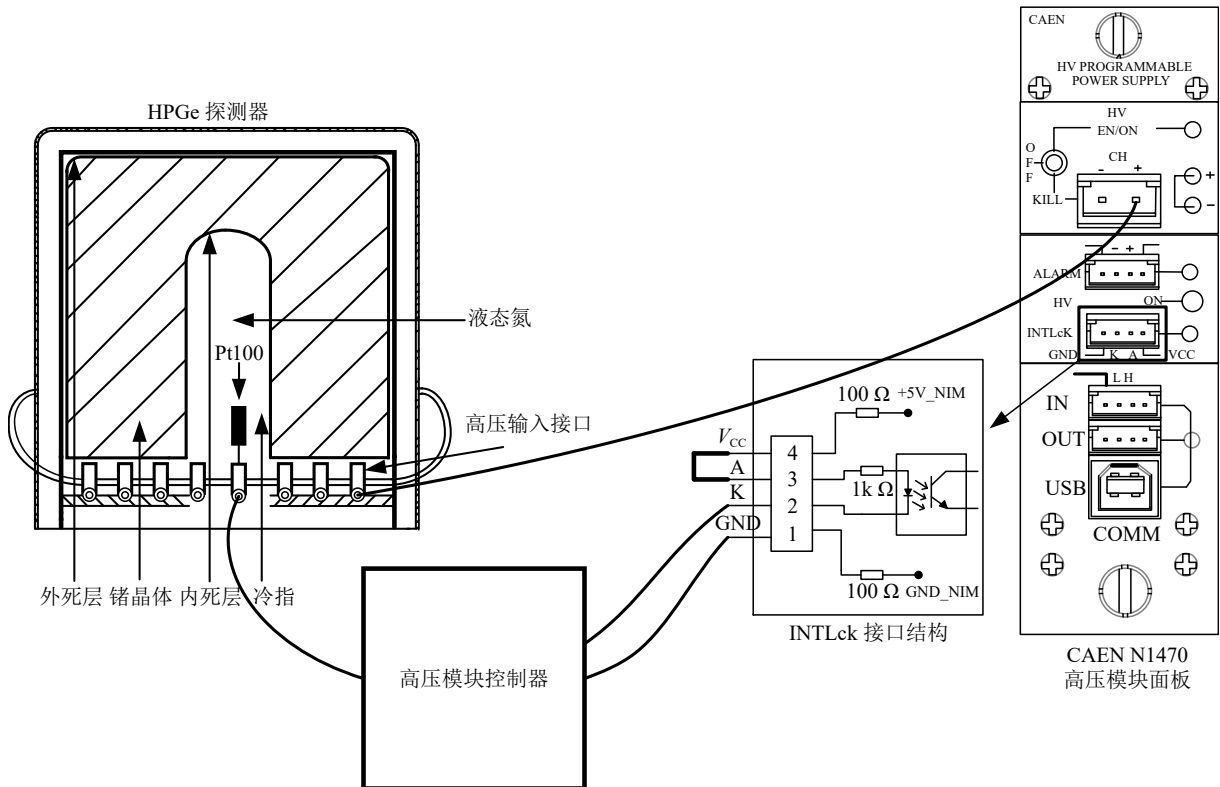


图 1 HPGe探测器高压保护控制方案示意图

## 2 高压模块控制器硬件设计

高压模块控制器硬件结构如图2所示，电路具有8路输入和8路输出，通过分时采集信号后，能够同时控制8路高压模块，为8个探测器提供保护功能。IN-

PUT1~INPUT8输入端连接HPGe探测器上的Pt100，OUTPUT1~OUTPUT8输出端连接高压模块的INTLcK控制接口。电路主要由输入和校准用模拟开关、惠斯通电桥、信号放大电路、模数转换电路(ADC)、FPGA控制电路、继电器输出电路、通信电路以及电源电路构成。

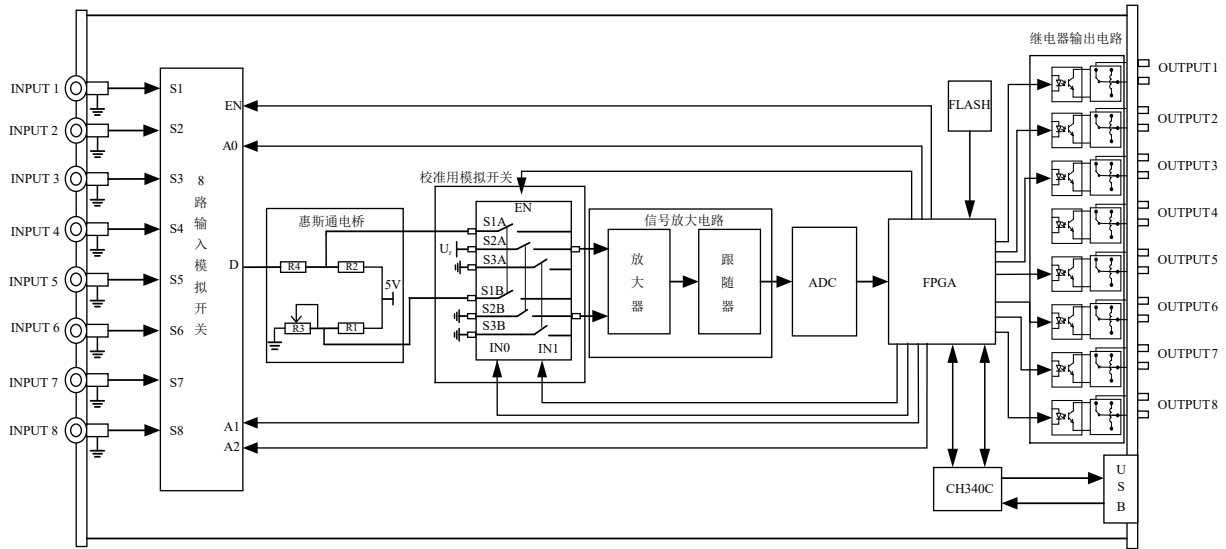


图 2 HPGe 高压模块控制器整体硬件结构

其中 FPGA 控制电路为核心电路，进行模拟开关的切换控制、ADC 时序控制、采集数据处理和继电器输出电路控制。工作时，FPGA 控制输入模拟开关将不同输入通道的 Pt100 顺序接入惠斯通电桥，利用惠斯通电桥检测 Pt100 两端的电压变化，通过放大电路放大后，进行模数转换，在 FPGA 中进行数据处理，将采集到的电压值与高低阈值比较，控制继电器输出电路，实现高压模块输出高压的控制。电路中设计了校准用模拟开关，可切换至参考电平和参考地电平进行采集，采集到的数据用于后期数据处理。通信电路为串口转 USB 电路，上位机可通过 USB 线缆和高压模块控制器连接，能够以指令的方式，灵活设置各通道高低阈值和读取各通道 Pt100 接入惠斯通电桥后的电压采集值。以下将对惠斯通电桥、放大电路、模数转换电路、继电器输出电路和电源电路做详细介绍。

### 2.1 惠斯通电桥

惠斯通电桥如图 3 所示，Pt100 接入电桥的一个桥臂。由于 Pt100 工作电流要求小于 5 mA，在 5 V 电压下经计算接入 510 Ω(0.1%)的精密电阻作为桥臂电阻进行限流。Pt100 的电阻变化率为 0.390 8 Ω/°C，由于阻值变化率小从而导致电压随阻值变化幅度很小，所以引线电阻不可忽略。为了尽可能减小测量误差，对输入端口至模拟开关的信号线进行等长设计。另外，为保证在 Pt100 接入桥臂前电桥完全平衡，将一个桥臂电阻 R<sub>3</sub> 改为可调变阻器，工作前将输入端口与地短接(等效为未接入 Pt100)，调节 R<sub>3</sub> 阻值，使得 U<sub>o</sub>=V<sub>in2</sub>-V<sub>in1</sub> 等于或接近 0 V<sup>[13]</sup>。

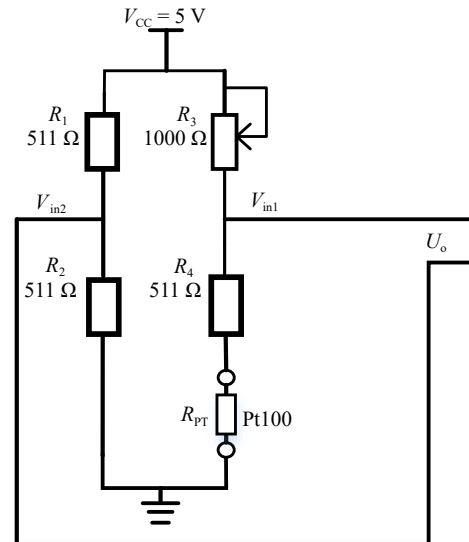


图 3 惠斯通电桥电路

当接入 Pt100 后，由于 Pt100 的阻值引起电桥不平衡，产生一个微弱的压差信号 U<sub>o</sub>，R<sub>Pt100</sub> 的阻值随温度变化，从而改变输出电压 U<sub>o</sub> 的大小。在电压 V<sub>CC</sub> = 5 V 时将表 1 中 Pt100 的阈值电阻带入式 (3) 可以计算出阈值电压 U<sub>o</sub> 的大小。式 (2) 为惠斯通电桥输出电压计算公式<sup>[14]</sup>：

$$U_o = \left( \frac{R_4 + R_{PT100}}{R_3 + R_4 + R_{PT100}} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC} = \left( \frac{510 + R_{PT100}}{510 + 510 + R_{PT100}} \right) \times 5 \text{ V}, \quad (2)$$

假设调平后 R<sub>3</sub> 的阻值为 510 Ω，经计算 Pt100 在 31.28 Ω (-170 °C) 和 33.38 Ω (-165 °C) 阻值下的输出电压 U<sub>o</sub> 约为 0.074 386 和 0.079 221 V，变化约 4.8 mV。信号十分微弱，很容易受到噪声的影响且不容易分辨，需要对信号进行放大处理。



### 2.2 信号放大电路

根据以上计算，在 5 V 供电电压范围内，放大增益选为 60 倍，即将输出电压  $U_0$  放大至 4.463 16~4.753 26 V 范围内，高低阈值电压差约 290 mV。由于热噪声的原因，放大电路中的增益电阻不能选得太大，所以放大电路采用两级放大结构，如图 4 所示。

由弗里斯公式可知<sup>[15]</sup>，第一级放大器的噪声系数对系统的总噪声系数影响最大，所以为保证引入的噪声足够小<sup>[16]</sup>，不能将第一级的放大倍数设计得过大。初级放大器选用 ADI 公司的 AD8137 通用放大器，其具有低功耗、低噪声、差分输入和输出的特点，在多级放大电路中很适合作为第一级放大器，增益计算公式为

$$G = \frac{R_F}{R_G}, \tag{3}$$

本设计中，选择  $R_F$  为 E96 系列 5 kΩ 金属膜电阻， $R_G$  为 E96 系列 1 kΩ 金属膜电阻，设计初级放大倍数为 5 倍。此设计下电路 3 dB 带宽为 12 MHz，噪声密度 60.1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。由此可以计算出在放大 5 倍的情况下引入的最大噪声为

$$\sqrt{12 \text{ MHz}} \times 60.1 \text{ nV} \sqrt{\text{Hz}} \times 5 \approx 1.041 \text{ mV}, \tag{4}$$

由式(4)可知初级引入的最大噪声为 1 mV 左右，不会对后端电路的采集和判断造成影响。为避免高频噪声通过无线感应方式反馈到输入端形成自激振荡，在反馈电阻上并联一个 10 pF 电容  $C_F$ <sup>[17-18]</sup>。

二级放大电路增益为 12 倍，选用 ADI 公司的可变

增益放大器 AD8429，这是一款集成了三运放的超低噪声仪用放大器，可提供 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$  的超低输入噪声，同时具有高共模抑制比，可以放大在共模电压下存在的差模信号。通过改变  $R_G$  的阻值，可以调控增益倍数，增益计算公式为

$$G = 1 + \frac{6 \text{ k}\Omega}{R_G}, \tag{5}$$

为了尽量减少引入噪声， $R_G$  选用 549 Ω，1% 精度的金属膜电阻，设计增益值为 11.92。

### 2.3 模数转换电路

模数转换电路选用 ADI 公司的 16 位单通道 ADC LTC2364，具有高达 94.7 dB 的信噪比和 3.4 mW 低功耗，采样率为 250 kSPS，通过 SPI 接口与 FPGA 通信。

在放大电路与 ADC 之间设计了一个跟随器电路，利用其高输入阻抗和低输出阻抗实现放大电路和 ADC 电路的隔离。根据 LTC2364 器件手册的推荐，选择 LT6202 作为电压跟随器来最小化 ADC 采集过程中的失真和建立时间，同时为输入 ADC 的信号源和采集时产生的峰值电流提供隔离，以保证 ADC 获得最佳性能。

在跟随器之前设计了低通滤波器 LPF1，带宽为 48 kHz，以滤除输入信号中的高频噪声，如图 5 所示。跟随器带来的噪声和失真也会影响到 ADC 的性能，所以在跟随器与 ADC 之间也设计了低通滤波器 LPF2，带宽为 1.6 MHz。由于模拟输入的 RC 时间常数过长会导致建立时间变长，因此，LPF2 要比 LPF1 有更宽的带宽<sup>[19-21]</sup>。

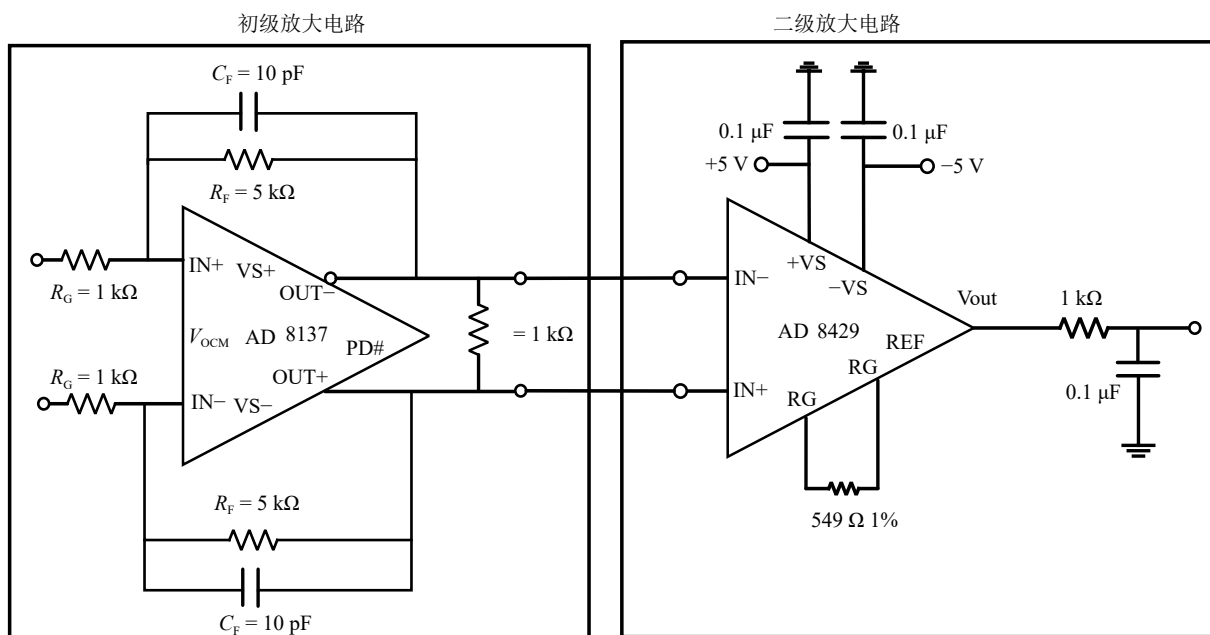


图 4 放大电路

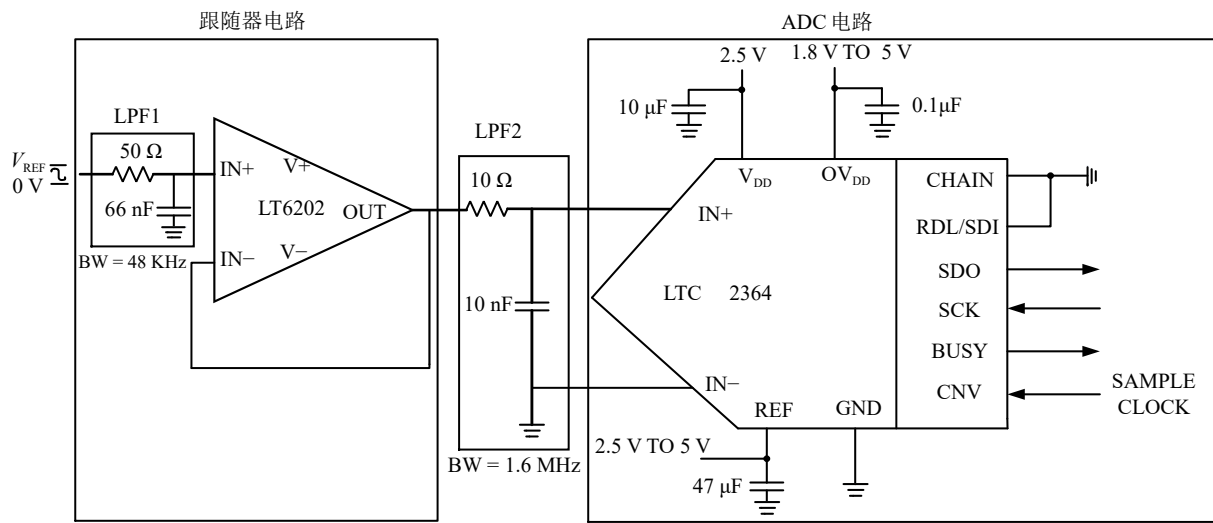


图 5 跟随器与 ADC 电路

### 2.4 继电器输出电路

高压模块高压的输出和切断由 FPGA 控制继电器实现，继电器的 3、5 引脚分别与高压模块控制端口的 1、2 引脚相连。在继电器和 FPGA 之间加入光耦对电路进行隔离 [22]，电路如图 6 所示。继电器为常闭型继电器，当 FPGA 输出

的控制信号为低电平时光耦导通，线圈通电将继电器断开，高压模块控制端口的 1、2 脚断路，高压模块输出高压。当控制信号为高电平或出现断电状况时光耦不导通，继电器保持常闭将高压模块控制端口的 1、2 脚短路，切断高压模块输出，避免探测器被持续输出的高压损坏。

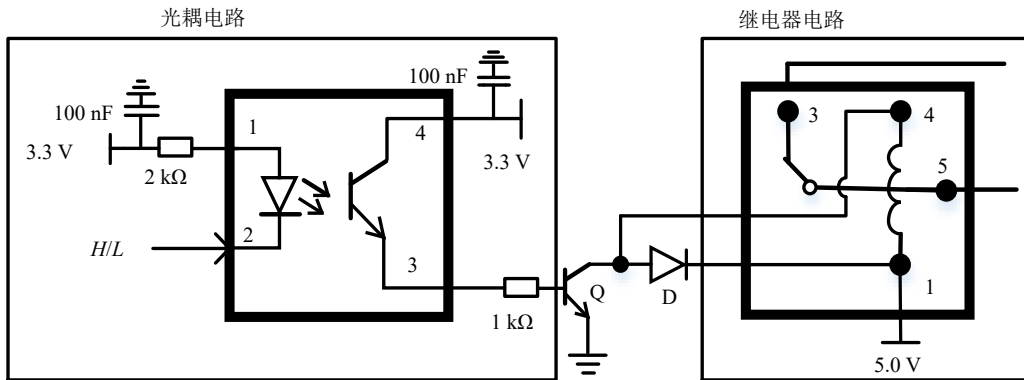


图 6 光耦隔离继电器电路

### 2.5 电源电路设计

高压模块控制器包含模拟电路和数字电路，电路设计时严格区分模拟电源和数字电源。模拟开关、惠斯通电桥、信号放大电路和 ADC 的供电电源划分为模拟部分，ADC 的输出电路、FPGA 和继电器输出电路的供电电源划分为数字部分，并采用线性稳压电源芯片实现各电源电压的电平转换。进行模拟地和数字地隔离，在高压模块控制器电源输入端进行单点接地 [23]。由于 Pt100 阻值变化引起惠斯通电桥的输出电压变化仅为 4.8 mV 左右，信号十分微弱，需要严格控制电源的纹波大小。高压模块控制器的供电适配器选用 iFi ipower 直流线性电源，该电源内置净化滤波器，手册中指出其噪声小于 1 μV。在现场工作环境，利用示波器对带负载下的

电源适配器输出纹波进行了测试，测试纹波约 40 μV，如图 7 所示。

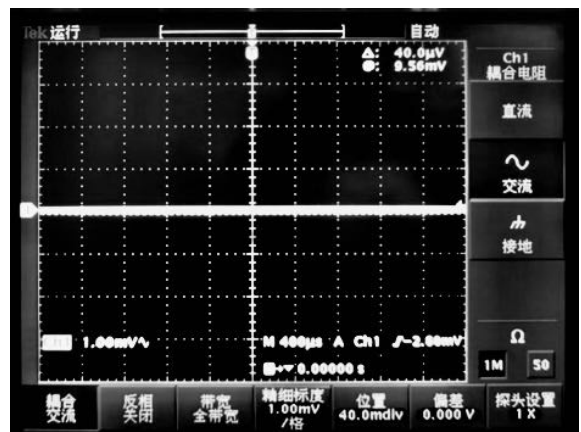


图 7 电源适配器纹波测试

### 3 高压模块控制器逻辑设计

高压模块控制器逻辑结构如图8所示，包括指令收发模块、ADC控制模块、数据处理模块、状态寄存器模块和输出控制模块。指令收发模块用于FPGA和上位机通信，上位机通过USB转串口线缆与高压模块控制器相连，利用串口调试助手接收和发送指令。指令接收模块接收上位机指令，通过指令解析模块解析。如果是高低阈值设置指令，则将设置的高低阈值存入状态寄存器模块；如果是读通道采集数据指令或读高低阈值指令，则从状态寄存器模块中读取相应数据，通过指令打包模块组帧，并通过指令发送模块发送至上位机。状态寄存器模块用于存储每个通道的高低阈值和当前采集并处理后的数据，状态寄存器中每个通道的高低阈值的初始值通过试验测试获得。ADC控制模块包括ADC驱动模块和ADC状态机模块，ADC驱动模块主要进行ADC时

序控制和SPI接口控制，实现模拟信号的采集和数据传输；ADC状态机模块主要进行模拟通道切换和采集状态切换，实现8路模拟信号、参考电平以及参考地电平的采集。数据处理模块对每个通道的采集数据进行均值滤波处理和校准处理。输出控制模块根据状态寄存器中每个通道的高低阈值和当前采集数据进行判断，实现继电器输出电路的控制。控制逻辑为：1) 当采集的数据小于低阈值，控制继电器输出电路开关打开，高压模块输出高压，此状态锁定；2) 只有当采集的数据大于高阈值，才控制继电器输出电路开关闭合，高压模块切断高压，此时状态再次锁定；3) 只有当采集的数据小于低阈值，再次控制继电器输出电路开关打开，高压模块输出高压。这种控制逻辑保证了稳定输出，不会因为噪声和干扰产生误输出。以下对指令及数据处理算法进行介绍。

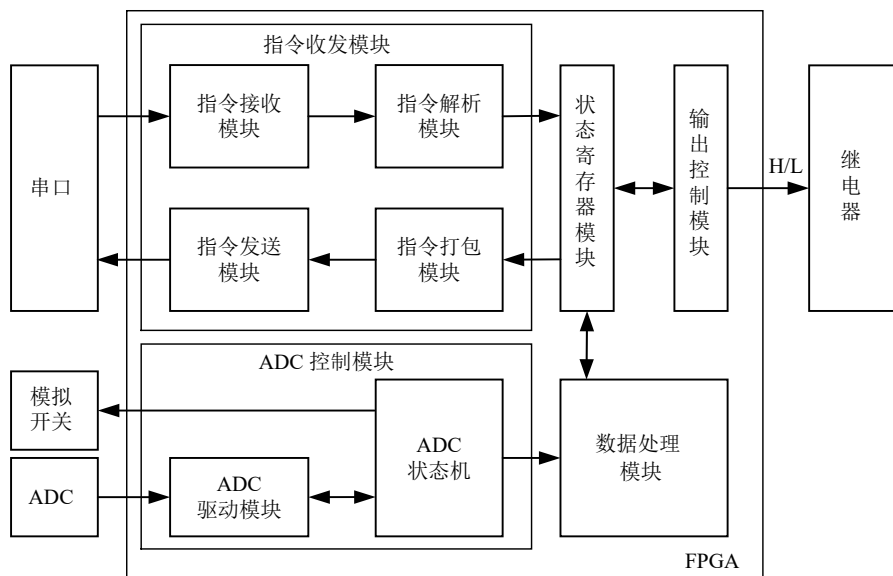


图 8 高压控制器逻辑结构

#### 3.1 指令及指令应答格式

指令包括写高低阈值指令、读高低阈值指令和读采样值指令，格式如图9所示。包头包括起始码和包头标识，为固定的“0x55AAEB90”，包尾即结束码，为固定的“0x5AA5”。指令类型分为写阈值、读阈值和读采样值三种。通道号表示需要读或写哪个通道。标志位表示高阈值、低阈值或采样值。当指令类型为写阈值，高字节和低字节为写入的高低阈值；当指令类型为读阈值和读采样值时，高字节和低字节为“0x00”。高压模块控制器接收到指令后需要进行应答，指令应答格式和指令格式相同。当指令类型为写阈值指令时，应答和发送指令

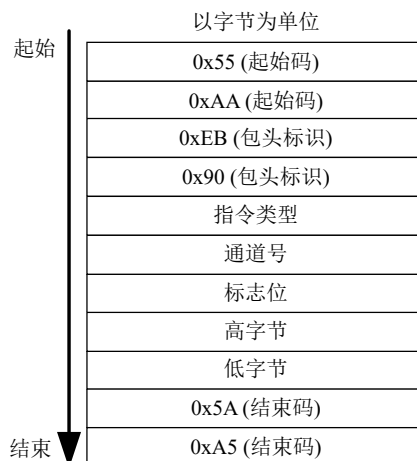


图 9 阈值设置指令及应答格式

相同；当指令类型为读阈值或读采样值指令时，应答中高字节和低字节为当前通道设置的高低阈值或通道采样值，应答中的其他字节和指令相同。

### 3.2 数据处理算法

为了降低噪声和干扰的影响，我们对每个通道采集的数据进行均值滤波处理，采集的数据越多平均的效果越好。ADC的采样率为250 kHz，设计中每个通道采集100个数据进行平均。通过计算，8个通道加

上参考电平和参考地电平的采集以及采集过程中的模拟开关的切换时间，一个完整的采集周期不超过10 ms，仍然可以满足HPGe探测器高压切断时间的要求。

然而通过均值滤波的处理方法，无法消除放大电路输入失调电压 $U_{os}$ 和通道增益引起的测量误差，为此在硬件电路设计中增加了参考电平和参考地电平的采集，并通过软件算法对通道增益和零点漂移进行校准，工作原理如图10所示<sup>[23-24]</sup>。

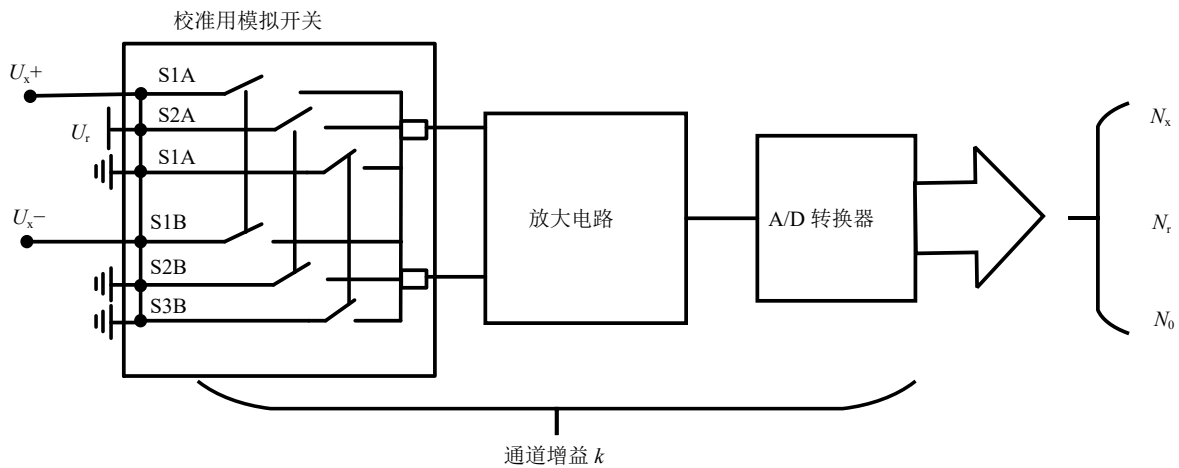


图10 校准算法原理图

设 $U_{os}$ 为折算到放大电路输入端的等效零漂，总的通道增益为 $k$ ， $N_x$ 、 $N_r$ 、 $N_0$ 分别为各输入通道被采集电压 $U_x$ 、参考电平 $U_r$ 和参考地电平A/D转换结果的数字量。校准过程如下：

1) **零点校准** 首先通过控制校准用模拟开关切换至参考地电平进行采集，即零点电压(0 V)，得到的转换结果并存储。此时，虽然输入电压为0，但由于各种噪声的存在，转换结果并不为0。此时的转换结果为

$$N_0 = kU_{os} \tag{6}$$

2) **参考校准** 再控制校准用模拟开关切换至参考电平( $U_r$ )进行采集，转换结果为 $N_r$ 并储存：

$$N_r = k(U_r + U_{os}) \tag{7}$$

3) **输入被采集信号** 将校准用模拟开关切换至采集通道并保持，再通过控制8路模拟开关对1~8通道的Pt100依次接入惠斯通电桥，将产生的压差( $U_x$ )采集，设转换结果为 $N_x$ ：

$$N_x = k(U_x + U_{os}) \tag{8}$$

由式(6)~(8)可得：

$$\frac{N_x - N_0}{N_r - N_0} = \frac{k(U_x + U_{os}) - kU_{os}}{k(U_r + U_{os}) - kU_{os}} = \frac{U_x}{U_r} \tag{9}$$

即

$$U_x = \frac{N_x - N_0}{N_r - N_0} U_r \tag{10}$$

由式(10)可知，通过以上校准，已完全消除通道零漂 $U_{os}$ 和通道增益 $k$ 引起的测量误差。

## 4 系统测试

### 4.1 测试系统搭建

测试系统如图11所示，利用上海正阳仪表厂ZX92A直流电阻箱代替Pt100进行高压模块控制器的测试，该电阻箱阻值范围0~1 111.10  $\Omega$ ，准确度为0.1%，调节步进0.01  $\Omega$ 。高压模块控制器输出利用万用表的通断测试功能进行测试。上位机通过USB转串口线缆与高压模块控制器相连，利用串口调试助手进行指令的发送和接收。



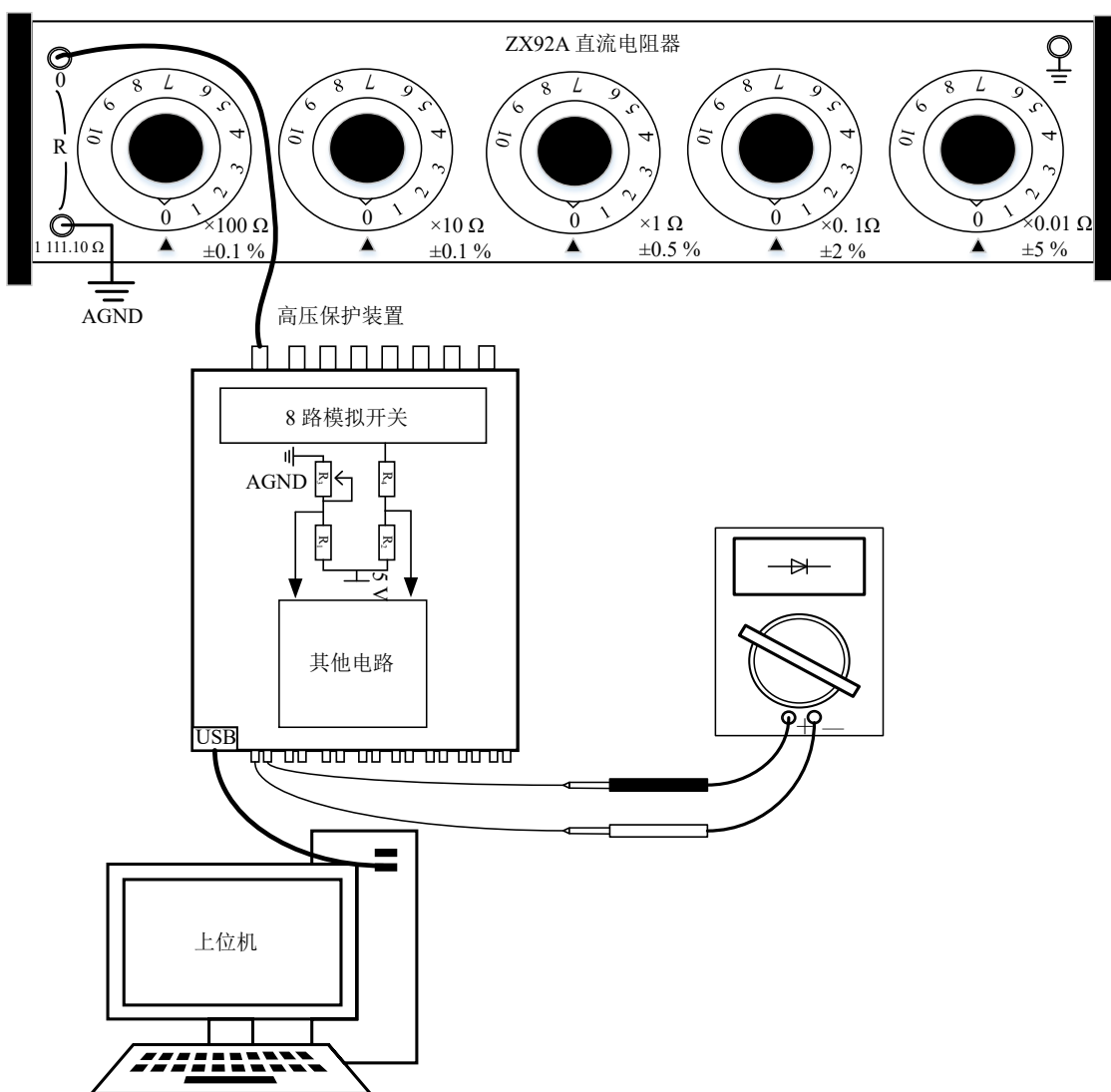


图 11 测试系统

### 4.2 高低阈值获取

每个通道的高低阈值初始值通过试验获取，并作为状态寄存器模块中各通道高低阈值的初始值。将电阻箱的阻值分别设定为 31.28 和 33.38 Ω，接入每个通道，通过上位机发送读取通道采样值指令，获得每个通道的高低阈值，该高低阈值为进行了均值滤波、增益和零点漂移校正后的结果，如表 2 所列。

表 2 读出的高低阈值与实际测量值

通道	低阈值	测量电压(低阈值)/V	高阈值	测量电压(高阈值)/V
CH0	E2FD	4.433 41	F1BE	4.721 53
CH1	E2FE	4.433 39	F1BD	4.721 50
CH2	E2FD	4.433 40	F1BE	4.721 52
CH3	E2FC	4.433 38	F1BD	4.721 49
CH4	E2FD	4.433 41	F1BC	4.721 48
CH5	E2FE	4.433 40	F1BD	4.721 50
CH6	E2FC	4.433 36	F1BE	4.721 51
CH7	E2FD	4.433 39	F1BC	4.721 49

### 4.3 系统实测

对高压模块控制器的功能进行测试。电阻箱的阻值由小到大再由大到小变化，变化范围为 30.50~34.00 Ω，考察高压模块控制器的输出是否满足设计要求，具体测试如表 3 所列。

表 3 系统实测数据记录表

通道	低阈值触发阻值/Ω	对应温度(低阈值)/°C	高阈值触发阻值/Ω	对应温度(高阈值)/°C
CH0	31.12	-170.24	33.37	-165.12
CH1	31.13	-170.25	33.34	-165.17
CH2	31.14	-170.29	33.35	-165.11
CH3	31.14	-170.29	33.36	-165.11
CH4	31.12	-170.26	33.33	-165.13
CH5	31.13	-170.26	33.37	-165.12
CH6	31.15	-170.29	33.34	-165.16
CH7	31.15	-170.28	33.32	-165.11

## 5 总结

1) 本文基于对 Pt100 电阻阻值变化的测量, 设计实现了高纯锗探测器高压保护系统。系统具有高灵敏度、高稳定性和实时监测功能, 弥补了人工监测的不足。

2) 系统具有串口通信功能, 能够在线设置不同通道的高低阈值以及读取实际采样值, 可以实现一个控制器保护 8 个探测器, 降低了监测成本且具有一定的灵活性和便捷性。

3) 对采集到的信号进行数据处理, 利用均值滤波算法消除噪声影响; 同时通过算法对通道增益和零点漂移进行校准, 提高了系统测量的准确性。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Nianpeng, DING Li, WANG Yulin, et al. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2014(1): 195.
- [2] GUO Xiaoqing, YANG Qiaoling, DIAO Lijun, et al. Annual Report of China Institute of Atomic Energy, 2017(1): 243.
- [3] TSUKASA A, YOSHIMUNE O, HIDESUKE I. Radiationprotection, 2020, 40(6): 527.
- [4] LIU Xue, WANG Shiqi, ZHANG Mingxu, et al. *Laboratory Science*, 2019, 22(05): 183. (in Chinese)  
(刘雪, 王是淇, 张明旭, 等. *实验室科学*, 2019, 22(05): 183.)
- [5] HEI Jinguo. Structure Improvement and Performance Test of Scintillation Detector[D]. Changchun: Jilin University, 2018.  
(黑进国. 闪烁探测器结构改进及性能测试的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.)
- [6] ERKIN A. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition), 1997(2): 40. (in Chinese)  
(艾尔肯·阿不都里木. 新疆大学学报(自然科学版), 1997(2): 40.)
- [7] MA Ruigang, ZHU Lihua, WANG Zhimin, et al. *Atomic Energy Science and Technology*, 2006(1): 92. (in Chinese)  
(马瑞刚, 竺礼华, 王治民, 等. *原子能科学技术*, 2006(1): 92.)
- [8] GONG Yubing, XIE Yanhang, HAO Yinghang. Science China(Chemistry), 2010, 53(1): 226.
- [9] EUGENIA N, DOMENICO S, SIMONE A, et al. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 935728.
- [10] LUO Weiping, ZHOU Bo, CHEN Jun, et al. *Modern Electronic Technology*, 2021, 44(18): 27. (in Chinese)  
(罗维平, 周博, 陈军, 等. *现代电子技术*, 2021, 44(18): 27.)
- [11] MASARU K, YUKI U, MANABU O, et al. *Electrochimica Acta*, 2021, 398: 139281.
- [12] Texas Instruments "Technical Information Manual Revision n. 25 12 February 2021" N1470 PROGRAMMABLE HV POWER SUPPLY[EB/OL]. [2023-03-20]. <https://www.caen.it/products/n1470/>
- [13] FERDIANSYAH T, BALAYSSAC J P, TURATSINZE A. International Journal of Civil Engineering, 2022(1): 20.
- [14] YAN Yongqiang, SUN Shengtao, WU Jinjie, et al. *Acta Metrologica Sinica*, 2021, 42(11): 1511. (in Chinese)  
(严永强, 孙圣涛, 吴金杰, 等. *计量学报*, 2021, 42(11): 1511.)
- [15] YU Huiqing. *Technology Wind*, 2015(21): 20. (in Chinese)  
(余辉晴. *科技风*, 2015(21): 20.)
- [16] LI Xin. Silicon Valley, 2014, 7(7): 107. (in Chinese)  
(李新. 硅谷, 2014, 7(7): 107.)
- [17] GAO Xiaohua, Feng Xi'an. *Technique and Method*, 2014, 33(03): 76. (in Chinese)  
(高小花, 冯西安. *微型机与应用*, 2014, 33(03): 76.)
- [18] LI Zebin, ZHANG Gang, YAO Youfeng, et al. *Journal of Tonghua Normal University*, 2015, 36(6): 33. (in Chinese)  
(李泽彬, 张刚, 姚有峰, 等. *通化师范学院学报*, 2015, 36(6): 33.)
- [19] WANG Kangan, JI Yi, CUI Fuyao. Industrial Design, 2011(6): 143. (in Chinese)  
(王康安, 纪亿, 崔福耀. 工业设计, 2011(6): 143.)
- [20] WU Zhengyu. *Technology Wind*, 2015(1): 97. (in Chinese)  
(武征宇. *科技风*, 2015(1): 97.)
- [21] HAO Shuli, TUO Xianguo, XI Dashun. Experiment Science and Technology, 2012, 10(3): 1. (in Chinese)  
(蒿书利, 庾先国, 奚大顺. 实验科学与技术, 2012, 10(3): 1.)
- [22] YU Huawu, SHI Zhiwei. *Power System Technology*, 2012, 36(05): 36. (in Chinese)  
(余华武, 史志伟. *电网技术*, 2012, 36(05): 36.)
- [23] BAO Jinsong. Agriculture Economics, 2004(3): 72. (in Chinese)  
(鲍劲松. 华夏星火, 2004(3): 72.)
- [24] FENG Zhanling, JIN Juncheng, LIU Liansheng, et al. *Electronic Measurement Technology*, 1982(1): 1. (in Chinese)  
(冯占岭, 金俊成, 刘连生, 等. *电子测量技术*, 1982(1): 1.)

# Design of Multi-channel High Voltage Protection System for High Purity Germanium Detector

ZHANG Jingzhe<sup>1)</sup>, LI Wenkai, WANG Xiaorui, MA Linbo, ZHANG Bo, XIAO Jinfeng,

LIU Meiyang, GOU Xiangxiang, ZHAO Jiuyao, SHI Chengcheng

(College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** High purity germanium detectors are widely employed for gamma ray measurements in nuclear spectroscopy experiments at the moment. The application of high voltage during operation necessitates stringent monitoring and control conditions. Traditional manual observation-based monitoring methods prove inefficient and slow in response, often resulting in varying degrees of detector damage. To address this issue, real-time temperature changes in the high purity germanium detector are converted into resistance value measurements using Pt100 sensors. Subsequently, a high-voltage module controller is designed and implemented to establish a protection system for the high purity germanium detector's high voltage supply. The hardware and logic of the controller are meticulously designed, while noise reduction algorithms are studied to enhance performance. Finally, circuit tests validate that the developed system automatically cuts off the high voltage when the detector temperature exceeds an upper threshold and restores it when the temperature falls below a lower threshold. This system effectively meets real-time protection requirements for high-voltage applications with respect to high purity germanium detectors.

**Key words:** high purity germanium detectors; high voltage protection; Pt100 Sensor; analog-to-digital converter; FPGA