

# BESIII 剂量率在线检测和保护系统 读出电子学设计

杨世明<sup>1</sup>, 龚光华<sup>1</sup>, 邵贝贝<sup>1</sup>, 李 金<sup>2</sup>

(1. 清华大学工程物理系, 北京 100084; 2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

**摘要:**为保护束流管, BESIII 将使用 PIN 硅光电二极管来实时检测对撞点附近的剂量率水平, 其中的信号读出电子学采用电流 A/D 转换方案。对几种弱电流放大与测量方法进行了比较, 主要介绍了电流 A/D 方法的工作原理、软硬件实现以及实际性能。

**关键词:**A/D 转换; 积分放大器; DDC112; PIN 硅光电二极管

**中图分类号:** TL8 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2006)04-0434-04

BEPCH 的束流管是由金属铍制成的, 内部填充矿物油用于冷却<sup>[1]</sup>。正负电子分别加速后在对撞点碰撞, 如果束流的发生偏转, 大量的高速粒子会打在束流管上, 产生的热量可能会将束流管损坏。由于束流的偏转将会在束流管道附近产生剂量场, 可以通过软件计算出束流偏转角度与管道周围剂量率之间的关系。如果对管道周围剂量率进行在线测量, 利用测得值就可以得到束流的偏转角度, 当偏转角度超过一定阈值, 就可以给出警报信号, 或是直接切断束流, 这样就可以起到对束流管的保护作用。

剂量率探测器选用 PIN 硅光电二极管, 它通过在硅二极管的 P 层和 N 层之间加入一层高阻的本征半导体(I 区)制成, 当 X 或  $\gamma$  射线穿过二极管的灵敏区域时, 部分动能通过光子与核外电子的作用(光电吸收、康普顿散射、电子对效应)被二极管吸收, 并以电子-空穴对的形式释放出自由电荷, 由此产生信号电流。芬兰地太公司的硅光电二极管 XRB100s-CB380<sup>[2]</sup> 灵敏区域面积和厚度分别为  $1\text{cm}^2$  和  $380\mu\text{m}$ , 剂量率灵敏度约为  $7\text{nA}/(\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1})$ , 无偏压模式下暗电流仅为  $10 \sim 20\text{pA}$ 。根据试验

测量, BEPC 在正常运行时, 束流管周围的剂量率一般不大于  $1\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ , 信号电流仅为  $0.5 \sim 5\text{nA}$  左右, 而束流注入时的瞬时剂量率可达  $100\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$  以上, 信号电流高达  $1 \sim 2\mu\text{A}$ 。这要求读出电子学系统能够精确测量弱小电流, 又需要有较大的动态范围, 同时响应时间控制在  $10\text{ms}$  以内, 这是系统设计的难点所在。

## 1 常见的弱电流测量方法

弱电流测量中最主要的部分是对弱电流信号的放大, 常用的实现方法有: 跨阻放大器、积分放大器和 I-F 变换器。

### 1.1 跨阻放大器

图 1 为典型的跨阻放大器结构。显然, 电路放大增益为  $-R_F$ , 即满足:

$$V_O = -I_{IN} R_F$$

电路的优点是实时性好, 适用于测量快变化的电流信号; 缺点是对噪声干扰非常敏感, 另外, 需要高阻来放大弱电流信号, 而高阻的稳定性和一致性较差, 还会降低系统的信噪比<sup>[3]</sup>。对于硅光电二极管探测器, 除了瞬时电流以外, 同样需要测量一段时间内的累积输出电荷, 即探测器的累积吸收剂量。跨阻放大器很难做到这一点。

### 1.2 积分放大器

积分放大器类似传统电荷灵敏前置放大

收稿日期: 2005-04-26

作者简介: 杨世明(1980—), 男, 山东潍坊人, 清华大学博士生, 主要从事核电子学与核探测器研究工作

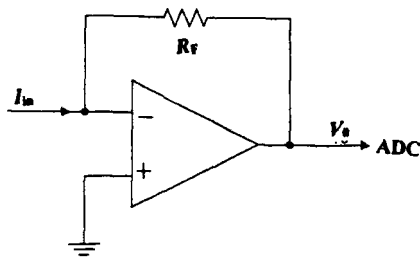


图1 跨阻放大器结构图

器<sup>[4]</sup>,见图2。经过  $T_{INT}$  积分时间后,输出电压为:

$$V_o = - (1/C) \int_{0}^{T_{INT}} I_{IN}(t) dt$$

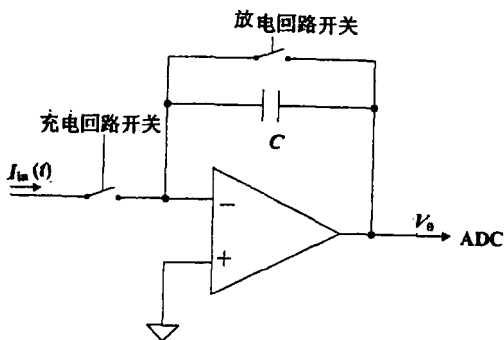


图2 积分放大器结构图

如果把输入电流看作常数,那么电路的放大增益为  $T_{INT}/C$ 。可以通过增大积分时间或减小积分电容来增大放大增益。对于 10pF 电容,10ms 的积分时间就可以达到跨阻放大器 1G 的增益。

由于电路将输入电流进行平均,因而对噪声以及外来的干扰有较强的抑制能力。但其实时性不好,不能反应信号的快速变化。因此,该方法适合于测量缓慢变化的信号。另外,由于每次测量完成后需要断开积分回路对电容放电复位,使得电路存在死时间,丢失部分电荷信息<sup>[3]</sup>。

积分放大电路需要微控制器或 FPGA 给出采样保持和放电的控制信号,测量需要 A/D 转换电路,硬件设计相对复杂。

### 1.3 FF 变换器

FF 变换器与积分放大器工作原理类似,改进之处在于放电回路。一般由积分放大电路、阈值甄别器、单稳态、恒流放电等部分组成。当积分放大器输出电压达到甄别器阈值时,启动单稳态电路输出一定时间宽度的放电脉冲,控制恒流放电回路对积分电容放电,每次放电的电荷量是一定的,那么放电脉冲的数目对应

探测器输出的总电荷,频率对应探测器输出电流<sup>[5]</sup>。

FF 变换器具有积分放大器的优点,但没有死时间,输出信号为脉冲序列,具有更强的抗干扰能力。但由于 FF 变换器是由分立元件组成,电路设计复杂;稳定性、一致性较差;

## 2 电流 A/D 转换方法

TI 公司提供的 DDC101/112/114 系列是专用于弱小电流测量的 20 位 A/D 转换芯片。以 DDC112<sup>[6]</sup> 为例,其内部集成了电流积分放大器、调制器、数字滤波器、数字输入输出缓冲和控制模块等。

该芯片采用 5V 电源供电,参考电平  $V_{REF}$  为 4.096V,典型工作时钟为 CLK 为 10MHz。A/D 转换结果采用串行移位输出:当输出允许引脚 DXMIT 为低电平时,移位时钟输入引脚 DCLK 上每出现一个上升沿,移位输出引脚 DOUT 上会输出一位二进制数据,可以使用 SPI 接口或微控制器的 I/O 引脚来读取转换结果。DIN 为移位寄存器的输入引脚,DVALID 为数据有效引脚,当移位寄存器中有数据时,芯片会在此引脚输出一个负脉冲,一般将其连接微控制器的外部中断输入引脚。CONV 引脚用于选择积分通道和设定积分时间,高电平时回路 A 积分,低电平时回路 B 积分。RANGE0-2 用于选择 8 个量程。

每个芯片有两个电流输入通道,内部共有 7 组高精度的积分电容,分别对应 50、100、...、350pC 等 7 个积分量程,还可以外接积分电容,可通过 RANGE0-2 引脚动态改变量程,提高了电流测量的动态范围。

DDC112 的工作原理见图 3。每个电流输入通道对应两个积分回路,分别对输入电流进行积分和 A/D 转换:当回路 A 到达积分时间后,控制模块将其断开,同时接通回路 B,在回路 B 积分完成之前,将回路 A 的积分电压进行 A/D 转换,结果放入移位寄存器并输出数据有效信号 DVALID,然后将积分电容放电,等待下一轮积分过程。

由于使用两个回路对电流进行积分放大,电路的死时间为零,在测量过程中不会丢失电荷信息。除去 8 个量程可供选择外,电路的积分时间可以动态设定,相对于其他电流测量方

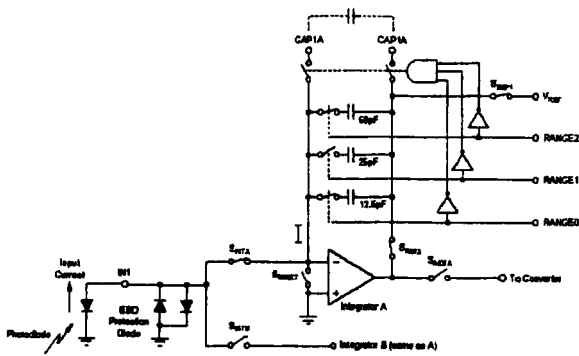


图3 DDC112工作原理示意图

法具有更高的灵活性。内部 A/D 转换器的最高转换频率为 2kHz, 积分时间最小可达 0.5 ms。

### 3 硬件设计

图 4 为单芯片的电流读出电路原理图。

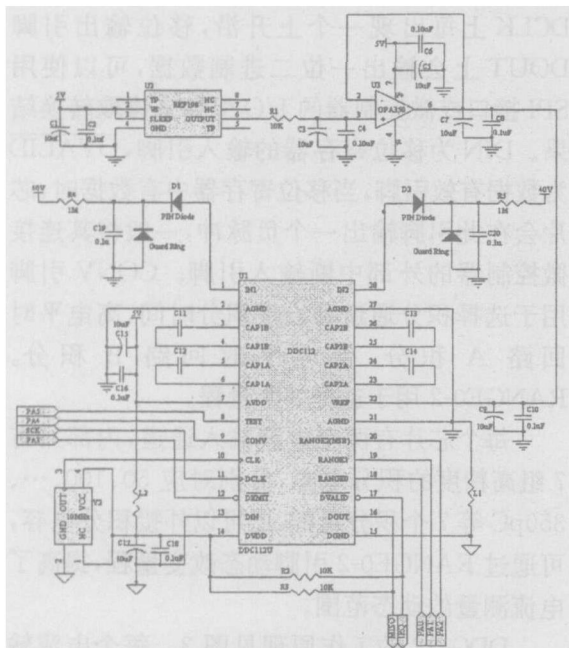


图4 硬件电路原理图

D1 和 D2 是需要测量的 PIN 硅光电二极管。模拟电路和数字电路之间通过磁珠隔离; REF198 产生 4.096V 基准电源, 由运放 OPA350 搭建电压跟随器来提高其驱动能力; 外接 0.01 $\mu$ F 的聚苯乙烯积分电容, 使电路的最大输入电荷达到 40nC, 可测电流高达 80 $\mu$ A; CONV、TEST、DXMIT、RANGE0-2 等连接微控制器的 I/O 引脚, DVALID 接微控制器的外中断输入引脚 IRQ; A/D 输出结果用 SPI 接口采集, 作为 SPI 从设备, DCLK 接 SPSCK 引

脚, DOUT 接 MISO 引脚; SCI 接口传送结果至 PC 机的 RS232 串口, 使用超级终端来读取数据。实际应用中所采用的是 freescale 公司的 16 位微控制器 MC9S12DP256<sup>[7]</sup>。

应用中需要多个 DDC112 芯片来测量多路 PIN 硅光电二极管的输出电流, 系统采用串联工作方式。这种方式中, 所有芯片都同步工作, 共用一组数字控制信号, 后者的 DOUT 引脚接前者的 DIN 引脚, 将 40 位移位寄存器串联成更大的寄存器, 大大降低了需要的微控制器 I/O 引脚数目, 并且简化了数据读取过程。

### 4 软件设计

软件的主要任务是实现对 DDC112 的控制、提供 DDC112 的工作时序以及读取 A/D 转换的结果, 图 5 为实际工作时序。CONV 信号利用微控制器的定时器产生, 积分时间可以通过设置定时器的相关寄存器来改变。检测到 DVALID 引脚产生的中断后, 微控制器运行中断处理程序, 输出移位时钟, 读入二进制转换结果。图 6 是系统的软件流程图。

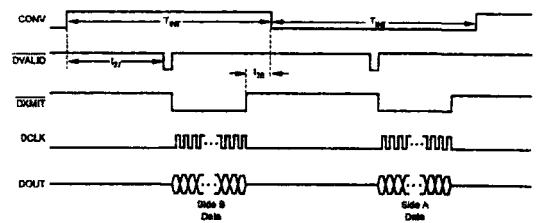


图5 工作时序图

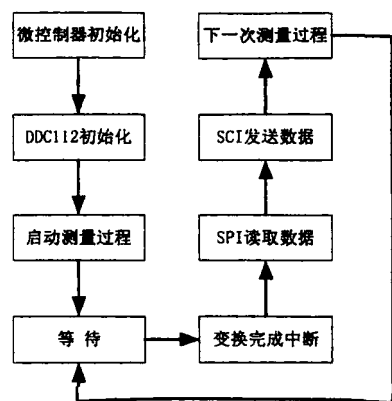


图6 软件流程图

### 5 性能指标

利用 DDC112 的 TEST 引脚可以测试系统的工作情况。当 TEST 引脚为高电平时, 在每个积分周期内, 芯片产生 13pC 电荷对积分

电容充电,图 7 是使用 50pC 量程时两个通道的测量结果,以 16 进制数值显示。可以看出,分辨率高达 15 位以上,两个通道差异仅为 0.1%,以输入通道 1 为例,实际测量电荷约为:  
 $(\$43690 - \$01000) / (\$FFFFFF - \$01000) \times 50 = 13.02\text{pC}$ 。

误差小于 0.2%,测量精度高达 0.02pC。以 1ms 积分时间计算,可以精确测量 20pA 的弱电流。既能保证精度,又可以保证响应时间,动态范围从 20pA ~ 80μA,完全可以满足系统

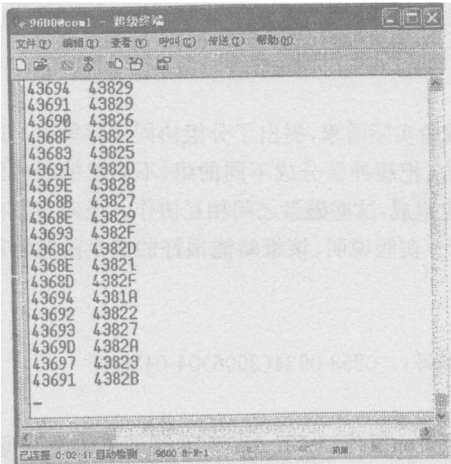


图 7 数据采集结果

## 6 结束语

通过试验测试,所述电流 A/D 转换方案工作良好,符合设计要求。具有以下优点:

1) 使用集成芯片对电流进行积分放大和 A/D 转换,电路设计简单,成本低,稳定性、可靠性、一致性高。

2) 积分量程可选择,积分时间可以自由设定,因而电路灵活性高,动态范围广。

3) 双通道积分方案,消除了死时间,适用于对电荷的连续测量。

4) 芯片串联的工作方式简化了微控制器的软硬件设计,适用于对多路探测器输出的测量。

### 参考文献:

- [1]中国科学院高能物理研究所. BESIII 设计报告对撞区,束流管和相关本底[R]. 北京:中国科学院高能物理研究所,2002.
- [2]Detection Technology Inc. High-Performance Diodes XRB-series[Z]. Finland:Detection Technology Inc.,2000. 8.
- [3]龚光华. 脉冲辐射场实时连续监测系统研究[D]. 北京:清华大学工程物理系,2004. 10.
- [4]王经瑾,等. 核电子学[M]. 北京:原子能出版社,1983.
- [5]吴瑞生,等. n- 电离室输出电流测量中 FF 变换器的设计[J]. 核电子学与探测技术,2001. 21(6): 468.
- [6]Dual Current Input 20-Bit Analog-To-Digital Converter[Z]. USA: Texas Instruments Inc.,2005. 2.
- [7]Motorola Inc. MC9S12DP256B Device User Guide V02.15[Z]. USA:Motorola Inc.,2005.

## Design of readout electronics for BESIII online dose rate monitoring and protection system

YANG Shi-ming<sup>1</sup>, GONG Guang-hua<sup>1</sup>, SHAO Bei-bei<sup>1</sup>, LI Jin<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;

2. Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing, 100049, China)

**Abstract** To protect the beam pipe of BESIII, Si PIN diodes will be used as detectors to monitor the dose rate level near the IP area. Analog to digital conversion is selected to read out the current signals of Si PIN diodes. Several low current amplifying and measuring methods are compared, mainly describing the theory of operation, software and hardware design and performance of the A/D conversion circuit.

**Key words**: analog to digital conversion; current to voltage integrator; DDC112; Si PIN diode