

引用格式: 张惊蛰, 刘美洋, 赵兴荣, 等. 束流剖面探测器多通道微电流数字化读出系统设计 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(2): 174-183.  
ZHANG J Z, LIU M Y, ZHAO X R, et al. Design of a multi-channel micro-current digital readout system for beam profile monitor[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(2): 174-183.

# 束流剖面探测器多通道微电流数字化读出系统设计



张惊蛰, 刘美洋\*, 赵兴荣, 肖金凤, 张博, 王小睿

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050)

**摘要:** 针对兰州重离子治癌装置束流诊断系统中束流剖面探测器分条电离室, 研制了一套多通道微电流数字化读出系统, 包括数据采集电路和上位机软件。数据采集电路基于电流数字转换芯片 ADAS1128 设计, 具有 256 路模拟输入通道, 接收分条电离室探测器输出的微电流信号并将其转化为数字信号。采集数据通过 FPGA 处理后, 由千兆以太网传输到上位机, 上位机软件接收数据并进行存储、处理和显示。数据采集电路体积小, 尺寸仅为 14 cm×12 cm, 便于和分条电离室探测器集成安装。通过测试, 在 43.5~691.25 nA 工作范围内, 通道噪声最大为 3.8 nA, 非线性误差小于 0.3%, 系统单通道最大功率约为 13 mW。系统经过长时间运行稳定可靠, 满足分条电离室对数据采集系统高精度、高集成度和低功耗的需求。

**关键词:** 重离子治癌; 束流诊断; 数据采集; 电流数字转换; FPGA

中图分类号: TL82

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024041

## Design of a multi-channel micro-current digital readout system for beam profile monitor

ZHANG Jingzhe, LIU Meiyang\*, ZHAO Xingrong, XIAO Jinfeng, ZHANG Bo, and WANG Xiaorui

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

**Abstract:** A multi-channel micro-current digital readout system, comprising a data acquisition circuit and host computer software, was developed for the beam profile monitor in the beam diagnosis system of the Lanzhou Heavy Ion Cancer Treatment Facility. The data acquisition circuit is based on the current digital conversion chip ADAS1128, which has 256 analog input channels to receive the micro-current signals output from the split-strip ionization chamber detector and convert them into digital signals. The collected data is processed by FPGA and transmitted to the host computer by Gigabit Ethernet, and then received by the host computer software for storage, processing and display. The data acquisition circuit measures only 14 cm × 12 cm, making it easy to integrate with the split-strip ionization chamber detector. The test results indicate that within the operating range of 43.5 nA to 691.25 nA, the maximum channel noise is 3.8 nA, the non-linear error is less than 0.3%, and the maximum power consumption of a single channel in the system is approximately 13 mW. The system has proven to be stable and reliable after an extended period of operation. It can meet the requirements for high precision, high integration, and low power consumption in the data acquisition system of the split-strip ionization chamber detector.

**Key words:** heavy ion cancer treatment; beam diagnosis; data acquisition; current to digital conversion; FPGA

相对于电子束、质子束等常规放疗射线, 重离子束对肿瘤治疗具有独特优势<sup>[1]</sup>。重离子治癌的关键之一是对束流的精准控制, 其前提是对束流参数的准确测量<sup>[2-3]</sup>。束流剖面信息作为重离子束众多参数之一<sup>[4-5]</sup>, 用来监测束流横向剖面分布。常用的剖面探测器有多丝、分条电离室等<sup>[5]</sup>, 这些探测器与束流相互作用, 产生多通道的微弱电流信号, 通过

数据采集系统进行采集和处理, 从而获取束流横向剖面分布, 用于调节加速器设备间的横向匹配<sup>[6-7]</sup>, 提高束流控制精度。

微弱电流信号测量目前常用的方法有 3 种:

1) 将微弱电流信号通过电阻直接转换并放大为电压信号, 通过模数转换器进行数字化, 如上海应用物理研究所为剂量电离室研制的基于跨阻放大法

收稿日期: 2024-02-29

作者简介: 张惊蛰, 博士, 高级工程师, 主要从事核电子学、测控技术与仪器方面的研究。

\*通信作者 E-mail: Moyaliu08@163.com

的 I-V 前端电子学<sup>[8]</sup>。2) 将微弱电流信号转换为频率脉冲信号, 每个脉冲代表一定的电荷量, 通过计数器进行数字化, 如中国科学院近代物理研究所为剂量电离室研制的电流-频率转换电路<sup>[9]</sup>。3) 将微弱电流信号进行积分转换为电压信号, 通过数模转换器件进行数字化, 如 PYRAMID 公司基于积分门控的 I3200 和 I128<sup>[10-11]</sup>。然而, 对于多通道的微弱电流信号测量, 利用传统的技术路线实现的测量电路都存在集成度低、功耗大、电路复杂、成本高等缺点。

目前兰州重离子治癌装置上分条电离室信号采集电路为基于积分门控的 I-V 转换电路<sup>[12]</sup>, 主要存在以下问题。

1) 电路采用分立元件设计, 电路体积较大 (64 通道尺寸为 22.3 cm×25.5 cm), 给设备的安装和应用带来不便; 2) 电路单通道功耗约 93.5 mW, 散热问题突出, 影响电子元件性能和寿命; 3) 噪声抑制效果不佳, 各通道差异性大, 影响系统的测量精度。

本文针对以上问题, 基于电流数字转换芯片 ADAS (analog digital acquisition system) 1128 和 FPGA 设计了一套多通道微电流数字化读出系统, 用于分条电离室探测器 256 通道微电流信号的采集和处理。并对系统进行了功能和性能测试, 该系统满足现有分条电离室对数据采集系统高精度、高集成度和低功耗的需求。

## 1 系统总体结构

系统主要包括分条电离室探测器、数据采集电路和上位机软件。电离室输出 256 路微电流信号经过 ADAS1128 数字化后传输至 FPGA 进行数据处理, 最后通过千兆以太网发送至上位机进行处理、显示和存储, 多通道微电流数字化读出系统结构框图如图 1 所示。

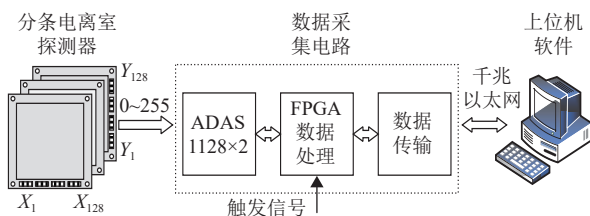


图 1 多通道微电流数字化读出系统结构框图

分条电离室探测器结构如图 2 所示, 主要由 X 和 Y 方向的位置信号极、高压极和两极之间的均压环构成<sup>[13-14]</sup>。其中 X 和 Y 方向位置信号极各由 128 条宽 1.7 mm、间距为 0.3 mm 的电镀金膜 (膜厚 35 μm) 组成, X 和 Y 方向位置信号极相互垂直, 每条信号极都通过线缆引出至探测器外部, 共

有 256 个信号通道。当重离子束流穿过分条电离室, 造成内部气体分子电离, 形成电子离子对, 其数量与带电粒子在电离室内的能损成正比。通过施加高压形成电场, 使电子或离子高速向 X 和 Y 位置信号极漂移, 若 X 和 Y 位置信号极作为阳极则收集电子, 若作为阴极则收集离子, 使得 256 个信号通道上产生微弱电流信号。通过数据采集电路采集该信号, 并进行处理, 通过上位机软件分析后可获得束流的横向剖面位置信息<sup>[15-18]</sup>。以下将对数据采集电路和上位机软件做详细介绍。

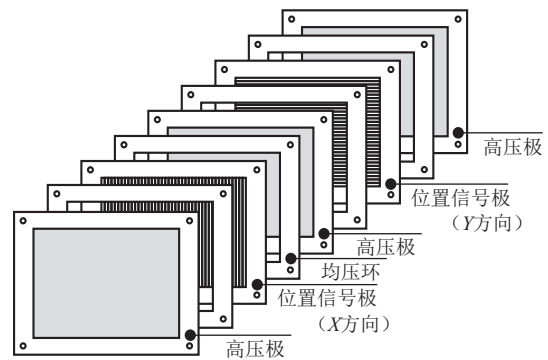


图 2 分条电离室探测器结构示意图

## 2 数据采集电路设计

### 2.1 ADAS1128 芯片介绍

ADAS1128 是 ADI 公司研制的电流数字转换芯片<sup>[17]</sup>, 如图 3 所示。128 个通道对应 128 个低功耗 (4.5 mW/channel)、低噪声 (0.4 fC) 的电流积分器和 128 个采样保持器, 采样保持器可对积分信号进行同步采样和保持, 并通过两个高分辨率 (24 bit) 和高采样率 (最大 19.7 kSPS) 的 ADC 进行数字化, 所有转换结果都通过单个 LVDS 接口读出。芯片通过 SPI 接口对 3 个 24 位的配置寄存器进行配置, 实现满量程因子  $F$ 、静音时间  $M$ 、过采样率  $O$ 、后处理子区间个数  $P$  这 4 个参数的配置和输入偏置电压误差校正以及满量程因子  $F$  快速校正两个功能的配置, 具体如表 1 所示。

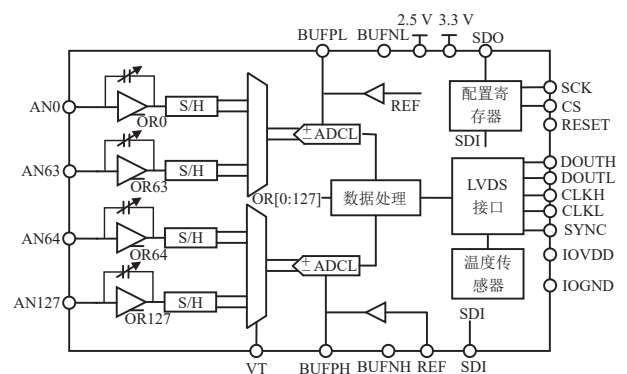


图 3 ADAS1128 功能结构框图

表 1 ADAS1128 配置寄存器

配置寄存器	配置功能/参数	参数范围	公式及设置要求
配置寄存器0	输入偏置电压误差校正	—	—
	恢复之前的偏置校正参数	—	—
	数据传输格式	—	0: Byte模式, 每BURST传输8 bit数据 1: Word模式, 每BURST传输24 bit数据
	满量程因子 $F$ 快速校正	—	—
	满量程因子 $F$	$8 \leq F \leq 127$	$I_{FSR} = 5.433F$ (nA) $LSB_{CHARGE} = 0.16839F \times REF$ (aC) 注: REF典型值为2.048 V
配置寄存器1	后处理模式	—	过采样率 $O=2$
	静音时间 $M$	$24 \leq M \leq 31$	(采样周期) 积分时间: $t_{INT} = (66O(24 + M))t_{clk} + t_{STRETCH}$ (ns)
	过采样率 $O$	$2 \leq O \leq 31$	注: $t_{clk} = 8$ ns, $t_{STRETCH}$ 用于对采样周期的微调, 取值不能超过2个函数的中的最小值: Function <sub>1</sub> = $((O - 2) \times 66(M + 24) - 4)t_{clk}$ Function <sub>2</sub> = $\left( (38 - 1) \times 66(M + 24) + \frac{4}{O} - 4 \right) t_{clk}$
	后处理子区间个数 $P$	$1 \leq P \leq O/2$	推荐 $P=(O+1)/3$
配置寄存器2	满量程因子 $F$ 快速校正 (备选)	—	—

## 2.2 数据采集电路硬件设计

数据采集电路由模拟前端电路、ADAS1128 电路、FPGA 电路、DDR3 存储电路、千兆以太网电路、OSC 时钟电路和电源电路构成, 如图 4 所示。FPGA 为整个电路的主控电路, 选用 Xilinx 公司的 Spartan6 系列 XC6SLX16 芯片, DDR3 存储电路主要对采集的数据进行缓存, 选用 Micron 公司 1GB 动态随机存储器 MT41J64M16LA-187E, 千兆以太网电路用于数据采集电路和上位机交互数据, 选用中国台湾瑞昱公司的千兆以太网物理层驱动芯片 RTL8211EG 来实现, OSC 时钟电路输出 125 MHz 时钟信号, 通过 FPGA 内部锁相环后输出 125、375 和 25 MHz 时钟信号, 为整个电路提供高精度的时钟。以上电路均为常规电路, 以下将对模拟前端电路、ADAS1128 电路和与 ADAS1128 相关的电源电路进行介绍。

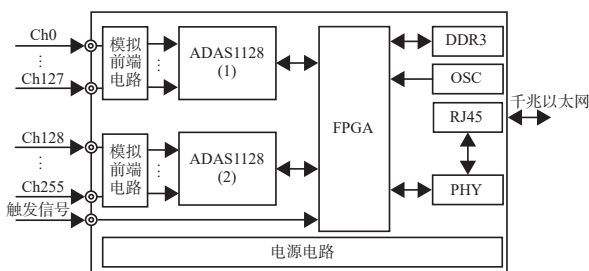


图 4 数据采集电路结构框图

### 2.2.1 模拟前端电路设计

分条电离室探测器输出的微电流信号可直接接

入 ADAS1128 的信号输入端, 但是该芯片的最大输入电流为  $I_{FSR} = 5.433 \times 127 = 691.25$  nA, 若测量信号大于 691.25 nA, 则需要通过电阻分流来实现测量范围的扩展, 如图 5 所示。

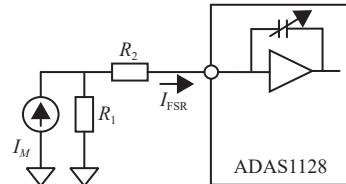


图 5 电阻分流电路

ADAS1128 的模拟输入端可以看作虚拟地<sup>[17]</sup>, 假设  $I_{FSR}$  为芯片的最大输入电流,  $I_M$  为被测电流, 可得:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{I_{FSR}}{I_M} \quad (1)$$

分条电离室的信号输出范围约为 10 pA ~ 100  $\mu$ A<sup>[12]</sup>, 为此设计了模拟前端电路, 由模拟开关 MAX7436 和分流电路组成, 如图 6 所示。

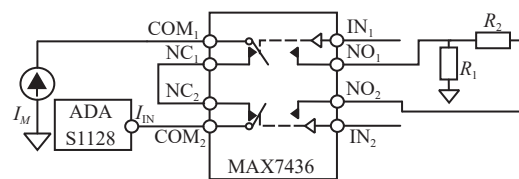


图 6 模拟前端电路

当测量电流信号在 0 ~ 691.25 nA 范围内, 通过模拟开关将探测器输出信号直接接入

ADAS1128 的信号输入端; 当大于该范围, 则模拟开关切换至分流电路, 将探测器输出信号分流后, 接入 ADAS1128 的信号输入端。分流电路中电阻  $R_1$  和  $R_2$  选择 0.01% 的高精密薄膜电阻, 阻值分别为 340 k $\Omega$  和 50 M $\Omega$ 。通过模拟前端电路实现了 ADAS1128 芯片测量范围的扩展, 具体如表 2 所示, 参数  $F=127$ ,  $O=3$ ,  $M=24$ 。

表 2 模拟前端电路量程划分

被测电流 $I_{M/nA}$	控制信号 $IN_1$ 和 $IN_2$	ADAS1128 输入 $I_{IN}/nA$	增益 $G$
0~690	$IN_1=0, IN_2=0$	0~690	1
$(675\sim100)\times 10^3$	$IN_1=1, IN_2=1$	4.56~675	148.1

### 2.2.2 ADAS1128 电路设计

数据采集电路包含 2 片 ADAS1128, 主要电路为参数配置电路和信号采集控制电路。ADAS1128 通过 SPI 接口进行配置寄存器的配置, 串行数据输入和输出采用菊花链的方式, 配置数据通过 FPGA 的 MOSI 端口输出至 ADAS1128 (片 1) 的 SDI 端口, 再通过 ADAS1128 (片 1) 的 SDO 端口输出至 ADAS1128 (片 2) 的 SDI 端口, 最后由 ADAS1128 (片 2) 的 SDO 端口输出至 FPGA 的 MISO 端口, 如图 7 所示。在片选信号 CS 为高时, 配置数据随着 SCK 时钟 (25 MHz), 通过 SPI 端口串行移位至合适位置, 在 CS 的下降沿, 配置寄存器被更新。在电路设计时 2 个芯片 CS 和 SCK 信号线需要等长处理。

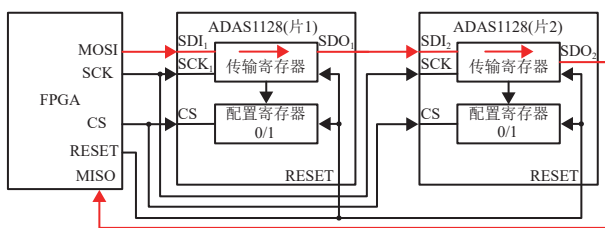


图 7 参数配置电路

信号采集控制电路主要包括同步信号 SYNC、差分时钟 CLKH/CLKL 和数据输出 DOUTH/DOUTL, 如图 8 所示。芯片内部信号采集和数据读出都基于差分时钟 CLKH/CLKL, 该时钟信号由 FPGA 的锁相环输出。同步信号 SYNC 控制采集过程的开始, 每个 ADAS1128 都有各自的数据输出 DOUTH/DOUTL, 分别接入 FPGA。分条电离室的 256 路信号需要同时采样, 才能获得准确的束流剖面信息, 需要 2 片 ADAS1128 能够进行同步采

样。因此 2 片 ADAS1128 的 CLKH/CLKL、SYNC 和 DOUTH/DOUTL 均需要做等长处理。

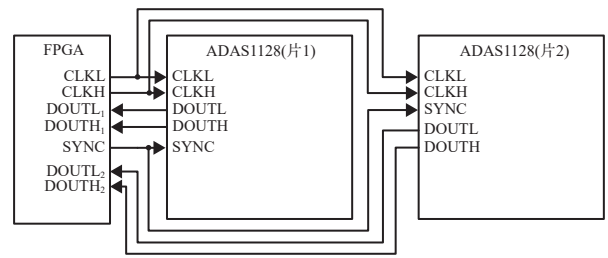


图 8 信号采集控制电路

### 2.2.3 ADAS1128 电源电路设计

电源电路在一定程度上决定了系统的稳定性和测量的准确性。ADAS1128 电源为 3.3 V 和 2.5 V, 选用 ADI 公司的低压降 CMOS 线性稳压器 ADP1708。参考电压为 2.048 V, 该电压作为内部采样的基准电压, 需要较高的稳定性和较低的噪声, 选用 ADI 公司超低噪声线性稳压器 ADR440。芯片的 BUFPH/BUFPL 和 BUFNH/BUFNL (见图 3) 通过 47  $\mu$ F 的陶瓷电容接地。在数据采集电路 PCB 设计时将地平面划分为模拟地和数字地, 以减少数字信号对模拟信号的干扰。

在采集系统的连接中, 涉及非常关键的 3 类地的连接, 即数据采集电路地 (GND)、信号屏蔽地 (SHIELD) 和探测器的输出信号地 (KGND) 的连接。GND 中会有较多的电流和其他频率成分, SHIELD 和 KGND 是高阻抗, 不携带任何电流。因此, 通过单点连接的方式连接 SHIELD 和 KGND, 采用开尔文连接的方式连接 SHIELD 和 GND。2 片 ADAS1128 各自的 SHIELD 和 KGND 通过星型连接的方式连接。

## 3 FPGA 逻辑设计

FPGA 作为数据采集系统的主控单元实现了对数据的处理和外围器件的控制。FPGA 逻辑如图 9 所示, 主要由时钟模块、以太网模块、指令接收和解析模块、ADAS 配置模式、触发模块、复位模块、采集信号模块、DDR3 控制模块、数据打包模块以及发送模块组成。

FPGA 逻辑主要分为指令接收和数据采集两大功能。指令接收: 以太网模块通过 UDP 协议接收从上位机发送的配置指令, 指令接收和解析模块对接收的指令进行解析, 并由 ADAS 配置模块对两片级联的 ADAS1128 进行状态参数配置, 配置完成后, FPGA 进入等待数据采集状态。数据采集:

FPGA 接收到外部触发信号, 采集信号模块响应, 输出同步信号 SYNC 和高速传输时钟 CLKS 驱动 2 片 ADAS1128 开始工作。采集信号模块接收 2 片 ADAS1128 芯片输出的高速串行数据 DOUT1

和 DOUT2, 模块中的串并转换逻辑对数据进行转换并送入 DDR3 处理存储, 以减轻数据传输压力。之后数据打包模块读取 DDR3 中的数据, 按照约定格式打包后由以太网模块传输至上位机。

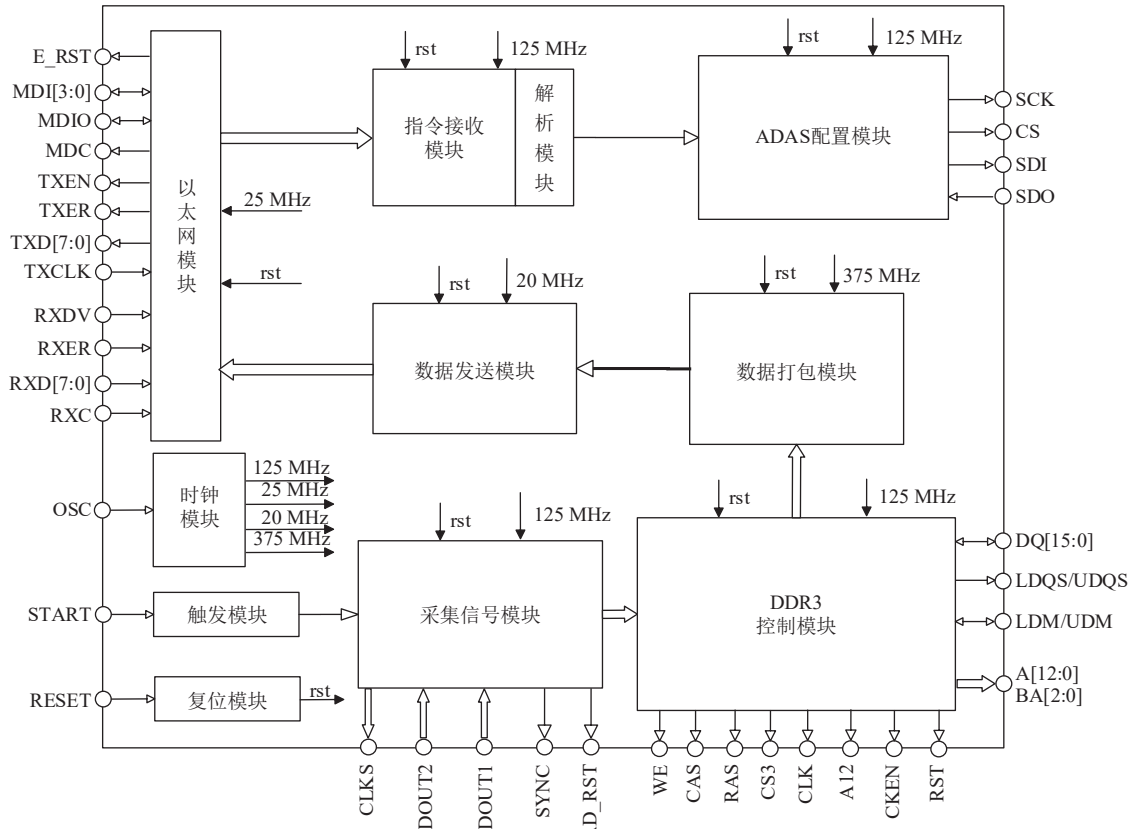


图 9 FPGA 内部逻辑框图

时钟模块利用 FPGA 内部时钟管理模块将 125 MHz 输入时钟信号分频和倍频为 20、25、125、375 MHz 时钟信号, 供 FPGA 内部各模块使用。复位模块接收外部复位信号, 产生全局复位信号, 使 FPGA 内部各模块进入初始状态。

## 4 上位机软件设计

### 4.1 上位机界面

上位机界面由 C#语言编写, 在 Windows 系统下运行。使用 Visual Studio 提供的 .NET Framework 框架进行窗体设计。交互界面设计如图 10 所示, 整体划分为 4 大区: 左侧配置区主要是对 ADAS 1128 芯片中寄存器 0、1 以及系统时钟进行配置; 下方指令显示区显示发送给数据采集电路的指令; 左侧数据分析区实时更新并显示从数据采集电路接收到的数据; 中部束流剖面分布区动态显示处理后的束流剖面分布结果。

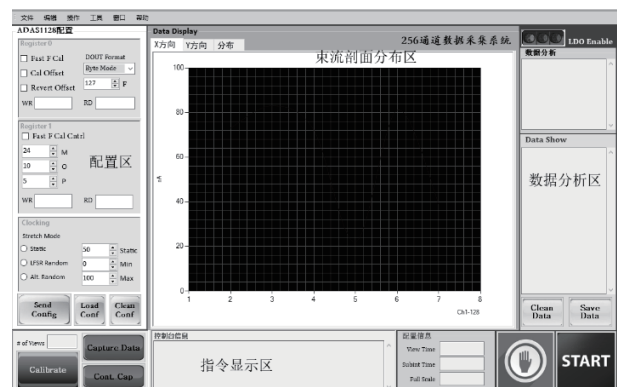


图 10 上位机界面

### 4.2 数据处理

从数据采集电路传输过来的数据包需要进行分析和处理后才能显示在数据分析区和束流剖面分布区。数据包携带状态信息、配置信息和 256 通道采集数据。状态信息为芯片内部的温度和电压测量值以及状态寄存器的值, 配置信息为当前配置寄存

器0和1, 256通道采集数据为X方向128通道和Y方向128通道的采集数据。对X方向和Y方向采集数据进行分析, 可以分别获得束流在X、Y方向的分布以及束流的横向剖面分布。

#### 4.2.1 X、Y方向束流分布处理算法

经研究, 相对于内插法、抛物线拟合和高斯分布拟合, 对采集得到的原始数据进行高斯拟合, 误差较小<sup>[19]</sup>。以X方向的128通道数据为例, 在靠近束流能量中心点处信号幅值最大, 随着与中心点距离的增大逐渐递减。采用最小二乘法的高斯拟合获得X、Y方向束流分布, 推导过程如下:

$$I(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (2)$$

式中,  $x_0$ 为中心点坐标;  $\sigma_x$ 为高斯曲线的标准差。对式(2)两边取对数, 得:

$$\ln(I) = \ln\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}\right) - \frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} = \ln\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}\right) - \frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{xx_0}{\sigma_x^2} - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} \quad (3)$$

令  $l = -\frac{1}{2\sigma_x^2}$ ,  $m = \frac{x_0}{\sigma_x^2}$ ,  $N = \ln\left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x}\right) - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2}$ , 得到一元二次多项式:

$$\ln(I) = lx^2 + mx + N \quad (4)$$

考虑到X方向共有128个数据, 上式可写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x_1^2 & x_1 & 1 \\ x_2^2 & x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^2 & x_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ m \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln(I_1) \\ \ln(I_2) \\ \vdots \\ \ln(I_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

简记为  $\mathbf{XP} = \mathbf{I}$ , 其中  $\mathbf{P}$  为本文要求的参数矩阵。根据最小二乘原理, 可得出矩阵  $\mathbf{P}$  的解为:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{I} \quad (6)$$

将数据集代入式(6)计算, 得出X方向中心点坐标与高斯分布函数。同理, 可求出Y方向中心点坐标和正态高斯分布函数。

#### 4.2.2 束流横向剖面分布处理算法

二维高斯拟合法运算精度高且稳定性好, 对符合高斯分布的重离子束流截面能量分布具有较好的鲁棒性。常用的二维高斯分布函数表达式为:

$$I(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \times e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left(\frac{(x-x_0)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho(x-x_0)(y-y_0)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-y_0)^2}{\sigma_y^2}\right)} \quad (7)$$

式中,  $x_0$ 、 $y_0$ 分别为束流截面在X方向和Y方向的中心点坐标;  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 分别为束流截面在X方向和Y方向的标准差;  $\rho$ 为x、y的相关系数。由于X、Y方向的通道数是相互独立的变量, 没有相关性, 所以  $\rho = 0$ 。

式(7)简化后, 得:

$$I(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (8)$$

将上式两边取对数得到:

$$\ln(I) = \ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\right) - \frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} = \ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\right) - \frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{xx_0}{\sigma_x^2} - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{yy_0}{\sigma_y^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2} \quad (9)$$

简化为一般的二元二次多项式:

$$\ln(I) = ax^2 + by^2 + cx + dy + E \quad (10)$$

式中,  $a = -\frac{1}{2\sigma_x^2}$ ;  $b = -\frac{1}{2\sigma_y^2}$ ;  $c = \frac{x_0}{\sigma_x^2}$ ;  $d = -\frac{y_0}{\sigma_y^2}$ ;

$$E = \ln\left(\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y}\right) - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2}$$

引入最小二乘法, 使得残差平方和最小, 利于参数修正:

$$F = \min\left\{\sum (ax^2 + by^2 + cx + dy + E - \ln(I))^2\right\}$$

求F最小值, 需要分别对a、b、c、d、E求偏导数并令其等于零:

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial F}{\partial b} = \frac{\partial F}{\partial c} = \frac{\partial F}{\partial d} = \frac{\partial F}{\partial E} = 0$$

计算后得出:

$$\begin{cases} 2 \sum (ax^2 + by^2 + cx + dy + E - \ln(I))x^2 = 0 \\ 2 \sum (ax^2 + by^2 + cx + dy + E - \ln(I))y^2 = 0 \\ 2 \sum (ax^2 + by^2 + cx + dy + E - \ln(I))x = 0 \\ 2 \sum (ax^2 + by^2 + cx + dy + E - \ln(I))y = 0 \\ 2 \sum (ax^2 + by^2 + cx + dy + E - \ln(I)) = 0 \end{cases}$$

变形后:

$$\begin{cases} \sum (ax^4 + by^2x^2 + cx^3 + dyx^2 + Ex^2) = \sum \ln(I)x^2 \\ \sum (ax^2y^2 + by^4 + cxy^2 + dy^3 + Ey^2) = \sum \ln(I)y^2 \\ \sum (ax^3 + by^2x + cx^2 + dyx + Ex) = \sum \ln(I)x \\ \sum (ax^2y + by^3 + cxy + dy^2 + Ey) = \sum \ln(I)y \\ \sum (ax^2 + by^2 + cx + dy + E) = \sum \ln(I) \end{cases}$$

矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \sum x^4 & \sum x^2y^2 & \sum x^3 & \sum x^2y & \sum x^2 \\ \sum x^2y^2 & \sum y^4 & \sum xy^2 & \sum y^3 & \sum y^2 \\ \sum x^3 & \sum xy^2 & \sum x^2 & \sum xy & \sum x \\ \sum x^2y & \sum y^3 & \sum xy & \sum y^2 & \sum y \\ \sum x^2 & \sum y^2 & \sum x & \sum y & \sum 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum \ln(I)x^2 \\ \sum \ln(I)y^2 \\ \sum \ln(I)x \\ \sum \ln(I)y \\ \sum \ln(I) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式 (11) 可看作是超定线性方程组  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  的形式, 它的最小二乘解等价于方程组  $\mathbf{A}^T\mathbf{Ax} = \mathbf{A}^T\mathbf{b}$  的解, 将采集数据代入式中得到二维正态高斯分布函数。

## 5 系统性能测试

### 5.1 试验平台搭建

试验平台如图 11 所示, 由电流源、直流电源、信号源、信号扇出板、数据采集电路、上位机软件构成。电流源 Keithley 6221 用于产生测试所需的脉冲电流信号, 可输出量程为 4 pA~210 mA, 频率在 1 MHz~100 kHz 的交流信号和量程为 100 fA~105 mA 的直流信号。电流源输出的电流信号通过扇出板扇出 256 路后输入数据采集电路。直流电源 HMP4040 用于提供直流 5 V 电源并测量数据采集电路功耗。RIGOL 信号源输出触发信号, 触发电平为 3.3 V, 数据采集电路每接收到一个触发脉冲时, FPGA 控制 ADAS1128 对模拟电流信号开始采样。上位机软件用于存储、处理和显示测试数据。

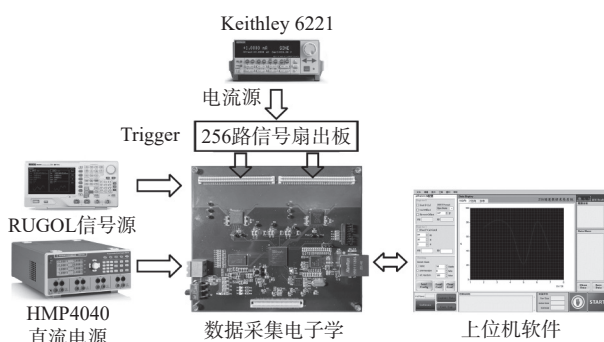


图 11 系统测试平台

### 5.2 功耗测试

在 256 通道同时采样工作的情况下, 直流电源 HMP4040 显示功耗约为 3.4 W, 即单通道功耗约为 13 mW, 相较于现有电子学单通道功耗 93.5 mW, 功耗明显降低。

### 5.3 本底噪声及稳定性测试

数据采集电子学在电流源输出为 0 的情况下, 间隔 1 min, 采集 2 次本底数据, 得到各通道本底噪声结果, 图 12 所示为两次测试的本底值。电子学整体噪声范围在 2.8~3.8 nA。为确认本底噪声的稳定程度, 由  $S = (A_2 - A_1)/A_1$  计算得到本底稳定性,  $A_1$  为第一次测量值,  $A_2$  为第 2 次测量值。图 13 所示为计算得到的各通道的本底稳定性曲线, 数据采集电路各通道本底稳定性小于 0.1%, 本底噪声稳定性较好, 对后续测试结果的影响较小。

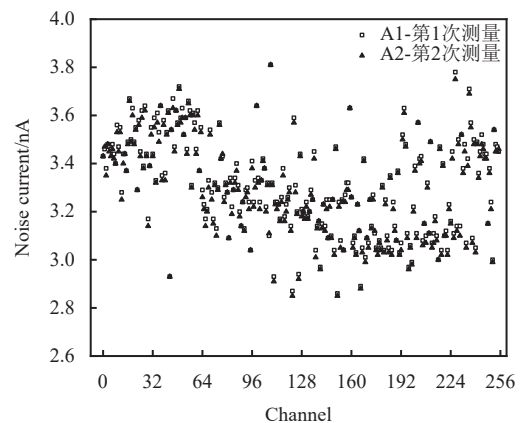


图 12 256 通道本底噪声测量结果

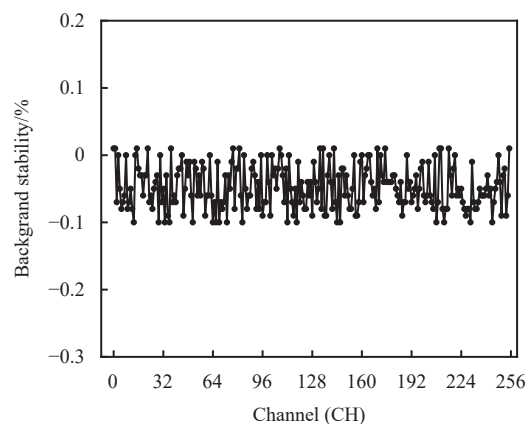


图 13 256 通道本底稳定性测试结果

### 5.4 非线性测试

系统非线性测试以 50 nA 为步长, 在 50~650 nA 的测量范围内对采样通道进行数据读出, 从测量结果中扣除本底噪声后采用最小二乘法进行线性拟合, 得到各通道输入-输出曲线, 如图 14 所示。图 15 为根据各通道拟合曲线计算的非线性误差, 可以看到非线性误差均小于 0.3%, 系统整体线性度较好。

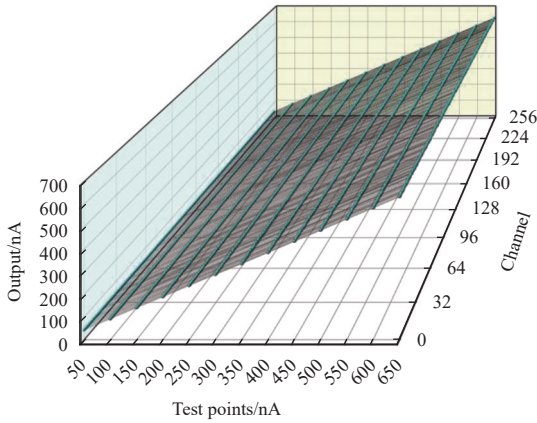


图 14 256 通道线性测试结果

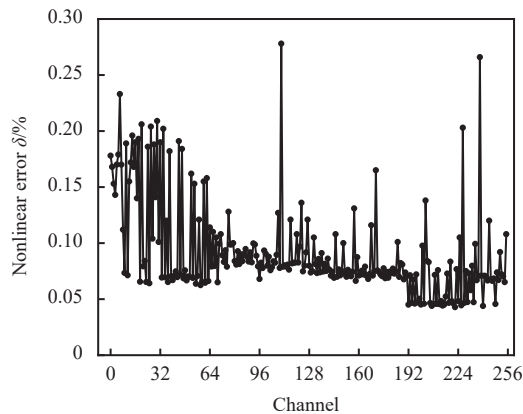


图 15 256 通道非线性误差测量结果

### 5.5 通道一致性测试

数据采集电路在输入同一信号时, 各通道之间读出结果的差异程度为通道一致性。同样以 50 nA 为步长, 在 50~650 nA 的测量范围内对采样通道进行数据读出, 得到在相同测试点 256 路通道输出曲线, 如图 16 所示, 可以看出各通道输出结果在输入同一信号的情况下整体波动小, 稳定性较好。图 17 为在不同测试点 256 路通道读出结果均值与最值关系, 测量结果的最大误差小于 1%, 表明各通道读出数据一致性较好。

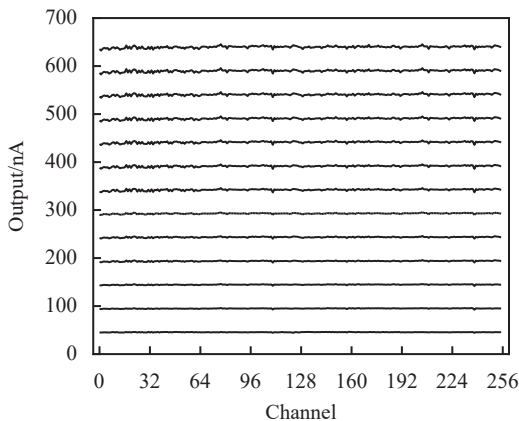


图 16 相同测试点 256 路通道输出曲线

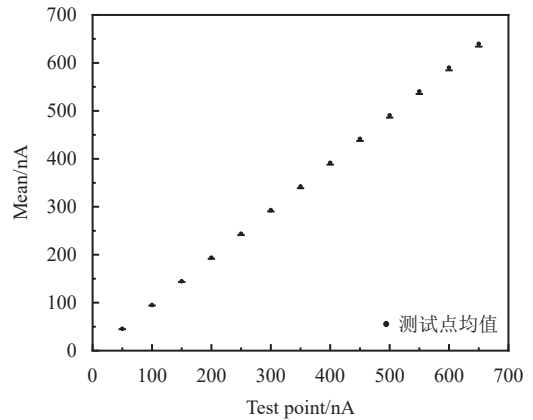


图 17 不同测试点 256 路通道读出结果均值与最值关系

### 5.6 在线束流测试

利用兰州重离子治癌装置上的分条电离室, 对数据采集系统的功能进行在线束流测试, 束流强度为 240 MeV。对采集数据进行误差修正和高斯拟合处理, 最终得出的 X 和 Y 方向束流分布结果如图 18 和图 19 所示, 在 X 方向 FWHM 为 6.92 mm, 采集的峰值电流约为 119.67 nA, 在 Y 方向 FWHM 为 6.98 mm, 采集的峰值电流约为 132.81 nA。X 和 Y 方向峰值之间的差别主要是因为束流先穿过 Y 方向位置信号极再穿过 X 方向位置信号极, 在穿过 Y 方向位置信号极时有部分能损, 因此造成峰值之间存在差别。束流横向剖面分布结果如图 20 所示, 束斑近似圆形, 拟合后的二维高斯分布为:

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (12)$$

式中,  $\sigma_x = 1.44$ ;  $\sigma_y = 1.46$ ;  $x_0 = 64.30$ ;  $y_0 = 64.34$ 。中心点为  $(-0.4076, -0.3285)$ , 偏移坐标中心直线距离为 0.5235 mm, 根据《WS816-2023 医用质子和重离子放射治疗设备质量控制检测标准》中质量控制检测项目与技术要求, 电离室对单能单点的束流进行束斑位置偏差在  $\pm 1.5$  mm 内, 因此当前条件下的束流满足治疗要求。

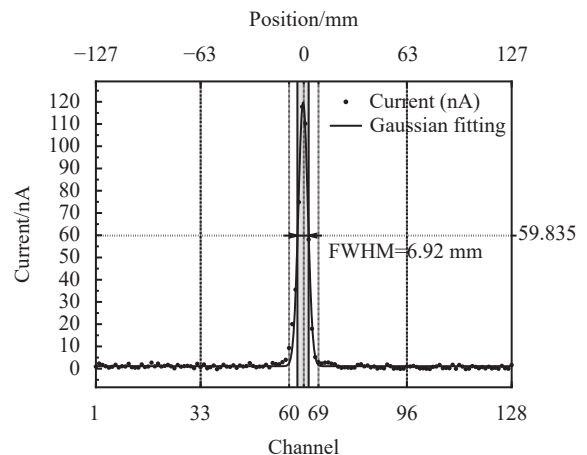


图 18 X 方向高斯拟合结果

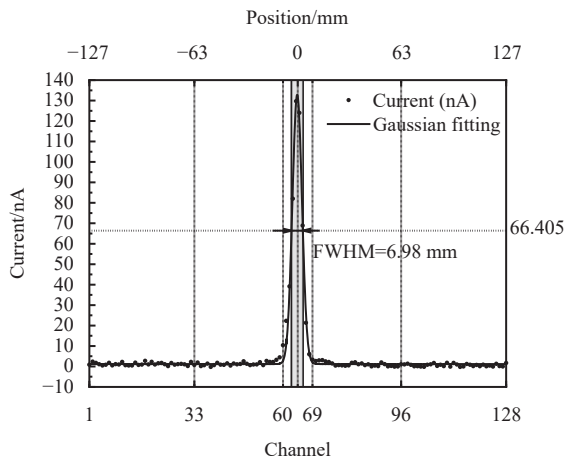


图 19 Y 方向高斯拟合结果

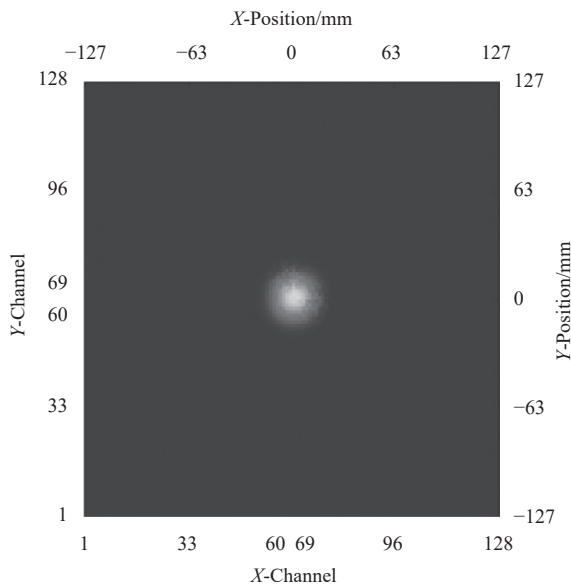


图 20 束流横向剖面二维高斯拟合结果

## 6 结束语

本文基于高集成的多通道电流数字转换芯片 ADAS1128, 设计实现了小体积、低功耗的用于分条电离室的多通道微电流数据采集系统。经测试, 系统具有较低的本底噪声、较小的非线性误差和较好的通道一致性。对系统进行了在线束流测试, 对测试结果进行分析处理, 获得了 X 方向和 Y 方向的束流分布以及束流横向剖面二维分布, 测试结果符合预期。该系统的成功研制为具有多通道微弱电流信号测量需求的应用提供了技术参考。

### 参考文献

[1] 肖国青, 李强, 张小奇, 等. 碳离子治疗系统的研发与成果转化[J]. 科技促进发展, 2020, 16(1): 9-17.

- XIAO G Q, LI Q, ZHANG X Q, et al. The development and commercialization of carbon ion cancer therapy facility[J]. Science & Technology for Development, 2020, 16(1): 9-17.
- [2] 余乾顺. 微弱信号数字化读出方法及电路研究[D]. 兰州: 中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2019.
- SHE Q S. Research on digital readout method and circuit of weak signal[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [3] 李鑫. 多通道弱电流测量系统的研制及其在束流诊断中的应用[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
- LI X. Development of multi-channel weak current measurement system and application in beam diagnosis[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- [4] 宋凯, 毛瑞士, 李娟, 等. 基于 Zynq 的多丝探测器数据采集系统设计[J]. 核电子学与探测技术, 2020, 40(2): 228-233.
- SONG K, MAO R S, LI J, et al. Design of multi-wire detector data acquisition system based on Zynq[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2020, 40(2): 228-233.
- [5] 余乾顺, 苏弘, 徐治国, 等. 束流均匀性测量前端读出电子学电路的设计[J]. 核电子学与探测技术, 2011, 31(6): 646-651.
- SHE Q S, SU H, XU Z G, et al. A circuit design for front-end read-out electronics of beam homogeneity measurement[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, 31(6): 646-651.
- [6] 王之琢, 曹建社, 王梓豪, 等. BEPC II 中束流位置测量系统的噪声分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(5): 948-954.
- WANG Z Z, CAO J S, WANG Z H, et al. Noise analysis of beam position measurement system in BEPC II [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(5): 948-954.
- [7] 冷用斌, 阎映炳, 周伟民, 等. 用束流位置监测器精确测量储存环流强[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(12): 2973-2978.
- LENG Y B, YAN Y B, ZHOU W M, et al. Precise beam current measurement for storage ring using beam position monitor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(12): 2973-2978.
- [8] 徐治国, 赵祖龙, 毛瑞士, 等. 一种粒子治疗装置的三维剂量测量探测系统, 中国, CN112083467A[P]. 2020-12-15.
- XU Z G, ZHAO Z L, MAO R S, et al. The invention relates to a three-dimensional dose measurement and detection system for a particle therapy device, China: CN112083467A[P]. 2020-12-15.
- [9] 赵斌清. 质子治疗束配系统电离室电子学研究[D]. 上海: 中国科学院大学(上海应用物理研究所), 2017.
- ZHAO B Q. Study of the electronics of beam monitors for the beam delivery system in proton therapy[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences(Shanghai Institute of Applied Physics), 2017.
- [10] 王亚楠. 适用于重离子治癌剂量监测的电流-频率转换电路设计[D]. 兰州: 中国科学院大学(近代物理研究所), 2017.
- WANG Y N. The circuit design of current to frequency converter for dose monitoring in heavy ion therapy[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of

- Sciences(Institute of Modern Physics), 2017.
- [11] PYRAMID. I3200 - 32-channel charge integrator digital electrometer[EB/OL]. (2013-12-23). <https://ptcusa.com/products/i3200>.
- [12] PYRAMID. I128 - 128 channel charge integrator digital electrometer[EB/OL]. (2014-10-14)[2024-01-12]. <https://ptcusa.com/products/i128>.
- [13] 刘世耀. 质子和重离子治疗及其装置[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
LIU S Y. Proton and heavy ions therapy and its facilities[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [14] CHEN A, CHEN Q, LIU X, et al. Prototype development of the beam diagnostic system of a proton therapy facility based on a superconducting cyclotron[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2021, 998(1): 165208.
- [15] 周建斌. 核信号数字分析与处理[M]. 北京: 原子能出版社, 2017.  
ZHOU J B. Digital analysis and processing of nuclear signal[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2017.
- [16] 随艳峰, 杜焱焱, 叶强, 等. 基于 BEPC II 数字束流位置测量系统电子学系统的设计与实现[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(1): 172-178.
- SUI Y F, DU Y Y, YE Q, et al. Development of digital beam position monitor electronics system based on BEPC II[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(1): 172-178.
- [17] Analog Devices. 128 channel, 24-bit current to digital ADC-ADAS1128[EB/OL]. [2024-01-12]. <http://www.analog.com>. Accessed Oct 2012.
- [18] 杨振, 龙继东, 蓝朝晖, 等. 离子束流剖面分布离线诊断方法探索[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4): 41-45.  
YANG Z, LONG J D, LAN Z H, et al. Exploratory research on off-line diagnosis method of ion beam profile[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4): 41-45.
- [19] 赵红卫, 沈志清, 魏宝文. 梯度法对 HIRFL 束流发射度的测量[J]. 原子能科学技术, 1994, 28(1): 50-55.  
ZHAO H W, SHEN Z Q, WEI B W. HIRFL beam emittance measurement by "Gradient Method"[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1994, 28(1): 50-55.

编辑 税红