

# 基于 LabVIEW 的高能质子束流密度分布测试系统

伍越, 陈卫, 刘进博, 罗杰, 李泽禹, 朱涛

(中国空气动力研究与发展中心 超高速所, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 主要介绍一套基于 LabVIEW 平台设计的高能质子束流密度分布测试系统, 服务于电子器件抗辐射加固试验, 用于加速器的辐射剂量测量; 它由法拉第杯探测器, 移动平台控制系统和基于 LabVIEW 的控制与数据获取软件三部分组成, 具有对法拉第杯位置控制、静电计读写、智能化测量、数据实时处理等功能; 性能测试显示该质子束流测量系统能实现亚 pA 级电流的测量, 20pA 量程时的测量精度为 5%, 解决了弱流质子束的测量问题; 该系统具有可靠性高、可扩充性好、抗干扰能力强的特点, 同时实验结果表明测得的质子束流密度分布, 能准确评估电子器件辐射环境与剂量, 为半导体器件抗辐射加固设计提供支撑。

**关键词:** 高能质子束; 法拉第杯; 静电计; LabVIEW; 束流密度; 测试系统

## A Measurement System of the High Energy Proton Beam Current Density Based on LabVIEW

Wu Yue, Chen Wei, Liu Jinbo, Luo Jie, Li Zeyu, Zhu Tao

(China Aerodynamic Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

**Abstract:** A LabVIEW based measurement system of the high energy proton beam current density has been developed for radiation hardening experiments of electronic devices. It mainly consists of a Faraday cup, a motor controller and a LabVIEW based DAQ software. And it performs the functions of position control of Faraday cup, read-write operation of electrometer, intellectualized measurement, real time data processing and so on. Performance tests demonstrate that current sensitivity of the system can reach sub-pA with an acquisition accuracy of 5% at the measurement range of 20 pA. This system has properties of high reliability, expansibility and interference immunity, and can meet the demands of weak proton beam measurement to provide necessary data for radiation-hardened electronic devices design.

**Keywords:** high energy proton beam; Faraday cup; electrometer; LabVIEW; current density; measurement system

### 0 引言

在大气层以外空间, 从事航天活动必然要考虑空间环境的影响, 空间环境一般有高层大气、空间碎片、电离辐射等, 其中电离辐射是引起卫星或空间飞行器电子学系统性能退化和失效的重要原因, 最终会导致卫星或空间飞行器的灾难性后果。由于缺少大气层的阻挡, 外空间的电离辐射成分与地面有很大不同, 辐射强度本底也比地面高, 其中质子是空间电离辐射的主要成分<sup>[1-3]</sup>。为了适应太空的辐射环境, 电子学器件一般要进行抗辐射加固处理, 而地面上的电离辐射环境一般由加速器产生, 因此, 在加速器上进行质子单粒子效应的模拟实验中, 满足空间电离辐射和抗辐射加固中对质子计量的要求, 必须对高能质子束流密度分布进行准确测量。同样, 质子束流的准确测量也在加速器产氩、ADS(加速器驱动次临界系统)研究中起着关键作用<sup>[4-5]</sup>。

采用高灵敏度的微弱电流测试仪, 在高真空和环境真空中, 利用法拉第杯对高能质子束流密度分布进行测试, 能够综合评价电子学样品室内的电荷环境。用于动态在线监测真空环境中在不同的方位以及不同质子辐照剂量下, 电子器件受影响的变化规律。

### 1 法拉第杯结构

法拉第杯是使用金属材料制成杯状, 利用带电粒子入射产生电荷的累积效应来测量束流强度的真空器件, 其形成的电流可以用来判定入射电子或离子的数量。当离子或电子进入法拉第杯以后, 会产生电子流。对一个连续的带单电荷的离子束来说:

$$\frac{N}{t} = \frac{I}{e} \quad (1)$$

其中:  $N$  是离子数量,  $t$  是时间 (s),  $I$  是测得的电流 (A),  $e$  是基本电荷 ( $1.60 \times 10^{-19}$  库伦)。我们可以估算, 若测得电流为 1 nA, 即约有六十亿个离子被法拉第杯收集。对于法拉第杯, 如果杯底的厚度不够带电粒子将会穿出杯底, 不能保证带电粒子的完全收集, 因此杯底的厚度必须大于带电粒子穿透介质所产生的射程  $R$ , 其中<sup>[6]</sup>:

收稿日期: 2018-08-15; 修回日期: 2018-09-05。

基金项目: 国家青年科学基金项目(11702312)。

作者简介: 伍越(1992-), 男, 四川广安人, 硕士, 研究实习员, 主要从事光学非接触测量、故障监测、抗辐射加固实验方向的研究。

$$R = \int_0^E \left( \frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE \quad (2)$$

在 Atomic Data<sup>[6]</sup>中给出了各种能量的质子在不同元素中的射程。以实际为例,采用的黄铜作为法拉第杯材料在 3 MeV 质子束中,带电粒子能穿透的黄铜介质厚度为 2.3 mm,为此设计采用了 5 mm 厚的黄铜作为法拉第杯杯底。

有两种因素会造成测量的误差,第一个是入射的带电粒子撞击法拉第杯表面产生低能量的二次电子而逃离;第二种是入射粒子的反向散射。而在较高加速电压产生大能量离子流时,离子流轰击入口狭缝产生的二次电子和二次离子数量会大幅增加,影响测量实际信号的大小,因此法拉第杯只适用于较小电子伏的测量。图 1 为法拉第杯示意图。

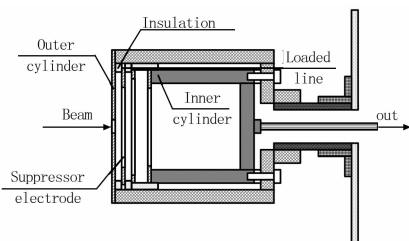


图 1 法拉第杯示意图

## 2 测试系统结构及原理

如图 2 所示,高能质子束流密度分布测试系统主要由采集质子束用的法拉第杯、机械扫描系统、步进电机、偏置电源、电机控制系统、数据采集系统及计算机等几部分组成。法拉第杯、机械扫描系统与步进电机位于加速器出口真空测试腔体内,偏置电源、电机控制系统、数据采集系统及计算机放置在测试现场,用屏蔽盒进行了抗辐射加固处理。

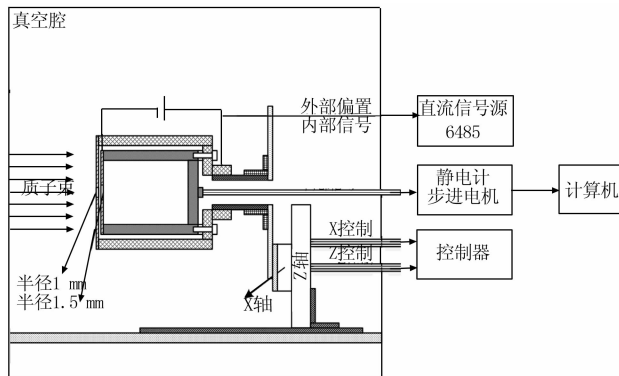


图 2 测试系统框架

当被加速的带电粒子高速撞击法拉第杯杯底,产生的二次电子将会获得较高的速度,如果角度合适将逸出法拉第杯不能被收集,造成测得的电流强度比真实值偏大。偏置电源的作用在于抑制二次电子的逃逸,其正极加载在法拉第杯杯底,负极加载在法拉第杯杯口,形成一个抑制

电场,同时设计的法拉第筒的长度远大于杯底的半径,二次电子产生后由于电场和出射角的作用将无法逸出杯外。

测试系统的控制与数据采集系统由 PC 机开发的虚拟仪器与下位的步进电机驱动模块和 Keithley6517A 静电计组成,可以检测出真空腔体内部各个位置质子束束流密度随时间变化情况,也可以实现空间二维扫描测量。在移动平台的选择上,选用了北京卓立汉光仪器公司的 TSAx 系列标准电控平移台,该平台传动采用滚珠丝杠,导轨采用线性轴承,电机后端配有手轮,可手动调节。平移台采用 SC300 系列步进电机控制箱,该控制箱为 1-3 轴点对点位置定位集成控制系统,内置步进电机驱动器,同时提供 RS232 串口,可通过通信协议或 OCX 控件进行二次开发。微弱电流的测量采用了 Keithley 6517A 静电计,是一种高精度的直流多用测量仪表,6517A 具有 425 读数/秒的读数率,速度比同类静电计显著提高,可以提供快速的微弱电流测量。

测试时,PC 机通过总线对步进电机控制器进行配置,在前面板的步进电机控制页面上可以设置起始点、终止点、单次扫描步长以及步进电机运行速度等,同时 PC 机还能通过仪器控制总线在前面板仪器控制页面上为 6517A 静电计选择合适的量程以配合不同功率的质子束进行实现量程切换,保证测得的电流不会溢出。当所有参数均能满足测试要求时,通过复位键将法拉第杯送至起始点,等待加速器同步触发信号触发,以开始测试。测试开始后,法拉第杯头收集到的电流被静电计实时采集,PC 机通过软件以百 Hz 的速度读取对静电计数据,并计算平均值作为该点的束流最终结果,同时在前面板上显示和保存,单次采集结束后,步进电机驱动探头运行到下一个测量点,并开始该点的数据采样、处理,每一次采集位置也可覆盖上一次的采集,通过数据处理可以得到更加精细的位置与束流密度的分布。如此步进往复,最后到达终止点完成测量。

## 3 系统软件设计

### 3.1 软件结构

系统软件的主要功能是对移动平台控制器进行通信控制以及对得到的电流信号进行计算处理。软件分为 5 个模块:平台移动控制模块,可设定步进电机运行参数同时控制机械扫描系统平动,也可设定零点位置并进行复位;静电计控制模块,可设定静电计运行参数,并在故障情况下对静电计进行手动复位;定点测量模块,实现对设定中心位置束流密度的测量、计算、显示与保存;扫描测量模块,实现空间不同位置束流密度的测量,同时存储测点的相对位置信息;数据插值模块,通过 LabVIEW 内置的一维 Fourier 算法对测试数据插值得到更精细的数据。软件处理的流程如图 3 所示。

### 3.2 利用 ActiveX 控件的平台控制

平台移动控制模块中利用属性节点调用步进电机控制

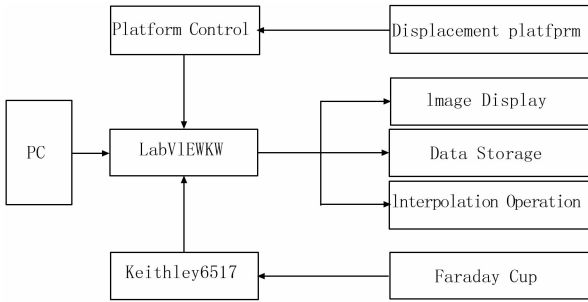


图 3 软件设计结构图

器厂家提供的 ActiveX 函数库，属性节点具有读取和写入引用的属性，通过属性节点对本地应用程序进行调用，可自动调整为用户所引用对象的类。LabVIEW 的外部接口包括动态链接库的调用、C 语言的接口、以及利用属性节点访问 XML、VISA、.NET 和 ActiveX 属性。软件中利用打开自动化函数，返回指向控制器对象的自动化引用句柄以驱动平台控制器动作。在 LabVIEW 中访问 ActiveX 控件的步骤如下：首先通过“插入 ActiveX 对象”打开函数对象，其次通过插入后续的“ActiveX 控件属性”对话框来选择配置对象的属性，然后通过调用节点执行属于对象的相应函数，如果当这个事件函数发生时，系统自动调用“事件回调注册”函数进行响应，最后使用“关闭引用函数”完成整个打开自动化过程。以一个完整的机械复位子程序为例展示整个属性节点的运行模式，如图 4 所示。

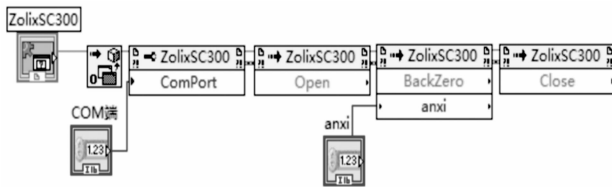


图 4 机械复位 VI 程序结构

### 3.3 基于 GPIB 的静电计控制

LabVIEW 提供了基于 GPIB 的仪器控制集成开发环境，静电计的控制通信模块均采用基于 GPIB 的仪器测试环境搭建，GPIB 的接口软件包含：GPIB 驱动程序和相关仪器的驱动程序，在此基础上硬件服务商还提供了封装好的仪器控制程序。其中 GPIB 驱动程序可在 NI 的技术支持中获取，仪器驱动程序在相应仪器生产厂家的程序包中获得，一般而言仪器厂商提供的驱动程序会将仪器的基本控制函数按照基本功能封装成子 VI 并添加到 DLL（动态链接库）中。在 LabVIEW 的开发环境中，基于 GPIB 的仪器通信使用标准化仪器编程语言 SCPI 实现，图 5 现实了静电计通过 GPIB 实现数据读操作的流程，首先配置初始化模块找到 GPIB 总线对应的端口对静电计初始化，接着由前面板对应的静电计参数选项修改静电计的参数设置，配置好的参数会自动生成 SCPI 指令并由 GPIB 总线输出到静电计，静电计通过下位机反馈需要读取得数据，这样 PC 机就通过

GPIB Read 指令读取到了所需数据。

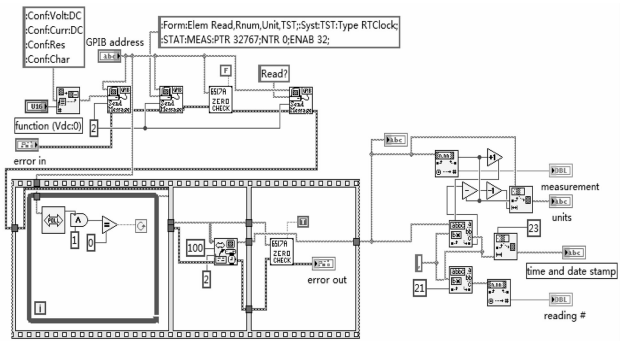


图 5 静电计的 GPIB 读数据操作

### 3.4 扫描测量模块设计

在扫描测量模块中，利用双层顺序结构实现了先对平台进行定位操作，之后再驱动测量程序对数据进行测量的过程。当完成整个流程扫描以后，将法拉第杯归位以实现下一次扫描。如图 6 所示。

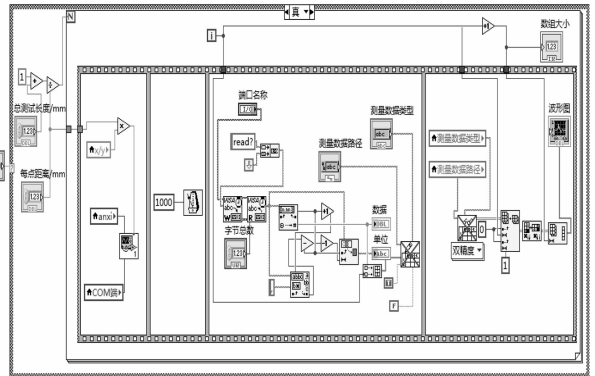


图 6 扫描测量模块程序

当具备测试条件之后，由加速器脉冲信号触发程序运行。触发后，由面板上的参数设定，得到每一次扫描的距离以及总扫描路径信息，在每一次采样的循环结束时得到每一次的运行采样时的时间信息，通过时间可以控制辐照的剂量大小。每次单循环将每一步相对位移信息和电流大小信息分别存入指定的 TXT 文件的不同列。通过对 TXT 文件中数组的处理就可得到辐照强度在空间的分布，最后用可视化图形窗口显示出来。

### 3.5 模块框架

整个模块程序由一个 WHILE 循环嵌套，当触发总体停止按键，程序才会停止。每一个模块程序是由选项卡控件驱动的一个条件结构实现的，选项卡控件由 LabVIEW 提供，连接到条件结构的选择器上面，在前面板上即可添加各模块程序相应的操作控件，后面板的 WHILE 循环内可进行不同模块程序的编写。

## 4 实验结果与分析

现场试验前需对试验现场和仪器的背景噪声进行测量，同时消除整个测试系统的系统误差。在加速器未运行情况

下, 将静电计量程设置为 20 pA, 在试验现场对静电计的输  
出进行了 500 s, 间隔 1 s 的数据采集, 并将结果返回给计  
算机进行分析。图 7 (a) 为采集到的原始数据波形图, 图 7  
(b) 为背景噪声的分布图。

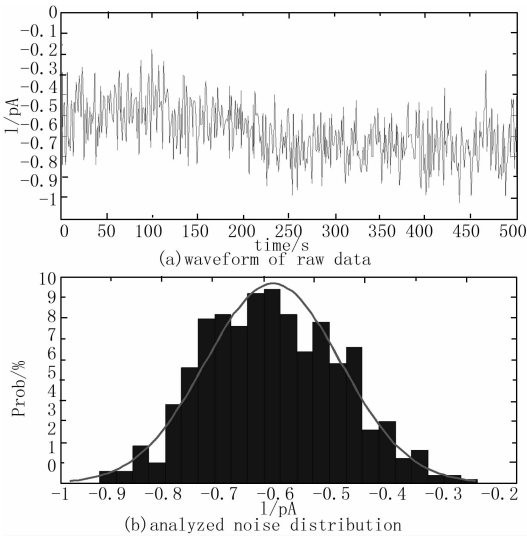


图 7 测试系统背景噪声及分布

图 7 (a) 中噪声主要分布在  $-1.1 \sim 0.1$  pA 之间, 噪声  
宽度为 1 pA, 可计算出 20 pA 量程时的测量精度为 5%, 从  
图 7 (b) 中可以看出, 系统的白噪声基本符合高斯分布,  
其中心位置为一个  $-0.53$  pA 的偏置, 属于测试系统的系统  
误差, 在实际测量中必须扣除该偏置对质子密度计算的影  
响, 即在实际测量时, 电流的值必须要加上 0.53 pA。

知道了法拉第杯产生的电流随时间的变化趋势后, 通  
过束流对时间的积分, 可得某一时间段中狭缝探测器收集  
到的质子数, 除以狭缝面积, 可得质子注量<sup>[7]</sup>, 即

$$\Phi = \int_0^t I_s(t) dt / S e \quad (3)$$

其中:  $\Phi$  为质子注量 ( $\text{cm}^{-2}$ );  $I_s(t)$  为散射质子流强  
(A);  $t$  为测量时间 (s);  $S$  为接收面积 ( $\text{cm}^2$ );  $e$  为基本电荷  
( $1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ )。

束流探测器狭缝面积可通过 MATLAB 处理束流探测器  
狭缝的阴影图像得到, 本文使用的狭缝面积为  $23.25 \text{ mm}^2$ 。

利用能量 3 MeV 的质子束, 对高能质子束流密度分布  
测试系统进行了实验验证, 实验用静电计测得了亚 pA 量级  
的质子束流, 图 8 (a) 显示了中心位置连续辐照强度的实  
验结果, 图 8 (b) 为辐照强度纵向分布的实验结果。

在中心位置定点测量时, 由图 8 (a) 可知, 法拉第杯  
中的电流从零开始积分, 积分时间约 6 min, 6 min 之后法  
拉第杯形成的电流趋于稳定, 每  $\text{cm}^2$  中的质子数约为  $14.7$   
 $\times 10^9$  个, 这一结果与辐照强度纵向分布时中心位置测量  
的强度基本一致, 整个测试过程中的质子束比较稳定, 但随  
着时间有一定的下降趋势; 由图 8 (b) 可知, 在质子束流  
的边沿, 法拉第杯仍存在积分现象, 质子束纵向分布基本  
均匀, 在中心位置上密度略有下降, 但下降范围不大, 经

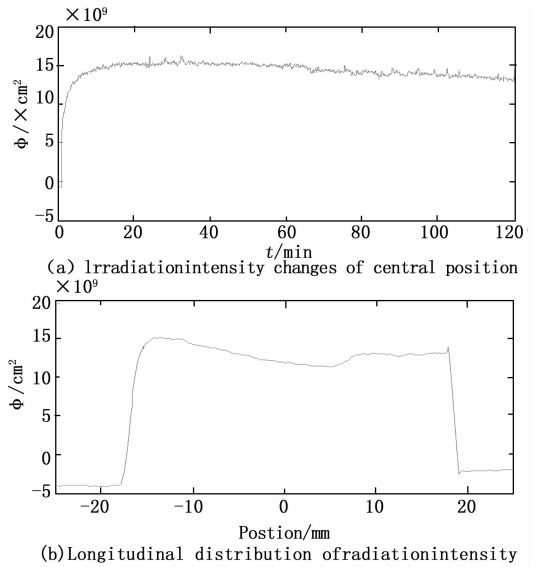


图 8 3MeV 质子束测量结果

过计算, 质子束密度相对于中心位置均匀性偏差为 11.7%。

## 5 结束语

本文基于 LabVIEW 平台设计了高能质子束流密度分布  
测试系统, 由法拉第杯探测器, 移动平台控制系统和基于  
LabVIEW 的控制与数据获取软件三部分组成, 具有对法拉  
第杯位置控制、静电计读写、智能化测量、数据实时处理  
等功能。该质子束流测量系统能实现亚 pA 级电流的测量,  
20 pA 量程时的测量精度为 5%, 解决了弱流质子束的测量  
问题, 同时实验结果表明测到的 pA 量级的质子束流密度随  
空间的分布, 能准确评估电子器件辐射环境与剂量, 为半  
导体器件抗辐射加固设计提供了所需的数据。

## 参考文献:

- [1] O' Neill P M. Badhwar—ONeill 2014 galactic cosmic ray model Description [J]. Gravit. Space Biol., NASA/TP—2015—218569.
- [2] Dietrich W F. CREME96; A revision of the cosmic ray effects on micro—electronics code [J]. IEEE Trans Nucl Sci, 1997, 44 (6): 2150—2160.
- [3] McMahan M A, Blackmore E, Cascio E, et al. Standard practice for dosimetry of proton beams for use in radiation effects testing of electronics [A]. IEEE Conference; Radiation Effects Data Workshop [C]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008.
- [4] Tanaka S I. High intensity proton accelerator project in Japan (J—PARC) [J]. Radiat Prot. Dosim., 2005, 115 (1/2/3/4): 33—43.
- [5] 张璐, 贺朝会, 陈亮, 等. 闪烁体薄膜在线测量质子束流强度 [J]. 核技术, 2012, 35 (1): 21—25.
- [6] Pages L, et al. Electron energy loss, range, and bremsstrahlung yield for 59 elements [J]. Atomic Data, 1972, 4: 9—69.
- [7] 贺朝会, 耿斌, 陈晓华, 等. pA 量级质子束流测量系统 [J]. 核电子学与探测技术, 2000, 20 (1): 40—43.