

多气隙电阻板室的时间特性研究*

李澄 陈宏芳 邵明 汪晓莲 许咨宗 曾辉
阮丽娟 黄胜利 孙勇杰 伍健 叶树伟

(中国科学技术大学近代物理系, 合肥 230027)

摘要 一种具有 10 个气隙的多气隙电阻板室, 在欧洲核子研究中心实验束上进行了性能测试. 该探测器采用几何上串联和电极上并联的特殊结构, 使用国产玻璃(厚度 1.1mm)作为高压电极, 有效灵敏面积为 $200\text{mm} \times 63\text{mm}^2$, 并具有 2×6 读出条. 对 $7\text{GeV}/c$ 的 π^- 粒子, 其探测效率大于 99%, 时间分辨达到 45ps.

关键词 多气隙电阻板室(MRPC) 时间分辨 飞行时间谱仪(TOF)

1 引言

在核物理和粒子物理实验中, 利用高时间分辨的探测器组成飞行时间谱仪(TOF)对事例判选和粒子鉴别起着十分重要的作用. 采用塑料闪烁体配合光电倍增管读出的方法, 是构成 TOF 的最常用的技术, 并得到了广泛的应用. 在新一代加速器物理实验中, 这种传统的粒子鉴别技术受到了严重的挑战. 以 RHIC-STAR 和 LHC-ALICE 重离子实验为例, 核-核碰撞产生的每单位快度的带电粒子数可高达 10^3 量级, 末态粒子动量达到几个 GeV. 为了识别这些粒子, 要求探测器时间分辨小于 100ps, 并且构成 TOF 的探测单元的面积必须足够小, 以避免多粒子同时击中一个单元, 在这种情况下, 对应的电子学读出道数达到 10^5 量级. 由于工作在强磁场中, 因此必须采用抗磁场的光电倍增管(fine mesh 结构), 每个管子的价格很高, 仅光电倍增管一项就需耗资上千万美元, 显然采用塑料闪烁体 TOF 技术已不再是一种现实的可行方案. 为了实现新一代高能加速器实验中对粒子鉴别的要求, 研制一种新型的高分辨的 TOF 探测器, 人们开展了大量的研究, 提出了一些新思想和新方法, 特别是将气体探测器引用到 TOF 中的新模式, 为进一步拓宽气体探测器的应用领域, 提高 TOF 的性能/价格比提供了一条新途径. 近年来在 RPC(电阻板室)基础上发展起来的 MRPC(多气隙电阻板室)使研制这种新型的高分辨 TOF 成为可能^[1,2].

对气体探测器而言, 减小室的气隙以减小原初电离位置的变化, 可以提高探测器的时间分辨, 在这方面人们对各种结构的气体探测器开展研究^[3,4], 如小间隙多丝室(MGC)、平

2001-11-05 收稿

* 国家自然科学基金(10075045, 10045004)和国家自然科学基金国际合作交流项目(10110120229)资助

板室(PPC)、气体电子倍增器(GEM)等.但是减小气隙使的原初电离离子数目和电子的漂移距离减小,从而探测器输出的感应电荷信号减小.以大面积的 PPC 为例,气隙减小到 1mm,对最小电离粒子,时间分辨达到 1—2ns,其输出电荷仅为 1—10fc,而 10fc 是快电子学可测量的下限. MRPC 在结构上的特点较好地解决上述问题.通常 MRPC 是由上下两块电极板和中间多块薄型的高电阻率(10^{11} — $10^{12}\Omega\cdot\text{cm}$)板叠加构成,各板之间留有窄气隙($<0.3\text{mm}$),室内充一定比例的含氟负电性气体.工作时在上下两面的电极上加上高压,当带电粒子通过 MRPC 时,每个气隙中产生的原初电离在电场的作用下产生雪崩放大,雪崩产生大量电子在各个气隙中作漂移运动,并在感应电极上产生感应电荷.由于电阻板处于悬浮电位和它的类半导体特性,中间电阻板内部场强保持为零,置于电极上感应条读出的电信号是各气隙中感应信号的迭加,即中间电阻板对感应信号是“透明”的,同时每层板之间气隙很窄,使雪崩区产生的电子的漂移时间涨落大大减小,从而既提高了时间分辨又保证了足够的电荷增益和探测效率.

为了获得最佳的时间分辨和电荷增益,选择适合的气隙宽度和气隙数目是非常重要的.在对 $5\text{mm}\times 0.22\text{mm}$ 和 $6\text{mm}\times 0.25\text{mm}$ 气隙 MRPC 测试的基础上^[5,6],研制一种 10 个气隙,具有双层对称结构的 MRPC,在欧洲核子研究中心试验束上进行了初步测试,获得了令人满意的结果.

2 室的结构

工作状态下的 MRPC 每个气隙的电场强度要求达到约 $10\text{kV}/\text{mm}$,气体放大过程限制在正比雪崩模式.由于 MRPC 电极是多层平行板结构,它的工作电压比一般的气体探测器要高得多,对 $10\text{mm}\times 0.22\text{mm}$ 气隙的 MRPC 上下电极之间的工作电压超过 20kV .为了减小过高的电压对电极绝缘性能的要求,增加输出信号的幅度,提高室的工作稳定性.我们采用上、中、下三个高压电极,即上下电极连接负高压,中间电极为正高压.每个电极由

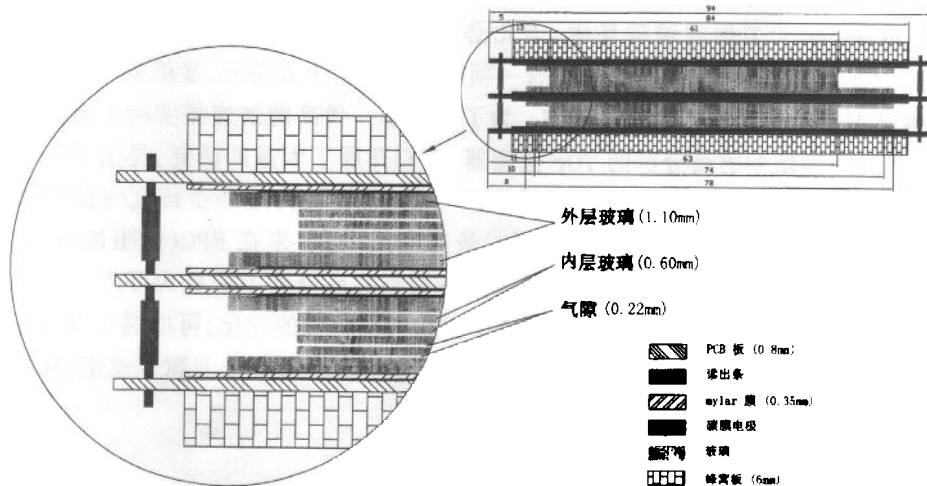


图 1 2×5 气隙电阻板室结构

表面粘上碳膜的玻璃构成,碳膜的特性阻抗为每单位平方面积 $\sim 5 \times 10^5 \Omega/\square$. 上、中、下三个玻璃电极厚度为 1.1mm(产地:上海,室温下的电阻率 $\rho = 8.75 \times 10^{12} / \Omega \cdot \text{cm}$)中间悬浮电极的玻璃厚度为 0.64mm. 整个室结构可以看成由两个 5 气隙的电阻板室构成,两个室之间在几何上是串联的,而电极上是并联的.

图 1 是室的结构示意图. 其中感应信号读出条尺寸为 $30\text{mm} \times 30\text{mm}$, 间隔 3mm, 总有效灵敏面积为 $200\text{mm} \times 63\text{mm}$. 读出条与碳膜之间用 0.35mm 厚聚酯薄膜 (Mylar 膜) 作为绝缘层. 玻璃之间用直径 0.22mm 高强度尼龙丝分隔, 并且每间隔 3cm 穿过一根尼龙丝以保证总的气隙变化不大于 $\pm 20\mu\text{m}$. 整个室固定在气密的屏蔽盒内, 充有一个大气压的混合气体 ($5\% \text{ SF}_6 + 5\% \text{ iso-C}_4\text{H}_{10} + 90\% \text{ C}_2\text{F}_4\text{H}_2$), 在 15kV 高压测试状态下, 每个电极的漏电流小于 5nA.

3 实验装置

测量时上下两个读出条与前端放大器的参考地电位连接, 由中间读出条引出感应信号, 并直接与前端放大器 (MAX3760, 输出脉冲上升时间小于 1.8ns) 连接. 放大后的信号一路经放大连接 ADC (LeCory 2249A), 另一路经甄别成形后连接 TDC (LeCory 2228). 连接室和电缆后, 读出电子学的时间晃动为 $25 \pm 5\text{ps}$. 转换后的数字信号由在线数据获取系统控制送到存储器 (VME Buffer).

用 CERN 质子同步加速器 (PS) 产生的 $7\text{GeV}/c$ 的 π 次级粒子束 (T10) 对室的性能进行测试. 粒子束穿过室位置分布的半高宽小于 1.0cm (见图 2), 束流脉冲宽度为 250ms, 束流强度 $\sim 100\text{Hz}$. 整个束流触发和径迹系统由以下几部分组成: 两个单路读出的 MRPC 和两组闪烁探测器给出测试束流的触发信号, 并提供 ADC 和 TDC 的开门和起始信号; 3 对多丝室构成束流径迹望远镜; 为了精确地获得粒子束入射时间参考值, 由 2 对垂直交叉的闪

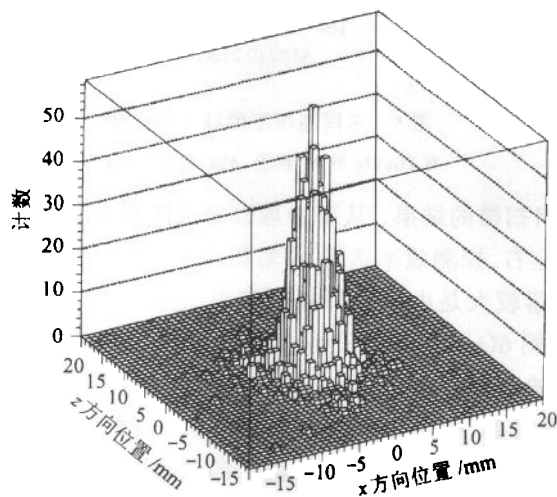


图 2 粒子束穿过室的位置分布
x 方向: 0.8cm, z 方向: 0.6cm (半高宽).

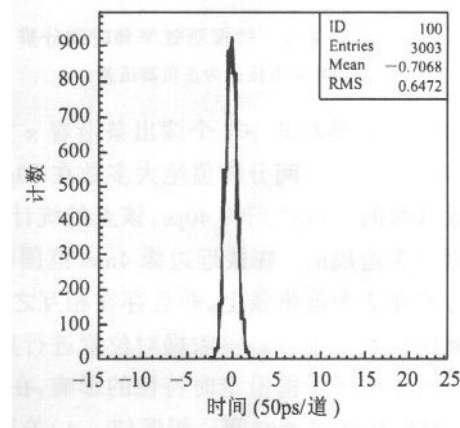


图 3 测量系统起始时间分布
时间分辨 $\sigma: 32\text{ps}$.

烁探测器组成专门的“起始时间”测量系统,每个闪烁体两端分别与 1 个快光电倍增管(输出脉冲上升时间 0.5ns)耦合,并用 4 个光电倍增管给出的时间信号的平均值作为参考时间,时间分辨达到 $\sigma \sim 30\text{ps}$ (见图 3).

4 测量结果

整个室固定在二维可移动平台上,通过移动室的位置进行扫描测试,对每个位置取 10000 次触发计数.束流的人射方向规定为 y 方向,室平面位于 x 和 z 方向.

实验首先测量了不同高压下的探测效率和时间分辨(见图 4).在电极上的高压为 $\pm 5.625\text{kV}$ 时,探测效率已经达到 98%,在 $\pm 5.875\text{kV}$ 时间分辨达到 55ps,增加电压至 $\pm 6.250\text{kV}$ 时会产生少量大幅度的流光信号(见图 5),因此选择 $\pm 5.875\text{kV}$ 作为工作电压.

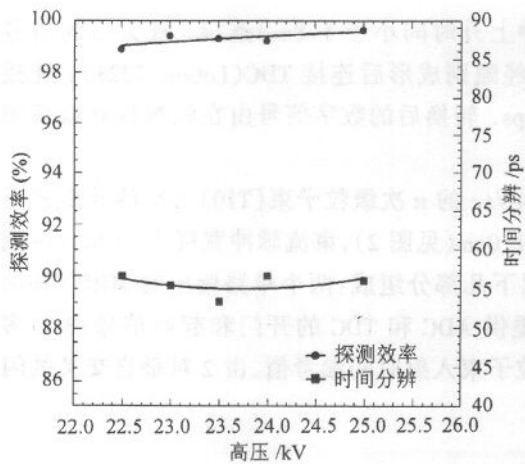


图 4 不同高压下的探测效率和时间分辨

图中所示电压值为正负高压差.

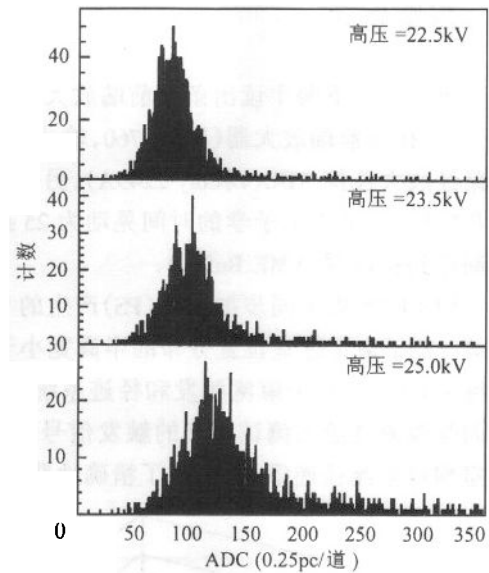


图 5 不同高压下的脉冲幅度谱

对 $7\text{GeV}/c$ 的 π^- 粒子,ADC 门宽 100ns .

图 6(a)是对其中 1 个读出条沿着 x 方向扫描的结果.从图中可以看出距离条的中心 $\pm 10\text{mm}$ 区间,时间分辨值绝大多数在 50ps 左右,探测效率达到 99% 以上.在读出条中心位置其时间分辨达到约 40ps ,该点的统计涨落较大是由于该位置位于束流斑点的边缘而数据较少造成的.在接近边缘 4mm 范围(见图 6(b))由于粒子击中在条的边缘时,感应电荷分布在 2 个读出条上,并且存在相互之间的信号串扰,使得时间分辨变差.图中粒子击中室的位置是用径迹室数据对位置进行重建得到,时间分辨值包括电子学时间晃动.

由于电子学前沿定时特性的影响,在离线分析时必须对不同幅度的信号进行时间修正.对实验测量的时间-幅度(T-A)关系(见图 7)用 1 个 6 次多项式(在小幅度区)加上线性函数(在大幅度区)进行拟合可以获得 T-A 修正系数.图 8 是 1 个经过 T-A 修正后的典型时间谱,扣除参考时间和电子学时间晃动,得到 MRPC 本身的时间分辨为: $\sigma =$

45 ps. 在读出条中心 $\pm 10\text{mm}$ 范围内,对所有的测量点作同样的修正,其时间分辨为 $\sigma = 45 \pm 5\text{ps}$.

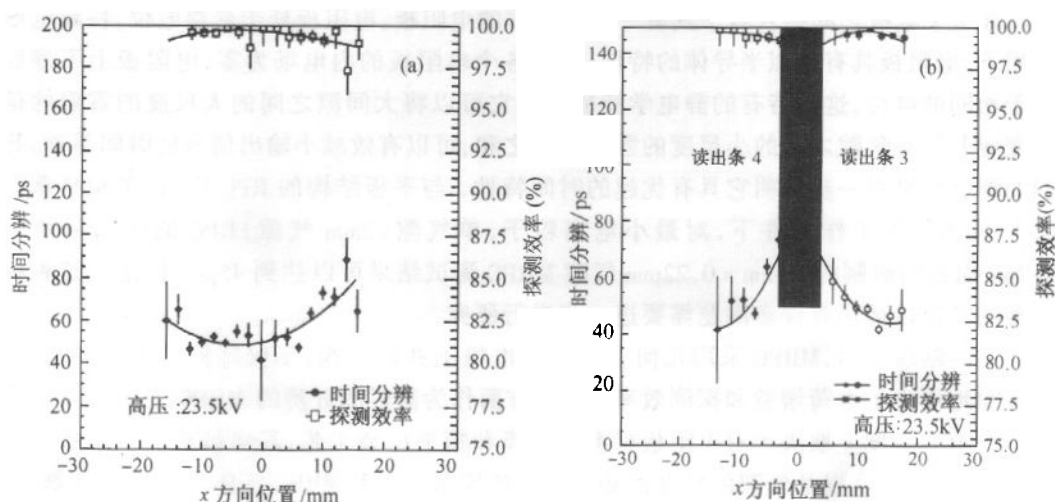


图 6 沿着 x 方向,不同位置的时间分辨和探测效率
(a) 在一个读出条上扫描的结果;(b) 在两个读出条边缘扫描的结果.

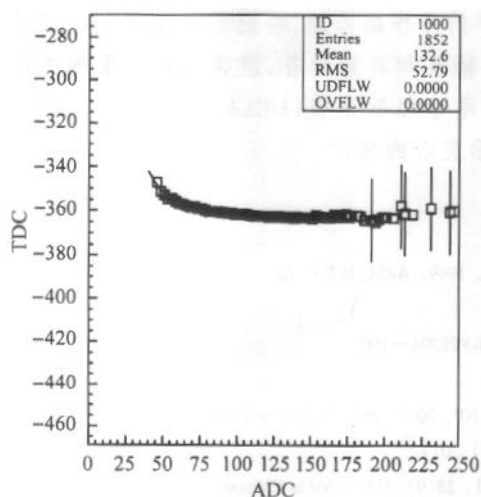


图 7 实验测量的时间 - 幅度(T - A)曲线

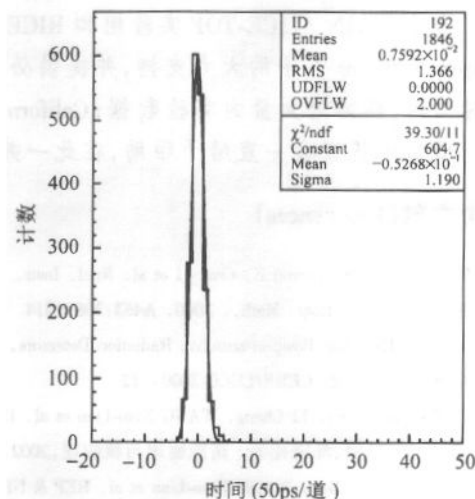


图 8 经过 T - A 修正后的典型时间谱

5 问题和结论

MRPC 是一种新型的气体探测器,它的原材料便宜,工作稳定可靠,单元面积可以做得很小,可根据实际需要构成不同形状的大面积 MRPC 阵列,便于大规模生产,这些优点使 MRPC 成为新型 TOF 的首选方案. 预计如将 MRPC(时间分辨 $\leq 100\text{ps}$)应用于 RHIC STAR 探测器中^[7],可使 π/K 分辨和 K/P 分辨(3σ)从目前的 $0.65\text{GeV}/c$ 和 $1.3\text{GeV}/c$ 分别提

高到 $1.6\text{GeV}/c$ 和 $2.6\text{GeV}/c$ 以上,将为寻找 QGP(夸克-胶子等离子体),研究核物质的夸克和胶子的结构函数以及强子化过程等物理课题提供重要的实验手段。

在 2 个电极之间插入若干具有一定电阻率的电阻板,电阻板处于悬浮电位,在高电场作用下,电阻板具有类似半导体的特性,使得各个电阻板的内电场为零,电阻板上下表面处于相同的电位,这种特有的静电学特征使得它可以大间隙之间的大尺度的雪崩的信号变成若干小气隙之间的小尺度的雪崩信号之和,可以有效减小输出信号的时间晃动,我们的测试结果进一步证明它具有优越的时间特性.与平板结构的 RPC 比较,实验测量给出^[8]:在类似的工作条件下,对最小电离粒子,单气隙(2mm 气隙)RPC 的时间分辨为 1.7ns ,而我们研制的 $10\text{mm} \times 0.22\text{mm}$ 气隙 MRPC 测试结果可以达到 45ps .但是对这种探测器的机理仍有许多问题需要进一步进行研究。

实验结果显示,MRPC 采用几何上串联和电极上并联结构,不仅降低了工作电压,而且有效地提高了电荷增益和探测效率.另一方面作为高时间分辨的 MRPC,它的正常稳定运行在很大程度上取决于对电阻板材料的选择和精细组装工艺,其中包括对电阻板的电特性、表面平整度以及气隙的精度都必须严格的控制.由于 MRPC 气体雪崩规模限制,为保证好的时间分辨和足够高的效率,低噪声高灵敏快响应的前级放大和电子学定时方法也是必须要解决的关键问题之一。

由于 CERN ALICE-TOF 实验组和 RICE 大学的合作组协助,特别是 ALICE-TOF 实验部 Crispin Williams 博士的大力支持,并提供必要实验室和测量设备,使我们在有限的束流测试时间内,获得大量的实验数据;California 大学洛杉矶分校(UCLA)的黄焕中教授对于这一项目的研究也一直给予帮助,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献 (References)

- 1 Williams M C S, Cerron E, Crotty I et al. Nucl. Instr. Meth., 1999, **A434**:362—372
- 2 Spegl M. Nucl. Instr. Meth., 2000, **A453**:308—314
- 3 Sauli F. High-rate Position-sensitive Radiation Detectors, CERN-PPE/94—150
- 4 ALICE-TOF TDR, CERN/LHCC 2000—12
- 5 CHEN Hong-Fang, LI Cheng, WANG Xiao-Lian et al. HEP & NP, 2002, **26**(3): 201(in Chinese)
(陈宏芳,李澄,汪晓莲等.高能物理与核物理,2002, **26**(3):201)
- 6 LI Cheng, WU Jian, WANG Xiao-Lian et al. HEP & NP, 2001, **25**(9):933—936(in Chinese)
(李澄,伍健,汪晓莲等.高能物理与核物理,2001, **25**(9):933—936)
- 7 Letter of Intent. RICE-TOF Group, Proposal for a Single Tray of MRPC TOF for STAR, 2001—6
- 8 Gorini E, Corty I, Hatzifotiadou D et al. Nucl. Instr. Meth., 1997, **A396**:93—99

Beam Test of a 10 Gaps of MRC Prototype as the TOF Detectors

LI Cheng CHEN Hong-Fang SHAO Ming WANG Xiao-Lian XU Zi-Zong ZENG Hui

RUAN Li-Juan HUANG Sheng-Li SUN Yong-Jie WU Jian YE Shu-Wei

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract A double superlayer of MRPC with 2×5 -gas gaps has been tested at CERN-PS (T10) beam line. The prototype has the sensitive area of $200\text{mm} \times 63\text{mm}$ with 2×6 -readout pads, which are connected geometrically in series and electrically in parallel. The 45ps time resolution at more than 99 % efficiency can be obtained for the $7\text{GeV}/c$ negative pions after the T-A correction.

Key words MRPC, time resolution, TOF

Received 5 November 2001

* Supported by NSFC (10075045, 10045004) and Projects of International Cooperation and Exchanges NSFC (10110120229)