

一种新型时间测量探测器 ——多气隙电阻板室*

陈宏芳¹⁾ 李澄 汪晓莲 邵明 许咨宗 汪兆民
黄胜利 阮丽娟 叶树伟 伍健 张子平 曾辉

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 介绍了具有 6 层气隙的电阻板室的结构和工作原理. 用动量 $7\text{GeV}/c$ 的粒子束测量了该探测器的性能, 得到时间分辨为 $60\text{--}70\text{ps}$, 探测效率大于 97% . 在动量为 $3\text{GeV}/c$ 的正电荷粒子束流测试中, 用该探测器获得了 p 和 π 的时间谱, 实现了很好的粒子分辨.

关键词 多气隙电阻板室 飞行时间 时间分辨 粒子识别

1 引言

在粒子物理实验中, 粒子的识别是探测装置的一个重要功能. 通过测量粒子的飞行时间可以分辨处于一定动量范围的粒子的质量, 由此可识别粒子的种类. 在高能重离子对撞实验中, 由于终态事件的高多重性, 如在 CERN 的大型强子对撞机 (LHC) 的 Pb-Pb 对撞时预期在单位快度内会有 8000 个粒子, 在相对论重离子对撞机 (RHIC) 的 Au-Au 对撞单位快度内的终态粒子数约有 2000 个, 为了保证每个单元探测器有低的占有率和高粒子探测效率, 必须要求飞行时间探测器 (TOF) 由许多小单元阵列组成并具有相当的覆盖面积. 如 RHIC 的 STAR 探测器的设计, 要求飞行时间探测器要有 64m^2 才能覆盖 $-1 < \eta < 1$ 的快度范围, 如果每个单元的面积是 $6.3\text{cm} \times 3.1\text{cm}$, 则要有 24500 个读出单元. 在此条件下, 如使用通常的由快闪烁体和快光电倍增管组成的闪烁探测单元来建造 TOF, 由于能在磁场中工作的快光电倍增管价格昂贵, 将使整个探测器的价格过高.

多气隙电阻板室 (MRPC) 是在近年来发展较快的一种新型气体探测器, 它结构简单, 价格便宜, 并能达到很好的探测效率和时间分辨^[1,2]. LHC 的 ALICE 实验组选择它建造新一代飞行时间探测器^[3], RHIC 的 STAR 组也在考虑使用它. 对此我们开展了一些研究工作. 在对单路读出 MRPC 的研制的基础上^[4], 制作了一个多路读出、6 层气隙的电阻板室实验

2001-09-13 收稿

* 国家自然科学基金 (10045004, 1005002) 资助

1) E-mail: hfchen@ustc.edu.cn

模型,在欧洲核子研究中心(CERN)的 T10 实验束的测试中,取得了很好的实验结果.

飞行时间探测器的一个主要性能是它的固有时间分辨. 飞行时间和粒子质量的关系为

$$m = p \sqrt{\frac{t^2}{l^2} - 1},$$

其中 m 是粒子的质量, p 是粒子的动量, l 是粒子的飞行距离, t 是飞行时间. 在一定的飞行距离下对粒子质量的分辨和飞行时间分辨的关系有

$$\frac{\delta m}{m} = \left(\frac{E}{m}\right)^2 \frac{\delta t}{t},$$

E 是粒子的能量. 对 STAR 探测器由时间投影室(TPC)识别粒子的动量的范围如表 1 所示,表中还同时给出了这些粒子实现 3σ 分辨对 TOF 时间分辨的要求.

表 1 STAR 探测器识别粒子的动量及对 TOF 时间分辨的要求

| 粒子分辨 ($\eta = 0$) | TPC | TOF | |
|------------------------|-------------|-------------|---------------|
| | $p/(GeV/c)$ | $p/(GeV/c)$ | σ_t/ps |
| $\pi/k(3\sigma)$ | ≤ 0.65 | 2.3 | 50 |
| | | 1.6 | 100 |
| | | 1.3 | 150 |
| $k/p(3\sigma)$ | ≤ 1.3 | 3.8 | 50 |
| | | 2.6 | 100 |
| | | 2.2 | 150 |

2 基本结构和工作原理

MRPC 是由上下两块电极板和一组平行放置的玻璃板构成,玻璃板间的气隙范围通常在 0.2—0.3mm. 最外层的玻璃板通过电阻性电极和高电压相连,而所有的内层玻璃板

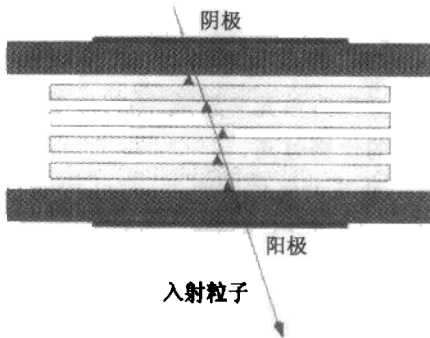


图 1 MRPC 探测器基本原理示意图

处于浮置的电位. 其基本结构如图 1. 所有气隙处于均匀的强电场下,形成探测器的灵敏区. 带电粒子穿过室时,在灵敏区内产生的电离会立即开始气体雪崩过程,并在感应电极上产生可观察的信号. 在一般的气体探测器(如多丝正比室,漂移室)中,电离电子通过漂移进入高电场区发生雪崩,漂移时间的涨落是影响时间分辨的主要因素. 而 MRPC 的时间晃动主要由单气隙的雪崩发展的涨落引起,所以分辨时间得以大大改善. 此外,由于玻璃板对由每个单气隙中的雪崩引起的快信号是透明的,所以在外电极上感应的信号是各小气隙内雪崩信号的累加,可以得到犹如大气隙室一样较大的信号. 所得到的电荷谱并不是指数形,而是 Γ 函数的形状,类似朗道分布那样有一个非零值的明显的峰. 这样可在一定的甄别阈值下仍有很好的探测效率. 在

工作状态下,MRPC 内层玻璃板的电位是浮置的,在气隙中雪崩形成的电子和正离子流可以使它们处在相对平衡的电位,而使得各个气隙都处于相同增益的稳定状态。

我们研制的多路读出 MRPC 有 2×6 个读出单元,每个单元尺寸为 $3.1\text{cm} \times 3\text{cm}$,各读出单元之间有 3mm 的间距,整个探测器的灵敏面积为 $20\text{cm} \times 6.3\text{cm}$,其结构如图 2。外玻璃板尺寸为 $21.6\text{cm} \times 8.9\text{cm}$,厚度为 1.2mm ,其外表面上粘以一层电阻率为 $\sim 8 \times 10^5 \Omega/\text{square}$ 的碳膜作为电极和高压相连。电极与读出印制板之间通过一层 0.35mm 厚的聚酯薄膜绝缘。在外玻璃板之间有 5 块面积为 $19.8\text{cm} \times 6.8\text{cm}$, 0.54mm 厚的内层玻璃。玻璃之间有直径 0.25mm 的尼龙丝分隔形成 6 个均匀气隙。为防止玻璃形变,在读出印制板外粘以 6mm 厚的蜂窝板。MRPC 所用玻璃的体电阻率约为 $8 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ 。室体放在一个气密的盒子内,并通以一个大气压的 $90\% \text{C}_2\text{F}_5\text{H} + 5\% \text{SF}_6 + 5\% \text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ 混合气体。采用负电性的气体和 SF_6 是为了有效的抑制流光的产生^[5],确保 MRPC 工作在正比雪崩的模式。每个读出单元都直接与前端低噪声快放大器连接,信号经过放大,一路连接信号幅度数字转换插件 ADC(LeCroy 2249A),另一路经甄别器连到时间数字转换插件 TDC(LeCroy 2228)。

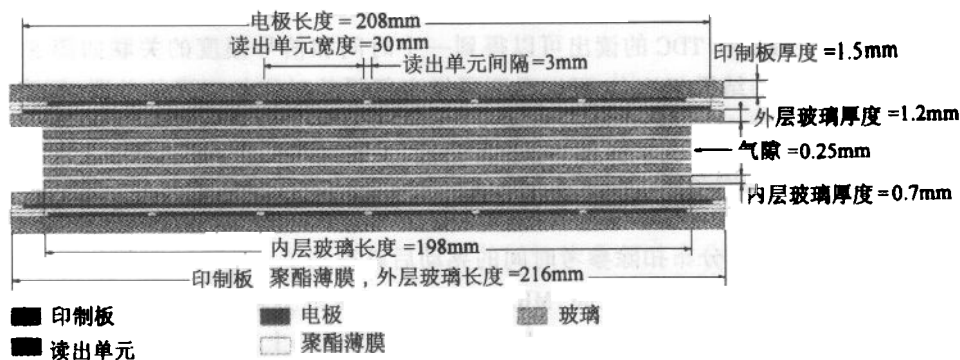


图 2 MRPC 基本结构示意图

3 实验测试

在 CERN 质子同步加速器 PS 的次级粒子束 T10 测试束上,利用 ALICE-TOF 的测试设备对室体进行了性能测试。测试束触发系统由一个单路读出的多气隙电阻板室 SC 和两对面积分别是 $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ 和 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 的闪烁计数器 P3, P4 和 P1, P2 组成,用于提供 ADC 和 TDC 的开门和起始信号。束流径迹望远镜由三对丝距为 4mm 的多室正比室组成。由一对垂直交叉的闪烁体提供测试束起始时间参考点的测量,每个闪烁体的两端与快光电倍增管(H6533)耦合,由这 4 个快光电倍增管 S1, S2, S3 和 S4 的 TDC 读数的平均值作为待测室时间的参考点,称之为“参考时间”,参考时间分辨率的实验值为 $\sim 30\text{ps}$ 。待测室放在一个可移动的工作台上。束流打在室上的斑点直径大小约为 1.5cm ,束流脉冲的宽度为 0.25s 。每路读出通过 22m 双绞线扁平电缆输入到 TDC 和 ADC。在经过电缆后,前端电子学的时间晃动为 25ps 左右。

3.1 效率坪

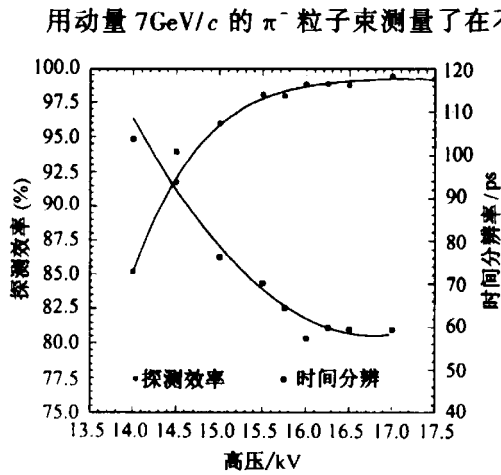


图 3 MRPC 高压坪曲线

用动量 $7\text{GeV}/c$ 的 π^- 粒子束测量了在不同高电压值情况下室的探测效率,效率 ϵ 定义为束流望远镜的计数与 TDC 有读数的事例数之比. 实验结果如图 3 所示. 室探测效率 97% 以上,可以有 1500V 以上的坪区. 在同一读出单元灵敏区内的不同位置,每间隔 7—8mm 进行一次测量. 在离线分析时,利用径迹室的数据计算入射粒子的轨迹,可以得到在读出单元不同位置处效率的分布. 设束流方向为 y 轴方向,图 4(a)和(b)分别给出在 x 方向和 z 方向的测试结果.

3.2 时间分辨

当束流击中相应于读出条的中心时,由 MRPC 输出信号的 ADC 和 TDC 的读出可以得到一个时间和信号幅度的关联如图 5. 与 5 层 0.22mm 气隙的室的结果相比^[4],可以看到同样有很强的时间与幅度的关联,幅度大的信号对应较早到达的信号,但相应的时间变化范围却小得多. 对时间和幅度的关系,在低幅度区采用 6 次多项式函数近似,在幅度较大区可用一次线性函数来拟合. 利用时间和幅度的关系在离线分析时对读出时间谱进行修正,可极大地改善时间分辨,经修正后的时间分布如图 6. 这个时间分布扣除参考时间的晃动后就得到了 MRPC 的时间分辨,实验结果见图 3. 在高压 1.6kV—1.7kV 之间,MRPC 可达到 60ps 的分辨时间. 对不同位置扫描的时间分辨结果与相应的探测效率一起显示在图 4(a)和(b)上. 引起注意的是在读出单

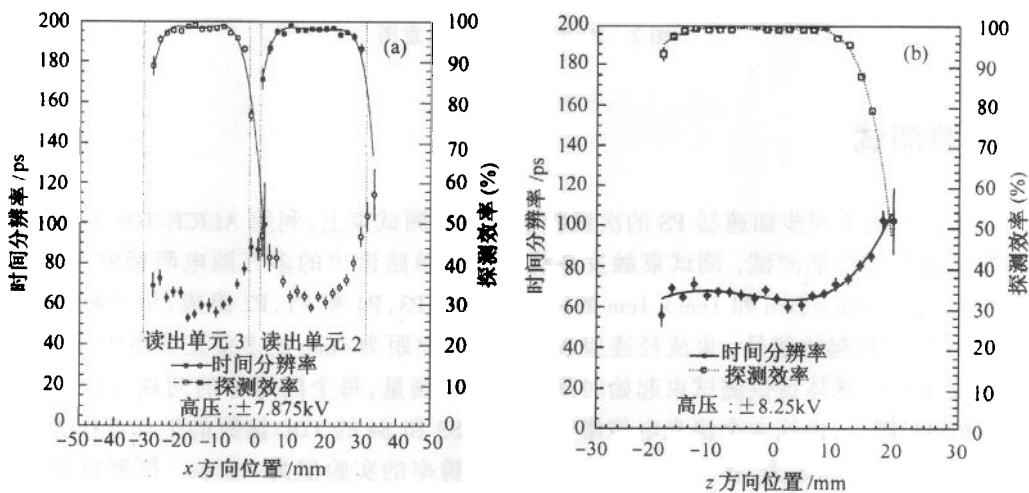


图 4 (a) MRPC 沿 x 方向的探测效率和分辨扫描结果;

(b) MRPC 沿 z 方向的探测效率和分辨扫描结果

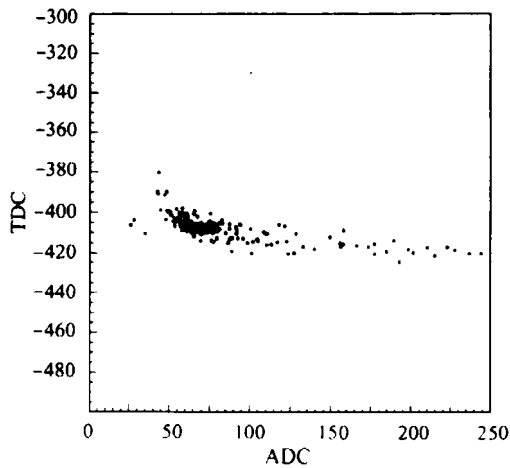


图 5 MRPC 时间 - 幅度(T-A)修正

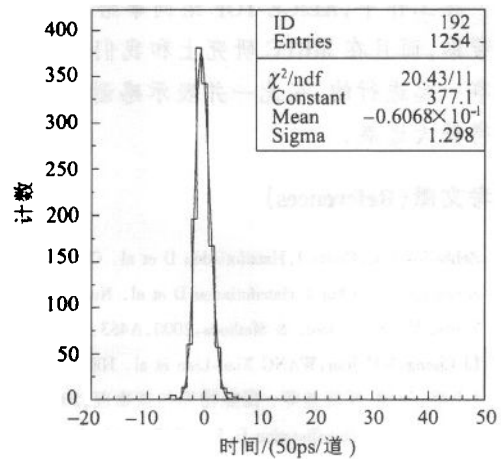


图 6 经过时间 - 幅度(T-A)修正后 MRPC 的时间分辨谱

元的交界处(图 4(a)的读出单元 2 和 3 的交界,及图 4(b)右侧 z 约 16mm 处),由于信号电荷分布在两个读出单元上,分辨时间略为变差。

3.3 π/p 分辨

改变 T10 束流的极性和有关的聚焦元件得到动量为 $3\text{GeV}/c$ 的正电荷粒子次级束。实验中待测的 MRPC 与参考时间计数器的距离为 277cm。质子和靶相互作用产生的次级束流中绝大部分是 π 粒子,但也有少量的弹性散射的质子。经过时间幅度修正后的时间谱如图 7 所示。图上有两个明显的峰,两个峰值相应的时间差为 441ps。计算 $3\text{GeV}/c$ 的 π 和 p 粒子穿越相应距离的时间,计算值为 432ps,同实验结果符合得很好。

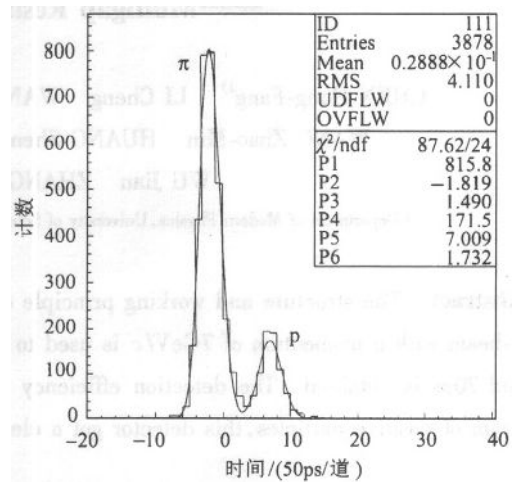


图 7 MRPC 对 T10 束流的 π/p 分辨

4 讨论

对 $6 \times 0.25\text{mm}$ 气隙, 2×6 路读出 MRPC 室的实验测试结果表明,在很宽的工作电压范围(15500—17000 V)下,MRPC 在读出单元中心区的时间分辨在 60—70ps;探测效率在 97% 以上。在读出单元的边由于感应电荷分布在相邻两个读出单元上,若不做特殊处理则会使效率和时间分辨都较中心处为差。如根据测量两个读出条上电荷分布的比例进一步修正。有可能得到改善。

在工作中,ALICE-TOF 组同事给与了许多的帮助,尤其是 C. Williams 博士不仅提供物质帮助,而且在 MRPC 研究上和我们进行了许多讨论. 我们的测试工作是和 RICE 大学的同事一起进行的,在此一并表示感谢. 感谢 UCLA 黄焕中教授的支持,使我们的研究工作获得较大进展.

参考文献 (References)

- 1 Zebballos E C, Crotty I, Hatzifotiadou D et al. CERN PPE/95—166
- 2 Zebballos E C, Choi J, Hatzifotiadou D et al. Nucl. Inst. & Methods, 1999, A434:362—372
- 3 Spegel M. Nucl. Inst. & Methods, 2000, A453:308—314
- 4 LI Cheng, WU Jian, WANG Xiao-Lian et al. HEP & NP, 2001, 25(9):936(in Chinese)
(李澄, 伍健, 汪晓莲等. 高能物理与核物理, 2001, 25(9):936)
- 5 Zebballos E C, Hatzifotiadou D, Kim D W et al. Nucl. Inst. & Methods, 1998, A419:475—478

A New Type Time Measurement Detector —Multigap Resistive Plate Chamber*

CHEN Hong-Fang¹⁾ LI Cheng WANG Xiao-Lian SHAO Ming XU Zi-Zong
WANG Zhao-Min HUANG Sheng-Li RUAN Li-Juan YE Shu-Wei
WU Jian ZHANG Zi-Ping ZENG Hui

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

Abstract The structure and working principle of a six-gap resistive plate chamber is discussed. A π -beam with a momentum of $7\text{GeV}/c$ is used to test this detector, and a time resolution between 60 and 70ps is obtained. The detection efficiency is greater than 97%. In the test with a $3\text{GeV}/c$ beam of positive particles, this detector got a clear separation between p/π particles.

Key words multigap resistive plate chamber, time-of-flight, time resolution, particle identification

Received 13 September 2001

* Supported by NSFC(10045004, 1005002)

1) E-mail: hfchen@ustc.edu.cn