

高时间分辨MRPC的位置灵敏读出方法*

李澄 孙勇杰¹⁾ 邵明 陈宏芳

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230026)

摘要 根据MRPC工作机制和高时间分辨的特性,研制一种位置灵敏MRPC原型及读出方法.该探测器具有10个220 μm 气隙,有效探测面积为20cm \times 20cm.前端电子学采用专用ASIC芯片,具有快时间响应和输入电荷-输出信号宽度的转换功能.采取同时读取信号传输时间差和感应信号分布的方法实现二维读出.对该探测器性能的束流测试结果显示:沿着读出条方向及其垂直方向的位置分辨率分别为4.5mm和1.6mm,其时间分辨达到63ps,探测效率>95%.

关键词 多气隙电阻板室 飞行时间探测器 空间分辨 读出方法

1 引言

多气隙电阻板室(MRPC)作为一种新型的飞行时间探测器,具有很高的时间分辨,可以由许多小的读出单元构成探测阵列,具有常规闪烁探测器构成的飞行时间谱仪所不具有的性能价格比.特别在高亮度的核与粒子物理实验中,由于末态事例的高多重性(如相对论重离子实验-RHIC)更显示出它的优点.为

STAR/TOFr研制的由28个MRPC(6气隙)模块组成探测阵列在近两年的RHIC/STAR物理运行中,显示了良好工作性能,其平均时间分辨为85ps(包括电子学系统的时间晃动),探测效率>95%^[1, 2].图1是2004年在Au+Au 62GeV对撞实验中,STAR/TOFr测量得到的末态粒子飞行速度(1/ β)与动量的关系和相应的质量分布谱.

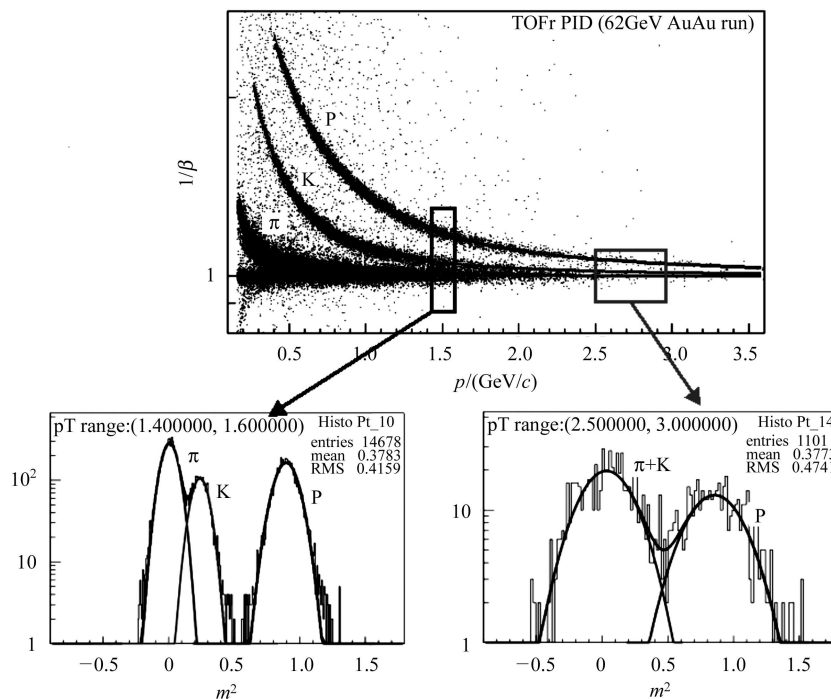


图1 在Au+Au 62GeV对撞实验中,STAR/TOFr测量得到的末态粒子飞行速度(1/ β)与动量 p 的关系和相应的质量分布谱

2005-09-27 收稿, 2006-02-15 收修改稿

* 国家自然科学基金(10375062)资助

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

MRPC工作特点是小气隙减小了离子漂移而引起的时间晃动. 处于悬浮电场下的电阻板对感应信号是“透明”的, 读出电极上的感应电荷与各个气隙电阻板上的电荷之和成正比, 从而有足够大输出信号. 同时工作在雪崩模式下的MRPC, 空间电荷效应在雪崩的发展过程中起着不可忽视的作用. 模拟结果显示^[3, 4], 如果不考虑空间电荷效应, 在以氟利昂(F134a 90%以上)为主的工作气体条件下, 单电子在每个气隙(220—250 μm)中雪崩产生约 10^{16} 电子, 由于空间电荷效应的作用实际上雪崩达到约 10^7 电子就不再发展, 实验数据也很好的验证了这一结果^[5]. 这种受限制的雪崩模式, 表明MRPC不仅可以抑制流光过程产生, 提高其时间分辨, 而且可以具有较好的空间分辨. 依据MRPC工作的这些特点, 我们试制一个有效探测面积为 $20\text{cm}\times 20\text{cm}$, 10个气隙MRPC模型, 采用了新的读出方法, 对该探测器的时间性能, 特别是定位性能进行了研究, 以探讨MRPC读出新模式.

2 探测器结构

研制的MRPC结构是由11层 $20\text{cm}\times 20\text{cm}$, 厚度0.4mm的玻璃构成, 玻璃之间用直径 $220\mu\text{m}$ 的尼龙丝做间隔, 组成10个气隙的电阻板室(见图2). 外层玻璃的外表面喷涂有 $19\text{cm}\times 19\text{cm}$ 的抗静电油漆作为高压电极, 其特性阻抗为每单位平方面积 $\sim 5\text{M}\Omega/\square$. 高压电极和信号读出条之间用Mylar膜隔开. 读出条宽度6.3mm, 每个条间隔1.3mm, 长度20cm. 读出条两端接电子学同时读出信号. 整个MRPC放在密闭的屏蔽盒中, 混合后的工作气体为: F134a 93%+SF₆ 7%.

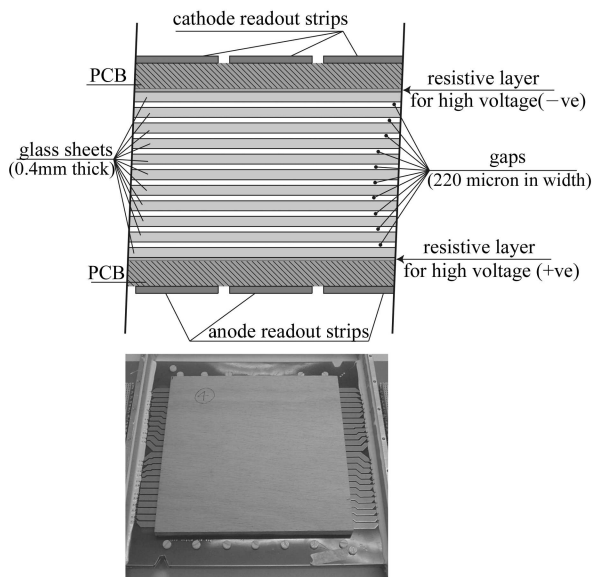


图2 MRPC结构示意图和实体照片

3 读出方法和电子学

为了获得两维位置灵敏信号, 实验采取从读出条两端同时获取信号, 利用信号沿读出条传播的时间差来测定沿读出条方向的位置; 同时测量感应信号在读出电极条上的分布来确定垂直读出条方向的位置.

为了保证同时获得精确的时间信号和幅度信号, 前端电子学采用基于NINO的放大转换电路. NINO是CERN ALICE-TOF组为MRPC信号读出研制开发的ASIC芯片^[6]. 该芯片采用差分输入, 脉冲时间响应 $< 1\text{ns}$, 输入最小电荷响应 10fC ; 并可以将输入电荷转换为输出信号的宽度, 用于过阈时间(Time-Over-Threshold, TOT)的测量; 变换后的输出信号时间晃动 $< 25\text{ps}$, 每片芯片可同时处理8路信号. 由于NINO输出信号形状提供了时间和幅度信息, 可以用TDC直接读取脉冲信号前沿和后沿时间(其时间宽度对应信号幅度), 进而可以进行时间-幅度修正. NINO输出时间信号的宽度与输入信号幅度并非线性关系(见图3), 在信号比较小时变化很快, 对大信号变化缓慢, 这种非线性关系对于小信号的修正效果更显著, 更有利于时间的修正. TDC转换电路采用CERN开发研制的High Performance TDC(HPTDC)芯片^[7]. HPTDC芯片在外部触发信号到来时提供相对时间测量, 可工作在高分辨模式下其时间分辨达到 24.4ps ; 每片可处理8路信号. 每个TDC(VME)插件可同时处理32路差分输入信号. 图4是位置灵敏MRPC读出电路.

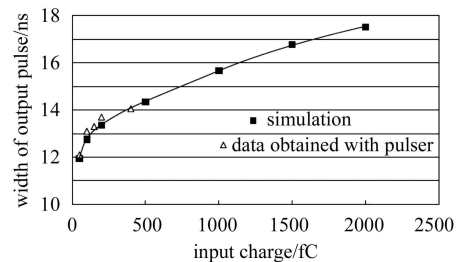


图3 NINO输出信号宽度与输入信号电荷量的关系(模拟数据是采用仿真软件SPICE计算结果)

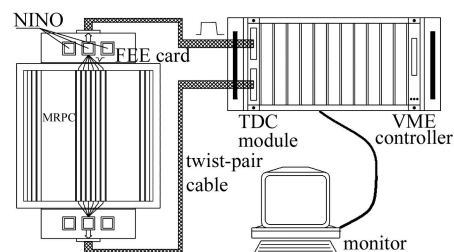


图4 位置灵敏MRPC读出电路

4 测试系统和实验结果

在CERN质子同步加速器(PS)上利用6GeV/c的 π 次级粒子束(T10)对探测器的性能进行了测试^[8]. 该束流测试系统主要由触发系统、径迹望远镜系统和“参考时间”系统构成. 一个预触发MRPC和两对交叉的闪烁探测器构成触发系统. 预触发MRPC主要为束流系统的TDC提供起始时间和ADC开门信号, 闪烁探测器的符合信号作为数据获取系统触发信号. 3个径迹探测器构成径迹望远镜, 位置分辨约为1mm. 在待测探测器附近有两个相互垂直的闪烁探测器, 为测量提供精确的参考时间 T_0 ($\sigma=29.38\text{ps}$, 见图5(b)). 测量时束流通量 $\sim 100\text{Hz}/\text{cm}^2$.

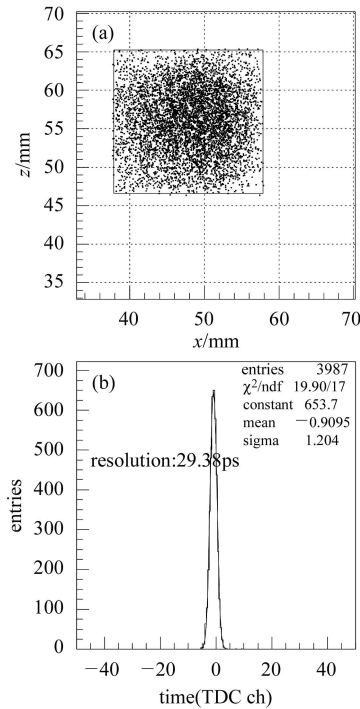


图5 重建的束斑尺寸和参考时间分布
(a) 束斑尺寸; (b) 参考时间分辨率.

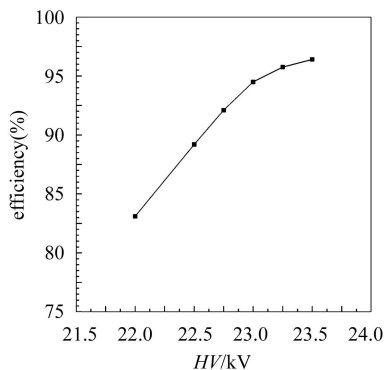


图6 高压坪曲线

实验测量的MRPC的高压-效率坪曲线见图6. 在工作电压为23.5kV, 探测效率大于95%. 由于径迹探测器重建束斑大小约 2cm^2 (见图5(a)), 其面积覆盖约3个读出条. 采用两端读出, 探测器的效率定为: 束斑覆盖下的3个读出条任意一条上两端同时有计数为有效的计数.

图7(a)给出了在工作电压23.5kV下, 时间-TOT修正关系, 其中在600道附近有较大的时间变化是由于存在部分信号反射造成的. 采用3次样条函数(cubic spline function)法拟和^[9], 用来修正信号TOT宽度(对应于幅度)带来的时间晃动. 为了减小粒子击中位置对时间-TOT修正的影响, 在沿读出条方向选取束斑中心3mm范围内的事例进行修正. 读出条两端的原始数据分别经过时间-TOT修正后, 相加取平均后的时间分布见图7(b), 扣除 T_0 晃动后的时间分辨 $\sigma=63.22\text{ps}$.

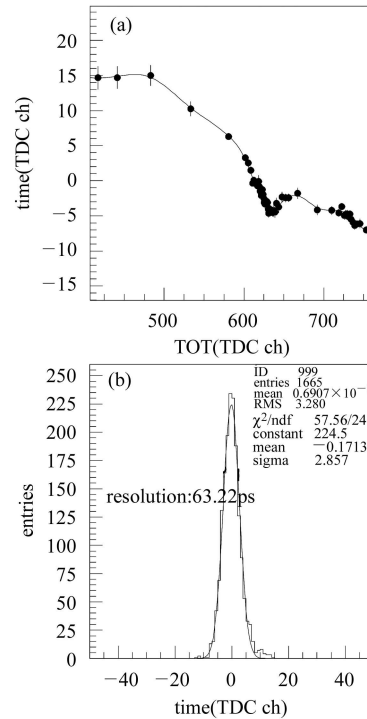


图7 TOT修正曲线和MRPC时间分辨率
(a) 时间-TOT相互关系; (b) MRPC时间分辨率.

利用MRPC读出条两端测得信号传输时间的差来确定位置, 需要确定信号在读出条(Z方向)上传输的速度. 根据实验测量的时间差(时间-TOT修正后)与径迹室给出的沿Z方向的位置关系(见图8), 计算得到信号在读出条上传输的平均速率为 $192.86\text{mm}/\text{ns}$. 信号在读出条上传输的平均速率计算方法如下.

假设在读出条上相距为 S 的 P_1 和 P_2 两点的信号传输到A端和B端的时间分别是 T_{A1} , T_{B1} 和 T_{A2} , T_{B2} ,

相应的时间差为 $Td1 = T_{B1} - T_{A1}$, $Td2 = T_{B2} - T_{A2}$. 如果信号在读出条上的传输速度为 v , 那么, $v \times T_{A1} + S = v \times T_{A2}$, $v \times T_{B2} + S = v \times T_{B1}$, 两式相加后求解, 可得信号传输速度 $v = 2 \times S / ((T_{B1} - T_{A1}) - (T_{B2} - T_{A2})) = 2 \times S / (Td1 - Td2)$.

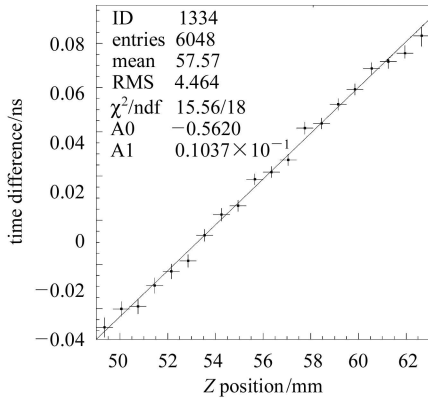


图 8 沿读出条方向信号传输速率

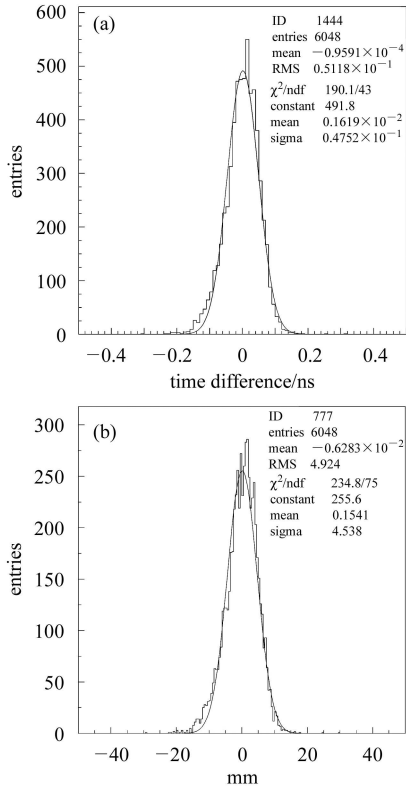


图 9 时间差的分布和位置分辨图

(a) 位置修正之后的时间差分布; (b) 沿读出条方向的位置分辨.

实验得到的时间差的分布见图 9(a), 其方均根误差 $\sigma = 47.5\text{ps}$. 沿读出条方向的位置分辨的分布见图 9(b), 其位置分辨 $\sigma = 4.5\text{mm}$. 在这里得到的读出条两端的时间差的误差 ($\sigma = 47.5\text{ps}$) 比平均时间的误差 ($\sigma = 63.22\text{ps}$) 小, 这是因为电子的雪崩和信号的感应

过程存在时间晃动, 这个时间晃动对读出条两端信号存在时间关联; 其次, 束流粒子动量的不确定性造成的飞行时间的晃动, 对读出条两端的信号也是相关的. 两端时间相减, 可以把这些时间的变化对误差的贡献抵消.

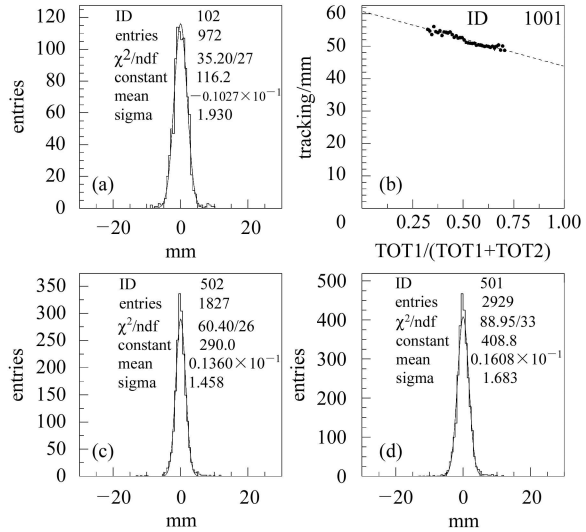


图 10 垂直读出条方向的位置分辨

(a) 仅中间读出条有信号时的位置分辨; (b) 位置与 TOT 比例之间的关系; (c) 两读出条有信号时的位置分辨; (d) 垂直读出条方向总的位置分辨.

实验数据显示当束流对准一个读出条的中心时, 通常在相邻的读出条上产生感应信号. 在我们的束流测量条件下, 约有 30% 的事例仅在中心读出条上产生感应信号; 约 60% 的事例在相邻的两个读出条上产生感应信号; 仅有小于 5% 的事例在 3 条读出条上同时产生信号. 为了测定粒子穿过探测器、在垂直读出条方向上 (x 方向) 的位置分辨, 在数据分析时采取了处理 3 种方法: 1) 当仅有一个读出条上有信号时, 这时只能认为粒子击中位置在读出条的中心, 比较径迹室给出的位置, 得到这时的位置分辨率为 1.93mm , 如图 10(a) 所示; 2) 当相邻的两个读出条上有信号时, 如前所述, 由于 TOT 信号的宽度与信号幅度的非线性关系 (图 4), 不能直接以 TOT 宽度计算出 x 方向的位置. 但根据测量得到的两个读出条上 TOT 宽度的比例关系 $TOT1/(TOT1+TOT2)$ 与径迹探测器给出的位置之间的关系 (图 10(b)), 拟合获得一条经验直线关系, 进而可以计算出事例在 x 方向上的位置, 从而得到这种情况下的位置分辨 (见图 10(c)). 位置分辨 $\sigma = 1.46\text{mm}$. 3) 当 3 个读出条有信号时, 采用传统的重心法就可以计算出击中位置, 但由于这种情况下的事例数很少, 统计误差较大, 得到的位置分辨 $\sigma = 1.89\text{mm}$. 3 种情况下的总位置分辨 $\sigma = 1.66\text{mm}$ (见

图10(d)).

5 结论和问题

不断提高探测器的时间测量和空间测量精度是现代高能物理实验技术发展的方向. 采用同时读取信号传输时间差和感应信号分布的方法实现二维读出, 是位置灵敏MRPC读出新模式. 由于MRPC工作在受限制的雪崩模式, 不仅具有很高的时间分辨, 并且感应信号在电极上的分布也受到限制. MRPC采用两端信号时间差定位的方法, 可以消除电子的雪崩和信号的感应过程的时间晃动对位置分辨的影响, 提高它的

位置分辨. 我们的研究表明利用MRPC的工作特点可以获得好的空间分辨.

初步的实验数据显示, 有必要进一步减小读出条的宽度, 使感应信号分布大于3条以上; 减小信号在读出条上传输过程中的时间涨落和幅度反射; 提高探测器的高压效率坪; 都可以进一步提高探测器的位置分辨. 由于束流测量时间的限制, 这些工作有待进一步深入研究.

该项研究是在与 CERN ALICE-TOF 合作组的合作研究中完成的, 得到了 M.C.S. Williams 和 D. Hatzifotiadou 博士及合作组其他成员的支持, 在此表示深深地感谢.

参考文献(References)

- 1 The STAR TOF Collaboration. Proposal for a Large Area Time of Flight System for STAR, 2003
- 2 The STAR Collaboration. Phys. Lett., 2005, **B616**: 8
- 3 Riegler W, Lippmann C, Veenhof R. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A500**: 144
- 4 Williams M C S. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A525**: 168
- 5 CERN/LHCC 2002-016 Addendum to ALICE TDR 8, 2002
- 6 Anghinolfi F, Jarron P, Martemiyarov A N et al. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A533**: 183
- 7 Akindinov A V, Alici A, Anselmo F et al. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A533**: 178
- 8 LI Cheng, CHEN Hong-Fang, SHAO Ming et al. HEP&NP, 2002, **26**(5): 455—461 (in Chinese)
(李澄, 陈宏芳, 邵明等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(5): 455—461)
- 9 Craven P, Wahba G. Numer. Math., 1979, **31**: 377

Spatial Resolution Measurement of a Position-Sensitive MRPC with High Time Resolution*

LI Cheng SUN Yong-Jie¹⁾ SHAO Ming CHEN Hong-Fang

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract A position-sensitive MRPC prototype with high time resolution was developed. This MRPC has $10 \times 220 \mu\text{m}$ gaps with the active area of $20\text{cm} \times 20\text{cm}$. A front-end electronics based on NINO ASIC was used. The NINO ASIC can transform the input charge to the width of output signal for the Time-Over-Threshold (TOT) measurement by using High Performance TDC (HPTDC). With the difference of transmit time and distribution of plus amplitude, we can get the two-dimension position information. The beam test result shows a spatial resolution of 4.5mm along the readout pads and 1.6mm perpendicular to the readout pads, respectively. The time resolution is about 63ps and the detection efficiency is over 95%.

Key words MRPC, TOF, spatial resolution, readout method

Received 27 September 2005, Revised 15 February 2006

*Supported by National Natural Science Foundation of China (10375062)

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