

多气隙电阻板室飞行时间谱仪技术

王义 张秋楠 韩冬 李元景

Time of flight technology based on multi-gap resistive plate chamber

Wang Yi Zhang Qiu-Nan Han Dong Li Yuan-Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 102901 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182192

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182192>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于中国散裂中子源多功能反射谱仪的高气压多丝正比室探测器的研制

Development of high-pressure multi-wire proportional chamber neutron detector for the China Spallation Neutron Source multipurpose reflectometer

物理学报. 2018, 67(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172618>

一种多频局域共振型声子晶体板的低频带隙与减振特性

Low frequency band gaps and vibration reduction properties of a multi-frequency locally resonant phononic plate

物理学报. 2016, 65(6): 064602 <https://doi.org/10.7498/aps.65.064602>

二维多丝室探测器读出方法的优化

Readout method for two-dimensional multi-wire proportional chamber

物理学报. 2017, 66(7): 072901 <https://doi.org/10.7498/aps.66.072901>

基于鲁棒极端学习机的混沌时间序列建模预测

Chaotic time series prediction based on robust extreme learning machine

物理学报. 2018, 67(3): 030501 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171887>

基于分形理论的尖-板电极短空气隙放电现象研究

Study on discharge phenomena of short-air-gap in needle-plate electrode based on fractal theory

物理学报. 2016, 65(2): 024703 <https://doi.org/10.7498/aps.65.024703>

多气隙电阻板室飞行时间谱仪技术*

王义† 张秋楠 韩冬 李元景

(清华大学工程物理系, 粒子技术和辐射成像教育部重点实验室, 北京 100084)

(2018年12月13日收到; 2019年3月25日收到修改稿)

基于多气隙电阻板室(MRPC)技术的飞行时间谱仪广泛应用于现代物理实验,并在粒子鉴别中发挥了重要作用.随着加速器能量和实验亮度的提高,对飞行时间谱仪的粒子计数率和时间分辨率要求越来越高.MRPC飞行时间谱仪按技术上可以分成三代.从第一代到第三代,计数率要求越来越高($> 30 \text{ kHz/cm}^2$),时间精度也更加严格($< 20 \text{ ps}$),相应的探测器结构和读出电子学系统呈现出不同的特性.本文总结了三代飞行时间谱仪技术的主要技术特点及主要物理实验,介绍了已经取得的应用成果,提出了该技术的未来发展方向.同时也介绍了MRPC探测器在工业及医学方面的应用.

关键词: 多气隙电阻板室, 时间分辨, 时间幅度校正, 机器学习, 波形采样

PACS: 29.30.Aj, 29.30.Ep, 29.40.Cs

DOI: 10.7498/aps.68.20182192

1 飞行时间谱仪和多气隙电阻板室

现代物理实验中粒子鉴别是非常重要的,其中飞行时间谱仪(TOF)在质子, K介子, π 介子以及电子的鉴别中发挥了重要作用.飞行时间谱仪通过测量带电粒子的飞行速度以达到测量粒子质量的目的.我们知道:

$$m = p \sqrt{\frac{t^2}{L^2} - \frac{1}{c^2}}, \quad (1)$$

其中 m 是粒子质量, L 是飞行距离, t 是飞行时间.可以看出,通过测量粒子的飞行时间,可以得到粒子质量.对于具有相同动量 p , 质量分别为 m_1 , m_2 的两种粒子,其飞行时间差可表示为

$$\Delta t = \frac{L}{v_1} - \frac{L}{v_2} = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right). \quad (2)$$

由于 $pc = \beta E$, 其中 E 是粒子能量, 则有:

$$\begin{aligned} \Delta t &= \frac{1}{pc^2} (E_1 - E_2) \\ &= \frac{L}{c} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{m_1 c}{p} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{m_2 c}{p} \right)^2} \right]. \end{aligned} \quad (3)$$

由于 $p \gg mc$, 则 $(mc/p)^4 \rightarrow 0$, 因此可以得到下列近似:

$$\begin{aligned} \sqrt{1 + \left(\frac{mc}{p} \right)^2} &\approx \sqrt{1 + \left(\frac{mc}{p} \right)^2 + \frac{1}{4} \left(\frac{mc}{p} \right)^4} \\ &= 1 + \frac{(mc)^2}{2p^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

将(4)式代入(3)式,可以将粒子鉴别能力 $n_{\sigma_{\text{TOF}}}$ 表示为

$$n_{\sigma_{\text{TOF}}} = \frac{\Delta t}{\sigma_{\text{TOF}}} = \frac{Lc}{2p^2 \sigma_{\text{TOF}}} (m_1^2 - m_2^2), \quad (5)$$

其中 σ_{TOF} 为飞行谱仪系统的时间分辨.图1显示了不同时间分辨的飞行时间谱仪系统的粒子鉴别能力.可以得到,系统时间分辨越高,粒子鉴别能力越强.在飞行距离为 8 m 时,对于 60 ps 的时间分

* 科技部基金(批准号: 2015CB856905, 2008CB8177072, 2016YFA0400100)和国家自然科学基金(批准号: 11420101004, 11461141011, 11275108, 11735009)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yiwang@mail.tsinghua.edu.cn

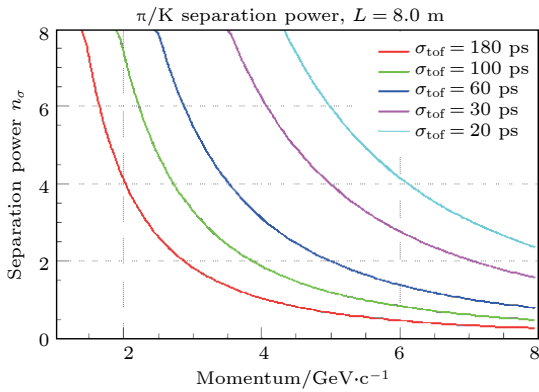


图 1 几种不同时间分辨飞行时间谱仪系统的 π/K 鉴别能力, 飞行距离 $L = 8$ m

Fig. 1. π/K separation power of TOF system with different time resolution, flight distance $L = 8$ m.

辨, 对动量为 $4 \text{ GeV}/c$ 的 π/K 鉴别能力可达 3σ , 如果要求对于 $7 \text{ GeV}/c$ 的 π/K 鉴别能力达到 3σ , 则时间分辨需达到 20 ps .

早期的飞行时间谱仪一般采用快闪烁探测器技术^[1], 由于存在强磁场, 信号读出通常采用抗磁场的光电倍增管, 虽然系统时间分辨能够达到 100 ps 量级, 但系统造价较高, 而且闪烁体存在辐照损伤. 20 世纪 90 年代后期, 一种新型的气体探测器——多气隙电阻板室 (MRPC) 以其优异的时间分辨和相对便宜的造价, 在物理实验的粒子鉴别中得到了广泛应用. 图 2 是 MRPC 探测器的典型结构图. MRPC 的显著特征有以下几点^[2]: 1) 采用阻性电极, 电极体电阻率达 $10^{10} - 10^{12} \Omega\cdot\text{cm}$; 2) 采用阻性

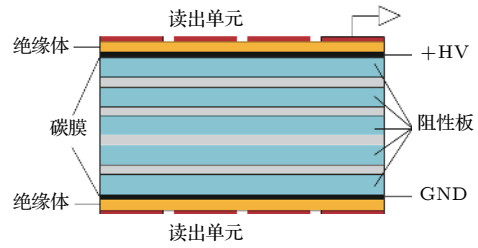


图 2 MRPC 探测器结构示意图

Fig. 2. The structure diagram of MRPC.

高压层, 面电阻率达 $\text{k}\Omega - \text{M}\Omega/\square$; 3) 中间极板通过静电感应获得相应电位; 4) 工作气体为氟里昂 ($\text{C}_2\text{F}_4\text{H}_2$) 等强电负性气体; 5) 气隙宽度为 $100 - 300 \mu\text{m}$, 气隙中场强达 $10^5 \text{ V}/\text{cm}$ 量级以上; 6) 感应读出, 读出可以为块状或条状.

MRPC 探测器一般工作于雪崩模式, 其时间分辨小于 100 ps , 探测效率高于 95% , 耐辐照, 性能稳定, 已被众多物理实验 (如美国 RHIC-STAR, LHC-ALICE 等^[3-5]) 采用, 用来建造飞行时间谱仪.

最初的 MRPC 采用浮法玻璃研制^[6], 由于玻璃电阻率高 (约为 $10^{12} \Omega\cdot\text{cm}$ 量级), 适用于粒子计数率较低的环境, 随着加速器能量和实验亮度的提高, 物理实验对 MRPC 飞行时间谱仪的粒子计数率和时间分辨要求也随之提高, 研制 MRPC 的电极材料, 读出电子学及时间分析方法都进行了改进. 根据这些方面的不同, 到目前为止, MRPC 飞行时间谱仪技术可以归纳为三代, 它们的性能特征及差别如表 1 所示.

表 1 三代 MRPC 飞行时间谱仪性能列表

Table 1. Performance of three generation MRPC TOF.

TOF 系统	时间分辨 /ps	计数率 /kHz·cm ⁻²	电极电阻率 /Ω·cm	电子学	分析方法	典型实验
第一代	80	<0.1	$\sim 10^{12}$	NINO + HPTDC	TOT slewing correction	RHIC-STAR LHC-ALICE
第二代	80	>20	$\sim 10^{10}$	PADIX + GET4	TOT slewing correction	FAIR-CBM
第三代	20	>20	$\sim 10^{10}$	Fast amplifier + SCA	TOT slewing correction Deep learning	JLab-SoLID

自 2000 年以来, 我国的清华大学、中国科学技术大学、中国科学院上海应用物理研究所、华中师范大学以及山东大学等单位先后加入了 RHIC-STAR, FAIR-CBM 及 JLab-SoLID 等国际合作组, 在这些合作组相应物理实验的飞行时间谱仪的设计建造、运行刻度及数据分析中, 中国合作组均做出了巨大贡献. 尤其是清华大学和中国科学技术大学在 MRPC 探测器研制、批量建造、质量控制

等方面, 都取得了举世瞩目的成绩, 得到国际同行的认可. 下面以典型物理实验来介绍三代谱仪的组成结构及性能.

2 第一代 MRPC 飞行时间谱仪

典型的第一代飞行时间谱仪是为 RHIC-STAR 和 LHC-ALICE 实验所建造的. 以美国布鲁

克海文国家实验室的相对论重离子对撞机 (RHIC) 上的螺旋形径迹探测器 (STAR) 为例, 其飞行时间谱仪位于中心探测器 (时间投影室) 的外围, 总面积约 60 m². MRPC 的结构及照片如图 3 所示. MRPC 由厚度为 0.7 mm 的普通浮法玻璃制成, 包含六个气隙, 气隙宽度为 0.22 mm. 探测器包含 6 个读出块, 读出块面积为 3.1 × 6.0 cm². 工作气体为 95% 的氟利昂和 5% 的异丁烷的混合气体, 工作场强为 106 kV/cm. 束流测试表明, 其时间分辨可达 60 ps^[7]. 整个 TOF 由 120 个 tray 组成, 每个 tray 里面有 32 个 MRPC, 因此整个 TOF 含有 3840 个 MRPC, 电子学通道数为 23040. 图 4 为集成好的 tray 的照片. Tray 一端包括气体, 高压等接头, 顶板上集成有电子学.

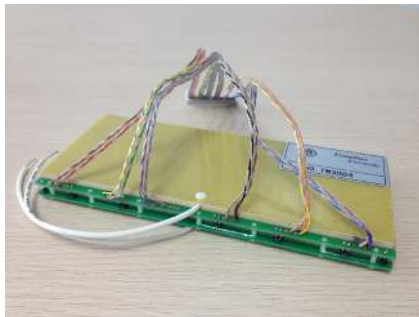
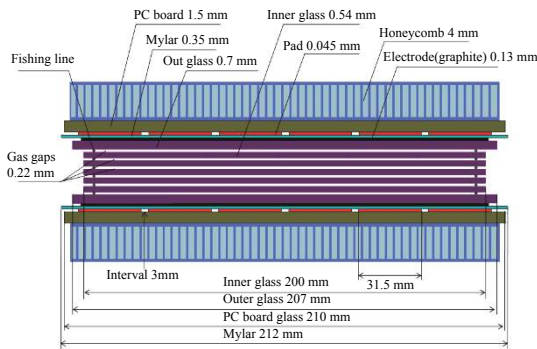


图 3 STAR-TOF MRPC 结构及照片

Fig. 3. Structure and picture of STAR-TOF MRPC.



图 4 STAR-TOF tray 集成照片

Fig. 4. Picture of STAR-TOF tray.

MRPC 输出的差分信号经过 50 cm 的扁平电缆与基于 NINOs 芯片的差分快前放电路连接, 这样可以有效降低噪声, 提高时间精度. NINO 差分放大器是欧洲核子研究中心 (CERN) 的研究小组采用 ASIC 技术开发的^[8], 已被多个实验所采用, 其主要特性有: 差分输入, 上升时间小于 1 ns, 输出为 LVDS 信号, 信号宽度 TOT 代表信号电荷大小, 低功耗 (45 mW/channel). TDC 也是由 CERN 研制的基于 ASIC 技术的 HPTDC^[9], 已被很多实验采用, 其每道的时间精度达到 25 ps.

系统的定时采用过阈定时方法, 而信号过阈时间与信号上升时间或信号幅度有很大关系. 一般采用时间幅度校正 (slewing correction) 的方法来修正这个定时误差, 图 5 显示了由于信号上升时间或幅度不同所造成的时间游走的原理. 时间游走造成了图 6 所示的时间幅度关系, 可以看出, 幅度越小, 时间游走越大. 一般采用多项式进行 slewing correction. STAR 飞行时间谱仪从 2009 年建成以来, 一直稳定运行, 在实验中发挥了重要作用, 取

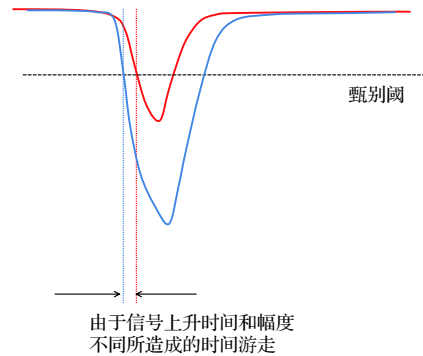


图 5 时间游走原理图

Fig. 5. Schematic of time slewing.

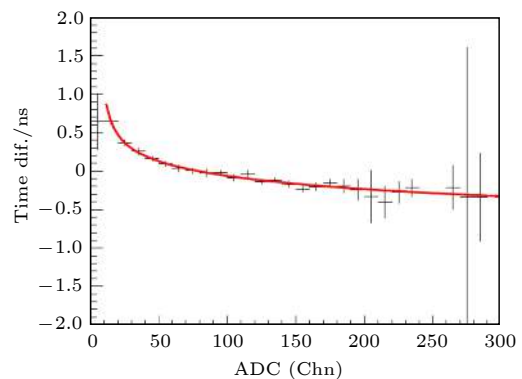


图 6 对 MRPC 的时间幅度信号进行校正, 以修正定时误差

Fig. 6. Slewing correction of MRPC to improve time precision.

得了多项物理成果. 图 7 显示了 STAR-TOF 的粒子鉴别能力, 可以看出, 对 p/(K, π) 的鉴别能力达到 3 GeV/c. 图 8 表示 STAR 合作组于 2011 年在金金对撞中捕获到的反氦核的信号 [10]. 该发现具有重要意义, 证明了宇宙早期反物质的存在.

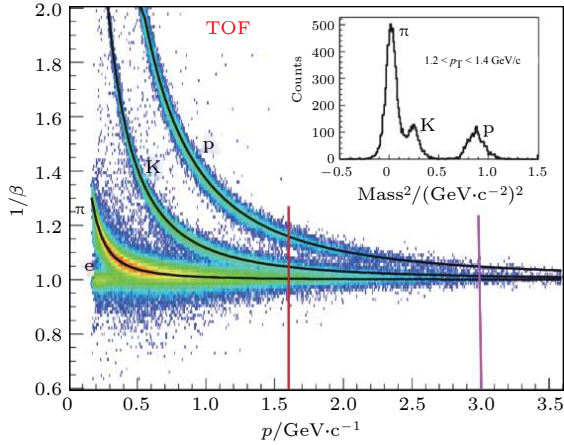


图 7 STAR-TOF 的粒子鉴别图
Fig. 7. The PID of STAR-TOF.

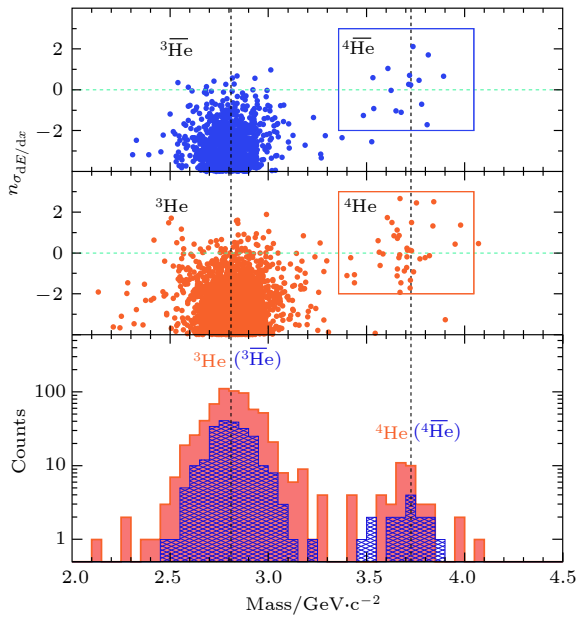


图 8 上图和中图是通过 STAR-TOF 测得的带电粒子质量和能量损失的二维图; 下图是带电粒子质量的一维图, 反氦 4 核的质量等于 3.73 GeV/c². 利用飞行时间谱仪, 在 10 亿次碰撞产生的 5000 亿条径迹中清晰地分辨出 18 个反氦 4 物质
Fig. 8. The top two panels show the dE/dx of charged particles as a function of mass measured by the TOF system; The bottom panel shows the mass distribution of charge particles. The mass of antimatter helium-4 nucleus is 3.73 GeV/c². 18 antimatter helium-4 nucleus are discriminated from around 500 billion tracks generated by one billion collisions.

3 第二代飞行时间谱仪

典型的第二代飞行时间谱仪是德国 FAIR^[11] 上的 CBM-TOF^[12]. 与 RHIC 和 LHC 不同, FAIR 的重离子碰撞是固定靶实验, 能量每核子可达 40 GeV. CBM (compressed baryonic matter) 实验的研究目标包括高重子数密度区间的 QCD 相结构、相变线上连接连续相变和一级相变的临界点位置、致密物质中媒质效应对强子性质的影响、寻找理论预言的新相——夸克素物质和物质的奇特态. 根据模拟, CBM 飞行时间谱仪中心区域粒子计数率高达 20 kHz/cm². 第一代飞行时间谱仪无法满足 CBM-TOF 要求. 这对 MRPC 飞行时间谱仪是一个巨大挑战. 我们知道, MRPC 探测器的计数率能力与气隙中的压降 \bar{V}_{drop} 有直接关系^[13]

$$\bar{V}_{\text{drop}} = V_{\text{ap}} - V_{\text{gap}} = \phi q \rho d, \quad (6)$$

式中 V_{ap} 为外加高压, V_{gap} 为气隙中的有效电压, ϕ 为粒子计数率, q 为雪崩电荷量, ρ 为电极体电阻率, d 为电极厚度. 可以看出, \bar{V}_{drop} 与粒子计数率、雪崩电荷量、电极体电阻率和电极厚度均有关系. 但大幅度提高计数率的最有效途径是降低电极体电阻率 ρ ^[13]. 从 2008 年开始, 我们一直致力于研制性能优良的低电阻玻璃. 通过改进玻璃材料成份, 研究制作工艺, 经过多次实验, 终于研制成功 TUYK-LRG10 型低电阻玻璃, 玻璃性能如表 2 所列^[14].

表 2 低电阻玻璃性能
Table 2. The performance of low resistive glass.

性能参数	典型值
标准尺寸	33 cm × 27.6 cm
体电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	$\sim 10^{10}$
标准厚度/mm	0.7, 1.1
厚度均匀性/ μm	20
表面粗糙度/nm	<10
介电常数	7.5-9.5
DC测试	累积电荷达 1 C/cm ²

由于 MRPC 电极间的气隙窄, 气隙中的场强度高, 因此对电极材料的厚度均匀性、表面光滑度均有很高要求, 我们研制的低电阻玻璃这些主要性能与浮法玻璃接近, 实验证明可以用作 MRPC 的电极材料. 另外玻璃高压测试累积电荷达 1 C/cm², 这相当于 CBM-TOF 最高计数率区域工作五年的累积电荷, 能够保证探测器的长期稳定工作. 采用

此低电阻玻璃, 我们研制了读出块和读出条的高计数率 MRPC 原型, 并赴德国德累斯顿 Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) 采用其强流电子束流测试了探测器在强束流下的性能, 结果如图 9 所示. 可以看出, 探测效率和时间分辨均受计数率的影响, 即使计数率达到 70 kHz/cm^2 , MRPC 探测器效率仍高于 90%, 时间分辨优于 80 ps. 原型探测器的性能大大超过了 CBM-TOF 的要求.

CBM 合作组已采用我们的技术建造飞行时间谱仪系统. 图 10 为 CBM-TOF 探测器结构图^[16], 其中 MRPC1, MRPC2 和 MRPC3a 均采用低电阻玻璃制造, MRPC3b 和 MRPC4 采用超薄浮法玻璃制造, 总面积约 120 m^2 , 电子学道数达 10 万道. 前端电子学采用 PADIX, 时间数字化采用 GET4, 电子学的时间抖动小于 30 ps.

清华大学负责了高计数率 MRPC3a 的设计与

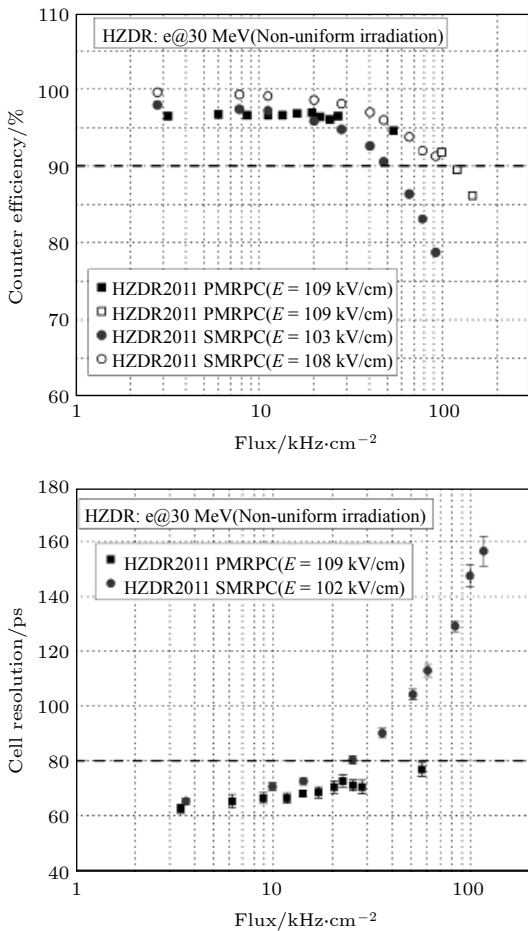


图 9 测试得到的 MRPC 探测效率和时间分别随粒子计数率的变化^[15]

Fig. 9. Measured efficiency and time resolution of MRPC change with particle rate.

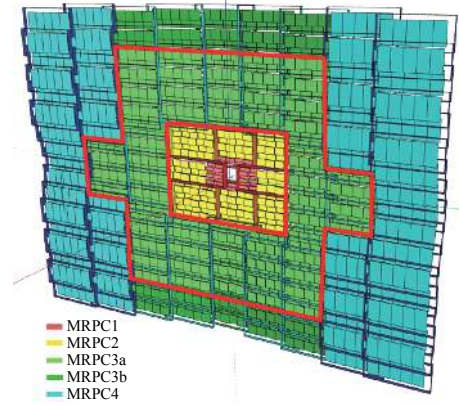


图 10 CBM-TOF 结构

Fig. 10. The structure of CBM-TOF.

制造, 中国科学技术大学负责 MRPC3b 和 MRPC4 的设计建造. 这三种探测器的结构类似, 只是电极材料不同. 图 11 所示为 MRPC3a 的照片. 该探测器采用两层结构, 每层 4 个气隙, 共 8 气隙, 气隙宽度为 0.25 mm. 探测器共有 32 个信号读出条, 读出条尺寸为 $27 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$. CBM 飞行时间探测器模块由五个 MRPC 组成, 为了减小噪声, 前放 PADIX 也放置在气盒中, 如图 12 所示.

采用束流测试 MRPC3a 探测器的性能, 结果如图 13 所示^[17]. 可以看出, 探测器时间分辨达

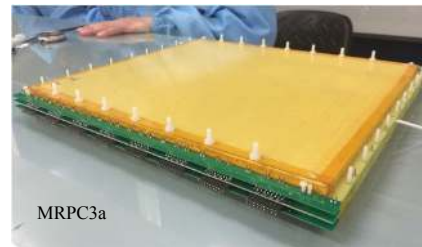


图 11 MRPC3a 探测器照片

Fig. 11. Picture of MRPC3a.



图 12 由 5 个 MRPC 和相应电子学组成的飞行时间探测器模块

Fig. 12. CBM-TOF module is consisted of 5 MRPC counters and related electronics.

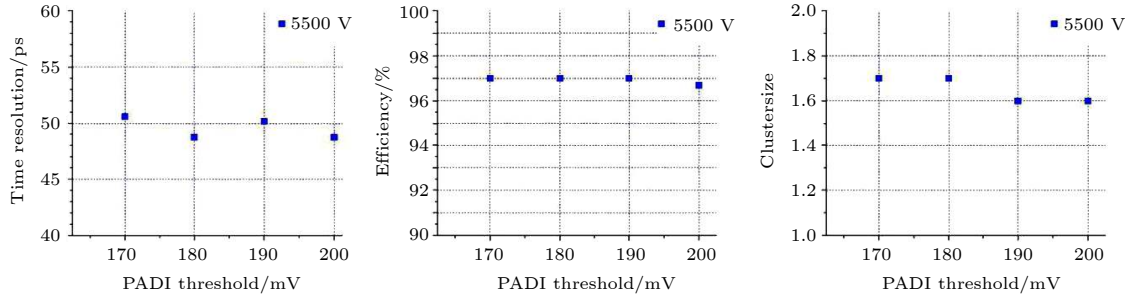


图 13 不同 PADI 阈值下, MRPC3a 探测器的时间分辨, 探测效率和簇大小

Fig. 13. Time resolution, efficiency and cluster size of MRPC3a at different threshold of PADI.

50 ps, 效率达 97%, 簇大小为 1.6. 这些性能均达到或超过 CBM-TOF 的要求, 可以用于建造 CBM-TOF 系统.

CBM-TOF 的电子学由德国 GSI 实验室研发, ASIC 放大器为 PADIX^[18], TDC 为 GET4^[19]. 二者组成系统的时间抖动小于 30 ps, 保证了 CBM-TOF 系统的高分辨时间性能. 目前我们已经开始高计数率 MRPC 的批量生产, 图 14 显示了在同方威视公司密云生产基地批量生产的照片.

由于 CBM 实验 2025 才开始运行, 我们将 MRPC 首先用于美国 RHIC-STAR 实验的端部飞行时间谱仪 (STAR-eTOF^[20]) 上. STAR-eTOF 由 36 个模块组成. 每模块包含 3 个 MRPC, 总共由 108 个 MRPC 组成. 这样一方面可以检验 MRPC 的性能, 另一方面可以进行 STAR 的二期能量扫描实验, 取得相应的物理结果. 图 15 表示 2018 年 STAR 实验 28 GeV 金金对撞的粒子鉴别结果, 可以看出系统对 P/(K, π) 的鉴别能力可达 3 GeV/c. 至 2018 年底, STAR-eTOF 全部建成, 将在 STAR 二期能量扫描中发挥重要作用.



图 14 同方威视公司密云生产车间正在进行高计数率 MRPC 的批量生产

Fig. 14. High rate MRPC were produced at Miyun manufacture base of NUCTECH Ltd.

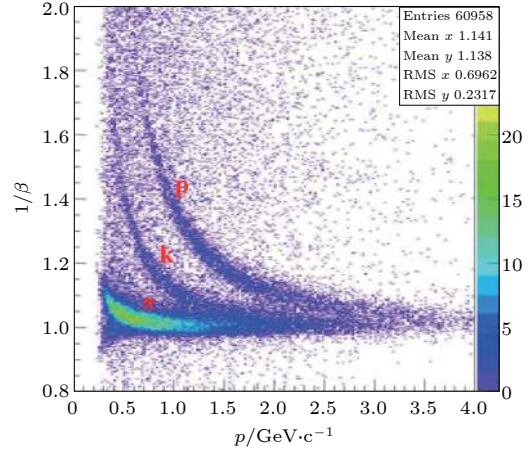


图 15 STAR-eTOF 的粒子鉴别

Fig. 15. The PID of STAR-eTOF.

4 第三代飞行时间谱仪

第三代飞行时间谱仪的典型要求是在高本底下达到优秀的时间性能. 如美国 JLab 实验室 A 实验大厅将要建造的高亮度大接收度谱仪 (SoLID)^[21] 采用 11 GeV 的高能电子打靶来研究核子结构, 其飞行时间谱仪要求对 K/ π 的分辨能力达到 7 GeV/c, 因此时间分辨要求达到 20 ps, 并且本底粒子计数率达到 20 kHz/cm². 这等于是在第二代高计数率飞行时间谱仪的基础上, 进一步提高时间分辨. 我们知道, 整个 TOF 系统的时间抖动包括 MRPC 和电子学的时间抖动:

$$\sigma_{\text{TOF}} = \sqrt{\sigma_{\text{MRPC}} + \sigma_{\text{electronics}}}. \quad (7)$$

要使 σ_{TOF} 小于 20 ps, 则 MRPC 的时间抖动 σ_{MRPC} 和电子学系统的时间抖动 $\sigma_{\text{electronics}}$ 都必须小于 14 ps. 我们知道, 窄气隙 MRPC 的本征时间分辨可达 10 ps, 但是第一\二代飞行时间谱仪所用的电子学 NINO (PADIX) + HPTDC (GET4) 的时间抖动一般大于 20 ps. 这样必须采用高速波形采样技术如高速开关电容阵列 SCA 或者高速

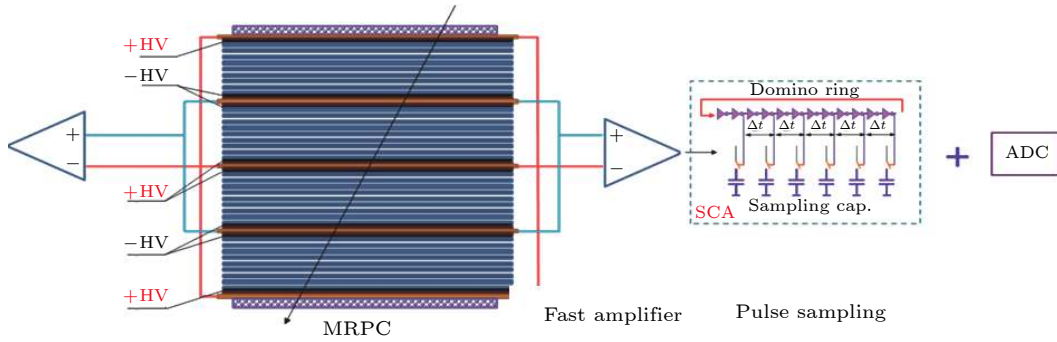


图 16 高时间分辨 MRPC 及读出电子学

Fig. 16. High resolution MRPC and read out electronics.

FADC. 这种技术路线如图 16 所示. MRPC 包含 32 个气隙, 气隙宽度为 104 μm . 高速电流放大器需采用差分输入, 带宽大于 350 MHz, 高速波形采样可以采用 DRS4-V5 芯片, 其采样率可达 5 GHz.

一般地, 根据得到的输出波形, 可以采用常规的过阈定时和时幅校正技术分析 MRPC 的时间性能. 由于上述方法只利用了波形的过阈时间点和波形积分信息, 忽略了波形上升沿、达峰时间点等关键信息, 因此常规分析方法存在一定局限性. 因此可以采用先进的深度学习方法来得到入射粒子到达 MRPC 的时间点, 准确地说是入射粒子在 MRPC 中发生初始电离的时间点. 如图 17 所示, 可以采用机器学习方法, 从信号波形得到粒子到达 MRPC 的精确时间点 t_a . 通过构建深度神经网络, 搭建完整的 MRPC 蒙特卡罗模拟系统, 为神经网络提供训练样本, 得到粒子入射到 MRPC 的精确时间点 [22,23].

为此, 我们建立一套完整的 MRPC 模拟系统, 从模拟工作气体参数开始, 综合考虑初级电离能量沉积、电离位置分布、电离的雪崩倍增、信号感应与成型以及电子学响应等过程, 模拟得到 MRPC

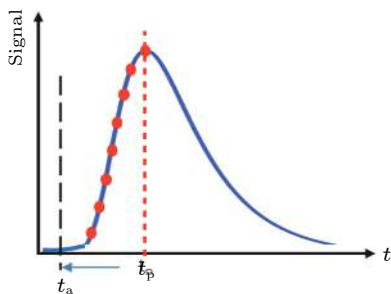


图 17 粒子到达 MRPC 的时间点 t_a 可以由信号波形前沿得到

Fig. 17. The time point t_a of particle arriving at MRPC can be obtained from pulse shape.

探测器的输出信号, 以此作为深度学习的样本.

采用长短期记忆网络 (LSTM) 进行学习, 如图 18 所示. 其输入为信号前沿各时间点, 输出为粒子到达时间点 t_a .

对图 16 中提出的 32 气隙 MRPC 进行模拟分析, 结果如图 19 所示. 分别使用时幅校正和神经网络 LSTM 进行探测效率和时间分辨率的分析, 可以看出, 当使用 LSTM 方法时, 效率一样, 但时间分辨较好. 两种分析方法得到的效率坪区的时间分辨均优于 20 ps. 这证明了设计方案的可行性.

同时也进行了实验验证. 研制出图 16 所示两个结构相同的 MRPC 探测器, 电子学采用高速前放和基于 DRS4^[24] 的波形采样电路, 采用宇宙射线进行了测试. 工作气体为 90% 的氟利昂, 5% 的异丁烷和 5% SF_6 的混合气体. 气隙中工作场强为 150 kV/cm, 达到了效率坪场强. 分别使用时幅校正和 LSTM 网络方法分析 MRPC 的时间分辨. 采用时幅校正得到的时间分辨是 19.8 ps. 图 20 是采用神经网络分析的结果, 可以看出, 神经网络分析结果较好, 达到 16.7 ps.

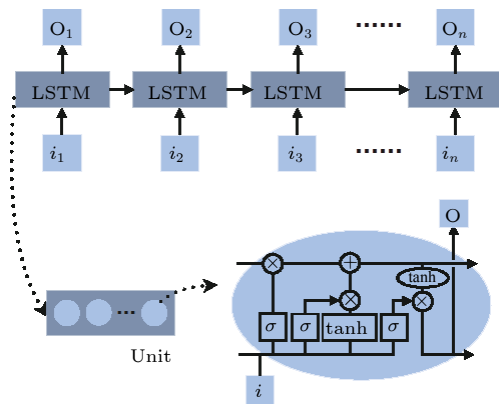


图 18 用于 MRPC 时间重建的 LSTM 网络架构

Fig. 18. The structure diagram of LSTM network used for time reconstruction of MRPC.

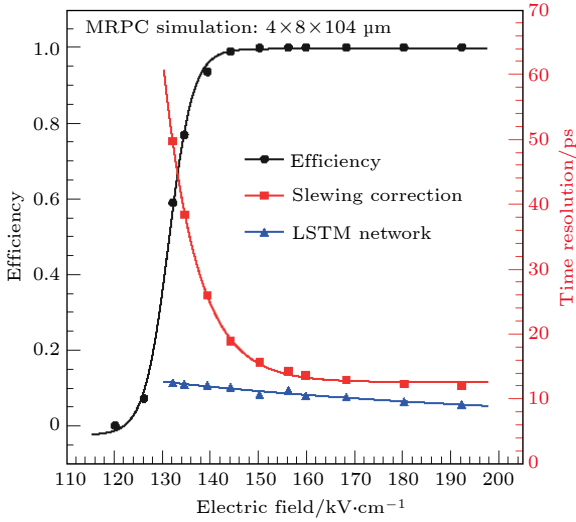


图 19 模拟得到 MRPC 探测效率和分辨随气隙场强的变化, 可以看出, 采用 LSTM 网络法重建出的时间分辨比时幅校正得到结果要好

Fig. 19. Simulated efficiency and time resolution of MRPC change with electric field in the gas gap. It can be seen the time resolution reconstructed with LSTM network is better than with slewing correction.

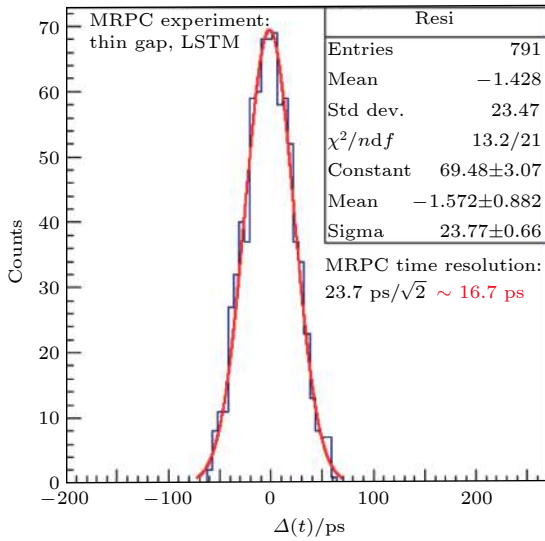


图 20 采用 LSTM 网络方法分析得到 MRPC 的测试时间谱

Fig. 20. Time spectrum of MRPC in cosmic test analyzed with LSTM network.

5 总结

本文着重介绍了 MRPC 飞行时间谱仪的主要技术特点及演变过程. 从 MRPC 发明之初的百 ps 时间分辨, 几百 Hz/cm² 的粒子计数率能力, 发展到现在 16 ps 的时间分辨, 70 kHz/cm² 的高计数率能力, 我们在 MRPC 探测器的物理机理、电

极材料、读出电子学和时间重建方法等方面都进行了深入研究, 取得了丰硕的成果. 随着加速器能量、流强和物理实验要求的提高, 技术上对飞行时间谱仪的要求会越来越苛刻. 除了研究更高计数率、更高时间精度的技术外, 当今国际上对该类阻性电极探测器的研究还有以下几方面热点:

1) 新型环保工作气体研究. MRPC 的标准工作气体 F134a 和 SF₆ 的温室效应都比较显著, 寻找替代气体刻不容缓. 目前欧洲核子研究中心的 ATLAS 和 CMS 实验组均在相关研究^[25], 也取得了一定的进展;

2) 在工业及医学方面的应用. 应用于科学的探测器只有得到工业及医学的广泛应用才能获得强大的生命力和技术资金支持. MRPC 以其优异的时间性能和位置分辨能力, 在医学正电子湮灭断层成像技术^[26]、宇宙射线缪子无损检测技术^[27] 等方面具有很好的应用前景.

3) 高速波形采样技术. 高速波形采样电子学是充分发挥 MRPC 优秀时间性能的关键. 一般采用开关电容阵列 (SCA)^[28] 技术和 FPGA 技术^[29] 实现高时间精度 MRPC 的波形数字化. 只有开发出更高采样频率, 更高幅度精度的电子学, 才能尽可能发挥出 MRPC 本征时间分辨的优势, 提高飞行时间谱仪的粒子鉴别能力.

参考文献

- [1] Acosta D, Ahn M, Anikeev K, et al. 2004 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **492** 605
- [2] Wang J B 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [王景波 2013 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [3] Wang Y, Wang J B, Cheng J P, et al. 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **613** 200
- [4] Wu J, Bonner B, Chen H F, et al. 2005 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **538** 243
- [5] Akimov A, Anselmo F, Basile M, et al. 2000 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **456** 16
- [6] Williams M C S 1998 *Nucl. Phys. B* **61B** 250
- [7] Shao M, Ruan L J, Chen H F, et al. 2002 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **492** 344
- [8] Anghinolfi F, Jarron P, Krummenacher F, Usenko E, Williams M C S 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **5** 1974
- [9] http://tdc.web.cern.ch/TDC/hptdc/docs/hptdc_manual_ver_2.2.pdf/ [2018-12-13]
- [10] Agakishiev H, Aggarwal M M, Ahammed Z, et al. 2011 *Nature* **473** 353
- [11] Boine-Frankenheim O 2010 *Proceedings of IPAC 10 Kyoto, Japan, May 23-28, 2010* p2430
- [12] Höhne C 2016 *PoS* 272
- [13] Abbrescia M, Peskov V, Fonte P 2018 *Resistive Gaseous*

Detectors: Designs, Performance, and Perspectives
(Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA) pp234-235

- [14] Wang J B, Wang Y, Zhu X L, et al. 2010 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **621** 151
- [15] Wang J B, Wang Y, Gonzalez-Diaz D, et al. 2013 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **713** 40
- [16] Deppner I, Herrmann N, Akindinov A, et al. 2014 *JINST* **9** C10014
- [17] Wang Y, Lyu P F, Huang X, et al. 2016 *JINST* **11** C08007
- [18] Ciobanu M, Herrmann N, Hildenbrand K D, et al. 2008 *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.* Dresden, Germany, October 19–25, 2008 p2018
- [19] The GSI Event Driven TDC ASIC GET4 V1.23, Flemming H, Deppe H <http://dx.doi.org/10.15120/GR-2014-1-FG-CS-11/> [2018-12-13]
- [20] Cebra D, Geurts F, Depper I, et al. 2016 arXiv: 1609.05102 [nucl-ex]
- [21] Gao H, Gamberg L, Chen J P, et al. 2011 *Eur. Phys. J. Plus* **126** 2
- [22] Wang F Y, Han D, Wang Y, et al. 2018 arXiv: 1812.02912v2 [physics.ins-det]
- [23] Wang F Y, Han D, Wang Y, et al. 2018 arXiv: 1805.02833 [physics.ins-det]
- [24] Ritt S, 2008 *IEEE Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec.* Dresden, Germany, October 19-25 2008, p1512
- [25] Guida R, Mandelli B, Rigoletti G 2019 *The 15th Vienna Conference on Instrumentation Vienna*, 21 February.
- [26] Couceiroa M, Blancoa A, Ferreira Nuno C, et al. 2007 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A* **580** 915
- [27] Wang J, Wang Y, Wang X, et al. 2016 *JINST* **11** C11008
- [28] Eric O, Jean F G, Herv G, et al. 2013 arXiv: 1309.4397v1 [physics.ins-det]
- [29] Wang J H, Liu S B, Zhao L, et al. 2011 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **58** 2011

Time of flight technology based on multi-gap resistive plate chamber*

Wang Yi[†] Zhang Qiu-Nan Han Dong Li Yuan-Jing

(Key Laboratory of Particle and Radiation Imaging of Ministry of Education, Department of Engineering

Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 13 December 2018; revised manuscript received 25 March 2019)

Abstract

Particle identification is very important in nuclear and particle physics experiments. Time of flight system (TOF) plays an important role in particle identification such as the separation of pion, kaon and proton. Multi-gap resistive plate chamber (MRPC) is a new kind of avalanche gas detector and it has excellent time resolution power. The intrinsic time resolution of narrow gap MRPC is less than 10 ps. So the MRPC technology TOF system is widely used in modern physics experiments for particle identification. With the increase of accelerator energy and luminosity, the TOF system is required to indentify definite particles precisely under high rate environment. The MRPC technology TOF system can be defined as three generations according to the timing and rate requirement. The first-generation TOF is based on the float glass MRPC and its time resolution is around 80 ps, but the rate is relatively low (typically lower than 100 Hz/cm²). The typical systems are TOF of RHIC-STAR, LHC-ALICE and BES III endcap. For the second-generation TOF, its time resolution has the same order as that for the first generation, but the rate capability is much higher. Its rate capability can reach 30 kHz/cm². The typical experiment with this high rate TOF is FAIR-CBM. The biggest challenge is in the third-generation TOF. For example, the momentum upper limit of K/ π separation is around 7 GeV/c for JLab-SoLID TOF system under high particle rate as high as 20 kHz/cm², and the time requirement is around 20 ps. The readout electronics of first two generations is based on time over threshold method, and pulse shape sampling technology will be used in the third-generation TOF. In the same time, the machine learning technology LSTM network is also used to analyze the time performance. As a very successful sample, MRPC barrel TOF has been used in RHIC-STAR for more than ten years and many important physics results have been obtained. A prominent result is the observation of antimatter helium-4 nucleus. This discovery proves the existence of antimatter in the early universe. In this paper, we will describe the evolution of MRPC TOF technology and key technology of each generation of TOFs including MRPC detector and related electronics. The industrial and medical usage of MRPC are also introduced in the work finally.

Keywords: multi-gap resistive plate chamber, time resolution, slewing correction, machine learning, pulse shape sampling

PACS: 29.30.Aj, 29.30.Ep, 29.40.Cs

DOI: 10.7498/aps.68.20182192

* Project supported by the Program of Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2015CB856905, 2008CB8177072, 2016 YFA0400100) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11420101004, 11461141011, 11275108, 11735009).

[†] Corresponding author. E-mail: yiwang@mail.tsinghua.edu.cn