

利用 MC 模拟研究 MRPC 性能*

邵明 阮丽娟 陈宏芳 张于彬 杨珽钧 葛嫄嫄
李洁 李澄 汪晓莲 伍健 许咨宗 黄胜利

(中国科学技术大学近代物理系 合肥 230027)

摘要 利用 Monte Carlo 方法模拟了多气隙电阻板室(MRPC)的气体雪崩和信号收集过程,通过模拟与实验数据的比较分析,研究了 MRPC 粒子探测效率和信号幅度等性能,并讨论了一些外部条件的影响.

关键词 MRPC Monte Carlo 模拟 探测效率 信号幅度

1 引言

多气隙电阻板室(MRPC)是近年来迅速发展来的新型粒子探测器,因其具有高探测效率,好的时间分辨以及价格低廉,容易大面积制造等特性倍受青睐,具有良好的发展前景.其基本结构如图 1 所示,由多块平行的电阻板(一般为玻璃板,电阻率 $\sim 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$)组成的室内充有一定比例的含氟负电性气体(保证其工作在雪崩模式下),工作高压加在最外层电阻板上,内层电阻板电位浮置.当带电粒子通过 MRPC 时,各气隙中产生的原初电离在电场的作用下产生雪崩放大,在各个气隙中作漂移运动,并在感应电极上产生感应电荷.电阻板之间气隙一般小于 0.3mm,以减小雪崩电子的漂移时间涨落,从而提高 MRPC 的时间分辨.而且由于电阻板对由每个单气隙中的雪崩引起的快信号是“透明”的,在外电极上感应的信号是各小气隙内雪崩信号的累加,可以保证足够的信号幅度和探测效率.

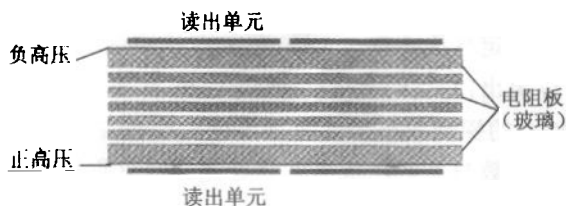


图 1 MRPC 基本原理结构示意图

由于 MRPC 的良好性能,美国相对论重离子对撞机(RHIC)上的 STAR 探测器将它作为建造飞行时间谱仪(TOF)的候选方案,并希望由中国负责室体的研制工作.为此,中国科学技术大学开始研制 MRPC,从 2000 年底陆续制作了一些样品,并分别利用宇宙线和 CERN 的 T10 测试束对其性能进行了研究,取得了很好的测试结果^[1-3].

为了保证室体性能和以后的批量生产要求,需要继续深入研究 MRPC 工作原理和影响性能各项指标的因素,以及对制作工艺和工作环境等条件的要求.本文将采用 Monte Carlo 方法,对 MRPC 的工作模式进行模拟,并通过和实验结果对比确定和修正关键的模拟参数,在此基础上仔细分析处理测试数据,讨论 MRPC 粒子探测效率和信号幅度等性能随各种外部条件变化的关系.

2 模拟原理简述

对于工作在雪崩模式的 MRPC,探测穿越的粒子主要分 3 个阶段,分别讨论如下:

2.1 原初电离

考虑穿越粒子第 j 次电离产生的原初电子簇,令 n_j 和 x_j 分别代表第 j 簇的起始大小和原初电离位置.假定 n_j 服从泊松统计^[4],

$$P(n_j = n) = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu} \quad (1)$$

其中, μ 为簇的平均大小, 即 n_j 的期望值是 μ . 而原初电离位置服从 Γ 分布^[4],

$$P(x \leq x_j \leq x + dx) = \frac{x^{j-1}}{(j-1)!} \lambda^j e^{-\lambda x} dx, \quad (2)$$

其中 λ 为粒子在给定混合气体中的原初电离密度. 另外, 气隙中总的原初电离簇的数目 n_{cl} , 其平均值应该为 λd (d 为气隙宽度), 假设 n_{cl} 服从泊松统计, 即有

$$P(n_{cl} = k) = \frac{(\lambda d)^k}{k!} e^{-\lambda d}.$$

2.2 雪崩模式

假定粒子的雪崩放大符合汤生 (Townsend) 指数增长规律. 即当第 j 簇电子在电磁场中漂移到位置 x 时, 经过雪崩放大后产生的电子离子对数目为^[4]

$$n_{ip} = n_j e^{\eta(x-x_j)}, \quad (3)$$

其中 $\eta = \alpha - \beta$ 是等效汤生系数, α 为汤生系数, β 为吸附系数.

还需要考虑指数增长的晃动^[6], 即电荷的增长并不是严格的按照(3)式的指数增长, 还需要乘一个因子 M_j . 当 E/p 很大时(这是 MRPC 和 RPC 的标准工作条件), 得到 n 个电子的几率服从 Polya 分布, $P_p(n_{cl} = n) = \left[\frac{n}{N} (1 + \theta) \right]^\theta \exp \left[-\frac{n}{N} (1 + \theta) \right]$, θ 可以取为 0.5, 其中, $N = n_j e^{\eta(d-x_0)}$ 为不考虑晃动的结果. 晃动因子可写为 $M_j = \frac{n}{N}$.

2.3 信号的感应

根据广义 Ramo 定理^[7], 点电荷 Q 在多电极探测器内运动, 电场强度为 E , 电荷在某一个读出电极上感应出的电流信号可以表达为

$$i(t) = - \int_x^z Q(x(\tau)) \Phi_w(x(t-\tau), t-\tau) \cdot v_d(x(\tau)) d\tau \quad (4)$$

其中 $x = x(t)$ 是电荷 Q 在探测器内的运动方程, $v_d(x)$ 是电荷 Q 在电场 $E(x)$ 中的漂移速度, $\Phi_w(x, t)$ 是探测器有效区域内的权场. 可将权场分解为 $\Phi_w(x, t) = \Phi(x) \delta(t)$, 对于有 n 个气隙, $n+1$ 块玻璃, 气隙的宽度 d , 玻璃厚度 s , 介电常数 ϵ_r 的 MRPC, 可以算出

$$\Phi(x) = \frac{\Delta V_w}{d}, \quad \Delta V_w = \frac{\epsilon_r d / s}{n \epsilon_r d / s + (n+1)}.$$

由于 MRPC 具有平行的电极, 可以假设 $E(x) = E_0$, $v_d(x) = v_d$ 均为常数, 且 Φ_w 与 v_d 平行. 电荷的运动方程可以写成 $x = v_d t + x_0$.

将 $\Phi_w(t) = \delta(t) \Phi$ 带入(4)式可得 $i(t) = -Q(x) \Phi \cdot v_d = Q(x) \Delta V_w \frac{v_d}{d}$, 对于第 j 次原初电离, 其表达式为: $i(t) = \Delta V_w \frac{v_d}{d} Q_j e^{\eta(x-x_j)} = \Delta V_w \frac{v_d}{d} Q_j e^{\eta d}$, 积分后可得电极板上收集到的总电荷:

$$q_{ind}^j = \int_0^{(d-x_j)/v_d} i(t) dt = \frac{q_e}{\eta d} \Delta V_w n_j [e^{\eta(d-x_j)} - 1]. \quad (5)$$

假设粒子总共发生了 n_{cl} 次原初电离, 则收集到的总信号为

$$q_{ind} = \frac{q_e}{\eta d} \Delta V_w \sum_{j=1}^{n_{cl}} n_j [e^{\eta(d-x_j)} - 1]. \quad (6)$$

3 模拟结果和实验的比较及讨论

根据上述的原理, 我们主要模拟了 MRPC 信号幅度和探测效率的特性, 并结合实验数据进行讨论.

3.1 探测效率

粒子探测效率是 MRPC 最重要的参数之一. 首先通过模拟计算, 得到 $5 \times 0.22 \text{mm}$ 和 $6 \times 0.25 \text{mm}$ 两种气隙宽度的 MRPC 对动量 $7 \text{GeV}/c$ 的 π 介子的探测效率随等效汤生系数与雪崩气隙宽度乘积 ($\eta \cdot d$) 的变化曲线. 由于汤生系数 α 和电场强度 E 之间有如下关系式:

$$\frac{\alpha}{A \cdot P} = \exp \left(-\frac{B \cdot P}{E} \right), \quad (7)$$

其中 P 为气体压强. 而根据软件包 GARFIELD^[8] 的模拟, 可以简单假设气体吸附系数 β 随电场强度呈指数下降, 有

$$\beta = C \cdot \exp(-D \cdot E), \quad (8)$$

这里假定气压不变. 这样, 利用束流测试实验结果, 可以定出(7), (8)式中的参数 A, B, C 和 D . 模拟时 MRPC 的探测效率定义为读出信号电荷量大于 16fC 的事例数与总的产生事例数之比. 模拟曲线和实验数据^[1,2] 一起显示在图 2 中. 图中模拟结果对应的两种 MRPC 参数如下: 气隙宽度分别为 $5 \times 0.22 \text{mm}$ 和 $6 \times 0.25 \text{mm}$, 内/外层玻璃厚度分别为 $0.54 \text{mm}/1.83 \text{mm}$ 和 $0.7 \text{mm}/1.2 \text{mm}$; 气体的原初电离密度 λ 均为 $10/\text{mm}$, 平均电子簇大小 μ 为 2. 由于缺乏相应的

气体参数实验结果, λ 和 μ 均由软件包 GARFIELD^[8] 和 HEED^[9] 计算得出(气体成分为 5% SF₆ + 5% iso-C₄H₁₀ + 90% C₂F₄H₂, 穿越粒子为动量 7GeV/c 的 π 介子). 模拟过程中若气体雪崩电子数超过 10⁸ 个, 则认为发生流光并舍弃该事例.

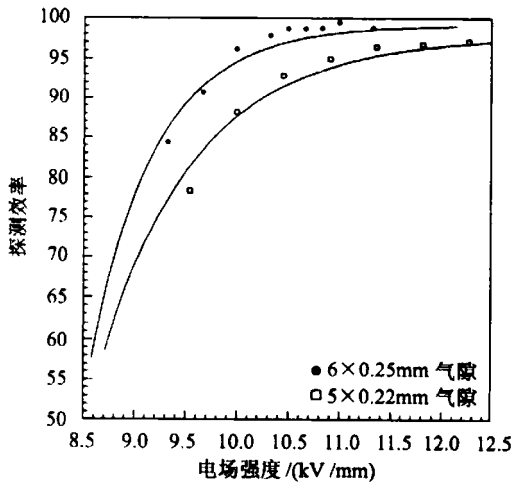


图 2 MRPC 探测效率随电场的变化
点为实验值, 曲线为模拟结果.

3.2 信号幅度

利用上面定出的模拟参数, 我们模拟了 MRPC 的信号平均幅度(电荷量)随电场强度的变化, 如图 3 所示. 各种参数同前文 6 × 0.25mm 气隙 MRPC. 可以看出, 在 MRPC 工作区附近, 信号幅度随所加高压近似线性地增长, 这反映了 MRPC 正比雪崩模式下的工作特点. 在高电场强度处, 模拟值与实验结果有所偏离. 这是由于高电场情况下, MRPC 流光产生几率增加, 实验值不可避免地包括了部分流光信号, 导致平均电荷量比模拟值更快地上升. 同时, 模拟没有考虑空间电荷效应, 这也将高电场强度时有

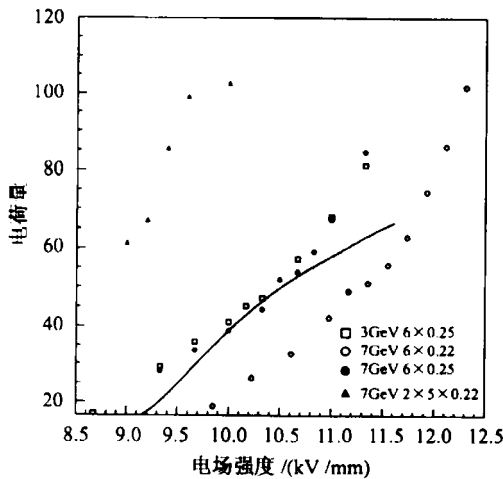


图 3 MRPC 信号幅度随电场的变化
曲线为模拟结果.

所影响. 图中 3GeV/c 动量 π 介子的实验数据显示信号幅度和入射粒子能量之间关系不大.

图 3 还同时给出了几个不同结构参数 MRPC 的实验测试结果. 注意到气隙宽度为 2 × 5 × 0.22mm 的 MRPC, 其信号幅度远高于其他的 MRPC (约为两倍). 这是由此 MRPC 的结构^[3]上具有“几何串联, 电极并联”的特点决定的, 可以根据广义 Ramo^[7] 定理加以证明.

3.3 外部条件对探测效率和信号幅度的影响

入射粒子在气体中的电离截面随粒子能量而改变, 必然会影响到 MRPC 的探测效率. 利用 GARFIELD^[8] 计算了 5% SF₆ + 5% iso-C₄H₁₀ + 90% C₂F₄H₂ 混合气体对于不同动量的 π 介子的原初电离密度和平均电子簇大小, 结果列在表 1 中. 可以看出, 原初电离密度 λ 的变化反应了 π 介子电离能量损失(dE/dX)的相对论上升.

表 1 MRPC 工作气体特性与入射 π 介子动量的关系

π 介子 动量/(GeV/c)	平均电子簇 大小 μ	原初电离 密度 λ/mm^{-1}
7.0	2.061	10.296 ± 0.571
3.0	1.988	9.506 ± 0.576
2.5	2.034	9.316 ± 0.523
2.0	1.982	9.192 ± 0.582
1.5	2.029	8.944 ± 0.572
1.0	2.013	8.47 ± 80.503
0.9	2.063	8.532 ± 0.564
0.8	1.950	8.246 ± 0.559
0.7	2.034	8.208 ± 0.539
0.6	2.023	8.268 ± 0.591
0.5	2.038	8.078 ± 0.473

根据表 1, 可以模拟计算出 MRPC 对不同动量的

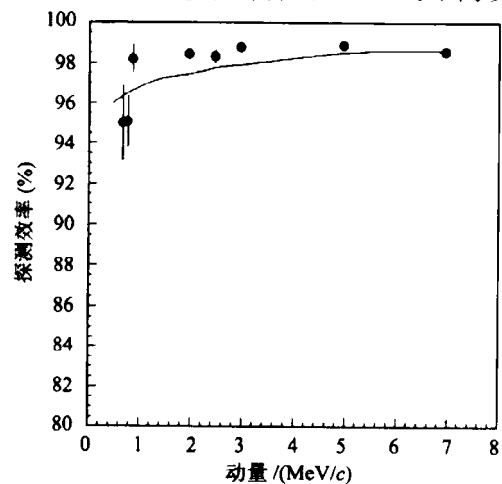


图 4 MRPC 探测效率随入射粒子动量的变化
曲线为模拟结果.

π 介子的探测效率,如图 4 所示. 图中同时给出了实验测试结果. 可以看出,实验值同模拟结果符合得不错;在很大的动量范围内,MRPC 的粒子探测效率变化不大,只在很低动量处略为下降,但仍能大于 90%.

在 MRPC 实际制作过程中,精确地确定气隙宽度是非常关键但相当困难的. 为了了解气隙宽度的变化对 MRPC 性能的影响,使得研制的 MRPC 有可靠的质量,我们模拟了不同气隙宽度下 MRPC 探测效率和信号幅度的变化,如图 5 所示. 这里,模拟的探测效率取的是饱和值(效率——高压曲线的坪区部分),并假设对不同的气隙宽度, $\eta \cdot d$ 保持不变. 由图可以看出,当气隙宽度大于 0.2mm 时,气隙的改变对探测效率影响较小,但对信号幅度有较明显影响. 在 0.22mm 气隙宽度处,为了要求探测效率的变化小于 1%,气隙宽度改变不能大于 0.01mm;此时相应的信号电荷量变化约 0.1pC. 为了保证 MRPC 有较高的探测效率,同时避免信号过大带来的噪声和串扰,气隙宽度要有适当的范围(对 $6 \times 0.22\text{mm}$ 气隙宽度的 MRPC,我们一般要求总气隙变化小于 0.05mm). 此外,气隙宽度改变对于 MRPC 的时间性能也有一定影响,但这个问题将不在本文中讨论.

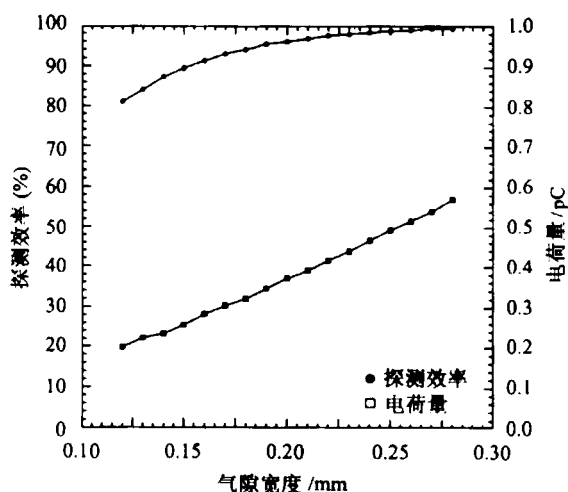


图 5 MRPC 探测效率和信号电荷随气隙宽度的变化

在我们前面的模拟中,探测器工作高压采取的都是图 6(a)的连接方式. 由于只有靠近阴极的电子团簇才有足够的雪崩距离产生可收集到的信号,因

此在(a)图中,第一个团簇电子对 MRPC 信号起决定作用;而按图 6(b)的连接方式,只有最靠后面的团簇靠近负高压的几率大些. 我们对两种不同的连接方式下不同团簇对探测效率的贡献作了模拟,如表 2 所示.

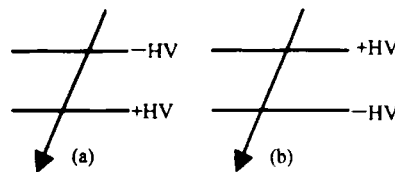


图 6 MRPC 探测粒子时不同的高压连接方式

表 2 两种高压连接方式对探测效率的影响

电子团簇序号	方式(a)	方式(b)
$J = 1$	93.72 %	25.31 %
$J = 2$	40.59 %	49.65 %
$J = 3$	7.79 %	53.83 %
$J = \text{all}$	97.16 %	91.62 %

其中 $J = 1, 2, 3, \text{all}$ 分别表示只考虑第一个团簇,只考虑第二个团簇,只考虑第三个团簇和考虑所有团簇的贡献. 从模拟的结果可知,对于高压连接方式(a),探测效率主要来自于第一个团簇的贡献,而对于方式(b),探测效率主要来自于 $j > 1$ 团簇的贡献,并且(a)方式能够给出更高的探测效率.

4 结论和总结

本文详细描述了利用 MC 方法对 MRPC 的气体雪崩和信号收集进行模拟的原理和过程. 通过实验和模拟的比较,证明此方法能够较好地与实验数据符合. 据此,我们对 MRPC 的探测效率和信号幅度性能进行研究和分析,并对一些可能影响 MRPC 的外部因素进行了讨论. 作为一个比较有效的工具,还可能利用它做更进一步的研究.

此外,该方法仍有许多可以加以完善之处,如增加对高增益时空电荷效应的模拟等等. 而且本文中并没有详细模拟雪崩电子-离子对在电场中的漂移和扩散,以及进一步的对 MRPC 时间性能的分析讨论,这些都需要做更多的工作加以完备.

参考文献 (References)

- 1 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)
- 2 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)
- 3 LI Cheng, CHEN Hong-Fang, SHAO Ming et al. HEP & NP, 2002, **26**(5): 455 (in Chinese)
(李澄, 陈宏芳, 邵明等. 高能物理与核物理, 2002, **26**(5): 455)
- 4 Abbrescia M et al. Nucl. Instr. and Meth, 1997, **A398**: 173—179
- 5 Abbrescia M et al. Nucl. Instr. and Meth, 1998, **A409**: 1—5
- 6 Abbrescia M et al. Nucl. Instr. and Meth, 1999, **A431**: 413—427
- 7 Gatti E et al. Nucl. Instr. and Meth, 1982, **193**: 651
- 8 GARFIELD version Program for Simulation of 2- and 3- Dimensional Drift Chambers. by Rob Veenhof, CERN, Geneva, Switzerland, 2000
- 9 HEED version Program for Calculation of Interaction of Particles with Gases. by Igor Smirnov, PNPI, St. Petersburg, Russia, 1997

Monte Carlo Study of the Property of Multi-gap Resistive Plate Chambers *

SHAO Ming RUAN Li-Juan CHEN Hong-Fang ZHANG Yu-Bin YANG Ting-Jun
GE Yuan-Yuan LI Jie LI Cheng WANG Xiao-Lian WU Jian XU Zi-Zong HUANG Sheng-Li
(Department of Modern Physics, USTC, Hefei 230027, China)

Abstract Monte Carlo method is used to simulate the process of avalanching and signal collection of the Multi-gap Resistive Plate Chambers (MRPC). The result is compared with experimental data to probe the detection efficiency and signal amplitude of MRPC. The effect of different conditions is also discussed.

Key words MRPC, Monte Carlo simulation, detection efficiency, signal amplitude