

# MRPC 宇宙线批量测试方法研究

王义<sup>1)</sup> 程建平 李元景 来永芳 岳骞 李金 贾怀茂

(清华大学工程物理系 北京 100084)

**摘要** 通过分析33个多气隙电阻板室(MRPC)的宇宙线测试结果,得到了雪崩信号比例和平均幅度与时间分辨的关系,计算得出了MRPC的分辨时间随测试事例数的变化趋势. 据此提出了MRPC的宇宙线批量测试方法.

**关键词** MRPC 宇宙线 时间分辨 雪崩信号

## 1 引言

多气隙电阻板室(Multi-gap Resistive Plate Chamber, MRPC)是20世纪90年代后期欧洲核子研究中心CERN的LHC-ALICE实验组首先发展的新型探测器<sup>[1, 2]</sup>. MRPC由若干块高电阻率( $\approx 10^{12}\Omega\text{cm}$ )的薄板叠加而成,各板之间留有约为 $220\mu\text{m}$ 的气隙. 采用流气方式,工作气体为一定比例的 $\text{C}_2\text{F}_4\text{H}_2$ 和 $\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ 的混和气体. 在上下两面的外电极上加上一定高压,气隙内电场强度达到 $10^5\text{V/cm}$ 量级. 当带电粒子通过MRPC时,气隙中的气体原子发生电离,原初电离的电子在电场的作用下产生雪崩放大. 由于电阻板处于漂浮电位和它的类半导体特性,板的内部电场强度为零,置于电极上的感应条读出的电信号是各气隙中雪崩信号之加权和,即高阻薄板对雪崩信号是“透明”的. 因为MRPC采用了多层高阻薄板和小气隙,并工作在雪崩区,所以具有很好的时间分辨性能. 研究表明<sup>[3]</sup>,MRPC的时间分辨可以达到 $\sim 70\text{ps}$ ,探测效率 $>95\%$ ,可承受几百 $\text{Hz/cm}^2$ 的计数率.

基于MRPC良好的性能,美国布鲁克海文国家实验室的RHIC-STAR实验拟采用MRPC技术建造飞行时间探测器(TOF)<sup>[4]</sup>,简称STAR-TOF. STAR-TOF系统是一个覆盖在STAR的时间投影室(TPC)外表面的由120个STAR-TOF探测器构成的圆柱桶,每个探测器由34个MRPC探测器模块和相关电子学构成. TOF总长度为4.8m,覆盖面积 $\sim 64\text{m}^2$ . 整

个TOF探测系统共需4080个MRPC探测器模块,这些模块将由清华大学和中国科学技术大学分别制作完成.

要制作这么多数量的MRPC,必须建立一套完善的质量检验和测试标准. 对于每一个MRPC室,除了要保证几何尺寸(包括长度,宽度,厚度及气隙均匀性等)的一致性以外,还要测量其暗电流和每个pad的噪声,更重要的是要知道该室的探测效率和每个pad的时间分辨. MRPC时间分辨性能是质量检验的核心和难点. 我们知道,高能带电粒子束流是测试MRPC性能的最好工具,但在实验室要获得高能带电粒子束流很困难,也是不现实的. 因此宇宙线是我们可以利用的唯一资源. 由于宇宙线通量很低,测量时间分辨要求事例数要达到一定数量(每个pad接收事例数达到500个以上),才能达到一定的统计精度,这样就要求很长的测量时间. 而测量幅度谱相对来说需要的事例数少一些(每个pad接收事例数达到200个左右<sup>[5]</sup>),同样的测试系统测量幅度谱需要的时间比测量时间谱需要时间少一半以上. MRPC幅度谱能直观反映信号的形成机理,MRPC气隙内电场强度约为 $10^5\text{V/cm}$ ,因此MRPC工作在雪崩模式下. 一般地,MRPC的雪崩信号前沿很快( $<4\text{ns}$ ),持续时间短( $<20\text{ns}$ ). 但由于各种原因(如电极玻璃上存在污渍或油渍等)MRPC中也会产生一些流光信号,流光信号前沿较雪崩信号慢,持续时间也长,经过ADC积分出来的电荷量(幅度)就大些,而且时间分辨较雪崩信号差. 因此信号的幅度

2005-09-21 收稿, 2005-11-28 收修改稿

1) E-mail: yiwang@mail.tsinghua.edu.cn

基本上能反映MRPC的时间性能. 本文在分析33个MRPC宇宙线测试性能基础上, 得出了MRPC的幅度与时间分辨的关系, 这样我们可以通过测量MRPC幅度谱来判别MRPC时间性能. 在此基础上, 总结得出了MRPC宇宙线测试方法. 该测试方法可以保证MRPC批量制作和测试工作的顺利完成.

## 2 MRPC宇宙线测试结果

采用MRPC宇宙线测试系统<sup>[6]</sup>测试了33个六气隙MRPC室(198个pad)的性能. 对每个室, 记录了暗电流及每个pad的噪声, 计算了探测效率和每个pad的雪崩信号比例(这里所指雪崩信号和流光信号是相对的, 取幅度谱中小于某一值的信号为雪崩信号, 也可以称为小幅度信号), 采用高斯拟合法和时间-幅度校正法计算了测试系统参考时间的晃动以及每个pad的时间分辨等指标. 雪崩信号比例定义为雪崩信号数目占总信号数目(雪崩信号数目+流光信号数目)的

百分比. 表1列出了各室的性能. 测试条件为: 高压 $\pm 7\text{kV}$ , 工作气体为97% F134a+3% iso-Butane, 放大器阈值为 $-80\text{mV}$ . 2004-1—2004-28共28个室我们认为性能比较好的, 其中一部分已在STAR上运行, 取得了很好的数据, 经过刻度, 时间分辨为80ps左右, 效率优于95%<sup>[7]</sup>, 满足了STAR-TOF的要求. 2004-2o, 3o, 5o, 7o及9o共5个室经测试性能不太好, 暗电流较大, 噪声较高, 时间分辨相对差一些. 为了分析原因, 对这些室进行了解剖, 结果发现用作Spacer的尼龙丝上存在油渍. 由于MRPC气隙内电场强度高, 里面有油渍必然会产生大量的流光信号和噪声. 从测试结果也可以看出, 测量得到的MRPC的时间性能与宇宙线测试系统的参考时间的晃动密切相关, 测2004-4室时系统出了问题, 4个闪烁探测器给出的参考时间晃动很大, 达到226ps, 这样测得的MRPC的时间分辨也很差. 所以要测到好的时间分辨, 首先得保证测试系统给出的参考时间的晃动要好于100ps左右.

表1 33个MRPC室的性能统计表

室编号	暗电流/nA	探测效率(%)	参考时间的晃动/ps	其他指标	pad1	pad2	pad3	pad4	pad5	pad6
2004-1	0	90	101.5	噪声/Hz	9.5	7.8	7.2	7.1	8.3	7.4
				雪崩信号比例(%)	84.7	89.7	84.2	85.8	82.9	77.7
				时间分辨/ps	99.9	111.1	93	118	87	94.6
2004-2	0	87	95.4	噪声/Hz	19.1	10.4	11.4	7.4	7.7	11.7
				雪崩信号比例(%)	90.5	91.6	90.8	94	91.3	92.7
				时间分辨/ps	87.3	81.2	76.8	88.9	92.8	106
2004-3	0	86	94.5	噪声/Hz	21.8	12.2	11.4	12.8	11.9	21.8
				雪崩信号比例(%)	95.5	96.1	94.9	95.7	95.5	88.1
				时间分辨/ps	93.5	94	88.5	91.4	69.2	85.5
2004-4	0	87	226.3	噪声/Hz	4.3	4.4	3.7	4.5	3.5	5.6
				雪崩信号比例(%)	94.3	86.1	92.6	91.3	90	91.3
				时间分辨/ps	101	160	148.2	171.7	180.3	193.5
				雪崩信号比例(%)	97	86	84	87	90	84
2004-28	0	89	101	噪声/Hz	122	88	131	119	120	74
				雪崩信号比例(%)	30.4	17.2	11.7	5.1	7.6	28.5
				时间分辨/ps	83	88	86	85	85	80
2004-5o尼龙丝上有油	0-1	87	102	噪声/Hz	90	94	113	104	105	79
				雪崩信号比例(%)	75	80	84	89	86	84
				时间分辨/ps	183	174	160	180	160	127
2004-7o尼龙丝上有油	0-1	85	89	噪声/Hz	12	10.1	13.4	13.2	11.7	16.2
				雪崩信号比例(%)	62	65	69	77	72	75
				时间分辨/ps	143	161	133	141	111	144
2004-9o尼龙丝上有油	0-1	86	83	噪声/Hz	12	14.5	10.1	6.9	7.8	21.9
				雪崩信号比例(%)	63	70	81	77	72	74
				时间分辨/ps	139	132	99	137	113	95

### 3 MRPC性能分析

#### 3.1 暗电流和噪声

多气隙电阻板室的噪声特性与暗电流是密切相关的. 从表中可以看出, 凡是暗电流为0nA的室, 其噪声均很低, 各pad噪声平均值为10Hz. 而暗电流大于0nA的室, 噪声相应要大些, 噪声平均值为17Hz. 图1给出了33个室198个pad的噪声分布情况, 可以看出, 绝大多数pad的噪声均小于20Hz.

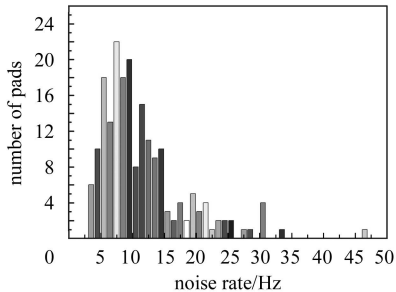


图1 33个MRPC室198个pad的噪声统计

#### 3.2 雪崩信号比例与时间分辨的关系

图2给出了33个MRPC室198个pad的时间分辨与相应的幅度谱中雪崩信号占总信号的比例的关系.

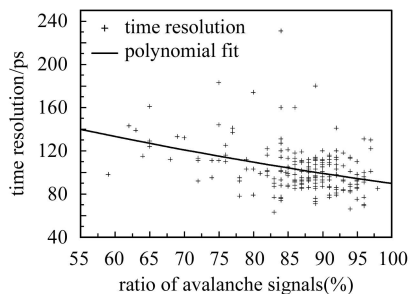


图2 198个pad时间分辨与雪崩信号比例的关系

可以看出时间分辨与雪崩信号比例的关系趋势, 即雪崩信号比例越高, 时间分辨越好. 雪崩信号比例大于80%的有170个pad, 其平均时间分辨为100ps, 相对误差为20ps, 雪崩信号比例小于80%的有29个pad, 平均时间分辨为120ps. MRPC的这一性质说明雪崩信号比例可以作为检验其性能的一个标准. 如果取120ps为合格室的时间分辨, (在STAR运行的MRPC的时间分辨约为80ps, 做了横向位置校正, 也对粒子能量进行了选择<sup>[7]</sup>. 这两点在宇宙线测试中是做不到的, 没有这些修正, 宇宙线测试的时间约能达到100ps左右, 考虑到20ps的相对误差, 宇宙线测试的MRPC

时间分辨应在120ps以内). 在雪崩信号比例大于80%的pad中, 时间分辨小于120ps的占92.3%, 即这种判别的可信度达到92.3%. 反之, 当雪崩信号比例小于80%时, 43%的pad时间分辨大于120ps. 去除6个暗电流和噪声较大的室, 在27个性能较好室的162个pad中(2004-4室因为参考时间晃动较大, 没有参与统计), 雪崩信号比例大于80%且时间分辨小于120ps的占96%. 所以我们可以根据测得的MRPC的宇宙线幅度谱来分析其时间性能.

#### 3.3 信号平均幅度与时间分辨的关系

图3表示各pad时间分辨与其平均幅度(扣除了ADC的Pedstal)的关系. 相对而言, 雪崩信号的幅度比流光信号的小. 从信号幅度的大小, 可以分析发生在室中的物理过程. 从信号平均幅度分析, 平均幅度小于400的有183个pad, 其平均时间分辨为100ps; 平均幅度大于400的有15个pad, 其平均时间分辨为122ps. 同样, 在平均幅度小于400的pad中, 其时间分辨小于120ps的pad占92%. 反之, 在平均幅度大于400的pad中, 53%的pad时间分辨大于120ps. 所以, pad的平均幅度也可以作为判别其时间分辨的一个标准. 图4表示各pad的信号平均幅度与雪崩信号比例的关系. 可以看出, 两者具有很好的线性关系.

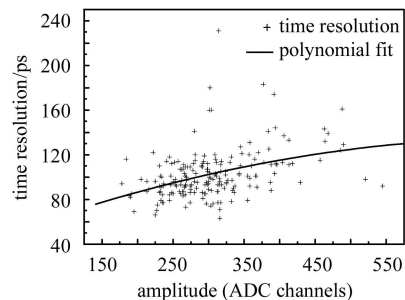


图3 时间分辨与平均幅度的关系. 从统计结果看, 信号平均幅度越大, pad的时间分辨越差, 这与上图雪崩信号比例结论是一致的

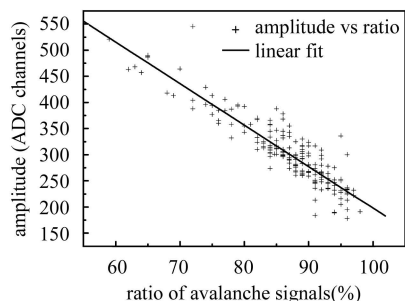


图4 平均幅度与雪崩信号比例的关系

### 3.4 时间分辨与事例数的关系

测量MRPC每个pad的时间分辨需要一定的事例数,才能达到一定的统计精度.对编号为2004-31的室进行了分析.图5表示该室的3个pad的时间分辨与事例数的关系.很明显,随着测试事例数的增加,时间分辨趋向于稳定值.当每个pad的事例数大于500时,该室的pad2,3,5的时间分辨测试值分别趋向于100ps,100ps和110ps,最大拟合时间分辨晃动率分别为5.9%,6.6%和12.5%.图6表示2004-31室被剂量率为 $2.7 \times 10^{-2} \text{Gy/h}$ 的 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线辐照24h后,测得的时间分辨与事例数的关系.可以看出,该室时间分辨性变差.同样,当事例数大于500时,3个pad的时间分辨测试值分别趋向于150ps,150ps和155ps.最大晃动率分别为6.6%,4%和6.7%.而从两图均可以看出,当事例数少时(如少于500),测试的时间分辨晃动很大.采用同样方法分析计算了另外几个MRPC室时间分辨

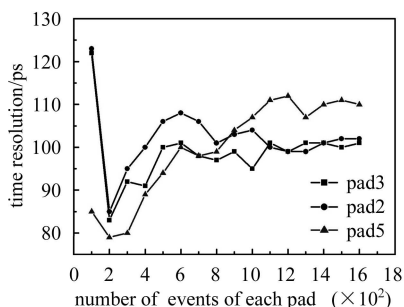


图5 2004-31室3个pad时间分辨与事例数的关系

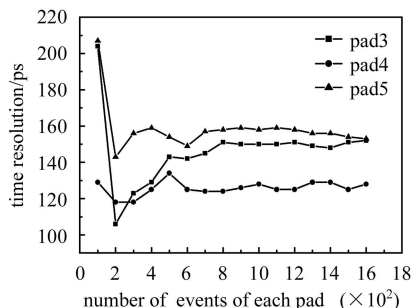


图6 2004-31室经过 $\gamma$ 辐照24h后3个pad时间分辨与事例数的关系

随事例数的变化,得到了同样的结论.所以,不管MRPC性能如何,对于我们的测试系统,只要pad的有效事例数大于500时,就可以得到该pad的时间分辨.

## 4 MRPC宇宙线测试方法

从以上分析可以得出如下结论:

- 1) MRPC的工作模式决定了MRPC的性能;
- 2) MRPC的幅度谱的性质与时间分辨性能直接相关;
- 3) 在MRPC批量制作中,对所有的室,只需要测量其幅度谱,而只对少量的室(如20%)抽测时间分辨.可以按以下步骤测量MRPC:
  - 1) 高压锻炼一定时间<sup>[5]</sup>,测量其暗电流和噪声;
  - 2) 对于暗电流和噪声都合格的MRPC测量其幅度谱;
  - 3) 抽测一定数量(如20%)的室(幅度谱合格<sup>[5]</sup>),测量其时间分辨,测量时间保证每个pad有效事例数达到500以上.

## 5 结论

本文详细分析了33个MRPC室的宇宙线测试结果.得到了雪崩信号比例和平均幅度与时间分辨的关系.这样我们在MRPC的批量制作中,就可以仅仅通过测幅度谱就可以判断室的时间性能.在此基础上,提出了MRPC批量测试方法,该测试方法可以充分保证MRPC批量制作和测试工作的顺利进行.

当然,我们提出的方法只是保证了测试技术和方法上的可靠性和可行性.具体的测试比如测幅度谱和时间谱需要的时间等问题,与实际的测试系统有关,这些问题还需要根据实际进行细化.

感谢中国科学技术大学陈宏芳教授和汪晓莲教授的宝贵建议.

## 参考文献(References)

- 1 Akindinov A, Anselmo F et al. Nucl. Instrum. Methods, 2000, **A456**: 16—22
- 2 Zeballos E C, Crotty I et al. Nucl. Instrum. Methods, 1996, **A381**: 569—572
- 3 SHAO M, RUAN L J et al. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **A492**: 344—350
- 4 The STAR TOF Collaboration. Technical Design Update to Proposal for a Large Area Time of Flight System for STAR. Aug.16, 2005
- 5 WANG Yi, CHENG Jian-Ping et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **A537**: 698—702
- 6 WANG Yi, LI Yuan-Jing et al. Nucl. Instrum. Methods, 2005, **A538**: 425—430
- 7 Geurts F, SHAO M, Bonner B et al. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A533**: 60—64

## Research on Cosmic Ray Mass Test Method of MRPC

WANG Yi<sup>1)</sup> CHENG Jian-Ping LI Yuan-Jing LAI Yong-Fang  
YUE Qian LI Jin JIA Huai-Mao

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** From the test results of 33 Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) modules, we studied the correlation between the average signal amplitude and the time resolution. The average amplitude depends on the gas multiplication operation mode which determines the time resolution. The fluctuation of time resolution measurements with the number of events collected by the chambers is also discussed. This analysis will help to set the control limits to select the chambers with required time resolution in mass production.

**Key words** MRPC, cosmic ray, time resolution, avalanche signals