

# 基于 GEM 探测器的时间投影室 TPC 的讨论\*

李玉兰<sup>1,1)</sup> 康克军<sup>1</sup> 李金<sup>1,2</sup> 来永芳<sup>1,3</sup>

1 (清华大学工程物理系 北京 100084)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

3 (防化指挥学院 北京 102205)

**摘要** 自 20 世纪 90 年代以来, GEM 探测器以其高电子倍增、高空间分辨和高计数率等优势在粒子物理和辐射成像等领域得到了广泛和深入的研究, 具有广阔的应用前景. 如果将 GEM 作为读出探测器应用在时间投影室 TPC 系统上, 和传统的读出方式比较起来, 既有许多优点也有许多挑战. 目前世界上有许多机构正在研究将此方案用于将来的大型正负电子对撞机 ILC. 本文论述了这些研究课题的概况, 讨论了 TPC 的各项关键性能指标与 GEM 探测器的关系及存在的问题.

**关键词** TPC(时间投影室) GEM(气体电子倍增器) 径迹重建 读出

## 1 引言

TPC (Time Projection Chamber, 时间投影室) 是一种气体漂移探测器, 它由桶状的漂移区和具有位置灵敏功能的端盖读出探测器组成, 内部存满工作气体并加有平行于桶轴向 ( $z$ ) 的电场和磁场. 当带电粒子穿过漂移区时, 会在径迹上产生电子-离子对, 电子在电场的作用下, 向端盖读出探测器漂移, 并在该处得到雪崩放大并产生具有位置、幅度、时间等信息的输出. 这样带电粒子的径迹在  $r$ - $\phi$  平面的位置可由端盖探测器给出,  $z$  方向的信息可由电子漂移时间给出, 实现了径迹的三维重建. 平行于电场方向的磁场一方面可以使我们测量入射粒子的动量, 同时还抑制了电子漂移过程中的横向扩散, 提高了径迹的空间重建能力. 正是由于 TPC 能够精确地测出粒子在漂移区域的三维径迹和  $dE/dx$  值, 具有很高的粒子识别能力, 许多大型高能粒子实验都采用其作为中心径迹探测器, 比较著名的有 LEP 实验的 ALEPH, DELPHI, BNL 的 STAR, LHC 的 ALICE 等等. 这些 TPC 都以多丝正比室 MWPC (Multi-wire Proportional Chamber), 作为读出探测器<sup>[1-4]</sup>. 在 MWPC 中, 阳极丝附近的电场强度很大, 电子的雪崩放大只发生在丝的附近, 随后在

离丝很近的阳极读出盘 (pad) 上感应出信号. 但这种读出方法有一些不可避免的缺点, 如: 空间分辨率与径迹和丝的夹角有关联; 由于在丝的附近电场和磁场不再平行, 电子会沿  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  的方向扩散, 最终造成了空间分辨率的劣化等.

最近几年, 粒子物理学界正在筹划建造下一个大型高能正负电子对撞机 (International Linear Collider, ILC), 它的物理目标对探测器提出了许多更高的要求, 必须探索提高目前探测器性能的办法. TPC 已被提议作为 ILC 系统的中心径迹探测器的候选者之一, 同时 MPGD (Micro Pattern Gas Detector, 微结构气体探测器) 也因其优于 MWPC 的性能而作为 TPC 读出探测器的优选方案<sup>[5]</sup>, 其中最具代表性的就是 GEM (Gas Electron Multiplier, 气体电子倍增器) 探测器.

GEM<sup>[6]</sup> 探测器一般由二至三层 GEM 膜组成. GEM 膜实际上是厚度为  $50\mu\text{m}$  左右的、双面覆铜的 Kapton 膜通过平版照相和化学刻蚀的方法刻蚀出许多小孔. 当在上下两层金属层上加上一定的电压 (300—400V) 时, 小孔中会形成很强的电场. 在漂移区电离产生的电子会被沿电力线方向进到小孔中, 得到雪崩放大, 电子进一步传导, 随后被后续的读出电路

2006 - 04 - 23 收稿

\* 国家自然科学基金(10575063)资助

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

读出. 图 1 是用 GEM 读出的 TPC 概念性示意图. 关于探测器的结构, 工作原理和性能可参考文献 [6, 7].

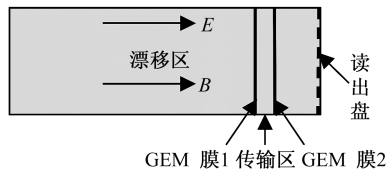


图 1 以 GEM 为端部读出的 TPC 示意图

作为 MPGD 的一种, GEM 来读出 TPC 比 MWPC 具有许多优势: 它本身就是二维结构, 且在二维读出平面中各向同性; 它的自身结构在  $100\mu\text{m}$  级, 接近系统要求的空间分辨率;  $E \times B$  效应很小, 甚至可以忽略; 由于阳极盘 (pad) 读出的是 GEM 雪崩放大时直接产生的电子信号, 信号宽度很窄 ( $\sim 20\text{ns}$ ), 所以在电子漂移方向有很好的径迹分辨能力; 同时 GEM 本身的结构使其具有很高的抑制正离子反馈的能力; 且不需拉丝, 系统更加坚固结实.

但用 GEM 读出 TPC 毕竟是一个全新的技术, 它的上述看似显而易见的优点能否真正在 TPC 中得到发挥, 必须经过仔细地研究和论证, 需要给出定量答案的课题有:

- (1) GEM 的增益及所能达到的探测效率、能量分辨率;
- (2) 空间分辨率、最佳读出 pad 的设计;
- (3) 强磁场对空间分辨率及 GEM 探测器中电荷传输的影响;
- (4) 探测器寿命;
- (5) 正离子反馈的抑制;
- (6) 最佳工作气体的确定.

目前国际上有许多科研机构都在研究将 GEM 探测器作为 TPC 的读出, 虽然部分回答了以上问题, 但是最终验证 GEM 是否适合做 TPC 的读出, 能否在未来直线对撞机 ILC 的实验探测器得到应用, 还有待进一步的研究.

## 2 不加磁场时, GEM 读出 TPC 时的基本性能

不加磁场时, GEM 作为 TPC 读出探测器时, 仍具有其单独工作时的性能指标<sup>[8]</sup>, 如探测效率、能量分辨率等. 德国 Karlsruhe 大学和 CERN 的研究结果证实了这一点. 他们所建造的原型样机长  $25\text{cm}$ , 直径  $20\text{cm}$ . 采用一灵敏面积为  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$  的双层的 GEM 膜读出<sup>[9]</sup>. 该原型机首先在 CERN 的  $p/\pi^\pm$  束流

下进行了无磁场情况下的测试. 图 2 显示了单行读出盘时, 探测效率与 GEM 有效增益的关系. 可以看出有效增益达到 3000 时效率曲线达到坪区 (峰值效率为  $99.3 \pm 0.1\%$ ), 此时对于  $10\text{cm}$  长的径迹,  $dE/dx$  的分辨率就能达到  $\sigma E/E = 20\%$ . 不难看出, 可以找到同时适用于 TPC 和 GEM 工作的气体. 而且, 不同气体的探测效率都不低.

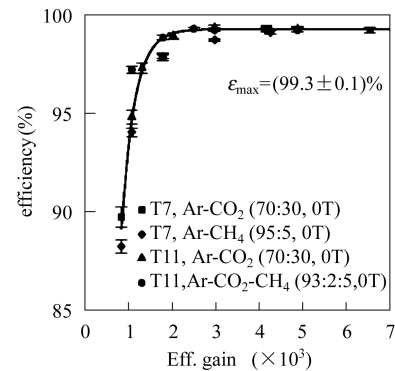


图 2 不同气体组分下, 单行读出时, 探测效率与增益的关系

## 3 空间分辨率及其与漂移距离、磁场强度的关系

衡量一个 TPC 系统好坏的一个主要指标就是其对带电粒子径迹的三维重建能力, 即它的空间分辨能力. 它与系统所采用的工作气体组分、漂移距离的长短、磁场的大小、信号读出盘 (pad) 的设计、读出电子学的性能等都有关系.

Kappler S 等<sup>[9]</sup> 对此进行了详细的研究. 他们所采用的读出盘的大小为  $1.27\text{mm} \times 12.5\text{mm}$ , 采用专为 STAR TPC 设计的 ASIC 电路. 图 3(a) 和 (b) 分别表示了空间分辨率与漂移距离、径迹倾斜度的关系. 随着漂移距离的增加, 空间分辨率下降, 且  $x$  方向分辨率与径迹的夹角有关. 该原型机随后又在德国 DESY 5T 的磁场下进行了测试<sup>[10]</sup>. 在  $0-5\text{T}$  的磁场下, 电子的漂移速度、横向扩展都与理论计算值很好地符合. 图 4(a) 显示了不同磁场下单行空间分辨率与漂移距离的关系. 从此可以看出, 在磁场较弱时, 空间分辨率只随着漂移距离的增大而变坏; 而在强磁场时, 空间分辨率随着漂移距离的增大而变小, 这是由于在强磁场下, 当漂移距离很小时, 电子束团非常窄以至于在读出面击中的读出盘数太少, 无法利用电荷分配法来精确定位. 空间分辨率的最佳值在  $100\mu\text{m}$  左右.

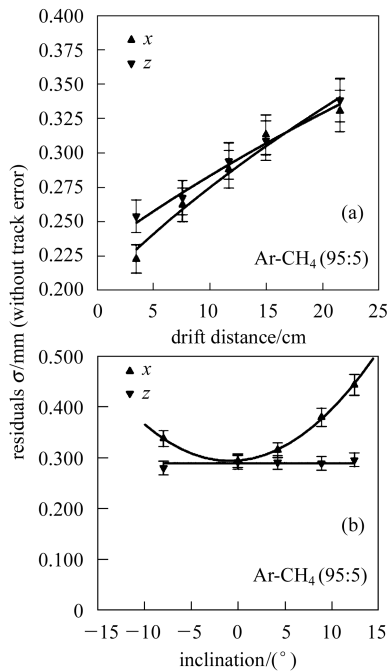


图 3 工作气体为 Ar-CH<sub>4</sub> (95:5) 时, 单行读出空间分辨率与 (a) 漂移距离、(b) 径迹倾斜度的关系 其中 *x* 方向对应于读出盘 1.27mm 间距的方向, *z* 方向对应于时间轴方向, 径迹平行于读出平面, 相对于读出盘长边方向倾斜.

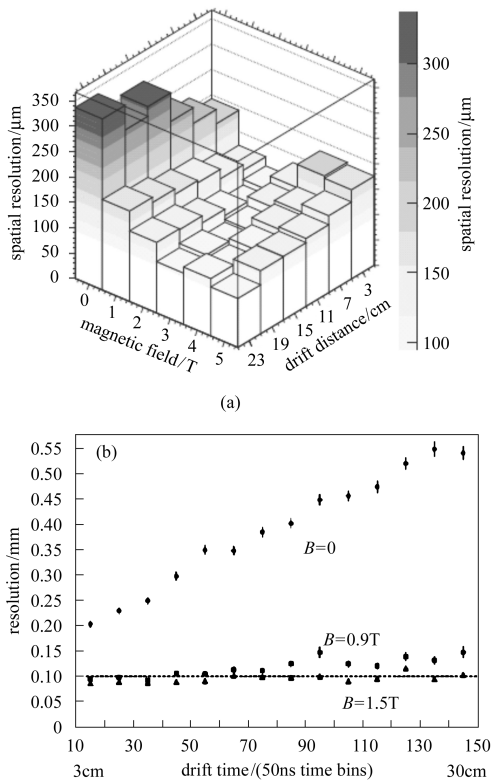


图 4 不同磁场下, 原型机空间分辨率与漂移距离的关系 (a) CERN 原型机测试结果; (b) 加拿大原型机测试结果.

加拿大几所大学也建造了基于 GEM 读出的 TPC 模型, 并在最大 5.3T 的磁场下, 用宇宙射线对其径迹重建能力进行了研究<sup>[11]</sup>. 当工作气体为 Ar-CH<sub>4</sub> (95:5) 时, 不同磁场下, 分辨率如图 4(b) 所示. 同样可以看出, 空间分辨率随着磁场的增强明显改进. 当磁场强度大于 1T 时, 达到了预期的 100 $\mu$ m 的分辨能力, 且与漂移距离无太大的关系. 该实验测试一直进行到 5.3T, 并没有发现分辨率有明显的改进. 这与 Kappler S 的结果<sup>[9]</sup> 相吻合. 当磁场强度达到一定的强度时, 再一味增加磁场强度并不能明显改善空间分辨能力, 需要与读出 pad 的设计统一考虑.

### 4 读出盘 (pad) 的设计

读出 pad 的设计直接影响着 TPC 在端盖平面内的二维空间分辨能力. 一方面好的空间定位精度要求读出 pad 越小越好, 但太小的 pad 会使读出通道多到无法承受的量级, 同时还会导致输出信号信噪比太小, 反而降低其定位精度; 另一方面 pad 尺寸太大时, 会出现上述文献 [10] 所得的实验结果, 即电子束团覆盖的读出 pad 数太少, 无法利用电荷分配法来精确定位, 尤其是当磁场较强、电子漂移时的横向扩散很小时.

在这方面不同研究机构的结果有所不符. Geronimo G D<sup>[12]</sup> 和 Yu B<sup>[13]</sup> 等人认为“Z”字形的 pad 设计可以促进电子在不同 pad 上的扩散和电荷重心法的应用, 并提高空间分辨力. 在 pad 径向、切向间距分别为 5mm 和 2mm 的情况下, 实现了 200 $\mu$ m 的空间分辨率. 而另外一些研究则认为长方形的 pad 设计最好<sup>[9, 10]</sup>, 他们采用了 1.27mm $\times$ 12.5mm 的设计; Karlen D 等<sup>[11]</sup> 则采用外圈 2.5mm $\times$ 5mm、内圈 2mm $\times$ 6mm 的设计, 也都实现了 100—200 $\mu$ m 的分辨能力. 另外为了增大电子束团在读出 pad 上的扩散, Dixit M S 等<sup>[14]</sup> 提出了一种在读出阳极面上覆盖一层阻性膜的方法, 可以将空间分辨率压至 100 $\mu$ m 以下.

### 5 磁场对 GEM 探测器中电荷传输影响的研究

我们知道, 在 TPC 探测器上加有平行于电场即轴向方向的磁场, 端盖读出探测器也处在该磁场中, 并且  $\hat{B}$  的方向垂直于 GEM 膜. 由于电子在电磁场中的漂移方向由下面 Langevin 公式决定:

$$\mathbf{v}_{\text{drift}} \propto \hat{E} + \omega\tau(\hat{E} \times \hat{B}) + \omega^2\tau^2(\hat{E} \cdot \hat{B})\hat{B}$$

式中  $\hat{E}$  和  $\hat{B}$  分别表示电场和磁场的单位向量,  $\omega = eB/m$  为电子的迴转频率,  $\tau$  为电子在气体中两次碰撞时间的平均值. 可以看出随着磁场强度的增强, 平行于  $\hat{B}$  的项所起的作用将越来越大. 这样会使得有些电子沿磁场方向而非电场方向运动. 在 GEM 读出探测器中, 由于 GEM 孔附近电场和磁场不再平行, 造成电子不能聚拢到 GEM 孔中并进而雪崩放大, 使得  $dE/dx$  分辨率的下降. 为了研究这个问题, 在不同的磁场强度下, Killenberg M 等人<sup>[15]</sup> 监测了三层 GEM 探测器各个电极在  $^{55}\text{Fe}$  源的照射下的电流情况, 如图 5 所示. 结果表明, 随着磁场的增强由于电子逸出效率的增大, 阳极电流增大了近 2 倍; 而电子的收集效率只下降了几个百分点, 收集到的初始电离的电子数仍能保证足够的统计涨落, 并不会影响  $dE/dx$  的测量精度.

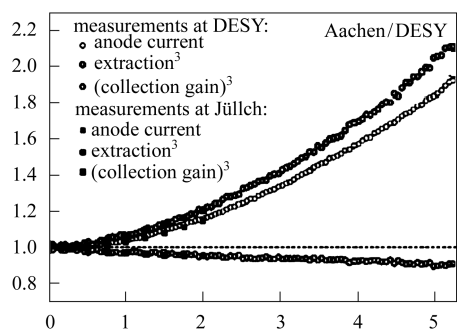


图 5 不同磁场下, 阳极电流和电子从阳极前最后一层 GEM 层逸出的效率的测量值  
电子收集效率和增益值由以上曲线计算而得.

## 6 正离子反馈

在 TPC 中, 总有部分正离子从端部读出探测器 (电子在此得到雪崩放大) 漂移到漂移区, 这些正离子的数目与到达读出盘的电子数之比称为正离子反馈率, 它必须尽量小, 以免漂移区的正离子堆积太多, 影响随后到来的测量粒子所产生的有用径迹的测量. 在以前的 TPC 中, 一般都在丝室前加一层门控栅网

(gating grid), 以抑制正离子的反馈. 如果束团之间时间间隔很短 (将来的 ILC 就是这种情况), 由于无法采用门控的方式, 要求读出探测器有很强的抑制正离子反馈能力. GEM 探测器本身的结构决定了其有这方面的优势. 图 6 是一个三层 GEM 探测器在不同磁场强度下, 正离子反馈率的测量值都小于 1%, 且随着磁场强度的增加而有所下降<sup>[16]</sup>.

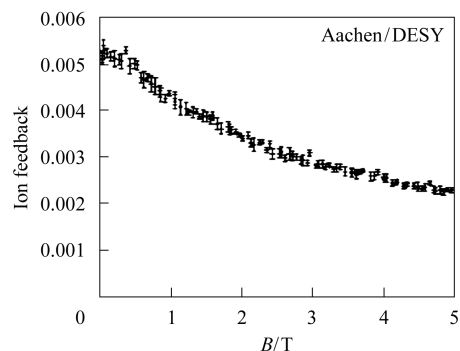


图 6 不同磁场强度下, 三层 GEM 探测器正离子反馈的测量值

## 7 结论

虽然用 GEM 读出 TPC 的研究工作刚刚开始几年, 但是初步的实验结果已证明 GEM 可以很好地在强磁场、高束流通量的情况下工作, 且能达到所期待的  $100\mu\text{m}$  的空间分辨率. 目前国际上已有一套基于 GEM 的 TPC (LEGS) 在实际运行, 另外还有若干实验性的原型机.

但是还有许多问题有待研究, 如最佳气体工作气体选择、耐受的正离子反馈、是否需要加门控栅极等等. 如何发挥 GEM 探测器时间响应快的特点, 使 TPC 能适应高计数率的要求. 当然 GEM 端部读出与 TPC 室体结合起来组成一个完整的 TPC 探测器, 还有许多工程、技术问题必须克服, 如读出电子学、机械对准等, 尚需大量深入细致的工作.

## 参考文献(References)

- 1 Buskulic D, Casper D, Bonis I D et al. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A360**: 481
- 2 Brand C, Cairanti G, Charpentier P et al. IEEE Tran. Nucl. Scie., 1989, **36**(1): 122
- 3 Anderson M, Bieser F, Bossingham R et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A499**: 679
- 4 Bachler J, Bracinik J, Fischer H G et al. Nucl. Instrum. Methods, 1998, **A419**: 511
- 5 Wienemann P. IEEE Tran. Nucl. Scie., 2004, **51**(4): 1497
- 6 Sauli F. Nucl. Instrum. Methods, 1997, **A386**: 531
- 7 LI J, LAI Y F, CHENG J P et al. Nucl. Scie. and Tech., 2005, **16**: 225
- 8 Büttner C, Capeáns M, Dominik W et al. Nucl. Instrum. Methods, 1998, **A409**: 79
- 9 Kappler S, Bieser F, Kaminski J et al. IEEE Tran. Nucl. Scie., 2004, **51**(3): 1039
- 10 Kaminski J, Ball M, Bieser F et al. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A535**: 201
- 11 Karlen D, Poffenberger P, Rosenbaum G et al. <http://phys01compuvicca:8080/karlen/talks/tpc/PID27281pdf>
- 12 Geronimo G D, Fried J, O'Connor P et al. IEEE Tran. Nucl. Scie., 2004, **51**(4): 1312
- 13 YU B, Radeka V, Smith G C et al. IEEE Tran. Nucl. Scie., 2003, **50**(4): 836
- 14 Dixit M S, Dubeau J, Martin J P et al. Nucl. Instrum. Methods, 2004, **A18**: 721
- 15 Killenberg M, Lotz S, Mnich J et al. <http://www-fdcdeyde/lcnotes/notes/LC-DET-2004-003pdf>
- 16 Sauli F, Ropelewski L, Everaerts P. [http://gddwebcernch/GDD/publicationsres/ion\\_feedbackpdf](http://gddwebcernch/GDD/publicationsres/ion_feedbackpdf)

## The Discussion on Time Projection Chamber (TPC) Based upon GEM Detector\*

LI Yu-Lan<sup>1,1)</sup> KANG Ke-Jun<sup>1</sup> LI Jin<sup>1,2</sup> LAI Yong-Fang<sup>1,3</sup>

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

2 (Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

3 (Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China)

**Abstract** Since its invention in 1990s, GEM has drawn great attention and wide studies in the field of particle physics and radiation imaging because of its high gain, high position resolution and high count-rate capability, many applications have been proposed, especially for the readout of TPC. Compared with traditional readout detector, mainly MWPC (Multi-wire proportional chamber), GEM has many advantages and also a lot of challenges. Many institutes are carrying comprehensive R&D of TPC based on GEM readout in order to evaluate whether it can meet the unprecedented requirement of future ILC. This paper reviews their recent result.

**Key words** time projection chamber (TPC), gas electron multiplier (GEM), track reconstruction, readout

Received 23 April 2006

\* Supported by National Natural Science Foundation of China (10575063)

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