

CMS 探测器升级中的 气体——电子放大器

章立诚 梁子寒 王大勇 班勇

(北京大学物理学院,核物理与核技术国家重点实验室 100872)

2009年,经过近二十年的设计、施工和安装调试,位于欧洲核子中心(CERN)的大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)终于正式对撞成功,运行于其上的紧凑型缪子螺线管(Compact Muon Solenoid, CMS)^①探测器也开始运行取数。三年后, CMS实验与ATLAS实验共同宣布,在质量125 GeV发现了希格斯玻色子^②。这是举世瞩目的高光时刻,意味着粒子物理标准模型预言的基本粒子全部被发现,人类对粒子物理的探索进入了新的领域。

CMS实验运行十多年来,成功获取了海量对撞数据,为科学家们探索自然提供了绝佳的舞台。随着对撞数据的积累和分析的深入,物质世界的一些

基本问题横亘眼前:在125 GeV测量到的玻色子与标准模型预言的希格斯玻色子性质一致吗?存在超出标准模型的新粒子吗? CP对称性破坏满足标准模型的限制吗? 超对称理论和弦论可以被验证吗? 能用对撞机研究宇宙学中的暗物质吗? 要回答这些问题,需要更高亮度、更精密的数据,对撞机和探测器升级就此被提上日程。

质心能量13~14 TeV的质子-质子对撞会产生质量、能量差别极大的各种基本粒子,捕捉这些粒子并对其性质进行精细测量,才能推导出隐匿其间的物理奥秘。顾名思义, CMS探测器在缪子测量方面有特殊的优势。图1展示了CMS作为一个大型

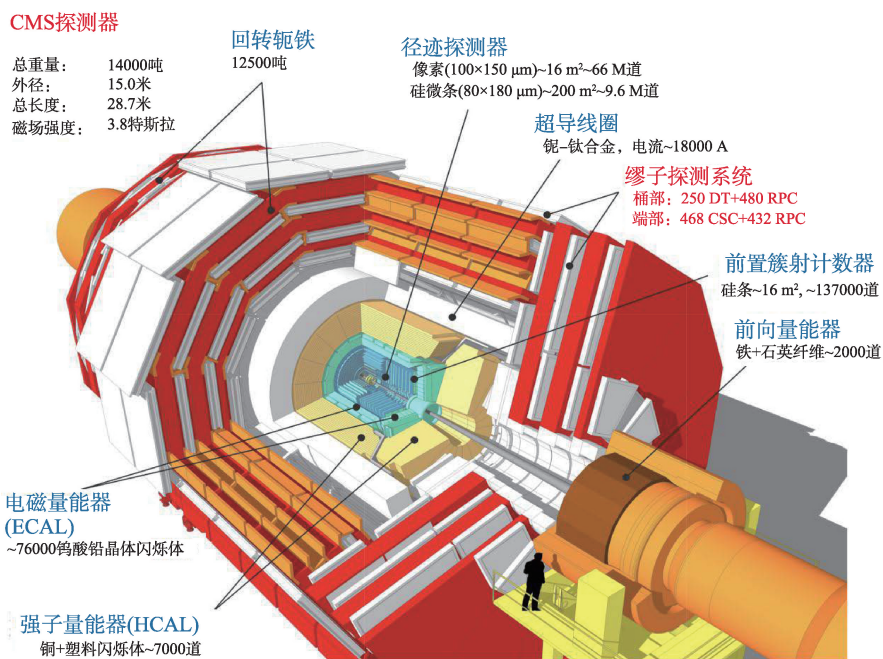


图1 CMS探测器的透视结构

通用探测器的构成情况,探测器以 4π 立体角包围对撞中心,探测对撞产生的除中微子外几乎所有粒子。中国组参加了端部缪子探测器-阴极条室(Cathode Strip Chambers, CSC)和阻性板室(Resistive Plate Chambers, RPC)的建造,目前也全力投入到缪子探测器升级计划中。

1. CMS 缪子探测系统的升级

升级后的对撞机被称为高亮度 LHC(High Luminosity LHC, HL-LHC),最高瞬时亮度将提升到现在的至少 2.5 倍,更多的对撞产物对 CMS 探测器触发和探测系统也提出了更高的要求。正如 CMS 的名字所强调的,缪子探测器可以说是 CMS 的主角。缪子可以被单独地准确地测量,在强子对撞产生的标志性的背景中“脱颖而出”,能够一直穿透到探测器的最外层。在 W 和 Z 玻色子、顶夸克和希格斯玻色子的发现中,缪子都扮演了至关重要的角色,这些粒子最重要、最显著的衰变模式所产生的末态粒子都包含一个或多个缪子^③。

图 2 显示了 CMS 探测器剖面结构。已建成的 CMS 实验缪子探测系统由几个互补的子探测器组成,包括端部的 CSC 和 RPC 以及桶部的漂移管探测器(Drift Tubes, DT)和 RPC,用于识别达到触发水平的缪子并在很大的量程范围内重建他们的动量和径迹。在本次升级前,端部最内圈预留给 RPC 的位置是空置的,在目前的对撞机运行亮度也不影响探测系统的触发和数据获取;而在高亮度运行时,这些位置必须要安装相应的探测器,以完善 CMS 缪子触发和探测系统,确保高亮度数据获取的正常进行。

缪子升级探测器所在的位置是靠近束流管的前向区域,在该区域对缪子精确测量对一些物理道的研究至关重要。但该处距离束流很近,事例率极高,并且存在强烈的本底辐射和背景噪声的干扰,对缪子升级探测器的正常运行构成了严重挑战。此外,磁场线在这一区域与粒子运动方向趋近平行,缪子在磁场中偏转幅度小,也不利于对其动量的准确测量。因此,在端部内圈安装的升级探测器必须在极高计数率下能正常工作,并且有很高的时

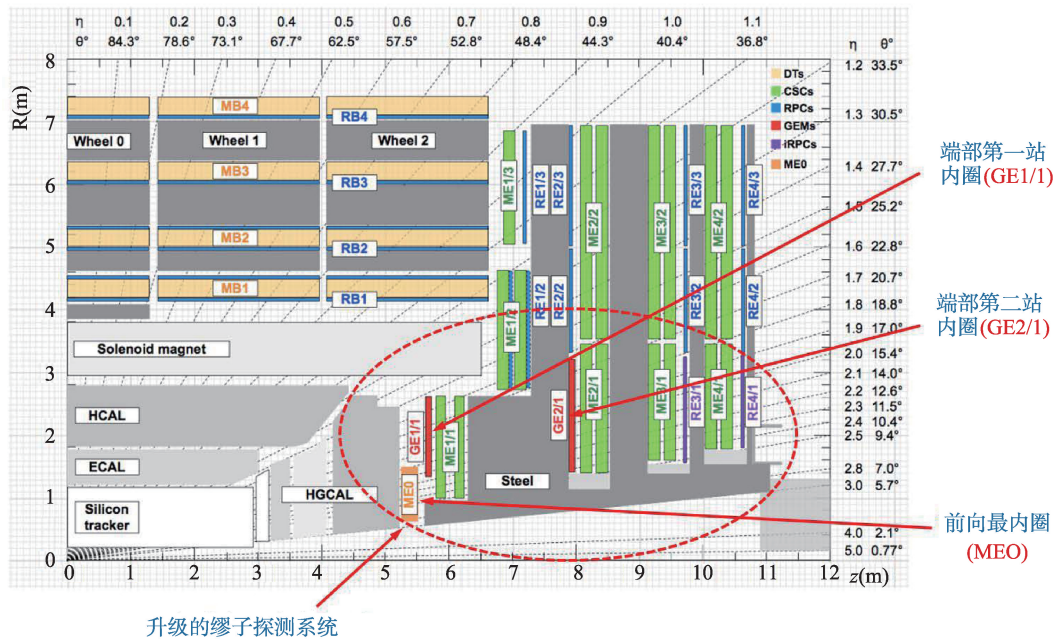


图 2 CMS 沿 z 轴截面的示意图(四分之一)。左下角坐标原点为对撞发生点。缪子系统不同种类的探测器用不同的颜色标识。已建成的是 MB(桶部 DT, 漂移管), RE(端部 CSC, 阴极条室)和 RB/RE(桶部和端部 RPC, 阻性板室)系统。GE1/1, GE2/1, ME0(GEM, 电子气体倍增器)和 RE3/1, RE4/1 是正在进行升级的探测器

间和位置分辨能力,这样可以快速给出前向缪子的时间和径迹,和更新后的已有区域的探测器一起,降低缪子轨道重建的模糊性并给测量系统增加更多的冗余度,满足高亮度运行取数的要求。

高能量、高亮度的对撞环境限制了对升级探测器技术方案的选择,原来设计的常规RPC方案能否满足条件?对此,CMS合作组2014年就开始了升级探测器的预研,改进的常规RPC(improved RPC, iRPC)、多层玻璃RPC(mRPC)以及气体-电子放大器(Gas Electron Multiplier, GEM)、FTD(Fast Timing Detector)、 μ RWELL(micro-Well Resistive GEM)等微结构气体探测器技术都成为备选方案。经过数年细致深入的预研,CMS合作组于2018年决定,端部内圈第一、二站(GE1/1、GE2/1)将采用GEM技术,第三、四站(RE3/1、RE4/1)将采用iRPC技术。除此之外,一个称为ME0的新缪子探测系统将被安装在前端量能器之后,提供极前端区域的缪子探测。ME0也将采用GEM技术。

2. 气体-电子放大器 GEM

气体探测器原理简单,它探测入射粒子的过程可以分成三步,第一步是入射粒子和气体分子碰撞产生电离;第二步是电离产生的电子和离子在气体室中强电场下定向运动,可能继续碰撞产生新的电离或雪崩;第三步是用气体室的电极把产生的所有电子和离子收集起来,读出并记录。

最早的气体探测器是1908年卢瑟福实验室制作的盖革计数器^④。如图3所示,它是一根储存有工作气体的圆柱体管,轴线位置为一根阳极金属丝,与作为阴极的管壁有一定电压差。粒子入射腔体后,与气体分子不断碰撞并损失能量产生电离,产生的电子和正离子在电场的作用下分别向阳极丝和阴极管壁移动,计数器拾取阳极丝上产生的电脉冲信号,就得到射线的一个计数。这种计数器至今仍有应用,但它性能有限,只能记录射线的数量,不能确定其入射位置或径迹。

1968年,G. Charpack在盖革计数器基础上发明了多丝正比室(Multi-Wire Proportional Chamber, MWPC)^⑤,解决了用气体探测器准确测量射线位置的问题;其结构及电场分布情况如图4所示。多丝正比室的阴极为间距几厘米的上下两金属平板,中间布有大量间距几毫米、作为阳极的平行金属丝。

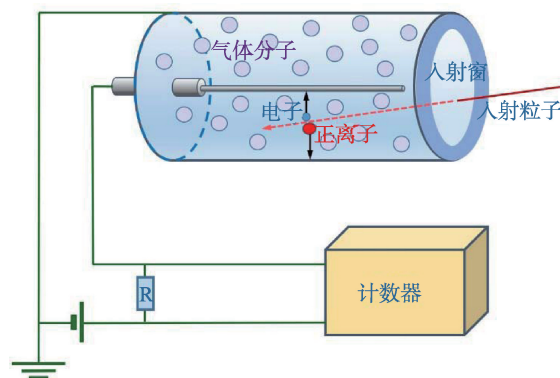


图3 盖革计数器原理示意图

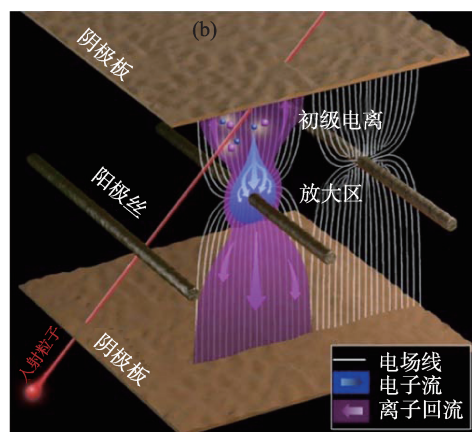
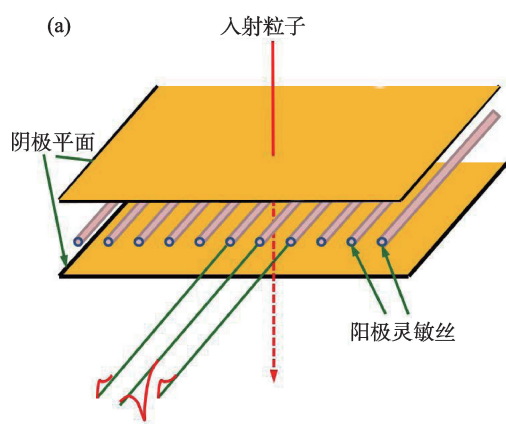


图4 多丝正比室的结构(a)和电场模拟(b)

入射粒子碰撞、电离产生的电子和正离子分别向两极漂移,通过阳极丝或阴极读出结构收集感应的电脉冲信号,经电子学读出系统处理后可确定粒子入射位置。若通过恰当方式将多个多丝正比室按一定方式堆叠排布,就可以实现粒子径迹测量。由于制造工艺的限制,进一步提高多丝正比室的空间分辨率有困难,空间电荷效应也限制了它的计数率。

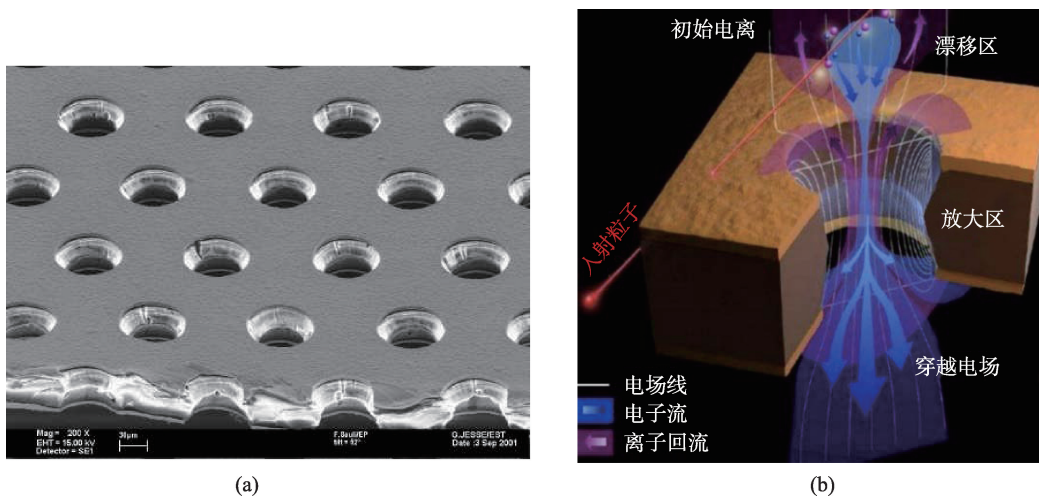
20世纪80~90年代,飞速发展的电子学技术使快速、精细的信号读出和处理成为可能,极大推进了多通道、高性能气体探测器的发展。在气体探测器结构设计中,采用微结构作为核心部件有很多优势,一是使粒子探测精细化,可以得到很高的空间分辨率;二是在极小的微结构空间加上高压,可以得到极高的电场强度,从而有益于电信号的雪崩和放大。另外微结构使信号的产生和收集局限在极小空间内,大大提高了探测器整体的计数率。与多丝正比室相比,微结构气体探测器(Micro Pattern Gaseous Detector, MPGD)具有更大的计数率承受力、更好的时间和空间分辨、更长的稳定时间以及更强的耐辐照能力,近几十年来已经成为了粒子物理与核物理实验的主力探测器。

1997年CERN的科学家F.Sauli发明的气体-电子放大器GEM[®]就是微结构气体探测器的一种。这种探测器的核心部件是含极多微孔、双面镀铜箔的Kapton(聚酰亚胺)膜,孔密度高达每平方毫米

50~100个,由腐蚀法等方式制作。当在两层铜箔间加300~500伏的电压差时,孔中就会产生高达100 kV/cm极强电场,电子通过时产生雪崩,成为这种气体探测器的放大通道。图5是GEM膜微孔结构及电离电子通过微孔时的放大情况。通常GEM探测器含有多层GEM膜,气体室顶层和底层是两个平面电极,用作漂移阴极和信号阳极。阴极和第一个GEM之间(漂移间隙)是探测器的灵敏区。入射粒子在灵敏区发生电离,产生的电子在电场作用下向倍增区漂移、扩散,在微孔内强电场区发生雪崩效应,产生的电信号经过多层GEM膜逐次放大,最终通过读出电子学平台实现信号获取;分析信号的特征可以得到入射粒子的信息。

用于CMS缪子探测系统升级的GEM探测器结构如图6所示,它的气体室内含有三层GEM膜(Triple-GEM),以获得更佳的气体放大性能;自上而下依次是漂移极、第一层GEM、第二层GEM、第三层GEM和读出极,其间气体间隙大小分别为3 mm、1 mm、2 mm和1 mm。GEM膜基底材料是一层50 μm厚的聚酰亚胺薄膜,上下各覆盖5 μm厚的铜膜作为电极,总厚度60 μm。GEM膜上的微孔通过化学腐蚀方法制作,表层内径约70 μm,中间最窄处内径约50 μm,相邻微孔中心距140 μm。微孔结构及其周围电场的分布也显示在图6中。

从电场的分布情况可以看出,匀强电场的电场



(a)

(b)

图5 GEM膜微孔结构(a)及电离电子通过微孔时的放大情况(b)

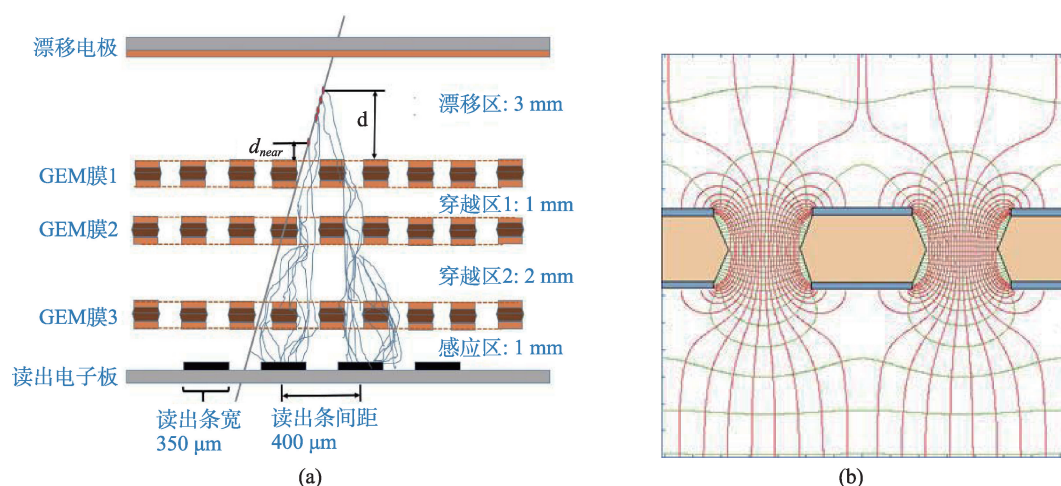


图6 CMS-GEM升级探测器结构(a),微孔结构及其周围的电场分布情况(b)

线无法直接穿过GEM膜,却会在微孔中发生弯曲集聚,从而在孔内产生极强的电场。如果给GEM膜上下铜膜加上500 V电压,微孔内就会形成约100 kV/cm的强场区,使穿过微孔的电子产生雪崩放大;整层膜的功能就相当于一个电子信号放大器。粒子进入探测器产生电离,经过多级放大后产生大量电子;当这些电子在电场的作用下从第三层GEM极板向读出板移动时,读出板会感应出大量电荷,从电荷量可以得出入射粒子能量沉积的信息;同时,由于金属薄膜的屏蔽效应,向上漂移的离子和其他区域产生的电子不会对该区域电场造成影响。读出板可以设计成条状、块状等,各读出单元感应的信号大小和电子团的位置相关;薄膜与读出板距离较近时,可以通过设计对应的读出电路得到入射粒子的位置信息。

GEM技术自发明以来已应用于多个粒子物理实验,比如在CERN 20世纪九十年代开始的COMPASS实验和目前正在进行的LHCb实验,都已经证明GEM探测器可以在高达数MHz/cm²的计数率下正常工作,未出现过老化问题。此外,GEM探测器结构设计灵活,可根据实际需求制成大面积探测器。它的时间分辨可到纳秒量级,空间分辨可达几十微米,高增益使其探测效率近100%,工作气体可采用氙气和二氧化碳也降低了运行成本。这些优点使GEM技术非常符合在HL-LHC下工作的需求,最终

被确定为端部内圈缪子系统升级的技术方案之一。

3. CMS-GEM探测器升级计划

如前所述,CMS-GEM探测器升级计划包含三个部分,其建造及安装时间的安排各有不同。端部内圈GE1/1和GE2/1系统各包含不同型号的288个GEM探测器模块,组装成“超模块”单元并进行整体测试后安装到CMS端部。GEM探测器的结构设计、预研测试都已经完成。GE1/1探测器的批量生产测试也已经完成,至2020年8月已经全部安装到CMS端部,目前正在进行调试。图7(a)显示了GE1/1探测器的整体结构设计,包含屏蔽盒、冷却系统、前端电子学板、读出芯片及光电转换模块、由三层GEM膜和框架组成的气体室、漂移电极,等等。CMS升级GEM探测器的设计指标为时间分辨好于10纳秒,方位角方向角分辨好于300微弧度,计数率高于10 kHz/cm²;累积辐射达到200 mC/cm²时没有增益损失。组装测试后的探测器达到了这些指标。图7(b)显示了端部内圈第一站GEM探测器的空间排布情况,它提供的额外缪子测量信息可以帮助CMS缪子系统更好地测量缪子径迹弯曲情况,排除误判的径迹,显著降低了初级缪子触发率,为电子学系统减轻了负担。

GE2/1探测器单元的面积显著大于GE1/1探测器,覆盖的角度范围也比GE1/1略大。GE2/1和

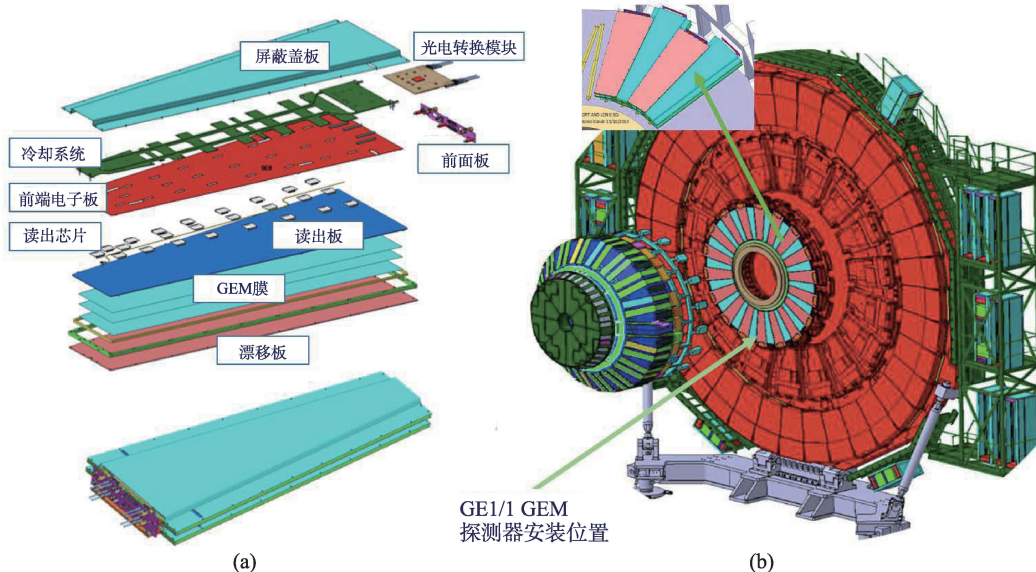


图7 GE1/1探测器的整体结构设计(a)和GE1/1 GEM探测器的空间排布情况(b)

GE1/1 探测器结构基本一致,在设计上根据 GE1/1 的经验作了一些优化,在触发系统中所起的作用也与 GE1/1 类似。GE2/1 GEM 的批量生产将于 2021 年 6 月正式开始。ME0 探测器目前还处于研制阶段。一个 ME0 包含了 6 层 GEM 探测器,将覆盖一部分没有其他缪子探测器覆盖的角度范围,其测量的信息用于离线径迹重建,在极前向提供更准确的缪子径迹测量。预计 ME0 批量生产将于 2023 年开始。图 8 显示了 GE2/1 和 ME0 探测器的安装情况。

成立于 2013 年的 CMS-GEM 探测器升级合作

组由十多个国家的四十多个科研单位组成,各成员单位分工合作,分别承担部分探测器部件的研发、生产和组装测试。中国的北京大学、清华大学、中山大学、北京航空航天大学也是合作组的正式成员,承担了探测器研制、前端电子学板设计研发和生产、GEM 探测器结构部件研制和生产及探测器整体组装测试任务。目前通过各国科学家和工程技术人员的通力合作,CMS-GEM 升级项目正在紧张有序地推展。图 9 是 2020 年 8 月 GEM 探测器在 CERN 的实际安装情况。

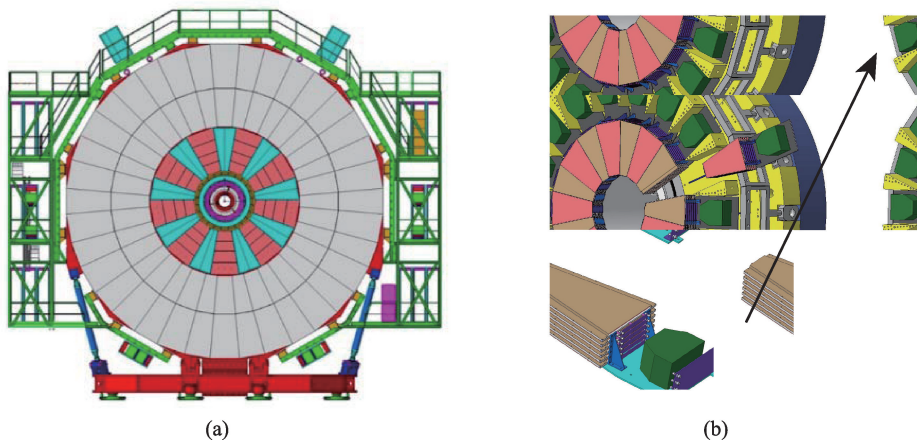


图8 GE2/1(a)和ME0(b)探测器的安装情况

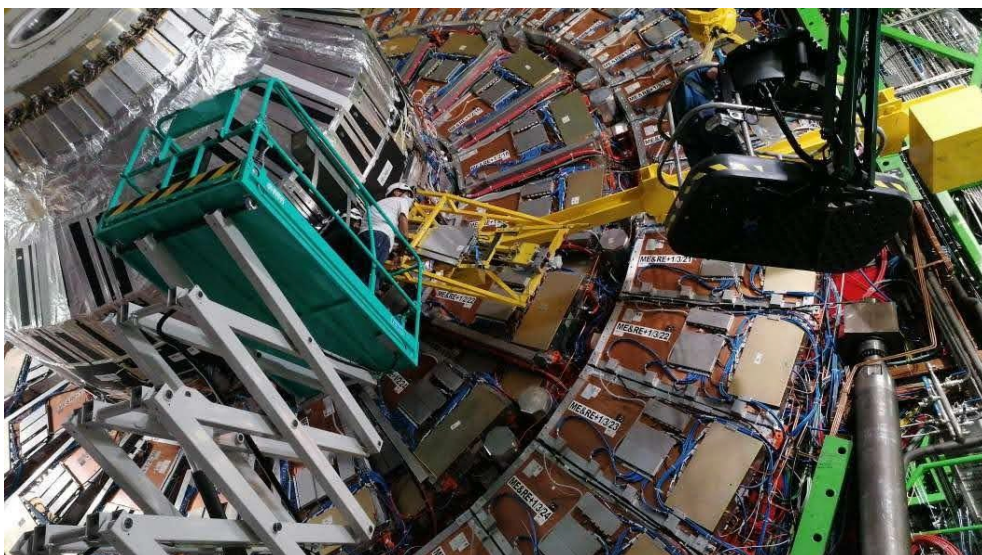


图9 GEM探测器正在被安装到CMS端部

4. 小结

GEM是一种新型微结构气体探测器,其精妙的微孔结构设计使它具有高增益、抗辐照等特点,对其结构进行优化设计也可以得到优异的时间和空间分辨能力。自诞生以来,GEM已经被应用于多个高能物理实验,其优异的性能也在长期实验运行中得到了检验。CMS缪子系统升级采用了GEM技术,这是大面积GEM探测器在高能物理实验中的首次大规模应用。在GEM升级探测器研发和生产过程中,多项新技术得到了开发和验证,例如大面积GEM膜生产技术,大面积GEM探测器组装技术,多通道快信号读出技术和探测器批量生产的质量控制技术等等,推动了高性能微结构探测器的发展。

目前GEM等微结构气体探测器研究的重点在于前端读出电子学的研制、大面积探测器生产工艺开发、快时间阻性电极探测器的研发和新材料、新结构的应用,目的是进一步提高探测器的时间和空间分辨能力、计数率承受能力、耐辐照性能和极端运行条件下的耐性。作为多丝正比室后的又一里程碑式突破,GEM等微结构气体探测器近几十年

来已成为气体探测器的主流研究方向。随着更加复杂的实验需求及材料、电子学和计算机的飞速发展,微结构气体探测器也在不断升级,由GEM基本结构衍化出来的各种探测器已经被广泛应用于各种粒子物理实验以及医疗、工程等多个领域。

参考文献

- ① CMS Collaboration, “The CMS Experiment at the CERN LHC”, JINST3(2008) S08004.
- ② CMS Collaboration, “Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC”, Phys. Lett.B, 716 (2012) 30.
- ③ Particle Data Group, P. A. Zyla et al., “Review of Particle Physics”, PTEP 2020 no. 8, (2020)083C01
- ④ E Rutherford, H Geiger. “An Electrical Method of Counting the Number of α -Particles from Radio-Active Substances”, Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 1908, 81(546):141-161.
- ⑤ G Charpak, R Bouclier, T Bressani, et al. “The Use of Multi-wire Proportional Counters to Select And Localize Charged Particles”, Nuclear Instruments & Methods, 1968, 62(3):262-268.
- ⑥ F.Sauli. “GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors”, Nucl. Instr. Meth. A 386 (1997) 531.