科学通报 2026 年 第 71 卷 第 13 期: 2862 ~ 2873
进 展
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

紧凑缪子线圈实验桶部晶体最小电离粒子时间探测器研发进展

王锦[1], 张明轩[1*], 董振宇[1], 高红[2], 李乐言[1], 林煜明[1], 秦俊凯[3], 王治浪[2], 张顺亮[3], 赵子健[3], 成曈光[2], 胡震[3], 孙小虎[1*]

1. 北京大学物理学院, 核物理与核技术全国重点实验室, 北京 100871
2. 北京航空航天大学物理学院, 北京 100191
3. 清华大学物理系, 高能物理研究中心, 北京 100084
* 联系人, E-mail: mingxuanzh@stu.pku.edu.cn; Xiaohu.Sun@pku.edu.cn

2025-12-30 收稿, 2026-03-05 修回, 2026-03-06 接受, 2026-03-09 网络版发表
国家自然科学基金(W2443006)、国家重点研发计划(2022YFA1602100)、核物理与核技术全国重点实验室项目(NPT2025ZX09)和清华大学自主科研计划资助

摘要 高亮度大型强子对撞机(High-Luminosity Large Hadron Collider, HL-LHC)计划于2030年启动, 并预计在十年运行周期内累计提供3000 fb^{-1}的积分亮度, 为标准模型的精确测量与新物理过程的探索带来前所未有的机遇. 然而, 高亮度对撞机带来了极为苛刻的对撞环境, 包括大幅提升的辐射剂量及每次束团交叉中高达约200次的事例堆积pileup效应. 为有效抑制pileup对事例重建和物理分析的影响, 紧凑缪子线圈(Compact Muon Solenoid, CMS)实验将在Phase-II升级中安装新的最小电离粒子(minimum ionizing particle, MIP)时间探测器(MIP timing detector, MTD), 将提供30~60 ps时间分辨率的MIP高精度飞行时间信息, 首次引入时间维度上的pileup区分能力, 实现四维对撞顶点与粒子流重建. MTD的核心组件之一——桶部时间探测器(barrel timing layer, BTL)由165888根LYSO:Ce闪烁晶体组成, 并配备双端SiPM读出, 以确保在高占用环境下仍能取得稳定的时间分辨率. 经过系统的原型机优化、束流性能验证和辐照测试后, BTL设计方案已最终确定并进入全面建造阶段. 本文概述了BTL的关键设计要点、性能验证与辐照测试结果, 并总结了建造流程、质量控制系统以及大规模建造的最新进展.

关键词 大型强子对撞机, 紧凑缪子线圈实验, SiPM, LYSO:Ce闪烁晶体, 时间分辨率, 飞行时间

大型强子对撞机(Large Hadron Collider, LHC)是目前世界上质心能量最高的环形强子对撞机, 在过去的十余年中, LHC持续提供高质量的质子-质子碰撞数据, 实现了包括希格斯玻色子发现在内的多项里程碑式突破. 自2010年开始运行以来, LHC的质子-质子对撞在不同运行阶段持续推进, 其质心能量从2010~2012年Run 1的7~8 TeV提升至2015~2018年Run 2的13 TeV, 并在2022年以来的Run 3中进一步提高至13.6 TeV. 如图1(a)所示, 其积累的庞大积分亮度的数据为标准模型的精确测量提供了坚实基础. 然而, 随着理论研究的深入, 以及进一步探索超出标准模型的新物理的需求日益增强, 欧洲核子中心(CERN)启动了LHC的全面升级计划, 使其在未来十年迈入高亮度阶段(High-Luminosity LHC, HL-LHC)[1]. 通过改善注入系统及提高束流亮度, HL-LHC将在2029年之后提供峰值瞬时亮度约5×10^{34} cm^{-2} s^{-1}(并在极限运行条件下达到7.5×10^{34} cm^{-2} s^{-1}), 远超目前运行阶段水平. 这意味着在每次质子-质子束流对撞中, 将产生平均140~200次的事例堆积(pileup), 显

引用格式: 王锦, 张明轩, 董振宇, 等. 紧凑缪子线圈实验桶部晶体最小电离粒子时间探测器研发进展. 科学通报, 2026, 71: 2862–2873
Wang J, Zhang M, Dong Z, et al. Progress on the development of the Compact Muon Solenoid barrel minimum ionizing particle timing detector (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 2862–2873, doi: 10.1360/CSB-2025-6012

© 2026《中国科学》杂志社

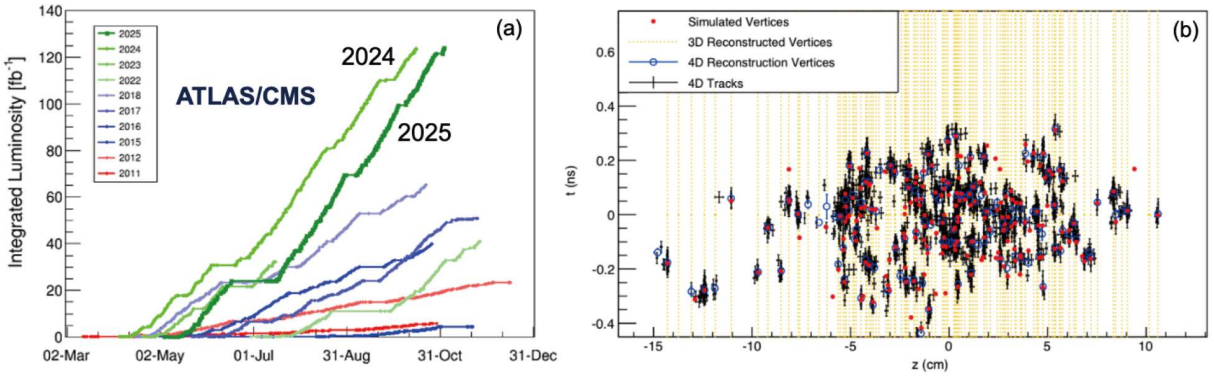


图 1 (网络版彩色)(a) LHC不同年份的累积亮度; (b) 在一次束流对撞中, 若存在覆盖桶区(barrel)和端盖(endcaps)、时间分辨率约为30 ps的MTD时, 200 pileup相互作用的模拟与重建顶点分布: 加入时间分辨信息后, 原本难以分离的3D重建顶点(由竖直虚线表示)被区分为带时间信息的4D重建顶点(由蓝色圈点表示), 从而大幅提升了顶点分离能力[3]

Figure 1 (Color online) (a) Integrated luminosity of the LHC in different years; (b) simulated and reconstructed vertices in a bunch crossing with 200 pileup interactions assuming a MTD with 30 ps time resolution covering the barrel and endcaps: with the addition of time resolution, the previously hard-to-separate dashed vertices are resolved as blue points with time information, enhancing vertex separation[3]

著增加粒子流的复杂度, 也将使得现有探测器的重建算法面临前所未有的挑战.

在HL-LHC的严苛对撞条件下, 几乎每一次存在硬散射的有效碰撞都会伴随超过百次空间上与时间上高度重叠的事例堆积. 尽管目前探测器的空间分辨率已经非常优异, 能够在束流方向上区分不同的对撞顶点, 但当事例堆积数目持续上升时, 仅依赖空间信息已难以有效区分来自不同碰撞顶点的粒子. 此外, 持续的高辐照量会对探测器硬件造成严重损伤, 导致电子学噪声增加、能量测量精度恶化以及电荷收集效率下降, 甚至永久性失效, 使得探测器性能随时间显著退化. 因此, 为保证在HL-LHC整个运行期间仍能维持Phase-I水平的粒子重建效率、能量与动量分辨率, 以及触发系统的可靠性, 各子探测器必须进行全面升级, 加入新的功能模块或增强现有系统的性能, 以应对瞬时亮度的提升和累计辐照量的大幅增加.

在LHC的4个大型国际合作实验ALICE (A Large Ion Collider Experiment)、ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus)、CMS (Compact Muon Solenoid)[2]和LHCb (Large Hadron Collider beauty)中, CMS实验凭借其强磁场超导磁铁、全硅基的径迹探测(Tracker)、高颗粒度的电磁与强子量能器以及大面积缪子系统, 在众多物理过程的研究中发挥了关键作用. CMS Phase-II升级的总体目标是: 在HL-LHC高达200次事例堆积的环境下, 仍需保持与Phase-I接近的重建性能, 并进一步在某些关键物理对象上提升分辨本领. 为此, CMS已规划替换硅径迹探测器(Tracker)、建造全新的高粒度端盖量能器(High-Granularity Calorimeter, HGCAL)、升级触发与数据采集系统等. 然而, 仅依赖空间分辨率或能量测量的改进, 仍不足以完全克服高事例堆积带来的严峻问题, 如顶点重建效率的下降、粒子流对象的错误关联, 以及动量与能量测量精度的恶化等问题. 为此, CMS提出引入一套覆盖全探测器(包括桶部与端盖)的精确时间测量系统. 该系统通过引入时间维度这一新的鉴别变量, 将成为在高亮度环境下维持高效的事例重建性能的关键.

基于上述需求, CMS在Phase-II升级计划中加入了MIP精确时间探测器(minimum ionizing particle timing detector, MTD)[3]. 该探测器的设计目标是在HL-LHC初期为穿越探测器的MIP粒子提供30~40 ps级别的时间分辨率, 并在HL-LHC运行末期(约十年)仍能保持50~60 ps的分辨率. MTD将安装在径迹探测器与量能器之间的有限空间区域, 并由两部分组成: 桶部时间探测器(barrel timing layer, BTL)和端盖时间探测器(end-cap timing layer, ETL), 以此覆盖$|\eta|<1.45$和$1.6<|\eta|<3$的区域. 如图1(b)所示[3], 通过为大量MIP粒子附加一个精确的到达时间参数, MTD能够将空间重建拓展至四维(x,y,z,t)重建, 从而有效区分来自不同堆积事例的径迹, 大幅提升顶点分离能力, 使粒子流算法重新获得Phase-I的性能水平. 此外, MTD亦为将来的一些新物理研究提供可能, 例如长寿命粒子的飞行时间和质量重建、强子鉴别等. 综上, MTD是确保CMS在HL-LHC阶段高

亮度环境下继续保持优异的物理探索敏感度的核心大型探测器升级项目之一.

类似地, 在高精度飞行时间测量的需求以及应对高堆积事件和亮度升级的背景下, 国际上多个实验建造了或在研高精度时间测量系统. 已运行的系统包括BESIII实验, 其飞行时间(time of flight, TOF)系统[4]在桶部和端盖区实现了65~70 ps的时间分辨率; STAR实验的TOF系统[5]在中快度区域($|y|<0.9$)时间分辨率约80 ps; ALICE实验的TOF系统[6]时间分辨率为56 ps. 在研系统包括ATLAS实验的HGTD (high-granularity timing detector)[7], 设计时间分辨率约30 ps, 但仅覆盖端盖区域; 相比之下, CMS实验的MTD在相同空间范围内设计时间分辨率为30 ps, 但覆盖更大空间区域, 包括桶部, 以更大的空间接收度实现粒子鉴别(particle identification, PID)和4D事件顶点重建. LHCb实验也在研发具备高时间性能的量能器, 其时间分辨率拟达到数十皮秒[8].

1 物理目标

LHC整体升级带来的更高亮度将为HL-LHC上CMS实验开展的一系列物理研究带来新的机遇, 其中包括标准模型过程的精确测量, 尤其是对希格斯玻色子性质的全面测量, 以及对超出标准模型粒子和过程的寻找. MTD在维持物理对象(如带电轻子、带电强子)良好的分辨率和重建效率方面发挥着关键作用, 而这些对于HL-LHC的科学目标至关重要. MTD将会在粒子级别提升探测效率, 并提高丢失横动量重建性能. 这些提升将会使得多粒子衰变末态事例探测效率在可约背景率保持不变的情况下增加约20%~30%, 而针对多粒子衰变末态事例的研究恰恰是许多不同的物理测量的关键. 下面将分别从希格斯测量、超出标准模型物理的测量以及重离子对撞物理三个方面说明MTD对于物理测量的提升.

根据标准模型, 希格斯粒子与费米子耦合强度与费米子质量成正比, 而底夸克质量较大, 因此希格斯粒子研究的一个重要方面是针对末态含有双底夸克喷注事例的测量. 在HL-LHC阶段, MTD提供的时间信息可以有效区分事例堆积, 从而有效提升底夸克喷注鉴别性能. 例如, 在$HH\to bb\gamma\gamma$过程中, 在背景保持不变的情况下, 引入精确时间信息后, 仅利用桶部探测器就可以使信号产额提升17%, 而若实现全覆盖则可提升22%, 如图2(a)所示[3]. 同时, 类似的提升也会反映在很多其他双希格斯末态探索中, 例如$bbbb$、$bb\tau\tau$、$bb\gamma\gamma$、$bbWW$及$bbZZ$末态等. 对于含有$HH\to\tau\tau$衰变的末态, 进一步的提升同时来自对于丢失横动量重建性能的改善. 在200个事例堆积的条件下, 利用MIP粒子轨迹的时间信息可以使丢失横动量分辨率提高10%~12%, 从而带来$\tau\tau$质量重建分辨率和信噪比的提升. 此外, 时间信息的使用可将重建事例中喷注堆积的数量降低约一半, 从而提升矢量玻色子融合标记的性能, 这对于干净地观测希格斯衰变十分重要. 更广泛地说, 多粒子末态测量效率的提升, 以及在$HH\to bb\gamma\gamma$衰变中更好的顶点识别能力将推动针对希格斯性质的更精确的测量, 并提升对统计受限的微分分布的测量精度, 而这些分布对超出标准模型的物理十分敏感.

物理学家提出了许多超出标准模型的物理来解释标准模型未能正确预测的一些现象, 其中超对称理论(SUSY)是最重要的候选之一. 针对SUSY模型中新物理搜索的灵敏度很大程度上受到丢失横动量的影响. MTD通过对轨迹进行时间测量, 丢失横动量分辨率提升了10%, 从而使得130 GeV以上的丢失横动量分布尾部本底事例减少约40%, 为未来的潜在发现提供新的机遇. 精确的时间测量还将提升轻子孤立度的计算精度, 增加孤立轻子的选择效率, 从而为多轻子末态的超出标准模型信号的寻找带来额外收益. 在针对重稳定带电粒子(heavy stable charged particle, HSCP)的搜索中, 精确测量HSCP的飞行时间可以有效提高事例选择效率及物理量重建能力并降低对HSCP搜索中的模型依赖性. 图2(b)展示了不同时间分辨率下质量重建结果, 粉色分布是无MTD情况下的质量重建结果, 红色和黑色分布则分别是MTD提供的时间分辨为60和30 ps情况下的质量重建结果, 可以看到MTD提供的时间信息可以显著改善HSCP质量的重建, 使信号分布更加集中. 此外, 轨迹时间重建为中性长寿命粒子的搜索开辟了新的途径. 这类粒子广泛存在于标准模型的许多扩展模型中, 例如Split-SUSY、GMSB、RPV SUSY、Stealth SUSY、SUSY models with compressed mass spectra[9].

MTD对时间测量的高精度使其成为优秀的MIP粒子飞行时间测量探测器, 并且能够对部分强子进行粒子鉴别. 这部分特性使得MTD在重离子物理以及某些低质量QCD和味物理的专门研究中非常重要. 由于HL-LHC计划在早期安排重离子对撞运行, 因此有必要基于30~40 ps的时间分辨率来评估MTD的影响. 结合

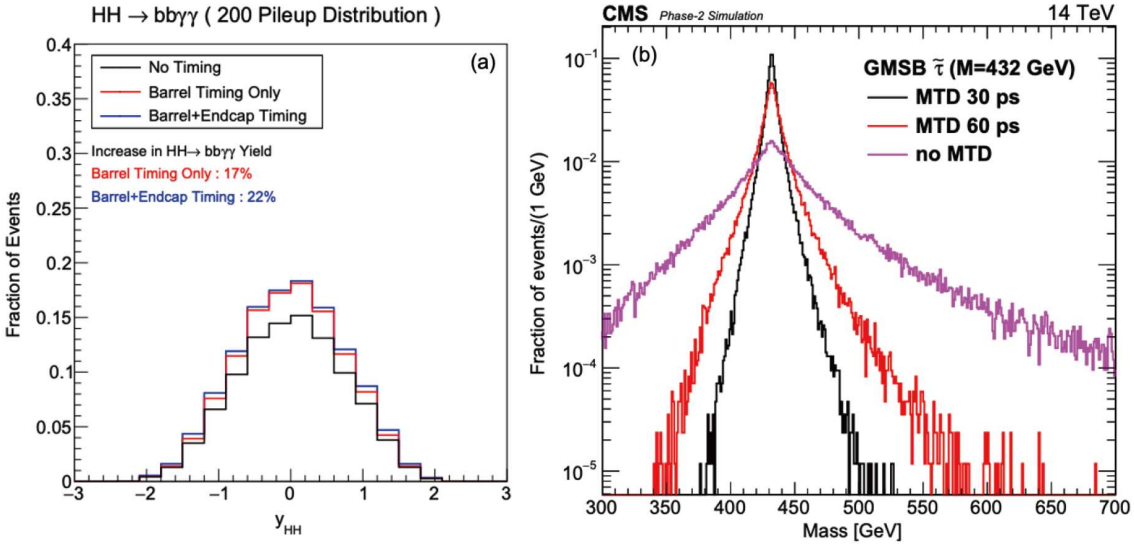


图 2 (网络版彩色)(a) MTD对$HH\to bb\gamma\gamma$产额的提升效果; (b) MTD对GMSB模型中重带电稳定粒子质量重建的改进效果[3]
Figure 2 (Color online) (a) Impact of the MTD on the $HH\to bb\gamma\gamma$ yield; (b) improvement in the mass reconstruction of heavy stable charged particles in the GMSB model with the MTD[3]

CMS探测器的大覆盖范围和完整的量能测量能力, MTD将为研究硬散射有色探针与夸克-胶子等离子体介质之间的相互作用机制, 以及在宽快度范围内重味粒子的动力学提供独特的机会. 在桶部区域, 具有0.7 GeV以上横动量的粒子能到达时间探测器. 对于快度接近0的粒子, 约2.5 GeV以下横动量的π介子与K介子可被鉴别, 而K介子与质子的鉴别可以接近5 GeV的横动量区域.

2 MTD探测器设计

综合考虑HL-LHC整体封装和技术细节之后, 仅有两个位置适合MTD的安装. 其一为介于外部径迹探测器最外层与桶部电磁量能器(electromagnetic calorimeter, ECAL)内端面之间的区域, 该位置可实现对桶区全域的覆盖; 其二为位于径迹探测器端盖与高粒度量能器HGCAL之间的间隙区域, 此设计能够完成对端盖区域的良好覆盖. 因此, MTD被分为桶部时间探测器(BTL)以及端盖时间探测器(ETL), BTL覆盖范围为$|\eta|<1.45$, ETL的覆盖范围为$1.6<|\eta|<3$. 为达到预期的时间分辨率, BTL和ETL的工作温度必须保持在较低水平, 因为SiPM暗计数率导致的噪声随温度上升而急剧增加, 其所引起的时间抖动会显著降低整体时间探测性能. 另外, 辐照也会导致暗计数率增加, 并可能降低MIP的信号幅度. 在没有束流碰撞的时间段, 如果严重受辐照的探测器被加热到室温或更高温度, 部分辐射损伤可以恢复, 从而降低暗计数率. 因此, BTL和ETL的运行环境温度将通过CO_2冷却系统维持在约–35 ℃. 本文将重点介绍BTL探测器.

BTL是一个内半径为1.148米、外半径为1.188米、表面积约为38平方米的桶形探测器, 设计目标是在HL-LHC运行初期对MIP实现30 ps的时间分辨率, 并在到达HL-LHC运行末期维持在60 ps. CMS为BTL预留的空间是从径迹探测器支撑管内表面向束流方向内缩40 mm的区域——BTL的服务组件(读出光纤、线缆和冷却管)将与外部径迹探测器的服务组件一起集成. BTL对p_T>0.7 GeV的粒子具有约90%的探测接受率, 其限制主要来自径迹探测器的支撑轨道以及传感器模块之间的微小死区.

敏感探测元件由掺铈硅酸钇镥晶体(LYSO:Ce)构成, 两端配有一对硅光电倍增器(SiPM), 其尺寸与晶体端面精准匹配, 以实现最优光收集效率[10]. 该晶体光产额高(约4×10^4光子/MeV), 衰减时间短(约40 ns), 抗辐照性能强(HL-LHC累计辐照后的光产额下降约为10%), 能够提供强MIP信号并减少信号堆叠对时间测量的影响[10]. 晶体几何结构的设计可在保证LYSO:Ce晶体敏感体积的前提下, 最小化所需SiPM的总面积, 进而降低系统功耗与读出通道数量, 且不损失光收集效率. 这得益于高纵横比晶体中光的全反射传播模式. 双端读出的传感器布局还能在整个探测面上提供均匀的时间响应, 具备一定的示踪能力.

晶体阵列由16根晶体条组成，两端与32个SiPM读出通道耦合，覆盖约55×52 mm^{2}的矩形区域，该模块称为Sensor Module (SM). 两块SM结合搭载TOFHIR2C ASIC[11]的前端读出板，并包裹导热铜壳构成Detector Module (DM). 模块按3×4排列，与冷却盘以及电子学板结合，构成一个读出单元(Readout Unit, RU). 图3(b)展示了从SM到RU各个层次BTL的实物图. 六个读出单元组成一个探测器整机(Tray)，覆盖BTL桶面纵向总长的一半(约2480 mm)和φ方向10°的范围. 总共72个探测器整机构成整个BTL桶部时间探测器，安装在径迹探测器支撑桶(barrel tracker support tube, BTST)之内，图3(a)为其原型图. 读出通道总数(即SiPM数量)为331776，晶体条总数为165888. 单根晶体条的面积是在读出通道数量、传感器性能以及运行占用率之间的最佳折中. 具体来说，在约200个事例堆积的情况下，探测单元的平均占用率约为7%，从而限制了同一束团碰撞中发生“双击”(double hits)的概率. 考虑到闪烁体的衰减时间，该占用率还能使前一束团的事例堆积对时间分辨率的影响可以忽略不计. 经过调研与束流测试验证，BTL选用了HPK公司生产的像素大小为25 μm的SiPM. BTL选取的晶体厚度为3.75 mm，并匹配相应尺寸的SiPM. 具体的优化和束流测试结果将在本文第4节详细介绍.

BTL电子学的基本构建单元是读出单元RU，用于处理来自768个独立SiPM的信号. 一个RU包含12个前端卡(Front-End, FE)，每个FE上有2个读出芯片，用于处理来自64个SiPM的信号，这些信号由TOFHIR2C ASIC进行处理. 12个FE连接到Concentrator Card (CC)，其上装有两个低功耗Giga-Bit收发器(lpGBT)[12]，分别连接到两个Versatile Link Plus (VTRx+)芯片，实现将前端采集的数据通过高速光链路传输至后端读出系统.

3 BTL时间分辨性能的评估

在高亮度对撞环境下维持对MIP粒子稳定而精确的时间测量，是BTL设计的核心目标. BTL的整体时间分辨可以分解为多项独立贡献，模型[13]通常表达为

$$\sigma_t \simeq \sigma_t^{\text{phot}} \oplus \sigma_t^{\text{ele}} \oplus \sigma_t^{\text{DCR}} \oplus \sigma_t^{\text{clock}}, \quad (1)$$

其中，σ_t^{phot}反映光子统计涨落与光收集效率，σ_t^{ele}由前端读出电子学和时间数字转换器(time-to-digital converter, TDC)误差主导，σ_t^{DCR}则来源于SiPM在累积辐照下急剧上升的暗计数率(dark count rate, DCR)带来的噪声，而σ_t^{clock}与时钟同步和分配相关，通常稳定在10 ps以下. 四项贡献在不同辐照阶段和不同SiPM工作电压下占有不同比重，特别是在HL-LHC后期，辐照主导的DCR项将成为限制时间分辨的主要因素之一，如图4所示[14]. 因此，BTL的电子学与冷却技术必须同步配合优化，以确保整个HL-LHC周期内维持30~60 ps的时间分辨率.

BTL探测模块单元由LYSO:Ce闪烁晶体阵列与SiPM阵列组成. MIP粒子信号穿过晶体，留下能量沉积，转化为闪烁光，这些光子直接或者通过反射传播到晶体两端，被SiPM收集转换为光电子并放大. 时间测量

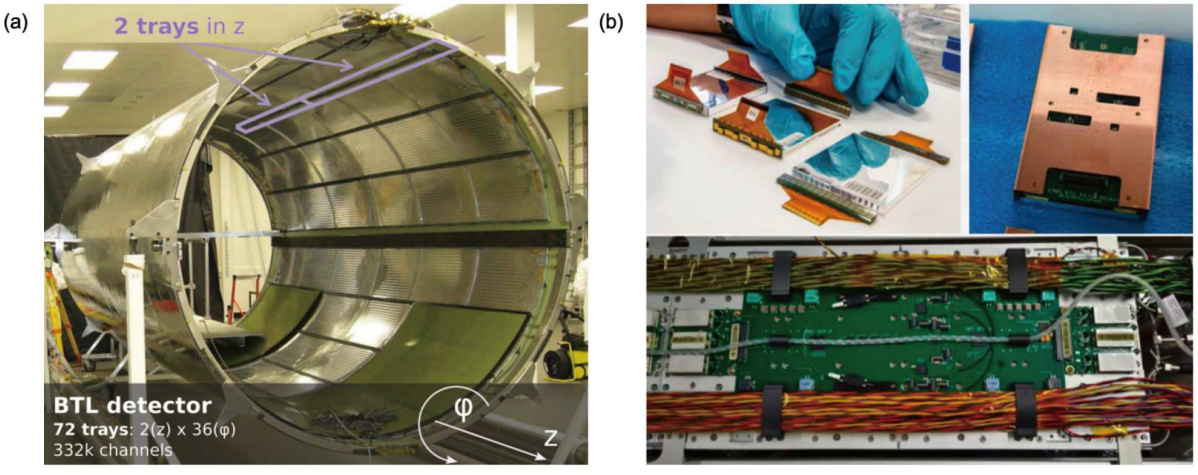


图 3 (网络版彩色)(a) BTST的模型，其中紫色框表示其中一条BTL Tray的安装位置[3]; (b) BTL探测器模块及其组装顺序——SM、DM而后组装为RU及BTL Tray

Figure 3 (Color online) (a) Model of the BTST, where the purple box indicates the installation position of one BTL tray[3]; (b) modules of the BTL detector and its assembly sequence, with SMs and DMs assembled into RUs and then into BTL trays

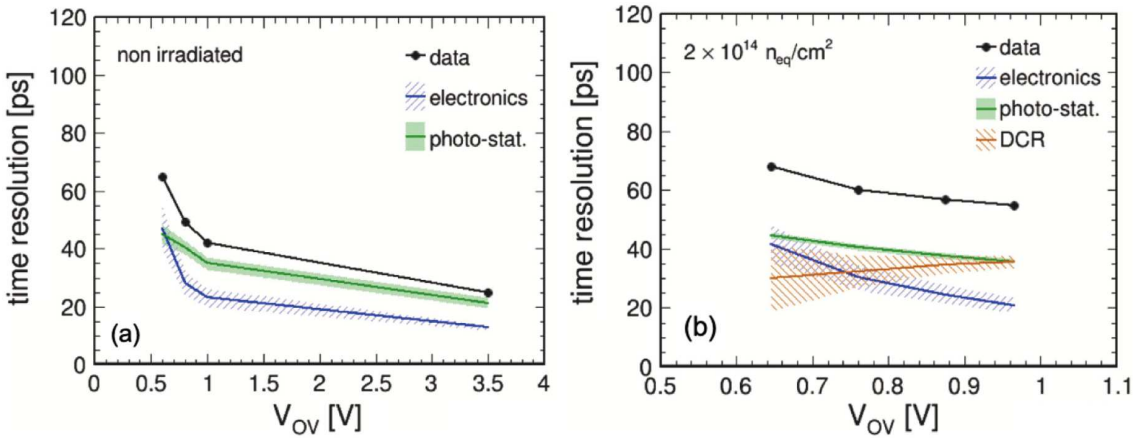


图 4 (网络版彩色)(a) 辐照前及(b) HL-LHC十年运行等效辐照后, BTL时间分辨率及各项分解随SiPM过电压的变化[14]
Figure 4 (Color online) (a) Before irradiation and (b) after irradiation equivalent to ten years of HL-LHC operation, the BTL time resolution and its individual contributions as a function of the SiPM overvoltage[14]

通常依赖信号脉冲的前沿(leading edge), 光子到达光电转换器件被转换成光电子的最终个数是时间分辨率的关键. 而影响最终光电子个数的主要因素包括光产额(light yield, LY)、光收集效率(light collection efficiency, LCE)以及SiPM的光子探测效率(photon detection efficiency, PDE). MIP粒子通过单位路径长度产生的光子数具有统计涨落而直接影响σ_t^{phot}, 后者反比于光产额. 晶体的结构、密度、品质等决定了光产额的多少. 另外, 晶体端面抛光、光学耦合胶、表面包覆反光材料等直接影响光收集效率, 以及SiPM器件的光子探测效率, 都影响最终的光电子个数而决定σ_t^{phot}. 在辐照前, σ_t^{phot}通常占主导; 但随着辐照累计逐渐增加, SiPM因辐照损伤而急剧上升的DCR变得显著, 成为影响时间分辨率的另一主导因素.

电子学项包含前端放大器噪声、信号前沿斜率以及TDC的时间分辨率. SiPM的工作点(反偏电压、增益以及PDE)也会直接影响信号幅度与信号前沿斜率——在增益较高时, 信号前沿更陡峭, 电子学噪声对时间测量的影响减小; 但过高的增益又会放大DCR及其涨落, 因此需要在PDE、增益和噪声之间平衡. TDC采用数字化时间测量, 其贡献小且稳定. 电子学项σ_t^{ele}在总时间分辨率中贡献相对有限, 一般小于σ_t^{phot}和辐照后的σ_t^{DCR}.

在HL-LHC的强辐照环境下, SiPM的像素单元受到中子与质子通量累积损伤, 导致DCR随运行时间显著增长, 成为限制时间分辨的主导因素之一. 高DCR不仅带来明显的基线噪声和脉冲堆叠, 还会在信号前沿附近引发触发时的不稳定, 从而恶化时间重建精度. 由于DCR随温度呈指数级变化, 因此温度控制对该项的抑制至关重要. BTL的长期性能预测表明, 在不采取有效冷却与退火手段的情况下, DCR的影响将使时间分辨恶化到远超设计指标要求的60 ps, 因此必须采取额外的温度控制系统将其维持在可控范围.

为在长期辐照后仍维持优良的时间分辨, BTL对SiPM采用两级冷却策略, 使其在约−45℃的温度下运行, 以将DCR压低到CMS基准运行环境−35℃状态(与径迹室共享冷却腔)的约一半. 冷却系统由托盘CO_2冷却回路和安装在每个SiPM阵列背面的紧凑型热电冷却贴片(thermo-electric cooler, TEC)[15]共同构成, 其设计图如图5所示, 通过反向驱动TEC持续吸收SiPM封装背面的热量, 并传导至与之接触的铜壳, 实现−10℃温差. 模块背面集成的RTD温度传感器实时监控SiPM的实际工作温度, 使控制系统能够在不同辐照阶段及时调整驱动电压. TEC的快速响应能力确保SiPM温度稳定, 从而有效阻止辐照累积期间DCR的指数增长, 使DCR在BTL整个运行周期中保持在可控范围内, 为系统实现稳定的30~60 ps的时间分辨奠定基础.

除了低温抑制DCR水平外, SiPM还依赖周期性的高温退火以修复部分辐照损伤. BTL计划在LHC技术停机期间将SiPM温度升至约60℃, 并持续数小时以部分恢复辐照损伤. CO_2冷却提供约10℃的基础温升, 而TEC提供额外约50℃温升, 从而精确控制退火温度. 退火可显著降低DCR, 特别是在HL-LHC中后期, 可使时间分辨恢复约10~20 ps的水平. 通过运行期间的冷却与

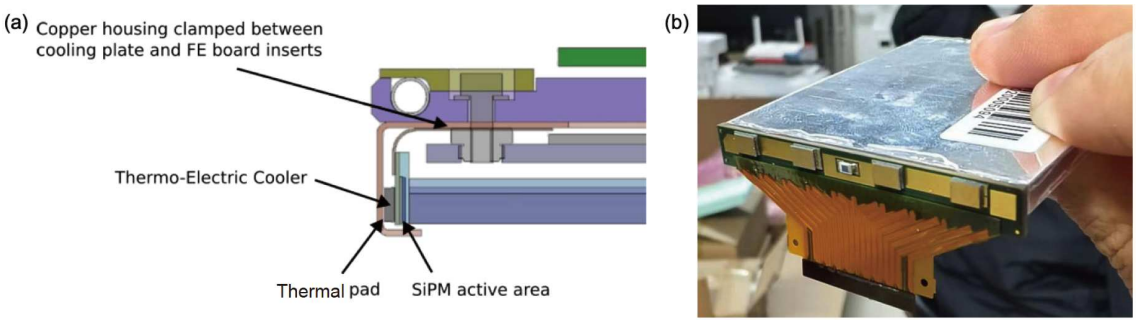


图 5 (网络版彩色)(a) TEC设计示意图[15]; (b) TEC实物: TEC被焊接在SiPM背板上, 并需与外侧铜壳紧密接触, 保证热量传导顺利

Figure 5 (Color online) (a) Schematic design of the TEC[15]; (b) TEC hardware, where the TEC is soldered onto the SiPM backplane and must be in close contact with the outer copper housing to ensure efficient heat transfer

停机期间的退火循环, BTL能够在整个HL-LHC寿命内保持高性能采数, 使整体时间分辨率的增加始终处于可接受范围.

4 束流测试

为系统验证BTL模块在HL-LHC条件下的性能, 并评估在累积辐照后时间分辨的演化, 我们在CERN SPS H8束流线[16]上开展了多轮测试[13]. 束流采用180 GeV的π介子, 能够提供稳定的MIP能量沉积, 并具有足够的穿透深度, 适用于评估LYSO:Ce晶体与SiPM读出的响应. 实验装置设置包括最终版设计的模块原型、基于TOFHIR2C ASIC的前端读出电路, 以及温控系统. 图6(a)给出了束流测试实验装置及其示意图. 测试涵盖未辐照模块、半期辐照剂量(约1×10^{14} n_{eq}/cm^2)模块及总照剂量(约2×10^{14} n_{eq}/cm^2)模块, 以便观察整个HL-LHC寿命周期的性能变化.

为优化模块的时间测量性能, 我们对SiPM像素单元尺寸及LYSO:Ce晶体厚度等参数进行了系统研究. 针对SiPM, 比较了15~30 μm的多种像素单元尺寸: 较大像素单元提供更高光子探测效率, 有助于改善光子统计项与电子学噪声项, 从而在初始阶段即可达到25~30 ps的时间分辨; 而在较高辐照条件下, 虽然更高PDE会带来更大的DCR, 但在可接受的工作区间内仍能保证时间分辨率在指标范围之内, 最终, 25 μm像素尺寸在PDE、增益、DCR和功耗之间取得最佳平衡, 且时间分辨率最优. 有关晶体厚度的研究表明, 时间分辨随厚度d近似符合$d^{-0.56}$的改善规律. 以上参数对时间分辨的影响如图6(b, c)所示. 这些扫描结果为最终模块参数设计提供了定量依据, 使其能够在HL-LHC整个运行周期内保证满足所需的优越的时间分辨率.

为了在束流测试中模拟未来BTL的工作热环境, 实验采用可控温冷箱提供−35°C范围内的基础环境温度, 再由集成于SiPM阵列背部的TEC进行精细调节, 使SiPM温度稳定在约−45°C附近. 在更进一步的温度测试中, SiPM使用搭载的TEC结构进行升温, 实现可控退火, 以便匹配预测模型中对辐照损伤恢复的估计[15]. 如图7(a)所示, TEC在运行阶段实现的额外10°C的降温, 以及在停机阶段的60°C退火中提供的约50°C的升温, 均有效地限制了DCR, 其在HL-LHC不同阶段的测试结果达到TDR设计指标, 如图7(b)所示, 束流测试结果与长期模型吻合.

如前文所述, 整个HL-LHC运行周期内的时间分辨率如图7(b)所示. 在辐照前, 探测器模块在3.5 V的过电压下实现约25 ps的时间分辨率, 达到TDR的原初设计指标. 在累计辐照至HL-LHC终生剂量约2×10^{14} n_{eq}/cm^2后, 辐照损伤使得DCR显著上升, 降低过压至约1 V, 时间分辨平稳退化至约55 ps, 退化幅度完全符合HL-LHC运行模型以及基于SiPM辐照参数的预测, 达到TDR的原初设计指标.

此外, 不同入射角度下的性能扫描[14](对应BTL不同赝快度区域, 如图7(c)所示)显示, 随着能量沉积增加, 光电子数随之提高, 时间分辨率均呈逐步改善趋势. 在辐照模块中, 这种改善更为明显, 因为增大的光电子数可更有效抵消DCR噪声带来的影响. 将入射角映射至BTL的赝快度区间, 可得到随其变化的最佳时间分辨曲线, 实验结果与模型预测在整个赝快度范围内保持一致.

综上, CERN SPS H8束流测试全面验证了BTL最终模块的时间响应、辐照耐受性、参数和工作点选择以及长期运行的性能. 包括SiPM像素尺寸、晶体厚度、

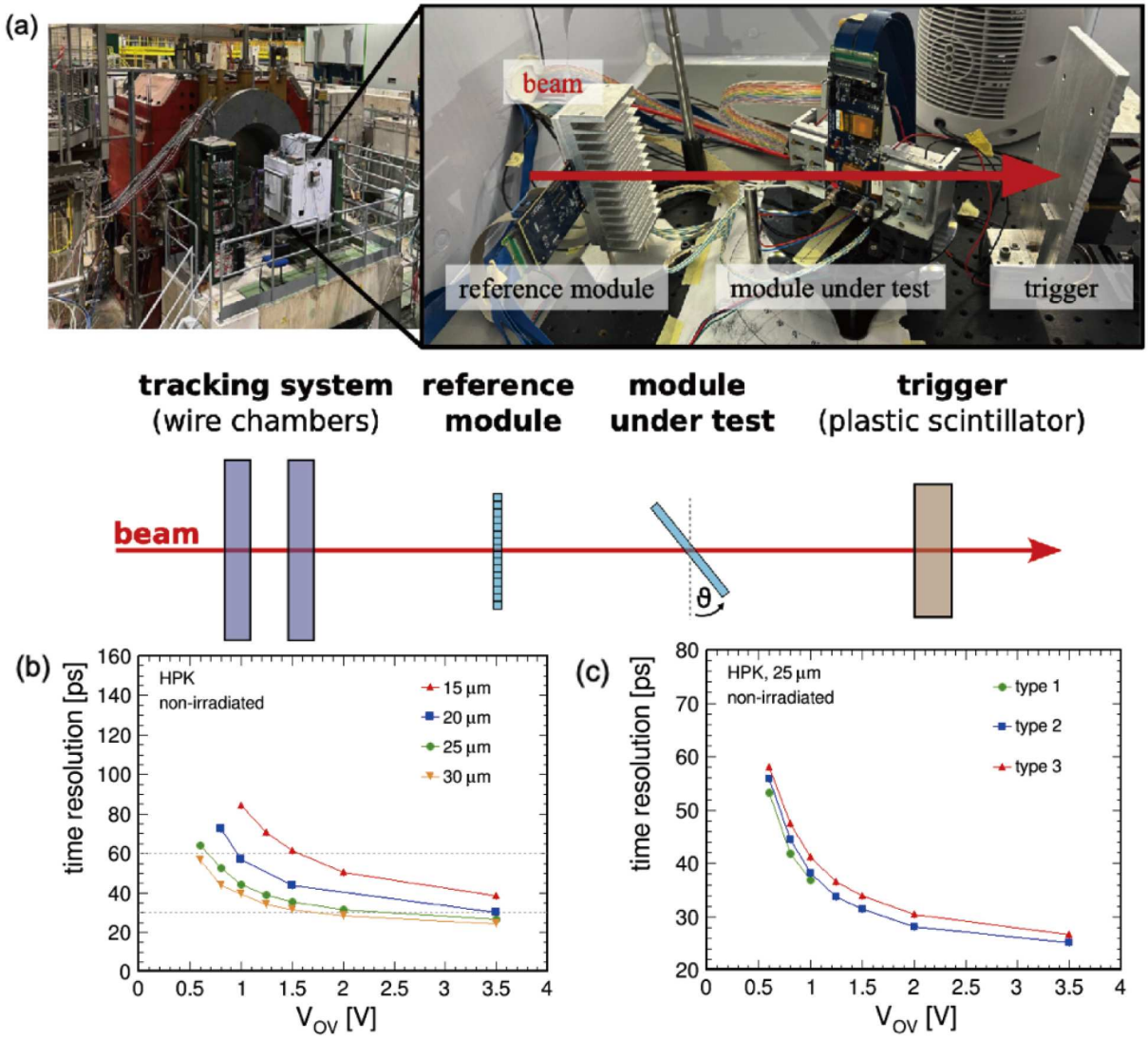


图 6 (网络版彩色)(a) MTD BTL束流测试实验装置及其示意图; (b) 辐照前, HPK SiPM不同像素尺寸对BTL时间分辨的影响; (c) 辐照前, 不同LYSO:Ce晶体厚度对BTL时间分辨的影响, 其中LYSO:Ce晶体类型及其厚度关系为: type 1, 3.75 mm; type 2, 3.0 mm; type 3, 2.4 mm[13]

Figure 6 (Color online) (a) MTD BTL beam test experimental setup and its schematic view; (b) effect of different HPK SiPM pixel sizes on the BTL time resolution before irradiation; (c) effect of different LYSO:Ce crystal thicknesses on the BTL time resolution before irradiation, where the LYSO:Ce crystal types and corresponding thicknesses are: type 1, 3.75 mm; type 2, 3.0 mm; type 3, 2.4 mm[13]

温度控制策略与前端读出在内的各项优化均在实验中得到验证, 为BTL在HL-LHC全寿命周期内稳定实现30~60 ps的时间分辨目标提供了坚实的实验依据.

5 探测器建造

BTL目前正处于整机建造阶段, 主要工作在北京、加利福尼亚、米兰与弗吉尼亚四个组装中心并行开展. 为确保最终探测器具备高质量、组件间完全可互换, 并在多年运行中保持完整可追溯性, 所有中心均采用统一的工装夹具、建造流程和质控(QA/QC)标准. 整个建造过程具有严格规范化的物料管理体系, 所有关键部件, 包括LYSO:Ce晶体、SiPM阵列、电子学板卡、冷却结构及机械固定件, 均在数据库中进行编码与跟踪, 所有操作都被记录, 以保障跨中心批次间的一致性. 图8展示了典型的BTL传感器模块.

BTL的建造包括三个主要阶段: 传感器模块(Sensor Module, SM)建造、探测器模块(Detector Module, DM)耦合, 以及探测器整机(Tray)集成. 第一阶段的SM

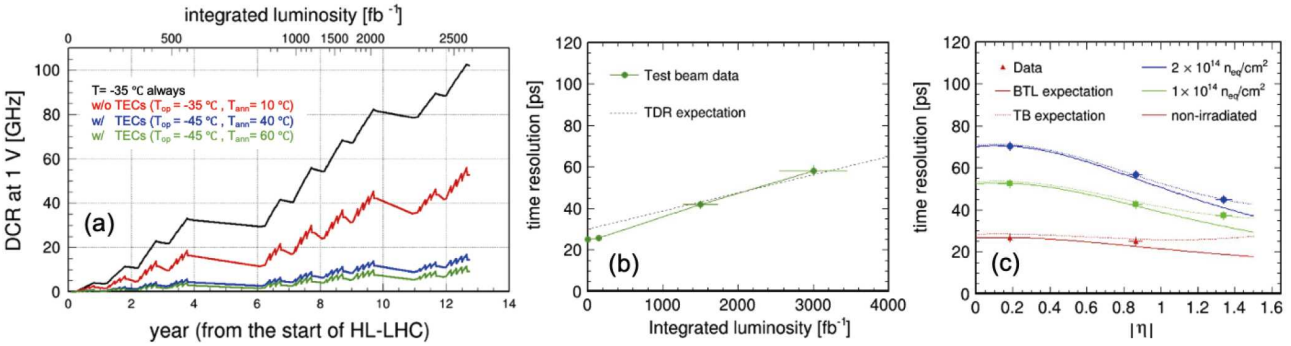


图 7 (网络版彩色)(a) 不同温度设置与退火情况下, DCR随HL-LHC运行时间的变化[15]; (b) HL-LHC期间, BTL时间分辨率随累积亮度的变化[14]; (c) 不同辐照下BTL的时间分辨率随等效赝快度的变化. 数据点(圆点)与BTL模型预期(实线)进行比较[14]. 虚线表示测试束流数据的期望分辨率(TB expectation), 该结果是在BTL模型预期的基础上, 叠加了由时间差对入射位置残余依赖引入的额外贡献

Figure 7 (Color online) (a) DCR as a function of HL-LHC running time for different temperature settings and annealing conditions[15]; (b) BTL time resolution versus cumulative luminosity during the HL-LHC[14]; (c) time resolution as a function of the equivalent pseudorapidity for modules irradiated to different fluences. The data (dots) are compared with the BTL model expectations (solid lines)[14]. The dashed lines correspond to the resolution expected for the test beam data (TB expectation), obtained by adding to the BTL model expectations the extra contribution due to the residual dependence of the time difference on the impact point

建造主要聚焦于LYSO:Ce晶体与SiPM阵列的黏接. 为获得稳定而均匀的光学耦合, 使用透明硅胶RTV3145在受控厚度下完成黏接. 由于胶层厚度和LYSO-SiPM对齐精度直接影响光子收集效率并进一步影响时间分辨, BTL合作团队开发了专用的批量建造夹具——GAMBIT黏接工作台, 它固定LYSO与SiPM阵列以保证对齐, 并使得胶水在固化前保持稳定的位置和压力. 完成黏接后, SM在23°C、40%~60%湿度的受控环境下固化24小时. 特定的装置与流程确保不同建造中心在胶层厚度、对准精度和压力施加方式上的一致性. 建造成型的批量SM如图8(a)所示.

第二阶段的DM耦合侧重机械与热学结构的精密耦合, 包括SM、前端读出板、铜壳之间的固定. 特别关键的是确保SiPM背部TEC与铜壳之间建立良好的热接触, 以便在最终运行时实现高效冷却与退火循环. 第三阶段的Tray组装将集成72个DM, 并将之安装至冷却板的指定槽位, 电源板与CC板则被安装在冷却板另一面. 光纤、低压电源线、CC控制线及温控线缆等传输线缆随后被集成至探测器整机上, 所有布线均需通过形位约束, 以确保最终能在有限空间内与CMS机械支撑结构良好兼容.

每个模块及Tray整机建造完成后, 都会进入相应层次的QA/QC检验. 模块级QA/QC搭配自动化放射源移动系统进行SM光产额等性能的测试, 及借助外部PT1000温度传感器进行DM热接触测试. SM QA/QC装置包括带光屏蔽的暗箱、由水冷和风扇组成的温控系统, 以及用于数据采集的16通道CAEN DT5742数字化仪, 整个装置如图8(b)所示. 在测试中通过自动轨道系统定位^{22}Na放射源, 以扫描SM各晶体条响应并测量511 keV能峰、单光电子电荷分布以及晶体整体光产额. 这些指标对最终时间分辨率至关重要, 并用于监控不同批次间的一致性. 为了评估LYSO材料本征差异引起的影响, 晶体条能量分辨率同样是重要的评价指标, 该指标与模块的整体均匀性相结合, 共同用于判断SM的优良程度. 大批量模块的重复测试体系被用来筛除潜在的不稳定模块, 后者可同时用于辐照束流测试与后续建造阶段的性能分析.

探测器整机Tray QA/QC则进一步验证整个Tray整机结构的电子学完整性与散热性能. QA/QC中, 首先检查读出板、光纤链路与CC连接的连续性, 并利用LYSO:Ce晶体自发辐射的307 keV能峰测试TOFHIR2C前端的能量响应, 以确保模块到后端电子学的全链路数据采集正常. 之后进行温度循环测试, 验证TEC在BTL整机中的冷却能力、温度稳定性和反馈控制精度. 该测试对大规模建造尤为关键, 因为整机水平的热特性将直接影响长期运行中SiPM的暗计数率演化.

随着全球Tray整机建造逐步推进, 完成的探测器将按批次运抵CERN进行进一步的系统整合与验收. 每个Tray整机在CERN通过再次QA/QC后进入CMS支撑结构并安装, 随后开展完整读出链路、时钟与触发接口以及温度控制系统的联调. 目前整体进度显示, BTL的Tray整机建造计划在2026年夏季完成, 并计划同年完成安装工作. 首批完成的Tray整机已成功运输至CERN并通过验收, 标志着BTL正式从研发阶段迈入全

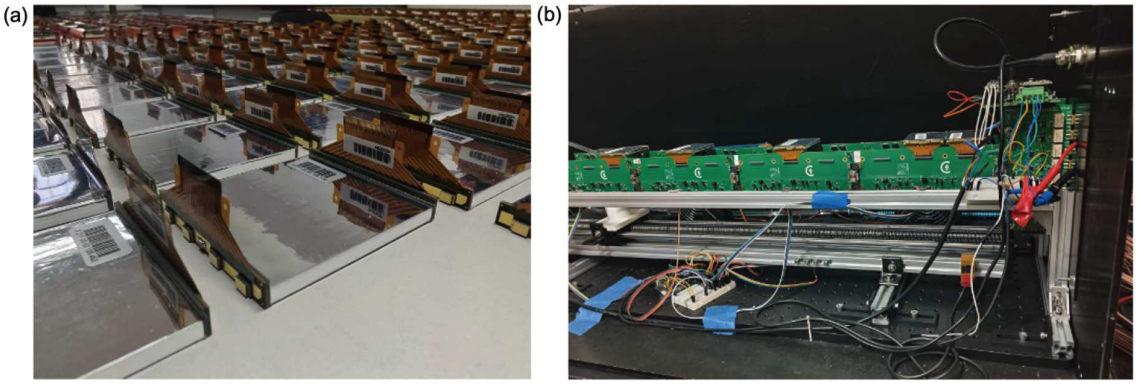


图 8 (网络版彩色)(a) 批量建造的部分Sensor Modules; (b) SM QA/QC装置, 包括光屏蔽暗盒、由水冷和风扇组成的温控系统, 和用于数据采集的16通道CAEN DT5742数字化仪, 以及电子学收集和放大板

Figure 8 (Color online) (a) Part of the batch-constructed Sensor Modules; (b) SM QA/QC setup, including a light-shielded dark box, a temperature control system with water cooling and fans, and a 16-channel CAEN DT5742 digitizer for data acquisition, along with electronics readout and amplification boards

面生产与系统建造阶段, 并已确定稳定的建造工艺和流程.

6 结论和展望

MTD BTL作为CMS Phase-II升级中最关键的新探测器之一, 将通过对穿越探测器MIP粒子提供30~60 ps级别的精确时间测量, 使CMS在HL-LHC阶段高达200次事例堆积的运行条件下保持优越的Phase-I水准的粒子重建性能. 本文系统介绍了BTL的时间分辨率来源、辐照效应抑制策略、束流验证结果以及建造与QA/QC流程. 束流测试表明, 最终设计的LYSO+SiPM耦合模块可在初期实现约25 ps的时间分辨率, 并在累积辐照至终生剂量后仍保持约55 ps的稳定性能, 与模型预测高度一致, 满足TDR原初设计指标; 建造与QA/QC则保证了大规模生产条件下的模块一致性与可追溯性, 为整个探测器的长期可靠运行奠定了基础.

随着全球Tray整机建造的全面推进, 组装完成的Tray整机正按批投入生产并逐步送往CERN进行系统集成. 未来两年内, BTL将与升级后的外部径迹室以及升级后的触发DAQ系统完成联调, 构建完整的4D径迹和顶点重建能力. BTL的引入不仅可提升顶点分辨率与粒子流重建性能, 还将在长寿命粒子搜索、重味物理、稀有过程测量等方向开辟新的分析途径. 随着运行经验积累, 时间测量也可能进一步与机器学习算法结合, 实现更高维度的事例重建优化.

CMS实验目前已有来自全球200多个合作单位, 其中有18个单位共同参与了MTD BTL的研发与建造工作. 在BTL的研发与建造中, 中国团队发挥了重要作用. 自项目初期, 团队便加入探测器的研发与建造, 在传感器模块设计与束流测试中做出重要贡献, 同时参与了建造工艺优化与质量控制体系的设计与实现, 并承担了大规模建造任务(BTL全球共四个CMS官方建造中心, 北京为其中之一, 承担总探测器四分之一的建造份额)、数据采集系统的开发与标定, 以及在CERN的测试与安装工作, 为BTL探测器从设计到量产再到安装调试的顺利推进提供了关键支持.

展望HL-LHC全寿命周期, BTL计划通过持续监测与周期性退火长期稳定运行, 其性能演化将与束流条件一起纳入CMS的实时校准框架. BTL在未来十年的运行中不仅是CMS抵抗极端pileup的核心探测器之一, 也将为未来高时间分辨率粒子探测技术的发展提供宝贵经验, 为下一代加速器和探测器的研发奠定基础.

致谢 感谢CMS实验合作组在MTD桶部晶体时间探测器的讨论与研制过程中所作出的贡献.

参考文献

1 Apollinari G, Béjar Alonso I, Brüning O, et al. High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC). Technical Design Report V.0.1, CERN Yellow

Reports: Monographs, 2017
2 Collaboration T C, Chatrchyan S, Hmayakyan G, et al. The CMS experiment at the CERN LHC. J Inst, 2008, 3: S08004
3 CMS Collaboration. A MIP Timing Detector for the CMS Phase-II Upgrade. Technical Report, CERN-LHCC-2019-003, CMS-TDR-020, CERN, Geneva, 2019
4 Cao P, Chen H F, Chen M M, et al. Design and construction of the new BESIII endcap Time-of-Flight system with MRPC Technology. Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment, 2020, 953: 163053
5 STAR and the CBM eTOF Collaboration. Physics program for the STAR–CBM upgrade. 2016, arXiv: 1609.05102
6 ALICE Collaboration. ALICE Time-Of-Flight System (TOF): Technical Design Report. Technical Report, CERN-LHCC-2000-012, CERN, Geneva, 2000
7 ATLAS Collaboration. Technical Proposal: A High-Granularity Timing Detector for the ATLAS Phase-II Upgrade. Technical Report, CERN-LHCC-2020-007, ATLAS-TDR-031, CERN, Geneva, 2020
8 Kholodenko S. Scintillating sampling ECAL technology for the LHCb PicoCal. Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment, 2024, 1066: 169656
9 Coccaro A, Curtin D, Lubatti H J, et al. Data-driven model-independent searches for long-lived particles at the LHC. Phys Rev D, 2016, 94: 113003
10 Addesa F M, Barria P, Bianco R, et al. Comparative characterization study of LYSO:Ce crystals for timing applications. J Inst, 2022, 17: P08028
11 Albuquerque E, Araújo M, Benaglia A, et al. TOFHIR2: the readout ASIC of the CMS barrel MIP Timing Detector. J Inst, 2024, 19: P05048
12 Moreira P, Kulis S, Baron S, et al. lpGBT: low-power radiation-hard multipurpose high-speed transceiver ASIC for high-energy physics experiments. IEEE Trans Nucl Sci, 2025, 72: 24–37
13 Addesa F, Anderson T, Barria P, et al. Optimization of LYSO crystals and SiPM parameters for the CMS MIP timing detector. J Inst, 2024, 19: P12020
14 Addesa F, Akrap P, Albert A, et al. The CMS barrel timing layer: Test beam confirmation of module timing performance. Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A-Accelerators Spectrometers Detectors Associated Equipment, 2026, 1081: 170823
15 Bornheim A, Lustermann W, Stachon K, et al. Integration of thermo-electric coolers into the CMS MTD SiPM arrays for operation under high neutron fluence. J Inst, 2023, 18: P08020
16 Abbott R, Abreu A, Addesa F, et al. Test beam characterization of sensor prototypes for the CMS Barrel MIP Timing Detector. J Inst, 2021, 16: P07023

Summary for “紧凑缪子线圈实验桶部晶体最小电离粒子时间探测器研发进展”

Progress on the development of the Compact Muon Solenoid barrel minimum ionizing particle timing detector

Jin Wang[1], Mingxuan Zhang[1*], Zhenyu Dong[1], Hong Gao[2], Leyan Li[1], Yuming Lin[1], Junkai Qin[3], Zhilang Wang[2], Shunliang Zhang[3], Zijian Zhao[3], Tongguang Cheng[2], Zhen Hu[3] & Xiaohu Sun[1*]

[1] *School of Physics and State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Peking University, Beijing 100871, China*
[2] *School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China*
[3] *Department of Physics and Center for High Energy Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
* Corresponding authors, E-mail: mingxuanzh@stu.pku.edu.cn; Xiaohu.Sun@pku.edu.cn

This paper presents a detailed overview of the Barrel Timing Layer (BTL), the subsystem of the Minimum Ionizing Particle Timing Detector (MTD) in the Compact Muon Solenoid (CMS) experiment at CERN, focusing on its physics motivation, detector design, performance verification, and construction progress for the High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC) era. The HL-LHC, scheduled to start in 2030, will deliver an integrated luminosity of approximately 3000 fb^{-1} over a decade, with peak instantaneous luminosity leading to 140–200 proton–proton interactions per bunch crossing, creating extremely challenging pileup conditions for traditional event reconstruction algorithms. To address these challenges and maintain high-precision reconstruction performance, CMS introduced the MTD in the Phase-II upgrade, adding a precise timing dimension to the conventional spatial measurements of tracks and vertices from each collision. MTD aims to provide time-of-flight (TOF) measurements for minimum ionizing particles (MIPs) with a time resolution of 30–60 ps, enabling pileup discrimination utilizing the time information and the four-dimensional vertex and particle-flow reconstruction. The MTD consists of the BTL covering $|\eta|<1.45$ and the Endcap Timing Layer (ETL) covering $1.6<|\eta|<3.0$. The BTL is based on 165888 LYSO:Ce scintillator crystals read out by 331776 dual-ended Silicon Photomultipliers (SiPMs). The combination of high light-yield crystals in a compact dimension and dual-end SiPM readouts provides high light output and precise timing while keeping the channel count and power consumption under control. The BTL adopts a modular design, where sensor modules (SMs) are assembled into detector modules (DMs), each DM integrates readout units (RUs), and full trays are formed at the top level. Unified mechanical, electronic, and cooling interfaces enable large-scale assembly and system integration. In the HL-LHC radiation environment, timing performance is influenced by photon statistics, front-end electronics, SiPM dark count rate, and clock distribution. To mitigate irradiation-induced dark count growth, BTL uses CO_2 cooling together with Thermo-Electric Coolers (TECs) on the SiPMs to maintain the detector at approximately −45°C during operation, and at 60°C for periodic thermal annealing during technical stops to partially restore radiation damage. Beam tests at the CERN SPS H8 line, including both unirradiated and irradiated modules, validated the final BTL design, showing an initial time resolution of ~25 ps, degrading to ~55 ps after lifetime-equivalent irradiation, consistent with model predictions. Systematic studies of SiPM cell size, LYSO:Ce crystal thickness, operating voltage, and incident angle dependence confirmed the final design choices and demonstrated that the timing performance meets design expectations across the entire coverage. BTL has now entered large-scale production and assembly at multiple international centers, using standardized tooling, procedures, and QA/QC to guarantee high quality, interchangeability, and traceability. The first full trays have been delivered and passed a variety of acceptance tests performed at CERN. In summary, MTD BTL is critical for maintaining high-precision event reconstruction under extreme HL-LHC pileup conditions, and its mature timing performance, radiation tolerance, and large-scale construction readiness provide strong assurance for physics operations in the coming decade while offering valuable experience for next-generation high-precision timing detectors.

Large Hadron Collider, Compact Muon Solenoid, SiPM, LYSO:Ce scintillator, time resolution, time of flight

doi: 10.1360/CSB-2025-6012