

江门中微子实验中的反符合探测器系统

张永鹏 关梦云 郭 聪 路浩奇 刘金昌 王瑞光 王思博
王 毅 王志民 徐吉磊 于泽源 张 鹏 庄红林 杨长根

(中国科学院高能物理研究所 100049)

江门中微子实验(JUNO)的核心物理目标是利用反应堆中微子精确测定中微子质量顺序与混合参数。中微子相互作用截面极小,信号事例率极低,为从海量数据中提取有效信号,必须将宇宙线 μ 子及其产生的同位素本底降至极低水平。为此,JUNO设计并建造了规模宏大、性能卓越的反符合探测器系统。该反符合探测器系统包含了装有约4万吨超纯水的水切伦科夫探测器。水池池壁与池底铺设高密度聚乙烯内衬,用于有效隔绝岩石渗水与氦扩散;池壁安装不锈钢“鸟笼”支撑结构,用于固定电缆、Tyvek反射膜及各类管线;Tyvek反射膜全面覆盖池壁、池底及中心探测器球面,显著提升光收集效率。此外,反符合探测器系统还包含覆盖水池顶部的塑料闪烁体径迹探测器与阻性板探测器,用于 μ 子探测和径迹重建;在池壁上端专门布置了4圈20英寸与8英寸PMT,以增强大气中微子探测能力。为减少地磁场对光电倍增管性能的影响,在中心探测器外围设计了主动地磁屏蔽线圈系统。一套产能达100吨/小时的低本底超纯水制备与循环系统,确保了超纯水的透明度与极低放射性本底。经过多年的设计、研制与安装,整个反符合探测器系统于2024年底竣工,并于2025年投入运行。反符合探测器系统的各子系统运行稳定,性能全面达到或超过设计指标,为JUNO探索中微子物理的未知前沿奠定了坚实的实验基础。

一、JUNO反符合探测器系统

JUNO是一项位于广东省江门市地下约700 m的大型多物理目标的粒子物理实验,其首要科学目

标是通过探测来自阳江与台山核电站的反应堆中微子,以前所未有的能量分辨率确定中微子质量顺序和精确测量混合参数^[1]。由于中微子信号事例率极低,必须有效抑制由宇宙线 μ 子及其在探测器里或与周围岩石中产生的次级粒子(如快中子、长寿命放射性同位素等)所构成的本底。为此,JUNO精心设计并建造了一个规模宏大、性能卓越的综合性反符合探测器系统,为2万吨液体闪烁体的中心探测器(CD)提供强大的本底“防火墙”。如图1所示,整个反符合探测器系统主要由以下部分集成:水切伦科夫探测器(WCD)、主动地磁屏蔽系统、顶部径迹探测器(TT)和阻性板探测器(RPC)。

WCD的主体是一个直径43.5 m、高44 m的圆柱形水池,装载有约4万吨超纯水。该水池既作为屏蔽介质吸收周围岩石等材料的中子与伽马射线本底,也作为探测介质记录 μ 子穿过时产生的切伦科夫辐射光。为了隔离岩石渗水并阻挡氦扩散,水池内表面整体铺设了5 mm厚且与水兼容的高密度聚乙烯(HDPE)防氦内衬。池壁和池底安装了不锈钢支撑结构(形象称为“鸟笼”),该结构由立柱、水平圈梁与斜撑组成,用于固定约3万根PMT电缆、Tyvek反射膜、纯水管路、LED刻度系统及其他附属设施。水池顶部覆盖黑色橡胶密封盖(Cover),其采用气密拉链实现光密封与气密封。Cover与水池液面之间充满氮气,有效抑制外部空气氦渗入。支撑这套庞大WCD运行的基础是一套产能达100吨/小时的低放射性超纯水制备与循环系统。该系统采用多级纯化工艺,特别是集成了高效的在线除氦装置,能够持续产出并维持水质的恒温、高电阻率、高

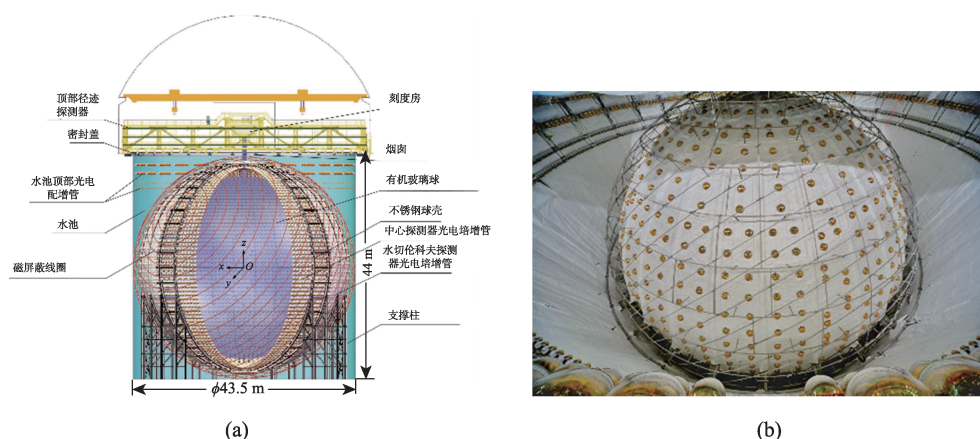


图1 JUNO 探测器结构示意图(a)^[2]和 WCD 探测器安装图(b)

光学透明度以及极低的放射性核素含量,满足探测器长期稳定运行的要求。在WCD里,还安装有用于PMT时间与电荷刻度的LED系统、监测水衰减长度的装置。

主动地磁屏蔽系统是针对大尺寸PMT在环境地磁场中性能问题的创新性解决方案。由于实验大厅存在0.4~0.5 G的地磁场,若不加以屏蔽,将使不同朝向的大尺寸PMT光电探测效率出现严重且不均匀的下降。JUNO采用主动线圈磁场补偿技术^[3],保障了CD内PMT性能的均匀性与稳定性。

TT位于水池顶部,覆盖约60%的顶部中间区域。JUNO复用了OPERA实验的塑料闪烁体模块,并将其按垂直距离间隔1.5 m放置了三层以组成顶部径迹探测器^[4]。TT能高精度的对 μ 子进行三维径迹重建,为发展精细的本底模型提供关键输入。

RPC作为TT的补充,部署于TT支撑桥两侧未覆盖的水池顶部区域,旨在实现水池顶部 μ 子探测的无死角覆盖。该系统复用了羊八井ARGO实验的成熟RPC模块^[5]。为确保在复杂且高湿的地下环境中RPC稳定运行,使用充满干燥气体的气袋包裹住整个探测器装置。

自2015年启动基建以来,经过近十年的设计、研制、安装与调试,JUNO反符合探测器系统于2024年底全面建成,并于2025年伴随CD完成灌装后投入物理运行。初步运行数据令人振奋,所有PMT通道的暗噪声率、增益稳定性均表现优异。性能卓越

的反符合探测器系统,不仅为JUNO确定中微子质量顺序和精确测量振荡参数等这些物理目标构筑了坚实屏障,也为开展大气中微子、超新星中微子以及宇宙线物理等多维度前沿研究开辟了广阔的窗口。

二、水切伦科夫探测器

1. 探测器介绍

WCD是整个反符合探测器系统的核心组成部分,是为中心探测器屏蔽本底的最关键的屏障。为高效收集 μ 子穿过WCD时产生的光信号,CD的不锈钢球壳结构外侧安装了2 404只20英寸微通道板型光电倍增管(MCP-PMT),其光阴极全部背离球心朝向外外部。为进一步增强光收集效率并隔绝CD与WCD之间的光串扰,在不锈钢球壳外表面、水池内壁及底部完全覆盖了高反射率的复合Tyvek膜,反射率高达95%以上。此外,为增强大气中微子探测能力,在水池壁上端安装了四圈PMT,共包含348只20英寸MCP-PMT以及600只从大亚湾实验退役的8英寸滨松PMT(R5912型)。这些PMT的光阴极朝向水池内部(即CD方向),不仅提高宇宙线 μ 子的探测效率,更旨在通过与CD的联合测量增强鉴别和重建大气中微子事例的能力。WCD总共使用了2 752只20英寸MCP-PMT和600只8英寸PMT。8英寸PMT工作高压根据工作增益(约 1×10^7)设定,

平均暗计数率约为 4 kHz。20 英寸 MCP-PMT 的工作高压是基于对探测效率、单光电子谱、单通道触发阈值以及闪烁光概率等因素的综合优化来设定的。目前 MCP-PMT 的平均工作高压在 1 500 V, 平均增益约为 4.0×10^6 , 所有 PMT 的增益在运行期间均表现出优异的稳定性。球面上的 MCP-PMT 平均暗噪声率大约 36 kHz, 水池壁顶端 MCP-PMT 的平均暗噪声率大约 18 kHz。不同安装位置的 MCP-PMT 暗噪声率差别主要是由于球面上的 MCP-PMT 安装在磁屏蔽线圈内, 受地磁影响较小。

2. μ 子探测性能

WCD 最重要的性能指标是对 μ 子的探测效率。除优化水池内 PMT 的排布以外, WCD 的 PMT 阵列规模庞大, 其电子学触发系统必须在高效捕捉 μ 子产生的切伦科夫光簇射与抑制各类噪声(如 PMT 暗计数、岩石放射性引发的微弱切伦科夫光)之间取得平衡。为此, WCD 采用了分区与交叉触发逻辑。将球面上的 PMT 阵列划分为 10 个区域(上部 5 个, 下部 5 个), 并将池壁上的 PMT 环划分为 3 个独立区域。在每个区域内, 设定一个事例触发阈值, 通常要求约 30 个 PMT 在 256 ns 的触发时间窗口内“着火”(即 PMT 信号超过单通道阈值)。达到此事例阈值即产生一个事例触发信号。为进一步降低由 PMT 暗噪声或 PMT 附近岩石等材料的放射性引起的误触发, 每个区域的事例触发阈值可独立设置, 且触发系统还设置了交叉区域触发的条件: 要求任意两个相邻区域的着火 PMT 个数之和超过一个更高的联合阈值(约 40 个 PMT)。这种设计使得只有能量沉积足够高、空间分布足够广的粒子(如 μ 子)才能满足全局触发条件, 从而在保持高 μ 子探测效率的同时, 将非 μ 子本底触发率降至极低水平。

探测器投入运行后, 其性能得到了实验数据的全面验证。由于 CD 对 μ 子具有接近 100% 的探测效率, 那些在 CD 中被探测到但未被 WCD 标记的 μ 子事例, 即可用来计算 WCD 的探测效率。如图 2 所示, 在整个数据采集期间, WCD 对穿过 CD 液闪

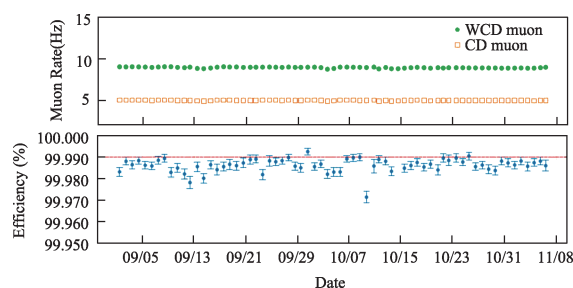


图 2 CD 和 WP muon 事例率以及 WP 对 CD mu 的探测效率^[2]

体积的 μ 子探测效率接近 100%, 仅在顶部连接 CD 与刻度间烟囱的几何区域存在微不足道的效率损失。WCD 对 μ 子的超过 99.9% 的极高效率意味着, 几乎每一个可能在中微子靶区产生干扰本底的宇宙线 μ 子都会被 WCD 准确识别。

当前 WCD 的 μ 子重建主要采用电荷聚类算法: 通过识别 PMT 电荷分布中局部的高电荷沉积簇, 可定位 μ 子进入和离开的大致位置, 进而将簇中心连线以重建径迹。此外也发展了基于深度学习的方法, 例如将 PMT 电荷信息基于 DeepSphere 模型映射到球面像素或基于 CoAtNet 模型映射到二维平面像素进行处理, 这些模型被训练以直接预测 μ 子的人射与出射点。几种重建方法以及与模拟中宇宙线的天顶角和方位角分布如图 3 所示, 重建得到的 μ 子天顶角和方位角分布与基于精细地形模拟的宇宙线预期分布高度一致, 验证了 WCD 径迹重建的可靠性。

3. 超纯水制备与循环系统

水的透明度会严重影响 CD 和 WCD 的光产额, 而水的放射性本底水平则直接关系到 CD 的本底水平。启动灌装液闪前, 还需要往 CD 灌注约 2.3 万吨超纯水以便后续置换成液闪, 这部分超纯水会直接接触液闪和有机玻璃球内表面。此外有机玻璃球壳及支撑结构对温度波动极为敏感, 水温变化直接关系到有机玻璃球的长期结构安全。为此 JUNO 对超纯水的衰减长度、放射性水平、温度等性能参数提出了极其严苛的要求。

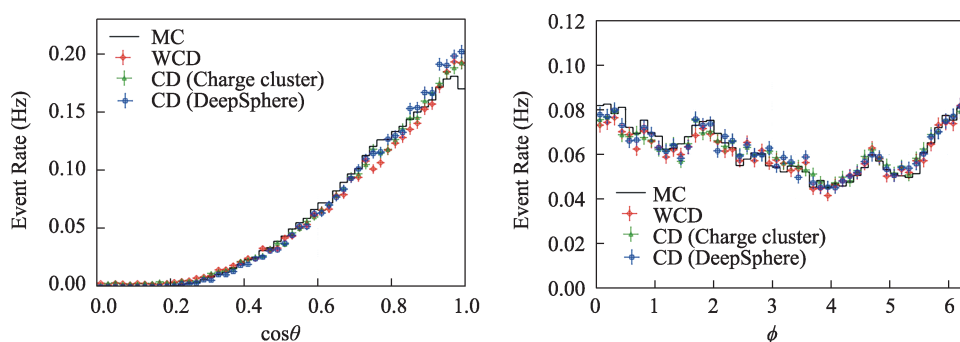


图3 不同 μ 子径迹重建算法的天顶角和方位角的重建结果与模拟的对比^[1]

JUNO 建设了一套技术先进、规模庞大的低放射性超纯水制备与循环系统。该系统如图4所示,采用“集中预处理、深度地下纯化”的两级架构。地面系统首先对自来水进行多级处理产出初级纯水。随后,初级纯水通过一条长达1.3公里的专用不锈钢管道泵送至地下水系统以进一步处理,最终产生实验所需的超纯水。

超纯水系统的最大的挑战来自于放射性惰性气体氡(^{222}Rn)的去除。氡极易溶于水,且会持续衰变产生一系列子体核素,构成重要的本底来源。为此,JUNO 自主研发并集成了创新的“微气泡注氮+多级膜脱气”在线氡去除装置。该装置首先利用微气泡发生器向水流中注入过饱和的高纯氮气,形成海量微米级气泡。随后,水流经过多级内的疏水性微孔中空纤维束,溶解的氡会被高效剥离至抽真空

的膜另一侧并被排出系统。实测表明,该组合工艺对 ^{222}Rn 的去除效率超过99.9%,能将出水中的氡活度稳定控制在小于10 mBq/m³的极低水平,实现从入水时的10 Bq/m³降低上千倍以满足实验低本底需求^[6]。对于 ^{226}Ra 的去除,主要依靠多级软化树脂和反渗透膜来实现了超过99.99%的去除效率,从进水约 4×10^5 $\mu\text{Bq/m}^3$ 降至4 $\mu\text{Bq/m}^3$ 以下,实现超过五个数量级的降低^[7]。

为保障CD有机玻璃球壳的结构安全且为浸没水中的大量电子学提供有效的散热环境。超纯水系统实现了灌装期16.5~21.5 $^{\circ}\text{C}$ 可调、运行期 21 ± 1 $^{\circ}\text{C}$ 的严格温控需求。通过计算流体动力学模拟优化布水器布局,形成“上下双向进水、中部区域回水”的循环流场,并配置三级板式换热器和对通往CD区域与外层水池的供水实施上下分路独立调

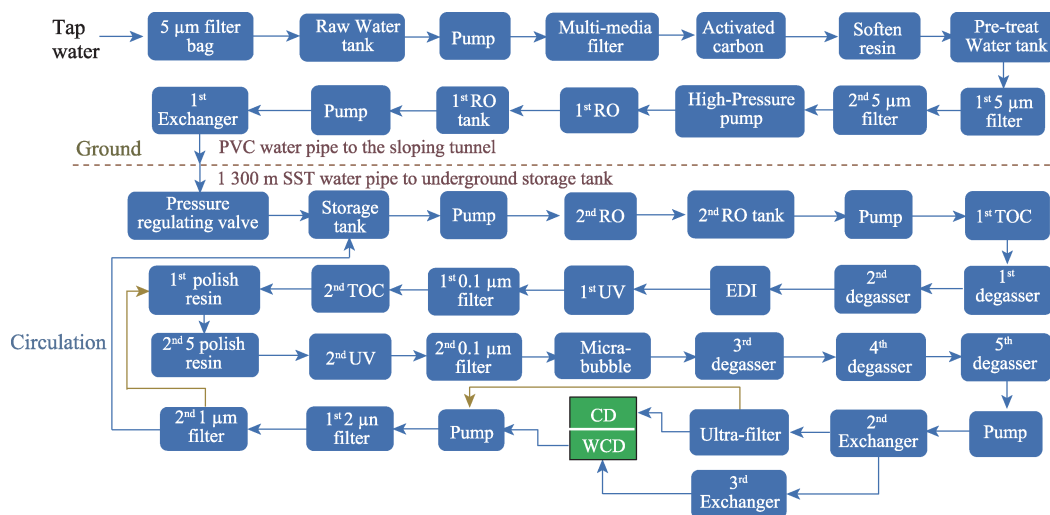


图4 江门中微子实验100吨/小时的水系统流程^[6]

节。实际运行表明,该系统成功将CD周边水温波动控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,水池内4万吨水体温度分布均匀,有效支撑了有机玻璃球的结构完整性、液体闪烁体的性能稳定以及电子学系统的可靠工作。该温控系统的稳定运行,为JUNO探测器实现其超高精度物理测量目标提供了至关重要的环境保障。

4. LED刻度系统

在WCD中,JUNO设计并安装了两套独立工作的LED刻度系统。其中一套LEC刻度系统是自主研发的固定式水衰减长度监测装置。该装置安装在水池底部中心,由一个LED点光源和五只位于不同距离(最近约2 m,最远约24 m)的20英寸MCP-PMT组成。每个PMT配有精密设计的遮光罩,以屏蔽来自水池内其他结构或材料的反射光干扰。测量时,LED发出400 nm的脉冲光,通过测量不同距离处PMT接收到的光强信号,可直接拟合出水的衰减长度。自2024年12月灌水以来,该装置定期测量,清晰记录了水质改善的过程,如图5所示。初始阶段衰减长度约25 m,随着2025年2月水循环系统的启动,衰减长度迅速提升并最终稳定在70 m以上,直观印证了水循环纯化系统的卓越性能。

为对WCD中所有PMT进行时间和电荷响应刻度,JUNO在水池内布置了由135个LED刻度单元组成的刻度系统。每个单元内封装四种波长(紫外、蓝、绿、红)的LED,这些LED被封装在由散射材

料制成的球体内,以形成一个各向同性发光的均匀发光体。这些刻度球被分为六层,系统地布置在水池的壁面和底部,以使LED发出的光可覆盖所有的PMT。此外利用这套LEC系统也可以去测量水池内不同区域的水衰减长度。两套LEC刻度系统独立工作,对衰减长度的测量可相互验证。

三、主动地磁屏蔽系统

PMT的光电探测效率(PDE)是其核心性能参数之一。在磁场环境中,从光阴极发射的光电子在向第一打拿极(或微通道板入口)加速运动时,其轨迹会受到洛伦兹力影响而发生偏转。若偏转严重,光电子可能无法有效进入倍增区域,导致PMT的增益和整体探测效率显著下降。对于JUNO所使用的20英寸PMT,其电子渡越路径长,对磁场尤为敏感。江门地下实验大厅的地磁场强度为0.4~0.5 G。如图2所示是PMT在不同磁场强度下的探测效率标定结果。由图2可知在江门环境下,不同空间朝向的PMT其PDE可能发生高达50%~60%的非均匀性下降。这将对CD的顶点和能量重建的分辨率以及均匀性构成重大影响。

为解决这一问题,JUNO采用了主动线圈磁场补偿技术。在不锈钢球壳网架上安装了载流线圈,其可以在PMT工作区域主动产生一个与地磁场方向相反、大小可调的磁场,从而大幅度抵消地磁,以减小地磁场的影响。这些线圈垂直于地磁场的主要水平分量方向,对称地布设在支撑CD的不锈钢球壳网架外围,形成一个与探测器几何相匹配的球形屏蔽层。每个线圈的匝数、半径、空间位置以及需要通入的电流值均经过有限元模拟精密计算,以确保在整个PMT阵列覆盖的庞大空间内达到最优的补偿效果。

该地磁屏蔽系统投入运行后,使用高精度磁强计对整个探测器空间进行了网格化扫描测量。CD的PMT所在核心区域,剩余磁场的最大值被压制在0.1 G以下,平均值约为0.05 G;在WCD不锈钢网架

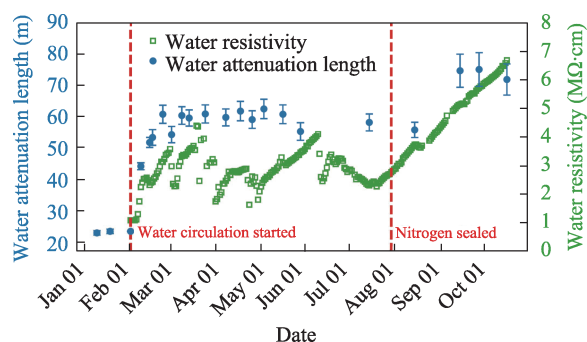


图5 2025年的长期水衰减长度监测结果。蓝色点是水衰减长度随着时间的变化,绿色的点是水池回水里电阻率随着水循环的变化^[2]

球壳外的PMT所处区域,剩余磁场也普遍低于0.2 G。这意味着地磁场强度被削弱了约一个数量级,达到了PMT性能不受显著影响的水平。由图6的PMT效率标定研究结果可知,在0.1 G以下的弱磁场中,PMT的PDE下降通常可控制在1%以内,确保了所有PMT,无论其安装朝向如何,都能在一个对其性能影响微乎其微的均匀弱磁场环境中工作。继2025年2月磁屏蔽系统开启后,PMT的单光电子谱与探测效率保持稳定^[2],说明地磁屏蔽系统长期工作状态良好。

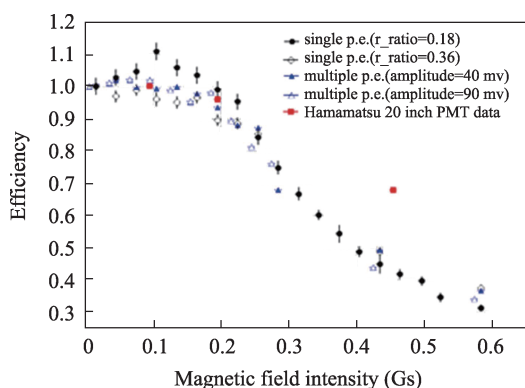


图6 不同光电二极管(LED)光强下测量的PMT探测效率与磁场强度的关系^[1]

四、顶部径迹探测器

TT是JUNO反符合探测器系统中提供 μ 子精确径迹信息的关键子系统。它不仅作为高效的 μ 子探测器,更能通过精确的径迹重建加深对 μ 子产生的次级粒子本底的理解和扣除。

JUNO在复用了OPERA实验的塑料闪烁体模块的同时配备了全新的电子学系统与支撑机械结构。其基本探测单元是长达6.86 m、截面为2.64 cm $\times$ 1.06 cm的塑料闪烁体条。每条闪烁体内部嵌入一根波长移位光纤,用于收集闪烁光。闪烁体条外表面包裹二氧化钛反射膜,以增加光收集效率并避免不同闪烁体条之间的干扰。64根这样的闪烁体条并排排列,组成一个探测模块,两端的光纤分别耦合至一个64通道的多阳极光电倍增管(滨松H7546)进行读出。4个模块并排形成的阵列与另外4个模

块并排形成的阵列相互旋转90度叠放在一起并安装在一个支撑框架上,最终构成一面尺寸约为6.8 m $\times$ 6.8 m的探测墙。通过一个墙内的击中信息即可确定 μ 子穿过该墙的二维坐标(X和Y)。如图7所示,整个TT系统由三层这样的探测墙水平排列组成,共包含62面探测墙,总计使用了31 744根闪烁体条和63 488个读出通道。

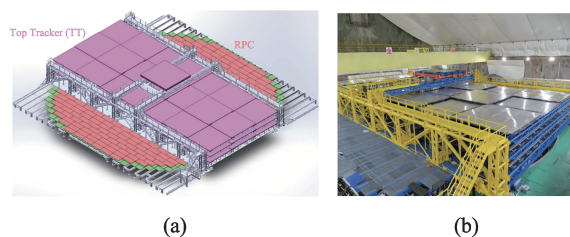


图7 水池顶部的TT探测器和RPC探测器结构示意图(a)和TT完成安装图(b)

TT最大的挑战是相对于muon事例率(约4 Hz),环境放射性造成的事例率极高,导致单通道噪声计数率可达kHz量级。为应对这一挑战,JUNO为TT全新设计了前端电子学与触发系统。触发系统采用两级筛选机制以压低本底:第一级触发要求同一面墙内正交的两层在100 ns内同时有信号;满足L1的信息被发送至全局触发单元,第二级触发要求在三层中的至少三面墙在300 ns内均产生了L1触发。这套严格的符合逻辑成功地将事例率从MHz量级的原始噪声中压低至kHz量级,使其能够被数据获取系统有效处理。TT探测器于2025年初在水池灌装完成后开始安装,并于2025年6月完成全部集成与调试,随后投入稳定运行。

TT最大的功能是可以精确重建 μ 子的径迹,从而为CD或WCD的 μ 子重建算法提供可靠的刻度样本,且利用其精确的径迹信息可以帮助理解 μ 子在CD中产生的级联粒子的空间及时间分布。TT高精度重建 μ 子径迹的原理是基于三层闪烁体提供的空间点信息: μ 子穿过每面墙时,由正交排列的闪烁体条给出一个二维坐标点;三层墙共提供至少三个空间点,通过 χ^2 最小化拟合即可得到一条三维直线径迹。得益于约2.64 cm $\times$ 2.64 cm的精细空间粒

度与约 1.5 m 的层间距,模拟研究预期 TT 可实现约 0.2 度的中位值角分辨率,对应在 WCD 底部投影的位置误差约为 20 cm。通过将 TT 重建的高精度径迹与 WCD、CD 信号进行时间与空间联合分析,不仅能进一步优化各子系统的径迹重建算法,还能将 μ 子径迹外推至 CD 内部,从而更精确地估计 μ 子诱发的快中子、放射性同位素(如 ^9Li 、 ^8He)等关键本底的产额与空间分布,为本底信号扣除奠定坚实基础。

五、阻性板探测器

为弥补 TT 无法完全覆盖水池顶部,在水池上方 TT 支撑桥的两侧区域,部署了 RPC 作为 μ 子探测器,如图 7 所示。RPC 是一种利用小气隙中的气体放大功能来探测带电粒子的气体探测器,被广泛用于高能物理与宇宙线实验中,具有时间响应快、探测效率高、可大面积覆盖等特点。

该 RPC 系统复用羊八井 ARGO 实验的模块。每个 RPC 模块为单层结构,尺寸为 $2.85\text{ m}\times 1.23\text{ m}$ 。每个 RPC 模块由两层高阻电极板(酚醛树脂材料)构成,中间夹有约 2 毫米的薄层气体间隙。电极板外侧涂有导电层用于施加高压,信号则由布置在电极外侧的铜板读出电极采集。铜板读出条被划分为 10 个 pad,每个 pad 连接一个内置的甄别器芯片,直接将模拟信号转化为数字信号输出。当带电粒子(如 μ 子)穿过 RPC 的气体间隙时,会使气体分子电离,产生电子-离子对。在强电场作用下,电子被加速并引发雪崩效应,进而发展为流光电晕,在电极上感应出可被读出的电信号。JUNO 采用五层 RPC 模块堆叠的方案,相邻层在平面上旋转 90 度以获得 X-Y 二维信息,并且在垂直方向上层间交错排列以减小死区。采用五层中至少三层有击中的读出逻辑,可在大幅降低暗噪声偶然符合的同时,保持对 μ 子的高探测效率,预期其探测效率约为 99%。

针对地下实验环境,对 RPC 配备了完善的气体系统。工作气体($\text{Ar}/\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4/\text{C}_4\text{H}_{10}$)由地面气体间精确配比后,通过长约 1.2 km 的管路输送至地下,再分为 16 个支路为所有 RPC 模块供气。此外 JUNO

设计了全新的后端电子学系统,其同时基于时间数字化和小白兔定时技术能够精确记录每个 pad 的击中时间,并通过以太网将数据汇总至数据获取系统。

目前,RPC 探测器正在完成所有模块的安装、气体管路连接和电子学集成调试。预期它将和 TT 探测器协同工作,确保水池顶部区域 μ 子探测的无死角覆盖,为物理分析提供可靠的 μ 子探测数据。

六、展望

JUNO 反符合探测器系统的全面建成与顺利投入运行,是实验迈向科学目标的关键里程碑。这套集成度高、规模庞大的系统,在超纯水制备与循环、地磁主动屏蔽、光电倍增管及电子学、区域触发与径迹重建等方面均实现了显著的技术创新与工程突破。目前,各子系统状态稳定,性能数据优异。

随着 JUNO 实验进入长期稳定取数阶段,反符合探测器系统除在反应堆中微子、太阳中微子、超新星中微子、质子衰变等物理信号的本底排除方面作出巨大贡献外,也有望在大气中微子鉴别及事例重建等方面提供帮助。反符合探测器系统长期运行的稳定性数据,也为未来更大规模的地下粒子探测器建设与运行提供了极其重要的工程经验和技術储备。

参考文献

- [1] Angel Abusleme et al. JUNO physics and detector[J]. Prog. Part. Nucl. Phys., 2022, 123: 10392.
- [2] Angel Abusleme et al. Initial performance results of the JUNO detector [J], arXiv:2511.14590.
- [3] G. Zhang et al. The study of active geomagnetic shielding coils system for JUNO [J], JINST, 2021, 16 T10004.
- [4] Angel Abusleme et al. The JUNO experiment Top Tracker [J], Nucl. Instrum. Meth. A, 2023, 1057: 168680.
- [5] B. Bartoli et al. The analog Resistive Plate Chamber detector of the ARGO-YBJ experiment, Astropart. Phys., 2015, 67 p.47.
- [6] C.B.Z. Luo et al, Measurement of radon concentration in the output water of the 100 t/h ultrapure water system at the Jiangmen Underground Neutrino Observatory[J], arXiv:2510.17082.
- [7] X. T. Xu et al, Producing $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ level low ^{226}Ra ultrapure water for the Jiangmen Underground Neutrino Observatory[J].