

中心探测器设计与研制

衡月昆

(中国科学院高能物理研究所 100049)

江门中微子实验将设计、研制并运行一个国际领先的中微子实验站,旨在测定中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数,并进行大气中微子、太阳中微子、超新星中微子、地球中微子等其他多项科学前沿研究。一般中微子实验主要由两种探测器组成,一种是探测中微子的中心探测器(CD),另一种是探测本底的反符合探测器。JUNO的中心探测器同时满足大体积、高精度、低本底等严苛要求,是整个实验工程的技术核心与难点^[1]。本文将详细介绍这一世界级探测器的设计理念、关键技术与研制历程,呈现其背后的科学与工程智慧。

一、设计目标与核心挑战

JUNO的首要物理目标是确定中微子质量次序,其方法是在反应堆50~55公里的中微子振荡极大值附近精确测量反应堆中微子能谱,为此需要:

1) 超高精度:能量分辨率需达到3%@1 MeV,比之前国际同类设备精度提升一倍^[2,3]。为此需要把中微子在液闪中产生的闪烁光尽量多地被收集,这就需要增大液闪透光率(即提高衰减长度)、增大光电探测面积比例、提高光电倍增管的探测效率等。

2) 巨大体量:需要2万吨液体闪烁体作为探测中微子的靶物质,这是之前世界最大的液闪探测器的20倍。为什么需要这么大呢?因为中微子与物质发生相互作用的截面极低,53公里远的台山核电站与阳江核电站产生的反应堆中微子在2万吨液闪探测器中被探测到的事例数约为50个/天,要精确测量中微子能谱,统计上需要探测约10万个中微子事例,这需要大约6年时间。而如果使用之前世界最大的1千吨液闪探测器,探测10万个中微子事例

需要约120年。

3) 极低本底:因为天然放射性物质在液闪中也会产生信号,有可能和中微子信号发生混淆,影响中微子的探测精度。为了提高信噪比,需要尽量压低天然放射性本底的影响。举例来说²³⁸U和²³²Th在液闪中的质量比要控制在 10^{-17} g/g量级,相当于在2万吨液闪中所有灰尘的总量要在8 mg以内。

二、总体设计方案

自2008年JUNO实验想法提出后,陆续有十多种中心探测器的设计方案,其核心要点有三个:第一,如何承载2万吨液闪,用气球还是有机玻璃球?第二,如何承载整体结构,用钢罐还是钢框架?第三,探测器放在何种液体中从而屏蔽环境材料的放射性本底,用有机液体如白油或烷基苯还是用纯水?

为此,科研团队经过两年多的方案论证,进行了模型实验和理论计算,在满足物理要求、可靠性、可行性与经济性后,确定了以有机玻璃球承载液闪,以钢框架作主结构支撑探测器,以纯水作屏蔽的方案。其后,又经过约两年时间,进行了实验验证,完成了工程深化设计,具体如下:

1) 结构布局:探测器核心是直径35.4米、厚度120毫米的有机玻璃球,用于装载2万吨液体闪烁体,其表面积最小化的球形设计可优化光电倍增管(PMT)的布置效率。有机玻璃球外侧是直径41.1米的不锈钢网壳结构,由23个纬向梁和30个经向梁组成,既承担有机玻璃球的支撑任务,又作为PMT的安装载体。整个探测器沉浸在43.5米直径的纯水池中,纯水既作为放射性屏蔽层,又构成水

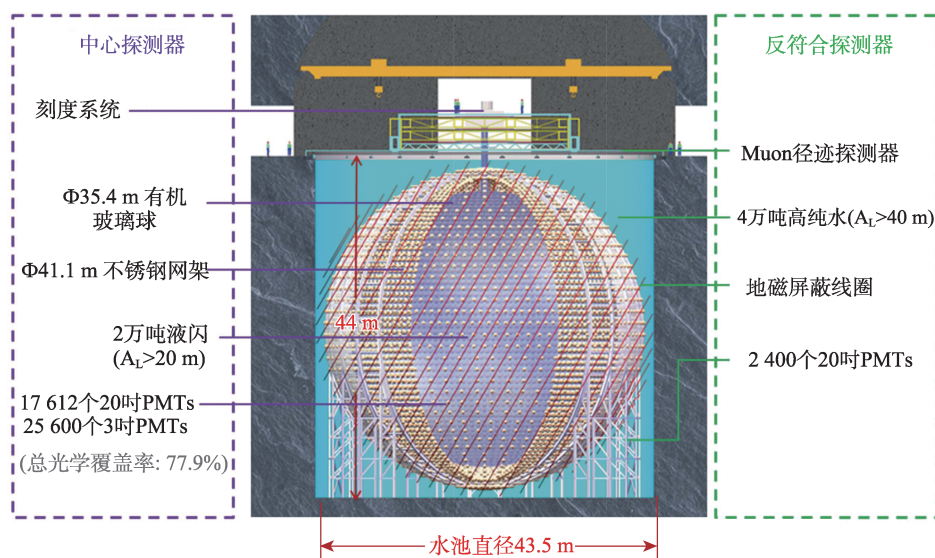


图1 JUNO探测器示意图

契仑柯夫探测器,与顶部径迹探测器共同组成反符合系统(VETO),有效剔除宇宙线本底。

2) 关键设计参数:有机玻璃球总重约600吨,由263块球面板和上下两个烟囱组成,通过590个支撑节点与不锈钢网壳连接,节点分布满足上下对称要求,确保受力均匀。不锈钢网壳总重约900吨,采用30榀平面桁架柱作为支撑,通过12万套高强度螺栓连接,安装精度达到毫米量级。光收集系统由17 600只20英寸PMT和25 600只3英寸PMT组成,光电覆盖率超过75%,光子探测效率大于27%,确保液体闪烁体产生的微弱光信号能被高效捕获。不锈钢网壳内表面和光电倍增管顶端到有机玻璃球之间屏蔽用的纯水厚度分别为2.2米和1.4米。

三、关键技术突破

中心探测器的研制突破了一系列世界级工程技术难题,形成了多项自主创新成果,为大科学装置建设提供了宝贵经验。

1) 超大尺寸有机玻璃球研制:有机玻璃球是探测器的核心容器,其研制需同时满足高透光性、低放射性、强力学性能三大要求。研制团队开发了专用有机玻璃配方,去除商业产品中的增塑剂和抗

UV成分,使420 nm波长下的透光率达到96.5%,且蠕变断裂时间满足20年运行需求。为控制放射性本底,建立了专用生产线:原料甲基丙烯酸甲酯(MMA)经400目和1 000目双重过滤,纯度达到99.9%以上;模具在洁净室用超纯水清洗;成品面板经100 μm深度打磨抛光,去除表面可能的放射性污染。最终产品的 ^{238}U 和 ^{232}Th 含量分别控制在0.6 ppt和0.7 ppt,远低于10 ppt的最初设计要求。在现场安装方面,采用“分层粘接+大体量聚合”技术,将263块球面板从顶部到底部逐层粘接,每层的横竖缝同时注料聚合,单次粘接长度可达150米,总粘接长度超过2千米。创新的支撑节点设计,使单个节点承载能力超过900 kN,满足有机玻璃球在装满液体后的巨大浮力(约 $3 \times 10^7 \text{ N}$)需求,且应力控制在3.5 MPa以下,保障长期运行安全。考虑有机玻璃和不锈钢的热膨胀系数的差异、保证结构安全,安装环境温度控制在 $21 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$,与长期运行工况下温度一致。

有机玻璃球直接接触液闪,在其研制过程中进行了严格的放射性本底控制,比如:a)有机玻璃板材在储存和运输中都贴膜保护;b)有机玻璃球安装过程中,内外表面的安装环境分别保持10 000级和

100000 级洁净度;c)为了防止空气中氩的衰变子体对有机玻璃表面的污染,我们在有机玻璃球内表面贴上带水溶胶的保护纸;d)在有机玻璃球建设完成后,需要把球内空间的空气洁净度改到 100 级水平,为控制成本和安全,放弃了人造空气置换的方案,创新性地采用雾化降尘方法;e)有机玻璃球建设完成后,使用 3D 旋转气压清洗技术,先把水溶胶的纸冲下来,再把内表面冲洗干净。

2) 高精度不锈钢网壳结构:不锈钢网壳不仅是支撑结构,更是 PMT 的安装基础,其精度直接影响光收集效率。定制低放射性 304 不锈钢材料避免添加废钢导致的放射性污染,满足实验对低本底的严格要求。为保证有机玻璃球受力安全可控,590 个不锈钢节点中底部 220 个采用了碟簧结构。为实现毫米级安装精度,采用了多项创新技术:a)对厚度 ≤ 20 mm 的钢板采用激光切割,厚度 >20 mm 的采用水刀切割,减少热影响区;b)模块在厂家的焊接过程采用“由内向外、先短后长”的顺序,严格控制不锈钢模块焊接变形,配合振动时效处理消除残余应力,全部模块在厂家进行了试组装;c)在现场安装时,使用 12 万套高强度螺栓连接整个结构。为什么不采用焊接呢?一是为了安全,二是为了洁净,三是为了安装精度。项目组专门研发了采用超音速火焰热喷涂技术,将不锈钢连接面抗滑移系数从 0.2 提升至 0.5,突破国内技术瓶颈;为确保可靠性,特别研发的 10.9 级不锈钢环槽铆钉,预紧力波动范围小于 3%,远优于普通螺栓的 12%,解决了地下工程动火受限情况下的高效连接问题。

3) 灌注、溢流与循环(FOC)系统:该系统负责纯水的灌注、液闪的置换,并提供长期稳定运行时因为液闪热胀冷缩造成的溢流功能以及液闪再次纯化需要的循环功能等。为了安全可控,液体灌注过程放弃了先氮气置换有机玻璃球内空气、再灌注液闪的方法,采用“水置换法”灌装:先向有机玻璃球和纯水池同时注入超纯水、保持球内水位和纯水池内水位一致;再通过顶部烟囱注入液体闪烁体,同时从底部排出水,保持液闪灌注速度和纯水排出速度

一致。考虑到温度变化 1 摄氏度,2 万吨液闪体积变化约 20 立方米,会造成液位的较大变化,影响探测器安全。为此,FOC 系统设计了两个 50 m^3 的溢流罐和一个存储罐,可被动吸收一定温度变化范围($\pm 0.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内)导致的液体体积变化,超过该范围时通过主动控制调节,确保液体闪烁体液位变化在可接受范围内。FOC 系统可实现把有机玻璃球内的液体闪烁体从球底抽出来,进行在线净化,同时把纯化好的液闪从球顶灌入。FOC 是液闪进入中心探测器的最后一关,本底控制极其严格:a)其罐体和管路采用定制的低本底 316 型号不锈钢制造;b)为减少表面积从而减少氩气释放,内表面都经过电解抛光;c)内表面经过二十多道清洗和检测流程;d)数百个连接需可靠密封,空气中的连接不能漏氩,水中的连接不能漏液,比如:下烟囱置于纯水中,内部是液闪,长期置于 40 米深液压环境中,需保证 30 年不漏。

四、研制历程

中心探测器的设计和研制经历了设计优化、原型验证、批量生产、现场安装、液体灌注等多个阶段,凝聚了国内外诸多单位的协同努力:

- 2008 年,提出通过精确测量中基线反应堆中微子能谱确定中微子质量次序的物理想法;
- 2012 年,纯水作为屏蔽体、有机玻璃球作为容器、不锈钢框架作为支撑结构的中心探测器方案首次提出;
- 2013 年,江门中微子实验获得中国科学院先导专项批准立项;
- 2015 年,土建施工开始;合作组论证确定中心探测器方案;
- 2017 年,中心探测器工程深化设计完成,进行各种验证实验;
- 2018 年,各系统陆续进入生产阶段;
- 2021 年底,地下实验厅交付使用,探测器开始进场安装;

- 2022年1月至6月,不锈钢网壳主体结构安装完成;
- 2022年7月至2024年9月,有机玻璃球完成安装;
- 2024年12月开始灌注纯水;
- 2025年2月启动液体闪烁体置换;
- 2025年8月完成全部灌装工作,正式进入实验取数阶段。

安装过程中,项目组与合作厂家通力合作,克服了诸多困难,开发了多种专用设备与技术,比如:a)为保证不锈钢主体结构预埋件在水泥浇筑振捣过程的毫米级精度控制,专门研制了大尺寸高精度固定工装;b)专门研发了半径可扩大可缩小、高度可自动升降的高精度有机玻璃安装平台;c)专门研发采用有机玻璃大体量横竖缝一次浇筑聚合技术,采用折中退火方案,控制退火产生的应力;d)克服了有机玻璃球粘接缺陷修补等技术难题,研发了环氧胶补强薄弱区域等方法;e)因为市场上没有可以现场使用的有机玻璃应力测量装置,自主研发了应力测量仪,基于光弹性原理,测量精度优于5%,可现场监测粘接缝和修补区域的应力分布;f)光纤光栅传感器系统实时监测支撑节点的受力状态,这对直径为60 mm和85毫米不锈钢连接杆的受力测量,精度达到1 kN,确保安装过程与运行期间的结构安全。

整个液体灌注过程耗时约8个月,随着灌注的进行中心探测器所受浮力越来越大,需严格监控液位和撑杆杆力,确保探测器安全。灌注过程中水和液闪都是在管道或罐体中、无法直接观察,FOC系统通过几十个传感器实时监测液位、流速、气压、温度等信息,采用PLC控制系统指挥操作阀门与泵组,不容有失。同时在整个液体灌注过程需要中心探测器、水系统、液闪系统等串联协调工作,特别需要确保没有漏气。

五、总结与展望

江门中微子实验中心探测器的设计与研制,是我国在大型粒子物理实验装置领域的一次重大突

破,其2万吨级的规模、3%的能量分辨率和极低的放射性本底,使其成为世界上性能最先进的中微子探测器之一,也是同期三大中微子实验装置中最早建成的^[4]。以该探测器的卓越性能为基础,分析投入运行后的59天有效数据,江门中微子实验(JUNO)已对所谓的太阳中微子振荡参数 θ_{12} 与 Δm_{21}^2 完成测量,其测量精度较此前实验提升了1.5至1.8倍,刷新世界纪录^[5]。该探测器的成功建成,不仅为中微子实验等前沿物理课题提供了强大的实验平台,更彰显了我国在大科学工程领域的系统集成能力和自主创新实力。

未来,随着探测器的正式运行,中心探测器将持续收集高质量的中微子数据,有望在中微子物理研究中取得重大突破。同时,其研制过程中积累的超大体积容器研制、低本底控制、高精度安装、透明材料应力测量等诸多技术,为我国后续的大型科学装置建设提供重要参考,推动相关领域的技术进步与产业升级。对于物理爱好者和科研工作者而言,中心探测器的设计与研制历程也为我们展示了如何将基础物理的严苛要求转化为工程现实,诠释了科学探索与工程技术相互促进的深刻内涵。

参考文献

- [1] JUNO collaboration, The design and technology development of the JUNO central detector, *Eur. Phys. J. Plus* (2024) 139: 1128, <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05830-8>.
- [2] F.Suekane, K. Collaboration et al., *KamLAND, Progress in Particle and Nuclear Physics* 57(1), 106-126(2006). <https://www.science-direct.com/science/article/abs/pii/S0146641005001559>.
- [3] G.Alimonti, C. Arpesella, et al., The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 600(3), 568-593(2009). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2008.11.076>.
- [4] Deep Underground Neutrino Experiment official site, <https://www.dunescience.org/>.
Hyper-Kamiokande official website, <https://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>. 这是与JUNO并列的两个大型中微子实验。
- [5] https://english.ihep.cas.cn/nw/han/y25/202511/t20251119_1132377.html.