

江门中微子实验站位置测量方案设计与实施

王 铜 董 岚 罗 涛 梁 静 刘 璨 马 娜 朱洪岩 何振强 柯志勇

(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 为了对中微子质量顺序等前沿科学进行研究, 江门中微子实验正在进行选址建设中。介绍了江门实验站与阳江核电站及台山核电站堆芯位置测量方案的设计与实施, 采用 GPS 静态观测实现控制网的测量, 并用 LGO 和自编软件对数据进行解算及坐标拟合转化。通过实际测量及数据解算, 最终得到的坐标精度为 ± 70 mm, 满足设计要求, 证明此次江门中微子实验站位置测量方案是合理可行的。

关键词 江门中微子实验, 反应堆, GPS 控制网, 距离, 精度

中图分类号 TL505

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2014.hjs.37.060604

大亚湾反应堆中微子实验项目取得了巨大成功。2012年3月项目组宣布发现新的中微子振荡模式, 在精确测量中微子混合角值 θ_{13} 方面取得国际领先。这是中国诞生的一项重大物理成果, 被称为中微子物理的一个里程碑。高能所准直组曾为大亚湾中微子实验精确测定了穿越山体、跨度 6 km 的反应堆到探测器的空间距离, 为中微子实验提供了准确的基础性数据^[1-2]。为了继续深入对中微子物理性

能的研究, 其二期工程江门中微子实验拟在广东省江门市选址建立一个实验站, 分别收集来自阳江核电站、台山核电站释放出的反应堆中微子, 以测定中微子质量顺序、精确测量中微子混合参数, 并进行其它多项科学前沿研究。实验站的具体位置要求在这两个核电站的中心轴线上, 为验证实验站选址位置的正确与否, 高能所准直组承担了实验站与阳江核电站、台山核电站的空间相互位置的测量任务。

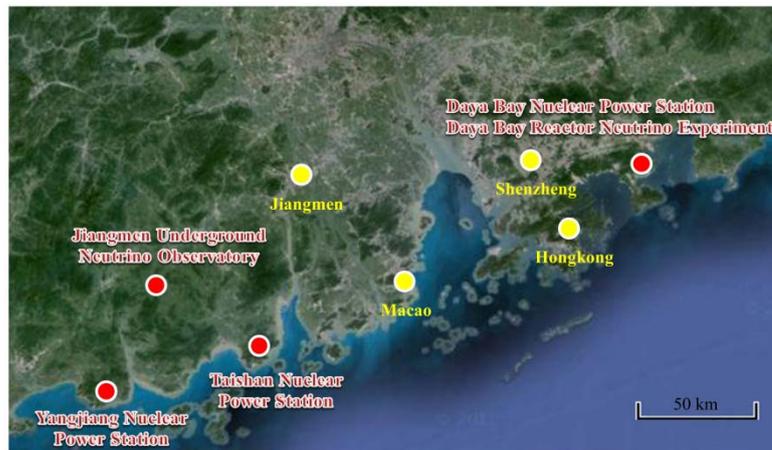


图 1 江门中微子实验站地理位置

Fig.1 Geographic location of Jiangmen underground neutrino observatory station.

1 测量方案设计

阳江核电站位于广东省阳江市, 台山核电站位于江门台山市, 两者相距约 78 km。拟建设的江门中微子实验站位于广东省江门开平市, 分别距阳江核电站及台山核电站 53 km 左右。其位置要求与这两核电站等距, 精度在 1 m 范围内。由于测量跨度大, 准直组研究制定了 GPS 控制网静态测量方案^[3]。

1.1 GPS 控制网布设

依据所在地方不同, GPS 控制网分为开平实验站控制网、台山核电站控制网、阳江核电站控制网。

在开平实验站进行地质详勘的时候, 进行过当地 1:500 的地形图测量, 地形图中标示有图根点以及实验站初址的位置。于是, 选取图中既有的三个图根点作为开平实验站 GPS 控制点, 要求此三点包

第一作者: 王铜, 男, 1987 年出生, 2010 年于武汉大学获硕士学位, 从事粒子加速器准直测量以及精密工程测量的理论、方法和技术研究
收稿日期: 2013-11-27, 修回日期: 2013-12-25

围区域覆盖实验站位置。同时,通过这三个基准点与核电站进行联测,即可将核电站位置纳入到开平实验站 1:500 地形图中。

另外,由于最终目的为获得实验站初址至核电站内反应堆堆芯的位置关系,核电站内反应堆堆芯是无法直接测量的,因此,建立台山核电站控制网以及阳江核电站控制网。核电控制网选取核电站内已有的测量用强制对中桩。这些强制对中桩的作用为反应堆的建设及运行提供基准,在台山核电站与阳江核电站内分别选取了四个强制对中桩。

本次 GPS 控制网共选取 11 个控制点,测量范围为:(1) 台山核电站控制网: TS03、TS04、TS06、TS11;(2) 阳江核电站控制网: YJ01、YJ13、YJ14、YJ34;(3) 开平实验站控制网: V002、V003、V004。



图 2 GPS 控制点
Fig.2 GPS control points.

1.2 测量仪器及方案

外业观测参考 GPS 测量规范 B 级控制网要求,选用 4 台 Leica GS15 双频双星接收机进行静态同步观测,其标称后处理精度为:水平 $\pm(3 \text{ mm}+0.5 \text{ mm}\cdot\text{km}^{-1})$,垂直 $\pm(6 \text{ mm}+0.5 \text{ mm}\cdot\text{km}^{-1})$ 。共观测 6 个时段,平均每个控制点观测 2 个时段,其中台山核电站内 4 点 2 小时、阳江核电站内 4 点 2 小时、台山核电站 2 点与阳江核电站 2 点联测 10 小时、开平实验站 2 点与台山核电站 2 点联测 8 小时、开平实验站 2 点与阳江核电站 2 点联测 8 小时以及开平实验站 2 点 2 小时。详细观测方案见表 1。

由于台山、阳江、开平三地相距较远,测量时间紧急,合理进行作业调度也是一大困难。因此,本次野外作业将人员分成 2 个小组进行 GPS 测量。对于核电控制网的测量,由于点位相互距离较近,采取适当缩短测量时间,为赶赴下一地点预留时间;对于开平实验站与核电站控制网的相互联测,考虑到控制网间的距离较远,需要长时间的观测,将观测时长控制在 8 小时左右,两组人员来回进行调动。最终,共历时 9 天完成测量。

表 1 GPS 观测方案
Table 1 Scheme of GPS observation.

序号 Sequence	观测点位 Observation points	时段长 / h Length of time
时段 1 No.1	TS03、TS04、TS06、TS11	2
时段 2 No.2	YJ01、YJ13、YJ14、YJ34	2
时段 3 No.3	TS04、TS11、YJ01、YJ13	10
时段 4 No.4	V002、V003、YJ14、YJ34	8
时段 5 No.5	V002、V004、TS03、TS06	8
时段 6 No.6	V003、V004	2

2 数据处理与分析

由于物理分析上是需要获知各点间的三维空间距离,这与传统的大地测量在椭球以及投影平面上对数据处理不同。传统的大地测量更多地服务于国民建设,数据多采用平面与高程分开处理,成果基于我国参考椭球的大地经纬度或者高斯投影平面坐标,以及基于大地水准面的高程。而对于物理探索要求,都是基于三维空间关系,因此要求整个坐标系的建立及转换都在空间三维直角坐标系下进行。

2.1 GPS 实测数据解算

采用 Leica GS15 仪器对所布设的 GPS 控制网进行了静态观测,形成本次测量所需的三维直角坐标系框架。利用 Leica LGO 处理软件^[4-5],对观测的 11 个点,共 31 条基线进行了解算。同时,在 WGS84 空间三维直角坐标系下对 GPS 控制网进行了无约束平差,得出各点坐标,最弱点的点位精度为 $\pm 40 \text{ mm}$ 。

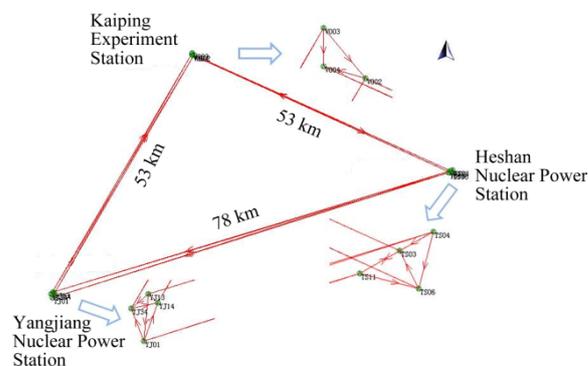


图 3 GPS 测量网形图
Fig.3 Map of GPS observation.

2.2 核电提供的已知数据

由于核电堆芯无法直接测量，只能通过间接测量核电站内的控制网点。因此，为了将阳江核电站、台山核电站的堆芯统一到 GPS 测量的坐标系统下，还需要获知各反应堆堆芯与核电控制网点的相互坐标关系。核电方面提供的具体数据如下：

(1) 台山核电站提供数据：负责提供有 4 个强制对中桩(TS03、TS04、TS06、TS11)与台山核电站堆芯的平面坐标及高程，平面采用 1980 西安坐标系，高程采用 85 国家高程基准。

(2) 阳江核电站提供数据：负责提供有 4 个强制对中桩(YJ01、YJ13、YJ14、YJ34)与阳江核电站堆芯的平面坐标及高程，平面采用阳江施工坐标系，高程采用珠江高程基准。

2.3 核电堆芯坐标计算

为了得到核电堆芯在 WGS84 统一坐标系下的坐标，将核电提供的各堆芯及控制点在核电坐标系下的坐标向 WGS84 坐标拟合^[6]。由于核电坐标系下各点的平面与高程坐标是分开的，平面系统为高斯投影后的独立坐标，高程系统基于大地水准面，需要将其转换为三维坐标。对于核电小面积区域，其平面坐标投影变形较小，其高程则需加入地球曲率改正^[7]，按此方法即可换算成三维坐标。

以阳江核电站为例，具体处理方法为：核电提供的已知数据有 YJ01、YJ13、YJ14、YJ34 四个强制对中桩以及堆芯在独立坐标系下的平面及高程坐标，将其换算为三维坐标；然后 GPS 也实测有这四个控制点在 WGS84 坐标框架下的空间三维直角坐标，以这四个公共点作最小二乘拟合转换，进而可以求得堆芯在 WGS84 坐标系下的坐标。采用高能所自行开发软件 bestfit 进行拟合计算，阳江核电站的拟合精度为 ± 8.0 mm；台山核电站的拟合精度为 ± 5.5 mm。详细见表 2 及表 3。

表 2 阳江核电坐标向 WGS84 坐标拟合偏差(mm)
Table 2 Deviations of coordinates best fit between Yangjiang nuclear plant control net and WGS84 (mm).

点名 Points name	Δx	Δy	Δz	点位偏差 Deviations
YJ01	0.4	-5.4	12.5	13.6
YJ13	0.0	2.4	-4.9	5.5
YJ14	-1.8	1.3	-4.8	5.2
YJ34	1.4	1.8	-2.8	3.6
$\sigma_x=1.1; \sigma_y=3.2; \sigma_z=7.3; \sigma=8.0$				

表 3 台山核电坐标向 WGS84 坐标拟合偏差(mm)
Table 3 Deviations of coordinates best fit between Taishan nuclear plant control net and WGS84 (mm).

点名 Points name	Δx	Δy	Δz	点位偏差 Deviations
TS03	-2.7	8.2	1.8	8.8
TS04	2.1	-3.7	-2.1	4.8
TS06	0.7	0.0	1.0	1.2
TS11	-0.1	-4.4	-0.7	4.4
$\sigma_x=1.7; \sigma_y=5.9; \sigma_z=1.5; \sigma=5.5$				

2.4 三维坐标转换至测图坐标系

在获得了开平实验站附近 1:500 地形图中图根控制点 V002、V003、V004 的 WGS84 三维坐标后，还是无法在地形图中直接判断实验站与核电的相互位置。因此，为了方便选址位置计算，还需要将 WGS84 坐标系转换至测图坐标系下。

于是通过开平实验站控制网的三个公共点 V002、V003、V004 进行坐标的最小二乘拟合转换，方法与 §2.3 相同，即可得到核电堆芯在测图坐标系下的坐标。经计算，三点拟合精度如表 4 中所示，为 ± 57.3 mm，这与图根点自身精度有关。

表 4 开平实验站坐标与 WGS84 坐标拟合偏差(mm)
Table 4 Deviations of coordinates best fit between Kaiping experimental station control net and WGS84 (mm).

点名 Points name	Δx	Δy	Δz	点位偏差 Deviations
V002	54.9	-36.2	14.0	67.2
V003	-20.6	56.3	-12.0	61.1
V004	-34.3	-20.1	-2.0	39.8
$\sigma_x=39.2; \sigma_y=40.3; \sigma_z=10.7; \sigma=57.3$				

3 结语

此次测量为高能所准直小组承担的首次大跨度远距离的测量，最终提交成果精度 ± 70 mm。据设计人员反馈，江门中微子实验站选址位置是正确的，满足设计要求。实验站初步选址对位置精度要求不是特别高（米级），未来实验站建成后，核电站堆芯至实验站地下 700 m 深的探测器的长距离高精度 GPS 测量还有很多问题有待研究。

参考文献

- 1 Liang J. Measurement of 3D distance from nuclear reactors to detectors in Dayabay neutrino experiment[C]. 10-14 September 2012, FermiLab, Batavia, USA
- 2 王铜, 罗涛, 梁静, 等. 精密三角高程在大亚湾中微子

- 实验距离测量中的应用研究[J/OL]. 测绘科学, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4415.P.20130531.0816.001.html>, 2013-5-31
- WANG Tong, LUO Tao, LIANG Jing, *et al.* Application of trigonometric leveling in distance measurement of Daya Bay reactor neutrino experiment[J/OL]. Science of Surveying and Mapping, <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.4415.P.20130531.0816.001.html>, 2013-5-31
- 3 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- LI Zhenghang, HUANG Jinsong. GPS surveying and data processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005
- 4 徐卫明, 赵俊生. GPS 测量坐标转换实用性问题的分析[J]. 测绘工程, 2000, 9(2): 10-15
- XU Weiming, ZHAO Junsheng. A practical analysis on the coordinates transformation of GPS surveying result[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2000, 9(2): 10-15
- 5 蔡昌盛, 高井祥, 郑南山, 等. 北京 54 坐标转换至 WGS-84 坐标的方法[J]. 四川测绘, 2005, 28(3): 125-127
- CAI Changsheng, GAO jingxiang, ZHENG Nanshan, *et al.* Transformation from BJ54 coordinate system to WGS84 coordinate system[J]. Surveying and Mapping of Sichuan, 2005, 28(3): 125-127
- 6 曾文宪, 陶本藻. 三维坐标转换的非线性模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(5): 566-568
- ZENG Wenxian, TAO Benzao. Non-linear adjustment model of three dimensional coordinate transformation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(5): 566-568
- 7 潘正风, 杨正尧, 程效军, 等. 数字测图原理与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- PAN Zhengfeng, YANG Zhengyao, CHENG Xiaojun, *et al.* Principles and methods of digital mapping[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005

Design and survey for the locating of Jiangmen underground neutrino observatory

WANG Tong DONG Lan LUO Tao LIANG Jing LIU Can MA Na
ZHU Hongyan HE Zhenqiang KE Zhiyong

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: In order to explore the sequence of neutrino mass and carry out other advanced scientific researches, Jiangmen underground neutrino observatory is proposed and the project is in the process of site searching. **Purpose:** This paper mainly introduces the way of position measurement between Jiangmen experimental station and reactor cores of Yangjiang nuclear power plant and Taishan nuclear power plant. **Methods:** The control network is established and measured by GPS, LGO and the self-developed software is used for data processing and fitting translation. **Results:** Through the actual measurement, the accuracy of the final coordinate is ± 70 mm, which meets the tolerance requirement. **Conclusion:** According to the feedback from the designer, the scheme of the position measurement is reasonable and feasible.

Key words Jiangmen neutrino experiment, Nuclear reactor, GPS control net, Distance, Precision

CLC TL505