

上海光源的一级平面控制网

于成浩¹, 柯明¹, 杜涵文¹, 殷立新¹, 赵振堂¹, 董岚², 黄开席²

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800;

2. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049)

摘要: 国家重大科学工程上海光源对加速器元件提出了亚毫米量级的超高定位精度要求。将一级平面控制网用于确定建筑和设备的相对位置关系, 并为下级控制网提供高精度的基准数据。控制网的设计过程受建筑、设备的制约, 测量过程中又面临不易观测、不利因素多等困难。经过不断优化设计和施测, 最终在周长 400 m 的大尺寸空间内取得了 0.3 mm 的超高精度。通过对 3 次观测结果比较, 发现了地基随季节的周期性变化现象。

关键词: 上海光源; 平面控制网; 全站仪; 投点仪

中图分类号: TL505

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)10-0931-04

Global Horizontal Control Network of Shanghai Synchrotron Radiation Facility

YU Cheng-hao¹, KE Ming¹, DU Han-wen¹, YIN Li-xin¹,
ZHAO Zhen-tang¹, DONG Lan², HUANG Kai-xi²

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

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

Abstract: As a national big scientific engineering, Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) has rigid requirement to the components with sub-millimeter accuracy. In the process of survey and positioning global control network is a connecting link, which determines the position relationship between building and accelerator devices, and provides high accuracy datum to local control network. Within the designing process, building and devices are very restrict. While among observation, it's hard to be observed and abound with disadvantages. With continuous optimization and careful operation, super-high accuracy of 0.3 mm within 400 m circumference was achieved and slab's periodic movement could be seen through 3 times measurement.

Key words: Shanghai Synchrotron Radiation Facility; horizontal control network; total station; plummet

上海光源(SSRF)是即将于2009年建成并运行的第3代中能同步辐射光源,是我国迄今为止最大的科学装置。主体包括20 m长的直线加速器、周长180 m的增强器、周长432 m的储存环^[1]及沿环外侧分布的同步辐射光束线和实验站。

加速器物理要求关键设备的定位精度均应优于0.2 mm,储存环设备支架内的横向相对定位精度应优于0.08 mm,这对准直测量技术提出了较高要求。上海光源的准直包括控制网、元件标定、预安装准直、现场安装等一系列步骤,控制网是其中最为重要的一步。

控制网通过对分布于隧道中控制点的观测和计算,得到网点的相对位置关系,可为设备安装提供基准,通过复测,还可监测建筑和设备的变形,并对变形进行调整,维持设备的准直精度。

上海光源的控制网分为一级网和二级网。一级网有两个目的:1)保证各个加速器和实验大厅各线站之间绝对关系正确;2)控制二级网的误差积累。二级网的目的是保证各个加速器及光束线站自身相对位置关系的正确^[2]。

一级网点共21个,直线和增强器上各2个,储存环上9个,实验大厅在设计时有6个,后来增加到8个,这些点具有建筑和设备两套坐标,为建筑和设备安装之间提供了桥梁。一级平面网在设计和施测过程中均面临诸多困难,本工作予以讨论。

1 控制网设计

控制网设计时,首先考虑的因素是测量方案。根据精密工程测量技术的发展现状,参考国内外加速器一级控制网的布设方案。决定采用边角网测量方式,利用高精度的边长和角度观测值,通过平差计算,得到网点的最优坐标。

1.1 设计难点

1) 无永久参照基准

大型科学工程一般均有永久的控制网网点,如北京高能物理研究所的正负电子对撞机^[3]、兰州近代物理所的冷却储存环等。但因上海光源所处软土地基,难以建立稳定的永久固定点,这将造成控制网点不固定,给平差带来

一定困难,并造成变形监测时只能求相对变化。

2) 应满足辐射防护要求

上海光源属于高能粒子加速器,运行期间会在加速器隧道空间内产生较强辐射。控制网点设计应避免在隧道墙体上产生过多的孔洞。

3) 通视条件差

作为一大科学工程,上海光源建筑具有复杂、优美的结构,各种工艺设备电缆、桥架极多,测量的通视性难以保证。

1.2 解决方案

对上述难题,通过3项措施进行处理。

1) 选用平差方法

在无永久参照基准条件下,需在平差处理时加以处理,通过自由网平差的方法,以前期控制网的重心为基准进行。

2) 视线高度设计

为满足通视性,并减少辐射防护问题,在建筑设计时,经与设计院、公用设施、辐射防护等部门协调,确定了测量视线设计为7.4 m的标高(图1)。在水平方向上,选取的点位应保证避开结构柱、隧道墙、大厅墙体等对视线的遮挡,在视线通过墙体处设可开启的窗。在铅垂方向上,地面点正上方相对应的隧道顶板预留 $\phi 200$ mm通视孔,以确保控制点从隧道地面投影到仪器中心。对于直线和增强器控制网点来说,在隧道顶部还有2.2 m高的管线层,上面需要预留通视孔,仪器支架高度将缩短^[4]。

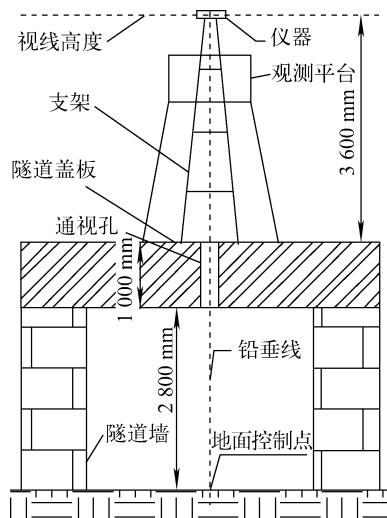


图1 储存环观测平台示意图

Fig. 1 Layout of storage ring observation platform

3) 支架设计

视线高度设计为 7.4 m, 为此, 需设计专门的仪器支架和观测平台。为避免人员走动对测量结果的影响, 观测平台与仪器支架相互分离。

1.3 网点结构和埋设

网点用环氧树脂与地面粘接在一起, 网点关键部分为锥面结构, 它与直径 38.1 mm 的球体配合, 选择相同直径的对中标志、跟踪仪、全站仪的反射球, 保证不同测量设备之间数据的互换。由于加工误差的存在, 球与锥面实际是 3 点接触, 反射球的放置重复性一般优于 0.01 mm, 避免了传统方法由标志而带来的系统误差。

1.4 控制网优化设计

根据自由网平差原理, 用清华山维平差软件 NASEW95 对地面网进行点位相对和绝对误差估算。设测距精度为 0.5 mm, 测角精度为 2", 用所有距离和角度观测量计算得到的最大相对点位误差为 ± 0.34 mm^[4], 点位误差较均匀, 最大绝对点位误差为 ± 0.24 mm。

1.5 仪器和方法

测量仪器为全站仪和投点仪, 型号分别为 TDM(A)5005 和 NL, 全站仪标称测角精度为 0.5", 在 120 m 范围内, 配合高精度的角偶棱镜, 可达到 0.2 mm 的测距精度^[5]。投点仪标称精度为 1:200 000, 用于精确对中。

为保证仪器性能, 全站仪和投点仪须经计量部门检测, 对全站仪的测距加常数进行实际测量并输入仪器, 测量过程中实时测量温度和压强, 对距离进行气象改正。

测量采用边角同测的方法, 角度测量 4 个测回, 距离测量 8 次。

2 控制网测量及平差结果

一级平面控制网共测量 4 次, 测量目的、人员、观测元素和测量结果精度均不太一样^[6]。

2.1 第 1 次测量

为建立上海光源加速器与建筑坐标系的关系, 进行了控制网点的埋设, 实施了第 1 次测量。建筑施工时, 通过 YA、YB、YC、YD、YE 5 个点(图 2) 进行施工控制, 通过对这些点和加速器的一级网点进行测量, 可建立加速器坐标系。由于当时储存环隧道盖板不到位, 图 1 中

的支架设计状态无法实现, 将原来设计的支架经过组装, 从地面直接升高到 7.4 m, 观测平台由脚手架搭建。支架稳定性差, 对测量结果造成不利影响, 控制网处理结果为: 点位最大误差约 4 mm; 相对点位精度约 1~2 mm。此精度显然无法满足加速器精密安装要求, 仅用于加速器坐标系的建立及粗放样。

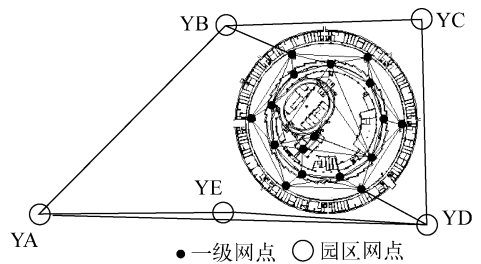


图 2 上海光源建筑控制网

Fig. 2 Construction control network of SSRF

2.2 第 2 次测量

为提高整体网的精度, 重新设计了储存环的仪器支架, 以钢管进行焊接加工, 加工好的支架从储存环地面直接生根, 并利用地面和隧道墙建立辅助支撑, 加以固化。经如此处理后, 支架的稳定性显著提高, 然后, 进行第 2 次测量。利用 NASEW95 进行平差计算, 以第 1 次测量得到的 5 和 11 两点为基准, 平差结果为: 平均点位误差为 0.5 mm, 最大点位误差为 0.8 mm(图 3)。最大点位误差位于外围实验大厅的控制点上, 由于观测量太少所引起。对于准直测量最为关键的储存环来说, 网点 5~13 绝对和相对点位精度均较高。

以第 2 次的控制网测量为正式成果, 用于控制各个局部网的建立, 指导加速器设备的安装准直。

2.3 第 3 次测量

由中国科学院高能物理研究所准直测量组对整体网进行了第 3 次测量, 其目的是校核一级网的质量。支架形态与第 2 次控制网测量时的相同。因原来的实验大厅控制点视线受阻, 故将控制网作了调整, 实验大厅的控制点数目由 6 个变为 8 个, 位置由墙上变到地面。计算采用 survey 和 NASEW95 分别进行, 在多种情形下, 两种软件得到的网点平面绝对和相对点位精度均优于 0.3 mm。由于仪器经校准、测

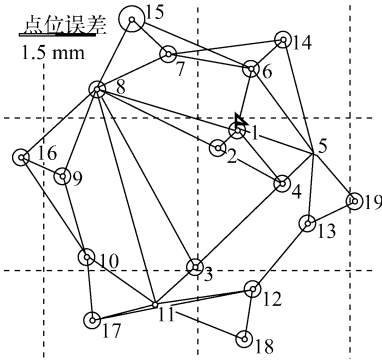


图3 第2次整体平面网点位误差椭圆

Fig. 3 Error ellipse of the second global horizontal control network point

量环境变好、测量人员更充裕等因素,测量精度有了较大提高,结果与设计目标相当。

与第2次测量结果相比,所有控制点之间的距离均有比例性的缩短。以5和9两点来说,其距离约为132 m,本次平差后的值比上次平差值短了约12 mm,其原因可归结为水泥随温度的收缩。

为与第2次的坐标系及结果相比较,将上次和本次测量结果进行拟合,求得二者间的最优匹配。以第2次的结果为参考系,按照7参数坐标转换,求得两套坐标系之间的平移和旋转参数为: $dx = 6.313 \text{ mm}$, $dy = 0.252 \text{ mm}$, $R = 0.0007^\circ$,比例因子为1.000092。就储存环的控制网点而言,拟合后,两次结果间的偏差在1 mm以内,可认为变化较小。

2.4 第4次测量

为验证储存环的地基随温度的变化特性,中国科学院高能物理研究所准直测量组对储存环上的5、8、11 3个点进行了重新测量。测量时,隧道盖板已到位,观测平台结构及仪器支架与设计情形较为接近。测量结果与上海光源整体平面网的尺度一致,说明地基又发生了膨胀。

通过上述对一级平面网的多次测量,证实了控制网的精度,说明一级平面网可为局部控制网提供可靠的平面基准,同时也发现了地基随季节变化的特性。

3 结语

利用一级平面控制网进行基准传递,指导加速器和光束线设备的安装准直,均取得了较好效果。上海光源的一级平面控制网具有大尺寸、高精度特点,在工程实践中不断优化设计,在周长400 m大空间中取得了0.3 mm的超高精度,是精密工程测量的一次极好实践。

参考文献:

- [1] ZHAO Zhentang, XU Hongjie, DING Hao. Construction of Shanghai Synchrotron Radiation Facility [C/OL] // Proceedings of Asian Particle Accelerator Conference-2007. Indore, India: Raja Ramanna Centre for Advanced Technology, 2007 [2007-11-11]. <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/a07/PAPERS/THZMA03.PDF>.
- [2] 于成浩,殷立新,杜涵文,等. 上海光源准直测量方案设计[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(7): 1167-1172.
YU Chenghao, YIN Lixin, DU Hanwen, et al. The design of SSRF survey and alignment[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(7): 1167-1172 (in Chinese).
- [3] 吴翼麟,孔祥元. 特种精密工程测量[M]. 北京: 测绘出版社, 1993.
- [4] YU Chenghao, DU Hanwen, YIN Lixin. The control network design of SSRF [C/OL] // Proceedings of the 8th International Workshop on Accelerator Alignment. Geneva, Switzerland: CERN, [2004-11-11]. <http://www.slac.stanford.edu/econf/C04100411/papers/016.PDF>.
- [5] DAVID M. Instrumentation and survey networks at the ESRF [C/OL] // Proceedings of the 8th International Workshop on Accelerator Alignment. Geneva, Switzerland: CERN, [2004-11-11]. <http://www.slac.stanford.edu/econf/C04100411/papers/009.PDF>.
- [6] 于成浩. 三维准直测量技术在上海光源中的应用研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2008.