



·粒子束及加速器技术·

高能同步辐射光源地面网测量方案及数据处理*

闫皓月¹, 董 岚^{1,2}, 王 铜^{1,2}, 马 娜^{1,2}, 梁 静^{1,2}, 王小龙^{1,2}, 门玲鸽^{1,2}, 刘晓阳¹,
卢 尚¹, 韩圆颖¹, 闫路平¹, 张露彦¹, 李 波^{1,2}, 柯志勇^{1,2}, 何振强^{1,2}

(1. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 2. 散裂中子源科学中心, 广东 东莞 523803)

摘 要: 随着粒子加速器对束流的精确控制要求越来越高, 对工程控制网的设计与测量提出了更高的要求, 详细介绍了高能同步辐射光源(HEPS)工程测量首级地面控制网的布设及测量方案。地面控制网永久点标志布设于粒子加速器建筑隧道内, 通过垂直通视孔与架设在在线站大厅顶面的仪器铅锤对中, 并形成平面互相通视的观测条件, 实现了平面测站和坐标的联系传递; 高程方向采用水平通视孔及门窗通视的方式实现水准测站和高程坐标的联系传递。由此构成了立体化通视与观测结构, 这在国内同步辐射光源建设中有独特之处, 有力保证了加速器轨道的精确控制。平面控制网分别采用 GNSS 控制网和全站仪边角网测量的方案, 高程控制网采用室内隧道地面和室外地面水准测量的方案。在加速器隧道设备安装前进行了两次地面控制网测量, 数据处理采用平面+高程的模式平差。经过不同测量方案的对比来验证测量过程的正确性, 同时对比两次控制网的测量结果来验证可靠性。平均点位标准偏差为 2 mm, 反映测量成果的精确可靠, 满足后续二级隧道控制网测量及设备安装准直需要。HEPS 对永久控制点的稳定性提出了很高的要求, 通过优化设计和特殊施工, 在狭窄隧道空间内成功建设了超高、超细、高稳定的基岩隔空桩, 为储存环构成了稳固的三维永久控制点, 为长期监测束流轨道的稳定性提供了基准, 为后续同步辐射光源建设提供了借鉴。

关键词: 控制网; GNSS 测量; 水准网; 投影变形; 控制网平差

中图分类号: P258; TL505

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230117

Surface network survey scheme and data processing at High Energy Photon Source

Yan Haoyue¹, Dong Lan^{1,2}, Wang Tong^{1,2}, Ma Na^{1,2}, Liang Jing^{1,2}, Wang Xiaolong^{1,2},
Men Lingling^{1,2}, Liu Xiaoyang¹, Lu Shang¹, Han Yuanying¹, Yan Luping¹,
Zhang Luyan¹, Li Bo^{1,2}, Ke Zhiyong^{1,2}, He Zhenqiang^{1,2}

(1. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China)

Abstract: With the increasing demand on higher precision control of beams in modern particle accelerators, higher requirements are raised for the design and survey of engineering control network. In this paper, the layout and survey scheme of the first-level surface control network for the engineering survey of High Energy Photon Source (HEPS) are introduced in detail. The permanent points of the surface control network are arranged in the tunnel of the particle accelerator building, and the vertical view hole is aligned with the instrument plumb on the top surface of the online station hall, and the observation condition of plane mutual view is formed, the transmission and contact of plane coordinates are realized. In the elevation direction, the communication between the leveling station and the elevation coordinates is realized by means of horizontal viewing holes and doors and windows. Therefore, the three-dimensional view and observation structure is formed, which is unique in the construction of synchrotron radiation light source in China, and effectively ensures the accurate control of accelerator orbit. The scheme that the plane control network adopts the GNSS control network and the corner network of the total station respectively is proposed. The elevation control network adopts the scheme of indoor tunnel ground and outdoor ground level survey scheme. Before the

* 收稿日期: 2023-05-06; 修订日期: 2023-09-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12075264)

联系方式: 闫皓月, yanhy@ihep.ac.cn。

通信作者: 董 岚, dongl@ihep.ac.cn。

installation of the accelerator tunnel equipment, two surface control network surveys were carried out. The data processing was adjusted in plane + elevation mode, and the accuracy of the measurement process is verified by comparing different survey schemes, and the reliability is verified by comparing the measurement results of two control networks. The average point position standard deviation is 2 mm, which indicates that the survey results are reliable and meet the requirements of subsequent control network survey and equipment installation collimation. The stability of the point is improved by optimizing the design of permanent point marker structure. As HEPS requires high stability of permanent control points, through optimal design and special construction, the ultra-high fine and stable bedrock spacer pile was successfully built in the narrow tunnel space, forming a stable three-dimensional permanent control point for the storage ring. It provides a benchmark for long-term monitoring of beam orbit stability, and provides a reference for the subsequent construction of synchrotron radiation light source.

Key words: control network, GNSS survey, leveling net, projection deformation, control net adjustment

中国科学院高能物理研究所承担建设的高能同步辐射光源(HEPS)是中国“十三五”期间优先建设的大科学装置,是世界上最亮的第四代同步辐射光源之一。HEPS包括一台长约49 m的直线加速器、一台周长约454 m的增强器、一台周长1360.4 m的储存环及若干光束线站,建成后可为我国以及国际上的科研人员提供更好的实验条件。HEPS作为一台大型粒子加速器,其对束流轨道的准确性和稳定性的要求极高,其规模也是我国迄今为止建造的所有加速器中最大的,为了实现这一点,精密的准直测量和设备安装是必不可少的。HEPS占地面积约650 700 m²,为了在项目的前期土建施工及高精度的设备安装调试,在园区布设地面控制网至关重要。

1 地面控制网布设

HEPS作为第四代先进光源,对设备的安装准直精度提出了超高要求:单元内相对准直精度0.03 mm,单元间的相对准直精度0.05 mm,同时对全装置注入器、储存环和光束线站三大区域的绝对定位精度要求2 mm。

地面控制网是首级测量控制网,为隧道的工程施工和设备的安装定位提供必要的测量基准^[1]。在全装置施工过程中,三大区域是先后开展施工的,因此,在施工的初期,需要针对各个区域分别独立布设地面控制网点,从而保证三大区域之间的高精度绝对定位以及顺利连接贯通。同时由于高能光源大科学装置的特殊性,整个装置建筑是封闭的,控制点之间无法通视,因此,在地面网测量时需要研究如何对大范围的控制网点进行联系测量。高能光源地面网测量的精度以及可靠性,直接影响了后续设备的高精度安装,如何保证测量的精度和可靠性,需要多种软件多种测量手段相互验证,这是本文研究的重点。

按照HEPS直线、增强器、储存环、光束线站均匀布设控制点,覆盖整个装置,遵循分级布网,逐级控制的原则,见图1。HEPS地面控制网共包含12个地面永久点,分别是4个深桩基岩点(P05R、P06R、P07R、P08R)位于储存环隧道,4个深桩土层点(P01L、P02L、P03B、P04B)位于直线和增强器隧道,4个浅桩土层点(P09T、P10T、P11T、P12T)位于长线站末端。另外10个土建控制点,由基建方提供,可用作已知起算点;还有国土点4个。

P01L~P08R这8个永久点位于加速器隧道内,同时也用作二级隧道网控制点。P01L、P02L位于直线加速器隧道首尾两端,用于控制直线加速器的位置,P03B、P04B位于增强器隧道内部用于控制增强器的位置,P05R、P06R、P07R和P08R均匀分布于储存环隧道内。装置区隧道永久点内部均采用钢筋混凝土浇筑,外围设置钢管护桶,内置强制对中装置,能够有效隔绝外部来自建筑物和设备的作用力所导致的永久点漂移,确保稳定,如图2所示。4个储存环永久点是80 m深的基岩桩,下部40 m长桩体浇筑在基岩内,从上向下依次贯穿强风化、中风化和微风化基岩,基岩桩的最底部进入微风化基岩1 m深,上部40 m通过护桶与建筑物地基及土层隔空。HEPS是国内唯一拥有桩长80 m基岩桩的光源,经桩长、桩径、埋深和浇筑方式的严格计算、优化,其结构与施工工艺均达到领先水平,稳定性良好。直线和增强器4个永久控制点是20 m长的深桩点,下部10 m埋在夯实的土层内,上部10 m与土层和建筑物地基隔空。长线站4个永久点是10 m浅桩点,下部8.5 m埋藏在夯实的土层内,上部1.5 m露出地面作为测量桩柱。

由于粒子加速器辐射防护的密封要求,全装置没有永久点水平通视孔,如图3所示,永久点位于加速器隧道内部,无法水平通视测量。加速器隧道高5 m,线站大厅高度16 m,隧道及光束线站位于线站大厅内。由于隧道永久点间无法互相通视,在测量方案设计时,通过在永久点正上方加速器隧道顶面以及线站大厅顶面预留直径400 mm的铅锤通视孔,确保永久点能从隧道内沿铅垂方向投影到隧道顶面及大厅顶面的仪器中心上^[2-3]。在隧道顶面及大

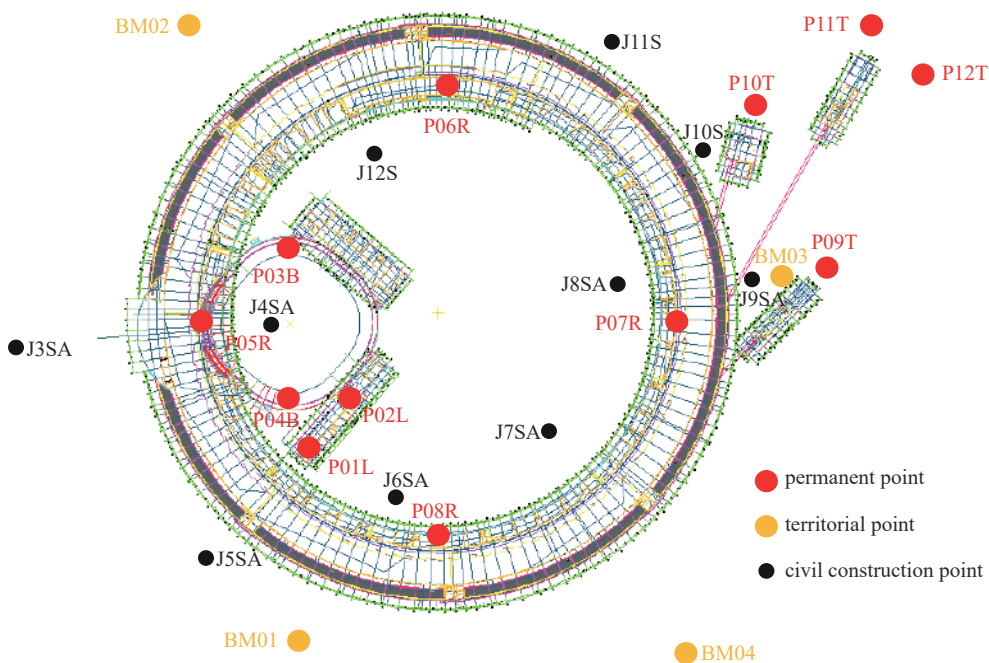


Fig. 1 Distribution of HEPS first level surface control network

图 1 HEPS 首级控制网分布图

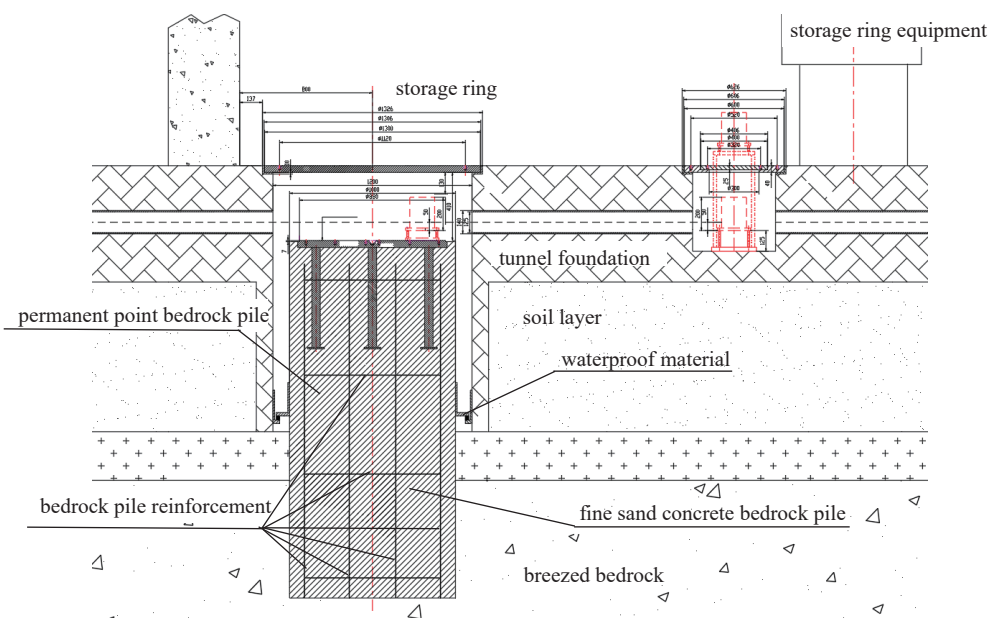


Fig. 2 Installation permanent point

图 2 装置永久点

厅顶面均设置准直平台, 将隧道内的永久点通过高精度投点仪引出至隧道顶面, 与光束线站大厅内的控制网联测, 可控制光束线站设备的位置; 继续引出至大厅顶面上形成平面通视条件, 通过 GNSS 静态同步观测以及全站仪全圆观测, 在大厅顶面开展与其他永久点的平面方向联系测量, 能够满足地面网高精度测量要求。

2 地面控制网测量方案

为加快工程进度, 实现全装置分段安装, 需土建早期进行地面网测量, 得到地面网永久点坐标。在工程建设期间为检验永久点稳定性, 亦需多次进行地面网测量, 确保隧道网平差计算基准的相对稳定和统一^[4]。高能光源建设至今共进行了两次地面网测量, 整体控制网的高程与平面分开观测。

2.1 GNSS 平面控制网测量方案

GNSS 作为测量领域最流行的大范围空间测量手段, 已广泛应用于工程形变监测、地壳运动监测, 灾害监测与

预报、城市地面沉降等多领域中,具有相邻测点间不要求通视、不受天气条件等诸多环境因素影响等多方面优势,相对定位精度已达到 10^{-6} ^[5-6]。高能光源在工程建设过程中,地面点位难免受到建筑物、施工设施等物体遮挡,通视效果欠佳,故采用GNSS测量方案获取地面网平面坐标,同时采用全站仪测量若干能够通视的点位作为符合验证测量。

两次地面网测量的GNSS网图如图4所示,测量包含永久点、土建点和国土点在内的共计33个点位,共观测17天24个时段,每时段观测至少4个点位,确保每次GNSS观测的不同时段有3个以上公共点。

在光源建筑完成后,GNSS接收机需架设于房顶,储存环大厅顶面距离隧道永久点超过了14 m,直线、增强器房顶距离隧道永久点也近7 m,GNSS静态观测时需投点对中在隧道永久点上。采用Wild NL投点仪作光学对中,其铅垂对中精度可达 $\pm 1/200\ 000$ 。具体方法是:于隧道永久点标志上放置3.81 cm半球水准镜,其中心点标志为直径1 mm的圆面。

于房顶GNSS三角基座上安置投点仪,保证投点仪水泡保持居中,通过多次调整平移台或三角基座角螺旋,确保从三个方位观测投点仪都能令目镜十字丝严格对称分划水准镜中心圆面,投点精度在1 mm以内,能够满足需求,如图5所示^[7]。投点完成后,使用钢尺量取仪器高,量高需从三个方位重复量取,读数至mm分划,连续读数三次,互差2 mm,取均值作为仪器高。

2.2 全站仪平面控制网测量方案

全站仪是三维坐标测量系统的代表,具有测量精度高、便携、操作简便的优势,在加速器工程中得到了广泛应用^[8]。但全站仪观测需具备通视条件,故采用全站仪在第二次地面网测量第一阶段对测区内具备通视条件的点位进行测量,起到校核作用,如图6所示。全站仪观测采用高能所准直系统自主开发的多测回自动观测软件控制TM50全站仪进行^[9]。

2.3 水准高程控制网测量方案

二等水准测量具备较高的测量精度,水准仪便携且应用简单,能够适用于各种控制测量场景^[10]。虽然GNSS测量可以获取三维坐标,但垂直方向精度及稳定性不能满足高能光源控制测量的要求,因此采用水准导线往返测量的方式来获取地面网高程坐标。需要注意往返测量奇数站和偶数站的标尺读数顺序并不相同,前者为后、前、前、后,后者为前、后、后、前^[10]。本测区的水准测量尽可能观测偶数站,于地面控制点放置半球供水准尺安放。高能光源二次地面网水准测量观测路线如图7所示,共计61条水准路线,122趟观测。

3 地面网测量实施及数据处理

3.1 第一次地面网测量

第一次地面网水准测量在2020年9月进行,此时为土建早期,建筑物只有地基,尚无墙体,点位间可直接直线距离观测。采用两台Leica NA2+GPM3水准仪,分别在8个永久点、5个土建点和4个国土点间往返测量,水准路线共36条,往返测量72趟,用以获取地面网控制点的高程坐标。

第一次地面网GNSS测量于2020年9月3至6日及17、18两日进行,在包括永久点、土建点和国土点在内的15个控制点上设站,获取地面网点位的平面坐标,此时点位上方无遮挡,是唯一一次可露天观测的机会。GNSS测量采用的是4台Leica GS15一体机、10台Leica GS10分体机,在多个控制点上进行静态同步观测,总计观测6天6个时段,每时段平均观测8 h。

第一阶段(9月3至6日)对P01L~P08R八个永久点、J6SA、J7SA、J8SA、J12S四个土建点及BM02、BM03两个国土点进行GNSS测量,使用了4台一体机,10台分体机,共观测了4个时段。第二阶段(9月17日、18日)使用4台分体机进行土建点补测。17日补测J4SA、J6SA、J7SA、J8SA四点,18日补测J4SA、J6SA、J7SA、J12S四点,共观测了2个时段。

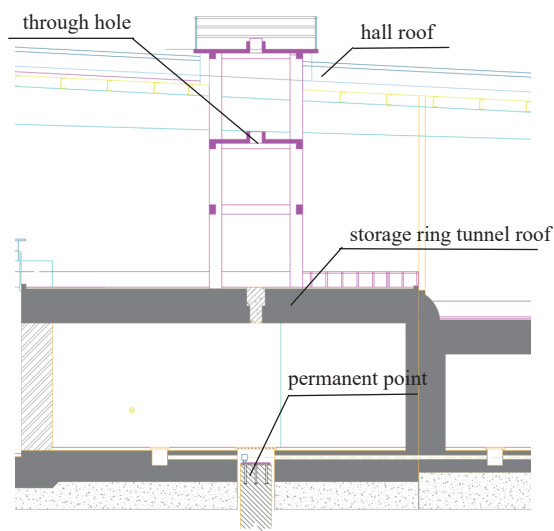


Fig. 3 Storage ring tunnel profile

图3 储存环隧道剖面图

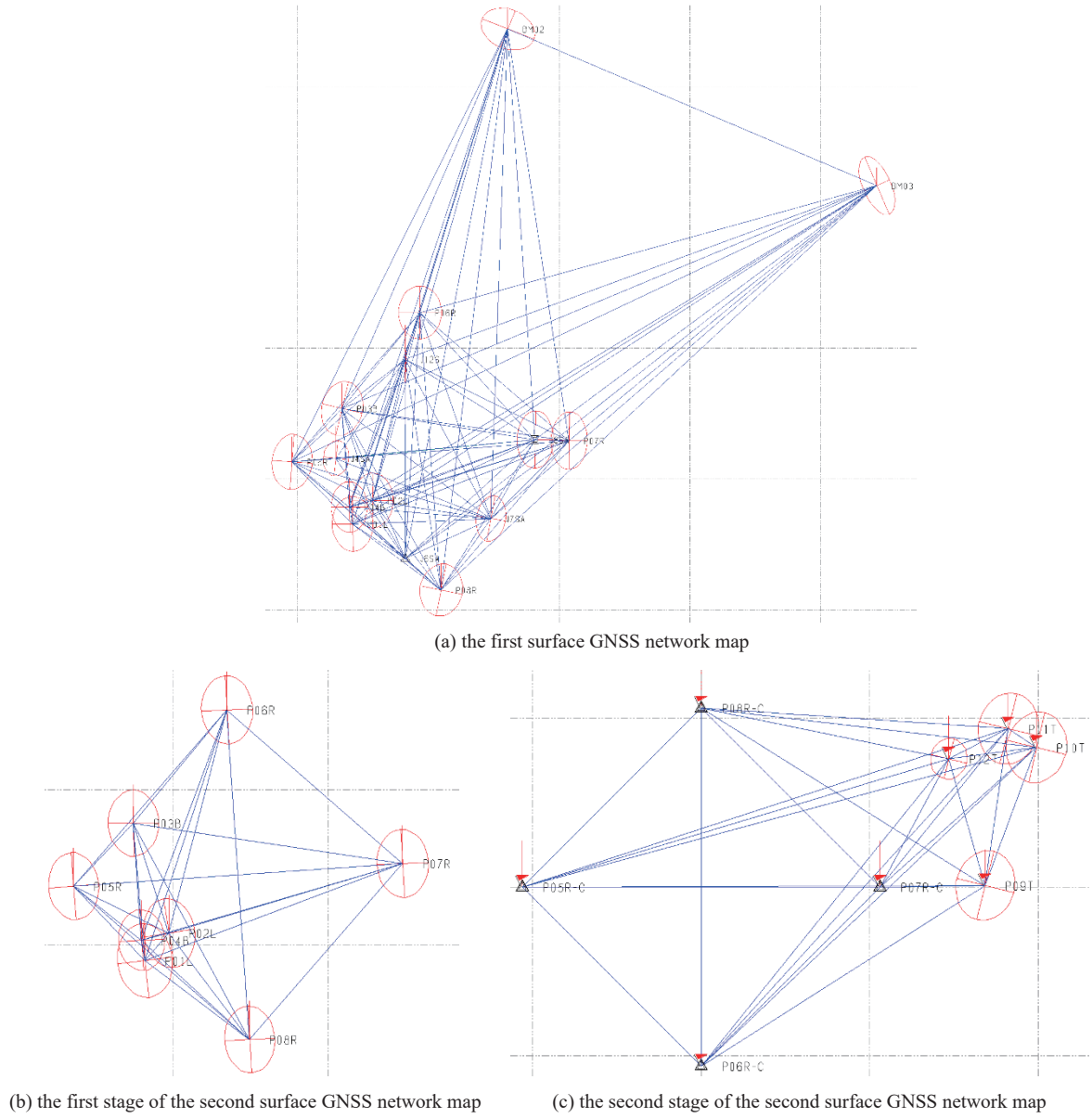


Fig. 4 GNSS network map of two surface networks

图4 两次地面网 GNSS 网图

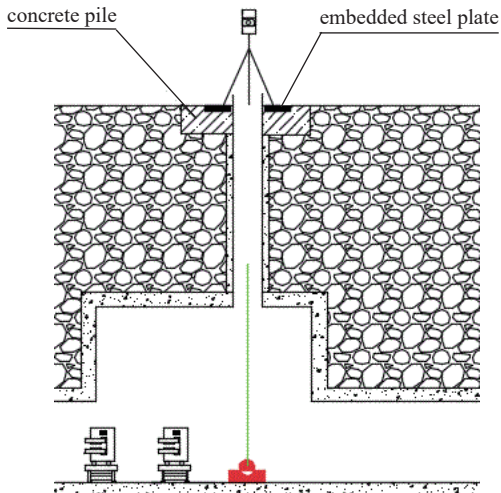


Fig. 5 Schematic diagram of point alignment and quantity height
图5 投点对中及量高示意图

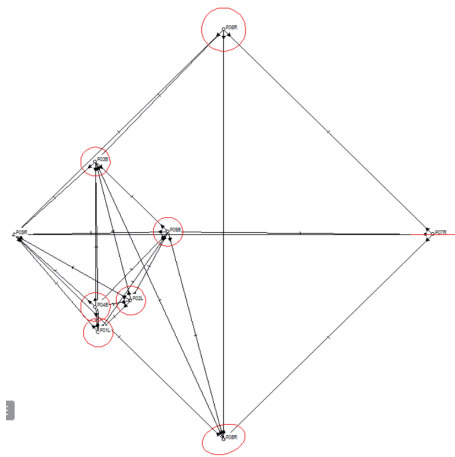


Fig. 6 Total station control network diagram
图6 全站仪控制网网图

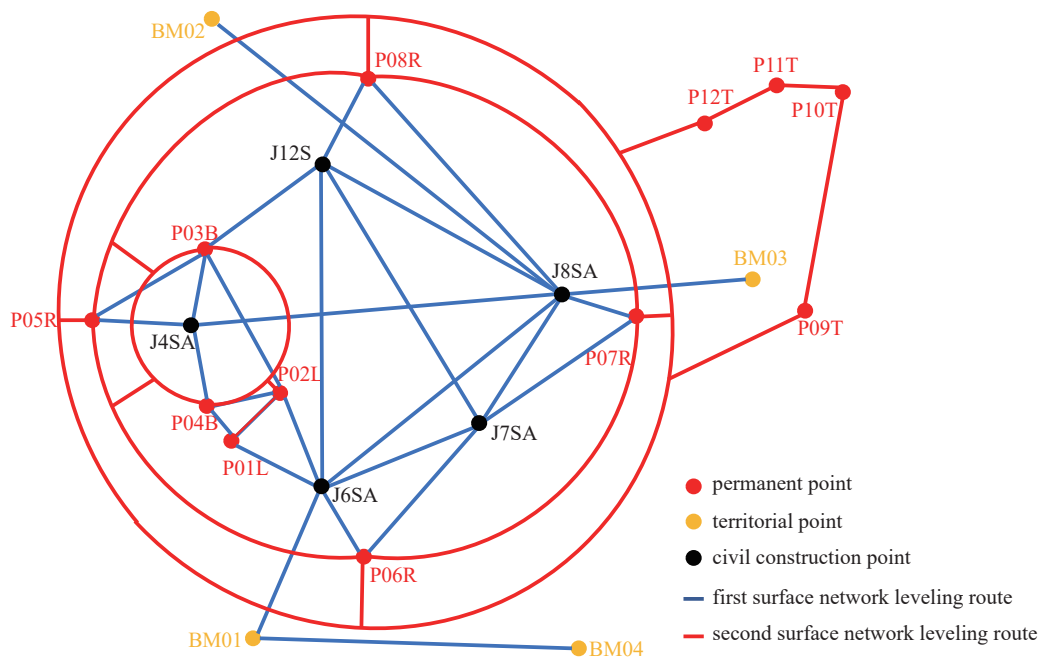


Fig. 7 Level map
图 7 水准路线图

地面网数据处理采用 GNSS 三维平差和水准单独平差的方式, 最终成果采用 GNSS 测量的平面结果及水准测量的高程结果。水准数据采用山维平差软件和高能所准直系统开发的 Vector 平差软件完成计算及验算。以土建 J8SA 一点的高程作为起算数据, 通过高程平差得到高能光源第一次地面网测量水准平差成果。

GNSS 数据处理主要用到 LGO 与 TBC 两款软件计算, 结果彼此验证。GNSS 平差采用无约束平差方案计算。无约束平差可考察网自身内符合精度及基线向量间有无明显粗差, 可以直接得到空间三维直角坐标; 所得长度是地面两点间的直接斜距, 需要进行投影转换, 才能得到参考椭球面投影后的高斯平面直角坐标^[11-12]。将 GNSS 地面观测长度归算到参考椭球面上产生的变形叫高程归算变形, 将参考椭球面上的长度投影到高斯平面上产生的变形叫高斯投影变形, 这两次改正可看作将地面测量的距离转换至高斯投影面上产生的长度综合变形, 按式(1)计算。

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{y_m^2}{2R^2} - \frac{H_m}{R} \quad (1)$$

式中: y_m 为测线在高斯平面上离中央子午线垂距的平均值, H_m 为观测边的平均大地高, R 为地球半径。

为减少投影变形, 可选择工地校正法、设置抵偿投影带法、设置抵偿高程面法等进行 GNSS 平差。工地校正法是利用多个已知点计算不同坐标转换参数, 设置抵偿投影带是通过选择适合的中央子午线减少投影变形, 抵偿高程面法是改变椭球参数, 选择适合的椭球半径。

本测区约 0.2 km², 采用独立坐标系统。建立地方独立坐标系统是通过确定一些元素来决定地方参考椭球与投影面^[13]。采用 TBC 设置抵偿高程面法进行数据处理, 通过椭球膨胀计算椭球参数。投影面的大地高 H 等于卯西曲率半径 N 的变化量, 又由

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} \quad (2)$$

得到如下公式

$$da/dN = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B} \quad (3)$$

式中: da 为椭球长半轴的改正量, B 为测区平均纬度, e 为椭球的第一偏心率, dN 为测区平均大地高^[14]。测区的平均纬度由建工提供的五个已知点 (J4SA、J6SA、J7SA、J8SA、J12S) 的平均值经工地校正后得到, 其值为 N40°22'51.612", 测区平均大地高为测区已知点位高程均值 49.233 m, 椭球的第一偏心率为 CGCS2000 椭球 0.081 819。计算得到椭球长半轴的改正量为 49.164 m。CGCS2000 椭球长半轴是 6 378 137 m, 膨胀后椭球长半轴为 6 378 186.164 m, 从而得到适当的椭球半径, 使长度归算到这个椭球面上减少的数值恰好等于这个面投影到高斯平面上增加的数

值,那么高斯平面上的距离和实地距离即可保持一致^[8]。经 TBC 网平差后得到各点高斯投影平面坐标。

HPES 第一次地面网测量平差是依据北京建工提供的坐标为起算数据,将 GNSS 无约束平差坐标固定一点一方向进行旋转平移坐标变换,即固定 J6SA 一点,保持 J6SA 至 J12S 的方向不变作变换,得到的三维平差变换坐标。再用 5 个土建控制点(J4SA、J6SA、J7SA、J8SA、J12S)的平面坐标和第一次地面网水准测量的高程平差值结合,构成组合建筑坐标。将平差变换坐标向组合建筑坐标拟合,得到第一次地面网测量的平面成果,再将该平面成果与高程平差值相结合得到第一次地面网测量最终成果^[15]。

3.2 第二次地面网测量

第二次地面网测量是装置土建完成后的测量。水准测量的时间跨度较大,分为两个阶段,第一阶段在 2022 年 8 月完成了直线、增强器和储存环间的水准网测量,第二阶段在 2022 年 11 月完成了长线站连接线站大厅的水准网测量,同样使用两台 Leica 水准仪进行往返测量。第一阶段水准路线共 13 条,往返测量 26 趟;第二阶段水准路线共 12 条,往返测量 24 趟。

第二次地面网 GNSS 测量也分为两个阶段,第一阶段于 2022 年 4 月 13 至 19 日进行,在 P01L~P08R 八个永久点上设站,采用 4 台 Leica GS15 一体机、4 台 Leica GS10 分体机,共观测了 14 个时段,每时段平均观测 8 h;并选用 Leica TS30 全站仪(测角标称精度:0.5"、测距精度 0.6 mm+10⁻⁶ mm)对 8 个永久点及一个临时点 P09B 进行四测回全圆方向观测,作为验证测量。第二阶段于 2022 年 11 月 1 至 4 日对储存环 4 个永久点和 4 个长线站浅桩点(P09T、P10T、P11T、P12T)进行 GNSS 测量,共观测 4 个时段,平均每时段观测 8 h。

第二次地面网数据处理分为两步,首先对第一阶段的水准测量和 GNSS 测量作平差计算,形成第二次地面网测量中间成果。再以中间成果作为起算数据,对第二阶段水准测量和 GNSS 测量作平差计算,更新中间成果,形成第二次地面网测量正式成果,具体操作过程如下:

水准数据处理同样采用山维和 Vector 平差软件,第一阶段水准测量通过直线、增强器和储存环三个大门,用室外水准测量将直线隧道、增强器隧道和储存环隧道的水准路线连接了起来,采用第一次地面网测量 P01L 的单点高程成果作为约束进行平差计算,形成第二次水准测量中间成果;第二阶段的长线站水准测量以第二次水准测量中间成果的 P05R 一点高程约束进行平差计算,在中间成果的基础上新增 4 个长线站浅桩点的高程坐标,形成第二次水准测量正式成果。

第一阶段 GNSS 测量的观测值是采用 LGO 软件作无约束平差,再向第一次地面网拟合(其中 P05R 不参加拟合),形成第二次地面网中间成果。第二阶段长线站 GNSS 测量的观测值同样采用 LGO 软件作无约束平差,平差结果再向第二次地面网中间成果拟合,用长线站 4 个浅桩点的拟合值更新中间成果,形成第二次地面网测量平面正式成果。将第二次地面网测量平面正式成果与水准测量正式成果相结合作为第二次地面网测量最终成果。

全站仪数据采用武汉大学测绘学院开发的平差软件 COSA 及准直系统自主开发的平差软件 Vector 相互验证平差^[16]。两种平差软件均采用第二次地面网测量中间成果 P05R 一点及 P05R-P07R 方位角约束。

4 平差结果分析

分别用山维与 Vector 两款软件对所有水准数据进行处理,两套平差结果直接作差,偏差在微米级以下,两次地面网水准成果统一采用山维高程平差结果。第一次地面网测量 GNSS 数据用到 LGO 与 TBC 两款软件,两款软件在无约束平差方案下取得的结果分别向五个土建点(J4SA、J6SA、J7SA、J8SA、J12S)拟合,拟合结果的平面坐标直接作差如下表 1 所示,偏差最大值为 0.3 mm,点位标准偏差 0.2 mm,在可接受范围内,说明平差处理无误,两款软件平差结果可作相互验证。

基建方在土建前期对土建点 J4SA、J6SA、J7SA、J8SA、J12SA 进行过测量并提供了成果,将 HEPS 第一次地面网测量成果与基建方测量成果进行对比,反算两者距离互差,结果见表 2、表 3,在一定程度上可验证 HEPS 首级地面控制网首次测量成果的可靠性。对 HEPS 第一次地面网测量进行精度统计,平面坐标精度 1.8 mm,高程坐标精度 1.3 mm,满足 2 mm 精度要求。

再将第一次地面网测量成果与设计坐标对比,偏差如表 4 所示,最大偏差仅 20.141 mm,说明测量成果可靠。

第一、二次地面网测量均观测了园区 P01L~P08R 这 8 个永久点,对比两次地面网测量坐标,再反算相应两点间距离,得出下表 5、表 6 结果。其中两次地面网测量的 P05R 点位标准偏差为 11.14 mm,反算距离的结果也显示凡是与 P05R 搭接的基线长度偏差都较大,怀疑 P05R 点位发生跑动。除 P05R 外其余 7 点平面方向坐标标准偏

表 1 LGO 与 TBC 平差结果对比
Table 1 Comparison of LGO and TBC adjustment results

permanent point	$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta Y/\text{mm}$
P01L	-0.298	-0.067
P02L	-0.169	0.084
P03B	0.043	0.197
P04B	0.093	0.155
P05R	-0.033	0.201
P06R	-0.247	0.314
P07R	0.009	0.083
P08R	-0.053	0.177

表 2 平差结果与土建坐标对比
Table 2 Comparison between adjustment results and civil engineering coordinates

civil construction point	$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta Y/\text{mm}$	$\Delta Z/\text{mm}$
J4SA	1.749	0.452	-4.682
J6SA	-1.075	-1.964	-0.766
J7SA	0.915	0.727	-1.412
J8SA	-0.174	3.686	-0.513
J12S	-1.416	-2.901	-2.653

表 3 已知点边长与实测坐标反算边长对比
Table 3 Comparison between known point side length and measured coordinate inverse side length

start and end roll call at baseline edge	the first surface network results are reversed/mm	distance from civil construction points	difference/mm
J4SA-J6SA	185 970.723	185 969.791	0.932
J4SA-J7SA	254 358.179	254 357.623	0.555
J4SA-J8SA	305 962.913	305 959.874	3.039
J4SA-J12S	185 167.096	185 171.603	-4.507
J6SA-J7SA	144 086.517	144 083.239	3.278
J6SA-J8SA	268 817.005	268 812.228	4.777
J6SA-J12S	304 370.946	304 371.293	-0.347
J7SA-J8SA	138 588.783	138 588.290	0.493
J7SA-J12S	276 868.125	276 868.467	-0.341
J8SA-J12S	233 472.998	233 468.058	4.940

表 4 第 1 次地面网永久点测量成果与设计坐标对比
Table 4 Comparison between the first surface network permanent point survey results and design coordinates

permanent point	$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta Y/\text{mm}$	$\Delta Z/\text{mm}$
P01L	-4.895	-10.841	-0.421
P02L	-7.920	-4.297	-4.076
P03B	5.145	-15.623	-18.978
P04B	9.044	-17.321	2.435
P05R	14.439	-2.691	-7.136
P06R	-20.141	-0.894	16.556
P07R	-7.083	7.614	3.684
P08R	-4.436	-5.313	-5.459

表 5 两次地面网成果对比

Table 5 Comparison of two surface network results

point	$\Delta X/mm$	$\Delta Y/mm$	$\Delta Z/mm$
P01L	-0.558	-0.468	0.000
P02L	1.636	-0.118	-1.668
P03B	0.950	0.317	0.198
P04B	0.337	-2.877	-0.251
P05R	4.789	-9.902	1.756
P06R	-2.461	1.158	0.291
P07R	2.293	-1.703	-0.134
P08R	-2.198	3.691	0.582

表 6 两次地面网成果反算距离对比

Table 6 Reverse calculation distance comparison of two surface network results

test point	permanent point	two surface network inverse distance difference/mm
P05R	P01L	-10.666
	P02L	-7.638
	P03B	4.074
	P04B	-8.029
	P06R	4.671
	P07R	-2.496
	P08R	-12.947

差 2.58 mm, 高程方向坐标标准偏差 0.7 mm, 说明桩体基本稳定, 测量可靠。

为验证 P05R 是否确实存在跑动, 对第二次地面网测量的数据采用枚举法计算了 32 种不同约束的平差方案, P05R 均不参与约束, 与第一次地面网成果一一对比, 其中 P05R 的点位偏差最大为 14.560 mm, 最小为 8.047 mm, 足以证明 P05R 点标志确实存在跑动, 现场勘查永久点 P05R, 发现护井内存在大量积水, 推测产生位移的原因可能是地下泉眼冒水涌动冲击了桩基根部。第二次地面网测量的两个阶段均对 P05R-P08R 这四个点位进行了 GNSS 观测, 中间时间间隔近 7 个月, 将两阶段测量数据独立平差, 结果对比如表 7 所示, P05R 点位偏差 0.89 mm, 认为目前水位如不再继续上升, P05R 点标志有趋于稳定的趋势, 其他点的坐标偏差也在减小, 永久点桩体普遍趋于稳定。

表 7 第 2 次地面网两阶段成果对比

Table 7 Comparison of the results of the second surface network at two stages

point	$\Delta X/mm$	$\Delta Y/mm$	$\Delta Z/mm$
P05R	0.582	-0.668	-0.102
P06R	-1.488	0.649	-0.154
P07R	1.076	0.638	0.007
P08R	-0.170	-0.619	0.247

全站仪测量成果可以作为 GNSS 控制网的外符合验证, 将第二次地面网成果与全站仪测量成果相对比, 如表 8 所示。

将全站仪外业实测斜距经气象改正、大气折光改正、仪器高归算后得到的平面边长, 与第二次地面网成果坐标反算后得到的对应边长相比较, 全站仪每一测站都观测了七个距离, 这七个距离均与 GNSS 坐标反算的距离对比, 得到七个差值, 将最大差值与最小差值列入下表, 如表 9 所示, 进一步验证了 GNSS 测量的正确性^[7]。全站仪外符合结果显示 GNSS 测量成果符合光源精度要求。

5 结 论

本文将第一次地面网测量成果与基建提供的点位坐标进行了对比, 除去国土点, 平面方向最大偏差为 3.686 mm, 高程方向最大偏差为 4.682 mm, 外符合对比标准偏差为 3.4 mm, 平差坐标反算距离最大偏差为 4.940 mm, 标准偏

表 8 第 2 次地面网成果与全站仪测量成果对比

Table 8 Comparison of the results of the second surface network and total station survey

point	$\Delta X/mm$	$\Delta Y/mm$	$\Delta X/mm$	$\Delta Y/mm$
	comparison of the second formal results of surface network and COSA adjustment measured by total station		comparison with vector adjustment measured by total station	
P01L	0.760	-0.463	0.409	-0.686
P02L	0.665	-0.489	0.346	-0.537
P03B	-0.196	-0.044	-1.056	0.112
P04B	-0.205	-0.072	-0.692	-0.148
P05R	0.015	-0.351	0.008	-0.392
P06R	1.296	0.261	1.171	0.246
P07R	1.154	0.344	1.066	0.382
P08R	-0.392	0.623	-0.499	0.571

表 9 全站仪测距边与 GNSS 坐标反算距离对比

Table 9 Inverse distance comparison between the range edge of total station and GNSS coordinates

survey station	reference point	GNSS coordinates inverse distance/mm	the side length measured by the total station is reduced to the Gaussian plane distance/mm	difference/mm
P01L	P05R	132 650.190	132 650.919	-0.729
	P02L	46 803.767	46 803.792	-0.025
P02L	P04B	36 611.268	36 612.157	-0.889
	P01L	46 803.767	46 803.745	0.022
P03B	P06R	315 978.187	315 980.501	-2.314
	P04B	150 772.074	150 772.498	-0.424
P04B	P02L	36 611.268	36 612.280	-1.012
	P05R	111 579.603	111 579.497	0.106
P05R	P04B	111 579.603	111 578.474	1.129
	P01L	132 650.190	132 650.233	-0.043
P06R	P03B	315 978.187	315 977.739	0.448
	P07R	300 528.132	300 528.167	-0.035
P07R	P08R	300 525.315	300 526.372	-1.057
	P06R	300 528.132	300 528.192	-0.060
P08R	P07R	300 525.315	300 526.793	-1.478
	P05R	300 499.194	300 499.391	-0.197

差为 2.986 mm。说明采用平面 GNSS 测量和高程水准测量,通过适合的平差方式可以得到可靠成果。

两次地面网成果对比, P05R 的点位标准偏差为 11.14 mm, 高程偏差为 1.756 mm, 发现 P05R 点位标志发生跑动。全站仪测量成果可为第二次地面网成果提供外符合, 将 GNSS 平面成果与全站仪成果对比, 最大偏差为 1.296 mm, 标准偏差为 0.78 mm, GNSS 成果坐标反算距离与全站仪平距对比, 最大偏差为 2.314 mm, 标准偏差为 0.89 mm。表明第二次地面网 GNSS 成果数据可靠, 符合光源 2 mm 精度要求。

将第二次地面网两阶段成果对比, 发现 P05R 在跑动后有趋于稳定的趋势, 点位标准偏差为 0.892 mm。建议坚持每年复测首级地面控制网, 形成统一的平差方案, 选择至少 4 个稳定点作为起算基准, 保持网形一致, 提高坐标绝对精度。

HEPS 地面永久点结构设计精巧, 大厅屋面准直平台垂直贯通隧道顶面、光束线站顶面, 与隧道点位形成通视, 实现了大范围控制网点间的联系测量, 以及采用多种仪器测量、多种软件计算, 彼此相互验证的方法均值得其他光源借鉴。

致 谢 感谢中国科学院上海高等研究院的段梦琪、袁蹈给予的指导和帮助, 感谢合肥国家同步辐射实验室的王巍、李笑给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 郭迎钢, 李宗春, 李广云, 等. 粒子加速器工程控制网研究进展与展望[J]. 测绘通报, 2020(1): 136-141. (Guo Yinggang, Li Zongchun, Li Guangyun, et al. Progress and prospect of engineering control network for particle accelerator[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(1): 136-141)
- [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. Survey and alignment design of Shanghai synchrotron radiation facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(7): 1167-1172)
- [3] 王铜, 董岚, 梁静, 等. 中国散裂中子源准直控制网数据处理方法[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 104002. (Wang Tong, Dong Lan, Liang Jing, et al. Adjustment method of control network for alignment in CSNS[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 104002)
- [4] 苏京平. 控制网的稳定性分析[J]. 城市勘测, 2000(4): 14-16. (Su Jingping. Stability analysis of control network[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2000(4): 14-16)
- [5] 马娜, 董岚, 梁静, 等. 基于加速器控制网的 GPS 绝对测量精度探讨[J]. 北京测绘, 2014(6): 23-27,43. (Ma Na, Dong Lan, Liang Jing, et al. Discussion on absolute accuracy of measurement based on accelerator control network[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2014(6): 23-27,43)
- [6] 张勤, 李家权. GPS 测量原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 73-85. (Zhang Qin, Li Jiaquan. Research on teaching reform for the course of GPS surveying principle and applications[M]. Beijing: Science Press, 2005: 73-85)
- [7] 马娜, 罗红斌, 梁静, 等. 一种高精度超大仪器高的测量方案设计[J]. 测绘通报, 2017(10): 128-132. (Ma Na, Luo Hongbin, Liang Jing, et al. A high precision measurement design to obtain super instrument height[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2017(10): 128-132)
- [8] 陈继华. 激光跟踪仪和全站仪测量系统在上海光源(SSRF)工程中的应用研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2001. (Chen Jihua. Research on application of laser tracker and total station measuring system in Shanghai SSRF project[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2001)
- [9] 梁静, 王铜, 罗涛, 等. 一种空间位置测量方法: 106646364B[P]. 2019-01-11. (Liang Jing, Wang Tong, Luo Tao, et al. A method of measuring spatial position: 106646364B[P]. 2019-01-11)
- [10] 魏迎国. 二等水准测量在矿区沉降形变监测中的应用[J]. 中国金属通报, 2022(5): 165-167. (Wei Yingguo. Application of second-class leveling in monitoring subsidence deformation in mining area[J]. China Metal Bulletin, 2022(5): 165-167)
- [11] 冯林刚, 张宗海. 关于 GPS 控制网 WGS84 平差坐标向地方独立坐标系的转换[J]. 测绘通报, 2005(3): 27-29. (Feng Lingang, Zhang Zonghai. On transformation of WGS adjusted coordinates of GPS control network into local independent coordinate system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2005(3): 27-29)
- [12] 王铜, 董岚, 罗涛, 等. 中国散裂中子源控制网测量方案及数据处理[J]. 地理空间信息, 2016, 14(11): 55-57. (Wang Tong, Dong Lan, Luo Tao, et al. Surveying scheme and data processing of the primary control network for China Spallation Neutron Source[J]. Geospatial Information, 2016, 14(11): 55-57)
- [13] 于亚杰, 赵英志, 张月华. 基于椭球膨胀法实现独立坐标系统的建立[J]. 测绘通报, 2011(12): 33-36. (Yu Yajie, Zhao Yingzhi, Zhang Yuehua. The establishment of independent coordinate system based on the ellipsoid expansion method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(12): 33-36)
- [14] 郭小鹏. GPS 网与地面网无约束平差在公路测量中的应用[J]. 测绘技术装备, 2007, 9(2): 35-36. (Guo Xiaopeng. Application of nonrestraint adjustment of GPS and ground control network in road survey[J]. Geomatics Technology and Equipment, 2007, 9(2): 35-36)
- [15] 梁静, 董岚, 王铜, 等. 高程拟合变换的平面坐标获取方法研究[J]. 地理空间信息, 2022, 20(2): 89-92. (Liang Jing, Dong Lan, Wang Tong, et al. Research on the plane coordinate transformation by height fitting method[J]. Geospatial Information, 2022, 20(2): 89-92)
- [16] 东莞中子科学中心. 激光跟踪仪测量数据处理系统: 2017SR681327[P]. 2017-05-01. (Dongguan Neutron Science Center. Laser tracker measurement data processing system: 2017SR681327[P]. 2017-05-01)
- [17] 叶超, 胡耀文, 江华, 等. 顾及地球曲率和大气折光的全站仪观测距离精密归算[J]. 测绘技术装备, 2022, 24(2): 110-113. (Ye Chao, Hu Yaowen, Jiang Hua, et al. Precision distance reduction for total station with consideration of earth curvature and atmosphere refraction[J]. Geomatics Technology and Equipment, 2022, 24(2): 110-113)