

网络构型对三维坐标控制网精度影响的研究



陈海平, 李萌阳, 尹灵钰, 张尽力, 严寒*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川绵阳 621900

摘要: 高精度三维坐标控制网是大科学装置各类大型模块现场安装的基础。天文望远镜等光学装置的规模通常可达到数十米以上, 其大口径光机模块的安装精度要求可达到亚毫米量级。针对光学装置大口径光机模块精密安装的坐标控制需求, 本文拟通过测量与分析, 研究坐标网络的网形对坐标网络精度及可靠性的影响。首先, 本文在 $18\text{m} \times 18\text{m}$ 的区域内布置 29 个测点和 4 个测站, 通过测量与分析得到各测点在第一测站坐标系中的坐标值, 形成三维坐标控制网络。然后, 通过测线筛选分别构建对全连接网络、回形闭环网络和回形开环网络。最后, 基于控制网广义可靠性理论, 从各测点的不确定度、网络中各测点到测站距离的分析值与实测值的差异、控制网络长标尺的长度分析值与标称值的差异等多方面对网络的精度进行评估。结果表明, 全连接网络内各测点的误差不超过 $40\mu\text{m}$, 其精度与可靠性最高, 回形开环网络的精度与可靠性最低。

关键词: 大口径光机模块; 三维坐标控制网; 激光跟踪仪; 统一空间测量网络

DOI: [10.57237/j.earth.2023.01.002](https://doi.org/10.57237/j.earth.2023.01.002)

Study on the Influence of Network Configuration on the Accuracy of 3D Coordinate Control Network

Chen Haiping, Li Mengyang, Yin Lingyu, Zhang Jinli, Yan Han*

Laser Fusion Research Center, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

Abstract: The high-precision 3D coordinate control network is the foundation for on-site installation of various large-scale modules in large-scale scientific facility. The scale of optical devices such as astronomical telescopes can usually reach tens of meters or more, and the installation accuracy of their large aperture optical mechanical modules can reach the sub-millimeter level. In response to the coordinate control requirements for the precise installation of large aperture optical mechanical modules in optical devices, this article intends to study the impact of the grid shape of the coordinate network on the accuracy and reliability of the coordinate network through measurement and analysis. Firstly, 29 measurement points and 4 stations are arranged within an $18\text{m} \times 18\text{m}$ area in this article, and the coordinate values of each measurement point in the first station coordinate system are obtained through measurement and analysis, forming a 3D coordinate control network. Then, a fully connected network, a loop back close network, and a loop back open network are constructed through line screening. Finally, based on the generalized reliability theory of control networks, the accuracy of the network is evaluated from various aspects such as the uncertainty of each measurement point, the difference between the analyzed and measured

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U20A20215).

*通信作者: 严寒, yanhan_caep@126.com

收稿日期: 2023-09-11; 接受日期: 2023-10-26; 在线出版日期: 2023-10-28

<http://www.earthscieng.com>

values of the distance from each measurement point to the measurement station in the network, and the difference between the analyzed and nominal values of the length of the control network's long scale. The results indicate that the error of each measurement point in the fully connected network does not exceed 40 μ m. The fully connected network has the highest accuracy and reliability, while the loop open loop network has the lowest accuracy and reliability.

Keywords: Large Aperture Optical Mechanical Module; 3D Coordinate Control Network; Laser Tracker; Unified Spatial Measurement Network

1 引言

20 世纪中叶以来,随着人类对未知领域探索,科学研究内容不断深化,研究手段和方式也趋于复杂化,对大型科学装置的需求也日益剧增。大型科学装置等工程的建设,对工程测量提出了更大范围、更高精度的双重挑战。大范围高精度坐标控制网是此类工程建设的必不可少的基础。高精度三维坐标控制网的建立方法得到广泛的研究[1~7]。现阶段,可通过全站仪(含经纬仪)[8]、激光干涉仪[9]、激光跟踪仪[10, 11]、全球导航卫星系统[12]等系统测量构建高精度三维控制网。利用全站仪(或经纬仪)进行精密测角建立三维控制网虽然精度较高,但存在着操作复杂、受人为操作因素影响较大、范围较小等不足[13]。通过激光干涉仪精密距离测量建立三维控制网具有精度高的优势,但存在算法复杂、现场测量条件易受限等不足。全球导航卫星系统坐标测量建立三维控制网具有效率高、范围广的优势,现阶段精度仍在毫米量级,可用于大型建筑、桥梁、高铁等工程的控制网测量,不足以满足高精度工程测量的精度要求。通过激光跟踪仪多站测量分析构建三维控制网[14, 15]具有范围广、精度高、测量便捷性高等优势,广泛应用于兰州重离子加速器、上海光源、散列中子源等各大科学装置的建设过程。

激光跟踪仪测量系统是一种大范围、高精度、实时动态测量的球坐标测量系统,其直接测量值包括水平角 H 、垂直角 V 、距离 D 三个值。根据极坐标原理,待测点在仪器坐标系中的三维坐标 (x, y, z) 如式(1)。

$$\begin{cases} x = D \cdot \sin V \cdot \cos H \\ y = D \cdot \sin V \cdot \sin H \\ z = D \cdot \cos V \end{cases} \quad (1)$$

本文通过激光跟踪仪测量与分析,在实验室构建高精度三维坐标控制网络,为大口径光机模块精密定位提供坐标基准,实现亚米级的大口径光机模块亚毫米级的高精密现场安装。通过测线筛选,构建不同类

型的坐标控制网络。首先,利用测量得到的全部测线构建全连接网络。然后,删除穿越回形空间内部区域的测线,构建回形闭环网络。最后,删除第一测站与最后一个测站之间的闭环测线,构成回型开环网络。基于控制网广义可靠性理论,从各测点坐标值的不确定度、测站与点位之间的距离分析值与跟踪仪实测值的差异、短标尺长度分析值与标称值的差异、长标尺长度分析值与标称值的差异等方面对所构建的网络精度进行评估,以判断各坐标控制网络的精度,选择最优的坐标控制网络。

2 控制网络设计与测量

根据实验室内光机模块精密安装的需求,首先在 $18\text{m} \times 18\text{m}$ 的空间内设计并布置三维控制网络,如图 1 所示。

该区域内有 4 根立柱,在立柱与墙面之间的回形空间的四个通道内共布置 29 个测点,4 个通道内的测点分别命名为 P101~P107, P201~P208, P301~P308, P401~P406。

在测量方案和测量仪器方面,本网络选用激光跟踪仪坐标测量作为主要的测量方案。且在实施网络测量前,将激光跟踪仪、标准尺等设备放置到实验室进行温度平衡。

在观测值可靠性方面,在回形通道的上下两条通道内合理的位置布置短标尺。在每一站测量时,都首先测量短标尺的端点 A,然后测量测站内其他各测点,最后测量短标尺的端点 B。分析时可以通过分析短标尺长度的测量结果是否存在异常判断各测站在测量过程中是否存在位移,提高观测值的可靠性。

在平差系统方面,选用合适的平差算法对数据进行分析。同时,在网络中引入长标尺,通过分析长标尺的长度误差,判断网络平差结果是否异常,进一步

提高控制网的可靠性。

短标尺为碳纤维标准尺，通过三坐标测量机进行标定测量，标定结果为 1000.740mm，标定误差范围为 $\pm 0.007\text{mm}$ 。长标尺通过高精度测距传感器[16]进行精密标定。测量时将高精度测距传感器放置于两个基准

点连线的延长线上，通过测量两点与高精度测距传感器之间的距离后求差得到长标尺标定结果为 10788.583mm。高精度测距传感器标称的单点测距误差为 $\pm 10\mu\text{m}$ ，基于误差合成理论可知长标尺标定误差范围为 $\pm 0.014\text{mm}$ 。

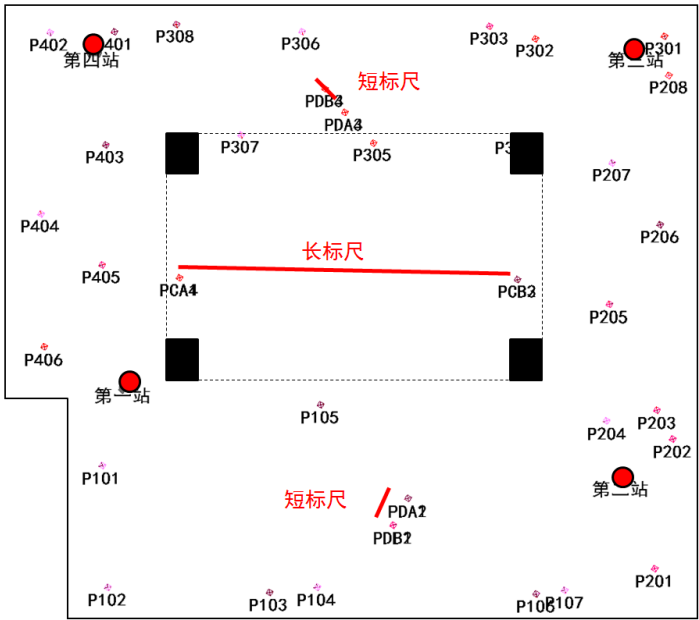
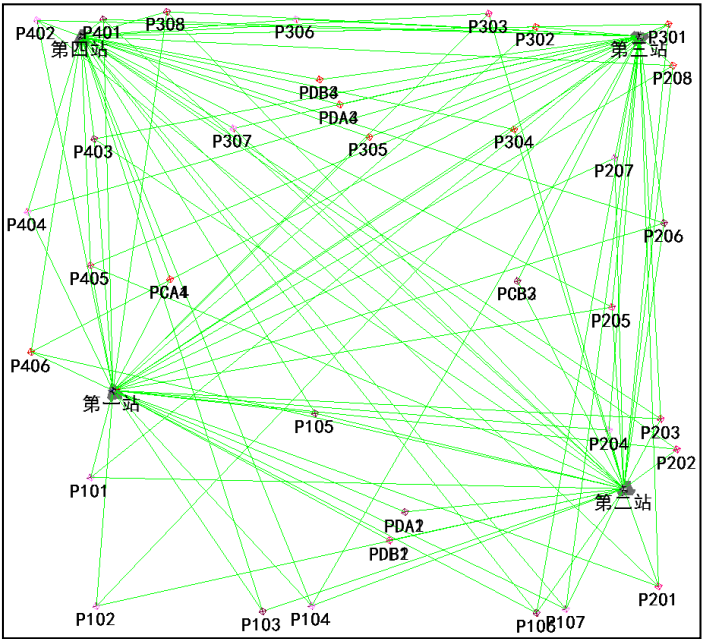


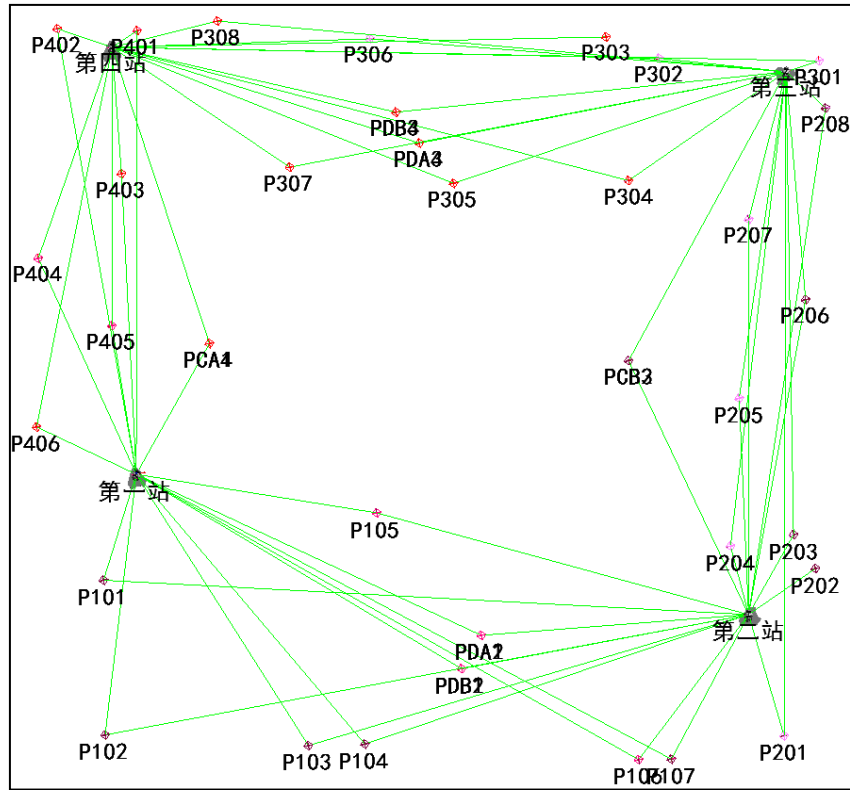
图 1 三维控制网设计示意图

Figure 1 Schematic Diagram of 3D Control Network

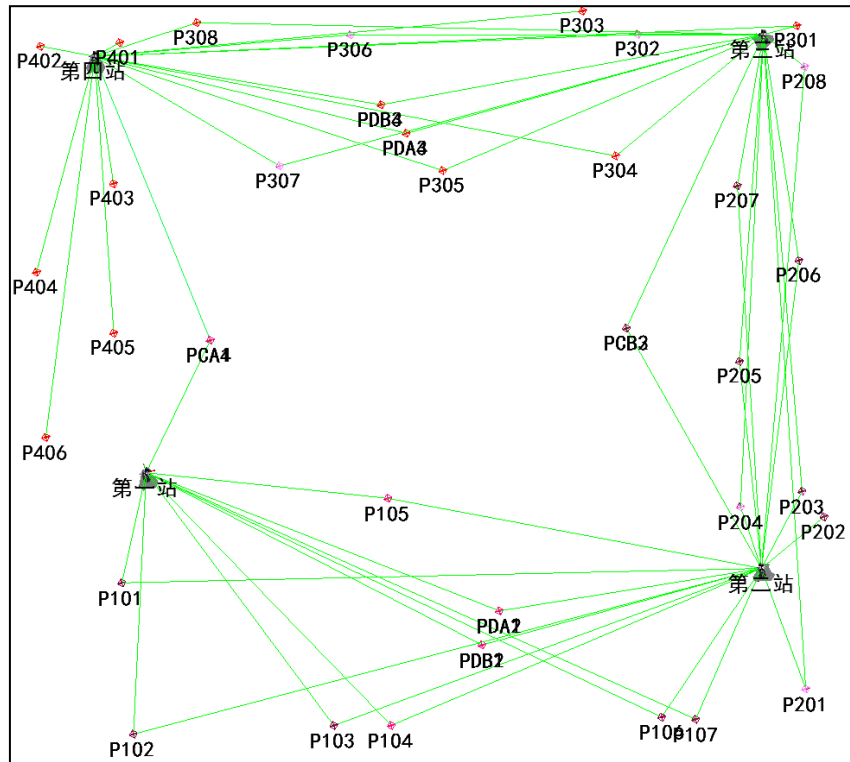
为构建三维坐标控制网络，在该区域内布置 4 个测站，用激光跟踪仪分别对可测量的测点进行测量，形成全连接网络、回形闭环网络和回形开环网络，如图 2 所示。



a) 全连接网络



b) 回形闭环网络



c) 回形开环网络

图 2 不同构型网络的测线图

Figure 2 Line maps of networks with different configurations

全连接网络要求在每个测站都尽可能多测量测点。回形闭环网络仅要求在每个测站完成相邻两个通道内的测点的测量。回形开环网络在回形闭环网络的基础上，删除第一测站与测点 P401~P406 之间的测线，即第四站与第一站之间没有公共测点。各网络测线统计如表 1 所示。

表 1 各测站测线数量统计
Table 1 Statistics of the number of survey lines at each station

网络类型	第一测站测线数量	第二测站测线数量	第三测站测线数量	第四测站测线数量
全连接网络	27	25	25	25
回形闭环网络	13	15	14	14
回形开环网络	7	15	14	14

根据网络设计结果，在实验室内布置测点、短标尺、长标尺。激光跟踪仪依次布置到 4 个测站，完成所有测点及标尺的测量。根据网络设计，选择合适的测量数据，通过平差分析构建相应的三维坐标控制网络。

在控制网平差分析之前，首先根据各测站内短标尺长度测量结果分析测站是否在测量过程中发生微小位移。本次实验各测站对短标尺长度测量结果如表 2 所示。根据表 2 的结果可得，各测站对短标尺长度测量值与参考值的最大差异为 0.014mm，不存在过大的测量误差，各测站均未在测量过程中存在位移。

表 2 各测站对短标尺长度测量的统计
Table 2 Statistics of short scale length measurement by each measuring station

	第一测站	第二测站	第三测站	第四测站
短标尺长度测量长度/mm	1000.726	1000.749	1000.747	1000.730
实测值与参考值的差异/mm	-0.014	0.009	0.007	-0.010

3 控制网平差分析

同一个量的各观测值之间，或者各观测值与其理论值（或其理论上真值）之间总是会因为测量仪器、测量条件以及观测者等不同而存在的差异。平差的目的是利用某种优化准则，由一系列带有误差的测量数据，求定未知量的最佳估计值及精度的理论和方法[17]，常用的平差方法包括最佳拟合、光束法平差、统一空间测量网络等。

a) 最佳拟合

最佳拟合原理相对简单，其原理是各站之间通过公共点进行转站，基于所有观测值的残差平方和最小的原则，对矩阵参数进行最小二乘求解，得到各站之间的旋转矩阵 R 和平移向量 D ，最后将坐标系统一到指定的坐标系上，建立控制网络。通常用激光跟踪仪第一测站坐标系为基准建立全局坐标系。

最佳拟合通常应用于激光跟踪仪转站测量，要求两站之间公共点数不小于 3。单次最佳拟合智能执行两各测站之间的最佳拟合，三个或三个以上的站位就需

要执行多次最佳拟合，伴随着最佳拟合次数增加，最终会产生比较大的误差[18]。

b) 光束法平差

光束法平差是测量学中非常重要的理论和方法。光束法平差源于经纬仪、全站仪观测时成束的瞄准（bundles of pointing）[19]，广泛应用于经纬仪测量、全站仪测量以及摄影测量中。该方法以物点、投影中心和像点 3 点共线的共线条件方程（式(2)）为基础的。其中，像点坐标是基本观测值，平差后结果是各像点相应的物点的三维坐标、相机的定向参数及相应的精度信息[20]。

$$\begin{cases} x - x_0 = -f \frac{a_1(X-X_s)+b_1(Y-Y_s)+c_1(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \\ y - y_0 = -f \frac{a_2(X-X_s)+b_2(Y-Y_s)+c_2(Z-Z_s)}{a_3(X-X_s)+b_3(Y-Y_s)+c_3(Z-Z_s)} \end{cases} \quad (2)$$

其中 (x_0,y_0) , f 为像平面中心坐标和相机主距，即相机内方位元素。 $(x,y,-f)$ 为像点坐标值， (X,Y,Z) 为物点坐标值， (X_s,Y_s,Z_s) 为投影中心坐标值， $\begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix}$ 为相机定向参数。

使用光束平差法处理经纬仪、全站仪及激光跟踪仪的观测值时,首先需要在每一个测站建立虚拟像面。像面建立过程如下:

- 1) 以测量原点(三轴交点)建立投影中心;
 - 2) 以最大水平观测角和最小水平观测角的角平分线在水平面上的投影射线建立像面法向;
 - 3) 以投影中心到虚拟像面距离 f 为焦距建立像面。
- 原则上, f 可以取任意值,但为了计算方便,通常取 206.265mm。

c) 统一空间测量网络

在光束法平差过程中,基于等精度测量的假设,所有仪器和测点的权值都是 1。大尺寸测量时,测点到测站距离相差较大,会导致各测点误差存在较大差异。并行作业时,用不同仪器进行测量,导致各测站测量误差存在较大差异。为进一步提高平差结果的合理性,需根据实际测量情况对各测站、测点进行单独的权值设置,为此产生了统一空间测量网络。统一空间测量网络的优点是可以根据仪器测量特性对每个测站对各测量点的测量进行权重分配,测量精度高的位置被分配到的权重较大,而测量精度低的位置被分配到的权重较小,且所有能观测到单一测点的站位权重总和为 1。

统一空间测量网络可以理解作为一种能够自适应分配权值的光束平差处理技术。统一空间测量网络的构建过程如下:

- 1) 在各测站测量固定的测点,并将测点描述为 P_{ik} ,如式(3)。

$$P_{ik} = f(m_{ki}, \sigma_k) \quad (3)$$

式中 m_{ki} 为 k 测站测量 i 测点的坐标分量,以球坐标系为例 $m = (\rho, \theta, \Phi)$,其中 ρ 为待测点到测站的距离, θ 为待测点与测站连线的水平角, Φ 为待测点与测站连线的垂直角; σ_k 是 k 测站的权值,受到测量仪器、测量环境、测量操作等因素的影响。

- 2) 求出固定点坐标 P_i ,使得残差 $\sum_{i=1}^m \varepsilon_{ik}^2$ 最小;
- 3) 计算仪器的坐标转换矩阵,使得矩阵转换误差最小;

仪器的坐标转换矩阵 T 如式(4)。

$$T = \begin{bmatrix} R(\gamma, \beta, \alpha) & D_x \\ & D_y \\ & D_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

该步骤的目的是计算 $T_k (k=1, 2, \dots, n)$,使得 $\sum_{k=1}^n E_k^2$ 最小,其中 $E_k = [\varepsilon_k]$ 为每站的转换误差。

- 4) 根据残余误差确定测量不确定度分量,得到测量网中测量仪器的不确定度分量 U_ρ, U_θ, U_Φ 。

d) 平差分析结果

本文采用统一空间测量网络对测量数据进行处理,通过该分析可以得到各测点、短标尺端点、长标尺端点以及各测站在第一测站坐标系中的坐标。统一空间测量网络分析还可以得到各测站的激光跟踪仪自身的水平角、垂直角与测距残差,如表 3 所示。

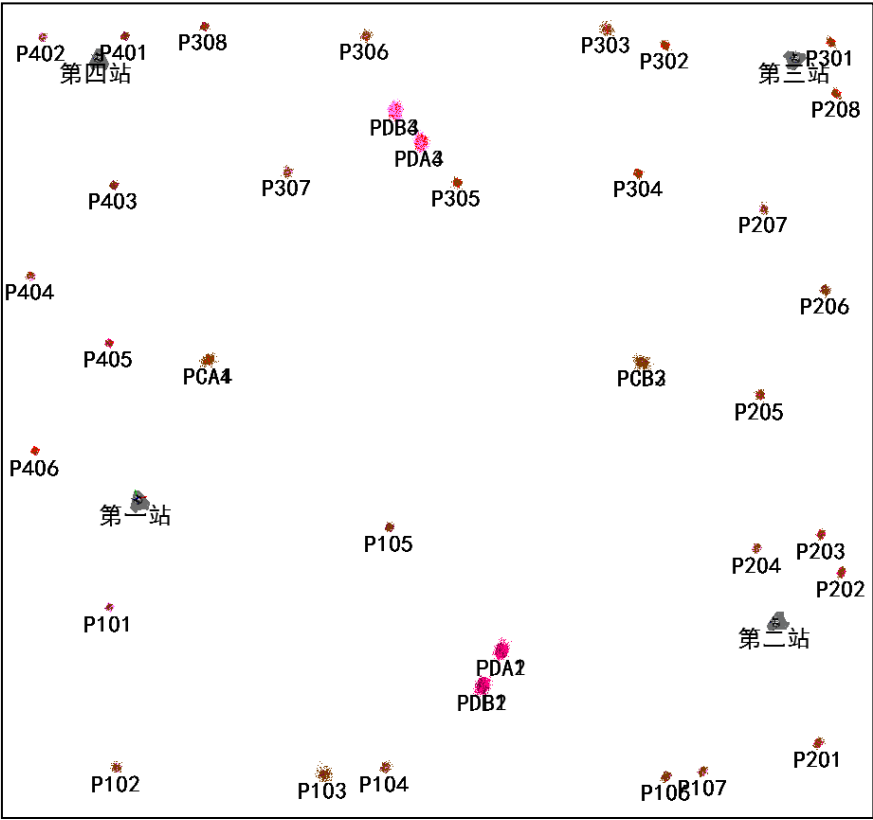
表 3 各测站的测量残差统计

Table 3 Measurement error statistics of each measuring station

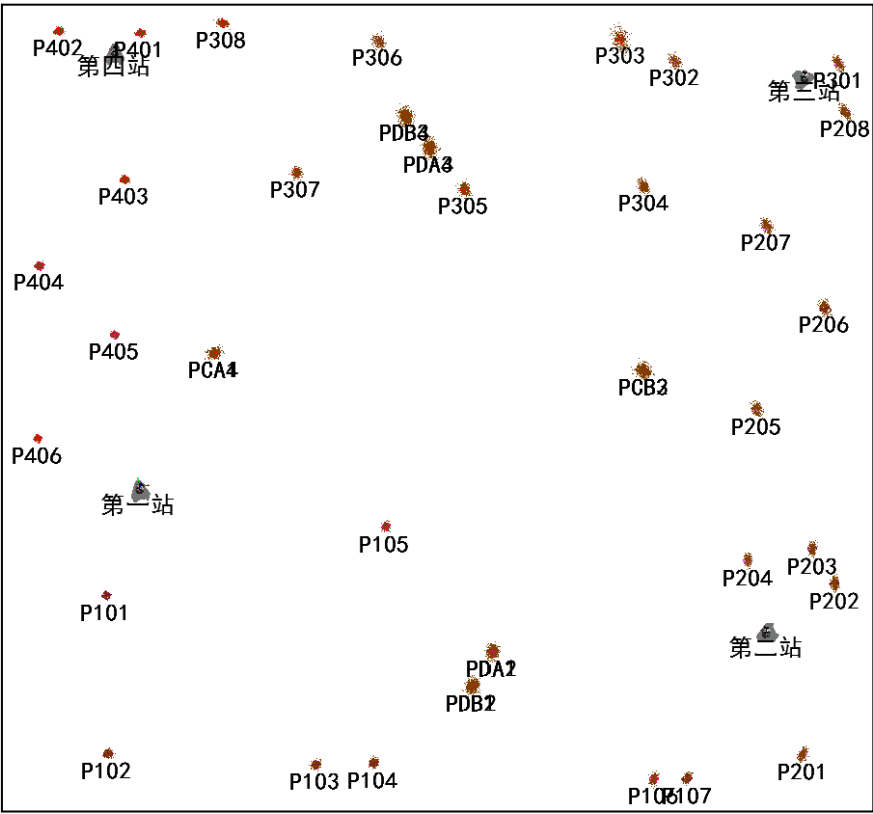
网络类型	全连接网络				回形闭环网络				回形开环网络			
测站序号	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
水平角残差/角秒	0.30	0.35	0.37	0.34	0.34	0.30	0.30	0.27	0.32	0.19	0.26	0.17
竖直角残差/角秒	0.28	0.31	0.22	0.24	0.24	0.34	0.19	0.22	0.20	0.16	0.15	0.09
距离残差/ μm	13	16	10	12	11	14	5	5	7	8	6	3

分析各测站跟踪仪的测量残差数据,全连接网络的各测站的残差最大,回形开环网络各测站的残差最小。全连接网络各测站的测点数最多,在平差分析将各测站与测点的误差最小化的过程中,测站误差相对较难降低。回形开环网络各测站的测点数最小,且网络未形成闭环网络,各测站仅通过公共点转站的方式进行关联,在平差分析各测站修正较小,各测站的测量残差取决于激光跟踪仪的测量误差,因此其测量残差相对最小。

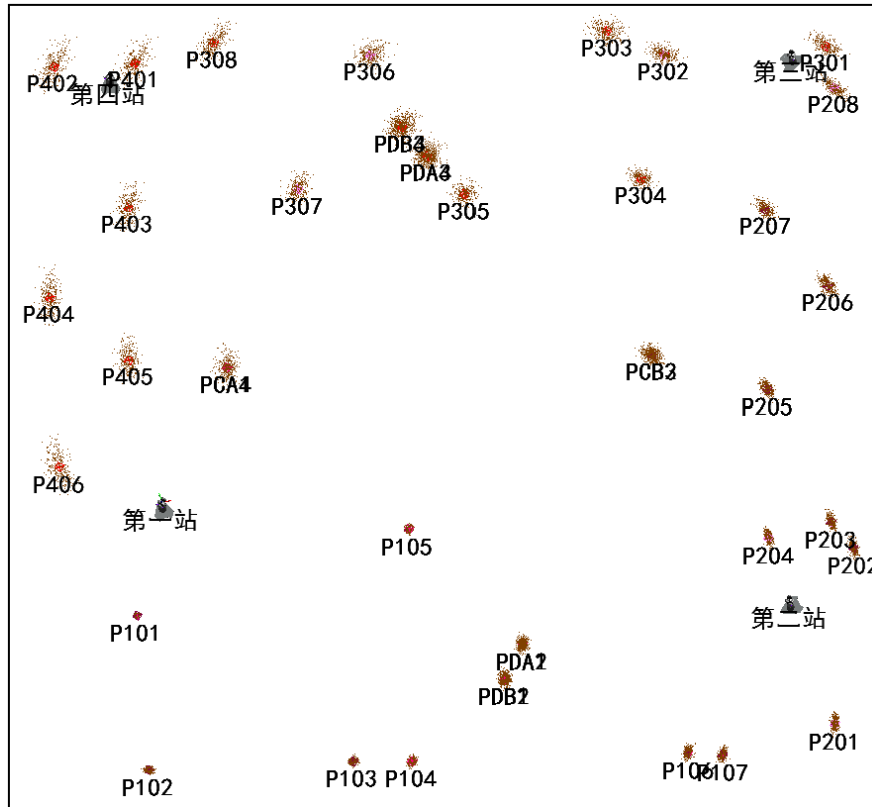
将激光跟踪仪测量的角度误差与距离误差特性代入每个点的测量分析过程,通过蒙特卡洛分析获取每个测点的不确定度。本文对每个点进行 1000 次仿真分析,在每个测点的理论值附近形成点云,如图 3 所示。



a) 全连接网络



b) 回形闭环网络



c) 回形开环网络

图 3 不同网络的不确定场示意图

Figure 3 Schematic Diagram of Uncertainty Field of Different Networks

各类网络中，最大的不确定度如表 4 所示。

表 4 各网络最大不确定度统计

Table 4 Statistics of maximum uncertainty of each network

网络类型	全连接网络	回形闭环网络	回形开环网络
最大不确定度点编号	P103	P301	P406
最大不确定度值/ μm	85	158	490

分析不同网络的不确定度可得：

- a) 回形开环网络的不确定度值最大，且存在从第一站到第四站不断增大的趋势；
- b) 全连接网络和回形闭环网络的不确定度场分布都相对均匀，不存在从第一站到第四站不断增大的趋势；
- c) 全连接网络的不确定度值最小。

4 控制网精度分析

基于激光跟踪仪测距精度较高、测角精度低的特性，以激光跟踪仪测距数据为参考，分析平差后得到的各测站与相应测点之间的距离值与激光跟踪仪实测距离值的差异，据此分析各类网络的绝对误差与相对误差。各类网络内各测点到相应测站距离的误差如图 4 所示。

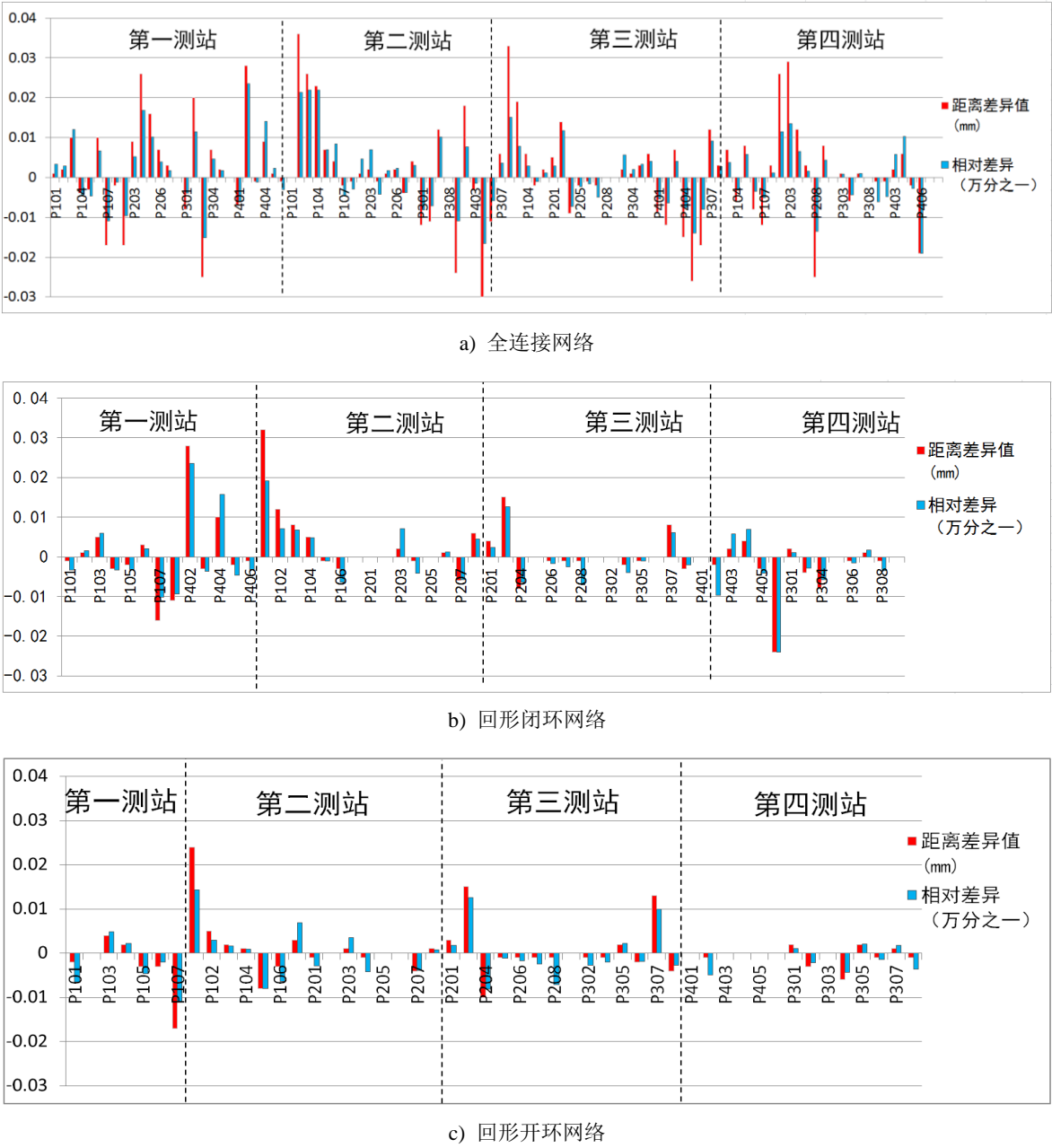


图 4 各类网络内各测点到相应测站距离分析值与实测值的差异

Figure 4 The difference between the analysis value and the measured value of the distance from each point to the station in various networks

各类网络内各测点到相应测站距离与实测值的差异最大值如表 5 所示。

表 5 各类网络内各测点到相应测站距离分析值与实测值的差异统计

Table 5 Statistics of the difference between the analysis value and the measured value of the distance from each point to the station in various networks

网络类型	全连接网络	回形闭环网络	回形开环网络
最大距离差异值/ μm	36	32	24
最大相对差异值/万分之一	0.0235	0.0241	0.0144

分析各类网络内各测点到相应测站距离与实测值的差异可得:

- 回形开环网络各测点到相应测站距离与实测值的差异最小。其原因为该网络未形成闭环,平差分析过程中对测站位姿修正较小。同时,由于测点 P401~P406 仅在第四站进行测量,该部分点的差异值除 P402 外均为 0;
- 全连接网络与回形闭环网络的最大距离差异值及最大相对差异值接近,其最大距离差异值均不超过 0.04mm,最大相对差异值均不超过 2.5ppm。

根据两点之间距离差异与测点定位误差的关系可得,该网络内测点定位误差不超过 0.028mm。

为进一步分析网络的误差,在网络中布置了长标尺,在第一测站、第四测站测量了长标尺靠近跟踪仪的端点(端点 A),在第二测站、第三测站测量了长标尺靠近跟踪仪的端点(端点 B)。以第一测站端点 A 和第二测站端点 B 的距离形成长标尺长度值 1,以第四测站端点 A 和第三测站端点 B 的距离形成长标尺长度值 2。通过分析长标尺长度值 1、长度值 2 与长标尺标称值的差异分析网络的误差,如表 6 所示。

表 6 长标尺长度值与标称值的差异统计

Table 6 Statistics of the difference between the measured value and the nominal value of the length of the long ruler

网络类型	全连接网络	回形闭环网络	回形开环网络
长标尺长度值 1/mm	10788.536	10788.505	10788.479
长标尺长度值 2/mm	10788.540	10788.538	10788.557
长标尺长度差异 1/ μm	-47	-78	-104
长标尺长度差异 2/ μm	-43	-45	-26

分析各类网络内长标尺长度值与标称值的差异可得全闭环连接网络得到的长标尺长度值差异最小,回形闭环网络得到的长标尺长度值差异较大,回形开环网络得到的长标尺长度值差异最大。

基于控制网精度分析可得:

- 全连接网络与回形闭环网络的最大距离差异值及最大相对差异值接近,但全连接网络的长标尺长度值差异最小,全连接网络更适宜构建大范围高精度的三维坐标控制网;
- 回形开环网络各测点到相应测站距离与实测值的差异最小,但长标尺长度值差异最大。该构型网络内距离较远的两个点相对位置关系存在较大误差,不适宜构建大范围高精度的三维坐标控制网;
- 在条件受限时,可采用回形闭环网络构建大范围高精度的三维坐标控制网。

- 通过激光跟踪仪自由设站测量与统一空间测量网络进行平差分析,可以构建高精度的三维空间坐标控制网络。在 18m 乘 18m 的空间内,该网络绝对精度可达到 0.04mm,其相对精度可达到万分之 0.025;
- 全连接网络长标尺长度值与标称值差异最小,且全连接网络各点的不确定度最小,该构型的网络可靠性最佳;
- 回形开环网络各点与相应测站之间的距离与实测值的差异最小,但该网络各点的不确定度最大,且存在从第一站到第四站不断增大的趋势,同时其长标尺长度值与标称值的差异最大,认为该网络误差相对较大。

5 总结

本文通过激光跟踪仪测量,选取不同的测量数据进行平差分析,分别构建了全连接网络、回形闭环网络和回形开环网络,通过对网络内各测点的不确定度、各测点与相应测站之间的距离与实测值的差异、长标尺长度值与标称值的差异等多方面对网络精度、可靠性进行分析。综合各方面分析结果可得:

参考文献

- [1] 李方, 邹进贵, 杨义辉. AT960 激光跟踪仪在大型设备安装检测中的应用 [J]. 测绘通报, 2018(S1): 129-133.
- [2] 张振虎. 激光跟踪仪结合全站仪的三维控制网测量及其精度分析 [J]. 北京测绘, 2019, 33(6): 708-712.
- [3] FORBES A B. Weighting Observations from Multisensor Coordinate Measuring System [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(2): 025004.
- [4] 于成浩, 董岚, 柯明 等. 大尺寸激光跟踪仪三维控制网平面精度研究 [J]. 测绘科学, 2008, 33(2): 42-44.

- [5] 李方, 邹进贵, 王铜 等. 粒子直线加速器精密三维控制网研究 [J]. 地理空间信息, 2018, 16(2): 87-89.
- [6] 蔡国柱. 大型离子加速器先进准直安装方法研究 [D]. 中国科学院大学 (兰州), 2014: 37-46.
- [7] 聂海滨. 基于激光跟踪仪的大型设备精密测量关键技术研究 [D]. 武汉大学 (武汉), 2017: 28-39.
- [8] 王志勇. 利用工业全站仪的三维控制网布设与精度分析 [J]. 测绘地理信息, 2013, 38(6): 45-47.
- [9] 范百兴, 李广云, 李佩臻 等. 利用激光干涉测距三维网的加权秩亏自由网平差 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2015, 40(2): 222-226.
- [10] 张三福. 基于激光跟踪仪的精密控制网建立及其精度分析研究 [D]. 兰州交通大学 (兰州), 2014: 35-57.
- [11] ZHANG D, ROLT S, MAROPOULOS P G. Modelling and Optimization of Novel Laser Multilateration Schemes for High-precision Applications [J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(12): 2541-2547.
- [12] 江宏军, 李春华. 静态 GNSS 控制网三维无约束平差及精度分析 [J]. 北京测绘, 2015: 47-49.
- [13] 汪冲, 范百兴, 向民志. 基于精密测距的三维坐标基准建立方法及精度研究 [J]. 北京测绘, 2017(S1): 65-68.
- [14] GALETTO M, MASTROGICOMO L, MAISANO D, et al. Uncertainty Evaluation of Distributed Large-scale-metrology Systems by a Monte Carlo Approach [J]. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2016, 65(1): 491-494.
- [15] CALKINS J M. Quantifying Coordinate Uncertainty Fields in Coupled Spatial Measurement Systems Mechanical Engineering [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [16] 肖华杰, 邓向瑞, 范百兴, 等. 精密测距仪— μ -base 测距精度测试方法与分析 [J]. 测绘科学与工程, 2016, 36 (2): 7.
- [17] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础 [M]. 第 3 版, 武汉: 武汉大学出版社, 2014: 1-4.
- [18] 尹寿宝. 总装精测提高激光跟踪仪转站精度的方法研究 [D]. 哈尔滨工业大学 (哈尔滨), 2016: 35-37.
- [19] 于成浩, 柯明. 基于激光跟踪仪的三维控制网测量精度分析 [J]. 测绘科学, 2006. 5, 30(3): 25-27.
- [20] 李小鹏. 以电子经纬仪为传感器的无接触三维精密定位测量系统 [J]. 测绘工程, 1995. 3, 4(1): 31-37.

作者简介

陈海平

1988 年生, 硕士研究生, 工程师. 主要研究方向为工程测量技术研究及其应用.

E-mail: chping5705@163.com