

## 用于精密坐标传递的二联激光跟踪仪系统

郭迎钢, 李宗春, 赵文斌, 杜涵文, 王志颖

引用本文:

郭迎钢, 李宗春, 赵文斌, 等. 用于精密坐标传递的二联激光跟踪仪系统[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 30–38.

GUO Ying-gang, LI Zong-chun, ZHAO Wen-bin, et al. Two-laser-tracker system for precise coordinates transmission[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 30–38.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202801.0030>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 激光跟踪仪的双面互瞄定向

Two-face reciprocal orientation for laser tracker

*光学精密工程*. 2017, 25(10): 2752–2758 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172510.2752>

### 基于无衍射姿态探针和全站仪组合测量空间隐藏坐标

Measurement of space coordinates in hidden parts by combining non-diffracting attitude probe and total station

*光学精密工程*. 2015, 23(2): 363–370 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152302.0363>

### 激光跟踪仪多边测量的不确定度评定

Evaluation of uncertainty in multilateration with laser tracker

*光学精密工程*. 2018, 26(10): 2415–2422 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182610.2415>

### 激光跟踪仪转镜倾斜误差的标定及修正

Error calibration and correction of mirror tilt in laser trackers

*光学精密工程*. 2015, 23(5): 1205–1212 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1205>

### 激光跟踪仪多基站转站精度模型与误差补偿

Model establishment and error compensation of laser tracker station-transfer

*光学精密工程*. 2019, 27(4): 771–783 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192704.0771>

文章编号 1004-924X(2020)01-0030-09

## 用于精密坐标传递的二联激光跟踪仪系统

郭迎钢<sup>1\*</sup>, 李宗春<sup>1</sup>, 赵文斌<sup>2</sup>, 杜涵文<sup>2</sup>, 王志颖<sup>1</sup>

(1. 战略支援部队信息工程大学, 河南 郑州 450001;

2. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201800)

**摘要:** 为了实现受限空间内的精密坐标传递, 建立了二联激光跟踪仪测量系统, 并设计了其施测及数据处理方法。首先, 对 Leica AT402 激光跟踪仪进行改装, 在其提手上安装能够放置球棱镜的靶座, 并精确标定球棱镜中心与仪器中心的高差, 称它为垂向偏心差。然后, 两台激光跟踪仪自由设站, 双面互瞄对方提手上的球棱镜, 并依据垂向偏心差将互瞄观测值改化至仪器中心, 得到仪器中心之间的互瞄观测值。两台仪器分别测量可视范围内的目标点, 当两台仪器能够观测到足够数量的公共点时, 可利用公共点和互瞄观测值共同传递坐标和方位; 当无公共点时, 可利用激光跟踪仪之间的互瞄观测值传递坐标和方位。在上海光源的工程控制网内开展了测量实验, 结果表明: 当相邻测站有公共点时, 该系统能提高坐标转换的精度; 当无公共点时, 在 9 m 的距离上, 坐标传递精度优于 0.22 mm, 定向旋转角精度接近 1"。该系统可应用于三维工程控制网的测量, 尤其适用于通视条件差的精密坐标传递场景。

**关键词:** 激光跟踪仪; 二联激光跟踪仪系统; 双面互瞄; 受限空间; 精密坐标传递

中图分类号: P258 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20202801.0030

## Two-laser-tracker system for precise coordinates transmission

GUO Ying-gang<sup>1\*</sup>, LI Zong-chun<sup>1</sup>, ZHAO Wen-bin<sup>2</sup>, DU Han-wen<sup>2</sup>, WANG Zhi-ying<sup>1</sup>

(1. PLA Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;

2. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

\* Corresponding author, E-mail: fariel\_gxg@163.com

**Abstract:** In this work, a two-laser-tracker system was developed, and its measuring and data processing methods were designed to precisely transmit coordinates in a limited space. First, two Leica AT402 laser trackers were modified, and two target seats were respectively installed on their handles to place spherical prisms. Thereafter, the height difference between the adapter center and instrument center was precisely calibrated as vertical eccentricity. Furthermore, the two laser trackers set up survey stations and aimed at the sphere prism on the handle of the other instrument. The observed values should be adjusted to the instrument centers considering the vertical eccentricity to obtain the aiming interaction observation between the instrument centers. Moreover, the two instruments measured the target points in the visible range. When the two laser trackers could observe sufficient common points, the common points and the aiming interaction observation could be used to transmit coordinates and orientation simultaneously. When there was no common point, the aiming interaction observation was utilized to transmit the coordinates and orientation. Measurement experiments were carried out in the en-

收稿日期: 2019-09-11; 修订日期: 2019-10-22.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41974216)

gineering control network of the Shanghai Synchrotron Radiation Facility. The experimental results show that when there are enough sufficient points in adjacent stations, the accuracy of coordinate transmission can be improved using the aiming interaction observation. When there is no common point, at 9 m, the precision of transmitted coordinate accuracy is better than 0.22 mm, and the precision of the directional rotation angle is approximately  $1''$ . This system can be applied to the measurement of a three-dimensional control network, and is especially suitable for precise coordinate transmission in poor visibility conditions.

**Key words:** laser tracker; two-laser-tracker system; two-face aiming interaction; limited space; precise coordinates transmission

## 1 引 言

在精密工程与工业测量领域,空间点三维坐标的精密测量有着极为广泛的需求<sup>[1-2]</sup>。以经纬仪、全站仪、激光跟踪仪、工业摄影测量等为代表的工业测量系统<sup>[3]</sup>是当前精密工程测量中点坐标测量的主要工具。其中,激光跟踪仪采用球坐标测量原理,坐标测量精度能达到几十微米量级,兼具测量精度高、范围大、速度快、实时测量、自动化程度高等优点,在航空航天、机械制造与安装、设备检测、计量检定等领域都有着广泛的应用<sup>[4-8]</sup>。

在粒子加速器工程控制网测量及准直安装中,激光跟踪仪发挥着重要的作用<sup>[9-13]</sup>。根据加速器隧道控制网为狭长控制网,为了完成整个控制网的测量,激光跟踪仪采用自由设站与多站拼接相结合的方式,相邻测站通过公共点来转换至统一的坐标系内。公共点转换的精度与公共点的数量及空间分布密切相关,当相邻两测站因通视条件受限导致公共点数量少、分布不均时,就会产生较大的坐标转换误差;当相邻两站公共点数量少于 3 个时,甚至无法传递点坐标。

在加速器工程中,尤其在同步辐射光源线站建设时,会有这样一种典型的应用需求:需要将储存环内的坐标精密传递到光束线站,以指导线站内磁铁部件的安装,保证线站与储存环之间精确的相对位置关系,一般要求控制网的传递精度优于 0.3 mm。根据辐射防护的要求,储存环与线站之间一般用厚的水泥墙体隔绝,无法直接通视。这种情况下,有 2 种坐标传递的思路:思路一是通过布设控制网从通视条件更好的地方将控制网坐标引出,然后多站拼接至该线站的建设位置;思路二是在墙面上开挖一个直径为 20~30 cm 的透光

孔,将储存环的控制网传递出去。相比而言,频繁转站会造成精度损失,而且思路一的测量效率低、成本大;思路二的测量成本小、效率高。在思路二的基础上,如何利用透光孔来实现控制网坐标的精确传递极有研究和应用价值。

围绕激光跟踪仪的原理、系统构成、建网方式、精度评定等方面,国内外学者展开了众多的研究<sup>[14-18]</sup>。关于受限空间内点坐标的传递,文献<sup>[19]</sup>提出了一种激光跟踪仪双面互瞄定向的方法,其思路是在激光跟踪仪照准部上固定一个靶座来安置球棱镜,根据照准部的运动特性构建几何约束来实现仪器的定向。作为一款精密测量仪器,在激光跟踪仪照准部上安置球棱镜会一定程度上影响其结构和运动,还有可能与提手部分发生干涉;此外,该方法需要通视路径上布设一个测量点来配合测量解算过程,数学模型较为复杂。

为了解决受限空间内精密坐标的传递问题,在经纬仪精确互瞄思路<sup>[20]</sup>的启发下,本文建立了二联激光跟踪仪系统。该系统首先需要在激光跟踪仪的提手上固定靶座来安放球棱镜,并精确标定球棱镜中心与仪器中心的几何关系。然后,将 2 台改装的激光跟踪仪精确整平后构成二联激光跟踪仪系统进行坐标测量,两台激光跟踪仪精确互瞄后构建仪器中心之间的互瞄观测值来传递坐标和方位。最后,在上海光源的控制网内开展了测量实验,验证了本文方法的精度。

## 2 系统构成及工作原理

### 2.1 系统构成

二联激光跟踪仪系统由 2 台经过改装的激光跟踪仪和 2 个球棱镜构成。为了实现激光跟踪仪之间的互瞄,需要将 U 型卡扣固定在激光跟踪仪

(Leica AT400 系列)的提手上,然后用强力胶将靶座粘在 U 型卡扣上,固定时尽可能使靶座中心位于激光跟踪仪的竖轴。靶座固定后,球棱镜可以在靶座上任意取放,也可以绕水平方向  $360^\circ$ 、垂直方向  $180^\circ$  旋转,从而使系统具有较强的灵活性。球棱镜在靶座上放置的重复性标称精度约为  $\pm 0.01 \text{ mm}$ ,能够保证球棱镜取放、旋转前后的定位中心高精度一致。两个“稳定固联”过程和靶座的高精度加工保证了球棱镜中心与激光跟踪仪中心几何关系的稳定。最终激光跟踪仪与球棱镜的组合效果如图 1 所示。

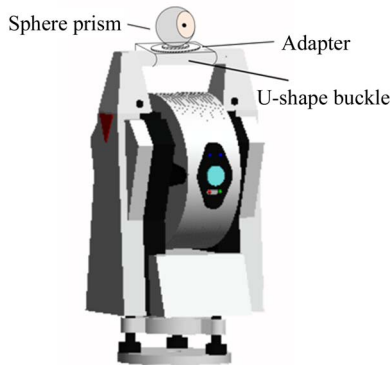


图 1 激光跟踪仪的改装图

Fig. 1 Schematic diagram of modified laser tracker

## 2.2 垂向偏心差标定

二联激光跟踪仪系统工作时,2 台激光跟踪仪照准对方提手上安放的球棱镜,为了将第 1 测站的坐标和方位传递到第 2 测站,需要得出 2 台激光跟踪仪仪器中心的空间位置关系,因此需要将瞄准球棱镜中心的观测值改化为瞄准仪器中心的观测值。球棱镜中心与仪器中心的空间位置关系如图 2 所示。由于球棱镜无法(也无必要)严格安装在激光跟踪仪的竖轴上,其安装位置与球棱镜等效点有一个固定的偏移。激光跟踪仪精确整平后,当仪器绕竖轴转动时,提手上球棱镜的运动轨迹为一个圆。位于 A 处的 1 号激光跟踪仪观测位于 B 处的 2 号激光跟踪仪时,2 号激光跟踪仪在盘左状态和盘右状态下球棱镜的位置关于球棱镜等效点在水平方向上对称,则取盘左盘右时球棱镜平面坐标的中数能够得到仪器中心的平面坐标。即:

$$\begin{cases} x_i = \frac{x_{S,L} + x_{S,R}}{2} \\ y_i = \frac{y_{S,L} + y_{S,R}}{2} \end{cases}, \quad (1)$$

式中:  $(x_i, y_i)$  表示仪器中心的平面坐标,  $(x_{S,L}, y_{S,L})$ ,  $(x_{S,R}, y_{S,R})$  分别为盘左、盘右时球棱镜中心的平面坐标。由于盘左盘右取中数能够消除固定偏移的影响,并计算得出仪器中心的平面坐标,所以球棱镜安装位置到球棱镜等效点的固定偏移对于系统的定位精度无影响。

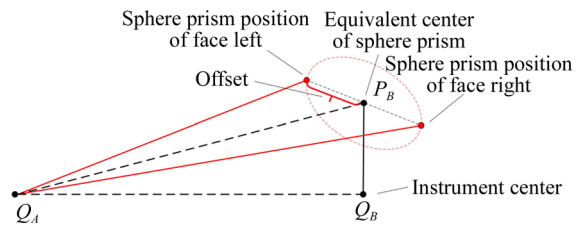


图 2 球棱镜等效点与仪器中心的关系

Fig. 2 Relationship between equivalent center of sphere prism and instrument center

在垂直方向上,球棱镜等效点到仪器中心的高度差是一个固定值,定义此高度差为相应激光跟踪仪的垂向偏心差  $\Delta h$ ,如图 3 所示。则垂向偏心差  $\Delta h$  可由球棱镜中心的垂直方向坐标减去仪器中心的垂直方向坐标获得。即:

$$\Delta h = Z_B - Z_I, \quad (2)$$

式中:  $Z_B$  为球棱镜等效点的垂向坐标,  $Z_I$  为仪器中心的垂向坐标。

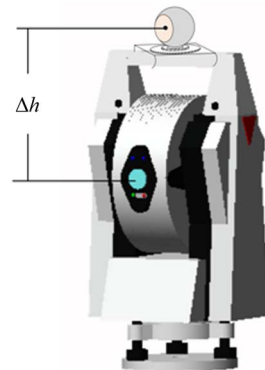


图 3 垂向偏心差示意图

Fig. 3 Schematic diagram of vertical eccentricity

为了将瞄准球棱镜的观测值改化到仪器中心,需要精确标定 2 台激光跟踪仪的垂向偏心差。标定过程在有許多均匀分布控制点的空间内进行,如图 4 所示。

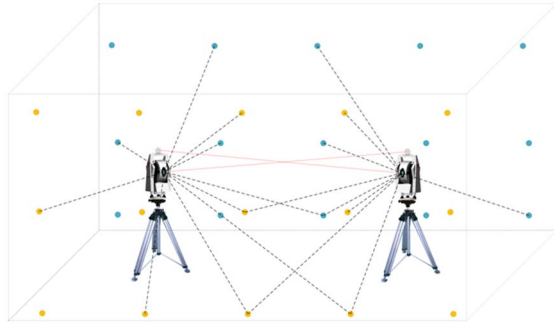


图 4 垂向偏心差标定示意图

Fig. 4 Schematic diagram for calibration of vertical eccentricity

2 台激光跟踪仪严格整平后,尽可能多地观测其周围空间分布的控制点。然后,1 号激光跟踪仪照准 2 号激光跟踪仪提手上的球棱镜,2 号激光跟踪仪绕竖轴旋转某固定角度(如旋转  $90^\circ$ )后保持不动,连续多个测回并记录 1 号跟踪仪的观测数据;接下来,2 号激光跟踪仪按照同样的步骤照准 1 号激光跟踪仪提手上的球棱镜并记录观测数据。最后,用 Spatial Analyzer 软件的统一空间测量网络(Unified Spatial Metrology Network, USMN)功能进行平差解算,取瞄准球棱镜多测回观测值的平均值为球棱镜等效点坐标,则球棱镜等效点 Z 坐标减去对应测站原点(仪器中心)的 Z 坐标,即为此台仪器的垂向偏心差。

### 2.3 作业流程

图 5 所示是一条由二联激光跟踪仪系统测量的空间三维导线。其中,A,B 测站有良好的通视条件,B,C 测站只能通过通光孔通视,难以测量其他公共点。则利用二联激光跟踪仪系统建立控制网的流程为:

(1)2 台激光跟踪仪精确互瞄。1,2 号激光跟踪仪按自由设站法架设在 A,B 两处并精确整平,1,2 号激光跟踪仪同时调至盘左观测对方提手上的球棱镜并记录观测值;然后调至盘右观测对方提手上的球棱镜并记录观测值;重复多测回,并通过水平方向坐标取平均、垂直方向坐

标减去垂向偏心差将照准球棱镜的观测值改化至仪器中心。

(2)控制点测量。1,2 号激光跟踪仪分别观测可视范围内尽可能多的测量点,并记录观测数据。

(3)仪器搬站。B 处的 2 号激光跟踪仪保持不动,将 A 处的 1 号激光跟踪仪搬至 C 处自由设站,然后按照(1)~(2)的步骤继续测量。

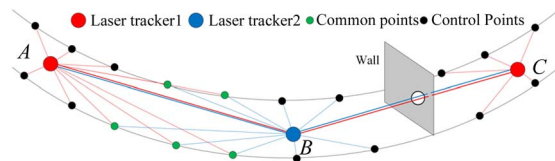


图 5 三维导线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of 3-D traverse

由图 5 可以看出,利用二联激光跟踪仪建立空间三维导线是在传统自由设站法多站拼接的基础上,增加了测站间的互瞄观测值,为测站位置和姿态的解算增加了约束条件。当相邻测站通视条件较好,能观测到多个公共点时,测站间的互瞄观测值能够进一步增强控制网的网形结构;当通视条件较差,公共点数量少甚至无公共点时,仪器中心之间的导线能够承担起传递坐标和方位的任务。因此,利用二联激光跟踪仪系统建立三维导线来测量控制网与传统的自由设站法多站拼接相比,控制网结构更为坚强,适用范围更广,尤其适用于通视条件差、公共点数量少且分布不均的情形。

### 3 解算模型

采用二联激光跟踪仪系统构建三维导线对三维控制网进行测量,共布设了  $s$  个测站,控制点总数为  $m$  个。激光跟踪仪的原始观测值为仪器中心照准目标的水平方向、垂直角和斜距,设第  $i$  测站观测了  $m_i$  个控制点,则照准控制点的观测值总数为:

$$n_1 = \sum_{i=1}^s 3 \cdot m_i. \quad (3)$$

$s$  个测站的相邻测站间建立了互瞄观测值,则总的互瞄观测数为:

$$n_2 = 2 \cdot (s - 1). \quad (4)$$

控制网的观测总数:

$$n = n_1 + n_2 = \sum_{i=1}^s 3 \cdot m_i + 2 \cdot (s-1). \quad (5)$$

以第一测站为基准测站,令 $(x_i, y_i, z_i)$ (其中 $i=1, \dots, m$ )表示第 $i$ 号控制点在第1测站坐标系下的坐标,令 $({}^jX_i, {}^jY_i, {}^jZ_i)$ 表示第 $i$ 号控制点在第 $j$ 测站坐标系下的坐标,则 $m$ 个控制点对应的未知参数 $t_1=3 \cdot m$ 。令 $(TX_j, TY_j, TZ_j, RX_j, RY_j, RZ_j)$ (其中 $j=2, 3, \dots, s$ )表示第 $j$ 号测站到第1测站的平移旋转参数,除了第1测站作为坐标系原点外,其余 $s-1$ 个测站对应的未知参数

有 $t_2=6 \cdot (s-1)$ 。则总的未知参数个数为:

$$t = t_1 + t_2 = 3 \cdot m + 6 \cdot (s-1). \quad (6)$$

第 $i$ 号控制点在第 $j$ 测站的坐标先缩放 $k$ 倍,再旋转 $(RX_j, RY_j, RZ_j)$ ,最后平移 $(TX_j, TY_j, TZ_j)$ 后,转换为第1测站下的坐标,其数学模型为:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = k\mathbf{R}^T \begin{bmatrix} {}^jX_i - TX_j \\ {}^jY_i - TY_j \\ {}^jZ_i - TZ_j \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵,可表示为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos RZ_j \cos RY_j & -\sin RZ_j \cos RX_j + \cos RZ_j \sin RY_j \sin RX_j & \sin RZ_j \sin RX_j + \cos RZ_j \sin RY_j \cos RX_j \\ \sin RZ_j \cos RY_j & \cos RZ_j \cos RX_j + \sin RZ_j \sin RY_j \sin RX_j & -\cos RZ_j \sin RX_j + \sin RZ_j \sin RY_j \cos RX_j \\ -\sin RY_j & \cos RY_j \sin RX_j & \cos RY_j \cos RX_j \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{D} - \mathbf{L}) = 0, \quad (9)$$

### 3.1 函数模型

将测站间的互瞄观测值作为约束条件,按照具有约束条件的参数平差进行解算,其观测方程为:

$$\begin{cases} \mathbf{L} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{D} \\ \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{C}_0 = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中: $\mathbf{X} = [x_1, y_1, z_1, \dots, x_m, y_m, z_m, X_2, Y_2, Z_2, RX_2, RY_2, RZ_2, \dots, X_s, Y_s, Z_s, RX_s, RY_s, RZ_s]^T$ ,表示未知参数的平差值; $\mathbf{L}$ 表示照准控制点的观测值; $\mathbf{A}, \mathbf{D}$ 分别为照准控制点观测值对应的系数矩阵和常数向量; $\mathbf{C}, \mathbf{C}_0$ 分别为测站间互瞄观测值对应的系数矩阵和常数向量。

### 3.2 随机模型

随机模型是描述观测值先验精度及观测值之间可能的随机相关性的模型,通常用观测向量的协方差或权矩阵表示。观测向量 $\mathbf{L}$ 的随机模型为:

即误差的期望为0。

观测向量 $\mathbf{L}$ 中有水平方向值 $H$ 、垂直角 $V$ 、斜距 $S$ 3类观测值,相互之间随机独立,可根据测量仪器的先验精度按照经验公式来确定3类观测值的权比,即:

$$P_H = \frac{m_{II}^2}{m_H^2} = 1, P_V = \frac{m_{II}^2}{m_V^2}, P_S = \frac{m_{II}^2}{m_S^2}. \quad (10)$$

## 4 测量实验与结果

在上海光源实验大厅的狭长隧道环境内,采用2台Leica AT402激光跟踪仪构成二联激光跟踪仪系统进行了实验。1号激光跟踪仪测量了11个控制点,2号激光跟踪仪测量了9个控制点,其中有6个点由2个测站共同观测。2台激光跟踪仪及控制点的空间分布如图6所示。

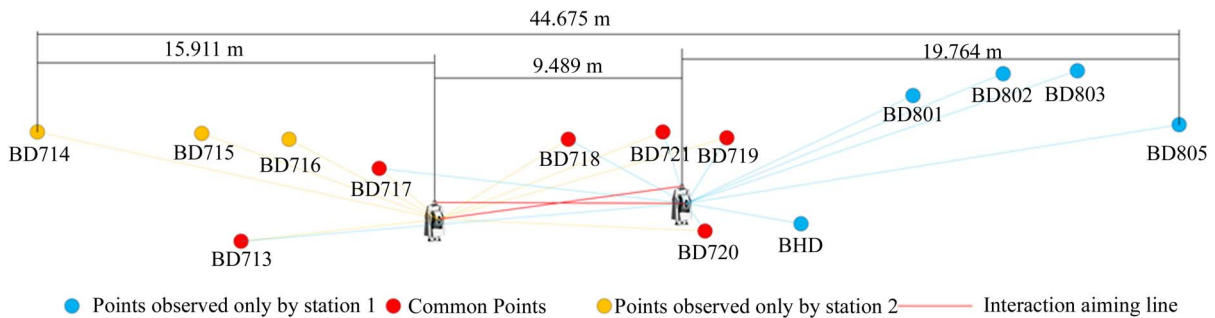


图6 二联激光跟踪仪系统测量场景示意图

Fig. 6 Schematic diagram of two-laser-tracker system measurement situ

4.1 系统参数标定

在实验场地内进行系统参数标定,2 台激光跟踪仪精确调平后,先测量标定场中的所有控制点,然后多测回观测对方提手上的球棱镜。再根

据控制网平差得出仪器中心坐标及仪器提手上球棱镜的坐标,取两者 Z 坐标的差值作为垂向偏心差。2 台仪器的观测数据如表 1 所示,标定得到 2 台仪器的垂向偏心差见表 2。

表 1 二联激光跟踪仪系统参数标定观测数据

Tab.1 Observation data for system parameters calibration of two-laser-tracker system (mm)

控制点	1 号激光跟踪仪			2 号激光跟踪仪		
	X	Y	Z	X	Y	Z
P1	-29 969.33	-19 128.08	691.63	-29 969.31	-19 128.07	691.76
P2	-12 956.68	-11 296.91	650.99	-12 956.65	-11 296.88	651.05
P3	-10 205.92	-5 760.11	608.28	-10 205.89	-5 760.09	608.24
P4	-4 745.24	-753.13	922.66	-4 745.23	-753.12	922.65
P5	242.47	2 911.64	671.40	42.46	2 911.62	671.46
P6	1 713.19	-719.28	715.03	1 713.14	-719.27	715.02
P7	-1 870.14	1 643.92	914.45	-1 870.14	1 643.90	914.45
P8	5 191.02	8 399.80	941.58	-	-	-
P9	7 673.61	11 193.52	931.67	-	-	-
P10	9 833.84	13 166.21	593.99	-	-	-
P11	14 615.68	13 285.02	714.77	-	-	-
P12	-	-	-	-22 127.07	-12 128.72	533.54
P13	-	-	-	-16 654.27	-8 713.98	948.13
P14	-	-	-	-13 760.13	-7 002.40	934.58
第 1 测回盘左	-7 574.44	-5 713.91	186.55	-0.18	1.65	185.66
第 1 测回盘右	-7 574.38	-5 713.97	186.52	-0.49	1.61	185.70
第 2 测回盘左	-7 576.23	-5 714.16	186.56	-1.65	-0.20	185.64
第 2 测回盘右	-7 576.26	-5 714.25	186.50	-1.65	-0.21	185.69
第 3 测回盘左	-7 575.76	-5 715.97	186.55	0.22	-1.53	185.65
第 3 测回盘右	-7 575.96	-5 715.86	186.51	0.29	-1.49	185.69
第 4 测回盘左	-7 574.12	-5 715.45	186.55	1.51	0.40	185.64
第 4 测回盘右	-7 574.15	-5 715.51	186.50	1.48	0.43	185.70
第 5 测回盘左	-7 574.37	-5 713.98	186.56	-0.48	1.60	185.63
第 5 测回盘右	-7 574.50	-5 713.88	186.50	-0.51	1.61	185.69
球棱镜等效点坐标	-7 575.02	-5 714.69	186.53	-0.15	0.39	185.67

控制点观测值

表 2 垂向偏心差标定结果

Tab.2 Result of instrument constant calibration

仪器编号	垂向偏心差/mm
1 号激光跟踪仪	185.667
2 号激光跟踪仪	185.621

4.2 数据处理方案

按照附有约束条件的参数平差编写程序进行平差计算,有以下 5 种处理方案:

方案一:利用 6 个公共点与互瞄观测值,整体平差后将平差结果作为基准坐标。

方案二:只利用 6 个公共点进行坐标传递。

方案三:将 2 台激光跟踪仪观测数据中 BD713, BD714, BD720 3 个点的观测数据删除,只保留 BD718, BD721, BD719 这 3 个公共点。利用 3 个公共点与互瞄观测值进行平差。

方案四:只利用方案三中的 3 个公共点进行坐标传递。

方案五:在方案一的基础上屏蔽公共点信息,只利用互瞄观测值得出 2 号激光跟踪仪相对 1 号激光跟踪仪的平移旋转关系,然后根据 2 号激光跟踪仪的观测值得出目标点的坐标,如图 7 所示。

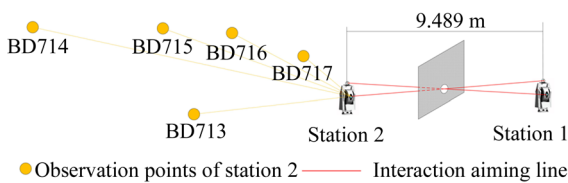


图 7 无公共点坐标传递示意图

Fig. 7 Coordinate transfer without common points

### 4.3 结果分析

#### 4.3.1 方案二与方案一对比

用平差解算后点位中误差的均方根衡量解算结果的内符合精度,则方案一与方案二的解算精度如表 3 所示。

表 3 方案一与方案二平差结果精度对比

Tab. 3 Precision comparison between Scheme 1 and Scheme 2

数据处理方案	点位中误差均方根/mm
方案一	0.047
方案二	0.050

表 3 中,方案一是在方案二的基础上增加了互瞄观测数据,对比结果表明互瞄观测值参与平差计算后使得点位中误差的均方根变小,提高了平差结果的内符合精度。

#### 4.3.2 方案五与方案一对比

将方案五的坐标传递结果与方案一的基准坐标做偏差,结果见表 4。由表 4 可以看出,本文方法能够在无公共点的情况下实现高精度的坐标传递,在 2 个测站相距 9 m 时,坐标传递的点位中误差均方根优于 0.22 mm。

由于 2 个测站在测量前都进行了精确整平,

整平精度优于 1",表明 2 个测站上仪器竖轴与铅垂线方向的夹角小于 1",可近似认为 2 台仪器的竖轴是平行的。此时,2 台仪器的姿态只是绕 Z 轴(仪器竖轴)有一个旋转角度,称它为定向旋转角  $\alpha$ 。将方案五得到的定向旋转角与方案一整体平差解算得到的定向旋转角进行对比,结果如表 5 所示。

表 4 方案五与方案一的坐标偏差

Tab. 4 Coordinates deviation from Scheme 5 to Scheme 1

点名	偏差值/mm			
	$d_x$	$d_y$	$d_z$	$d_p$
BD713	-0.122	0.119	-0.203	0.265
BD714	-0.118	0.190	-0.315	0.386
BD715	-0.100	0.152	-0.204	0.274
BD716	-0.088	0.135	-0.147	0.218
BD717	-0.090	0.111	-0.052	0.152
BD718	-0.050	0.081	0.055	0.110
BD719	-0.009	0.071	0.121	0.141
BD720	-0.017	0.044	0.120	0.129
BD721	-0.029	0.080	0.110	0.139
均方根	0.080	0.117	0.167	0.219

表 5 定向旋转角的计算结果

Tab. 5 Calculation result of directional rotation angle

处理方案	$\alpha$
方案一	107.031 0°
方案五	107.031 3°

由表 5 可计算得出,当相邻 2 测站无公共点时,只利用互瞄观测值传递所得的定向旋转角的精度为  $0.000 3^\circ = 1.08''$ 。

#### 4.3.3 其他对比

将方案二至方案五计算得到的控制点坐标与方案一得到的基准坐标做偏差,3 个坐标轴方向的偏差分量以及总的点位偏差的均方根如表 6 所示。由表 6 可知,方案二的坐标偏差值的均方根为 0.005 mm,说明当公共点数量充足时,只利用公共点传递的点坐标与利用公共点、互瞄观测值整体平差所得的点位坐标偏差很小,三维坐标偏

表6 不同方案所得坐标与基准坐标偏差的均方根  
Tab. 6 Root-mean-square of coordinates deviation from adjustment result of different schemes to reference coordinates

方案	偏差值均方根/mm			
	dx	dy	dz	dp
二	0.001	0.001	0.004	0.005
三	0.013	0.013	0.015	0.024
四	0.015	0.024	0.154	0.157
五	0.080	0.117	0.167	0.219

差的均方根小于 0.01 mm。方案二与方案四都是只用公共点传递坐标,公共点个数由 6 个变为 3 个时,其偏差值均方根由 0.005 mm 增大至 0.157 mm,表明公共点个数越多,坐标传递的精度越高。方案三与方案四对比,在公共点数量仅为 3 个时,互瞄观测值参与平差前后,三维偏差的均方根由 0.157 mm 减小为 0.024 mm,表明当公

#### 参考文献:

- [1] OGUNDARE J O. *Precision Surveying: The Principles and Geomatics Practice* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016.
- [2] 李广云,范百兴. 精密工程测量技术及其发展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1742-1751.  
LI G Y, FAN B X. The development of precise engineering surveying technology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1742-1751. (in Chinese)
- [3] 李广云,李宗春. 工业测量系统原理与应用[M]. 北京:测绘出版社, 2011.  
LI G Y, LI Z CH. *The Principles and Applications of Industrial Measuring System* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011. (in Chinese)
- [4] 范百兴,李广云,易旺民,等. 激光跟踪仪测量原理与应用[M]. 北京:测绘出版社, 2017.  
FAN B X, LI G Y, YI W M, et al.. *The Measurement Principle and Application of Laser Tracker* [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2017. (in Chinese)
- [5] 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.  
YU CH H. *The Application Research of 3D Survey and Alignment Technique in SSRF* [D].

共点数量较少时,互瞄观测值作为约束条件参与平差能够显著提高点位精度。

## 5 结 论

本文针对受限空间内精密坐标传递的需求,建立了二联激光跟踪仪系统,并介绍了系统结构、垂向偏心差标定和作业流程等内容。按照附有约束条件参数平差法建立了附有导线约束的三维控制网平差解算模型。在上海光源的三维控制网中进行了实验,结果证明:当相邻测站有足够数量的公共点时,本文方法相比较于自由设站法多站拼接能提高平差结果的精度,且公共点数量越少,精度提高越明显;当相邻测站无公共点时,本文方法也能实现高精度坐标传递,9 m 距离上坐标传递精度优于 0.22 mm,定向旋转角精度约为 1"。本文方法实现了受限空间内高精度坐标传递的目的。

致 谢:感谢师弟付永健博士和汪文琪硕士在数据采集时付出的辛勤劳动。

- Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [6] 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:武汉大学, 2017.  
NIE H B. *Research on the Key Techniques of Precision Metrology for Large-scale Equipments Based on Laser Tracker* [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [7] 梁静,王铜,董岚. 基于长度标准装置提高激光跟踪仪测量精度的方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(3): 325-330.  
LIANG J, WANG T, DONG L. Method to improve the measurement accuracy of laser tracker based on the length standard device [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(3): 325-330. (in Chinese)
- [8] 范斌,季青松,李明飞,等. iGPS 测量系统与激光跟踪仪在某飞机大部件数字化装配中的对比应用[J]. 航空制造技术, 2019, 62(5): 57-62.  
FAN B, JI Q S, LI M F, et al.. iGPS and laser tracker applications comparison in digital assembly of large aircraft parts [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(5): 57-62. (in Chinese)
- [9] 梁静,董岚,罗涛,等. BEPCII 储存环激光跟踪仪测量精度统计及先验误差的确定[J]. 测绘科学, 2013, 38(6): 182-184.

- LIANG J, DONG L, LUO T, *et al.*. Precision statistics of laser tracker in BEPCII storage ring and calculation of mean square error of unit weight [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38(6): 182-184. (in Chinese)
- [10] 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, 110.
- LI F, ZOU J G, WANG T, *et al.*. Research on precise 3D control network of particle linac [J]. *Geospatial Information*, 2018, 16(2): 87-89, 110. (in Chinese)
- [11] MOISIEIENKO M, ZELINSKY A, MYTSYKOV A, *et al.*. NSC KIPT experience in use of laser tracker Leica at 401 in equipment alignment of 100 mev/100 kw electron linear accelerator of "Neutron Source" driver [C]// *Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark*, 2017: 4604-4606.
- [12] YUAN J D, HE Y, ZHANG B, *et al.*. Alignment of beam position monitors in cryomodule of CADS injector II [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, 28(6): 75.
- [13] 杨凡. 加速器准直测量控制网建立的理论与方法 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014.
- YANG F. *Theories and Methods of Control Network on Accelerator* [D]. Zhengzhou: The PLA Information Engineering University, 2014. (in Chinese)
- [14] 刘娇月, 杨聚庆, 董登峰, 等. 激光跟踪仪的光电瞄准与定位系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6): 1558-1564.
- LIU J Y, YANG J Q, DONG D F, *et al.*. Optoelectronic aiming and orientation system of laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6): 1558-1564. (in Chinese)
- [15] 李辉, 刘巍, 张洋, 等. 激光跟踪仪多基站转站精度模型与误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4): 771-783.
- LI H, LIU W, ZHANG Y, *et al.*. Model establishment and error compensation of laser tracker station-transfer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(4): 771-783. (in Chinese)
- [16] 赵子越, 甘晓川, 马骊群. 一种基于多传感系统协同测量的联合平差组网方法[J]. *传感技术学报*, 2019, 32(1): 100-105.
- ZHAO Z Y, GAN X CH, MA L Q. A combined adjustment network method based on multi-sensor system cooperative measurement [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2019, 32(1): 100-105. (in Chinese)
- [17] 任瑜, 刘芳芳, 张丰, 等. 激光跟踪仪多边测量的不确定度评定[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(10): 2415-2422.
- REN Y, LIU F F, ZHANG F, *et al.*. Evaluation of uncertainty in multilateration with laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(10): 2415-2422. (in Chinese)
- [18] 李丽娟, 赵延辉, 林雪竹. 加权整体最小二乘在激光跟踪仪转站中的应用[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2570-2577.
- LI L J, ZHAO Y H, LIN X ZH. Application of WTLS in coordinate transformation of laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2570-2577. (in Chinese)
- [19] 林嘉睿, 孟伟, 杨凌辉, 等. 激光跟踪仪的双面互瞄定向[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2752-2758.
- LIN J R, MENG W, YANG L H, *et al.*. Two-face reciprocal orientation for laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(10): 2752-2758. (in Chinese)
- [20] ALLAN A L. The principles of theodolite intersection systems [J]. *Survey Review*, 1988, 29(227): 226-234.

#### 作者简介:



郭迎钢(1992—),男,甘肃武威人,博士研究生,2014年、2017年于解放军信息工程大学分别获得学士、硕士学位,主要从事精密工程测量,特别是三维工程控制网建立的研究。E-mail: fariel\_gyg@163.com

#### 导师简介:



李宗春(1973—),男,山东日照人,教授,博士生导师,1998年于解放军测绘学院获得硕士学位,2003年于解放军信息工程大学获得博士学位,主要从事精密工程测量、三维激光点云数据处理等方面的教学与科研。E-mail: 13838092876@139.com