



# 激光跟踪仪的高精度预准直方法和精度分析

汪昭义<sup>1</sup> 何晓业<sup>1</sup> 王巍<sup>1</sup> 张海艇<sup>1</sup> 陈义华<sup>1</sup> 陈佳鑫<sup>1</sup>

1 中国科学技术大学国家同步辐射实验室,安徽 合肥,230029

**摘要:**新型粒子加速器对关键元件的准直测量精度要求越来越高,而现有测量仪器受自身技术发展的限制,难以在短时间内显著提高其单站测量精度,由此提出一种基于激光跟踪仪的三维测边网平差的预准直测量方法。通过布设多个测站,将定位点和测站点的坐标均作为未知参数进行平差解算,得到较高精度的定位点坐标。此外,通过比较分析不同测站数目下各定位点的解算精度,得到局部最优测站数。实验结果表明,三维测边网平差解算的定位点精度远高于同等观测条件下三维边角网平差解算的定位点精度。当采用22个测站时,各定位点的空间点位中误差的均值为8.9 μm。根据4个定位点均要获得10 μm以内的定位精度需求,综合考虑定位精度和工作效率两方面因素,判断布设12个测站能达到此要求。所提方法对实际工作中高精度的预准直测量和设备的安装定位具有一定的工程应用价值。

**关键词:**粒子加速器;激光跟踪仪;三维测边网平差;预准直;局部最优测站数

中图分类号:P258

文献标志码:A

以第四代同步辐射光源和超大型粒子对撞机为代表的新型粒子加速器对关键元件的准直测量精度要求越来越高,而作为关键环节的预准直过程,其产生的元件标定误差在元件安装结束后不再被调整,从而成为该元件的系统误差<sup>[1-2]</sup>。受仪器自身技术发展的限制,厂家在短时间内很难通过提升测量仪器自身精度来提高最终的测量点位精度。传统测量方法往往将平面和高程分开考虑,虽然可以最大限度地简化计算过程,但由于测量点的空间坐标( $x, y, z$ )之间存在一定的相关性,单独完成平面和高程测量将造成额外的模型误差,且测量效率低下<sup>[3]</sup>。

为满足粒子加速器某些特定元件的高精度预准直要求,本文借助激光跟踪仪布设多个测站来建立三维测边网,将整平后的激光跟踪仪几何测量中心(以下简称测站点)和粒子加速器各元件安装定位的靶座点(以下简称定位点)的空间坐标均当作未知参数,并采用秩亏自由网平差的方法进行求解计算。此外,在拥有充足的多余观测数的情况下,对比分析不同测站数目下各定位点的解算精度,得到与定位点数量有关的局部最优测站数。

## 1 激光跟踪仪三维测边网平差原理

### 1.1 误差方程建立

激光跟踪仪测量点误差分布如图1所示,激光跟踪仪沿光线方向上的测距误差远低于垂直于该方向上主要由测角带来的误差<sup>[4-6]</sup>,采用三维测边网平差可有效避免测角误差对最终求解点位测量精度的影响。

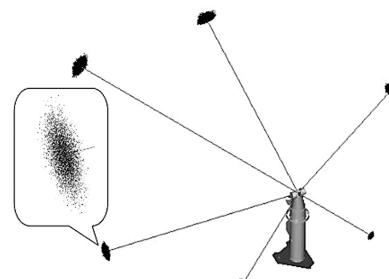


图1 激光跟踪仪测量点误差分布图<sup>[7]</sup>

Fig.1 Distribution Diagram of Position Errors Measured by Laser Tracker<sup>[7]</sup>

若按经典自由网平差方法进行解算,三维测边网的起算数据包括一个固定点的位置(三维坐标值)和方向(3个方向余弦值)。激光跟踪仪采用自由设站的方式<sup>[8-9]</sup>,将所有测站点和定位点均

收稿日期:2020-04-01

项目资助:国家重点研发计划(2016YFA0402000);国家自然科学基金(11705199)。

第一作者:汪昭义,硕士生,主要从事精密工程测量的理论与方法研究。wzychina@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:何晓业,博士,教授。xyhe@ustc.edu.cn

作为未知参数进行平差解算,此时网形缺少必要的起算数据,故该三维测边网存在数亏问题。本文拟采用附加约束条件的秩亏自由网平差方法来解决此问题,即在原平差模型中增加 $d$ 个虚拟观测值( $d$ 为秩亏数),与原观测值共同组成误差方程进行平差解算。

由于只涉及距离观测值,基于激光跟踪仪的三维测边网平差的实质是根据定位点和测站点之间的欧氏距离建立误差方程<sup>[10-12]</sup>。假设测站点编号用 $i$ 表示( $i=1, 2 \dots n$ ),空间坐标为 $(X_i, Y_i, Z_i)$ ,定位点编号用 $j$ 表示( $j=1, 2 \dots m$ ),

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{\Delta X_{ij}^0}{D_{ij}^0} & -\frac{\Delta Y_{ij}^0}{D_{ij}^0} & -\frac{\Delta Z_{ij}^0}{D_{ij}^0} & \frac{\Delta X_{ij}^0}{D_{ij}^0} & \frac{\Delta Y_{ij}^0}{D_{ij}^0} & \frac{\Delta Z_{ij}^0}{D_{ij}^0} \end{bmatrix}^T$$

假设测站点和定位点的坐标近似值分别为 $(X_i^0, Y_i^0, Z_i^0)$ 和 $(X_j^0, Y_j^0, Z_j^0)$ ,则 $\Delta X_{ij}^0 = X_j^0 - X_i^0$ ; $\Delta Y_{ij}^0 = Y_j^0 - Y_i^0$ ; $\Delta Z_{ij}^0 = Z_j^0 - Z_i^0$ 。 $D_{ij}^0$ 为测站点与定位点之间的距离近似值,计算式为:

$$D_{ij}^0 = \sqrt{(X_j^0 - X_i^0)^2 + (Y_j^0 - Y_i^0)^2 + (Z_j^0 - Z_i^0)^2} \quad (3)$$

激光跟踪仪采用自由设站的测量方式,每一个测站均对应着一个单独的局部坐标系,以第一个测站建立的局部坐标系作为全局坐标系<sup>[13]</sup>,第一个测站点的空间坐标近似值取 $(0, 0, 0)$ 。在第一个测站进行观测时,依次瞄准各定位点并观测得到相应的距离、水平角和垂直角,由极坐标系原理求解各定位点的坐标值,并将其作为各定位点的空间坐标近似值。剩余的 $i-1$ 个测站点的空间坐标近似值则根据空间距离交会原理,由任意3个已知空间坐标近似值的定位点和它们到第 $i-1$ 个测站点的距离观测值得到,计算式为:

$$D_{(i-1),j} = \sqrt{(X_j^0 - X_{i-1}^0)^2 + (Y_j^0 - Y_{i-1}^0)^2 + (Z_j^0 - Z_{i-1}^0)^2} \quad (4)$$

此处涉及的角度观测值仅用于求解各定位点的空间坐标近似值,未参与后续的三维测边网平差的求解计算。因此,在该三维测边网平差模型中,总观测值数目为 $mn$ ,未知参数数目为

$$S^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 \\ 0 & Z_1^0 & -Y_1^0 & 0 & Z_2^0 & -Y_2^0 & \dots & 0 & Z_w^0 & -Y_w^0 \\ -Z_1^0 & 0 & X_1^0 & -Z_2^0 & 0 & X_2^0 & \dots & -Z_w^0 & 0 & X_w^0 \\ Y_1^0 & -X_1^0 & 0 & Y_2^0 & -X_2^0 & 0 & \dots & Y_w^0 & -X_w^0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $w$ 为所有未知点的数目(包括定位点数量 $m$ 和测站点数量 $n$ );第 $k$ ( $1 \leq k \leq w$ )点的近似坐标

空间坐标为 $(X_j, Y_j, Z_j)$ ,测站点 $i$ 到定位点 $j$ 之间的距离观测值为 $D_{ij}$ ,计算式为:

$$D_{ij} = \sqrt{(\hat{X}_j - \hat{X}_i)^2 + (\hat{Y}_j - \hat{Y}_i)^2 + (\hat{Z}_j - \hat{Z}_i)^2} \quad (1)$$

式中, $(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i)$ 和 $(\hat{X}_j, \hat{Y}_j, \hat{Z}_j)$ 分别为测站点和定位点的坐标平差值,根据式(1)列如下误差方程:

$$V = B\hat{x} - L \quad (2)$$

其中,

$$\hat{x} = [\hat{x}_i \quad \hat{y}_i \quad \hat{z}_i \quad \hat{x}_j \quad \hat{y}_j \quad \hat{z}_j]^T$$

$$L = [D_{ij} - D_{ij}^0]^T$$

$3(m+n)$ ,多余观测数目为 $mn - 3(m+n) + d$ 。

本文采用的激光跟踪仪型号为AT960,标称的测角和测距精度分别为 $\pm(15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m})$ 和 $\pm 0.5 \mu\text{m}/\text{m}$ 。故布设测边网的权阵 $P$ 中各项 $p_{ij}$ 的计算式为:

$$p_{ij} = \left( \frac{1}{0.5D_{ij}} \right)^2 \quad (5)$$

式中, $D_{ij}$ 以m为单位,用于定权取值。

## 1.2 平差解算和精度评定

由于激光跟踪仪建立的三维测边网平差模型缺少必要的起算数据,若根据式(2)进行平差解算,求解的法方程为奇异阵,其结果不唯一。为获取唯一解,采用在原平差模型的基础上引入基准约束条件 $\hat{x}^T P_{\hat{x}} \hat{x} = \min$ 。此处基准权阵 $P_{\hat{x}}$ 取单位矩阵 $I$ ,则满足最小范数准则: $\hat{x}^T \hat{x} = \min$ 。假设等价于该最小范数约束的限制条件方程为: $S^T \hat{x} = 0$ ,其中 $S$ 为附加约束矩阵, $\text{rank}(S) = d$ ( $d$ 为秩亏数,此处为6)且满足 $BS = 0$ 。该附加约束条件的秩亏自由网平差函数模型的计算式为<sup>[14-15]</sup>:

$$\begin{cases} V = B\hat{x} - L \\ V^T P V = \min \\ S^T \hat{x} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

根据文献[14],附加约束矩阵 $S$ 的计算式为:

值为 $(X_k^0, Y_k^0, Z_k^0)$ 。在实际计算时,往往需对 $S$ 进行中心化和标准化。中心化后的约束矩阵为 $S'$ ,

$S'$ 是将  $S$  中的  $X_k^0, Y_k^0, Z_k^0$  分别用  $\bar{X}_k^0, \bar{Y}_k^0, \bar{Z}_k^0$  进行替换得到的。中心化后的原点在重心所在的位置,此时对应的第  $k$  点的近似坐标  $(\bar{X}_k^0, \bar{Y}_k^0, \bar{Z}_k^0)$  计算式为:

$$\begin{cases} \bar{X}_k^0 = X_k^0 - \frac{1}{w} \sum_{k=1}^m X_k^0 \\ \bar{Y}_k^0 = Y_k^0 - \frac{1}{w} \sum_{k=1}^m Y_k^0 \\ \bar{Z}_k^0 = Z_k^0 - \frac{1}{w} \sum_{k=1}^m Z_k^0 \end{cases} \quad (8)$$

约束矩阵  $S$  的标准化建立在中心化的基础上,假设标准化后的约束矩阵用  $G$  表示,此时引入辅助矩阵  $A$  使得  $G^T = A \cdot (S')^T$ , 最终中心化和标准化后的约束矩阵满足  $G^T G = I$  ( $I$  为单位矩阵), 辅助矩阵  $A$  的计算式为:

$$A = \text{diag}(\frac{1}{\sqrt{w}}, \frac{1}{\sqrt{w}}, \frac{1}{\sqrt{w}}, \frac{1}{\sqrt{R_1}}, \frac{1}{\sqrt{R_2}}, \frac{1}{\sqrt{R_3}}) \quad (9)$$

$$\begin{cases} R_1 = \sum_{k=1}^w ((\bar{X}_k^0)^2 + (\bar{Y}_k^0)^2) \\ R_2 = \sum_{k=1}^w ((\bar{X}_k^0)^2 + (\bar{Z}_k^0)^2) \\ R_3 = \sum_{k=1}^w ((\bar{Y}_k^0)^2 + (\bar{Z}_k^0)^2) \end{cases} \quad (10)$$

单位权中误差  $\hat{\sigma}_0$ 、参数估计  $\hat{x}$  和协因数  $Q_{\hat{x}\hat{x}}$  的计算式为:

$$\hat{\sigma}_0 = \sqrt{\frac{V^T P V}{mn - 3(m+n) + d}} \quad (11)$$

$$\hat{x} = (B^T P B + G G^T)^{-1} \cdot B^T P L \quad (12)$$

$$Q_{\hat{x}\hat{x}} = (B^T P B + G G^T)^{-1} - G G^T \quad (13)$$

## 2 边角网平差模型

为了验证本文三维测边网平差方法的可靠性, 实验引入传统的三维边角网平差进行解算, 并对二者解算结果进行比较分析。边角网的观测值除了测边网仅利用的距离观测值以外, 还包括水平角、垂直角。激光跟踪仪的三维边角网平差模型计算式为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} D_{ij} = \sqrt{(\hat{X}_j - \hat{X}_i)^2 + (\hat{Y}_j - \hat{Y}_i)^2 + (\hat{Z}_j - \hat{Z}_i)^2} \\ H_{ij} = \arctan \frac{\hat{Y}_{ij}}{\hat{X}_{ij}} \\ V_{ij} = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{\hat{Z}_{ij}}{\sqrt{\hat{X}_{ij}^2 + \hat{Y}_{ij}^2}} \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $H_{ij}$  和  $V_{ij}$  分别为测站点  $i$  与定位点  $j$  之间的水平角、垂直角观测值;  $(\hat{X}_{ij}, \hat{Y}_{ij}, \hat{Z}_{ij})$  为定位点  $j$  在测站  $i$  的局部坐标系下的坐标平差值。在进行三维边角网平差之前, 需将所有测站对应的局部坐标系下的坐标换算到统一的全局坐标系下, 此处取第一个测站建立的局部坐标系作为本次实验的全局坐标系。考虑到激光跟踪仪具有非常高的测距精度, 认为各测站间的尺度因子均为定值 1, 待整平仪器后, 各测站仪器的竖轴方向垂直于坐标系的  $XOY$  平面, 此时旋转矩阵仅包含绕  $Z$  轴的旋转角度  $\gamma_{i-1}$ 。第  $i$  个测站对应的未知参数为  $(X_i, Y_i, Z_i, \gamma_{i-1})$  ( $i \neq 1$ , 当  $i$  取 1 时对应已知的第一个测站), 第  $j$  个定位点对应的未知参数为  $(X_j, Y_j, Z_j)$ 。故该边角网平差模型中, 总观测值数目为  $3mn$ , 未知参数数目为  $3m + 4(n-1)$ , 多余观测数目为  $3mn - 3m - 4(n-1)$ 。

## 3 实例分析

为了验证本文平差算法精度, 在  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 3\text{ m}$  的室内平稳放置一块四极磁铁, 并对其展开实测数据分析。以 4 个靶座点所在位置作为定位点, 其编号依次为  $F_1 \sim F_4$ 。沿四极磁铁外侧依次布设 22 个测站, 以仪器整平后的几何测量中心作为测站点, 其编号依次为  $T_1 \sim T_{22}$ , 在每个测站均对 4 个定位点进行观测, 如图 2 所示, 各网点在平面方向上大致呈现出均匀对称分布。

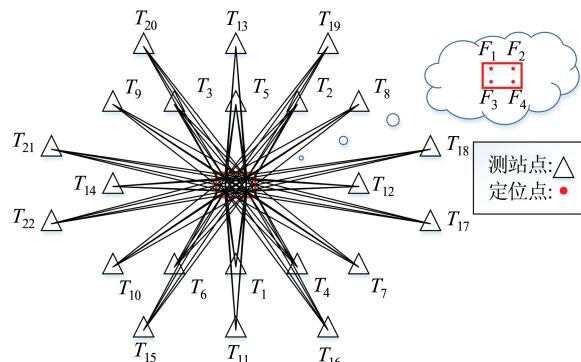


图 2 实际测量的网点分布图

Fig. 2 Distribution Map of Actual Measurement Points

表 1、表 2 分别表示在 22 个测站下由附加约束条件的三维测边网平差解算的定位点、测站点均方根误差 (root mean squared error, RMSE)。解算结果显示, 各定位点的空间点位中误差的均值为  $8.9 \mu\text{m}$ , 各测站点的空间点位中误差的均值为  $51.6 \mu\text{m}$ 。由于定位点数量远少于测站点数量, 导

致同一平差方法解算的测站点精度低于定位点精度。此外,由于点位在垂直方向上分布不够均匀,导致二者的水平方向精度均高于垂直方向精度。由表2和图2可知,测站点的点位中误差大小与该测站点到测量中心(此处取4个定位点的坐标平均值)的距离大小有关,二者之间呈现出正相关。

表1 定位点平差解算精度 / $\mu\text{m}$ Tab. 1 Adjustment Precision of Location Points / $\mu\text{m}$ 

点号	坐标系各分量误差			点位中误差
	RMSE-X	RMSE-Y	RMSE-Z	
$F_1$	3.7	2.8	7.6	8.8
$F_2$	3.6	2.7	7.7	8.9
$F_3$	3.7	2.8	7.5	8.8
$F_4$	3.7	2.7	7.7	8.9

表2 测站点平差解算精度 / $\mu\text{m}$ Tab. 2 Adjustment Precision of Station Points / $\mu\text{m}$ 

点号	坐标系各分量误差			点位中误差
	RMSE-X	RMSE-Y	RMSE-Z	
$T_1$	8.9	10.1	28.0	31.1
$T_2$	9.3	10.4	28.9	32.1
$T_3$	10.2	11.0	32.2	35.5
$T_4$	10.7	11.5	35.8	39.1
$T_5$	7.9	9.0	22.7	25.7
$T_6$	10.4	11.4	34.6	37.9
$T_7$	14.1	15.3	53.7	57.6
$T_8$	14.1	14.5	49.9	53.8
$T_9$	13.9	15.1	52.5	56.4
$T_{10}$	14.8	15.0	54.6	58.5
$T_{11}$	15.0	15.1	60.0	63.7
$T_{12}$	10.3	10.3	30.6	33.9
$T_{13}$	14.5	14.6	56.0	59.7
$T_{14}$	10.4	10.4	31.1	34.4
$T_{15}$	17.0	15.1	64.9	68.8
$T_{16}$	16.1	16.1	64.9	68.8
$T_{17}$	14.3	19.2	58.8	63.5
$T_{18}$	15.0	16.9	55.0	59.5
$T_{19}$	15.2	14.4	56.2	60.0
$T_{20}$	15.6	15.8	60.7	64.6
$T_{21}$	14.5	20.0	61.9	66.6
$T_{22}$	15.5	17.9	59.8	64.3

为了进一步验证解算结果的可靠性,根据平差方法解算得到各点的空间坐标,反算定位点和测站点间的距离,并与实测的距离观测值进行比较,结果如图3所示。由图3可知,测边网和边角网两种平差方法与实际距离观测值之间的差值均在 $\pm 2.0 \mu\text{m}$ 以内,且二者之间相差值趋近于零,反映出两种平差方法解算结果的稳定性和可靠性。

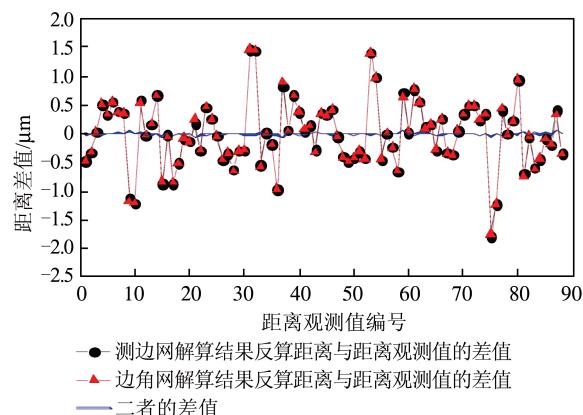


图3 两种方法反算距离与距离观测值的差值

Fig.3 Distance Differences Between Observation and Calculation Results of Two Methods

图4是附加约束条件的三维测边网和三维边角网平差解算的各定位点、测站点的点位中误差。两种平差方法的解算结果呈现出相似的趋势,但前者解算的点位精度要优于后者,此特性在定位点上尤为突出,前者解算的定位点精度均在 $10 \mu\text{m}$ 以内,远高于后者解算的 $30 \mu\text{m}$ 。分析原因在于测边网仅采用距离观测值,而边角网涉及距离、水平角和垂直角3种观测值。由于激光跟踪仪的测距精度远高于测角精度,在采用边角网平差时,其点位测量误差主要取决于其测角误差。当采用测边网平差时,能有效避开角度观测值,从而有利于提高实验解算的点位精度。

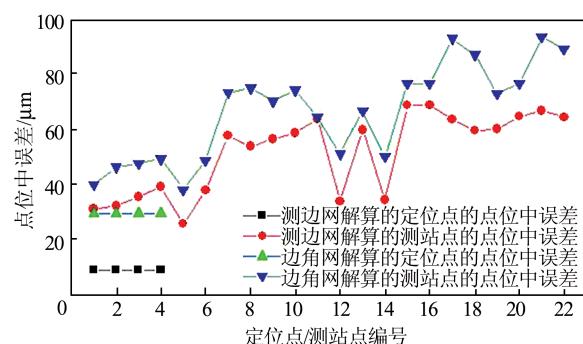


图4 两种方法解算定位点与测站点的点位中误差

Fig.4 RMSE of Location Points and Station Points Calculated by Two Methods

图5是不同测站数目下解算各定位点的点位中误差平均值。由图5可知,当测站数目为22时,附加约束条件的三维测边网平差解算的定位点精度最高,但在实际工作中往往需综合定位精度和工作效率两方面进行考虑。当测站数目为7时,满足最少的多余观测数要求。因此,该实验在22个测站中依次选取7~22个测站,完成相应测站数目下所有组合的遍历,并统计不同测站数

目下解算的 4 个定位点的空间点位中误差的平均值。结果表明,针对 4 个定位点的情况,采用 12 个测站亦可实现  $10 \mu\text{m}$  的高精度要求。相对于测站数目为 22 的解算结果,12 个测站的测量效率更高,且二者精度几乎相当,平差解算的定位点误差均小于  $10 \mu\text{m}$ 。

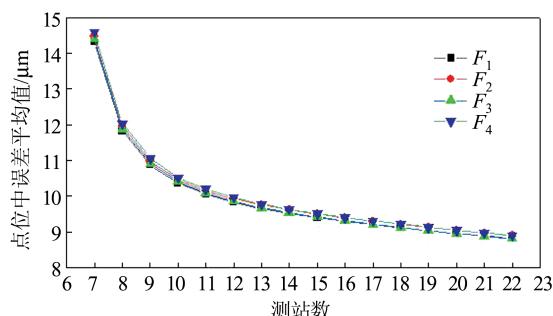


图 5 不同测站数目解算各定位点的点位中误差平均值

Fig.5 Average RMSE of Location Points Calculated by Different Numbers of Survey Stations

## 4 结语

为了进一步提升粒子加速器某些特定元件的安装精度,本文提出一种基于激光跟踪仪的三维测边网平差的预准直方法。通过布设多个测站,将定位点和测站点的坐标均当作未知参数进行平差解算,得到的定位点精度较已有方法有明显提高。同时,本文验证了在同等观测条件下基于激光跟踪仪的三维测边网平差解算的定位点精度远高于三维边角网平差解算的精度。当测站达到一定数量时,随着测站数目的增加,解算的定位点精度将不再显著提高,此时结合工作效率可认为当前的解算结果是达到局部最优的。该方法对实际工作中高精度的准直测量和设备的安装定位具有一定的工程应用价值。针对粒子加速器准直领域,如何合理布设空间网点以使各测量点误差在水平和垂直方向上分布更为均匀,以及如何结合不同仪器共同完成测量工作并对数据进行联合平差处理,尚存在进一步的探讨空间。

## 参 考 文 献

- [1] Chen Wenjun, Ma Lizhen, Cai Guozhu, et al. Alignment of High Energy Line for Wuwei Heavy Ion Medical Machine [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(8): 085102(陈文军, 马力祯, 蔡国柱, 等. 武威重离子治癌装置高能束线的准直安装[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(8): 085102)
- [2] He Zhenqiang, Ke Zhiyong, Dong Lan, et al. Pre-alignment of DTL for China Spallation Neutron Source[J]. *Nuclear Techniques*, 2017, 40(5): 12-16(何振强, 柯志勇, 董岚, 等. 中国散裂中子源 DTL 漂移管的预准直[J]. 核技术, 2017, 40(5): 12-16)
- [3] Yu Chenghao, Ke Ming. The Measurement Accuracy Analysis of Three Dimensional Control Network Based on Laser Tracker [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2006, 31(3): 25-27(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, 31(3): 25-27)
- [4] Calkins J M. Quantifying Coordinate Uncertainty Fields in Coupled Spatial Measurement Systems [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002
- [5] Zhou Weihu. Research on the Precision Theory of Large-scale Coordinate Measuring Systems[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2000(周维虎. 大尺寸空间坐标测量系统精度理论若干问题的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2000)
- [6] Fan Baixing, Li Guangyun, Li Peizhen, et al. Adjustment of a Laser Interferometer 3D Rank-Defect Free-Network [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(2): 222-226(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)
- [7] Yang Fan. Theories and Methods on the Establishment of Control Network for Accelerator [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011(杨凡. 高能粒子加速器工程精密测量研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2011)
- [8] Xie Zhengwei. Study on Accuracy Optimization of Three-dimensional Coordinate Control Network [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014(谢政委. 三维坐标测量控制网精度优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2014)
- [9] Ke Zhiyong, He Zhenqiang, Dong Lan, et al. Analysis on Alignment Position Error of BEPCII Storage Ring[J]. *Nuclear Techniques*, 2015, 38(1): 1-6(柯志勇, 何振强, 董岚, 等. BEPC II 储存环准直测量点位误差分析[J]. 核技术, 2015, 38(1): 1-6)
- [10] Muralikrishnan B, Phillips S, Sawyer D. Laser Trackers for Large-Scale Dimensional Metrology: A Review[J]. *Precision Engineering*, 2016, 44: 13-28
- [11] Zhang F M, Zhang H D, Qu X H. A Multilateral Laser-Tracking Three-Dimensional Coordinate Measuring System Based on Plane Constraint[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(1): 015205
- [12] Wang H, Shao Z X, Fan Z Y, et al. Optimization of Laser Trackers Locations for Position Measure-

- ment [C]//IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Houston, USA, 2018
- [13] Wang Wei. Survey and Alignment of the HLSII Upgrade Project and Study of the Measurement Precision [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016(王巍. 合肥光源升级改造测量准直及测量精度的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016)
- [14] Cui Xizhang, Yu Zongchou, Tao Benzao. General Surveying Adjustment[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(崔希璋, 于宗俦, 陶本藻. 广义测量平差[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)
- [15] Qiu Weining, Tao Benzao, Yao Yibin. The Theory and Method of Surveying Data Processing Theory and Method of Surveying Data Processing[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2008(邱卫宁, 陶本藻, 姚宜斌. 测量数据处理理论与方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008)
- [16] Fan Baixing, Li Guangyun, Zhou Weihu, et al. Precision Analysis of the Unified Spatial Metrology Network Adjustment Model [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(1): 120-126(范百兴, 李广云, 周维虎, 等. 激光跟踪仪空间联合平差模型及精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(1): 120-126)

## High Precision Pre-Alignment Method Based on Laser Tracker

WANG Zhaoyi<sup>1</sup> HE Xiaoye<sup>1</sup> WANG Wei<sup>1</sup> ZHANG Haiting<sup>1</sup> CHEN Yihua<sup>1</sup> CHEN Jiaxin<sup>1</sup>

1 National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China

**Abstract:** **Objectives:** Higher accuracy is needed for the alignment and installation of key components in new generation particle accelerators. However, the existing measuring instruments are limited by the technological development, it is difficult to significantly improve the measurement accuracy in a short time. **Methods:** In this paper, we proposed a novel pre-alignment method based on 3D trilateration network adjustment of laser trackers. Firstly, we established multiple survey stations surrounding the component which needs to be pre-aligned. Then, we utilized only distance observations between station points and location points to establish 3D trilateration network. Finally, we regarded all coordinates of both station points and location points as unknown parameters, and adopted a 3D free trilateration network adjustment. **Results:** Experimental results show that the root mean squared error (RMSE) of location points calculated by 3D triangulation are three times higher than that calculated by 3D trilateration. In addition, the average RMSE of location points can reach the highest precision as 8.9  $\mu\text{m}$  by establishing 22 survey stations. Because the precision is no-more-than 10  $\mu\text{m}$  by establishing 12 survey stations, we consider 12 as the quantity of locally optimal survey stations. **Conclusions:** This method can provide crucial engineering values for the practical work during the high-precision alignment and installation of devices.

**Key words:** particle accelerator; laser tracker; 3D trilateration network adjustment; pre-alignment; quantity of locally optimal survey stations

**First author:** WANG Zhaoyi, postgraduate, specializes in the theories and methods of precise engineering survey. E-mail: wzychina@mail.ustc.edu.cn

**Corresponding author:** HE Xiaoye, PhD, professor. E-mail: xyhe@ustc.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China(2016YFA0402000); the National Natural Science Foundation of China(11705199).

**引文格式:** WANG Zhaoyi, HE Xiaoye, WANG Wei, et al. High Precision Pre-Alignment Method Based on Laser Tracker[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(4):555-560. DOI:10.13203/j.whugis20190143(汪昭义, 何晓业, 王巍, 等. 激光跟踪仪的高精度预准直方法和精度分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(4):555-560. DOI:10.13203/j.whugis20190143)