



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111238454 A

(43)申请公布日 2020.06.05

(21)申请号 202010054719.9

(22)申请日 2020.01.17

(71)申请人 中国人民解放军战略支援部队信息工程大学

地址 450001 河南省郑州市高新区科学大道62号109信箱

(72)发明人 郭迎钢 李宗春 何华 王志颖

(74)专利代理机构 郑州睿信知识产权代理有限公司 41119

代理人 吴敏 黄晶

(51)Int.Cl.

G01C 15/00(2006.01)

G01B 11/00(2006.01)

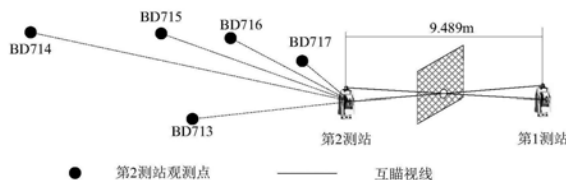
权利要求书2页 说明书10页 附图3页

(54)发明名称

一种空间三维坐标测量仪系统及其三维控制网测量方法

(57)摘要

本发明涉及一种空间三维坐标测量仪系统及其三维控制网测量方法,属于精密工业与工程测量领域。系统包括两台三维坐标测量仪,每台三维坐标测量仪顶部固定一个球棱镜,两台三维坐标测量仪进行三维控制网的测量时,控制两台三维坐标测量仪互瞄对测其顶部的球棱镜,得到三维坐标测量仪之间的互瞄观测值,根据互瞄观测值,结合三维控制网中各控制网点的观测值,建立参数平差模型,求解得到控制点在将某个测站作为基准测站下的坐标,以及其他测站在所述基准测站的平移旋转参数,实现三维坐标测量仪之间的控制网点坐标传递。本发明的系统尤其适用于通视条件差的精密坐标传递场景,可推广应用于激光跟踪仪、全站仪等极坐标测量系统。



1. 一种空间三维坐标测量仪系统,其特征在于,包括两台三维坐标测量仪,每台三维坐标测量仪顶部固定一个球棱镜,两台三维坐标测量仪进行三维控制网的测量时,控制两台三维坐标测量仪互瞄对测其顶部的球棱镜,得到三维坐标测量仪之间的互瞄观测值,根据所述互瞄观测值,结合所述三维控制网中各控制网点的观测值,建立参数平差模型,求解得到控制点在将某个测站作为基准测站下的坐标,以及其他测站在所述基准测站的平移旋转参数,实现三维坐标测量仪之间的控制网点坐标传递。

2. 根据权利要求1所述的空间三维坐标测量仪系统,其特征在于,所述参数平差模型如下:

$$\begin{cases} L = AX + D \\ C X + C_0 = 0 \end{cases}$$

$\begin{matrix} n_1 \times 1 & n_1 \times t & t \times 1 & n_1 \times 1 \\ n_2 \times t & t \times 1 & & n_2 \times t \end{matrix}$

式中, $X = [x_1, y_1, z_1, \dots, x_m, y_m, z_m, X_2, Y_2, Z_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \dots, X_s, Y_s, Z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s]^T$ 表示未知参数的平差值,其中, $x_1, y_1, z_1, \dots, x_m, y_m, z_m$ 为控制点在将某个测站作为基准测站下的坐标, $X_2, Y_2, Z_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \dots, X_s, Y_s, Z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s$ 为其他测站在所述基准测站的平移旋转参数, L 表示照准控制点的观测值, A, D 为照准控制点观测值对应的系数矩阵和常数向量, C, C_0 为测站间互瞄观测值对应的系数矩阵和常数向量。

3. 根据权利要求1或2所述的空间三维坐标测量仪系统,其特征在于,所述三维坐标测量仪之间的互瞄观测值为三维坐标测量仪中心的观测值,通过三维坐标测量仪上球棱镜的观测值与三维坐标测量仪的垂向偏心差作差得到,所述垂向偏心差为三维坐标测量仪中心到球棱镜中心在垂直方向上的高差。

4. 根据权利要求3所述的空间三维坐标测量仪系统,其特征在于,所述垂向偏心差的计算式如下:

$$\Delta h = Z_B - Z_I$$

式中, Δh 为垂向偏心差, Z_B 为球棱镜中心的垂向坐标, Z_I 为仪器中心的垂向坐标。

5. 根据权利要求1所述的空间三维坐标测量仪系统,其特征在于,所述每台三维坐标测量仪顶部固定有用于装配球棱镜的球棱镜靶座,该球棱镜靶座为底部带有凸台的圆柱形套管,且圆柱形套管与待装配的球棱镜相切,使球棱镜的中心保持在三维坐标测量仪的竖轴上;所述凸台用于固定在三维坐标测量仪顶部。

6. 根据权利要求5所述的空间三维坐标测量仪系统,其特征在于,还包括固定在三维坐标测量仪顶部的固联平台,所述凸台固定在固联平台上面;固联平台下面固定有两个U型卡扣,该固联平台用于通过两个U型卡扣固定在全站仪顶部。

7. 根据权利要求1所述的空间三维坐标测量仪系统,其特征在于,各三维坐标测量仪采用激光跟踪仪或全站仪。

8. 一种空间三维坐标测量仪系统的三维控制网测量方法,其特征在于,所述三维控制网测量方法包括以下步骤:

1) 将两台三维坐标测量仪分别放置在第一个测站和第二个测站,每台三维坐标测量仪顶部固定一个球棱镜,控制第一个测站和第二个测站上的两台三维坐标测量仪互瞄对测其顶部的球棱镜,控制两台三维坐标测量仪分别对三维控制网的控制点进行测量,记录各三维坐标测量仪的观测值,包括三维坐标测量仪之间的互瞄观测值,及各控制网点的观测值;

2) 将第一个测站上的三维坐标测量仪移动至第三个测站,控制第二个测站和第三个测站上的两台三维坐标测量仪互瞄对测,控制两台三维坐标测量仪分别对三维控制网的控制点进行测量,记录各三维坐标测量仪的观测值;直至所有测站均测量完毕。

9. 根据权利要求8所述的空间三维坐标测量仪系统的三维控制网测量方法,其特征在于,所述每台三维坐标测量仪顶部固定有用于装配球棱镜的球棱镜靶座,该球棱镜靶座为底部带有凸台的圆柱形套管,且圆柱形套管与待装配的球棱镜相切,使球棱镜的中心保持在三维坐标测量仪的竖轴上;所述凸台用于固定在三维坐标测量仪顶部。

10. 根据权利要求8所述的空间三维坐标测量仪系统的三维控制网测量方法,其特征在于,各三维坐标测量仪采用激光跟踪仪或全站仪。

一种空间三维坐标测量仪系统及其三维控制网测量方法

技术领域

[0001] 本发明属于精密工业与工程测量领域,具体涉及一种空间三维坐标测量仪系统及其三维控制网测量方法。

背景技术

[0002] 在精密工业与工程测量领域,空间点三维坐标的精密测量有着极为广泛的应用需求,以经纬仪测量系统、全站仪测量系统、激光跟踪仪测量系统、工业摄影测量系统等为代表的工业测量系统是当前精密工程测量中点坐标测量的主要工具。其中,激光跟踪仪采用空间球坐标测量原理,是当前精度最高的非正交坐标测量系统。激光跟踪仪的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。

[0003] 在粒子加速器工程的三维控制网测量及准直安装中,激光跟踪仪发挥着重要的作用。由于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。

[0004] 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。由于辐射防护的要求,储存环与线站之间一般有厚的水泥墙体隔绝,无法直接通视。这种情况下,有两种坐标传递的思路,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20~30cm的通光孔将储存环的控制网传递出去。相比而言,思路一频繁转站会造成精度损失,而且测量效率低、成本大;思路二的测量成本小,效率高。在思路二的基础上,如何利用通光孔来实现控制网坐标的精确传递成为了一个具有重要应用价值的研究课题。

[0005] 国内外学者围绕激光跟踪仪的原理、系统构成、建网方式、精度评定等进行了一定研究。例如,关于受限空间内点坐标的传递,作者林嘉睿等人在期刊《光学精密工程》中第25卷第10期第2752-2758页公开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(球棱镜在照准部上运动时,如果选用的球棱镜型号较大,旋转至最上方时会被提手挡住,影响测量);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。

发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种空间三维坐标测量仪系统,用于解决现有三维坐标测量仪系统在通视条件受限导致公共点数量少、分布不均时无法实现控制网点坐标准确传递,甚至无法实现坐标传递的问题;还提出一种空间三维坐标测量仪系统的三维控制网测量方法,用于实现三维控制网测量。

[0007] 基于上述目的,一种空间三维坐标测量仪系统的技术方案如下:

[0008] 包括两台三维坐标测量仪,每台三维坐标测量仪顶部固定一个球棱镜,两台三维坐标测量仪进行三维控制网的测量时,控制两台三维坐标测量仪互瞄对测其顶部的球棱镜,得到三维坐标测量仪之间的互瞄观测值,根据所述互瞄观测值,结合所述三维控制网中各控制网点的观测值,建立参数平差模型,求解得到控制点在将某个测站作为基准测站下的坐标,以及其他测站在所述基准测站的平移旋转参数,实现三维坐标测量仪之间的控制网点坐标传递。

[0009] 上述技术方案的有益效果是:

[0010] 本发明的三维坐标测量仪系统通过对三维坐标测量仪进行改造,在三维坐标测量仪顶部固定球棱镜,使得在三维控制网的测量时,能够控制两台三维坐标测量仪在测量控制网点的同时,使两台三维坐标测量仪互瞄对测,通过互瞄对测获得的互瞄观测值,结合控制网点的观测值,建立观测方程,从而实现三维坐标测量仪之间的控制网点坐标精确传递。本发明的系统尤其适用于通视条件差的精密坐标传递场景,可推广应用于激光跟踪仪、全站仪等极坐标测量系统。

[0011] 进一步,为了实现控制网点坐标传递,所述参数平差模型如下:

$$[0012] \begin{cases} L = AX + D \\ C X + C_0 = 0 \end{cases}$$

[0013] 式中, $X = [x_1, y_1, z_1, \dots, x_m, y_m, z_m, X_2, Y_2, Z_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \dots, X_s, Y_s, Z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s]^T$ 表示未知参数的平差值,其中, $x_1, y_1, z_1, \dots, x_m, y_m, z_m$ 为控制点在将某个测站作为基准测站下的坐标, $X_2, Y_2, Z_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2, \dots, X_s, Y_s, Z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s$ 为其他测站在所述基准测站的平移旋转参数, L 表示照准控制点的观测值, A, D 为照准控制点观测值对应的系数矩阵和常数向量, C, C_0 为测站间互瞄观测值对应的系数矩阵和常数向量。

[0014] 进一步,为了得到三维坐标测量仪之间的互瞄观测值,所述三维坐标测量仪之间的互瞄观测值为三维坐标测量仪中心的观测值,通过三维坐标测量仪上球棱镜的观测值与三维坐标测量仪的垂向偏心差作差得到,所述垂向偏心差为三维坐标测量仪中心到球棱镜中心在垂直方向上的高差。

[0015] 具体的,所述垂向偏心差的计算式如下:

$$[0016] \Delta h = Z_B - Z_I$$

[0017] 式中, Δh 为垂向偏心差, Z_B 为球棱镜中心的垂向坐标, Z_I 为仪器中心的垂向坐标。

[0018] 进一步,为了实现三维坐标测量仪与球棱镜的固定,所述每台三维坐标测量仪顶部固定有用于装配球棱镜的球棱镜靶座,该球棱镜靶座为底部带有凸台的圆柱形套管,且圆柱形套管与待装配的球棱镜相切,使球棱镜的中心保持在三维坐标测量仪的竖轴上;所述凸台用于固定在三维坐标测量仪顶部。

[0019] 进一步,为了实现所述凸台的固定,还包括固定在三维坐标测量仪顶部的固联平台,所述凸台固定在固联平台上面;固联平台下面固定有两个U型卡扣,该固联平台用于通过两个U型卡扣固定在三维坐标测量仪顶部。

[0020] 进一步,各三维坐标测量仪采用激光跟踪仪或全站仪,实现三维控制网中各控制网点的观测,以及互瞄观测。

[0021] 基于上述目的,一种空间三维坐标测量仪系统的三维控制网测量方法的技术方案如下:

[0022] 1) 将两台三维坐标测量仪分别放置在第一个测站和第二个测站,每台三维坐标测量仪顶部固定一个球棱镜,控制第一个测站和第二个测站上的两台三维坐标测量仪互瞄对测其顶部的球棱镜,控制两台三维坐标测量仪分别对三维控制网的控制点进行测量,记录各三维坐标测量仪的观测值,包括三维坐标测量仪之间的互瞄观测值,及各控制网点的观测值;

[0023] 2) 将第一个测站上的三维坐标测量仪移动至第三个测站,控制第二个测站和第三个测站上的两台三维坐标测量仪互瞄对测,控制两台三维坐标测量仪分别对三维控制网的控制点进行测量,记录各三维坐标测量仪的观测值;直至所有测站均测量完毕。

[0024] 上述技术方案的有益效果是:

[0025] 本发明通过对三维坐标测量仪进行改造,在三维坐标测量仪顶部固定球棱镜,构建三维坐标测量仪系统,使得在三维控制网的测量时,能够控制两台三维坐标测量仪在测量控制网点的同时,使两台三维坐标测量仪互瞄对测,得到三维坐标测量仪之间的互瞄观测值,及各控制网点的观测值,用于实现三维坐标测量仪之间的控制网点坐标精确传递。

[0026] 进一步,为了实现三维坐标测量仪与球棱镜的固定,所述每台三维坐标测量仪顶部固定有用于装配球棱镜的球棱镜靶座,该球棱镜靶座为底部带有凸台的圆柱形套管,且圆柱形套管与待装配的球棱镜相切,使球棱镜的中心保持在三维坐标测量仪的竖轴上;所述凸台用于固定在三维坐标测量仪顶部。

[0027] 进一步,各三维坐标测量仪采用激光跟踪仪或全站仪,用于实现三维控制网中各控制网点的观测,以及互瞄观测。

附图说明

[0028] 图1是本发明系统实施例的激光跟踪仪与球棱镜的改装组合效果图;

[0029] 图2是本发明系统实施例的球棱镜中心与仪器中心的空间位置关系图;

[0030] 图3是本发明系统实施例的激光跟踪仪的垂向偏心差示意图;

[0031] 图4是本发明系统实施例的垂向偏心差标定示意图;

[0032] 图5是本发明系统实施例的三维导线示意图;

[0033] 图6是本发明方法实施例的测量场景示意图;

[0034] 图7是本发明方法实施例的无公共点坐标传递示意图;

[0035] 图8是本发明系统实施例的球棱镜靶座示意图;

[0036] 图9是本发明系统实施例的固联平台和U型卡扣的固定示意图;

[0037] 图中的附图说明如下:

[0038] 1,激光跟踪仪;2,靶座;3,球棱镜;4,固联平台;5,U型卡扣。

具体实施方式

[0039] 下面结合附图对本发明的具体实施方式作进一步的说明。

[0040] 系统实施例：

[0041] 本实施例的一种三维坐标测量仪系统，包括两台经过改装的激光跟踪仪和两个球棱镜，改装的激光跟踪仪与球棱镜的组合效果如图1所示，激光跟踪仪顶部装设的球棱镜靶座2，球棱镜靶座2用于放置球棱镜3，使球棱镜3的中心在激光跟踪仪1的竖轴上。其中，球棱镜3的结构如图3所示，球棱镜靶座2的结构如图8所示，该球棱镜靶座为底部带有凸台的圆柱形套管，且圆柱形套管与待装配的球棱镜相切，使球棱镜的中心保持在激光跟踪仪的竖轴（即中心轴线）上。

[0042] 上述球棱镜靶座2的凸台通过一个固联平台4固定在激光跟踪仪顶部，如图9所示，固联平台4下面固定有两个U型卡扣5，将U型卡扣5固定在激光跟踪仪（LEICA AT40X系列）的提手上，固联平台4上面采用强力胶将靶座2粘在U型卡扣5上，固定时尽可能使靶座中心位于激光跟踪仪的竖轴。在U型卡扣5与提手的固定过程中，以及靶座2与U型卡扣5的固定过程中，这两个“稳定固联”过程要保证球棱镜中心与激光跟踪仪中心几何关系的稳定。

[0043] 三维坐标测量仪系统在工作时，两台激光跟踪仪照准对方提手上安放的球棱镜，为了获取两台激光跟踪仪中心的空间位置关系，需要将激光跟踪仪照准球棱镜中心的观测值改化到激光跟踪仪中心的观测值，这就需要精确标定球棱镜中心到激光跟踪仪中心在垂直方向上的差异（即垂向偏心差）。

[0044] 具体的，球棱镜中心与仪器中心的空间位置关系如图2所示。由于球棱镜无法严格安装在激光跟踪仪的竖轴上，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，则取盘坐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：

$$[0045] \quad \begin{cases} x_I = \frac{x_{S_L} + x_{S_R}}{2} \\ y_I = \frac{y_{S_L} + y_{S_R}}{2} \end{cases} \quad (1)$$

[0046] 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。

[0047] 在垂直方向上，球棱镜等效点到仪器中心的高差是一个固定值，定义此高差为对应激光跟踪仪的垂向偏心差 Δh ，如图3所示。则仪器中心垂直方向的坐标可由球棱镜中心的垂直方向坐标减去垂向偏心差获得，即：

$$[0048] \quad \Delta h = Z_B - Z_I \quad (2)$$

[0049] 式中， Δh 为垂向偏心差， 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。

[0050] 为了将瞄准球棱镜的观测值改化到仪器中心，需要精确标定两台激光跟踪仪的垂向偏心差，其标定过程在有许多均匀分布控制点的空间内进行，如图4所示。两台激光跟踪仪严格整平后，分别尽可能多的观测周围空间内分布的控制点。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概略旋转某固定角度（如旋转

90°)后保持不动,连续多个测回测量并记录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,则球棱镜等效点的Z轴坐标减去对应测站原点(仪器中心)的Z轴坐标,即为此台仪器的垂向偏心差。

[0051] 图5所示是一条由三维坐标测量仪系统测量的空间三维导线的示例图。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,难以测量其他的公共点。基于上述三维坐标测量仪系统,本实施例三维坐标测量仪系统的三维控制网测量方法的具体流程如下:

[0052] (1) 两台激光跟踪仪精确互瞄。

[0053] 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的观测值。

[0054] (2) 控制点测量。

[0055] 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。

[0056] (3) 仪器搬站。

[0057] 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。

[0058] 本实施例中,采用三维坐标测量仪系统构建三维导线,并对对三维控制网进行了测量,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 n_1 为:

$$[0059] \quad n_1 = \sum_{i=1}^s 3 \cdot m_i \quad (3)$$

[0060] 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 n_2 为:

$$[0061] \quad n_2 = 6 \cdot (s-1) \quad (4)$$

[0062] 则三维控制网的观测总数为:

$$[0063] \quad n = n_1 + n_2 = \sum_{i=1}^s 3 \cdot m_i + 6 \cdot (s-1) \quad (5)$$

[0064] 以第1测站(即1号测站)为基准测站,令 (x_i, y_i, z_i) (其中 $i=1, \dots, m_1$)表示第i号控制点在第1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 $(X_j, Y_j, Z_j, \alpha_j, \beta_j, \lambda_j)$ (其中 $j=2, \dots, s$)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t为:

$$[0065] \quad t = t_1 + t_2 = 3 \cdot m + 6 \cdot (s-1) \quad (6)$$

[0066] 基于上述通用公式,对应图5中的三维控制网,控制点总数为 $m=19$,测站数 $s=3$,则由于 n_1 的数量为每个仪器照准点数之和的三倍,A照准了10个点,B照准了9个点,C照准了5个点,一共 $24 \times 3=84$ 个观测值,即 $n_1=84$;互瞄观测数 $n_2=4 \times 3=12$,则总的未知参数个数 $t=69$ 。

[0067] 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(即参数平差解算公式)为:

$$[0068] \quad \begin{cases} L = AX + D \\ C X + C_0 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

[0069] 式中, $X = [x_1, y_1, z_1, x_m, y_m, z_m, X_2, 2Y, 2Z\alpha, 2\beta, 2\gamma \dots X_s, Y_s, Z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s]^T$ 表示未知参数的平差值,第一测站的比较特殊,观测值直接等于未知参数,不需要进行坐标转换,函数关系较为简单;其他测站各控制点的观测数据除了观测值本身作为未知参数外,其未知参数还包括当前测站相对基准测站的转换关系,L表示照准控制点的观测值,A、D为照准控制点观测值对应的系数矩阵和常数向量,C、C₀为测站间互瞄观测值对应的系数矩阵和常数向量。

[0070] 式(7)具体对应的方程式如下:

$$[0071] \quad \left. \begin{aligned} L_1 &= a_1 \hat{x}_1 + b_1 \hat{x}_2 + \dots + t_1 \hat{x}_t + d_1 \\ L_2 &= a_2 \hat{x}_1 + b_2 \hat{x}_2 + \dots + t_2 \hat{x}_t + d_2 \\ &\dots\dots\dots \\ L_n &= a_n \hat{x}_1 + b_n \hat{x}_2 + \dots + t_n \hat{x}_t + d_n \end{aligned} \right\}$$

$$[0072] \quad \left. \begin{aligned} c_{11} \delta \hat{x}_1 + c_{12} \delta \hat{x}_2 + \dots + c_{1t} \delta \hat{x}_t + w_1 &= 0 \\ c_{21} \delta \hat{x}_1 + c_{22} \delta \hat{x}_2 + \dots + c_{2t} \delta \hat{x}_t + w_2 &= 0 \\ &\dots\dots\dots \\ c_{r1} \delta \hat{x}_1 + c_{r2} \delta \hat{x}_2 + \dots + c_{rt} \delta \hat{x}_t + w_r &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$[0073] \quad \text{上式中, } A = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & \dots & t_1 \\ a_2 & b_2 & \dots & t_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_n & b_n & \dots & t_n \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix}, C_{r \times t} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1t} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{r1} & c_{r2} & \dots & c_{rt} \end{bmatrix}, C_0 = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_r \end{bmatrix}$$

[0074] A矩阵中具体元素为观测值L关于未知参数 $X = [x_1, y_1, z_1, \dots, x_m, y_m, z_m, X_2, Y_2, Z_2, \alpha_2, \beta_2, \gamma_2 \dots X_s, Y_s, Z_s, \alpha_s, \beta_s, \gamma_s]^T$ 求导得到的。比如: $a_1 = \frac{\delta L_1}{\delta x_1} = \frac{\delta x_1}{\delta x_1} = 1, a_2 = \frac{\delta L_2}{\delta x_1} = \frac{\delta y_1}{\delta x_1} = 0 \dots$

[0075] 在具体解算时,上面公式(7)是下面的公式进行整理变换得到:

$$[0076] \quad \begin{pmatrix} x_{ji} \\ y_{ji} \\ z_{ji} \end{pmatrix} = R^T \begin{pmatrix} x_i - X_j \\ y_i - Y_j \\ z_i - Z_j \end{pmatrix}$$

$$[0077] \quad R = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & -\sin \gamma \cos \alpha + \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha & \sin \gamma \sin \alpha + \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \alpha + \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha & -\cos \gamma \sin \alpha + \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix}$$

[0078] 其中, $(x_{ji}, y_{ji}, z_{ji})^T$ 为测站j对控制点i的观测值,对应为公式(7)中的L;R为测站j到基准测站(即第1测站)的旋转矩阵,α为绕X轴旋转的角度,β为绕Y轴旋转的角度,γ为绕Z轴旋转的角度; (x_i, y_i, z_i) 为基准测站下控制点i的坐标; (X_j, Y_j, Z_j) 为测站j(j≠1)到基准测站的平移参数。在求系数矩阵A时,通过下面的求导公式得到:

$$[0079] \quad x_{ik} = \cos \gamma \cos \beta (x_i - X_j) + \sin \gamma \cos \beta (y_i - Y_j) - \sin \beta (z_i - Z_j);$$

$$[0080] \quad \frac{\partial x_{ik}}{\partial x_i} = \cos \beta \cos \gamma, \quad \frac{\partial x_{ik}}{\partial y_i} = \sin \gamma \cos \beta, \quad \frac{\partial x_{ik}}{\partial z_i} = -\sin \beta;$$

$$[0081] \quad \frac{\partial x_{ik}}{\partial X_j} = -\cos \beta \cos \gamma, \quad \frac{\partial x_{ik}}{\partial Y_j} = -\sin \gamma \cos \beta, \quad \frac{\partial x_{ik}}{\partial Z_j} = \sin \beta;$$

$$[0082] \quad \frac{\partial x_{ik}}{\partial \alpha} = 0;$$

$$[0083] \quad \frac{\partial x_{ik}}{\partial \beta} = -\cos \gamma \sin \beta (x_i - X_j) - \sin \gamma \sin \beta (y_i - Y_j) - \cos \beta (z_i - Z_j);$$

$$[0084] \quad \frac{\partial x_{ik}}{\partial \gamma} = -\sin \gamma \cos \beta (x_i - X_j) + \cos \gamma \cos \beta (y_i - Y_j)。$$

[0085] C_X 矩阵中具体元素为条件观测值(激光跟踪仪仪器中心之间的互瞄观测值 (x_I, y_I, z_I))关于未知参数 x 求导得到的元素。比如: $c_{11} = \frac{\delta X_2}{\delta x_1} = 0, c_{12} = \frac{\delta Y_2}{\delta x_1} = 0, c_{13} = \frac{\delta Z_2}{\delta x_1} = 0, (X_2, Y_2, Z_2)$

为第一台仪器照准第二台仪器中心的互瞄观测值。

[0086] 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 L 的随机模型为:

$$[0087] \quad \begin{cases} E(AX + D - L) = E(\Delta) = 0 \\ \Sigma_{\Delta} = \sigma_0^2 P_{\Delta}^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

[0088] 式中, E 表示取数学期望, Δ 表示误差, Σ_{Δ} 表示方差-协方差矩阵, σ_0^2 表示单位权中误差, P_{Δ}^{-1} 中对应的元素即为公式 (9) 中的 P_H, P_V, P_S 构成矩阵 P_{Δ} 的逆矩阵, 为 3×3 矩阵。

[0089] 即使观测向量 L 的随机模型误差的期望为 0; 观测向量 L 中有水平方向值 H 、垂直角 V 、斜距 S 三类观测值, 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三类观测值的权比, 即:

$$[0090] \quad P_H = \frac{m_H^2}{m_H^2} = 1, P_V = \frac{m_H^2}{m_V^2}, P_S = \frac{m_H^2}{m_S^2} \quad (9)$$

[0091] 其中, P_H, P_V, P_S 分别为水平方向值 H 、垂直角 V 、斜距 S 三类观测值的权值, m_H 为水平方向值的测角精度, m_V 为垂直角的测角精度, m_S 为斜距的测距精度。

[0092] 根据上述观测方程和随机模型, 利用最小二乘估值方法, 能够求解出未知参数的平差值。

[0093] 本发明的三维坐标测量仪系统通过对三维坐标测量仪进行改造, 在三维坐标测量仪顶部固定球棱镜, 使得在三维控制网的测量时, 能够控制两台三维坐标测量仪在测量控制网点的同时, 使两台三维坐标测量仪互瞄对测, 通过互瞄对测获得的互瞄观测值, 结合控制网点的观测值, 建立观测方程, 从而实现三维坐标测量仪之间的控制网点坐标精确传递。本发明的系统尤其适用于通视条件差的精密坐标传递场景, 可推广应用于激光跟踪仪、全站仪等极坐标测量系统。

[0094] 方法实施例:

[0095] 本实施例基于系统实施例中的三维坐标测量仪系统,提出了一种三维坐标测量仪系统的三维控制网测量方法,当控制网中设置的测站为两个时,该测量方法包括以下步骤:

[0096] S1.将两台三维坐标测量仪分别放置在第一个测站和第二个测站,控制第一个测站和第二个测站上的两台三维坐标测量仪互瞄对测,控制两台三维坐标测量仪分别对三维控制网的控制点进行测量,记录各三维坐标测量仪的观测值。

[0097] 当测站为三个时,该测量方法包括以下步骤:

[0098] 首先进行上述步骤S1,实现第一个测站和第二个测站的控制点测量和互瞄对测,包括三维坐标测量仪之间的互瞄观测值,及各控制网点的观测值;

[0099] S2.将第一个测站上的三维坐标测量仪移动至第三个测站,控制第二个测站和第三个测站上的两台三维坐标测量仪互瞄对测,控制两台三维坐标测量仪分别对三维控制网的控制点进行测量,记录各三维坐标测量仪的观测值。

[0100] 当测站为多个时,该测量方法包括以下步骤:

[0101] 进行上述步骤S1,实现第一个测站和第二个测站的控制点测量和互瞄对测;

[0102] 进行上述步骤S2,实现第二个测站和第三个测站的控制点测量和互瞄对测;

[0103] S3.将第二个测站上的三维坐标测量仪移动至第四个测站,控制相邻两个测站上的两台三维坐标测量仪互瞄对测,控制两台三维坐标测量仪分别对三维控制网的控制点进行测量,记录各三维坐标测量仪的观测值;然后依次类推,直至所有测站均测量完毕。

[0104] 下面,基于上面两个实施例中的三维坐标测量仪系统及三维控制网测量方法,给出验证例如下:

[0105] 在上海光源实验大厅的狭长隧道环境内,采用2台Leica AT402激光跟踪仪构成三维坐标测量仪系统进行了实验。其中,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,控制点中有6个公共点由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。

[0106] 首先,在实验场地内进行系统参数标定,两台激光跟踪仪精确调平后,先测量标定场中的所有控制点,然后多测回观测另一台激光跟踪仪提手上的球棱镜;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轴坐标的差值作为垂向偏心差,标定得到两台仪器的垂向偏心差见表1。

[0107] 表1垂向偏心差标定结果(单位:mm)

[0108]	仪器编号	1号激光跟踪仪	2号激光跟踪仪
	垂向偏心差	185.667	185.621

[0109] 按照上述附有约束条件的参数平差解算模型进行平差计算,以平差后点位中误差的均方根来衡量结果的精度,如表2所示。

[0110] 表2 6个公共点时的平差结果精度对比(单位:mm)

[0111]	互瞄观测值是否参与平差	不参与	参与
	点位中误差均方根	0.0502	0.0473

[0112] 由表2可知,互瞄观测值参与平差计算后,点位中误差均方根变小,表明互瞄观测值提高了平差结果的精度。将只利用公共点转换所得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作偏差,结果见表3。

[0113] 表3公共点传递与整体平差结果的点位偏差(单位:mm)

点名	偏差值				斜距
	X	Y	Z	三维	
[0114] BD713	0.003	-0.002	0.003	0.005	17202
BD714	0.006	-0.006	-0.009	0.013	25238
BD715	0.005	-0.004	-0.006	0.009	18820
BD716	0.005	-0.004	-0.005	0.008	15467
BD717	0.003	-0.002	0.000	0.004	11734
BD718	0.002	-0.002	0.000	0.003	4892
BD719	0.002	-0.002	0.000	0.003	2997
BD720	0.003	-0.002	0.005	0.006	1990
[0115] BD721	0.002	-0.002	0.000	0.003	2652
平均值	0.003	-0.003	0.001	0.006	11221

[0116] 由表3可知,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坐标偏差很小,三维偏差的平均值小于0.01mm。

[0117] 为了对比公共点数量变化时,互瞄观测值是否参与平差计算对平差结果精度的影响,将2台激光跟踪仪观测数据中BD713、BD717、BD720三个点的观测数据删除,只保留BD718、BD721、BD719这三个公共点。重新平差计算后,得到采用互瞄观测值前后点位中误差均方根如表4所示。

[0118] 表4 3个公共点时的平差结果精度对比(单位:mm)

[0119] 互瞄观测值是否参与平差	不参与	参与
点位中误差均方根	0.0410	0.0295

[0120] 将表2和表4中数据进行对比,当有6个公共点时,互瞄观测值参与平差前后点位中误差均方根变小了0.0029mm;表3中,公共点数量变为3个时,互瞄观测值参与平差前后点位中误差均方根变小了0.0115mm。对比可知当公共点数量较少时,互瞄观测值作为约束条件参与平差对于点位精度的提高更为显著。

[0121] 在4.2实验的数据的基础上,不用公共点信息,只利用两台激光跟踪仪之间的互瞄观测值得出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。

[0122] 将只利用互瞄观测值传递所得的点坐标与利用公共点、互瞄观测值整体平差所得的点坐标作偏差,结果见表5。

[0123] 表5互瞄观测值传递与整体平差结果的坐标偏差(单位:mm)

点名	偏差值				斜距
	X	Y	Z	三维	
BD713	-0.122	0.119	-0.203	0.265	17202
BD714	-0.118	0.190	-0.315	0.386	25238
BD715	-0.100	0.152	-0.204	0.274	18820
[0124] BD716	-0.088	0.135	-0.147	0.218	15467
BD717	-0.090	0.111	-0.052	0.152	11734
BD718	-0.050	0.081	0.055	0.110	4892
BD719	-0.009	0.071	0.121	0.141	2997
BD720	-0.017	0.044	0.120	0.129	1990
BD721	-0.029	0.080	0.110	0.139	2652
平均值	-0.069	0.109	-0.057	0.202	11221

[0125] 由表5可以看出,本发明的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测站相距9m时,坐标传递的精度约为0.20mm。此外,观察表4的斜距值与偏差值可以发现,随着控制点到测站距离的增大,坐标传递精度也就越低;在5m内,坐标传递精度能够优于0.15mm。对比表3和表5可知,只利用公共点的坐标传递精度要优于只利用互瞄观测值的坐标传递精度。

[0126] 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"),2个测站的姿态只是绕Z轴(仪器竖轴)有一个旋转角度,称其为定向旋转角 α 。将不利用公共点信息、只利用互瞄观测值得到的定向旋转角与整体平差解算得到的定向旋转角进行对比,结果如表6所示。

[0127] 表6定向旋转角计算结果(单位:°)

计算方式	平差解算	只利用互瞄观测值传递
α 的计算结果	107.0310°	107.0313°

[0129] 由表6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精度为 $0.0003^\circ = 1.08''$ 。

[0130] 综上,本发明利用2台激光跟踪仪建立了三维坐标测量仪系统,实现了受限空间内的精密坐标传递。在激光跟踪仪提手上安装了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作为垂向偏心差。测量作业时,两台激光跟踪仪自由设站后双面互瞄另一台仪器提手上的球棱镜,并依据垂向偏心差将互瞄观测值改化至仪器中心,建立起仪器中心之间的互瞄观测值。然后,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,可利用公共点和导线共同传递坐标和方位;当无公共点时,可只利用激光跟踪仪之间的双导线传递坐标和方位。在上海光源的工程控制网内的测量实验结果表明:当相邻测站有公共点时,互瞄观测值能提高坐标转换的精度;当无公共点时,在9m的距离上,坐标传递精度约为0.20mm,定向旋转角精度接近1"。该系统尤其适用于通视条件差的精密坐标传递场景,亦可推广应用于全站仪等其他极坐标测量系统。

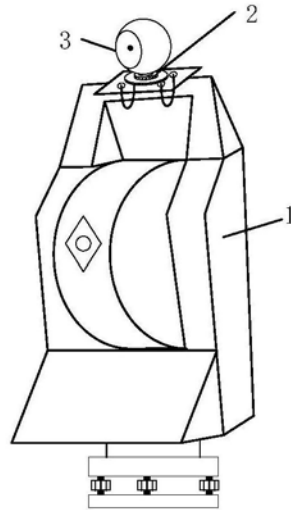


图1

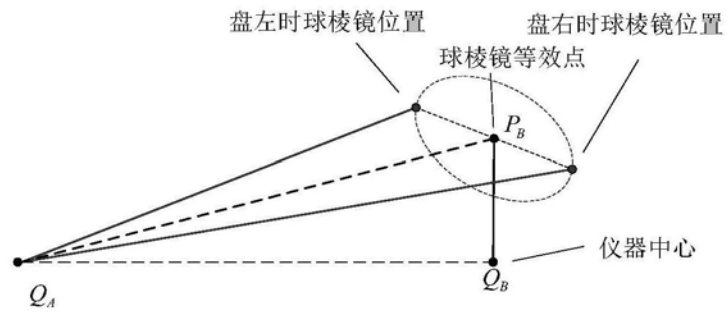


图2

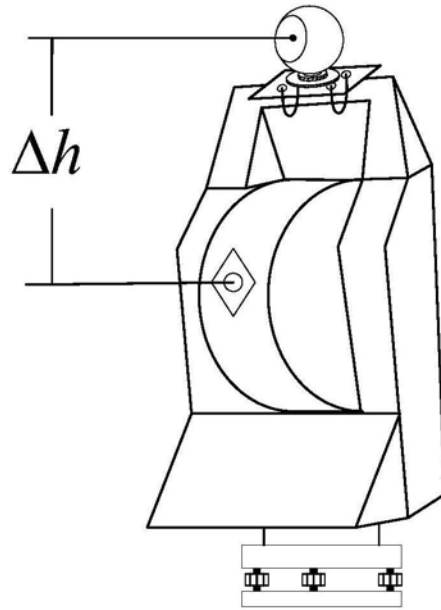


图3

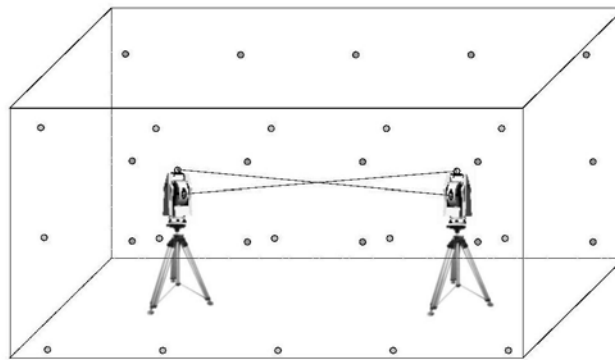


图4

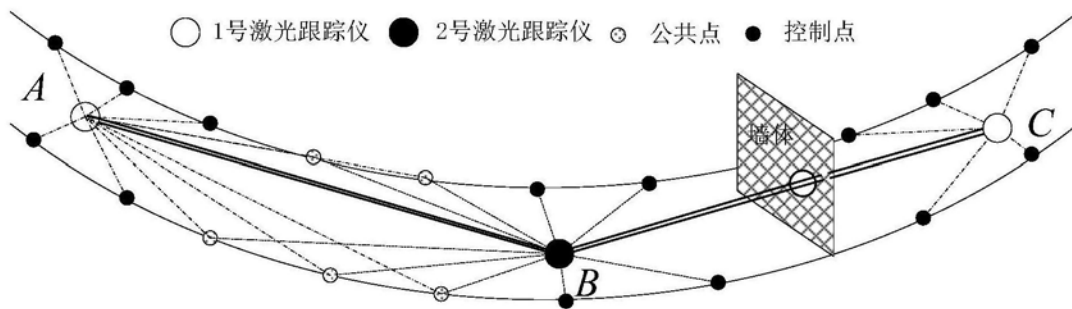


图5

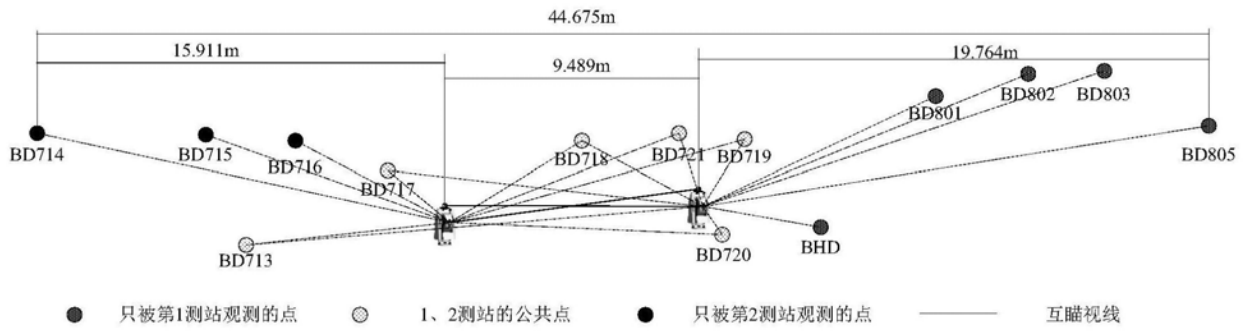


图6

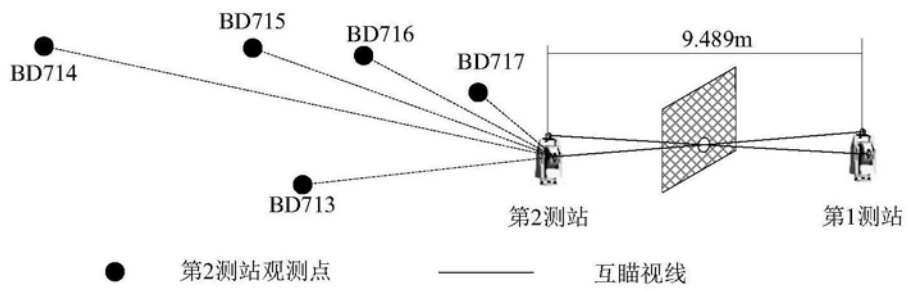


图7

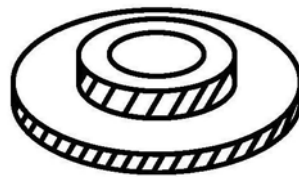


图8

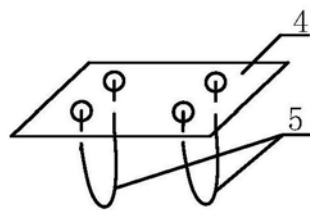


图9