

文章编号 1004-924X(2015)02-0363-08

## 基于无衍射姿态探针和全站仪 组合测量空间隐藏坐标

马国鹭<sup>1\*</sup>, 曾国英<sup>1</sup>, 赵斌<sup>2</sup>

(1. 西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010;

2. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**针对大尺度空间中构件特征隐藏区的空间坐标测量,提出了一种基于无衍射光束的测量探针,并将该探针与全站仪结合构成了空间坐标组合测量系统。介绍了探针姿态测量系统和组合测量系统的结构与原理。测量时,首先将探针测头接触于被测点,并用全站仪或激光跟踪仪瞄准探针的光学系统,测得探针的空间位置坐标。接着,使用探针将测距激光通过 axicon 透镜变换为无衍射光,并由 CCD 摄像机获得图像。由无衍射光的中心一对一映射激光的入射方向,通过无衍射光图像定中计算,获得探针的水平角和俯仰角。最后,通过电子倾角仪测得探针滚动角;联合测得各姿态角和位置坐标,通过坐标变换,计算得出被测点的空间坐标。实验显示,该探针的姿态角测量精度为 1 mrad,组合测量空间位置偏差为±1 mm,表明基于无衍射光束的探针与全站仪所构成的组合测量系统可满足大尺度空间中特征隐藏区空间坐标测量的要求。

**关键词:**坐标测量;无衍射光探针;全站仪;激光跟踪仪;特征隐藏区

**中图分类号:**TH72;TN247 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152302.0363

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

MA Guo-lu<sup>1\*</sup>, ZENG Guo-ying<sup>1</sup>, ZHAO Bin<sup>2</sup>

(1. College of Manufacturing Science and Engineering,  
Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621010, China;

2. College of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University  
of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

\* Corresponding author, E-mail: maguolu999@163.com.

**Abstract:** A non-diffracting beam based probe was proposed, then the probe was integrated with a total station to form a combined measurement system for measuring space coordinates of hidden parts in a large-scale space. The constructs and principles of the optical probe for measuring spatial attitude and the combined measurement system were introduced, and the mapping relationships between the centre position of non-diffracting and the incident angle of laser was established. In the combined measurement system, the probe stylus was first set to touch the point of measurement, and the optical

收稿日期:2014-05-26;修订日期:2014-07-18.

基金项目:西南科技大学自然科学基金资助项目(No. 14zx7160);四川省部共建教育部重点实验室资助项目(No. 13zxzk06)

system of the probe was targeted by the total station or the laser tracker to measure the spatial coordinates of the probe. The laser beam to measure the distance was transformed into a non-diffracting beam through the axicon lens, and CCD images were produced. The center of the non-diffracting beam was mapped one to one to the incident direction of the laser, and the horizontal angle and the pitching angle of the probe were obtained via center fitting of the non-diffracting images. Finally, an inclinometer was used to measure the rolling angle of the probe, and the spatial coordinates of the measured point were obtained by combing all the measured attitude angles with the position coordinates and coordinate transformation. Experimental results indicate that the precisions of probe's attitude-measuring system and combing measurement system are 1 mrad and  $\pm 1$  mm, respectively, which demonstrates that the combined system is more flexible and reliable and meets the measuring demands of space coordinates of hidden parts in large-scale spaces.

**Key words:** coordinate measurement; non-diffracting probe; total station; laser tracking instrument; hidden part

## 1 引言

在工业装备的装配定位、质量检测和安全管理等制造工艺过程中,空间坐标的精确测量起着关键的支撑作用<sup>[1-2]</sup>。特别在航空航天、汽车船舶和水利电力等工业领域中,高精度、大尺度的空间坐标测量有着广泛的需求。

在跨度大的测量环境中<sup>[3-4]</sup>,空间阻隔、遮挡、被测点凹陷等因素常导致被测件上的某些区域无法得到测量。针对这类问题,通常采用两种测量方式:一是通过测量设备的多次移站<sup>[5]</sup>来覆盖测量盲点。然而在复杂的(如空间狭窄)测量环境中,不易进行移站,即便勉强移站也会因移站给坐标测量带来累积误差<sup>[6]</sup>;二是组合相同或不同类型的多个测量设备,将测量数据集成融合,以提高测量系统适应环境的能力,增强系统的鲁棒性<sup>[7-8]</sup>。

目前,探针与激光跟踪仪或全站仪所构成的组合测量系统因便携、精度高、成本低、操作简单等优点而被广泛应用。其原理是通过测量探针的空间位置和姿态,根据坐标变换来计算出隐藏区的空间坐标。探针的空间位置可由激光跟踪仪或全站仪测得,而探针的空间姿态测量方法却分为两种。第一种是基于摄像测量原理的姿态测量,通过测量分布在探针上的至少 3 个发光点在 CCD 上的成像位置来解算出探针的空间姿态<sup>[9-10]</sup>。然而,该方法的姿态测量精度受背景杂散光、成像系统的球差、光笔上的光源形状等影

响,且探针上多点光源在成像时易被遮挡。第二种是采用激光测距与电子倾角仪相结合的方式来测量探针的空间姿态<sup>[11]</sup>。首先将立方角锥棱镜顶点磨削成一个平行于底面的小平面,在小平面后放置面阵 CCD。立方角锥棱镜将入射的部分激光原路反射回去,用于测距;另一部分激光透射过立方角锥棱镜,在 CCD 上形成小平面的投影。投影图像的中心唯一映射着入射激光的方向,通过图像处理和标定数据,便可求得探针的水平角和俯仰角,再通过电子倾角仪测出滚动角,便可实现探针的空间姿态测量<sup>[12]</sup>。然而,由于背景噪声影响图像质量,其中心坐标在 CCD 上的定位精度难以达到亚像素级,从而影响了水平角和俯仰角的测量精度,并且测角分辨率受制于小平面的尺寸;另外反射棱镜顶点处的切口平面影响测距精度,导致探针的空间位置测量产生偏差。

本文将具有定心精度高、无离焦、无畸变和抗背景干扰能力强等特性的无衍射光<sup>[13-14]</sup>引入到探针法姿态测量系统中,提出了一种基于无衍射光技术的测量探针。将该探针与全站仪构成组合测量系统,实现了大尺度空间中隐藏区域的坐标测量。

## 2 探针组合测量系统及其原理

### 2.1 探针组合测量系统

图 1 为探针组合测量系统,它主要由空间坐标测量仪(全站仪或激光跟踪仪)、探针姿态测量系统、便携式电脑、数据采集及处理软件构成。其

中, 全站仪的局部球坐标系为  $o x_1 y_1 z_1$ , 而全局坐标系  $o x y z$  建立在球坐标系  $o x_1 y_1 z_1$  原点  $o$  处, 且全站仪坐标系的高程轴  $o z_1$ , 东坐标轴  $o x_1$  与北坐标轴  $o y_1$  分别与全局坐标系  $o x, o y$  与  $o z$  重合。其变换关系如下:

$$(x, y, z) = (x_1, y_1, z_1) \times \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}. \quad (1)$$

探针的局部坐标系为  $o_a x_a y_a z_a$ , 并在该坐标系原点处建立探针的参考坐标系  $o_a x' y' z'$ ; 探针结构上的任何点在局部坐标系的空间坐标不会因为探针的空间位置与姿态的变换而改变, 局部坐标系随探针一起动; 而探针的局部参考坐标系除其坐标原点随探针空间位置的变换而改变外, 各轴矢量方向始终与全局坐标系  $o x y z$  对应的各轴方向保持不变。探针的空间姿态角  $(\beta, \varphi, \gamma)$  分别为绕  $o_a x'$  轴,  $o_a y'$  轴与  $o_a z'$  轴旋转的滚动角、倾斜角与水平方位角, 其中  $(\beta, \varphi)$  由安装在探针中的二维电子倾角仪测得,  $\gamma$  由探针光学系统与全站仪测距激光的相对关系测出。

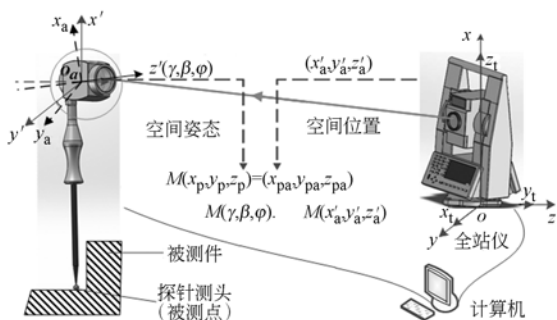


图 1 探针组合测量系统

Fig. 1 Block diagram of combination measuring system

在测量过程中, 将探针的测头接触于被测点, 全站仪以自动跟踪模式瞄准探针的光学系统, 探针光学系统将全站仪的测距激光分成两束: 一束按照原路返回, 用于测量探针基准点的空间位置坐标, 等同于探针坐标系原点在全站仪坐标系下的空间坐标  $(x'_a, y'_a, z'_a)$ ; 另一束光则进入探针光学系统, 将测距激光的空间入射方向角通过光学方式映射到图像传感器上, 通过图像处理得到光线的入射方位角  $\gamma$ 。

测量时全站仪以自动跟踪模式对准探针的光学系统, 测得探针基准点在全站仪坐标系下的坐标  $(x'_a, y'_a, z'_a)$ , 根据式 (2) 得探针坐标系原点

在全局坐标系下的空间位置坐标为  $(z'_a, x'_a, y'_a)$ 。设探针测头在探针局部坐标系下的坐标为  $(x_{pa}, y_{pa}, z_{pa})$ , 它是一个常量, 可通过实验标定获得。根据坐标变换理论, 应用测得的空间姿态角  $(\beta, \varphi, \gamma)$ , 便可计算得出  $P$  点的空间坐标:

$$(x_p, y_p, z_p) = (x_{pa}, y_{pa}, z_{pa}) \times \mathbf{M}(\varphi) \times \mathbf{M}(\beta) \times \mathbf{M}(\gamma) \times \mathbf{M}(z'_a, x'_a, y'_a), \quad (2)$$

其中:  $\mathbf{M}(\beta), \mathbf{M}(\varphi)$  与  $\mathbf{M}(\gamma)$  分别为姿态角  $(\beta, \varphi, \gamma)$  所对应的旋转矩阵,  $\mathbf{M}(z'_a, x'_a, y'_a)$  为全站仪测得探针的空间位置矩阵。全站仪在瞄准探针上的光学反射器 (三直角角锥棱镜) 实现空间位置测量时, 其球坐标系到全局坐标系  $o x y z$  的转换关系为:

$$\begin{cases} x'_a = x_j + S \cdot \cos \gamma_1 \cdot \cos \beta \\ y'_a = y_j + S \cdot \cos \gamma_1 \cdot \sin \beta \\ z'_a = z_j + S \cdot \sin \gamma_1 \end{cases}. \quad (3)$$

实际上类似全站仪球坐标空间坐标测量仪, 如激光跟踪仪, 其基本结构均可简化为一个精密测距仪在空间中绕两转轴相互垂直的角度编码盘旋转, 根据被测点距离  $S$  与被测点在测量仪坐标系中的空间角度 (水平方位角  $\beta_1$  和俯仰角  $\gamma_1$ ) 来度量空间坐标。在测量遮挡点  $P$  的过程中, 图像处理、数据采集与矩阵变换计算以及最终结果的输出等诸多环节都是在计算机硬件平台上完成实现的。

### 2.2 探针结构与姿态测量原理

探针主要由 CCD 相机、axicon 透镜、反射器和具有  $0.01^\circ$  测角精度的二维电子倾角仪构成, 如图 2 所示。其中反射器是顶点被切割成一个与底面平行的小平面的直角角锥棱镜。当全站仪对准探针光学系统发出测距激光, 反射器将一部分

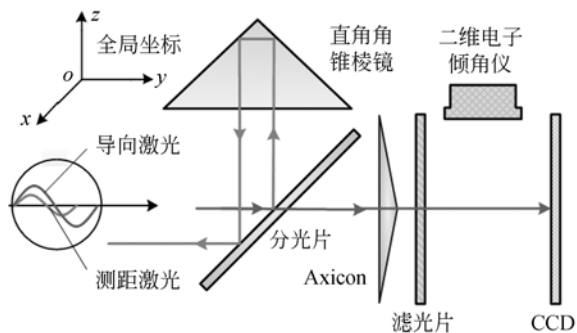


图 2 探针姿态测量原理

Fig. 2 Principle of attitude measurement of probe system

激光反射,用于测距;而另一部分激光透射过反射器,经由 axicon 透镜生成无衍射光,被 CCD 相机接收。

无衍射光环中心在 CCD 相机的坐标唯一映照着入射激光的方向,如图 3 所示。通过无衍射光定中算法<sup>[15-16]</sup>获得了精度达亚像素的中心坐标,结合 CCD 相机的标定数据,通过插值获得了反射器主轴与入射光的夹角  $\gamma$ 。

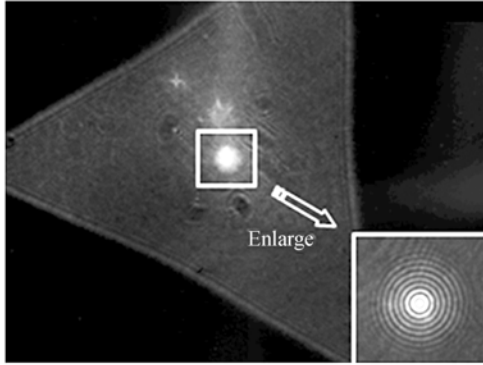


图 3 CCD 获得的无衍射光斑

Fig. 3 Non-diffracting beam captured by CCD camera

根据空间坐标转换关系可计算出探针的空间姿态角  $\beta$ ,  $\varphi$  和  $\gamma$ , 分别为:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arcsin \frac{\sin \beta'}{\cos \varphi} \\ \beta &= \beta' \\ \gamma &= \arctan \frac{\sin \theta \cos \beta_1}{\sin \theta \sin \beta_1 + \cos \theta \cos \beta_1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\varphi'$ ,  $\beta'$  为二维电子倾角仪测得的探针在  $o_a x' y' z'$  坐标系下分别绕轴  $o_a x'$ ,  $o_a y'$  的转角;  $\beta_1$  是探针光学系统全局在坐标系  $oxyz$  中的俯仰角,由全站仪测得。

### 2.3 无衍射光束测角原理

无衍射光束是标量波动方程下的一簇特解,具有定心优良、无离焦、像差和抗噪能力强等特性<sup>[17]</sup>,其入射方向与光斑中心的几何关系<sup>[18]</sup>如图 4 所示。其中,  $\theta$  为平行激光与 axicon lens 主轴光线的夹角,平面  $o_a x_a y_a z_a$  是建立在 axicon 透镜顶点处的坐标系,且  $o_a x_a$  平行于 axicon lens 的光轴,  $o_c x_c$  是 CCD 平面坐标系  $o_c x_c y_c$  的竖直轴,  $h_c$  是衍射环在 CCD 平面  $o_c x_c y_c$  上距离中心坐标点  $o_c$  的高度。

根据无衍射光理论<sup>[19]</sup>,通过 axicon lens 所生成的无衍射莫尔条纹的光学能量密度沿 axicon

lens 的  $o_c z_c$  轴, CCD 相机上的光强分布为:

$$E = \frac{1}{i\lambda z_{ac}} \iint \exp(ikx \sin \eta) \exp[-ik(n-1)\sqrt{x_c^2 + y_c^2} \theta] \times \exp\{ik\sqrt{ik\sqrt{z_{ac}^2 + (x_c - x_{co})^2 + (y_c - y_{co})^2}}\} dxdy, \quad (5)$$

式中:  $\lambda$ ,  $n$  分别为激光波长和 axicon 透镜的折射率,  $(x_{co}, y_{co})$  是无衍射光条纹在  $o_c x_c y_c$  平面上的坐标,  $z_{ac}$  是 CCD 相机坐标平面中心  $o_c$  到平面  $o_a x_a y_a z_a$  坐标中心  $o_a$  的距离。根据无衍射光入射特性,光斑中心的轨迹与入射光线平行,  $z_{ac}$ ,  $h_c$  和入射角  $\theta$  的关系为:

$$h_c = z_{ac} \times \tan \theta. \quad (6)$$

式中:  $h_c = (x_c^2 + y_c^2)^{1/2}$  是衍射环中心坐标到原点的距离。根据上式,入射角  $\theta$  的测量范围受 CCD 靶面尺寸和 axicon 透镜与 CCD 空间位置的约束。

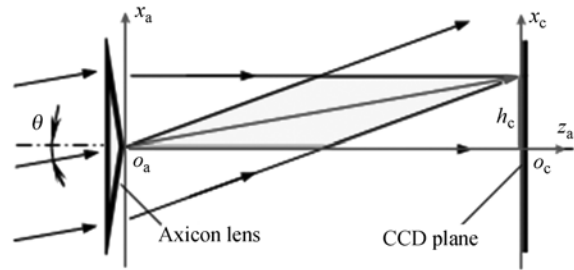


图 4 无衍射光斑中心与入射角的空间几何关系

Fig. 4 Principle of measurement incident angle based on non-diffracting beam

## 3 测量实验与结果

### 3.1 姿态角测量对比实验

探针系统的滚动角选用精度达毫弧度的电子倾角仪。为验证探针其它两个姿态角的测量精度,使用测角精度为  $1''$  的经纬仪,构建俯仰角和水平精度测量的实验平台,如图 5 所示。探针的光学系统置于  $o_s' x_s' y_s' z_s'$  调整平台上,光学系统可随支撑平台沿导轨在  $o_s' y_s'$ ,  $o_s' z_s'$  轴移动。

在测试实验中,将经纬仪调平后对准探针的光学系统,并记录经纬仪的水平角和俯仰角的读数,对捕获的无衍射光图像进行处理,再结合实验标定数据,计算得出探针系统的水平角和俯仰角。沿  $o_s' y_s'$  轴和  $o_s' z_s'$  轴调整光学系统的空间位置,绕  $o_s y_s$ ,  $o_s z_s$  轴旋转经纬仪的镜头对准探针的光

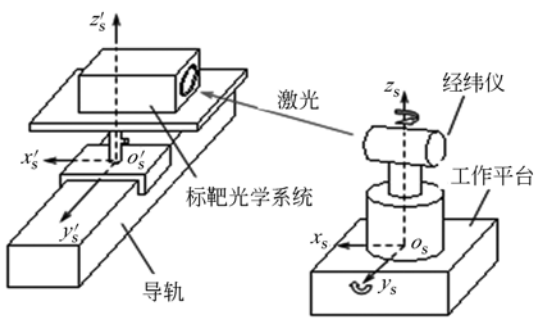


图 5 姿态角实验测量系统的结构简图

Fig. 5 Schematic diagram of attitude measuring experiment system

学系统, 测得水平角和俯仰角。重复上述步骤, 获得多组实验数据。对探针光学系统与经纬仪测得的角度值求差, 其误差曲线如图 6 所示。统计实验误差数据表明, 探针的姿态角测量误差小于 1 mrad。

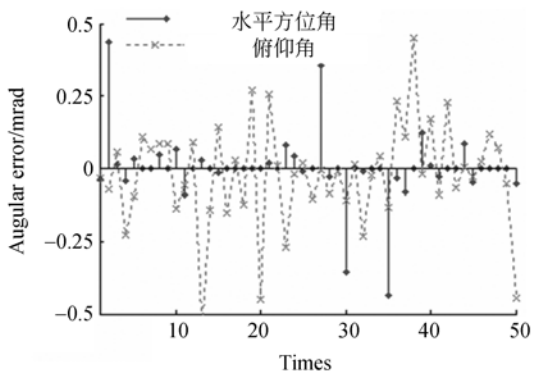


图 6 姿态角测量误差曲线

Fig. 6 Error curves of attitude angle measurement

让投射过切口小平面的激光直接投射在 CCD 上<sup>[8]</sup>, 形成切口小平面图像(图 7(a)), 或者采用凸透镜将激光聚焦在 CCD 上<sup>[8]</sup>, 形成焦斑图像(见图 7(b))。通过对图像定中的处理, 测定激



(a) 传统切口 (b) 普通透镜焦斑  
(a) Conventional cut (b) Common focal spot

图 7 传统定中图像

Fig. 7 Common images for centering

光束的入射角度和方向。然而, 由于背景噪声或透镜球差等因素<sup>[8]</sup>导致光斑在 CCD 上的灰度值和图像形状不对称, 光斑定心精度只能在像素级<sup>[8-11]</sup>。将上述两种实现方式, 结合本文的实例模型, 在没添加背景噪声的情况下进行统计计算。结果显示, 其姿态角的测量误差不低于 5 mrad, 其精度和抗噪性远低于本文所述测量方式的测量精度。

### 3.2 直接测量对比实验

为了验证探针的空间坐标测量精度和便于直接测量测头, 在探针测头处安装一个角锥棱镜; 采用全站仪瞄准探针的光学系统进行测量, 计算出探针测头(即三直角角锥棱镜的顶点)在全站仪坐标系下的空间坐标; 再将全站仪直接瞄准探针测头上的角锥棱镜测得其空间位置坐标; 接着改变探针的空间位置和姿态并重复以上步骤, 进行多次测量并记录, 测试实验如图 8 所示; 最后, 对比间接测量与直接测量的坐标位置数据。

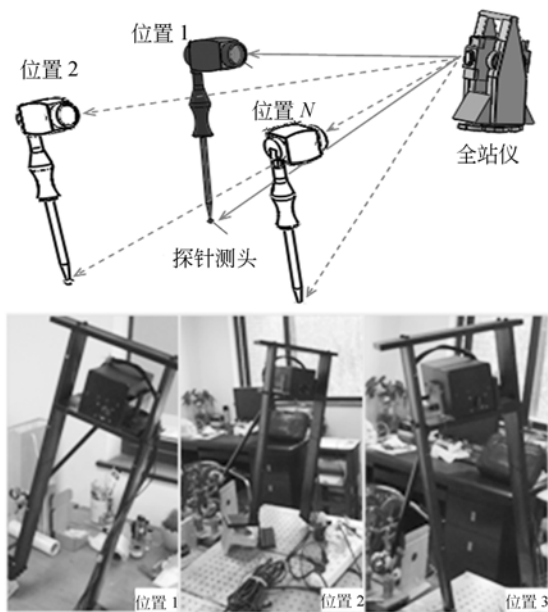


图 8 直接与间接测量对比实验原理

Fig. 8 Working principle of combined measurement experiment

由于探针球形测头被角锥棱镜所替换, 角锥棱镜的顶点便对应于被替代的球形测头的球心, 因此在替代装夹过程中难以确保角锥棱镜顶点与球形测头的球心重合, 探针测头的已标定数据也会失效, 需要重新标定探针测头。而作为测头的

角锥棱镜顶点的空间位置可通过全站仪直接测量,因此标定非常简单,仅需用全站仪顺序瞄准探针光学窗口与角锥棱镜,并分别进行测量,嵌入在测量系统的标定模块便会自动根据空间坐标变换

原理解算出角锥棱镜顶点在探针局部坐标系中的相对坐标位置。标定后,保持全站仪固定不动,多次变换探针的空间姿态和位置,通过探针间接测量和全站仪直接测量的部分实验数据如表 1 所示。

表 1 实验测量数据列表

Tab. 1 Data of experimental measurement

次数	通过全站仪直接测量的坐标/m	通过组合间接测量的坐标/m	探针的空间姿态/rad
1	(-3.454, 0.2034, -0.4155)	(-3.4534, 0.2045, -0.4163)	(-0.0071, 0.0093, 1.356)
2	(-3.4459, 0.1939, -0.4156)	(-3.4454, 0.1936, -0.4163)	(-0.0077, 0.0095, 1.4274)
3	(-3.45, 0.1778, -0.4251)	(-3.4518, 0.1785, -0.4252)	(0.2555, 0.008, 1.3971)
4	(-1.3109, -2.3519, -0.3372)	(-1.3098, -2.3518, -0.3372)	(0.0136, -0.0058, 2.5995)
5	(-2.7426, 3.048, -0.39)	(-2.744, 3.0456, -0.3906)	(0.0006, -0.0036, 0.7468)
6	(3.0049, 0.6572, -0.3917)	(3.0028, 0.6597, -0.3923)	(0.0929, -0.0095, 4.8928)
7	(2.995, 0.7546, -0.3487)	(2.9949, 0.7554, -0.3492)	(0.0881, -0.0051, 4.8757)
8	(-4.5001, -2.0084, -0.3281)	(-4.4991, -2.0092, -0.3293)	(-0.0133, -0.0076, 1.9574)

表 1 中的数据是在探针处于不同的空间位置、不同的光线入射角、不同滚角与不同的倾斜角下,通过探针测量与全站仪直接测量的空间坐标数据。统计分析测量的空间坐标位置偏差  $\Delta l = [(x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p - z_i)^2]^{1/2}$ , 结果表明二者之间的位置偏差不大于  $\pm 1$  mm。

为了进一步验证探针组合测量系统空间坐标测量的重复性,将探针球形测头置于球形孔中,并且固定。多次变换探针的空间姿态,计算出测头球心的空间位置坐标。实验原理如图 9 所示,测量的部分数据如表 2 所示。

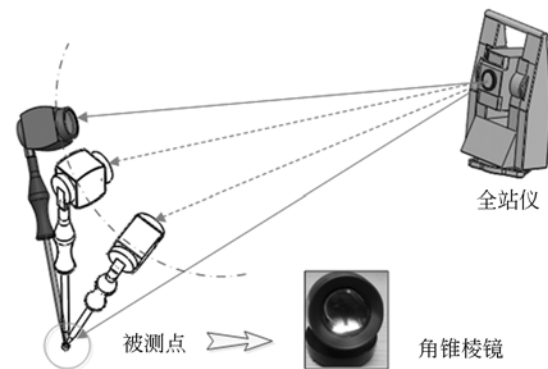


图 9 不同姿态角下被测点的测量

Fig. 9 Measurement of fixed points with different attitude angles of probe

表 2 实验测量数据列表

Tab. 2 Data of experimental measurement

次数	探针基准点的空间坐标/m	探针的空间姿态/rad	坐标测量偏差/mm
1	(-0.0173, 2.027, -0.036)	(0.0569, 0.019, 0.0013)	(0.6610, -0.0479, 0.4171)
2	(-0.0412, 1.9865, -0.0364)	(-0.0977, 0.0103, 0.0024)	(1.1629, -0.9038, -0.3139)
3	(-0.0868, 1.9893, -0.0143)	(-0.068, -0.0048, 0.1188)	(1.1701, -0.5094, -0.8109)
4	(-0.0781, 2.0107, -0.0104)	(-0.0817, 0.0521, 0.0973)	(0.2014, 1.3859, 0.7383)
5	(-0.0518, 1.9934, -0.0285)	(-0.006, -0.0228, 0.0626)	(0.4560, -1.3015, -0.6737)
6	(-0.0322, 1.9945, -0.0384)	(-0.0102, -0.0191, 0.0158)	(0.1534, 0.9162, 0.6026)
7	(-0.1407, 1.9759, -0.0008)	(-0.0567, -0.037, 0.2443)	(-0.1211, 1.3756, 0.8701)
8	(-0.0953, 2.0052, -0.0056)	(0.1069, -0.0308, 0.2021)	(-0.1444, -0.4997, -1.3227)

多次改变探针的空间姿态,对坐标位置偏差  $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$  与  $\Delta z_i$  进行统计,其方差分别为

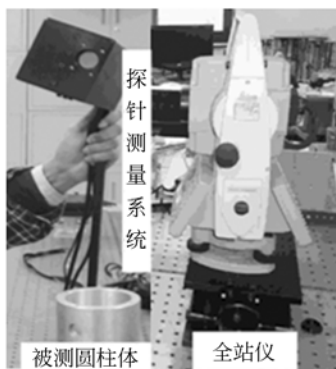
(0.853 5, 0.891 1, 0.873 8)。数据表明在探针与全站仪组合测量系统中,由探针空间姿态测量误

差所引起的空间位置偏差约为 1 mm,由于探针测杆的长度为 1 m,则探针姿态角的测量精度为 1 mrad,达到了设计精度。

### 3.3 激光跟踪仪对比实验

为了进一步验证探针与全站仪组合测量系统的可靠性,设计并采用精车工艺加工了一个外径为 111.2 mm,内径为 88 mm,高为 140 mm 的标准圆柱体,其尺寸精度达 IT8 级。先将标准样件用玻璃胶固结在工作平台上,先后通过激光跟踪仪与探针和全站仪所构成的组合测量系统对圆柱体样件的外表面进行相同次数的测量,并将测量数据进行圆柱拟合,对比拟合结果,以衡量探针的测量精度。其中激光跟踪仪的角向精度为  $20 \mu\text{m}+5 \mu\text{m}/\text{m}$ ,测距精度为  $16 \mu\text{m}+8 \mu\text{m}/\text{m}$ ,产自美国 FARO 公司,测量实验如图 10 所示。

拟合探针组合测量系统得到的坐标后,获得的圆柱特征参数为:圆柱直径 111.887 9 mm,测量点的最大偏差 0.180 9 mm,圆柱度 0.018 5 mm;而激光跟踪仪所测数据拟合后的圆柱参数为:圆柱直径 111.906 mm,测量点的最大偏差  $-0.094 \text{ mm}$ ,圆柱度 0.019 mm。对比实验表明,尽管探针测量数据的拟合偏差的离散度比激光跟踪仪大,但是在进行插值拟合后所获得的被测体的结构参数与激光跟踪相差很小,偏差在  $10 \mu\text{m}$  以内,满足实际工程上大尺度空间中隐藏区间的坐标测量精度。



(a) 探针全站仪组合测量

(a) Measurement combined with probe and total station



(b) FARO 激光跟踪仪测量

(b) Measurement with FARO laser tracker

图 10 规则样件的对比测量实验

Fig. 10 Contrast experiments with different methods

## 4 结 论

本文针对大尺度空间中构件特征隐藏区的空间坐标测量的要求,提出了一种基于无衍射光束的测量探针与全站仪构成的组合测量系统。首先介绍了该系统的结构与原理。然后,采用直接映射标定法实现了探针姿态测量系统的标定。最后,设计了一台探针样机,与全站仪组合,并与激光跟踪仪进行了测量对比实验。实验结果表明:探针空间测量的位置偏差为  $\pm 1 \text{ mm}$ ,探针系统的姿态测量精度为 1 mrad。

由于探针与全站仪所构成的组合测量系统的测量精度受全站仪空间位置测量精度与探针姿态测量系统精度的共同作用,因此,有必要选择更高空间坐标测量精度的全站仪或者将探针直接与激光跟踪仪组合;另外,在测量特征隐藏面时可采用更多测点,通过均方数据处理在一定程度上削弱空间坐标测量的偏差。该探针不仅可以与全站仪组合,还可与激光跟踪仪或者其它具有发射平行激光装置的设备构成组合测量系统,例如经纬仪、激光测距仪等。这一空间姿态测角技术还适用于大尺度范围中的姿态测量。

### 参考文献:

[1] ZHU J G, YE S H, YANG X Y, et al.. On-line industrial 3D measurement techniques for large vol-

ume objects [J]. *Key Engineering Materials*, 2005, 295(4):423-430.

[2] 周维虎,丁蕾,王亚伟,等. 光束平差在激光跟踪仪系统精度评定中的应用[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4):851-856.

- ZHOU W H, DING L, WANG Y W, *et al.*. Application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4):851-856. (in Chinese)
- [3] CUYPERS W, VAN GESTE N, VOET A, *et al.*. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2009, 47(3): 292-300.
- [4] 王德元, 张晓琳, 马强, 等. 多站大尺寸测量仪坐标系转换的 Procrustes 方法[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4):949-955.  
WANG D Y, ZHANG X L, MA Q, *et al.*. Procrustes method in coordinate transformation on multi-station of large scale measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):949-955. (in Chinese)
- [5] KOSAREVSKY S. Practical way to measure large-scale 2D parts using repositioning on coordinate-measuring machines [J]. *Measurement*, 2010, 43(6):837-841.
- [6] 韩廷祥, 张志胜, 戴敏. 用于目标测距的单目视觉测量方法 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 1110-1117.  
HAN Y X, ZHANG ZH SH, DAI M. Monocular vision system for distance measurement based on feature points [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1110-1117. (in Chinese)
- [7] CARBONE V, CAROCCI M, SAVIO E, *et al.*. Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surfaces [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2001, 17(4):263-271.
- [8] WECKENMANN A, JIANG X, SOMMER K D, *et al.*. Multisensor data fusion in dimensional metrology [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2009, 58(2): 701-721.
- [9] ZHAO P, NI G Q. Precise curved surface area measurement with a light-pen vision measurement system [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121(20): 1848-1852.
- [10] XIAO Z, JIN L, YU D, *et al.*. A cross-target-based accurate calibration method of binocular stereo systems with large-scale field-of-view [J]. *Measurement*, 2010, 43(6): 747-754.
- [11] MA G L, ZHAO B, FAN Y Y. Non-diffracting beam based probe technology for measuring coordinates of hidden parts [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, 51(5): 585-591.
- [12] KAM C L, POTOMAC M D. Accurate target orientation measurement system, Inc., USA; Patent No. US007400416B2 [P]. 2006.
- [13] DURNIN J, MICELI J J, EBERLY J H. Diffraction-free beams [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [14] 王涛, 杜团结, 吴逢铁. LD 泵浦的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器被动式产生近似无衍射绿光 [J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(1):1-5.  
WANG T, DU T J, WU F T. Laser diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser generating quasi-non-diffracting green beam by passive axicon [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(1):1-5. (in Chinese)
- [15] MA G L, ZHAO B. Polar transformation-based phase-scanning method for centering a non-diffracting fringe image [J]. *Optics Communications*, 2014, 325: 47-53.
- [16] BIN Z. Digital moire fringe-scanning method for centering a circular fringe image [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(14): 2833-2839.
- [17] SURESH P, MARIYAL C, RAJESH K B, *et al.*. Generation of a strong uniform transversely polarized nondiffracting beam using a high-numerical-aperture lens axicon with a binary phase mask [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(4): 849-853.
- [18] DURNIN J. Exact solutions for nondiffracting beams I. The scalar theory [J]. *JOSA A*, 1987, 4(4): 651-654.
- [19] ZHAO B, LI ZH. Diffraction property of an axicon in oblique illumination [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(13):2563-2568.

#### 作者简介:



马国鹭(1981—),男,四川巴中人,博士研究生,讲师,2014年于华中科技大学获得博士学位,主要从事大尺度空间中几何量精密测量方面的研究。E-mail: maguolu999@163.com.

#### 导师简介:



赵斌(1963—),男,江西人,博士,教授,博士生导师,1984年于浙江大学获得学士学位,1987年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得硕士学位,1995年于华中理工大学获得博士学位,主要研究方向为激光三角线阵 CCD 高精度非接触位移测量技术,激光三角 PSD 高速高灵敏度非接触位移、振动测量技术,无衍射光直线度测量技术与无衍射光大焦深显微成像技术。E-mail: zhaobin163@sohu.com

(版权所有 未经许可 不得转载)