

文章编号: 1001-3806(2014)06-0723-06

## 基于光学标靶与测距仪的隐藏区域坐标测量

范宜艳<sup>1,2</sup>, 赵斌<sup>1\*</sup>, 马国鹭<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 湖北工业大学 机械工程学院, 武汉 430068)

**摘要:** 为了解决大型装备中隐藏区域的空间坐标测量问题, 提出一种基于光学标靶与测距仪的激光测头, 该测头与全站仪或激光跟踪仪构成非接触测量系统。测量时, 激光测距仪发出的激光对准被测点测得其距离, 用全站仪或激光跟踪仪瞄准光学标靶, 实时获取激光测头的空间坐标, 同时激光测头测得其自身的空间姿态角, 然后通过坐标变换得到被测点的空间坐标; 并进行了实验验证。结果表明, 该测量系统可以使得组合测量的量程扩大并保持较高的空间坐标测量精度。

**关键词:** 测量与计量; 空间坐标测量; 隐藏区间; 非接触测量; 激光测距仪

**中图分类号:** TH761 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.06.001

## Coordinate measurement system of hidden parts based on optical target and rangefinder

FAN Yiyang<sup>1,2</sup>, ZHAO Bin<sup>1</sup>, MA Guolu<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Science Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** In order to solve the coordinate measurement of hidden parts in large equipment, a laser probe based on optical target and rangefinder was proposed, which was combined with a total station instrument or a laser tracker to form a non-contact measurement system. During the measurement, the laser beam from the rangefinder was set to touch the measurement point and the distance between the rangefinder and the point was measured. And then, the optical target was aimed at by the total station instrument or the laser tracker. The spatial coordinates and the attitude angles of the laser probe were gotten. Finally, the spatial coordinates of the measured point was calculated by coordinate transformation. After theoretical analysis and experimental verification, the results show that the measurement system could expand the measurement range and achieve reliable and higher measurement precision.

**Key words:** measurement and metrology; space coordinate measurement; hidden parts; non-contact measurement; laser rangefinder

### 引言

空间坐标的测量在工业领域中有着广泛的需求, 如航天航空领域、船舶工业、高速列车、卫星天线等大型装备领域<sup>[1]</sup>。目前, 基于全站仪或者激光跟踪仪的空间坐标测量系统是在大尺寸空间坐标测量领域中应用最广的系统<sup>[2-5]</sup>。

在大型装备的测量中<sup>[6]</sup>, 常因空间阻隔、遮挡、被测点凹陷等因素导致被测件上的某些区域无法被测量。目前, 针对这类问题, 通常采用探针与激光跟踪仪或全站仪器所构成的组合测量系统进行测量<sup>[7-10]</sup>, 其原理是通过探针空间位置和姿态的测量, 根据坐标变换便可计算出被测点的空间坐标。然而探针测杆的长度有限, 一般在 1m 以内, 因此只适合近距离隐藏点的测量, 满足不了大型设备远距离测量的需要, 而且由于是接触式测量, 测量过程中可能会引起工件的变形或损坏。这时, 需要一种非接触式测量来弥补这些不足。

本文中激光测距仪取代接触式测杆, 与光学标靶相结合构成激光测头, 并与全站仪或激光跟踪

基金项目: 国家九七三重点基础研究发展计划资助项目(2013CB035405)

作者简介: 范宜艳(1975-), 女, 博士研究生, 讲师, 主要从事精密测量方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhaobin63@sohu.com

收稿日期: 2013-12-17; 收到修改稿日期: 2014-02-25

仪构成非接触测量系统。由于选用的激光测距仪测量范围为 0m ~ 10m, 因此可大大增加隐藏点空间坐标测量的距离。

### 1 测量系统的构成

空间坐标测量系统如图 1 所示, 由全站仪(或激光跟踪仪)、激光测头和电脑构成。其中激光测头包含光学标靶系统和激光测距仪两部分, 并且激光测距仪的指向方向是可以调节的, 光学标靶系统的结构见参考文献[11]。

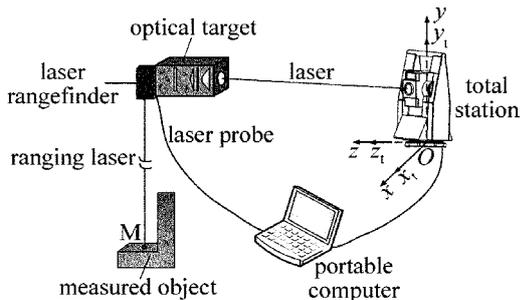


Fig. 1 Structure of measuring system

测量时, 将激光测距仪发出的激光对准被测点, 测出激光测头内基准点到被测点的距离, 全站仪对准光学标靶系统的角锥反射镜, 实时获取光学标靶系统在全站仪坐标系下的空间坐标, 同时光学标靶测得其自身的空间姿态角, 最后根据坐标转换即可获取被测点的空间坐标。

该测量系统通过改变激光测距仪激光的指向方向, 可以适应不同方位隐藏点的空间坐标测量。

### 2 测量原理

#### 2.1 测量系统的坐标系

测量系统的坐标系如图 2 所示, 全站仪是典型的球坐标测量仪, 球坐标系为  $O-x_1y_1z_1$ , 转换成笛卡尔直角坐标系  $O-xyz$ , 作为测量系统的参考坐标系; 激光测头坐标系  $O'-x_sy_sz_s$  以角锥反射镜的顶点为

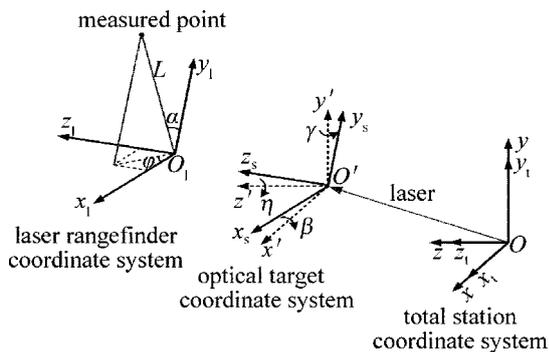


Fig. 2 Coordinate systems of measuring system

坐标原点,  $O_s-z_s$  为光轴方向, 辅助参考坐标系  $O'-x'y'z'$  由参考坐标系  $O-xyz$  空间平移得到; 激光测距仪坐标系  $O_1-x_1y_1z_1$  以传感器端面出射光点为坐标原点, 由  $O'-x_sy_sz_s$  平移得到。各坐标系均为右手坐标系。

#### 2.2 测量原理

测量时, 整体转动激光测头, 使激光测距仪的激光对准被测点  $M$ , 得到测距值  $L$ , 全站仪瞄准光学标靶系统的角锥反射镜, 实时获取其在全站仪坐标系下的坐标  $(x_0, y_0, z_0)$ , 同时光学标靶测得其自身的空间姿态角  $(\eta, \beta, \gamma)$ 。根据坐标变换关系, 便可得  $M$  点的空间坐标  $(x_M, y_M, z_M)$ 。

$$\begin{bmatrix} x_M & y_M & z_M & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_M' & y_M' & z_M' & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\eta & \sin\eta & 0 \\ 0 & \sin\eta & \cos\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_0 & y_0 & z_0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\eta, \beta$  和  $\gamma$  分别为光学标靶测得的滚动角、俯仰角和水平方位角, 可通过光学标靶系统内各传感器得到<sup>[11]</sup>;  $(x_M', y_M', z_M')$  为被测点  $M$  在激光测头坐标系  $O'-x_sy_sz_s$  下的空间坐标, 它可根据激光测距值  $L$  计算出。

由图 2 可知, 激光测距仪坐标系与激光测头坐标系的方向保持一致, 所以  $M$  点在激光测头坐标系下的坐标  $(x_M', y_M', z_M')$  与其在激光测距仪坐标系下的坐标  $(x_{1,M}, y_{1,M}, z_{1,M})$  的关系可通过平移矩阵得到:

$$\begin{bmatrix} x_M' & y_M' & z_M' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,M} & y_{1,M} & z_{1,M} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,  $t_x, t_y$  和  $t_z$  是平移参量。

被测点  $M$  在激光测距仪坐标系下的坐标  $(x_{1,M}, y_{1,M}, z_{1,M})$  为:

$$\begin{cases} x_{1,M} = L \sin\alpha \cos\varphi \\ y_{1,M} = L \cos\alpha \\ z_{1,M} = L \sin\alpha \sin\varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  和  $\varphi$  分别为被测点在激光测距仪坐标系  $O_1-x_1y_1z_1$  中的水平方位角和垂直方位角。

由(2)式和(3)式可得到被测点  $M$  在激光测头坐标系  $O'-x_sy_s z_s$  下的空间坐标:

$$\begin{cases} x_M' = L \sin \alpha \cos \varphi + t_x \\ y_M' = L \cos \alpha + t_y \\ z_M' = L \sin \alpha \sin \varphi + t_z \end{cases} \quad (4)$$

式中,未知参量  $t_x, t_y$  和  $t_z$  以及  $\alpha, \varphi$  是无法直接得到的。若令  $k_x = \sin \alpha \cos \varphi, k_y = \cos \alpha, k_z = \sin \alpha \sin \varphi$ , 则有:

$$\begin{cases} x_M' = k_x L + t_x \\ y_M' = k_y L + t_y \\ z_M' = k_z L + t_z \end{cases} \quad (5)$$

可见是  $L$  的线性函数,其各项参量可通过标定得到。

全站仪瞄准光学标靶测量出其空间坐标,数学描述如下式所示:

$$\begin{cases} x_i = x_j + S \sin \beta_i \cos \gamma_i \\ y_i = y_j + S \cos \beta_i \\ z_i = z_j + S \sin \beta_i \sin \gamma_i \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $(x_j, y_j, z_j)$  是全站仪参考坐标系  $O-xyz$  的基准点坐标,  $S, \beta_i$  和  $\gamma_i$  分别是光学标靶在全站仪坐标系  $O-x_jy_jz_j$  中的空间斜距、俯仰角和水平方位角。

将(5)式和(6)式带入(1)式,得到被测点  $M$  在全站仪坐标系下的空间位置坐标:

$$\begin{cases} x_M = x_j + S \sin \beta_i \cos \gamma_i + (k_x L + t_x) \cos \beta \times \\ \cos \gamma + (k_y L + t_y) \sin \eta \sin \beta \cos \gamma - \\ (k_z L + t_z) \cos \eta \sin \beta \cos \gamma - (k_y L + t_y) \times \\ \cos \eta \sin \gamma - (k_z L + t_z) \sin \eta \sin \gamma \\ y_M = y_j + S \cos \beta_i + (k_x L + t_x) \cos \beta \sin \gamma + \\ (k_y L + t_y) \sin \eta \sin \beta \sin \gamma - (k_z L + t_z) \times \\ \cos \varphi \sin \beta \sin \gamma + (k_y L + t_y) \cos \eta \cos \gamma + \\ (k_z L + t_z) \sin \eta \cos \gamma \\ z_M = z_j + S \sin \beta_i \sin \gamma_i + (k_x L + t_x) \cos \beta - \\ (k_y L + t_y) \sin \eta \cos \beta + (k_z L + t_z) \cos \eta \cos \gamma \end{cases} \quad (7)$$

在测量过程中,全站仪以自动跟踪模式对准光学标靶,测得其在全站仪坐标系下的斜距  $S$ 、俯仰角  $\beta_i$  和水平方位角  $\gamma_i$ 。由全站仪、激光测距传感器和光学标靶的测量数据,根据(7)式便可计算出被测点的空间坐标。

### 2.3 测量系统参量的标定

由上述测量系统的数学模型(7)式可知,如果已知激光测距仪坐标系与激光测头坐标系的相对位置关系,就可通过矩阵计算得到目标点的空间坐标。测量系统的标定就是求解(5)式中的参量  $t_x, t_y$  和  $t_z$  以及  $k_x, k_y, k_z$ 。

测量系统参量标定过程示意如图3所示,其具体方法为:激光测头的位姿保持不变,在激光测距仪射出的光线上的任一位置放置一球型空心角反射器(简称R),得到此时的测距值  $L_1$ ,然后用全站仪分别瞄准光学标靶和球型空心角反射器,得到光学标靶的角锥反射镜坐标  $(x_0, y_0, z_0)$  和R的中心点坐标  $(x_{M,1}, y_{M,1}, z_{M,1})$ ,以及其它姿态角参量  $\eta, \beta$  和  $\gamma$ ,代入方程(1)式解出R在激光测头坐标系下的坐标  $(x_{M,1}', y_{M,1}', z_{M,1}')$ ;沿着激光线改变R的位置,重复以上测量过程两次以上,得到  $L_1, L_2, \dots, L_n$  等,代入以下方程组:

$$\begin{cases} x_{M,1}' = k_x L_1 + t_x \\ x_{M,2}' = k_x L_2 + t_x \\ \vdots \\ x_{M,n}' = k_x L_n + t_x \\ y_{M,1}' = k_y L_1 + t_y \\ y_{M,2}' = k_y L_2 + t_y \\ \vdots \\ y_{M,n}' = k_y L_n + t_y \\ z_{M,1}' = k_z L_1 + t_z \\ z_{M,2}' = k_z L_2 + t_z \\ \vdots \\ z_{M,n}' = k_z L_n + t_z \end{cases} \quad (8)$$

解以上各超定方程组,可得到参量  $(k_x, t_x), (k_y, t_y)$  和  $(k_z, t_z)$ 。

理论上只需要测量激光线上的两个位置点即

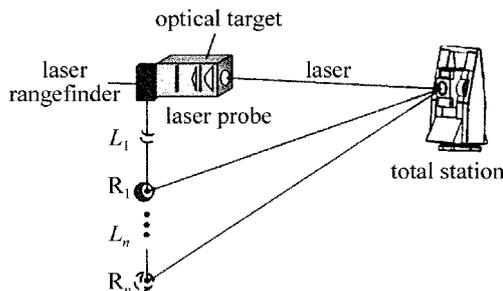


Fig. 3 Calibration of the measuring system

可,实际标定中,应多测几个点以减小误差的影响。

实际标定中,选取 5 个位置点,标定得到参量值为  $(k_x, t_x)$ ,  $(k_y, t_y)$  和  $(k_z, t_z)$  分别为  $(-0.8213, 0.2181)$ ,  $(-0.2765, 0.2195)$ ,  $(0.4990, 0.0283)$ 。

在标定出测量系统各个参量后,即可计算出被测点的 3 维空间坐标。由于光学标靶的姿态角转动范围是有限的,为了对全空间范围的坐标点进行测量,往往需要改变激光测距仪相对于标靶的安装方位,每次重新安装后,都应按以上步骤进行重新标定,得到新的参量。

### 3 测量不确定度

根据 1995 年出版的《测量不确定度的评定指南》,系统的合成不确定度可表示为<sup>[12]</sup>:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u_c^2(x_i)} \quad (9)$$

式中,  $y$  和  $x_i$  分别表示间接测量值与直接测量值,并且  $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,  $u_c(y)$  是变量  $x_i$  的标准不确定度。根据测量不确定度原理(7)式和(9)式,组合测量系统的合成不确定度表示为:

$$\left\{ \begin{aligned} u_c(x_M) &= \{u_c^2(S)\sin^2\beta_1\cos^2\gamma_1 + S^2u_c^2(\beta_1)\cos^2\beta_1\cos^2\gamma_1 + S^2u_c^2(\gamma_1)\sin^2\beta_1\sin^2\gamma_1 + \\ &[(k_yL+t_y)\sin\eta\cos\beta\cos\gamma - (k_zL+t_z)\cos\eta\cos\beta\cos\gamma - (k_xL+t_x)\sin\eta\cos\beta\sin\gamma]^2u_c^2(\beta) + \\ &[(k_zL+t_z)\cos\eta\sin\beta\sin\gamma - (k_xL+t_x)\cos\beta\sin\gamma - (k_yL+t_y)\sin\eta\sin\beta\sin\gamma - \\ &(k_yL+t_y)\cos\eta\cos\gamma - (k_zL+t_z)\sin\eta\cos\gamma]^2u_c^2(\gamma) + [(k_xL+t_x)\cos\eta\sin\beta\cos\gamma + \\ &(k_zL+t_z)\sin\eta\sin\beta\cos\gamma + (k_yL+t_y)\sin\eta\sin\gamma - (k_zL+t_z)\cos\eta\sin\gamma]^2u_c^2(\eta) + \\ &[k_x\cos\beta\cos\gamma + k_y\sin\eta\sin\beta\cos\gamma - k_z\cos\eta\sin\beta\cos\gamma - k_y\cos\eta\sin\gamma - k_z\sin\eta\sin\gamma]^2u_c^2(L) \}^{\frac{1}{2}} \\ u_c(y_M) &= \{u_c^2(S)\cos^2\beta_1 + S^2u_c^2(\beta_1)\sin^2\beta_1 + [(k_xL+t_x)\sin\eta\cos\beta\sin\gamma - \\ &(k_xL+t_x)\sin\beta\sin\gamma - (k_zL+t_z)\cos\eta\cos\beta\sin\gamma]^2u_c^2(\beta) + [(k_xL+t_x)\cos\beta\cos\gamma + \\ &(k_yL+t_y)\sin\eta\sin\beta\cos\gamma - (k_zL+t_z)\cos\eta\sin\beta\cos\gamma - (k_yL+t_y)\cos\eta\sin\gamma - \\ &(k_zL+t_z)\sin\eta\sin\gamma]^2u_c^2(\gamma) + [(k_xL+t_x)\cos\eta\sin\beta\sin\gamma + (k_yL+t_y)\sin\eta\sin\beta\sin\gamma - \\ &(k_yL+t_y)\sin\eta\cos\gamma + (k_zL+t_z)\cos\eta\cos\gamma]^2u_c^2(\eta) + [k_x\cos\beta\sin\gamma + \\ &k_y\sin\eta\sin\beta\sin\gamma - k_z\cos\eta\sin\beta\sin\gamma + k_y\cos\eta\cos\gamma + k_z\sin\eta\cos\gamma]^2u_c^2(L) \}^{\frac{1}{2}} \\ u_c(z_M) &= \{u_c^2(S)\sin^2\gamma_1\sin^2\beta_1 + S^2u_c^2(\beta_1)\cos^2\beta_1\sin^2\gamma_1 + S^2u_c^2(\gamma_1)\sin^2\beta_1\cos^2\gamma_1 + \\ &[(k_yL+t_y)\sin\eta\sin\beta - (k_xL+t_x)\sin\beta]^2u_c^2(\beta) + [(k_zL+t_z)\cos\eta\sin\gamma]^2u_c^2(\gamma) + \\ &[(k_yL+t_y)\cos\eta\cos\beta + (k_zL+t_z)\sin\eta\cos\gamma]^2u_c^2(\eta) + [k_x\cos\beta - k_y\sin\eta\cos\beta + \\ &k_z\cos\eta\cos\gamma]^2u_c^2(L) \}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中,  $u_c(x_M)$ ,  $u_c(y_M)$  和  $u_c(z_M)$  分别是被测点的空间坐标不确定度;而  $u_c(S)$ ,  $u_c(\beta_1)$  和  $u_c(\gamma_1)$  分别对应于全站仪直接测量的光学标靶坐标系原点在全站仪坐标系中的斜距、俯仰角以及水平方位角的标准不确定度,这 3 个量由全站仪系统所决定;  $u_c(\eta)$ ,  $u_c(\beta)$  和  $u_c(\gamma)$  分别是光学标靶的滚动角、俯仰角和水平方位角的标准不确定度;  $u_c(L)$  是激光测传感器的标准不确定度。

### 4 实验及结果分析

针对图 1 所示的全站仪与激光测头构成的测量系统,在对系统进行了标定后,进行了空间点位测量,并与全站仪对同一空间点坐标的直接测量结果进行

了比较,通过测量对比来验证本系统的测量精度。全站仪的测角精度为 2'、测距精度为  $2\text{mm} \pm 1\mu\text{m}$ 。采用球型空心角反射器作为被测目标进行测量实验。

实验步骤如下:首先用全站仪对准激光测头的光学系统,同时激光测距仪发出的激光对准球型空心角反射器,于是根据其变换关系得到被测点在全站仪坐标系下的空间坐标;然后,保持激光测头在空间位姿不变,转动全站仪(此时全站仪的位置保持不变)对准球型空心角反射器,直接测量出被测点的空间坐标;接着调整激光测头的姿态和空间位置,同时移动球形空心角反射器的到不同的位置,重复上述步骤,获得多组测量数据,部分数据如表 1 所示。

表 1 中  $(x_M, y_M, z_M)$  和  $l_M = (x_M^2 + y_M^2 + z_M^2)^{1/2}$

Table 1 Coordinates of laser probe in different positions and measured by the combined system and by the total station instrument/m

distance	measured by combined measurement				measured by total station instrument directly				error
	$L$	$x_M$	$y_M$	$z_M$	$l_M$	$x_t$	$y_t$	$z_t$	
6.5621	1.3216	0.4269	-0.1683	1.3990	1.3225	0.4271	-0.1689	1.4000	-0.0010
2.8637	1.8983	0.9718	-0.4826	2.1865	1.8975	0.9715	-0.4823	2.1856	-0.0009
2.1692	2.2149	-0.8338	-0.5511	2.4300	2.2156	-0.8336	-0.5515	2.4306	0.0007
3.7834	4.5211	-0.8061	0.7804	4.6582	4.5220	-0.8063	0.7806	4.6592	-0.0009
1.8539	-6.4384	1.2149	-0.1484	6.5537	-6.4390	1.2154	-0.1486	6.5544	-0.0007
7.8452	8.3790	-0.7669	0.5526	8.4330	8.3799	-0.7665	0.5528	8.4321	0.0009
4.2075	11.3269	1.7661	0.5004	11.4747	11.3258	1.7659	0.5007	11.4736	0.0011
5.3974	14.5345	0.4338	-0.6710	14.5564	14.5357	0.4335	-0.6714	14.5577	-0.0012
8.9531	16.9222	-0.7590	0.8673	16.9614	16.9208	-0.7593	0.8671	16.9600	0.0014
9.8482	18.9746	0.1768	-0.7543	18.9889	18.9904	0.1763	-0.7549	18.9899	0.0014

分别是通过激光测头间接测量的被测点的空间坐标和斜距,同理 $(x_t, y_t, z_t)$ 和 $l_t = (x_t^2 + y_t^2 + z_t^2)^{1/2}$ 就是通过全站仪直接测量的被测点的空间坐标和斜距,误差 $\Delta l = l_M - l_t$ 。由以上实验结果可以看出,通过本测量系统测量的空间坐标与直接通过全站仪测量的空间坐标的测量误差不大于 2mm。

实验中由于全站仪测量的斜距  $S$  范围从 0m 到 50m,则其标准不确定度为  $u_c(S) = 2\text{mm}$ ,俯仰角及水

平方位角的标准不确定度为  $u_c(\beta_t) = u_c(\gamma_t) = 0.0097\text{mrad}$ 。而无行射光光学标靶的姿态角的标准不确定度分别为  $u_c(\eta) = 0.8341\text{mrad}$ ,  $u_c(\beta) = 0.1745\text{mrad}$  和  $u_c(\gamma) = 0.3964\text{mrad}$ 。激光测传感器在 10m 测量范围内的标准不确定度  $u_c(L) = 1\text{mm}$ 。根据(10)式,通过组合测量系统测量得到空间坐标的合成不确定度如表 2 所示。实验结果表明,被测点空间坐标不确定度 $(u_c(x_M), u_c(y_M), u_c(z_M))$ 是

Table 2 Combined standard uncertainty of coordinates measured by the optical target in different positions and attitudes

the measured distance $L/\text{m}$	assessment point		the coordinates of the measured point $M/\text{m}$	combined standard uncertainty of the coordinates through combination system measured for the point $M/\text{mm}$
	the attitude angles of optical target/mrad			
2.1692	(16.292, 15.357, 259.476)		(2.2149, -0.8338, -0.5511)	(2.134, 2.271, 2.026)
4.2075	(59.952, 40.791, 526.863)		(11.3269, 1.7661, 0.5004)	(2.247, 2.482, 2.279)
6.3746	(98.802, 186.175, 377.724)		(30.6864, -0.8573, 1.8754)	(2.471, 2.712, 2.546)
8.8524	(187.812, 78.953, 203.736)		(37.5627, 1.8267, -1.0275)	(2.536, 2.683, 2.773)
9.5675	(235.874, 183.628, 492.549)		(48.9753, 1.9274, -0.9863)	(2.853, 2.781, 2.901)

(2.853, 2.781, 2.901) mm

### 5 结论

本测量系统利用光学标靶的高精度角度测量,再加上激光测距仪的光学测距精度,这样就使得测得的角度和距离精度都很高,确保了组合测量中的空间坐标的测量精度,而且由于激光测距仪的测量范围大,大大增加了组合式空间坐标测量的距离,可广泛应用于大型装备的隐藏点空间坐标大量程、非接触、动态测量。

#### 参 考 文 献

[1] ZHU J G, YE Sh H, YANG X Y, et al. On-line industrial 3-D measurement techniques for large volume objects[J]. Key Engineering Materials, 2005, 295/296(10):423-430.  
 [2] YU C L. Measurement method based on total station in 3-D meas-

urement system[J]. Optical Instruments, 2010, 32(2):1-4 (in Chinese).

[3] CHEN H P, ZHAO B. Space coordinate measurement based on theodolites and rangefinders[J]. Laser Technology, 2013, 37(1):77-81 (in Chinese).  
 [4] ZHANG Ch F, ZHANG J, TANG W Y, et al. Application of laser tracker on geometric parameters measurement of large dimensional workpieces[J]. Tool Engineering, 2002, 36(5):26-28 (in Chinese).  
 [5] NAKAMURA O, GOTO M. Development of a coordinate measuring system with tracking laser interferometers[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1991, 40(1):523-526.  
 [6] CUYPERSA W, van GESTELB N, VOETA A, et al. Optical measurement techniques for mobile and large-scale dimensional metrology[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(3/4):292-300.  
 [7] ZHAO P, NI G Q. Precise curved surface area measurement with a light-pen vision measurement system[J]. Optik, 2010, 121

- (20):1852-1858.
- [8] XIAO Zh Zh, JIN L, YU D H, *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.
- [9] LAU K C. Accurate target orientation measurement system; US, 007400416[P]. 2008-07-15.
- [10] 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.
- [11] CHEN H, ZHAO B. Electric target based on non-diffracting beam and error analysis [J], *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(2): 34-40 (in Chinese).
- [12] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Guide to the expression of uncertainty in measurement [M]. Sevres, France; International Organization for Standardisation Geneva ISO, 1995:1-120.

版权所有 © 《激光技术》编辑部