

文章编号: 1001-3806(2011)03-0407-05

## 无衍射光电子标靶的直接映射标定方法研究

陈慧, 赵斌\*, 马国鹭

(华中科技大学机械科学与工程学院仪器科学与技术系, 武汉 430074)

**摘要:** 为了实现盾构机的自动导向, 研制了一种新型无衍射光电子标靶, 给出了该电子标靶系统的构成和姿态角测量原理。针对标靶光学系统难以确定精确光学中心的问题, 提出一种新型标定方法, 直接将全站仪激光入射在标靶中 CCD 上的光斑中心位置和全站仪的角度值联系起来, 建立一一对应的映射关系数据库。工作时, 由光斑中心位置可直接插值得到入射光线的空间角度, 再结合电子水平仪读数, 计算出标靶的实际坡度角、滚动角和水平方位角, 并进而计算盾首中心坐标。结果表明, 利用该方法对无衍射光电子标靶进行标定能够获得较高的标定精度, 从而在标靶进行测量工作时获得较高的测量精度。

**关键词:** 测量与计量; 无衍射光; 电子标靶; 姿态角测量; 标定

**中图分类号:** TN247      **文献标识码:** A      **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.03.031

### Study on direct mapping calibration method of an electronic target based on non-diffracting beam

CHEN Hui, ZHAO Bin, MA Guo-lu

(Department of Instrumentation Science and Technology, School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Based on the principle of the non-diffracting beam, a new electronic target was designed for guidance of a shield machine. The system constitution and the measurement principle of attitude angles of the electronic target were discussed. Since the accurate optic center of optic system in the electronic target was difficult to find, a new calibration method was proposed. The spot center location of the incident laser of the total station in CCD fixed in the electronic target and the angle data of the total station were combined, and a mapping database was set up. During guidance of the shield machine, the actual slope angle, rolling angle and horizontal azimuth angle of the electronic target and the center of the head of shield machine were computed by the space angle of the incident laser interpolated by the actual spot center location and the angles of electronic gradiometer. The experiment shows that high calibration precision is achieved by the calibration method, and high measurement precision is gained during measurement of electronic target.

**Key words:** measurement and metrology; non-diffracting beam; electronic target; attitude angle measurement; calibration

## 引言

隧道施工技术在我国的发展前景非常广阔, 目前盾构法已经成为隧道施工的主要方法。随着隧道长度的增加, 隧道曲线复杂程度也不断增加, 为确保隧道的贯通精度, 盾构定位导向技术也相应得到发展<sup>[1-5]</sup>。在目前实际盾构施工中, 普遍应用国外的激光导向测量系统<sup>[6]</sup>, 利用来自全站仪或激光经纬仪的激光和一个

安置在盾构上的电子标靶完成测量盾构机姿态角的任务。因此, 研制电子标靶对于盾构自动导向系统国产化具有重要意义。

本文中介绍了无衍射光电子标靶的研制工作, 该标靶直接利用全站仪的跟踪激光作为测量光源, 采用图像处理方法确定 CCD 图像传感器采集到的无衍射光斑中心的位置, 结合电子水平仪的读数, 测出滚动角和坡度角, 得到无衍射光电子标靶的完整姿态角, 并完成盾首掘进面中心坐标的计算。针对标靶光学系统难以确定精确光学中心的问题, 作者提出一种新型的直接映射标定方法, 该标定方法先通过实验建立入射光空间方位角与 CCD 上光斑位置的 2 维映射关系数据库, 工作时则由无衍射光斑中心的位置插值得到入射光的空间方位角。

基金项目: 国家九七三重点基础研究发展计划资助项目 (2007CB714000)

作者简介: 陈慧 (1978-), 女, 博士研究生, 现主要从事精密测量、图像处理的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhaobin63@yahoo.cn

收稿日期: 2010-09-29; 收到修改稿日期: 2010-11-18

### 1 无衍射光电子标靶的系统构成及姿态角测量原理简介

在论述标定方法之前,有必要先介绍基于无衍射光的电子标靶系统的原理(见图1)。该标靶由平顶

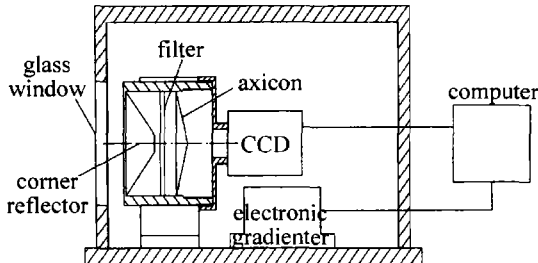


Fig.1 Block diagram for an electronic target based on non-diffracting beam  
角锥棱镜(即锥顶削成一小平面)、滤光片、圆锥透镜、CCD图像传感器、电子水平仪组成,计算机分别与CCD图像传感器及电子水平仪相连,用于计算光斑的中心和电子标靶的整体姿态角。

该标靶测量工作时(见图2),全站仪的跟踪激光

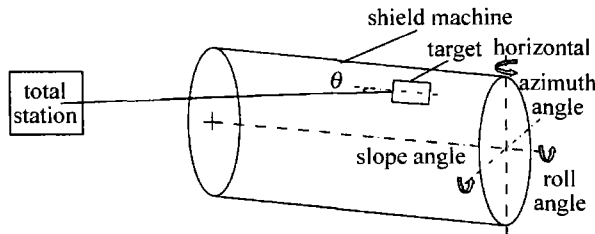


Fig.2 Principle diagram of the electronic target based on non-diffracting beam

以某一角度 $\theta$ 入射,透过平顶角锥棱镜顶点部位的小平面后,成为较窄的一束平行光,该平行光通过滤光片和圆锥透镜后成为无衍射光。无衍射光在CCD平面上的投影光斑是一系列同心光环<sup>[7-9]</sup>,光环中心的位置由入射光的方向决定,具体为过圆锥透镜的锥顶做一条与入射光平行的直线,该直线与CCD平面的交点即为光环中心<sup>[10]</sup>。用数字图像处理的方法计算出光环中心的位置后<sup>[11]</sup>,即可反算入射光的相对空间方位角,再结合电子水平仪的反映倾斜和滚动的角度数据,就可以计算出姿态角。由标靶本身的坐标和姿态角,进而完成盾首的空间坐标的计算,再与隧道设计轴线相比较,即可获得盾构的掘进偏差量。

因此,如何根据无衍射光斑中心的位置反算入射光的空间方位角是以上测量过程的关键。

### 2 传统标定方法存在的问题

在传统的光学系统中,为了测量入射平行光束的空间方位角 $\theta$ ,在畸变可以忽略的情况下,一般都是根据焦平面上光斑中心到光学中心(即从圆锥透镜顶点作CCD光敏面的垂线的垂足 $C$ ,如图3所示)的距离 $d$

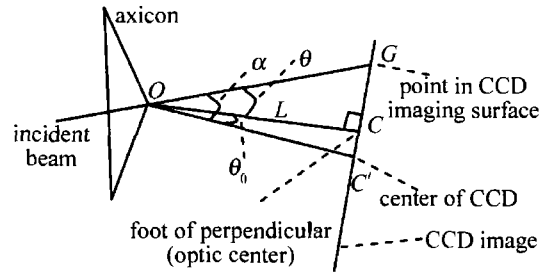


Fig.3 Optic center of the CCD imaging surface

$$\theta = \arctan(d/L) \quad (1)$$

计算<sup>[3]</sup>: 式中, $L$ 是像方主面到焦平面的距离。

这样做的前提是必须知道光学中心 $C$ 的精确位置,而由于制造、装配等原因,CCD中心一般并不是实际光学中心。若假定CCD光敏面中心 $C'$ 为光学中心,则由于装配误差,CCD光敏面中心与光学系统中心轴的偏差达0.2mm是正常的,再加上CCD光敏面的倾斜误差,实际从真实光学中心 $C$ 到CCD光敏面中心 $C'$ 的距离达0.5mm也是有可能的,而偏差0.5mm对应角度偏差为 $\theta_0 = 15 \times 2 / (1600 \times 7.4 \times 10^{-3}) \times 0.5 = 1.27^\circ$ (标靶的设计要求为1600像素对应水平角度 $\pm 15^\circ$ ,像素大小为 $7.4\mu\text{m}$ )。下面分析当 $C$ 到 $C'$ 的距离为0.5mm时,用CCD光敏面中心 $C'$ 代替光学中心 $C$ 所带来的测角误差,假设CCD光敏面上 $G$ 点与 $C$ 和 $C'$ 点在一条直线上,首先用实线表示 $G$ 点到 $C'$ 点的距离 $D = L \tan(\alpha - \theta_0) + L \tan \theta_0$ , $\alpha$ 为入射光线 $OG$ 与 $OC'$ 轴的夹角,将 $D$ 转换成像素,如图4a所示, $D$ 是一条

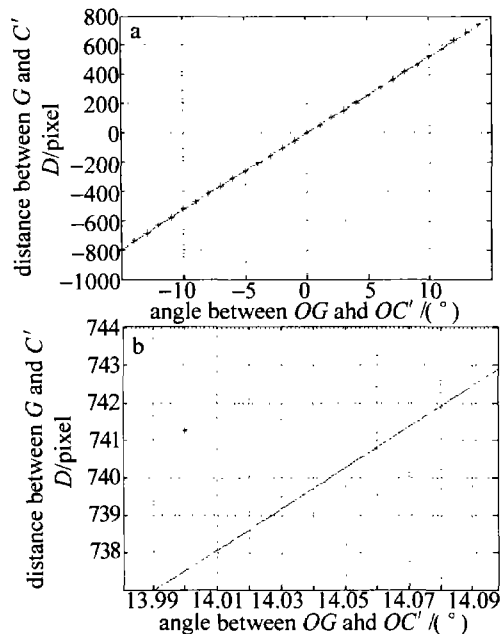


Fig.4 a—angle error induced by optic center offset b—magnified view of the left image

过原点且关于点 $(\theta_0, L \tan \theta_0)$ 对称的正切曲线,点 $(\theta_0, L \tan \theta_0)$ 即为光学中心 $C$ 。由于 $\alpha$ 的角度范围较小,从图中可看出, $D$ 近似为直线,因此,很难用实验的方法测量或计算出光学中心 $C$ 的精确位置。星点表示不

偏心的最小二乘拟合正切曲线  $D' = L' \tan \alpha$ 。图 4b 为将曲线一端放大后的结果,从图中可看出,在  $D = D'$  时对应的角度差约为  $0.07^\circ$ , 大于标靶设计要求测角精度  $1\text{mrad}$ , 因此,不能简单用 CCD 光敏面中心作为光学中心。

虽然理论上光学中心位置可以用各种方法加以修正,但目前尚无成熟的算法可采用,且很可能导致标定过程的复杂化。为此,本文中提出一种新标定方法,它直接利用激光经纬仪在空间角度定向上的高精度(2s, 远高于本标靶所要求的  $1\text{mrad}$  精度)的优点,将指向标靶的激光经纬仪的方向角数据与标靶中光斑位置数据结合,产生一一对应的映射关系,从而避免测量环节过多、计算方法过于复杂等可能带来的误差。

### 3 无衍射光电子标靶的直接映射标定

标定工作分成两个部分,一是建立标靶的入射光线空间角度与 CCD 坐标的映射关系数据库,二是在将光学镜头和电子水平仪装配到一起后,建立电子水平仪角度数据与标靶镜头入射光线空间角度映射关系数据的连接。

#### 3.1 标靶的入射光线空间角度映射关系标定装置

根据上节中将经纬仪方向数据与 CCD 光斑位置数据一一对应的思路,设计了如图 5 所示的标定装置。

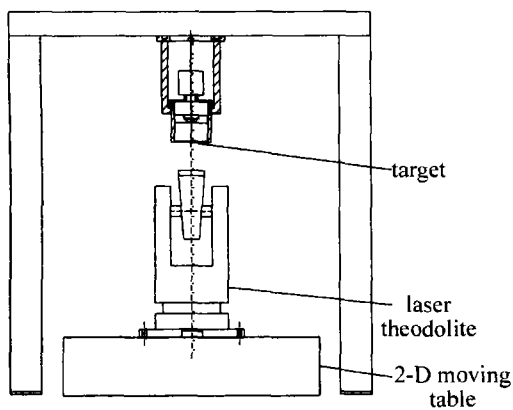


Fig. 5 Calibration device for the electronic target

激光经纬仪放置在 2 维平移台上,其望远镜光轴垂直向上;无衍射光电子标靶的光学镜头位于激光经纬仪的上方,固定在一龙门标定架上,其光轴垂直向下。标定工作时,激光经纬仪发出的平行激光模拟全站仪从远处射入标靶的光线,进入标靶后,在 CCD 产生对应的光斑;通过经纬仪望远镜的 2 维转动,以及 2 维平移台的相应移动,使得其发出的平行激光改变射入标靶的角度,这样就得到了一系列基本覆盖整个 CCD 的光斑中心坐标  $(x, y)$  和经纬仪角度坐标(天顶角  $\varphi$  和方位角  $\phi$ , 见图 6)之间的映射关系数据,即

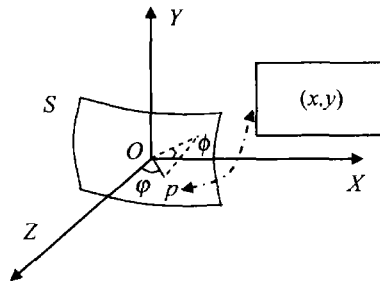


Fig. 6 Initial target coordinates

$\varphi(x, y)$  和  $\phi(x, y)$ 。

在标靶镜头和电子水平仪装配到一起后,为了将前面得到的空间角度映射关系数据与电子水平仪的 2 维倾斜角度数据结合,必须知道当电子水平仪为水平时,水平入射的光线在 CCD 上的光斑位置。

#### 3.2 角度映射关系数据与电子水平仪角度数据的连接

3.2.1 建立初始的标靶虚拟坐标系 为了建立映射关系数据与电子水平仪数据的关系,需先建立一个初始的标靶虚拟坐标系。以标靶中圆锥透镜的顶点为球心  $O$ , CCD 平面大致为  $XOY$  的方向,  $OY$  为大致铅垂方向,  $OZ$  为光线的方向,建立初始的标靶坐标系  $O-XYZ$ , 如图 6 所示。需说明的是,这样一个坐标系并不是真实地与标靶内任何元件的物理坐标所对应的,它仅仅是映射关系中光线空间角度的一种表示。单位球面  $S$  上的每点  $p$  与  $O$  的连线  $\vec{Op}$  对应一个光线方向  $(\varphi, \phi)$ ,  $\varphi$  为  $\vec{Op}$  与  $Z$  轴的夹角,  $\phi$  为  $\vec{Op}$  在  $XOY$  面的投影与  $X$  轴的夹角,即激光经纬仪的方位角,而每一个光线方向  $(\varphi, \phi)$  都对应 CCD 上的一个光斑中心位置  $(x, y)$ 。

3.2.2 确定标靶的水平线和滚动轴 如图 7a 所示,

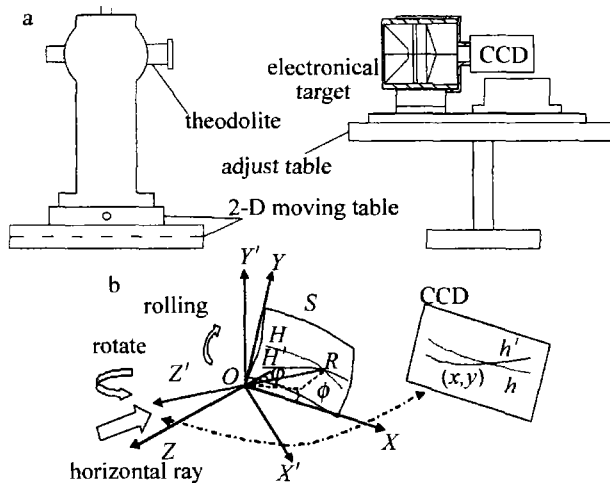


Fig. 7 a—setup for determining rolling axes b—relationship between new and initial coordinates

首先利用电子水平仪的读数将标靶在水平调节台表面调平,激光经纬仪放置在对面的 2 维电动平移台上,发出的平行激光水平射入标靶内,得到无衍射光斑中心坐标  $(x, y)$ 。左右水平转动经纬仪,并在 2 维电动平移台上平移使得激光进入标靶内,激光进入标靶后产

生的无衍射光斑中心在 CCD 上形成一条扫描曲线  $h$  (见图 7b), 该曲线上的每一点通过映射数据库, 都映射到单位球面  $S$  上, 形成一条扫描曲线  $H$ 。

使标靶滚动, 并保持倾斜角为 0, 然后按上述方法左右水平转动经纬仪, 得到曲线  $h'$  和  $H'$ 。则  $H$  与  $H'$  的交点  $R$  与角锥棱镜的顶点  $O$  的连线  $OR$  为标靶滚动轴。

**3.2.3 标靶坐标系的变换** 将图 7b 所示的初始标靶坐标系  $O-XYZ$  变换到以标靶滚动轴  $OR$  为  $Z'$  轴, 铅垂方向为  $Y'$  轴, 水平面为  $X'OZ'$  面的新坐标系  $O-X'Y'Z'$  中。其变换方法如下: (1)  $H$  与  $H'$  的交点方向对应新坐标系中  $Z'$  轴方向, 记为矢量  $\vec{OZ}'$ ; (2)  $H$  上任两点  $H_1, H_2$  与原点  $O$  所确定的平面为  $X'OZ'$  平面, 矢量  $\vec{OH}_1$  和  $\vec{OH}_2$  的叉积对应新坐标系中  $Y'$  轴方向, 记为矢量  $\vec{OY}'$ ; (3) 矢量  $\vec{OZ}'$  与矢量  $\vec{OY}'$  的叉积得到新坐标系中  $X'$  轴方向, 记为矢量  $\vec{OX}'$ ; (4) 利用 3 个矢量  $\vec{OX}', \vec{OY}'$  和  $\vec{OZ}'$  可以得到同一空间光线在旧坐标系和新坐标系之间的变换矩阵。

新坐标系中单位球面  $S$  上的每点  $p$  对应的光线方向  $(\varphi', \phi')$  与 CCD 上的光斑中心位置  $(x, y)$  仍然满足一一对应的映射关系, 得到新的映射数据库, 即  $\varphi'(x, y)$  和  $\phi'(x, y)$ 。而新的光线方向中的  $\varphi'$  就是在标靶坐标系  $O-X'Y'Z'$  中光线与标靶滚动轴的夹角。

**3.3 盾首坐标的计算**

为了验证本标定方法的精度, 利用所研制的标靶测量盾首坐标, 并与直接用全站仪测量盾首的坐标值进行对比。

盾首坐标的计算方法如下<sup>[12]</sup>: 建立以标靶棱镜为原点的标靶相对坐标系, 其  $Y$  轴为铅垂方向,  $Z$  轴为标靶滚动轴方向。因此, 盾首中心在全站仪 3 维坐标系中的坐标  $(x, z, y)$  可由盾首中心相对于标靶棱镜的坐标  $(A, B, C)$  经过 3 次旋转变换和 1 次平移得到:

$$(x, z, y, 1) = (A, B, C, 1) \times \begin{pmatrix} \cos\eta & 0 & \sin\eta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\eta & 0 & \cos\eta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ 0 & \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_0 & z_0 & y_0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中,  $(z_0, x_0, y_0)$  为标靶棱镜在全站仪坐标系中的坐标, 由全站仪直接测量得到。滚动角  $\eta$  和坡度角  $\beta$  由

电子水平仪得到, 双轴电子水平仪双轴示数为  $\theta_x, \theta_y$ , 若水平仪  $\theta_x$  轴沿盾构轴线安装, 则盾构的实际坡度角  $\beta$  就是  $\theta_x$ ; 如果盾构只滚动不倾斜, 则滚动角  $\eta$  即为  $\theta_y$ ; 如果盾构同时存在倾斜和滚动, 则实际滚动角  $\eta$  与  $\theta_x, \theta_y$  满足如下关系:  $\eta = \sin^{-1}(\sin\theta_y/\cos\theta_x)$  (3)

式中, 水平方位角  $\gamma$  为:  $\gamma = \delta + \theta'$  (4)

式中,  $\delta$  是当全站仪的望远镜光轴对准标靶棱镜时全站仪的水平方位角示数,  $\theta'$  是光线在  $O-X'Y'Z'$  坐标系中与  $Z'$  轴的夹角在水平面的投影, 它可根据光斑坐标  $(x, y)$ , 在新的映射数据库中插值得到天顶角  $\varphi'(x, y)$ , 由于标靶有滚动角  $\eta$  和坡度角  $\beta$ , 此时的  $O-X'Y'Z'$  坐标系的  $X'OZ'$  面并不水平, 通过反滚动和反倾斜, 将  $X'OZ'$  面变换到水平面, 光线与  $Z'$  轴的夹角即为  $\theta'$ 。

**4 直接映射标定法产生误差的因素分析**

利用直接映射标定法来标定无衍射光电子标靶存在的影响测量精度的误差源, 主要有激光经纬仪、电子水平仪。

首先, 入射光线空间角度与 CCD 坐标映射关系数据库的精度只与激光经纬仪的角度精度有关, 因此, 这部分标定环节简单, 没有其它误差源, 这正是本方法的优点所在。激光经纬仪的角度精度为  $2''$ , 远高于电子水平仪绝对精度  $0.01^\circ$  (即  $36''$ ), 其影响基本可忽略。

其次, 在建立电子水平仪角度数据与入射光线空间角度映射关系数据的连接时, 利用电子水平仪将标靶在水平调节台表面调平, 激光经纬仪发出的平行激光水平射入标靶内, 无衍射光斑中心的轨迹在 CCD 上形成水平扫描线  $h$ , 如图 8 所示, 由于电子水平仪滚动

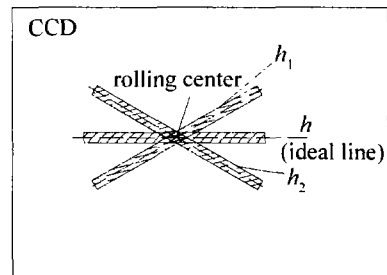


Fig. 8 Error analysis of electronic gradiometer

角的误差, 使得  $h$  在一定角度范围内旋转; 由于水平仪倾斜角的误差, 使得  $h$  在一定的范围内上下移动, 因此, 实际的  $h$  是理想的  $h$  周围的一个带域。同样, 标靶只滚动按上述方法得到的扫描线  $h_1, h_2$  也将是一个带域, 这些带域的交汇点就是滚动中心, 显然该点是有一定误差范围的, 它将影响最终的入射光线空间角度的确定, 这也是本标靶系统的误差源之一。

## 5 实 验

实验模拟盾构机实际工作时,标靶随盾构机一起做刚体运动,将标靶和代表盾首的棱镜一起固定在实验平台上(见图9),通过调节实验平台来改变标靶的

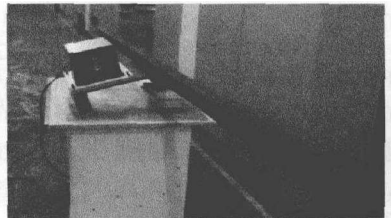


Fig.9 Simulation experiment setup

姿态,使标靶内的双轴电子水平仪的倾斜角示数在  $-3.5^{\circ} \sim +3.5^{\circ}$  之间变化,滚动角示数在  $-12^{\circ} \sim +12^{\circ}$  之间变化,调节全站仪与标靶的距离,使其最近 6.5m,最远 42.1m。用全站仪依次分别测量标靶和盾首棱镜的坐标,并记录下此时无衍射光电子标靶内电子水平仪的示数  $\theta_x$  和  $\theta_y$ ,全站仪跟踪标靶时的水平方位角示数  $\delta$ ,以及无衍射光斑的中心坐标  $(x, y)$ 。

进行了 30 次实验,按前述方法计算出的盾首中心的东坐标、北坐标和高程值与全站仪直接测得的盾首中心的东坐标、北坐标和高程之差分别由曲线 1, 2, 3 上的点表示,如图 10 所示。本标靶设计要求测角精度

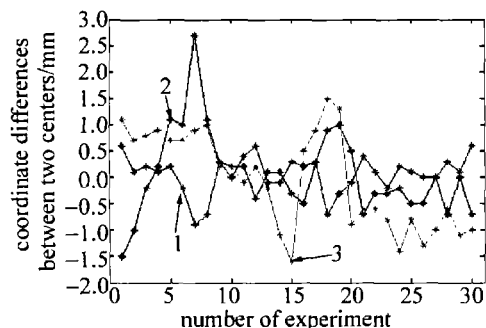


Fig. 10 Coordinate difference between calculated value and measured by total station

为 1mrad,图中可看出最大测量误差为 2.8mm,均方差小于 1mm,满足设计要求。

实验证明:经过这种新型直接映射标定方法标定后的无衍射光电子标靶能够获得较高的测量精度,测

量盾构机盾首的偏差精度达到毫米级,能够满足现场导向要求。

## 6 结 论

尽管本文中所述的直接映射标定方法基本能满足测量精度的要求,但在实际工作中,它存在标定工作数据量太多、标定实验时间过长的缺点,未来可以用自动经纬仪实现自动标定;同时,在用 CCD 上光斑位置插值求光线空间角度的过程中,插值精度也受具体插值算法的影响,有待进一步改进。

### 参 考 文 献

- [1] FENG D J, PAN Q L, ZHANG F M, *et al.* On the orientation survey of the shield in subway construction[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2003, 31(5):57-61 (in Chinese).
- [2] ZHANG H M, GU L. On the measurement and the method of computation of the posture parameters of shields[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2004, 41(2):14-20 (in Chinese).
- [3] ZOU W J, ZHU G L, WU X B. Angle measuring system of laser based on array CCD[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, 33(10):91-95 (in Chinese).
- [4] WU X B, ZHU G L, ZOU W J. Research of a PSD-based electric laser system[J]. *Machinery & Electronics*, 2006, 24(7):38-40 (in Chinese).
- [5] PAN M H, ZHU G L. Study of measure methods of the automatic guiding system of shield machine[J]. *Construction Technology*, 2005, 34(6):34-36 (in Chinese).
- [6] LIU D L, HUANG Y K. Guided system VMT of shield machine[J]. *Construction Machinery*, 2003, 23(1):60-61 (in Chinese).
- [7] ZHOU L P, ZHAO B, LI Zh. Theory and generation of non-diffracting Bessel beams[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1997, 5(4):14-19 (in Chinese).
- [8] ZHANG B, LÜ B D. Analyzing the propagation properties of diffraction-free beams[J]. *Laser Technology*, 1996, 20(1):14-19 (in Chinese).
- [9] ZHAI Zh Sh, ZHAO B. Study on property of central spot of non-diffracting beams[J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5):480-483 (in Chinese).
- [10] ZHAO B, LI Zh. The focus diffraction property of axicon illuminated by inclined plane wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(3):299-305 (in Chinese).
- [11] CHEN H, ZHAO B. Global center detection algorithm of non-diffracting beam[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, 29(5):770-773 (in Chinese).
- [12] ZHU G L, WU X B, PAN M H. Analysis of errors in shield automatic guide system[J]. *China Municipal Engineering*, 2006, 31(1):44-47 (in Chinese).

(上接第 314 页)

- [7] NOTOMI M. Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: refractionlike behavior in the vicinity of the photonic band gap[J]. *Physical Review Letters*, 2000, B62(16):10697-10705.
- [8] HE S L, JIN Y, RUAN Zh Ch, *et al.* On subwavelength and open resonators involving metamaterials of negative refraction index[J]. *New Journal of Physics*, 2005, 7: 210.
- [9] HE S L, RUAN Zh Ch. A completely open cavity realized with photonic crystal wedges[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2005, A6(5):355-357.
- [10] RUAN Zh Ch, HE S L. Open cavity formed by a photonic crystal with negative effective index of refraction[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(17):2308-2310.
- [11] KUANG J C, JIN Y, HE S L. An open wedge cavity based on the negative refraction of a photonic crystal[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2006, 16(11):582-584.
- [12] SUN G L, BAKHTAZAD A, JUGESSUR A, *et al.* Open cavities using photonic crystals with negative refraction[J]. *SPIE*, 2006, 6343: 63433M/1-63433M/7.