

# 基于双相机标靶的直线顶管掘进机导向方法

黄喆<sup>1\*</sup>, 燕庆德<sup>1</sup>, 邵震宇<sup>2</sup>, 赵旭晔<sup>2</sup>, 杜文阳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222;

<sup>2</sup>天津恒度量子精密仪器技术有限公司, 天津 300384

**摘要** 针对直线顶管掘进机在掘进导向中所面临的响应速度慢、成本高的问题, 提出了一种基于双相机靶标的实时位姿测量方法。利用对向安装的两个工业相机及两块感光成像屏组成测量标靶, 并辅以一道已知空间方位信息的指示激光。所提方法利用光斑图像分析处理、标定网格检索以及欧拉角解算技术, 可完成掘进机相对计划线在工程坐标系下水平/垂直偏差的测量, 进而实现导向。实验结果表明, 所提双相机标靶的方位角重复性测量精度优于  $0.03^\circ$ 、绝对测量误差小于  $0.05^\circ$ 、水平/垂直偏差测量误差小于 3 mm, 完全满足直线顶管掘进机实时精确导向需求。

**关键词** 视觉光学; 视觉测量; 直线顶管导向; 双相机标靶; 位姿测量

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0433001

## Guiding Method of Linear Pipe Jacking Machine Based on Dual Camera Target

Huang Zhe<sup>1\*</sup>, Yan Qingde<sup>1</sup>, Shao Zhenyu<sup>2</sup>, Zhao Xuyue<sup>2</sup>, Du Wenyang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222;

<sup>2</sup>Tianjin Hengdu Quantum Precision Instrument Technology Co., Ltd., Tianjin 300384

**Abstract** Aiming at the problems of slow response speed and high cost faced by linear pipe jacking machine in tunneling guidance, a real-time pose measurement method based on dual camera targets is proposed. The measurement target is composed of two opposite industrial cameras and two photosensitive imaging screens installed in the opposite direction, supplemented by an indicator laser with known spatial orientation information. By using the techniques of spot image analysis and processing, calibration grid retrieval and Euler angle calculation, the proposed method can complete the measurement of horizontal/vertical deviation of machine relative to the planning line in the engineering coordinate system, so as to realize the guidance. The experimental results show that the azimuth repeatability measurement accuracy of the proposed dual camera target is better than  $0.03^\circ$ , the absolute measurement error is less than  $0.05^\circ$  and the horizontal/vertical deviation measurement error is less than 3 mm, which can fully meet the real-time accurate guidance requirements of the linear pipe jacking machine.

**Key words** visual optics; vision measurement; linear pipe jacking guidance; dual camera target; pose measurement

## 1 引言

随着我国经济持续稳定地增长, 城市化进程逐

步加快, 隧道施工的需求量也在逐年增加, 并且顶管技术在我国地下管线的施工中起到越来越重要的作用<sup>[1-3]</sup>。顶管施工技术的关键在于准确、高效地

收稿日期: 2021-01-12; 修回日期: 2021-02-10; 录用日期: 2021-03-18

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2006100)、天津市自然科学基金(18JCYBJC88600)、天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室开放课题(pilab1905)

通信作者: huangzhe@tust.edu.cn

测量直线顶管掘进机的实时位姿,通过控制顶管机的位置和姿态可完成隧道掘进。

目前,顶管掘进机的导向方法主要分为激光标靶法和陀螺仪法<sup>[4]</sup>。德国 VMT 导向系统利用激光标靶法完成导向<sup>[5]</sup>。在激光标靶法中,将激光靶安装在顶管掘进机盾尾处,利用全站仪将激光打到激光靶的中心,再利用激光靶的内部算法计算出激光靶姿态,将激光靶姿态与刚体零位信息结合后即可解算出顶管机的实时位姿。日本 TMG-32B 陀螺仪导向系统利用陀螺仪法实现导向。陀螺仪导向系统是陀螺仪和倾角仪的结合,其中陀螺仪指示正北方向以确定顶管机的水平角,倾角仪可得到顶管机的滚转角和俯仰角,进而可获取顶管机的姿态信息。然而, TMG-32B 陀螺仪导向系统的可靠性有待提高<sup>[6]</sup>。在国内,在利用短距离顶管法的施工过程中,顶管掘进机的导向一般采用人工测量法、激光经纬仪+砧板法、全站仪+三棱镜法和全站仪+三维激

光靶法等。由于上述测量方法存在效率低、精度低和成本高等问题,故为提高施工效率和隧道质量,顶管法隧道施工中迫切需要一款操作简便、高效且能满足施工精度要求的自动化导向系统。

针对成本和测量效率问题,本文提出了一种基于双相机靶标的直线顶管掘进机精确导向方法。在保证测量精度的前提下,所提方法仅用一道已知空间指向信息的指示激光和双相机靶标即可实现顶管机导向,具有很强的工程适用性。

## 2 算 法

### 2.1 测量原理

基于双相机靶标的直线顶管掘进机导向方法能够实现对顶管机相对计划线路的水平/垂直偏差的实时精确测量。为实现顶管机的导向功能,必须先定义该系统中的坐标系。顶管机导向的过程可抽象为如图 1 所示的数学模型。

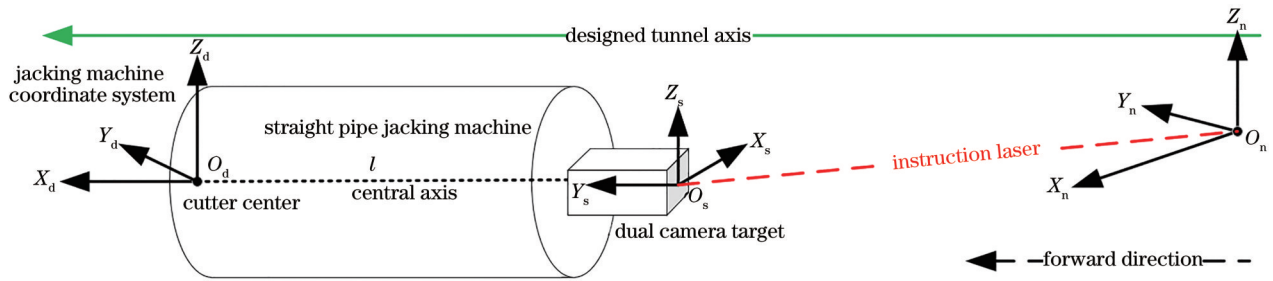


图 1 坐标系定义

Fig. 1 Definition of coordinate system

由图 1 可知,该系统中的坐标系有工程坐标系  $O_n-X_nY_nZ_n$  (简称 n 系)、双相机标靶坐标系  $O_s-X_sY_sZ_s$  (简称 s 系) 和直线顶管掘进机坐标系  $O_d-X_dY_dZ_d$  (简称 d 系)。根据测量行业的使用习惯,将 d 系和 n 系定义为左手坐标系;因为右手坐标系便于测量人员理解,所以将 s 系定义为右手坐标系。其中, s 系和 d 系属于同一个刚体坐标系。

在顶管机掘进过程中,司机需要根据导向系统的测量值,控制顶管机的刀盘中心( $O_d$ )和顶管机轴线  $l$  严格按照计划线(掘进方向)移动,故导向系统必须实现对顶管机水平/垂直偏差的精确测量,这样才能保证隧道顺利贯通。为实现对其刀盘中心(顶管机坐标系的原点  $O_d$ )在 n 系下空间坐标的实时精确测量,即计算  $O_d^n$ ,相应算法设计如下。

由设计加工模型可知,顶管机机身关键特征点<sup>[7]</sup>在 d 系下的坐标为已知量。所述顶管机机身关键特征点指顶管机盾首、盾中和盾尾,其中盾首坐

标为顶管机坐标系原点  $O_d$ ,在 d 系下的盾首坐标可以表示为

$$O_d^d = [0 \ 0 \ 0]^T. \quad (1)$$

获取  $O_d^n$  需要经过坐标系传递链  $d \rightarrow s \rightarrow n$  变换, d 系  $\rightarrow$  s 系的变换可通过 d 系旋转平移完成,再利用  $R_s^n$  对 s 系进行旋转变换,即可得到  $O_d^n$ 。根据设计原理对顶管机水平/垂直偏差在 s 系的位置进行解算。此外,在解算坐标  $O_d^n$  时, s 系  $\rightarrow$  n 系未进行平移转换。上述变换过程可以表示为

$$O_d^n = R_s^n (R_d^s \cdot O_d^d + T_f^s), \quad (2)$$

式中:  $R_d^s$  表征了双相机靶标与顶管机的刚体零位关系,通过始发零位测量所有顶管机机身关键特征点的三维空间坐标获取<sup>[8]</sup>;  $T_f^s$  为 s 系下前屏实时光斑的坐标,该坐标通过基于双相机靶标的标定网格索引方法获取;  $R_s^n$  为标靶坐标系与工程坐标系的旋转矩阵,通过姿态矩阵解算方法获取<sup>[9]</sup>。

已知  $O_d^n$  坐标后,可计算相对隧道设计轴线的水平/垂直偏差,计算原理如图 2 所示。其中,  $B$  点的坐标为  $O_d^n$ ,该点所在坐标系为  $O_d'-X_d'Y_d'Z_d'$ ,  $B'$  和  $B''$  为  $B$  点在水平和垂直面的投影。图 2 中线段  $CD$  为截取的一段指示激光,  $C'$  和  $C''$  为  $C$  点在水平和垂直

面的投影,  $D'$ 、 $D''$  为  $D$  点在水平和垂直面的投影,  $E$ 、 $E'$  和  $E''$  分别为平面  $B'BB''B_1$  与  $CD$ 、 $C'D'$ 、 $C''D''$  的交点。按照本文的偏差定义,  $B'E'$  为刀盘中心水平偏差,  $B''E''$  为刀盘中心垂直偏差。

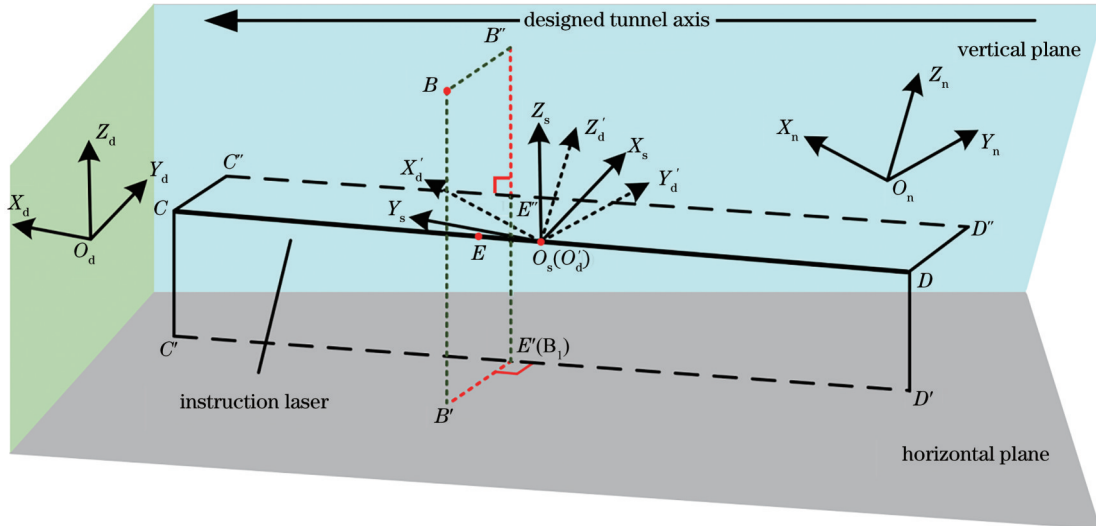


图 2 水平/垂直偏差的测量原理

Fig. 2 Measurement principle of horizontal/vertical deviation

根据图 2 中的数学模型可知,指示激光的水平角  $\theta_{hz}^n$  和垂直角  $\theta_v^n$  为已知量。参考文献[9]中欧拉角的计算公式,能够得到指示激光的水平旋转分量  $R_z^n$  和垂直旋转分量  $R_x^n$ 。将已知坐标  $O_d^n$  分别与  $R_z^n$ 、 $R_x^n$  相结合,可获取水平偏差  $S_{hz}^n$  和垂直偏差  $S_v^n$ 。

### 2.2 测量系统组成

由于所提测量系统依赖于双相机靶标的结构特性,因此双相机靶标的结构设计尤为重要。根据直线顶管掘进机现场安装空间和测量原理对靶标结构进行设计,如图 3 所示。

在图 3 中,两个工业相机对向安装,利用固定在前屏上方的相机拍摄后屏图像,利用固定在后屏上方的相机拍摄前屏图像,且两个相机与前后感光成像屏的夹角为  $27^\circ$ 。前感光成像屏(简称前屏)为透明亚克力板,后感光成像屏(简称后屏)为磨砂黑色亚克力板。在测量过程中,仅需将一束已知空间方位信息的指示激光射向双相机靶标,在前屏和后屏均出现光斑后,调整两个工业相机的曝光时间,使得两个相机均能清晰抓取前后屏光斑的图像。然后,利用靶标姿态测量和水平/垂直偏差测量的方法,即可实现直线顶管掘进机的姿态测量。

所提测量方法实现坐标  $O_d^n$  与计划线的水平/垂直偏差的计算步骤如下。

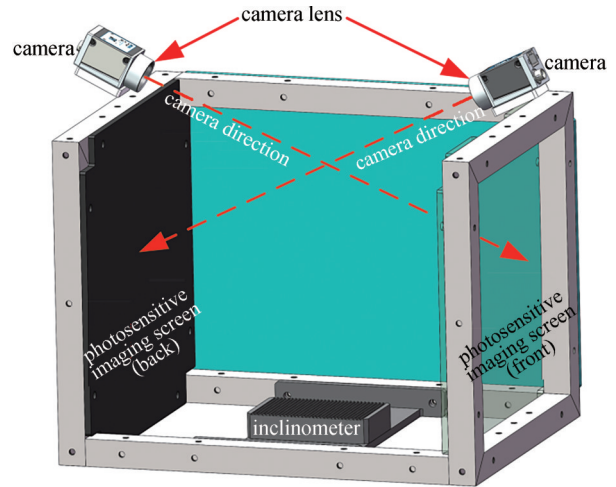


图 3 靶标结构

Fig. 3 Target structure

1) 靶标姿态测量。根据双相机靶标的标定索引和旋转空间矢量方法,对计算  $O_d^n$  所需要的中间变量进行解算,进而获得  $O_d^n$  的空间坐标。

2) 水平/垂直偏差测量。根据坐标  $O_d^n$  到计划线的最短距离计算水平/垂直偏差。

### 2.3 靶标姿态测量

由 2.1 节可知,在双相机靶标解算姿态的过程中,可以完成旋转矩阵  $R_s^n$  和平移矩阵  $T_s^n$  的解算。算

法流程为首先完成对双相机靶标抓取光斑图像的高性能处理(步骤 A)。结合靶标网格标定(步骤 B)和索引 s 系下前后靶面的实时光斑坐标(步骤 C)。利用旋转空间矢量的方法(步骤 D),计算出双相机靶标的姿态角(步骤 E)。通过姿态矩阵的计算方法,解算出坐标系  $s \rightarrow n$  的旋转矩阵  $R_n^s$ (步骤 F),进而完成靶标姿态测量过程。

步骤 A 中前后屏光斑的成像、预处理、质心提取和匹配过程均采用文献[10]中的方法。在步骤 B 中,利用全站仪将前、后屏划分为  $50 \times 50$  的网格阵

列,记录各个网格角点在 n 系下的空间三维坐标,并取前屏中心坐标为坐标系原点,建立 s 系。将 n 系下的空间三维坐标转换为 s 系下的坐标,并记录每个坐标对应的行数( $n_{row}$ )和列数( $n_{col}$ )。同时,利用双相机靶标中两个工业相机拍摄光斑,获取与行、列数对应的质心  $U、V$ 。在标定过程中,光斑质心提取不确定度小于 0.5 pixel,坐标测量不确定度小于 0.1 mm。通过步骤 B 可得到光斑在前后屏的行列数与 s 系下的坐标值和质心的对应关系,网格标定原理如图 4 所示。

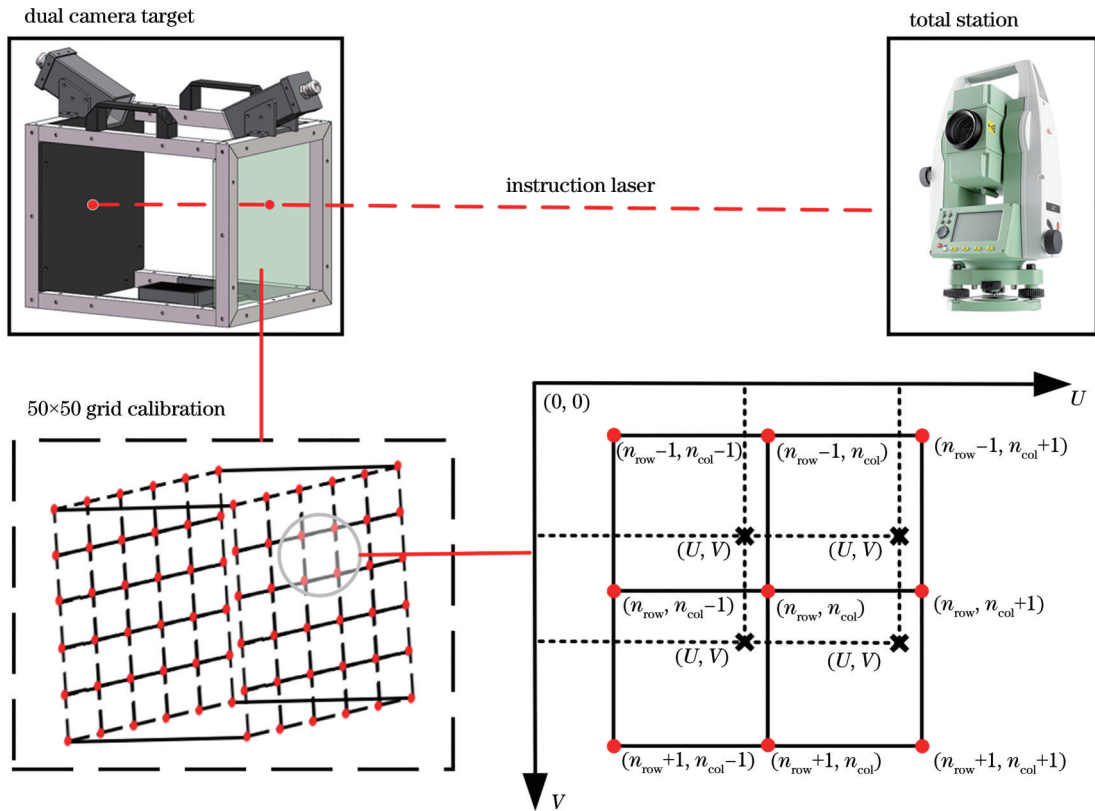


图 4 网格标定原理

Fig. 4 Principle of grid calibration

如图 4 所示,基于步骤 B 的标定结果,利用全站仪射出一束指示激光。步骤 C 通过双相机靶标中两个工业相机实时获取前后屏光斑的质心  $U、V$ ,并通过质心索引该标定网格中 4 个角点的行列数。利用步骤 B 中的对应关系,实时获取前后靶面光斑在 s 系下的三维坐标  $T_f^s$  和  $T_b^s$ 。因此, s 系下入射激光直线的方向矢量  $I_s$  可以表示为

$$I_s = \frac{T_b^s - T_f^s}{|T_b^s - T_f^s|} \quad (3)$$

根据图 2 的模型,计划线的水平角  $\theta_{hz}^n$  和垂直角  $\theta_v^n$  为已知量。参考文献[9]中欧拉角的计算公式,

可求得 n 系下入射激光直线的方向矢量  $I_n$ 。

在步骤 D 中,将 n 系下与 s 系下的方向矢量进行转换,可以表示为

$$I_s = R_n^s \cdot I_n, \quad (4)$$

而  $R_n^s$  可以表示为

$$R_n^s = R_Y^s \cdot R_X^s \cdot R_Z^s. \quad (5)$$

因此,获取  $R_n^s$  需要先计算靶标绕 X、Y、Z 轴旋转的姿态矩阵  $R_X^s、R_Y^s、R_Z^s$ 。利用靶标中的倾角仪可获得靶标实时的俯仰角  $\beta^s$  和滚转角  $\alpha^s$ ,参考文献[9]中姿态矩阵的计算公式,可求得  $R_X^s、R_Y^s$ 。因此,(4)式可表示为

$$I_s = R_Y^s \cdot R_X^s \cdot R_Z^s \cdot I_n \quad (6)$$

根据(6)式可知,解算以  $R_Z^s$  为未知数的方程,可以获得靶标的方位角  $\gamma^s$ 。

基于上述步骤的解算结果,在步骤 C 中通过靶标定索引的方法获得  $T_f^s$ ,在步骤 F 中利用参考文献[9]中姿态矩阵的计算公式获得  $R_s^s$ ,故系统可完成对靶标与全站仪间旋转矩阵  $R_s^n$  和 s 系下靶标前屏实时光斑的坐标  $T_f^s$  的解算。

综上所述,将解算出的三组中间变量  $R_d^s, T_f^s, R_s^n$  代入(2)式,即可完成  $O_d^n$  的解算。

### 2.4 水平/垂直偏差测量

根据设计导向模型,指示激光的水平角  $\theta_{hz}^n$  和垂直角  $\theta_v^n$  为已知量,参考文献[9]中的欧拉角计算公式,可获得 n 系下绕 X 轴旋转的垂直分量  $R_X^n$  和绕 Z 轴旋转的水平分量  $R_Z^n$ 。因此,水平偏差  $S_{hz}^n$  和垂直偏差  $S_v^n$  可以表示为

$$\begin{cases} S_{hz}^n = R_X^n \cdot O_d^n \\ S_v^n = R_Z^n \cdot O_d^n \end{cases} \quad (7)$$

利用(7)式即可实现顶管机机身关键特征点在 n 系下的坐标相对计划线的水平/垂直偏差 ( $S_{hz}^n$  和  $S_v^n$ ) 的测量。

## 3 实验

根据《城市轨道交通工程测量规范》<sup>[11]</sup>,直线顶管机在掘进过程中刀盘几何中心相对计划线的水平/垂直偏差的短时重复性测量精度应小于 10 mm,出洞时刻的绝对位置精度应小于 50 mm。

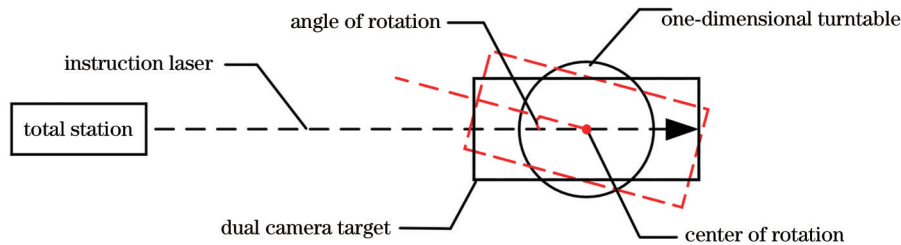


图5 方位角相对精度测量实验原理

Fig. 5 Experimental principle of azimuth relative accuracy measurement

在测试过程中,需保证高精度一维转台稳固,端面与靶标保持稳定的刚体关系,且一维转台与靶标的旋转中心必须重合。全站仪放置在距离靶标约 9 m 的位置处,通过调平旋钮将全站仪与一维转台调整在同一水平面上。同时,利用全站仪将指示激光垂直角设为  $90^\circ$ ,以保证指示激光垂直射入靶面中心。这样操作能排除俯仰角和滚转角对测量结

因此,须设计实验来验证所提导向方法是否满足现场施工要求的测量性能。

### 3.1 技术参数

测量实验中使用到的仪器设备有双相机靶标、全站仪和一维转台,其技术参数如表 1 所示。

表 1 技术参数

Table 1 Technical parameters

Hardware	Technical parameter
Basler camera	Resolution: 1282 pixel $\times$ 1026 pixel; pixel size: 5.3 $\mu$ m $\times$ 5.3 $\mu$ m
Inclinometer	Angle measurement accuracy: $\leq 0.01^\circ$
One dimensional turntable	Accuracy: 2"
Leica TS12	Ranging accuracy (prism free mode): (2+2 $\times 10^{-3}$ ) mm; angle measurement accuracy: 2"; repeatability accuracy: 0.1 mm

在已知目前测量系统中关键硬件的具体技术参数后,设计以下实验以验证该测量方法是否能够满足现场施工的精度需求。

### 3.2 方位角相对精度测量实验

为评定双相机靶标解算方位角的相对测量精度,设计了如下实验。

在实验中,将双相机靶标安装在高精度的一维转台上,并记录一维转台的实际转动角度和靶标算法计算的转动角度,计算二者的差值后可获得双相机靶标的相对精度。方位角相对精度测量实验原理如图 5 所示。

果的影响,从而准确获得双相机靶标方位角的绝对精度。实验中使用的主要硬件有双相机靶标、高精度一维转台和全站仪,方位角相对精度测量实验环境如图 6 所示。方位角绝对精度测试结果如图 7 所示。

通过对实验数据的统计分析可知,所提方法的方位角重复性测量精度优于  $0.03^\circ$ 、绝对测量误差小

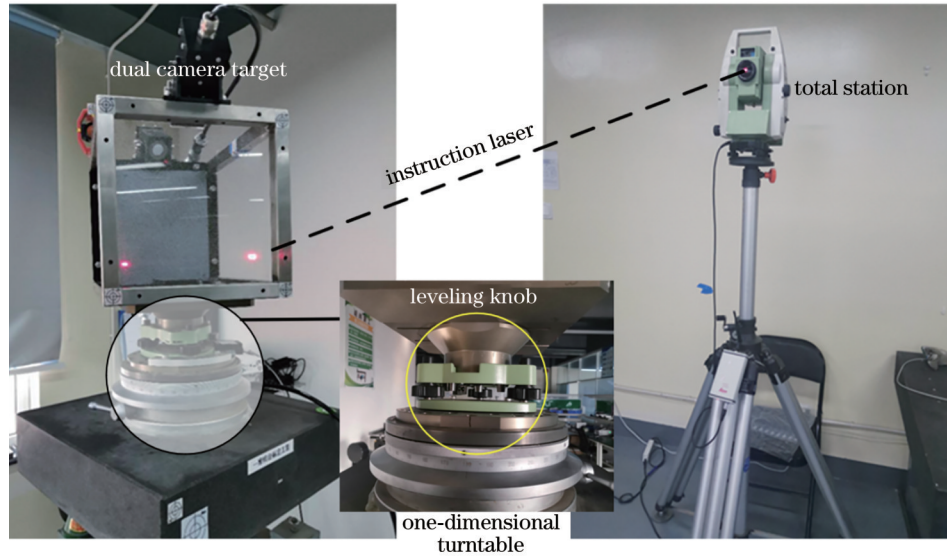


图 6 方位角相对精度测量实验环境

Fig. 6 Experimental environment of azimuth relative accuracy measurement

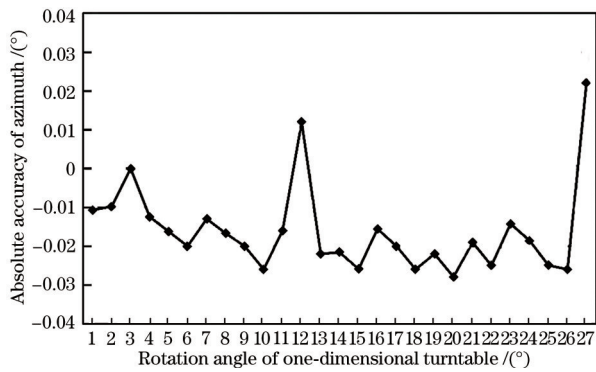


图 7 方位角绝对精度测试结果

Fig. 7 Test results of absolute accuracy of azimuth

于  $0.05^\circ$ , 满足现场施工要求。

### 3.3 水平/垂直偏差测量实验

为评定双相机靶标测量子系统的水平/垂直偏差的测量精度,设计如下实验。

将 LEICA TS12 作为坐标测量比对基准,将测量靶标与测试工装稳定连接,在测试前模拟顶管机始发零位测量,并将此零位数据作为已知量。移动测试工装到测量空间的不同位置,结合双相机靶标的实时测量值,同时对双相机靶标和全站仪测量的棱镜坐标,便完成了对双相机靶标测量子系统水平/垂直偏差测量精度的评定,实验环境如图 8 所示。

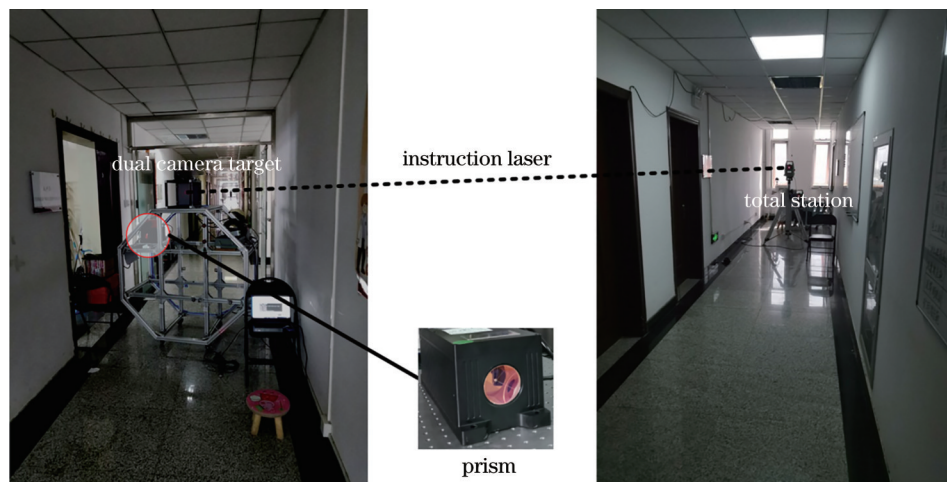


图 8 水平/垂直偏差精度测量实验环境

Fig. 8 Experimental environment of accuracy measurement of horizontal/vertical deviation

水平/垂直偏差相对精度测量实验数据如表 2 所示。其中,  $P_{target}$  代表双相机靶标测量,  $P_{TS}$  代表 LEICA TS12 全站仪测量,  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  分别表示 X、Y、Z 方向上的偏差。Y、Z 方向的偏差  $D_y$ 、 $D_z$ , 即

表 2 水平/垂直偏差相对精度测量实验数据

Table 2 Experimental data of relative accuracy measurement of horizontal/vertical deviation

No.	Method	X /m	Y /m	Z /m	$D_x$ /mm	$D_y$ /mm	$D_z$ /mm
1	P_target	10.6243	2.8351	0.9949	0.1	1.6	0.4
	P_TS	10.6242	2.8335	0.9945			
2	P_target	10.0270	2.6744	0.9162	-2.4	-1.5	0.0
	P_TS	10.0294	2.6759	0.9162			
3	P_target	11.2700	2.9301	1.0097	1.7	2.3	0.2
	P_TS	11.2683	2.9278	1.0095			
4	P_target	11.7301	3.0741	0.9941	-0.3	-0.5	-0.9
	P_TS	11.7304	3.0746	0.9950			
5	P_target	11.1149	2.9796	0.9589	-0.8	-2.5	0.3
	P_TS	11.1157	2.9821	0.9586			
6	P_target	13.4982	3.6008	1.3739	-2.7	2.1	0.8
	P_TS	13.5009	3.5987	1.3731			
7	P_target	14.1867	3.5212	1.3996	1.8	-1.9	2.0
	P_TS	14.1849	3.5231	1.3976			
8	P_target	14.1939	3.5059	1.3762	0.1	0.2	-0.1
	P_TS	14.1938	3.5057	1.3763			

为水平偏差和垂直偏差。

通过对实验数据的分析可知,所提方法的水平/垂直偏差的测量精度优于 3 mm,符合现场使用的精度要求。

### 3.4 现场测试

基于所提方法研发的力信直线顶管导向系统已经成功应用于宁波某地铁隧道区间掘进施工中,现场安装示意图如图 9 所示。



图 9 现场安装示意图

Fig. 9 Schematic diagram of on-site installation

目前该区间已经实现精确贯通,贯通水平误差和垂直误差均小于 10 mm。

## 4 结 论

虽然所提的直线顶管导向方法解决了直线顶管导向系统响应速度慢、成本高的问题,但是相机

标定和图像畸变校正均需要继续优化。所提的基于双相机靶标的直线顶管导向方法能够实时且高效地测量直线顶管掘进机的水平/垂直偏差,能够满足目前顶管施工的精度需求,并且还有操作简便、性价比高等优点。

在今后的工作中,有如下几方面问题需要进一

步研究:1) 进一步增加质心提取的准确性和对杂光的抗干扰能力;2) 相机拍摄图片有轻微畸变,后续将利用畸变校正提高精度。

### 参 考 文 献

- [1] Lu J F, Li J C. The application of pipe jacking method construction technology in the construction of water delivery culvert pipe project of Xikeng Reservoir [J]. Science & Technology Information, 2010, 8 (13): 130.  
卢集富, 黎杰成. 顶管法施工技术在西坑水库输水涵管工程施工中的应用 [J]. 科技资讯, 2010, 8 (13): 130.
- [2] Wang C, Li Y Q, Liu L S. Horizontal angle measurement of automatic navigation system of pipe jacking machine [J]. Optical Technique, 2015, 41 (3): 238  
王彩, 李月强, 刘力双. 顶管机自动导向水平角测量系统研究 [J]. 光学技术, 2015, 41(3): 238
- [3] Zhang X B, Yang Y F. Study on horizontal azimuth angle measuring system based on non-diffracting beam [J]. Optical Instruments, 2014, 36(2): 95  
张新宝, 杨一帆. 基于无衍射光束的水平方位角测量方法研究 [J]. 光学仪器, 2014, 36(2): 95
- [4] Zhai H, Yan M F, Lü Q Z, et al. Laser attitude measurement system of pipe jacking machine based on FPGA photoelectric sensor array [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(7): 50-57.  
翟华, 闫梦飞, 吕庆洲, 等. 组合 FPGA 光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(7): 50-57.
- [5] Yang Y X. The construction management and economic benefits of the shield tunnel through the mine method [J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(2): 139-140.  
杨亿希. 盾构空推过矿山法隧道的施工管理与经济效益 [J]. 工程技术研究, 2020, 5(2): 139-140.
- [6] Mao J, Li S Y. Research of tunnel guide system composed of gyroscope and total-station [J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2007(5): 54-56.  
毛君, 李申岩. 陀螺仪和全站仪组合的导向系统 [J]. 煤矿机电, 2007(5): 54-56.
- [7] Shen X F. Examination methods of shield machine posture deviation in digging process [J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(12): 206-208.  
沈秀锋. 掘进过程中盾构机姿态出现较大偏差的检核方法 [J]. 山西建筑, 2016, 42(12): 206-208.
- [8] Zhao W B. On intelligent shield guidance system [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2017.  
赵文斌. 智能盾构导向系统研究 [D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2017.
- [9] Kong X Y, Guo J M, Liu Z Q. Foundation of geodesy [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2006.  
孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.
- [10] Zhu J G, Yu Z J. Principles and methods of visual measurement [M]. Machinery Industry Press, 2011.  
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [11] Qin C L. Introduction to the revision of "Urban rail transit engineering survey specification" [J]. Standardization of Engineering Construction, 2008(6): 55-57.  
秦长利. 《城市轨道交通工程测量规范》修订简介 [J]. 工程建设标准化, 2008(6): 55-57.