

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902781

组合FPGA光电传感器阵列的 顶管机激光姿态测量系统*

翟华^{1,2} 闫梦飞^{1,2} 吕庆洲³ 丁煦^{1,2} 方华^{1,2} 唐飞⁴

(1. 航空结构件成形制造与装备安徽省重点实验室 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 工业与装备技术研究院 合肥 230009;
3. 淮南联合大学 淮南 232038; 4. 安徽唐兴机械装备有限公司 淮南 232009)

摘要:由于复杂多变的地质环境、推力不均、注浆不均、尾盾间隙不均等影响,顶管机在施工过程中实际顶进的轨迹与预期轨迹之间往往存在偏差,较大偏差会导致施工事故或严重的经济损失。采用坐标转换方法,设计了基于组合光电传感器阵列和PLC相结合的姿态测量系统,开发了相关实时显示的操作界面,用于实时显示测量的顶管机3个方向姿态角。并应用投影的方法,计算顶管机实时显示运行轨迹,辅助顶管机姿态控制。实验中进行人为模拟顶管机机头的运动偏差情况来验证该测量系统的准确性,实验表明,该激光测量系统点光源的坐标识别精度达3 mm,角度测量精度达0.1°,最大误差0.784°,符合顶管机施工要求,方便了顶管机姿态测量,提高了顶管施工质量和效率。

关键词: 顶管机;光电传感器阵列;激光;姿态测量

中图分类号: TH6;TN2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460

Laser attitude measurement system of pipe jacking machine based on fpga photoelectric sensor array

Zhai Hua^{1,2} Yan Mengfei^{1,2} Lv Qingzhou³ Ding Xu^{1,2} Fang Hua^{1,2} Tang Fei⁴

(1. Anhui Province Key Lab of Aerospace Structural Parts Forming Technology and Equipment, Hefei 230009, China;

2. Industry and Equipment Technology Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Huainan

Union University, Huainan 232038, China; 4. Anhui Tangxing Machinery & Equipment Co. Ltd., Huainan 232009, China)

Abstract: Due to the complex and changeable geological environment, uneven thrust, uneven grouting and uneven shield clearance, etc., There is often a deviation between the actual jacking trajectory of the pipe jacking machine and the expected trajectory during the construction process, and large deviations may cause construction accidents or serious economic losses. Aiming at the above problems, an attitude measurement system based on the combination of a photoelectric sensor array and a PLC is designed in the method of coordinate conversion. A related real-time display interface is developed, which is used for real-time display of the three angle attitudes of the pipe jacking machine. And the projection method is used to calculate the real-time display of the trajectory of the pipe jacking machine to assist the attitude control of the pipe jacking machine. In the experiment, artificially simulate the movement deviation of the pipe jacking machine head to verify the accuracy of the measurement system. Experiments show that the coordinate recognition accuracy of the point source of the laser measurement system is up to 3 mm, the angle measurement accuracy is 0.1 degree, and the maximum error is about 0.784 degrees, which meets the requirements of pipe jacking construction, facilitates the attitude measurement of pipe jacking, and improves the quality and efficiency of pipe jacking construction.

Keywords: pipe jacking machine; photoelectric sensor array; laser, attitude measurement

0 引言

非开挖顶管技术因具有使用土质广,施工精度高以及能够穿越公路、建筑物、江河等障碍物优点^[1-2],在现代城市化建设中广泛应用;地下污水管道以及雨水管道的铺设,长距离的自来水管道路以及天然气管道等民生工程都可以使用非开挖顶管技术完成的。

目前存在的顶管以及盾构姿态测量系统比较成熟。主要有 TMG-32B 陀螺仪姿态测量系统^[3]、ROBOTEC 自动测量系统^[4]、ZED26lu 姿态测量系统以及 SLS-T APD 姿态测量系统^[5-6]等产品,主要分为激光标靶法和陀螺仪法^[7-8]两大类。激光标靶法采用激光靶,将处于机头处激光靶上激光点位置视频信号接入控制台。操作人员凭借摄像头传出的激光靶上光斑的位置信息来判断顶管机的掘进状态,手动调整顶管机姿态,自动化程度比较低,施工效率和质量受到严重限制。陀螺仪法主要针对复杂曲线顶管,使用陀螺仪逐点计算测量,操作计算复杂且陀螺仪造价较高,容易受到地磁干扰,多用于大型复杂盾构施工。

综上所述,目前常用顶管机主要存在智能化低,造价高昂等问题^[9-11]。由于地下土质变化以及已拼管节轴线不准等因素,要使顶管完全按设计的方向推进比较困难,往往推进轨迹犹如蛇形,容易产生姿态偏差^[12]。如果不能及时掌握将会导致地表沉降、管体下沉和管节变形破裂等施工失败现象,造成严重经济损失。为保证顶管掘进精度和施工质量,必须对顶管机实时姿态测量^[13-15]。本文提出以组合 FPGA 光电传感器阵列测量为基础,通过可编程序控制器(PLC)进行数据处理、显示姿态测量结果,可以实时测量显示顶管机的姿态角、空间坐标和运动轨迹等参数;能够满足顶管机姿态测量要求且造价较低,为智能顶管机自动纠偏装置研发提供基础。

1 顶管机激光姿态测量系统

1.1 系统构成

本系统主要以激光标靶法为原理,实现在线测量姿态,实时显示姿态角、空间坐标以及轨迹路径等功能。系统结构框图如图 1 所示。

硬件电路以组合 FPGA 光电传感器阵列为核心,搭载激光发生器、激光测距仪^[16-17]、PLC、RS232 通信模块、显示组件等器件,构成地下空间顶管机激光姿态测量系统。组合 FPGA 光电传感器阵列由两块光敏电阻阵列板组合而成,光敏电阻阵列中两电阻之间间距 3 mm,主要安装于顶管机机头处,接收来自顶管机出发井激光器点光源信号,光敏电阻感应可以形成阵列上点位坐标,反映

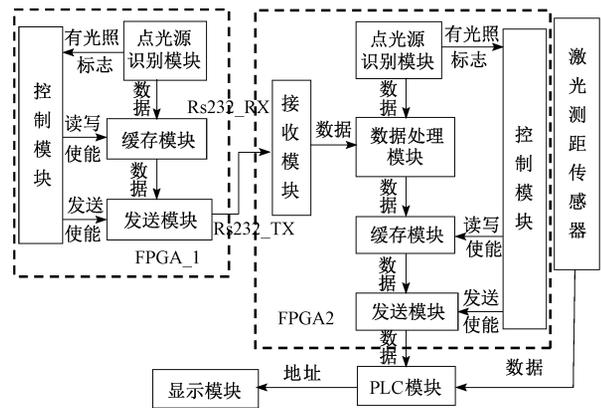


图 1 系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of system structure

出偏摆和俯仰偏差,结合激光测距仪得到的行进距离,根据空间坐标变换关系实时计算顶管机的姿态情况,由 PLC 计算并显示姿态角、空间坐标以及空间轨迹。

1.2 基于 FPGA 高速光电传感阵列点阵数据采集模块

数据采集电路采用模块化设计,分为点光源识别模块、PLL 锁相环时钟管理模块、A/D 转换模块、SDRAM 数据缓存模块和串口发送接收模块。点光源识别模块是采用对特定波长的光源才有响应的光敏电阻,组成的光电传感器阵列。点光源识别模块的数据采集卡选用 AC6651 接口板卡。其中一路电路如图 2 所示。

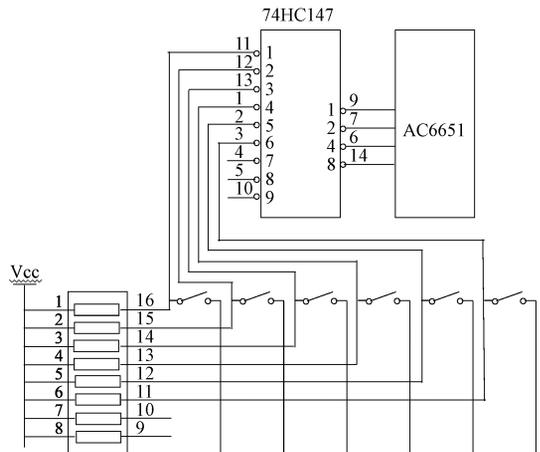


图 2 数据采集卡其中一路电路原理

Fig. 2 One circuit schematic diagram of data acquisition card

为减少平面光电传感器阵列到数据采集卡数据通道的路数,采用编码器将传感器阵列输出的多路电压信号进行编码^[18]。由于传感器(即光敏电阻)点数较多,但传感器信号只能单个独立产生,而数据采集卡的 I/O 通道数有限,所以在光电信号送入后续接口板卡输入通道之前采用编码技术,将多路光电信号进行编码,处理器采集信号后再进行解码处理。对于 $6 \times 6 = 36$ 的平面光电传感

器阵列,信号编码采用 4 片 10 线-4 线优先编码器 74HC147,将 36 路光电传感器输出电平信号进行编码减少为 16 路信号;图 2 只包含 1 片接口电路,其余 3 片电路连接类似,其输出编码信号经过通用 I/O 接口卡 AC6651 后输入处理器。

1.3 基于 FPGA 高速光电传感阵列点阵采集计算模块

FPGA 软件程序按照层次化设计思想,建立工程项目,在项目的顶层设计文件中,对内部各功能模块的连接关系和对外接口进行例化描述,然后分别对各个功能模块进行细化设计。其 RTL 视图如图 3 所示。

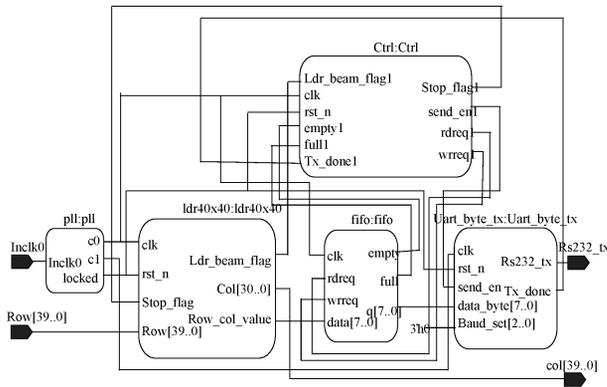


图 3 点光源识别 RTL 视图

Fig. 3 Point light identifies the RTL view

如图 4 所示,点光源识别模块采用状态机的方式实现。首先将平面光电传感器阵列进行编码,增加无光照状态和有光照状态的编码;光敏电阻阵列无光照状态下,预先将列编码的控制线全部输出置 0,等待行编码状态控制线的输入状态;当行编码状态控制线输入状态不全为 1,开始执行扫描,在列编码扫描控制线循环状态下,执行行编码状态控制线逐行扫描。同时,在列编码扫描控制线循环状态下,对于非当前行编码扫描控制线输出全部置 1。

当扫描有光敏电阻被照射到,就进入有光照状态,同时在列编码扫描控制线循环状态下,继续执行下一行扫描,在有光照时,记录此时行、列的编码值以及有光照标志。对于不同行、列的编码值组合输出相应的光敏电阻坐标译码值,在一轮扫描完毕后,将所有记录的光敏电阻坐标译码值求平均值,并输出。

1.4 PLC 计算模块

PLC 程序主要功能是接收传感器阵列识别的点光源的坐标,计算出顶管机的姿态角,结合接收到激光测距仪测得的距离信息,根据空间坐标变关系解算出顶管机的空间姿态,并实时显示出其姿态情况和轨迹,如图 5 所示。

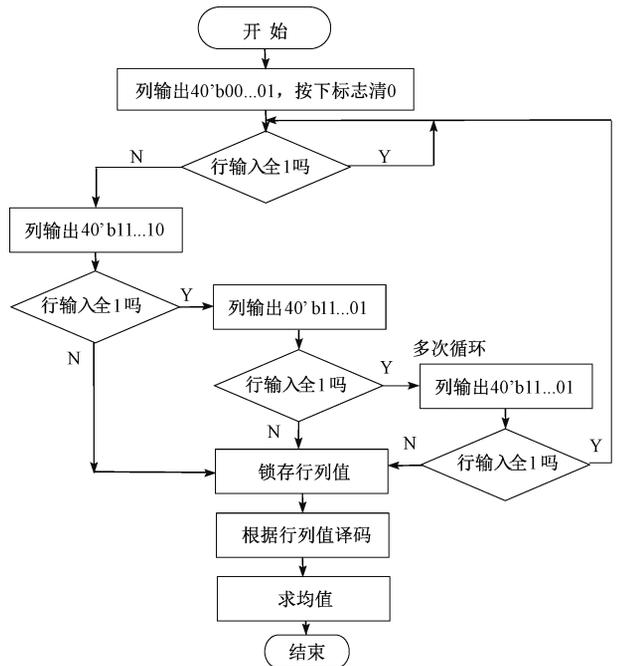


图 4 点光源识别流程

Fig. 4 Point light source identification flow chart

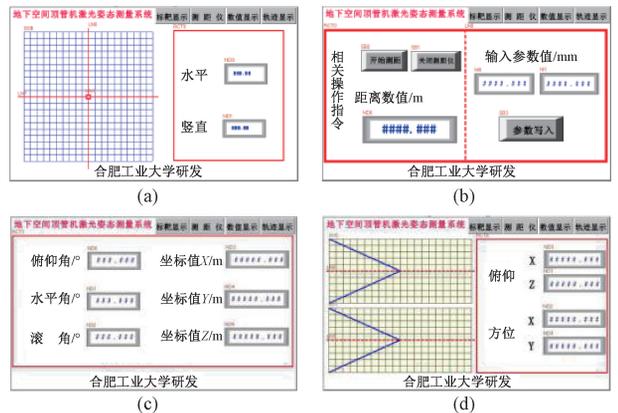


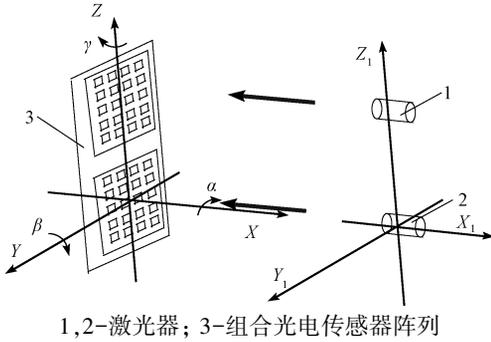
图 5 显示模块相关界面

Fig. 5 Display module related interface

2 组合 FPGA 光电传感阵列坐标转换

在顶管机的姿态测量中需要用到两个坐标系,一个是隧道三维坐标系 $X_1Y_1Z_1$,另外一个为传感器阵列电子标靶局部坐标系 XYZ 。顶管机姿态可用 3 个姿态角(水平角 γ 、俯仰角 β 和横滚角 α)来表示。如图 6 所示,姿态测量装置包括安装在顶管机出发工作井内的两个激光器,以竖直方式安装在顶管机机头与机尾之间并与激光器正对的两块组合平面光电传感器阵列板。传感器阵列下板中心与顶管机机头轴线重合,传感器阵列上板与传

传感器阵列下板平行安装,初始时两个激光器分别以上一上一下正对着组合传感器阵列板的中心。



1,2-激光器; 3-组合光电传感器阵列

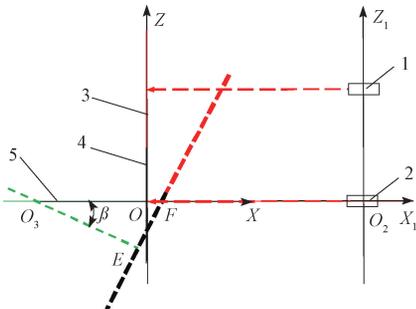
图6 各装置安装模型图

Fig. 6 Installation model diagram of each device

传感器阵列板随机头摆动,两个激光器光束分别水平照射到两块传感器阵列上,根据阵列上获得的两个相应光电传感器位置坐标值,结合几何关系可以计算出顶管机姿态。

2.1 俯仰角测量的坐标转换

如图7所示,当传感器阵列随机头进行上下摆动一定幅度时,顶管机轴线摆动前后夹角即为顶管机俯仰角β。



1,2-激光器; 3-光敏电阻阵列上板;

4-光敏电阻阵列下板; 5-顶管机轴线

图7 俯仰角测量的坐标转换示意图

Fig. 7 Coordinate transformation geometry diagram of elevation angle measurement

图7中EF长度,即光斑Z轴方向上坐标值相对于初始时光斑在Z轴方向上坐标差值。则俯仰角β有以下两种方法计算。

1) 在直角三角形△EFO₃中,有:

$$\tan(\beta) = \frac{EF}{EO_3} \Rightarrow \beta = \arctan\left(\frac{EF}{EO_3}\right) \quad (1)$$

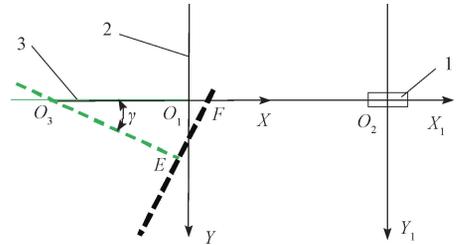
2) 在扇形O₃O₁E中,有:

$$EO_1 = \beta \cdot EO_3 \Rightarrow \beta \frac{EO_1}{EO_3} \approx \frac{EF}{EO_3} \quad (2)$$

本文选用第1种方法进行坐标转换,其中EO₃根据顶管机轴线长度确定。

2.2 水平角测量的坐标转换

如图8所示,当组合平面光电传感器阵列随机头进行左右摆动一定幅度时,此时的顶管机轴线摆动前后的夹角即为顶管机的水平角γ。



1-激光器; 2-光敏电阻阵列下板; 3-顶管机轴线

图8 水平角测量的坐标转换示意图

Fig. 8 Coordinate transformation geometric diagram of horizontal angle measurement

图8中EF长度,即光斑Y轴方向上坐标值相对于初始时光斑在Y轴方向上坐标差值。则顶管机水平角γ计算方法有以下两种方法。

1) 在直角三角形△EFO₃中,有:

$$\tan(\gamma) = \frac{EF}{EO_3} \Rightarrow \gamma = \arctan\left(\frac{EF}{EO_3}\right) \quad (3)$$

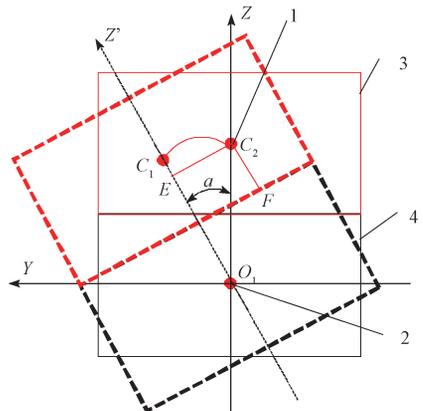
2) 在扇形O₃O₁E中,有:

$$EO_1 = \gamma \cdot EO_3 \Rightarrow \gamma \frac{EO_1}{EO_3} \approx \frac{EF}{EO_3} \quad (4)$$

本文选用第1种方法由式(3)计算角γ,其中EO₃根据顶管机轴线长度确定。

2.3 横滚角测量的坐标转换

如图9所示,当传感器阵列随顶管机掘进头顺时针或逆时针滚动时,标靶局部坐标系XYZ中Z轴滚动前后夹角为横滚角α。



1,2-激光器; 3-光敏电阻阵列上板; 4-光敏电阻阵列下板

图9 横滚角测量的坐标转换示意图

Fig. 9 Coordinate transformation geometric diagram of rolling angle measurement

图 9 中 EC_2 即光斑 Y 轴方向上的坐标值相对于初始 Y 轴方向的坐标差值; C_1O_1 和 C_2O_1 的长度, 即初始时两个激光器在 Z 轴方向距离。则横滚角 α 计算方法有以下两种方法。

1) 在直角三角形 $\triangle EO_1C_2$ 中, 有:

$$\tan(\alpha) = \frac{EC_2}{C_2O_1} \Rightarrow \alpha = \arctan\left(\frac{EC_2}{C_2O_1}\right) \quad (5)$$

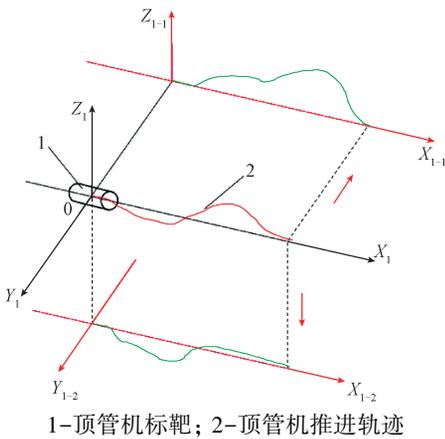
2) 在扇形 $C_1O_1C_2$ 中, 有:

$$C_1C_2 = \alpha \cdot C_2O_1 \Rightarrow \alpha \approx \frac{C_1C_2}{C_2O_1} \approx \frac{EC_2}{C_2O_1} \quad (6)$$

本文选用第 1 种方法由式(5)进行计算。

2.4 轨迹的计算方法

如图 10 所示, 通过坐标转换计算顶管机在隧道坐标系上俯仰角、水平角和横滚角; 结合激光测距仪得到距离值, 计算顶管机在隧道坐标系中各时刻坐标点, 连接成其在隧道坐标系中的空间轨迹曲线。为方便显示其轨迹曲线, 采用投影法^[19-20]将空间轨迹曲线投影到侧面 ($X_{1-1}O_{1-1}Z_{1-1}$ 平面) 和低平面 ($X_{1-2}O_{1-2}Y_{1-2}$ 平面), 可以在二维平面上分别表示。



1-顶管机标靶; 2-顶管机推进轨迹

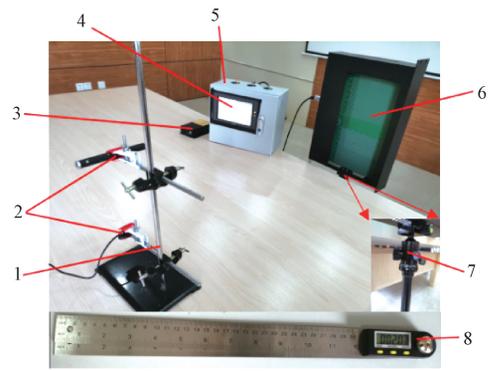
图 10 顶管机推进轨迹投影

Fig. 10 Schematic diagram of push track projection of pipe jacking machine

3 实验与分析

如图 11 所示, 为验证组合 FPGA 光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统精确性, 根据顶管机工作情况, 使用万向三脚支架模拟顶管机运转过程中的姿态偏离情况, 并搭建测量系统, 进行组合 FPGA 光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统实验。

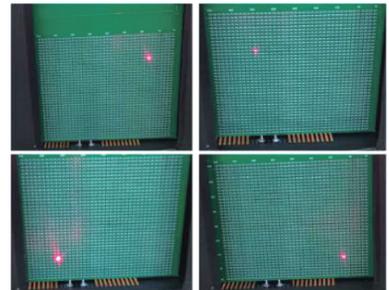
如图 12 所示, 实验首先针对组合 FPGA 光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统中光电传感器阵列对点光源识别的准确性进行了验证, 分别对以中心为原点四象限验证。



1-支架; 2-激光器; 3-测距仪; 4-PLC 工控盒; 5-操作面板; 6-光电传感器阵列; 7-万向三脚支架; 8-数显量角器

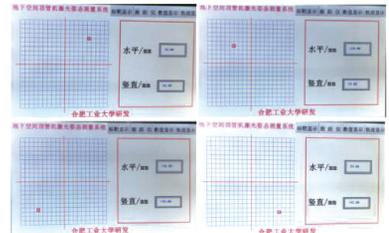
图 11 测量系统实验装置

Fig. 11 Measuring system experimental device



(a) 点光源实际位置

(a) Actual position of point light source



(b) 测量结果

(b) Measurement results

图 12 光电传感器阵列识别点光源实验结果

Fig. 12 Experimental results of identifying point light source by photoelectric sensor array

从图 12 可以看出, 测量系统中光电传感器阵列能够准确识别点光源位置, 满足设计要求。当调整万向三脚支架, 光电传感器阵列偏转一定角度, 分别使用数显量角器测出光电传感器阵列转动的固定姿态角度 (包括俯仰角, 水平角和横滚角), 该实验中光电传感器阵列各个姿态角转动从 $0^\circ \sim 10^\circ$ 做了 5 组实验, 各组间隔 2° , 同时将显示屏上各姿态角度与采用数显量角器测得的各姿态角度进行比较, 实验数据结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 不同姿态角的实际角度值与测量值相符合, 测量值与理论值最大误差 0.784° , 主要原因是光电传感器阵列中各光敏电阻尺寸, 以及各光敏电阻间距影

响导致。安装结构误差以及光斑大小也会对测量结果造成影响。测量误差符合顶管机测量要求,验证了测量系统实用性。

表 1 顶管机姿态角测量实验数据

Table 1 Experimental data of attitude angle measurement of pipe jacking machine (°)

姿态角		角 度					
俯仰角	理论值	0	2	4	6	8	10
	测量值	0	1.849	3.583	5.216	8.213	9.594
水平角	理论值	0	2	4	6	8	10
	测量值	0	2.020	4.034	6.039	7.533	9.509
横滚角	理论值	0	2	4	6	8	10
	测量值	0	1.614	4.038	5.658	8.097	10.550

如图 13 所示,采用预先设计运动轨迹比对方法验证轨迹计算精度,光电传感器阵列沿设计轨迹运动,对比显示屏上测得轨迹和设计轨迹。实验结果表明,该系统能够实时显示其运动轨迹。但是实验中发现,随着距离逐渐增加,激光器光斑会变大,直径 3 mm 以内光斑大小对测量精度没有影响,当超过 3 mm 的光斑将产生较大测量误差。

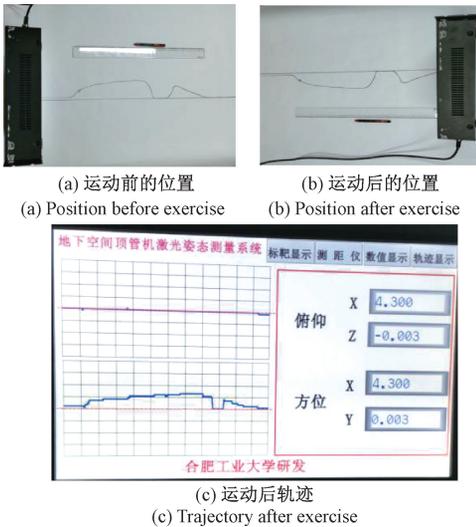


图 13 任意曲线轨迹实验结果

Fig. 13 Experimental results of arbitrary curve trajectories

4 结 论

在顶管机施工过程中,需要保证顶管机能够沿着预定的轴线进行推进,因此对其姿态进行实时测量,获取其推进过程中的空间位置是必要的,包括顶进距离、角度偏差(俯仰角、水平角、滚角)、距离偏差(水平偏差、竖直偏差)等。设计了以 FPGA 和 PLC 控制器为核心,以激光测距仪和激光发生器为辅助单元的地下空间顶管机激光

姿态测量系统,可以实时采集识别的点光源坐标信息、计算顶管机姿态角、显示顶管机空间位置坐标、显示顶管机运动轨迹等功能。实验结果表明,该组合 FPGA 光电传感器阵列的顶管机激光姿态测量系统的测量结果有效,能完成顶管机轴线自动测量施工,可辅助提高顶管施工质量和效率。但仍然存在不足之处,实验结果与理论上有一定的误差,强烈的太阳光对光电传感器有一定程度的影响;未来改进可以选用感光波长范围更大且集成度高的光电传感器,长距离聚焦激光器有助于提高测量精度和避免太阳光的干扰。

参考文献

[1] CHENG M, LU Y. Developing a risk assessment method for complex pipe jacking construction projects [J]. Automation in Construction, 2015, 58:48-59.

[2] BARTLETT W, KER-LINDSAY J, ALEXANDER K, et al. The UAE as an emerging actor in the western balkans: The case of strategic investment in serbia [J]. Journal of Arabian Studies, 2017, 7(1):94-112.

[3] SOLFRIZZI V, SCAFATO E, FRISARDI V, et al. Frailty syndrome and the risk of vascular dementia: The Italian longitudinal study on aging [J]. Alzheimer's & Dementia: The Journal of the Alzheimer's Association, 2013, 9(2):113-122.

[4] 王国才, 马达君, 杨阳, 等. 软土地层中地铁盾构施工引起地表沉降的三维有限元分析 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(S1):273-277.

WANG G C, MA D J, YANG Y, et al. Three-dimensional finite element analysis of ground settlement caused by subway shield construction in soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S1): 273-277.

[5] ZUO X, YAN G. Evolutionary game analysis of the problem in occupational-disease appraisal [J]. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2012, 154:1616-1621.

[6] 张佳兴. 长株潭城际铁路开滨区间盾构施工技术(八)盾构机到达施工(下) [J]. 工程机械与维修, 2016(5):94-97.

ZHANG J X. Shield construction technology for kaibin section of chang-zhu-tan intercity railway (8) arrival construction of shield machine (2) [J]. Construction Machinery and Maintenance, 2016 (5): 94-97.

[7] 孙伟, 文剑, 张远, 等. MEMS 陀螺仪随机误差的辨识与降噪方法研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1):15-20.

SUN W, WEN J, ZHANG Y, et al. Study on identification and noise reduction method of random errors of MEMS gyroscope [J]. Journal of Electronic Measurement and

- Instrumentation, 2017, 31 (1): 15-20.
- [8] 李征, 房宏才, 柯熙政, 等. 滑动平均法在 MEMS 陀螺信号趋势项提取中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 43-49.
- LI ZH, FANG H C, KE X ZH, et al. Application of moving average method to extract trend term of MEMS gyro signal [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33 (7): 43-49.
- [9] 王志强. 市政道路污水管顶管施工技术[J]. 山西建筑, 2015, 41(6): 120-121.
- WANG ZH Q. Pipe jacking technology for municipal sewage pipes [J]. Shanxi Architecture, 2015, 41 (6): 120-121.
- [10] YEN J, SHOU K. Numerical simulation for the estimation the jacking force of pipe jacking [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 218-229.
- [11] 荣亮, 杨红军. 郑州市下穿中州大道超大断面矩形隧道顶管姿态控制技术[J]. 隧道建设, 2015, 35(10): 1097-1102.
- RONG L, YANG H J. Attitude control technology of Zhengzhou city underneath the Zhongzhou avenue super-large section rectangular tunnel jacking attitude [J]. Tunnel Construction, 2015, 35 (10): 1097-1102.
- [12] WANG J F, WANG K, ZHANG T, et al. Key aspects of a DN4000 steel pipe jacking project in China: A case study of a water pipeline in the Shanghai Huangpu River[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 72: 323-332.
- [13] SHOU K J. A study of jacking force for a curved pipe jacking[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(4): 298-304.
- [14] 白兰, 曾风山. 长距离顶管工程施工测量控制技术[J]. 测绘与空间地理信息, 2011, 34(3): 237-238, 241.
- BAI L, ZENG F SH. Measurement and control technology for construction of long-distance pipe jacking project [J]. Surveying, Mapping and Spatial Geographic Information, 2011, 34 (3): 237-238, 241.
- [15] ZHANG D, LIU B, QIN Y. Construction of a large-section long pedestrian underpass using pipe jacking in muddy silty clay: A case study[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2016, 60: 151-164.
- [16] CAVEDO F, NORGIA M, PESATORI A, et al. Steel pipe measurement system based on laser rangefinder[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(6): 1-6.
- [17] 董祉序, 孙兴伟, 刘伟军, 等. 基于激光位移传感器的自由曲面精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(12): 30-38.
- DONG Y X, SUN X W, LIU W J, et al. Precise measurement method of free-form surface based on laser displacement sensor [J]. Journal of Instrumentation, 2018, 39 (12): 30-38.
- [18] 蒋爱国, 符培伦, 谷明, 等. 基于多模态堆叠自动编码器的感应电机故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 17-23.
- JIANG AI G, FU P L, GU M, et al. Fault diagnosis of induction motors based on multi-mode stacked autoencoders[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2018, 32 (8): 17-23.
- [19] 徐小力, 蒋章雷, 吴国新, 等. 基于拓扑特征和投影法的东巴象形文识别方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(1): 150-154.
- XU X L, JIANG ZH L, WU G X, et al. Research on Dongba pictograph recognition method based on topological features and projection method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2017, 31 (1): 150-154.
- [20] 刘今越, 刘佳斌, 贾晓辉, 等. 基于面结构光投影法的刀具几何参数测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1276-1284.
- LIU J Y, LIU J B, JIA X H, et al. Study on measurement of tool geometric parameters based on surface structured light projection [J]. Journal of Instrumentation, 2017, 38 (5): 1276-1284

作者简介



Zhai Hua (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Hefei University of Technology in 1995, 1998 and 2003, respectively. Now he is a professor at Hefei University of Technology. His main research interests include research on straightening technology and its equipment.



翟华, (通信作者), 分别在 1995 年、1998 年和 2003 年于合肥工业大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为合肥工业大学教授, 主要研究方向为精密校直工艺研究及装备研发。

E-mail: jxzhaihuajx@hfut.edu.cn

闫梦飞, 2017 年于安徽工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为数控技术及数控装备。

E-mail: y13625645986@163.com

Yan Mengfei received his B. Sc. degree from Anhui University of Technology in 2017.

Now he is a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include CNC technology and CNC

equipment.



丁煦,分别在2008年、2015年于合肥工业大学获得学士学位和博士学位,现为合肥工业大学讲师,主要研究方向为无线通信、无线传感器网络。

E-mail: Dixon. ding@ aliyun

Ding Xu received his B. Sc. and Ph. D. degrees both from Hefei University of Technology in 2008 and 2015, respectively. He is now a lecturer at Hefei University of Technology. His main research interests include wireless communications and wireless sensor networks.