

基于角度传感器的机械式盾尾间隙测量装置的研制与应用^{*}

王 伟¹ 杨 光^{2,3} 刘家俊^{2,3} 王俊杰^{2,3} 王利明^{2,3}

(1. 国网新源有限公司抽水蓄能技术经济研究院, 100032, 北京;

2. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 450001, 郑州; 3. 中铁隧道局集团有限公司, 511458, 广州)

摘 要 [目的] 针对在盾构或隧道掘进机掘进过程中, 盾尾间隙时刻处于变化之中, 为保证施工安全, 必须对盾尾间隙进行实时测量。针对非接触式盾尾间隙测量装置环境适应性差、精度低、造价高等不足, 开展了接触式即机械式盾尾间隙测量装置的研制与开发。[方法] 采用磁敏角度传感器进行角度测量, 再经数学计算将角度值转换成距离值, 得到对应的盾尾间隙值, 实现了盾尾间隙实时测量。[结果及结论] 该装置在工程现场进行了试验与应用, 达到了较好的应用效果: 机械式盾尾间隙测量装置可实现对盾尾间隙的连续实时测量, 测量数据可以本地存储和远程读取, 故测量效率高; 机械式测量不需要经过复杂的数据处理, 测量精度相对较高, 可以控制在 1 mm 以内; 机械式盾尾间隙测量装置成本低, 约为非接触式测量装置造价的 1/5, 有利于成本控制。

关键词 盾构隧道; 盾尾间隙; 机械式测量; 角度传感器; 实时测量

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.048

Development and Application of Mechanical Shield Tail Clearance Measurement Device Based on Angle Sensor

WANG Wei¹, YANG Guang^{2,3}, LIU Jiajun^{2,3}, WANG Junjie^{2,3}, WANG Liming^{2,3}

(1. Pumped-storage Technological & Economic Research Institute, State Grid Xinyuan Group Co., Ltd., 100032, Beijing, China; 2. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, 450001, Zhengzhou, China; 3. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., 511458, Guangzhou, China)

Abstract [Objective] In view of the constant changes of shield tail clearance during shield or tunnel boring machine excavation process, to ensure construction safety, it is necessary to measure shield tail clearance in real-time. Addressing the shortcomings of non-contact shield tail clearance measurement devices, such as poor environmental adaptability, low accuracy,

and high cost, the development and implementation of a contact-type, as in mechanical shield tail clearance measurement device is carried out. [Method] Angle measurement is conducted using a magneto-sensitive angle sensor, and mathematical calculations are then applied to convert the angle values into distance values and obtain corresponding shield tail clearance values, thereby achieving real-time measurement of the shield tail clearance. [Result & Conclusion] This device undergoes testing and application in engineering sites, demonstrating satisfactory performance. The mechanical shield tail clearance measurement device enables continuous real-time measurement of the shield tail clearance, with measurement data storable locally and accessible remotely, providing high measurement efficiency. Mechanical measurement does not require complex data processing, resulting in relatively high measurement accuracy, controllable within one millimeter. The cost of this device is low, approximately one-fifth of the non-contact measurement device cost, contributing to cost control efforts.

Key words shield tunnel; shield tail clearance; mechanical measurement; angle sensor; real-time measurement

0 引言

在盾构/TBM(隧道掘进机)掘进过程中, 盾尾间隙时刻处于变化之中。当盾尾间隙超出允许范围时, 将会造成护盾与管片产生摩擦, 可能会导致管片破裂、增大推进阻力、降低掘进速度, 甚至破坏盾尾密封系统^[1], 严重时, 还会造成管片错台、隧道渗漏、地面坍塌等^[2]。因此, 有必要对盾尾间隙进行实时测量, 再结合推进油缸行程差、掘进姿态等数据, 进行合理的管片选型和姿态调整, 以保证盾构/TBM 施工的顺利进行。

目前, 常用的盾尾间隙测量方法主要有人工测

^{*} 国网新源集团有限公司科技项目(SGXYKJ-2022-050)

量、非接触式测量和接触式测量。人工测量的测点不能保持固定,数据的连续性差,且因测量人员的主观差异,其测量精度相对较低^[3]。对于非接触式测量方法,国内外已有较多相关研究,如文献[4]采用激光测距技术开发了 SRGD 新型盾尾间隙测量装置,利用三角几何关系推算盾尾间隙值;文献[5]提出了基于空间结构的视觉测量方法,利用激光线标记并运用数字图像处理技术获得盾尾间隙值;文献[6-7]分别采用超声波技术和 Labview 平台开发了两种盾尾间隙测量系统;文献[8]通过拍摄激光标定点,结合卷积神经网络和数字图像处理技术获取盾尾间隙值;文献[9-10]采用双道激光识别技术,将双道激光作为预制标尺,提升了盾尾间隙测量精度。从上述研究成果来看,非接触式法的测量精度误差大致在 2~6 mm,虽然能够满足施工需要,但是并不能满足今后盾构/TBM 智能化发展的需要。同时从应用效果的反馈来看,非接触式法测量装置对复杂环境的适应性较差,故障率较高,维护成本也较高。此外,非接触式测量方法的硬件造价相对较高,对工程建设的成本控制较为不利。

对接触式测量方法的研究虽然起步较早,但是研究成果较少,因此,很有必要开发一款接触式即机械式盾尾间隙实时测量装置,为掘进施工提供参数依据^[11]。

1 机械式盾尾间隙实时测量装置设计概述

1.1 装置概述

基于接触式测量方法,研发了一种机械式盾尾间隙测量装置。测量过程主要通过磁敏角度传感器实现角度测量,再经数学计算得到对应的盾尾间隙值。这种机械式的测量方法具有精度高、环境适应性强、成本低等优点。在实际应用过程中,还可根据需要采用多组测量装置对不同点位的间隙值进行测量。装置配套的采集系统,其上位机通过 RS485 通信协议采集装置测得的角度值,经计算机处理后得到对应的盾尾间隙值,并在界面上实时显示出来;还可在数据库保存历史数据和配置参数。

1.2 装置原理

本测量装置可实现自动实时测量,上位机在采集到测量数据后,依据式(1)计算出对应的盾尾间隙值,其计算原理如图 1 所示。

$$H = L \sin \alpha \quad (1)$$

式中:

H ——盾尾间隙值;

L ——自由旋转杆长度;

α ——底座与自由杆间的夹角。

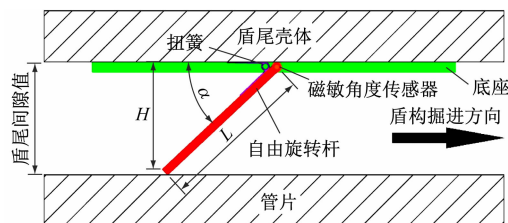


图 1 盾尾间隙计算原理示意图

Fig. 1 Photo of diagram of shield tail clearance calculation principle

2 硬件设计

2.1 传感器型号选择

传感器的选择需考虑对振动、高温、高湿、污染等复杂环境的适应性,现采用基于霍尔效应原理的磁敏角度传感器。其主要优势表现在:①体积小,可以满足小空间的测量需要;②测量的动态范围大,便于对初始值进行标定;③不易损坏,使用寿命长等。

经市场及技术比选,选择了台州量子科技有限公司生产的 GTDAS1135 型磁敏角度传感器(见图 2)。其主要技术参数如表 1 所示。



图 2 磁敏角度传感器实物图

Fig. 2 Photo of magneto-sensitive angle sensor

表 1 磁敏角度传感器技术参数

Tab. 1 Technical parameters of magneto-sensitive angle sensor

参数	取值或说明	参数	取值或说明
机械行程/(°)	0~360 (无停止位)	精度/%	±0.3
工作电压/V	常规直流 5×(1±10%)	工作电流/mA	<13.5
分辨率/(°)	0.088	防护等级	IP67
刷新频率/ (ms/次)	0.6 或 0.2(高速)	机械总寿命/ 万转	>5 000
工作温度/℃	-30~80	通信方式	RS485 串行通信

2.2 测量装置研制

测量装置可固定在盾尾内壁上,通过有线方式与上位机进行数据传输和处理。其主体结构包括角度传感器、底座、旋转杆、扭簧等结构,结构设计如图 3 所示,实物如图 4 所示。

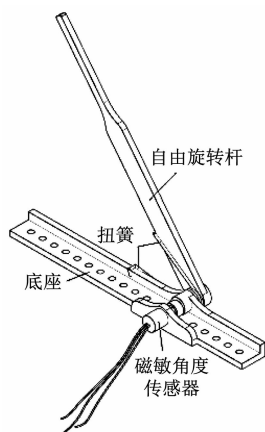


图 3 测量装置结构设计图

Fig. 3 Design drawing of measurement device structure



图 4 测量装置实物图

Fig. 4 Photo of measurement device

各部位的特性及功能如下:

1) 底座为不锈钢材质,可通过焊接胶、电焊或打孔等方式固定在护盾内壁,其他构件均与底座连接。

2) 旋转杆为不锈钢材质,一端设置空心转轴,并通过转轴与底座转动连接,另一端为自由端。

3) 磁敏角度传感器固定在底座一侧,其转轴通过弹簧夹头与旋转杆的空心转轴固定连接,可与旋转杆同步旋转,传感器通过 RS485 协议与上位机相连。

4) 旋转杆的空心转轴上套设扭簧,扭簧两端分别与旋转杆和底座搭接,旋转杆可以在扭簧弹力作用下自由张开,使其自由端始终与管片紧密接触。

2.3 其他硬件设备

除主体结构外,测量装置用到的其他硬件设备

主要有 RS485 接口、集线器、上位机等。RS485 接口主要用于测量装置与上位机连接;集线器主要用于并联多个测量装置;上位机主要进行数据处理和显示。

3 软件系统开发

上位机软件采用 C# 语言,并配合 SQLite 数据库保存和管理数据。C# 语言开发上位机软件具有简洁高效的优势,SQLite 数据库是一种轻量级、跨平台的关系型数据库,无须配置、使用简单。根据功能需要,将软件系统分为三个模块:采集模块、通信模块和数据库模块。

3.1 采集模块

本软件通过 RS485 接口与测量装置进行通信,在读取盾尾间隙测量装置的数值时,先通过串口发送读取数值的指令;然后盾尾间隙测量装置解析该指令,并返回相应地址的数值,再通过串口读取该数值;最后,计算并在系统主界面上显示出来,如图 5 所示。

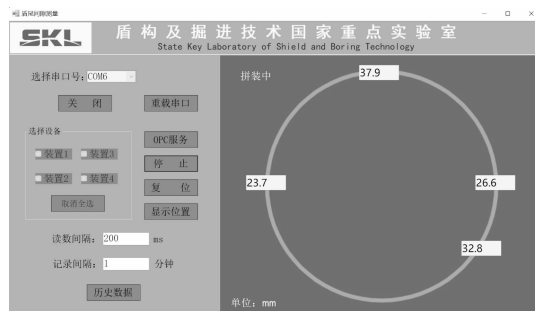


图 5 系统主界面截图

Fig. 5 System main interface

3.2 通信模块

盾构/TBM 主要是在拼装管片后测量盾尾间隙,而在掘进过程中,间隙值一般变化较小。为避免数据库臃肿,就要识别盾构/TBM 的运行状态。使用 C# 语言编写符合 OPC 协议的客户端,通过 Kepserver 服务器访问盾构/TBM 的 PLC(可编程逻辑控制器),将获取的 PLC 数据写入 Redis(高速缓存数据库)中进行缓存,再从 Redis 中读取盾构/TBM 运行状态相关参数,实现数据读取和扩展系统功能。

3.3 数据库模块

数据库模块实现了盾尾间隙数据的增、删、改、查功能,且可以选择日期查看数据,如图 6 所示。

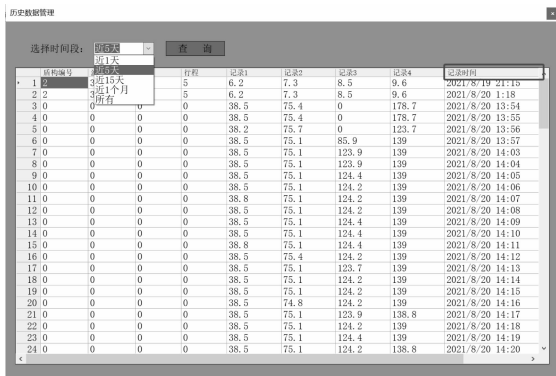


图6 历史数据管理界面截图

Fig.6 Screenshot of historical data management interface

4 试验与应用

4.1 室内试验

为验证测量装置的运行效果及测量精度,装置开发完成后进行了室内试验。主要硬件有:盾尾间隙测量装置、通信线路、RS485 转 USB 接口、上位机等。测量装置放置在工作台上,通过通信线路和转接口与上位机相连。首先进行初始值标定,之后采用游标卡尺固定每次测量时装置的张开高度,同时在上位机读取对应的输出测量值,并进行统计分析。室内试验总计读取数据 20 组,如表 2 所示。

从室内试验的结果来看,测量值和固定值十分接近,总体误差均控制在 1 mm 以内,与非接触式法相比,本系统的测量精度具有十分明显的优势。

表 2 室内试验测量数据统计

Tab.2 Statistics of indoor test measurement data

编号	固定值/mm	测量值/mm	编号	固定值/mm	测量值/mm
1	16.0	16.1	11	26.0	26.1
2	17.0	16.9	12	27.0	27.0
3	18.0	18.1	13	28.0	28.1
4	19.0	19.0	14	29.0	29.1
5	20.0	20.0	15	30.0	30.1
6	21.0	21.0	16	31.0	31.0
7	22.0	21.9	17	32.0	32.1
8	23.0	22.9	18	33.0	33.2
9	24.0	24.0	19	34.0	34.2
10	25.0	25.1	20	35.0	35.2

4.2 工程现场应用

本测量装置在青岛地铁 6 号线 1 台双护盾 TBM 上进行了应用,达到了较为理想的测量效果。

1) 测量装置现场安装:测量装置安装于盾尾护盾内表面,采用焊接胶固定,通信线路使用丁基胶带固定。4 组测量装置均与集线器相连,集线器通过 RS485 接口与上位机相连。

2) 现场测量结果分析:截取了现场 10 个循环的测量结果,并与人工值进行对比,规定点位 1 为隧道拱顶、点位 2 为面向掘进方向隧道左侧边墙、点位 3 为面向掘进方向隧道右侧边墙、点位 4 为隧道底部,测量数据如表 3 所示。

表 3 现场测量数据统计

Tab.3 Statistics of field measurement data

单位:mm

编号	点位 1		点位 2		点位 3		点位 4	
	人工值	测量值	人工值	测量值	人工值	测量值	人工值	测量值
1	50.0	51.7	35.0	34.3	50.0	51.1	27.0	28.1
2	57.0	58.4	30.0	29.1	31.0	32.9	15.0	17.1
3	60.0	60.3	30.0	30.6	30.0	31.8	15.0	16.8
4	60.0	59.6	50.0	49.3	25.0	25.4	15.0	16.1
5	51.0	53.1	45.0	45.5	15.0	16.8	25.0	25.1
6	40.0	40.8	35.0	34.2	25.0	26.4	35.0	37.4
7	16.0	17.6	32.0	33.9	30.0	32.1	60.0	59.8
8	30.0	29.1	35.0	34.1	30.0	30.7	50.0	50.5
9	32.0	33.8	35.0	35.3	30.0	30.2	40.0	38.6
10	25.0	26.6	35.0	37.7	20.0	22.1	35.0	36.1

由于人工测量结果受测量人员水平影响较大,其结果因人员不同存在差异性,不便于进行精度误

差判定。但从表 2 中可以看出,本测量系统测得的数值与人工测量值接近,完全可以满足现场施工

需要。

5 结语

本文基于接触式测量方法,采用磁敏角度传感器测量角度,再经几何运算得到对应的盾尾间隙值,据此开发了机械式盾尾间隙测量装置,并在工程现场进行了应用推广,达到了预期效果。主要得到以下结论:

1) 测量装置具有较强的环境适应性,传感器达到了 IP67 防护等级,装置其他结构全部采用不锈钢材质,从现场应用效果来看,即使有污水、泥浆、油脂附着,也可正常工作运行。

2) 装置测量精度高,经测算,测量精度可以控制在 1 mm 以内,相比非接触式方法具有明显优势。

3) 装置采用的传感器等硬件设备价格低廉,约是非接触式法硬件成本的 1/5,即使在使用过程中出现损坏也可随时更换,操作方便、维护成本低,对工程建设的成本控制具有积极意义。

4) 装置可实现对盾尾间隙的实时监测,同时还可根据需要修改上位机对数据的采集频率,为管片选型、盾构机姿态控制等提供参考依据。

在接下来的研究中,将考虑测量系统接入盾构/TBM 工程大数据云平台,并结合掘进姿态、油缸行程等数据进行综合分析,为自识别管片选型提供依据,也为今后智能化掘进创造条件。

参考文献

- [1] 陈刚. 基于 Matlab 的盾构施工数据分析平台[J]. 工程建设与设计, 2016(15): 169.
CHEN Gang. The analysis platform for shield construction data based on Matlab[J]. Construction & Design for Engineering, 2016(15): 169.
- [2] 张海东. 基于机器视觉的盾尾间隙测量系统研制[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2019.
ZHANG Haidong. Development of shield tail gap measurement system based on machine vision[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2019.
- [3] 张立彬. 基于数字图像处理技术的盾构机盾尾间隙测量系统的研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2013.
ZHANG Libin. The research on the measure system of the shield tail clearance based on digital image processing technique[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2013.
- [4] 孙连, 庄欠伟. 盾构盾尾间隙测量装置试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(增刊1): 56.
SUN Lian, ZHUANG Qianwei. Experimental study on the measurement clevice of shield tail gap[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(S1): 56.
- [5] 陈健, 周兆钊, 刘飞香, 等. 基于盾构机盾尾间隙空间结构的视觉测量研究[J]. 机床与液压, 2020, 48(19): 116.
CHEN Jian, ZHOU Zhaozhao, LIU Feixiang, et al. Research on the visual measurement based on shield tail clearance space structure of the shield machine[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(19): 116.
- [6] 路亚缙, 李光. 基于超声波测距技术的盾构盾尾间隙测量系统研制[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊2): 135.
LU Yati, LI Guang. Study on the LabVIEW-based measuring system of visual shield tail gap[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(S2): 135.
- [7] 路亚缙, 徐智良. 基于 LabVIEW 的视觉盾尾间隙测量系统研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(1): 197.
LU Yati, XU Zhiliang. Study on the LabVIEW-based measuring system of visual shield tail gap[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(1): 197.
- [8] 赵栓峰, 耿龙龙, 丁志兵, 等. 基于卷积神经网络的盾尾间隙测量系统研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(23): 146.
ZHAO Shuanfeng, GENG Longlong, DING Zhibing, et al. Research on shield tail gap measurement system based on convolutional neural network[J]. Modern Electronics Technique, 2020, 43(23): 146.
- [9] 许超, 贺创波, 熊栋栋, 等. 基于双道激光图像识别的盾尾间隙实时监测技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊2): 582.
XU Chao, HE Chuangbo, XIONG Dongdong, et al. Real-time monitoring technology of shield tail gap based on double-channel laser image recognition[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 582.
- [10] HE C, XU C, XIONG D. Development of an automatic measurement device for double laser shield tail gap based on image recognition technology[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 783(1): 012070.
- [11] 蔡清程. 盾构隧道管片预制智能化控制技术[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(6): 36.
CAI Qingcheng. Intelligent control technology for the shield segment prefabrication[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(6): 36.

• 收稿日期:2022-04-22 修回日期:2022-05-23 出版日期:2024-08-10
Received:2022-04-22 Revised:2022-05-23 Published:2024-08-10
• 第一作者:王伟,工程师,940039583@qq.com
通信作者:杨光,工程师,yghxsgz3@163.com
• ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license