

引用格式: 龚秋明, 黄流, 刘永强, 等. TBM 隧道施工掌子面岩体信息系统研制[J]. 隧道建设(中英文), 2026, 46(1): .  
GONG Qiuming, HUANG Liu, LIU Yongqiang, et al. Development of a rock mass information system for TBM tunneling faces[J]. Tunnel Construction, 2026, 46(1): .

## TBM 隧道施工掌子面岩体信息系统研制

龚秋明<sup>1</sup>, 黄流<sup>1</sup>, 刘永强<sup>2</sup>, 谢兴飞<sup>1</sup>, 郝刚<sup>2</sup>, 张放<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124;  
2. 北京玖瑞科技有限公司, 北京 100107)

**摘要:**为实现隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)施工掌子面图像的安全、高效采集及岩体信息的智能识别,研发了一套基于机器视觉技术的 TBM 施工掌子面岩体信息感知系统。该系统由图像采集、控制与通讯、图像处理与可视化 3 个模块构成。设计抗振、密封的终端结构用于保护图像采集模块,使其可稳定安装于刀盘人孔内。提出多线阵相机协同旋转采集图像的方式,实现刀盘狭小空间内的大范围图像采集。采用无线与有线相结合的数据传输方案,确保系统通讯的稳定性。针对图像畸变与拼接难题,提出基于误差校正的多角度图像处理方法。此外,配套研发软件系统,用于采集控制和数据可视化。室内与现场试验验证表明:1) 在拍摄距离不超过 950 mm 时,系统图像分辨率优于 1 mm/pix。2) 所设计终端结构的抗振性和密封性满足实际工程要求,能够在 TBM 施工环境中稳定运行,并采集掌子面图像。3) 系统现场应用中的单次采集总耗时约 280 s,平均数据传输速率约 80 Mbps,丢包率低于 1%,能够获取清晰的掌子面二维图像。

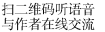
**关键词:** 隧道掘进机; 掌子面; 机器视觉; 二维图像; 岩体信息

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2026.02.000

文章编号: 2096-4498(2026)02-0000-11

中图分类号: U 45

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

## Development of a Rock Mass Information System for TBM Tunneling Faces

GONG Qiuming<sup>1</sup>, HUANG Liu<sup>1</sup>, LIU Yongqiang<sup>2</sup>, XIE Xingfei<sup>1</sup>, HAO Gang<sup>2</sup>, ZHANG Fang<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of the Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Jiurui Technologies Co., Ltd., Beijing 100107, China)

**Abstract:** Herein, a rock mass information system for tunnel boring machine (TBM) tunneling faces based on machine vision technology is developed to enable safe and efficient image acquisition and intelligent identification of rock mass information at the tunneling face. The system comprises three modules: image acquisition, control and communication, and image processing and visualization. An anti-vibration, sealed housing is developed to protect the image acquisition module, enabling stable installation inside the cutterhead manhole. In addition, a multi-linear-array camera collaborative rotation acquisition method is proposed to achieve wide-area image capture within the confined space in front of the cutterhead. A hybrid wired-wireless transmission scheme is employed to ensure stable system communication. To address image distortion and misalignment, a multi-angle image processing method based on error correction is proposed. Corresponding software is also developed to enable acquisition control and data visualization. Validation through laboratory and on-site tests confirms the following results: (1) the system provides an image resolution better than 1 mm/pixel at a shooting distance not exceeding 950 mm; (2) the designed terminal structure satisfies practical engineering requirements for vibration resistance and sealing, demonstrating stable operation under TBM construction conditions and reliable acquisition of tunnel face images; and (3) during field deployment, the system completes a single acquisition cycle in approximately 280 s, with an average data transmission rate of about 80 Mbps and a packet loss rate below 1%, thereby ensuring the acquisition of clear two-dimensional tunnel face images.

**Keywords:** TBM; tunnel face; machine vision; two-dimensional image; rock mass information

收稿日期: 2025-06-04; 修回日期: 2025-11-10

第一作者简介: 龚秋明(1969—),男,湖南安化人,2006年毕业于新加坡南洋理工大学,岩土工程专业,博士,教授,现从事 TBM 与盾构隧道智能化施工方面的研究工作。E-mail: gongqiuming@bjut.edu.cn。

## 0 引言

隧道掘进机(tunnel boring machine, TBM)被广泛应用于深、长隧道的开挖。与钻爆法相比, TBM 施工具有自动化程度高、掘进速度快、施工扰动小等显著优势<sup>[1]</sup>。但 TBM 对地质条件敏感, 操作人员需要依据隧道掌子面的岩体条件, 选择合适的掘进参数, 以确保 TBM 安全、高效的掘进。因此快速、准确地获取掌子面岩体信息显得尤为重要。

在 TBM 施工期间, 目前主要通过掌子面素描获取掌子面岩体信息。由于受到刀盘及支撑盾体的阻挡, 可获取的岩体信息有限, 且安全性低、主观性强、速度慢, 难以与 TBM 高效施工的需求相匹配<sup>[2]</sup>。超前钻探技术<sup>[3-5]</sup>通过分析钻进参数和钻取的岩芯获取施工前方的围岩信息, 尽管技术准确性较高, 但无法做到 TBM 围岩条件的快速感知。随着大数据采集和人工智能技术的发展, 利用 TBM 自身监测的海量数据也可以识别如岩体强度和脆性指数<sup>[6]</sup>、不良地质条件<sup>[7]</sup>或围岩类别等围岩信息<sup>[8-10]</sup>, 这种方法可在不增加额外成本的情况下实现部分岩体参数的实时识别, 但对模型的鲁棒性和施工数据监测传感器的性能要求较高, 其实用性有待验证。通过搭载智能监测系统获取如滚刀磨损<sup>[11]</sup>、TBM 振动参数<sup>[12-13]</sup>、渣片参数<sup>[14]</sup>、滚刀力<sup>[15]</sup>等岩机相互作用关键参数, 进而识别掌子面岩体条件, 是一种较准确的岩体信息间接感知方法, 但其识别效果容易受数据规模和数据质量的影响。

机器视觉作为一种基于图像采集与分析的新兴技术, 因其具有高度直观性和准确性, 已被应用于岩体信息获取。例如, 奥地利 3GSM 公司研发的 ShapeMetriX3D 岩石三维成像系统<sup>[16-17]</sup>以及澳大利亚联邦科学与工业研究组织研发的 CAE Sirovision 岩体遥测与结构分析系统等<sup>[18-20]</sup>, 能够通过多视角图像采集与三维重建技术获取岩体结构面参数。然而, 这些系统通常需要足够的测量空间布置采集设备, 操作流程复杂、耗时较长。部分国内学者也研发了基于双目视觉的岩体信息识别系统<sup>[21-23]</sup>, 但这些系统难以同时兼顾采集范围和采集精度, 且对拍摄环境要求较高。

目前, 基于机器视觉的围岩感知技术主要适用于地表露头或钻爆法隧道等开阔场景。而在 TBM 施工隧道中, 掌子面外露空间狭小, 且存在岩渣、泥水及强烈振动, 导致传统测量点位架设与常规成像技术难以实施。为此, 本文研发了一套基于机器视觉的 TBM 施工隧道掌子面信息系统。设计了具备抗振、防冲击与高密封性的采集终端, 可稳定搭载于刀盘人孔中。在非掘进阶段, 通过多台线阵相机随刀盘协同旋转实现高效的大范围图像采集。开发了基于误差校正的多角度图像拼接算法, 以生成清晰的掌子面二维全景图像。

此外, 配套研发了软件系统, 实现图像采集控制和可视化。通过室内试验和工程测试验证对系统性能进行了全面评估, 以为后续隧道掘进机辅助智能掘进提供可靠的岩体信息参考。

## 1 系统设计

### 1.1 整体设计

#### 1.1.1 安装环境与需求

根据 TBM 刀盘结构特点, 掌子面信息系统的图像采集模块只能安装于 TBM 刀盘的人孔内, 人孔一般位于刀盘径向的中间位置, 其直径与长度一般都不小于 500 mm。系统在 TBM 掘进时处于关闭状态, 随刀盘转动, 因此图像采集模块需同时具备抗振、抗岩渣冲击、防尘及防水性能。图像采集模块还需内置光源, 在 TBM 停止掘进后, 后退刀盘至合适位置后进行图像采集。因拍摄距离短, 系统需要多台相机协同工作, 再进行图像拼接。此外, 因图像采集模块跟随刀盘转动, 在刀盘内其控制信号与图像传输只能依赖无线通讯, 这对系统通讯稳定性提出了较高要求。

#### 1.1.2 系统功能与性能指标

系统的核心功能是获得清晰的掌子面图像, 识别掌子面节理分布、渗漏水、塌方与掉块等岩体信息, 并对掌子面岩体质量进行分类。依据上述工作环境, 系统功能参数设计为: 图像采集距离 30~80 cm; 图像最高分辨率 $\leq 1 \text{ mm/pix}$ , 识别宽度不小于 1 mm、长度大于 50 mm 的节理; 图像采集模块具备抗振及防岩渣冲击性能, 防护等级至少达到 IP67<sup>[24]</sup>(即完全防尘, 并且短暂浸入 1 m 深的水中达 30 min 时, 无水进入设备内部); 系统指令和图像数据必须能快速、稳定地传输。

#### 1.1.3 系统架构设计

基于系统的功能需求, 系统整体设计框架如图 1 所示, 包含图像采集、控制与通讯、图像处理与可视化 3 个核心模块。图像采集模块用于获取掌子面原始图像及图像拍摄姿态数据。控制与通讯模块连接图像采集模块和上位机软件, 用于控制系统的采集状态, 传输系统控制指令和采集的数据。图像处理与可视化模块用于实现图像处理、信息解析、数据储存、数据查询及可视化功能。

### 1.2 图像采集模块

图像采集模块由相机、光源、测距仪和角度传感器构成。为适应狭小拍摄空间, 采用多台线阵相机作为成像设备, 每台相机采集一定径向范围的掌子面, 最后拼接成完整的掌子面图像。光源采用激光光源, 激光光束的方向、大小和形状通过激光镜头调节。相机镜头和激光镜头安装在同一平面上, 保证光源与相机视场共线, 如图 2 所示。通过调整相机和激光镜头的水

平安装角度,可控制图像采集和光照的范围,确保激光光源覆盖相机视场。测距仪与相机镜头共线安装,用于获取相机镜头到掌子面的拍摄距离。基于拍摄距离

计算图像的像素当量。角度传感器与相机镜头共面安装,获取每张图像的拍摄角度,为后续的图像拼接处理提供方位信息。

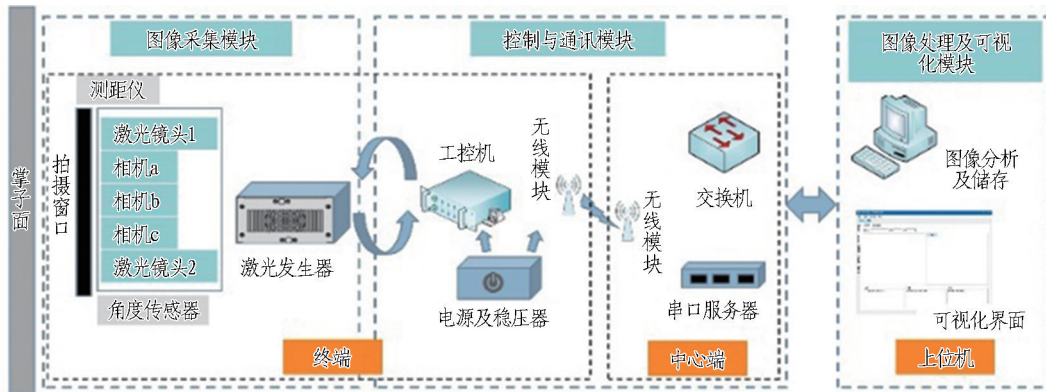


图 1 系统框架

Fig. 1 Framework of the system

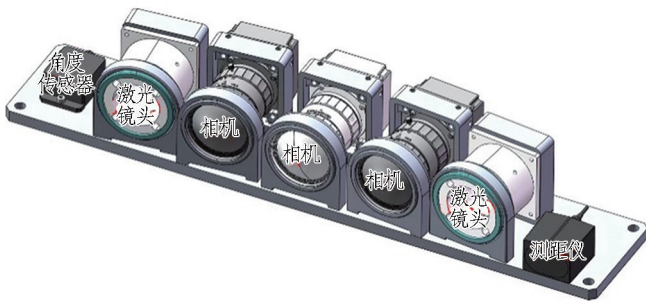


图 2 采集装置安装示意

Fig. 2 Installation diagram of acquisition device

### 1.3 控制与通讯模块

#### 1.3.1 控制模块

控制模块主要承担系统指令执行、电源管理等任务。为此,设计了一套集成工控机、可充电电源、串口服务器以及工业交换机的控制模块。其中,工控机主要负责控制图像采集模块的启停;可充电电源为工控机和图像采集模块供电,并通过内置稳压器输出稳定的 24 V 电压,避免因电池电量下降产生的电压波动影响设备运行。

为实现掌子面图像的采集,设计了一套控制程序,如图 3 所示。在 TBM 完成 1 个掘进循环后,后退刀盘至最佳拍摄位置。由上位机下达启动指令,工控机接收指令后依次开启测距仪与角度传感器,并将实时拍摄距离和角度监测量上传至上位机。然后,旋转 TBM 刀盘至设定转速后,上位机发送图像采集指令。相机及光源随后打开,开始采集图像。角度传感器同步记录每张图像的拍摄角度,同时上传采集数据。当累计旋转角度达到设定阈值后,图像采集自动停止。当数据上传完成后,由上位机发送关机指令,关闭图像采集模块和工控机,图像采集结束。

#### 1.3.2 通讯模块

通讯模块需要解决 2 个关键问题。首先,系统的

控制指令需要稳定传输,以确保系统能够快速响应用户的控制操作;其次,采集的图像数据量较大,为了保证后续图像处理的准确性和时效性,必须确保较低的图像丢包率和较高的传输速率。针对上述 2 个关键问题,刀盘内的无线通讯分别设计了 433 MHz LoRa 扩频通信和 2.4 G 无线数据传输模式。其中,433 MHz LoRa 扩频通信具有功耗低、穿透力强、抗干扰能力强等优点,用于传输高频率的控制指令。图像数据则通过高速且低延迟的 2.4 G 无线 AP 传输,其最高理论传输速率可达 300 Mbps,丢包率低于 0.01%,以实现图像的高效、稳定传输,如图 4 所示。在刀盘外,系统使用光纤通讯,进一步保障系统通讯的时效性和稳定性。

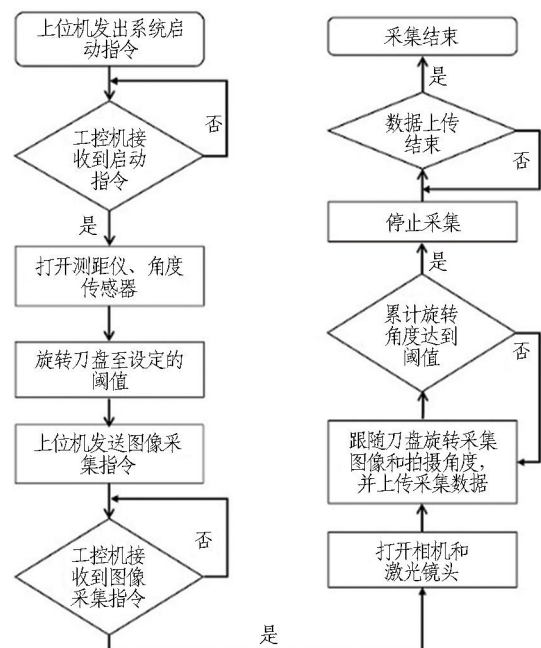


图 3 系统采集控制逻辑

Fig. 3 System acquisition control logic

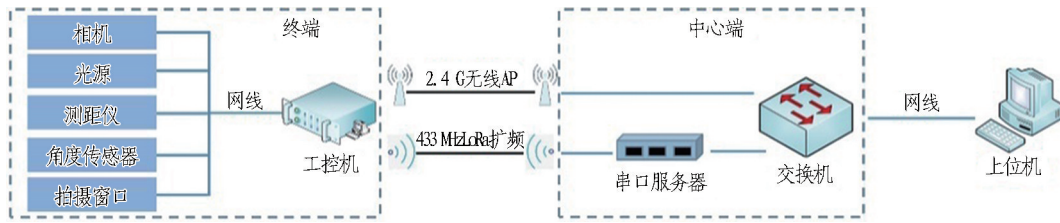


图4 系统通讯示意

Fig. 4 System communication schematic

## 1.4 图像处理与可视化模块

### 1.4.1 图像处理模块

图像处理模块主要负责原始图像的预处理与岩体信息的提取。系统采集的原始图像为不同角度下的线扫描图像,需要将这些线扫描图像拼接成一幅完整的图像,才能进一步实现岩体信息的提取与分析。图像拼接处理的难点在于如何精确对齐多张不同角度的图像,消除畸变误差,并有效处理图像重叠区域的融合问题。为此,提出了一种基于误差校正的多角度图像拼接方法。首先,在上位机接收到图像数据及拍摄角度信息后,计算成像点的像素坐标,再通过坐标映射将所有图像对齐到统一的坐标系下。然后,采用径向基函数(RBF)对映射到该坐标系中的线扫描图像进行误差校正。最后,采用加权平均法拼接图像,得到最终的融合图像。具体处理过程如下:

假设成像平面上的一个极坐标点  $X(r, \theta)$ , 其对应的像素坐标为  $P(x, l)$ 。基于已知的相机焦距  $f$  和相机位置  $(r_c, z_c)$ , 可计算理想成像点的扫描线坐标  $x_i$  (成像点在扫描线上的位置), 如式(1)所示。

$$x_i = \frac{f(r-r_c)}{z_c} \quad (1)$$

式中:  $f$  为相机的焦距;  $r$  为成像点到成像平面中心的距离;  $r_c$  为相机在成像平面上的投影到成像平面中心的距离;  $z_c$  为相机到成像平面的距离。

实际拍摄过程中,镜头的径向畸变会导致图像失真,因此需要通过畸变修正来计算成像点的实际扫描线坐标  $x$ , 如式(2)所示。

$$x = x_i(1 + k_1 x_i^2 + k_2 x_i^4 + k_3 x_i^6) \quad (2)$$

式中  $k_1, k_2, k_3$  为相机的畸变系数,由相机室内标定试验获得。

对于每一个扫描线,其编号  $l$  由该扫描线的成像角度  $\theta$  计算得到,计算公式如式(3)所示。

$$l = \frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta} \quad (3)$$

式中:  $\theta_0$  为扫描的起始角度;  $\Delta\theta$  为扫描线的角度步进。

在完成每个成像点的像素坐标计算后,将成像面栅格化,并将各线扫描图像的所有像素坐标均映射到

统一的坐标系中,以确保图像在空间上的一致性。为了消除映射过程中可能存在的误差,使用径向基函数(RBF)进行误差校正。对于已知点  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , 使用 RBF 进行拟合,如式(4)所示。

$$y(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \varphi(\|x - x_i\|) \quad (4)$$

式中:  $\lambda_i$  为权重系数;  $\|x - x_i\|$  为位置  $x$  与  $x_i$  之间的欧几里得距离;  $\varphi$  为径向基函数,选用式(5)所示的高斯函数:

$$\varphi(\|x - x_i\|) = \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

其中  $\sigma$  为平滑参数,用于控制误差修正的范围。

在完成误差校正后,使用加权平均法拼接图像。加权平均法通过对多个输入图像在同一像素位置的值进行加权求和,从而得到融合图像。在拼接过程中,每个输入图像的像素值根据预先设定的权重进行加权,最终生成融合图像的像素值。假设有 2 张图像  $I_1$  和  $I_2$ , 它们在同一像素位置上的像素值分别是  $I_1(X_1, Y_1)$  和  $I_2(X_2, Y_2)$ , 融合后的像素值  $I_{\text{fusion}}(X, Y)$  通过式(6)计算。

$$I_{\text{fusion}}(X, Y) = w_1 I_1(X_1, Y_1) + w_2 I_2(X_2, Y_2) \quad (6)$$

式中  $w_1$  和  $w_2$  分别为  $I_1$  和  $I_2$  的加权系数,通过相机室内标定试验确定。

### 1.4.2 软件与可视化模块

系统软件集成数据采集控制、数据管理、数据处理、结果显示和用户管理 5 大功能模块,其架构如图 5 所示。数据采集控制提供采集操作指令,便于用户执行采集设置和数据采集操作;数据管理功能涵盖数据储存、历史数据查询以及相关信息的导入,确保数据的系统化管理;数据处理功能通过集成相关算法实现原始图像拼接、岩体信息提取及隧道三维地质模型重构;结果显示功能可对掌子面二维图像及相关分析结果进行可视化,帮助操作人员快速理解和决策;用户管理功能则根据不同权限需求,为各类用户配置不同的操作权限,以保障系统的安全性与灵活性。

## 2 系统研制

根据系统的整体设计需求和 TBM 结构特点,将系统分为终端、中心端和上位机软件 3 个部分进行搭载。

其中终端安装于刀盘人孔中,用于采集原始掌子面图像。上位机部署于 TBM 主控室,为施工人员提供人机交互界面。中心端则作为终端和上位机的通讯中继站,与终端无线通讯,并与上位机有线通讯。为保障无线通信质量与传输速率,中心端需尽量靠近终端安装。

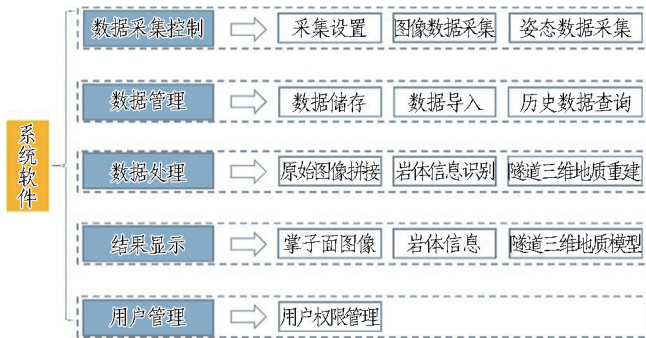


图 5 系统软件框架

Fig. 5 Software framework of the system

### 2.1 终端研制

终端集成图像采集模块、图像采集窗口控制装置、工控机、通讯模块和电源等核心组件。为适应 TBM 刀

盘人孔的几何尺寸,将终端外壳设计为圆柱形,其前端通过焊接的法兰固定于人孔前端,尾部通过可膨胀结构块紧固于人孔内壁,确保安装稳定性,如图 6(a)所示。外壳前端设有与相机镜头平行的拍摄窗口,在图像采集前打开,提供视野,采集结束后关闭。拍摄窗口内侧装配 1 块拍摄玻璃,防止图像采集期间岩渣与水的侵入。外壳的前端和尾部均配备密封圈,进行整体防水处理,如图 6(b)所示。终端内部采用结构化设计,设有前后 2 个独立的设备安装舱。安装舱与壳体一体化成型,既增强结构抗振性,也降低了整体质量,如图 6(c)所示。前舱分为 3 层,用于安装图像采集模块、工控机和通讯模块;后舱分为 2 层,用于安装电源和稳压器。为抑制各部件的相互干扰,壳体内各安装空间相互独立,仅预留必要的线缆穿孔。所有线缆接口均采用焊接式防水接头,进一步提高系统防水性能的同时,避免因振动引起的线缆松动问题。尾部舱门采用聚四氟乙烯材料制成,兼具优异的耐久性与电磁波穿透性,便于电池更换与无线信号传输。

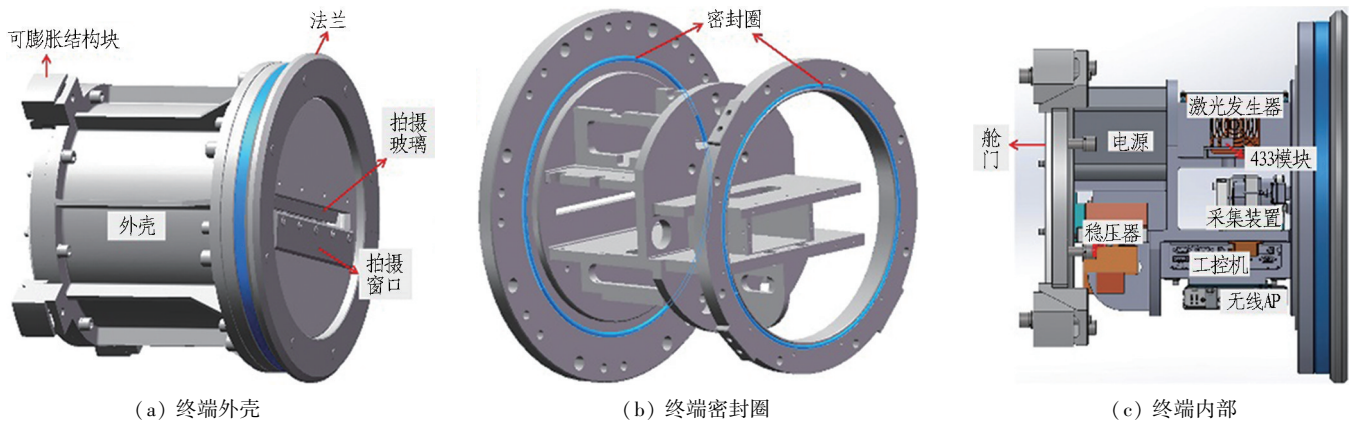


图 6 终端结构示意图

Fig. 6 Terminal structure diagram

### 2.2 终端抗振防水测试

参考以往研究<sup>[12,25-26]</sup>,发现刀盘破岩过程中的振动主频率一般在 10~100 Hz,三轴振动加速度大多在 2 g 以内,且瞬时振动加速度不超过 30 g。为验证终端

结构的抗振性,在其组装完成后,采用东菱 LT1111 型振动台(如图 7 所示)对其进行了整体抗振性能测试,测试方案如表 1 所示。测试完成后对终端进行检验,其结构完整性良好,表明其抗振性能满足设计要求。

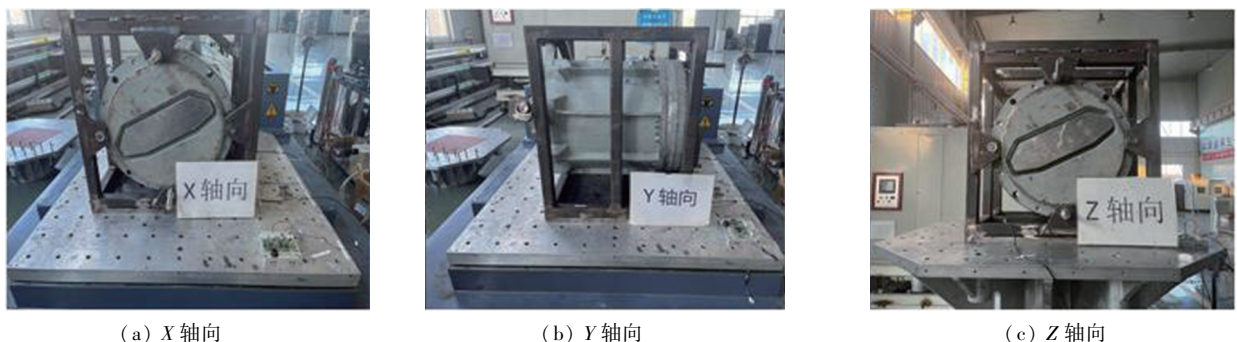


图 7 终端抗振性能测试

Fig. 7 Terminal vibration resistance test

依据 GB/T-4208—2017《外壳防护等级(IP 代码)》<sup>[24]</sup>标准,对终端壳体进行了 IP68 等级(即完全防尘,并可在至少 1 m 水深处长期浸泡而无渗漏)的防水密封

性能测试。测试中将壳体完全浸没于水下 1 m 深处,持续浸泡 12 h。测试结束后,拆开终端检查,内部无任何渗水迹象,表明其密封性能达到 IP68 防护等级要求。

表 1 终端抗振性测试方案

Table 1 Terminal vibration resistance test design

测试类型	测试方向	测试参数设置	测试流程
定频振动测试	X 轴	加速度为 2 g 的正弦波,振动频率从 10、20、30 Hz,逐级增加至 100 Hz,每级频率持续测试 30 min	X、Y、Z 3 个方向按顺序先后进行测试
	Y 轴		
	Z 轴		
冲击测试	X 轴	采用峰值加速度为 30 g、脉冲宽度为 10 ms 的半正弦波脉冲,脉冲次数为 50,脉冲间隔为 1.5 s	X、Y、Z 3 个方向各测试 10 次
	Y 轴		
	Z 轴		

### 2.3 软件研制

基于 Qt 和 C++ 开发了上位机软件,软件界面上方显示从 TBM 的 PLC 系统接入的实时掘进里程和时间信息,如图 8 所示。主界面左下方动态展示最新采集的掌子面图像,右侧同步显示该图像对应的里程和岩体信息识别结果。除主界面外,软件还包含图像查询、三维重建、采集控制和设置界面。图像查询界面支持按时间或里程区间查询掌子面图像及岩体信息识别结

果;三维重建界面可显示指定区间内的隧道三维地质模型及纵断面图;采集控制界面根据图像采集逻辑提供相关的操作指令,并实时反馈终端各元件的工作状态;设置界面用于导入相机标定参数和配置数据储存路径。考虑到系统需管理图像、岩体信息、掘进参数等多源异构数据,且数据量庞大,因此采用 MySQL 开发系统数据库。MySQL 不仅支持复杂数据结构的灵活存储,还可通过内置的索引机制保障数据的查询与调用效率。



图 8 软件主界面

Fig. 8 Main interface of software

### 2.4 系统集成

系统整体研制完成后的实物图如图 9 所示。终端作为直接面对恶劣工况的核心部件,具备前述已验证的抗振与密封性。中心端集成了通讯模块、串口服务器、工业交换机以及电源模块,确保长期稳定的系统通讯。上位机软件则实现了图像和岩体信息等数据的快速储存、查询及可视化,并且提供友好的用户交互

界面。

## 3 室内测试

### 3.1 测试平台

在系统研制完成后,在室内测试平台上对系统进行整体测试,如图 10 所示。平台由安装轨道、机械臂、电机及拍摄面组成。其中,安装轨道用于固定系统终端,并可通过调整终端在安装轨道上的安装位置来改

变拍摄距离。机械臂用于固定安装轨道,带动终端旋转,并可通过调整安装轨道在机械臂上的安装位置来调整终端的安装半径。电机控制机械臂的旋转,转速范围为0~2 r/min。拍摄面模拟隧道掌子面,尺寸为12 m×6 m,最大可模拟直径为12 m的隧道掌子面。测试平台可通过协同调节上述参数,该平台能够有效模拟不同人孔位置、拍摄距离以及刀盘转速下的图像采集过程。

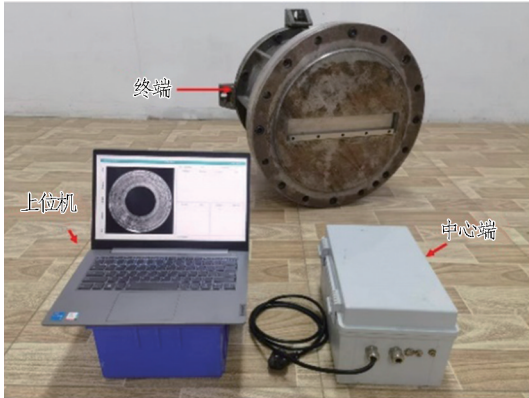


图9 系统实物图

Fig. 9 Photograph of the system



图10 系统室内测试平台

Fig. 10 Indoor experimental platform for the system

### 3.2 测试过程与结果

#### 3.2.1 试验设计

测试采用3台焦距为8.5 mm、像元尺寸为8.8 mm、分辨率为4 096的定焦相机组成图像采集模块。中间相机与拍摄面平行布置,两侧相机与拍摄面的夹角为20°,相机的理论像素当量计算如式(7)所示。

$$G = \frac{s \cdot z_c}{f} \quad (7)$$

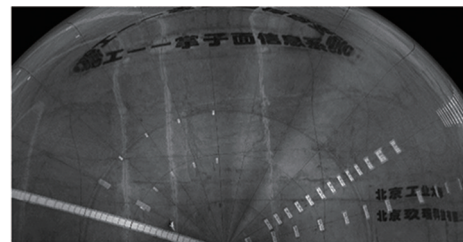
式中:  $G$  为像素当量;  $s$  为像元尺寸;  $z_c$  为相机到成像平面的距离。试验前对相机进行了标定,得到了相机的畸变系数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  和拼接加权系数  $w_1$ 、 $w_2$ 。

三相机理论总采集宽度计算如式(8)所示。

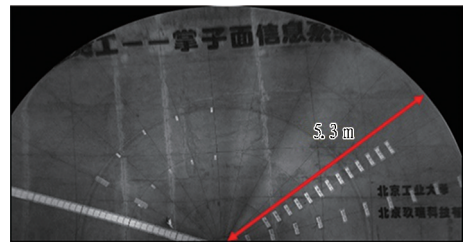
$$L = 2 \cdot G \cdot p \cdot \cos \alpha - z_c \cdot \tan \alpha \quad (8)$$

式中:  $p$  为相机分辨率;  $\alpha$  为两侧相机与拍摄面的夹角。

将掌子面信息系统搭载到试验平台后,对系统的采集、通讯、控制及软件功能进行调试。试验中,系统累计旋转角度阈值为180°,机械臂的转速固定为0.3 r/min,初始拍摄距离为100 mm,每次试验拍摄距离增加50 mm,最大拍摄距离为1 000 mm,系统性地评估拍摄距离对图像分辨率的影响。每次试验先启动系统,然后打开电机驱动系统终端旋转采集图像。当系统累计旋转180°后,采集自动停止。待图像上传完毕,初步拼接图像,如图11(a)所示;经过径向基函数(RBF)进行误差处理,完成图像的最终拼接,如图11(b)所示。试验结束后,记录系统当前拍摄距离下的图像采集范围以及像素当量,然后调整拍摄距离,重复上述试验。



(a) 图像初步拼接结果



(b) 图像最终拼接结果

图11 图像拼接结果

Fig. 11 Results of images stitching

#### 3.2.2 试验结果分析

试验结束后,对试验数据进行分析。如表2所示,像素当量随距离增加而线性增大,同时单次扫描的采集范围也随之扩展。当拍摄距离大于200 mm时,系统单次扫描覆盖的环宽超过1.8 m(掌子面半径的30%)。当拍摄距离为950 mm时,图像的像素当量实测值为0.99 mm/pix(小于1 mm/pix)。像素当量与采集范围的实测值与理论值平均误差均小于1%,这验证了系统测量的可靠性。上述规律意味着,在实际工程中可通过调整采集距离,在图像分辨率与观测视野之间取得平衡,近距离采集适于高分辨率精细识别,远

距离采集则利于大范围图像采集。此外,图像数据传输速率平均 180 Mbps,最高可达 200 Mbps,平均丢包率小于 0.1%。当转速为 0.3 r/min 时,系统采集与拼接图像全程不超过 150 s。图像拼接方法可精确对齐不同角度的图像,并且有效消除畸变误差。试验结果表明,系统的整体性能满足设计要求。

表 2 各采集距离下的图像参数

Table 2 Image parameters at various acquisition distances

采集距离/ mm	理论像素当 量/(mm/pix)	实际像素当 量/(mm/pix)	理论采集 范围/m	实际采集 范围/m
200	0.20	0.21	1.8	1.8
250	0.26	0.26	2.2	2.2
300	0.31	0.31	2.6	2.5
350	0.36	0.36	3.1	3.1
400	0.41	0.42	3.5	3.4
450	0.46	0.47	3.9	4.0
500	0.52	0.52	4.3	4.3
550	0.57	0.57	4.8	4.8
600	0.62	0.62	5.2	5.3
650	0.67	0.68	5.7	5.7
700	0.72	0.73	6.1	6.1
750	0.78	0.78	6.5	6.5
800	0.83	0.83	7.0	7.0
850	0.88	0.88	7.4	7.4
900	0.93	0.94	7.8	7.8
950	0.99	0.99	8.3	8.3

## 4 系统现场测试

### 4.1 工程概况

考虑到 TBM 实际工作环境的复杂性,在完成系统室内测试后,在北山地下实验室螺旋斜坡道 TBM 施工段对系统进行了现场测试。北山地下实验室位于甘肃省酒泉市肃北蒙古族自治县新场地区,主体工程由 3 条竖井、2 层试验水平和 1 条螺旋斜坡道组成。斜坡道 TBM 开挖洞径 7.03 m,最大埋深 560 m,总长约 7.47 km,最大坡度为 1:10,水平转弯半径 255 m。TBM 施工区间对应桩号为 K0+494.7~K7+472.5,全长约 6.98 km,埋深为 33~560 m,地层岩性主要为花岗岩。TBM 刀盘被设计为特殊的锥面结构,其上共布置 55 把滚刀,平均刀间距为 60 mm。刀盘上设置 2 个人孔,每个人孔的直径为 600 mm,长度为 600 mm,安装半径为 2.1 m。

### 4.2 现场测试与效果分析

在 K5+226.9 处,隧道埋深约 414 m,成功将掌子面信息系统搭载至 TBM 上,如图 12 所示。系统图像

采集模块仅装配 1 台焦距为 8.5 mm、像元尺寸为 8.8 mm 的定焦相机,与掌子面平行布置。系统搭载完成后,首先对系统的采集、通讯、控制及软件功能进行调试,调试完成后进行现场采集测试。测试前,通过人孔观察并记录了掌子面的岩体条件,岩性为花岗闪长岩,岩石新鲜,岩面平整且无渗水现象。岩体中主要分布 2 组节理,其中,第 1 组节理的节理间距约 25 cm,闭合,在掌子面上的出露长度 0.5~2 m,与隧道轴向夹角 35°~45°;第 2 组节理的节理间距约 35 cm,闭合,在掌子面上的出露长度 0.3~2 m,与隧道轴向夹角约 60°。系统图像采集测试时,为确保系统采集到完整的掌子面图像,将系统累计旋转角度阈值设置为 400°。首先,后退刀盘到指定拍摄距离 400 mm;然后旋转刀盘,当刀盘转速稳定在 0.3 r/min 后,启动系统采集图像,同时上传采集结果;当系统累计旋转阈值达到 400°之后,系统自动停止采集;待数据完全上传后,系统完成掌子面图像的拼接,并将拼接后的结果展示在软件系统的主界面。现场测试表明系统可在 TBM 空转条件下采集掌子面图像。整个测试过程历时约 280 s,图像数据传输速率平均为 80 Mbps,最高可达 100 Mbps,平均丢包率小于 1%。拼接后的图像为一个内径 1.39 m、外径 2.89 m、宽 1.5 m 的圆环,分辨率为 0.41 mm/pix,如图 13 所示。从图像质量来看,掌子面岩体纹理清晰,特征明显,满足高精度地质判识的要求。图像中可辨识出 2 组优势节理组,其展布规律与现场地质素描记录高度吻合,这验证了系统对岩体结构信息的保真能力。为定量评估系统的测量精度,选取了图像中一条完全出露、首尾可见的节理进行量测(图 13(a)中黄色框标示)。现场地质记录中该节理的长度约为 1.2 m。在系统获得的图像上,该节理的像素长度为 2 942 pixel,结合图像分辨率,计算得到其实际长度约为 1.206 m,与现场地质记录的数值相近,表明系统可以实现节理等岩体信息的准确量化。

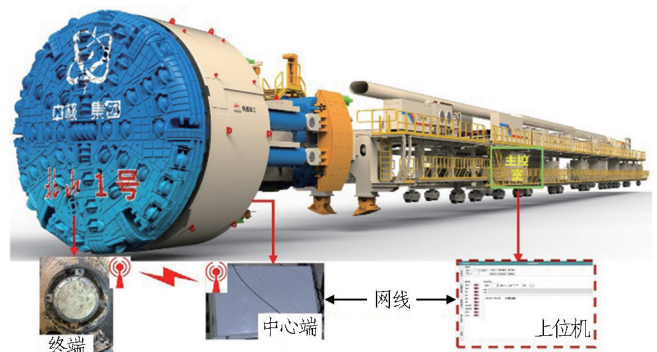
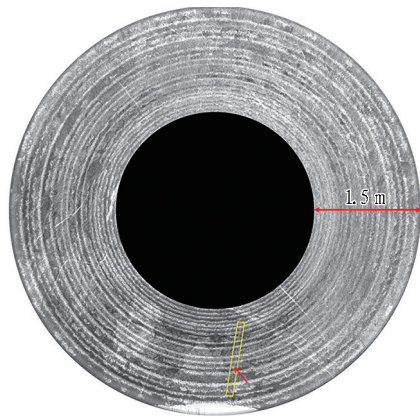
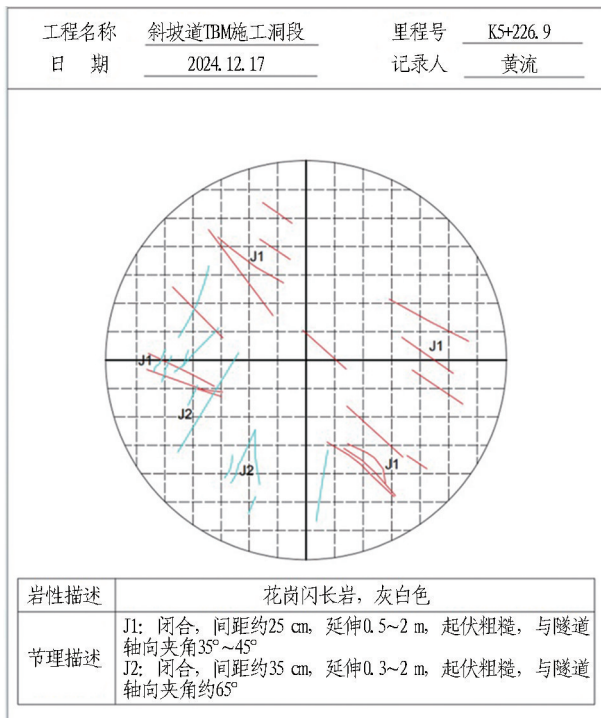


图 12 系统现场搭载示意

Fig. 12 On-site system layout



(a) 掌子面图像



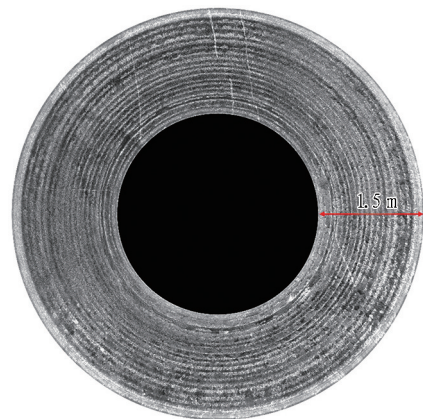
(b) 掌子面素描

图 13 掌子面图像和素描(K5+226.9)

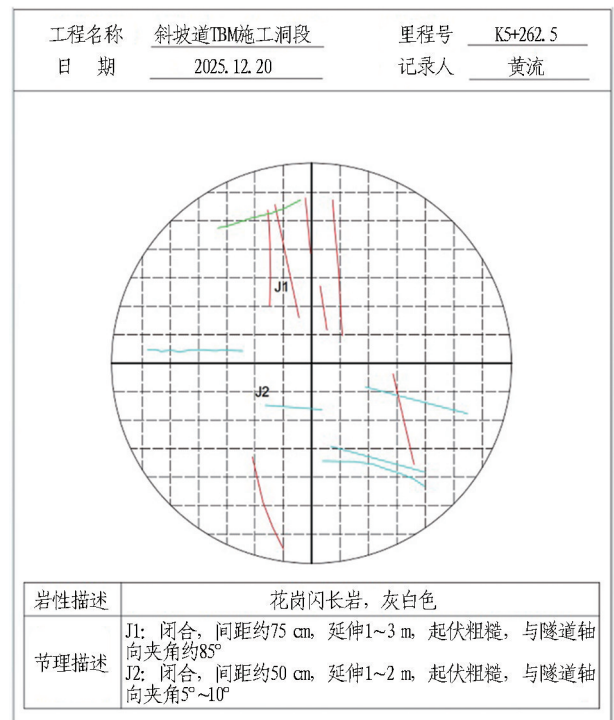
Fig. 13 Tunnel face image and mapping in section K5+226.9

为进一步验证系统不同岩体条件下的成像效果,在桩号 K5+262.5 处进行了掌子面图像采集,采集距离为 500 mm。在采集前,通过人孔观察并记录了该处掌子面的岩体条件,岩性为花岗闪长岩,岩石新鲜,岩面平整且无渗水现象。岩体中主要分布 2 组节理,其中,第 1 组节理的节理间距约 75 cm,闭合,在掌子面上的出露长度 1~3 m,与隧道轴向夹角约 80°;第 2 组节理的节理间距约 50 cm,闭合,在掌子面上的出露长度 1~2 m,与隧道轴向夹角 5°~10°。获取的图像尺寸与分辨率不变,如图 14 所示。从图像中可明确辨识 2 组节理的分布规律与几何形态,其产状、间距与现场记录高度吻合,定性验证了系统在不同节理发育条件下的成像一致性与可靠性。与桩号 K5+262.5 处的测试结果相比,本处节理间距更小、走向变化更为显著,但

图像仍能清晰反映出这些差异。



(a) 掌子面图像



(b) 掌子面素描

图 14 掌子面图像和素描(K5+262.5)

Fig. 14 Tunnel face image and mapping in section K5+262.5

该系统已在斜坡道 TBM 施工段 K5+226.9~+621.2 成功获取了 31 张掌子面图像,表明系统整体设计满足使用需求,并能长期稳定运行。为提高系统应用效果,后续将重点研究基于深度学习的岩体信息解析方法。计划构建多任务融合的智能识别模型:利用图像分类算法识别岩性与宏观岩体结构类型,采用目标检测算法精确定位出水与掉块区域,并结合图像分割算法与传统形态学方法,实现节理产状、间距等几何参数的精确量化识别。同时,围绕数据集增强、训练策略和损失函数等方面开展优化算法研究,提升模型在复杂工程环境下的识别精度与泛化能力,为 TBM 安全、高效掘进提供精准的岩体信息支持。

## 5 结论与建议

本文成功研发了一套基于机器视觉的TBM施工掌子面岩体信息感知系统,该系统由图像采集、控制与通讯、数据处理与可视化3个模块组成。通过室内测试与现场应用对其有效性进行了验证。主要结论如下:

1) 基于系统的搭载条件与工作环境,所设计的终端结构具备良好的抗振性和密封性,能在TBM恶劣工况下长期稳定运行。提出的基于误差校正的多角度图像拼接方法,能够有效对齐线扫描图像并消除畸变,生成清晰、完整的掌子面图像。开发的软件集成了数据采集控制、管理、处理与可视化功能,可直观展示掌子面图像与岩体信息,并支持多种类型的数据的储存与查询。

2) 室内与现场测试表明,当拍摄距离大于200 mm时,系统单次扫描覆盖的环宽超过1.8 m。当拍摄距离为950 mm时,图像的像素当量实测值为0.99 mm/pix(小于1 mm/pix)。在现场应用中,单次采集总耗时约280 s,平均数据传输速率约80 Mbps,丢包率低于1%,能够稳定获取清晰的掌子面二维图像,满足设计要求。

本研究为TBM施工提供了一种安全、高效的非接触式掌子面信息获取手段。后续研究将重点验证系统在破碎岩体、渗漏水等复杂地质下的适应性,并跟踪其长期稳定性。此外,将结合深度学习技术开发掌子面岩性、节理条件、地下水等岩体信息识别模型,探究隧道三维地质重构方法,为TBM隧道智能化掘进提供技术支持。

### 参考文献(References):

- [1] LIU Q S, HUANG X, GONG Q M, et al. Application and development of hard rock TBM and its prospect in China [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 57: 33.
- [2] 朱合华, 潘柄屹, 武威, 等. 岩体结构面信息采集及识别方法研究进展[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(6): 1339.
- ZHU Hehua, PAN Bingyi, WU Wei, et al. Review on collection and extraction methods of rock mass discontinuity information[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*. 2023, 31(6): 1339.
- [3] YAMAMOTO T, SHIRASAGI S, YAMAMOTO S, et al. Evaluation of the geological condition ahead of the tunnel

face by geostatistical techniques using TBM driving data [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(2/3): 213.

- [4] 刘送永, 徐保龙, 秦立学, 等. 煤矿巷道掘进长距离快速超前钻探工艺策略及配套机具研究[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(增刊2): 229.
- LIU Songyong, XU Baolong, QIN Lixue, et al. Study on long-distance fast advance drilling technology strategy and supporting equipment in coal mine roadway tunneling [J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(S2): 229.
- [5] 苟承志, 刘勇斌, 张晓平, 等. 敞开式TBM前置式超前钻探及注浆加固技术研究: 在首台国产再制造TBM上的应用[J]. *隧道建设(中英文)*, 2025, 45(4): 834.
- GOU Chengzhi, LIU Yongbin, ZHANG Xiaoping, et al. Research and application of front-mounted exploration drilling and grouting reinforcement technology in China's first remanufactured open tunnel boring machine [J]. *Tunnel Construction*, 2025, 45(4): 834.
- [6] LIU B, WANG R R, GUAN Z D, et al. Improved support vector regression models for predicting rock mass parameters using tunnel boring machine driving data [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91: 102958.
- [7] CHEN Z Y, ZHANG Y P, LI J B, et al. Diagnosing tunnel collapse sections based on TBM tunneling big data and deep learning: A case study on the Yinsong Project, China [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108: 103700.
- [8] 朱梦琦, 朱合华, 王昕, 等. 基于集成CART算法的TBM掘进参数与围岩等级预测[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(9): 1860.
- ZHU Mengqi, ZHU Hehua, WANG Xin, et al. Study on CART-based ensemble learning algorithms for predicting TBM tunneling parameters and classing surrounding rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(9): 1860.
- [9] NIE Y Q, ZHANG Q, HOU L L, et al. TBM rock mass classification using XGBoost and Interpretable Machine learning [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2025, 66: 103459.
- [10] ZHANG C H, WANG Y, LI X, et al. Bayesian sequential learning of rock mass classifications along tunnel trajectory using TBM operational data and geo-data spatial correlation [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, 163: 106709.
- [11] GONG Q M, WU F, WANG D J, et al. Development and

- application of cutterhead working status monitoring system for shield TBM tunnelling[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(4): 1731.
- [12] WU F, GONG Q M, LI Z G, et al. Development and application of cutterhead vibration monitoring system for TBM tunnelling [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 146: 104887.
- [13] FANG Y R, LI X G, LIU H Z, et al. Intelligent real-time identification technology of stratum characteristics during slurry TBM tunneling [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 139: 105216.
- [14] 周小雄. 基于渣片形成机理与特征分析的 TBM 智能掘进研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2021.  
ZHOU Xiaoxiong. Study on TBM intelligent tunneling based on the formation mechanism and characteristic analysis of rock chips [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [15] 郑申, 龚秋明, 谢兴飞, 等. TBM 滚刀载荷传感器研制[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2022, 30(6): 1563.  
ZHENG Shen, GONG Qiuming, XIE Xingfei, et al. Development of a sensor for TBM disc cutter force measurement [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022, 30(6): 1563.
- [16] 杨天鸿, 于庆磊, 陈仕阔, 等. 范各庄煤矿砂岩岩体结构数字识别及参数表征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009 (12): 8.  
YANG Tianhong, YU Qinglei, CHEN Shikuo, et al. Rock mass structure digital recognition and hydro-mechanical parameters characterization of sandstone in Fanggezhuang coal mine [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009 (12): 8.
- [17] 徐帅, 张驰, 安龙, 等. Sirovision 节理岩体遥测系统误差分析与修正方法[J]. *金属矿山*, 2015 (8): 110.  
XU Shuai, ZHANG Chi, AN Long, et al. Error analysis and correction method of sirovision telemetry system of jointed rock mass [J]. *Metal Mine*, 2015 (8): 110.
- [18] WU N, LIANG Z Z, ZHANG Z H, et al. Development and verification of three-dimensional equivalent discrete fracture network modelling based on the finite element method [J]. *Engineering Geology*, 2022, 306: 106759.
- [19] 李术才, 刘洪亮, 李利平, 等. 基于数码图像的掌子面岩体结构量化表征方法及工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(1): 1.  
LI Shucai, LIU Hongliang, LI Liping, et al. A quantitative method for rock structure at working faces of tunnels based on digital images and its application [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(1): 1.
- [20] 吴顺川, 孙贝贝, 吴金, 等. 双像解译的结构面迹线产状测量方法[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(1): 127.  
WU Shunchuan, SUN Beibei, WU Jin, et al. Measurement method of discontinuity trace occurrence based on double image interpretation [J]. *Mining Research and Development*. 2023, 43(1): 127.
- [21] 冷彪, 张毅, 杨辉, 等. 隧道掌子面岩体裂隙快速识别方法[J]. *西南交通大学学报*, 2021, 56(2): 246.  
LENG Biao, ZHANG Yi, YANG Hui, et al. Rapid recognition of rock mass fractures in tunnel faces [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2021, 56(2): 246.
- [22] CHEN J Y, YANG T J, ZHANG D M, et al. Deep learning based classification of rock structure of tunnel face [J]. *Geoscience Frontiers*, 2021, 12(1): 395.
- [23] 李轶惠, 许振浩, 潘东东, 等. 基于数字图像的隧道岩体裂隙智能识别与参数提取方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2023, 31(6): 1427.  
LI Yihui, XU Zhenhao, PAN Dongdong, et al. An intelligent identification and parameter extraction method for rock fractures based on digital images [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2023, 31(6): 1427.
- [24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 外壳防护等级(IP 代码): GB/T4208—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 4.  
General administration of quality supervision, inspection and quarantine of the People's Republic of China. Degrees of protection provided by enclosure (IPcode): GB/T4208-2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 4.
- [25] HUO J Z, WU H Y, YANG J, et al. Multi-directional coupling dynamic characteristics analysis of TBM cutterhead system based on tunnelling field test [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(8): 3043.
- [26] HUANG X, LIU Q, LIU H, et al. Development and in-situ application of a real-time monitoring system for the interaction between TBM and surrounding rock [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 187.