

基于探地雷达的可吸附式智能检测机器人 装备应用

周志峰¹, 夏得胜²

¹中国铁路郑州局集团有限公司郑州高铁基础设施段, 河南 郑州

²华东交大科创产业发展有限公司, 江西 南昌

收稿日期: 2024年12月9日; 录用日期: 2025年1月17日; 发布日期: 2025年1月29日

摘要

随着隧道工程质量事故的频发, 确保隧道安全成为工程建设中的关键任务。传统的隧道质量检测方法, 存在高空作业风险、检测效率低、数据可靠性差等问题, 亟需一种更加高效、安全的检测手段。本文提出了基于探地雷达的可吸附式智能检测机器人。系统设计了两种飞行模式(飞行和贴墙检测), 具备自动避障功能, 适应复杂工程环境。检测数据通过WIFI实时回传至主机进行算法处理, 精准分析隐患类型和位置, 并通过数据存储与回放功能进行统一管理。实验结果表明, 该系统能够显著提高检测效率、保障工程安全并降低成本, 为铁路隧道等地下工程提供了一种创新的质量检测解决方案。

关键词

无人机, 探地雷达, 混凝土质量检测

Application of Ground Penetrating Radar-Based Adsorbable Intelligent Detection Robot Equipment

Zhifeng Zhou¹, Desheng Xia²

¹Zhengzhou High-Speed Railway Infrastructure Section, China Railway Zhengzhou Bureau Group Co., Ltd.,
Zhengzhou Henan

²East China Jiao Tong University Science and Technology Industrial Development Co., Ltd., Nanchang Jiangxi

Received: Dec. 9th, 2024; accepted: Jan. 17th, 2025; published: Jan. 29th, 2025

文章引用: 周志峰, 夏得胜. 基于探地雷达的可吸附式智能检测机器人装备应用[J]. 人工智能与机器人研究, 2025, 14(1): 209-216. DOI: [10.12677/airr.2025.141020](https://doi.org/10.12677/airr.2025.141020)

Abstract

With the frequent occurrence of tunnel engineering quality accidents, ensuring tunnel safety has become a critical task in engineering construction. Traditional tunnel quality inspection methods face issues such as high-altitude work risks, low detection efficiency, and poor data reliability, necessitating more efficient and safer detection approaches. This paper proposes a ground penetrating radar-based adsorbable intelligent detection robot. The system is designed with two flight modes (flying and wall-adhering detection) and features automatic obstacle avoidance, making it adaptable to complex engineering environments. Detection data is transmitted in real-time to the host via WiFi for algorithmic processing, enabling accurate analysis of hazard types and locations. The system also offers data storage and playback functionalities for unified management. Experimental results demonstrate that this system significantly improves detection efficiency, ensures engineering safety, and reduces costs, providing an innovative quality inspection solution for underground projects such as railway tunnels.

Keywords

Drone, Ground Penetrating Radar, Concrete Quality Inspection

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

21世纪以来，隧道及地下工程作为基础设施建设的关键组成部分，取得了飞速的发展，尤其是在公路、铁路、地铁等领域，隧道数量和总里程迅速增加[1]。然而，隧道工程在建造和运营过程中面临的安全问题依然严峻，如何在隧道建设与运营的各个阶段实现“建好、管好、养好”，并有效解决相关痛点与难点问题，已经成为未来隧道工程科技创新的核心方向[2]。

国内在建铁路隧道衬砌质量无损检测过程中普遍依托现场装载机焊架子、购买或租赁升降机、从现场抽调工人完成混凝土质量检测工作，检测现场阻碍交通、影响在建工作面施工工序等问题依然普遍[3]。

近年来出现了运用检测专用车对隧道进行检测的方法，但检测专用车成本极高，普及十分困难；检测专用车对路面平整度要求极高，导致检测数据质量差、检测效率低且安全性差，检测时需要封闭交通且雷达设备连接线路较多，成本高、精度低，不易推广[4]。

针对上述隧道质量检测瓶颈问题，结合“新基建”背景，迫切需要应用互联网、大数据、人工智能等先进技术，开发一套高效、自动化的隧道质量检测装备。基于探地雷达的可吸附式智能检测机器人，将为隧道衬砌质量控制提供更为智能化和高效的解决方案。

瑞典 MALA 公司[5] (MALA GEOSCIENCE AB) ImpulseRadar 基于实时采样(RTS)技术的多通道和阵列式 GPR/HDR 雷达的尖端知识，采用 RTS 技术的数字双频探地雷达系统，采集软件基于安卓系统，采用 RTS 和 HDR (UWB)技术，产品不需要独立主机，数据采用无线传输可实现大于 130 km/h (5 cm 道间距)的高速数据采集。但对路面或隧道衬砌的平整度要求较高。如果隧道或检测路径的表面不平整(例如存在大范围的裂缝、起伏等)，会导致信号反射不稳定，从而降低检测精度。尤其在老旧或维护不善的隧道中，设备可能无法获得准确的结果。

美国 GSSI 公司生产的 SIR-4000 型地质透视仪[6], 达到 24 位 A/D 转换、32 位数据存储、800 kHz 发射速率, 这些指标可以大大增强接收较弱信号的能力、有效提高探测的分辨率, 携带快速三维成像软件、交互式三维解释软件, 但 SIR-4000 型地质透视仪采用高精度传感器和先进的处理技术, 其设备和配套系统的购买成本较高。这使得它在一些预算有限的项目中不易普及。

辛国亮[7], 中国电波所工程师基于先进的 WIFI 通信产品和 5G 通信模块, 网络通信协议通过嵌入式 MicroBlaze 软核实现, 内部采用基于 LwIP 开发的 TCP/IP 协议栈, 在满足 UDP、TCP 通信协议前提下, 尽量减少对硬件资源的消耗, 实现 100~200 米之间的远端无线控制及数据传输功能。但在复杂的地下或隧道环境中, 信号传输可能会受到墙壁、钢筋、混凝土等物质的屏蔽, 导致信号衰减严重。此外, 地下环境中的电磁干扰和多路径效应可能影响定位的稳定性。

对此, 本文将深入研究基于探地雷达的可吸附式智能检测机器人, 以克服传统检测设备对路面或隧道衬砌平整度要求较高的问题。引入激光雷达 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 智能化定位技术与 GPS/INS 紧耦合组合导航算法, 旨在通过两项技术的有机结合, 突破传统定位技术在复杂隧道环境中的局限性。借助这两种技术, 检测机器人将能够实现更加精准、高效地定位与导航, 从而显著提升其在复杂隧道环境中的适应性与检测性能, 推动隧道质量检测技术的发展与应用[8]。

2. 基于探地雷达的可吸附式智能检测机器人研究

本研究提出了一种基于探地雷达(GPR)和先进导航技术的可吸附式智能检测机器人装备。该设备设计理念为雷达天线能够紧贴隧道衬砌表面, 并沿着预定测线位置进行直线前进, 从而实现对隧道衬砌的全面质量检测。

2.1. 激光雷达 SLAM 智能化定位技术

为解决隧道内环境复杂、空间狭小等问题, 本研究引入激光雷达 SLAM 技术进行智能化定位与路径规划。SLAM 技术通过实时获取激光点云数据, 构建隧道内的三维环境地图, 并实现设备的定位与姿态估计。在此基础上, SLAM 能够提供连续的定位信息, 使设备能够在隧道内自主导航, 并沿着既定路径进行高效地探测。

具体而言, 激光雷达通过激光扫描获取隧道墙面及衬砌表面的三维点云数据, SLAM 算法通过处理这些数据, 实时估算设备的位置信息与姿态(包括方向、俯仰角等), 同时构建出隧道环境的地图[9]。使用激光雷达开展机器人活动环境轮廓信息高精度过程中激光雷达的三角测距原理如图 1 所示。

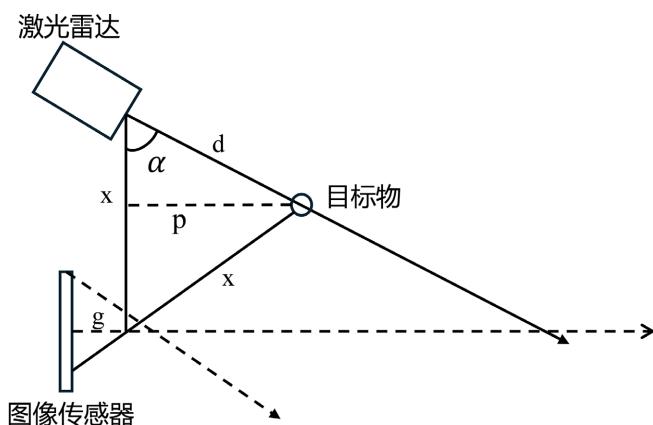


Figure 1. Principle diagram of LiDAR distance measurement
图 1. 激光雷达测距原理图

在激光雷达测距过程中, 目标物与激光之间的距离用 d 表示, 目标物与图像传感器元件之间的成像边缘距离用 x 表示, 镜头焦距用 g 表示。根据这些确定的参数, 计算目标物与激光雷达之间的距离, 结果如以下公式所示[10]:

$$d = \frac{gz}{x \sin \alpha} \quad (1)$$

式中, 激光雷达与图像传感器之间的距离表述成 z 形式, 激光雷达监测夹角表述成 α 形式。根据上述计算结果, 获取激光雷达监测下的机器人实际活动环境轮廓信息, 输出结果如下式所示:

$$s_i = d_i * \varphi_i \quad (2)$$

式中, 第 i 个目标被测点与激光雷达之间的距离描述成 d ; 被测点的对应角度描述成 φ_i 。

在实际应用中, 图像传感器的成像边缘距离与目标物的距离有一定的几何关系, 而镜头的焦距则影响图像的放大倍数, 进而影响测量精度。通过这三者之间的关系, 准确地计算出目标物与激光雷达之间的距离。确保在不同的环境和配置条件下, 能够准确获取测距数据。通过将这些目标点的距离和角度信息综合分析, 激光雷达可以输出机器人活动环境的轮廓信息, 帮助机器人在环境中进行定位。

基于上述获取的自主机器人移动环境轮廓信息, 构建 SLAM 图。首先, 通过控制输入进行机器人的状态估计, 然后利用激光雷达采集的环境信息进行特征提取和数据关联, 更新环境中的路标位置。最后, 通过修正状态估计值, 完成机器人的位姿和路径更新, 从而生成更新后的地图。

通过上述方法, 设备能够在复杂环境中实现高精度的路径跟踪和定位, 主要依托图 2 所示的算法框架, 结合激光雷达 SLAM (同步定位与建图)技术进行智能化定位。

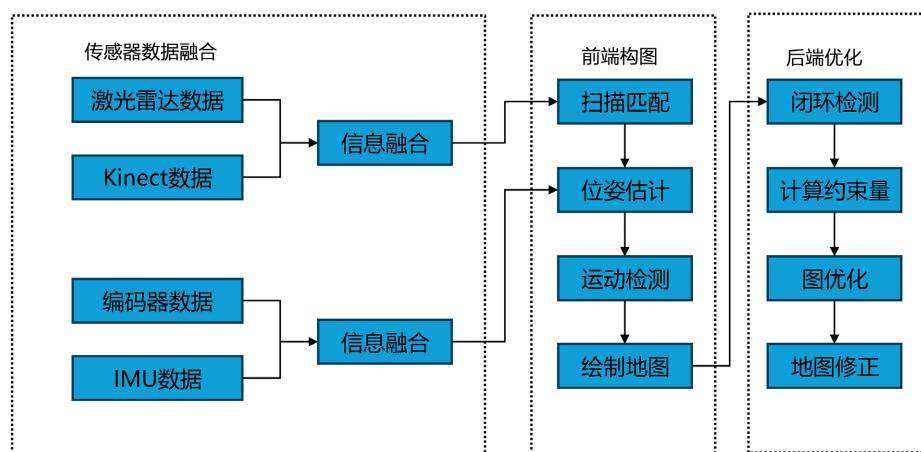


Figure 2. SLAM algorithm framework
图 2. SLAM 算法框架

2.2. GPS/INS 紧耦合组合导航算法技术

为进一步提升设备的定位精度, 结合了 GPS 与惯性导航系统(INS)的紧耦合组合导航算法[6]。GPS 提供全局定位参考, 而 INS 则通过加速度计和陀螺仪对设备的加速度和角速度进行实时测量, 进而估算出设备的速度、位置与姿态。紧耦合算法将 GPS 和 INS 的数据进行融合, 综合两者的优点, 弥补 GPS 在隧道内信号弱或失效时的不足。

INS/GPS 紧耦合系统需要考虑载体运动的位置、速度和加速度等信息, 为全面反映载体运动状态的变化, 基于惯性坐标系得到 INS/GPS 紧耦合系统的状态向量为[11]:

$$X = (\delta R \ \delta V \ \delta \varphi \ \delta \varepsilon \ \delta \alpha)^T \quad (3)$$

其中 δR 为位置误差, δV 为速度误差, $\delta \varphi$ 为平台失准角, $\delta \varepsilon$ 为陀螺仪零偏, $\delta \alpha$ 为加速度计零偏。这些误差因素一起构成了 INS/GPS 系统的状态向量, 反映了载体在各个方面的运动状态变化, 帮助进行更精确的状态估计。

$$\dot{X}^e(t) = \begin{bmatrix} \delta R^e \\ \delta V^e \\ \delta \varphi^e \\ \delta \varepsilon^e \\ \delta \alpha^e \end{bmatrix} = F_{15 \times 15} * X = \begin{bmatrix} \delta V^e \\ -F^e \delta \varphi^e + N^e \delta R^e - 2\omega_{ie}^e \delta V^e + C_b^e \delta \alpha^b \\ -\omega_{ie}^e \delta \varphi^e + C_b^e \delta \varepsilon^b \\ M \\ N \end{bmatrix} \quad (4)$$

在 INS/GPS 紧耦合系统中, 载体的运动状态不仅与惯性坐标系(INS 系统中的坐标系)相关, 还需要与地球坐标系(GPS 坐标系)进行转换。式中 F^e 是比力向量的反对称矩阵, N^e 是引力系数矩阵, ω_{ie}^e 是地球系相对于惯性系的角速度在地球系的投影, C_b^e 代表载体系到惯体系的方向余弦矩阵, M 和 N 为一阶马尔可夫过程的常量表示。

将式(4)整理并离散化可写成:

$$\dot{X}^e(k+1) = \Phi_{(15 \times 15)} X^e(k) + w(k) \quad (5)$$

式中, Φ 为系统转移矩阵, W 为系统噪声矩阵。离散化后的状态转移方程有助于以离散时间步长的方式计算系统状态, 使得在实际操作中可以根据测量和估计结果逐步更新系统状态。

伪距与多普勒频移测量残余为 GPS 接收模块得到的伪距、多普勒频移实际测量值与依靠惯性器件计算的伪距、多普勒频移预测值相减后得到的结果:

$$\delta p^i = e_1^i \delta x + e_2^i \delta y + e_3^i \delta z - \delta t_u - \varepsilon_p^i \quad (6)$$

$$\delta \dot{p}^i = e_1^i \delta \dot{x} + e_2^i \delta \dot{y} + e_3^i \delta \dot{z} - \delta t_u - \varepsilon_p^i \quad (7)$$

式中 e_1^i 、 e_2^i 、 e_3^i 为卫星相对于用户位置单位矢量的 x 、 y 、 z 轴分量。这些残余可以帮助进一步校正 GPS 系统的测量数据, 减小误差, 优化位置和速度的估计。

为消除本地时钟与卫星时钟的时差, 将相对于不同卫星得到的伪距与伪距率测量残余相减, 可以得到伪距与伪距率星间差:

$$\delta p^{ij} = \delta p^i - \delta p^j \quad (8)$$

$$\delta \dot{p}^{ij} = \delta \dot{p}^i - \delta \dot{p}^j \quad (9)$$

由式(8)、(9)可得量程公式:

$$Z(k) = A_{6 \times 15} X^e(k) + v(k) \quad (10)$$

式中 A 为量程矩阵, v 为测量噪声。通过这种方式, 系统能够对伪距和多普勒频移等测量进行精确估计, 并通过调整系统噪声来优化导航精度。

基于上述公式(3)~(10)展示了 INS/GPS 紧耦合系统在动态环境中如何通过不同的数学模型和算法进行精确的状态估计。通过对伪距、多普勒频移、星间差等测量数据的处理, 系统能够有效地校正误差, 提高定位精度, 并在运动过程中不断更新状态向量, 从而为复杂环境中的精确导航提供支持。

最后, 本文通过设计 GPS/INS 紧耦合组合导航系统的实现方案, 提出了一种闭环反馈校正方式, 利用常规卡尔曼滤波器进行组合系统的数据融合。紧耦合导航系统将 GPS 系统与惯性导航系统(INS)相互

结合, 通过实时数据的相互补充与校正, 显著提高了系统的导航精度和稳定性。相较于传统的松耦合系统, 紧耦合系统能够有效减少由信号中断或干扰引起的定位误差, 增强了在复杂环境下的导航能力。

紧耦合系统的优势不仅体现在提高导航精度上, 还表现在其较强的抗干扰能力和对多变环境的适应性。在隧道、城市高楼密集区等 GPS 信号难以覆盖的场所, 紧耦合组合导航系统能够提供持续稳定的定位服务, 为高精度、高可靠的智能检测机器人系统奠定了技术基础。如图 3 所示。

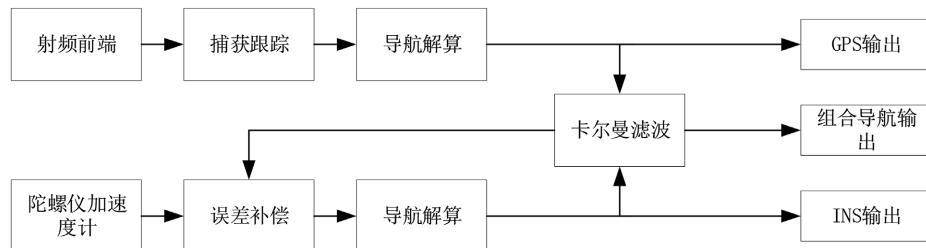


Figure 3. Principle diagram of GPS/INS integrated navigation
图 3. GPS/INS 组合导航原理图

3. 工程实际应用

结合实际环境, 下文将展示基于探地雷达的可吸附式智能检测机器人的实际应用性。如图 4 所示, 以郑州铁路局某隧道为例本文将该智能检测机器人应用于隧道的整体质量检测。该机器人利用探地雷达进行地下结构成像, 能够对隧道结构进行详细、精准地评估, 为隧道的完整性提供重要数据。通过实际应用场景的展示, 凸显了该检测系统在复杂动态环境中的适应能力, 并且通过自主导航和实时数据传输等先进技术的整合, 进一步提升了隧道检测过程的安全性、效率和成本效益, 具有显著的实际应用价值。



Figure 4. Tunnel inspection site
图 4. 某隧道检测现场

图 5 展示了基于探地雷达的可吸附式智能检测机器人数据处理软件界面, 图像中的黑白条纹代表电磁波反射信号。信号的振幅、频率和连贯性可用于判断介质的电性差异。强反射波为高对比黑白条纹, 通常出现在衬砌与空洞之间的界面。弱反射波为低对比条纹, 可能对应密实的衬砌材料或连续介质。图中红色框标注区域出现了明显的反射信号变化, 表现为强反射波的特征, 初步判定为脱空病害。脱空病害是指在隧道的拱顶结构中, 衬砌层与周围岩体之间出现空隙或脱空现象。这种病害可能影响隧道的稳定性和安全性, 严重时可能导致塌方或其他结构性损伤。

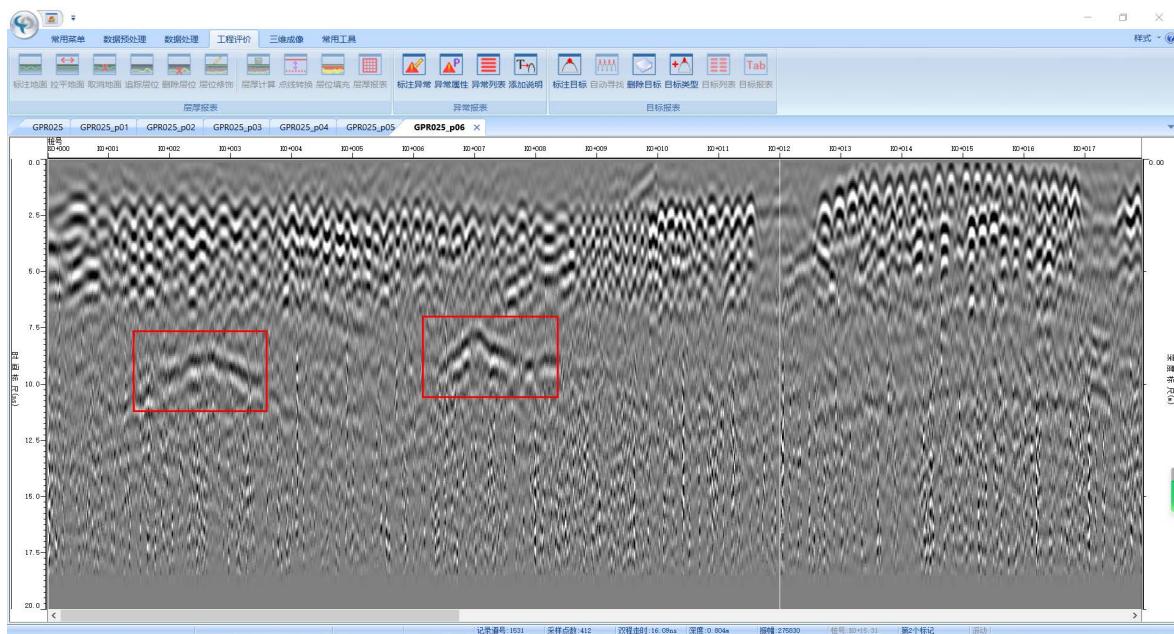


Figure 5. Data processing software interface of the ground penetrating radar-based adsorptive intelligent detection robot
图 5. 基于探地雷达的可吸附式智能检测机器人数据处理软件界面

在病害位置上方显示病害的准确里程信息，侧边表示电磁波传播的时间及等效探测的深度。这些信息是通过高精度的导航与定位技术结合探地雷达检测结果共同实现的。具体而言，病害的里程信息由激光雷达 SLAM 技术与 GPS/INS 紧耦合组合导航系统提供的精确位置信息相融合，确保检测机器人在隧道内移动时能够实时记录病害的空间位置，并将其精准映射到实际的里程坐标中。同时，探地雷达的数据处理算法进一步优化了病害位置的探测精度，通过对电磁波信号的传播时间和反射强度进行分析，明确病害的深度和范围，从而为里程标定提供可靠依据。这种多技术协同的病害里程信息显示方式，不仅能够精确定位病害位置，还能为后续病害的维修和评估工作提供高效且详尽的基础数据支持。

实践表明，隧道智能检测机器人在设计上合理，软硬件性能稳定且可靠，技术成熟且适应性强，图像采集精度高，显著提高了检测效率并大幅降低了时间和成本。与人工检测相比，利用数据中心生成的检测报告，能直观呈现隧道的病害情况，具有更快的病害识别速度和更高的准确性，便于隧道运营管理单位制定有效的养护计划。

4. 结语

本文提出的基于探地雷达的可吸附式检测装备应用，针对铁路隧道衬砌质量检测的实际需求，进行了针对性的实地应用研究。该设备通过高效、精准的检测技术，在隧道内复杂环境中展现出良好的适应性，不仅提高了检测的自动化水平，还有效降低了人工成本与施工影响。在实际铁路隧道环境中，设备能够实时、全面地检测混凝土衬砌的质量缺陷，确保了工程的安全性和可靠性。与传统检测方法相比，该系统具有更高的灵活性和精准度，尤其是在狭小和复杂的隧道空间中，能够突破传统检测设备的限制，提供更为高效的解决方案。未来，随着技术的不断发展与优化，这种基于探地雷达的智能化检测装备将能够广泛应用于铁路隧道及其他地下工程领域，推动质量检测的智能化、自动化水平迈向新台阶。

基金项目

中国铁路郑州局集团有限公司郑州高铁基础设施段科技研究开发课题组。

中国铁路郑州局集团有限公司科技研究开发项目(编号 2024G19)。

参考文献

- [1] 方平洋, 卢喜, 张希龙, 等. 智能检测机器人在隧道施工质量控制中的应用[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(19): 18-21.
- [2] 马参考, 荆松, 闻武华. 长大隧道数智化检测方法与装备发展及展望[J]. 电子元器件与信息技术, 2024, 8(9): 121-124.
- [3] 赵洋, 郭甜, 尚英强, 等. 电力隧道巡检机器人关键技术研究[J]. 机电信息, 2024(8): 78-81.
- [4] 张伟. 机器人在隧道养护检测中的应用[J]. 四川水泥, 2024(2): 212-213, 216.
- [5] 陈家博. 公路隧道不良地质体探地雷达图像解译分析[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湘潭大学, 2012.
- [6] Herzog, M., Schmitt, A. and Bubenzer, O. (2024) Reconstructing Star Dune Dynamics Using Ground Penetrating Radar—How Movement Shapes Complex Surface Structures. *Aeolian Research*, **67**, Article 100920.
<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2024.100920>
- [7] 辛国亮, 孙学超, 等. 实时三维探地雷达关键技术的设计与实现[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 194-200.
- [8] 张剑波. 基于激光雷达与 IMU 的电缆隧道检测机器人定位与建图方法研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [9] 石少杰. 基于模糊滑模算法的隧道检测机器人末端控制研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 山东大学, 2023.
- [10] 汤莉莉, 文于华, 周艳玲. 基于激光雷达的自主机器人移动路径跟踪方法[J]. 激光杂志, 2024, 45(10): 204-208.
- [11] 费恒敏, 施琴, 田俊杰. INS/GPS 紧耦合组合导航系统抗差定位算法[J]. 微型机与应用, 2015, 34(7): 20-23, 26.