

# 桥梁小空间梁体腹腔裂缝检测微型机器人系统的开发与应用研究

蒋俞圣 傅长荣<sup>(通讯作者)</sup> 陈俊安 季仁杰

丽水学院 浙江丽水 323000

**[摘要]** 本文概述了狭窄空间视频巡检机器人项目的研究背景和意义,指出了传统检测方法在桥梁小空间裂缝检测中的不足,并强调了微型机器人系统在此环境中的优势。分析了石塘互通主线桥箱室内检测的可行性,并通过案例展示了微型机器人在桥梁检测中的应用效果。详细介绍了桥梁小空间裂缝检测微型机器人系统的设计和开发,包括系统架构、关键技术、算法优化等。该系统集成了高清摄像头、传感器、图像处理算法等技术,实现了高精度、高效率的裂缝检测。实验结果证明,系统能显著提高检测准确性和效率,支持桥梁安全评估与维护。最后,总结了微型机器人在桥梁检测领域的应用前景与挑战,并提出了未来研究方向。

**[关键词]** 桥梁检测; 裂缝检测; 微型机器人系统; 小空间梁体腹腔

## 1. 引言

桥梁作为交通体系的关键组成部分,承担着连接各个地区的重任,其安全性和稳定性直接关系到交通运输的顺畅和人民生命财产的安全<sup>[1]</sup>。随着桥梁使用年限的增长和自然环境的侵蚀,桥梁结构不可避免地会出现裂缝等损伤。这些损伤如果不及时检测并修复,将对桥梁的承载能力和耐久性产生严重影响,甚至可能引发严重的交通事故。因此,桥梁裂缝检测对于保障桥梁安全、延长使用寿命具有重要意义<sup>[2]</sup>。桥梁裂缝检测是桥梁养护管理工作中的重要环节。通过裂缝检测,可以及时发现桥梁结构中的损伤情况,评估桥梁的承载能力和耐久性,为桥梁的维修和加固提供科学依据。这不仅可以避免桥梁因损伤累积而突然倒塌,还可以延长桥梁的使用寿命,降低维修成本,提高交通运输效率<sup>[3]</sup>。传统的桥梁裂缝检测方法主要包括人工巡检、超声波检测、红外热像检测等<sup>[4]</sup>。这些检测方法在桥梁小空间梁体腹腔检测中有限制。例如,人工巡检耗时耗力,难以发现狭小空间裂缝;超声波和红外热像检测精度高,但设备复杂,操作难,空间应用不灵活。<sup>[5][6]</sup>因此,迫切需要一种新型的检测方法来解决桥梁小空间梁体腹腔裂缝检测中的难题<sup>[7]</sup>。本研究提出一种基于微型机器人系统的解决方案,用于桥梁小空间梁体腹腔裂缝检测。该系统体积小、灵活性高、检测精度高,能进入狭小空间进行检测,并实时传输图像和数据。它支持裂缝识别和分析,实现远程控制和自动化检测,降低检测人员劳动强度和风险。研究该系统对提高桥梁裂缝检测效率和准确性具有重要意义。<sup>[7][8]</sup>

## 2. 桥梁小空间梁体腹腔裂缝检测需求分析

### 2.1 桥梁概况

本实验研究的桥梁为石塘互通主线桥。此桥位于杭州绕城高速公路北段,跨越320国道,建成于2001年12月,中心桩号为K103+147.29,本桥分左右线,桥面设2%的横坡,最大纵坡5.35%。左右幅共计70跨。上部结构:单箱(3-5

室)钢筋混凝土等高度连续箱梁。

### 2.2 桥梁裂缝的类型

本桥主要病害箱梁底板横向超限裂缝,腹板竖向、斜向超限裂缝及墩顶横向裂缝。其中墩顶横向裂缝由养护技术人员对本桥墩顶沥青铺装局部铣刨开挖,检测出20m跨径的墩顶存在细小横向裂缝。(Dmax=0.15mm)。

### 2.3 箱室内检测的必要性

通过对箱体内部的全面测量,可以清晰地了解桥梁箱室内的裂缝分布情况,包括裂缝的位置、走向以及可能的宽度。这些信息对于准确评估桥梁的病害程度至关重要,有助于为后续的加固和维护工作提供科学依据。箱体内部的测量数据能够直接反映桥梁内部的实际情况,这对于制定针对性的加固方案至关重要。

### 2.4 检测难点与挑战

桥梁检测通道狭窄,限制了标准设备的使用,需微型化设计检测设备。箱梁内部障碍物、昏暗光线、不平整地面和精确测量需求,都提高了检测技术的要求。操作检测设备在复杂环境中的挑战性,以及大量数据的高效处理和分析,都是必须面对的问题。同时,确保检测人员安全和设备防护也是关键。这些因素导致箱体内检测成本高、周期长。

高精装备检测因成本和专业要求限制,主要用于大型项目,不适用于日常桥梁巡检。视频机器人平台成本较低,操作简单,适合日常使用。市场上视频机器人平台分为两类:全向波纹管式和大型轮式机器人。全向波纹管式系统不适用于箱梁结构桥梁检测,而大型轮式机器人因体积限制也不适用。目前没有适合本项目检测环境的机器人平台。本项目开发了一套微型机器人平台,通过箱梁排水口进行作业。它结合视频、无线测距和机器人控制技术,连续采集箱梁内壁视频,检测并标定裂缝位置,生成检测报告,以供日常巡检和维护使用。

解决的关键技术问题:

(1) 机器人系统微型化。箱梁无专用养护通道, 需利用直径 10 厘米排气孔作为机器人平台进出口。机器人平台装备须微型化设计, 横截面小于 7 厘米正方形。

(2) 机器人装备的动力与体积之间的最佳能效比。考虑到体积限制, 动力装置需满足机器人自重、装备和结构体重量的移动, 同时应对箱梁内地面碎石等障碍物的跨越和避让。

(3) 在微光环境下的视频捕捉和高清图像存取处理装备微型化技术。

(4) 机器人平台的供电、通讯、控制和裂缝位置标定技术;

(5) 机器人平台全套装备的回收技术。

### 3. 微型机器人系统的设计与开发

#### 3.1 系统总体设计方案

项目使用轮式机器人作为检测平台。平台有两种控制方案: 4D 差速控制和 2D 转向控制。选择方案需现场评估。4D 差速控制提供稳定移动和高精度控制, 但对起伏路面适应性差。2D 转向控制使用大型直流减速电机, 提高底盘离地高度, 适合复杂地形, 但转向精度和操控性较差。本项目同时各设计一套基于 4D 和 2D 平台的机器人检测平台, 通过实地测试来最终确定平台方案。

在微光环境下, 由于箱梁入口尺寸限制, 无法使用常规微光夜视摄像机。本项目在机器人前端设计小型云台搭载微光摄像机模块, 单片机解析视频数据并封装, 通过数据接口实时传输图像至控制平台显示。同时, 机器人配备 2 盏 1W 草帽 LED 辅助照明, 云台带动摄像机模块实现 360 度摄像和拍照。

裂缝位置通过超带宽无线测距技术标定, 车载模块与基准天线实时传输数据, 控制平台计算信号强度和延时, 实现厘米级精度的实时相对位置测量。

由于箱梁内部环境复杂且空间狭窄, 无线信号易受干扰, 影响指令准确性和实时性。因此, 本项目采用 RS485 连接方式, 控制平台通过私有协议与机器人平台交换视频信号和控制指令。

本项目研究了两种机器人移动平台方案

#### (1) 4WD 机器人平台

该型机器人平台 4 轮独立驱动, 可提供较好的操控性, 但鉴于微型电机的体积限制, 无法提供大扭矩, 如遇箱梁内部地表起伏较大时, 容易卡住底盘。

#### (2) 单后驱+舵机转向式机器人平台

这款机器人平台由一个双轴电机驱动, 电机尺寸较大, 提供 stronger 的扭矩和动力。节省空间允许装配直径约 60mm 的车轮, 底盘提升约 1cm, 适应起伏地面能力增强。不过, 仅靠一个舵机控制转向, 操控性和精度有所不足。

经过两种方案的对比, 单后驱+舵机转向式机器人平台要优于 4WD 机器人平台, 所以本研究以方案二来设计机器人平台。

#### 3.2 视频系统设计

视频系统主要设计由转向控制舵机和星光级摄像头组成。转向舵机配合机器人移动平台可实现水平 360 度, 垂直

120 度左右的转向控制, 可满足箱梁体内部的视频观测需求。星光级支持低照度 0.0001Lux 下的视频采集和录制, 配合机器人移动平台本身搭载的 2 颗大功率照明用 LED 灯珠, 基本可满足箱梁体内部空间的清晰摄像需求。

测距系统主要由超带宽 UWB 定位系统组成, 该系统可支持双向测距或 TDOA 定位, 开阔空间内定位精度可达 10cm, 数据传输率高达 6.8Mbps。UWB 定位技术具备系统容量大, 传输速度快、发射功率低、多径分辨率高、系统保密性好、定位精度高、穿透能力强等显著优势。机器人移动平台上搭载一块 UWB 标签, 另一段在通道口设立一个接收标签, 即可快速实现测距标定。

上位机软件实现操作系统, 支持双屏同步显示箱梁体内部情况及实时视频录制。可手动拍照裂缝并标定距离坐标。操控通过 485 电缆通讯, 使用控制方向盘逻辑, 易于操作。

系统供电采用前后双级独立供电, 机器人平台由拖拽电缆供电, 视频系统由锂电池供电。此供电方式确保机器人工作续航和视频信号不受电机启停干扰。

#### 3.3 关键结构设计与实施方案

为适应直径约 10 厘米的排水管环境, 其中杂物可能妨碍机器人前进和观察, 我们设计了带有延长臂和可调节角度摄像组件的机器人。延长臂前端的摄像机可调整视角, 尾部的挡板则用于推开杂物, 保护转向轮。附上设计工图:

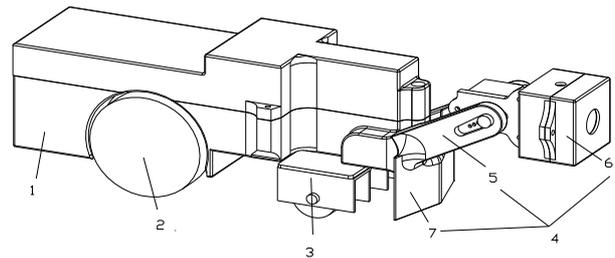


图 1 视频巡检的结构示意图

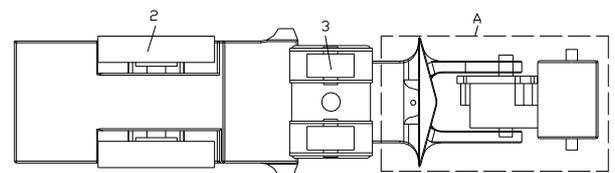


图 2 视频巡检机器人的仰视图

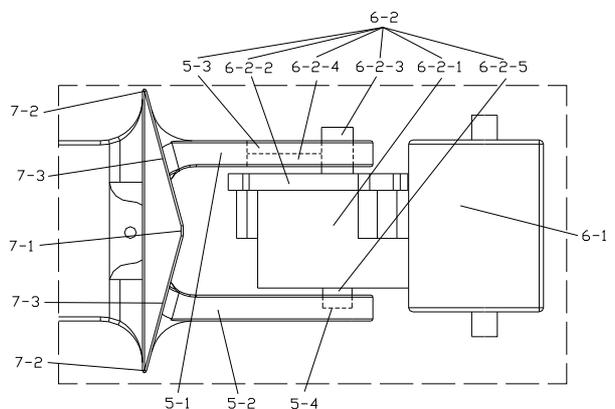


图 3 局部放大图 A。

标记说明: 机壳 1、驱动轮 2、转向轮 3、巡检装置 4、延长臂 5、第一臂体 5-1、第二臂体 5-2、卡槽 5-3、旋转孔 5-4、摄像组件 6、摄像头 6-1、连接件 6-2、安装壳 6-2-1、盖板 6-2-2、电机 6-2-3、卡条 6-2-4、转轴 6-2-5、挡板 7、突起部 7-1、起始部 7-2、引导面 7-3。

#### 4. 系统测试和优化

##### 4.1 测试环境与设备

测试环境分室内平坦地面、室外水泥路面、桥梁箱体目标平面三种不同的地形进行测试。

环境温度为 25℃, 湿度 40%~60%, 无风。

测试平台为最新设计的 2WD+舵机架构的轮式机器人平台, 搭载星光级数字摄像头, 红外激光测距仪, UWB 超宽带测距标签。设备控制方式为 RS485 总线通讯, 通讯线缆总长度为 30 米, 测试平台总负重约 3.5kg。

##### 4.2 检测结果与分析

运动性能: 机器人平台最高速度可达 0.12m/s, 平均速度 0.1m/s。转弯时, 最小半径 0.3m, 速度略有下降。测试显示, 室外水泥路速度最快, 其次是室内平坦地面, 桥梁箱体最慢。

定位精度: 激光测距仪在 10 米内测速和数据最精准, 精度达 0.1 毫米。性能排序为: 桥梁箱体目标平面、室内平坦地面、室外水泥路面。

负载能力: 机器人平台设计负载为 10kg, 超重会降低运动速度和电池续航, 且转向舵机会抖动。负载主要由检测电缆重量决定, 电缆越长越粗, 负载越重。测试使用 30 米长的 rvvp 6\*0.3 铜质线缆, 重约 2.1kg。机器人拖行 30 米线缆时, 车头上扬, 转向失控; 少于 25 米时, 车头正常但驱动轮打滑; 少于 20 米时, 机器人能正常运行。测试结果表明, 室外水泥路可拖行电缆最长, 其次是桥梁箱体目标平面, 室内平坦地面最短。

续航能力: 配备 18000mAh 电池的机器人平台可连续工作约 4 小时, 续航受负载和路程影响。大负载和频繁启停会缩短工作时间。

##### 4.3 优化

根据测试结果, 优化方向和策略包括:

改进电机控制算法, 使用先进 PID 策略提升机器人转弯稳定性和协调性, 减少电能损耗。确保电能输出均衡稳定, 避免速度波动引起的振荡。在遇到障碍时, 优先避障, 必要时增加扭矩突破。

提升定位测距技术, 通过在桥梁箱体前后排水口设置定位标签, 结合卡尔曼滤波算法, 提高定位精度至±1cm。多次测量激光测距数据, 增强机器人在复杂环境下的测量准确性。

增强负载能力, 定制高扭矩电机, 改变变速箱设计以提高离地距离; 优化电机驱动电路和控制编码反馈系统, 提升工作效率和输出功率。考虑调整供电位置, 减少线缆屏蔽结构, 减轻线缆重量。

提升续航: 使用高电能密度的三元锂电池包, 电池容量翻倍, 续航时间超过 7 小时。设计更轻的外壳材料, 减轻重量, 延长使用时间。优化结构设计, 调整配重, 增强稳定性,

提高抓地力, 减少运动控制的电能损耗。

#### 5. 结论与展望

##### 5.1 研究成果

本项目研发的微型机器人成功地利用梁板的透气孔进入箱梁体内进行视频检测, 能获得箱梁内部外观质量的影像和标定相应位置, 这些技术将对箱梁进行内部无损探测。

##### 5.2 应用前景与展望

该装置可广泛应用于公路桥梁、隧道、管道等狭窄空间的检测和维护领域, 具有广阔的市场前景。随着技术的不断成熟和成本的进一步降低, 该装置有望成为桥梁等基础设施日常巡检的重要工具, 为保障基础设施安全稳定运行提供有力支持。

#### 参考文献

- [1]覃现, 黄铭, 李奇, 等. 桥梁裂缝检测技术研究[J]. 测绘通报, 2024, (S2): 28-31+36. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2024.S206.
  - [2]金龙. 基于迁移学习的桥梁裂缝无损检测方法[J]. 信息记录材料, 2024, 25(08): 83-85. DOI: 10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2024.08.001.
  - [3]孙涛. 基于分割网络和三维重建的混凝土桥梁裂缝检测[D]. 湖南大学, 2023. DOI: 10.27135/d.cnki.ghudu.2023.000263.
  - [4]刘江. 基于摄影测量的桥梁裂缝检测技术研究[D]. 重庆交通大学, 2024. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2024.000780.
  - [5]辛绍强, 张海辉, 于太伏. 道路桥梁智能检测技术研究现状与应用综述[J]. 交通工程, 2024, 24(06): 85-88. DOI: 10.13986/j.cnki.jote.2024.06.014.
  - [6]杜文龙, 常勇, 周东漪. 桥梁检测机器人运动分析与运动规划研究[J]. 机床与液压, 2024, 52(05): 53-57.
  - [7]贾东诺. 桥梁水下结构检测机器人设计研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2024, (15): 52-54. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202415018.
  - [8]黄海新, 王峥, 程寿山, 等. 负压吸附桥梁检测爬壁机器人的本体结构优化设计[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2023, 51(12): 21-33.
- 基金项目: 浙江省交通运输科学研究院重点科研平台开放课题“桥梁小空间梁体腹腔裂缝检测微型机器人系统开发和应用”(编号: 202305G), 丽水学院基金项目“狭窄空间视频巡检机器人技术的研究与应用”(编号: HXB2023113), 丽水市自筹类公益性技术应用研究项目“遂昌县农村山区公路安全智能监测系统研发与应用”(编号: 2022SJC095)
- 作者简介: 蒋俞圣(2004.12月-), 男, 民族: 汉族, 籍贯: 浙江省嘉兴市海宁市, 职称: 学生, 学历: 本科, 研究方向: 机械设计制造及其自动化。
- 通讯作者简介: 傅长荣(1970.08-), 男, 汉族, 籍贯: 浙江省丽水市, 丽水学院, 正高级工程师, 本科, 主要从事道桥工程研究。