

国内外巡检机器人研究进展与未来综述

林祥文, 朱广蕊, 孙 景, 张春锋, 苏 杰

上海市动物无害化处理中心, 上海

收稿日期: 2025年7月30日; 录用日期: 2025年12月31日; 发布日期: 2026年1月9日

摘 要

巡检机器人作为工业4.0时代的重要技术载体, 在智能制造转型中发挥着关键作用。本文通过系统梳理国内外巡检机器人的理论发展脉络, 深入分析其技术演进规律与应用特征。研究表明, 巡检机器人技术正从单一功能向多元智能系统演进, 从独立作业向人机协作转变。文章基于传感器技术、自主导航、数据处理、系统集成等核心技术理论, 对比分析国内外发展差异, 识别技术挑战与发展瓶颈, 预判未来发展趋势。当前巡检机器人在温室农业、电力设备、畜禽养殖、基础设施等领域展现出广阔应用前景, 但在复杂环境适应性、长期自主运行、多技术系统集成等方面仍面临挑战。未来发展将围绕人工智能深度融合、新材料技术应用、跨领域协同创新等方向展开, 为智能制造和智慧城市建设提供重要技术支撑。

关键词

巡检机器人, 技术演进, 理论分析, 发展趋势

Review on Research Progress and Future of Inspection Robot at Home and Abroad

Xiangwen Lin, Guangrui Zhu, Jing Sun, Chunfeng Zhang, Jie Su

Shanghai Municipal Animal Innocuous Treatment Center, Shanghai

Received: July 30, 2025; accepted: December 31, 2025; published: January 9, 2026

Abstract

Inspection robots have emerged as pivotal technological platforms in the Industry 4.0 era, playing a crucial role in the transformation toward intelligent manufacturing. This study systematically examines the theoretical development trajectory of inspection robots both domestically and internationally, conducting an in-depth analysis of their technological evolution patterns and application characteristics. Research findings reveal that inspection robot technology is transitioning from single-function systems toward multi-dimensional intelligent platforms, while simultaneously shifting

文章引用: 林祥文, 朱广蕊, 孙景, 张春锋, 苏杰. 国内外巡检机器人研究进展与未来综述[J]. 人工智能与机器人研究, 2026, 15(1): 146-155. DOI: 10.12677/airr.2026.151015

from independent operations to human-robot collaborative frameworks. Drawing upon core technological theories encompassing sensor technology, autonomous navigation, data processing, and system integration, this research conducts a comparative analysis of developmental disparities between domestic and international approaches. The study identifies prevailing technical challenges and developmental bottlenecks while forecasting future evolutionary trends. Contemporary inspection robots demonstrate substantial application potential across diverse sectors including greenhouse agriculture, electrical equipment maintenance, livestock farming, and infrastructure monitoring. However, significant challenges persist in areas such as complex environment adaptability, long-term autonomous operation capabilities, and multi-technology system integration. Future developments are anticipated to center around the deep integration of artificial intelligence technologies, advanced material applications, and cross-disciplinary collaborative innovation. These advancements position inspection robots as essential technological foundations for both intelligent manufacturing initiatives and smart city construction endeavors.

Keywords

Inspection Robots, Technological Evolution, Theoretical Analysis, Development Trends

Copyright © 2026 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

传统人工巡检方式在现代工业生产中逐渐暴露出效率低下、安全隐患、质量不稳定等固有缺陷。工作人员在高温、高压、有毒等恶劣环境中执行巡检任务，不仅面临安全风险，而且检测结果容易受到个人经验和主观判断的影响。随着工业制造业转型升级步伐加快，传统巡检模式已难以满足现代化生产对精度、效率和安全性的严格要求。巡检机器人技术的兴起为解决这一困境提供了新的路径。作为集成感知、控制和决策功能的智能系统，巡检机器人融合了机器人技术、人工智能、传感器技术、控制理论等多个学科的核心理论。这种技术融合不仅体现了现代科技发展的交叉特征，也反映了从劳动密集型向技术密集型转变的产业发展趋势。当前巡检机器人在电力设备、交通运输、工业制造、农业和养殖业、安防和应急等领域的应用日趋广泛，展现出巨大的市场潜力和社会价值。然而，技术发展过程中仍存在诸多挑战。复杂环境下的感知精度、长期自主运行的稳定性、多机器人协同作业的协调机制等问题亟待解决。国内外在技术路径选择、产业化程度、标准体系建设等方面也存在显著差异，需要深入分析其内在机制和发展规律。基于这一背景，本研究采用理论分析与文献综合相结合的方法，系统梳理巡检机器人的概念体系、技术架构和发展历程，深入分析其核心技术理论和应用特征，对比研究国内外发展现状和技术路径差异，探讨面临的技术挑战和发展瓶颈，预判未来发展趋势和应用前景。通过构建完整的理论分析框架，为巡检机器人技术研究和产业发展提供参考依据。

2. 巡检机器人理论基础与技术架构

2.1. 概念内涵与理论基础

巡检机器人作为现代智能制造体系的重要组成部分，其概念内涵远超传统机器人的范畴。这类智能系统将环境感知、数据处理、决策分析、执行控制等功能有机整合，形成了具备自主性、适应性和智能性的技术载体。与传统的固定式监控设备相比，巡检机器人具备移动能力和主动感知特性，能够在复杂

多变的环境中执行全方位、多角度的检测任务。

巡检机器人的理论基础涵盖了多个学科领域的核心知识体系。机器人学为其提供了运动控制、路径规划、机械设计等基础理论支撑，确保机器人能够在三维空间中灵活移动并精确定位。人工智能技术贡献了知识表示、推理决策、学习优化等智能化能力，使机器人具备了类人的认知和判断功能[1]。传感器技术和信息融合理论保障了环境信息的准确获取和有效处理，为智能决策提供了可靠的数据基础。控制理论和自动化技术确保了系统的稳定运行和精确控制，实现了设计目标和实际性能的有效匹配。

2.2. 技术架构与系统组成

现代巡检机器人的技术架构体现了模块化、层次化、集成化的设计理念。硬件平台构成了系统的物理基础，包括移动底盘、传感器阵列、计算单元、通信设备等核心组件。移动平台根据应用环境的不同采用轮式、履带式、足式或轨道式等多种形式，每种形式都有其特定的适用场景和技术特点。传感器系统作为机器人的“感官”，集成了视觉、听觉、触觉、嗅觉等多种感知模态，为环境理解提供了丰富的信息来源。

软件系统是巡检机器人智能化的核心载体，采用分层架构设计实现了功能的模块化和接口的标准化。感知层负责传感器数据的采集、预处理和特征提取；决策层基于感知信息进行态势分析、任务规划和行为决策；控制层将决策指令转化为具体的执行动作，实现机器人的精确控制[2]。各层次之间通过标准化的数据接口和通信协议实现信息交互，保证了系统的整体协调性和可扩展性。

2.3. 分类体系与应用特征

通信网络构建了巡检机器人与外部环境的信息桥梁，支持与控制中心、其他机器人、监控系统的实时数据交换。无线通信技术的发展为巡检机器人提供了更大的行动自由度，而 5G、物联网等新兴技术的应用进一步增强了通信的可靠性和实时性。边缘计算技术的融入使得部分数据处理任务可以在本地完成，减少了对网络带宽的依赖，提高了系统的响应速度。

根据应用环境和技术特征的不同，巡检机器人呈现出多样化的分类特征。室内巡检机器人主要应用于工厂车间、仓储物流、办公楼宇等相对封闭的环境，对导航精度和避障能力有较高要求。室外巡检机器人则需要应对更加复杂多变的自然环境，在防护等级、环境适应性、续航能力等方面面临更大挑战。轮式平台因其结构简单、成本较低而得到广泛应用，但在复杂地形中的通过性有限。履带式和足式平台虽然成本较高，但在恶劣地形中具有更好的适应性。轨道式平台在特定场景中能够提供高精度的定位和稳定的运行性能[3]。

3. 国内外巡检机器人研究进展对比分析

3.1. 国外研究进展与发展轨迹

3.1.1. 发展历程阶段划分

国外巡检机器人技术发展历程体现了从理论探索到产业应用的清晰脉络。20 世纪 80 年代至 90 年代的起步探索期，欧美发达国家开始关注机器人在特殊环境巡检中的应用潜力，重点开展基础理论研究和关键技术攻关。这一时期的研究主要集中在机器人运动控制、传感器技术、简单的环境感知等方面，技术水平相对初级，应用范围较为有限。

进入技术积累期后，随着计算机技术、传感器技术、人工智能技术的快速发展，巡检机器人在核心技术方面实现了重要突破。机器视觉技术的成熟使得机器人具备了基本的环境理解能力，SLAM 技术的发展解决了未知环境中的自主导航问题，多传感器融合技术提高了感知的准确性和鲁棒性。这一阶段的

技术成果为后续的产业化应用奠定了坚实基础[4]。

3.1.2. 技术路径与创新特色

应用拓展期标志着巡检机器人从实验室走向实际应用的重要转折。电力、石化、核工业等高风险行业对自动化巡检的迫切需求推动了技术的快速产业化。机器人制造商开始推出商业化产品，技术标准和行业规范逐步建立，产业生态初步形成。这一时期的特点是技术与应用的深度融合，产品性能和可靠性得到显著提升。

当前的智能化发展期以人工智能技术的深度融合为主要特征。深度学习算法的应用大幅提升了环境感知和目标识别的精度，强化学习技术增强了机器人的自主决策能力，大数据分析为预测性维护提供了新的手段。云计算和边缘计算的结合优化了计算资源的配置，5G 通信技术的应用改善了实时性和可靠性。

3.1.3. 主要国家技术特色

美国在巡检机器人技术发展中体现了军用技术向民用转化的特色路径。美国国防部门在无人系统、自主导航、环境感知等方面的大量投入为民用巡检机器人技术提供了强大的技术储备。硅谷地区的创新生态为初创企业提供了良好的发展环境，促进了技术创新和商业模式创新的有机结合。美国企业在基础算法、核心器件、系统集成等方面保持着技术领先地位。RP7i 巡诊机器人由“触摸健康”公司研制，是针对远程医疗服务领域开发的创新医疗器械，其身高约为 1.63 米，净重接近 100 公斤，集成了无线宽带通讯模块，高分辨率显示屏，高清摄像头等关键部件，借助计算机系统达成远程操控，具有位置调整，视角切换等功能，医护人员可通过操作手柄开展患者检查，病历记载，生命体征监测(含心率检测，脉搏测量)，影像数据解析等工作，并做到医患双方的即时双向视频交流，目前在美国已有 250 多家医疗机构投入使用，对跨区域医疗协作起到了重要作用。

欧洲在巡检机器人发展中更加注重标准化体系建设和安全性保障。欧盟通过制定严格的技术标准和认证体系，推动了行业的规范化发展。德国在工业 4.0 战略推动下，将巡检机器人作为智能制造的重要组成部分，在系统集成和工业应用方面积累了丰富的经验。欧洲在功能安全、网络安全、环境保护等方面的严格要求促进了相关技术的发展。欧洲品牌注重场景适配性，德国 Festo 开发的仿生机械臂巡检机器人，在核电站复杂环境中表现出色，例如德国 SICK AG，工业 4.0 标杆产品 SICK sR500，集成 2000+传感器节点，可同时检测设备振动、温度、红外辐射等 12 类参数。

日本依托其在精密制造领域的传统优势，在巡检机器人的传感器精度、控制精度、加工精度等方面形成了独特优势。日本企业在激光雷达、机器视觉、精密驱动等关键器件方面具有较强的技术实力[5]，为巡检机器人的高精度作业提供了重要支撑。日本在老龄化社会背景下对自动化技术的迫切需求也推动了巡检机器人技术的发展。例如，日本机器人界的“瑞士军刀”，CRX-25N 可在同一设备上完成机械检测、清洁、数据录入等 8 项任务。值得关注的是，2023 年日本川崎重工并购韩国斗山机器人，组建起覆盖电力、矿山、港口三大场景的生态联盟，其最新发布的 KMR-5000 巡检机器人配备自研的 5G-MEC 边缘计算模块，数据处理速度提升 300%¹。

3.2. 国内研究进展与发展特色

3.2.1. 发展阶段特征

我国巡检机器人技术发展经历了一个从跟随到并跑的演进过程。技术引进期主要通过设备采购、技术合作等方式学习国外先进技术，重点关注系统集成和工程应用。这一阶段虽然在核心技术方面依赖进口，但为后续的自主发展积累了宝贵经验。

¹国外十大巡检机器人企业发展现状分析！_财富号_东方财富网。

消化吸收期的特点是在引进技术基础上的再创新。国内科研院所和高等院校加强了基础理论研究，企业开始开发具有自主知识产权的产品。产学研合作模式的建立促进了技术转化和人才培养，为自主创新奠定了基础。这一时期在某些细分领域开始形成技术优势。

3.2.2. 创新模式与技术特色

自主创新期体现了我国巡检机器人技术的快速发展。在国家科技计划的支持下，一批重大技术攻关项目取得突破性进展。企业的研发投入不断增加，技术创新能力显著提升。在设施农业、电力巡检、轨道交通等特定领域，我国已经形成了具有国际竞争力的技术解决方案。

据统计，巡检工业机器人市场在 2025 年迎来爆发式增长，全球市场规模预计突破 300 亿美元，中国占比超过 40%，成为全球最大的单一市场²。以大疆、海康威视为龙头的中国公司，在电力、核电等众多领域已积累了丰富的经验，显示出国产设备在技术创新上的重大突破，通过对国内外各企业人工智能算法以及边缘计算领域的竞争态势展开深入研究，可以剖析核心技术发展的重要推动力量。华为在 5G 技术和边缘计算方面有着明显的优势，它所研发出的辐射监测设备精准度为正负百分之零点一微西弗每小时，此数值超过国际原子能机构规定的技术指标要求，采用分布式的人工智能芯片来进行本地化的数据加工处理，从而很好地应对了核电站场景当中存在的数据传送延迟问题，依靠融合毫米波雷达、四千像素摄像头还有电声传感器的组合式设计而赢得红点奖章的企业正是这个华为，它的创新能力以及产品设计能力都得到了全面的展现³。

产学研深度融合构成了我国巡检机器人技术发展的重要特色。科研院所承担基础理论研究和关键技术攻关，为技术发展提供源头创新；高等院校发挥人才培养和基础研究优势，为产业发展输送专业人才；企业作为技术转化的主体，将科研成果转化为实际产品和商业价值。这种合作模式有效整合了各方资源，加速了技术进步和产业发展[6]。

3.2.3. 重点应用领域突破

应用导向的技术发展路径使得我国在特定领域形成了独特优势。针对温室农业的特殊需求，我国开发了适合设施农业环境的专用巡检机器人，在作物监测、环境调控、设备维护等方面提供了完整的解决方案。在畜禽养殖领域，结合我国养殖业的规模化发展趋势，开发了适合大规模养殖场的巡检机器人系统。在电力系统巡检方面，针对我国电网规模大、运行环境复杂的特点，形成了相对成熟的技术体系[7]。

3.3. 国内外发展差异深层分析

3.3.1. 技术发展路径差异

国内外技术发展路径的差异反映了不同的创新模式和市场环境。国外更注重基础理论研究和核心技术突破，技术发展体现了从理论到应用的线性逻辑。长期的研发投入和技术积累使得国外在基础算法、关键器件等方面保持领先地位。完善的知识产权保护和技术转化机制促进了创新成果的商业化。

我国的技术发展更多体现了需求驱动的特征，在应用创新和系统集成方面展现出较强的适应能力。巨大的市场需求为技术验证和产业化提供了有利条件，丰富的应用场景促进了技术的快速迭代和优化。成本控制能力和工程化能力成为我国企业的重要竞争优势。

3.3.2. 产业化程度对比

在产业化程度方面，国外经过较长时间的技术积累和市场培育，已经形成了相对成熟的产业生态。技术标准相对完善，产品可靠性较高，市场接受度良好。产业链分工明确，上下游协作关系稳定。我国虽然在某些细分领域具有优势，但在整体产业化程度、技术标准化、品牌影响力等方面仍有差距。核心

²<https://www.iim.net.cn/2358/view-15345-1.html>

³<https://baijiahao.baidu.com/s?id=18323>

器件依赖进口、基础软件薄弱等问题制约了产业的进一步发展。

4. 核心技术理论分析

4.1. 传感器技术理论与发展趋势

现代巡检机器人的感知能力建立在多元传感器技术的有机集成之上。视觉传感器作为最重要的信息获取手段，为机器人提供了丰富的环境信息。可见光摄像头能够获取环境的纹理、颜色、形状等视觉特征，为目标识别和场景理解提供基础数据。红外热成像传感器通过检测物体的热辐射实现温度异常的快速识别，在电力设备巡检、工业安全监测等应用中发挥重要作用[8]。这种非接触式的温度检测方式不仅提高了检测效率，还避免了人员接触高温、高压设备的安全风险。

传感器，这一检测装置，具备感知被测信息的能力，并能遵循特定规律，将这些信息转化为电信号或其他所需形式，以支持信息的传输、处理、存储、显示、记录以及控制等多样化需求(如图 1)。

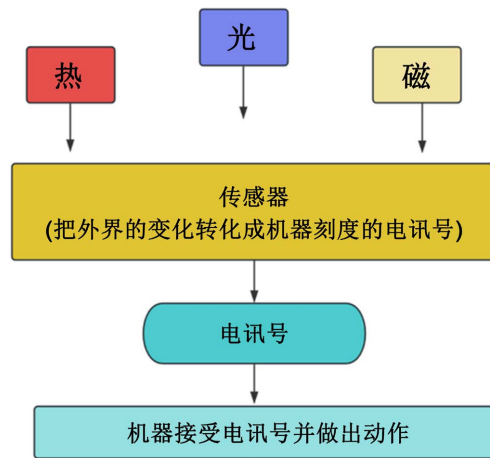


Figure 1. Schematic diagram of sensor technology

图 1. 传感器技术原理图

传感器通常由四个核心部分构成：敏感元件、转换元件、变换电路以及辅助电源。这些组件协同工作，使得传感器能够感知并转换被测信息，满足多样化的应用需求。

超声波传感器基于声波反射原理实现近距离障碍物的精确感知，特别适用于狭小空间的导航和避障。其工作原理简单、成本较低、环境适应性强的特点使其在各类巡检机器人中得到广泛应用。激光雷达技术通过发射激光脉冲并测量反射时间来获取精确的距离信息，能够构建高精度的三维环境地图。相比其他传感器，激光雷达具有测量精度高、探测距离远、角度分辨率高等优势，成为复杂环境感知的核心设备。

传感器技术的发展趋势体现了精度提升、集成度增强、智能化水平提高的特征。新材料技术的应用推动了传感器的小型化和轻量化，MEMS 技术使得多种传感功能能够集成在单一芯片上，大幅降低了系统复杂度和成本。传感器的智能化程度不断提高，嵌入式处理能力的增强使得传感器能够完成更多的本地数据处理任务，减少了对中央处理单元的依赖。环境适应性的改善使得传感器能够在更恶劣的条件下稳定工作，扩大了巡检机器人的应用范围。

4.2. 自主导航技术理论

自主导航技术构成了巡检机器人自主作业能力的核心基础。路径规划算法负责在已知或未知环境中

为机器人规划出从起点到终点的最优路径。全局路径规划基于环境地图生成宏观路径,通常采用 A*算法、Dijkstra 算法、RRT 算法等经典方法。这些算法在计算复杂度、路径质量、环境适应性等方面各有特点,需要根据具体应用场景选择合适的算法[9]。

局部路径规划负责在机器人运动过程中处理动态障碍物和路径优化问题。人工势场法通过构建虚拟力场引导机器人运动,具有计算简单、实时性好的优点,但容易陷入局部最优。动态窗口算法通过在速度空间中搜索可行的运动轨迹,能够很好地处理动态环境中的避障问题。这些算法的选择和优化直接影响机器人的导航性能和安全性。

SLAM 技术为巡检机器人在未知环境中的自主导航提供了理论基础和技术支撑。基于滤波的传统 SLAM 方法通过扩展卡尔曼滤波、粒子滤波等技术实现状态估计和地图构建,具有理论基础扎实、实现相对简单的特点。不同 SLAM 算法的实现细节各异,但通常包含前端与后端。

前端:

基于传感器数据和已有地图信息规划机器人轨迹的主要步骤包含:利用激光雷达、摄像装置等设备获取环境多源异构数据;进行数据时序同步处理,保证跨传感器或不同时刻的信息能够准确对齐;提取重要特征点及描述符,给精准地图形成给予基本支持;采用数据融合手段整合多种感知信息,改善建图结果的鲁棒性和可靠性;凭借特征匹配算法把当前帧同以前地图或者邻近帧中的特征联系起来,进而完成机器人运动状况分析和路径规划运算。

后端:

依靠前端搜集的运动轨迹数据以及地理空间信息,创建起包含机器人状态,环境地图以及传感器误差的多维度评价体系,而且规划出专门的改良计划,采用非线性优化算法,像非线性最小二乘法,针对机器人姿态参数和环境地图展开迭代调节,从而明显改进定位精确度,加入回环检测机制来找到路径上的重复节点,有效地压制累积误差,进而改善 SLAM 算法在复杂环境中的鲁棒性和稳定性。

按照传感器种类划分,SLAM 技术可以分为二维激光 SLAM,三维激光 SLAM 以及视觉 SLAM 这三类,在二维激光 SLAM 方面, Cartographer 和 Karto 通常被当作是代表性的算法,三维激光 SLAM 大多依靠 LIO-SAM 和 LOAM 这类框架来搭建,至于视觉 SLAM,则以 ORB-SLAM3 和 VINS-Fusion 为主要的实现方案[10]。

4.3. 数据处理与分析技术理论

巡检机器人产生的海量数据需要高效地处理和分析技术支撑智能决策。大数据分析技术通过对历史巡检数据的深度挖掘,能够发现设备运行的规律性和异常性特征。机器学习算法的应用使得系统能够从数据中自动学习和优化,提高故障预测的准确性和及时性。深度学习技术在图像识别、异常检测、模式分类等方面的突出表现,为巡检数据的智能分析提供了强大工具[9]。

预测性维护理念的引入改变了传统的被动维护模式。通过对设备运行状态的连续监测和趋势分析,能够在故障发生前识别异常征象,制定相应的维护策略。这种主动式的维护方式不仅能够避免突发故障造成的损失,还能够优化维护资源的配置,提高设备的整体效率。

点云数据作为激光雷达等三维传感器的主要输出,需要专门的处理算法进行有效利用。点云配准技术通过对不同时刻或不同视角的点云数据进行对齐,实现三维环境的完整重建。点云滤波技术用于去除噪声点和异常点,提高数据质量。点云分割技术将点云数据划分为不同的区域或对象,为后续的特征提取和目标识别奠定基础。

4.4. 系统集成技术理论

系统集成技术是实现巡检机器人整体性能的关键环节。现代巡检机器人需要将传感、计算、控制、

通信等多个子系统进行有效整合,形成协调统一的智能系统。模块化设计理念通过标准化的接口和协议实现不同模块的即插即用,提高了系统的可维护性和可扩展性。

分层控制架构将复杂的控制任务分解为多个层次,每个层次负责特定的功能和任务。硬件抽象层屏蔽了底层硬件的差异,为上层软件提供统一的接口。中间件技术实现了不同软件模块之间的通信和协调,简化了系统集成的复杂度。实时操作系统保证了关键任务的及时响应,确保系统的安全可靠运行[11]。

容错设计是提高系统可靠性的重要手段。冗余配置通过备份关键组件降低单点故障的风险,故障检测和隔离机制能够及时识别和处理异常情况。自诊断功能使得系统能够监控自身的运行状态,预警潜在问题。这些设计措施共同构成了巡检机器人的安全保障体系。

5. 技术挑战与未来发展趋势展望

5.1. 关键技术挑战分析

巡检机器人在复杂环境中的适应性问题依然是制约其广泛应用的关键瓶颈。非结构化环境的复杂性和不确定性对机器人的感知、决策、控制能力提出了极高要求。光照变化、天气条件、环境噪声等外部因素会显著影响传感器的性能,导致感知精度下降或误判。动态环境中的移动障碍物、人员活动、设备变化等因素增加了路径规划和避障的难度。恶劣工作条件下的设备可靠性保障也面临严峻考验,高温、低温、湿度、腐蚀性气体等环境因素对电子设备和机械部件的长期稳定运行构成威胁。

传感器在极端条件下的性能退化问题需要从材料科学、电路设计、算法优化等多个维度寻求解决方案[12]。新型材料的应用能够提高传感器的环境耐受性,先进的信号处理算法能够在噪声环境中提取有效信息,自适应控制技术能够根据环境变化调整系统参数。多传感器融合技术通过信息冗余和互补提高了系统的鲁棒性,但如何在保证可靠性的同时控制成本和复杂度仍是重要课题[13]。

系统集成过程中的协调控制问题体现了技术复杂性的挑战。多个子系统之间的实时通信需要满足严格的时延要求,数据传输的可靠性直接影响系统的整体性能。不同供应商的组件在接口标准、通信协议、数据格式等方面的差异增加了集成的复杂度[14]。系统规模的扩大带来了管理和维护的困难,需要建立完善的系统架构和管理机制。

5.2. 未来技术发展趋势预测

人工智能技术的深度融合将推动巡检机器人向更高智能水平发展。深度学习算法在环境感知、目标识别、异常检测等方面的应用不断深化,模型的准确性和泛化能力持续提升[15]。强化学习技术使得机器人能够通过与环境的交互学习最优策略,适应复杂多变的工作环境。联邦学习、迁移学习等新兴技术为知识共享和快速适应提供了可能[16]。

边缘计算技术的发展改变了巡检机器人的计算架构。本地计算能力的增强减少了对云端服务的依赖,提高了响应速度和可靠性。边缘 AI 芯片的出现为实时推理提供了硬件支撑,神经网络的轻量化设计使得复杂算法能够在资源受限的设备上运行。云边协同的计算模式实现了计算资源的优化配置,提高了整体系统效率[17]。

5G 通信技术为巡检机器人提供了更强大的连接能力。高带宽、低时延、大连接的特性支持高清视频传输、实时远程控制、大规模设备接入等应用需求[18]。网络切片技术为不同应用提供定制化的网络服务,保证关键业务的通信质量。移动边缘计算与 5G 网络的结合进一步缩短了响应时间,提升了用户体验。

5.3. 产业发展前景展望

新材料技术在提升巡检机器人性能方面展现出巨大潜力。碳纤维、石墨烯等新型材料的应用实现了

结构的轻量化和强度的提升。新型电池材料提高了能量密度和充电速度，延长了续航时间。智能材料的应用为机器人提供了自适应和自修复能力，提高了环境适应性。

量子计算技术虽然尚处于发展初期，但其在解决复杂优化问题方面的潜力为巡检机器人的未来发展提供了新的可能。路径规划、任务调度、资源分配等组合优化问题可能从量子算法中获益。量子传感器的超高精度为精密测量提供了新手段。

数字孪生技术为巡检机器人的设计、测试、优化提供了虚拟环境。通过构建物理系统的数字化模型，能够在虚拟环境中进行仿真实验，降低实际测试的成本和风险[4]。数字孪生模型的实时更新使得系统能够持续优化和改进。预测性维护、故障诊断、性能优化等应用都能够从数字孪生技术中获益。

应用领域的持续拓展为巡检机器人产业发展提供了广阔空间。智慧城市建设中的基础设施监测、环境监控、公共安全等应用需求巨大。海洋工程、太空探索、极地科考等极端环境应用对机器人技术提出了新的挑战。医疗健康、教育科研、服务业等新兴应用领域也展现出良好的发展前景。“巡检 + 其他功能”模式的巡检机器人的发展，拓展了巡检机器人的应用[19]。

6. 结论与展望

6.1. 主要研究结论

巡检机器人技术发展的历程完全体现了跨学科交叉融合的革新性质和面向应用发展走向的路径特点，它从最初简单的遥控器设备慢慢变成高级别的自主智能系统，其间发生的技术演变表现出单方面向多个模块共同运作，操作过程从人为操作转变为智能判断以及产品形式从标准通用型产品向个性化设计升级这样一种明显特征，这种进程同时体现出技术完善程度逐渐提升，并且非常真实地展现了市场需要变动以及使用场合不断扩大等重要信息内容。

巡检机器人技术集合了机械工程、电子信息、控制科学以及计算机科学这些不同领域关键的理论与技术，在机器人的物理根基方面，机械工程给予了它坚实的基础，而且改进了其运动方面的性能表现，电子信息学给它赋予了准确的采集数据并加以信号处理的能力，控制科学保证整个系统可以达到稳定运行的状态，还保持一定的动态响应准确度，至于电脑科学，就给智能化决策支撑以及数据分析的大规模信息处理任务，巡检机器人能够适应比较复杂和多变的工作环境，又可以实现效率良好并且状态稳定的运行。

以实际应用为指向的创新模式在巡检机器人领域表现出明显的价值，各种特定场景下的功能差异化需求，促使技术不断突破并得到性能上的改善，在电力系统当中，为了达到对高压输电线路高效巡检的目的，这种设备必须具备高精度定位、智能化导航以及故障诊断等能力；而在化工生产环境里，则要应对复杂的化学工艺状况，还要准确检测那些可能存在的危险气体，这些多方面的实际需求一起推动着巡检机器人技术不断向前发展。

6.2. 发展建议

核心技术的发展水平决定了巡检机器人的性能边界和应用范围。传感器技术向着高精度、多模态、智能化方向发展，为环境感知提供了更丰富、更准确的信息来源。自主导航技术在算法优化、硬件集成、环境适应等方面不断突破，使得机器人能够在更复杂的环境中稳定工作。数据处理技术的进步为智能决策提供了强大支撑，大数据分析、人工智能、边缘计算等技术的融合应用大幅提升了系统的智能化水平。系统集成技术的发展促进了各子系统的协调统一，模块化、标准化的设计理念提高了系统的可维护性和可扩展性。

基于以上分析,提出以下发展建议。加强基础理论研究,重点突破传感器技术、智能算法、系统集成等关键技术瓶颈,提升技术创新能力和产业竞争力。完善标准体系建设,制定行业技术标准和规范,促进产业健康有序发展。深化产学研合作,建立开放共享的创新平台,加速科技成果转化和产业化应用。优化政策环境,在研发投入、税收优惠、市场准入等方面提供支持,营造良好的创新创业氛围。

6.3. 研究展望

技术挑战的存在表明巡检机器人技术仍有很大发展空间。复杂环境适应性问题需要从多个维度寻求解决方案,传感器技术、算法优化、系统设计等方面都需要持续改进。长期自主运行的可靠性保障涉及硬件、软件、管理等多个层面,需要建立全生命周期的质量保证体系。多技术融合带来的系统复杂性需要通过标准化、模块化的方式加以管理和控制。

展望未来,巡检机器人技术将在智能制造、智慧城市、国防安全等重要领域发挥越来越重要的作用。技术融合的深化将催生新的应用模式和商业模式,跨界创新将成为技术发展的重要特征。国际合作与竞争的并存将推动全球巡检机器人技术水平的整体提升。我国应抓住新一轮科技革命和产业变革的机遇,加快推进巡检机器人技术的创新发展,为建设制造强国和科技强国做出积极贡献。

基金项目

上海市农业科技创新项目资助(项目编号:2025-02-08-00-12-F00017)。

参考文献

- [1] 王少聪,杜肖鹏,丁小明,等. 温室巡检机器人关键技术研究进展与展望[J]. 江苏农业科学, 2024, 52(16): 1-10.
- [2] 侯志华. 电气巡检机器人轨迹规划控制系统设计研究[J]. 机器人产业, 2024(4): 90-95.
- [3] 肖德琴,黄一桂,熊悦淞,等. 畜禽机器人技术研究进展与未来展望[J]. 华南农业大学学报, 2024, 45(5): 624-634+620.
- [4] 高莉莉. 智能巡检机器人现状及发展趋势分析[J]. 农机使用与维修, 2023(10): 63-66.
- [5] 高春艳,陶渊,吕晓玲,张明路. 非结构化环境下巡检机器人环境感知技术研究综述[J]. 传感器与微系统, 2023, 42(4): 10-13+18.
- [6] 李永立,王燕飞. 国内外巡检机器人研究现状[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(30): 66-68+72.
- [7] 尹项迎,蔺飞飞. 智能巡检机器人的现状与发展趋势[J]. 科技视界, 2020(24): 160-162.
- [8] 彭道刚,赵晨洋,威尔江. 基于准模型校准卡尔曼滤波的巡检机器人运动系统辨识研究[J]. 电气传动, 2020, 50(4): 74-80.
- [9] 张成巍,岳湘. 智能巡检机器人研究现状与发展趋势[J]. 电工文摘, 2015(1): 9-12.
- [10] Choi, S., Al-Sabbag, Z.A., Narasimhan, S. and Yeum, C.M. (2024) Gaze-Based Human-Robot Interaction System for Infrastructure Inspections. 2024 *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Yokohama, 13-17 May 2024, 9571-9577. <https://doi.org/10.1109/icra57147.2024.10610684>
- [11] Zhang, Y., Yang, Y., Lu, S. and Zhou, E. (2024) Development and Outlook for Pipeline Inspection Robots. *Recent Patents on Engineering*, 18, 16. <https://doi.org/10.2174/0118722121292206240318064149>
- [12] 李铭浩,于音,李响,等. 多模态全光智能机器人巡检系统设计[J]. 光学与光电技术, 2024, 22(3): 109-119.
- [13] 金大刚,毛青海,陈自强,等. 基于多能物联的水电站智能巡检机器人研究[J]. 电器工业, 2023(1): 62-65.
- [14] 余浩扬,李艳生,肖凌励,等. 面向动态环境的巡检机器人轻量级语义视觉 SLAM 框架[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(10): 3979-3992.
- [15] 吴张勇,纪书保. 基于挂轨机器人的智能巡检系统研究[J]. 现代信息科技, 2024, 8(8): 60-63.
- [16] 许钟奇. 铁矿井下钢丝绳巡检机器人设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
- [17] 曹云虎. 智能机器人在变电站自动巡检系统中的应用探究[J]. 电脑爱好者(电子刊), 2023(6): 2808-2809.
- [18] 柳翔,刘雨佳,李倩. 巡检轨道机器人管理系统关键技术研究[J]. 通讯世界, 2023, 30(4): 160-162.
- [19] 张宝. 化工环境下巡检机器人关键控制技术研究进展[J]. 当代化工研究, 2023(22): 9-11.