



面向 LNG 接收站的四足机器人巡检系统设计与研究

王 堃¹ 唐清琼² 付 环³

(1. 国家管网集团深圳天然气有限公司 2. 国家管网集团深圳天然气有限公司 3. 国家管网集团深圳天然气有限公司)

摘要: 随着 LNG 接收站智能化建设的不断推进,传统巡检方式已难以满足复杂环境下的安全高效运营需求。本文综述了国内外巡检机器人研究进展及应用现状。基于 LNG 接收站的巡检难点,探讨四足机器人在复杂地形适应能力、防爆设计、智能化巡检与数据分析等方面的优势。在自主导航、节能续航、模块化设计、远程操控、标准化与法规支持以及与数字孪生技术结合方面,提出四足机器人在 LNG 接收站智能巡检中的具体应用方案。总结了四足机器人在 LNG 接收站智能巡检中的发展趋势和应用前景,为智能化接收站的建设提供有力支撑。

关键词: 四足机器人; LNG 接收站; 智能巡检; 防爆设计; 数字孪生

2025.08.DQGV
71

0 引言

LNG 接收站作为液化天然气供应链中的重要环节,其安全高效运营至关重要。传统人工巡检因依赖人力操作,存在效率低下、安全隐患突出及监测盲区较多等局限性,难以满足现代 LNG 接收站的智能化需求^[1]。近年来,随着机器人技术的快速发展,四足机器人凭借其卓越的地形适应能力和多功能性,逐渐成为高危环境巡检的理想选择^[2]。本文旨在探讨四足机器人在 LNG 接收站智能巡检中的应用前景和发展趋势,为 LNG 接收站的智能化建设提供新的思路和解决方案。

1 巡检机器人国内外研究现状

1.1 国外研究现状

国外对于巡检机器人的研究起步较早,20 世纪 80 年代,美国、日本等国外学者开展了变电站巡检机器人的研究工作,取得了相关研究成果。1988 年,日本四国电力公司和东芝公司等研究机构设计了一种适用于 500kV 变电站的变电站巡检机器人,如图 1 所示,通过搭载可见光摄像头和红外热成像设备采集变电站图像的方式进行巡检^[3-4]。加拿大魁北克水电研究所设计了一款名为“LineScout”的变电站巡检机器人,如图 2 所示,可以实现远程操作和实时控制^[5]。



图 1 日本 500kV 变电站巡检机器人



PRODUCT AND TECHNIC

|| 产品与技术 ||



图2 “LineScout”变电站巡检机器人

Remotec 公司研制了一款配备气体传感器、机械臂和可见光摄像头的“V2”煤矿救援机器人,如图3所示,可远程操作机器人在井下进行巡检,读取井下相关气体浓度^[6]。2018年,荷兰 ExRobotics 公司设计了一款针对石化罐区等易燃易爆场景下的防爆巡检机器人,如图4所示,该机器人是通过履带式差速驱动,携带摄像头、气体传感器对现场进行巡检。荷兰壳牌石油公司设计研发了一款适用于石化厂区巡检场景的轮式巡检机器人,该机器人可以在雪地、泥地等路况下行走^[7]。



图3 “V2”防爆巡检机器人



图4 履带式巡检机器人

1.2 国内研究现状

国内开展巡检机器人研究相对于国外起步较晚,在20世纪90年代末才开始巡检机器人相关研究。

2002年,电力机器人技术实验室在国家“863计划”支持下就开展变电站设备设施巡检机器人的研究,并研制出第1代变电站巡检机器人^[8],随后经过不断的优化改进,已升级到第五代变电站巡检机器人^{[7][9]},如图5所示。



图5 五代变电站巡检机器人

2012年,沈阳中科院自动化研究所研制出一款沿轨道行驶的巡检机器人,如图6所示,该机器人具有很强的环境适应能力,可在恶劣的天气下完成全天候自动巡检工作^[10]。2017年,中信重工开诚智能装备有限公司研制了一种轮式巡检机器人,如图7所示,该机器人采用防爆设计,搭载了高清摄像头和红外热成像仪,可应用于石化场所巡检、仪表读数以及泄漏检测等^[11]。



图6 沈阳中科院研制的巡检机器人



图7 轮式巡检机器人

2 防爆四足机器人在 LNG 接收站智能巡检中的优势

(1) 复杂地形适应能力

LNG 接收站通常具有复杂的地形环境，如管道密集区、储罐区、斜坡、楼梯等。传统的轮式或履带式机器人在这些环境中可能难以灵活移动。四足机器人具有更强的地形适应能力，能够跨越障碍、上下楼梯，甚至在崎岖不平的地面上稳定行走。这种能力使得四足机器人能够覆盖更多传统机器人无法到达的区域，实现更全面的巡检覆盖。

(2) 防爆设计满足高危环境需求

LNG 接收站属于易燃易爆环境，防爆设计是机器人应用的前提条件。防爆四足机器人能够满足高危环境的安全要求，避免因机器人运行引发安全事故。例如，通过符合 IEC 60079-14：2022 标准的防爆认证^[12]，四足机器人可在储罐区、工艺区等高风险区域进行实时气体泄漏监测，确保安全生产。

(3) 智能化巡检与数据分析

随着人工智能和物联网技术的发展，四足机器人集成 AI 视觉识别、红外测温、振动分析等功能，能够通过传感器实时采集数据，并通过 5G 网络传输至中央控制系统。例如，搭载气体检测模块的四足机器人可对 LNG 储罐的微泄漏进行早期预警，为设备状态监测和智能决策提供关键支持。

3 防爆四足机器人系统架构

防爆四足机器人巡检系统由终端层、应用层、

数据层组成，如图 8 所示，包含四足机器人本体、多传感器融合感知模块、自主导航与避障模块、缺陷识别与诊断模块以及远程监控平台等。

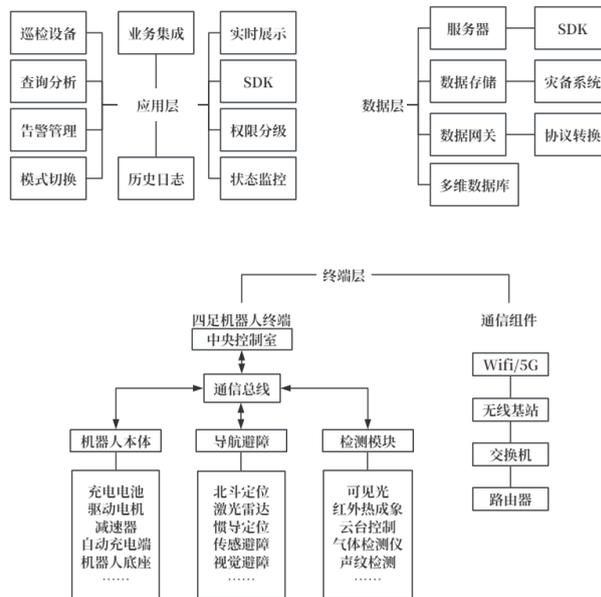


图8 四足机器人系统组成示意图

终端层：终端层包含四足机器人终端和通信组件，按需布置于巡检区域现场，相互连接控制，共同完成巡检功能。机器人终端包含机器人本体、导航避障和检测模块，由中央控制单元通过标准通信总线与所有机器人硬件组件进行对接控制。中央控制单元为机器人终端的核心控制大脑，能够对机器人导航避障、云台角度、数据采集、数据存储、数据通信、自动充电以及智能识别处理等所有功能进行集中控制，并与数据层和应用层进行数据通信。中央控制单元使每个机器人成为独立的任务执行个体，在网络条件不理想的情况下，仍能按照既定计划执行巡检任务。

数据层：数据层包含多维数据库、服务器、存储设备，各系统为并列关系，对机器人巡检所涉及的所有数据进行标准化存储和备份。巡检数据是智能应用的基本前提，也是机器人系统的核心价值数据。



PRODUCT AND TECHNIC

|| 产品与技术 ||

应用层：应用层是巡检机器人状态、数据的展示和交互界面，包含机器人任务编辑与任务执行状态监控，告警监控及告警处理，机器人远程操控，以及机器人数据查询、分析、处理等综合功能。除此以外，该平台软件具有开放式、扩展性和整合集成性，通过外部通讯数据接口，提供与现场的站场系统的数据推送功能，从而实现数据信息的共享和联动功能。

4 四足机器人在 LNG 接收站智能巡检中的具体应用方案

4.1 自主导航与协同作业

未来的四足机器人将结合 SLAM（同步定位与地图构建）技术，实现在复杂环境中的自主路径规划与避障。例如，波士顿动力 Spot 机器人在挪威 Equinor LNG 接收站中，通过激光雷达与视觉融合的 SLAM 技术，定位误差小于 0.3m，覆盖了 90% 的传统巡检盲区，效率提升 40%^[13]。此外，通过与无人机、轨道式机器人协同作业，四足机器人可形成多维度的巡检体系。在管道区，四足机器人负责地面巡检，无人机则从空中监测高位设备，协同提升效率。例如，在荷兰 Gate LNG 终端的试点项目中，四足机器人（Spot）与无人机（DJI Matrice 300）协同作业，地面机器人负责管道焊缝检测，无人机则从空中监测储罐顶部腐蚀情况。协同系统将整体巡检时间从 8h 缩短至 3.5h，效率提升 56%^[14]。验证了多机器人协同的显著优势。

4.2 节能与长续航能力

通过优化运动控制算法与能源管理策略，四足机器人的续航能力显著提升^[15]。例如，采用高密度锂电池与能量回收系统，四足机器人在 LNG 接收站连续工作 8h 以上，减少充电频率并提高巡检覆盖率。

4.3 模块化设计与多功能扩展

模块化设计使四足机器人能够快速更换功能模

块。例如，在夜间巡检中安装热成像模块，或在应急任务中搭载机械臂进行阀门操作。这种灵活性使其不仅限于巡检，还可承担简单的维护任务，提升接收站的智能化水平。

4.4 远程操控与应急响应

四足机器人支持基于 VR/AR 技术的远程操控功能。在 LNG 接收站发生火灾或泄漏时，操作人员可通过远程控制机器人进入危险区域，实时回传现场数据并执行应急处理。例如，机器人可携带灭火装置或堵漏工具，显著降低人员风险。

4.5 标准化与法规支持

四足机器人的规模化应用需符合行业安全标准。例如，API RP 580 提出的风险检测框架可指导机器人巡检任务的优先级划分^[16]。同时，ENISA 发布的工业机器人网络安全指南^[12]可确保巡检系统的数据安全与操作可靠性。

4.6 与数字孪生技术的结合

通过将四足机器人采集的实时数据同步至数字孪生系统，接收站的运行状态可实现动态模拟与预测。例如，数字孪生模型可基于机器人提供的振动数据预测设备故障，优化维护策略并减少停机时间。

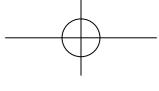
5 结束语

四足机器人在 LNG 接收站智能巡检中具有广阔的应用前景，未来，油气行业智能巡检机器人将朝着智能化、自主化、多功能化和网络化方向发展。

智能化方面，机器人将具备更强的自主决策能力和环境感知能力，能够自动识别和处理复杂的巡检任务。

自主化方面，机器人将实现更高的自主导航和避障能力，能够在复杂的油气生产环境中自由移动。

多功能化方面，机器人将集成更多的传感器和检测功能，如气体泄漏检测、设备故障诊断、图像识别等，以满足油气行业多样化的巡检需求。



网络化方面，机器人将通过 5G 等高速通信技术与控制中心实现实时数据传输和远程控制，提高巡检系统的整体效率和可靠性。随着技术的不断进步和成本的降低，四足机器人将成为 LNG 接收站智能化建设的重要组成部分。

后续的研究需进一步探索四足机器人在具体场景中的技术优化（如多模态传感器融合）和法规完善（如防爆认证标准化），以推动其在更多高危环境中的广泛应用。

参考文献

- [1] 张来斌, 李根生. LNG 接收站智能化建设中的关键工艺与安全优化[J]. 天然气工业, 2022, 42(3): 67-74.
- [2] Li Y, Zhang H, Wang L. Application of Quadruped Robots in Hazardous Environments: A Case Study of LNG Terminals[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 19(4), 1120-1128.
- [3] Takahashi H. Development of patrolling robot for substation[J]. Japan IERE Council. Special Document R-8903, 1989(10): 19.
- [4] Lu S, Zhang Y, Su J. Mobile robot for power substation inspection: a survey[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2017, PP(99): 1-18.
- [5] Pouliot N, Montamabault S. Geometric design of the line scout: a teleoperated robot for power line inspection and maintenance[C]. IEEE International Conference of Robotics and Automation. Pasadena, USA: IEEE Press, 2008: 3970-3977.
- [6] 朱斌, 雷利伟, 贾瑞清. 煤矿探测救援机器人研究现状及其应用[J]. 机电产品开发与创新, 2013, 26(6): 14-16.
- [7] 李鑫宝. 石化巡检机器人设计与组合导航研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2022.
- [8] 李向东, 鲁守银, 王宏, 等. 一种智能巡检机器人的体系结构分析与设计[J]. 机器人, 2005(6): 502-506.
- [9] 鲁守银; 苏建军. 机器人在变电站设备巡检中的应用[J]. 机器人技术与应用, 2007(5): 33-36.
- [10] 鲁守银, 张营, 李建祥, 等. 移动机器人在高压变电站中的应用[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 276-284.
- [11] 赵仁佳. 防爆巡检机器人设计与动力学分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [12] International Electrotechnical Commission (IEC). Explosive Atmospheres—Part 14: Design Selection and Erection of Electrical Installations [M]. International Electrotechnical Commission, 2022.
- [13] Katz B, Di Carlo J, Kim S. Dynamic Legged Mobility for Industrial Inspection: A Case Study with Boston Dynamics Spot[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2021: 12345-12352.
- [14] Van der Heide J, De Vries L. Multi-Robot Collaboration in LNG Terminals: A Framework for Task Allocation and Communication Optimization[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 82: 102567.
- [15] Yang F, Wang C. Energy-Efficient Locomotion Control of Quadruped Robots for Long-Duration Missions[J]. Mechatronics, 2020, 68: 102366.
- [16] American Petroleum Institute (API). Recommended Practice for Risk-Based Inspection[M]. American Petroleum Institute, 2021.

(收稿日期: 2025-02-26)