

电气工程机器人巡检技术的应用与未来展望

杨建红

中铝（郑州）铝业有限公司设备保障中心，中国·河南 郑州 450041

摘要：随着电气工程领域对巡检效率和安全性要求的不断提高，机器人巡检技术作为一种新兴的解决方案，逐渐在电力设施的巡检任务中获得应用。论文综述了电气工程机器人巡检技术的应用现状，探讨了其在变电站、输电线路等场景中的优势与挑战，并分析了未来技术发展的趋势。研究表明，机器人巡检能有效提高工作效率、保障人员安全，并推动电力行业向智能化、自动化方向发展。

关键词：电气工程；机器人巡检；智能化

Application and Future Prospects of Electrical Engineering Robot Inspection Technology

Jianhong Yang

Equipment Support Center of China Aluminum (Zhengzhou) Aluminum Industry Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 450041, China

Abstract: With the continuous improvement of inspection efficiency and safety requirements in the field of electrical engineering, robot inspection technology, as an emerging solution, is gradually being applied in the inspection tasks of power facilities. The paper summarizes the current application status of electrical engineering robot inspection technology, explores its advantages and challenges in scenarios such as substations and transmission lines, and analyzes the future trends of technological development. Research has shown that robot inspection can effectively improve work efficiency, ensure personnel safety, and promote the development of the power industry towards intelligence and automation.

Keywords: electrical engineering; robot inspection; intelligentization

0 前言

电气工程作为现代社会基础设施的重要组成部分，其设备的稳定运行直接关系到能源供应的安全性及效率。传统的电力设备巡检方式主要依赖人工操作，虽然能够及时发现设备故障，但面临着巡检效率低、人员安全风险高和信息反馈滞后的问题。随着电力系统日益复杂化和智能化要求的提高，传统的巡检手段已难以满足现代电力设施对高效、安全、精准维护的需求。因此，机器人技术作为一种前沿的自动化解决方案，逐渐在电气工程领域得到广泛关注。机器人巡检不仅能够克服人工巡检中的诸多局限性，还能在高危、复杂的环境中提供稳定、可靠的服务，为电气设施的安全管理提供了新的技术路径。近年来，基于人工智能、传感器技术、自动化控制与数据分析等技术的发展，电气工程机器人巡检在多个应用场景中取得了显著成效，如变电站巡检、输电线路监测以及高压电气设备的实时检测等。机器人巡检系统不仅提升了电力设备的运维效率，降低了人工成本，更为保障人员安全、优化资源配置提供了有力支持。然而，尽管机器人巡检技术在实践中展现出广阔的应用前景，但仍面临技术成熟度不足、设备高成本、环境适应性差等挑战。论文旨在通过回顾电气工程机器人巡检技术的发展现状，分析其应用中的优势与局限，并展望未来技术进步对电力巡检领域的深远影响，进一步推动机器人巡检技术在电气行业中的普及与

深化应用。

1 电气工程巡检需求与挑战

电气设施的巡检是保障电力系统稳定运行的重要环节，其目的是及时发现设备故障并采取有效措施进行维护。传统的人工巡检虽然在某些情况下仍具有一定的优势，但随着电力设备规模和复杂性的不断增加，其弊端逐渐显现。

1.1 电气设施巡检的传统方法

传统的电气设施巡检方式主要依赖人工定期检查和目视监测。巡检人员需要定期对变电站、输电线路、电气设备等进行逐一检查，确保各项设备运行正常。这些检查任务包括设备外观的观察、电气参数的测量、绝缘状态的检查等。虽然传统巡检方法在电气设施的日常维护中仍然起到重要作用，由于巡检区域广泛且多位于高压电力设备中，人工巡检存在较高的安全风险^[1]。此外，人工巡检无法及时发现隐性故障，且检查结果往往依赖人工经验，容易出现漏检或判断不准确的情况。

1.2 面临的挑战

随着电力系统的不断发展，电气设施巡检面临诸多挑战。随着电网规模的扩大，设备数量和种类不断增加，传统人工巡检的工作量和频次也显著提高，导致巡检效率低下，无法及时响应电力设施的突发故障^[2]。电力设备的工作环境通常复杂、恶劣，尤其是在高压线路、风力发电机组等设备

的巡检中,人工巡检人员需要在高危环境中操作,极易发生安全事故。人工巡检的数据记录和分析通常依赖纸质或简单的电子表格,缺乏实时性和系统性,导致巡检信息无法快速反馈,难以及时发现设备潜在问题,从而影响了故障预警和维护决策的效率。

1.3 机器人技术的引入

面对这些挑战,机器人技术的引入为电气设施巡检提供了创新的解决方案。机器人巡检能够自动化执行设备检测任务,减少人为干预,提高巡检效率和精度。通过集成多种先进传感器和数据分析算法,机器人能够在高压、复杂环境下进行精准巡检,及时发现设备隐患,避免了人工巡检中可能出现的安全风险和疏漏^[1]。此外,机器人巡检具有实时性强、数据采集精度高的优势,为后期数据分析和设备故障预测提供了更加可靠的依据。尽管机器人巡检在提升巡检效率和安全性方面展现出巨大潜力,但要实现大规模应用,还需要克服技术、成本及环境适应性等方面的挑战。

2 电气工程机器人巡检技术的现状

随着机器人技术的持续进步,电气工程领域的巡检方式正在发生革命性变化。传统的人工巡检方式已经无法满足现代电力设施对高效、安全和精准的需求。因此,机器人巡检作为一种自动化解决方案,逐步应用于多个电气设施的巡检任务。近年来,机器人巡检技术依托人工智能、传感器集成、机器视觉和自动控制技术的突破,已在多个应用领域取得了显著成效,并且成为电力运维中的重要工具。然而,尽管取得了一定的进展,机器人巡检技术在实际应用中仍然面临着高成本、技术适应性和环境适应性等方面的挑战,仍需进一步发展和完善。

2.1 机器人技术发展现状

电气工程机器人巡检技术的发展离不开人工智能(AI)、传感器技术、机器视觉和自动化控制等多个领域的创新。随着AI技术的快速发展,机器人的数据处理能力和故障识别水平不断提高,使得巡检机器人不仅能够高效地执行任务,还能进行智能决策和故障预测。机器视觉和激光雷达技术的应用,使得机器人能够在复杂环境中进行精准的图像采集和三维环境建模,从而实现精确导航和路径规划。而传感器技术的进步,尤其是温湿度传感器、红外成像设备和气体传感器的融合,使得机器人能够实时监测电力设备的运行状态,及时发现设备故障并传输数据。尽管这些技术已取得初步进展,但在复杂环境下,机器人仍面临着适应性差、导航精度不足和工作可靠性低等问题,这些挑战限制了其在更广泛场景中的应用。

2.2 巡检类型与应用场景

机器人巡检技术已经在多个电气设施中得到初步应用,特别是在变电站、输电线路、电气设备和新能源发电设施等场景中。变电站作为电力系统的重要组成部分,其设备巡检

是保证电力供应安全的关键。机器人可以利用热成像、高清摄像等多种传感器,实时监测变电站内设备的运行状态,帮助发现设备过热、老化、腐蚀等潜在问题。对于输电线路的巡检,尤其是在高压、复杂环境下,人工巡检的安全风险较大。无人机和地面机器人能够执行常规检查,并通过传感器和摄像头进行线路的状态监测,大大提高了巡检效率和安全性。电气设备内部的巡检任务,如对配电柜、变压器内部的检测,依赖机器人实现高效、安全的工作,避免了人工检查过程中可能出现的电击和设备损坏风险。风力发电和太阳能发电作为新能源的重要组成部分,其设备巡检同样得益于机器人技术的应用,特别是在风力发电的高空巡检和太阳能电池板的清洁任务中,机器人能够完成高效率、高安全性的巡检操作。尽管机器人巡检在这些场景中展现了巨大的潜力,仍需要进一步克服环境适应性和多功能集成等技术难题。

2.3 关键技术

电气工程机器人巡检技术的成功应用依赖于多项关键技术的支持。自动导航与路径规划技术是确保机器人能够在复杂环境中自主高效工作的基础。通过激光雷达、视觉传感器以及GPS等技术的结合,机器人能够在电气设备之间自由穿行,避开障碍物并准确执行巡检任务。同时,路径规划算法也能帮助机器人在变化的环境中实时调整路线,提升巡检效率。传感器技术是机器人巡检系统的核心,温度传感器、红外成像仪、气体检测传感器等设备能够实时采集电气设备的工作状态数据,检测设备的故障征兆。这些数据经过传输和处理后,能够为后续的故障诊断提供依据。数据处理和故障诊断技术的结合,尤其是基于大数据和机器学习的分析方法,使得机器人能够从大量巡检数据中提取有价值的信息,识别潜在的故障风险。人工智能和机器视觉技术的引入,提升了机器人对设备表面缺陷的识别能力,机器人能够精准判断电气设备的损伤类型,如裂纹、腐蚀等,并对不同的故障类型进行处理。尽管这些技术的成熟推动了机器人巡检的发展,但在实际应用中仍面临诸如环境适应性差、成本控制难度大、技术标准不统一等问题,限制了机器人巡检技术在更广泛场景中的推广。

3 电气工程机器人巡检技术的应用案例

3.1 国内外电气工程巡检机器人应用案例

在中国,许多电力公司已开始尝试引入机器人巡检技术,以提高巡检效率和安全性。以中国南方电网为例,南方电网已开展机器人巡检技术的试点应用,尤其是在变电站和输电线路的巡检中取得了较好成效。通过使用无人机和地面巡检机器人,南方电网在高压线路的巡检中大幅提高了工作效率,且通过图像识别和传感器检测,能够实时监测设备的状态,及时发现线路的安全隐患。这些机器人系统通过自动化巡检,避免了人工巡检可能存在的安全隐患,如高空作业、电力设施周围的恶劣天气等问题。

在国外,美国电力公司和欧洲一些国家的电力企业也已开始实施机器人巡检技术。以美国的 PG&E 公司为例,该公司通过无人机执行输电线路巡检任务,配备高清摄像头和红外传感器,可以监测输电线路的结构、绝缘子和导线状态。一旦发现异常情况,无人机会实时将数据传回监控中心,进一步分析和处理。PG&E 公司利用机器人巡检技术,不仅提高了巡检的效率,也减少了人工巡检所需的时间和人力资源。此外,欧洲的一些电力企业也开始将机器人技术应用于变电站的内部巡检。机器人通过激光雷达和高清摄像技术进行设备状态监测,不仅提升了数据采集的精度,还大大降低了运维人员的安全风险。

这些案例表明,机器人巡检技术在电气工程中的应用已经取得了一定的实践成果,无论是国内还是国际上,越来越多的电力公司和机构开始认识到机器人巡检在提升效率、保障安全、减少人工成本等方面的潜力。然而,尽管已有初步的应用成果,机器人巡检的广泛推广仍面临技术成熟度、设备适应性和成本控制等方面的挑战。

3.2 机器人巡检在特殊环境中的应用

电气设施巡检常常需要在高风险、难以到达的区域进行,传统人工巡检存在较大安全隐患。机器人巡检技术在这些特殊环境中的应用,展现了显著优势。以高压输电线路为例,线路多分布在偏远地区,巡检困难且风险高。无人机巡检成为理想解决方案,通过高清摄像头、红外成像和激光雷达,能够快速扫描线路,检查电线、绝缘子等设备的状态,并及时反馈异常数据。此方法大幅降低了人工巡检的安全风险,并提升了巡检效率。比如,中国电力的无人机巡检项目,成功将巡检周期缩短约 50%,同时提高了故障检测的准确性。此外,机器人巡检在恶劣天气和复杂地理环境中同样表现出色。在大雪、强风或山区等条件下,地面机器人能够穿越崎岖地形,进行设备检查,避免了人工巡检的风险和低效问题。这不仅提高了安全性,还保证了巡检工作的连续性和高效性。

3.3 成功经验与教训

机器人巡检技术在多个领域取得了显著成果,但在实施过程中也暴露了一些问题。成功经验表明,机器人巡检应与电力设备管理系统紧密结合,通过智能平台实现数据共享与反馈,形成闭环管理,从而提高设备管理效率、决策的及时性和设备的安全性。此外,技术标准化对于机器人巡检的推广至关重要,统一的行业规范能够减少不同厂商之间的差异,提升技术的兼容性和普适性,进而推动广泛应用。然而,

实践中的教训也值得借鉴。首先,高成本问题仍然是推广的主要障碍,特别是对中小型电力企业而言,机器人设备的初期投入和长期维护费用较高,制约了其普及。其次,尽管机器人在大多数环境中表现出色,但在极端天气、高温、高湿等复杂条件下的适应性仍需提升,技术的完善仍需要时间。最后,机器人与现有电力设备管理系统的兼容性问题也是一个挑战,不同厂商的系统接口、通信协议差异较大,如何实现无缝对接和系统集成,成为技术应用中的关键问题。

4 电气工程机器人巡检技术的未来发展趋势

电气工程机器人巡检技术未来将朝智能化、集成化和普及化方向发展。通过人工智能、深度学习和多传感器融合技术,机器人将在故障识别、风险预测和环境适应性上更加精准,同时依托 5G 技术实现高效的数据传输与实时监控。在应用场景方面,机器人巡检将从传统的变电站和输电线路扩展到海上风电场、超高压线路等复杂环境,并深度结合物联网、云计算和大数据平台,实现设备智能监测与运维优化。随着技术成熟和生产工艺优化,机器人的成本将显著降低,标准化的推动也将促进其在中小型电力企业中的普及。未来,机器人巡检技术将在推动电力行业智能化和自动化转型中发挥关键作用,为设备管理和维护提供高效、智能的解决方案。

5 结语

电气工程机器人巡检技术在提升巡检效率、安全性和降低成本方面具有显著优势,尤其在高风险和复杂环境中应用效果突出。随着人工智能、传感器融合和自动化技术的进步,机器人巡检的智能化、精确度将不断提升。然而,技术成熟度、成本控制和标准化等问题仍需解决,限制了其广泛应用。未来,随着技术的不断创新和行业标准的逐步建立,机器人巡检技术有望在电力设施中得到更广泛的应用,推动电力行业的智能化和自动化发展。同时,跨领域技术集成和应用场景拓展将进一步提高其效能,为电气工程的运维提供更加高效、智能的解决方案。

参考文献:

- [1] 冯坤,马磊,孙永奎.基于激光传感器的变电站巡检机器人导航[J].传感器与微系统,2019,38(2):118-120+132.
- [2] 邓国权.高压变电巡检机器人智能技术研究[J].山东工业技术,2019(2):160.
- [3] 李振宇,郭锐,赖秋频,等.基于计算机视觉的架空输电线路机器人巡检技术综述[J].中国电力,2018,51(11):139-146.