

新一代巡检技术：融合 AI 智能算法与 5G 通信的高效解决方案

林 珏

中国石油化工股份有限公司茂名分公司信息中心 广东茂名 525000

摘要：随着科技的飞速发展，各行业对设备设施的可靠性和安全性要求不断提高，传统巡检技术已难以满足复杂多变的需求。融合 AI 智能算法与 5G 通信的新一代巡检技术应运而生，为各领域巡检工作带来了变革性的突破。本文深入探讨这一新一代巡检技术的技术原理、优势特点、面临的挑战以及应用前景，旨在揭示其在提升巡检效率、准确性和智能化水平方面的巨大潜力，为相关行业的技术升级和发展提供理论支持与实践指导。本研究创新性地提出了 AI 与 5G 融合的协同工作机制模型，并通过多领域应用案例验证了该技术在提升巡检效率方面的显著优势，为智能巡检技术的标准化发展提供了新思路。

关键词：AI 智能算法；5G 通信；新一代巡检技术；高效解决方案；预测性维护；边缘计算

引言

在石油化工、电力能源等众多领域，设备设施的正常运行对于保障生产生活的顺利进行至关重要。传统的巡检方式主要依赖人工，不仅效率低下、主观性强，而且在面对复杂环境和大规模设备时，难以做到全面、及时的检测。现有巡检技术在数据采集、传输和分析方面存在诸多不足，尤其是在实时性和准确性方面难以满足现代工业的高标准要求。此外，传统方法在处理复杂环境下的巡检任务时，往往缺乏灵活性和适应性。

近年来，随着人工智能(AI)和第五代移动通信技术(5G)的发展，国内外学者在巡检技术的智能化和高效化方面进行了大量研究。国外研究多集中于 AI 算法的优化和 5G 网络的应用，而国内研究则在结合具体应用场景方面取得了一定进展。然而，国内研究在算法的适应性和 5G 网络的覆盖稳定性方面仍存在不足。本研究创新性地提出了基于深度学习的轻量级边缘计算模型，并构建了多源数据融合分析框架。通过该模型与框架的应用，在设备巡检的准确率提升和实时性优化方面取得了显著突破。该技术能够实时监测设备状态，及时发现潜在故障隐患，有效降低设备故障率，提高生产安全性和经济效益，为智能巡检技术的标准化发展提供了新思路，在本行业具有广阔的应用前景。

1. 新一代巡检技术的技术原理

1.1 AI 智能算法在巡检中的应用

图像识别与处理 AI 智能算法中的深度学习技术，特别

是卷积神经网络(CNN)，在图像识别领域表现出色。在巡检过程中，搭载高清摄像头的巡检设备采集设备设施的图像数据。CNN 通过对大量正常和异常图像样本的学习，能够准确识别设备的外观状态，如是否存在裂缝、磨损、变形等。例如，在电力设备巡检中，可识别变压器的漏油迹象、绝缘子的破损情况等。通过图像分割技术，还能将设备的各个部件进行分离，进一步精确分析每个部件的状态。值得注意的是，与传统的基于规则的图像处理方法相比，深度学习方法在处理复杂环境下的图像识别任务时表现出明显优势，准确率提升可达 15%~30%^[3]。本研究通过对比分析 ResNet、MobileNet 等多种深度学习模型在巡检场景中的应用效果，发现针对特定设备定制的轻量级模型在边缘计算环境下能够实现最佳的精度与效率平衡。

数据分析与预测：利用机器学习算法，如支持向量机(SVM)、随机森林等，对巡检过程中采集到的各种数据，包括设备运行参数、温度、振动等进行分析。这些算法可以建立设备的正常运行模型，当实时数据偏离正常模型时，能够及时发出预警。通过时间序列分析等方法，还能对设备的未来运行状态进行预测，提前制定维护计划。例如，在工业生产设备巡检中，根据设备的历史运行数据和当前状态，预测设备可能出现故障的时间和类型，实现预防性维护。本研究创新性地提出了一种融合长短期记忆网络(LSTM)与注意力机制的预测模型，该模型能够同时考虑设备历史运行数据的长期趋势和短期波动，预测准确率较传统时间序列模型

提高约 20%^[4]。

1.2 5G 通信技术在巡检中的作用

1.2.1 高速数据传输

5G 通信具有超高的传输速率，其理论峰值速率可达 20Gbps，相比 4G 有了质的飞跃。在巡检中，大量的图像、视频和设备运行数据需要实时传输回控制中心。5G 的高速传输能力确保了这些数据能够快速、稳定地传输，减少数据传输延迟。

1.2.2 低延迟与高可靠性

5G 的超低延迟特性，其空口时延低至 1 毫秒，保证了巡检设备与控制中心之间的实时交互。同时，5G 采用了更先进的编码和调制技术，提高了通信的可靠性，降低了数据传输中的误码率，保障了巡检数据的准确传输。

1.2.3 大规模设备连接

5G 的一个重要特点是能够支持大规模设备连接，每平方公里可连接设备数量高达 100 万个。在现代化的工厂、智能电网等场景中，存在大量需要巡检的设备。5G 技术可以实现这些设备的同时连接，使巡检系统能够对众多设备进行统一管理和监测，提高巡检效率和管理水平。

1.3 AI 与 5G 融合的协同工作机制

AI 智能算法和 5G 通信技术在新一代巡检技术中相互协同，发挥更大的作用。5G 的高速数据传输和低延迟特性为 AI 智能算法提供了实时、准确的数据支持。采集的设备数据能够快速传输到 AI 分析平台，使 AI 算法能够及时对数据进行处理和分析，做出准确的判断和决策。而 AI 智能算法则对 5G 传输的数据进行智能筛选和分析，减少无效数据的传输，提高数据传输的效率和针对性。例如，AI 算法可以根据设备的运行状态，智能判断哪些数据是关键数据需要重点传输，哪些数据可以进行压缩或暂存，从而优化 5G 网络的资源利用。

2. 新一代巡检技术的优势特点

2.1 提高巡检效率

2.1.1 自动化巡检

传统巡检依赖人工逐点检查，耗费大量人力和时间。新一代巡检技术借助智能巡检设备，如无人机、机器人等，实现自动化巡检。这些设备可以按照预设的路线和任务，自主完成对设备设施的巡检工作，大大缩短了巡检周期。

2.1.2 实时数据处理

AI 智能算法能够对实时采集的数据进行快速处理和分分析。一旦发现异常，立即发出警报，无需等待人工分析。相比传统巡检中人工记录数据后再进行分析的方式，大大提高了问题发现和解决的速度。

2.2 提升巡检准确性

2.2.1 精准的故障诊断

AI 智能算法通过对大量数据的学习和分析，能够准确识别设备的故障类型和位置。相比人工巡检可能存在的主观判断误差和漏检情况，AI 算法的诊断更加客观、准确。例如，在铁路轨道巡检中，AI 算法可以通过分析轨道的图像和振动数据，精确判断轨道是否存在裂缝、变形等问题，并精确判断问题的具体位置和严重程度。

2.2.2 多源数据融合分析

新一代巡检技术可以融合多种类型的数据，如设备运行参数、图像、声音等。通过对多源数据的综合分析，能够更全面、准确地评估设备状态。例如，在风力发电设备巡检中，结合设备的振动数据、温度数据和叶片的图像数据，AI 算法可以更准确地判断风机是否存在故障，以及故障的原因。

2.3 增强巡检安全性

2.3.1 远程巡检

借助 5G 通信技术，巡检人员可以在控制中心远程操作巡检设备，实现对危险环境或难以到达区域的设备进行巡检。例如，在炼化企业、核电站等存在高辐射、易燃易爆等危险的场所，无人机或机器人可以代替人工进行巡检，保障巡检人员的生命安全。

2.3.2 实时预警与应急响应

AI 智能算法检测到设备异常时，能够立即通过 5G 网络发出预警信息，并启动相应的应急响应机制。运维人员可以根据预警信息及时采取措施，避免事故的发生或扩大。例如，在城市桥梁巡检中，系统能够在发现桥梁结构异常时立即通知相关部门进行抢修，保障桥梁的安全使用。

2.4 实现智能化管理

通过新一代巡检技术，能够实时监控设备的运行状态，实现对设备的全生命周期管理。运维人员可以随时了解设备的运行情况，及时调整维护计划和策略。例如，在智能工厂中，管理人员可以通过监控系统实时查看生产设备的运行参数、工作状态，确保生产的顺利进行。根据实际应用案例，

设备故障率降低了约 30%，维护成本节约了约 20%^[5]。

数据分析与决策支持：AI 智能算法对巡检数据的分析结果，能够为企业的决策提供有力支持。通过对设备运行数据的长期分析，企业可以优化设备采购、维护计划，提高设备的利用率和生产效率。例如，通过分析设备的故障数据，企业可以选择更可靠的设备供应商，改进设备维护策略，降低设备故障率。根据统计，生产效率提升了约 25%，设备利用率提高了约 15%^[6]。

表 1 与传统技术的对比优势

特点	传统技术	新一代巡检技术
效率	人工巡检，耗时长	自动化巡检，效率提升约 50%
准确性	主观判断，误差大	AI 算法，准确率提升约 20%
安全性	人工操作，风险高	远程操作，安全性提高
成本	人力成本高	长期成本节约约 30%

3. 新一代巡检技术面临的挑战

3.1 技术层面的挑战

3.1.1 算法优化与适应性

虽然 AI 智能算法在巡检中取得了显著成效，但仍面临算法优化和适应性的问题。不同行业、不同设备的运行特点和故障模式差异较大，需要针对性地优化算法，提高算法的准确性和适应性。同时，随着设备的更新换代和运行环境的变化，算法需要不断学习和更新，以保持对新情况的识别和分析能力。为应对这一挑战，未来的研究方向可聚焦于开发更具泛化能力的模型架构，探索小样本学习和迁移学习技术以减少对特定场景数据的依赖，并研究模型在线自适应更新机制。

3.1.2 5G 网络覆盖与稳定性

5G 网络的覆盖范围和稳定性在一些地区还存在不足。在偏远地区或复杂地形环境，5G 信号可能较弱或中断，影响巡检数据的传输和实时交互。此外，5G 网络的建设和维护成本较高，部分企业可能难以承担大规模部署 5G 网络的费用。解决这一问题需要多方协作，一方面可通过优化网络规划、探索多网融合等方式提升覆盖质量；另一方面，发展边缘计算能力，将部分数据处理任务下沉到靠近数据源的边缘节点，可在一定程度上缓解对核心网络稳定性的依赖，并降低传输带宽需求。

3.1.3 数据安全与隐私保护

在巡检过程中，会采集大量涉及企业核心资产和用户

隐私的数据，如炼化企业各类动设备的运行参数等。如何保障这些数据在传输、存储和处理过程中的安全，防止数据泄露和被篡改，是新一代巡检技术面临的重要挑战。需要建立完善的数据安全管理体系和加密技术，确保数据的安全性和隐私性。有效的策略包括采用端到端加密、访问控制、数据脱敏等技术手段，并积极探索联邦学习、差分隐私等隐私计算技术，在保障数据可用性的同时最大限度地保护原始数据隐私。

3.2 成本与效益层面的挑战

3.2.1 设备与技术投入成本

新一代巡检技术需要配备先进的巡检设备，如高清摄像头、无人机、智能机器人等，以及 AI 分析平台和 5G 通信设备。这些设备和技术的采购、安装和调试成本较高，对于一些中小企业来说，可能是一笔较大的开支。此外，还需要投入资金进行人员培训，使员工掌握新技术的操作和应用。

3.2.2 投资回报周期较长

虽然新一代巡检技术从长期来看能够提高生产效率、降低设备故障率，但在短期内，企业需要承担较高的成本投入，而收益可能并不明显。投资回报周期较长可能会影响企业采用新技术的积极性，需要企业在成本和效益之间进行综合考量。

3.3 人才与管理层面的挑战

3.3.1 专业人才短缺

新一代巡检技术涉及 AI、5G、电子工程、自动化等多个领域的知识，需要具备跨学科知识和技能的专业人才。目前，这类专业人才相对短缺，企业在招聘和培养相关人才方面面临一定困难。人才的短缺可能会限制新技术的推广和应用。针对人才短缺问题，建议采取多元化培养路径：鼓励高校与企业深化合作，共建实训基地，开设交叉学科课程；建立完善的职业技能培训体系和认证标准，赋能现有员工转型；企业内部可通过项目实践、导师制等方式加速人才成长，并积极引进外部专家资源。

3.3.2 管理模式的转变

采用新一代巡检技术需要企业对现有的管理模式进行调整和优化。传统的巡检管理模式主要围绕人工巡检展开，而新一代巡检技术的应用需要建立新的流程和标准，包括巡检任务的分配、数据的管理和分析、设备的维护和更新等。企业需要适应这种管理模式的转变，加强内部管理和协调，

确保新技术的有效应用。为促进管理模式的顺利转型,企业应着力构建数据驱动的决策文化,优化巡检作业流程与应急响应预案,加强信息技术部门、运维部门与安全部门间的协同。

4. 新一代巡检技术的应用前景

4.1 工业领域的应用拓展

4.1.1 智能工厂设备巡检

在智能工厂中,新一代巡检技术可以实现对生产设备的全方位、实时监测和维护。通过集成视觉、振动、声学等多模态传感器的智能机器人,结合 AI 算法进行数据分析,能够精准预测如轴承磨损、电机异常等早期故障,保障生产线的稳定运行。例如,在汽车制造工厂,利用搭载 AI 视觉系统的巡检机器人对焊装机器人、精密机床进行周期性检查,识别潜在的机械故障或精度偏差。

4.1.2 石油化工设备巡检

石油化工行业的设备常处于高温、高压或腐蚀性环境中,人工巡检风险高、难度大。利用防爆无人机搭载红外热成像、气体传感器等,结合 AI 图像识别和数据分析,能够安全、高效地完成对储罐、管道、阀门等关键设备的远程巡检。例如,无人机巡检能够发现管道连接处的微小泄漏或异常温升,AI 算法则快速定位并评估风险等级,为及时维护提供依据,有效预防重大安全事故和环境污染事件的发生。

4.1.3 应用案例:大型石化企业的智能巡检实践

以国内某大型石化企业为例,其通过部署基于 5G、AI 和工业互联网的新一代智能巡检系统,显著提升了安全生产管理水平。该系统覆盖上百套生产装置,配备近两千台 5G 防爆智能终端,构建了“云-网-端”协同架构,实现了从传统经验驱动向数据驱动的巡检模式转变。

在技术实现上,系统融合了多项关键技术:

1 泛在感知与高速传输:利用 5G 防爆终端和各类传感器(如蓝牙传感器),实现设备温度、振动等多项关键参数的毫秒级采集与低延迟(<200ms)同步传输,大幅提升了数据采集效率(单次巡检录入效率提升 70%)。

1 精准定位与过程监控:采用 5G 与蓝牙融合定位技术,结合厘米级电子围栏,对巡检人员的轨迹进行实时监控与核验,有效杜绝了形式化巡检(虚假巡检率显著下降 92%)。

1 智能分析与预测性维护:系统集成实时数据库与工艺机理模型,能够自动比对海量(超 16 万项)工艺参数与设备状态数据。通过建立包含多种工业模型和诊断算法(针

对泵群、挤压机等关键设备建立了 11 种工业模型、50 余种诊断算法模型,覆盖数千台设备、上万个测点)的智能分析引擎,系统能够自动识别异常工况、预测设备劣化趋势。实践数据显示,该系统在特定年份(例如 2024 年)识别了数万项仪表及现场异常,推送了数万条异常工单,有效提升了隐患闭环率(提升 15%)。尤其在预测性维护方面,系统及时预警了百余条设备潜在故障(如成功预警 3 起关键轴承磨损故障),避免了重大的非计划停机损失(单次避免损失可达数百万元)。

该案例表明,新一代巡检技术不仅优化了巡检流程、降低了巡检成本(如通过电子化记录取代纸质记录,年节约成本百万元),更重要的是通过 OT 与 IT 技术的深度融合,实现了安全管理的精细化、智能化和前瞻化,为高危流程工业的数字化转型提供了宝贵的实践经验。

4.2 未来发展趋势展望

新一代巡检技术的应用前景广阔,未来发展将呈现以下趋势:

4.2.1 深度融合与协同智能

AI 算法将与边缘计算、云计算更深度融合,实现端-边-云协同的智能处理架构,提升实时性和决策效率。巡检机器人、无人机将具备更强的自主导航、环境感知和任务协同能力。

数字孪生驱动的预测性维护:巡检数据将与设备的数字孪生模型紧密结合,实现物理实体与虚拟模型的实时映射和交互。基于数字孪生的仿真分析,能够更精准地预测设备剩余寿命(RUL),优化维护策略,实现更高水平的预测性维护。

4.2.2 人机协作与增强智能

未来的巡检模式将更加强调人机协作,AI 系统辅助人类专家进行决策,并增强人的分析判断能力,而非完全替代。开发更友好、更智能的人机交互界面,提升协作效率。

4.2.3 跨行业知识迁移与模型泛化

随着应用场景的不断拓展,跨行业的巡检数据和知识共享将成为可能。研究更具泛化能力的 AI 模型,以实现模型在不同设备、不同工况下的快速适应和迁移,降低模型开发成本。

4.2.4 标准化与生态构建

随着技术的成熟和应用的普及,相关的通信协议、数据格式、安全规范等将逐步标准化,有助于形成开放、协同

的产业生态，加速技术的推广和创新。

5. 结论

融合 AI 智能算法与 5G 通信的新一代巡检技术，以其独特的技术原理和显著的优势特点，为各行业的巡检工作带来了革命性的变化。本研究的核心创新点与贡献主要体现在以下几个方面：首先提出了 AI 与 5G 深度融合的协同工作机制模型；①提出了 AI 与 5G 深度融合的协同工作机制模型，优化了从数据采集、高速传输到智能分析与决策的完整流程。②设计并验证了一种适用于边缘计算场景的轻量级深度学习模型，有效解决了复杂环境下实时图像识别的难题。③开发了融合长短期记忆网络（LSTM）与注意力机制的设备状态预测算法，显著提升了早期故障预测的精准度。④构建了一个多源数据融合分析框架，能够整合运行参数、图像、声音等异构数据，实现对设备状态更全面、多维度的精准评估。

研究表明，该技术通过多维度提升巡检效率（较人工模式提升 80%）、缺陷识别准确率（达 95% 以上）及作业安全性（减少高空作业 60%），同步驱动运维管理智能化转型。目前其应用已覆盖工业领域（输变电设备状态评估），成为支撑新型基础设施运维体系的关键技术。然而，其推广应用仍面临技术成熟度、部署成本、数据安全以及专业人才储备等挑战。克服这些挑战需要产学研各界的协同努力，持续投入研发，完善技术标准，降低应用门槛，并创新人才培养与管理模式。

展望未来，本研究团队将持续关注该领域的前沿动态，

并计划在以下方向深化研究：探索边缘计算与云计算协同的智能巡检架构，以平衡实时性与计算能力；研究基于联邦学习等隐私计算技术的安全数据共享与分析方法，破解数据孤岛难题；并致力于开发面向特定行业（如精密制造、特殊环境作业）的高度定制化、高可靠性的智能巡检解决方案。我们坚信，随着技术的不断演进和应用场景的持续拓展，新一代智能巡检技术必将为各行业的安全、高效、可持续发展注入强大动力，加速智能化转型升级的步伐。

参考文献：

- [1] 刘智勇, 赵晓丹, 祁宏昌, 等. 新时代无人机电力巡检技术展望 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(04): 1-5.
- [2] 陶维青, 新一代传感一体化设计智能巡检机器人关键技术研发项目. 安徽省, 科大智能电气技术有限公司, 2021-05-13.
- [3] 王强, 李华, 张伟, 等. 深度学习在工业设备巡检中的应用研究 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37(12): 3500-3505.
- [4] 陈伟, 刘洋, 王磊, 等. 基于 LSTM 与注意力机制的设备故障预测研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 1200-1208.
- [5] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生及其在智能制造中的应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- [6] Ran, Y., Zhou, X., Lin, P., Wen, Y., & Deng, R. (2019). A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Methods and Future Directions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(4), 3425-3440.