

智能传感器网络在机电设备故障预测与健康管理中的作用

马小龙

西安昱昌环境科技有限公司 陕西西安

【摘要】随着工业智能化的推进，机电设备的故障预测与健康管理成为提升生产效率和降低维护成本的关键。智能传感器网络凭借其分布式感知、实时数据采集和智能分析能力，在这一领域展现出巨大潜力。本文首先介绍了智能传感器网络的架构与技术优势，随后探讨了其在故障监测、数据融合与健康评估中的应用机制，并提出了基于智能算法的健康管理策略。最后，对未来发展趋势进行了展望。

【关键词】智能传感器网络；机电设备；故障预测；健康管理；工业智能化

【收稿日期】2025 年 1 月 23 日 **【出刊日期】**2025 年 2 月 26 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20250084

Role of intelligent sensor network in fault prediction and health management of electromechanical equipment

Xiaolong Ma

Xi'an Yurcent Environmental Technology Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi

【Abstract】 With the advancement of industrial intelligence, the fault prediction and health management of electromechanical equipment have become the key to improve production efficiency and reduce maintenance costs. Smart sensor networks, with their distributed sensing, data collection in real time, and intelligent analysis capabilities, have shown great potential in this field. This paper first introduces the architecture and technical advantages of intelligent sensor network, then discusses its application mechanism in fault monitoring, data fusion and health assessment, and proposes a health management strategy based on intelligent algorithm. Finally, the future development trend is discussed.

【Keywords】 Intelligent sensor network; Mechanical and electrical equipment; Fault prediction; Health management; Industrial intelligence

引言

机电设备是现代工业生产的核心，其运行状态直接影响生产效率和产品质量。传统的设备维护方式多依赖于定期检修，这种方式不仅成本高昂，而且难以精准预测故障，导致设备突发故障时停机时间过长，严重影响生产进度。近年来，随着物联网、大数据和人工智能技术的快速发展，智能传感器网络作为一种新兴的监测技术应运而生。本文旨在深入探讨智能传感器网络在机电设备故障预测与健康管理中的应用机制与优势，为工业智能化发展提供理论支持与实践指导。

1 智能传感器网络的架构与技术优势

智能传感器网络是一种基于物联网技术的分布式监测系统，由大量微型传感器节点组成，这些节点不仅具备感知功能，能够实时采集机电设备的振动、温度、压力、电流、电压等多维度数据，还具备一定的计算与通信能力。它们可以对采集到的数据进行初步处理，并通过无线通信技术将数据传输至中心处理单元。与传统的 PLC（可编程逻辑控制器）和 DCS（分布式控制系统）相比，智能传感器网络具有更高的灵活性和扩展性。PLC 和 DCS 通常依赖于固定的硬件架构和集中式控制逻辑，而智能传感器网络则通过分布式部署和无线通信技术，能够更灵活地适应复杂设备结构和动态监测需求。此外，

作者简介：马小龙（1989-）男，回族，宁夏回族自治区固原市，中级，本科，研究方向为机械工程。

智能传感器网络的节点具备自主感知和初步处理能力，能够实现更精细化的数据采集和分析，而 PLC 和 DCS 则更多依赖于预设的程序和固定的监测点。

智能传感器网络的技术优势十分显著。它具备高精度监测能力，能够捕捉设备微小状态变化。在大型电机设备中，光纤传感器可实时监测温度变化，其精度高、抗电磁干扰能力强，能够准确反映电机内部的热状态。无线传感器网络则用于采集振动数据，通过对振动信号的频谱分析，可以检测到电机转子不平衡、轴承磨损等早期故障特征。这些技术虽然在风机、电机等设备中已有应用，但在智能传感器网络中，通过多维度数据的融合分析，能够提供更全面的设备运行状态评估^[1]。例如，结合温度和振动数据，可以更准确地判断故障的严重程度和发展趋势。此外，针对传感器安装位置、角度和介质对准确性的影响，智能传感器网络可以通过优化传感器布局、采用多传感器融合技术以及引入智能算法进行数据校正，进一步提高监测精度。对于小而精的自动化设备，智能传感器网络可以通过微型化设计和灵活的部署方式，实现精准监测。

智能传感器网络的分布式部署方式是其另一大优势。它可以覆盖复杂设备结构，实现全面监测。以数控机床为例，这种设备结构复杂，包含多个关键部件，如刀具、主轴和导轨等。通过在这些关键部位部署不同类型的传感器，如在刀具处安装力传感器和温度传感器，监测切削力和刀具温度；在主轴上安装振动传感器和转速传感器，监测主轴的振动状态和运行速度；在导轨上安装位移传感器，监测导轨的磨损情况和运动精度。这种分布式监测方式能够实时获取设备各个关键部位的运行状态信息，从而实现对设备整体运行状态的全面感知。与传统的集中式监测方式相比，分布式监测不仅提高了故障诊断的准确性，还能更早地发现潜在故障，从而减少设备停机时间，提高设备的可靠性和生产效率，为工业生产提供了可靠的保障。

无线传感器网络作为智能传感器网络的重要组成部分，其稳定性和抗干扰能力是关键因素。无线传感器网络通过自组织和多跳通信技术，能够在复杂环境中实现数据的可靠传输^[2]。为了提高稳定性，无线传感器网络采用了多种技术手段，如信道编码、自动重传请求（ARQ）和多路径传输等，以减少数

据丢失和传输错误。此外，通过采用频段选择、信号加密和干扰抑制技术，无线传感器网络能够有效抵抗电磁干扰，确保数据传输的准确性。例如，在工业环境中，无线传感器网络可以通过动态频段切换，避开干扰频段，从而提高通信的可靠性。同时，通过优化传感器节点的通信协议和能量管理策略，无线传感器网络能够在低功耗模式下实现高效运行，进一步增强了其在复杂工业环境中的应用价值。

2 智能传感器网络在故障监测中的应用

机电设备故障监测是预防性维护的关键环节，其重要性在于能够提前发现潜在故障，从而避免突发故障导致的生产中断和设备损坏。智能传感器网络通过实时采集设备运行数据，能够精准识别故障特征，极大地提升了故障监测的效率和准确性。与传统的 PLC（可编程逻辑控制器）和 DCS（分布式控制系统）相比，智能传感器网络不仅具备数据采集和预警功能，还通过分布式部署和多传感器融合技术，实现了更精细化的故障检测和更全面的状态评估。

2.1 提前发现潜在故障的机制

智能传感器网络通过在设备的关键部位部署多种类型的传感器，能够实时采集设备运行中的多维度数据，包括振动、温度、压力、液位、流量、氧含量等。这些传感器不仅能够感知设备的当前状态，还能通过数据分析技术捕捉设备运行中的微小变化，从而提前发现潜在故障^[3]。例如，通过在电机轴承处安装高精度振动传感器，智能传感器网络可以实时监测振动信号的频率、幅值和相位变化。当振动信号出现异常时，系统会结合设备的历史数据和故障模式库，利用机器学习算法（如支持向量机、神经网络等）对数据进行分析，判断是否存在故障风险。一旦检测到潜在故障特征，系统会立即发出预警信号，并提供故障诊断报告，帮助维护人员快速定位故障原因。

此外，智能传感器网络还可以通过数据融合技术，将不同类型的传感器数据进行综合分析。例如，结合振动信号和温度数据，系统可以更准确地判断故障的严重程度和发展趋势。这种多维度数据分析能力使得智能传感器网络能够在故障发生前发出预警信号，提醒维护人员采取措施，从而有效避免故障的进一步恶化。

2.2 多参数监测与分布式监测网络

智能传感器网络不仅局限于振动和温度监测,还能够整合多种参数,如压力、液位、流量、氧含量等,形成一个全面的监测网络。通过在设备的不同部位部署不同类型的传感器,智能传感器网络能够实现对设备整体运行状态的全面感知。例如,在工业机器人中,除了监测关节电机的运行温度外,还可以通过压力传感器监测液压系统的压力变化,通过流量传感器监测冷却液的流量,通过液位传感器监测润滑油的液位^[4]。在电机设备中,除了振动和温度监测外,还可以通过电流传感器监测电机的运行电流,通过氧含量传感器监测设备周围的氧气浓度,以防止因缺氧导致的安全事故。

这种多参数监测方式能够更全面地反映设备的运行状态,为故障诊断提供更丰富的信息。例如,在液压系统中,通过监测压力和流量的变化,可以提前发现液压泵的磨损或堵塞问题。在化工设备中,通过监测氧含量和温度变化,可以预防因高温或缺氧导致的爆炸事故。智能传感器网络通过分布式部署,将这些不同类型的传感器有机结合起来,形成一个完整的监测网络,从而实现对设备运行状态的全面感知和精准故障诊断。

3 基于智能传感器网络的数据融合与健康评估

机电设备的健康状态评估需要综合多源数据进行分析。智能传感器网络采集的海量数据中包含设备运行状态、故障特征以及环境因素等信息。通过数据融合技术,可将这些异构数据进行整合与分析,提取有价值的信息用于健康评估。数据融合方法包括基于统计的融合、基于模型的融合以及基于人工智能的融合^[5]。基于统计的融合通过计算数据的相关性与相似性,提取特征参数;基于模型的融合则利用设备的物理模型与数学模型,对数据进行校正与分析;基于人工智能的融合则借助机器学习算法,如神经网络、支持向量机等,自动学习数据特征,实现设备健康状态的智能评估。

在健康评估过程中,智能传感器网络通过建立设备健康指标体系,对设备运行状态进行量化评估。健康指标通常包括设备性能指标、可靠性指标与安全性指标。通过对采集数据的实时分析,结合设备历史数据与故障模式,智能传感器网络可计算设备的健康指数,并根据健康指数的变化趋势预测设备

的剩余使用寿命^[6]。在航空发动机中,通过监测燃油流量、燃烧室温度、叶片振动等多源数据,利用数据融合与健康评估算法,可实时评估发动机的健康状态,预测其剩余使用寿命,为航空维修提供科学依据。

基于智能传感器网络的数据融合与健康评估技术,为机电设备的精细化管理提供了技术支持,有助于实现设备的全生命周期健康管理。随着大数据和人工智能技术的不断发展,数据融合与健康评估的精度将进一步提高,为工业设备的智能化管理提供更有力的支持。

4 智能传感器网络的健康管理策略与应用

智能传感器网络不仅能够监测设备故障,还可基于实时数据制定健康管理策略。健康管理策略包括故障预警、维护计划制定与优化、设备性能提升等。通过实时监测设备运行状态,智能传感器网络可在故障发生前发出预警信号,提醒维护人员及时采取措施^[7]。预警信号的生成基于设备健康指数的变化趋势与故障特征的识别。当设备健康指数低于设定阈值或出现故障特征时,系统自动发出预警,并提供故障诊断报告,帮助维护人员快速定位故障原因。

在维护计划制定方面,智能传感器网络可根据设备健康状态与剩余使用寿命,动态调整维护计划。与传统的定期维护方式相比,基于智能传感器网络的维护计划更加精准与高效^[8]。通过分析设备运行数据与历史维护记录,系统可预测设备的潜在故障风险,并根据风险等级制定个性化的维护方案。在工业机器人中,通过监测关节电机的运行状态与齿轮磨损情况,智能传感器网络可预测机器人手臂的使用寿命,并根据预测结果调整维护周期,减少不必要的维护工作,降低维护成本。

智能传感器网络还可通过数据分析优化设备运行参数,提升设备性能。在工业锅炉中,通过监测燃烧效率、烟气成分等数据,智能传感器网络可实时调整燃烧参数,提高燃烧效率,降低能耗与污染物排放。智能传感器网络的健康管理策略为机电设备的高效运行与可靠性维护提供了智能化解决方案,推动了工业设备管理的变革。随着技术的不断进步,智能传感器网络将与人工智能、大数据等技术深度融合,进一步提升设备健康管理的智能化水平。

5 结语

智能传感器网络在机电设备故障预测与健康管理中展现出巨大的应用潜力。其高精度监测、数据融合与智能分析能力,为设备的精细化管理提供了有力支持。随着技术的不断进步,智能传感器网络将与人工智能、大数据等技术深度融合,进一步提升设备健康管理的智能化水平。未来,智能传感器网络有望在更多工业领域广泛应用,为工业智能化发展注入新动力。

参考文献

- [1] 李畅,洪云飞. 基于无线传感器网络的造纸废水排放水质监测研究 [J]. 造纸科学与技术, 2025, 44 (02): 44-47.
- [2] 张玉博. 基于智能传感器网络的国网电力自动化系统设计 [J]. 自动化应用, 2025, 66 (04): 168-170.
- [3] 孙泽钰,宫新保. 基于 FMCW 雷达的异常行为智能识别检测技术 [J]. 信息技术, 2025, (02): 74-79.
- [4] 徐慧,吴美连. 基于 K-means++和粒子群算法的 SDN 多控制器部署方法 [J]. 湖北工业大学学报, 2025, 40 (01): 43-48.
- [5] 查建中,周迅. 高压开关柜局部放电检测方法及相关案例 [J]. 电气开关, 2025, 63 (01): 96-101.
- [6] 张凌峰,丁晓宇,潘慕绚. 基于 PSO-BP 温度补偿算法的智能压力传感器设计 [J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57 (01): 160-168.
- [7] 叶苗,王珏,蒋秋香,等. 基于 SDN 的通存一体化边缘在网存储节点选择方法 [J/OL]. 计算机科学, 1-13[2025-03-17].
- [8] 许宝莉. 软件定义网络架构与关键技术探讨 [J]. 网络安全技术与应用, 2025, (02): 8-10.
- [9] 宗耀,相翠翠,张彬,等. 高压开关柜综合状态监测系统的设计与应用研究 [J]. 自动化应用, 2025, 66 (03): 221-224.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

