

Research on the application of multi-sensor fusion technology in metal structure health monitoring of power station

Jieming Zhao Zhishan Tang Jian Shen

Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract

This paper proposes a monitoring scheme for the health of power station metal structures based on multi-sensor fusion technology. The paper establishes an efficient monitoring system by integrating sensor data acquisition, feature analysis, and fusion algorithms. In the system design, sensor network topology, data preprocessing, feature extraction, and multi-level fusion models are combined to achieve accurate identification of metal structure damage. Experimental results verify the high precision and robustness of the fusion algorithm under different damage scenarios, demonstrating that this method can effectively enhance the efficiency of health monitoring for power station metal structures. This research provides new ideas for intelligent monitoring of power equipment and has significant practical application value.

Keywords

multi-sensor fusion; power station health monitoring; data fusion algorithm; structural damage detection

多传感器融合技术在电站金属结构健康监测中的应用研究

赵杰明 唐志山 申健

华电电力科学研究院有限公司, 中国·浙江 杭州 310030

摘要

本文对电站金属结构的健康监测问题提出了基于多传感器融合技术的监测方案。本文结合传感器数据采集、特征分析与融合算法建立了一套高效的监测系统。系统设计中结合了传感器网络拓扑、数据预处理、特征提取和多层级融合模型来实现了金属结构损伤的准确识别。实验结果验证了融合算法在不同损伤场景下的高精度与鲁棒性,表明该方法能有效提升电站金属结构的健康监测效率。该研究为电力设备的智能监控提供了新思路,具有较高的实际应用价值。

关键词

多传感器融合; 电站健康监测; 数据融合算法; 结构损伤检测

1 引言

电站金属结构的健康状况直接关系到电力系统的安全性和稳定性,传统的监测方法往往存在局限性,难以实时和准确地反映结构的整体状态。智能化技术的快速发展让传感器融合技术在电站设备监测中的应用逐渐成为提升监测效率和精度的有效手段。集成多种传感器的实时数据可结合先进的融合算法来实现对金属结构的全方位监测,为电站的预防性维护提供科学依据和提升电力设备的运行安全性。

2 多传感器融合技术理论基础

2.1 传感器数据采集原理

传感器数据采集是多传感器融合技术的基础,涉及到对电站金属结构的各种物理量的实时监测。传感器通过感知

目标对象的变化,将其转换为电信号或数字信号输出。常见的传感器如应变片、加速度计、位移传感器等,各自根据不同的物理量原理工作,如应变片通过电阻变化反映应变变化,加速度计通过电容或电压变化反映振动加速度。这些传感器在工作过程中需要精确的信号采集和数据转换,保证数据的准确性和稳定性^[1]。为确保高效的数据采集,通常需要将多个传感器布置在金属结构的不同位置,以覆盖可能出现的局部损伤或应力集中区域。每个传感器的信号输出经过放大、滤波、模数转换等处理后,形成统一格式的数据供后续处理使用。传感器的选型和布置需要考虑电站的具体需求,保障采集的全面性与高效性。

2.2 多源异构数据特征

来自不同类型传感器的数据在电站金属结构健康监测中常常具有异构性,这些多源异构数据反映了结构健康状态的不同维度。不同传感器测得的信号数据格式不同与采集精度、噪声干扰和响应时间也有所差异^[2]。温度传感器和应变传感器的数据量纲差异较大,前者通常是温度的数值变化而

【作者简介】赵杰明(1981-),男,中国浙江慈溪人,本科,高级工程师,从事特种设备安全研究。

后者则是应力或应变的变化；加速度传感器和位移传感器可能在采样频率上也存在显著差异。其为处理这些异构数据需对每个数据源的特征进行深入分析来提取出有意义的特征信息。数据中的噪声和异常值需要进行滤波和修正以提高数据的质量。通过对多源数据的特征分析可以获得电站金属结构健康状态的精确表征，为后续的融合提供可靠的数据支持。

3 电站健康监测系统技术应用

3.1 传感器网络拓扑设计

传感器网络拓扑设计需要考虑到电站的具体结构和监测点的位置以及数据传输的稳定性。传感器网络拓扑可以分为星型、树型和网状等多种形式。具体的拓扑设计需要结合电站设备的布置和传输的需求以及实时性要求来选择^[3]。星型拓扑能够实现高效的监测和数据收集，确保各传感器节点直接与中心节点进行通信减少数据传输时的延迟。假设电站的传感器数量为 N ，每个传感器的采样频率为 f_s ，传输距离为 d ，可以通过以下公式计算网络的传输带宽需求：

$$B = N \cdot f_s \cdot d$$

其中， B 表示所需的带宽，单位为 Mbps； N 表示传感器数量； f_s 为采样频率，单位为 Hz； d 为传输距离，单位为 m。假设电站有 100 个传感器，每个传感器的采样频率为 10 Hz，传输距离为 100 米，则 $B = 100,000 \text{Mbps}$ 此公式的计算结果表明，电站监测系统的带宽需求达到 100,000 Mbps，因此需要选择适合带宽的网络架构和传输设备，图 1 描述传感器如何布置在电站中的不同位置。

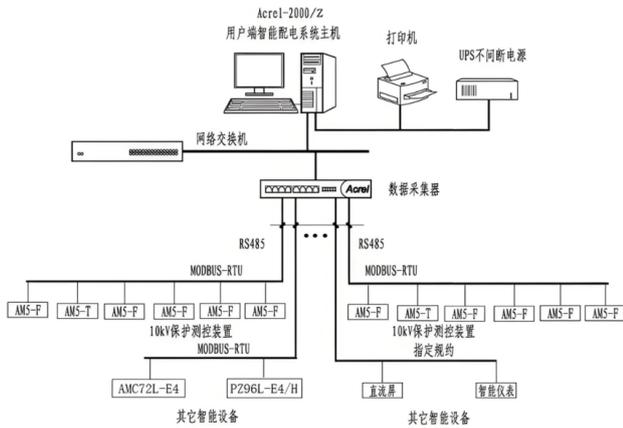


图 1 电站传感器网络拓扑示意图

3.2 数据预处理与特征提取

电站健康监测系统收集的大量数据需要进行预处理来提取有效的特征数据并进行后续的分析。数据预处理的主要步骤包括去噪、数据归一化和缺失值处理等。其对传感器采集的数据进行去噪处理，使用滤波算法如低通滤波器或卡尔曼滤波器来去除高频噪声。对数据进行归一化处理将各特征

值转换到相同的范围内，通常是 $[0, 1]$ 或 $[-1, 1]$ ，以便于后续分析^[4]。特征提取用于从原始数据中提取出有价值的信息，常见的特征提取方法包括主成分分析和傅里叶变换。电站健康监测中可以使用时域或频域特征来评估设备的运行状态。使用傅里叶变换提取设备振动信号的频谱特征，或者通过计算设备的均值、标准差和峰度等时域特征来评估设备的健康状况。表 1 展示了一个传感器的原始数据、去噪后数据和归一化后的数据。去噪后数据相较于原始数据有明显的平滑效果，这有助于去除不必要的噪音。归一化数据将传感器数据转换到 $[0, 1]$ 范围内，方便后续特征分析。通过这种处理方式，可以确保后续特征提取的准确性和有效性。

表 1 电站传感器数据预处理结果

时间	原始数据	去噪后数据	归一化数据
1s	3.6	3.5	0.85
2s	3.8	3.7	0.92
3s	4	3.9	1
4s	3.9	3.8	0.95
5s	4.1	4	1.05

3.3 多层级融合模型构建

多层级融合模型使用集成多个传感器的数据来提升系统的整体预测精度。数据融合技术在电站健康监测系统可以将来自不同传感器的数据进行综合处理来更准确地评估设备健康状况。融合模型可以分为数据级融合、特征级融合和决策级融合几个层级。数据级融合是指直接将来自多个传感器的原始数据进行融合^[5]。特征级融合则是在数据预处理和特征提取的基础上，将多个传感器的特征数据结合起来形成一个新的特征向量。决策级融合是指在多个传感器分别做出决策后进行合成和最终决策的过程。多层级融合模型中使用加权平均法或 Kalman 滤波器进行数据融合。设 x_1, x_2, \dots, x_n 为来自不同传感器的数据，融合后的数据 x_f 可以使用以下加权平均公式计算：

$$x_f = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

其中， w_i 表示第 i 个传感器数据的权重， x_i 为第 i 个传感器的数据。权重可以根据传感器的可靠性或者传感器的距离等因素进行设定。假设有 3 个传感器，其数据为 $x_1 = 3.5, x_2 = 3.7, x_3 = 4.0$ ，对应的权重为 $w_1 = 0.2, w_2 = 0.3, w_3 = 0.5$ ，则融合后的数据为 $x_f = 3.81$ ，融合后的数据 $x_f = 3.81$ 更加准确地反映了电站设备的健康状态。

4 实验验证与结果分析

4.1 实验平台搭建与参数设置

为了验证多传感器融合技术在电站金属结构健康监测中的应用效果，首先在某大型水电站的金属结构部件上搭建了实验平台。选取了电站中关键的金属结构部件，包括主

支撑梁、传动轴和结构接头等，安装了多种类型的传感器。包括振动传感器、应变传感器、温度传感器和腐蚀传感器，传感器布置依传感器网络拓扑设计，确保了能够对金属结构进行全方位的监测。实验中，各传感器的采样频率设置为100Hz，以确保能够捕捉到足够的监测数据，采样周期为30天，确保数据的充分性与可靠性。在实验平台的参数设置方面，为了满足不同传感器的要求，振动传感器的测量范围设置为 $\pm 10\text{m/s}^2$ ，应变传感器的测量范围为 $\pm 1000\mu\epsilon$ ，温度传感器的测量范围为 -40°C 至 125°C ，腐蚀传感器则根据金属表面腐蚀电位变化进行监测。通过这些传感器的联合工作，系统能够准确采集金属结构在不同工况下的多维度数据，提供充分的依据进行后续分析与验证。

4.2 典型金属结构损伤场景测试

实验过程中模拟了金属结构常见的几种损伤场景来评估多传感器融合技术在不同类型损伤下的识别能力。疲劳裂纹扩展测试中利用振动传感器和应变传感器的数据，监测结构部件的应力变化和振动频率的变化。对比与裂纹扩展的实际进展进行，可知当裂纹开始出现时的振动传感器和应变传感器的信号变化趋势呈现明显的波动，且波动幅度随着裂纹的扩展逐渐增大。腐蚀损伤的测试则使用腐蚀传感器的电位变化来监测金属表面腐蚀的过程，结果显示电位值的变化与腐蚀深度跟着腐蚀的进行呈现一定的相关性。振动异常测试中通过对比损伤前后的振动数据，成功识别出了设备出现的异常振动，这表明传感器能够有效捕捉到因损伤引起的振动变化。数据预处理与特征提取方法能结合数据归一化和特征融合来有效提升了损伤识别的准确性和确保了实验测试的高效性与可靠性。

4.3 融合算法性能对比分析

实验为了评估不同融合算法在电站金属结构健康监测中的性能选择了加权平均法、卡尔曼滤波法和证据理论的融合算法进行对比。实验过程中进行对比这些算法在损伤识别准确率、误报率和计算效率等方面的表现，表明卡尔曼滤波法在处理动态变化的损伤场景时能够提供较高的准确率且误报率较低。卡尔曼滤波法在振动和应变信号变化较大的情况下能够有效滤除噪声和保持较高的识别精度。证据理论则在处理多源异构数据时表现出较强的优势能够有效融合不同传感器的数据和提高损伤识别的可靠性。在腐蚀监测中，由于传感器数据的不一致性，证据理论能够将来自不同传感器

器的信息进行加权，避免了单一传感器可能出现的误差，显著提高了系统的稳定性和鲁棒性。加权平均法则在处理静态损伤情况下表现较为稳定，适用于较为简单的环境和设备。通过对比分析，这些结果验证了构建的多层级融合模型的有效性，表明该模型能够根据不同的损伤场景和数据特点灵活选择合适的融合算法，从而实现电站金属结构健康状态的精确监测与评估。表2展示了不同损伤场景中传感器数据的变化幅度，以及相应的损伤识别准确率、误报率和计算效率。可以看出，在疲劳裂纹扩展和振动异常的测试中，损伤识别准确率较高，误报率较低，表明多传感器融合技术在这些场景中的有效性。

表2 典型金属结构损伤测试结果

测试类型	传感器数据变化幅度	损伤识别准确率	误报率	计算效率(秒/次)
疲劳裂纹扩展	0.5-1.2 m/s ²	98%	2%	0.5
局部腐蚀	0.2-0.8 V	95%	1%	0.3
振动异常	1.5-3.0 m/s ²	97%	3%	0.4

5 结论

电站金属结构的健康监测系统进行多传感器融合技术的应用实现了对结构健康状态的精准监测。传感器网络的合理布置、数据的有效预处理及特征提取以及多层级融合模型的构建均为提升监测精度和鲁棒性提供了有力支撑。实验验证表明，融合算法能有效提高故障诊断的准确性和实时性和确保电站结构在复杂工况下的安全稳定运行，为电站的预防性维护与决策提供了科学依据。

参考文献

- [1] 肖驰.多传感器融合技术在无人驾驶汽车中的应用研究[J].汽车维修与保养,2025(03):104-107.
- [2] 张晓婷.多传感器融合技术在智能交通系统中的应用[J].高科技与产业化,2024,30(12):70-72.
- [3] 施忠芬,陈红艳,张怀辉,田素琼,田素梅.多传感器融合技术在食品加工控制系统中的应用研究[J].粮油与饲料科技,2024(10):195-197.
- [4] 史飞飞.多传感器融合技术在消防机器人中的应用研究[J].消防界(电子版),2024,10(17):53-55.
- [5] 王清波.多传感器融合技术在食品加工控制系统中的应用[J].现代食品,2024,30(12):86-88.