

橡胶树，分布在不规则的地形上，传统的割胶路径规划方法效率低下且难以适应复杂的环境变化。为了解决这一问题，研究人员首先收集了橡胶园的详细数据，包括橡胶树的位置、生长状况、历史割胶记录以及地形信息等。这些数据通过传感器网络和人工记录的方式获取，涵盖了橡胶园的各个方面。然后，利用深度学习算法对这些数据进行分析 and 处理，构建了一个割胶路径优化模型。该模型能够根据实时数据动态调整割胶路径，考虑到割胶人员的工作效率和胶乳的产量。具体来说，模型通过学习橡胶树的分布特征和割胶历史数据，预测出最优的割胶顺序和路径，使得割胶人员能够按照模型的建议高效地完成割胶任务。在实际应用中，该模型通过智能手机应用向割胶人员提供最优路径建议，帮助他们更准确地规划行走路线，避免了不必要的往返和重复劳动，显著提高了割胶作业的效率 and 胶乳的收集率。

经过一段时间的运行，该橡胶园的割胶效率得到了显著提升，胶乳产量也有所增加，证明了深度学习算法在割胶路径优化中的实际应用价值。具体来说，割胶时间缩短了约20%，割胶人员的劳动强度降低了30%，胶乳产量提高了15%左右。这些成果不仅为橡胶园带来了直接的经济效益，还为橡胶产业的智能化发展提供了有力的技术支撑。

此外，该案例还展示了深度学习算法在处理大规模和复杂数据集方面的强大能力，以及其在动态环境下的自适应性和灵活性。通过不断学习和优化，模型能够适应橡胶园中橡胶树的生长变化和环境条件的波动，为橡胶园的可持续发展提供了持续的技术支持。

3.2 案例分析与总结

3.2.1 深度学习算法的优势

在该橡胶园的割胶路径优化案例中，深度学习算法展现出了显著的优势。首先，算法能够处理大规模和复杂的数据集，适应橡胶园中不规则的橡胶树分布和多变的环境条件。传统的割胶路径规划方法往往依赖于割胶人员的经验和直觉，难以全面考虑各种因素的相互影响。而深度学习算法通过构建多层神经网络模型，可以自动学习和提取数据中的特征，捕捉橡胶树分布和割胶过程中的复杂规律。

其次，算法的自适应性和动态调整能力使得割胶路径能够根据实际情况灵活变化，提高了割胶作业的灵活性和适应性。例如，在遇到突发的天气变化或橡胶树生长更新时，模型能够迅速根据实时数据重新规划路径，确保割胶作业的顺利进行。此外，深度学习算法还具有强大的泛化能力，通过在大量数据上进行训练，能够将学到的知识应用到新的场景中，为不同地区的橡胶园提供有效的割胶路径优化解决方案^[4]。

3.2.2 实际应用中的挑战

尽管深度学习算法在该案例中取得了良好的应用效果，但在实际应用中 also 面临一些挑战，数据的准确性和完整性对模型性能的影响较大。在橡胶园中，数据的收集和处理需要依赖于传感器网络和人工记录，而传感器的故障、数据传输的中断以及人工记录的误差等问题都可能导致数据的不准确或缺失，从而影响模型的训练和预测结果。例如，如果橡胶树的生长状况数据不准确，模型可能会生成不合理的割胶路径，导致胶乳产量降低或割胶效率下降。

3.2.3 对农业智能化的启示

该橡胶园的案例为农业智能化的发展提供了重要的启示。深度学习算法在农业领域的应用潜力巨大，能够为传统农业行业提供新的解决方案和优化途径。除了橡胶树割胶路径优化外，深度学习算法还可以应用于农作物的种植管理、病虫害监测与防治、农产品的质量检测等多个方面，通过智能化的决策支持，提高农业生产的效率和质量，实现农业生产的精准化和可持续发展^[5]。

4 结论与展望

随着农业现代化的不断推进，如何利用先进的技术手段提高农业生产效率和产品质量成为研究的重点。本文针对橡胶树割胶路径优化问题，深入研究了深度学习算法的应用。通过对橡胶园实际数据的分析和模型的构建与训练，深度学习算法成功地地为割胶路径规划提供了一种高效、智能的解决方案。实验结果表明，该算法缩短了割胶路径长度，降低割胶人员的劳动强度，还能提高胶乳的产量和质量，为橡胶园的经济效益和可持续发展提供了有力支持。

参考文献

- [1] 杨署光,晁金泉,李言,等.机械伤害、排胶和割胶频率对橡胶树橡胶生物合成的影响[J/OL].热带亚热带植物学报,1-10[2025-01-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1374.Q.20241203.1721.002.html>.
- [2] 丁世涛,高新生,黄肖,等.橡胶树5个主栽品种对日间割胶模式的响应研究[J/OL].西南林业大学学报(自然科学),1-7[2025-01-04].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1218.S.20241115.0917.002.html>.
- [3] 覃怀德,张安洋,聂智毅,等.海南热研73397等5个橡胶树品种全年割胶周期生胶质量变化[J].热带作物学报,2024,45(06):1226-1234.
- [4] 曾山,武玉金,曾丰毅,等.固定式橡胶自动割胶机的设计与试验[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(03):92-102.
- [5] 李杨,潘媛,罗平,等.橡胶树日间割胶试验初报[J].热带作物学报,2023,44(05):937-945.

Study on fatigue life prediction model of metal components in power plant

Jian Shen¹ Huiyuan Song² Tao Lou¹ Yu Fang¹

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

2. Guizhou Dafang Power Generation Co., LTD., Bijie City, Guizhou Province, 551700, China

Abstract

The fatigue life prediction of metal components in power plants is crucial for ensuring the safe and stable operation of power systems. With the development of materials science and computational technology, damage mechanics models have gradually emerged, taking into account the impact of internal micro-damage evolution on fatigue life. In this context, this paper delves into the fatigue damage mechanisms of metal components in power plants and provides a comprehensive review of existing fatigue life prediction models. This offers new and effective methods for predicting the fatigue life of metal components in power plants, which is of great significance for enhancing the reliability and safety of power plant operations.

Keywords

power station metal components; fatigue life prediction; machine learning; stress analysis; damage mechanism

电站金属构件疲劳寿命预测模型研究

申健¹ 宋惠远² 楼韬¹ 方瑜¹

1. 华电电力科学研究院有限公司, 中国·浙江 杭州 310030

2. 贵州大方发电有限公司, 中国·贵州 毕节 551700

摘要

电站金属构件的疲劳寿命预测, 对保障电力系统安全稳定运行至关重要。随着材料科学与计算技术的发展, 损伤力学模型逐渐兴起, 考虑材料内部微观损伤演化对疲劳寿命的影响。基于此背景, 本文针对电站金属构件, 深入剖析疲劳损伤机理, 全面综述现有疲劳寿命预测模型, 为电站金属构件疲劳寿命预测提供新的有力手段, 对提升电站运行可靠性与安全性具有重要意义。

关键词

电站金属构件; 疲劳寿命预测; 机器学习; 应力分析; 损伤机理

1 引言

1.1 研究背景与意义

电站金属构件长期处于高温、高压、高应力及复杂交变载荷等恶劣服役环境中, 疲劳失效是其主要失效形式之一。据统计, 电力行业中因金属构件疲劳问题引发事故占相当大比例, 严重威胁电站的安全稳定运行, 导致巨大的经济损失与社会影响。精准预测电站金属构件的疲劳寿命, 提前采取有效的预防与维护措施, 对保障电力系统可靠运行、降低运维成本、提升电力企业经济效益与社会效益具有极其重要的意义。

1.2 国内外研究现状

【作者简介】申健(1988-), 男, 中国湖北宜昌人, 硕士, 高级工程师, 从事发电企业特种设备和金属结构检验研究。

国内外学者在电站金属构件疲劳寿命预测领域, 已经开展大量研究工作。随着材料科学与计算技术的发展, 损伤力学模型逐渐兴起, 考虑了材料内部微观损伤演化对疲劳寿命的影响。国外如美国、德国等科研团队利用神经网络、支持向量机等算法对金属材料疲劳寿命进行预测, 取得了一定成果。国内众多高校与科研机构也积极开展相关研究, 结合实际工程需求, 探索适用于电站金属构件的高精度预测模型。但目前研究仍存在问题, 如传统模型在复杂工况下预测精度不足, 机器学习模型对数据质量与数量要求较高, 模型的可解释性有待提升等。

2 电站金属构件疲劳损伤机理分析

2.1 疲劳损伤的基本概念

疲劳损伤是指金属材料在交变载荷作用下, 内部微观结构逐渐发生变化, 累积形成微裂纹, 微裂纹不断扩展、连接, 最终导致材料宏观失效的过程。与静态载荷下的失效不

同，疲劳损伤具有累积性、突发性与局部性特点。在低于材料屈服强度的交变应力作用下，经过一定循环次数后，材料可能发生疲劳破坏。

2.2 疲劳裂纹的萌生机制

在晶体缺陷、晶界、夹杂等部位，位错堆积形成应力集中区，当应力集中达到一定程度时，原子键被破坏，形成微裂纹核。对于多晶体金属，晶界处原子排列不规则，变形协调性差，易成为裂纹萌生的优先位置。此外，材料表面的加工缺陷、划痕等也会降低材料表面局部区域的疲劳强度，促使裂纹在表面优先萌生。例如，电站锅炉管道表面的微小凹坑，在长期热应力与机械应力交变作用下，极易引发疲劳裂纹萌生。

3 疲劳寿命预测模型综述

3.1 基于力学理论的预测模型

3.1.1 S-N 曲线法

S-N 曲线法是最经典的疲劳寿命预测方法，通过对标准试样进行不同热点应力水平下的疲劳试验，获取应力（S）与疲劳寿命（N）之间的关系曲线。该曲线通常呈现幂函数形式，即 $S_m N = C$ ，其中 m、C 为材料常数。S-N 曲线法原理简单、易于理解与应用，适用于热点应力水平较为单一、工况相对简单的情况。但其缺点比较明显，仅考虑应力幅值对疲劳寿命的影响，未考虑平均应力、应力集中等因素，且对材料性能参数的依赖性较强，不同批次材料的 S-N 曲线可能存在较大差异，导致预测精度有限。^[1]

3.1.2 Miner 线性累积损伤理论

在不同应力水平下 Miner 线性累积损伤理论材料的疲劳损伤呈线性关系。累积损伤 $D = \sum i = 1kN_i n_i = 1$ ，通过计算累积损伤可预测构件在变幅载荷下的疲劳寿命。然而，该理论未考虑不同应力水平加载顺序对疲劳损伤的影响，且线性关系假设与实际材料疲劳损伤非线性累积特性存在偏差，在复

杂载荷工况下预测误差较大。

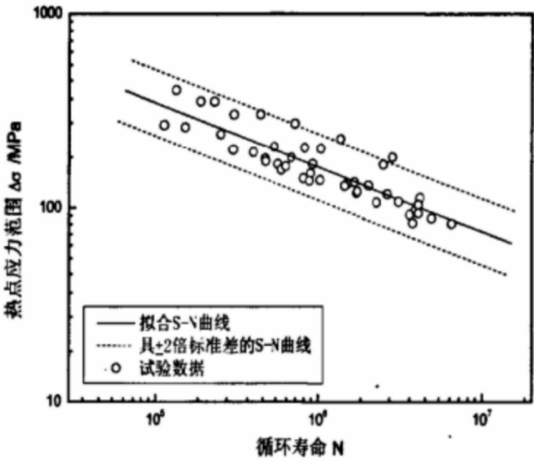


图 3.1 热点应力范围表示 S-N 曲线

3.1.3 断裂力学模型

断裂力学模型主要通过计算裂纹尖端应力强度因子，并结合 Paris 定律等裂纹扩展速率公式，预测疲劳裂纹从初始尺寸扩展到临界尺寸所需的循环次数，从而得到构件的疲劳寿命。存在初始裂纹或缺陷的金属构件，断裂力学模型具有较高的预测精度。但该模型对初始裂纹尺寸、形状等参数的测量精度要求极高，实际工程中准确获取这些参数较为困难。此外，模型计算过程复杂，需要具备一定的断裂力学专业知识，限制了其在工程现场的广泛应用。^[1]

3.1.4 应力场强法预测疲劳寿命

应力场强法是通过计算某试件的疲劳寿命来验证临界距离法的有效性。某铝板试件几何尺寸如图 3.1 示，力学性能为杨氏模量 $E=71022\text{MPa}$ ，强度极限 $\sigma_b=466\text{MPa}$ ，屈服极限 $\sigma_s=343\text{MPa}$ ，材料的应力应变循环曲线如表 1 示，材料的 S-N 曲线如表 2 示。

表 1 某材料应力应变循环曲线

$\sigma_a(\text{MPa})$	249	309	327	337	348	355	361	371	382	396
$\varepsilon_a(\%)$	0.36	0.45	0.50	0.55	0.70	0.85	1.00	1.30	1.80	2.50

表 2 某材料的 S-N 曲线

$S(\text{MPa})$	400	350	300	250	200	180	170	160
N	2560	19100	83976	311050	572296	600260	846313	1309410

3.2 基于损伤力学的预测模型（Lemaitre 疲劳损伤模型）

Lemaitre 疲劳损伤模型基于连续介质损伤力学理论，将材料内部微观损伤用损伤变量进行描述，通过建立损伤演化方程，反映疲劳损伤随循环次数的变化规律。该模型考虑了材料的塑性变形、加载历史、平均应力等因素对疲劳损伤

的影响，能够较好地模拟材料在复杂加载条件下的疲劳损伤过程。Lemaitre 模型在理论上具有一定优势，但模型中部分参数难以通过实验准确测定，且损伤变量的物理意义不够直观，在实际应用中模型参数的确定与验证存在一定困难。^[2]

3.3 基于数据驱动的预测模型

人工神经网络模型是一种基于生物神经网络结构与功