

钢丝绳无损检测技术研究综述

王龙刚¹, 侯小静¹, 华翔宇², 陈 峰², 王国强¹

¹洛阳理工学院计算机学院, 河南 洛阳

²洛阳泰斯特探伤技术有限公司, 河南 洛阳

收稿日期: 2025年9月19日; 录用日期: 2025年10月25日; 发布日期: 2026年1月6日

摘要

钢丝绳作为矿山、建筑、交通运输等重大工程中的关键承载构件, 其运行状态直接关系到生产安全与经济效益。长期处于恶劣工况下, 钢丝绳易发生断丝、磨损、锈蚀等损伤, 若未及时检测, 可能引发重大安全事故。本文系统综述了钢丝绳无损检测技术的研究进展。首先, 阐述钢丝绳检测的研究背景与国内外发展现状, 梳理技术演进脉络; 其次, 分析钢丝绳主要损伤类型及其成因, 为检测需求提供理论基础; 随后, 详细评述电磁检测、机器视觉、声发射等主流无损检测技术的原理、优势、局限性及最新研究成果; 进一步探讨人工智能、多传感器融合、数字孪生等前沿技术在钢丝绳检测中的应用潜力; 最后, 总结当前技术瓶颈并展望未来发展方向, 为钢丝绳无损检测的创新研发与工程应用提供参考。

关键词

钢丝绳, 无损检测, 损伤类型, 检测技术, 人工智能

Review of Research Progress on Non-Destructive Testing Technologies for Steel Wire Ropes

Longgang Wang¹, Xiaojing Hou¹, Xiangyu Hua², Feng Chen², Guoqiang Wang¹

¹School of Computer Science, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang Henan

²Luoyang TST Flaw Detection Technology Co., Ltd., Luoyang Henan

Received: September 19, 2025; accepted: October 25, 2025; published: January 6, 2026

Abstract

Steel wire ropes, critical load-bearing components in industries such as mining, construction, and

文章引用: 王龙刚, 侯小静, 华翔宇, 陈峰, 王国强. 钢丝绳无损检测技术研究综述[J]. 矿山工程, 2026, 14(1): 1-10.
DOI: 10.12677/me.2026.141001

transportation, significantly impact production safety and economic efficiency. Prolonged exposure to harsh conditions makes them susceptible to damage like wire breakage, wear, and corrosion, which, if undetected, may lead to severe safety accidents. This paper systematically reviews the research progress in non-destructive testing technologies for steel wire ropes. It begins by outlining the research background and global development status, clarifying the technological evolution. Next, it analyzes the primary damage types and their causes, providing a theoretical basis for detection requirements. Subsequently, it evaluates the principles, advantages, limitations, and recent advancements of mainstream NDT methods, including electromagnetic, machine vision, and acoustic emission detection. Furthermore, it explores the potential of emerging technologies such as artificial intelligence, multi-sensor fusion, and digital twins in enhancing steel wire rope NDT. Finally, it summarizes current technical challenges and prospects for future development directions, offering insights for innovative research and engineering applications.

Keywords

Steel Wire Rope, Non-Destructive Detection, Damage Type, Detection Technology, Artificial Intelligence

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

1.1. 研究背景

钢丝绳凭借高抗拉强度、轻自重和优异柔韧性，成为矿山提升、建筑吊装、港口装卸、电梯牵引等领城不可或缺的关键构件。然而，其长期运行于高负荷、强腐蚀、剧烈振动和多粉尘等恶劣工况，易发生断丝、磨损、锈蚀、变形等损伤，直接威胁生产安全和经济效益。据统计，全球每年因钢丝绳失效引发的工业事故造成数亿元经济损失及重大人员伤亡[1]-[8]。例如，2017 年黑龙江龙煤双鸭山矿业东荣二矿副井提升机钢丝绳断裂导致坠笼事故，17 人遇难；2022 年宜昌龙洞湾磷矿主斜井钢丝绳因严重断丝断裂，致 2 人死亡。这些事故凸显了钢丝绳实时无损检测的迫切需求。

随着工业化和智能化进程加速，钢丝绳应用场景日益复杂，损伤演化机制更趋多样化。传统定期更换策略虽可降低风险，但导致约 20% 的未达报废标准的钢丝绳被浪费，造成显著资源损耗。国内统计显示，工业领域每年因盲目更换产生的废弃钢丝绳成本高达数千万。同时，传统人工检测依赖经验，易受主观因素和环境干扰影响，存在漏检率高、效率低等问题，难以满足现代工业对高精度、高效率检测的需求[3]-[15]。因此，研发高效、精准、智能化的无损检测技术，不仅能实现钢丝绳损伤的早期识别与寿命预测，还可优化资源利用，显著提升工业安全水平，为矿山、建筑等领域的安全生产提供技术保障。

1.2. 国内外发展现状

1.2.1. 国外发展现状

国外钢丝绳无损检测技术研究起步较早，20 世纪 20 年代即开始探索电磁检测原理。1925 年，德国学者 H. Chappuzeau 首次提出基于漏磁测量的钢丝绳电磁无损检测装置，该装置采用直流线圈励磁，通过检测线圈捕捉损伤处漏磁场，开创了钢丝绳电磁检测的先河[2]-[5]。然而，早期的装置结构庞大、操作复杂，实用性受限。

20世纪末至21世纪初，电磁检测技术持续优化。Weischedel H. R.深入研究漏磁检测原理，提出多极磁化方法，提升了对高速运行钢丝绳(速度 $<3\text{ m/s}$)的检测精度；Yan X.等设计轻便型钢丝绳断丝检测装置，结合霍尔元件与三维有限元模拟，实现电磁干扰环境下细钢丝断丝信号的精确捕捉与分析。与此同时，其他检测方法也逐步发展。英国学者Casey N. F.于1984年提出钢丝绳声发射检测法，实现断丝定位，但初期受设备限制，检测效果不佳；Chakhlov S.等开发数字射线成像系统，引入X射线束硬化校正算法，提高钢丝绳内部损伤检测能力[6]-[20]。尽管如此，射线检测设备成本高昂且存在辐射风险，限制了其在工业现场的广泛应用。

进入21世纪，机器视觉技术在钢丝绳检测领域迅速兴起。Vallan A.等利用机器视觉测量金属钢丝绳捻距，通过图像处理算法提取轮廓特征，实现索道钢丝绳状态监测；Wacker E. S.等构建钢丝绳表面外观概率模型，融合结构与外观信息进行异常检测，准确率达95%；Denzler J.团队通过表面图像生成三维模型，提升断丝损伤识别精度。随着深度学习技术的兴起，国外学者广泛应用卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)和YOLO (You Only Look Once)系列算法。Huang X.等基于CNN构建钢丝绳表面损伤识别模型，实现断丝、磨损等损伤类型的精准分类；Zhou Z.等提出融合同态滤波、局部二值化模式与支持向量机的检测算法，准确率达93.3% [7]-[30]。

1.2.2. 国内发展现状

国内钢丝绳无损检测技术的研究始于20世纪80年代，最初主要依赖引进和消化国外技术，随后逐步开展自主研发。杨叔子院士团队率先开展钢丝绳电磁检测研究，提出基于漏磁信号的断丝定量识别方法，并通过优化励磁装置与信号处理算法，提高了损伤定位与定量精度，为国内电磁检测技术奠定了基础。

进入21世纪，国内学者在电磁检测领域不断取得突破。战卫侠、窦连城等针对漏磁信号易受偏离值和噪声干扰的难题，提出自适应滤波、小波变换等方法，实现了信号降噪与特征提取，增强了弱损伤识别能力；郭永亮基于漏磁检测原理，开发了钢丝绳断丝在线检测系统，推动技术向工业应用落地。同时，声发射与超声波检测技术也取得进展。邵永波等建立了钢丝绳疲劳损伤与声发射信号特征的定量关系，实现了疲劳程度评估。

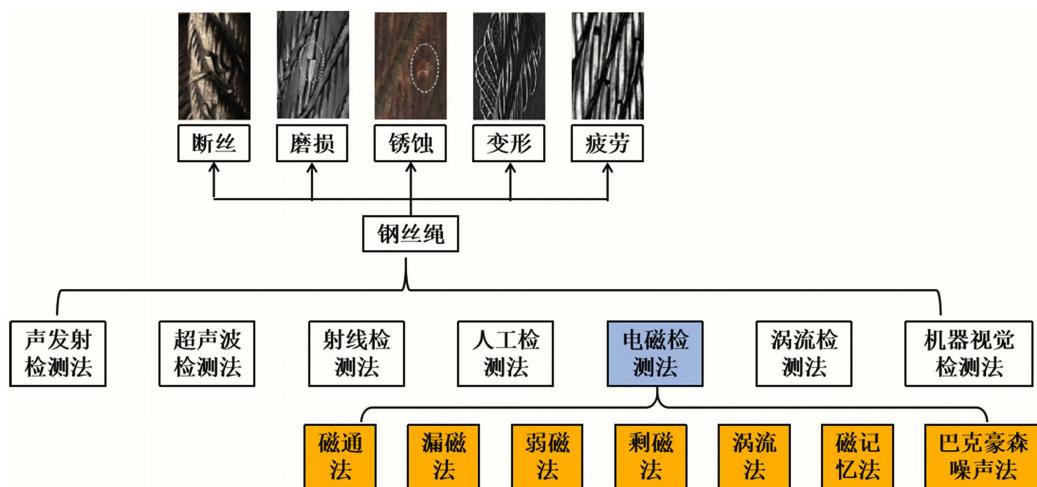
近年来，机器视觉与深度学习在钢丝绳检测中的应用成果显著。谭建平团队设计了多相机阵列采集系统，可通过滑轨调节相机位置以适配不同直径钢丝绳，并结合图像处理算法实现表面缺陷在线检测；周坪提出WR-YOLOv3算法，将YOLOv3的骨干网络替换为MobileNet，实现了轻量化断丝检测，mAP达93.92%；陈荣信等构建自动采集钢丝绳周向全景图像的实验平台，并融合改进残差网络与注意力机制，将断丝识别准确率提升至97.4%；于正针对矿用钢丝绳高速运行产生的运动模糊问题，提出基于边缘引导的模糊复原算法，并结合改进YOLOv5，在CPU环境下实现mAP 87.4%、帧率75.3 fps，满足实时检测需求[5]-[16]。

此外，国内在多技术融合检测方面也有所探索。刘添提出基于漏磁检测与机器视觉的多模态检测系统，利用短时峭度法处理漏磁信号，并结合ConvNeXt网络识别低照度图像损伤，从而提升了复杂环境下的检测可靠性。

2. 钢丝绳损伤的种类及其成因分析

2.1. 钢丝绳主要损伤类型

如图1所示，根据GB/T5972-2016《起重机钢丝绳保养、维护、检验和报废》及工业现场实际情况，钢丝绳损伤类型主要分为断丝、磨损、锈蚀、变形、疲劳五大类，各类损伤对钢丝绳承载能力的影响存在差异，具体特征如下。

**Figure 1.** Types and detection methods of steel wire rope damage**图 1. 钢丝绳损伤类型和检测方法**

2.1.1. 断丝

断丝是钢丝绳最危险的损伤类型之一，指钢丝在受力或环境作用下发生断裂，按断裂位置可分为表面断丝、内部断丝、深部断丝；按断裂数量可分为单根断丝、多根断丝；按断口形态可分为疲劳断丝、磨损断丝、过载断丝。表面断丝易通过外观观察发现，内部与深部断丝则需借助专业检测设备识别。断丝会直接削弱钢丝绳横截面承载面积，单根断丝可能引发应力集中，加速周围钢丝断裂，形成“连锁反应”，大幅降低钢丝绳整体强度。

2.1.2. 磨损

磨损是钢丝绳最常见的损伤，指钢丝表面因摩擦、挤压导致材料流失，按磨损形式可分为正常磨损、异常磨损。正常磨损是钢丝绳在正常工作中，钢丝间、钢丝绳与滑轮/卷筒间的轻微摩擦导致的表面材料损耗，磨损均匀，发展缓慢；异常磨损包括局部严重磨损、偏磨、锈蚀磨损等，表现为局部钢丝直径大幅减小、表面凹凸不平，严重时导致钢丝截面面积损失超过 10%，显著降低承载能力。

2.1.3. 锈蚀

锈蚀是钢丝绳在化学与电化学作用下发生的腐蚀损伤，按锈蚀程度可分为轻微锈蚀、中度锈蚀、严重锈蚀。轻微锈蚀表现为钢丝表面出现少量锈迹，无明显坑蚀；中度锈蚀时钢丝表面锈层较厚，伴随少量坑蚀，表面粗糙度增加；严重锈蚀则导致钢丝截面出现明显腐蚀坑、锈层剥落，甚至钢丝之间粘连，失去柔韧性。锈蚀不仅削弱钢丝力学性能，还会加剧磨损与疲劳损伤，形成“锈蚀 - 磨损 - 疲劳”恶性循环。

2.1.4. 变形

变形指钢丝绳整体或局部结构发生永久性改变，常见类型有扭结、弯折、鼓包、松散等。扭结是钢丝绳在扭转力作用下形成的永久性扭曲，分为松扭结与紧扭结，紧扭结会导致钢丝严重挤压、变形，大幅降低局部强度；弯折是钢丝绳受外力作用发生的非弹性弯曲，形成“死弯”，弯折处钢丝易产生裂纹与断丝；鼓包是钢丝绳内部钢丝或绳股异常凸起，通常由内部断丝、绳股松散导致；松散则是钢丝绳捻距增大、绳股分离，失去原有结构稳定性，易引发进一步损伤。

2.1.5. 疲劳

疲劳损伤是钢丝绳在交变载荷作用下，内部产生微裂纹并逐步扩展导致的损伤，属于隐性损伤。疲劳损伤初期无明显外观变化，但钢丝力学性能逐渐下降，当微裂纹扩展至一定程度，会突然发生疲劳断

丝。疲劳损伤的演化与载荷循环次数、应力幅值、环境因素密切相关，是钢丝绳失效的主要原因之一，尤其在矿山提升、电梯运行等频繁启停的场景中更为突出。

2.2. 损伤成因分析

2.2.1. 力学因素

载荷作用：钢丝绳长期承受超过设计极限的静载荷或动载荷，易导致钢丝塑性变形、断裂。例如，矿山提升机钢丝绳在提升重物时，若载荷波动大或超员、超载，会使钢丝应力超过屈服强度，引发过载断丝；频繁启停产生的冲击载荷，会加剧钢丝疲劳损伤，缩短使用寿命。

摩擦与挤压：钢丝绳与滑轮、卷筒、导向装置接触部位，因相对运动产生摩擦与挤压。若滑轮/卷筒槽型不符、表面磨损严重或润滑不足，会导致钢丝绳局部磨损加剧，出现偏磨、严重磨损；同时，绳股间的挤压会使钢丝变形，破坏捻制结构，引发松散、鼓包等变形损伤。

振动与冲击：工业设备运行中的振动的冲击会使钢丝绳承受交变应力。例如，矿山提升机在加速、减速过程中产生的振动，会导致钢丝绳与设备部件频繁碰撞，加速疲劳裂纹萌生与扩展；运输过程中的颠簸冲击，会使钢丝绳局部应力集中，引发断丝或变形。

2.2.2. 环境因素

腐蚀环境：潮湿、酸碱、盐雾等腐蚀环境会导致钢丝绳发生化学与电化学腐蚀。在矿井井下、沿海港口等场景中，空气中的水分、盐分、有害气体会附着在钢丝绳表面，破坏钢丝表面氧化膜，形成锈蚀。锈蚀会降低钢丝强度，同时锈层会加剧钢丝间摩擦，形成“锈蚀-磨损”协同作用，加速损伤演化。

粉尘与杂质：矿山、建筑等场景中的粉尘、砂粒等杂质易进入钢丝绳内部，在钢丝间形成“磨料”，加剧磨损。同时，杂质会堵塞钢丝绳内部缝隙，影响润滑效果，使摩擦系数增大，进一步加速磨损与疲劳损伤。

2.2.3. 材料与制造因素

材料缺陷：钢丝原材料若存在夹杂物、裂纹、成分不均匀等缺陷，会降低其力学性能。在受力过程中，缺陷处易产生应力集中，成为损伤萌生源，加速断丝、疲劳等损伤的发生。

制造工艺缺陷：钢丝绳捻制过程中，若捻距不均匀、钢丝张力控制不当、绳股排列不整齐，会导致钢丝绳结构不稳定。

3. 现有各种检测手段的研究现状

3.1. 声发射检测法

3.1.1. 原理

声发射检测法基于材料损伤时释放应力波的原理，钢丝绳在发生断丝、裂纹扩展、摩擦等损伤过程中，会释放弹性应力波。通过声传感器捕捉这些信号，经放大、滤波、特征提取与分析，实现损伤识别与定位。该方法可实时监测钢丝绳动态损伤过程，尤其适用于静载荷或缓慢变化载荷下的损伤检测。

3.1.2. 研究进展

国外方面，Casey N. F.于1984年首次提出钢丝绳声发射检测法，实现断丝定位，但受设备限制，检测效果初期不佳；Bai W.等通过分析电梯钢丝绳拉伸过程中的声发射波形与参数，建立断丝与声发射信号的关联模型，实现断丝数量评估；邵永波等建立钢丝绳疲劳损伤与声发射信号特征的定量关系模型，通过实时监测声发射信号能量变化，评估疲劳损伤程度与剩余寿命；聂林针对载荷变化场景，提出声发

射信号自适应滤波算法，抑制载荷波动对检测结果的干扰，提升复杂工况下的检测可靠性[1]-[10]。

3.1.3. 优势与局限性

优势：可实时监测损伤动态演化过程，提前预警潜在风险；对内部损伤敏感，可检测钢丝裂纹萌生与扩展；非接触检测，不影响钢丝绳正常运行；适用于静态或缓慢动态场景。

局限性：易受环境噪声干扰，在矿山、建筑等强噪声场景中，信噪比低，漏检、误检率高；检测距离有限，传感器需近距离布置，不适用于长距离钢丝绳；难以定量评估损伤程度，仅能实现定性识别与定位；设备成本高，不适用于大规模普及应用。

3.2. 超声波检测法

3.2.1. 原理

超声波检测法利用超声波在介质中的传播特性，超声波在钢丝绳中传播时，遇到损伤会发生反射、折射、衰减。通过超声波探头发射与接收超声波信号，分析反射信号的幅值、传播时间、相位等参数，实现损伤识别、定位与定量评估。

3.2.2. 研究进展

国外学者 ROSTAMI J.等利用超声导波与 tone-burst 小波技术，实现电梯钢丝绳断丝检测，检测距离达 10 m；Chakhlov S.等通过优化超声波探头阵列布局，提升对钢丝绳内部锈蚀的检测精度。国内学者在超声导波检测技术上有创新，张燕超等提出基于 X 射线数字成像与超声波融合的检测方法，结合两种技术优势，实现钢丝绳内外部损伤的精准识别；季晓华开发基于超声波的钢丝绳芯无损探伤系统，通过光纤高速传输数据，实现在线智能检测，检测准确率达 92%以上；郭晓婷等优化超声导波信号处理算法，采用小波变换抑制噪声，提升弱损伤信号识别能力，可检测直径 3 mm 钢丝的微裂纹[6]-[11]。

3.2.3. 优势与局限性

优势：可检测内部与表面损伤，检测深度大；对裂纹、锈蚀等损伤敏感，检测精度高；可定量评估损伤尺寸；适用于多种材质与尺寸的钢丝绳。

局限性：受耦合剂影响大，需在探头与钢丝绳间涂抹耦合剂，不适用于干燥、粉尘多的环境；检测速度慢，不适用于高速运行钢丝绳；对检测人员技术要求高，需专业人员操作与数据分析；设备体积较大，便携性差，不适用于狭小空间检测。

3.3. 电磁检测法

3.3.1. 原理

如图 2 所示，电磁检测法基于电磁感应原理，利用钢丝绳铁磁性的特性，通过励磁装置将钢丝绳磁化至饱和状态。当钢丝绳存在断丝、磨损、锈蚀等损伤时，磁路完整性被破坏，会在损伤处产生漏磁场。通过磁敏传感器捕捉漏磁场信号，经信号处理与分析，实现损伤识别、定位与定量评估。根据检测参数不同，电磁检测法可分为漏磁检测法、主磁通检测法等，其中漏磁检测法应用最广泛。

3.3.2. 研究进展

Zhou Z.等提出基于多阶段励磁原理的钢丝绳断丝检测装置，通过优化励磁线圈布局，增强对微小断丝的识别能力。杨叔子院士团队提出基于漏磁信号的断丝定量识别方法，通过小波变换、自适应滤波等算法提取损伤特征，实现断丝数量与位置的精准识别；战卫侠采用短时峭度法处理漏磁信号，有效抑制噪声干扰，提升弱损伤信号检测能力，损伤定位误差小于 0.5%；郭永亮开发基于漏磁检测的钢丝绳断丝在线检测系统，集成励磁、信号采集、数据处理功能，实现工业现场实时检测，检测准确率达 95%以上[1]-[12]。

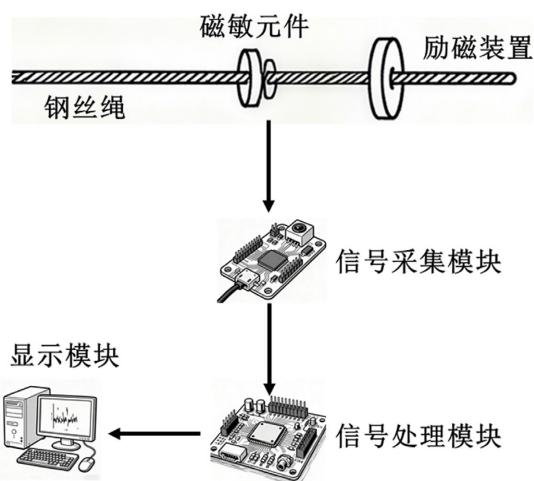


Figure 2. Flow chart of electromagnetic testing method
图 2. 电磁检测法流程图

3.3.3. 优势与局限性

优势: 非接触检测, 不影响钢丝绳正常运行; 可检测表面与内部损伤, 适用范围广; 检测速度快, 适配高速运行场景; 技术成熟, 已形成商业化检测设备。洛阳泰斯特公司的产品在矿山提升机钢丝绳检测中, 提升速度可达 3~5 m/s, 电磁检测系统可通过固定在天轮附近, 实现实时在线检测。

局限性: 受偏离值影响大, 传感器与钢丝绳间距变化会导致检测精度下降; 对直径较小的钢丝绳或微小损伤检测精度低; 易受外部电磁干扰, 在强电磁环境中需额外抗干扰措施; 难以区分损伤类型。

3.4. 机器视觉检测法

3.4.1. 原理

机器视觉检测法利用工业相机采集钢丝绳表面图像, 通过图像处理、模式识别和深度学习算法, 实现损伤检测与识别。该方法通常包括图像采集系统、图像处理模块、损伤识别模块三部分。图像采集系统通过单相机或多相机阵列获取钢丝绳全景图像; 图像处理模块对图像进行矫正、去噪、增强, 提升图像质量; 损伤识别模块通过传统机器学习或深度学习算法, 实现断丝、磨损、锈蚀等损伤的分类与定位。

3.4.2. 研究进展

国外研究始于 20 世纪末, Vallan A. 等采用机器视觉技术测量钢丝绳捻距, 通过边缘检测算法提取钢丝绳轮廓, 实现索道钢丝绳状态监测; Wacker E. S. 等建立钢丝绳表面外观概率模型, 结合结构与纹理特征进行异常检测, 检测准确率达 95%; Denzler J. 团队通过图像生成三维模型, 提高断丝损伤识别精度。近年来, 深度学习推动机器视觉检测技术突破。

国内学者在图像采集系统优化与算法创新上成果突出, 陈荣信等搭建自动采集钢丝绳周向全景图像的实验平台, 采用高斯滤波去噪、固定区域配准、改进像素加权融合算法生成全景图像, 结合改进 ResNet, 断丝识别准确率达 97.4%; 于正针对矿用钢丝绳高速运行导致的运动模糊问题, 提出基于边缘引导的模糊复原算法, 结合改进 YOLOv5, 在 CPU 环境下 mAP 值达 87.4%, 帧率 75.3 fps, 满足实时检测需求; 刘添针对矿井低照度环境, 采用对数变换、同态滤波与引导滤波融合的图像增强算法, 结合 ConvNeXt 网络, 实现低照度下钢丝绳损伤识别, mAP 值达 86.5% [3]-[14]。

3.4.3. 优势与局限性

优势: 直观可视化, 可获取损伤形貌信息, 便于人工复核; 非接触检测, 对钢丝绳无损伤; 可同时

检测多种表面损伤；结合深度学习后，检测精度与泛化能力强，适配复杂环境。在港口集装箱起重机钢丝绳检测中，码头环境光照充足，采用多相机阵列环绕采集钢丝绳全景图像，可精准识别表面磨损、锈蚀与断丝露头。

局限性：难以检测内部损伤，仅适用于表面及近表面损伤；受环境光照影响大，在低照度、强反光环境中需额外补光与图像增强措施；图像采集系统复杂，多相机阵列需精确校准与同步控制；数据处理量大，对硬件算力有一定要求。但该技术在矿井井下场景中面临光照不足与粉尘遮挡问题，单独使用时误检率超 40%。

3.5. 其他检测方法

3.5.1. 射线检测法

射线检测法利用 X 射线、 γ 射线等穿透特性，射线穿过钢丝绳时，损伤处与正常区域的衰减程度不同，通过探测器获取射线图像，分析图像灰度差异实现损伤检测。该方法可清晰显示钢丝绳内部结构，适用于检测内部断丝、绳股松散等损伤。但射线检测设备成本高、存在辐射风险，需严格防护；检测速度慢，不适用于实时在线检测；对微小损伤识别能力有限，应用场景受限。

3.5.2. 涡流检测法

涡流检测法基于电磁感应中的涡流效应，当通有交变电流的线圈靠近钢丝绳时，会在钢丝绳表面感应出涡流。若钢丝绳存在断丝、锈蚀等损伤，会改变涡流分布，导致线圈阻抗变化。通过检测线圈阻抗变化，实现损伤识别。该方法检测速度快、非接触，适用于表面及近表面损伤检测。但受集肤效应影响，仅能检测钢丝绳表面几毫米深度内的损伤，无法检测内部损伤；易受钢丝绳材质、形状、温度影响，检测精度波动大；在强电磁环境中易受干扰，应用范围较窄。

3.6. 小结

综上所述，各种钢丝绳无损检测方案特点及优缺点情况如下表 1 所示：

Table 1. Characteristics, advantages and disadvantages of different non-destructive testing schemes for steel wire ropes
表 1. 不同钢丝绳无损检测方案特点及优缺点

检测技术	检测对象	损伤类型	优缺点	典型应用场景
声发射检测法	表面 + 内部	断丝、疲劳裂纹	优点： 实时监测，可以提前预警，灵敏度高，适用于静态或缓慢动态场景； 缺点： 信噪比低、漏误检率高，检测距离有限，无法定量评估，设备成本高。	斜拉桥缆索、静载设备
超声波检测法	表面 + 内部	内部断丝、锈蚀、裂纹	优点： 同步检测内外部损伤，检测深度大，灵敏度高，定量检测，适用范围广； 缺点： 依赖耦合剂，不适用干燥多尘环境，检测速度慢，对人员技术要求高，设备便携性差。	电梯、实验室验证
电磁检测法	表面 + 内部	断丝、磨损、锈蚀	优点： 检测范围广且速度快能适配高速场景，技术成熟，且已商业化； 缺点： 对微小损伤检测效果差，不适用强电磁环境，难以区分损伤类型。	矿山提升机、港口起重
机器视觉检测法	表面	表面断丝、磨损、锈蚀、变形	优点： 检测结果直观，可同步识别多种表面损伤，实时检测； 缺点： 无法检测内部损伤，低照度或强反光环境精度低，数据处理对硬件算力要求高。	港口起重、建筑塔吊

续表

射线检测法	表面 + 内部	内部结构缺陷、绳股松散	优点: 清晰显示内部结构, 对绳股松散等缺陷识别效果好, 检测结果可量化, 抗干扰能力强; 缺点: 设备成本高, 存在辐射风险, 检测速度极慢, 对微小损伤识别能力有限。	出厂检测、实验室验证
涡流检测法	表面	表面裂纹、锈蚀	优点: 检测速度快, 对表面及近表面微小损伤敏感, 设备体积小便携性好适配狭小空间; 缺点: 受集肤效应影响无法检测内部损伤, 易受环境干扰, 对大面积磨损、变形识别能力弱。	不锈钢钢丝绳、表面筛查
人工法	表面	表面裂纹、锈蚀	优点: 简单、直接; 缺点: 耗时且受环境和人为因素影响。	适于工人工作的场景

4. 新兴技术应用于钢丝绳无损检测

新兴技术正从多维度赋能钢丝绳无损检测, 不仅提升检测精度与效率, 也推动其向智能化方向发展, 更好地适应矿山等复杂场景需求。在人工智能方面, 深度学习将进一步优化损伤识别算法, 多传感器融合有望突破单一方法的局限; 同时, 借助 MEMS 技术实现传感器的微型化与集成化, 可满足矿山狭小空间的部署要求。数字孪生技术将构建钢丝绳“物理 - 虚拟”映射体系, 基于井下钢丝绳表面损伤在线视觉检测系统采集的实时数据, 建立三维虚拟模型, 模拟损伤演化过程, 从而优化检测路径与维护方案; 结合 AR/VR 技术, 还可实现远程可视化交互, 辅助检测人员进行故障排查。

在传感器领域, 新型传感器技术将显著提升数据采集的精度与稳定性。物联网与大数据技术则为检测网络化管理提供支撑。依托 5G 与边缘计算, 可构建矿用钢丝绳检测物联网系统, 实现实时数据采集、传输与预处理; 在此基础上, 建立行业级大数据平台, 整合多场景检测数据, 挖掘损伤演化规律, 为检测技术优化与维护策略制定提供依据。最终将形成“感知 - 分析 - 诊断 - 维护”一体化智能系统, 推动钢丝绳无损检测向精准化、智能化与协同化方向发展, 为矿山等工业领域的安全生产提供有力保障。

5. 结论

钢丝绳无损检测技术已从传统电磁方法发展为多技术融合的综合检测体系, 涵盖电磁、声发射、超声、机器视觉及深度学习等方向, 检测精度与应用范围不断提升。在人工智能、物联网和大数据等新兴技术推动下, 检测的智能化与实时化水平显著增强, 部分成果已实现工程化应用。但在复杂环境适应性、弱损伤识别能力及多模态融合方面仍存在不足。未来研究应加强智能化与系统化探索, 推动深度学习与多传感器融合, 结合数字孪生、边缘计算等前沿技术, 构建“感知 - 分析 - 诊断 - 维护”一体化智能检测体系, 为矿山及相关领域的安全运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 谭继文. 钢丝绳安全检测原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 周坪. 钢丝绳视觉无损检测与评估方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [3] 王济广. 矿用提升机钢丝绳缺陷检测系统研制[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [4] 王士豪. 矿用钢丝绳局部损伤磁检测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2024.
- [5] Mazurek, P. (2023) A Comprehensive Review of Steel Wire Rope Degradation Mechanisms and Recent Damage Detection Methods. *Sustainability*, **15**, Article 5441. <https://doi.org/10.3390/su15065441>
- [6] Zhou, P., Zhou, G., Zhu, Z., He, Z., Ding, X. and Tang, C. (2019) A Review of Non-Destructive Damage Detection Methods for Steel Wire Ropes. *Applied Sciences*, **9**, Article 2771. <https://doi.org/10.3390/app9132771>
- [7] Zhang, J., Li, H. and Qu, Y. (2025) Quantitative Study on Characteristic Values of Magnetic Signals for Early Damage

- of Steel Wire Ropes under Weak Magnetic Excitation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **25**, 2458-2468. <https://doi.org/10.1007/s11668-025-02281-w>
- [8] Wei, J., Zhang, J. and Wang, H. (2025) Detection of Surface Damage on Steel Wire Ropes Based on Improved U-Net. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **25**, 458-467. <https://doi.org/10.1007/s11668-025-02114-w>
- [9] Zhao, C., Tian, J., Wang, H., Shi, Z., Wang, X., Huang, J., et al. (2025) An End-To-End Quantitative Identification Method for Mining Wire Rope Damage Based on Time Series Classification and Deep Learning. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **44**, Article No. 25. <https://doi.org/10.1007/s10921-025-01166-0>
- [10] 于小杰, 李旭东, 解社娟, 等. 钢丝绳断丝损伤涡流检测方法[J]. 中国机械工程, 2019, 30(22): 2757-2763.
- [11] 朱海平. 矿井提升钢丝绳表面损伤在线视觉检测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
- [12] 王红尧, 吴佳奇, 李长恒, 等. 矿用钢丝绳损伤检测信号处理方法研究[J]. 工矿自动化, 2021, 47(2): 58-62.
- [13] 王浩宇. 矿用钢丝绳损伤漏磁检测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2023.
- [14] Wang, H., Zheng, H., Tian, J., He, H., Ji, Z. and He, X. (2024) Research on Quantitative Identification Method for Wire Rope Wire Breakage Damage Signals Based on Multi-Decomposition Information Fusion. *Journal of Safety and Sustainability*, **1**, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.jsasus.2024.02.001>
- [15] Zhou, P., Zhou, G., Wang, H., Li, X., Wang, H., He, Z., et al. (2024) Intelligent Visual Detection Method for the Early Surface Damage of Mine Hoisting Wire Ropes. *Measurement Science and Technology*, **35**, Article ID: 115018. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ad6a78>
- [16] Tian, J., Zhao, C. and Wang, H. (2024) Damage Identification for Mining Wire Rope Based on Continuous Wavelet Transform and Convolutional Neural Network. *Nondestructive Testing and Evaluation*, **40**, 2598-2620. <https://doi.org/10.1080/10589759.2024.2383790>
- [17] 姚毅. 钢丝绳损伤检测与定量识别研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2021.
- [18] 石晟, 张炳福, 赵庆龙. 基于机器视觉的矿用钢丝绳无损监测系统研究[J]. 煤矿机电, 2017(4): 19-22.
- [19] 杨叔子, 康宜华, 陈厚桂, 等. 钢丝绳电磁无损检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [20] Wang, H., Zhang, J. and Wei, J. (2024) Nondestructive Detection of Wire Rope Damage Using Leakage Magnetic Technique Based on Dual-Layer Sensors. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **60**, 801-812. <https://doi.org/10.1134/s1061830924601971>
- [21] Li, X., Sun, Y., Liu, X. and Zhang, S. (2024) Adaptive Multi-Scale Bayesian Framework for MFL Inspection of Steel Wire Ropes. *Machines*, **12**, Article 801. <https://doi.org/10.3390/machines12110801>
- [22] Zhao, M., Ding, N., Fang, Z., Jiang, B., Zhong, J. and Deng, F. (2025) Nondestructive Inspection of Steel Cables Based on Yolov9 with Magnetic Flux Leakage Images. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, **14**, Article 80. <https://doi.org/10.3390/jsan14040080>
- [23] 吴澎, 花虎跃. 钢丝绳无损检测中存在问题的探讨[J]. 无损检测, 2017, 39(6): 65-68.
- [24] Mazurek, P., Roskosz, M. and Kwaśniewski, J. (2024) Analysis of the Resolution of the Passive Magnetic Method on the Example of Nondestructive Testing of Steel Wire Ropes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **589**, Article ID: 171607. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.171607>
- [25] Chen, J., Wang, Y., Liu, S., Ji, Z. and Zhang, Z. (2024) Non-Destructive Testing of Wire Rope Algorithm Based on Lightweight YOLOv7-Tiny. *International Conference on Algorithms Software Engineering and Network Security*, Nanchang, 26-28 April 2024, 77-83. <https://doi.org/10.1145/3677182.3677198>
- [26] Bao, Y. and Hu, B. (2024) A New Method for Optical Steel Rope Non-Destructive Damage Detection. 2024 2nd International Conference on Intelligent Perception and Computer Vision (CIPCV), Xiamen, 17-19 May 2024, 87-95. <https://doi.org/10.1109/cipcv61763.2024.00025>
- [27] Li, G., Cao, B., Zhou, Y., Fan, M. and Yang, L. (2025) Evaluation of Broken Steel Wire Rope Using Magnetic Flux Leakage and Optimised Convolutional Neural Network. *Nondestructive Testing and Evaluation*. <https://doi.org/10.1080/10589759.2025.2534182>
- [28] Shivkumar, K., Konindanala, N.P., Ashfaq, S.S. and Boothalingam, R. (2025) Classification of Steel Wire Ropes Using Signal Processing and Machine Learning. *AIP Conference Proceedings*, **3175**, Article ID: 020046. <https://doi.org/10.1063/5.0254656>
- [29] Han, J., Zhang, Y., Feng, Z. and Zhao, L. (2024) Research on Intelligent Identification Algorithm for Steel Wire Rope Damage Based on Residual Network. *Applied Sciences*, **14**, Article 3753. <https://doi.org/10.3390/app14093753>
- [30] Peng, Y., Liu, J., He, J., Qiu, Y., Liu, X., Chen, L., et al. (2024) Steel Wire Rope Damage Width Identification Method Based on Residual Networks and Multi-Channel Feature Fusion. *Machines*, **12**, Article 744. <https://doi.org/10.3390/machines12110744>