

轨道缺陷无损检测技术研究现状综述^{*}张志宏^{1,2} 张力玲¹ 马婷婷¹ 钟 胜² 黄 锋¹

(1. 广州计量检测技术研究院 广州 510000; 2. 华中科技大学人工智能与自动化学院 武汉 430000)

摘 要: 随着轨道交通的快速发展,轨道缺陷检测成为保障安全的关键。本文系统综述了常见轨道缺陷类型,如钢轨的疲劳裂纹、灼伤、扣件松动等。详细介绍了超声波、涡流、漏磁、机器视觉等检测技术及其原理、应用与进展,涵盖常规超声、相控阵超声、激光超声、超声导波等多种超声检测衍生方法,以及涡流检测在抑制趋肤效应、结合热成像等方面的创新,漏磁检测在信号处理和新型提离层等方面的改进,机器视觉检测中传统图像处理与深度学习方法的特点。同时阐述了多源信息融合技术在轨道缺陷检测中的应用成果,如利用多技术采集数据结合深度学习模型进行缺陷识别定位,最后分析了多源技术融合面临的挑战并对未来研究方向提出建议,为轨道缺陷检测技术发展提供全面参考。

关键词: 轨道缺陷;无损检测;物理检测;机器视觉

中图分类号: TN29;TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Review of the research status of nondestructive testing
technology for track defectsZhang Zhihong^{1,2} Zhang Liling¹ Ma Tingting¹ Zhong Sheng² Huang Feng¹

(1. Guangzhou Institute of Metrology and Testing Technology, Guangzhou 510000, China;

2. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430000, China)

Abstract: With the rapid development of rail transit, the detection of track defects has become crucial for ensuring safety. This paper systematically reviews common types of track defects, such as fatigue cracks, burns of rails, and fastener looseness. It elaborates in detail on detection technologies including ultrasonic, eddy current, magnetic flux leakage, and machine vision, as well as their principles, applications, and advancements. This encompasses various derivative methods of ultrasonic detection, such as conventional ultrasound, phased array ultrasound, laser ultrasound, and ultrasonic guided waves. Additionally, it covers the innovations in eddy current detection regarding the suppression of the skin effect and combination with thermal imaging; the improvements in magnetic flux leakage detection in terms of signal processing and new lift-off layer design; and the characteristics of traditional image processing and deep learning methods in machine vision detection. Meanwhile, the application achievements of multi-source information fusion technology in track defect detection are expounded. For example, defect identification and localization are realized by collecting data from multiple technologies and integrating deep learning models. Finally, the challenges faced by multi-source technology fusion are analyzed, and suggestions for future research directions are proposed, providing a comprehensive reference for the development of track defect detection technologies.

Keywords: track defects; non-destructive testing; physical detection; machine vision

0 引 言

轨道交通作为现代社会高效、便捷的运输方式,近年来在全球范围内取得了迅猛发展。无论是城市地铁、轻轨,还是高速铁路、重载铁路,都在不断拓展线路里程、提升运输能力,以满足日益增长的人口流动与经济交流需求^[1]。然

而,随着轨道交通网络的日益庞大与运营强度的持续攀升,确保其安全运行成为了至关重要的课题。轨道结构作为列车运行的直接承载基础,长期承受着巨大的动静态荷载、环境侵蚀以及材料疲劳等多重因素影响,极易产生各类缺陷^[2]。若未能及时精准地检测与修复,极有可能引发轨道不平顺加剧、列车脱轨、颠覆等灾难性事故,不仅危及乘客

的生命财产安全,还会造成重大的经济损失与社会负面影响。国际铁路联盟(UIC)在《2021 年度铁路安全报告》中指出:轨道缺陷占欧洲铁路网基础设施相关事故的 18.3%,仅次于信号系统故障(27.1%)和人为因素(21.9%)^[3]。其中钢轨断裂和道床失效是致命脱轨的主要诱因。据统计,广州铁路集团管辖线路内发生钢轨折断事故 45 起,其中 41 起是由于钢轨表面缺陷导致的。2021 年美国一列火车在蒙大拿州发生脱轨,事故造成 3 人死亡、50 多人受伤;2020 年一辆意大利列车由于钢轨缺陷导致脱轨事故,造成多人受伤以及 2 人死亡。类似地,2013 年西班牙高铁脱轨事件,因轨道几何形变未及时检测,造成 79 人死亡的严重后果。美国费城 Amtrak 事故(2015 年)中扣件松动导致轨道横向刚度下降 52%,凸显高精度动态检测技术的必要性^[4]。

传统的轨道交通缺陷检测手段,如人工巡检、常规测量工具检测等,在面对如今复杂且大规模的轨道交通系统时,愈发暴露出效率低下、精度有限、主观性强等诸多弊端^[5]。在此背景下,先进的缺陷检测技术应运而生,借助现代传感器技术、图像处理技术、机器学习算法、无损检测原理等多学科前沿成果,实现对轨道缺陷的高效、自动、智能识别与定位,不仅能够大幅提升检测的准确性与及时性,降低人工成本与劳动强度,还能为后续的精准维修养护提供关键的数据支撑,有力推动轨道交通运维管理向智能化、科学化方向迈进,对于保障轨道交通的长期稳定、安全运营,提升整个交通运输体系的可靠性与服务质量具有不可估量的现实意义。

1 轨道交通系统常见的缺陷类型

轨道系统作为轨道交通的关键基础设施,其结构完整性和稳定性直接关系到列车运行的安全与效率。在长期的

运营过程中,轨道系统会受到多种因素的影响(列车荷载、自然环境、材料老化),从而产生各类缺陷,常见的缺陷如钢轨缺陷、接头错位、轨枕缺陷和道床缺陷^[6]。

1.1 钢轨缺陷

钢轨作为轨道交通轨道结构的核心部件,直接承受列车车轮的巨大压力、摩擦力、冲击力以及制动时的制动力等多种复杂荷载作用。在长期频繁的运营过程中,钢轨极易出现各类损伤。根据国家标准 GBT1778/2010,钢轨损伤有 53 种,如图 1 所示,其中 8 种伤损具有鲜明的视觉特征,如断裂、灼伤、异物、螺栓缺失、卡扣缺失、波浪磨耗、剥离掉块、疲劳裂纹^[7]。波浪磨耗是轨道损伤的前期特征,通常出现在曲线地段、道岔区域以及列车频繁启停的车站附近;若磨损进一步加剧,轨道表面就会产生剥离掉块,削弱钢轨的承载能力,危及行车安全^[8]。疲劳裂纹也是钢轨损伤的重要形式,它的产生源于钢轨制造过程中的内部残余应力、材质缺陷,以及运营期间的疲劳荷载、过大的冲击荷载等因素^[9]。这些裂纹初期可能较为微小,隐藏在钢轨内部或表面,随着列车的反复碾压,裂纹会逐渐扩展延伸,一旦发展到临界尺寸,在列车动荷载的作用下,钢轨极有可能瞬间断裂,造成严重的脱轨事故。钢轨灼伤是由于受到异常的高温 and 压力作用,导致局部组织发生熔化、氧化等现象,进而形成损伤的情况,通常发生在制动过程中^[10]。螺栓和卡扣作为连接钢轨与轨枕的关键连接件,其紧固状态对于保持轨道结构的整体性、稳定性以及钢轨的精确几何位置起着决定性作用^[11]。列车运行时产生的持续强烈震动,不断冲击扣件系统,使得扣件的螺栓、螺母等连接件逐渐发生松动,原本紧固的夹持力下降,导致钢轨与轨枕之间的相对位移增大;尤其是在列车高速通过、轨道不平顺地段或道岔区域,这种震动冲击更为剧烈,扣件松动的风险也随之急剧上升,严重威胁轨道交通的运营安全。

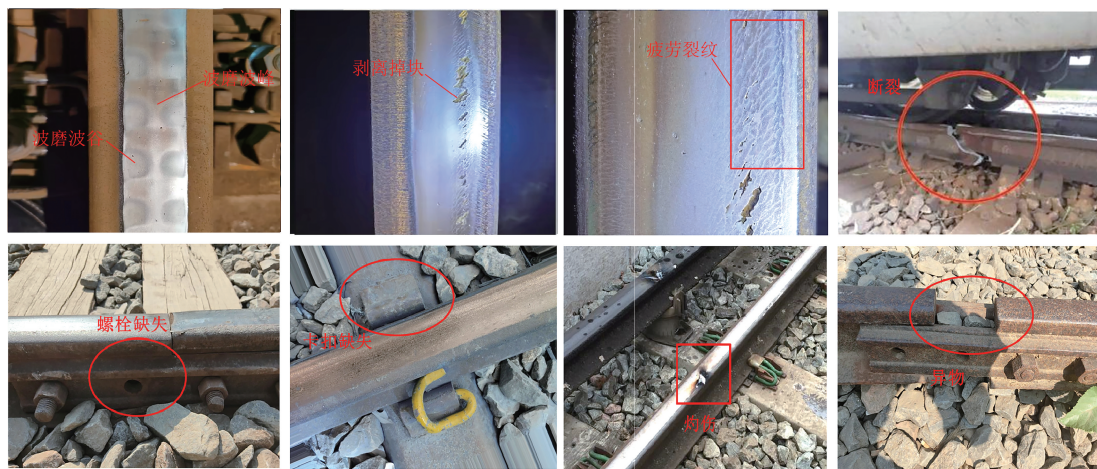


图 1 具有明显视觉特征的轨道缺陷图像^[10,12-13]

Fig. 1 Orbital defect image with obvious visual features

1.2 接头错位

接头错位是指钢轨接头处两根钢轨的轨头、轨腰或轨底在水平或垂直方向上出现的偏差。接头错位的产生主要是由于钢轨铺设时的施工误差、列车运行时的冲击力以及接头扣件的松动等原因^[14]。在钢轨铺设过程中,如果施工人员对接头的安装精度控制不当,就容易导致接头错位。列车运行时,车轮对接头处的冲击力会使接头扣件逐渐松动,进而加剧接头错位的程度。接头错位会导致列车通过时产生剧烈的颠簸和振动,加速钢轨接头处的磨损,降低轨道的平顺性和稳定性,同时也会增加列车运行的阻力和能耗^[15]。严重的接头错位还可能导致列车脱轨等安全事故。

1.3 轨枕损坏

轨枕损坏包括轨枕断裂、裂缝、腐蚀等多种形式^[16]。轨枕断裂主要是由于列车荷载过大、轨枕材质不合格或在长期使用过程中出现疲劳损伤等原因导致。如图2(a)所

示,在一些重载铁路上,由于列车轴重大,轨枕承受的荷载也相应增加,如果轨枕的设计强度不足或材质存在缺陷,就容易发生断裂^[17]。轨枕裂缝的产生可能是由于混凝土浇筑质量不佳、温度变化、列车振动等因素引起。在混凝土浇筑过程中,如果振捣不密实,就会在轨枕内部形成空洞或缝隙,降低轨枕的强度。如图2(b)所示,温度变化会使轨枕产生热胀冷缩,当温度应力超过轨枕的抗拉强度时,就会出现裂缝^[18]。列车运行时的振动也会对轨枕产生疲劳作用,加速裂缝的发展。轨枕腐蚀则主要是由于轨枕长期处于潮湿、酸性或碱性等恶劣环境中,受到化学物质的侵蚀而导致^[19]。在一些沿海地区或化工企业附近,由于空气中含有大量的腐蚀性气体和盐分,轨枕容易受到腐蚀。如图2(c)所示,轨枕损坏会使轨枕的承载能力下降,影响轨道的稳定性,严重时可能导致轨道变形、列车脱轨等安全事故。

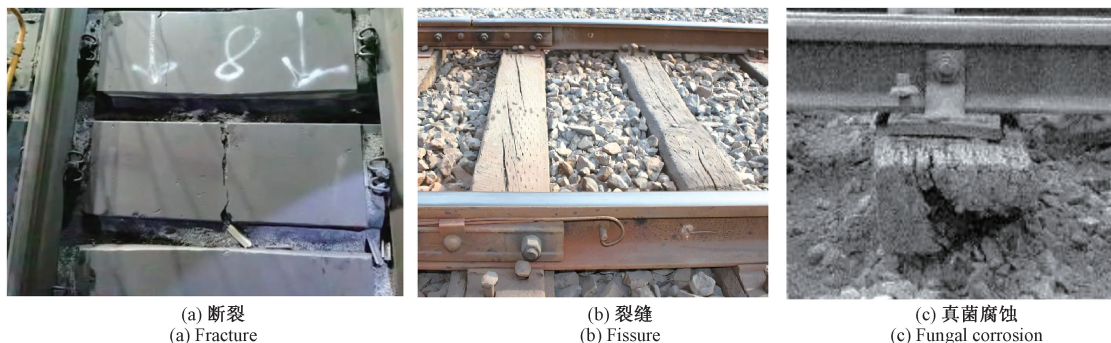


图2 轨枕典型损坏^[20-22]
Fig. 2 Typical damaged sleepers

1.4 道床缺陷

道床作为轨道结构的重要组成部分,其核心功能在于通过荷载传递机制实现轨道系统的力学平衡,通过三维应力扩散效应将轨枕传递的动、静荷载进行空间重分布,防止轨枕塑性变形,从而确保轨道几何形位的长期稳定^[23]。然而在运营过程中,道床系统面临着道床沉降、道床脏污和道床翻浆冒泥等病害的威胁^[24]。其中,道床沉降本质上是散粒体介质在循环荷载作用下的渐进性密实过程。研究表明,当列车轴载(P)与速度(V)的乘积超过临界阈值时,道砟颗粒间接触力链网络将发生重构,导致道砟层孔隙率下降4%~7%,进而引发累计沉降量达15~30 mm。高速铁路因存在轮轨高频冲击($f > 50$ Hz)及轴重增大效应,其道床动力沉降速率可达普通线路的1.8~2.5倍^[25]。道床脏污会使道砟颗粒之间的空隙减小,降低道床的排水性能和弹性,影响道床的承载能力和减震效果^[26]。同时,脏污的道床还容易滋生细菌和害虫,对轨道结构和周边环境造成损害。例如,在一些货运线路上,由于列车运输的货物可能会产生粉尘和油污,道床脏污的问题更为严重。道床翻浆冒泥是在列车荷载的反复作用下,道床中的细小颗粒会逐渐被挤入道床底部的基床中,与基床土混合形成

泥浆^[27]。该病害本质上是固液两相流在动水压力($\Delta P > 5$ kPa)驱动下的迁移过程。当基床土塑性指数 $I_p > 12$ 且含水率 $\omega > 28\%$ 时,列车振动引发的超孔隙水压力会使泥浆迁移速率达到0.15~0.25 m/s,在道床-基床界面形成水力劈裂通道^[28]。监测数据表明,翻浆区段的轨道刚度变异系数可达正常区段的4.6倍,致使轨面短波不平顺功率谱密度在0.1~1 m波长范围激增80 dB/Hz^[29]。

2 轨道缺陷检测技术

国内外在轨道交通缺陷检测领域均投入了大量的精力与资源,取得了丰硕的研究成果,但由于技术基础、应用场景等方面的差异,呈现出不同的发展态势。目前,根据检测原理的不同,钢轨的表面缺陷检测方法可以分一下几种方法:超声波检测法^[30]、电涡流检测法^[31]、漏磁检测法^[32]和机器视觉^[33]等。

2.1 基于超声波技术的钢轨缺陷检测

超声波检测技术是基于超声波在介质中传播的固有特性而发展起来的一种无损检测方法。在该技术中,超声波在介质内传播时,若遇到诸如裂纹、孔洞、夹杂等缺陷,便会引发反射、折射、散射等一系列物理现象^[34]。通过对

超声波传播过程及响应特征的深入分析,即可推断出物体内部的实际状况。基于超声波原理的钢轨缺陷检测如图 3 所示,通常采用一个超声波探头(换能器)作为核心部件。该探头具备将电能高效转换为机械能的能力,进而产生高频的超声波。这些超声波以特定的频率和能量向钢轨内部传播。当超声波在均匀介质中传播时,一旦遭遇介质的界面或者缺陷,反射和折射现象随即发生。反射回来的超声波(回波)携带着界面或缺陷的相关信息。接收到的信号通常需要经过一系列复杂的处理流程,包括放大、滤波以及模数转换等。随后,通过特定的算法对超声波的传播时间、幅度和频率等关键参数进行精确分析,最终实现对缺陷的位置、大小和形状의准确推断。历经多年的发展与持续改进,基于超声波检测技术的钢轨缺陷检测领域不断拓展,衍生出多种检测方法,主要包括常规超声波检测、相控阵超声波检测、基于激光的超声波检测以及超声波导波检测等^[13]。

1) 常规超声波检测

常规超声波检测(conventional ultrasound, CU)是基于超声波脉冲回波技术,该技术通常用于检测钢轨的内部

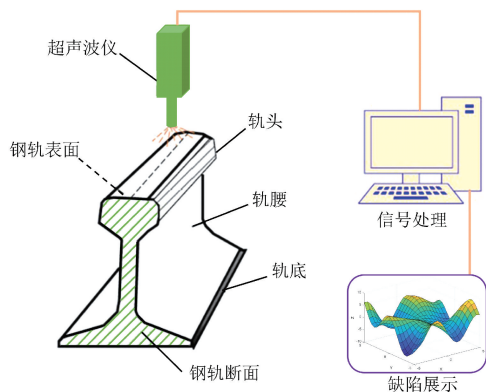


图 3 超声波在钢轨中缺陷检测原理

Fig. 3 The principle of ultrasonic defect detection in rails

缺陷。上海东方海洋工程技术有限公司基于超声回波技术研发了 RUD-15 双轨探伤仪^[35],如图 4 所示,该设备通过安装的不同角度的脉冲回波探头进行钢轨中不同种类的损伤探测。由中国铁道科学研究院研发的超声波探头配备在 GTC-80X 探伤车上,最大检测速度可以达到 80 km/h 进行轨道缺陷检测^[36]。

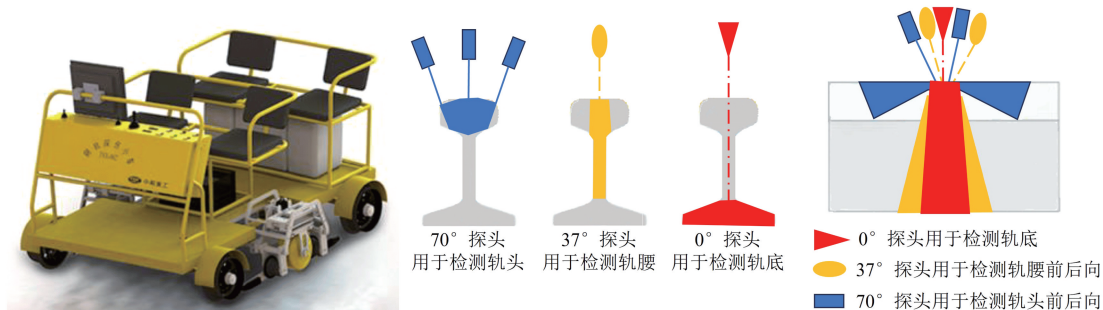


图 4 基于常规超声波检测的 RUD-15 双轨探伤仪^[35]

Fig. 4 RUD-15 dual-track flaw detector based on conventional ultrasonic testing

2) 相控阵超声检测

基于常规超声波的铁路检测系统存在检测覆盖率低和更换探头不方便的问题,无法满足实际应用的需要。与常规超声波检测相比,相控阵超声波检测(phased array ultrasonic testing, PAUT)使用多个晶片组成的探头阵列来实现超声波的发射和接收,如图 5 所示,具有多角度扫描、速度快、精度高等优势^[3]。Zhang 等^[37]提出了一种高速相控阵超声检测技术,通过高速相控阵技术,一次产生多个角度的波束,接收所有通道的缺陷回声信号,并实时并行处理所有数据。提高铁路检测的速度和覆盖率,实现更高效的检测。Chen 等^[38]设计使用相控阵探头结合常规探头进行缺陷检测,通过不同角度探头确保检测覆盖区域,现场可编程门阵列(FPGA)的并行处理能力实现了最大检测速度可达 90 km/h,同时保持 6 mm 的检测精度,具有实际应用价值。张俊岭等^[39]通过相控阵超声检测技术实现对轨道不同部位(轨头、轨腰、轨底)高速检测。Kim 等^[40]使用两个 PAUT 探头构建了轨道裂纹检测系统,能

够分辨出 2 mm 的裂纹尺寸,并实现孔隙、螺栓孔星裂纹、纵向垂直裂纹和焊接裂纹的检测。Xu 等^[41]使用相控阵检测信号通过带通滤波和相位一致性加权的方法对图像进行降噪,有效地检测轨道焊接部位的缺陷。在许多工业应用中,特别是在需要高精度和高效率检测的场合,PAUT 检测正逐渐取代常规超声波检测的方法^[39]。

3) 激光超声检测

激光超声检测(laser ultrasonic testing, LUT)是一种融合激光技术与超声原理的前沿检测手段。如图 6 所示,其基本原理是利用高能量脉冲激光束照射轨道表面,使材料表面瞬间产生热弹性膨胀,进而激发出超声波;通过激光干涉仪、压电传感器等接收装置捕捉这些超声波信号,并依据信号特征分析轨道内部的缺陷状况^[42]。

隋皓等^[43]研究激光点源和线源激发超声波对钢轨表面缺陷检测的影响。通过有限元建模和实验对比,发现线源激光激发的声表面波指向性好、信号幅值大,对不同类型钢轨表面缺陷检测能力更强,为激光超声钢轨检测应用

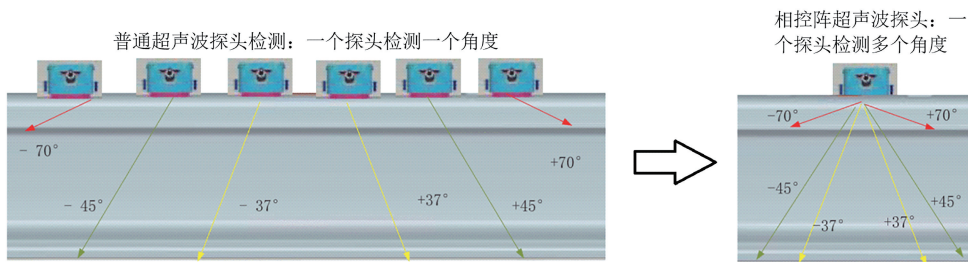


图 5 普通超声波探头与相控阵超声波探头检测范围对比^[3]

Fig. 5 Comparison of the detection range of ordinary ultrasonic probes and phased array ultrasonic probes

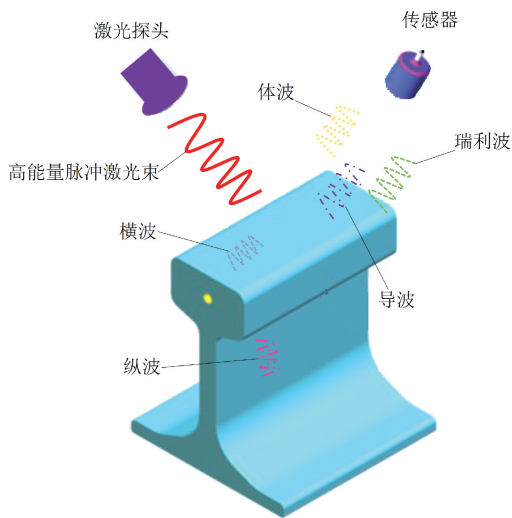
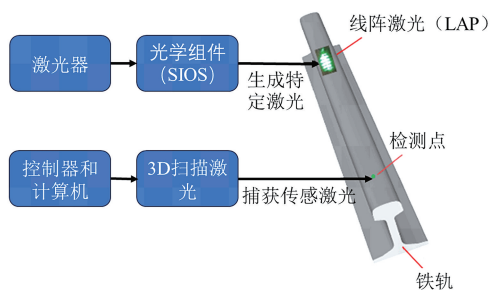


图 6 LUT 检测原理

Fig. 6 The detection principle of LUT

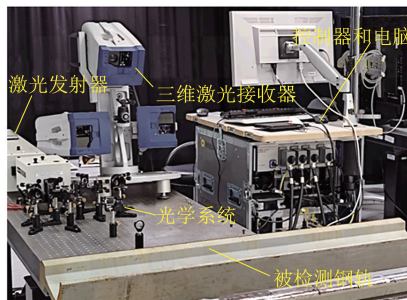
提供基础。Jiang 等^[44]通过二维有限元模型和实验研究发现,表面波对钢轨表面不同深度缺陷敏感,且缺陷越深损伤因子越大,通过拟合损伤因子-损伤深度曲线可定量评估缺陷。随后有研究表明激光照射钢轨表面时,能量被吸收

引发热弹性机制,产生包括瑞利波、纵波、横波、体波、导波等多种超声波。其中瑞利波体波、导波因沿表面传播且衰减减小,在缺陷检测方面潜力巨大。NG 等^[45]提出基于激光瑞利波和混沌振子的非接触式检测系统(NLDOS),利用混沌振子对微弱信号的强抗噪性识别内部缺陷反射信号,实验证明对不同深度和类型内部缺陷有效。Imran 等^[46]设计的非接触式激光检测系统,如图 7(a)所示,利用有限元方法研究激光热弹性产生窄带瑞利波检测轨道缺陷,实验证明线阵激光可产生有效窄带波;针对超声信号噪声问题提出基于飞行时间的缺陷探测准则(TOFFD),能自动识别缺陷回波,确定了轨道不同部位缺陷检测范围,搭建了超声波检测装置用于轨道的全面检测,如图 7(b)所示,可实现轨头表面缺陷检测范围达 30 cm、轨腰表面缺陷检测范围约 25 cm 等,有效提高检测可靠性。Jiang 等^[47]则基于 LUT 体波散射和衍射原理,研究体波与内部孔缺陷相互作用及模态转换,通过优化算法和实验验证,实现对特定直径和深度内部孔缺陷的定量检测,位置和定量相对误差在一定范围内。Pathak 等^[48]运用有限元模拟,分析不同频率激光诱导超声导波在轨脚的传播特性及传感器位置影响,确定 20 kHz 为适宜频率,传感器距裂纹 300 mm 最佳,为轨脚缺陷检测系统开发提供依据。



(a) 超声波检测系统示意图

(a) Schematic diagram of ultrasonic testing system



(b) 超声波检测装置实物图

(b) Physical diagram of ultrasonic testing device

图 7 非接触式 LUT 检测系统^[46]

Fig. 7 The non-contact LUT detection system

LUT 检测技术在轨道缺陷检测方面取得显著进展,从原理研究到不同类型缺陷检测方法,再到检测系统优化,不断推动技术发展。然而,仍面临如现场环境复杂、检测

精度提升等挑战。未来研究可聚焦于多技术融合、智能算法优化及实际工况适应性改进等方面,进一步提升检测性能,保障铁路运输安全。

4) 超声波导波检测

超声波导波 (ultrasonic guided waves, UGW) 是一种在结构内部传播的机械波, 可以在结构如轨道和管道中传播很远的距离, 这些波在遇到轨道中的不连续性 (如裂纹或缺陷) 时会产生反射。为了更好的了解 UGW 在轨道中的传播特性, Xie 等^[49] 基于半解析有限元 (SAFE) 方法对具有不规则横截面的钢轨中 UGW 传播进行建模, 计算了诸如波数、相速度、群速度和波结构等基本特性, 并通过模态和振动能量分布分析, 筛选出对横向裂纹缺陷敏感的对称模式 S₆, 并利用 ABAQUS 软件模拟验证其有效性, 同时研究了激励频率、缺陷尺寸及深度等因素对反射波形的影响, 确定 75 kHz 为较优激励频率, 且发现反射系数与缺陷尺寸和水平深度分别呈单调递增和递减关系, 而垂直深度对检测灵敏度影响较小。Sun 等^[50] 则对混合高阶 SH 导波的传播特性展开研究, 分析了不同阶次 SH 导波在厚度方向的位移和能量场分布, 发现高阶模式在厚度方向具有对称且不均匀的分布特征, 创新地提出基于导波相对能量系数和导波相对阶次系数的深度量化和法向定位方法为后续缺陷检测奠定理论基础。在检测系统与信号处理方面, 也有重要进展。Loveday 等^[51] 构建了基于 UGW 的轨道监测系统, 采用两个压电换能器以脉冲回波模式收发导波, 对运行中的重载铁路轨道进行为期两周的监测。通过一系列信号预处理步骤, 包括相位阵列处理、色散补偿、信号拉伸和缩放等, 有效降低了环境和操作条件变化对信号的影响, 并运用奇异值分解 (SVD) 和独立成分分析 (ICA) 等机器学习技术从预处理数据中检测缺陷, 结果表明 ICA 结合降维技术在检测小缺陷生长方面表现更优。Ramatlo 等^[52] 将 UGW 技术结合了先进的信号处理技术和机器学习算法, 实现了焊接轨道中的缺陷检测。

2.2 涡流检测

在高速轨道运输领域中, 涡流检测 (eddy current, EC) 以其非接触、易实现自动化等特点, 被广泛应用于钢轨表面缺陷的检测。电涡流检测原理如图 8 所示, 把带有交流电的线圈靠近钢轨, 线圈产生的磁场会在钢轨内部形成电涡流, 由于钢轨中存在的缺陷部分会影响到钢轨的导电性能, 通过判断电涡流的强度、相位、分布等信息的变化情况来检测钢轨的缺陷^[53]。Wang 等^[54] 设计了一种使用涡流传感器检测轴承钢球表面缺陷的新方法, 通过分析不同钢球的电压信号采集结果, 验证了涡流传感器检测钢球表面质量的可行性。

然而, 由于趋肤效应的存在, 涡流检测很难探测出内部损伤。为解决这一问题, 许鹏等^[55] 提出了一种增强磁场涡流以抑制趋肤效应的方法, 在涡流检测线圈之上增加一个通入直流电流的 U 形电磁铁, 用磁轭导磁到钢轨以增强磁轭下的磁场。通过有限元仿真, 得出增强磁场后涡流渗透深度的改变, 同时仿真研究磁轭的提离和间距对检测效果的影响。搭建高速轨道检测的实验平台, 进行增强磁场

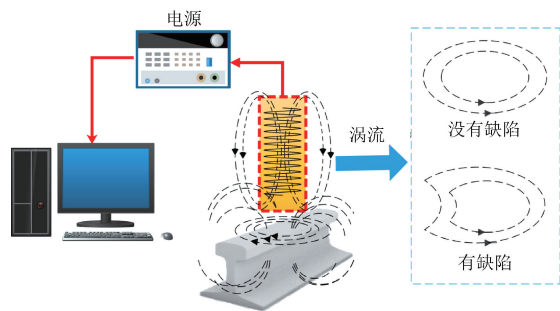


图 8 钢轨涡流检测示意图

Fig. 8 The schematic diagram of rail eddy current testing

涡流实验, 结果表明, 适当地增大背景磁场能够使涡流检测到深层次的缺陷并可以提高检测信号的信噪比。此外, Xie 等^[56] 验证了利用涡流脉冲热成像 (ECPT) 检测纤维增强聚合物 (CFRP) 加强钢结构内部缺陷的有效性。基于涡流脉冲热成像技术, 通过线圈中的交流电产生交变磁场, 在被检测导电物体中感应出涡流, 涡流产生焦耳热成为红外热成像检测的内部热源, 由于缺陷会影响涡流分布和热传导, 从而在表面形成异常温度分布, 通过热像仪记录温度分布来识别缺陷, 为轨道缺陷检测提供了新的解决办法。Alvarenga 等^[57] 基于涡流检测原理, 设计了钢轨表面缺陷检测系统 (RSDVS), 安装在检测车辆上, 如图 9 所示, 包括固定涡流探头的机械结构 (探头距轨面约 2 mm)、用于控制和处理数据的计算机、全球定位系统 (GPS, 采集率 5 Hz) 以及用于采集钢轨图像的相机系统, 实现了钢轨缺陷的在线检测、定位和分类。克服现有检测方法的不足, 提高检测效率和准确性, 为铁路维护计划提供优化依据。

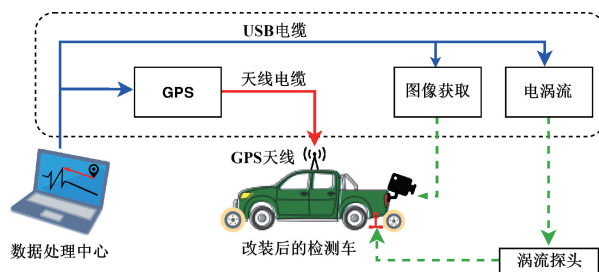


图 9 钢轨表面缺陷检测系统图^[57]

Fig. 9 The diagram of the rail surface defect detection system

涡流检测技术是基于电磁感应定律来评估材料或结构的完整性^[58], 然而涡流检测技术也存在信号处理复杂和定量检测精度有限的缺点。Anandika 等^[59] 研究了涡流检测方法在表征轨道表面近表面裂纹时的局限性。通过将检测到的裂纹的涡流信号与实际的裂纹剖面参数 (即深度和面积) 进行比较, 结果表明, 面积较大但较浅的裂纹可能比面积较小但较深的裂纹产生更高的涡流信号响应, 而且涡流检测无法用于测量密集的裂纹。为了提高涡流检测技术对微小缺陷检测灵敏度, Aouf 等^[60] 提出一种由 3 个差分探头组成的多传感器系统, 探头在特定配置下布置,

基于涡流检测原理,通过检测线圈中感应电压变化来检测钢轨表面裂纹。实验表明单探头仅在裂纹位于其路径上时才能检测到裂纹,高频(如 100 kHz)更适合检测表面裂纹,对提出的多差分探头系统进行有限元数值模拟,结果显示该配置在检测裂纹方面具有高效性和鲁棒性,无论裂纹大小、方向和位置如何,都能有效检测,其信号由 3 个差分信号(A、B 和 C)组成,对应每个差分传感器通过缺陷轴时的情况,此时感应电流受到强烈扰动。Kwon 等^[61]设计了 16 通道的涡流检测装置,如图 10 所示,利用多通道传感器采集自然钢轨缺陷试样的 X(电阻)和 Y(电抗)数据,对数据进行去趋势和去噪处理,通过校准测试件(含特定尺寸缺陷,确保所有传感器经过相同缺陷以校准传感器间差异,确定位置和幅度校准值使传感器在同一位置有相同幅度和相位)校准信号,根据校准数据调整传感器位置、幅度和相位,将校准数据应用于自然缺陷试样检测,分析检测结果(如缺陷深度估算)。Xu 等^[62]研究了检测速度对涡流检测信号的影响,根据有限元仿真分析得出:随着速度的增加,缺陷信号幅度近似线性地减小,下降斜率与缺陷深度有关。进一步得到缺陷信号幅值、缺陷深度和检测速度之间的关系,用于评估不同速度下的缺陷深度。


 图 10 多通道涡流检测装置^[61]

Fig. 10 The multi-channel eddy current testing device

2.3 漏磁与脉冲漏磁检测

漏磁检测(magnetic flux leakage, MFL)的原理是当磁性物体被磁化后,在物体表面或近表面的缺陷位置会形成泄漏磁场,由磁感应传感器获取缺陷漏磁场信号,通过该信号来检测物体是否存在缺陷^[63]。

为了高效的检测轨道交通中钢轨表面的缺陷,Jia 等^[64]提出了一种新的基于多传感器信号相对值的钢轨表面缺陷检测方法,该方法利用磁通量泄漏技术来检测钢轨表面的缺陷,为了减少由于振动等外部因素引起的误判,使用多传感器测量的相对值而非单一传感器的绝对值进行钢轨缺陷检测。为了抑制钢轨头部表面缺陷的漏磁检测信号中提高干扰的影响,Jia 等^[65]采用基于缺陷漏磁场分布特征的滤波方法,通过传感器阵列根据 x 和 z 方向信号差异确定参考信号并推导传感器安装方式,进行了有限

元仿真和物理实验(包括单缺陷和多缺陷实验),研究了钢轨头部表面缺陷的漏磁检测中抑制提高干扰的问题,得出该方法能有效抑制提高干扰,可获得相对完整缺陷漏磁场检测波形的结论。基于漏磁技术对钢轨缺陷检测的过程中,存在缺陷的轨道表面的漏磁信号通常较弱且经常包含复杂的噪声(幅值和频率的重叠),难以检测,为了减少这种噪声对检测精度的影响以及提高信号处理的精度。Ji 等^[66]提出了一种改进的自适应滤波方法,通过构建虚拟通道结合自适应滤波算法处理漏磁信号,在 30 km/h 的检测速度下,使漏磁信号的噪声降低了 81.44%。Jia 等^[67]通过磁轭导磁到钢轨以增强磁轭下的磁场,实现了轨道表面的漏磁信号的放大。Liu 等^[68]提出了一种最小熵解卷积的信号滤波方法对漏磁信号进行滤波检测,有效提高了钢轨表面微小缺陷的检出率。Long 等^[69]探讨缺陷漏磁检测信号与缺陷开口轮廓的对应关系模型,分析传统方法误差,提出了一种特征近似方法(CAA)来检测缺陷边缘,将缺陷轮廓识别的误差从 6.00%降低到 2.00%,提高了缺陷开口轮廓识别精度。传统漏磁检测中,为保护传感器并减少磨损,传感器与样品表面间有提高层(距离为提高值),其材料通常为空气或非铁磁耐磨材料(如不锈钢、铜)。提高值增加会使漏磁信号迅速衰减,降低检测灵敏度。Tang 等^[70]提出了一种基于带通槽铁磁提高层的新型漏磁检测方法,通过仿真和实验研究了相关影响因素,验证了新型方法对近侧和远侧裂纹检测的有效性,如图 11 所示,实验结果表明,裂纹和通槽漏磁场相互增强,放大了漏磁信号,提高了检测灵敏度。Usarek 等^[71]提出漏磁信号用于钢板中缺陷分类和尺寸测量,同时对 3 种互补的磁性检测技术(表面拓扑气隙磁阻系统 STARS、残余漏磁 RMFL 和杂散漏磁 SMFL)在区分钢板近侧和远侧缺陷检测能力方面进行比较,并通过实验和有限元分析进行了验证。Antipov 等^[72]研究了高速漏磁检测中尾场的特性及其在获取缺陷数据方面的应用,以钢轨为测试对象,获取了钢轨内部和表面的磁场分布,实验结果表明,表面和内部缺陷在极间空间和磁化系统后方的磁场扰动不同,后方尾场特殊配置有助于区分内部和表面缺陷信号。

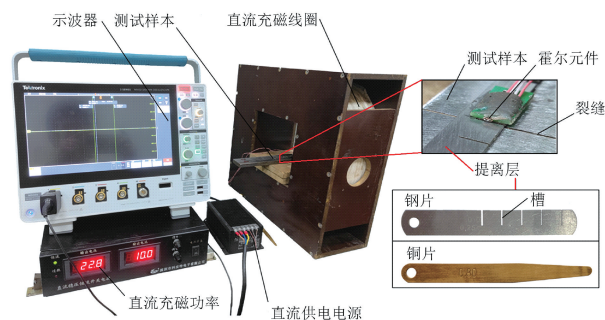

 图 11 基于铁磁剥离层的 MFL 检测系统原理图^[70]

Fig. 11 The schematic diagram of MFL detection system based on ferromagnetic peel layer

脉冲漏磁检测(pulsed magnetic flux leakage, PMFL)是一种新兴且有效的电磁无损检测技术^[32],它将传统的漏磁技术与脉冲电流理论相结合,具有更快的检测速度和更低的扫描误差。Wang 等^[73]设计了基于传感器阵列的脉冲漏磁检测系统可用于检测含多缺陷的铁磁材料试件,能够同时检测裂缝的磁场分布,消除磁轭引起的边缘效应,并且可以更准确地获取裂缝参数。Piao 等^[74]提出了一种融合脉冲涡流和漏磁的新型高速检测方法,当磁性材料被施加的强直流磁场磁化至饱和状态时,亚表面缺陷的存在会导致泄漏磁场和磁导率分布不均匀,从而实现磁性材料亚表面缺陷的快速检测。Ibrahim 等^[75]提出一种基于磁头(MH)和隧道磁阻(TMR)侧置的新型脉冲磁通量泄漏(PMFL)方法,通过对比实验发现,TMR 的位置对裂纹检测信号的灵敏度和信噪比有影响,且侧置 TMR 在裂纹检测中的灵敏度和信噪比均高于下置 TMR。

2.4 机器视觉检测法

机器视觉检测方法借助图像采集与智能分析技术,达成对钢轨缺陷的快速识别与精准定位^[12]。其实现途径涵盖传统图像处理及深度学习两类。在图像预处理阶段,二者均涉及灰度化、图像增强、图像分割等操作^[76]。然而,二者的检测方法存在差异。传统图像处理方法具有检测速度快、计算量小以及对计算机硬件要求低等优势,但其鲁棒性与泛化能力欠佳,仅在特定图像检测中效果显著。相比之下,深度学习检测方法能够凭借算法从海量数据中挖掘规律,进而在新样本检测中表现出色,其泛化能力及鲁棒性均优于传统图像处理方法^[77]。

1) 传统图像处理检测方法

随着计算机性能的提升,在数字图像处理方面的研究也越来越多,许多研究者将数字图像处理技术引进到钢轨缺陷检测中,对钢轨表面缺陷进行检测。Zhao^[78]分别利用蓝色、红色光源对钢轨加以照明,如图 12 所示,借助彩色线阵相机采集钢轨表面图像,依据不同波长的光对钢轨表面缺陷反射状况存在差异的原理,设计阴影修正以及非线性微分算法来处理图像,最后运用图像形态学技术分割出感兴趣区域,漏检率仅为 2.4%。

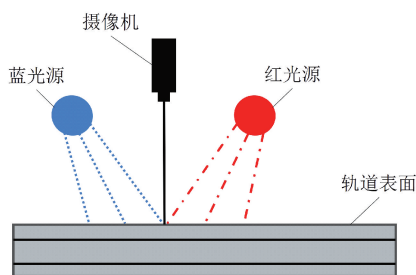


图 12 照明法轨道缺陷检测原理示意图

Fig. 12 The schematic diagram of the principle of track defect detection by illumination method

轨图像进行灰度直方图变化,锐化等操作进行图像增强,然后使用中值滤波对图像进行降噪,平滑,最后对提取到的特征使用模板匹配算法进行模式识别,检测钢轨裂缝。为了提高传统从图像处理算法的鲁棒性,Fan 等^[80]提出一种基于线局部二值模式(LLBP)的高速铁路扣件检测算法,能够有效区分正常扣件和故障扣件(完全缺失和部分缺失),并对光照、天气、铁路条件和复杂背景具有鲁棒性。陈骁等^[81]根据钢轨扣件的几何特征,提出了一种从粗到精的扣件定位策略和基于 Adaboost 算法的扣件状态识别方法,能够快速准确地定位损坏扣件,准确率为 92%。刘志勇等^[82]提出了一种实时视觉检测系统(VIS)用于检测钢轨头部的离散表面缺陷,采用局部归一化方法(LN)克服了图像光照不均和轨道表面反射特性不同的挑战,基于投影轮廓的缺陷定位(DLBP)算法实现轨道缺陷的精确定位,该系统对噪音具有鲁棒性且运行速度快,可在 216 km/h 的测试列车上实时运行。Min 等^[83]通过分析轨道区域(包括钢轨、道砟、轨枕和扣件)在检测图像中的 H 值特征,发现钢轨区域 H 值整体较高且突变小,基于 H 值实现轨道快速定位,然后根据方向链码轮廓跟踪提取轨道上的缺陷信息,避免搜索整个图像,提高算法效率。Han 等^[84]采用多元视觉融合的方案,针对轨道中紧固件缺失的情况,结合结构光投影产生的二维强度信息和三维深度信息,可以在动态运行中实现紧固件位置的准确感知,使用动态模板匹配算法从二维强度图中定位紧固件,准确率达到 99.4%,然后使用分水岭算法在三维图像中对紧固件的螺栓和螺母进行分割,实现紧固件全面检测。Guerrieri 等^[85]通过 Canny 算子对图像进行边缘检测,利用移动平均滤波器和范围算子进行处理,确定边缘像素所属类别(背景、不确定区域、轨道),最终得到钢轨的轮廓矩阵。最后计算磨损钢轨和完整钢轨轮廓的偏差,得到不同角度下的钢轨磨损图。随后,各种纹理分析技术也广泛用于钢轨缺陷检测中。Dubey 等^[86]基于最大稳定极值区域(MSER)技术用于计算分割图像的区域面积、质心、填充面积和周长等特征,从而实现检测、标记和可视化钢轨中的缺陷区域,如图 13 所示。



图 13 基于 MSER 技术图像分割流程^[86]

Fig. 13 Image segmentation process based on MSER technology

刘雷等^[79]提出一种钢轨表面裂纹检测算法,首先对钢

Gan 等^[87]针对铁路表面离散缺陷提出了采用随机策略生成背景表示,结合不同的随机选择和融合策略增强了背景表示能力,通过定义显著性函数实现了准确的缺陷检测,具有可靠的检测性能、鲁棒性和实时适用性。Lee 等^[88]在图像的频域中提取特征,并使用高斯近似方法对图像中的峰值频率进行像素级估计,从而计算钢轨波纹波长,提取的 7 个特征向量作为构建支持向量机,准确率达到 97.11%。为了降低遮挡、复杂纹理的问题在视觉检测的场景中经常出现的问题,Gan 等^[89]设计了分层提取器(粗提取器和细提取器)用于图像的特征提取,粗提取器基于均值漂移算法寻找背景模式,细提取器整合纵向上下文信息和横向先验信息来过滤噪声点,在轨道缺陷定位中取得了良好的效果。

2) 基于深度学习的检测方法

随着科技的蓬勃发展,自动化与智能化检测技术逐渐成为研究的核心热点。机器视觉技术和深度学习算法的

融合,借助图像采集和智能分析手段,实现了对缺陷的快速探测与精确定位,为轨道交通缺陷检测提供了创新性的解决方案^[90]。通过图像采集和智能分析,实现了对缺陷的快速识别和定位。深度学习技术的进步,尤其是卷积神经网络(CNN)在图像识别领域的开创性突破,为轨道交通缺陷的自动检测赋予了强大的技术保障^[91]。Min 等^[83]提出的铁路表面实时视觉检测方法通过利用目标结构特征简化计算,实现了检测要求。通过实验确定了目标区域定位算法的最佳参数,验证了钢轨表面缺陷检测的有效性,检测时间满足实时检测要求,可在一定程度上替代人工巡检。钢轨缺陷种类繁多,Gibert 等^[92]提出了一种基于深度多任务学习的铁路轨道检测方法,如图 14 所示,通过训练一个网络来同时执行多个相关任务(例如材料分类、紧固件检测和评估),并共享底层特征表示,实现了钢轨多类型缺陷同时检测目标。

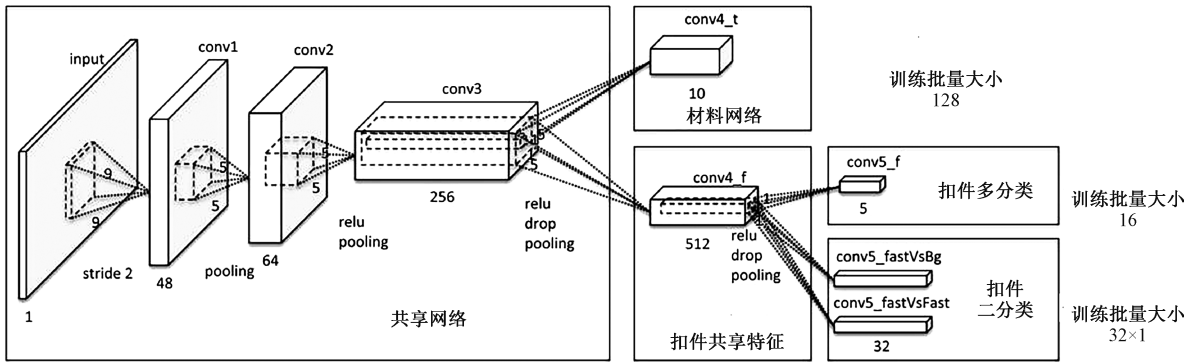


图 14 多任务深度学习网络^[92]

Fig. 14 Multi-task deep learning network

2015 年由 Joseph Redmon 等提出的 YOLO(you only look once)算法凭借着优异的目标检测性能在缺陷检测领域得到快速发展^[93-94]。Bai 等^[95]提出了一种基于改进的 YOLOv4 的新方法,用于铁路表面缺陷检测。该方法使用 MobileNetV3 作为 YOLOv4 的主干网络来提取图像特征,并在 YOLOv4 的 PANet 层应用深度可分离卷积,与 YOLOv4 相比,提出的方法在参数量上减少了 78.04%,在检测速度上提高了 10.36 fps,并且模型体积减少了 78%。Wang 等^[96]开发了一个基于深度学习的铁路表面实时检测系统,该系统利用边缘计算设备进行轨道缺陷的实时检测,通过引入深度可分离卷积和重参数化方法优化了 YOLOv5 结构,实现了 83.2% 的平均精度均值(mAP)和在边缘计算设备上的 51 fps 的检测速度。针对轨道表面缺陷检测面临的光照复杂、反射特性不均、污染噪声等问题。Yang 等^[97]基于边缘像素标准差的稳定性进行轨道提取后,使用 YOLOv2 对轨道表面缺陷精确定位,平均准确率为 97.11%,如图 15 所示。

随后,注意力机制概念的提出进一步提高了深度学习算法在目标检测领域的性能^[98-100]。Ouyang 等^[101]提出了

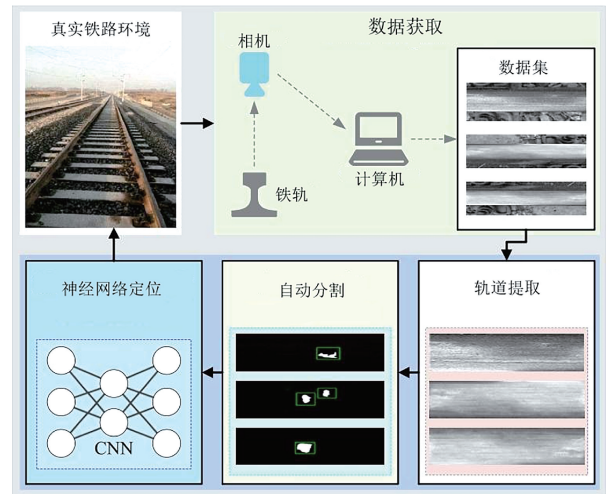


图 15 基于边缘像素标准差的缺陷检测流程图^[96]

Fig. 15 The flowchart of defect detection based on standard deviation of edge pixels

一种新的高效多尺度注意力(EMA)模块,该模块通过重塑部分通道到批量维度,并在每个特征组内进行分组,以减

少计算开销。Ni 等^[102]将轨道缺陷检测视为一个关键点估计问题,设计了一种通过交并集 (IOU) 引导中心点估计的一致性进行轨道表面缺陷检测的注意力神经网络,在四个表面缺陷数据集上都表现出优异的性能。Zhong 等^[103]提出了一种基于双路径特征融合 (DPF) 的铁路表面缺陷检测方法。该方法采用双路径结构分别提取低级和高级特征,利用注意力机制和特征融合技术整合这些特征,以保留更丰富的信息。实验结果表明,模型在缺陷检测的准确率达到 98.6%,对污垢的准确率为 94.1%,对间隙的准确

率达到 100%。钢轨两侧的边缘缺陷和不同类型缺陷之间的多尺度变化都对钢轨表面缺陷的检测提出了挑战。为了解决上述问题,Wang 等^[104]提出的 YOLOv5s-VF 框架通过锐化注意力机制 (V-CBAM) 和微尺度自适应空间特征融合 (M-ASFF) 有效解决了轨道表面缺陷检测中的边缘定位、小缺陷特征丢失和多尺度特征融合语义冲突等问题,如图 16 所示。在实验数据集上,该模型检测性能优于其他深度学习框架,平均检测精度达 93.5%,检测速度为 114.9 fps,具有实际应用潜力。

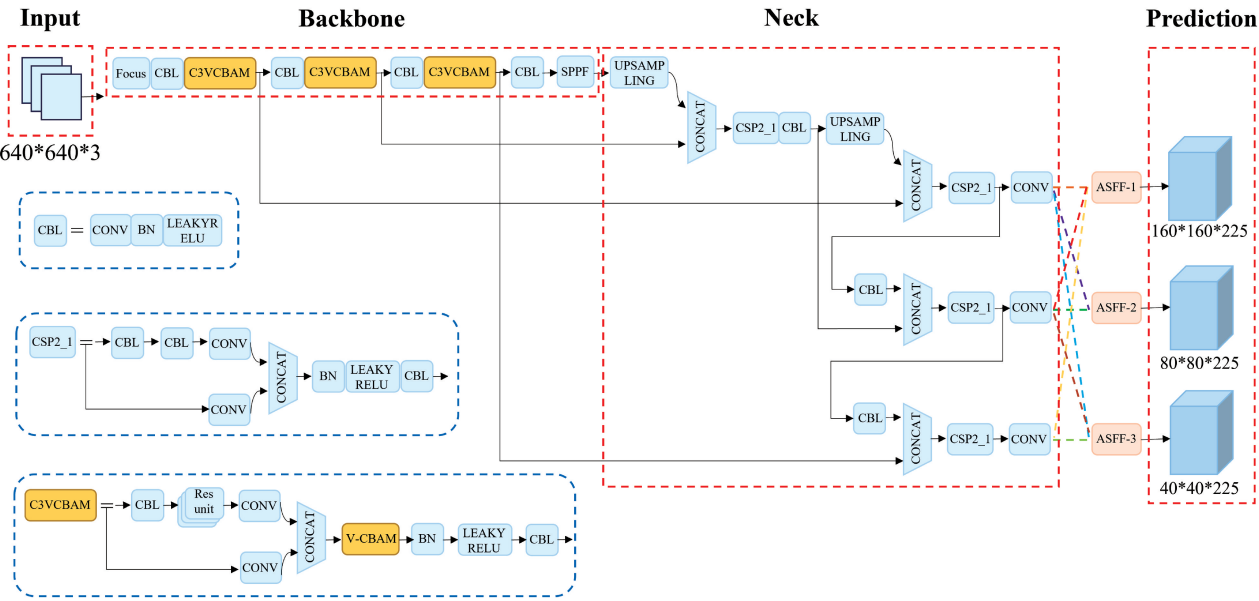


图 16 YOLOv5-VF 模型^[104]
Fig. 16 YOLOv5-VF model

最近,用于自然语言处理的 Transformer 模型也被应用于图像领域以完成视觉任务,成为一个新的研究方向^[105-106]。视觉 Transformer 能处理长距离依赖,适用于铁路轨道图像检测,Phaphuangwittayakul 等^[107]提出了 RailTrack-DaViT 方法检测铁路轨道缺陷,如图 17 所示,利用双重注意力视觉变换器 (DaViT) 架构捕捉全局和局部信息,定制分类头和训练流程,提高模型在小数据集上的性能,快速适应新图像,减少实际应用时间消耗。Hu 等^[108]将 Transformer 与 YOLOv5 结合用于铁路表面缺陷检测,在 YOLOv5 的 C3 模块后集成 Transformer,将连接 SPP 的 C3 改为 C3-Transformer,使网络更好连接上下文语义信息并聚焦目标区域,实验结果表明 mAP 相比 YOLOv5s 提高 3.9%,处理速度达 76.92 fps。Wan 等^[109]提出的双流 Swin Transformer 网络 (TSSTNet) 的创新深度学习网络,有效解决了轨道定位不准确、轮廓提取不佳和缺陷检测不完整等问题。轨道分割面临轨道模式种类多,类内差异大、类间相似性高等问题,Ni 等^[110]提出了一种基于两阶段 Transformer 卷积神经网络的分割框架,第一阶段,通过学习超像素内一致性和边界标定生成

铁路超像素,以有效拟合铁路边界并指导第二阶段的铁路分割。第二阶段,在超像素和像素尺度上做出全面的分割决策。最终在多类型轨道分割中实现了 98.71% 的整体精度。

深度学习在铁道缺陷检测的研究中具有较高的鲁棒性和泛化能力,然而前期模型的训练需要大量标注数据,实际研发中缺陷样本数量和种类有限,难以获取足够的轨道缺陷数据^[111-112]。Min 等^[113]提出一种简单而有效的铁路表面缺陷检测模型,解决以往检测模型面临的缺陷样本不足的问题。使用预训练模型提取正常轨道样本和缺陷样本的深度特征,采用无监督学习方法学习特征分布,并创建特征原型记忆库。利用原型学习技术,基于原型记忆库估计测试样本每个像素属于缺陷的概率。该方法在只有少量缺陷样本用于训练的情况下,在 RSDDS Type-I 和 Type-II 轨道缺陷数据上的 ROC 分别达到了 95.2% 和 99.1%,与最先进的无监督异常检测算法相当。He 等^[114]提出感知约束单图像生成对抗网络 (PCSGAN),如图 18 所示,采用金字塔式结构,包含多个生成器和判别器,从最小尺度开始训练,学习图像内部数据分布,从单张真实或

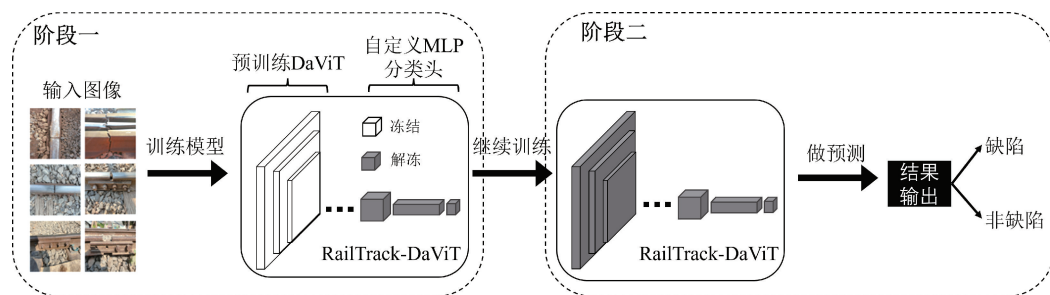


图 17 RailTrack-DaViT 框架检测流程图

Fig. 17 The flow chart of the RailTrack-DaViT framework detection

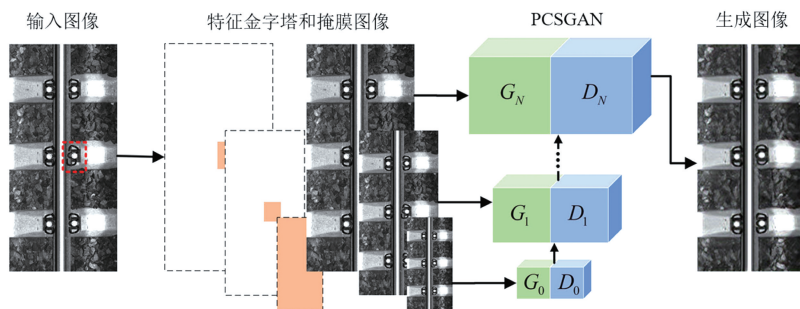

 图 18 PCSGAN 网络生成图像数据流程^[114]

Fig. 18 The process of generating image data on PCSGAN network

手动编辑的缺陷图像生成多样且符合铁路结构约束的缺陷图像,解决模型训练样本不足的问题,提高缺陷检测效果。此外,Xu等^[115]基于自监督表示学习和缺陷模拟算法预训练骨干网络,利用无缺陷样本学习缺陷特征,解决有限标注数据下的铁路表面缺陷检测问题。Hong等^[116]设计了自监督预训练的高速轨道基础设施缺陷小样本检测器(FDSP-HRID),解决缺陷样本少和特征提取不足问题,提高检测性能。

2.5 轨道无损检测技术对比

综上所述,本文基于物理检测方法和机器视觉方法对目前国内外关于钢轨无损检测技术进行了比较全面的综述,各技术的优缺点如表 1 所示。其中,物理方法主要论证了CU、PAUT、LUT、UGW、EC、MFL和PMFL等经典检测方法,并对其方法进行了性能对比验证,PAUT、LUT、UGW都是CU技术的衍生技术,其原理都是都利用了超声波在材料中的传播速度、衰减特性以及材料的相互作用等物理性质来检测缺陷。CU检测属于传统检测方法,适用单个探头发射和接收超声波,具有成本低、技术成熟等优势,但检测速度可能较慢,需要耦合剂,所以在表面不平或者有涂层的环境下可能效果不好。检测精度可能中等,对操作人员要求高^[117]。相比CU检测,PAUT具有多个阵列探头,可以电子扫描,不用移动探头,检测速度快一些,精度更高,尤其是对复杂形状的缺陷。但设备成本高,数据处理复杂,需要更专业的操作人员,适合检测焊缝或者复杂结构的内部缺陷^[85]。LUT检测是非接触式的,

用激光激发和接收超声波,适合高温或者难以接触的环境,检测速度可能很快,精度也不错,但设备昂贵,对表面条件要求高,比如需要反射层或者清洁表面,在户外或有污染的环境下效果不好^[48]。UGW可以在长距离传播,适合检测长轨道中的缺陷,比如钢轨的整体检测,检测效率高,覆盖范围大,但精度可能较低,只能检测大致位置,需要后续其他方法确认,适用于快速筛查,但无法精确定位或定量分析^[52]。EC检测适用于导电材料,对表面和近表面缺陷敏感,不需要耦合剂,检测速度快,但只能用于导电材料,对深层缺陷检测能力差,而且受材料电磁特性影响,比如不同材质的轨道可能需要不同的校准^[67]。适合表面裂纹检测,成本中等。MFL和PMFL多用于铁磁性材料,如钢轨,可以检测表面和近表面缺陷,设备简单,检测速度快,适合高速巡检,但精度较低,难以检测非磁性材料,且对缺陷形状敏感,可能需要后续验证,且成本可能较低,适合大规模快速检测^[70]。随着计算机和图像处理算法的不断发展,机器视觉技术开始逐渐应用于轨道缺陷检测领域。这一时期的系统主要基于传统的图像处理方法,如边缘检测、阈值分割等,能够检测出一些较为简单的缺陷,如轨道表面的裂纹、划痕等,具有成本低,易于实现等优势。但受光照、天气影响大,检测精度有限,只能检测表面可见缺陷,处理速度取决于算法复杂度,误检率高^[118]。近年来,随着深度学习、人工智能等技术的兴起,机器视觉技术在轨道缺陷检测中的应用得到了快速发展。基于深度学习的检测方法,利用卷积神经网络等模型自动识别缺陷,可以处理复杂

的图像数据,适应不同光照和角度,检测精度高,但需要大量标注数据训练模型,计算资源要求高,实时性可能受硬件限制^[119]。另外,模型的可解释性较差,可能存在过拟合问题,适合与图像处理结合,用于自动化检测系统^[120]。同时,硬件设备的性能也不断提升,如高分辨率相机、高速图像采

集卡等,使得检测速度和精度都得到了大幅提升。目前,机器视觉技术在轨道缺陷检测领域正朝着智能化的方向发展。不仅能够实现对轨道缺陷的自动检测和识别,还能够结合大数据分析、物联网等技术,对轨道的健康状况进行实时监测和评估,为轨道的维护和管理提供更加科学的依据。

表 1 钢轨无损检测技术对比
Table 1 Comparison of rail non-destructive testing techniques

检测方法	检测技术	缺陷类型	适用环境	结果对比
物理检测	CU	轨头内部、轨腰、轨底缺陷	实验室、平整表面	检测精度较高,能检测内部缺陷;对检测人员技术要求高,检测速度慢,需耦合剂 ^[121-122]
	PAUT	轨头内部、轨腰、轨底缺陷	复杂结构、焊缝	检测速度快,使用灵活,成像直观;但检测对象有局限性,缺陷定性困难,设备成本高 ^[3, 123]
	LUT	轨头、轨腰和轨底缺陷	高温、非接触环境	非接触、频带宽、高精度等特点,在检测时无需耦合剂,易受提离影响 ^[42, 124]
	UGW	轨头内部、轨腰、轨底缺陷	长距离、隐蔽区域	传播距离远,速度快,对横向裂纹缺陷灵敏度高 ^[125-126]
机器视觉检测	EC	钢轨表面和近表面缺陷	导电材料表面	不需耦合剂,操作简单,灵敏度高,检测深度有限,易受干扰 ^[127-128]
	MFL 和 PMFL	钢轨表面和近表面缺陷	铁磁性材料表面	操作简单,灵敏度较高,可检测一定深度表面和近表面缺陷;但存在漏检可能,对内部缺陷检测能力有限 ^[67, 129]
	传统图像处理	钢轨整体表面、卡扣和螺栓缺失	光照稳定环境	常用于钢轨表明缺陷检测,检测速度快,但精度不高,对光照等环境条件敏感 ^[130]
	深度学习检测	钢轨整体表面、卡扣和螺栓缺失	自动化系统、复杂表面	检测精度高,对复杂缺陷识别能力强;但需要大量样本训练,受算法检测能力的影响 ^[131]

3 多源信息融合技术

轨道缺陷检测技术将呈现多维度的创新发展趋势,为轨道交通安全注入源源不断的动力。多技术融合将成为主流发展方向,不同原理的检测技术优势互补,协同攻克复杂检测难题^[132]。在多源信息采集方面,多种技术手段被综合应用。Wang 等^[133]利用超声检测技术获取轨道内部缺陷的 B-扫描图像,通过 GCT-8C 轨检仪的多个检测通道采集数据,然后使用不同框架的深度学习模型(YOLOv8、YOLOv5、DETR 和 Faster R-CNN 等)对超声 B-扫描图像中的轨道内部缺陷进行自动识别和定位,经过数据预处理、迁移学习和参数优化,YOLOv8 网络在检测四种常见内部缺陷(如月牙形疲劳裂纹、鱼尾螺栓孔裂纹等)时表现出较高的平均精度(93.3%)和较快的检测速度,相比其他网络优势明显。Dang 等^[30]提出了一种基于图像分类的铁路轨道缺陷检测方法,利用超声导波(UGWs)和光纤布拉格光栅(FBG)传感器结合卷积神经网络实现对轨道状态(完好、人工裂纹损坏、表面凸起)的有效识别,研究表明,所提出的基于图像分类的方法在预测每种铁路状况方面实现了高精度,并且具有快速的收敛速度,整体分类准确率达到 98.0%。此外,在检测系统与创

新上,也有重要成果。Yin 等^[134]提出了一种基于轴箱振动加速度和深度学习网络的智能方法,用于检测包括螺栓松动和缺失紧固件等在内的紧固件缺陷。通过分析轴箱振动加速度与紧固件缺陷之间的动态关系,建立了基于深度卷积神经网络的紧固件缺陷识别网络,通过车辆-轨道动态耦合模型,分析了紧固件缺陷对轨道和车轮集振动的影响,并使用深度学习技术进行紧固件缺陷的实时智能诊断。Liu 等^[135]提出基于脉冲涡流检测(PECT)和小型深度卷积神经网络(S-DCNN)的缺陷识别方法,首先通过 PECT 实验获取一维缺陷信号,再利用平滑伪 Wigner-Ville 分布(SPWVD-C)方法将其转换为二维时频表示作为 S-DCNN 的输入,实验表明该方法在小样本数据下比经典 VGG 网络结构具有更高精度和更快运算速度。Zhang 等^[136]针对热成像轨道缺陷检测,提出一种基于记忆模块和度量学习的异常检测算法,利用大量正常样本和少量缺陷样本对背景建模,通过度量学习模块扩大正常样本与缺陷样本的特征空间距离,减少干扰影响,在多种类型缺陷检测中,其图像级和像素级的 AUC 值均高于现有先进算法,有效提高了检测准确性。Shen 等^[137]提出多尺度特征动态融合网络(MFDF-Net),融合振动和图像多模态数据识别钢轨表面状况。如图 19 所示,通过振动多尺度特征

提取模块(VMFEM)和特征金字塔网络(FPN)分别提取特征,利用注意力机制实现动态加权融合。实验表明,该模型测试集平均准确率达99.333%,比单振动模式提高2.67%,比单图像模式提高7.8%,有效提升了检测精度和鲁棒性。Yuan等^[138]基于RGB-P双峰数据融合提出铁路扣件紧固度检测方法。利用3-D激光传感器采集数据构建双峰数据,通过Unet网络分割扣件并提取骨架,计算扣件间隙以检测紧固度。实验显示,该方法测量误差和均方根误差均小于0.1 mm,紧固度检测总体检测率超99.4%,检测速度不低于10.05 m/s,能有效应用于铁路维护。Wang等^[139]提出协同学习注意力网络(CLANet)用于无服

役钢轨表面缺陷检测。利用RGB图像和深度图像,通过特征提取、跨模态信息融合和缺陷定位分割3个阶段进行检测。构建了多模态注意力块(MAB)和双流解码器(DSD),并建立了NEU RSDDS-AUG数据集。实验显示,CLANet在5个参数上均有提升,在四个公共基准数据集上也具有竞争力。Sun等提出基于知识蒸馏的归一化循环网络(NCLNet-S*)用于钢轨表面缺陷检测^[140]。通过构建跨模态特征循环增强结构和归一化融合滤波器模块,结合知识蒸馏和自蒸馏技术,减少模型参数并提高性能。在NEU RSDDS-AUG数据集上,NCLNet-S*优于15种先进方法,在其他RGB-D公共基准数据集上也表现出色。

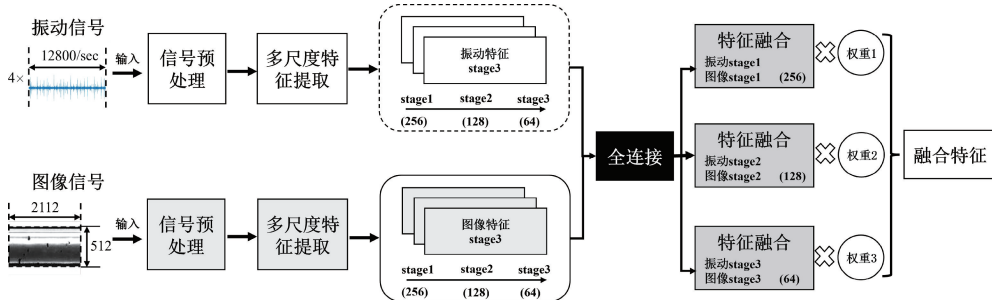


图19 MFDF-Net网络结构框图

Fig.19 The block diagram of the MFDF-Net network

多源技术融合在轨道缺陷检测领域取得了重要进展,通过整合不同的检测技术采集多源数据,并借助先进的算法模型进行分析处理,在缺陷识别、分类和系统优化等方面不断创新,显著提升了轨道缺陷检测的性能。然而,仍面临一些挑战,如在复杂环境下多源数据的融合精度有待进一步提高,部分算法的计算成本较高等^[141]。未来轨道缺陷检测的核心突破将依赖于多源信息融合技术的深度优化与跨学科融合,重点解决数据异构性、模型泛化性及实时性难题。通过算法创新(如动态权重分配、GAN增强)、新型模型架构(多模态注意力网络、GNN)及系统集成(数字孪生、无人机协同),有望实现从“离散检测”到“全息感知”的技术跃迁,为轨道交通的安全运维提供更智能化的解决方案。

4 结 论

轨道缺陷检测技术在保障轨道交通运营安全方面发挥着至关重要的作用。通过对多种检测技术的研究与分析可知,超声波检测技术基于超声波传播特性发展出多种检测手段,在检测内部缺陷方面各有优势;涡流与脉冲涡流检测利用电磁感应原理在表面及近表面缺陷检测中应用广泛,但存在一定局限性;漏磁检测能有效检测磁性材料表面和近表面缺陷,且在信号处理和方法改进上取得进展;机器视觉检测从传统图像处理发展到深度学习方法,检测精度和鲁棒性大幅提升。多源信息融合技术成为重要发展趋势,整合不同检测技术采集的多源数据并借助先

进算法分析处理,在缺陷识别、分类和系统优化等方面成果显著。然而,目前仍面临复杂环境下多源数据融合精度待提高、部分算法计算成本高的问题。未来需聚焦优化融合算法、开发高效模型结构和增强系统适应性,持续推动轨道缺陷检测技术发展,确保轨道交通长期稳定安全运营。

参考文献

- [1] 廖进, 吴松荣, 刘东, 等. 车载式地铁轨道缺陷巡检系统设计[J]. 现代城市轨道交通, 2020(4):11-16.
LIAO J, WU S R, LIU D, et al. Design of on-board inspection system for subway track defects [J]. Modern Urban Transit, 2020(4):11-16.
- [2] 赵奕开. 接触轨视频表面缺陷分类研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2020.
ZHAO Y K. Research on surface defect classification of contact track video [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2020.
- [3] XIONG L H, JING G Q, WANG J R, et al. Detection of rail defects using NDT methods [J]. Sensors(Basel), 2023,23(10):4627.
- [4] ZHAO Y L, LIU ZH Q, YI D, et al. A review on rail defect detection systems based on wireless sensors[J]. Sensors(Basel), 2022,22:6409.
- [5] 杨涛, 李晓晓, 吴柏强, 等. 悬挂式单轨箱型轨道梁外部缺陷巡检小车的设计[J]. 国防交通工程与技术,

- 2023,21(4):41-44.
- YANG T, LI X X, WU B Q, et al. Design of inspection trolley of suspension-type mono-rail track beam external defect [J]. Defense Transportation Engineering and Technology, 2023,21(4):41-44.
- [6] KOU L. A review of research on detection and evaluation of the rail surface defects [J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2022,19(3):167-186.
- [7] 孙国营, 刘志明, 冯推银, 等. 周期荷载作用下钢轨缺陷检测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(11):2873-2882.
- SUN G Y, LIU ZH M, FENG T Y, et al. Analysis of defects detection of track under cyclic load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(11): 2873-2882.
- [8] 李栋, 王睿, 王烨, 等. 基于机器视觉的高鲁棒轨道表面缺陷检测方法[J]. 铁道工程学报, 2024,41(5): 11-18.
- LI D, WANG R, WANG Y, et al. High robust track surface defect detection method based on computer vision technique[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024,41(5):11-18.
- [9] 姚宗伟, 杨宏飞, 胡际勇, 等. 基于机器视觉和卷积神经网络的轨道表面缺陷检测方法[J]. 铁道学报, 2021,43(4):101-107.
- YAO Z W, YANG H F, HU J Y, et al. Track surface defect detection method based on machine vision and convolutional neural network[J]. Journal of the China Railway Society, 2021,43(4):101-107.
- [10] 于少楠. 基于深度学习的钢轨表面损伤识别研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2024.
- YU SH N. Research on identification of rail surface damage based on deep learning [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2024.
- [11] 韦若禹. 基于计算机视觉的地铁轨道扣件缺陷检测及定位系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- WEI R Y. Research on detection and positioning system of metro rail fastener based on computer vision [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [12] 李宁. 基于机器视觉的钢轨表面缺陷检测系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- LI N. Research on rail surface defect detection system based on machine vision[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [13] 杨宏飞. 基于机器视觉的钢轨表面缺陷智能检测关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- YANG H F. Research on key technologies of intelligent detection of steel rail surface defects based on machine vision[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [14] 敬霖, 刘凯. 车轮踏面缺陷引起的轮轨动态响应综述[J]. 交通运输工程学报, 2021,21(1):285-315.
- JING L, LIU K. Review on wheel-rail dynamic responses caused by wheel tread defects[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021,21(1): 285-315.
- [15] 魏秀琨, 所达, 魏德华, 等. 机器视觉在轨道交通系统状态检测中的应用综述[J]. 控制与决策, 2021, 36(2):257-282.
- WEI X K, SUO D, WEI D H, et al. A survey of the application of machine vision in rail transit system inspection[J]. Control and Decision, 2021,36(2):257-282.
- [16] FU W J, HE Q X, FENG Q B, et al. Recent advances in wayside railway wheel flat detection techniques: A review [J]. Sensors (Basel), 2023, 23(8):3916.
- [17] 李杰. 混凝土轨枕裂缝产生的原因及防治措施[J]. 民营科技, 2014(9):174.
- LI J. Causes and prevention measures of cracks in concrete sleepers[J]. Private Technology, 2014(9):174.
- [18] 黄余健. 地铁轨道梯形轨枕与浮置板道床减振效果对比研究[D]. 广州: 广州大学, 2024.
- HUANG Y J. Comparative study on vibration reduction effects of ladder track and floating slab track in metro track [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2024.
- [19] 周彦冰. 轨枕-道床结构层间粘结试验研究及力学性能分析[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- ZHOU Y B. Interlayer bonding test research and mechanical property analysis of rail sleeper-track bed structure[D]. Nanjing: Southeast University, 2023.
- [20] BANGALY K. 竹纤维增强混凝土轨枕力学特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- BANGALY K. Study on mechanical properties of bamboo fiber reinforced concrete sleeper[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [21] 陈楠. 基于离散元法的钢轨-轨枕-有砟道床力学性能的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2023.
- CHEN N. Research on mechanical properties of rail-sleeper-ballast bed based on discrete element method[D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [22] 董惠定, POSPISCHIL F, LOY H. 弹性轨枕垫在重载铁路中的应用[J]. 交通世界, 2020(22):33-34.
- DONG H D, POSPISCHIL F, LOY H. Application of elastic sleeper pads in heavy-haul railways[J]. The World of Transportation, 2020(22):33-34.

- [23] 刘建利,周海斌. 地裂缝区沉降引起轨道几何形位变化的监测和对策[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(9):42-46.
LIU J L, ZHOU H B. Monitoring and countermeasures of track geometry deterioration caused by tunnel settlement in ground fissure area[J]. Urban Rail Transit Research, 2020,23(9):42-46.
- [24] 方观周. 基于地铁隧道的整体道床沉降监测及病害分析[J]. 河南科技, 2024,51(23):69-72.
FANG G ZH. Settlement monitoring of monolithic track bed and defect analysis based on subway tunnels[J]. Henan Science and Technology, 2024,51(23):69-72.
- [25] RAHMAN M A, TAHERI H, DABABNEH F, et al. A review of distributed acoustic sensing applications for railroad condition monitoring [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2024,208: 110983.
- [26] 郗录朝,余文颖,徐旻,等. 重载铁路道砟清洁度对聚氨酯固化道床力学性能的影响[J]. 铁道建筑, 2023,63(9):1-4.
QIE L CH, YU W Y, XU Y, et al. Impact of ballast cleanliness on mechanical properties of polyurethane solidified ballasted track bed in heavy haul railway[J]. Railway Engineering, 2023,63(9):1-4.
- [27] 王学军,邓宇. 基于改进内切圆法的离散道砟颗粒建模对二维道砟休止角和道床沉降的影响研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2024, 49(3): 116-126.
WANG X J, DENG Y. The impact of discrete ballast particle modeling based on improved inscribed circle method on two-dimensional ballast angle of repose and ballast bed settlement [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2024,49(3):116-126.
- [28] LIU J, SHAO K, SU Q, et al. Numerical analysis of vibration responses in high-speed railways considering mud pumping defect[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 9707909.
- [29] WAN ZH B, XU W CH, ZHANG ZH Y, et al. In-situ investigation on mud pumping in ballastless high-speed railway and development of remediation method [J]. Transportation Geotechnics, 2022,33:100713.
- [30] DANG D ZH, LAI CH CH, NI Y Q, et al. Image classification-based defect detection of railway tracks using fiber bragg grating ultrasonic sensors [J]. Applied Sciences, 2023,13(1):384.
- [31] 朱晨露. 基于电涡流的高速轨道缺陷检测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- ZHU CH L. Research on high-speed rail defect inspection based on eddy current testing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [32] 李东. 高速铁路裂纹漏磁检测技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2015.
- LI D. High-speed rail crack magnetic flux leakage testing technology research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [33] 马茜. 基于图像识别技术的轨道交通缺陷检测研究[J]. 计算技术与自动化, 2022,41(1):117-122.
MA Q. Research on rail transit defect detection based on image recognition technology [J]. Computing Technology and Automation, 2022,41(1):117-122.
- [34] ZHONG Y J, GAO X R, LUO L, et al. Simulation of laser ultrasonics for detection of surface-connected rail defects[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2017,36(4):1-10.
- [35] CHEN ZH X, WANG Q H, YANG K H, et al. Deep learning for the detection and recognition of rail defects in ultrasound B-Scan images [J]. Transportation Research Record, DOI: 10.1177/03611981211021547.
- [36] 田勐,王丽萍,张勇,等. 轨道车辆车体用碳纤维复合材料超声波检测试验研究[J]. 铁道车辆, 2021, 59(6):90-96.
TIAN M, WANG L P, ZHANG Y, et al. Research on ultrasonic detection testing of CFRP for railway car-body[J]. Rolling Stock, 2021,59(6):90-96.
- [37] ZHANG Y, GAO X R, PENG CH Y, et al. Rail inspection research based on high speed phased array ultrasonic technology[C]. 2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum(FENDT), 2016.
- [38] CHEN L, GUO J Q, GAO X R, et al. Research on rail defect detection system based on FPGA[C]. 2016 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum(FENDT), 2016.
- [39] 张俊岭,王子成,陈潇,等. 基于相控阵的高速铁路钢轨超声探伤检测系统[J]. 中国机械工程, 2019, 30(3):339-344.
ZHANG J L, WANG Z CH, CHEN X, et al. High-speed railway rail ultrasound flaw detection systems based on phased array [J]. China Mechanical Engineering, 2019,30(3):339-344.
- [40] KIM G, SEO M K, KIM Y I, et al. Development of phased array ultrasonic system for detecting rail cracks[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 311: 112086.
- [41] XU S, PENG C, GUO J, et al. Denoising of phased array ultrasonic total focus image on rail bottom welds[C]. 2021 IEEE Far East NDT New Technology & Application

- Forum(FENDT), 2021.
- [42] WANG W S, SUN Q Q, ZHAO ZH Y, et al. Laser-induced ultrasonic guided waves based corrosion diagnosis of rail foot [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023,72:1-9.
- [43] 隋皓, 高晓蓉, 罗林, 等. 激光点源与线源激发表面波与钢轨缺陷作用的有限元仿真和实验[J]. 激光与光电子学进展, 2019,56(8):158-166.
- SUI H, GAO X R, LUO L, et al. Finite element simulation and experiment on interaction of surface waves excited by laser point or line source with rail defects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8):158-166.
- [44] JIANG Y, WANG H T, TIAN G Y, et al. Non-contact ultrasonic detection of rail surface defects in different depths[C]. 2018 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum(FENDT), 2018.
- [45] NG K, GHAFOR I, TSE P. A novel laser-based duffing oscillator system to identify weak ultrasonic guided wave signals related to rail defects[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022,157:107111.
- [46] IMRAN G, PETER W T, TOM T L C, et al. The design of a non-contact inspection system integrated with the time of flight-based flaw detection(TOFFD) criterion to investigate the structural integrity of the rail track[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024,73:1-13.
- [47] JIANG Y, CHEN SH, WANG K ZH, et al. Quantitative detection of rail head internal hole defects based on laser ultrasonic bulk wave and optimized variational mode decomposition algorithm [J]. Measurement, 2023,218:113185.
- [48] PATHAK M, ALAHAKOON S, SPIRYAGIN M, et al. Rail foot flaw detection based on a laser induced ultrasonic guided wave method [J]. Measurement, 2019,148:106922.
- [49] XIE J S, DING W X, ZOU W, et al. Defect detection inside a rail head by ultrasonic guided waves [J]. Symmetry(Basel), 2022,14(12):2566.
- [50] SUN H Y, FENG Q B, LI J K, et al. Rail web buried defect location and quantification methods in hybrid high-order guided wave detection [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024,73:1-12.
- [51] LOVEDAY P W, LONG C S, RAMATLO D A. Ultrasonic guided wave monitoring of an operational rail track[J]. Structural Health Monitoring, 2020, 19(6):1666-1684.
- [52] RAMATLO D A, WILKE D N, LOVEDAY P W. Digital twin hybrid modeling for enhancing guided wave ultrasound inspection signals in welded rails[J]. Mathematical and Computational Applications, 2023, 28(2):58.
- [53] 许鹏, 刘柏霖, 陈亚雄. 基于差分柔性涡流探头的铁轨裂纹检测方法[J]. 中国机械工程, 2023,34(20):2419-2427.
- XU P, LIU B L, CHEN Y X. Rail crack detection method based on differential flexible eddy current probe [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(20):2419-2427.
- [54] WANG H X, LIU H H, ZHANG H Y, et al. A new method for bearing steel ball surface detection with eddy current sensor [J]. Intelligent Robotics and Applications, 2021,13013:263-274.
- [55] 许鹏, 曾泓茗, 朱晨露, 等. 基于增强磁场涡流的高速轨道缺陷检测方法[J]. 中国机械工程, 2021, 32(4):454-459.
- XU P, ZENG H M, ZHU CH L, et al. High speed track defect detection methods based on enhanced magnetic field eddy currents [J]. China Mechanical Engineering, 2021,32(4):454-459.
- [56] XIE J, WU CH W, GAO L M, et al. Detection of internal defects in CFRP strengthened steel structures using eddy current pulsed thermography [J]. Construction and Building Materials, 2021, 282:122642.
- [57] ALVARENGA T A, CARVALHO A L, HONORIO L M, et al. Detection and classification system for rail surface defects based on eddy current[J]. Sensors(Basel), 2021, 21(23):7937.
- [58] 刘柏霖. 基于 FPCB 涡流的高速轨道缺陷检测与评估方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022.
- LIU B L. Research on defect detection and evaluation method of high-speed track based on FPCB eddy current [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.
- [59] ANANDIKA R, LUNDBERG J. Limitations of eddy current inspection for the characterization of near-surface cracks in railheads [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-journal of Rail and Rapid Transit, 2022,236(5):532-544.
- [60] AOUF A, BOUCHALA T, ABDON A, et al. Eddy current probe configuration for full rail top surface inspection[J]. Instrumentation, Mesure, Metrologie, 2021,20:65-72.
- [61] KWON S G, LEE T G, PARK S J, et al. Natural rail

- surface defect inspection and analysis using 16-channel eddy current system[J]. Applied Sciences, 2021, 11(17):8107.
- [62] XU P, ZHU CH L, ZENG H M, et al. Rail crack detection and evaluation at high speed based on differential ECT system[J]. Measurement, 2020, 166:108152.
- [63] 许鹏, 耿明, 方舟, 等. 基于复合电磁的高速轨道缺陷检测方法研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 57-65.
XU P, GENG M, FANG ZH, et al. Study on high-speed rail defect detection method based on combination of EC and MFL testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18):57-65.
- [64] JIA Y L, ZHANG SH CH, WANG P, et al. A method for detecting surface defects in railhead by magnetic flux leakage[J]. Applied Sciences, 2021, 11: 9489.
- [65] JIA Y L, LU Y CH, XIONG L H, et al. A filtering method for suppressing the lift-off interference in magnetic flux leakage detection of rail head surface defect[J]. Applied Sciences, 2022, 12:1740.
- [66] JI K L, WANG P, JIA Y L, et al. Adaptive filtering method of MFL signal on rail top surface defect detection[J]. IEEE Access, 2021, 9:87351-87359.
- [67] JIA Y L, LIANG K W, WANG P, et al. Enhancement method of magnetic flux leakage signals for rail track surface defect detection[J]. IET Science Measurement & Technology, 2020, 14:711-717.
- [68] LIU J, SU SH B, GUO H F, et al. A signal filtering method for magnetic flux leakage detection of rail surface defects based on minimum entropy deconvolution[J]. International Journal of Swarm Intelligence Research, 2024, 15(1):1-11.
- [69] LONG Y, HUANG S L, PENG L SH, et al. A characteristic approximation approach to defect opening profile recognition in magnetic flux leakage detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70:1-12.
- [70] TANG J, WANG R B, LIU B CH, et al. A novel magnetic flux leakage method based on the ferromagnetic lift-off layer with through groove[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 332:113091.
- [71] USAREK Z, CHMIELEWSKI M, PIOTROWSKI L. A comparative study on methods of distinction between near and far-side defects as techniques used alongside with the magnetic flux leakage testing[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2022, 41(1):12.
- [72] ANTIPOV A G, MARKOV A A. Using a tail field in high-speed magnetic flux leakage testing[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2022, 41(1):1-9.
- [73] WANG P, XIONG L H, SUN Y CH, et al. Features extraction of sensor array based PMFL technology for detection of rail cracks[J]. Measurement, 2014, 47: 613-626.
- [74] PIAO G Y, GUO J B, HU T H, et al. High-speed inspection method fusing pulsed eddy current and magnetic flux leakage[C]. 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC), 2019.
- [75] IBRAHIM E T, YANG CH R, TIAN G Y, et al. Pulsed magnetic flux leakage measurement using magnetic head and tunnelling magnetoresistance for defect detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(17):19184-19193.
- [76] 叶涛, 赵宗扬, 郑志康. 基于LAM-Net的轨道侵入界异物自主检测系统[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 206-218.
YE T, ZHAO Z Y, ZHENG ZH K. Research on the autonomous detection system for railway intrusion obstacles based on LAM-Net[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9):206-218.
- [77] ZHANG X, SONG Y Z, SONG T T, et al. LDConv: linear deformable convolution for improving convolutional neural networks[J]. ArXiv preprint arXiv: 2311.11587, 2024.
- [78] ZHAO K, LUO L ZH, REN ZH M, et al. A surface defect detection system for railway track based on machine vision[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1678(1):12002.
- [79] 刘雷, 许洁, 王艳, 等. 基于MLILPP维数约简的轨道交通牵引电机轴承故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6):96-102.
LIU L, XU J, WANG Y, et al. Rail transit traction motor bearing fault diagnosis based on MLILPP dimension reduction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 96-102.
- [80] FAN H, COSMAN P C, HOU Y, et al. High-speed railway fastener detection based on a line local binary pattern[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2018, 25(6):788-792.
- [81] 陈骁. 城市轨道交通车辆在线监测与诊断系统研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(20):104-109.
CHEN X. Research on on-line monitoring and

- diagnosis system for urban rail transit vehicles[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(20): 104-109.
- [82] 刘志勇, 刘引川, 朱峰, 等. 弓网离线电弧对机场 ADS-B 地面站系统电磁骚扰测试与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(2): 56-61.
- LIU ZH Y, LIU Y CH, ZHU F, et al. Test and analysis of off-line arc in pantograph catenary on electromagnetic disturbance of airport ADS-B ground station system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(2): 56-61.
- [83] MIN Y ZH, XIAO B Y, DANG J W, et al. Real time detection system for rail surface defects based on machine vision[J]. EURASIP Journal on Image and Video Processing, 2018, 2018(1): 1-11.
- [84] HAN Q, WANG SH CH, FANG Y, et al. A rail fastener tightness detection approach using multi-source visual sensor[J]. Sensors(Basel, Switzerland), 2020, 20(5): 1367.
- [85] GUERRIERI M, PARLA G, CELAURO C. Digital image analysis technique for measuring railway track defects and ballast gradation[J]. Measurement, 2018, 113: 137-147.
- [86] DUBEY A K, JAFFERY Z A. Maximally stable extremal region marking-based railway track surface defect sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(24): 9047-9052.
- [87] GAN J R, WANG J ZH, YU H M, et al. Online rail surface inspection utilizing spatial consistency and continuity[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(7): 2741-2751.
- [88] LEE H, HONG J, WENDIMAGEGN T W, et al. Rail corrugation detection and characterization using computer vision[J]. Sensors, 2021, 21: 8335.
- [89] GAN J R, LI Q Y, WANG J ZH, et al. A hierarchical extractor-based visual rail surface inspection system[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(23): 7935-7944.
- [90] 陶攀, 方宇, 王欣, 等. 基于改进 SAM 模型的多任务轨道缺陷检测方法[J]. 南京大学学报(自然科学), 2024, 60(5): 776-784.
- TAO P, FANG Y, WANG X, et al. Multi-task track defect detection method based on improved SAM model[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2024, 60(5): 776-784.
- [91] DING X H, ZHANG X Y, HAN J G, et al. Diverse branch block: building a convolution as an inception-like UNIT [J]. 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2021: 10881-10890.
- [92] GIBERT X, PATEL V, CHELLAPPA R. Deep multitask learning for railway track inspection [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 18: 153-164.
- [93] WANG Y, ZHANG K H, WANG L, et al. An improved YOLOv8 algorithm for rail surface defect detection[J]. IEEE Access, 2024, 12: 44984-44997.
- [94] WANG J L, MENG R F, HUANG Y H, et al. Road defect detection based on improved YOLOv8s model[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 16721-16758.
- [95] BAI T B, GAO J L, YANG J W, et al. A study on railway surface defects detection based on machine vision [J]. Entropy (Basel, Switzerland), 2021, 23(11): 1437.
- [96] WANG Y D, YU H, GUO B Q, et al. Research on real-time detection system of rail surface defects based on deep learning [J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(13): 21157-21167.
- [97] YANG H F, WANG Y ZH, HU J Y, et al. Deep learning and machine vision-based inspection of rail surface defects [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-14.
- [98] WU T Y, TANG SH, ZHANG R, et al. CGNet: a light-weight context guided network for semantic segmentation [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 30: 1169-1179.
- [99] ZHANG X, LIU CH, YANG D G, et al. RFACnv: innovating spatial attention and standard convolutional operation[J]. ArXiv preprint arXiv: 2304.03198, 2023.
- [100] 孙明. 基于注意力机制的接触轨表面缺陷检测模型[J]. 设备管理与维修, 2022(20): 41-42.
- SUN M. A surface defect detection model of contact rail based on attention mechanism [J]. Equipment Management and Maintenance, 2022(20): 41-42.
- [101] OUYANG D, HE S, ZHAN J, et al. Efficient multi-scale attention module with cross-spatial learning[C]. ICASSP 2023-2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2023.
- [102] NI X F, MA Z J, LIU J W, et al. Attention network for rail surface defect detection via consistency of intersection-over-union (IoU)-guided center-point estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 18: 1694-1705.
- [103] ZHONG Y F, CHEN G R. Rail surface defect detection based on dual-path feature fusion [J]. Electronics(Basel), 2024, 13(13): 2564.

- [104] WANG M L, LI K ZH, ZHU X, et al. Detection of surface defects on railway tracks based on deep learning[J]. IEEE Access, 2022,10:126451-126465.
- [105] LI J, WEN Y, HE L. SCConv: spatial and channel reconstruction convolution for feature redundancy[C]. 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2023.
- [106] 乔彦涵, 陈文, 邹劲柏, 等. 基于Transformer与局部特征融合的轨道紧固件缺陷检测方法[J]. 铁路计算机应用, 2024,33(4):18-22.
QIAO Y H, CHEN W, ZOU J B, et al. Defect detection method for track fastener based on transformer and local feature fusion[J]. Railway Computer Application, 2024,33(4):18-22.
- [107] PHAPHUANGWITTAYAKUL A, HARNPORNCHAI N, YING F L, et al. RailTrack-DaViT: A vision transformer-based approach for automated railway track defect detection[J]. Journal of Imaging, 2024, 10(8):192.
- [108] HU Q, TANG B, JIANG L, et al. Rail surface defects detection based on yolov5 integrated with transformer [C]. 2022 IEEE 5th International Conference on Electronics Technology(ICET), 2022.
- [109] WAN CH, MA SH, SONG K CH. TSSTNet: a two-stream swin transformer network for salient object detection of no-service rail surface defects [J]. Coatings(Basel), 2022,12(11):1730.
- [110] NI X F, FIEGUTH P W, MA Z J, et al. Superpixel-guided multi-type rail segmentation via contextual information aggregation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(10): 14004-14018.
- [111] WEI H R, LIU X, XU SH Q, et al. DWRSeg: rethinking efficient acquisition of multi-scale contextual information for real-time semantic segmentation[J]. ArXiv preprint arXiv: 2212.01173, 2022.
- [112] 任中伟, 方维维, 许文元, 等. 面向轨道缺陷检测的联邦学习轻量化模型训练技术研究[J]. 铁道学报, 2023,45(4):77-83.
REN ZH W, FANG W W, XU W Y, et al. Research on lightweight model training technology of federated learning for railway defect detection[J]. Journal of the China Railway Society, 2023,45(4):77-83.
- [113] MIN Y ZH, WANG Z W, LIU Y, et al. FS-RSDD: few-shot rail surface defect detection with prototype learning[J]. Sensors(Basel), 2023,23(18):7894.
- [114] HE S, JIAN Z H, LIU SH L, et al. PCSGAN: a perceptual constrained generative model for railway defect sample expansion from a single image[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024,25(8):8796-8806.
- [115] XU Y G, WANG H, LIU ZH L, et al. Self-supervised defect representation learning for label-limited rail surface defect detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2023,23(23):29235-29246.
- [116] HONG ZH R, YU CH CH, QIN Y, et al. FDSP-HRID: few-shot detector with self-supervised pretraining for high-speed rail infrastructure defects [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024,73:1-12.
- [117] 赵凯辉, 陈特放, 张昌凡, 等. 永磁同步牵引电机无速度传感器转矩精确控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015,29(1):38-47.
ZHAO K H, CHEN T F, ZHANG CH F, et al. Sensorless precision torque control of PMSM for railway vehicles [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015,29(1):38-47.
- [118] 古玉锋, 李真, 高世椿, 等. 基于联合卷积变分自编码器和预测器的UWB定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1):182-192.
GU Y F, LI ZH, GAO SH CH, et al. UWB location algorithm based on joint convolutional variational auto-encoder and predictor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(1):182-192.
- [119] 赵鸿亮, 郭佑民, 王建鑫, 等. 基于改进YOLOv5的轨道交通障碍物检测算法[J]. 电子测量技术, 2024, 47(1):130-135.
ZHAO H L, GUO Y M, WANG J X, et al. Railtransit obstacle detection algorithm based on improved YOLOv5 [J]. Electronic Measurement Technology, 2024,47(1):130-135.
- [120] LI CH, ZHOU AO J, YAO A B. Omni-dimensional dynamic convolution [J]. ArXiv preprint arXiv: 2209.07947, 2022.
- [121] CHANG Y Q, ZHANG X, LIN CH H, et al. An efficient method for wheel-flattened defects detection based on acoustic emission technique[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control, 2022, 69(2): 843-853.
- [122] SALVADOR P, NARANJO V, INSA R, et al. Axlebox accelerations: their acquisition and time-frequency characterisation for railway track monitoring purposes[J]. Measurement, 2016,82:301-312.
- [123] WANG W S, SUN Q Q, ZHAO ZH Y, et al. Electromagnetic thermoacoustic technique for online dynamic detection of high-speed rail internal defect at early

- stage: theory, implementation, and field trial[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024,73:1-8.
- [124] SUN M J, LIN X W, WU ZH H, et al. Non-destructive photoacoustic detecting method for high-speed rail surface defects[C]. 2014 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference(I2MTC) Proceedings, 2014.
- [125] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019,40(2):11-25.
ZHANG H, SONG Y N, WANG Y N, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(2): 11-25.
- [126] 陈天炎, 韩泽明, 黄允浒, 等. 基于视觉的列车轨道缺陷检测综述[J]. 智能科学与技术学报, 2024,6(3): 367-380.
CHEN T Y, HAN Z M, HUANG Y H, et al. Survey on vision-based railway track defect detection [J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2024,6(3):367-380.
- [127] PARK J W, LEE T G, BACK I C, et al. Rail surface defect detection and analysis using multi-channel eddy current method based algorithm for defect evaluation[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2021,40(3):83.
- [128] 卢雅丽. 基于涡旋电磁波的航空材料缺陷检测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
LU Y L. Research on detection method for defects in aviation materials based on vortex electromagnetic wave technique [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.
- [129] ANTIPOV A G, MARKOV A A, MAXIMOVA E A. Using a magnetic flux leakage method to evaluate gaps in railroad bolt joints [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2023,59(6):677-690.
- [130] 田贵云, 高斌, 高运来, 等. 铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2016,37(8): 1763-1780.
TIAN G Y, GAO B, GAO Y L, et al. Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016,37(8):1763-1780.
- [131] HE B, XIONG Y, LI B L, et al. Integrating the symmetry image and improved sparse representation for railway fastener classification and defect recognition [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2015,2015: 462528.
- [132] 赵越, 孙明, 张国富, 等. 地铁接触轨综合检测系统研究[J]. 智能计算机与应用, 2022,12(1):132-136.
ZHAO Y, SUN M, ZHANG G F, et al. Research on comprehensive detection system for subway contact rails [J]. Intelligent Computer and Applications, 2022,12(1):132-136.
- [133] WANG S CH, YAN B, XU X Y, et al. Automated identification and localization of rail internal defects based on object detection networks [J]. Applied Sciences, 2024,14(2):805.
- [134] YIN X X, WEI X K, ZHENG H CH. Railway track vibration analysis and intelligent recognition of fastener defects[J]. Advanced Theory and Simulations, 2022, 5(10): 2200027.
- [135] LIU B L, HU H L, PENG J, et al. Rail defect identification method based on pulsed eddy current detection and Small-DCNN[C]. 2021 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum(FENDT), 2021.
- [136] ZHANG X Y, GAO B, SHI Y H, et al. Memory linked anomaly metric learning of thermography rail defects detection system[J]. IEEE Sensors Journal, 2021,21:24720-24730.
- [137] SHEN Y F, ZHONG Q W, ZHENG SH B, et al. A multi-modal approach to rail surface condition analysis: the MFDF-Net[J]. IEEE Access, 2024,12: 132480-132494.
- [138] YUAN X C, LEI ZH M, ZHU H T, et al. A tightness detection method for railway fasteners based on RGB-P bimodal data [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-15.
- [139] WANG J P, SONG K CH, ZHANG D F, et al. Collaborative learning attention network based on RGB image and depth image for surface defect inspection of no-service rail [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2022,27(6):4874-4884.
- [140] SUN X Y, ZHOU W J, QIAN X H. Normalized cyclic loop network for rail surface defect detection using knowledge distillation[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25 (11): 16561-16573.
- [141] 马安奇. 轨道图像特征融合方法的模型研究与应用[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2021.
MA AN Q. Model research and application of rail image feature fusion method[D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2021.

作者简介

张志宏(通信作者), 博士, 主要研究方向为计算机视觉、图像处理、传感器与检测技术、智能检测技术。
E-mail:754556079@qq.com