

铁路钢轨缺陷伤损巡检与监测技术综述^{*}

田贵云^{1,4}, 高斌¹, 高运来^{2,4}, 王平², 王海涛², 石永生³

(1. 电子科技大学自动化工程学院 成都 611731; 2. 南京航空航天大学自动化学院 南京 211106; 3. 中国铁道科学研究院基础设施检测研究所 北京 100081; 4. 英国纽卡斯尔大学电气与电子工程学院 纽卡斯尔 NE1 7RU)

摘要:我国高速铁路的快速发展给铁路钢轨基础设施的状态维护和安全保障带来挑战,综述了钢轨不同类型缺陷伤损的巡检与监测技术。回顾总结了国内外钢轨无损检测与监测技术的特点和局限性,以及钢轨在线巡检与监测仪器的应用情况。分析了多模态多物理集成传感与可视化成像检测、宏观与微观组织状态观测、无损检测与评估和健康监测集成融合,以及基于大数据管理的铁路钢轨快速巡检和实时监测等新技术研究进展,讨论了未来铁路钢轨缺陷伤损巡检及监测技术的发展趋势。

关键词:铁路钢轨;缺陷伤损;无损检测与评估;健康监测

中图分类号: TH878 TG115.28 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Review of railway rail defect non-destructive testing and monitoring

Tian Guiyun^{1,4}, Gao Bin¹, Gao Yunlai^{2,4}, Wang Ping², Wang Haitao², Shi Yongsheng³

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;
2. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
3. Infrastructure Inspection Research Institute, China Academy of Railway Science, Beijing 100081, China;
4. School of Electrical and Electronic Engineering, Newcastle University, NE17RU, UK)

Abstract: The rapid development of high-speed railway in China has brought a great challenge for the state maintenance and security assurance of railway rail infrastructure. This paper reviews variety of techniques for the inspecting and monitoring of different kinds of defects in the rail, summarizes the characteristics and limitation of the rail non-destructive testing and monitoring technologies both in China and abroad, and the application of rail on-line inspection and monitoring instruments. The following new technologies are analyzed: multiple modality physical integrated sensor and visual imaging NDT techniques for rail; the measurement of macro properties as well as micro texture characteristics for stress detection of rail; integrated fusion of non-destructive testing and health monitoring; and railway rail fast inspection and real-time monitoring based on big data management. Finally, the future development trend of railway rail NDT inspection and monitoring technology is discussed.

Keywords: railway rail; defect damage; non-destructive testing and evaluation; health monitoring

1 引言

铁路行业的快速发展为我国经济建设和民生改善发挥重要的促进作用。根据国家《中长期高速铁路网规划示意图(2030年)》,“十三五”期间我国将加快实施“八纵八横”高速铁路网主通道的建设^[1]。在铁路基础设施

中,轮对、车轴及铁路钢轨的结构性能和质量好坏直接影响铁路运行安全,关键结构的缺陷伤损检测对铁路基础设施的保障维护具有重要意义。钢轨是铁路轨道的主要组成部件,直接承受轮对传来的压力,长期使用过程中出现的缺陷伤损和材料退化影响其服役性能且威胁行车安全^[2-3]。钢轨应力、疲劳和缺陷等故障引起的钢轨断裂会导致列车出轨、倾覆等重大事故,进而造成人员伤亡和

巨额财产损失^[3,4]。随着高速铁路行车密度增加、运行速度提高以及重载货运线路载重量增加,钢轨的负荷和受到挤压及冲击程度增大,钢轨故障和伤损发生的概率增大,钢轨的伤损类型和失效模式也在发生变化,进而对传统钢轨伤损检测和监测技术带来挑战^[5,7]。

铁路钢轨服役过程中,导致钢轨缺陷产生的因素很多,伤损种类也复杂多样。钢轨缺陷主要包括滚动接触疲劳裂纹、内部缺陷、压溃、侧磨、剥离、腐蚀以及焊缝和道岔等特殊部位的材料退化等伤损^[2-3,8,9]。近年来,德国 Zerst U 等人^[2]从断裂力学角度研究了钢轨缺陷的产生、扩展及断裂机理,分析了钢轨疲劳裂纹、内部核伤以及焊接等部位的缺陷特点;英国 Grassie S. L.^[3]分析了哈德斯菲尔德列车脱轨事故是由钢轨滚动接触疲劳裂纹导致,该缺陷大多产生于钢轨顶面且连续分布,沿钢轨内部深处扩展容易在列车通过时引起钢轨突然断裂;美国 Hernandez F. R. 等人^[4]分析了北美铁路系统钢轨轨底腐蚀和材料微观组织退化对钢轨服役性能的影响;Grohmann H. D. 等人^[9]分析了钢轨滚动接触疲劳损伤裂纹的几何特征以及钢轨检测和打磨等保障措施;中国铁道科学研究院周清跃等人^[10]研究了重载铁路钢轨的伤损特点及预防对策;西南交通大学刘启跃等人^[11]研究了铁路钢轨伤损的形成机理及缺陷类型;赵雪芹等人^[12]研究了高速和重载线路钢轨的伤损形式,得出高速线路钢轨缺陷主要为接触疲劳损伤;钟雯等人^[13]研究了不同材料钢轨斜裂纹的扩展特性及危害性;江晓禹等人^[14]研究了轮轨高速滚动接触疲劳裂纹的扩展行为,表明高速铁路钢轨裂纹基本为张开型裂纹,且扩展速率快于低速钢轨;中国铁道科学研究院石永生等人^[15]研究了钢轨探伤车的检测应用以及钢轨伤损的分级;卢超等人^[16]基于超声和涡流检测指出轨头裂纹和隐伤是我国提速段钢轨最主要的滚动接触疲劳伤损。从缺陷发生位置来看,典型钢轨滚动接触疲劳缺陷和应力集中主要分布在轨头、轨腰、轨底全断面的内部和表面。图 1 为典型的钢轨滚动接触疲劳裂纹缺陷沿斜向以一定角度向轨头内部扩展并形成大尺寸横向疲劳裂纹,容易导致钢轨发生横向折断^[8,9]。另外,高速铁路无缝钢轨的大量使用,使热胀冷缩导致的温度应力成为影响钢轨内部应力集中的重要因素,容易造成胀轨及断轨故障^[2]。从缺陷发生状态来看,裂纹包括萌生期、扩展期以及形成宏观裂纹和断裂等不同阶段,其中伤损形成初期的微缺陷和亚表面斜裂纹具有很大的隐蔽性^[8,9]。

为防止铁路钢轨故障,通常是对服役状态下的钢轨采用无损检测方法进行缺陷伤损巡检和健康监测^[6-7,17]。无损检测以不损害被检测对象的使用性能为前提,应用物理和化学方法对被测件进行检验,评价被测件的连续性、完整性、可靠性和安全性,是保证产品质量

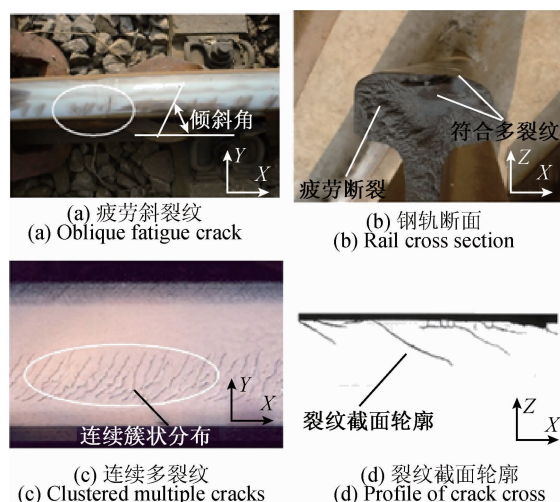


图 1 典型铁路钢轨滚动接触疲劳裂纹缺陷

Fig. 1 Rolling contact fatigue crack defect of typical railway rail

和安全的关键技术^[6,18]。然而,对铁路钢轨进行无损检测存在以下特殊性和挑战性:1)复杂形面钢轨的缺陷类型众多,其中亚表面斜裂纹从钢轨表面无开放性创口,但其深度可达 6 mm 以上,裂纹宽度有的却只有 1 mm 以下,对其检测要求有更高的灵敏度。从钢轨断面覆盖角度上看,疲劳多裂纹发生在表面和亚表面的超声检测盲区,而核伤发生在钢轨内部只有超声波才能测到,道岔尖轨、焊接缝、轨腰和轨底等特殊部位的缺陷由于复杂结构或材料特性变化难以被全面有效地检测。2)要求检测应以非接触方式快速高效巡检。一般期望手推式巡检设备移动速度达到 1.5 ~ 12 m/s,专用探伤车巡检速度应能达到列车行驶速度(120 km/h 以上),以实现人力节约并满足铁路运行调度的需要^[6]。当前超声波技术只能在 80 km/h 速度以内,并以接触状态才能有效检测到缺陷^[18]。3)造成钢轨伤损的机理复杂,缺陷定性和定量评估都存在相当难度,包括缺陷形貌的不规则以及缺陷萌生状态的不确定性,图 2 所示为不同位置钢轨裂纹的萌生和扩展状态^[2,8,9]。超声等常规无损检测方法仅能检测出已发展成形的有一定尺度的内部缺陷,难以检测钢轨表面和近表面缺陷,且无法判别导致铁轨内部应力集中的原因,以及应力分布状态与损伤原因之间的映射关系。超声技术对钢轨早期损伤,特别是尚未成形的隐性不连续性变化,难以实施有效的评价^[19]。然而,在缺陷形成和扩展阶段对材料微观组织、应力状态的观察对于早期损伤的发现和钢轨故障早期预警都是必要的^[8]。综上所述,当前铁路钢轨检测领域的关键挑战,主要有如下方面:1)缺陷的全类型,包括处于裂纹萌生及扩展全阶段的状态检测;2)断面的全覆盖,从轮轨接触面到内部、轨腰甚至轨底

的检测覆盖;3)全里程的覆盖,包括焊接缝、道岔尖轨等复杂因素下的状态检测,不留盲区;4)快速巡检,以 80 km/h 速度以上进行检测,节约人力并满足铁路运营的要求。

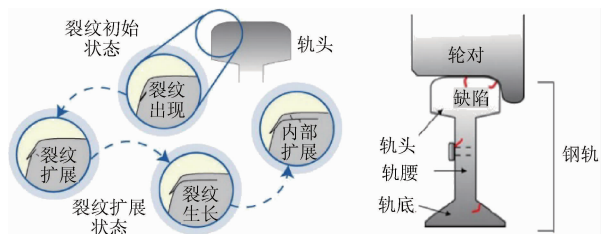


图2 钢轨裂纹的初始萌生和扩展状态

Fig.2 Initial and propagation states of crack in railway rail

我国高速铁路的快速发展和大范围成功应用对铁路运行安全和基础设施状态维护的要求日渐提高。同时,基于多模态多物理的无损检测与健康监测新方法和集成式检测新仪器的不断出现,给铁路钢轨巡检与监测技术的快速发展带来机遇^[5, 20-21]。

2 铁路钢轨缺陷伤损检测和巡检

自 1959 年世界首辆钢轨超声检测车投入使用以来^[18],无损检测技术已广泛应用到铁路钢轨缺陷伤损检测和巡检中,对钢轨生产、安装及服役条件下的故障检测和状态维护发挥重要作用。目前国内外常用的铁路钢轨检测技术主要包括超声检测、涡流检测、漏磁检测和视觉检测等。然而,不同检测方法及其仪器设备的原理和检测性能不同,且都有一定局限性。回顾总结了目前国内外铁路钢轨检测和巡检技术的特点和局限性,及其在钢轨滚动接触疲劳裂纹、应力集中和微观组织等检测中的应用。

2.1 超声检测, 导波, 电磁超声, 激光超声技术

2.1.1 超声及相控阵检测技术

超声检测^[18, 22]利用超声波的反射、衍射、透射等特性,通过观察超声波在被测工件中的波形、回波、声速、衰减及共振等传播变化来判定被测工件的内部是否存在缺陷等。常规超声技术已广泛用于钢轨内部缺陷检测,其穿透能力强、缺陷定位准确、对工件内部平面型裂纹检测灵敏度高,易于实现自动化扫描巡检^[23]。但常规超声需要耦合剂充满探头与被测件表面之间的空隙,对复杂形状和不规则外形工件检测困难,对钢轨顶面表面及近表面疲劳伤损(如轨头龟裂、斜裂纹和压溃)不能有效检出和评定。特别是靠近轨距角的水平方向纵向延伸的缺陷会对超声波产生反射作用,阻碍声束入射,致使不能探测到埋藏在其下面的危险性裂纹,存在明显的检测盲区,对距离被测件表面深度小于 4 mm 的缺陷会出现漏检^[19, 23]。此外,超声相控阵^[24]全聚焦成像技术基于全

矩阵数据进行虚拟聚焦,具有精度高及算法灵活的特点,对形状复杂的缺陷检测十分有效。目前,多探头超声检测系统逐渐被超声相控阵系统所替代,新的自动超声检测系统由一对相控阵探头能够完成大量的常规探头承担的任务。南昌航空大学卢超等人^[25]介绍了超声相控阵技术在钢轨铝热焊缝和气压焊缝缺陷检测中的应用。然而,由于超声相控阵技术检测钢轨需要大量数据分析,该方法用于高速钢轨检测时也具有局限性^[26]。随着信息技术的快速发展,超声检测技术也由传统检测探伤逐步走向全自动无损定量评价与结构健康寿命预测^[27-28]。

2.1.2 导波检测技术

相对于传统超声技术,导波检测具有长距离检测、不需要在检测面逐点扫描等特点,导波检测技术可实现特定对象的快速检测和结构可达性^[29-30],基于导波的结构健康监测技术也得到较快发展。美国的 Rose J. L. 等人^[31]提出将导波方法应用于钢轨缺陷检测;英国 TWI (英国焊接研究所)目前已开发出第 4 代导波检测仪 TELETEST^[32];伦敦帝国大学和英国超声导波铁路公司联合研制的 G 型扫描超声导波钢轨检测装置,主要对钢轨中垂向分布的缺陷和铝热焊缝区域进行检测^[26, 30];卢超等人^[33]研究了超声导波技术检测钢轨轨底斜裂纹。张友鹏等人^[34]研究了超声导波的实时钢轨断裂检测方法。胡剑虹等人^[35]采用导波对钢轨道岔尖轨进行状态监控;中国铁道科学研究院将导波技术用于钢轨应力检测^[36]。非接触式空气耦合超声导波技术用于钢轨快速巡检和状态监测也得到发展^[28, 37]。

2.1.3 电磁超声检测技术

利用电磁耦合方法激励和接收超声波,与传统超声检测技术相比,具有精度高、不需要耦合剂、非接触式测量、检测速度快等优点^[38]。处于交变磁场中的金属导体内部产生电涡流,由于任何电流在磁场中受到洛伦兹力的作用,而金属介质在交变应力作用下产生频率在超声波范围内的应力波。由于此效应呈现可逆性,返回声压使质点的振动在磁场作用下使涡流线圈两端电压发生变化,通过接收装置接收并放大该检测信号来分析缺陷的信息。英国 Warwick 大学已经开发出基于超声波检测技术的钢轨探伤技术^[38];俄罗斯 VIGOR 公司研制出了一套基于 EMAT 的钢轨缺陷离线检测系统,能实现对包括钢轨轨底在内的整根钢轨全面探伤^[39];Tektrend 公司设计了基于电磁超声传感器的钢轨探伤车 RailPro^[40];美国宾夕法尼亚大学的 Rose J. L. 等人^[31]提出采用电磁超声导波技术对钢轨进行探伤;Wavesinsolids 公司成功研制出基于电磁超声导波长距离检测技术的钢轨探伤车 Prism^[41];邱玉等人^[42]应用电磁超声换能器进行钢轨检测并开发了钢轨探伤手推式检测装置。

2.1.4 激光超声检测技术

利用激光激发和检测超声波的一种非接触式无损检

测技术。激光脉冲产生的声波波长只有几 μm , 可以检测材料内部微小缺陷。激光超声技术作为一种非接触无损检测方法, 可在恶劣环境下对材料进行高精度无损检测^[43]。对于形状复杂的工件, 激光超声技术能在一次激发过程中产生多种模式的超声波信号, 可应用于对钢轨等部件的微裂纹实时检测。美国运输技术中心和 Tecnogamma SPA 公司联合研发了钢轨非接触式激光-空气混合超声检测系统^[44]; 丹麦研制的基于激光超声技术自动检测装置^[45], 能有效检测出多种类型钢轨缺陷; 唐志峰等人^[46]将激光超声技术用于钢轨探伤应用中。赵扬等人^[47]将混合式激光超声技术和激光-电磁超声 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT) 技术用于钢轨轨头疲劳损伤和内部缺陷的无损检测。

2.2 涡流检测、脉冲涡流与远场涡流

由于常规超声技术存在表面检测盲区, 基于电磁原理的涡流检测方法被提出用于钢轨表面和近表面缺陷检测^[48-49]。涡流检测利用交变磁场在被测导电工件中产生旋涡状的感应交变电流, 被测件电导率、磁导率、有无缺陷及缺陷尺寸形状等影响电涡流的分布和大小。通过探测线圈测量电涡流引起的磁场变化获取被测件中涡流的分布、大小和相位等信息, 进而获得被测件的电导率和缺陷特征。电涡流检测为非接触测量, 可进行高速巡检, 但具有集肤效应仅能检测导电材料的表面和近表面结构状态^[50]。另外, 涡流检测受提离变化的影响较大, 检测探头与被测钢轨表面的距离需尽量保持固定 (一般在 2 mm 范围内)^[22]。美国 Sperry 公司采用涡流检测钢轨表面裂纹, 并与超声波结合实现不同深度的钢轨缺陷检测^[18]; 德国 Eurailscout 和罗曼公司研发的电涡流和超声集成钢轨探伤车巡检速度达 75 km/h, 但是快速巡检时受提离影响因素较大^[23]; 浙江大学李国厚等人^[49]研究了涡流检测用于钢轨裂纹定量化评估; 马旺宇等人^[51]研制了应用于钢轨检测的便携式涡流探伤仪; 中国铁道科学研究院黄凤英等人^[52]研究了应用于道岔曲尖轨表面缺陷检测的卡片式涡流传感器; 厦门爱德森公司^[53]开发了基于涡流技术的钢轨、车轮、车轴电磁无损检测装置。

脉冲涡流检测是利用脉冲激励信号在被测件中感应出瞬态涡流。检测单元会感应出随时间变化的电压, 通过分析该瞬态涡流频率变化, 来实现试件的不同深度缺陷检测、属性表征和状态评估。该技术具有丰富的频谱内容能实现不同深度缺陷的检测与识别, 检测速度快, 非接触式检测等优势。Wilson J. W. 等人^[54]将脉冲涡流技术用于钢轨金属材料的缺陷检测; Tian G. Y. 教授与华威大学将脉冲涡流和电磁超声技术集成用于钢轨缺陷的检测与评估^[55]; 英国纽卡斯尔大学研究团队^[56]还将脉冲涡流技术与热成像技术融合应用于钢轨疲劳自然裂纹缺陷的快速可视化检测。远场涡流, 对实现钢轨深处缺陷的非接触是快速巡检提供了一种潜在的方法。随着脉冲涡流、远场涡

流等新型检测方式的发展, 涡流在铁轨检测已被重视。

2.3 漏磁检测、交变磁场测量

铁磁材料被磁化后, 试件表面或近表面缺陷会使磁导率发生变化, 导致磁路中的磁通和磁感应线流向改变, 部分磁通泄漏到工件表面通过空气绕过缺陷再进入材料形成漏磁场。漏磁检测通过磁传感器获取漏磁场信息, 实现钢轨表面及近表面缺陷检测。美国 Sperry 公司在 1928 年就曾开发出了给钢轨注入低压强电流的缺陷检测技术, 这种基于磁感应漏磁场检测方法成为早期铁路检测技术的基础^[18]。Wilson J. W. 等人^[58]研究了三维漏磁场成像技术用于缺陷损伤的可视化成像与描述; 李勇等人^[59]仿真分析了高速巡检中的漏磁信号的变化以及运动电涡流的影响; 美国 Sperry 公司将超声和漏磁技术结合可实现 35 km/h 速度的钢轨缺陷巡检^[18]; 基于英国纽卡斯尔大学脉冲漏磁, 南京航空航天大学王平研究团队近年来对铁路钢轨高速漏磁巡检开展了大量研究, 并与中国铁道科学研究院、上海铁路局等合作分别在高速铁路广州工务段、中南通州线路、南京工务段和上海工务段线路上进行了钢轨表面及近表面缺陷在线快速巡检^[60-61]; 赵飒等人^[62]研究了三维漏磁检测技术用于钢轨斜裂纹的特征识别; 高运来等人^[61, 63]研究了钢轨裂纹高速漏磁检测中的动态磁化及速度效应; 郝思恩等人^[64]研究了阵列式漏磁巡检设备的开发及钢轨裂纹定量分析, 获得缺陷位置和分布等特征。图 3 所示为南京航空航天大学采用漏磁技术对钢轨表面及近表面裂纹缺陷进行高速巡检和磁阵列可视化成像检测研究的实验平台和在线测试设备。目前, 实验室模拟条件下对 0.2 mm 宽度裂纹可实现高达 200 km/h 的巡检速度, 处于本领域国内领先地位^[60]。此外, Antipov A. G. 等人^[65]研究了漏磁技术用于钢轨横向裂纹的深度检测; Kang D 等人^[66]研究了漏磁技术用于非接触式钢轨局部故障检测及快速巡检; Wang P 等人^[67]研究了交流和脉冲漏磁技术用于钢轨表面及近表面裂纹缺陷的快速识别与评估。

交 变 磁 场 测 量 法 (alternating current field measurement, ACFM) 通过测量工件表面感应磁场的变化进行材料缺陷检测, 可实现缺陷的准确定位和测量具有非接触式检测的优点。英国 Birmingham 大学采用 ACFM 技术在实验室可实现钢轨缺陷的检测速度达 121.5 km/h^[68]。英国 TSC 公司基于 ACFM 技术和传感器阵列研制出了手推式钢轨顶面疲劳损伤检测设备^[69-70]。



(a) 钢轨检测高速平台
(a) High speed rail NDT platform

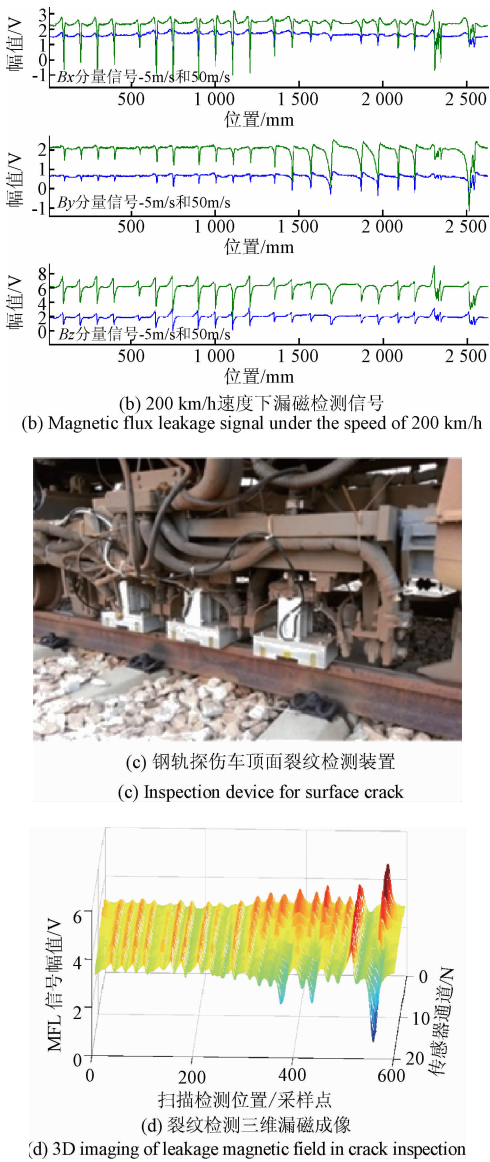


图3 南京航空航天大学钢轨漏磁检测技术
Fig.3 Railway rail magnetic flux leakage inspection technique developed in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

将集成传感和智能机器人技术结合 ACFM 技术也开始出现在钢轨缺陷检测与量化评估中^[71]。近年来,国外又出现一种新的表面磁场测量技术(surface magnetic field measurement, SMFM)^[72],SMFM 只需要一维磁场数据,但是对后处理要求更高,测量过程中外界影响因素较多,尚未应用于实际领域。

2.4 涡流脉冲热成像

涡流脉冲热成像(eddy current pulsed thermography, ECPT)基于电磁学中的电涡流和焦耳热现象,运用红外热像仪获取导电试件在脉冲电涡流激励下因焦耳热现象

引起的温度场分布和传导,并通过多热图的分析处理来检测缺陷^[56, 73]。该技术融合了脉冲电涡流和红外热成像的技术优势,相较于其他红外热像法,ECPT 使用脉冲电磁激励具有电、磁、热多物理时空特性和丰富的瞬态信息,空间分辨率和对近表面深度缺陷的检测灵敏度高。ECPT 感应加热热量集中在缺陷处,增加了缺陷和非缺陷区域的温度对比,提高了信噪比和微小缺陷的检测灵敏度。Vrana J 等人^[74]开发了固定式和便携式感应热成像检测系统,实现有效检测深度为 100 μm 的裂纹;Oswald-Tranta B 等人^[75]对金属表面缺陷进行了感应热成像仿真和实验分析,研究了不同电磁参数材料表面缺陷的温度分布,探讨了涡流透入深度对温升的影响;Walle G 等人^[76]利用感应热成像对钢板上的开放性缺陷进行了理论和实验研究,讨论了缺陷长度、深度以及倾角对检测结果的影响。英国纽卡斯尔大学 Tian G. Y. 研究团队基于电磁热多物理场效应融合激励,研发成功了国际领先的涡流脉冲热成像无损检测与评估技术和实验平台^[77]。Wilson J 等人^[56]基于单匝线圈在钢轨表面及近表面疲劳多裂纹及微小缺陷的电磁热耦合效应成像检测;Peng J. P. 等人^[73]提出使用改进的亥姆赫兹线圈激励结构实现钢轨表面的相对均匀加热方法,以消除单匝线圈非均匀加热对缺陷检测的不足。Gao Y. L. 等人^[78-79]通过比较漏磁和 ECPT 技术提出多物理开放式 ECPT 检测方法,利用铁氧体磁轭式激励结构实现复杂结构钢轨顶面的相对均匀加热和无遮挡缺陷可视化热成像,有利于实现缺陷的量化评估。Yang R 等人^[80]基于 ECPT 检测的热传导特性提出纵向平行裂纹的检测方法;Gao B 等人^[81]以独特的视角将电磁热多物理场耦合效应在时-空-频-稀疏多维信息中建立物理数学模式成分混合模型和分离方法,以信息融合模式增加微缺陷检测精度和辨识能力。

采用 ECPT 技术对钢轨表面及近表面疲劳多裂纹和微缺陷损伤进行检测实验,实验数据能有效呈现多裂纹疲劳损伤的分布、尺寸、数量等信息^[73]。针对疲劳多裂纹缺陷损伤,将缺陷漏磁场成像与基于 ECPT 技术的热成像结果对比研究,结果表明基于多物理效应的 ECPT 技术对典型的钢轨疲劳多裂纹成像检测分辨率更高,缺陷的几何和分布信息更丰富^[78]。将漏磁或 ACFM 检测的磁轭激励结构与 ECPT 技术进行融合,提出基于磁轭激励结构的均匀感应加热和开放式成像方法,能实现铁磁性材料表面多方位裂纹损伤的可视化,且消除了原来 ECPT 方法激励线圈对成像的遮挡作用^[78-79]。相比于 ACFM 和漏磁技术,基于多物理效应的 ECPT 感应热成像方法在多裂纹微小缺陷可视化检测方面分辨率更高,对复杂缺陷的定性及量化识别,具有较大的优势。图 4 为不同激励结构的涡流脉冲热成像钢轨疲劳多裂纹检测结果。图 5 为德国 Fraunhofer 研究院最新的电磁热成像研

究进展中,已将其应用于铁路钢轨的巡检成像检测^[82]。

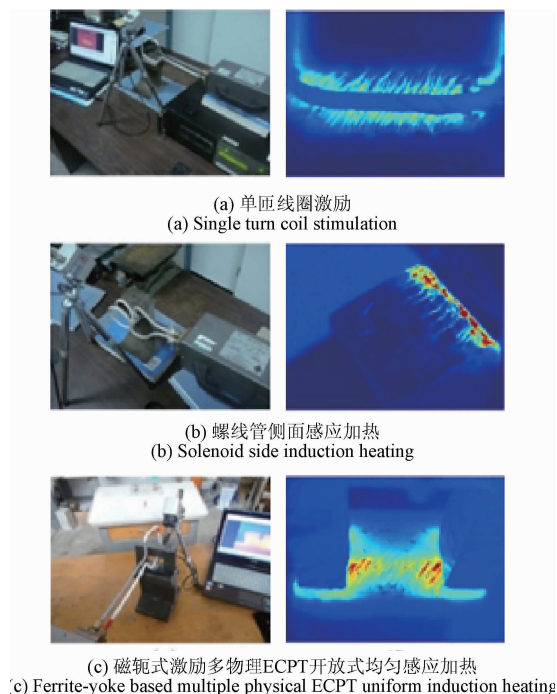


图 4 新型的钢轨滚动接触疲劳裂纹涡流脉冲感应热成像检测

Fig. 4 Novel ECPT inspection technique for rail rolling contact fatigue cracks

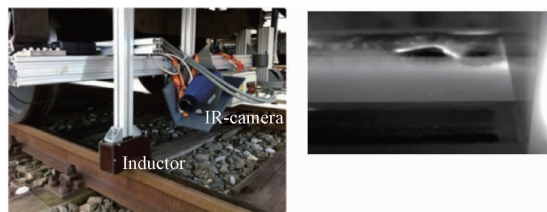


图 5 德国 Fraunhofer 研究院钢轨电磁热成像巡检装置
Fig. 5 Electromagnetic thermal imaging inspection device developed in Fraunhofer Research Institution, Germany

2.5 视觉检测

视觉检测是指用人的眼睛或借助目视辅助器材如工业相机对被测工件进行检测,适于检测工件表面裂纹、变形及腐蚀等缺陷。北京航空航天大学孙军华等人^[83]研究了基于结构光视觉传感的钢轨磨损动态测量与特征提取方法;南京航空航天大学王海涛等人^[84]将计算机视觉检测方法应用于铁轨表面缺陷的检测,并分析了表面缺陷的大小和位置信息;Gibert X 等人^[85]研究了自动化视觉系统用于铁路钢轨的巡检;INTERAIL 联盟成员开发了一套基于复合无损检测技术的高速钢轨检测系统^[86],该系统把光学图像视频检测技术、ACFM 检测技术和超声波检测技术结合起来,能较为全面地检测钢轨中的多类

型复杂缺陷损伤。

2.6 钢轨应力检测,微观组织结构检测

巴克豪森噪声(magnetic Barkhausen noise, MBN)检测技术在铁磁材料残余应力、材料疲劳老化状况评估方面得到较多研究和应用。其原理是通过研究铁磁性材料磁化过程中磁畴翻转造成的磁或声发射的信号特征,反应材料微观结构和应力分布等特性^[87-88]。MBN 检测技术可以检测铁磁材料的应力及疲劳,剥离和细小裂纹等微观组织结构。Jiles D 等人^[89]研究了在钢材料中残余应力、弹性和塑性变形对巴氏效应的影响,以及钢样的微观组织结构对 MBN 的影响;南京航空航天大学研制了基于 MBN 技术的钢轨应力检测设备,如图 6 所示。王平等^[87]将新的巴克豪森噪声特征值提取方法应用到钢轨材料性能及应力特征描述中。此外,南航团队还研究了巴克豪森检测钢轨温度应力、MBN 信号频谱分析以及基于神经网络的钢轨应力量化检测方法^[90]。巴克豪森噪声检测具有如下优势:1)巴克豪森噪声是铁磁材料微观结构的一种本质反映,更能够描述钢轨形变等受限条件下铁磁材料内部应力情况;2)巴克豪森噪声是一种电磁无损检测技术,可用于应力的非接触检测;3)根据 MBN 产生机理,MBN 检测技术不仅能够检测应力大小,还能检测铁磁材料疲劳寿命和细小裂纹等微观组织结构。

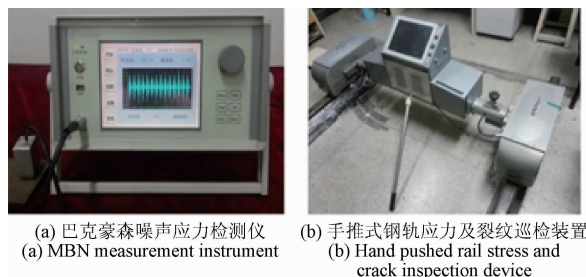


图 6 南京航空航天大学开发的钢轨应力检测仪
Fig. 6 Rail stress measurement instrument developed in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

钢轨缺陷的形成包含孵化期、初始裂纹产生和扩展等阶段。在损伤早期即孵化期,表现通常是各种微观的应力集中等因素导致微观结构组织的变化。这种情况在应力集中区域以及疲劳、腐蚀和蠕变过程中的发展尤为剧烈。在该阶段,常规的观察手段主要是应用光学显微镜、扫描电子显微镜、电子背散射衍射和取向成像显微技术、X 射线和中子射线显微镜等。此类方法能够观测材料的微观结构,但是需要进行表面打磨、切割等处理,适用于实验室取样研究,无法用于非破坏性的在线检测。只有在宏观裂纹的扩展阶段,才能采用超声、电磁等无损检测手段进行缺陷检测。但必须指出的是,宏观缺陷扩展的过程中对于缺陷裂纹尖端和裂纹侧壁等部位的微观

结构进行观察仍然是必要的。缺陷微观变化的检测研究可以对缺陷形成扩展与应力分布机理和微观结构变化与宏观检测参数建模提供理论支持^[91]。表 1 总结了目前缺陷孕育、产生及发展各阶段的检测手段。通常,裂纹扩

展到 50 μm 以上才能被常规的无损检测方法探测到。如磁粉探伤的最小样例是 50 μm,涡流检测裂纹的最小宽度也在几十微米。但是,裂纹形成阶段及扩展方式具有多样性,目前技术难以准确量化。

表 1 缺陷孕育、初始和发展期各类检测手段

Table 1 Different kinds of defect inspection techniques in the breeding, initial and propagation stages			
	裂纹孕育期	初始期	发展期
观察单位尺度	nm ~ μm	μm	μm ~ mm
常规观察手段	光学、电子、射线显微镜、磁成像	光学、电子、射线显微镜、磁成像	常规无损检测手段,超声、电磁以及光学
分析方法	微观原子结构模型、晶界工程	-	力学、电磁学宏观特性模型

磁光检测技术是近年来兴起的一种新型电磁微观结构观测技术,能够自动分析并确定材料表面磁特征和磁畴壁翻转场的分布^[92]。不同系列的磁光克尔效应系统在磁性纳米技术、磁性薄膜以及磁场传感器等研究领域都得到了广泛应用^[93]。田贵云教授已开展应用磁光克尔效应进行铁磁材料的微观组织结构成像检测新技术研究^[94]。德国 Schaefer 教授采用磁光克尔显微镜观察了应力加载情况下材料微观磁畴结构和宏观磁滞回线的特征变化,研究了应力对材料微观和宏观磁特性的作用^[95]。

显微镜技术在材料微观组织结构观察与无损检测评估方面的应用,包括晶格组织结构、弹性和塑形变形与残余应力之间的相互关系,进而分析微观结构尺度上缺陷的形成机理^[96]。裂纹产生初始期,裂纹宽度在 nm 或 μm 单位量级。典型的钢轨和轮对疲劳接触裂纹,初始宽度在 10 μm 之内^[97]。利用多尺度模型^[98]可以很好地建立微观与宏观之间的联系,从而实现对材料损伤不同演化阶段的缺陷特征全解析。综上所述,表 2 总结了各类钢轨缺陷无损检测技术的优缺点。

表 2 各类钢轨缺陷无损检测技术的优缺点

Table 2 The advantages and disadvantages of different kinds of rail defect non-destructive testing techniques			
无损检测技术	可使用检测系统	可检测缺陷类型	检测性能
超声检测	低速手推式与高速巡检系统 (最高可达 80 km/h)	轨头内部缺陷,轨腰和轨底缺陷	可靠的内部缺陷检测方法,存在表面及近表面检测盲区,使用耦合剂
电磁超声检测	低速轨检车系统(<10 km/h)	表面缺陷,轨头、轨身、轨底内部缺陷	有效检测表面及内部缺陷,漏检轨底缺陷,受提离影响
激光超声检测	低速轨检车系统(<15 km/h)	轨头,轨腰和轨底缺陷	有效检测内部缺陷,易受提离影响,非接触检测
涡流检测	低速手推式与高速系统 (最高可达 70 km/h)	表面和亚表面缺陷	可有效检测表面及近表面不同深度缺陷,易受提离变化的影响,时频信息丰富
漏磁检测	低速与高速巡检车 (Sperry 仪器达 35 km/h)	钢轨表面及近表面缺陷	有效检测轨头表面及亚表面缺陷;适于高速巡检
交变电磁场测量	低速及高速轨检车 (达 121.3 km/h)	表面及近表面缺陷	有效检测和量化表面及近表面缺陷,提离影响较小
视觉检测	低速与高速巡检系统 (最高可达 320 km/h)	表面大尺寸缺陷,轨头轮廓、波磨、缺失及压载缺陷	有效检测波磨,轨头轮廓、缺失;难以检测表面微缺陷,且无法检测内部缺陷
射线检测	静态检测系统	焊缝处内部缺陷	有效检测焊缝内部缺陷,漏检部分横向缺陷;设备笨重,放射性安全隐患

3 铁路钢轨检测仪器和巡检探伤车

随着铁路钢轨无损检测技术的发展,已有手推式低速检测车及快速钢轨探伤巡检车等多种仪器系统被应用于铁路钢轨的缺陷伤损巡检和状态维护应用中^[6-7]。世界范围内已开发了基于不同无损检测技术的多模态集成的铁路钢轨检测仪器和巡检探伤车系统。美国 Sperry 公司研发了基于超声技术的手推式钢轨检测设备(见图 7(a)),并通过对超声与磁感应技术的集成研制了快速钢轨伤损检测车(见图 7(b)),其检测速度达 35 km/h,但有时需要停车人工确认^[18]。如图 7(c)所示,德国 Eurailscout 研发了基于超声和涡流技术融合的高速钢轨巡检车,巡检速度达 75 km/h,但是快速巡检时受提离因素影响较大^[6]。如图 7(d)所示,英国 TSC 公司基于 ACFM 技术研制了手推式钢轨检测车^[69]。中国铁道科学研究院的钢轨探伤车最高巡检速度为 80 km/h^[15],可有效检测钢轨内部缺陷,但难以检测表面和近表面裂纹的发展深度、宽度等严重性指标,无法对钢轨的应用状态进行完整评估。法国 Socomate 研制了一种利用快速自动角度扫描技术 FFAST 的超声相控阵系统,其理论检测速度能达到 100 km/h^[99];俄罗斯研制了一种线性无线阵列式低频短脉冲超声导波钢轨检测探头和便携式设备(AKR1224)^[100]。Coccia S 等人研发了一种适用于钢轨在线检测的超声导波系统^[28];美国 TTCI 研制的 Omni-scan 相控阵超声系统,能定量检测轨头中的缺陷,在线检测缺陷在不同轴重载荷下发展变化^[24]。基于高速摄像的钢轨监控巡检系统已展开应用,比如法国 SNCF 公司的钢轨高速视觉巡检车系统“IRIS320”,可以巡检实现钢轨的轨头几何轮廓、磨损、剥离、表面大尺寸疲劳缺陷的快速可视化巡检,最高速度达 320 km/h,但是该系统无法检测亚表面和深层缺陷损伤^[101]。

中国铁道科学集成研发的新一代 GTC-80 型钢轨探伤车^[102],配备了超声检测系统和基于高清线阵 CCD 动态扫描的视觉检测系统,可分别自动实现钢轨内部损伤及表面擦伤的巡检识别,整体检测速度达到 80 km/h^[103],并与南京航空航天大学联合开发了钢轨顶面裂纹的高速电磁检测系统,实现了超声与电磁检测的互补。国内的祝连庆等人^[104]开发了基于超声技术的钢轨高速探伤系统;金炜等人^[105]设计开发了基于超声技术的钢轨探伤小车;南京航空航天大学开发了集成漏磁和巴克豪森噪声技术的手推式钢轨巡检车和钢轨应力检测仪器,如图 6 所示。英国 Network Rail 公司研究与开发了铁路钢轨巡检车:新测量列车(new measurement train NMT)含超声、涡流及视觉检测装置^[106]。

以上铁路钢轨巡检探伤车和仪器系统基于超声、电



图 7 铁路钢轨探伤仪器设备

Fig. 7 Railway rail defect detection equipment

磁、视觉等多种模态的检测技术。由于不同检测方法和仪器设备的检测原理和缺陷检测能力不同,且都有一定局限性,单一检测技术难以全面获得铁路钢轨的结构状态信息。各种无损检测技术应用于铁路钢轨巡检的速度不同,为突破速度限制以实现铁路钢轨的快速高效巡检,迫切需求开发新型的铁路钢轨巡检仪器和探伤车。另外,由于铁路钢轨结构复杂且缺陷伤损类型多样,不同位置 and 不同类型及扩展阶段的缺陷危害性不同,获取尽可能全面的钢轨结构状态信息,实现钢轨缺陷的量化描述与评估对钢轨的故障早期预警和状态维护非常重要。

4 钢轨结构健康状态监测与基于大数据管理的钢轨状态维护

采用无损检测与评估技术,实现铁路钢轨的快速巡检能有效地发现钢轨缺陷伤损。然而,高速铁路的大范围应用导致进行钢轨巡检与维护的“天窗期”逐渐缩短,分不同时间间隔进行周期性地钢轨巡检难以及时获得钢轨的服役状态信息。通过安装永久传感器和构建传感器网络实现铁路钢轨结构健康状态的实时监测,有助于全面地了解钢轨的服役状态,及时发现故障并进行状态维护,最大限度地保证铁路运行安全。另外,长期监测获取的钢轨状态数据信息,有助于分析服役钢轨的演化状态及失效模式,有助于提高钢轨的保障维护能力。

4.1 钢轨结构健康状态监测

通过安装永久传感器和传感器网络的方法可以实现铁路钢轨的服役状态健康监测,获取超声和电磁巡检难以得到的钢轨结构性能长期演化及缺陷的扩展信息^[21, 107]。钢轨状态监测传感器主要包括电阻应变片、压电式应变传感器、光纤应变传感、位移、振动、声发射和加速度传感器等^[20]。图8为一种典型的无线传感网络应用于铁路状态监测示意图^[108]。

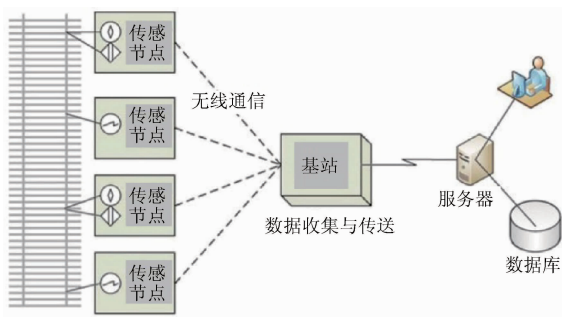


图8 无线传感网络应用于铁路钢轨状态监测示意图

Fig.8 Schematic diagram of wireless sensor network applied in railway rail condition monitoring

1) 应变法:在宏观缺陷扩展的过程中,对于钢轨道岔尖轨,焊接缝处等特殊检测部位缺陷检测是必要的^[109-110]。然而,无损检测技术对此类缺陷存在检测技术瓶颈,需要研发用于结构状态和健康监测的永久安装传感器实现对复杂结构部位持续监测数据和异常行为的获取与捕捉,如结构健康监测中常用到的应变片以及用于拾取振动信号的压电晶体,用于获取列车行驶过监控区域时所产生的振动激励以及可能发生的缺陷共同作用下的动态响应。

2) 光纤监测:铁路运营线路中钢轨的应变和温度变化直接关系到钢轨的服役状态,光纤布拉格光栅监测技术可实现钢轨表面的应变和温度监测,从而获得在列车载荷及环境温度变化情况下钢轨的状态变化^[111]。西南交通大学周威等人^[112]研究了双向应变的匹配光栅应变传感监测技术实现动态载荷下轨道应变的准分布式实时监测;张艳晓等人^[113]将FBG环形位移传感器用于高速铁路轨道的位移监测中;兰州交通大学田铭兴等人^[114]研究了光纤和应力实时断轨监测方法;叶肖伟等人^[115]研究了基于FBG反射谱特征的铁路道岔损伤识别方法。

3) 振动监测:基于振动的结构损伤识别技术可以分为3类^[116]:(1)基于振动时程数据的损伤识别技术;(2)基于实测频率反应函数的损伤识别技术;(3)使用模态参数的损伤识别技术。大连理工大学张海等人^[109]基于加速度传感器的振动响应对高铁轨道安全监测无线传感器网络关键技术进行了研究;香港理工大学Hong M等

人^[117]采用超声导波和振动的方法实现结构的多损伤监测与识别。

此外,Tian G. Y. 教授还开发了基于RFID无线射频识别的传感器及传感器网络,并结合物联网新技术实现铁路健康状态的监测与管理^[118]。低频和高频无线射频传感器被开发应用于铁路轨底腐蚀的监测与描述中^[119]。英国Newcastle大学NEWTON项目联合Network Rail,谢菲尔德大学和约克大学开展基于无线射频传感和无线传感网络的铁路钢轨健康状态监测和大数据管理及云平台的研究^[118-119],在基于无线传感网络的钢轨结构状态健康监测方面开展了原理性研究和验证实验工作。

4.2 钢轨巡检监测的数据融合与管理

为实现无损检测和健康监测的集成融合,电子科技大学正在进行基于缺陷扩展模型和多物理场多维特征数据融合的大数据云管理平台研发,如图9所示。将现有钢轨巡检仪器亟需与大数据管理相结合,结合应力、塑性变形、缺陷等因素联合作用下的裂纹扩展模型,研究方向将包括缺陷各物理场和多物理场融合下响应信号在空间、时域、频域、时频域、统计域的检测、识别、量化与可视化重构算法^[81]。在多物理场多维缺陷特征提取技术的研究基础上,将海量存储数据进行融合,综合比较缺陷检测,识别和可检测性。此外,深入挖掘速度对热、电磁等方法的干扰及等效模型,在不同的速度下研究各类方法的融合模型。根据各标准缺陷样件测试,实际测试数据及上述特征分析,从缺陷的孕育、发生、扩展等不同阶段的多尺度、多物理场特征的研究,建立缺陷-健康状况(材料状态、设备性能)模型,并对当前的钢轨健康状况进行评估,并给出风险预警预报,建立大数据云系统管理平台,结合历史数据,获得缺陷演变曲线的趋势,建立缺陷演变-寿命评估模型,同时给出整体钢轨路线和局部风险路段的剩余寿命准确评估,为决策部门提供维修、退役、更新、改进设计等建议。

从多模态传感获取的特征可以了解,数据是海量的、异构的(有视频、图像、传感等结构化、半结构化、非结构化的数据)、动态的和含干扰的。从数据分布的管理形式看,数据分散在不同的应用系统、不同单位,有很多甚至存放在电子文件甚至是纸质记录中,数据是孤立的、分散的、难以综合利用。从现有系统架构看,“集中式”系统结构与“点式”业务应用存在矛盾,不能满足基层业务管理的需要,也不能满足信息汇聚进行管理决策的需要。从基础设施检相关的各类数据和应用需求来看,其数据体量、数据类型、处理速度要求、有效数据密度和价值回报等,具有“大数据”基本的“4V特征”—数据体量巨大;数据类型繁多;数据需要实时、快速处理速度;有些数据自身价值密度低但价值回报高。图10为北京交通大学提出的一种基于大数据和多模态传感的铁路钢轨巡检监

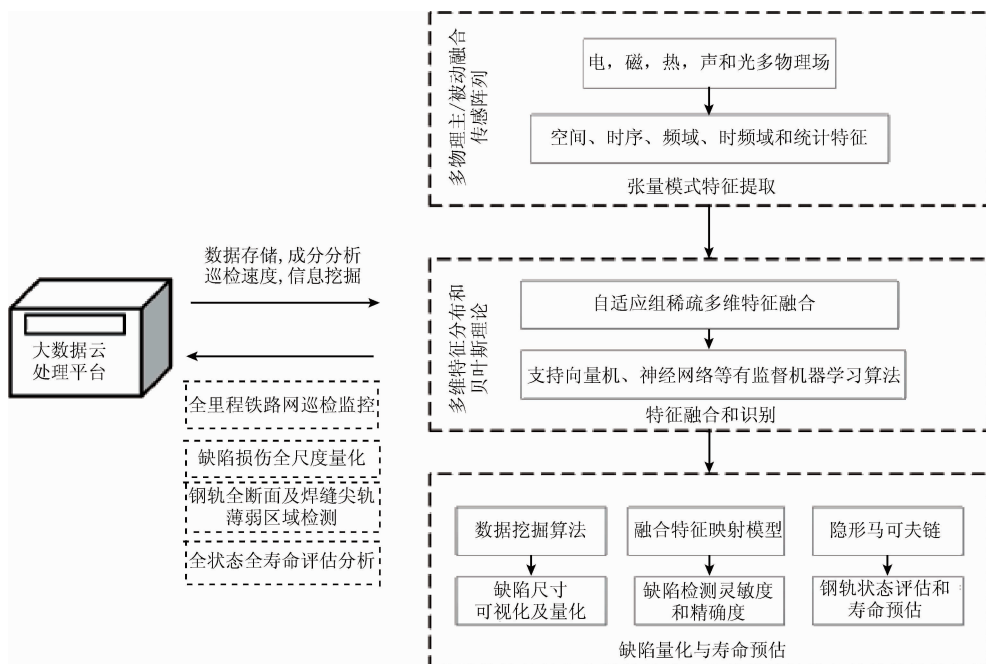


图9 特征提取、数据融合与决策算法和缺陷的量化与寿命评估

Fig. 9 Feature extraction, data fusion, decision-making algorithms as well as defect quantization and life assessment

测平台^[5]。

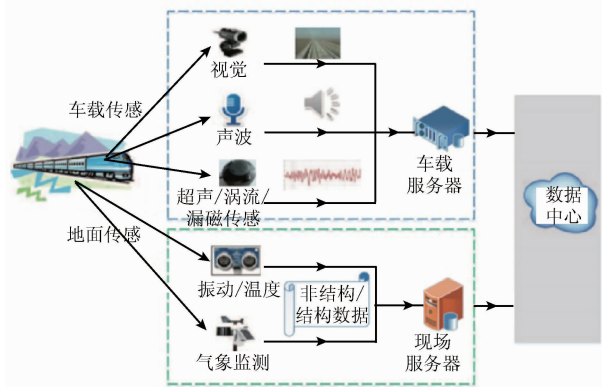


图10 基于大数据的铁路钢轨巡检监测平台

Fig. 10 The railway rail inspection monitoring platform based on big data management

通过大数据背景下的海量数据处理技术、数据挖掘、分析预测等方法的应用,研究基础设施的病害特征提取和融合技术、病害成因分析技术、病害识别与诊断技术、设备状态预测技术等,对轨道、钢轨、路基、典型桥梁结构等,进行设备故障诊断、状态预测,实现设备的健康管理和全寿命周期管理。具体通过大数据挖掘实现:

1) 轨道典型故障识别及分析诊断。通过病害特征和故障模式提取等,对钢轨顶面短波不平顺、擦伤、异物压入、接触光带、疲劳裂纹(含剥离掉块)等特征识别;局部

不均匀沉降特征识别;钢轨波浪磨耗识别和成因分析;扣件松动、接头状态不良等典型故障识别。

2) 设备故障发展预测及状态演变预测。包括轨道平顺性状态演变规律和状态预测;不同地质条件、不同轨道结构下的轨道平顺性发展预测;车辆/轨道系统相互作用下的不同工况下的轨道状态预测预警等。

3) 轨道结构设备劣化规律与寿命预测评估。包括不同运输下轨道关键部件劣化规律、不同劣化状态对列车运营影响、轨道部件的失效标准和评估方法等。

4) 钢轨全寿命周期管理和维修决策支持。包括钢轨焊接接头状态管理、钢轨断轨风险评估和预测、道岔钢轨裂纹及折断预测预警、无缝线路稳定性与钢轨折断预警、钢轨伤损变化规律与预测等。

5 铁路钢轨巡检和监测技术的发展趋势

随着高速铁路及城市地铁交通运输系统的快速发展,迫切需求综合多种技术的快速钢轨探伤车及移动式巡检装置用于铁路钢轨的快速扫描检测和安全维护。面对钢轨检测全断面覆盖、全里程检测以及缺陷和故障全过程检测要求,以及符合铁路调度、维修频度、劳力节约方面的要求和高速铁路挑战,钢轨检测的技术发展的未来趋势包括以下几点。

1) 更高的检测速度。大于 80 km/h 的巡检速度,才

能够满足目前铁路针对轨检和探伤车的调度和人力的要求。而更高的巡检速度,将使得铁路调度安排更为容易,检测频度提高。国家自然科学基金委国家重大科研仪器研制项目“钢轨接触疲劳及裂纹多物理高速巡检监测技术攻关和仪器研发(61527803)”以电子科技大学为依托单位,联合南京航空航天大学和中国铁道科学研究院,三方合作开展研究电磁、热红外等多种方式在不同速度下的响应,以及不同的检测深度覆盖。开发新型的钢轨探伤快速巡检车和仪器系统,实现铁路钢轨的综合快速巡检和精确复检。

2)多模态多物理集成传感钢轨巡检和监测:不同的钢轨巡检和监测技术均有其优点和局限性,单一原理的检测技术难以获得钢轨状态的全部信息。将多种传感技术集成获得不同模态的钢轨巡检监测数据以实现钢轨断面的全覆盖,从轮轨接触面到内部、轨腰甚至轨底的检测覆盖,不留检测盲区,有助于准确地判定钢轨结构的完整性和服役状态。同时,将电磁、声、光、热等多物理传感集成融合进行可视化成像检测^[81],实现钢轨断面、焊接缝和道岔尖轨等复杂因素下的状态检测和铁路网全里程覆盖巡检,有助于钢轨缺陷伤损的量化评估并为钢轨状态维护提供指导。

3)对钢轨微观结构的变化和应力分布的检测,包括温度应力、载荷应力的影响的获得。钢轨结构失效模式的理解与剩余寿命的评估;缺陷的全类型,包括处于裂纹发展的全阶段的状态检测;材料微观和宏观缺陷的检测描述;通过在轨底、焊接缝、道岔尖轨等铁路钢轨薄弱环节和重点区段安装多模态永久传感器,实现多位置分布式钢轨结构状态实时监测,有助于分析缺陷伤损的初始萌生、扩展至断裂等全阶段状态信息。结合材料微观组织演化和宏观缺陷扩展,深入理解基于不同类型缺陷伤损的钢轨故障失效模式,进而评估钢轨的服役状态和剩余寿命。

4)基于大数据管理的钢轨状态维护和安全保障:无损检测技术与结构健康监控技术的结合,巡检与监测模式的结合。以高速、全役、全里程的巡检与重点区域固定点的全时域监控相结合。以不同的数据汇入方式多来源的提供钢轨状态信息全面信息数据,基于大数据和云计算管理平台实现钢轨扫描巡检、在线状态监测以及历史数据等不同模态信息的融合分析和信息挖掘,准确评估钢轨结构完整性、预测钢轨服役剩余寿命,提高铁路钢轨安全运行的可靠性。

6 结 论

本文分析了目前铁路钢轨缺陷伤损巡检和监测领域的关键挑战,比如:1)实现钢轨缺陷伤损的全类型检测识

别和全阶段状态演化监测;2)从轮轨接触面到内部、轨腰甚至轨底的钢轨全断面检测覆盖;3)实现包括焊接缝、道岔尖轨等特殊薄弱部位和重点区段的铁路全里程覆盖巡检,不留检测盲区;4)进行铁路钢轨 80 km/h 以上速度的快速高效巡检和低速精确复检的结合,满足铁路安全运营及状态维护的需求。在回顾总结铁路钢轨超声检测、涡流检测、漏磁检测、视觉检测等常规检测技术基础上,对比了各类钢轨缺陷伤损检测技术的优缺点,并对当前钢轨巡检和监测设备及探伤车仪器系统的应用情况进行了分析。进而讨论了多模态多物理集成传感与可视化成像检测、宏观与微观组织状态演化观测、无损检测与评估和结构健康监测集成融合等发展趋势,以及实现基于大数据管理、信息挖掘与通信互联的铁路钢轨基础设施服役性能管理和状态维护综合决策。

参考文献

- [1] 国家发展与改革委员会. 中长期高速铁路网规划[R]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/2016/w020160802639956019575>, 2016.
National development and reform commission (NDRC). China mid-long term railway network planning [R]. <http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/2016/w020160802639956019575>, 2016.
- [2] ZERBST U, LUNDÉN R, EDEL K-O, et al. Introduction to the damage tolerance behaviour of railway rails: A review [J]. Engineering fracture mechanics, 2009, 76(17): 2563-2601.
- [3] GRASSIE S L. Rolling contact fatigue on the British railway system: Treatment[J]. Wear, 2005, 258(7): 1310-1318.
- [4] HERNÁNDEZ F R, PLASCENCIA G KOCH K. Rail base corrosion problem for North American transit systems[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1): 281-294.
- [5] LI Q, ZHONG Z, LIANG Z, et al. Rail inspection meets big data: Methods and trends [C]. 18th IEEE International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS), 2015: 302-308.
- [6] PAPAELIAS M P, ROBERTS C, DAVIS C L. A review on non-destructive evaluation of rails: state-of-the-art and future development[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and rapid transit, 2008, 222(4): 367-384.
- [7] 王雪梅, 倪文波, 王平. 高速铁路轨道无损探伤技术的研究现状和发展趋势[J]. 无损检测, 2013, 35(2): 10-17.
WANG X M, NI W B, WANG P. Overview and future development of rails nondestructive inspection [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(2): 10-17.

- [8] U.S. Department of Transportation Federal Railroad Administration. Rolling contact fatigue: A comprehensive review[R]. 2011: 5-118.
- [9] GROHMANN H D, HEMPELMANN K, GROBTHEBING A. A new type of RCF, experimental investigations and theoretical modelling [J]. Wear, 2002, 253(1-2): 67-74.
- [10] 周清跃, 张建峰, 郭战伟, 等. 重载铁路钢轨的伤损及预防对策研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 27-31.
- ZHOU Q Y, ZHANG J F, GUO ZH W, et al. Research on the rail damages and the preventive countermeasures in heavy haul railways [J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 27-31.
- [11] 刘启跃, 张波, 周仲荣. 铁路钢轨损伤机理研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(18): 1596-1599.
- LIU Q Y, ZHANG B, ZHOU ZH R. Investigation of rail track damage mechanisms [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 13(18): 1596-1599.
- [12] 赵雪芹, 钟雯, 王文健, 等. 高速重载线路钢轨损伤特性分析[J]. 润滑与密封, 2007, 32(10): 100-102.
- ZHAO X Q, ZHONG W, WANG W J, et al. Analysis of rail damage behavior of high-speed and heavy-haul railway[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(10): 100-102.
- [13] 钟雯, 赵雪芹, 王文健, 等. PD3 与 U71Mn 钢轨疲劳裂纹扩展特性研究 [J]. 中国机械工程, 2008, 19(14): 1740-1743.
- ZHONG W, ZHAO X Q, WANG W J, et al. Study on growth behavior of fatigue crack of PD3 and U71Mn rail[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 19(14): 1740-1743.
- [14] 江晓禹, 李孝滔, 李煦, 等. 轮轨高速滚动接触及钢轨疲劳裂纹扩展研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 275-281.
- JIANG X Y, LI X T, LI X, et al. Research on wheel/rail rolling contact at high speed and fatigue crack propagation in rail [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 275-281.
- [15] 石永生, 马运忠, 傅强, 等. 钢轨探伤车的检测运用模式与伤损分级探讨[J]. 铁路技术创新, 2012(1): 96-98.
- SHI Y SH, MA Y ZH, FU Q, et al. Application modes of rail inspection car and discussion of damages classification[J]. Railway Technical Innovation, 2012(1): 96-98.
- [16] 卢超, 涂占宽, 程建军, 等. 高速铁路钢轨 RCF 伤损特征及 NDT 研究进展[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(1): 51-57.
- LU CH, TU ZH K, CHENG J J, et al. RCF damage characteristics of high-speed railway rail and research development of NDT techniques[J]. Failure analysis and Prevention, 2009, 4(1): 51-57.
- [17] 赵扬, 陈建伟, 孙继华, 等. 在役钢轨无损检测技术与系统的应用与发展[J]. 无损检测, 2014, 36(3): 58.
- ZHAO Y, CHEN J W, SUN J H, et al. The application and progress of Nondestructive Testing Technique and System for Rail In-service [J]. Nondestructive Testing, 2014, 36(3): 58.
- [18] CLARK R. Rail flaw detection: overview and needs for future developments[J]. NDT & E International, 2004, 37(2): 111-118.
- [19] ZAHARAN O, AL-NUAIMY W. Recent developments in ultrasonic techniques for rail-track inspection [C]. Proceedings of NDT Conference, 2002: 55-60.
- [20] SHARMA K, KUMAWAT J, MAHESHWARI S, et al. Railway security system based on wireless sensor networks: State of the art [J]. International Journal of Computer Applications, 2014, 96(25): 32-35.
- [21] TURNER C, TIWARI A, STARR A, et al. A review of key planning and scheduling in the rail industry in Europe and UK[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2015, 66(31): 283-293.
- [22] POHL R, ERHARD A, MONTAG H-J, et al. NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection[J]. NDT & E International, 2004, 37(2): 89-94.
- [23] THOMAS H, HECKEL THANSFACH G. Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2007, 49(6): 341-344.
- [24] LAO J J, LU C. Application of portable ultrasonic phased array instrument for rail welds ultrasonic inspection[J]. Advanced Materials Research, 2013, 717: 384-389.
- [25] 卢超, 邓丹, 陈文生, 等. 钢轨气压焊接头的超声相控阵检测技术研究 [J]. 失效分析与预防, 2011, 6(3): 139-143.
- LU CH, DENG D, CHEN W SH, et al. Research on ultrasonic phased array detecting technique for gas pressure welding joint of rail [J]. Failure analysis and Prevention, 2011, 6(3): 139-143.
- [26] MIKI M, OGATA M. Phased array ultrasonic testing methods for welds in bogie frames of railway vehicles[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition

- Monitoring, 2015, 57 (7): 382-388.
- [27] MCNAMARA JD, SCALEA F L D, FATEH M. Automatic defect classification in long-range ultrasonic rail inspection using a support vector machine-based smart system [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2004, 46 (6): 331-337.
- [28] RIZZO P, CAMMARATA M, BARTOLI I, et al. Ultrasonic guided waves-based monitoring of rail head: laboratory and field tests [C]. Advances in Civil Engineering, 2010:1-13.
- [29] RIZZO P, COCCIA S, BARTOLI I, et al. Noncontact rail monitoring by ultrasonic guided waves [C]. Encyclopedia of Structural Health Monitoring, 2009: 1-13.
- [30] NGUYEN T V, MARIANI S, PHILLIPS R R, et al. Non-contact ultrasonic guided wave inspection of rails[C]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2013: V011T006A012.
- [31] ROSE J L, AVIOLI M J, MUDGE P, et al. Guided wave inspection potential of defects in rail [J]. NDT & E International, 2004, 37 (2): 153-161.
- [32] CAWLEY P, WILCOX P, ALLEYNE D, et al. Long range inspection of rail using guided waves - field experience [C]. Proceedings of the 16th World Conference on Non-Destructive Testing, 2004: 1-7.
- [33] 卢超, 盛华吉, 宋凯, 等. 钢轨轨底斜裂纹的超声导波散射特性[J]. 无损检测, 2016, 38 (5): 18-22.
- LU CH, SHENG H J, SONG K, et al. Ultrasonic guided wave scattering characteristics of rail base oblique cracks[J]. Nondestructive Testing, 2016, 38 (5): 18-22.
- [34] 张友鹏, 任远. 基于超声导波的实时钢轨断裂检测方法研究[J]. 铁道工程学报, 2010(11): 47-51.
- ZHANG Y P, REN Y. Research on real-time detection method for broken rail based on ultrasonic guided waves[J]. Journal of railway engineering society, 2010, (11): 47-51.
- [35] 胡剑虹, 唐志峰, 蒋金洲, 等. 道岔钢轨轨底缺陷的导波检测技术研究 [J]. 中国铁道科学, 2014, 35(3): 34-40.
- HU J H, TANG ZH F, JIANG J ZH, et al. Research on guided wave inspection technology for rail base defect of turnout[J]. China Railway Science, 2014, 35(3): 34-40.
- [36] 许西宁, 叶阳升, 江成, 等. 钢轨应力检测中超声导波模式选取方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2473-2483.
- XU X N, YE Y S, JIANG CH, et al. Research on method for mode selection of guided ultrasonic waves in stress measurement of rails [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35 (11): 2473-2483.
- [37] MARIANI S. Non-contact ultrasonic guided wave inspection of rails: Next generation approach [M]. San Diego: University of California, 2015.
- [38] DIXON S, EDWARDS RJIAN X. Inspection of rail track head surfaces using electromagnetic acoustic transducers (EMATs) [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2004, 46 (6): 326-330.
- [39] HAN H, LU G, CONG P, et al. Development of Novel Rail Non-destructive Inspection Technologies [J]. Sensors & Transducers, 2014, 179 (9): 121.
- [40] HAN H, LU G, GONG P, et al. Development of novel rail non-destructive inspection technologies [J]. Sensors & Transducers, 2014, 179(9): 121-127.
- [41] HAY T, JAYARAMAN SHAY R. Ultrasonic guided wave inspection of rail defects under shelling [C]. Joint Rail Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2009: 47-50.
- [42] 邱玉, 许霁, 汪开灿, 等. 基于电磁超声表面波的钢轨在线探伤装置[J]. 无损检测, 2013, 35 (5): 43-46.
- QIU Y, XU J, WANG K CH, et al. Online rail flaw detection device based on electromagnetic acoustic surface wave [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(5): 43-46.
- [43] ZHAO Y, SUN J, MA J, et al. Application of the hybrid laser ultrasonic method in rail inspection [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2014, 56 (7): 360-366.
- [44] KENDERIAN S, DJORDJEVIC B B, CERNIGLIA D, et al. Dynamic railroad inspection using the laser-air hybrid ultrasonic technique [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2006, 48 (6): 336-341.
- [45] NIELSEN SA, BARDENSHTEIN AL, THOMMESEN AM, et al. Automatic laser ultrasonics for rail inspection[C]. 16th World Conference on NDT Montreal, 2004:1-8.
- [46] 刘洋, 项占琴, 唐志峰. 激光超声技术在钢轨探伤中的应用研究[J]. 机械设计与制造, 2009(10): 60-61.
- LIU Y, XIANG ZH Q, TANG ZH F. Application of laser-induced ultrasound on rail flaw inspection [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(10): 60-61.
- [47] 赵扬, 刘帅, 马健, 等. 混合式激光超声技术的钢轨轨头疲劳损伤无损检测研究与应用 [J]. 中国激光, 2014, 41 (增刊1): 108008.
- ZHAO Y, LIU SH, MA J, et al. Investigation and application of laser-EMAT testing fatigue damage of railhead [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41 (Suppl.1): 108008.
- [48] BENTOUMI M, AKNIN PBLOCH G. On-line rail defect

- diagnosis with differential eddy current probes and specific detection processing[J]. The European Physical Journal Applied Physics, 2003, 23 (3): 227-233.
- [49] 李国厚, 黄平捷, 陈佩华, 等. 涡流检测在钢轨裂纹定量评估中的应用[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45 (11): 2038-2042.
- LI G H, HUANG P J, CHEN P H, et al. Application of eddy current testing in the quantitative evaluation of the rail cracks [J]. Journal of Zhejiang University : Engineering, 2011, 45 (11): 2038-2042.
- [50] POHL R, KRULL R. A new eddy current instrument in a grinding train[J]. In Proceedings of the ECNDT, 2006: 178-184.
- [51] 马旺宇, 刘栋, 赵文博. 应用于钢轨检测的便携式涡流探伤仪的研制[J]. 机械设计与制造, 2010 (2): 88-90.
- MA W Y, LIU D, ZHAO W B. A portable eddy current flaw detector for railway testing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(2): 88-90.
- [52] 黄凤英, 高东海, 丁兴和. 道岔尖轨表面缺陷检测卡片式涡流传感器的设计与应用[J]. 无损检测, 2014, 36(2): 63.
- HUANG F Y, GAO D H, DING X H, Design and application of card-type eddy current sensor for testing the surface defects of switch rail[J]. Nondestructive Testing, 2014, 36 (2): 63.
- [53] 林俊明. 一种在用钢轨的涡流电控扫查监测方法及装置: 中国, CN103149273 B [P]. 2013.
- LIN J M. An eddy current electronically controlled scanning method and apparatus for rail monitoring, China, CN103149273 B[P]. 2013.
- [54] WILSON J W, TIAN G Y. Pulsed electromagnetic methods for defect detection and characterisation [J]. NDT & E International, 2007, 40 (4): 275-283.
- [55] EDWARDS R, SOPHIAN A, DIXON S, et al. Dual EMAT and PEC non-contact probe: Applications to defect testing[J]. NDT & E International, 2006, 39 (1): 45-52.
- [56] WILSON J, TIAN G Y, MUKRIZ I, et al. PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue[J]. NDT & E International, 2011, 44(6): 505-512.
- [57] SUN Y S, UDPA S, LORD W, et al. A remote field eddy current NDT probe for the inspection of metallic plates [J]. Materials evaluation, 1996, 54 (4): 510-512.
- [58] WILSON J W, TIAN G Y. 3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterisation[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2006, 48 (6): 357-359.
- [59] LI Y, TIAN G YWARD S. Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed[J]. NDT & E International, 2006, 39 (5): 367-373.
- [60] WANG P, GAO Y, TIAN G, et al. Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed magnetic flux leakage inspection [J]. NDT & E International, 2014, 64(2): 7-12.
- [61] 高运来, 王平, 田贵云, 等. 基于电磁原理的钢轨裂纹高速在线巡检方法[J]. 无损检测, 2012, 34 (12): 1-11.
- GAO Y L, WANG P, TIAN G Y, et al. High-speed online inspection techniques of rail crack defects based on electromagnetic principle[J]. Nondestructive Testing, 2012, 34 (12): 1-11.
- [62] 赵飒. 基于三维漏磁检测技术的高速铁路钢轨斜裂纹特征识别研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- ZHAO S. Research on high-speed railway inclined cracks feature recognition using 3D MFL technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [63] 高运来, 王平, 田贵云, 等. 钢轨裂纹高速漏磁巡检中的动态磁化及速度效应分析[J]. 无损检测, 2013, 35 (10): 53-58.
- GAO Y L, WANG P, TIAN G Y, et al. Velocity effect analysis of dynamic magnetization in high speed detection for rail crack using MFL method [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35 (10): 53-58.
- [64] 郝思思. 阵列式漏磁巡检设备的开发及钢轨裂纹定量分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- HAO S S. The development of the array MFL testing equipment and quantitative analysis of rail cracks[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [65] ANTIPOV A G, MARKOV A A. Evaluation of transverse cracks detection depth in MFL rail NDT [J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, 50 (8): 481-490.
- [66] KANG D, OH J-T, KIM J-W, et al. Study on MFL technology for defect detection of railroad track under speed-up condition[J]. Journal of the Korean society for railway, 2015, 18 (5): 401-409.
- [67] WANG P, XIONG L, SUN Y, et al. Features extraction of sensor array based PMFL technology for detection of rail cracks[J]. Measurement, 2014, 47(1): 613-626.
- [68] PAPAELIAS M P, LUGG M C, ROBERTS C, et al. High-speed inspection of rails using ACFM techniques[J]. NDT & E International, 2009, 42 (4): 328-335.

- [69] TOPP DSMITH M. Application of the ACFM inspection method to rail and rail vehicles [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2005, 47(6): 354-357.
- [70] PAPAELIAS M P, ROBERTS C, DAVIS C, et al. Detection and quantification of rail contact fatigue cracks in rails using ACFM technology [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2008, 50(7): 364-368.
- [71] ROWSHANDEL H, NICHOLSON G, DAVIS C, et al. A robotic approach for NDT of RCF cracks in rails using an ACFM sensor [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2011, 53 (7): 368-376.
- [72] SALEMI A H, SADEGHI S H H, MOINI R. The effect of sensor lift-off on crack depth measurement by the surface magnetic field measurement technique [C]. In *Proceeding of the Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2002, 615(1): 977-983.
- [73] PENG J P, TIAN G Y, WANG L, et al. Investigation into eddy current pulsed thermography for rolling contact fatigue detection and characterization [J]. *NDT & E International*, 2015, 26(6): 2825-2831.
- [74] VRANA J, GOLDAMMER M, BAUMANN J, et al. Mechanisms and models for crack detection with induction thermography [C]. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2008: 475-482.
- [75] OSWALD-TRANTA B. Thermo-inductive crack detection [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2007, 22 (2-3): 137-153.
- [76] WALLE G, NETZELMANN U. Thermographic crack detection in ferritic steel components using inductive heating [C]. *Proceedings of the Ninth ECNDT*, 2006: 25-29.
- [77] WILSON J W, TIAN G P, ABIDIN I, et al. Pulsed eddy current thermography: system development and evaluation [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2010, 52 (2): 87-90.
- [78] GAO Y L, TIAN G Y, LI K, et al. Multiple cracks detection and visualization using magnetic flux leakage and eddy current pulsed thermography [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015: 269-281.
- [79] GAO Y L, TIAN G Y, WANG P, et al. Ferrite-yoke based pulsed induction thermography for cracks quantitative evaluation [C]. *IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, 2015: 197-201.
- [80] YANG R, HE Y, GAO B, et al. Lateral heat conduction based eddy current thermography for detection of parallel cracks and rail tread oblique cracks [J]. *Measurement*, 2015, 66(1-2): 54-61.
- [81] GAO B, WOO W L, TIAN G Y. Electromagnetic thermography nondestructive evaluation: Physics-based modeling and pattern mining [R]. *Scientific Reports*, 2016: 6.
- [82] NETZELMANN U, WALLE G, EHLEN A, et al. NDT of railway components using induction thermography [C]. *Incorporating the 6th European-American Workshop on Reliability of NDE*, 2016, 1706(1): 171-186.
- [83] 孙军华, 王伟华, 刘震, 等. 基于结构光视觉的钢轨磨耗测量方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36 (9): 1026-1029.
- SUN J H, WANG W H, LIU ZH, et al. Rail wear measurement method based on structured light vision [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36 (9): 1026-1029.
- [84] 王海涛, 甄理, 杨春霞, 等. 基于计算机视觉的铁轨表面缺陷检测系统 [J]. *无损检测*, 2011, 33 (11): 38-41.
- WANG H T, ZHEN L, YANG CH X, et al. Rail surface defects detection system based on computer vision technology [J]. *Nondestructive Testing*, 2011, 33 (11): 38-41.
- [85] GIBERT X, PATEL V, MCHHELLAPPA R. Robust fastener detection for autonomous visual railway track inspection [C]. *IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, 2015: 694-701.
- [86] PAPAELIAS M P, DAVIS C, ROBERTS C, et al. Interail: Development of a novel integrated inspection system for the accurate evaluation of the structural integrity of rail tracks - implementation of the ACFM rail inspection module [C]. *Proceedings of the 10th European Conference on Non Destructive Testing*, 2010: 1-13.
- [87] WANG P, GAO Y, YANG Y, et al. Experimental studies and new feature extractions of MBN for stress measurement on rail tracks [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, 49 (8): 4858-4864.
- [88] SANTA-AHO S, SORSA A, NURMIKOLU A, et al. Review of railway track applications of Barkhausen noise and other magnetic testing methods [J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2014, 56(12): 657-663.
- [89] JILES D. Dynamics of domain magnetization and the Barkhausen effect [J]. *Czechoslovak Journal of Physics*, 2000, 50 (8): 893-924.
- [90] WANG P, JI X, YAN X, et al. Investigation of temperature effect of stress detection based on Barkhausen

- noise[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 194: 232-239.
- [91] MOROZOV M, TIAN G Y WITHERS P J. The pulsed eddy current response to applied loading of various aluminium alloys[J]. *NDT & E International*, 2010, 43(6): 493-500.
- [92] HUBERT ASCHÄFER R. Magnetic domains: The analysis of magnetic microstructures [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.
- [93] MCCORD J. Progress in magnetic domain observation by advanced magneto-optical microscopy[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(33): 333001.
- [94] QIU F, REN W, TIAN G Y, et al. The effect of stress on the domain wall behavior of high permeability grain-oriented electrical steel[C]. *IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)*, 2015: 207-211.
- [95] PEREVERTOV O, SCHÄFER R. Influence of applied tensile stress on the hysteresis curve and magnetic domain structure of grain-oriented Fe - 3% Si steel[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(18): 185001.
- [96] WITHERS P. Residual stress and its role in failure[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2007, 70(12): 2211.
- [97] JAIN P, GODBOLE M. Review of magnetic hysteresis-based NDE of creep damage in power plant steels[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2012, 54(3): 128-133.
- [98] LUO C, CHATTOPADHYAY A. Prediction of fatigue crack initial stage based on a multiscale damage criterion[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(3): 403-413.
- [99] COPERET P. FAAST: fast automated angle scan technique[C]. In *Proceedings of the ECNDT*, 2006: 1-9.
- [100] GURVICH A, SAMOKRUTOV A, SHEVALDYKIN V. Guided wave ultrasonic flaw detection in rails. application experience[C]. *ECNDT*, 2006: 1-5.
- [101] KOUADIO R, DELCOURT V, HEUTTE L, et al. Video based catenary inspection for preventive maintenance on IRIS 320[C]. In *World Congress of Railway Research*, 2008: 00474613.
- [102] 张向阳, 张高峰. GTC-80 型钢轨探伤车[J]. *机车电传动*, 2013(6): 94-96.
ZHANG X Y, ZHANG G F. GTC-80 rail flaw detection car [J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2013(6): 94-96.
- [103] 李培, 王旭, 石永生, 等. 高速轮式钢轨探伤变距式超声波发射模式的设计与应用[J]. *铁道建筑*, 2015(11): 127-130, 146.
- LI P, WANG X, SHI Y SH, et al. Design and application of high speed wheel-type rail flaw detection device based on distance variable mode[J]. *Railway Engineering*, 2015(11): 127-130, 146.
- [104] 祝连庆, 孙军华, 董明利, 等. 钢轨高速探伤系统的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2002, 23(增刊1): 119-121.
- ZHU L Q, SUN J H, DONG M L, et al. Study on high speed detection system for rail flaw[J]. *China Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(Suppl.1): 119-121.
- [105] 金炜, 范荣巍, 孙琼. 新型钢轨探伤中试试验车探伤小车的研制[J]. *铁道机车车辆*, 2005, 25(5): 31-35.
- JIN W, FAN R W, SUN Q. Development of a new test carriage for the rail flaw detection car[J]. *Railway Locomotive & Car*, 2005, 25(5): 31-35.
- [106] RAIL N. Infrastructure monitoring fleet measurement[R]. *System Overview (Mobile Asset Development Team)*, 2013.
- [107] LIDÉN T. Railway infrastructure maintenance-a survey of planning problems and conducted research[C]. 18th Euro Working Group on Transportation, 2015, 10: 14-16.
- [108] HODGE V J, O'KEEFE S, WEEKS M, et al. Wireless sensor networks for condition monitoring in the railway industry: A survey[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2015, 16(3): 1088-1106.
- [109] 张海, 刘冲, 王大志, 等. 应变电测法监测无缝线路实际锁定轨温的变化[J]. *传感器与微系统*, 2014, 33(11): 62-64.
- ZHANG H, LIU CH, WANG D ZH, et al. Monitoring of change of real locked temperature of continuous welded rail by strain electrical measuring method [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2014, 33(11): 62-64.
- [110] FURUKAWA A. Recent Trends in Track Inspection and Monitoring Technologies[J]. *Quarterly Report of RTRI*, 2015, 56(1): 1-4.
- [111] BUGGY S J, JAMES S W, STAINES S, et al. Railway track component condition monitoring using optical fibre Bragg grating sensors [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(5): 055201.
- [112] 周威. 基于光纤光栅的轨道应变监测技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- ZHOU W. Rail strain monitoring technology based on fiber bragg gratings [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong

University, 2013.

- [113] 张艳晓. FBG 变形环位移传感技术及在高速铁路上的应用研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2013.
ZHANG Y X. Displacement sensing technology with FBG deforming ring and its applied research in high speed railway[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.
- [114] 田铭兴, 陈云峰, 赵斌, 等. 实时断轨检测方法综述[J]. 兰州交通大学学报, 2011, 30 (1): 122-126.
TIAN M X, CHEN Y F, ZHAO B, et al. Summary of real-time broken rail detection methods [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2011, 30 (1): 122-126.
- [115] 叶肖伟, 姜洋, 倪一清, 等. 基于 FBG 反射谱特征的铁路道岔损伤识别试验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 71-76.
YE X W, JIANG Y, NI Y Q, et al. Experimental study on damage detection of railway turnouts based on characteristics of FBG reflective spectra[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(6): 71-76.
- [116] JENSEN T, CHAUHAN S, HADDAD K, et al. Monitoring rail condition based on sound and vibration sensors installed on an operational train[J]. Notes on Numerical Fluid Mechanics & Multidisciplinary, 2015, 126:205-212.
- [117] HONG M, WANG Q, SU Z, et al. In situ health monitoring for bogie systems of CRH380 train on Beijing-Shanghai high-speed railway [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 45 (2): 378-395.
- [118] SUNNY A I, TIAN G Y, ZHANG J, et al. Low frequency (LF) RFID sensors and selective transient feature extraction for corrosion characterisation [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 241: 34-43.
- [119] ZHANG J, TIAN G Y. UHF RFID tag antenna - based sensing for corrosion detection & characterization using principle component analysis[C]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016: 1-10.

作者简介



田贵云, 分别在 1985 年和 1988 年于四川大学分别获得学士和硕士学位, 1998 年于英国 Derby 大学获得博士学位, 现为电子科技大学自动化工程学院教授、国家“千人计划”入选者、英国纽卡斯尔大学传感器技术首席教授, 主要研究方向为电磁传感器、无损检测与评估、结构健康状态监测等。

E-mail: g. y. tian@uestc. edu. cn

Tian Guiyun received his B. Sc. degree in metrology and instrumentation and M. Sc. degree in precision engineering both from the Sichuan University, Chengdu, China in 1985 and 1988,

respectively; and obtained Ph. D. degree from University of Derby, Derby, U. K. in 1998. Currently, he is an adjunct professor in School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China; he has been selected as a Chinese Thousand Talent Scholar. Since 2007, he has been based at Newcastle University, Newcastle upon Tyne, U. K., where he is the chair professor of sensor technologies. His research interests include electromagnetic sensors, non-destructive testing and evaluation, structural health monitoring and etc.



高斌, 2005 年于西南交通大学获得学士学位, 2007 年于英国纽卡斯尔大学获得硕士学位, 2011 年于英国纽卡斯尔大学获得博士学位, 现为电子科技大学自动化工程学院教授, 主要研究方向为盲源与微弱信号分离、电磁热无损检测与复合传感多维特征挖掘

技术研究。

E-mail: bin_gao@uestc. edu. cn

Gao Bin received his B. Sc. degree in 2005 from Southwest Jiaotong University, received his M. Sc. degree in 2007 and Ph. D. degree in 2011 both from Newcastle University, UK. Now, he is a professor in University of Electronic Science and Technology of China. His main research interest includes blind source and weak signal separation, electromagnetic thermography nondestructive testing and evaluation, multi-sensor signal processing and feature extraction.



高运来 (通讯作者), 2010 年于浙江科技学院获得学士学位, 2013 年于南京航空航天大学获得硕士学位, 现为南京航空航天大学博士研究生、英国纽卡斯尔大学联合培养博士生, 主要研究方向为新型电磁热传感器设计、无损检测与评估、多物理场建模仿真及磁畴微观结构动态观测研究、用于结构完整性及疲劳缺陷描述和应力测量。

E-mail: yunlai. gao@nuaa. edu. cn; Y. Gao28@newcastle. ac. uk

Gao Yunlai (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2010 from Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, China and M. Sc. degree in 2013 from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China. He is currently working toward Ph. D. degree in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China. He is also a joint Ph. D. student in New castle University UK. His research interest includes novel electromagnetic thermal sensor design, non-destructive testing and evaluation, multi-physical field modeling and simulation, magnetic domain microstructures dynamic observation for structural integrity, material fatigue defect characterization and stress measurement.



王平,分别在 1999 年和 2004 年于东南大学获得学士学位和博士学位,现为南京航空航天大学自动化学院教授,主要研究方向为高速漏磁巡检、巴克豪森噪声等电磁无损检测与评估技术研究。

E-mail:zeit@263.net

Wang Ping received his B. Sc. degree in 1999 and Ph. D. degree in 2004 both from Southeast University, China. Now, he is a professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing China. His main research interests are focused on electromagnetic non-destructive testing and evaluation including high-speed magnetic flux leakage (MFL) and magnetic Barkhausen Noise (MBN) techniques and etc.



王海涛,分别在 1991 年和 1994 年于西安交通大学获得学士学位和硕士学位,2002 年于中国科学院获得博士学位,现为南京航空航天大学自动化学院教授,主要研究方向为电磁、超声、激光超声等无损检测与评估技术研究。

E-mail:htwang@nuaa.edu.cn

Wang Haitao received his B. Sc. degree in 1991 and M. Sc. degree in 1994 both from Xi'an Jiaotong University, received his Ph. D. degree in 2002 from Chinese Academy of Sciences, China. Now, he is a professor in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing China. His main research interests include electromagnetic, ultrasonic and laser-ultrasonic non-destructive testing and evaluation.



石永生,1998 年于中南大学获得学士学位,现为中国铁道科学研究院基础设施检测研究所副研究员,主要研究方向为高速在役钢轨伤损检测标准研究、应用和高速在役钢轨伤损检测设备开发工作。

E-mail:sys1048@126.com

Shi Yongsheng received his B. Sc. degree in 1998 from Central South University, China. Now, he is an associate research fellow at Infrastructure inspection research institute in China Academy of Railway Sciences, Beijing, China. His main research interests include the standards, applications and instruments development for in - service rail track damages inspection at high speed.