

高速铁路轨道无损探伤技术的研究现状和发展趋势

王雪梅¹,倪文波¹,王 平²

(1. 西南交通大学 机械工程学院,成都 610031;2. 西南交通大学 土木工程学院,成都 610031)

摘 要:在介绍铁路钢轨无损检测技术发展历程的基础上,针对传统超声波检测技术的不足,重点综述了目前国内外钢轨无损检测新技术的研究应用情况,主要包括激光超声技术、电磁超声技术、相控阵列超声技术、超声导波技术、声发射技术、电磁检测技术、光学图像检测技术、光纤传感器检测技术和轮轨相互作用监测技术等。最后通过对不同无损检测技术的分析对比,讨论了未来钢轨无损检测技术的发展趋势。

关键词:铁路轨道;无损探伤;超声波检测

中图分类号:U213.4⁺3;TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2013)02-0010-08

Overview and Future Development of Rails Nondestructive Inspection

WANG Xue-Mei¹, NI Wen-Bo¹, WANG Ping²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Rails are the foundation of railway transportation. The defects of rails directly and seriously affect the safety of railroad vehicles. The history and present situation of rails non-destructive inspection were introduced. For the issues of the traditional ultrasonic inspection method, the recent developments of rails non-destructive new techniques were reviewed, including the laser ultrasonic technique, the phased array ultrasonic technique, the electromagnetic acoustic technique, the ultrasonic guided waves technique, the acoustic emission technique, the electromagnetic measurement technique, the optical image and visual inspection technique, the fiber optical sensors measurement technique and vehicle-track interaction monitoring technique. With the analysis and comparison of the different non-destructive methods, the future developments of rails non-destructive inspection technique were discussed.

Keywords: Rails; Nondestructive inspection; Ultrasonic test

钢轨是机车车辆运行的基础,其状态的好坏直接关系到铁路运输的安全。轮轨之间复杂的作用力,以及由于气候和其他因素对钢轨受力的影响,使钢轨产生压缩、伸长、弯曲、扭转、压溃、磨损或断裂等损伤^[1],对车辆的安全运行构成很大的威胁。因此,国内外铁路部门很早就开始对钢轨进行各种无

损检测,以保证铁路运输的安全。

有关铁路钢轨无损探伤技术的应用研究早在1877年就已开始。1927年,Elmer Sperry博士应美国铁路联盟的要求,研制了世界上第一辆基于漏磁检测原理的轨道探伤车,但漏磁检测法只能探测钢轨表面和近表面的缺陷。随着超声波检测技术的发展,该法后来逐步成为了铁路轨道伤损检测的主要方法。欧洲各国和日本等铁路发达国家先后推出了各种形式的超声波钢轨探伤设备,有便携式的、手推式的、道路和轨道两用的检测车辆以及专用的轨道检测列车等^[2~6]。在我国,从最初的引进到后来的

收稿日期:2011-11-03

基金项目:铁道部科技开发资助项目(2011G009);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU11CX021)

作者简介:王雪梅(1968—),女,副教授,博士,研究方向为现代测控技术及其在轨道交通中的应用。

自主研发,经过几十年的努力,钢轨探伤取得长足进步,经与国外合作,已经能够生产大型探伤车,并开发研制了系列型号的探伤车辆。目前,国内外铁路轨道检测大都采用大型高速钢轨探伤车与手推式钢轨探伤车辆相结合的方式。

传统的超声波检测法主要采用轮式探头对钢轨内部的缺陷进行检测,但其对表面和近表面缺陷(如轨头龟裂和压溃)的探测效果则较差或根本无法检测。特别是靠近轨距角的水平方向纵向延伸的剥离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。此外,传统超声波检测技术采用接触式超声换能器进行检测,检测效果受钢轨表面几何形状、粗糙度和清洁度等因素的影响,检测速度也受到限制。高频超声波能量衰减较大,对焊缝区域、轨腰或轨底等处理藏较深的缺陷检出率也较低。正是由于传统超声波检测技术在钢轨检测中的不足,促使各国研究者不断探索新的钢轨无损探伤技术,一些新技术、新方法不断涌现,大大提高了钢轨无损探伤的精度、速度和缺陷的检出率。笔者将对这些无损探伤新技术及其在钢轨探伤中的应用研究情况进行综述。

1 超声检测新技术及其应用

1.1 激光超声技术及其应用

激光超声技术(Laser Ultrasonic Technique, LUT)利用脉冲激光在试件中激励产生超声波,而超声信号的检测则主要有压电换能器检测法、空气耦合检测法和光学检测法三种。光学检测法又有非干涉法和干涉法之分。目前,基于激光激励和空气耦合检测的混合钢轨无损探伤技术是国内外研究的热点^[7-12]。

美国 TTCI 和 Tecnogamma SPA 公司联合开发了第一台专门用于钢轨无损检测的基于激光-空气混合超声技术(Laser_Air Hybrid Ultrasonic Technique, LAHUT)的非接触式检测系统^[9-11,15],该系统能有效检测位于轨底的横向裂纹和位于轨头的垂直开裂型裂纹(VSH)。试验结果表明,该系统能 100% 检测出 VSH 缺陷,对轨底缺陷的检出率也达到 90%。丹麦研制的基于激光超声技术的轨道检测车辆^[12]通过对含有人造缺陷的试验样轨进行探测,能实现分布于轨头、轨腰和轨底的多种类型的钢轨缺陷的有效检测。目前国内很多单位也开展了有关激光超声技术及其应用的研究工作。但大多还

停留在试验室研究阶段,还没有成熟的产品推出。

与传统的压电超声技术相比,激光超声技术具有非接触、无需耦合剂等优点,降低了对被测轨面粗糙度和清洁度的要求,而且激光器安装位置可距离轨道较远,如果采用光纤来传输激光,将进一步方便安装,为建立道旁监测系统创造了有利条件。此外,激光抗干扰能力强,能在较恶劣的环境下或其它方式难以实施的高温条件下进行测量;脉冲激光作用于固体表面,可同时产生纵波、横波及表面波,因此不仅可以用来检测内部缺陷,还可用于检测表面缺陷。但目前激光超声技术还存在光-声能量转换效率低、超声信号微弱、检测设备造价较高等问题。

1.2 相控阵列超声技术及其应用

相控阵列超声技术(Phased Array Ultrasonic Technology, PAUT)的基本概念源于相控阵雷达技术,其基本特征是在计算机控制下对超声换能器晶片阵列(多个压电晶片按一定形状、尺寸排列)进行激励,分别控制每个晶片发射信号的波形、幅度和相位延迟量,使各晶片发射的超声子波束在空间叠加合成,从而产生发射聚焦和声束偏转等效果。因此,只需通过改变控制软件,相控阵换能器就可方便地实现对不同方向、不同深度和不同位置的裂纹的检测,这是传统的单晶片超声换能器所不能比拟的。

相控阵列超声技术因其突出的优点,近年在国际无损界得到快速发展和广泛应用。目前开展铁路钢轨相控阵列超声检测技术应用研究的国家和地区有:美国的 TTCI、爱荷华州立大学,英国的沃里克大学和伯明翰大学、TWI 公司以及法国的 Socomate 等^[13-16]。

2005 年 TTCI 研制了一种 Omni-scan 相控阵超声系统(如图 1 所示)^[13],并把它用于钢轨横向裂纹的现场实时监测。试验结果表明,该技术不仅可定量检测轨头中的缺陷,而且可以在线监测轨头缺陷在不同轴重载荷作用下的发展变化过程。

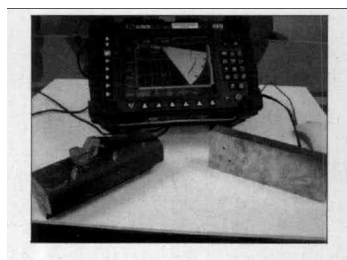


图 1 Omni-scan 钢轨超声相控阵检测系统

相控阵列超声技术的数据控制、处理量大,对计算机的软硬件都有很高的要求。2006 年 Socomate

研究了一种新的快速自动角度扫描技术 FFAST^[16],图2是使用该技术研制的具有64个通道的信号检测和处理系统,采用了嵌入式CPLD和DSP技术,全部64个通道都是并行处理模式,可以同步控制32个这样的机箱同时工作。整个系统检测的行进速度可达到100 km/h。

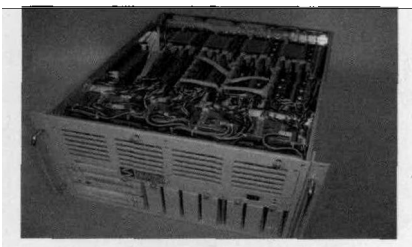


图2 FFAST系统的64通道PC机箱

与传统超声检测技术相比,相控阵列超声技术采用电子方法控制声束聚焦和扫描,可以在不移动或少移动探头的情况下进行快捷的扫查,提高了检测速度。在对钢轨进行检测时,可根据缺陷的位置分布,优化声束形状和大小,提高缺陷的检出率。由于钢轨铝热焊缝包含了大量的粗晶粒材料,传统超声波检测方法的大部分入射超声波能量在轨道截面的上层就被衰减掉了,因而难以检测出位于下层的缺陷。虽然相控阵列超声技术同样存在超声信号能量衰减的问题,但它通过聚焦可以提高声束能量,通过方向控制可以把声束投射到焊缝中缺陷出现的地方,使其检测焊缝底部缺陷成为可能。但目前相控阵列超声检测设备的价格昂贵,对操作人员的技术要求较高。

1.3 电磁超声技术及其应用

电磁超声技术(Electromagnetic Acoustic Technique, EMAT)是一种利用电磁的方法在导体中激励和检测超声波的技术。把通有交变电流的线圈放在导体表面附近,在交变磁场的作用下导体中将感生出涡电流,如果在同一时间施加一稳定磁场,则构成涡流回路的质点将受到洛伦兹力的作用。介质质点在交变洛伦兹力的作用下产生往复振动,当振动以一定方式传播出去就可产生超声波。超声波的频率与线圈中所通交流电的频率相同。通过改变外加偏转磁场的大小和方向、高频电流的大小和频率、线圈的形状和尺寸可以控制EMAT产生的超声波类型、强弱、频率及传播方向等参数。

随着EMAT技术的不断发展,以EMAT为核心的电磁超声技术也在铁路钢轨伤损的检测中得到应用^[17-20]。加拿大Tektrend公司(现为NDT

Olympus)研制了基于EMAT的高速轨检车Rail-Pro^[18],采用了几种EMAT配置方法来激励产生表面波、纵波和横波,以便能对整个轨道截面进行检测。该系统以10~15 km/h的检测速度成功实现了对包含各种缺陷的试验样轨的检测。

英国沃里克大学和伯明翰大学研究了一种基于EMAT的钢轨表面缺陷的检测技术^[19-20]。采用两个EMAT换能器,一个换能器用于发射产生表面瑞利波,与之相隔固定距离(150 mm)的另一个换能器用于接收沿表面传播的瑞利波,所接收到的瑞利波会随两探头间的表面缺陷的情况而变化。与通常的反射法不同,该技术采用穿透法,可实现钢轨表面和近表面缺陷的检测。研究表明EMAT方法可显著改善传统压电换能器对轨头的横向缺陷和垂直开裂型缺陷的检出性能。

与压电式换能器相比,EMAT换能器与被测物体不直接接触、无需耦合剂、检测速度快、重复性好,可以在高温和较低温度环境下实现自动化检测,还可以方便地产生多种类型的超声波。但EMAT的超声转换效率低,接收到的超声波信号幅值小;采用永久磁铁的EMAT换能器在检测铁磁性材料的构件时还会引入巴克豪森噪声,使接收信号常被湮没在噪声中,故需采用先进的信号处理技术。

1.4 超声导波技术及其应用

三维无限均匀固体中自由传播的波称为体波(Body wave),体波分为纵波(P)和横波(S)。当体波在波导中传播时,将在上下边界内不断地反射,而沿着波导的方向传播,这就形成了超声导波(Ultrasonic Guided Waves)。钢轨具有三种典型的波导,即轨头、轨腰和轨底。由于其截面形状和尺寸大小不同,在其中传播的超声波的频率和速度也显著不同。

频散是超声导波的主要特性之一,即导波的相速度随着频率的不同而不同的现象。频散特性使超声导波技术与传统超声技术具有很大不同。多模式是导波的另一重要特征,不同结构的波导中的导波模式是不相同的。钢轨中的导波存在许多不同模式,多种模式叠加在一起并分别以不同的速度传播将使数据信号解释困难。因此导波应用的关键就是充分了解钢轨中导波的特性,确定用于检测的特定导波模式。因此常借助计算机数值仿真建模的方法来分析研究超声导波在轨头、轨腰和轨底波导中的行为和特征,主要有:解析法、半解析有限元法、有限

元法和有限差分法等。传播距离长是超声导波区别于体波的又一个重要特征。超声导波的频率较低(几万赫兹的范围),波长长(几百毫米),因此其能沿着钢轨传播几十到几百米,适合对钢轨长度方向分布的缺陷进行检测。这种特性符合了快速、大范围无损检测的需求,探头无需对钢轨进行常规超声的逐点式扫查^[21-22]。

图3是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^[23],主要对钢轨中的垂向分布缺陷和铝热焊缝区域进行检测。该设备是一个机械/气动检测控制系统,检测时通过空气泵扣紧在钢轨上。试验表明该设备能有效检测出道岔尖轨轨底18 mm深(占整个截面面积的3.4%)的缺口。图4是俄罗斯研制的一种线性无线阵列式低频短脉冲超声导波钢轨检测探头(包括12个传感器)和便携式设备(AKR1224)^[24-25],采用导波脉冲反射法进行测量,最长测试距离为50 m,缺陷定位精度能达到10 cm。美国加利福尼亚圣地亚哥分校的Coccia^[26]研究了一种适用于钢轨在线检测的超声导波系统。由于超声导波能在钢轨表面不连续性缺陷下面传播,把表面剥离层产生的对分布于其下面的横向裂纹的屏蔽效应降低到了最小,从而能对轨头的横向裂纹、垂直开裂型裂纹和复合型缺陷进行有效检测。此外由于频率低,由晶界散射引起的能量衰减非常小,因此声波易于穿过铝热焊缝区域,从而对之进行有效检测。

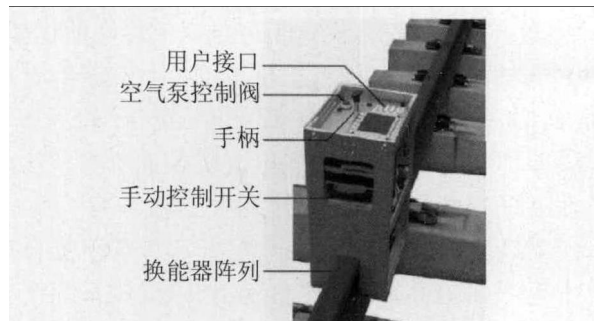


图3 G-扫描导波钢轨测试系统



图4 用于钢轨检测的无线阵列式传感器

1.5 声发射技术及其应用

声发射(Acoustic Emission, AE)亦称应力波发射。与普通超声波检测方法不同,其特点是从外部施加载荷,使固体材料中局域源能量快速释放而产生瞬态弹性波,利用所接收到的声信号研究材料的内部缺陷,借以评价材料的完整性和特性。

声发射技术具有早期发现故障、非接触测量等特点,特别适合于在线监测和诊断的应用,因此很快受到铁道部门的重视^[27-32]。美国TTCI研制了新一代轨边声学探测系统^[28](TADS),用于货车滚动轴承早期故障诊断。该系统已在北美、南非、澳大利亚和我国铁路上安装使用。德国弗朗霍费Fraunhofer无损检测研究所研究了一种基于AE技术的列车车轮表面裂纹的在线监测技术^[29]。文献[30]研究了利用AE技术在线监测车轮踏面因实施紧急制动所造成的擦伤缺陷的方法。

早在2002年,AEA轨道技术公司(现在叫DeltaRail)就开发了一用于轨道检测^[31]的被称为NoiseMon的AE系统。主要用于检测和评估列车在轨道上运行时,轮轨相互作用产生的噪声。该系统的传感器采用空气耦合压电式换能器或麦克风,安装于检测列车的构架上。在伦敦Euston到伯明翰NewStreet之间进行了实际线路测试,检测速度最高达到160 km/h。试验结果表明,该AE系统有潜力检测出轨道的断裂、车轮擦伤、凹陷、轨道轮廓的磨损和差的黏着条件等。

区别于其他无损检测方法,AE技术有两个突出特点:① AE检测是一种动态无损检测方法,即可以在不损伤钢轨的条件下在线监测缺陷的生长、发展过程,可及早或临近预报钢轨的疲劳与破坏。② AE技术探测得到钢轨变形过程中的能量来自被测钢轨自身的应力、应变能,而不像超声波和射线检测方法是靠外部提供能量。此外,AE技术对构件的几何形状不敏感,适用于检测像钢轨这样形状复杂的构件。但AE技术对材料甚为敏感,易于受到机电噪声的干扰;对缺陷的定性、定量仍需依赖于其他无损检测方法。

2 其它无损检测技术及其应用

除了超声波检测技术,目前应用于钢轨的无损检测技术还有电磁检测法、光学图像检测法、光纤传感器检测法以及轮轨相互作用监测法等等。

电磁检测技术通过把电流或电磁场或两者同时

引入被测试件,通过检测相应的电磁响应来获得有关试件表面和近表面附近的缺陷特征信息,主要有涡电流检测技术^[33-37]、漏磁检测技术和交流电场检测技术^[38-44]等。由于趋肤效应,电磁检测法对于钢轨轨头的 RCF、波浪形磨耗、剥落和车轮擦伤等缺陷的检测优势明显,但对位于轨腰、轨底等埋藏得比较深的缺陷则不能检出,而且其对线圈的提离效应非常敏感,因此当对轨道表面的缺陷进行检测时,需严格控制好探头与轨面之间的间距($\leq 2\text{ mm}$),否则会引起灵敏度的波动。

光学图像检测法的基本原理是利用 CCD 摄像机拍摄钢轨的轮廓图像,从图像上直接获取反映钢轨外形的轮廓曲线和轨道表面的各种伤损情况。目前,各种基于视频图像的检测系统已经在轨道检测中得到广泛应用^[45-47]。例如,法国 SNCF 在其新的 IRIS320 检测车上就采用了高速视频检测系统,最高检测速度可达 320 km/h。该轨检车以 160 km/h 的速度,每隔 15 d 就在高速主干线路上对轨道表面缺陷进行一次检测^[46]。美国 ZETA-TECH 公司最新研制的自动道岔检测车辆 ASIV^[47]能检测道岔轨道截面轮廓形状、垂直方向和侧面的磨耗情况、直轨与尖轨之间的高度差、直轨与尖轨之间的间隙、轨距角以及尖轨、心轨的角半径等信息,检测精度达到 0.1~1 mm。基于图像的自动检测方法具有非接触、检测速度快、结构简单、测量精度高、在线测量等特点,随着数字图像处理技术的进一步发展,其精度和可靠性将进一步得到提高。但光学图像检测法只能检测钢轨的表面状态,不能检测其内部损伤。

光纤传感器(Fiber Optical Sensors)因其极高的传感性能和微小的尺寸而得到越来越多的应用。光纤传感器可用于测量温度、压力、振动和应力等多种参数。近十年来,国内外有关光纤传感技术在铁路轨道监测中的应用研究方兴未艾^[48-49]。例如,美国伊利诺斯大学的研究人员与美国铁路联盟合作,对光纤传感技术在铁路轨道断裂、扭曲、列车占道等检测方面的应用进行了深入研究^[48]。虽然光纤传感技术是一种实时性和可靠性都非常高的断轨监测方法,但光纤的机械性能较差,如果遇到过大的外力或弯曲则很容易断裂,且安装和维修工作困难重重。

车辆与轨道之间的动力学相互作用(Vehicle/Track Interaction)问题,是铁路轮轨系统中最基本、最重要的问题。铁路车轮失圆、轨道的不平顺和各种伤损都是引起车辆轨道相互作用系统冲击振动的

原因,尤其在高速行车条件下,它会导致轮轨间强烈的相互作用,加速轮轨疲劳磨损。通过对轮轨相互作用力的监测来实现车轮擦伤、轨道不平顺和各种伤损的在线检测一直以来都是各国铁路研究的热点问题,主要有振动加速度法和冲击载荷法。振动加速度法将加速度传感器安装在轨腰或轨底座上进行测量。冲击载荷法大多采用将应变片粘贴在钢轨或车轮辐板上进行测量^[50-53]。该法检测的是轮轨相互作用对列车运行平稳性和安全性影响的一种综合性能,必须经过严格的理论分析和大量的试验研究,否则不能具体确定缺陷是来自机车车辆轮对系统还是来自轨道。目前的研究应用大多侧重于车轮踏面擦伤、剥离、磨损和不圆度等方面的问题,对轨道伤损的检测研究还很少。

3 发展趋势

基于以上介绍和分析可以看到各种无损检测技术在应用上都有其自身的优势和局限性,没有任何单一的一种无损检测方法能探测并识别出钢轨中所有的缺陷,所以实际使用中,可以考虑把两种或两种以上的不同检测方法结合起来,取长补短,提高钢轨伤损的检出率。

超声与涡流检测技术是目前应用最广泛、技术最成熟、互补性最强的无损检测方法。超声波易于检测出位于轨头、轨腰和轨底的内部缺陷,而不易发现和检测出位于轨头表面的缺陷,例如,踏面上的滚动接触疲劳、压溃等,但这正好是涡流检测的优势,两种方法结合起来,优势互补,就能对钢轨进行更加全面的伤损检测。Eurailsout 公司的 UST-96& UST-02 型超声波及涡流复合式轨检车就充分利用了这两种技术的互补关系^[3,36]。

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^[51]。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,可以在 320km/h 的高速下实现铁路轨道快速、可靠的检测。每个检测模块提供反映钢轨不同方面的状态信息。光学图像视频检测模块提供有关钢轨波浪形磨耗、轨头轮廓和是否遗失零部件等的状况;ACFM 模块能检测并确定 RCF 缺陷(包括轨头龟裂和压溃)的程度;而超声模块能对钢轨内部缺陷进行检测和评估。把这三个检测模块集成在一起,经过一次运行探测就能得到反映钢轨状态的比较全面的信息,大大节省了检测时间。此

外,把来自三个检测模块的数据进行融合分析可进一步降低误报率,显著提高缺陷预报的可靠性。

开发复合式检测系统是目前无损检测技术发展的主要趋势^[3,36,54-56]。采用数据融合技术,通过对多种无损检测技术所获得的关于未知钢轨伤损信息的数据进行分析与综合,可以提高钢轨伤损识别的可靠性和准确性。

4 结语

随着高速铁路在我国快速发展,列车的运行安全问题越来越引起人们的重视,钢轨作为铁路运输的基础,其状态的好坏直接关系到铁路运输安全。历史上很多次重大的脱轨事件的发生都与钢轨发生伤损密切相关。开展钢轨无损探伤技术的研究,不断探索新的无损检测原理和方法,以期提高钢轨伤损的检出概率,提高缺陷识别的可靠性和准确性,对于保证高速铁路运营安全,指导维修都具有十分重要的作用。

参考文献:

- [1] 邹定强. 钢轨失效分析伤损图谱[M]. 北京:中国铁道出版社,2010:29-31.
- [2] CLARK R. Rail flaw detection: overview and needs for future developments[J]. NDT&E International, 2004,37:111-118.
- [3] THOMAS H M, HECKEL T, HANSPACH E. Advantage of a combined ultrasonic and eddy current examination for railway inspection trains [EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.4.5.3.pdf>.
- [4] PAPAELIAS M, ROBERTS C, DAVIS C L. A review on non-destructive evaluation of rails: state-of-the-art and future development[J]. Journal of Rail and Rapid Transit,2008,222(4):367-384.
- [5] RAINER P, ERHARD A, MONTAG H J, et al. NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection[J]. NDT & E International,2004,37:89-94.
- [6] AHARONI R, GLIKMAN E, KRUG G. A novel high-speed rail inspection system[EB/OL]. [2011-08-10] <http://www.ndt.net/article/ecndt02/156/156.htm>.
- [7] LADABAUM I, JIN X, SOH H T, et al. Surface micro-machined capacitive ultrasonic transducers [J]. IEEE Ultrasonics, Ferroelectric, and Frequency Control,1998,45(3):678-690.
- [8] 周正干,魏东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J]. 机械工程学报,2008,44(6):10-14.
- [9] 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.
- [10] KENDERIAN S, CERNIGLIA D, DJORDJEVIC B B, et al. Laser-air hybrid ultrasonic technique for dynamic railroad inspection application[EB/OL]. [2011-08-10]. http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/railroad_inspection/8_kenderian.pdf.
- [11] KENDERIAN S, DJORDJEVIC B B, ROBERT E, et al. Laser based and air coupled ultrasound as non-contact and remote techniques for testing of railroad tracks[J]. Materials Evaluation,2002,60:65-70.
- [12] NIELSEN S A, BARDENSHEIN A L, THOMMESEN A M, et al. Automatic laser ultrasonics for rail inspection [EB/OL]. [2011-08-10]. http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/laser_ultrasonics/377_nielsen.pdf.
- [13] GARCIA G, ZHANG J C. Application of ultrasonic phased arrays for rail flaw inspection[R]. Washington, DC: Office of Research and Development,2006:31-37.
- [14] HANSEN W, HINTZE H. Ultrasonic testing of railway axles with the phased array technique-experience during operation [J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring,2005,47(6):358-360.
- [15] PAPAELIAS M P, ROBERTS C. D4. 4. 1-Rail inspection technologies(Report prepared for EU funded project INNOTRACK, Project no. TIP5-CT-2006-031415) [R]. Birmingham: University of Birmingham,2008:21-22.
- [16] COPERET P. Fast automated angle scan technique [EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.4.5.2.pdf>.
- [17] VITALY I G, ALEXANDER V G. Development of instruments for NDT of rail-tracks with use of contactless electromagnetic acoustic emission transducers (EMATs) [EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/563.pdf>.
- [18] CHAHBAZ A, BRASSARD M, PELLETIER A. Mobile inspection system for rail integrity assessment [EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn533/idn533.htm>.
- [19] EDWARDS R S, DIXON S, JIAN X. Characteriza-

- tion of defects in the railhead using ultrasonic surface waves[J]. *NDT & E International*, 2006, 39: 468—475.
- [20] EDWARDS R S, HOLMES C, FAN Y, et al. Ultrasonic detection of surface-breaking railhead defects[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2008, 50(7): 1—5.
- [21] LEE C M, ROSE J L, CHO Y. A guided wave approach to defect detection under shelling in rail[J]. *NDT&E International*, 2009, 42: 174—180.
- [22] 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.
- [23] CAWLEY P, WILCOX P, ALLEYNE D N, et al. Long range inspection of rail using guided waves-field experience[EB/OL]. [2011-08-10]. http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/railroad_inspection/399_cawl.pdf.
- [24] GURVICH A K, KOZLOV V N, SAMOKRUTOV A A, et al. Non-destructive testing of rails in case of guided waves use[EB/OL]. [2011-08-10]. http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/railroad_inspection/255_samokrutov.pdf.
- [25] GURVICH A K, SHEVALDYKIN V G, SAMOKRUTOV A A. Guided wave ultrasonic flaw detection in rails—application experience[EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/We.4.5.4.pdf>.
- [26] COCCIA S. Ultrasonic guided waves for structural health monitoring and application to rail inspection prototype for the Federal Railroad Administration[D]. San Diego: University of California, 2007.
- [27] TOMOKI S, YASUHIRO N, XIU L, et al. Damage assessment in railway sub-structures deteriorated using AE technique[EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/ewgae2004/pdf/i21shotani.pdf>.
- [28] 刘瑞杨,王毓民. 铁路货车滚道轴承早期故障轨边声学诊断系统(TADS)原理及应用[M]. 北京:中国铁道出版社, 2005: 70—79.
- [29] MEYENDORF N, FRANKENSTEIN B, HENTSCHEL D, et al. Acoustic techniques for structural health monitoring[EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/121.pdf>.
- [30] ANASTASOPOULOS A, BOLLAS K, PAPASALOUROS D, et al. Acoustic emission on_line inspection of rail wheels[EB/OL]. [2011-08-10]. http://www.ndt.net/article/ewgae2010/papers/76_Anastasopoulos.pdf.
- [31] CAWSE S J, HARDY A E J, WRIGHT C E. Acoustic track monitoring. Phase 1: Initial data gathering analysis[R]. UK: AEA Report for RSSB, December, 2002: 1—18.
- [32] MURAVIEV V, MYRAVIEV T. Diagnostics of railway objects using acoustic emission technique[EB/OL]. [2011-08-10]. http://www.ndt.net/article/ENDTdays2007/nde_for_safety/21.pdf.
- [33] KRULL R, HINTZE H, THOMAS M, et al. Non-destructive testing of rails today and in the future[J]. *ZEVrail Glasers Annalen*, 2003, 127: 286—296.
- [34] POHL R, MONTAG H J, THOMAS H M, et al. NDT techniques for railroad wheel and gauge corner inspection[J]. *NDT&E International*, 2004, 37: 89—94.
- [35] DEY A, THOMAS H M, POHL R. The important role of eddy current testing in railway track maintenance[EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/393.pdf>.
- [36] HECKEL T, THOMAS H M, KREUTZBRUCK M, et al. High speed non-destructive rail testing with advanced ultrasound and eddy-current testing techniques[EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/nde-india2009/pdf/5-D-1.pdf>.
- [37] MARCHAND B, DECITRE J, CASULA O. Recent developments of multi-elements eddy currents probes[EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/392.pdf>.
- [38] HOWITT M. Bombardier brings ACFM into the rail industry[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2002, 44(6): 379—382.
- [39] TOPP D, SMITH 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.
- [40] LUGG M. The first 20 years of the A. C. field measurement technique[EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.ndt.net/article/wcndt2008/papers/386.pdf>.
- [41] PAPAELIAS M P, LUGG M C, ROBERTS C, et al. High-speed inspection of rails using ACFM techniques[J]. *NDT & E International*, 2009, 42: 328—335.
- [42] ROWSHANDEL H, PAPAELIAS M, ROBERTS C, et al. Development of autonomous ACFM rail inspection techniques[J]. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2011, 53(2): 85—89.
- [43] 赵海涛. 基于交变磁场测量技术的金属表面缺陷检测系统的研究与实现[D]. 长沙:国防科技大学, 2004.

- [44] 刘佳利. 交变磁场测量成像技术的研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2010.
- [45] 刘瑞扬, 王毓民. 铁路货车运行故障动态图像监测系统(TFDS)[M]. 北京:中国铁道出版社, 2005:1-4.
- [46] FOEILLET G. IRIS 320 is a global concept inspection vehicle merging engineering and R&D tools for infrastructure maintenance[EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/i.3.1.pdf>.
- [47] ALLAN M Z, TODD L E, JOSEPH W P. Development, implementation, and validation of an automated turnout inspection vehicle[EB/OL]. [2011-08-10]. <http://www.railway-technology.com/downloads/whitepapers/track/file2286>.
- [48] SHUN L C, ALAN H, ERIK Y. Fiber optical sensors for high-speed rail application(Report for High-Speed Rail IDEA Project 19)[R]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign. August 2003:1-25.
- [49] 黄小妹. 高速铁路无缝道岔光纤光栅应变、温度和位移的监测[D]. 武汉:武汉理工大学, 2011.
- [50] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学= Vehicle-track coupling dynamics[M]. 北京:科学出版社, 2007:145-165.
- [51] 宋颖. 高速车轮失圆对轮轨动力作用的影响及其监测方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010.
- [52] ENSCO Co. Vehicle/Track Interaction (V/TI) Monitor[EB/OL]. [2011-09-08]. http://www.ensco.com/userfiles/file/Products_Services_PDF/07_Rail/Track-Inspection-Systems/090076-Rail-Vehicle-Track-Interaction-VTI-Monitor-ENSCO.pdf.
- [53] KESICH J, GOLBY A. MNR wheel impact load detection-improved performance at reduced cost[EB/OL]. [2011-09-08]. http://www.deltarail.com/papers/documents/APTA_Wheel_Impact_Load_Detection_System.pdf.
- [54] 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[EB/OL]. [2011-08-10]. http://www.ndt.net/article/ecndt2010/reports/1_10_33.pdf.
- [55] 张清华. 基于超声和涡流的复合式无损检测技术[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [56] EDWARDS R S, 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.

(上接第9页)

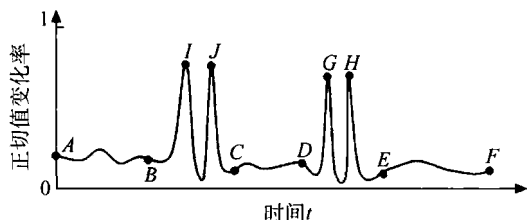


图4 信号曲线正切值变化图

综上所述,轮毂由于厚度和形状的变化而产生的干扰信号在某些地方幅值会很大,但是却是连续均匀变化的,其正切值也比较小;裂纹产生的缺陷信号的幅值在某些情况下可能会较小,但是变化急促,或者在方向上会有突然的改变。

4 结论

通过对某型轮毂的涡流检测信号分析,创造性运用了相关数学函数知识分析信号曲线,可以较准确判断缺陷信号。因此笔者提出一种设想,在智能

涡流设备软件融入函数计算和相应的识别程序,采集涡流检测信号的同时后台程序进行分析与识别,就可以比较准确地判断细小的缺陷信号,而且显示非常直观,这就大大提高了涡流检测的效率和准确性^[6]。

参考文献:

- [1] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册·电磁卷[M]. 《美国无损检测手册》译审委员会译. 上海:世界图书出版公司, 1999:115.
- [2] 任吉林, 林俊明, 高春法. 电磁检测[M]. 北京:机械工业出版社, 2000:118.
- [3] 陈建兵, 李杰. 谱表达方法的频率取点优选[J]. 振动工程学报, 2001, 24(1):89-92.
- [4] 华东师范大学数学系. 数学分析(上册)[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [5] 华东师范大学数学系. 数学分析(下册)[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [6] 克莱因 M. 古今数学思想(第二册)[M]. 上海:上海科技出版社, 2002.