文章编号:1005-0523(2022)01-0108-08

基于临界折射纵波的钢轨温度力监测方法

孙刘家,李再帏,范国鹏,何越磊

(上海工程技术大学城市轨道交通学院,上海 201620)

摘要:传统温度力检测方法受检测原理和传感元件效率的制约,难以对无缝线路钢轨温度力进行快速准确的实时监测。提出一种基于临界折射纵波的无缝线路温度力在线监测方法,以声弹性原理为基础,采用Snell定理计算超声纵波最佳入射角,通过中性温度点实现无缝线路温度力实时检测。分别搭建了温度力在线监测硬件和软件系统对理论算法进行实践,利用移动网络传输的方式将实时监测波形发送到云端服务器,将原始波形的波峰作为特征数据,通过标定实验去除残余应力对温度力检测结果的干扰。结果表明:临界折射纵波可以有效地实现无缝线路钢轨温度力测量,结合建立的硬件和软件系统为无缝线路服役性能关键参数管理提供了新途径,建议继续深化钢轨温度力监测研究。

关键词:无缝线路;温度力;临界折射纵波;在线监测

中图分类号:U213.2+44 **文献标志码**:A

本文引用格式:孙刘家,李再帏,范国鹏,等. 基于临界折射纵波的钢轨温度力监测方法[J]. 华东交通大学学报,2022,39(1):108-115.

Rail Temperature Stress Monitoring Method Based on Critical Refraction Longitudinal Wave

Sun Liujia, Li Zaiwei, Fan Guopeng, He Yuelei

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The traditional temperature stress detection method is restricted by the detection principle and the efficiency of sensor elements, so it is difficult to monitor the temperature stress of continuously welded rail (CWR) quickly and accurately in real time. Based on the principle of acoustic elasticity, the optimal incident angle of ultrasonic longitudinal wave is calculated by using Snell theorem, and the real-time temperature stress detection of CWR is realized through the neutral temperature point. The hardware and software systems of temperature stress on-line monitoring are built up to practice the theoretical algorithm. The real-time monitoring waveform is sent to the cloud server by mobile network transmission. The peak of the original waveform is taken as the characteristic data, and the interference of residual stress on the temperature stress detection results is removed by calibration experiment. The results show that the critical refracted longitudinal wave can effectively measure the temperature stress of CWR rail. Combined with the established hardware and software system, it provides a new way for the management of key parameters of CWR service performance. It is suggested that the proposed rail temperature stress monitoring scheme be popularized.

Key words: continuously welded rail; temperature stress; the critical refracted longitudinal wave; on-line monitoring

Citation format: SUN L J, LI Z W, FAN G P, et al. Rail temperature stress monitoring method based on critical refraction longitudinal wave[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(1): 108-115.

收稿日期:2021-06-13

基金项目:国家自然科学基金项目(51808333,51978393);甘肃省科技计划资助项目(19ZD2FA001)

钢轨作为轨道结构的主要部件，承载列车轮轨力和环境温差的交互作用[1]。无缝线路消除了钢轨接头，降低了轮轨撞击荷载，提升列车运行速度和舒适性；与此同时，无缝线路内部也产生了巨大的温度力，存在胀轨跑道、断轨等高度风险的结构病害形式[2-4]。对无缝线路钢轨温度力状态进行实时监测具有十分重要的生产实践价值。

无缝线路钢轨温度力检测方法依据检测原理可分为能量法、应变法及应力法 3 类[5]。能量法如强迫横向位移法和钢轨提升法是通过大型机械将线路中的应力释放，估算其内部积聚的应力大小，操作繁琐费力，影响铁路线路的正常运行，不适用于高速铁路维修天窗期的实际[6]。应变法如观测桩法是利用预埋观测桩的位置来确定钢轨相对位移的变化，多用于无缝线路状态的运维管理[7]。而标定轨长法则是用与钢轨具有相同线性膨胀系数的标尺来测量测标，由标尺的伸长量测量无缝线路的应变从而推导出其内部应力大小[8]。这两种方法只能大致地估算钢轨内部应力，存在较大误差，仅可作为定性分析手段。此外，近年来，通过电阻或光纤光栅传感器检测钢轨应变的方法也得到了一定应用，但在轮轨力作用下存在零点漂移等突出问题，且传感器昂贵造价制约着这类方法的有效推广。基于应力法原理的超声波法[9]、X 射线法[10]、巴克豪森法[11]等同样应用于钢轨温度力的测量中，这类方法主要思想是利用钢轨材料物理变化所产生的声、电或磁的改变量来实现钢轨内部温度应力的测量[12-14]。其中，X 射线法与巴克豪森法检测深度较浅，适合于检测钢轨表面温度力。而超声波法则依据钢轨内部声波的变化量实现钢轨表面及内部温度力进行检测，可以实现钢轨表面及内部温度力的测量[15-19]。综上可知，超声波法是进行无缝线路钢轨温度力测量比较有效途径。

鉴于此，国内外学者进行了大量的超声检测研究，如刘艳等[20]通过对比既有钢轨应力检测方法得出超声波法是针对钢轨应力检测最具潜力的方法之一的结论。Nucera 等[21]发现了非线性超声导波在钢轨中的非线性系数与应力同步改变，由该特性判断轨温和钢轨应力状态结果不受钢轨材质影响。王嵘等[22]设计了基于导波多模态融合的无缝钢轨温度应力估计算法，克服了弹性模量变化对超声检测温度力的干扰。彭小丹等[23]阐述了临界折射纵波检测钢轨温度力的原理及系统组成结构。这些研究多是对定点钢轨温度力进行测量，关于钢轨温度力在线监测的研究较少。采用超声波法进行钢轨温度力的在线监测尚存在较大的研究空间。

通过分析临界折射纵波在钢轨中的传播机理，建立超声波检测应力的数学模型，搭建钢轨温度力的临界折射纵波检测硬件系统，设计并实现钢轨温度力在线监测系统 Web 页面，实现无缝线路钢轨温度力的在线监测。

1　检测原理

声弹性原理可描述为

$$t-t_1=B\cdot\sigma \tag{1}$$

式中：t 与 t_1 为固定声程内材料空载与应力荷载状态下超声波在该物体中的传播时间，s；B 为弹性物体的声弹性常数；σ 为和应力大小，Pa。

LCR 波以纵波斜入射的方式在被测物体中激励产生，换能器发射超声脉冲由有机玻璃进入被测物体内部，其激励和接收都遵循 Snell 定律

$$\frac{v_0}{\sin\theta_0}=\frac{v_l}{\sin\theta_l}=\frac{v_s}{\sin\theta_s} \tag{2}$$

式中：θ_0 为入射角，(°)；θ_l和 θ_s 分别为纵波和横波在钢轨中的折射角，(°)；v_0 为入射声速，m/s；v_l 和 v_s 分别为纵波和横波在钢轨中的声速，m/s。LCR 波检测原理如图 1 所示。

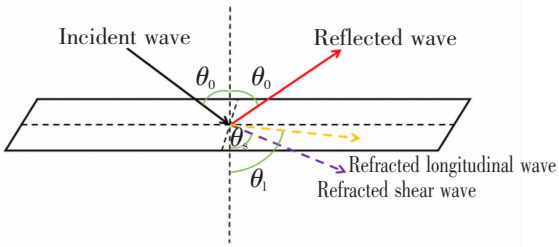

图 1　临界折射纵波原理示意图

Fig.1　Schematic diagram of critical refraction P-wave principle

由 Snell 定理知，超声波由波速较慢的介质传播到波速较快的介质中时，折射角大于入射角即 $\theta_l>\theta_s>\theta_0$。随着 θ_0 的逐渐增大，θ_l 和 θ_s 会先后迫近 90°，其中 θ_l=90°时称为第一临界角，此时折射纵波平行于物体亚表面传播。第一临界角可由 Snell 定理计算：

$$\theta_{cr}=\arcsin\left(\frac{v_0}{v_l}\right) \tag{3}$$

由式(3)可知，纵波的入射角度由波的传播速

度决定,而超声纵波在物体中的传播速度可描述为

$$V_L=\sqrt{\frac{E}{\rho}}\sqrt{\frac{(1-u)}{(1+u)(1-2u)}} \tag{4}$$

式中:V_L 为波传播速度;E,ρ,u 分别为被测物体弹性模量,密度,泊松比。

由临界折射纵波检测原理及表1的材料物理参数可计算钢轨内部激励出LCR波角度 θ_{cr}=27.8°。

根据Mumaghan有限变形理论和应变能表达式,存在应力的固体中弹性波速度可以表达为

$$\rho_0 v^2=\lambda+2\mu+(2l+\lambda)\theta+(4m+4l+10\mu)\alpha \tag{5}$$

式中:ρ_0 为初始密度,kg/m^3;v 为质点在该方向的位移,m;λ,μ 为二阶弹性常数,也称Lame常数;l,m为三阶弹性常数的前两阶;α 为物体在该方向的应变分量;θ 为应变总和。

当应力分布与超声波传播方向相同时,该方向上的应变可表达为

$$\left.\begin{aligned}\alpha&=\varepsilon\\ \alpha_2&=\alpha_3=-u\varepsilon\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中:ε 为与 α 同向的应变;u 为泊松比;α_2,α_3 分别为相邻90°方向的应变分量。将式(6)代入式(5)中,可得

$$\rho_0 v^2=\lambda+2\mu+\left[4(\lambda+2\mu)+2(\mu+2\mathrm{m})+\sigma\mu\left(1+\frac{2l}{\lambda}\right)\right]\varepsilon \tag{7}$$

假设应力相对变化较小,则可由式(5)和式(7)计算出波速随轴向应变的相对变化

$$\frac{\mathrm{d}v_{11}/v^0_{11}}{\mathrm{d}\varepsilon}=2+\frac{\mu+2m+\sigma\mu\left(1+\frac{2l}{\lambda}\right)}{\lambda+2\mu}=k \tag{8}$$

式中:k 为声弹性常数,Pa;v^0_{11} 的上标0是零轴向应变时的声速,m/s。

对于各向同性材料,应变与应力的关系为

$$\varepsilon=\sigma/E \tag{9}$$

将式(9)代入式(8),可以得到应力与声速的关系为

$$\mathrm{d}\sigma_{11}=\frac{E}{k}\frac{\mathrm{d}v_{11}}{v^0_{11}} \tag{10}$$

式中:$\mathrm{d}v_{11}$ 为声波传播方向应力的变化量,MPa;E 为弹性模量,MPa。材料的弹性模量和声弹系数往往是固定的,应力的变化量和零轴向应力状态下的超声波声速变化量成正比。也就是说,在等距的条件下声波在物体中声速变化量等价于时间变化量。可将应力变化量与声波传播时间变化量之间的关系进一步描述为

$$\mathrm{d}\sigma_{11}=\frac{E}{k}\frac{\mathrm{d}t_{11}}{t^0_{11}} \tag{11}$$

式(11)描述了弹性材料中应力变化量与声波传播时间变化量的关系。式(11)可称为超声检测应力数学模型。钢轨是一种弹性、各向同性的结构材料,其材料参数见表1,可得 k=−2.51。将声弹性常数 k 代入式(7)即可得到钢轨温度应力与声时的关系,如图2所示。

表1 60 kg/m钢轨材料参数

Tab.1 Material parameters of 60 kg/m rail

Name	Symbol	Unit	Value
Elastic modulus	E	Pa	20.9×10^{10}
Poisson's ratio	u	Dimensionless	0.29
Density	ρ	kg/m^3	8.9×10^3
Lame constant	λ	Pa	11.58×10^{10}
Lame constant	μ	Pa	7.99×10^{10}
Murmaghan constant	t	Pa	-24.8×10^{10}
Murmaghan constant	m	Pa	-62.3×10^{10}

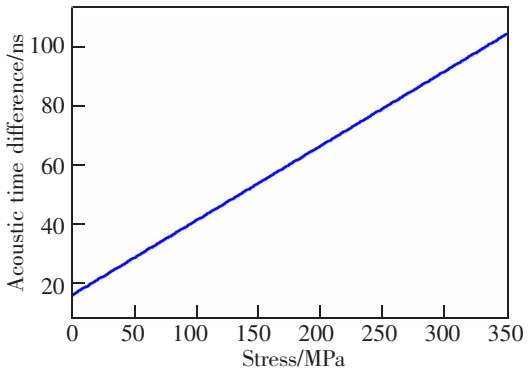

图2 钢轨应力–声时差关系图

Fig.2 Rail stress acoustic time difference diagram

2 标定实验

设计了标定实验对60钢试样残余应力进行标定。在室内恒温18 ℃下(锁定轨温)使用拉力测试机对长90 cm的60钢试样两端进行拉伸,模拟应力作用,在试样上固定一组28°的收发楔块安置超声发射及接收换能器,采集临界折射纵波信号,提取波峰作为特征值,观察随着试样拉应力逐渐增大临界折射纵波声时的变化。标定实验系统组成模块及参数如表2所示。将60钢轨试样使用夹具固定安装在拉力测试机上,检测基准信号如图3。

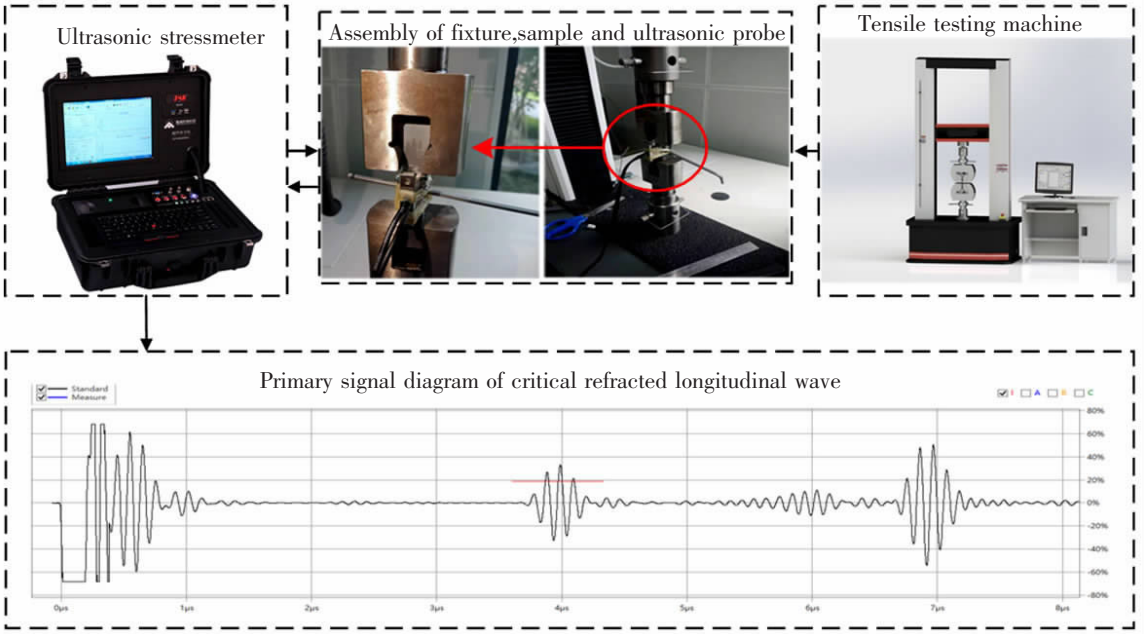

图 3　标定实验图

Fig.3　Calibration diagram

标定实验系统拉力为 0 时，将接收到的临界折射纵波信号设为基准信号，图 3 所示波形红色线标注部分为临界折射纵波信号，提取其波峰为特征值，该特征值即为排除残余应力干扰后得到的声时。

在拉力测试机拉力 0~95 MPa 内每 5 MPa 采集一次超声信号，共采集 20 个点的特征信号，使用线性拟合将图中 20 个点的数据拟合，得到应力声时关系图如图 4 所示，可知，该组数据与式(11)超声检测应力数学模型计算结果基本一致。

表 2　标定实验系统主要组成模块

Tab.2　The main modules of calibration experiment system

Module	Technical parameter
Tensile testing machine	Pull range: 10~50 kN Power accuracy: ≤0.8%
Ultrasonic stress meter	Measurement accuracy: ±1 MPa
Fixture	Maximum tensile force: 50 kN

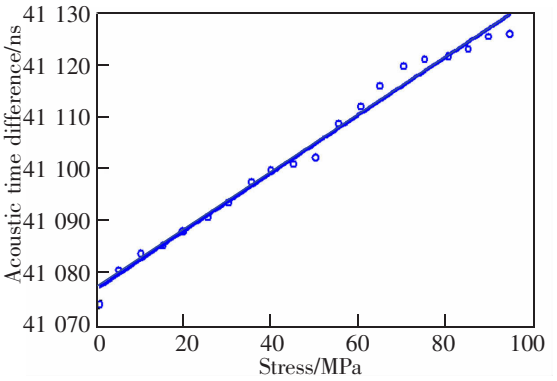

图 4　标定实验应力–声时关系图

Fig.4　Stress– acoustic time relation curve of calibration experiment

3　无缝线路温度力在线监测系统

3.1　系统硬件设计

搭建如图 5 所示的实验系统硬件设计，它由 5 MHz 超声探头、温度传感器、28°楔块、应力监测模块 USGNet、多通道数据采集器、工业路由器及终端显示设备等组成。

由图 5 可知系统的硬件组成，超声波发射及接收探头距离为 2 cm，安装在 28°的楔块上与温度传感器一样紧贴轨腰，应力监测模块 USGNet 每 2 min 向超声波探头发送一次脉冲信号，声波信号由楔块斜发射进入钢轨内部激励产生临界折射纵波信号，

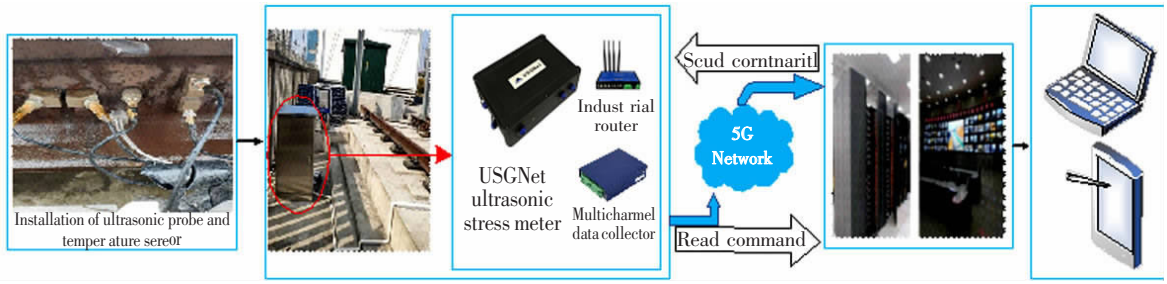

图 5 实验系统硬件组成

Fig.5 Hardware composition of experimental system

紧贴轨腰的温度传感器和接收探头将捕获的温度数据和超声信号回传至多通道数据采集器。工业路由器借由 5G 移动通讯网络将数据采集器的温度及声波数据发送至云端服务器。USGNet 超声应力仪、多通道数据采集器及工业路由器安装在防水密封箱内部。

服务器运行的 Java Web 后台程序从数据库中读取声波数据，提取数据特征值，与写入软件系统后台的标定实验拟合曲线进行比对，确定当前声时对应的应力值。抽取当前时刻的轨温数据与应力值对应，通过前端展示页面将该温度–应力值点在终端设备的温度–应力曲线上显示。

3.2 系统软件设计

无缝线路钢轨温度力在线监测系统软件依据需求分析，采用 Java Web 开发常用的 Spring 和 Mybatis 数据持久层框架，简化开发流程，实现系统的高内聚与低耦合，方便后期功能调整及扩展。系统流程图如图 6 所示。

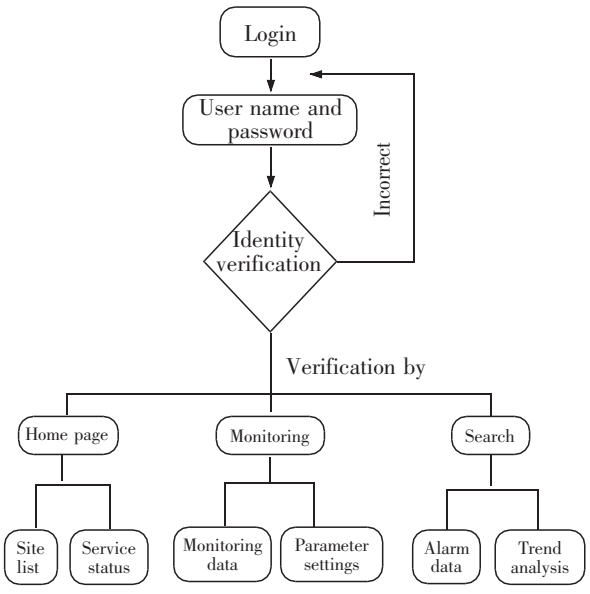

图 6 系统设计流程图

Fig.6 System design flow chart

系统分为 2 层结构，分别为表示层、服务层及持久层。表示层又称 Web 层，即客户端视图，使用前端开源框架 Bootstrap 辅助开发，主要文件包括HTML、JSP 和 CSS 等。表示层使用 Spring MVC 对代码进行解耦，方便后期系统升级及扩张，主要功能是在浏览端显示视图，接收服务器端的响应及基于 HTTP 协议向服务器端发送用户请求。登陆页面用户表单提交基于 Form 表单和 Servlet 完成前后端交互。

使用异步通信技术 Ajax 实现主界面监测数据的可视化。Ajax 通过与后台与服务器进行少量数据交换，即可在不重新加载整个网页的情况下对监测系统数据显示坐标轴部分定时进行更新。

监测模块还包括基准波形展示和监测系统参数设置等功能。同时在管理模块设置了运行日志查询、节点状态查询、用户信息查询等功能，用户可随时了解系统运行情况。

服务层是系统逻辑功能实现的支撑，利用 Spring 框架实现主要的业务逻辑，系统运行时，服务层接收来自表示层的用户请求，若需调用数据库中的数据则使用转发请求至持久层，持久层将操作数据库得到的数据发送给服务层，经服务层逻辑处理后对表示层的请求做出应答。

持久层也即 Dao 层，是系统与数据库交互的主要承担者，温度力在线监测系统使用免费的小型关系型数据库 MySQL 存储用户信息表、轨温表、声波数据表等数据。系统 Dao 层的实现依靠 Mybatis 框架，通过配置文件 Spring–Mybatis.xml 将 Spring 和 Mybatis 关联。

3.3 监测数据分析

将系统的软硬件进行集成开发，安装于华东区某高铁实训基地内，对 2020 年 11 月 24~26 日采集到的监测数据进行分析，绘制出温度–温度应力对应关系图，如图 7 所示。

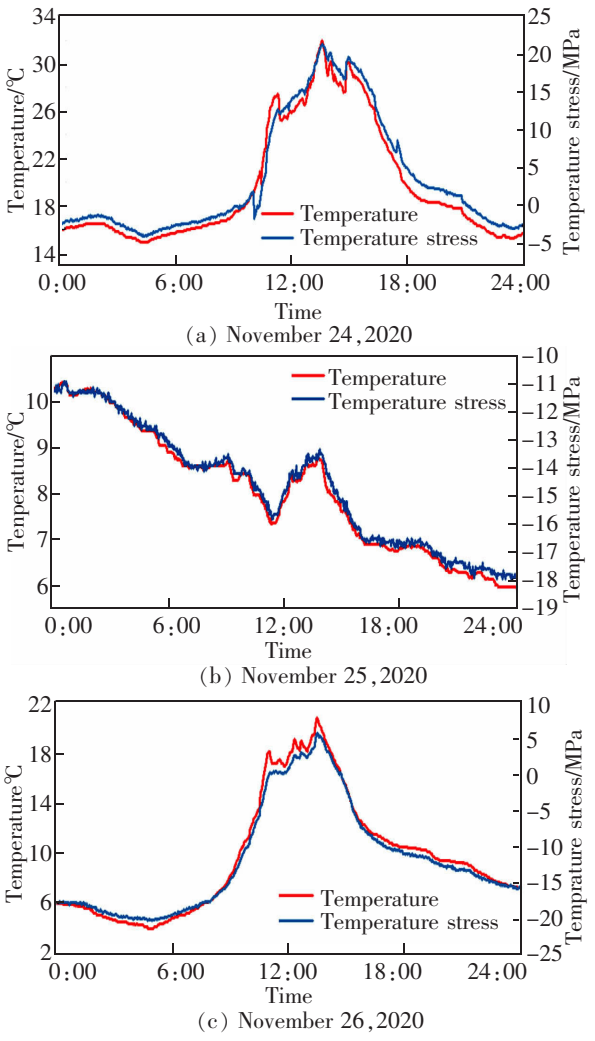

图 7　温度–温度应力变化关系图

Fig.7　Temperature temperature stress variation diagram

由图 7 可知，图 7(a)与图 7(c)中轨温在 13:00–14:00 时达到最大值，而后缓缓下降，图 7(b)为阴雨天气监测数据，当日轨温持续走低，在 3 组监测数据中，温度应力大小随着轨温变化而变化。

图 7(a)与图 7(c)两日温度与温度应力曲线先增后减，钢轨中的温度应力存在拉应力–压应力–拉应力的循环转换，而图 7(b)当日为阴雨天，轨温持续下降，钢轨中只存在压应力。温度与温度应力二者变化遵循标定实验结果，该监测系统能够真实、准确反应钢轨温度力的变化情况。

4　结论

通过建立超声波钢轨应力检测模型，研究了应力与超声波声速之间的对应关系，搭建了无缝线路钢轨温度力在线监测系统。

1）采用临界折射纵波法检测温度力，通过标定实验得到声时与应力对应关系，可以去除残余应力干扰，有效实现无缝线路钢轨温度力的精准测量。

2）基于应力监测模块 USGNet、多通道数据采集器、工业路由器等硬件设备及 SSM 框架的软件系统能够实现无缝线路钢轨温度力的远程实时监测。

3）对于临界折射纵波检测温度力的关键影响因素分析还不够全面，若大规模应用于生产实践，需要进一步进行深入的研究。

参考文献：

[1] 邸锦玉. 基于超声应力检测的钢轨锁定轨温测定[J]. 铁道建筑，2018，58(9)：106–108.
DI J Y. Determination of rail locking temperature based on ultrasonic stress detection[J]. Railway Construction，2018，58(9)：106–108.

[2] 贾昕昱，黎国清，刘秀波，等. 重载铁路钢轨疲劳裂纹萌生影响因素[J]. 中国铁道科学，2020，41(4)：40–47.
JIA X Y，LI G Q，LIU X B，et al. Heavy haul railway rail fatigue crack initiation influencing factors[J]. China Railway Science，2020，41(4)：40–47.

[3] 岳国军. 无缝线路钢轨实际锁定轨温超声法测量研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2021，34(2)：87–92.
YUE G J. Study on the ultrasonic measurement of the actual locked rail temperature of seamless rail[J]. Journal of Shijiazhuang Railway University(Natural Science Edition)，2021，34(2)：87–92.

[4] 许西宁，叶阳升，余祖俊，等. 基于声弹性效应的钢轨应力检测方法[J]. 北京交通大学学报，2015，39(4)：37–43.
XU X N，YE Y S，YU Z J，et al. The rail stress detection method based on acoustic elastic effect[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2015，39(4)：37–43.

[5] 王炳楷，孙文磊，王宏伟，等. 风力机叶片表面应变的光纤光栅检测方法研究[J]. 机械科学与技术，2021，40(11)：1741–1746.
WANG B K，SUN W L，WANG H W，et al. Research on fiber grating detection method of wind turbine blade surface strain[J]. Mechanical Science and Technology，2021，40(11)：1741–1746.

[6] 段凯锋，陈娟，李帅，等. 无缝线路温度应力的安全稳定性研究[J]. 电子测量技术，2020，43(22)：126–131.

DUAN K F,CHEN J,LI S,et al. Study on the safety and stability of temperature stress in seamless line[J]. Electronic Measurement Technology,2020,43(22):126-131.

[7] 傅洁,殷华宇,陈娟,等. 基于巴克豪森效应的钢轨应力检测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(5):403-408.
FU J,YIN H Y,CHEN J,et al. Design of rail stress detection system based on Barkhausen effect[J]. Journal of Electronic Measurement and Instruments,2013,27(5):403-408.

[8] 曾志平,徐榕,阮莹,等. 地铁大坡度道岔制动工况下钢轨表面接触应力变化规律研究[J]. 表面技术,2021,50(6):243-249.
ZENG Z P,XU R,RUAN Y,et al. Research on the variation law of rail surface contact stress under braking condition of subway large slope turnout[J]. Surface Technology,2021,50(6):243-249.

[9] 牛笑川,朱力强,余祖俊,等. 无缝钢轨中温度对应力非线性超声检测的影响[J]. 声学学报,2019,44(2):241-250.
NIU X C,ZHU L Q,YU Z J,et al. Effect of temperature in seamless rail on stress nonlinear ultrasonic testing[J]. Journal of Acoustics,2019,44(2):241-250.

[10] ZENG J,DRINKWATER B W,WILCOX P D. Effects of array transducer inconsistencies on total focusing method imaging performance[J]. NDT & E International,2011,44(4):361-368.

[11] 王骁,刘辉,祁欣,等. 巴克豪森噪讯无缝线路应力检测仪的研制及应用[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2010,37(3):123-126.
WANG X,LIU H,QI X,et al. Bakhausen noise seamless line stress detector development and application[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition),2010,37(3):123-126.

[12] 王聪,吴先梅,刘松,等. 温度应力作用下钢轨导波频散特性分析[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版),2019,47(6):51-58.
WANG C,WU X M,LIU S,et al. Analysis of guided wave dispersion characteristics of rail under temperature stress [J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition),2019,47(6):51-58.

[13] HE J,YUAN F G. Lamb wave-based subwavelength damage imaging using the DORT-MUSIC technique in metallic plates[J]. Structural Health Monitoring,2016,15(1):65-80.

[14] 高明昕,杨建,付丽华,等. 钢轨循环滚动接触过程残余应力-应变的变化规律研究[J]. 铁道学报,2018,40(11):147-153.
GAO M X,YANG J,FU L H,et al. Research on the variation law of residual stress-strain during rail cyclic rolling contact[J]. Journal of Railways,2018,40(11):147-153.

[15] 郭创,周玉博,邓展伟. 大温差作用下寒区路面温度应力行为研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(5):23-30.
GUO C,ZHOU Y B,DENG Z W. Research on pavement temperature stress behavior in cold region under large temperature difference[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(5):23-30.

[16] 张海燕,李加林,徐梦云. 多缺陷兰姆波拓扑成像[J]. 声学技术,2019,38(5):42-47.
ZHANG H Y,LI J L,XU M Y. Multi-defect lamb wave topology imaging[J]. Acoustic Technology,2019,38(5):42-47.

[17] 尹银艳. 铁路无缝线路极限状态法和容许应力法设计对比研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(5):65-69.
YIN Y Y. Comparative study on limit state method and allowable stress method design of railway seamless line[J]. Railway Standard Design,2021,65(5):65-69.

[18] 马晓川,刘林芽,冯青松,等. 铁路钢轨裂纹萌生的键型近场动力学预测模型[J]. 交通运输工程学报,2021,21(3):228-237.
MA X C,LIU L Y,FENG Q S,et al. Railway rail crack initiation bond near-field dynamics prediction model[J]. Journal of Transportation Engineering,2021,21(3):228-237.

[19] 张鹏飞,姚典,涂建,等. 双向温梯荷载下简支梁桥上CRTSⅡ型板受力变形[J]. 北京交通大学学报,2021,45(1):32-38.
ZHANG P F,YAO D,TU J,et al. The deformation of CRTS Ⅱ slab on simply supported beam bridge under bidirectional temperature gradient load[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2021,45(1):32-38.

[20] 刘艳,朱静,岳丽婕,等. 超长无缝钢轨零应力轨温实用测试方法[J]. 铁道学报,2004(2):56-59.
LIU Y,ZHU J,YUE L J,et al. Practical test method for zero stress rail temperature of ultra-long seamless rail[J]. Journal of Railways,2004(2):56-59.

[21] NUCERA C,FRANCESCO L D S . Nonlinear wave propa-

gation in constrained solids subjected to thermal loads[J]. Journal of Sound & Vibration,2014,333(2):541-554.

[22] 王嵘,余祖俊,朱力强,等. 基于导波多模态融合的无缝钢轨温度应力估计算法[J]. 铁道学报,2018,40(6):136-143.
WANG R,YU Z J,ZHU L Q,et al. The temperature stress estimation algorithm of seamless rail based on guided wave multi-modal fusion[J]. Railway Journal,2018,40(6):136-143.

[23] 彭小丹,丁杰雄. 利用 L_(CR)波监测长轨温度应力方法的研究[J]. 电子科技大学学报,2006(5):844-847.
PENG X D,DING J X. Study on the method of using L_(CR) wave to monitor the temperature stress of long rail [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology,2006(5):844-847.



第一作者:孙刘家(1996—),男,硕士研究生,研究方向为超声无损检测。E-mail:sunzhou20212021@163.com。



通信作者:李再帏(1983—),男,副教授,博士,硕士研究生导师,研究方向为轨道结构服役可靠性、铁路基础设施养护维修与在线监测理论。E-mail:zaiweili@sues.edu.cn。

(责任编辑:刘棉玲)