

便携式无缝线路应力均匀化调整装置设计与应用<sup>\*</sup>贺相林<sup>1</sup> 刘平<sup>1</sup> 路宏遥<sup>2,3</sup> 吴文涛<sup>3</sup>

(1. 国能朔黄铁路发展有限责任公司肃宁分公司, 062350, 河北;

2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 201804, 上海;

3. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海)

**摘要** [目的] 为了及时、准确地掌握无缝线路内部应力的分布情况,减轻无缝线路应力调整作业人力、物力的投入,有必要对无缝线路的应力调整问题进行研究。[方法] 介绍了无缝线路内部温度分布不均匀现象产生的原因,并结合红外热成像技术明确了其温度分布的特性;设计了一种便携式无缝线路应力均匀化调整装置,并将其应用于实际工程中。[结果及结论] 锁定轨温的随机差异、气象参数与材料的客观差异是导致无缝线路内部温度分布不均的原因;实际运营线路中,相邻扣件位置处存在温度差异,温度差值为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,致使钢轨局部产生 $2.77\text{ MPa}$ 的温度应力极差;便携式无缝线路应力均匀化调整装置可激发钢轨的最大加速度值为 $305.944\text{ m/s}^2$ ,钢轨纵向波动位移值为 $0.014\text{ mm}$ ,无缝线路内部应力因高频激振而获得有效释放。

**关键词** 无缝线路;应力均匀化;调整装置设计

**中图分类号** U213.9

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.12.017

## Design and Application of Portable Continuous Welded Rails Stress Homogenization Adjustment Device

HE Xianglin<sup>1</sup>, LIU Ping<sup>1</sup>, LU Hongyao<sup>2,3</sup>, WU Wentao<sup>3</sup>

(1. Suning Branch, Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd., 062350, Hebei, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, 201804, Shanghai, China; 3. School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] In order to timely and accurately grasp the internal stress distribution of continuous welded rails (CWR) and reduce the investment of manpower and material resources in CWR stress adjustment operations, it is necessary to study the issues of CWR stress adjustment. [Method] The causes for uneven temperature distribution in CWR are introduced, and the characteristics of temperature distribution in

CWR are clarified by combining infrared thermal imaging technology; a portable CWR stress homogenization adjustment device is designed and applied in actual projects. [Result & Conclusion] The random differences in locked rail temperature, and the objective differences in meteorological parameters and materials are the reasons for the uneven temperature distribution inside CWR. On the actual operating line, there is a temperature difference at the position of adjacent fasteners, with a temperature difference of  $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which causes a local temperature stress extreme difference of  $2.77\text{ MPa}$  in the steel rail. The portable CWR stress homogenization adjustment device can excite the maximum acceleration value of the rail to  $305.944\text{ m/s}^2$ , and control the longitudinal fluctuation displacement value of the rail to  $0.014\text{ mm}$ . The CWR internal stress is thus effectively released due to the high-frequency excitation.

**Key words** CWR; stress homogenization; adjustment device design

无缝线路因减少了钢轨之间的焊接接头,提高了列车运行时的平顺性与舒适度,目前被广泛运用于铁路建设领域<sup>[1]</sup>。由于不同区域的钢轨在锁定时存在温度差异,导致无缝线路将会不可避免地产生温度应力不均匀的问题。然而,由于扣压力的作用,使得无缝线路的钢轨无法自由地伸缩变形,局部位置存在伸缩不均、钢轨内部局部应力集中等现象<sup>[2]</sup>,这将为无缝线路作业带来一定的风险。因此,为了科学指导铁路无缝线路的养护维修,及时、准确地掌握无缝线路内部的应力分布情况,有必要对无缝线路的应力均匀化调整问题进行研究。

目前,钢轨温度力的检测方法难以适用于钢轨温度分布不均匀的情况,常见的温度力测量方法为人工轨温表检测,单点测量难以掌握全线温度力的分布情况。同时,通过轨温表对无缝线路进行轨温

<sup>\*</sup> 国能朔黄铁路发展有限责任公司科研项目(SHTL-21-02)

测量时存在精度较低、人为误差大等问题。现阶段国内外对于无缝线路内部应力不均匀的调整方法相对单一,通常使用滚筒撞轨法<sup>[3]</sup>。该方法会对钢轨产生较大的冲击力,容易造成钢轨损伤,且撞轨器较为笨重,拆卸较为不易,会消耗大量的人力。

鉴于此,本文针对无缝线路内部温度应力分布不均匀问题,设计了一种基于横向激振作用的便携式无缝线路应力均匀化调整装置。该装置既能减少撞轨器在撞轨过程中对钢轨造成的擦伤,还能提高应力放散的作业质量与效率,减少人工成本。

## 1 无缝线路内部温度分布不均特性

### 1.1 温度分布不均现象产生的原因

锁定轨温存在随机差异是无缝线路内部温度分布不均的原因之一<sup>[4]</sup>。在安装拧紧扣件的过程中,弹性垫层与弹条的安装均需要一定的人力和物力。随着施工时间的推移,钢轨周围环境温度也随之发生变化,这将导致钢轨锁定时的温度存在细微的随机差异,使相邻区段内的钢轨也产生温度差异。

气象参数与材料存在客观差异也将影响无缝线路内部的温度分布情况<sup>[5]</sup>,其中包括气象参数(如环境温度、太阳辐射量和风速等),以及材料的导热性能差异等因素。不同的气象条件必然导致无缝线路中不同位置所受到的能量辐射有所不同,进而使得局部区域产生温度差异。此外,无缝线路钢轨材料本身属性的差异也会导致温度传导方面存在客观差异。

### 1.2 现场钢轨温度测量

为了进一步明确无缝线路内部温度分布的特性,采用红外热像仪器对现场钢轨温度进行测量,所获得的相邻两个扣件之间的钢轨温度差异云图如图1所示。M1点位于钢轨顶面光亮带处,其温

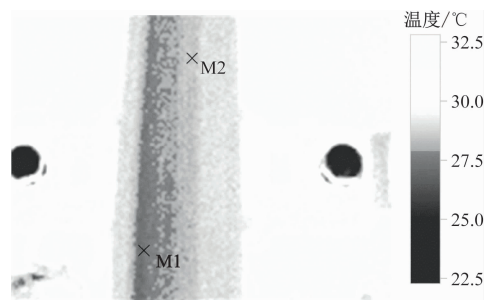


图1 相邻两个扣件之间的钢轨温度差异云图

Fig. 1 Nephogram of steel rail temperature difference between two adjacent fasteners

度值为 26.9℃;M2 点位于钢轨顶面边缘处,其温度值为 28.7℃。由现场监测的实际结果可知,在实际运营线路中,相邻扣件位置处存在温度差异,且温度差值达到了 1.8℃。

### 1.3 不均匀温差带来的问题

无缝线路钢轨内部温度应力  $\sigma$  可以表示为:

$$\sigma = E\alpha\Delta T \quad (1)$$

式中:

$E$ ——钢轨的弹性模量;

$\alpha$ ——钢轨的线膨胀系数;

$\Delta T$ ——钢轨温度差异。

由式(1)可知,温度差异会导致钢轨局部产生 2.77 MPa 的温度应力极差,出现钢轨应力分布不均匀的问题。无缝线路钢轨局部产生应力集中问题易导致轨道的几何形位及纵、横向位移发生偏差,影响线路的平顺性和列车的运行安全,同时还会增加养护维修的工作量。

## 2 便携式无缝线路应力均匀化调整装置设计

### 2.1 设计思路

轨道交通线路设计中普遍存在“高运量、大坡道”的特点,导致线路应力集中或应力不均匀现象频发,从而使得其应力调整作业呈现出地点多、频率高的问题。传统应力均匀化装置的体积和质量相对较大,在作业过程中人工搬运困难,使得应力调整作业综合成本高,且存在一定的施工安全隐患。因此,便携式无缝线路应力均匀化调整装置的设计不仅需实现装置便捷化、轻量化,还需考虑工作时稳定振动的输出、对应钢轨型号的适配问题,以满足在现场操作简单、高效施工的要求。同时,该调整装置需适配相应的工作电源,满足“轻质量、高质量”的要求,减小人力、物力的投入,降低安全隐患。

振动应力均匀化是一种通过振动作用来使钢轨内部的残余应力降低并逐步均匀化的方法<sup>[6]</sup>。在钢轨轨颏位置施加合理频率的横向激振力,实现在温度应力集中位置处首先发生局部的钢轨纵向伸缩变形,继而过渡至扣件松开区段均匀发生纵向位移与应变。通过区段内的激振作用,实现钢轨内部不均匀温度应力的重新分布,达到无缝线路应力均匀化调整的工程需求。

## 2.2 调整装置设计与研发

无缝线路应力均匀化调整装置主体结构包括

激振器、夹持装置及供电装置三部分,其示意图如图 2 所示。

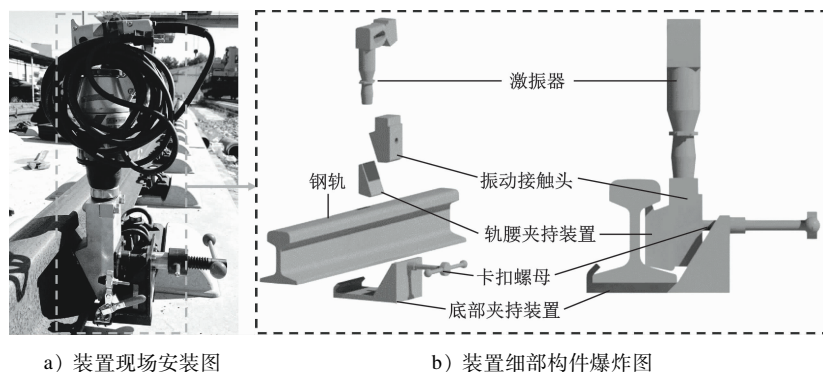


图 2 无缝线路应力均匀化调整装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of CWR stress homogenization adjustment device

激振器主要用于提供周期性横向激振力的作用,促使钢轨在应力集中处产生塑性变形,以实现应力均匀化的目的。为了达到较好的激振效果,需将激振装置贴合至钢轨轨颚处,由此,需设计一种激振器与钢轨紧密贴合的夹持装置。

结合钢轨的不均匀截面特点,为避免激振器端部接触部件因高频、长时间工作而损伤,同时确保激振装置能与钢轨有效紧密贴合,设计激振器夹持工装。根据钢轨几何形位轮廓设计钢轨轨底夹持工具,其底部卡槽形状与钢轨轮廓相匹配,可直接将底座固定在钢轨轨底处,并通过扣压杆稳固放置夹持工具。为实现装置的激振力可以完整且稳定地传输至钢轨,设计激振器的保护接头,并使激振器能与钢轨轨腰紧密贴合,同时设计长杆螺栓、螺母推动激振器,使其与钢轨轨腰紧密贴合。为保证激振器的有效固定,在螺栓、螺母上安装卡扣螺帽,该设计不仅可确保夹持装置持续输出稳定夹持力,还可避免后期无缝线路应力均匀化调整装置因高频振动而发生松动。为适应野外长时间的实际应用场景,供电系统采用可拆卸锂电池组。

## 3 工程实际应用效果

### 3.1 应力调整作业流程优化

以应力调整作业的天窗工作顺序为例,通过作业前、作业中和作业后三部分作业内容,将无缝线路激振装置应用至现场的无缝线路应力调整工作中,并将原本安装撞轨器、滚筒滚杠等设备的工作任务更换为便捷化装置,提升了整体应力调整的工作效率。无缝线路内部温度应力调整流程示意图

如图 3 所示。

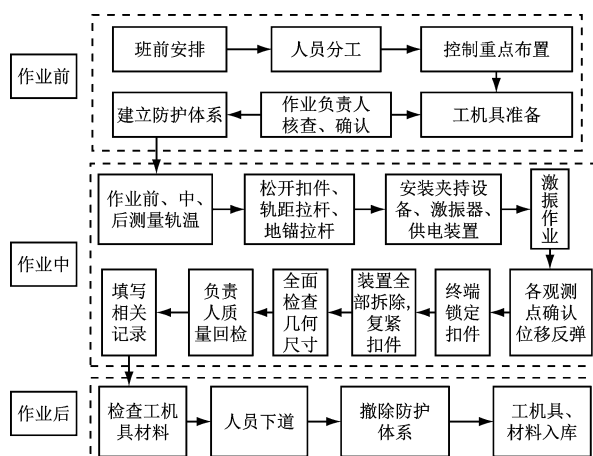


图 3 无缝线路内部温度应力调整流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of CWR internal temperature stress adjusting process

### 3.2 装置评价方案

为了科学地评价无缝线路应力均匀化调整装置的实际应用效果,基于两种参数进行综合评价<sup>[7]</sup>:通过所激发的加速度幅值等参数,评价激发能量的大小与传递情况;通过区段内钢轨的整体纵向位移变化情况,评价激振器所产生的横向激振力对无缝线路的钢轨塑性变形影响,以及应力均匀化效果。装置振动评价方案设计示意图如图 4 所示。

### 3.3 实际应用效果分析

选取某铁路试验线 50 m 区段开展无缝线路应力均匀化调整效果试验,扣件完成拆卸工作后,在振动激发处对钢轨施加横向激振,同步采集钢轨振动加速度与纵向位移的变化情况。激振过程中,钢轨振动加速度与钢轨纵向位移随测试时间的变化

情况,如图 5 所示。

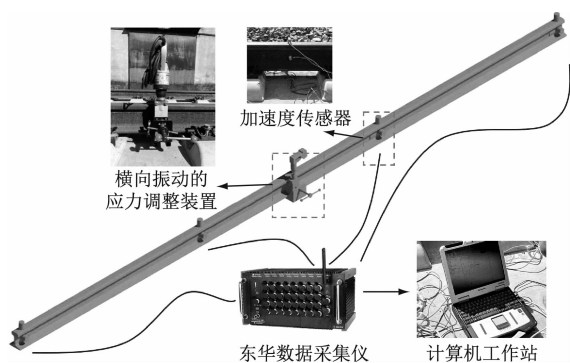


图 4 装置振动评价方案设计示意图

Fig. 4 Schematic diagram of device vibration evaluation scheme design

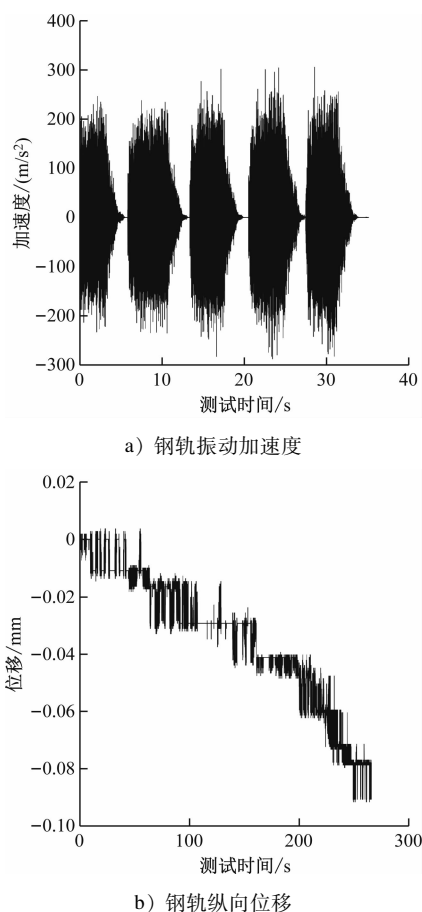


图 5 激振过程中钢轨振动加速度与钢轨纵向位移随测试时间的变化情况

Fig. 5 Changes in steel rail vibration acceleration and steel rail longitudinal displacement with test time during the excitation process

在横向振动激发端处,钢轨最大加速度为  $305.944 \text{ m/s}^2$ ;在单次振动装置激励过程中,钢轨纵向位移产生了  $0.014 \text{ mm}$  的波动,待一组激振应力

调整作业结束后,受激振区段的钢轨纵向位移为  $0.092 \text{ mm}$ 。由此可知,所设计的振动式无缝线路应力均匀化调整装置可实现内部局部应力的有效释放,通过高频振动力激发局部的钢轨纵向伸缩变形,进而逐步实现区段内的钢轨应力均匀化。

## 4 结语

本文设计了一种振动式无缝线路应力均匀化调整装置,通过横向激振作用实现无缝线路内部应力集中区域的应力均匀化,较传统无缝线路应力调整工艺更高效。主要获得以下几个结论:

1) 通过红外热成像仪对现场钢轨温度进行测量,获得相邻扣件处的钢轨温度差异,验证了无缝线路内部温度分布不均匀的客观事实。

2) 设计了一种便携式振动式无缝线路应力均匀化调整装置,通过区段内的钢轨激振作用,实现钢轨内部不均匀温度应力的重分布。

3) 现场测试结果表明,激振装置可提供有效的激振力,能够实现钢轨的纵向伸缩变形,进而实现区段内钢轨应力的均匀化调整,满足无缝线路应力调整作业的工程实际需求。

## 参考文献

- [1] 崔万里. 高速铁路无缝线路钢轨纵向应力与轨温监测系统研究[J]. 现代信息科技, 2023, 7(3): 168.  
CUI Wanli. Research on the monitoring system for rail longitudinal stress and rail temperature of jointless track in high-speed railway [J]. Modern Information Technology, 2023, 7(3): 168.
- [2] 宋瑞, 刘林芽, 秦佳良. 考虑钢轨轴向温度力的无砟轨道振动响应分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(12): 26.  
SONG Rui, LIU Linya, QIN Jialiang. Analysis of ballastless track vibration response influenced by rail axial temperature force [J]. Urban Mass Transit, 2019, 22(12): 26.
- [3] 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.  
DUAN Kaifeng, CHEN Juan, LI Shuai, et al. Research on safety and stability of temperature stress of CWR [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(22): 126.
- [4] 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.  
YUE Guojun. Research on ultrasonic measurement of actual stress-free temperature of continuously welded rail [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science Edition), 2021, 34(2): 87.

(下转第 112 页)

回风温度的差值,对空调系统的制冷能力进行调节,本文构建的机组回风温度预测模型的预测值也表现出相同的变化趋势,表明了 LSTM 神经网络模型能够学习地铁空调系统的数据特征,适用于预测地铁空调机组的回风温度。

2) 通过优化模型结构和训练参数,获得了预测精度较高的机组回风温度预测模型,将机组回风温度预测模型的预测精度提高至 0.843 7,表明了 LSTM 时序预测方法能够较为精准地预测一段时间内的地铁列车空调数据。

3) 增大样本个数在一定程度上能够缩短模型训练的时间,但最终的模型预测精度会有所降低。当样本个数从 1 增加至 2 时,其训练时间减少了约 54.4%,但其相关系数减小了约 6%。

## 参考文献

- [1] 李福韩,张登春. 地铁车厢内不同客流量的热环境特性及变化规律[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(6): 1546.  
LI Fuhuan, ZHANG Dengchun. Thermal environment characteristics and changing laws of different passenger flows in subway cars [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(6): 1546.
- [2] 张建平,李桐. 地铁列车车厢内不同气流形式下的舒适性[J]. 大连交通大学学报, 2020, 40(1): 39.  
ZHANG Jianping, LI Tong. Thermal comfort of subway train compartment with different airflow forms [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2020, 40(1): 39.
- [3] 方杰. 地铁热环境状态的神经网络预测与数值模拟分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.  
FANG Jie. Neural network prediction and numerical simulation a-

nalys of subway thermal environment [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.

- [4] 赵明珠,王丹,方杰,等. 基于 LSTM 神经网络的地铁车站温度预测[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(4): 94.  
ZHAO Mingzhu, WANG Dan, FANG Jie, et al. Prediction of subway station temperature based on LSTM neural network [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(4): 94.
- [5] 罗启崑,龙静,陈焕新,等. 基于数据挖掘算法的地铁站能耗时序预测方法[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(6): 23.  
LUO Qiyin, LONG Jing, CHEN Huanxin, et al. Time series prediction of subway station energy consumption based on data mining algorithm [J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(6): 23.
- [6] 朱恩文,朱安麒,王洁丹,等. 基于 EEMD-GA-BP 模型的风电功率短期预测研究[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(1): 166.  
ZHU Enwen, ZHU Anqi, WANG Jiedan, et al. Research on wind power short-term prediction based on EEMD-GA-BP model [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2022, 40(1): 166.
- [7] 刘茜阳,宋燕,张亚萌. 基于模糊 K 线的 FCLSTM-vSVR 模型的股票价格预测[J]. 智能计算机与应用, 2022, 12(4): 54.  
LIU Qianyang, SONG Yan, ZHANG Yameng. Stock price forecasting using FCLSTM-vSVR based on fuzzy Candlestick [J]. Intelligent Computer and Applications, 2022, 12(4): 54.

· 收稿日期:2022-07-15 修回日期:2022-08-19 出版日期:2024-12-10  
Received:2022-07-15 Revised:2022-08-19 Published:2024-12-10  
· 第一作者:杨阔,硕士研究生,2662569619@qq.com  
通信作者:陈焕新,教授,chenhuanxin@tsinghua.org.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

## (上接第 106 页)

- [5] 聂文成. 无缝线路应力放散及调整分析[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2014(6): 130.  
NIE Wencheng. Analysis of stress dissipation and adjustment of jointless track [J]. Management & Technology of SME, 2014(6): 130.
- [6] 余田,廖凯,李立君,等. 薄壁件表面应力松弛均化的时效分析与实验[J]. 振动测试与诊断, 2020, 40(2): 242.  
YU Tian, LIAO Kai, LI Lijun, et al. Aging analysis and experiment of stress relaxation and homogenization on the surface of thin-walled components [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(2): 242.
- [7] 郭磊. 无缝线路应力及稳定性检测评估方法方案的研究[D].

北京: 北京化工大学, 2016.

GUO Lei. Research on stress and stability detection and evaluation method and scheme for jointless track [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.

· 收稿日期:2024-01-14 修回日期:2024-01-19 出版日期:2024-12-10  
Received:2024-01-14 Revised:2024-01-19 Published:2024-12-10  
· 第一作者:贺相林,高级工程师,hexianglin65021@126.com  
通信作者:路宏遥,实验师,luhongyao1@163.com  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license