

# 普速铁路无缝线路锁定轨温变化规律研究

马占礼

邯济铁路有限责任公司, 中国·山东 聊城 252000

**摘要:** 文章围绕普速铁路无缝线路锁定轨温变化规律展开研究, 介绍了观测桩法、应力法、光纤传感监测法三种监测方法。分析发现, 锁定轨温随时间呈“快速下降—缓慢衰减—趋于稳定”趋势, 有夏季稳定、冬季波动的季节性特征, 且曲线、桥梁、隧道等不同地段变化存在差异。研究为无缝线路养护维修提供了参考, 有助于保障铁路运营安全。

**关键词:** 普速铁路; 无缝线路; 锁定轨温; 变化规律

## Research on the Variation Law of Locked Rail Temperature in Conventional-Speed Railway Seamless Track

Ma Zhanli

Handan-Jinan Railway Co., Ltd, China Shandong Liaocheng 252000

**Abstract:** This paper focuses on the variation law of locked rail temperature in conventional-speed railway seamless track. Three monitoring methods, namely the observation pile method, stress method, and optical fiber sensing monitoring method, are introduced. The analysis reveals that the locked rail temperature shows a trend of "rapid decline - slow attenuation - stabilization" over time, with seasonal characteristics of stability in summer and fluctuation in winter. Moreover, there are differences in the changes in different sections such as curves, bridges, and tunnels. The research provides a reference for the maintenance and repair of seamless tracks and helps ensure the safety of railway operations.

**Keywords:** Conventional-speed railway; Seamless track; Locked rail temperature; Variation law

### 0 引言

无缝线路是普速铁路的重要组成部分, 锁定轨温作为其核心参数, 直接决定钢轨温度力大小, 关乎运营安全。然而, 锁定轨温在运营中会受多种因素影响发生变化, 可能引发胀轨、断轨等事故。本文通过研究其监测方法, 分析随时间、季节及不同地段的变化规律, 旨在为线路养护提供依据, 保障铁路运输安全稳定。

### 1 锁定轨温变化规律的监测方法

#### 1.1 观测桩法

在普速铁路线路维护里, 位移观测桩至关重要。其设置依据线路类型而定, 跨区间与区间无缝线路, 按单元轨节等距离设桩, 桩间距离不大于 500m, 长轨条起、终点及距其 100m 处也需设桩; 普通无缝线路长轨条长度不同, 设桩数量和位置有别, 大于 1200m 时要适当增设且桩距不大于 500m; 无缝道岔和调节器也有特定设桩要求。

观测桩规格有标准, 用准直仪观测时, 有混凝土尺寸、钢筋预埋等细节规定。埋设要牢固, 位置有要求, 特殊情况有替代方案。相邻桩间距要丈量精准并填表记录。桩按列车运行方向编号, 包含管内区间、单元轨条等信息,

能清晰反映观测桩位置与初始位移量, 为准确监测无缝线路位移、保障线路稳定和铁路运行安全提供坚实依据。

根据《普速铁路线路修理规则》规定, 跨区间无缝线路、区间无缝线路按单元轨节等距离设置位移观测桩, 且桩间距离不宜大于 500m。单元轨节位移观测桩可按图 1 设置, 单元轨节长度不足 500m 整数倍时, 可适当调整桩间距离。

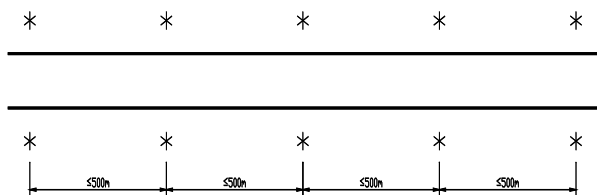


图1 单元轨节位移观测桩布置

跨区间无缝线路、区间无缝线路在长轨条起、终点及距起、终点 100m 处应分别设置一对位移观测桩。

普通无缝线路的长轨条长度不大于 1200m 时, 可按图 2 设置 5 对位移观测桩; 长轨条长度大于 1200m 时, 应适当增设位移观测桩且桩间距离不宜大于 500m。

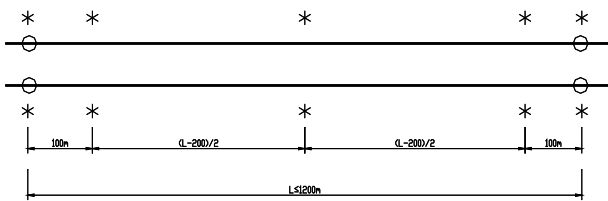


图2 普通无缝线路观测桩设置

无缝道岔宜按图 3 分别在道岔始端和终端、尖轨跟端（或限位器处）分别设置一对钢轨位移观测桩，18 号及以上的道岔宜在心轨处加设一对位移观测桩。

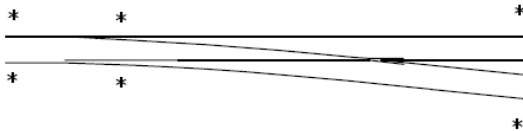


图3 无缝道岔位移观测桩布置

调节器宜按图 4 在尖轨尖端、基本轨始端、基本轨跟端设置 3 对位移观测桩，用于观测尖轨、基本轨位移。

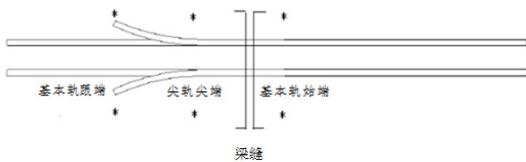


图4 调节器位移观测桩布置

位移观测桩必须预先埋设牢固，桥上位移观测桩应设置在固定端（调节器设置位移观测桩除外），内侧应距线路中心不小于 3.1m。在轨条就位或轨条拉伸到位后，应立即进行标记。标记应明显、耐久、可靠。

固定区位移量超过 10 mm 时，应及时上报工务段查明原因，及时处理。

无缝线路位移观测。每 6 个月不少于 1 次，原则上春、秋季各 1 次，进行影响无缝线路稳定的作业后，应及时进行观测。

### 1.2 普速线路观测桩设置原则

跨区间无缝线路、区间无缝线路单元轨条起止点及轨条内等距离设置位移观测桩，且桩间距离不宜大于 500m。单元轨节长度不足 500m 整数倍时，可适当调整桩间距离。

跨区间无缝线路、区间无缝线路在起、终点及距起、终点 100m 处应分别设置一对位移观测桩。

通无缝线路的长轨条长度小于 700m 时，起终点及距起、终点 100m 处应分别设置一对位移观测桩；不大于 1200m 时起终点，距起、终点 100m 处及中心位置设置 5 对位移观测桩；长轨条长度大于 1200m 时，应适当增设位移观测桩且桩间距离不宜大于 500m。

无缝道岔宜分别在道岔始端和终端、尖轨跟端（或限位器处）分别设置一对钢轨位移观测桩，18 号及以上的道岔宜在心轨处加设一对位移观测桩。岔间线长度小于 300m 时可不设观测桩，500m 时中间布设 1 对观测桩。

使用准直仪进行位移观测时，位移观测桩应采用混凝土预制或现场浇注，尺寸为 200\*200\*500mm（长\*宽\*高）。观测桩中心预埋长度 300mm  $\phi$  12mm 钢筋，并露出顶面 2-5mm，钢筋顶部锯深度不小于 1mm 的“+”字，“+”字横、竖宽度不大于 1mm，并涂红油漆标注。使用其它方式进行位移观测时，位移观测桩可采取其它样式，具体由维修段单独说明。

位移观测桩必须埋设牢固，桩顶高出路肩不宜超过 50mm，严禁随意挪动。特殊情况无法埋设的，必须选用牢固、永久标志物替代。

相邻观测桩间的距离要丈量准确，并填写《无缝线路（道岔）位移观测桩统计表》。

观测桩按列车运行方向（单线顺里程方向）顺序编号，编号为“x-y-z-a”。x 为管内区间、站内编号（具体编号见附件 9），y 为单元轨条编号，z 为该单元轨节条的观测桩编号，a 为该观测桩的初始位移量。

### 1.3 应力法

应力法作为直接测量钢轨内部温度应力的监测手段，其技术核心在于建立应力与锁定轨温的定量关联。其理论基础源于材料力学中的热弹性原理，即温度应力与轨温变化呈线性关系，公式表达为：温度应力 = 钢轨弹性模量  $\times$  线膨胀系数  $\times$ （实际轨温 - 锁定轨温）。在这一公式中，钢轨弹性模量取 210GPa（针对 60kg/m 钢轨），线膨胀系数采用  $11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  的行业标准值，通过测量实际轨温与温度应力的数值，可直接反推出锁定轨温。这种直接关联使得应力法能够绕过钢轨位移监测中的间接换算环节，从力学本质上反映无缝线路的应力状态<sup>[1]</sup>。

在设备选型与安装方面，应力传感器的选择需满足铁路环境的严苛要求。目前应用较广的有电阻应变片式传感器、压电式传感器和光纤光栅应力传感器。电阻应变片式传感器通过金属箔片的电阻变化感知应变，再换算为应力，其灵敏度可达  $1 \mu \epsilon$ （微应变）对应 1.2MPa 应力；压电式传感器利用晶体压电效应输出电荷信号，适用于动态应力监测；光纤光栅传感器则通过光栅反射波长的偏移量计算应力，抗干扰能力更强。

### 1.4 光纤传感监测法

光纤传感监测法是近年来在铁路工程领域快速发展的

新型监测技术,其核心是利用光纤的光学特性与力学参数的耦合关系实现对钢轨应变的高精度感知,进而推导锁定轨温的变化。该技术突破了传统点式监测的局限,通过分布式测量实现对无缝线路的全域监测,其技术原理基于两种关键光学效应:光弹效应是指光纤在应力作用下折射率发生变化,导致传输光的相位产生偏移,通过相位解调可换算出应变大小;布里渊散射则是光与光纤中的声波相互作用产生的频率偏移现象,散射光频率与光纤应变呈线性关系(灵敏度约为 $1\text{MHz}/\mu\epsilon$ ),通过追踪频率偏移量可实现长距离应变监测<sup>[9]</sup>。

数据处理系统作为整个监测系统的“智慧大脑”,承担着对解调单元提取的信息进行进一步处理和分析的重要任务。它运用预先设定的算法和模型,将解调得到的相位或频率变化信息换算为轨道的应变值和锁定轨温。通过实时监测轨道的应变变化,能够及时发现轨道的微小损伤和变形,为轨道的维护和修复提供科学依据;准确掌握锁定轨温则有助于合理安排轨道的养护作业时间,确保轨道在不同温度条件下的稳定性。同时,数据处理系统还具备数据存储、分析和预警功能,能够对历史监测数据进行长期保存和分析,为轨道的健康评估和寿命预测提供数据支持;当监测数据超出预设的安全阈值时,系统能够及时发出预警信号,提醒相关人员采取相应的措施,保障轨道的安全运行。

## 2 普速铁路无缝线路锁定轨温变化规律分析

### 2.1 锁定轨温随时间的变化趋势

锁定轨温随时间变化是无缝线路应力状态演化的直接体现。对公司管内5-10年监测数据显示,其变化呈“快速下降—缓慢衰减—趋于稳定”的阶段特征<sup>[9]</sup>。

初期(0-3年)下降最显著,年降幅 $1.5\sim 2.5^\circ\text{C}$ ,重载区段达 $3^\circ\text{C}/\text{年}$ 。如华北某线铁路K120+000-K125+000段,3年累计降 $5.6^\circ\text{C}$ 。此阶段因新钢轨受列车反复碾压(日均总重 $20\sim 30\text{Mt}\cdot\text{km}$ ),轨头表层金属塑性流动,呈现“碾长”特征(每公里轨头宽增 $0.3\sim 0.5\text{mm}$ ),残余伸长致锁定轨温降低。塑性变形占总降幅 $60\%\sim 70\%$ ,前3个月更占初期 $30\%\sim 40\%$ ,因新轨表面粗糙( $R_a=12.5\sim 25\mu\text{m}$ ),轮轨接触面积小、应力集中( $800\sim 1000\text{MPa}$ ),加速变形。中期(3-10年)下降放缓,年降幅 $0.5\sim 1.0^\circ\text{C}$ 且逐年递减。上述华北铁路4-7年年降幅 $0.9^\circ\text{C}$ 、 $0.7^\circ\text{C}$ 、 $0.5^\circ\text{C}$ 、 $0.4^\circ\text{C}$ ,累计降幅约为初期 $1/3$ 。因轨头形成 $2\sim 3\text{mm}$ 硬化层(硬度从 $230\text{HV}$ 升至 $300\sim 350\text{HV}$ ),道床纵向阻力从 $8\sim 10\text{kN/m}$ 提至 $12\sim 15\text{kN/m}$ ,约束增强。但

频繁大修会打破趋势,清筛使道床阻力降至 $6\sim 8\text{kN/m}$ ,致锁定轨温骤降 $1\sim 2^\circ\text{C}$ 。后期(10年以上)变化平缓,年降幅 $< 0.3^\circ\text{C}$ ,部分区段稳定在 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 。钢轨塑性变形停止,道床纵向阻力波动 $< 10\%$ ,扣件扣压力保持 $8\sim 10\text{kN}$ 。运营10年累计降 $5\sim 8^\circ\text{C}$ ,与温度应力疲劳累积地域差异相关。

### 2.2 锁定轨温变化的季节性特征

锁定轨温的季节性波动是温度应力与轨道结构动态响应共同作用的结果,与大气温度周期性变化密切相关,受钢轨热胀冷缩、道床约束能力及列车荷载分布等因素影响,呈现夏季稳定、冬季波动的特征<sup>[4]</sup>。

夏季锁定轨温相对稳定。大气温度超 $25^\circ\text{C}$ 时,钢轨温度午后达峰(高于气温 $15\sim 20^\circ\text{C}$ ),内部温度压力达 $300\sim 400\text{MPa}$ 。此时轨道结构热稳定:道床干燥疏松,纵向阻力 $12\sim 15\text{kN/m}$ ,波动仅 $5\%\sim 8\%$ ;扣件扣压力受温度影响小(弹条应力变化率 $< 3\%$ ),有效约束钢轨位移。高温使钢轨“压紧”,抑制塑性变形,应力分布均匀,月变化幅度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 以内。短期热浪中,因轨道热惯性(钢轨温度滞后气温 $2\sim 3$ 小时),锁定轨温仅缓慢微降(每周 $< 0.3^\circ\text{C}$ )。冬季锁定轨温变化活跃。大气温度低于 $5^\circ\text{C}$ ,钢轨温度下降,内部产生温度拉力(极端低温达 $-250$ 至 $-300\text{MPa}$ )。钢轨受拉力有收缩趋势,拉力超道床与扣件约束力时,会发生纵向收缩变形(单日 $0.1\sim 0.3\text{mm/m}$ ),导致锁定轨温降低。低温使道床性能改变:负温下碎石道床因冻融产生冻结力,纵向阻力较夏季升 $15\%\sim 20\%$ (达 $14\sim 18\text{kN/m}$ ),但呈脆性,拉力超临界值时阻力骤降 $30\%\sim 40\%$ ,引发钢轨“骤缩”。且冬季钢轨脆性增加(冲击韧性降 $20\%\sim 30\%$ ),列车冲击更易引发塑性变形,加剧波动。冬季变化幅度是夏季的 $3\sim 5$ 倍,寒潮期间单周变化占冬季总变化的 $20\%\sim 30\%$ 。春秋为过渡阶段。春季(3-5月)气温回升,钢轨应力从拉转压,道床解冻,纵向阻力回落,锁定轨温月变 $0.5\sim 1.0^\circ\text{C}$ ,呈小幅回升。秋季(9-11月)气温下降,钢轨应力从压转拉,道床阻力因秋雨降 $10\%\sim 15\%$ ,锁定轨温波动加剧,月变化从 $0.5^\circ\text{C}$ 增至 $1.0^\circ\text{C}$ 以上。

### 2.3 不同地段锁定轨温变化的差异

不同地段的无缝线路锁定轨温变化存在显著差异,这种差异是地形条件、结构特性与运营环境共同作用的结果。曲线地段的锁定轨温变化幅度明显大于直线地段,这源于列车通过曲线时产生的复杂力学效应:列车行驶过程中会产生离心力,为平衡这种力量,曲线轨道设置了超高,导致内外轨承受的竖向荷载分配不均,外轨荷载通常比内轨

高出 30%–50%。同时, 轮轨接触产生的横向力(横向力系数可达 0.2–0.3, 远高于直线段的 0.1 以下)使钢轨有向曲线外侧移动的趋势, 这种横向位移会带动钢轨纵向产生附加塑性变形。外轨因持续承受较大横向挤压力, 轨头侧面磨损量是直线段的 2–3 倍, 伴随磨损产生的金属塑性流动进一步加快了外轨锁定轨温的下降, 其下降速率比内轨快 10%–15%。从轨道约束来看, 曲线地段道床容易出现不均匀密实, 外轨道床因横向挤压密实度升高但纵向阻力下降 10%–15%, 内轨道床则因荷载较小密实度不足, 纵向阻力比直线段低 15%–20%, 这种不对称性使曲线钢轨更易发生纵向爬行(年爬行量可达 5–10mm, 直线段通常小于 3mm), 进一步加剧了锁定轨温的波动, 其中小半径曲线( $R \leq 600\text{m}$ )的年变化幅度可达 4–6℃, 大半径曲线( $R \geq 1000\text{m}$ )则接近直线段<sup>[5]</sup>。

桥梁地段的锁定轨温变化因梁体与钢轨的温度场差异而更为复杂, 桥梁结构与路基的热传导特性存在本质区别: 混凝土梁体的导热系数仅为路基土体的 60%–70%, 导致梁体温度变化滞后于大气温度 4–6 小时, 而钢轨直接暴露于大气中, 温度响应速度比梁体快 2–3 倍, 这种响应差会产生梁轨相对位移(伸缩量可达 10–30mm/100m 梁长), 引发附加应力。不同梁体材料的影响进一步凸显差异, 钢结构梁的线膨胀系数与钢轨接近, 梁轨相对位移较小, 锁定轨温年变化幅度比路基段高 5%–10%; 混凝土梁的线膨胀系数与钢轨差异较大, 且梁体温度梯度显著(夏

季顶面与底面温差可达 10–15℃), 导致梁轨相对位移达 15–30mm, 附加应力使锁定轨温年变化幅度比路基段高 20%–30%(可达 5–7℃)。

### 3 结语

文章探究了普速铁路无缝线路锁定轨温的变化规律, 分析了观测桩法、应力法、光纤传感监测法的特点, 揭示了其随时间、季节及不同地段的变化特征。研究表明, 锁定轨温变化受多种因素影响, 需针对性采取措施。未来可结合新技术提升监测精度, 深化变化机理研究, 为无缝线路养护维修提供更科学依据, 以保障普速铁路安全高效运营, 推动铁路轨道技术持续发展。

### 参考文献:

- [1] 伍丽泉, 曾鹏, 郭晓薇. 广西不同下垫面轨温对比及其与气象条件的关系研究[J]. 气象与环境科学, 2024,47(03):30–37.
- [2] 于广涛. 高速铁路无缝道岔天窗点内应力放散施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024,53(06):150–154.
- [3] 刘超. 铁路无缝线路应力放散与锁定技术研究[J]. 工程机械与维修, 2024,(02):7–9.
- [4] 田常海, 张金, 俞喆, 李闯, 梁旭, 林云蕾. 普速铁路钢轨伤损的分布规律[J]. 铁道建筑, 2020,60(07):115–117.
- [5] 刘磊. 普速铁路无缝线路钢轨折断工务应急处置措施探讨[J]. 铁路工程技术与经济, 2020,35(02):59–62.