

基于监测数据的铁路钢桁梁车致支座位移响应分析

韩乃杰

(河北交通投资集团有限公司,河北 石家庄 050043)

摘要: 为了分析采用温度-位移关系模型来评估活动支座滑移性能的局限性,开展了列车作用下铁路钢桁梁支座位移响应特征的研究。基于桥梁健康监测系统,对比了温度和列车综合作用下某钢桁梁 1#~3# 支座位移响应的差异,并分析了产生差异的原因;针对受列车影响显著的 3# 支座,建立了位移响应特征与列车作用工况的映射关系,提出了一种可以基于车致支座位移来识别支座滑移状态是否异常的方法。研究表明:列车荷载破坏了温度与 3# 支座位移的滞回路径,难以利用温度-位移模型来评估 3# 活动支座的滑移状态;由列车荷载引起的 3# 支座位移响应特征可分为 4 种类型,并且有唯一的列车荷载工况与之对应;3# 支座位移终态在一个区间范围内往复振荡,该振荡区间的长度可用于活动支座滑移状态是否异常的判别,也为桥梁活动支座滑移状态的评估提供了一种新思路。

关键词: 铁路钢桁梁;列车荷载;健康监测;支座位移;支座摩阻力;状态识别

中图分类号: U443.36

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)11-0260-05

0 引言

在桥梁健康监测领域中,温度与桥梁纵向位移的关系(Temperature-Displacement Relationship, TDR)是用于评估桥梁纵向变形状态的重要工具^[1-8]。文献[3-5]利用温度-梁端位移线性模型开展了伸缩缝性能预警研究。文献[6-8]考虑了活动支座摩阻力对支座位移的影响,利用支座位移-温度滞回路径来评估活动支座的滑移工作性能。文献[9]分析了支座位移与温度的时滞效应,提出了基于非线性时变系数回归模型的支座纵向位移精细模拟方法。在监测数据质量有保证的前提下,采用 TDR 模型来评估活动支座滑移工作状态的可靠性取决于支座位移数据与温度数据的相关性。然而一些监测数据表明,大跨铁路桥梁在温度正常缓慢变化的情况下,支座位移响应存在显著的突变特征^[10-12],此类响应与温度的变化并不存在相关性,这对基于 TDR 模型的活动支座评估结果准确性造成了一定的影响。

支座位移突变响应可能是由传感器故障、系统噪声、外界荷载(列车、风等)引起的。通常情况下,传

感器故障引起的突变需要更换故障传感器,以确保数据采集的准确性;对于微小的系统噪声,可以采用滤波平滑处理的方法来提升数据质量;但由外界荷载引起的支座位移突变处理方法还未有深入分析。不同原因引起的位移突变应该采取不同的分析方法和处理措施,这需要对突变响应产生的原因及支座位移突变响应特征作进一步的分析,以确定评估活动支座滑移状态的方法,提高诊断的准确性和可靠性。

本文以某大跨高速铁路桥梁活动支座在列车作用下的支座位移响应特征为研究内容,分析了不同位置的支座位移响应存在差异的原因,建立了列车行驶方向与支座位移响应特征之间的映射关系。研究结果表明:由列车作用引起的支座位移突变会破坏支座位移-温度滞回路径;支座位移突变响应需要结合前后两次列车通行方向进行分析;还有,由列车作用引起的支座位移响应会在一定程度上改变活动支座摩阻力,在这种情况下虽然难以保证基于 TDR 活动支座评估方法的可靠性,但是由列车作用引起的支座位移振荡区间长度仍然能够为支座滑移状态的评估提供依据。

1 工程概况

某高速铁路连续钢桁梁为双向 6 线铁路(包含 2 条城市轨道交通线路),总体为 6 跨对称钢桁梁拱桥结构体系,最大跨度为 336 m。横截面为三桁架结构,拱桥

收稿日期:2024-01-23

基金项目:河北省重点研发计划(19210804D);河北省自然科学基金创新研究群体项目(E2021210099)

作者简介:韩乃杰(1988—),男,博士,工程师,从事桥梁结构健康监测研究工作。

吊杆为刚性吊杆,全桥共 7 组支座,其中 4# 墩支座为固定支座,其余 6 组墩顶支座为纵向活动支座(见图 1)。活动支座采用球形钢支座,以不锈钢面板与平面四氟滑板的接触平面作为支座的滑移面(见图 2)。活动支座均安装了纵向位移计,采样频率为 1 Hz。另外,在 3#、5# 墩桥面位置安装了行车监测仪,能够记录列车通过桥梁的时间和方向。

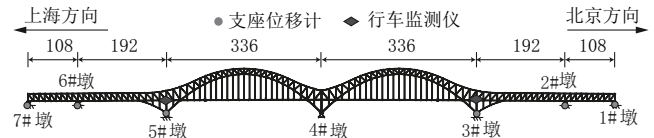


图 1 桥梁健康监测系统(单位:m)

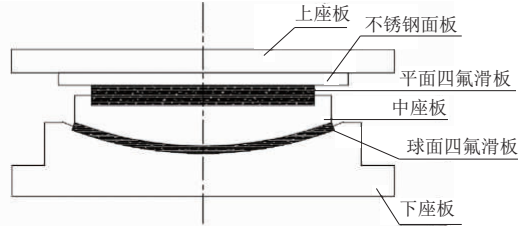


图 2 球形钢支座构造图

2 支座位移响应特征差异性分析

对北京侧半结构支座位移展开分析,1#~3# 墩上下游两侧 480 h 内的平均支座位移见图 3。

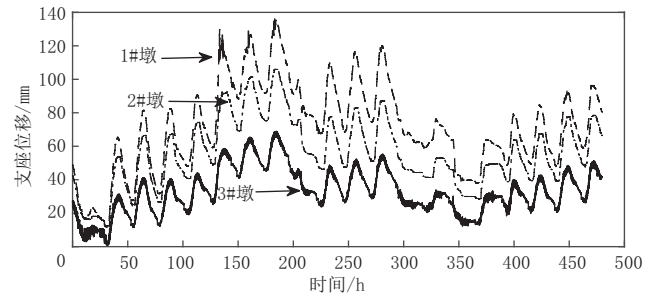
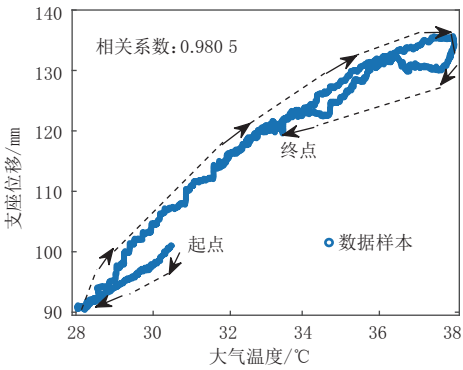


图 3 北京侧平均支座位移时程曲线(480 h)

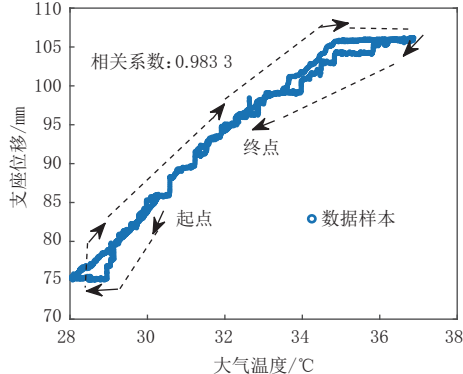
总体看来,3 个支座的平均位移受温度影响显著,时程曲线总体呈正弦式变化趋势,但 1# 墩和 2# 墩位移变化曲线相对光滑,3# 墩位移变化曲线较为粗糙,与 1# 墩和 2# 墩的支座位移显著不同。

取 24 h 内的平均支座位移和大气温度监测数据,对比分析不同支座的位移与温度滞回路径,结果见图 4。

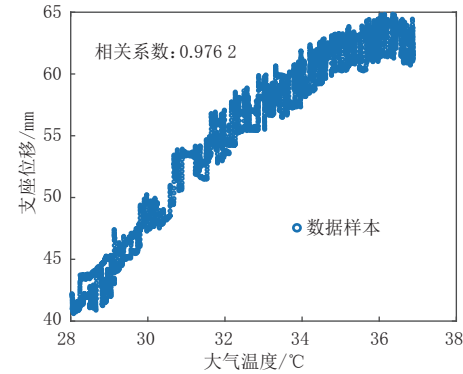
由图 4 可知,1# 墩、2# 墩支座位移与温度的相关性较高,且位移数据随着温度变化的滞回路径清晰,呈现出较强的“环形”特征,运用 TDR 方法来评估支座工作状态具有可行性;对比之下,3# 墩支座位移与温度的相关性较差,且位移数据随温度变化的滞回路径较为紊乱,根据监测数据无法建立清晰的温度-位移数学关系,表明 TDR 方法不适用于 3#



(a) 1# 墩活动支座



(b) 2# 墩活动支座



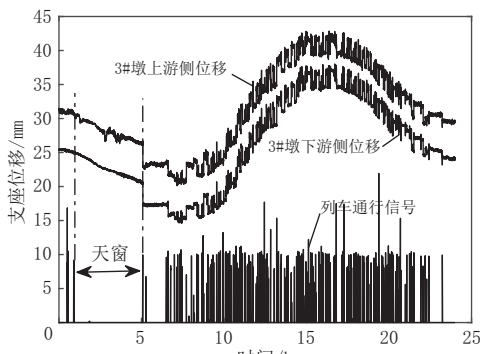
(c) 3# 墩活动支座

图 4 支座位移与温度的滞回路径(24 h)

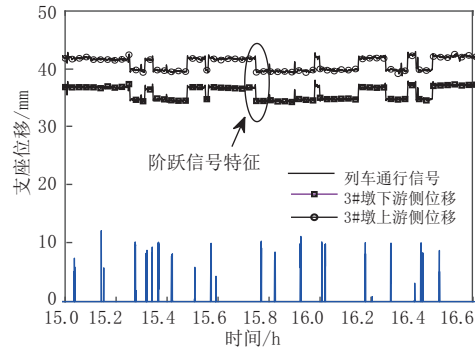
墩的支座工作状态评估。

列车荷载对 3# 墩支座位移的影响见图 5。

以 24 h 内的监测数据为例,进一步分析 3# 墩支座位移路径紊乱原因。由图 5(a)可见,3# 墩支座位移总体呈正弦波动,符合 1 d 内温度的变化趋势,表明 3# 墩支座位移监测数据能够客观地反映温度对支座位移的作用;在天窗期内(见图 5(a))和列车通行桥梁的间歇内(见图 5(b)),3# 墩支座位移监测数据变化平稳,未出现显著突变和剧烈波动;仅在列车通行桥梁的时刻,3# 墩支座位移监测数据才发生显著突变。以上表明列车作用是引起 3# 墩支座位移监测数据产生显著突变的原因,并且在无列车作用时,3# 墩支座位移监测数据的质量是有保证的。因此可以推断出 3# 墩支座位移传感器工作性能良好,监测



(a) 24 h 内支座位移响应特征



(b) 2 h 内支座位移响应特征

图 5 列车荷载对 3# 墩支座位移的影响

数据可信,列车通过桥梁对应时刻的监测数据能够较为真实地反映列车对支座位移的作用规律。

3 列车作用与支座位移响应之间的规律

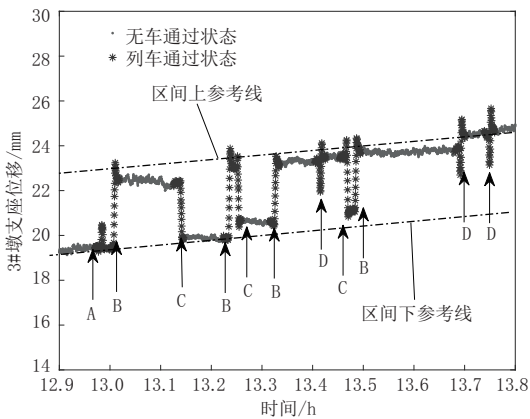
3# 墩支座位移受列车影响最为显著,故重点开展 3# 墩支座位移响应规律的分析。按照前后相邻两次列车的行驶方向定义列车作用工况(见表 1),表中“本次列车”为当前支座位移突变时刻通行的列车,“前次列车”为本次列车前一班次通行的列车。每班次列车仅可能为上行和下行两种行车方向,本次列车行车方向与前次列车行车方向两两组合,一共组成 4 种列车作用工况。工况 A、工况 D 前后两次列车行车方向相同;工况 B、工况 C 前后两次列车行车方向相反。

表 1 列车作用工况分类

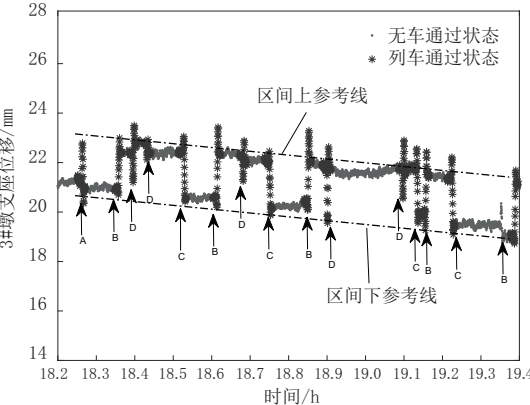
行车工况		本次列车行车方向	
		上海→北京	北京→上海
前次列车 行车方向	上海→北京	工况 A	工况 B
	北京→上海	工况 C	工况 D

按照行车监测记录,标记出 1 d 内各工况对应的支座位移突变过程。不同列车作用工况下的支座位移突变见图 6。

由图 6 可知,相同行车工况对应的相同支座位移突变特征为:工况 A、工况 D 作用后,尽管出现支



(a) 升温时间段



(b) 降温时间段

图 6 不同列车作用工况下的支座位移突变

座位移突变,但支座位移状态前后并未发生改变;但工况 B、工况 C 作用后,支座位移前后状态发生了显著改变。此外,工况 B、工况 C 作用后的支座位移最终状态被限制在一个区间之内,区间的上参考线与区间下参考线基本平行,表明区间的大小较为稳定。同时该区间上下参考线斜率与温度变化存在一定的关系,升温时间段斜率为正,降温时间段斜率为负,表明区间边界的空间位置受到温度的影响而发生移动。

工况 A、工况 C 的本次列车行驶方向为上海至北京,支座位移的终态位于区间下参考线,说明梁体受到压缩,反映出列车对梁体的纵向作用力指向固定支座(即指向上海方向);工况 B、工况 D 的本次列车行驶方向为北京至上海,支座位移终态位于区间上参考线,说明梁体受到拉伸,反映出列车对梁体的纵向作用力背离固定支座(即指向北京方向)。该规律表明列车纵向作用力方向与列车行驶方向相反。

4 活动支座滑移工作状态分析

无外界作用时,支座位移可在某一区间内的任意位置,如图 7 所示。图中: $f_{\max}$ 为支座最大静摩阻力,区间上限为支座摩阻力 $f=f_{\max}$ 时对应的支座位移,区间下限为支座摩阻力 $f=-f_{\max}$ 时对应的支座位

移,区间中心位置为支座摩阻力 $f=0$ 的支座位移状态;最大区间长度为 $2f_{\max}/K$,其中 K 为梁体的纵向变形刚度。

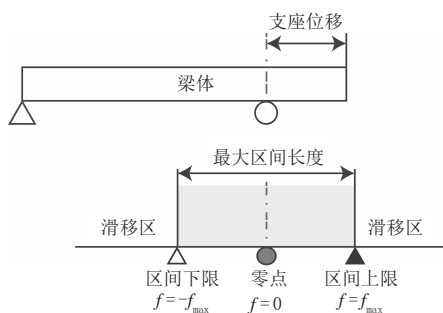


图7 支座位移区间示意图

当列车纵向作用力使得支座克服支座最大静摩阻力时,支座位移才会发生突变。在这种情况下,往复行驶的列车对梁体产生方向交替变化的纵向力,导致支座位移在区间内部振荡。

对于3#墩活动支座,工况B、工况C前后两次列车纵向力方向相反,分别使支座位移在一个区间内表现出上、下阶跃突变特征:工况B使支座位移由区间下参考线突变至区间上参考线,工况C使支座位移由区间上参考线突变至区间下参考线(见图6),2种行车工况使支座位移的终态在一定范围内往复振荡。将支座位移在列车作用前后的变化范围定义为振荡区间,振荡区间长度小于等于最大区间长度,振荡区间长度与支座中最大摩阻力和列车纵向作用力均有关系。

对比之下,1#墩、2#墩支座位移未随着列车的出现而发生显著突变,说明列车纵向力未能使支座克服最大摩阻力。随着3#墩支座工作性能的退化,其摩阻力会进一步增加,当增加到一定程度后,3#墩支座在列车作用下不能克服支座最大摩阻力而发生滑移,从而最终演变为与1#墩、2#墩支座位移相同的响应特征。在此过程中,3#墩支座位移在往复列车作用下振荡区间的长度也会发生变化,因此支座位移振荡区间长度能够为支座工作性能的评估提供依据。

3#墩支座位移振荡区间长度可根据列车作用工况B、工况C作用前后的支座位移变化量计算,其表达式为:

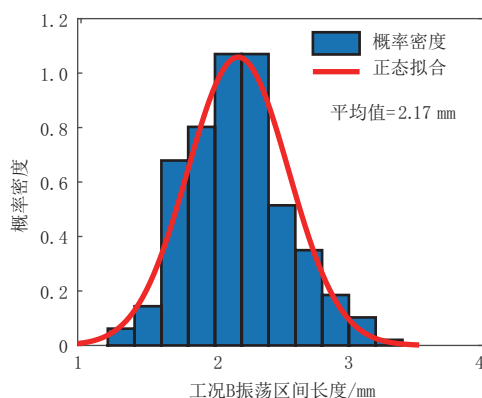
$$L = Y_{\text{终}} - Y_{\text{初}} \quad (1)$$

式中: L 为振荡区间长度; $Y_{\text{终}}$ 为支座位移终态,即列车作用工况加载结束后的支座位移值; $Y_{\text{初}}$ 为支座位移初态,即列车作用工况加载前的支座位移值。

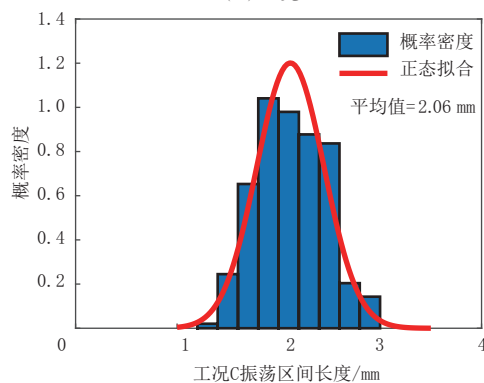
考虑到高速列车最大长度、桥跨长度、列车行驶

速度,所有列车作用工况的前后两次列车通行时间间隔均需大于30s,这样才能确保桥上不会出现2组列车同时作用的情况。同时为了削弱温度变化对支座位移的影响,选取午后温度变化缓慢的时间段,统计工况B、工况C下3#墩支座位移初态和终态,并计算振荡区间长度。

根据某年6月份20d的监测数据,选取午后温度变化缓慢时间段的监测数据,以便削弱温度变化对支座位移的影响,分别计算并统计工况B、工况C对应的振荡区间长度,其概率密度如图8所示。由图8可见,工况B、工况C振荡区间长度的概率密度均接近一重正态分布。



(a) 工况B



(b) 工况C

图8 振荡区间长度的概率密度

振荡区间长度与支座最大摩阻力、列车纵向力荷载大小密切相关。桥梁运营期间,在列车纵向力荷载统计规律不发生显著变化的情况下,按照某一周期(月或年)统计出3#墩支座位移振荡区间长度的平均值。假如前后两个周期内3#墩支座位移振荡区间平均值发生较大变化,则表明3#墩支座滑移状态可能出现较大故障,需要及时对支座进行检修。

5 结 语

(1)列车荷载引起3#墩支座位移的突变,破坏了支座位移-温度滞回路径,导致支座位移与温度

的相关性下降,支座摩阻力的大小和方向发生变化,因此基于 TDR 的支座状态评估方法无法准确评定 3# 墩活动支座的工作性能。

(2)列车引起的 3# 墩支座位移突变响应与前后两次的列车行驶方向有关:当 2 次列车通行方向相同时,支座位移尽管产生突变,但其终态与初态几乎相同;2 次列车通行方向相反时,支座位移终态与初态相比发生较大变化。往复列车作用交替出现时,支座位移会表现出振荡变化特征。

(3)3# 墩支座位移的监测数据分析表明,支座位移的振荡区间较为稳定,且近似为正态分布。由列车作用引起的支座位移振荡区间长度与支座最大静摩阻力具有一定的关系,3# 墩活动支座滑移性能出现异常时会导致支座振荡区间长度发生变化,因此通过比较前后两个统计周期内振荡区间长度平均值的异常变化,可以识别 3# 墩活动支座工作状态有无发生退化。

参考文献:

- [1] GUO T, ASCE M, LIU J, *et al.* Displacement monitoring and analysis of expansion joints of long-span steel bridges with viscous dampers [J]. Bridge Engineering, 2015(20): 04014099.
- [2] XIA Q, XIA Y, WAN H, *et al.* Condition analysis of expansion joints of a long-span suspension bridge through metamodel-based model updating considering thermal effect[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2020(27): 2521.
- [3] YARNOLD M T, MOON F L. Temperature-based structural health monitoring baseline for long-span bridges [J]. Engineering Structures, 2015(86): 157.
- [4] NI Y Q, WANG Y W, ZHANG C. A bayesian approach for condition assessment and damage alarm of bridge expansion joints using long-term structural health monitoring data [J]. Engineering Structures, 2020(212): 110520.
- [5] HUANG H B, YI T H, Li H N, *et al.* New representative temperature for performance alarming of bridge expansion joints through temperature displacement relationship [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(7): 04018043.1-04018043.14
- [6] YARNOLD M T, MOON F L, AKTAN A E. Temperature-based structural identification of long-span bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 2015(141): 04015027.
- [7] 赵维刚, 韩乃杰, 张浩, 等. 温度作用下钢桁拱桥活动支座工作性能评估方法研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(3): 53-60.
- [8] WU G M, YI T H, YANG D H, *et al.* Friction anomaly alarm for bridge sliding bearings under operating environmental conditions[J]. Engineering Structures, 2023(278): 115481.
- [9] 梅大鹏, 周鑫, 王高新. 考虑非线性时变相关特性的支座纵向位移精细模拟方法[J]. 桥梁建设, 2021, 51(5): 74-80.
- [10] 王高新, 丁幼亮, 刘华, 等. 基于支座位移监测的高铁桥梁支座磨损状态安全评估[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 39-46.
- [11] 吴来义, 刘兴旺, 赵大成, 等. 基于关联性统计计数的桥梁支座累计位移计算方法[J]. 世界桥梁, 2020, 48(5): 63-68.
- [12] 刘华, 刘兴旺, 陈斌. 千米级铁路悬索桥梁端支座位移长期变化规律分析[J]. 桥梁建设, 2023, 53(3): 48-55.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿邮箱: cdq@smedi.com 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com 投稿网站: <http://www.csdqyfh.com>