

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.029



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



大跨桥梁温致位移监测数据时滞效应的 自适应消除方法

龙伟¹, 沈安斌¹, 王胜利¹, 王耀¹, 段玲玲¹, 周广东²

(1. 中铁交通投资集团有限公司, 南宁 530219; 2. 河海大学土木与交通学院, 南京 210098)

摘要: 时滞效应消除是增强大跨桥梁温致位移与温度相关性和提升基于位移的结构运营病害识别可靠性的关键步骤, 固定时间平移方法因不能捕捉时滞程度随时间的变化而难以彻底消除时滞效应。借助函数型数据分析方法, 将时滞效应消除转换为寻找一个最优的时间弯曲函数, 将温致位移与温度对齐, 提出温致位移监测数据时滞效应自适应消除方法。利用数值模拟揭示了时滞效应产生机理, 介绍了基于函数型数据相幅分离的时滞效应自适应消除方法, 在此基础上利用一座大跨公铁两用桥梁伸缩缝位移与温度长期监测数据验证了方法的有效性, 最后提出了时滞效应自适应消除方法边端效应的处理策略。结果表明: 热传导系数较低形成的热惯性效应是时滞效应产生的根本原因, 时滞效应自适应消除方法能够根据时滞程度的不同而自动找到最优的时间弯曲函数进行时滞效应消除, 时滞消除效果明显优于固定时间平移方法, 采用数据延伸的策略能有效解决边端效应而实现时滞效应的完全消除。

关键词: 大跨桥梁; 位移响应; 温度效应; 时滞消除; 性能评估

中图分类号: U441 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Adaptive elimination method for time-lag effects in thermal displacement monitoring data of long-span bridges

LONG Wei¹, SHEN Anbin¹, WANG Shengli¹, WANG Yao¹, DUAN Lingling¹,
ZHOU Guangdong²

(1. China Railway Communications Investment Group Co., LTD, Nanning 530219, P. R. China; 2. College of Civil
and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

Abstract: The elimination of time-lag effects is a crucial step in enhancing the correlation between thermal displacement and temperature of long-span bridges, and improving the reliability of displacement-based structural operation damage identification. The fixed time translation method cannot capture the changes in time lags over time and is difficult to completely eliminate time-lag effects. This article uses functional data analysis methods to transform the elimination of time-lag effects into finding an optimal warping function to align thermal

收稿日期: 2024-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(51978243)

作者简介: 龙伟(1970-), 男, 高级工程师, 主要从事大跨桥梁受力性能研究, E-mail: longwei01@crcg.com。

周广东(通信作者), 男, 博士, 教授, E-mail: dagongzhoud@163.com。

Received: 2024-11-15

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51978243)

Author brief: LONG Wei (1998-), senior engineer, main research interest: mechanical behaviors of large-span bridges, E-mail: longwei01@crcg.com.

ZHOU Guangdong (corresponding author), PhD, professor, E-mail: dagongzhoud@163.com.

displacement and temperature, and proposes an adaptive elimination method for time-lag effects in thermal displacement monitoring data. Firstly, the mechanism of time-lag effects was revealed through numerical simulation. Secondly, an adaptive elimination method for time-lag effects based on phase-amplitude separation of functional data was introduced. Thirdly, the effectiveness of this method was verified using long-term monitoring data of expansion joint displacement and temperature of a large-span rail-cum-road bridge. Finally, a strategy was presented to cope with the end effect of the adaptive elimination method. The research results indicate that the thermal inertia effect formed by low thermal conductivity is the intrinsic reason for the generation of time-lag effects. The adaptive elimination method of time-lag effects can automatically find the optimal warping function for time-lag effects elimination according to the degree of time lags. The proposed method is significantly better than the fixed time translation method. The strategy of data extension can effectively remove the end effect and achieve complete elimination of time-lag effects.

Keywords: long-span bridge; displacement response; thermal effect; time-lag compensation; performance evaluation

位移作为表征大跨桥梁整体受力性能的重要指标,被广泛用于主梁刚度退化、伸缩缝阻塞、支座性能劣化等运营病害的识别。然而,除了运营病害会引起结构位移变化外,温度升降也会引起结构位移的变化^[1-3]。因此,在利用长期监测位移变化识别桥梁运营病害之前,需要建立温度与温致位移的相关模型,进而实现温致位移的有效剔除。大量的监测数据和研究表明,结构温度与温致位移之间存在不可忽略的时滞效应,即温致位移的变化滞后或超前于结构温度的变化^[4-6]。时滞效应会造成结构温度与温致位移相关模型的精度大幅降低。因此,提出有效的温致位移时滞效应消除方法,是提升结构温度与温致位移相关模型准确性和基于位移的桥梁运营病害识别结果可靠性的关键环节。

学者们对温致位移时滞效应进行了多方面研究。Guo等^[7]将温度监测数据向后平移45 min,显著增强了大跨公路斜拉桥温度与伸缩缝纵向位移之间的相关性。Yang等^[8]将温致变形移动2.2 h来消除公铁两用斜拉桥温度与位移的时滞效应。李宁等^[9]利用傅里叶变换获得温度与位移在相位上的差异,进而换算得到支座位移较环境温度滞后1.5 h。郑秋怡等^[10]利用LSTM神经网络建立了多元温度-位移的相关模型,消除了一座大跨拱桥温致位移的时滞效应,进而大幅提升了温致位移的重构和预测精度。Yue等^[11]建立了温度-温致位移的LSTM网络预测模型,并利用该模型预测了桥梁的温致挠度,发现可以较好地消除温度与位移之间的时滞效应。Wang等^[12]利用历史的平均滞后时间来消除时滞效应。Ju等^[13]通过不断改变平移时间大小来获得温度与位移拟合优度的最佳值,进而得到斜拉桥两座桥塔监测数据中的时滞值分别为2.8、2.9 h。刘洪双等^[14]提出一种基于拟合优度检验的时滞效应消

除方法,并证明其优于傅里叶级数法。

已有研究大多通过平移固定的时间来消除时滞效应,可在一定程度上提升温度与温致位移相关模型的精度。然而,由于不同材料导热系数的差异性、结构几何尺寸的复杂性以及环境温度的时变性,温度与温致位移之间的时滞在不同时刻的值并不相同,采用固定时间平移方法并不能完全消除时滞效应。基于此,笔者探讨温致位移时滞效应产生机理,引入函数型数据分析思路,提出温致位移时滞效应的自适应消除方法,并进一步利用实桥监测数据验证方法的有效性,最后讨论了监测数据不同预处理方法对时滞效应消除结果的影响。

1 时滞效应产生机理

从理论上讲,材料热胀冷缩是迅速发生的,并不会出现时滞。但是,众多桥梁的长期监测结果均表明,温度与温致位移的变化在时间上不同步^[6, 10, 13]。假定有一根截面尺寸为0.6 m×0.3 m、长度为40 m的悬臂梁,利用有限元软件ANSYS建立其有限元模型,如图1所示。简支梁四周空气温度按周期为1 d的标准余弦曲线变化,约束跨中截面的纵向位移、两端部截面的竖向位移,不考虑梁的自重。先预设简支梁的温度为20℃,然后采用三维热分析单元计算简支梁在空气温度作用下的温度分布,最后将热分析单元转换为结构分析单元,计算简支梁在温度作用下的纵向位移。分别假定简支梁的材质为混凝土和钢材,计算该简支梁的温度变化和温度引起的纵向位移。考察端部截面靠近边缘1/2处的位移以及跨中截面边缘和中心的温度,测点在横截面上的位置如图1所示,图中 T_1 和 T_2 分别代表第1和第2个温度测点、D代表位移测点。

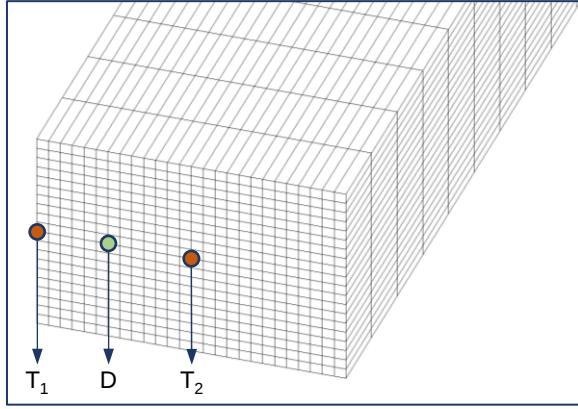


图1 简支梁网格及测点位置

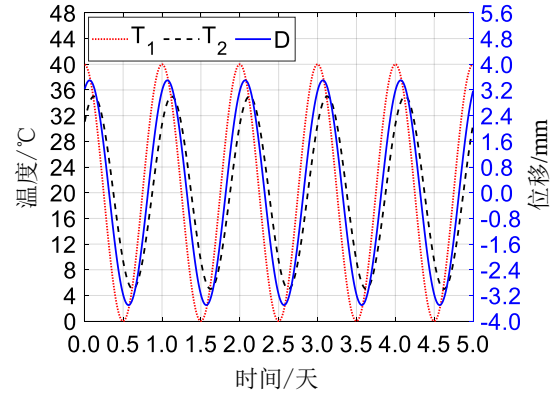
Fig.1 Mesh and measurement points of a simply supported beam

考虑到热传递的时效性,先进行5 d 预分析,获得简支梁内部稳定的温度分布,然后进行简支梁的时变温度场分析。某连续5 d 稳定的温度和温致位移时程如图2所示。从图2可以看出,简支梁的结构温度随空气温度的变化而不断变化。当简支梁的材质为混凝土时,截面中心温度 T_2 的变化明显滞后于截面边缘温度 T_1 的变化,位移 D 的变化滞后于截面边缘温度 T_1 的变化,超前于截面中心温度 T_2 的变化;当简支梁材质为钢材时,截面中心温度 T_2 与截面边缘温度 T_1 的变化基本同步,位移 D 与温度 T_1 和 T_2 也基本同步变化。结合材料的热传导系数进行分析,混凝土的热传导系数小,简支梁表面与内部的热交换需要较长的时间,使得截面中心的温度变化滞后于截面边缘的温度变化,形成了热惯性效应。简支梁纵向位移是简支梁各点温度变化的综合效应,其变化与截面边缘温度 T_1 和截面中心温度 T_2 变化均存在时间差。钢材的热传导系数大,简支梁表面与内部的热交换迅速,截面各点温度变化的时间差异不明显,纵向位移变化与截面不同位置的温度变化也几乎不存在时滞。

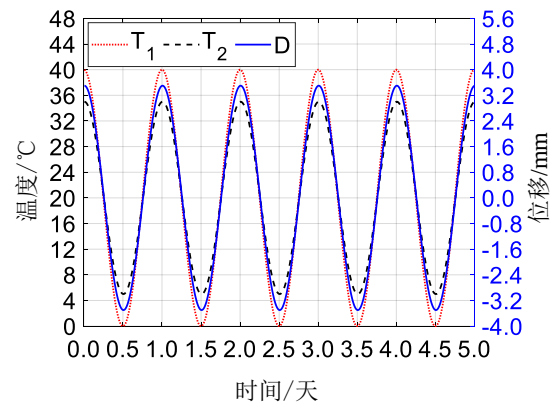
对于大跨桥梁,结构构件可能包含不同的材料,比如钢箱梁的钢材箱壁、沥青混凝土铺装、箱室内空气等,不同材料热传导系数的差异会进一步加大不同测点温度之间的时滞,热惯性效应更加明显,温度与温致位移之间的时滞效应也变得更加显著。因此,大跨桥梁温度与温致位移时滞效应产生的原因可以归结为:材料热传导的缓慢性导致结构不同位置的温度变化不同步,造成表征局部温度特性的测点温度与表征整体温度效应的温致位移的变化也不同步,从而出现时滞效应。

2 时滞效应自适应消除方法

从数学上讲,长期监测的温度和温致位移时间



(a) 混凝土梁



(b) 钢梁

图2 模拟温度和位移时程

Fig. 2 Simulated time histories of temperature and displacement

序列可被视为闭区间上连续函数的离散记录,即属于典型的函数型数据,因此,可以采用函数型数据分析方法进行处理^[15]。考虑后续处理方便,将待分析监测温度和位移的时间范围 $[0, \Omega]$ 线性映射到单位区间 $[0, 1]$ 。假设同时监测的温度和温致位移分别由两个函数 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 表示,其中 t 表示时间。 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 隶属于函数集 $\mathcal{F}$,函数集 $\mathcal{F} = \{f(t): [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}\}$, $\mathbb{R}$ 为实数集。

时滞效应消除相当于将两个函数 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 对齐,函数对齐的核心是通过时间弯曲函数将振幅变化与相位变化分开,即匹配函数的峰值和谷值。从而,时滞效应消除可以表达为找到一个最优的时间弯曲函数 $\phi(t)$ 来最小化 $f_1(t)$ 和 $f_2(t) \circ \phi(t)$ 之间或 $f_1(t) \circ \phi(t)$ 和 $f_2(t)$ 之间的时滞。 $\circ$ 为复合映射, $f_2(t) \circ \phi(t)$ 为 $\phi(t)$ 对 $f_2(t)$ 进行时间弯曲, $f_1(t) \circ \phi(t)$ 为 $\phi(t)$ 对 $f_1(t)$ 进行时间弯曲。 $\phi(t)$ 为时滞的相对大小。 $\phi(t) \in \Gamma$, Γ 是具有单位区间 $[0, 1]$ 的保向微分同胚映射集,且 Γ 是具有单位元 $\gamma_{id}(t) = t$ 的李群。 Γ 可以定义为^[16]

$$\Gamma = \{\psi: [0, 1] \rightarrow [0, 1] | \psi(0) = 0, \psi(1) = 1\} \quad (1)$$

上述复合映射既不对称也不正定,即

$$\inf_{\psi(t) \in \Gamma} \|f_1(t), f_2(t) \circ \psi_2(t)\| \neq \inf_{\psi(t) \in \Gamma} \|f_1(t) \circ \psi_1(t), f_2(t)\| \quad (2)$$

式中: $\|\cdot\|$ 为 L_2 范数。 $f_1(t)$ 向 $f_2(t)$ 对齐和 $f_2(t)$ 向 $f_1(t)$ 对齐结果不一样,在工程中难以应用。

为了解决这个问题,引入函数 $f(t)$ 的导函数平方根 $q(t)$ ^[17]。函数 $f(t)$ 可以转化为

$$q(f): [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}, q(t) = \text{sign}(\dot{f}(t)) \sqrt{|\dot{f}(t)|} \quad (3)$$

式中: $q(t)$ 为函数 $f(t)$ 的导函数平方根; $\dot{f}(t)$ 为函数 $f(t)$ 的导函数; $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。函数 $f(t)$ 可以由函数 $q(t)$ 积分得到,即

$$f(t) = f(0) + \int_0^t q(s) |q(s)| ds \quad (4)$$

根据导函数平方根的特性, $f(t) \circ \gamma(t)$ 的导函数平方根为^[18]

$$(q, \psi)(t) = q(\psi(t)) \sqrt{\dot{\psi}(t)} \quad (5)$$

从而可以得到如下的等距特性:

$$\|q_1(t) - q_2(t)\| = \|(q_1, \psi)(t) - (q_2, \psi)(t)\| \quad (6)$$

式中: $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$ 分别为待对齐函数 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 的导函数平方根。

对于任意的 $f_1(t), f_2(t) \in \mathcal{F}, q_1(t), q_2(t) \in L_2$, 函数对齐可以表达为优化问题

$$D_y(f_1(t), f_2(t)) = \inf_{\psi(t) \in \Gamma} \|q_1(t) - (q_2, \psi)(t) \sqrt{|\dot{\psi}(t)|}\| \quad (7)$$

式中: $D_y(\cdot)$ 为振幅距离。同时对于任意的 $\psi_1(t), \psi_2(t) \in \Gamma$, 还有

$$D_y(f_1(t) \circ \psi_1(t), f_2(t) \circ \psi_2(t)) = D_y(f_1(t), f_2(t)) \quad (8)$$

从式(6)可知,导函数平方根 $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$ 具有对称性,即:如果 $q_1(t)$ 通过 $\psi(t)$ 与 $q_2(t)$ 对齐, $q_2(t)$ 也可以通过相同 $\psi(t)$ 与 $q_1(t)$ 对齐。不仅如此, $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 也能通过相同 $\psi(t)$ 对齐,进而消除时滞效应。由式(8)可知,振幅距离在任意时间弯曲函数复合映射下保持不变。因此,可以先利用动态规划算法等优化算法求解式(7)所示的优化问题,求得最优的 $\psi(t)$ 将 $q_1(t)$ 和 $q_2(t)$ 对齐,然后通过式(4)所示的导函数平方根积分完成 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 对齐。在优化过程中,时间弯曲函数 $\psi(t)$ 的值会随着时间的变化而变化,从而能够自动适应温度与温致位移不同的时滞。

时间弯曲函数空间 Γ 是无穷维非线性流形,且是非凸的,即存在 $\psi_1(t), \psi_2(t) \in \Gamma$, 使得 $\psi_1(t) + \psi_2(t) \notin \Gamma$, 因此,有必要借助微分几何方法进行空间变换^[19]。引入时间弯曲函数的导函数平方根,即

$$\gamma(t) = \sqrt{\dot{\psi}(t)} \quad (9)$$

式中: $\gamma(t)$ 为时间弯曲函数 $\psi(t)$ 的导函数平方根。该变换也是可逆的,即

$$\psi(t) = \int_0^t \gamma(s) ds \quad (10)$$

$\gamma(t)$ 的 L_2 范数为

$$\|\gamma(t)\|^2 = \int_0^1 \dot{\psi}(t)^2 dt = \psi(1) - \psi(0) = 1 \quad (11)$$

式(11)表明所有的 $\gamma(t)$ 构成了 $L_2([0, 1])$ 空间中单位球面 S 上的正象限。两个时间弯曲函数 $\psi_1(t)$ 和 $\psi_2(t)$ 的距离可以用单位球面上最短弧长来表示。

$$D_x(\psi_1(t), \psi_2(t)) = \cos^{-1} \left(\int_0^1 \gamma_1(t) \gamma_2(t) dt \right) \quad (12)$$

单位球面依然是非线性流形,进一步转换到单位球面的切线空间 T , 其定义为

$$T(S) = \left\{ g: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R} \mid \int_0^1 g(t) dt = 1 \right\} \quad (13)$$

切线空间 T 与单位球面 S 的相互转换关系为^[20]

$$T \rightarrow S: \exp_1(g) = \cos(\|g\|) + \frac{\sin(\|g\|)}{\|g\|} g \quad (14)$$

$$S \rightarrow T: \exp_1^{-1}(\gamma) = \frac{1}{\sin(\theta)} (\gamma - \cos \theta) \quad (15)$$

$$\theta = \sin^{-1}(\langle 1, \gamma \rangle), g \in T \quad (16)$$

因此,所有的数据分析可以在切线空间进行,因为切线空间具有线性、等距和可逆特性。

3 方法验证

以一座大跨斜拉桥温度与伸缩缝位移的长期监测数据为例,对方法的有效性进行验证。首先对截取的监测数据进行预处理并分析时滞效应,其次对预处理后的数据节段进行时滞效应消除并与平移固定时间的消除方法对比,最后采用数据延伸的方法来处理数据节段时滞效应消除的边端效应。

3.1 数据预处理

某大跨公铁两用钢桁架斜拉桥横跨长江,主跨和两等边跨分别为 410 m 和 175 m。两主塔均为钢筋混凝土 Y 形塔,桩基础。下层铁路桥面采用纵横梁体系,上层公路桥面采用箱梁和正交异性桥面板系统,公路桥面预制混凝土桥面板厚 26 cm。为确保该大跨公铁两用桥梁的安全运营,在桥梁上安装

了一套全面的结构健康监测系统,对温度、位移、索力、应变等进行长期监测。选择跨中截面钢桁架竖杆温度和北侧钢桁架端部伸缩缝纵向位移进行分析,截取两段连续 10 d 的监测数据,分别命名为工况 1 和工况 2。温度和伸缩缝位移的采样频率分别为 1 Hz 和 2 Hz。

工况 1 和工况 2 下伸缩缝位移和温度监测结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,伸缩缝位移随着温度的升高和降低而增大和减小,伸缩缝位移与温度之间具有明显的相关性。但是由于监测环境和电磁波等干扰以及列车的冲击效应,位移和温度监测结果中均存在较多的毛刺,使得峰值和谷值的位置难以精准确定。这不仅会降低时滞效应消除的效果,还会延长时滞效应消除的计算时间。考虑温度和温致位移的慢变特性并确保位移和温度数据长度的一致性,采用常见的 10 min 平均法对监测结果进行预处理,即以 10 min 为基本时距对位移和温度监测数据进行平均,其结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,经过 10 min 平均后,伸缩缝位移和温度监测数据中的绝大部分毛刺不复存在,列车影响也被消除。

3.2 时滞特征

将伸缩缝位移和温度时程绘制在同一图中进

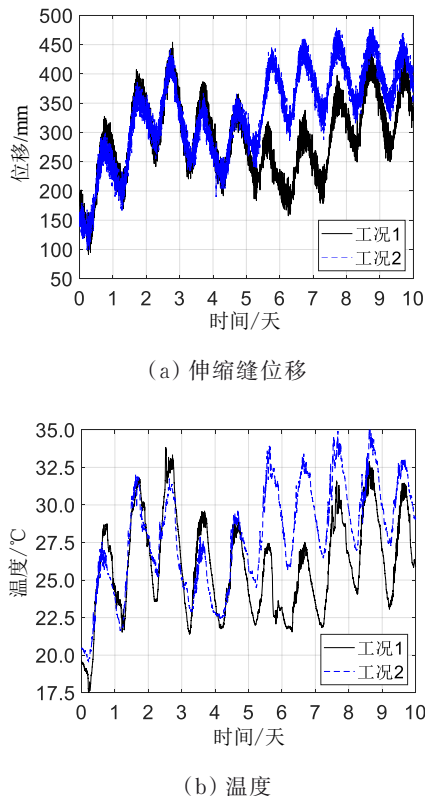


图 3 伸缩缝位移和温度监测时程

Fig. 3 Monitored time histories of expansion joint displacement and temperature

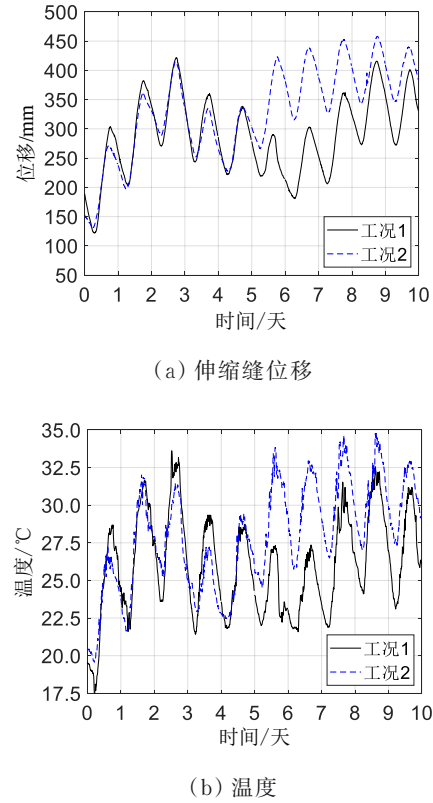


图 4 10 min 平均后伸缩缝位移和温度时程

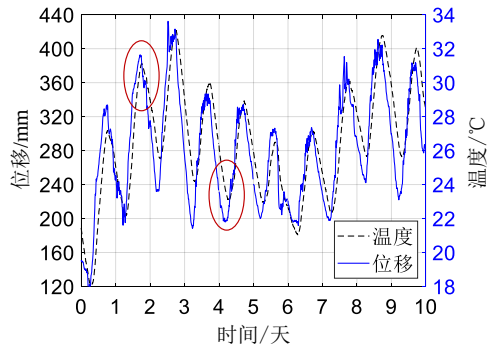
Fig.4 Time histories of expansion joint displacement and temperature averaged by 10 minutes

行对比,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,位移变化滞后于温度的变化,存在着明显的时滞,如图中圆圈所示。不仅如此,不同时刻的时滞大小并不相同,采用平移固定时间方法,难以完全消除时滞效应。进一步绘制位移与温度一天数据的相关性曲线,如图 6 所示。虽然从图 6 可以观察到位移随温度升高而增大的现象,但是由于时滞效应的影响,相关性曲线存在明显的滞回特性,造成位移与温度的相关模型精度大幅降低。因此,在进行位移与温度相关模型构建之前,非常有必要进行时滞效应消除。

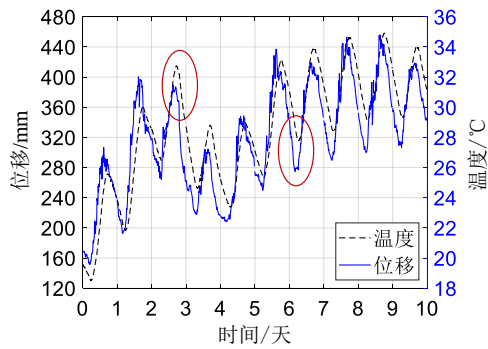
3.3 时滞消除结果

采用时滞效应自适应消除方法对 10 min 平均后伸缩缝位移与温度数据进行分析,其结果如图 7 所示。由于温度数据中个别毛刺的存在,时滞效应自适应消除方法在优化求解中难以精确对齐 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$,使得时滞效应未能被消除。为进一步消除数据毛刺,对 10 min 平均后的温度数据进行平滑处理。再次采用时滞效应自适应消除方法对平滑后的纵向位移与温度之间时滞效应进行消除,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,时滞效应已被消除,伸缩缝位移与温度同步变化,证明了方法的有效性。

为了对比分析,图 9 展示了采用平移固定时间



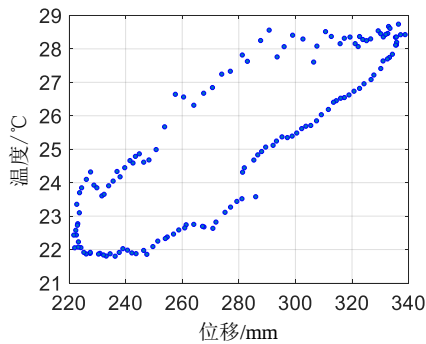
(a) 工况 1



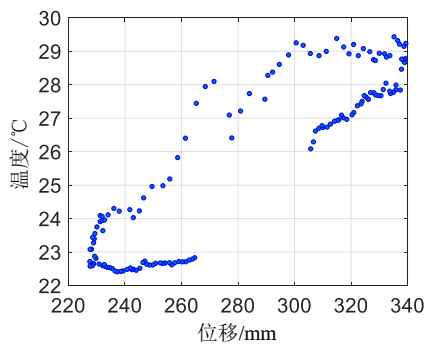
(b) 工况 2

图 5 温度-位移时滞现象

Fig.5 Time lag between temperature and displacement



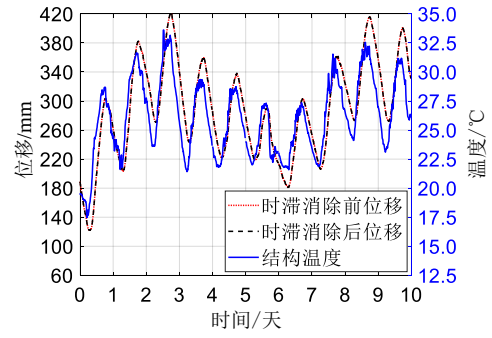
(a) 工况 1



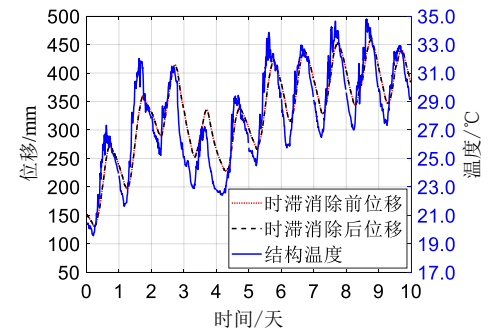
(b) 工况 2

图 6 温度-位移相关性

Fig.6 Relationship between temperature and displacement



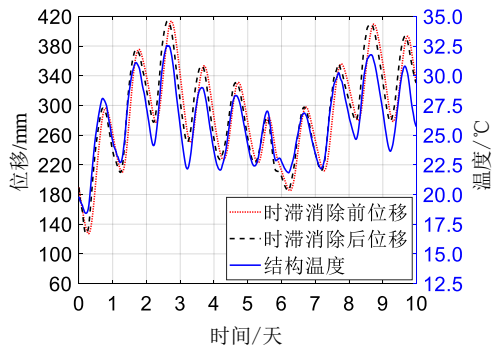
(a) 工况 1



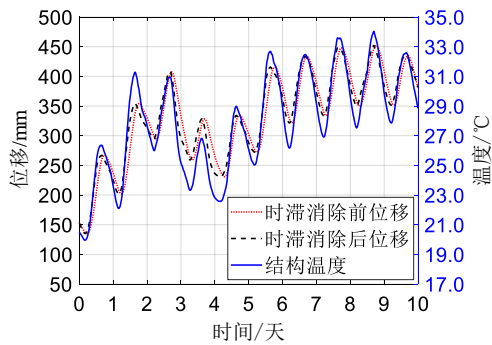
(b) 工况 2

图 7 10 min 平均数据的方法时滞效应消除结果 Fig.7

Results of time-lag elimination based on 10-min averaged data using the proposed method



(a) 工况 1



(b) 工况 2

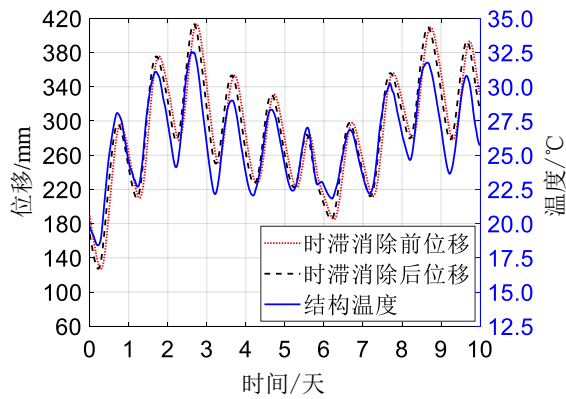
图 8 平滑数据的方法时滞效应消除结果

Fig.8 Results of time-lag elimination based on moving averaged data using the proposed method

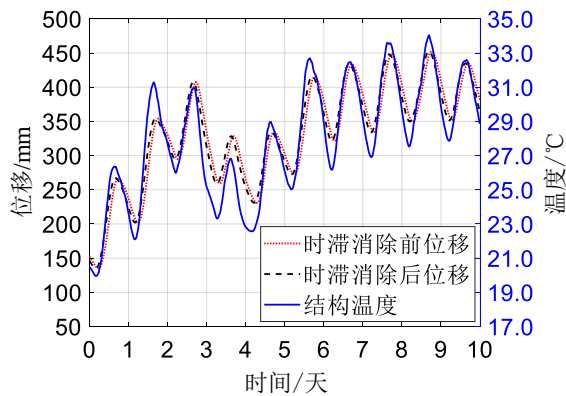
方法获得的伸缩缝位移与温度之间时滞效应的消除结果。从图9可以看出,时滞效应得到了较好的消除。绘制时滞消除前和消除后同一天的位移与温度相关性散点图,如图10所示。时滞效应消除后,伸缩缝位移与温度的滞回特性消失,相关性显著提升。对比时滞效应自适应消除方法和平移固定时间方法的结果,平移固定时间方法无法适应时滞的变化,导致部分时滞效应难以消除;而时滞效应自适应消除方法的时间弯曲函数根据时滞的大小不断调整,消除时滞效应后的伸缩缝位移与温度相关性明显高于平移固定时间方法的结果,表明该方法优于平移固定时间方法。计算时滞效应消除前、该方法消除后和平移固定时间方法消除后位移与温度的皮尔逊相关系数,工况1下分别为0.65、0.94和0.89,工况2下分别为0.68、0.95和0.88。该方法消除时滞后的相关性最高,再次证明该方法优于平移固定时间方法。

为了更加清晰地展示时滞变化,定义时滞度量 $\mathcal{H}$ 如式(17)所示。

$$\mathcal{H} = \phi(t) - t \quad (17)$$

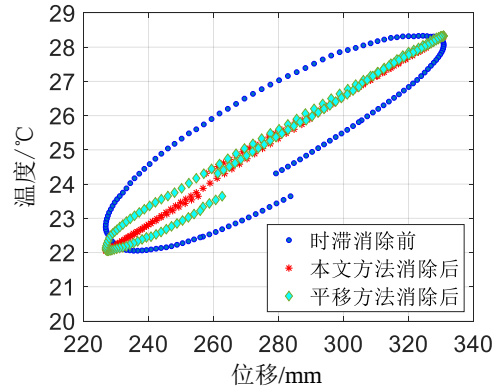


(a) 工况1

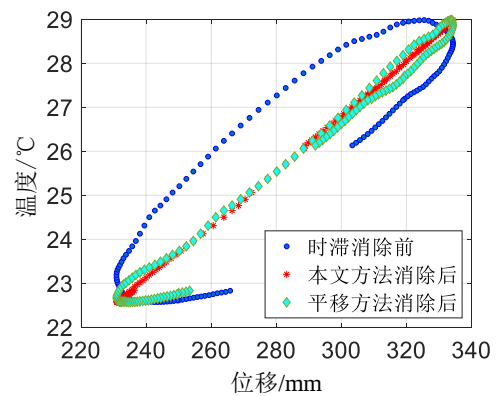


(b) 工况2

图9 平滑数据的平移固定时间方法时滞效应消除结果
Fig.9 Results of time-lag elimination based on moving averaged data using the fixed time-shift method



(a) 工况1



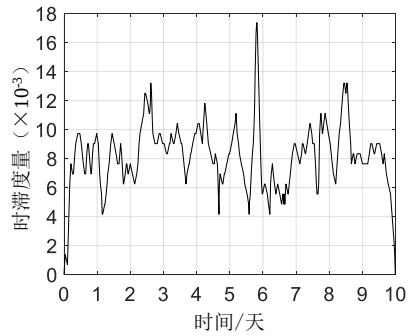
(b) 工况2

图10 时滞效应消除前后位移与温度相关性
Fig.10 Relationships between temperature and displacement before and after time-lag elimination

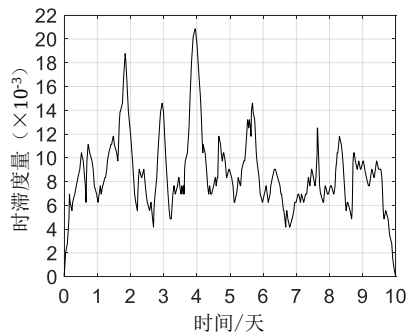
对平滑后的数据,工况1和工况2下时滞度量的变化如图11所示。从图11可以看出,时滞度量随时间的变化而不断变化,即不同时刻的伸缩缝位移与温度时滞效应并不相同,这也从侧面说明采用平移固定时间方法难以完全消除时滞。

为了进一步证明方法的有效性,采用该大跨公铁两用钢桁架斜拉桥跨中截面的平均温度作为温度代表值,对伸缩缝位移的时滞效应进行消除,结果如图12所示。从图12可以发现,时滞效应也被很好地消除。由此可见,时滞效应自适应消除方法不受测点温度、平均温度、有效温度等温度数据类型的影响,具有良好的通用性。另外,对于多种温度、温差因素影响下的温致位移时滞效应消除,可以以某一个温度作为基准,采用自适应时滞效应消除方法对其余温度、温差以及温致位移均进行时滞消除,从而保证多种温度、温差、温致位移同步。

函数型数据对齐计算时,默认 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 的第1个数据点和最后一个数据点均已对齐,即存在边缘效应。图11中初始点和结束点的时滞度量为0,也表明了此特性。但在实际工程中,被分析的位移



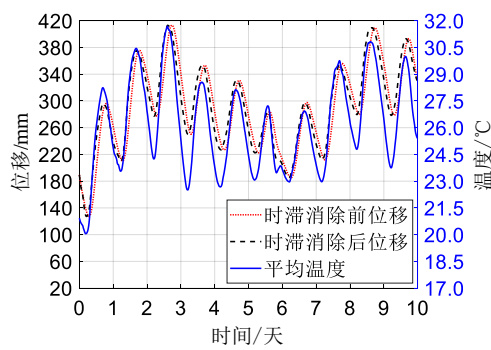
(a) 工况 1



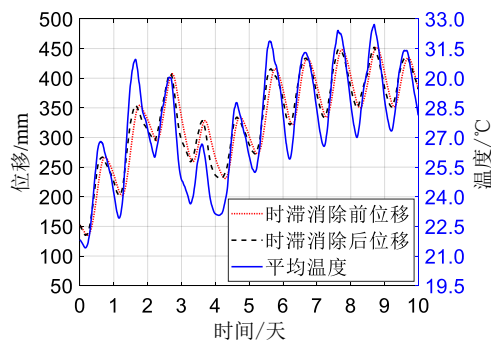
(b) 工况 2

图 11 时滞效应度量

Fig.11 Metric of time lag



(a) 工况 1

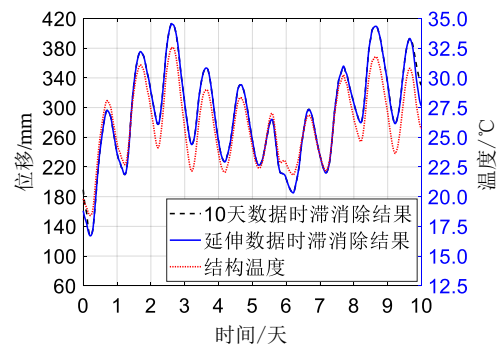


(b) 工况 2

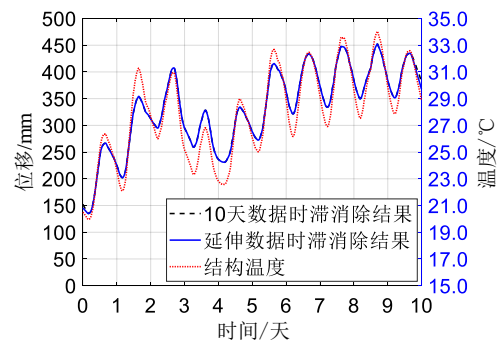
图 12 平均温度下时滞效应消除结果

Fig.12 Results of time-lag elimination based on mean temperature

和温度数据节段的首尾也存在时滞效应。考虑到大跨桥梁位移和温度监测数据的长期性,在进行时滞消除时,将被分析的数据节段分别向前和向后延伸一段时间。比如,案例中的 10 d 连续数据节段,分别向前和向后延伸 1 d,将连续 12 d 的数据代入进行时滞效应消除,从而可以避免边端效应对第 2 天到第 11 天数据节段的影响。数据延伸后工况 1 和工况 2 下的时滞效应消除结果如图 13 和 14 所示。虽然是将连续 12 d 的数据代入进行分析,为了对比方便,这里仅展示了与图 8 时间相同的 10 d 数据结果。从图中可以看出,10 d 数据和延伸数据在端部存在较大的不同。由于边端效应的存在,10 d 数据起点附近和结束点附近的时滞效应未能被有效消除,位移与温度的线性相关性被削弱,如图 14 所示,工况 1 尤其明显。采用延伸数据进行分析时,边端效应被有效去除。延伸数据在进行时滞效应消除后,工况 1 和工况 2 下位移和温度的皮尔逊相关系数分别提升至 0.96 和 0.97,相关性被进一步增强。



(a) 工况 1



(b) 工况 2

图 13 延伸数据的时滞效应消除结果

Fig.13 Results of time-lag elimination based on extended data

时滞消除前后,温度与温致位移线性相关模型的斜率如图 15 所示。图 15 中, D 表示伸缩缝位移, T 表示结构温度。从图 15 可以看出,时滞消除前后线性模型的斜率有明显变化。为了获得更准确的温度-温致位移相关模型,有必要消除时滞效应。

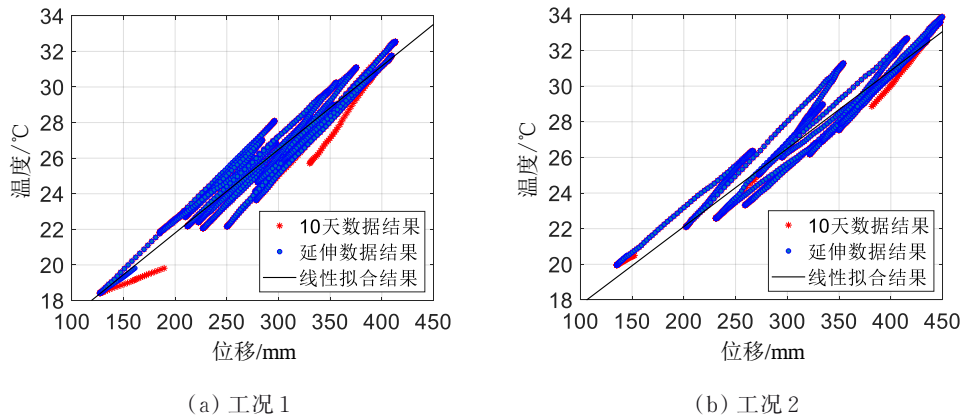


图 14 10 天数据与延伸数据时滞效应消除后位移与温度的相关性

Fig.14 Relationships between temperature and displacement after time-lag elimination based on ten-day data and extended data

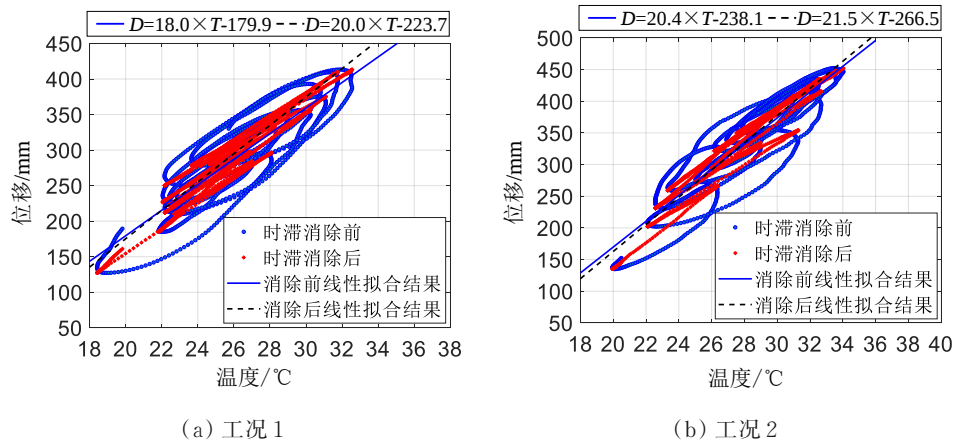


图 15 时滞效应消除前后温度与位移的线性相关模型

Fig.15 Linear correlation model between temperature and displacement before and after time-lag elimination

4 结论

时滞效应会降低大跨桥梁长期监测中温致位移与温度之间的相关性,可能导致基于位移的结构病害识别结果偏离工程实际。借助函数型数据相幅分离理论,提出了大跨桥梁温致位移时滞效应的自适应消除方法。主要结论如下:

1) 大跨桥梁各部分热传递系数的不同和热传导的缓慢性导致不同测点的温度变化出现时间差,进而造成代表局部温度特征的测点温度与代表整体温度效应的温致位移之间的变化不同步,从而出现温致位移时滞效应。

2) 时滞效应自适应消除方法通过时间弯曲函数将温致位移和温度时程的振幅变化与相位变化分开,进而实现温致位移和温度时程的峰值和谷值完全对齐,不受数据长度的限制。利用导函数平方根、单位球面和切线空间可以确保时间弯曲函数的线性、可逆和对称,进而完成最优时间弯曲函数的高效求解。

3) 提出的时滞效应自适应消除方法可以根据

时滞的大小自动调节时间弯曲函数,完成温致位移时滞效应的自适应消除。时滞消除后的温致位移与温度的相关性高于基于固定时间平移方法消除后两者的相关性。采用数据延伸的策略可以解决时滞效应自适应消除方法的边端效应,实现时滞效应的完全消除。数据延伸的时间长度不宜小于一个温致位移周期。

需要说明的是,温致位移的提取也可采用小波分解、滤波等其他方法,只要保证提取结果符合温致位移的慢变特征,即可采用时滞效应自适应消除方法进行时滞效应消除。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2021[J]. 中国公路学报, 2021, 34(2): 1-97. Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's bridge engineering research: 2021 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(2): 1-97. (in Chinese)
- [2] 周云, 危俊杰, 李剑, 等. 基于 InSAR 技术的大跨桥梁

- 温度变形监测研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(3): 39-50.
- ZHOU Y, WEI J J, LI J, et al. Research on temperature deformation monitoring of long-span bridges based on InSAR technology [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024, 51(3): 39-50. (in Chinese)
- [3] 王高新, 徐世阳, 朱洁, 等. 大跨度钢桁梁桥温度梯度的长期监测及标准值计算方法[J/OL]. 中国公路学报, 2024: 1-15. (2024-09-05). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGGL20240903004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. WANG G X, XU S Y, ZHU J, et al. Long-term monitoring and standard value calculation of temperature gradients of long-span steel truss bridges [J/OL]. China Journal of Highway and Transport, 2024: 1-15. (2024-09-05). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=ZGGL20240903004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [4] HAN Q H, MA Q, XU J, et al. Structural health monitoring research under varying temperature condition: A review [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2021, 11(1): 149-173.
- [5] DE BATTISTA N, Brownjohn J M W, Tan H P, et al. Measuring and modelling the thermal performance of the Tamar Suspension Bridge using a wireless sensor network [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2015, 11(2): 176-193.
- [6] 杨东辉, 孙家正, 伊廷华, 等. 可考虑温致位移时滞的大跨桥梁支座劣化预警技术[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(2): 268-274.
- YANG D H, SUN J Z, YI T H, et al. Early warning technology of long-span bridge bearing deterioration considering time lag effects of thermal-induced displacement [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(2): 268-274. (in Chinese)
- [7] GUO T, LIU J, ZHANG Y F, et al. Displacement monitoring and analysis of expansion joints of long-span steel bridges with viscous dampers [J]. Journal of Bridge Engineering, 2015, 20(9): 04014099.
- [8] YANG D H, YI T H, LI H N, et al. Correlation-based estimation method for cable-stayed bridge girder deflection variability under thermal action [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32(5): 04018070.
- [9] 李宁, 朱晨辉. 基于桥梁健康监测的支座纵向位移时滞效应的研究[J]. 山东交通科技, 2020(5): 52-55.
- LI N, ZHU C H. Time-lagged response of bearing displacement based on structural health monitoring [J]. Shandong Transportation Technology, 2020(5): 52-55. (in Chinese)
- [10] 郑秋怡, 周广东, 刘定坤. 基于长短时记忆神经网络的大跨拱桥温度-位移相关模型建立方法[J]. 工程力学, 2021, 38(4): 68-79.
- ZHENG Q Y, ZHOU G D, LIU D K. Method of modeling temperature-displacement correlation for long-span arch bridges based on long short-term memory neural networks [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(4): 68-79. (in Chinese)
- [11] YUE Z X, DING Y L, ZHAO H W. Deep learning-based minute-scale digital prediction model of temperature-induced deflection of a cable-stayed bridge: Case study [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(6): 05021004.
- [12] WANG Z W, ZHANG W M, ZHANG Y F, et al. Temperature prediction of flat steel box girders of long-span bridges utilizing in situ environmental parameters and machine learning [J]. Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(3): 04022004.
- [13] JU H W, ZHAI W Q, DENG Y, et al. Temperature time-lag effect elimination method of structural deformation monitoring data for cable-stayed bridges [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 42: 102696.
- [14] 刘洪双, 翟文强, 曾国良. 斜拉桥结构变形监测数据温度时滞效应消除方法[J/OL]. 中外公路, 2024: 1-12. (2024-06-28). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240626.1619.002.html>. LIU H S, ZHAI W Q, ZENG G L. Elimination method of temperature lag effect in structural deformation monitoring data of cable-stayed bridge [J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 2024: 1-12. (2024-06-28). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20240626.1619.002.html>. (in Chinese)
- [15] 靳雪晴. 函数型数据分析若干方法[J]. 现代计算机, 2021, 27(34): 77-80.
- JIN X Q. Several methods of functional data analysis [J]. Modern Computer, 2021, 27(34): 77-80. (in Chinese)
- [16] LU Y, KURTEK S. Bayesian registration of functions with a Gaussian process prior [J]. Journal of Computational and Graphical Statistics, 2017, 26(4): 894-904.
- [17] TUCKER J D, WU W, SRIVASTAVA A. Analysis of proteomics data: Phase amplitude separation using an extended Fisher-Rao metric [J]. Electronic Journal of Statistics, 2014, 8(2): 1724-1733.
- [18] SRIVASTAVA A, WU W, KURTEK S, et al. Registration of functional data using Fisher-Rao metric [J/OL]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1103.3817>
- [19] 金海波, 马海强. 相幅组合的函数型数据特征提取方法研究[J]. 计算机应用研究, 2021, 38(8): 2354-2358.
- JIN H B, MA H Q. Feature extraction for functional data by combining phase and amplitude information [J]. Application Research of Computers, 2021, 38(8): 2354-2358. (in Chinese)
- [20] JIANG H C, WAN C F, YANG K, et al. Modeling relationships for field strain data under thermal effects using functional data analysis [J]. Measurement, 2021, 177: 109279.