

DOI:10.11918/202501007

非线性温度效应的超声投影幂律特征

陈鹏^{1,2}, 郑罡^{1,2}, 薛文琪^{1,2}, 宋林正^{1,2}

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室(重庆交通大学), 重庆 400074)

摘要: 环境温度变化会导致超声信号的显著波动, 使得区分损伤、应力等目标参数变得复杂, 为此, 有必要研究超声信号的温度效应特征及其表达形式。温度对超声信号的影响最终体现为信号向量的空间变化, 故使用特定函数系在时域向量空间构造特性向量, 使得温度效应可以在超声时域直接投影为若干声测特征, 并由基函数表示。这些特征的大小由温度增量和基函数决定, 符号与投影方向一致。采集实验室混凝土梁超声测试信号, 同时基于波动方程的理论解得到温度变化下的时域信号。构造幂函数基的特性向量空间, 利用幂律特征描述温度的非线性效应。结果表明, 实验和理论两种信号的温度效应幂律特征具有相同的分布规律, 其反应了温度效应的能量大小, 并随基函数阶次升高服从指数递减规律。上述幂律特征可以得到同一温度下的不同特征值, 分别表征了不同维度的温度效应信息, 同一特征与温度增量之间遵循幂函数映射, 同一温度的不同特征值随幂次的增加呈指数映射。实现了超声测试过程中温度效应的数学描述, 为不同场景下的温度效应表征提供了有效工具。

关键词: 无损检测; 超声波; 温度效应; 投影; 幂律特征; 非线性声测

中图分类号: U446.3

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2026)02-0140-11

Ultrasonic projection power law features of nonlinear temperature effects

CHEN Peng^{1,2}, ZHENG Gang^{1,2}, XUE Wenqi^{1,2}, SONG Linzheng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering (Chongqing Jiaotong University), Chongqing 400074, China)

Abstract: Variations in ambient temperature can cause significant fluctuations in ultrasonic signals, complicating the distinction of target parameters such as damage and stress. To address this issue, this study investigates the characteristics and mathematical representation of temperature effects on ultrasonic signals. The influence of temperature on ultrasonic signals ultimately manifests as spatial changes in signal vectors. Therefore, we construct characteristic vectors in the time-domain vector space using a specific set of functions, allowing the temperature effect to be directly projected into several acoustic measurement features within the ultrasonic time domain, represented by basis functions. The magnitude of these features is determined by the temperature increment and the choice of basis function, with their signs consistent with the projection direction. Experimental ultrasonic test signals were collected from laboratory concrete beams, while theoretical solutions based on wave equations provided time-domain signals under varying temperatures. We constructed a characteristic vector space using power function bases and employed power-law features to describe the nonlinear effects of temperature. Results show that both experimental and theoretical signals exhibit identical distribution patterns in their temperature-effect power-law features, reflecting the energy magnitude of temperature effects. These features decrease exponentially with increasing order of the basis function. Based on power-law characteristics, distinct characteristic values at the same temperature can be derived, each representing temperature effect information across different dimensions. The relationship between a given characteristic and temperature increments follows a power-law mapping, while different characteristic values at identical temperatures exhibit an exponential relationship with increasing power exponents. This establishes a mathematical description of temperature effects during ultrasonic testing, providing an effective tool for characterizing temperature effects across various scenarios.

Keywords: non-destructive testing; ultrasound; temperature effects; projection; power-law features; nonlinear acoustic measurement

收稿日期: 2025-01-06; 录用日期: 2025-03-10; 网络首发日期: 2025-06-30

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250627.1804.002>

基金项目: 国家自然科学基金(51978112)

作者简介: 陈鹏(1996—), 男, 博士研究生; 郑罡(1972—), 男, 研究员, 博士生导师

通信作者: 郑罡, zhenggang@cqjtu.edu.cn

超声技术广泛地用于土木、机械、航空等领域的无损检测和评估,其中,温度对测试信号的影响问题一直是其中的难点^[1-2]。现有测试方法和技术在抑制温度效应方面已经取得了若干进展,一种是将温度效应从损伤、应力等目标参数的特征中分离出来^[3],另一种是寻找具有温度鲁棒性的特征直接建立与目标参数的联系^[4]。温度效应问题最终归结为建立何种声测特征与温度参数之间的准确联系。

温度效应来源于介质的热膨胀和声速变化,后者与介质的弹性模量变化、密度、散射体形变等有关。研究表明,金属等匀质材料的声学参数在常温影响下通常表现出线性或弱非线性趋势^[5-7],而混凝土等多相复合介质的测试信号对微弱变化更加敏感,介质内部的孔隙、孤体、气泡等均会影响传播路径。从文献研究结果来看,即便是 2 ℃ 的温度变化也可能显著影响混凝土超声测试的结果^[8]。有时温度对声测特征的影响甚至大于目标参数本身引起的特征变化^[9],并且表现出明显的非线性特点^[10-11]。针对该问题的研究呈现出两种不同的思路。一种是量化温度效应在目标特征上的大小,如幅值、相位、声速、声时等,以此实现温度效应的补偿。基于该思路开发出了对声学参数进行拟合标定的方法^[12],以及关于波形的最优基线选择法^[5]、基线信号拉伸法^[13]及二者的改进算法。上述方法在线性范围内均有较好的效果,仅需提前确定拟合函数或准备好一定量的基线样本。之后温度效应的量化和补偿精度不断提高,目的是减小基线库的样本量或增大适用温度区间。如基于传感器网络优化^[14]、采用拉伸与平移相结合的补偿方法^[8],以及基于矩阵分解技术的量化补偿方法^[15]等,在不增加基线样本量的情况下可以将适用范围扩大到弱非线性效应。然而,对于混凝土、管道等多相复合介质,温度的弱非线性范围仅有几摄氏度。一旦温度区间增大非线性效应明显时,则需使用高阶多项式拟合声学参数的变化趋势^[16]。温度对超声信号的影响在非线性显著时成为温度效应问题的难点^[17]。非线性带来的不仅是基线库的样本量增加,在补偿效果上还容易受到其他因素的影响,因而产生了另一种研究思路,即利用鲁棒性较强的特征或指标直接与目标参数建立联系,从而“屏蔽”温度效应的影响。这类指标通常需要给定阈值,以此来判断目标参数是否出现。如文献[9]基于协方差矩阵计算得到一种损伤指标,当指标大于特定阈值时认为损伤发生。由于阈值的给定需要事先在无损伤状态下进行测试并推定,需要不断优化阈值并获得经验。得益于深度学习的发展,容易找到损伤、应力等目标参

数的最佳特征,使得温度“屏蔽”后的效果较为理想。利用奇异值分解提取奇异值序列并输入卷积神经网络进行深度学习^[18],或者使用自适应变分模态分解与递归量化分析提取信号的多个特征^[19],并将特征输入卷积神经网络进行训练和识别,可以得到鲁棒性较强的特征。通常深度学习后的目标识别准确率可达 98% 以上,而识别的效果与所用训练集样本的大小有关^[20-21]。总体来看,温度效应在目标特征上的量化精度和目标参数的识别准确率都在不断提高。然而,减少剥离温度效应所需样本量仍然面临较大挑战,要进一步突破这一瓶颈,需要深入研究温度效应本身的特征及其影响机制。

为此,从超声时域提取多个具有明确物理意义,由特定函数系为基函数表示的温度效应特征,实现温度效应的数学描述和特征量化。该特征由超声时域信号直接投影得到,区别于对原始信号的多次变换,同时,其物理意义便于进一步研究对象本身的物理声学规律。使用实验采集和理论构造两种信号提取温度效应的幂律特征,验证该投影特征描述温度效应的可行性。

1 超声测试的温度效应幂律特征提取方法

超声时域信号可看作线性空间的向量,其信息变化最终表现为向量的模长和方向变化。模长易受传感器发射能量的影响,其作为一维信息与高维方向信息相比可忽略不计,因此,研究单位向量在高维线性空间的方向偏转规律。通过构造温度效应的特性方向,使得温度的非线性效应可以被直接投影并分解为若干特征,并由一组基函数表示。

1.1 温度效应的向量空间与正交基

测试信号受温度影响时会产生信号残差,表现为向量空间的向量差,其包含了与温度相关的介质变化信息。这里使用信号向量的正弦分量表示这种差量,在该分量的空间提取温度效应的超声特征。对于单位信号向量,残差分量的模表征了温度效应引起的超声信号的能量变化率。记单位化的样本信号矩阵为 $\mathbf{W}_m = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n)$,选择其中一个作为基准信号 \mathbf{w}_B 。为得到信号向量的正弦增量,用样本信号减去在基准信号上的投影分量,即

$$\mathbf{D}_m = \mathbf{W}_m - \mathbf{w}_B \cdot (\mathbf{w}_B^T \cdot \mathbf{W}_m) \quad (1)$$

式中 T 表示转置运算。 \mathbf{D}_m 的任一列向量在基准信号 \mathbf{w}_B 的投影都为 0,即与 \mathbf{w}_B 的方向正交, \mathbf{D}_m 包含了温度效应的全部影响(\mathbf{D}_m 中的列向量为残差量,不应单位化)。

由奇异值分解定理知,存在矩阵 \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 可将

$D_{\text{III}} (m \times n)$ 奇异值分解为

$$D_{\text{III}} = USV^T \quad (2)$$

式中: U 和 V 分别为 $m \times m$ 和 $n \times n$ 的正交矩阵, S 为 $m \times n$ 的对角矩阵。 S 可由下式定义:

$$S = \begin{cases} [\Sigma & \mathbf{0}]^T, & m > n \\ \Sigma, & m = n \\ [\Sigma & \mathbf{0}], & m < n \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$, $r = \min(m, n)$, 且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_r > 0$ 为矩阵 D_{III} 的全部奇异值。 U 和 V 中的列向量分别对应 $\sigma_i (i = 1, 2, \dots, r)$ 的左奇异向量和右奇异向量, 且均为单位向量。 U 中的前 ξ 个列向量构成温度效应的向量空间, 该空间的所有变化特征均可由这 ξ 个正交向量线性表出。

文献[15]利用奇异值分解得到的奇异向量, 将样本信号投影到这些奇异向量上以实现量化, 在 6°C 的温度范围内成功量化了温度效应。实际上, 每个奇异向量包含了所有幂次的温度效应成分, 因此, 所得量化结果由多项式函数表示。为了在工程适用的大温度区间内实现超声测试的温度效应量化, 需要准确还原各幂次效应的方向, 并解耦不同幂次之间的相互影响。

1.2 特性方向的还原与解耦

为了将温度效应引起的非线性偏转分解成简单的函数形式, 需要找到满足既定函数关系的特性方向。

1.2.1 利用正交基还原特性方向

非线性偏转可以映射在奇异向量上, 故使用矩阵 U 的前若干列向量作为正交基, 利用正交分量线性表出该空间的温度效应特性方向。采用幂函数系来逼近各温度下的样本信号在基向量上的投影值。记正交基向量为 u_1, u_2, \dots, u_ξ , 基向量 $u_k (k = 1, 2, \dots, \xi)$ 上的投影为 $p_k(\Delta T)$, 设拟合所用多项式的项数为 ω , 得

$$p_k(\Delta T) = \alpha_{1k} \cdot \Delta T^0 + \alpha_{2k} \cdot \Delta T^1 + \alpha_{3k} \cdot \Delta T^2 + \dots + \alpha_{\omega k} \cdot \Delta T^{(\omega-1)} \quad (4)$$

其中 $\alpha_{ik} (i = 1, 2, 3, \dots, \omega)$ 表示基向量 u_k 对应的拟合多项式第 i 项系数, 由此温度的第 i 阶效应产生作

用的方向利用 ξ 个正交基还原得

$$r'_i = \sum_{k=1}^{\xi} \alpha_{ik} u_k / \left\| \sum_{k=1}^{\xi} \alpha_{ik} u_k \right\|, \xi \geq \omega; i = 1, 2, 3, \dots, \omega \quad (5)$$

称单位化的 r'_i 为第 i 阶主特性向量, 并记 $R' = [r'_1, r'_2, r'_3, \dots, r'_\omega]$ 为主特性向量组。

主特性向量还原的线性变换过程如图 1 所示。 $\alpha_{ik} u_k$ 是主特性向量在正交基上的分量, 系数 α_{ik} 由样本信号或残差信号在奇异向量 u_k 上映射得到。

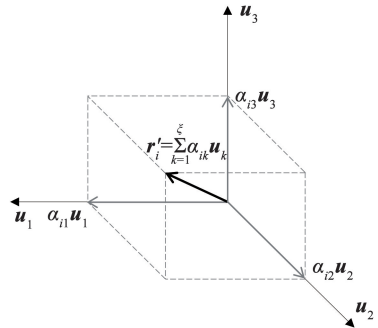


图 1 主特性向量还原示意

Fig. 1 Principal characteristic vector reduction

需要注意的是, 式(4)中所用拟合多项式项数 = 特性向量数 \leq 基向量数 \leq 奇异值数。这里基向量数必须大于特性向量数是由于主特性向量组成的矩阵是满秩的, 所有主特性向量必须在相同或更高的维度才能被线性表出。

1.2.2 特性方向的解耦

由于不同阶次之间存在相关性, 所得主特性向量两两互不 orthogonal。为使超声信号能够直接投影得到服从单一阶次变化的特征, 需要解耦所有阶次。这一问题可表述为去除 r'_i 与 $r'_j (i \neq j)$ 之间的相关性, 即寻找向量 r_i 使其满足

$$r_i^T \cdot V'_{-i} = 0, \text{ 且 } r_i^T \cdot r'_i \neq 0, i = 1, 2, 3, \dots, \omega \quad (6)$$

V'_{-i} 表示主特性向量集合中元素 r'_i 的补集。求解式(6)可借助矩阵分解或施密特正交化。

基于施密特正交化的解耦方法如下。从向量组 $[r'_1, r'_2, r'_3, \dots, r'_\omega]$ 的最后一个向量 r'_ω 开始依次作正交化, 则第 1 阶特性向量 r_1 可由下式得

$$\begin{cases} a_\omega = r'_\omega \\ a_{\omega-1} = r'_{\omega-1} - (r_{\omega-1}^T \cdot a_\omega) \cdot a_\omega / \|a_\omega\|^2 \\ a_{\omega-2} = r'_{\omega-2} - (r_{\omega-2}^T \cdot a_\omega) \cdot a_\omega / \|a_\omega\|^2 - (r_{\omega-2}^T \cdot a_{\omega-1}) \cdot a_{\omega-1} / \|a_{\omega-1}\|^2 \\ \vdots \\ a_2 = r'_2 - (r_2^T \cdot a_\omega) \cdot a_\omega / \|a_\omega\|^2 - (r_2^T \cdot a_{\omega-1}) \cdot a_{\omega-1} / \|a_{\omega-1}\|^2 - \dots - (r_2^T \cdot a_3) \cdot a_3 / \|a_3\|^2 \\ r_1 = r'_1 - (r_1^T \cdot a_\omega) \cdot a_\omega / \|a_\omega\|^2 - (r_1^T \cdot a_{\omega-1}) \cdot a_{\omega-1} / \|a_{\omega-1}\|^2 - \dots - (r_1^T \cdot a_2) \cdot a_2 / \|a_2\|^2 \end{cases} \quad (7)$$

所得 r_1 与 $r'_j (j \neq 1)$ 正交,且 r_1 与 r'_1 非正交,因此,其可以独立地表征第1阶温度效应。交换主特性向量矩阵中 r'_2 与 r'_1 的顺序,从向量组 $[r'_2, r'_1, r'_3, \dots, r'_\omega]$ 的最后一个向量 r'_ω 开始依次作施密特正交化,可得第2阶特性向量 r_2 。第 i 阶特性向量 r_i 的求法类推。累计进行轮次为 ω 的相关性去除,得到表征温度效应单一阶次的特性向量组。基于矩阵分解的解耦过程类似,所得结果相同。最后,对所有特性向量单位化并记 $R = [r_1, r_2, \dots, r_\omega]$ 。特性向量 r_1, r_2, \dots, r_i 彼此之间不一定正交,但此时所有阶次已全部解耦。

主特性向量解耦前后的空间几何关系如图2所示。设共有3个主特性向量 r'_i, r'_j, r'_k ,且任意两个均不正交,则解耦后特性向量 r_i 与平面 S'_{jk} (r'_j 和 r'_k 所在平面)垂直,所得 r_i 作为 r'_i 的分量与其他所有主特性向量正交, r_j 与 r_k 同理。由此特性向量作为投影方向时将映射出单一阶次的部分投影。该过程推广到 ω 阶温度效应的解耦即为式(6)的情形。

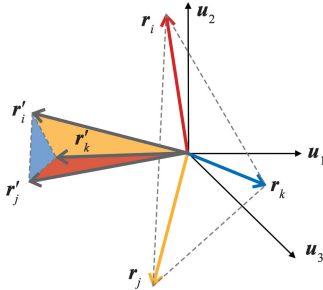


图2 主特性向量解耦示意

Fig. 2 Decoupling of the main characteristic vectors

记矩阵 R' 到 R 的过渡矩阵为 C ,有 $R' \cdot C \cdot C = R'$,即 C 是一个对合矩阵。经过上述变换,温度效应引起的信号变化量都将以投影的形式反映在特性向量上,此投影值的大小必然随温度变化服从幂函数。

1.3 利用特性函数表征温度效应

特性向量可以表征温度影响的方向,且每一阶特性向量都独立地表征单一阶次的温度效应。受温

度影响的样本信号 W_{III} 与第 i 阶特性向量 r_i 存在映射关系,即

$$\varphi_i(\Delta T) = W_{\text{III}}^T(\Delta T) \cdot r_i \quad (8)$$

$\varphi_i(\Delta T)$ 表示样本信号在特性向量上的投影,其服从 i 次幂函数。根据1.2节可知,由式(8)所得投影为单一阶次的部分投影,这部分不受其他阶次影响的量即为温度效应的幂律特征。幂律特征是样本信号投影到向量空间中得到的,其等价于温度效应引起的残差量或偏转量的投影。因此,单一阶次的幂律特征表现的是信号残差分量(即信号能量变化率)的一部分。另一方面,特性向量则给出了幂次变化的方向,提供了温度效应影响超声信号的有关信息。不同阶次的幂律特征代表了温度效应的不同成分,对于总能量相同而影响形式不同的温度效应将表现出不同的幂律特征值。

若样本信号除了包含温度效应外,还受到温度以外其他参数的影响,则所得映射 $\varphi_i(\Delta T)$ 不会严格服从 i 次幂函数,即存在部分偏差,记这类偏差为 $\mu(\Delta T)$,则

$$g_i(\Delta T) = \varphi_i(\Delta T) - \mu(\Delta T) \quad (9)$$

$g_i(\Delta T)$ 为幂律特征的基函数,记作特性函数。仅当 $\mu(\Delta T) \equiv 0$,即环境严格存在温度单一影响时,由投影所得函数即特性函数。

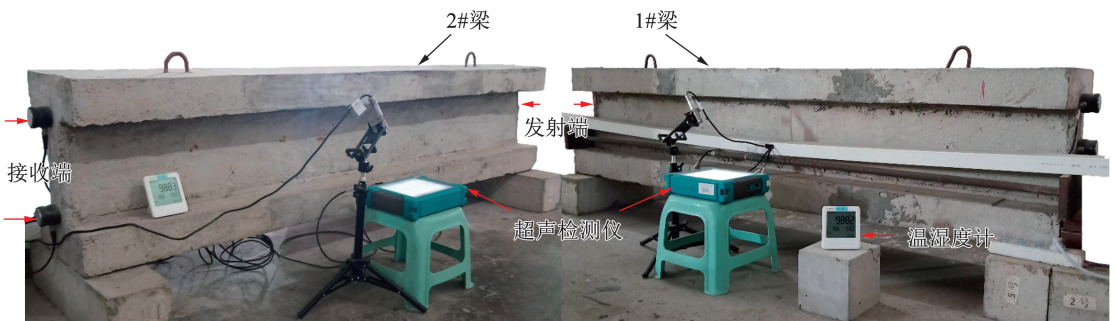
上述方法分析温度效应时,式(8)表示的映射关系通常是离散的。借助少量样本获得映射关系后,可以通过曲线拟合获得连续且显式表达的特性函数,便于其在不同场合的应用。

2 混凝土超声测试实验

开展混凝土超声测试实验,在实验室自然温度变化条件下采集超声信号,同步记录环境温度,得到若干超声信号及对应温度值。

2.1 测试系统与实验方案

测试系统含混凝土试件、超声测试仪、超声传感器、环境温度采集仪4个部分,总体布置如图3所示。



(a) 实验测试系统

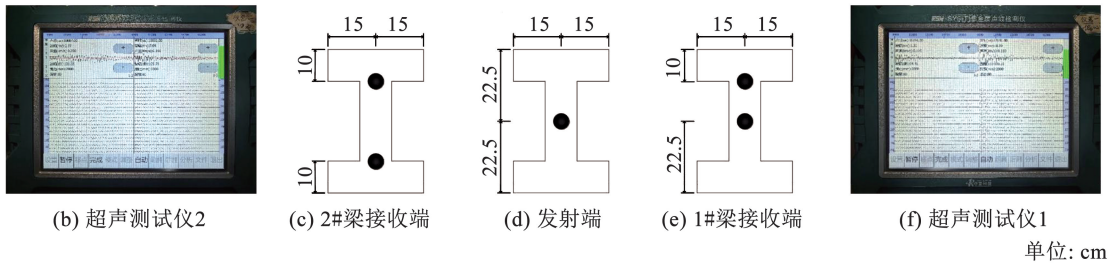


图 3 实验系统

Fig. 3 Test system

单位: cm

2.1.1 测试介质

两个同尺寸的钢筋混凝土工字梁试件(记为1#、2#梁),梁长为2 m,梁高45 cm,梁宽30 cm,翼缘板厚度10 cm。梁体内部配有直径为10 mm的HPB300级钢筋,箍筋间距15 cm。混凝土(强度C30)配合比为 m (水泥): m (细骨料): m (粗骨料): m (水): m (粉煤灰): m (矿物)=1.00:2.50:3.85:0.55:0.22:0.16。粗骨料为5~10 mm的碎石,含泥量为0.3%。支座垫石为混凝土试块,尺寸为55 cm×15 cm×55 cm。垫石与试件之间设有弹性橡胶垫作为缓冲。

2.1.2 超声测试仪

超声测试仪为RSM-SY5(T)非金属声波检测仪。为使超声信号的温度效应更加明显,设定采集接收时间相对靠后的超声时域信号。声波检测仪的采样长度、触发延时、采样间隔、脉宽、增益和跨距等参数见表1。

表 1 RSM-SY5(T) 声波检测仪参数设置

Tab. 1 RSM-SY5(T) acoustic detector parameter setting

采样点数	触发延时/ μs	采样间隔/ μs	脉宽/ μs	增益/ dB	跨距/ mm
1 024	9 999	8	5	80	2 000

2.1.3 压电传感器

采用JHP01型传感器,中心频率50 kHz,直径40 mm。使用环氧树脂胶作为耦合剂将传感器固定在梁端横截面上,排除耦合剂的人为操作误差。采用一发两收透射型布置,发射传感器布置于梁截面中心,1#梁的两个接收器记为1-1(上)、1-2(中),2#梁的两个接收器记为2-1(上)、2-3(下)。

2.1.4 温湿度计

环境温度湿度记录使用YEM-70L温湿度自动采集仪,采样间隔设置为5 min/次。温度量程为-30~65℃,精度为 ± 0.3 ℃,分辨率为0.1℃。湿度量程为0~100% RH,精度为 $\pm 3\%$ RH,分辨率为0.1% RH。

2.2 超声信号采集与处理

实验累计测试182 d,每天连续采集14个时段。

每个时段采集26 min,连续重复采集400次。每天实验前对超声测试仪预热1 h,待仪器示值稳定后开始采集超声信号,同步记录环境温度。每次采集均得到一个超声时域信号,含1 024个采样点。每片梁的每个接收器累计采集得到一个 $1\ 024 \times 400 \times 14 \times 182$ 的信号矩阵。每个测试时段可采集5个环境温度数值,共计得到 $5 \times 14 \times 182$ 个温度值,温度值与信号矩阵中的信号向量一一对应。

研究表明,传感器发射频率的温度依赖性对最终的超声信号影响较小,为尽可能减小发射能量的差异,同时消除部分环境噪声。对记录信号作预处理:1)信号向量每个维度幅值减去所有维度幅值的均值,即去均值;2)平均每个时段的400个信号;3)时段平均后的信号向量能量归一化。每个接收器的信号预处理后均得到一个 $1\ 024 \times 2\ 548$ 的信号矩阵。每个时段的5个温度值平均可得到2 548个温度值。预处理后的样本记为一级样本。

3 温度效应的幂律特征和影响规律

为减小非温度因素的影响对一级样本适当平均,分析温度对混凝土超声信号的影响并量化温度效应的幂律特征,然后与理论构造信号的量化结果对比。

3.1 超声信号的温度效应

原始记录信号预处理后得到一级样本,其包含多种环境因素影响。为研究温度对超声信号的影响规律,对一级样本进行以下两种平均:从最低温开始,每隔0.2℃将步长内的温度和对应信号平均一次,取平均温度和平均信号为新的二级样本,该处理可消除样本分布权重的影响,称为“相同温度”平均;基于二级样本,每个温度及其对应信号都在自身 $\pm \Delta t$ (取 ± 2 ℃)范围内作平均,取平均温度和平均信号为新的三级样本,该处理可减小非温度因素的影响,称为移动平均。

3.1.1 信号向量的方向角

超声信号可视为高维向量空间的信号向量,任意信号向量与选定的基准向量之间存在空间夹角,

由此定义方向角来考察温度对超声信号的影响。设信号向量为单位(列)向量,则信号 w_i 相对于基准信号 w_B 的方向角定义为

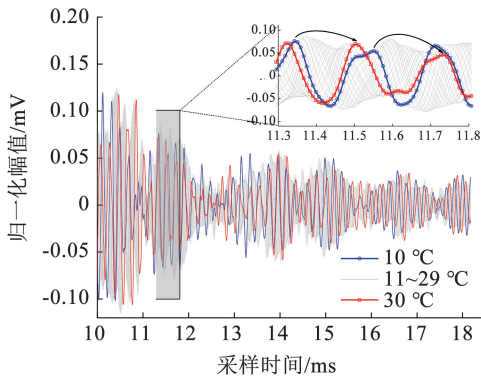
$$I_\theta = \arccos(w_B^T \cdot w_i) \quad (10)$$

I_θ 表示信号向量间的空间夹角,取值为 $[0, \pi]$ 。将 I_θ 作为衡量超声信号差异的指标, I_θ 越大表示信号向量的偏转角度越大,信号受到的温度影响也越强。

3.1.2 温度的非线性影响

超声信号的温度效应可以用不同的声学物理参数进行表征。基于1#梁接收端1(上)的数据,给出三级样本的超声波形和方向角与环境温度的关系,结果如图4所示。

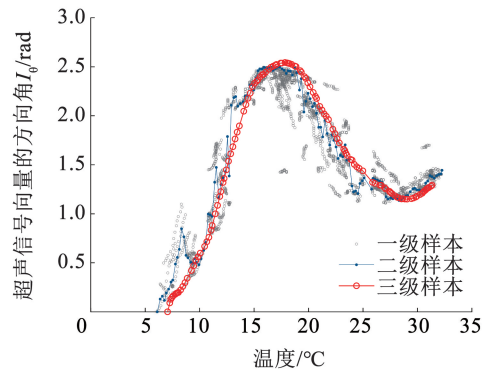
图4(a)给出了实验所得10~30℃的三级样本信号波形图,可以看出,温度效应导致的超声信号平移、伸缩和局部波形变异现象。文献研究也表明,在2~3℃的环境温度波动下,非匀介质的超声波形即受到显著影响。并且波形平移量和伸缩率随温度升



(a) 超声波形与温度的关系

高并非始终遵循线性关系,特别当温度变化超过一定范围时,呈现出明显的非线性特征。为此考察超声信号向量在高维空间的偏转规律。

由图4(b)可以看出,实验所得一级样本信号的方向角与温度具有多对一的映射关系,这表明超声信号受到温度以外的其他因素影响。一级样本经过“相同温度”平均和移动平均处理后,得到具有一对一映射关系的三级样本,此时温度对超声信号的影响以方向角的偏转形式显现。超声波形的时移、伸缩和波形变化特征在高维向量空间被映射为向量夹角随温度的类正弦变化趋势。基于方向角具有规律性变化的特点,对样本信号在向量空间的残差量进行奇异值分解。采用幂函数序列逼近其非线性偏转映射值,构造得到反映温度效应的各阶特性向量。最终,非线性偏转量能够以幂函数形式的基函数来表征,实现对温度效应的有效量化与精确标定。



(b) 方向角与温度的关系

图4 超声信号的非线性温度效应

Fig. 4 Nonlinear temperature effect of ultrasonic signal

3.2 温度效应的幂律特征

首先确定一个基准温度,此处选取与平均温度最接近的测量值,对应的信号定义为基准信号。根据第1节中介绍的方法,在时域向量空间中提取了10个特性向量,分别对应0~9阶幂律特征。通过将三级样本信号投影到这些特性向量上,建立了效应指标与温度增量之间的映射关系,并拟合出描述温度效应的特性函数。图5展示了1#梁上面接收端各阶幂律特征的提取结果。

图5(a)~(f)分别为第0~5阶的量化结果,图5(g)、(h)分别为0~9阶的奇数次和偶数次量化结果。实验超声测试信号的温度效应并不严格服从其特性函数,而是存在微小偏差。这是由于样本中包含非温度因素影响,这些因素的影响方向与温度特性向量存在相关性(或正或负),量化时会影响温度分量的投影,使得实测值略大于或小于拟合值。

此外,0阶特性向量的指标值相对较小,所得0阶特性函数为一个较小的常数,如图5(a)所示,其表征了样本信号的整体偏差。

2#实验梁的温度效应幂律特征量化规律类似,图6展示了两片梁同位接收端(上)各阶温度效应能量(所有样本实测投影值的平方和)以及量化拟合优度与特性函数阶次之间的关系。特性函数是通过拟合得到的,其准确性依赖于温度效应的能量大小,即样本信号向量相对于基准向量在高维空间的偏转角大小,这与温度变化区间和梁体本身的物理性质及外部条件有关。在该实验条件下(2#梁靠近实验室通风口),2#梁受到环境非温度因素的影响更为明显,其温度效应的总能量小于1#梁的,这使得2#梁超声测试的温度效应高阶特征受到明显干扰,其第9阶拟合优度相对于2#梁小了约13%;由于低阶特征能量占比较大,非温度因素对其干扰不

明显,拟合优度与 1#梁的接近。值得注意的是,两片梁超声测试温度效应量化的同一特征在量值上有所差异,但特征的量值随阶次增加的变化规律趋于

一致,这体现了温度效应对两者作用规律的一致性,为此在 3.3 节利用波动方程的理论解构造时域信号进一步探究这种一致规律。

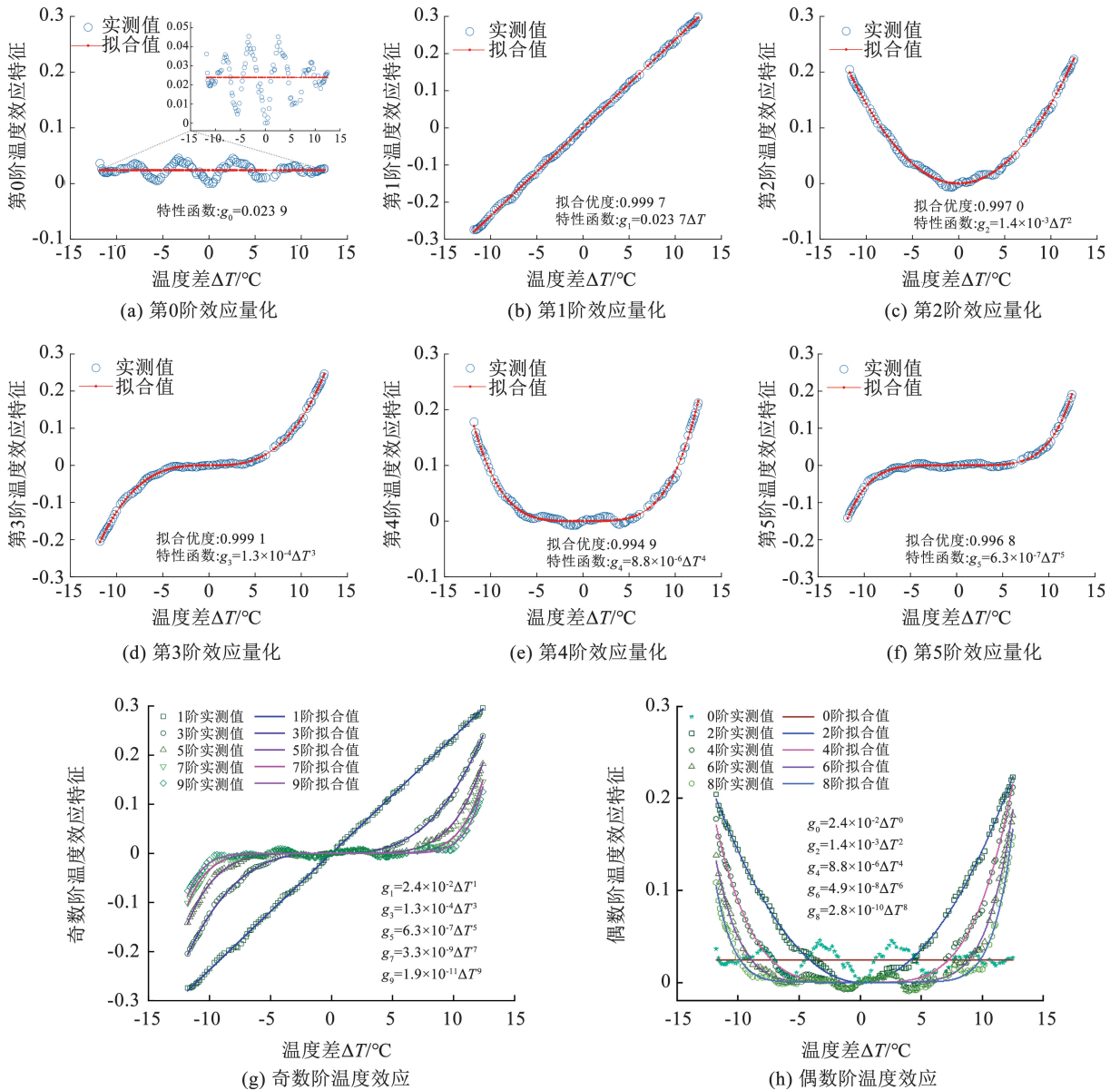


图 5 各阶温度效应的量化结果

Fig. 5 Quantitative results of temperature effects of all orders

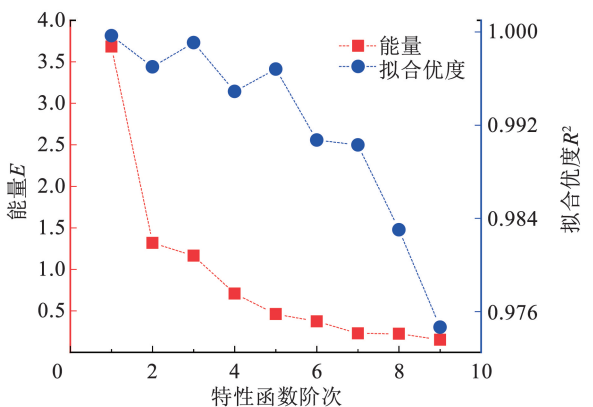


图 6 特性函数阶次与能量及量化拟合优度的关系

Fig. 6 Relationship between basis function order, energy, and goodness of fit of quantification

上述超声测试的温度效应量化结果如下:幂律特征的量化结果与其数学性质相符,奇数阶表现为奇函数(关于基准点反对称),偶数阶表现为偶函数(关于基准点对称);效应分量的能量随阶次增加而递减,表明温度效应主要集中在低阶分量;量化效果与效应能量大小相关。随着能量减小,拟合优度总体呈下降趋势,显示低阶特征,具有更强的鲁棒性。

不同的信号样本及不同的温度区间跨度所得幂律特征的数量可能不同,其主要由温度效应的非线性程度决定。由于事先并不知道幂的阶数,需要事先估计一个稍大的阶数进行试算,并逐步减小直至最高阶幂律特征刚好出现,以此确定最优阶数。若

阶数过小, 则误差增大, 结果不可用。对于能量占比较低的高阶特征, 虽然可以被特性向量勉强投影出来, 因其受非温度因素影响显著也应舍去。

实验结果表明, 在适当条件下, 超声测试的温度效应幂律特征可以成功提取。通过事先获得的温度效应特性函数, 可以描述和表征这种效应, 并为测量对象的其他参数提供评估基础。

3.3 幂律特征的理论验证

超声波的纵向传播可简化为等截面细长直杆杆端受冲击荷载后振动的传播, 力学模型如图 7 所示。此处基于杆的纵向振动一维波动方程, 考虑温度作用下杆的线性伸长和弹性模量变化, 以梁末端加速度为幅值, 构造温度变化下的时域信号, 然后量化其温度效应并与实验结果对比。

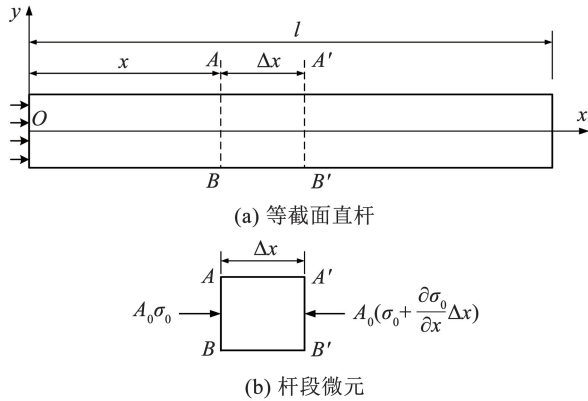


图 7 均匀细长直杆杆端受冲击荷载

Fig. 7 Uniform slender straight rod with impact loading at the free end

图 7 所示杆的纵向振动一维波动方程为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (11)$$

其中, 波速

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (12)$$

式(11)有通解

$$u = \sum \varphi_i(x) g_i(t) \quad (13)$$

$$g_i(t) = A_i \sin \omega_i t + B_i \cos \omega_i t \quad (14)$$

$$\varphi_i(x) = C_i \sin \frac{\omega_i x}{c} + D_i \cos \frac{\omega_i x}{c} \quad (15)$$

取两端自由的边界条件, $\varphi'(0) = \varphi'(l) = 0$, 可得

$$u(x, t) = \sum_{i=1}^n (A_i \sin \omega_i t + B_i \cos \omega_i t) \cdot \cos \frac{i\pi x}{l} \quad (16)$$

其中, A_i, B_i 与初始条件有关, 设初始条件为

$$\frac{\partial^2 u(0, 0)}{\partial t^2} = 1, \frac{\partial u(0, 0)}{\partial t} = 0$$

将初始条件代入式(16)可得 $A_i = 0, -\sum_{i=1}^n B_i \cdot \omega_i^2 = 1$,

取 $B_i = -\omega_i^{-2}/n$ (n 为模态叠加所用阶数)。

当取 1~5 阶模态进行叠加时, 温度效应的第 1 阶能量与实验信号的相同, 在此基础上比较理论和实验所得信号的温度效应幂律特征。利用式(16)位移函数求二阶偏导可得直杆末端位置在特定时间窗口内的加速度值。每 1 个温度取值对应 1 次杆长和弹性模量变化, 并将 1 023 个时刻下的加速度值作为 1 个时域信号, 累计得到 120 个构造时域信号, 最后将每个信号的能量归一化。信号构造时参数设定如表 2 所示。

表 2 理论模型的构造信号所用参数

Tab. 2 Parameters used for constructing signals for theoretical models

参数	设定值	说明
弹性模量	3.0×10^{10} Pa	取常用值, C30 混凝土弹性模量约为 3.0×10^{10} Pa
体积密度	$2\ 400$ kg/m ³	取常用值, C30 混凝土质量密度为 $2\ 350 \sim 2\ 450$ kg/m ³
初始杆长	2 m	与实验相同, 初始杆长即无温度变化时的杆长
热膨胀系数	$1.0 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$	取适中值, 混凝土的热膨胀系数为 $(0.8 \sim 1.2) \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$
弹性模量变化率	$1.5 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$	取适中值, 混凝土的弹性模量变化率为 $(1.0 \sim 2.0) \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$
叠加模态	1~5	取适中值
温度变化区间	$[-11.8, 12.5]^\circ\text{C}$	温度取值与实验的三级样本相同, 共计 120 个温度值
采样点数	1 023	与实验采样点数相同
采样间隔	8×10^{-6} s	与实验采样间隔相同
采样时间窗口	$(9\ 999 \sim 18\ 175) \times 10^{-6}$ s	与实验采集的时间窗口相同

由于两片实验梁的热膨胀率和弹模变化率并不相同, 为比较实验信号和理论构造信号的温度效应

量化规律, 选择适当的热膨胀系数和弹模变化率, 使得构造信号的第 1 阶分量量值与 1#梁的接近, 由此

比较其余阶次的量化结果。理论构造信号同样得到 9 个阶次的幂律特征,图 8(a) 给出了半幅温度区间

0 ~ 12 °C 的量化结果。这里构造信号没有零漂,因此不含 0 次项。

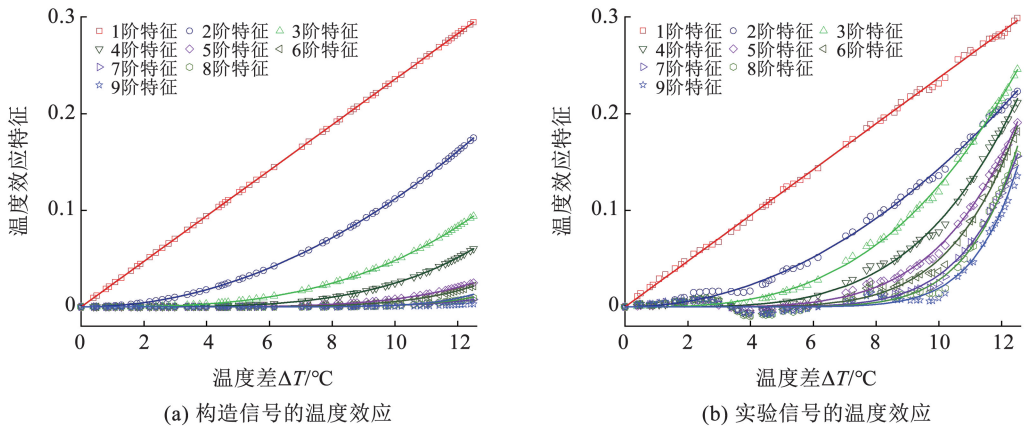


图 8 构造信号与实验信号的温度效应

Fig. 8 Temperature effects of the constructed and experimental signals

基于图 8 的结果得到特性函数后,可计算对应温度区间内任意温度的样本信号特性值。对 1 °C 和 10 °C 的单个样本信号的投影值取平方,得到其温度效应能量,图 9 给出了这两个温度下的特性函数阶次与温度效应能量的关系。可以看出,实验信号与构造信号的温度效应各阶能量随特性函数阶次增加逐渐递减,且均服从形如 $Ae^{\lambda n}$ 的指数递减规律。同时注意到,实验信号与构造信号的前 2 阶能量较大,且两者较为接近。从第 3 阶开始,实验信号的能量减小趋势相对缓慢,而构造信号的能量下降趋势更为显著,表明两种样本的温度效应差别主要体现在第 3 阶以后。

其高阶特征的能量比构造信号的大。另一方面,理论构造信号的声传播介质为理想匀质材料,而实验测试介质为非匀质的混凝土,其内部包含孔隙、气泡等大量散射体,这些散射体的变化也会带来超声传播路径的改变^[23],且温度越高散射体变化越突出。因此,实验信号温度效应第 3 阶以后的幂律特征还可能与散射体的变化程度有关。诚然,上述物理模型较为简洁,其理论结果无法反映实验场景下的温度效应产生和作用的全过程,只能得到温度效应幂律特征的分布和变化规律。仅以此验证幂律特征表征温度效应的可行性,而温度效应的影响机制尚待深入研究。

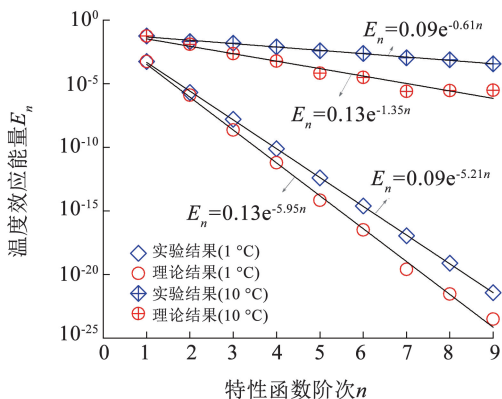


图 9 特性函数阶次-温度效应能量关系

Fig. 9 Temperature effect energy-characteristic function order

比较 1 °C 和 10 °C 下单个信号的温度效应能量变化趋势可以看出,温度越高,则实验信号与构造信号的高阶特征差别越大。由于理论模型为一维构件,而混凝土梁有特定的截面形式且更接近三维构件,在相同温度变化下实验信号传播过程中的边界反射更加复杂,温度的非线性效应会更加明显^[22],

4 混凝土超声测试中的非温度影响因素

与金属、玻璃等匀质介质不同,混凝土属于多相复合的非匀介质,在超声测试过程中,其物理力学性质除了因外部温度条件不同外,也依赖内部含水率的变化^[24-25]。在非浸水条件下,混凝土内部含水率主要与外部环境温度 and 绝对湿度有关。正是由于环境温湿度的耦合影响,温度、湿度以及含水率对超声信号的影响机制异常复杂。

含水率和环境温度对混凝土超声测试信号的影响具体分为 3 个部分:混凝土内部含水率不变,直接由温度引起的介质物理性质变化,主要包括弹性模量、密度、声程;由于混凝土内部含水率变化引起的介质物理性质变化,主要包括弹性模量、密度;前两者的非线性耦合影响。当温度不变时,混凝土内部含水率主要与外部绝对湿度有关,而环境温度对混凝土内部含水率还有直接的影响,即混凝土内部含水率与外部绝对湿度及环境温度均有直接关系。考

考虑到无损检测的情况下,实际工程测量混凝土构件的含水率十分困难,考察试件的外部环境条件尤为必要。

图10给出了实验过程中环境温度、绝对湿度及两者得出的相对湿度随实验时间的变化曲线,横坐标的一个时段为26 min,每个时段对应一个平均后的温湿度样本,共计2 548个时段。所示温度、绝对湿度、相对湿度在一天内的变化量最大值分别为

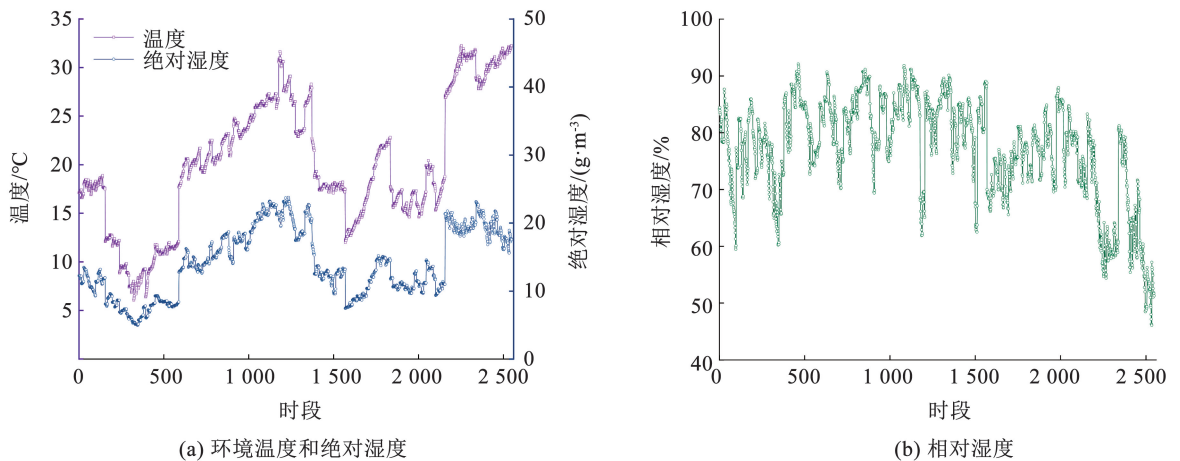


图10 实验环境温湿度随时间变化规律

Fig. 10 Temporal variation of laboratory ambient temperature and humidity

尽管实验在非受控的室内条件下开展,环境温度湿度变化相比室外更加规律且平缓,但不同类型的环境条件及不同的数据处理方法可能导致幂律特征的数量和特征值大小存在差异。在实际工程中,特别是在恶劣环境下或涉及跨江和沿海工程时,绝对湿度和温度的变化可能不同步,混凝土含水率也可能受到其他因素的影响。因此,除了温度之外,还需特别关注环境湿度对超声测试信号的影响,或者采取措施控制混凝土内部含水率的变化,以确保测量结果的可靠性。

5 结论

1) 利用时域向量空间投影可以实现温度效应的数学描述,超声信号的非线性变化可在时域向量空间被直接投影分解为简单的函数形式,这一过程在幂函数上进行了验证,得到了幂函数基表示的温度效应声测特征。

2) 同一温度下的效应可被不同基函数表示,不同基函数对应的幂律特征具有不同的物理意义。实验信号的温度效应量化得到0~9阶分量,其中,0阶特征表征声传播过程中与温度相关的稳定量,1~9阶特征表征温度效应的大小,其随幂函数阶次升高能量逐渐减小。

3) 借助幂律特征可在物理模型上近似得到超

声测试过程中温度效应的影响规律和趋势。考虑介质的热膨胀和弹性模量变化,理论构造信号温度效应的幂律特征分布规律和实验信号相同。两种信号提取得到相同数量的幂律特征,其反应的温度效应能量随基函数阶次升高均服从指数衰减。

4) 基于两种信号的温度效应量化结果,得到了特征与温度之间以及不同特征之间的关系。即同一幂律特征与温度增量之间遵循幂函数映射,不同幂律特征的量值随幂次的增加呈指数映射。

尽管实验在相对稳定的室内环境中进行,但环境条件(如温湿度)、数据处理方法、试件形式及材质种类等因素可能影响幂律特征的数量和量值。此外,同一声测特征对不同目标参数的敏感度差异以及应用场景的不同要求也意味着需要针对具体情况设置相应的区分或校正温度效应的阈值。因此,在利用幂律特征分析由不同因素(如温度、损伤、应力等)引起的信号变化时,应当考虑上述因素的影响。上述结论可以为超声测试中的温度效应研究提供参考。

参考文献

- [1] WANG X, NIEDERLEITHINGER E, HINDERSMANN I. The installation of embedded ultrasonic transducers inside a bridge to monitor temperature and load influence using coda wave interferometry technique [J]. Structural Health Monitoring, 2022,

- 21(3): 913. DOI: 10.1177/14759217211014430
- [2] KEXEL C, MAETZ T, MÄLZER M, et al. Ultrasonic data transmission across metal structures affected by environmental conditions [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2021, 490: 115691. DOI: 10.1016/j.jsv.2020.115691
- [3] WANG Yishou, WANG Geng, WU Di, et al. An improved matching pursuit-based temperature and load compensation method for ultrasonic guided wave signals[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 67530. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2985748
- [4] SAENGER E H, FINGER C, KARIMPOULI S, et al. Single-station coda wave interferometry: a feasibility study using machine learning [J]. *Materials*, 2021, 14(13): 3451. DOI: 10.3390/ma14133451
- [5] LU Yinghui, MICHAELS J E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations[J]. *Ultrasonics*, 2005, 43(9): 718. DOI: 10.1016/j.ultras.2005.05.001
- [6] YE H C, JEYAPRAKASH N, YANG C H. Non-destructive characterization of elastic properties on steel plate using laser ultrasound technique under high-temperature atmosphere [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 108: 129. DOI: 10.1016/j.ijmesci.2024.109158
- [7] WEI W, ZHANG Y, DU Z, et al. The dependence of ultrasonic velocity in ultra-low expansion glass on temperature [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 577. DOI: 10.3390/app12020577
- [8] ZHONG Bibo, ZHU Jinying. Applications of stretching technique and time window effects on ultrasonic velocity monitoring in concrete [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(14): 7142. DOI: 10.3390/app12147130
- [9] MESNIL O, RECOQUILLAY A, FISHER C, et al. Self-referenced robust guided wave based defect detection; application to woven composite parts of complex shape [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 188: 109948. DOI: 10.1016/j.ymsp.2022.109948
- [10] SHEN Yanjun, HOU Xin, YUAN Jiangqiang, et al. Thermal deterioration of high-temperature granite after cooling shock: multiple-identification and damage mechanism [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2020, 79: 5389. DOI: 10.1007/s10064-020-01888-7
- [11] ABBAS S, LI F, QIU J, et al. Optimization of ultrasonic guided wave inspection in structural health monitoring based on thermal sensitivity evaluation [J]. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 2021, 40(1): 612. DOI: 10.1177/1461348419886189
- [12] LIU W, SHAN L, LIN Z, et al. Dual-wave ZnO film ultrasonic transducers for temperature and stress measurements[J]. *Sensors*, 2024, 24(17): 5691. DOI: 10.3390/s24175691
- [13] CROXFORD A J, MOLL J, WILCOX P D, et al. Efficient temperature compensation strategies for guided wave structural health monitoring[J]. *Ultrasonics*, 2010, 50(4/5): 517. DOI: 10.1016/j.ultras.2009.11.002
- [14] MEMMOLO V, LUGOVTSOVA Y, OLINO M, et al. Application of temperature compensation strategies for ultrasonic guided waves to distributed sensor networks[C]//49th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2023, 86595: V001T10A001
- [15] 郑罡, 陈鹏, 彭宇, 等. 混凝土超声测试温度效应量化方法与实验验证[J]. *中国科技论文*, 2023, 18(4): 372
ZHENG Gang, CHEN Peng, PENG Yu, et al. Quantitative method and experimental verification of temperature effect in concrete ultrasonic test[J]. *China Sciencepaper*, 2023, 18(4): 372. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2783.2023.04.004
- [16] MARIANI S, CAWLEY P. Change detection using the generalized likelihood ratio method to improve the sensitivity of guided wave structural health monitoring systems[J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(6): 3222. DOI: 10.1177/1475921720981831
- [17] 王伟. 复合材料结构的超声应力无损检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019
WANG Wei. Research on the ultrasonic stress nondestructive testing technology of composite structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019
- [18] ZONG S, WANG S, LUO Z, et al. Robust damage detection and localization under complex environmental conditions using singular value decomposition-based feature extraction and one-dimensional convolutional neural network [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 36(1): 61. DOI: 10.1186/s10033-023-00889-3
- [19] 王海军, 王涛, 俞慈君. 基于递归量化分析的 CFRP 超声检测缺陷识别方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2024, 58(8): 1604
WANG Haijun, WANG Tao, YU Cijun. CFRP ultrasonic detection defect identification method based on recursive quantitative analysis [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2024, 58(8): 1604. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2024.08.008
- [20] MARIANI S, RENDU Q, URBANI M, et al. Causal dilated convolutional neural networks for automatic inspection of ultrasonic signals in non-destructive evaluation and structural health monitoring [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 157: 107748. DOI: 10.1016/j.ymsp.2021.107748
- [21] YON K C, BAKHARY N, PADIL K H, et al. Unsupervised environmental operating condition compensation strategies in a guided ultrasonic wave monitoring system: evaluation and comparison [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2024, 14(4): 861. DOI: 10.1007/s13349-024-00761-5
- [22] 杨正岩. 异型截面结构超声导波监测的半解析有限元分析方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020
YANG Zhengyan. Investigation of semi-analytical finite element method for guided wave based monitoring in arbitrary cross-section [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020
- [23] SNIEDER R, GRËT A, DOUMA H, et al. Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity [J]. *Science*, 2002, 295(5563): 2253. DOI: 10.1126/science.1070015
- [24] OKAZAKI S, IWASE H, NAKAGAWA H, et al. Effect of moisture distribution on velocity and waveform of ultrasonic-wave propagation in mortar [J]. *Materials*, 2021, 14(4): 790. DOI: 10.3390/ma14040790
- [25] LI Haoran, MENG Shirong, SHI Dongping, et al. Influence of moisture on ultrasonic propagation, acoustic emission activity, and failure mechanism in concrete media[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 386: 131499. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131499