

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2024.06.002

基于向量残差 SVD 的混凝土超声测试温度效应研究

郑 罡^{1,2}, 陈 鹏^{1,2}, 彭 宇^{1,2}, 于吉港^{1,2}, 陈伟基^{1,2}

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

摘要:为研究温度对混凝土超声测试尾波信号的影响规律;将信号向量间的归一化夹角作为波动指标,反映温度效应引起的信号变化;通过向量残差矩阵 SVD 获得表征温度效应大小的特征向量,建立向量空间映射和温度差的数学关系。在实验室采集混凝土梁尾波信号进行验证,结果表明,随温度升高尾波信号的波形发生后移,文中方法可分段线性量化温度效应;基于量化结果,得到常温下超声尾波信号最敏感的温度区间;任意 4.5 °C 范围内,可去除 74%~90% 的温度效应。

关键词:向量残差;SVD;温度效应;混凝土;超声波

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2024)06-015-09

Research on temperature effect of concrete ultrasonic testing based on vector residual SVD

ZHENG Gang^{1,2}, CHEN Peng^{1,2}, PENG Yu^{1,2}, YU Jigang^{1,2}, CHEN Weiji^{1,2}

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

Abstract: In order to study the influence of temperature on the coda wave signal of concrete ultrasonic test, the normalized angle between signal vectors is used as the fluctuation index to reflect the signal change caused by temperature effect. The eigenvectors characterising the magnitude of the temperature effect are obtained by SVD of the vector residual matrix, and the mathematical relationship between the vector space mapping and the temperature difference is established. Verification of concrete beam code wave signals are collected in the laboratory. The results show that the waveform of the coda wave signal shifts backward with increasing temperature, and the proposed method can quantify the temperature effect piecewise and linearly. Based on the quantization results, the most sensitive temperature range of ultrasonic coda wave signal at room temperature is obtained. When the temperature span is 4.5 °C, 74%~90% of the temperature effect can be removed.

Keywords: vector residual; SVD; temperature effect; concrete; ultrasonic

超声波在非均匀介质中传播时会发生散射和衍射,使得一部分波的传播路径更长,称这一部分为尾波。Larose 等^[1]测试单轴应力混凝土试件的波速变化,尾波波速对应力识别分辨率在 0.01~0.1MPa。Payan 等^[2]对比了混凝土与岩石的尾波波速,得到混凝土的波速变化率明显小于岩石的结果。郭增伟等^[3]在实验室开展混

收稿日期:2023-03-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51478072, 51978112)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51478072, 51978112).

作者简介:郑罡(1972—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事桥梁结构动力学研究,(E-mail)zhenggang@cqjtu.edu.cn。

混凝土梁加载实验,得到了梁的应力与尾波特征参数的线性关系。Jiang等^[14]利用退役的30 m混凝土T梁,证明尾波可以检测到应力和损伤的变化,通过建立传感器网络,可以准确区分混凝土中拉伸和压缩应力的变化。其他研究也表明,超声尾波在混凝土应力监测方面具有潜在优势^[15-9]。

超声信号易受环境温度影响这一问题在尾波信号上体现得尤为明显,无论在实验室还是实际工程中,区分温度和应力引起的声学特征变化较困难。Snieder等^[10]测量了温度变化时花岗岩和铝试件中尾波波速变化的均值和方差,得到 $\pm 5^\circ\text{C}$ 温度变化下相对速度变化幅度约为0.1%,误差约为0.02%。Wang等^[11]利用尾波监测了实桥的应力,认为温度对桥的影响不可忽视,是波速变化的主要影响因素之一。Niederleithinger等^[12]认为尾波在区分波形类别、确定方向性及预估测量上限等方面存在诸多限制;此外,尾波信号极易受到环境温度的影响,当前亟须优化信号处理方法^[13]。Larose等^[14]针对混凝土板在不同环境温度下的尾波波形进行了分析,验证了环境温度的改变与尾波波形时移量的变化存在相关性。温度变化的主要影响是波形的拉伸或压缩,次要影响是波形的形状改变^[15]。由于这种主要影响,即使温度仅相差几度,记录波形间的均方误差与结构损坏前后的波形均方误差处于同一数量级^[15]。Lu等^[15]利用“最优基线法”,选取基线库内与测试波最匹配的基线波,并计算测试波与基准波之间的误差参数,较大程度地补偿了测试波的温度效应。Zhang等^[16]提出“热偏差控制技术”,利用参比试件进行对照实验,显著降低了实验室环境温度波动带来的影响。上述2种方法为解决温度对尾波信号的影响提供了思路,不过实际混凝土工程结构很难建立大型基线数据库,而参比试件的制作则十分困难。为此,Lu等^[15]回到温度效应的量化问题上,研究了铝试件的尾波到达时间与波速变化率的关系,得到两者拟合直线斜率与温度差的线性关系。

为实现混凝土材料超声测试温度效应的量化,研究温度效应量化与去除的内在联系,将超声信号视为高维空间中的向量,考察信号向量在高维空间的方向变化规律。基于向量残差SVD提取表征温度效应大小的特征向量,在高维空间建立几何映射关系,实现温度效应的量化和去除。在实验室开展混凝土梁足尺试件超声测试实验,采集自重状态的超声尾波信号,验证文中方法的可行性。

1 温度效应量化和去除方法

将尾波信号视为高维空间中的向量,对于能量归一化的单位信号向量(当未特别说明时,下文的向量包括矩阵中的列向量均为单位向量),其方向变化由温度效应引起。利用SVD提取主成分的能力,锁定温度效应对测试信号产生影响的向量,实现温度效应的量化和去除。

1.1 信号波动性评估

为衡量样本信号与参考信号间的差异性,设样本信号 w_i 与参考信号 w_B 均为单位列向量,计算2信号向量间的归一化夹角,即波动指标 θ

$$\theta = \arccos(w_i^T \cdot w_B) / \pi, \quad (1)$$

式中:波动指标 θ 的取值为 $[0,1]$,当波动指标为0时,表示2向量方向一致;当波动指标为1时,表示2向量相互正交,即2信号不存在相关性。

1.2 温度效应量化与去除

1) 信号向量的残差

设信号样本为矩阵 $W_a = (w_1, w_2, \dots, w_n)$,在样本信号中选定1个 w_B 作为基准信号,所有信号向量减去在基准信号向量上的投影,即

$$D_a = W_a - w_B \cdot [w_B^T \cdot W_a], \quad (2)$$

式中: D_a 为信号向量的残差矩阵; T 表示转置运算。 D_a 的任一列向量在平均信号 w_B 上的投影都为0,即与 w_B 垂直, D_a 包含了温度效应的总体影响(D_a 中的列向量为残差向量不可单位化)。

2) 残差矩阵的SVD

残差矩阵 D_a 为 $m \times n$ 阶矩阵,由奇异值分解可得

$$D_a = USV^T, \quad (3)$$

式中: U 为 $m \times m$ 阶酉矩阵; S 为 $m \times n$ 阶对角矩阵; V^T 为 $n \times n$ 阶酉矩阵,是 V 的共轭转置。其中,

$$S_{m \times n} = \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: Σ_r 为对角阵, 对角线上的元素均非负且按递减顺序排列; r 为非零元的个数, $r = \min(m, n) = \text{rank}(D_a)$; $S_{m \times n}$ 的对角元素 $S_{ii} (1 \leq i \leq \min(m, n))$ 称为矩阵 D_a 的奇异值; U 的列向量称为 $S_{m \times n}$ 的左奇异向量; V 的列向量称为 $S_{m \times n}$ 的右奇异向量。

3) 温度效应量化与去除

信号受影响的因素包括环境温度、环境湿度、随机噪声、系统误差等, 视环境温度效应为主要影响, 建立 I_i 与温度差的关系反映测试信号的温度效应。

$$f(I_i, \Delta t) = 0, \quad (5)$$

式中: I_i 为效应指标; Δt 为环境温度差。样本信号偏离平均方向的程度可由残差矩阵 D_a 的奇异向量 u_1 反映。

$$I_i = w_i^T \cdot u_1 (i = 1, 2, \dots, n), \quad (6)$$

式中: w_i 是样本信号; I_i 可表征温度效应的大小, 取值为 $[-1, 1]$; u_1 为温度效应的特征向量。当 $I_i = 1$ (或 -1) 时, 信号与温度效应方向一致 (或相反), 即与真实信号正交, 效应达到正向 (或反向) 最大; 当 $I_i = 0$ 时, 信号与真实信号方向一致, 没有温度效应。

由温度效应量化的假设, 利用式 (7) 可将样本信号 w_i 在温度作用方向的投影去除, 从而实现温度效应的去除。

$$w'_i = w_i - u_1 \cdot (u_1^T \cdot w_i) (i = 1, 2, \dots, n). \quad (7)$$

2 混凝土超声实验

2.1 测试系统

在实验室开展混凝土工字梁自重状态下的超声测试实验, 同步记录环境温度, 实验系统如图 1 所示。

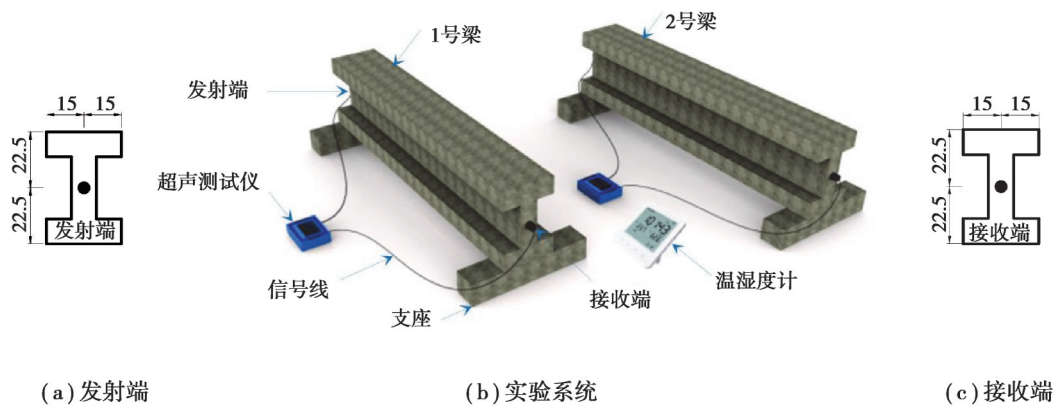


图 1 超声测试系统示意图 (单位: cm)

Fig. 1 Test system

制作了 2 片同尺寸的钢筋混凝土工字梁 (记作 1#、2#梁), 尺寸如图 2 所示。实验梁及仪器参数如表 1 所示。

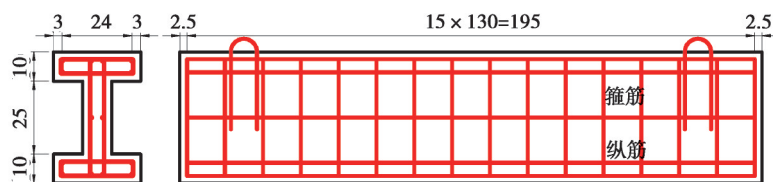


图 2 实验梁配筋图 (单位: cm)

Fig. 2 Reinforcement diagram of test beam

表1 超声测试实验参数

Table 1 Ultrasonic test experimental parameters

超声实验梁	钢筋配置	直径为10 mm的HPB300级钢筋,箍筋间距15 cm。
	C30砼配合比	水泥:细骨料:粗骨料:水:粉煤灰:矿物 = 1.00:2.50:3.85:0.55:0.22:0.16。
	骨料性能	细骨料细度模数2.7,MB值1.1;粗骨料为5~10 mm的碎石,含泥量为0.3%。
实验梁支座	素混凝土试块,尺寸为:55 cm×15 cm×55 cm。	
超声测试仪	跨距	声程为实验梁长2 000 mm。
	增益	增益不改变超声信息,取经验值80 dB。
	脉宽	为获得最大超声能量,取最大值5 μs。
	采样间隔	多次调试后取经验值8 μs。
	触发延时	为采集到尾波信号取仪器最大值9 999 μs。
	采样长度	采样长度越长信息越丰富,取最大值1 024。
压电换能器	直径40 mm,中心频率50 kHz。	
环境温度计	采样间隔为5 min/次;量程:-30~65 °C;精度:±0.3 °C;分辨率:0.1 °C。	

超声测试使用RSM-SY5(T)非金属超声检测仪,电源为充电式电池,已验证电池更换和导线插拔对实验无明显影响。换能器采用JHP01型压电陶瓷换能器,使用环氧树脂耦合剂将换能器永久固定在梁端横截面上,一端发射一端接收。使用YEM-70L环境记录仪自动采集温湿度。

2.2 实验流程与数据采集

实验时间跨度为2020年10月—2021年10月,累计进行了108 d。每天实验时间为9:30—16:30;每次实验开始前均对测试系统和温度计进行预热准备,尽可能降低环境噪声和测试仪器带来的影响,测试系统启动1 h待数据示值趋于稳定后,正式采集当日实验数据。每天进行14个时段的测试(约7 h),单个时段重复采集400条尾波信号,单条尾波信号采样长度为1 024个点。实验过程中同步记录环境温度,每个时段可采集5个温度数值。最后,将测试数据汇总整理为 $1\ 024 \times 400 \times 14 \times 108$ 的信号矩阵和 $5 \times 14 \times 108$ 的温度矩阵。

3 数据处理与结果分析

数据处理流程如图3所示。每次测试采集的1条超声信号为 $1\ 024 \times 1$ 的信号向量,为消除测试误差和换能器能量发射差异的影响,对采集的信号作如下标准化预处理:1)对每个时段的400个信号进行平均;2)零均值化信号向量;3)信号向量范数归一(能量归一化或单位化)。经标准化处理后,每片实验梁可分别得到1个 $1\ 024 \times 1\ 512$ 的信号矩阵。每个时段采集的5个温度值平均,得到1 512个温度值。

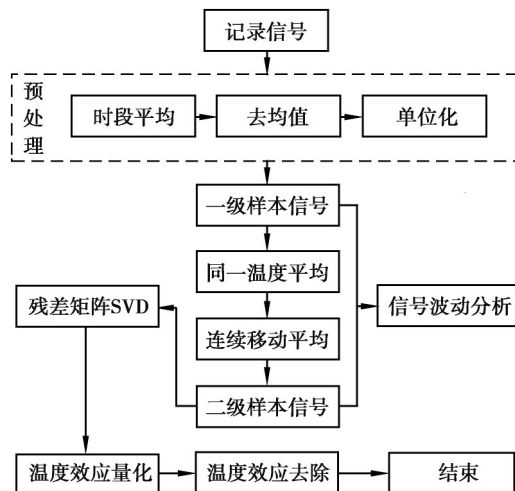


图3 数据处理流程

Fig. 3 Data processing flow

3.1 信号波动性分析

超声信号标准化处理后得到一级样本信号,按温度从小到大排序,依次进行下面 2 种平均,以消除权重对后续处理分析的影响和减小测试误差。

1)以最低温度对应的信号为基准,依次划分 0.1 °C 为间隔的温度区格,认为各区格内的信号处于同一温度,将区格内的温度和对应的信号进行平均,记为均匀样本信号。

2)基于均匀样本信号,以每个温度点为中心把 $\pm\Delta t$ 范围内的温度和对应信号平均,即连续移动平均,得到二级样本信号。

为直观体现环境温度变化对超声测试尾波信号的影响规律,选择最低温度对应的信号为参考信号,3 种样本信号分别与该参考信号做波动指标。图 4 (a)和 4 (c) 表明,波动指标随环境温度升高近似呈类正弦曲线变化,表现出明显的周期性;此外,波动指标随温度升高呈带状分布,表明除环境温度外还存在其他非随机影响因素。图 4 (b)表明,2 梁波动指标随着温度升高相对产生某种固定的螺旋偏转,这是 2 梁固有差异造成的,即温度变化大时,2 梁信号差异体现明显。

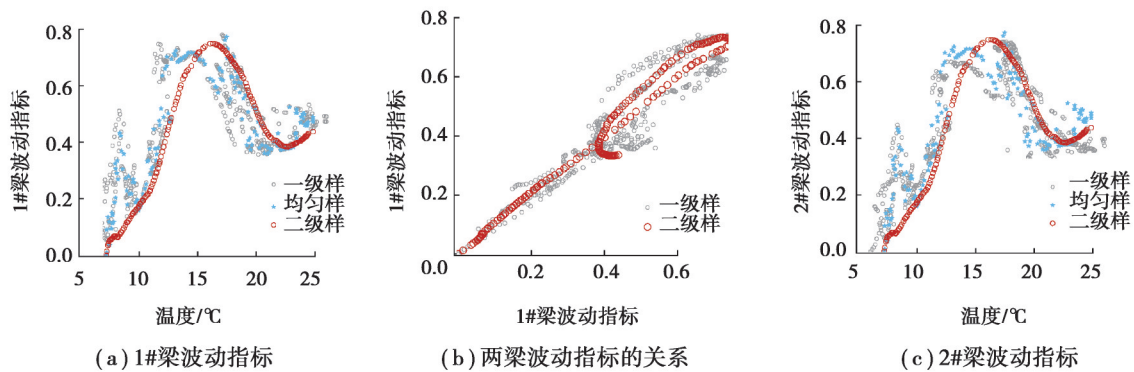


图 4 尾波信号波动指标与温度的关系

Fig. 4 Code wave signal fluctuation indicators as a function of temperature

根据前期的实验分析,测试仪自身温度对信号波动无明显影响,其他非随机影响因素可能是湿度效应引起的^[6,17]。文中主要针对温度效应进行分析,通过连续移动平均减小温度以外的其他影响因素,同时保留温度效应的影响规律,图 4 给出了 $\Delta t=2.0$ °C 时的处理结果。

为分析温度对信号波形特征的影响规律,平均 $[t - 0.5, t + 0.5]$ (t 取整数,°C)范围内的二级样本信号作为 t °C 的代表信号,样本信号能量归一化后的幅值记为归一化幅值。图 5 给出了 1# 梁的处理结果。

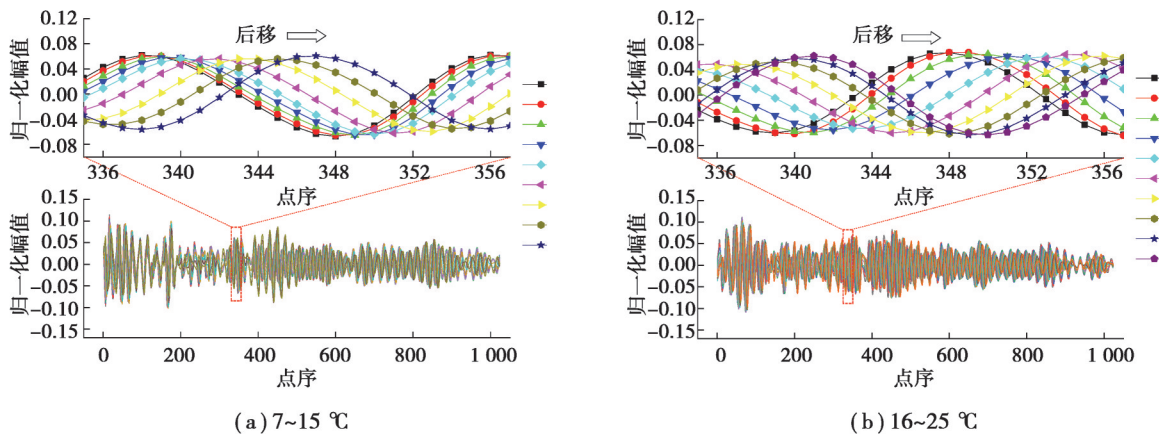


图 5 尾波波形与温度的关系

Fig. 5 The form of Code wave versus temperature

通过分析波形图可以发现,温度变化的主要效应是拉伸或压缩信号,次要效应是变形形状,尾波波形随环境温度上升发生规律性后移。尾波信号可近似看作某种受扰动的衰减正弦信号,而正弦信号的自相关函数为余弦函数。波动指标是该衰减正弦信号的自相关函数的映射,所以图4近似呈类正弦曲线变化。

研究表明,在2~3 °C的环境温度变化时,能显著影响测试信号^[14,18-19]。虽然,大部分文献是以导波飞行时间或波速变化率来反映这种影响,但本质上都反映了导波信号对温度变化的极敏感性。上述现象的存在使得解耦或量化信号的温度影响困难。为此,文中提出一种基于残差矩阵SVD的向量空间几何映射方法,提取温度效应在高维空间产生影响的特征向量,实现温度效应的量化和去除。

3.2 温度效应量化与去除

利用式(6)可建立温度差与效应指标的关系,当量化温度区域不大时,两者具有近似线性关系,反之,将表现出非线性关系。文中采用分段线性量化温度效应,将分段区间内的平均信号作为该区间的基准信号。

1) 温度效应量化的最优区间

线性回归程度可用拟合优度表征。图6给出了不同 Δt 时, ΔT 逐渐增大的拟合优度对比,并选择2种 ΔT 的起始区间,分别为6~10 °C增大至6~21 °C和26~22 °C增大至26~11 °C,分别记为情形一和情形二。

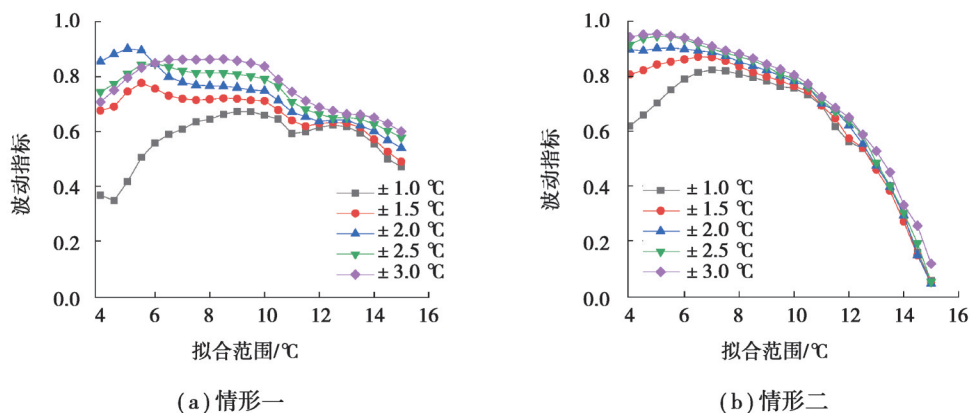


图6 温度效应在不同温度区间的量化效果

Fig. 6 Quantitative results of temperature effect in different temperature ranges

2种情形随着拟合区间 ΔT 增大,拟合优度总体逐渐减小; Δt 分别取 ± 2.0 °C、 ± 2.5 °C及 ± 3.0 °C时,随着拟合区间增大,拟合优度变化曲线光滑下降,可取这3种 Δt 量化温度效应。为了获得拟合优度较高的线性量化结果,综合比较,取 $\Delta t = \pm 2.0$ °C, $\Delta T = 4.5$ °C为宜。

2) 温度效应量化

基于上述分析,将一级样本同一温度(± 0.05 °C)平均后,在 ± 2.0 °C范围内连续移动平均得到二级样本,并在4.5 °C范围内量化温度效应。在选定的温度区间内,二级样本去除其在平均信号上的投影,得到信号残差矩阵。提取信号残差矩阵的奇异向量 \mathbf{u}_1 (效应的特征向量),二级样本在 \mathbf{u}_1 上的投影值即效应指标。图7给出了温度连续的4个区间的量化结果。4个区间拟合优度分别为0.90、0.89、0.92和0.90。单位温度差下效应指标的增量即灵敏度,分别为0.18/°C、0.43/°C、0.39/°C和0.37/°C,表明在11.5~16 °C环境温度下,信号对温度效应最敏感。温度的效应指标与温度差虽有较高的线性关系,但仍有部分实测值偏离预测值较远,且这种偏离不是随机的,说明温度效应线性量化的基础上还存在其他影响量,这可能是温度效应的高阶量。

3) 温度效应去除

二级样本去除残差矩阵奇异向量 \mathbf{u}_1 上的投影,对比分析区间内去效应前后二级样本的波动指标。4个区间内,去效应前后波动指标均值明显减小,去效应比率分别为83%、77%、81%和85%,表明奇异向量 \mathbf{u}_1 上包含了大部分影响量,即温度效应。这样就得到了温度线性影响的方向向量。温度效应去除结果,如图8所示。

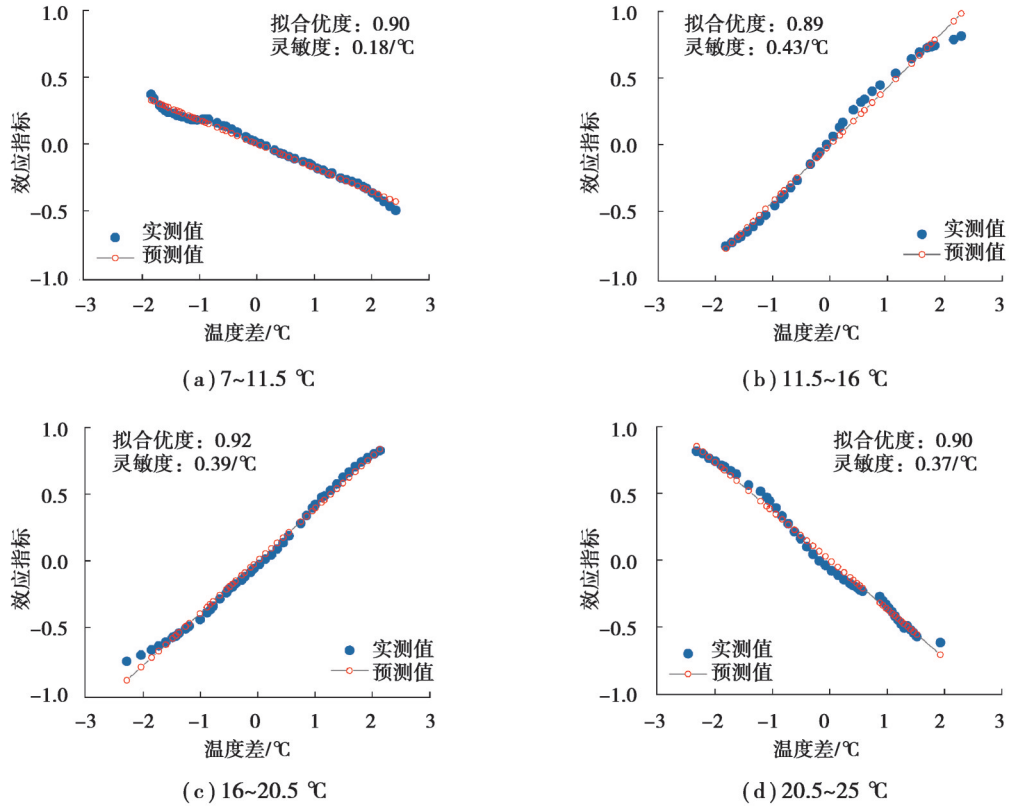


图 7 温度效应量化结果

Fig. 7 Quantifying temperature effect

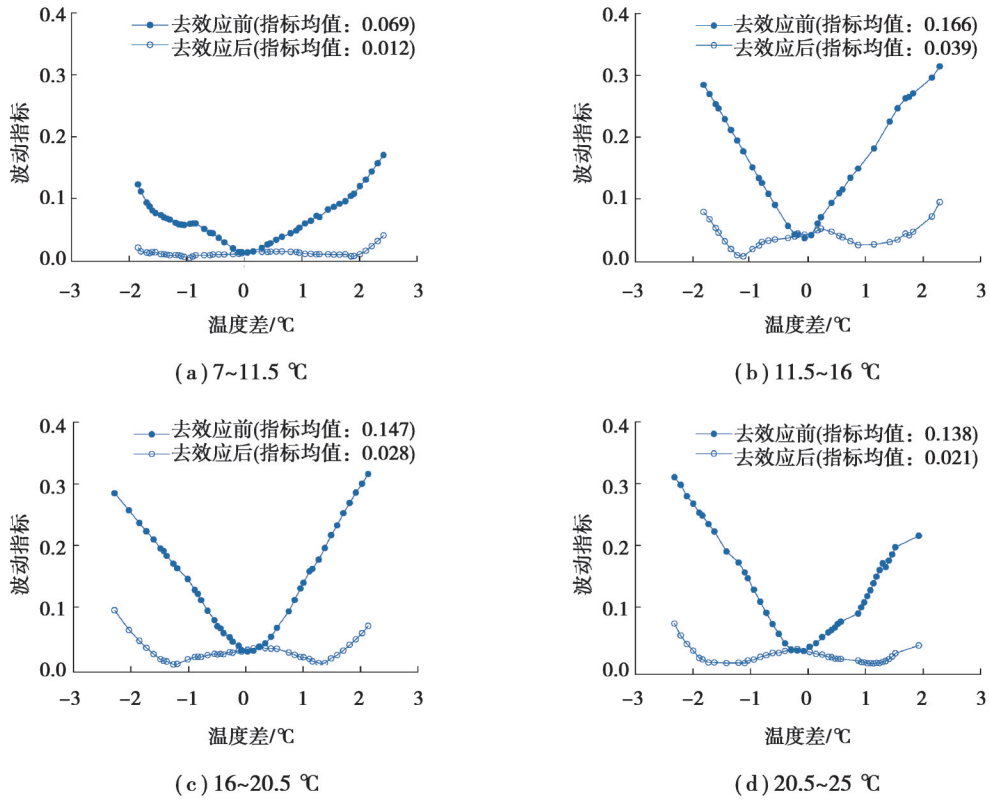


图 8 温度效应去除结果

Fig. 8 Temperature effect removal results

4) 温度效应量化和去除的关系

为分析奇异向量 u_1 量化和去除温度效应的一般效果,将图6中2种情形,在 Δt 取 $\pm 2.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时,建立各区间去效应比率与拟合优度的关系,结果如图9(a)所示。同时,在 $7\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ 的总跨度内,任意取 $4.5\text{ }^\circ\text{C}$ 的区间(分度值 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$) 建立去效应比率与拟合优度的关系,如图9(b)所示。

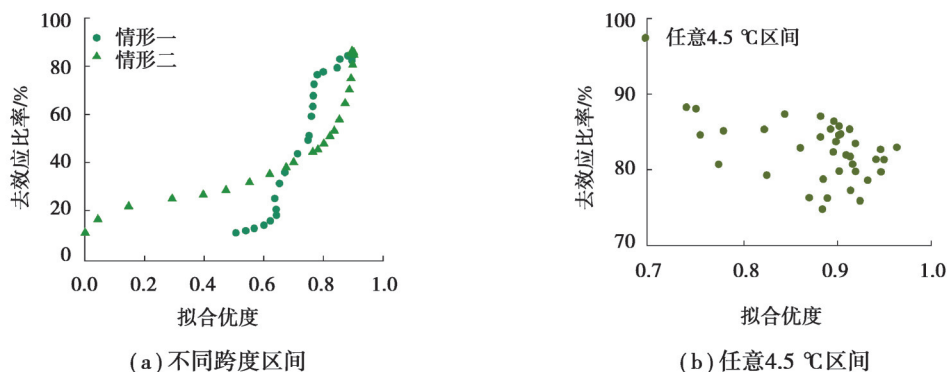


图9 拟合优度与去效应比率的关系

Fig. 9 Relationship between goodness of fit and effect reduction ratio

由图9(a)和图6可以得到,当选定相同基准温度时,温度跨度区间越小,拟合优度越高,去效应比率也越大。选定相同温度跨度,不同温度区间时,去效应比率在一定范围内波动。文中选择任意 $4.5\text{ }^\circ\text{C}$ 跨度时,这个波动范围在 $74\%\sim 90\%$,如图9(b)所示。上述方法能去除大部分温度效应,但仍然有小部分效应未能去除,这可能是温度效应使信号向量在高维空间发生非线性(不同平面)偏转导致的。

3.3 温度效应量化和去除的实用化方法

上述方法得到残差矩阵时所使用的(二级)样本数量较大,实际工程应用时往往没有条件在某 $4.5\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内把全部温度对应的信号采集到,这就需要寻找一种可替代性的残差矩阵,期望以少量样本信号获得等价的奇异向量 u_1 。表2给出了图7(或图8)中所选4个温度区段的替代性 u_1 (记作 u'_1)与原有 u_1 的相似性。表中 u'_1 是通过该温度区段最低、中间、最高3个温度对应的3个二级样本信号作残差矩阵,并SVD分解得到的。

表2 不同样本数量所得 u_1 的比较

Table 2 Comparison of u_1 with different sample numbers

温度区间	7~11.5 $^\circ\text{C}$	11.5~16 $^\circ\text{C}$	16~20.5 $^\circ\text{C}$	20.5~25 $^\circ\text{C}$
$\cos\langle u'_1, u_1 \rangle$	0.990 5	0.996 9	0.998 5	0.997 3

由表2可知,只需要采集区间端点及中间温度对应的信号就能标定温度影响的方向 u'_1 ,从而实现该温度区间任意信号的降噪。需要说明的是,当包含了端点2个温度的样本时,同一区间,端点之间的样本越多且越均匀,标定的 u'_1 就越接近 u_1 ;随着温度跨度的增大,达到相同效果的 u'_1 所需要的中间样本就越多。当温度跨度为 $4.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、只包含端点2个温度的样本时,所得 u'_1 与 u_1 的余弦值约能达到0.99。

4 结 论

在实验室采集自重状态的梁片混凝土梁尾波信号,将信号向量间的归一化夹角作为波动指标,与环境温度变化建立联系。通过向量残差矩阵SVD提取温度产生影响的特征向量,线性量化和去除温度效应。得到结论如下。

1) 环境温度对两片梁的尾波信号有相同的影响规律,尾波波形随温度升高发生规律性后移;信号波动指标随环境温度变化近似呈类正弦变化,且同一温度下的波动指标存在幅度相近的带宽,表明除温度外还存在其他非随机影响量。

2) 可在分段区间线性量化温度效应,文中取 $7\sim 11.5\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $11.5\sim 16\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $16\sim 20.5\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $20.5\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$,4个区间量化时,效应指标与温度差线性拟合优度分别为0.90、0.89、0.92和0.90; $11.5\sim 16\text{ }^\circ\text{C}$ 区间内效应指标灵敏度最大,尾波信号对温度效应最敏感。

3) 温度效应线性量化和去除效果与所选区间大小有关。选定相同基准温度不同温度跨度,温度效应线性量化拟合优度越高,去效应比率越大;当确定温度跨度,不同温度区间的去效应比率在一定范围内波动,任意4.5℃跨度内,去效应比率为74%~90%。

提高上述方法去温度效应的效果,优化该方法和量化温度以外环境因素的影响,为将来实际工程超声应力测试标定温度及其他影响提供支撑,是下一步研究的主要内容。

参考文献

- [1] Larose E, Hall S. Monitoring stress related velocity variation in concrete with a 2×10^{-5} relative resolution using diffuse ultrasound[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 125(4): 1853-1856.
- [2] Payan C, Garnier V, Moysan J. Determination of nonlinear elastic constants and stress monitoring in concrete by coda waves analysis[J]. European journal of environmental and civil engineering, 2008, 15(4): 519-531.
- [3] 郭增伟, 田川, 计亲, 等. 混凝土工字梁三点弯曲荷载超声测试[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(11): 88-97.
Guo, Z W, Tian C, Ji Q, et al. Three-point bending load ultrasonic test of concrete I-beam[J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(11): 88-97.(in Chinese)
- [4] Jiang H W, Zhan H Y, Zhang J Q, et al. Detecting Stress Changes and Damage in Full-Size Concrete T-Beam and Slab with Ultrasonic Coda Waves[J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(9): 04021140.
- [5] Stähler S C, Sens-Schönfelder C, Niederleithinger E. Monitoring stress changes in a concrete bridge with coda wave interferometry[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2011, 129(4): 1945-1952.
- [6] 宋丽莉, 葛洪魁, 郭志伟, 等. 利用多次散射波监测介质性质变化的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 713-722.
Song L L, Ge H K, Guo Z W, et al. Experimental study of variation of media properties monitoring using multiple scattering waves[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 713-722.(in Chinese)
- [7] Hu H W, Li D Y, Wang L, et al. An improved ultrasonic coda wave method for concrete behavior monitoring under various loading conditions[J]. Ultrasonics, 2021, 116: 106498.
- [8] Gondim R M L, Haach V G. Monitoring of ultrasonic velocity in concrete specimens during compressive loading-unloading cycles[J]. Construction and Building Materials, 2021, 302: 124218.
- [9] Finger C, Saydak L, Vu G, et al. Sensitivity of Ultrasonic Coda Wave Interferometry to Material Damage—Observations from a Virtual Concrete Lab[J]. Materials, 2021, 14(14): 4033.
- [10] Snieder R, Grêt A, Douma H, et al. Coda wave interferometry for estimating nonlinear behavior in seismic velocity[J]. Science, 2002, 295(5563): 2253-2255.
- [11] Wang X, Chakraborty J, Niederleithinger E. Noise reduction for improvement of ultrasonic monitoring using coda wave interferometry on a real bridge[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2021, 40(1): 1-14.
- [12] Niederleithinger E, Wang X, Herbrand M, et al. Processing ultrasonic data by coda wave interferometry to monitor load tests of concrete beams[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1971.
- [13] 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): 913-927.
- [14] Larose E, De Rosny J, Margerin L, et al. Observation of multiple scattering of kHz vibrations in a concrete structure and application to monitoring weak changes[J]. Physical Review E, 2006, 73(1): 016609.
- [15] Lu Y H, Michaels J E. A methodology for structural health monitoring with diffuse ultrasonic waves in the presence of temperature variations[J]. Ultrasonics, 2005, 43(9): 717-731.
- [16] Zhang Y X, Abraham O, Tournat V, et al. Validation of a thermal bias control technique for Coda Wave Interferometry (CWI) [J]. Ultrasonics, 2012, 53(3): 658-664.
- [17] 郑丹, 任涛. 频率及含水量对混凝土损伤超声检测的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(S1): 90-94.
Zheng D, Ren T. Influence of frequency and water content on ultrasonic detection of concrete damage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S1): 90-94.(in Chinese)
- [18] 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): 517-528.
- [19] Niederleithinger E, Wunderlich C. Influence of small temperature variations on the ultrasonic velocity in concrete[C]//AIP Conference Proceedings. Denver, Colorado, USA. AIP, 2013: 390-397.