

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306451

变温环境下充水管道导波监测的复合误差补偿方法*

谢志峥¹ 王衍学¹ 王 一²(1. 北京建筑大学机电与车辆工程学院 北京 100044; 2. 北京师范大学-
香港浸会大学联合国际学院理工科技学院 珠海 519085)

摘要:温度的变化对导波传播有着很大的影响,但温度与其他因素对导波造成的复合误差却少有研究,而管道常常处于各种严峻环境下,对其进行温度变化与不同工况之间的复合误差研究十分有必要。本文就充水管道与温度变化之间的关系,提出了一种新的补偿思路,即用信号集匹配相近的基线信号,同时判断充水信息,再用基线拉伸法拉伸监测信号中的时域部分,最后减去相对应的最大残余幅值与充水偏差,完成信号的复合误差补偿。通过 COMSOL 模拟仿真分析该方法的可行性,同时设计实验验证效果,实验结果表明,进行补偿后的残余信号平均幅值比进行补偿前的残余信号平均幅值低约 5 dB,即该方法能够有效的补偿由变温与充水共同造成的复合性误差。

关键词:健康检测;超声导波;管道结构;温度补偿;充水管道

中图分类号: TB553 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 14020

Composite error compensation for guided wave monitoring of water-filled pipelines in variable temperature environment

Xie Zhizheng¹ Wang Yanxue¹ Wang Yi²

(1. School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Faculty of Science and Technology, Beijing Normal University-Hong Kong Baptist University United International College, Zhuhai 519085, China)

Abstract: Temperature changes have a great impact on guided wave propagation, but the composite error caused by temperature and other factors on guided waves is rarely studied, and pipelines are often in various severe environments. It is necessary to study the composite error between temperature changes and different working conditions. Regarding the relationship between the water-filled pipeline and the temperature change, a new compensation idea is proposed, that is, the signal set is used to match the similar baseline signal, and the water filling information is judged at the same time, then the time domain part of the monitoring signal is stretched by the baseline stretching method, and finally the corresponding maximum residual amplitude and the water-filling deviation are subtracted to complete the composite error compensation of the signal. The feasibility of the method was analyzed by COMSOL simulation, and experiments were designed to verify the effect. The experimental results show that the average amplitude of the residual signal after compensation is 5 dB lower than the average amplitude of the residual signal after compensation, that is, the method can effectively compensate for the composite error caused by temperature change and water filling.

Keywords: health screening; ultrasonic guided waves; piping structure; temperature compensation; filling pipes

0 引言

结构健康监测(structural health monitoring, SHM)具

有实时监控、检测时不需拆卸器件和高精度检测等诸多优点^[1],是近年来无损检测(nondestructive testing, NDT)的热门发展方向。也是由于结构健康监测实时监控的特点,以至于需要传感器与监测结构永久性连接,这就对所

用的监测方法有了一定的要求。超声导波检测是利用兰姆波在板状或者管状结构中的散射和多模态特性进行远距离的缺陷检测,这项独特的能力让它能够非常贴合结构健康监测的技术要求^[2-5]。

而结构健康监测的发展受限于不断变化的环境和运行条件,运用超声导波监测时也不例外,温度变化是最能影响其传播的属性,对此国内外都已有了许多的研究成果。Lui 等^[6]研究了在 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内模态为 $L(0,1)$ 的兰姆波在钢材结构中的传播;Raghavan 等^[7]在研究不同温度对导波信号收发的影响中观察到测量振幅上的响应具有非单调性;Abbas 等^[8]提出了随环境温度和传播波激发频率变化的群波速函数。已经有很多的研究表明了温度的变化对导波的传播有着巨大的影响,不少研究也提出了一些关于超声导波检测的温度补偿策略^[9-15]但这些研究大多是在可控温度范围内的原始材料上进行的^[16-20],而温度与不同环境和条件对导波传播的复合性影响还没有足够多的讨论。

管道运输是 5 大运输方式之一,在各类工程中都有应用。在广泛使用的同时,管道结构的健康监测也不得不面对处于各类工况的挑战。输水管道是运输管道的一大类别,而导波传播与管道充水之间关系的相关研究也有不少。Gazis^[21]从理论上研究了所有模态的导波在空心管中的传播;Baik 等^[22]从理论上和实验上研究了导波在充液管道中的传播,Sato 等^[23]研究了导波在不锈钢材质的充水管道中的传播,并且对充水管道理论进行了扩展。通过这些研究可知导波在管道内的传播会随管内充水情况而发生变化。

综上所述,许多论文都只研究了温度变化与充水工况分别对管道中的导波信号所造成的单一影响,但对二者造成的复合性误差却少有提及。其实充水管道在温度变化下的应用场景非常之多,比如热水管道的使用就是一个很好的例子。现阶段关于导波信号的损伤检测方法更多的还是将采集到的检测信号与原始信号求差值,算得残余信号(residual signal),通过寻找奇异点的存在来判断损伤信息,而像变温与充水都会使信号发生变化,造成误差,干扰奇异值。所以在进行损伤检测之前首先需要对这些误差做出补偿,尽可能消除它们的干扰。下面就超声导波监测下温度变化对输水管道充水工况时的影响进行研究讨论,提出了一种在变温环境下对充水管道进行信号补偿的方法。

1 基础理论

1.1 温度变化对充水管道的影响

从文献^[23]中可以得到在充水时,管道产生的额外偏移:

$$u^{solid} = \nabla \theta_s + \nabla \times \mathbf{H} \quad (1)$$

波的势能等式为:

$$v_i^2 \nabla^2 \theta_s = \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial t^2} \quad (2)$$

$$v_i^2 \nabla^2 \theta_f = \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial t^2} \quad (3)$$

其中, θ_s 为管道的势能标量、 θ_f 为水的势能标量, \mathbf{H} 为势能矢量, v_i 、 v_i 分别为管道的纵向声速和横向声速。得益于此公式,不仅可以推算出管道在充水时产生的信号偏差,而且从文献^[6]中克制,温度每增加 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,管道中的速度阻滞率为 0.9 m/s ,即随着温度的改变,管道充水产生的信号偏移也会发生变化。

对此结论的仿真验证如图 1 的波形所示,该波形为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度下充水管道与无充水管道之间的残余信号对比。

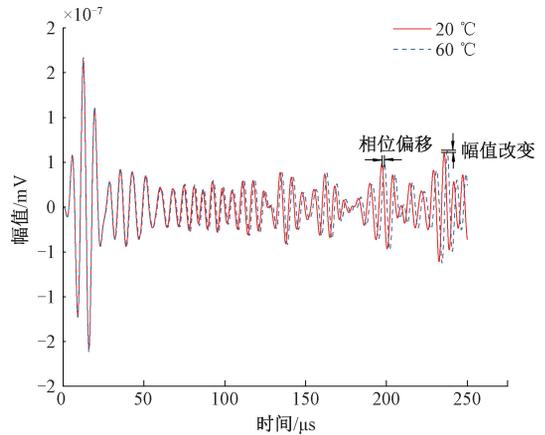


图 1 不同温度下充水管道与无充水管道之间的残余信号

Fig. 1 Residual signal between water-filled and non-water-filled pipes at different temperatures

从图 1 中可以看出,在不同温度下充水后管道的残余信号发生了振幅改变和相位偏移,且随着传播时间的增加这种变化也更为明显,这不仅证明了温度变化会对管道的充水偏差产生影响,而且这种影响趋势符合温度补偿的范畴。由此可以结合温度补偿策略对变温下的充水管道进行信号补偿。

1.2 温度补偿策略

现阶段温度补偿策略有许多,比如最佳基线选择(optimal baseline selection, OBS)、基线信号拉伸(baseline signal stretch, BSS)以及将 OBS 和 BSS 组合的 OBS+BSS。

OBS 在温度补偿策略中是非常经典的一种方法,它可以精确地进行温度补偿,但缺点也显而易见,该方法中创建信号集所需要的信号采集量十分庞大,要想校正的温度足够准确,样本量就要足够多。

相比 OBS 所拥有的庞大信号集, BSS 只需要一个原

始信号作为基线信号即可。但使用 BSS 时会额外产生颗粒化噪声和频率噪声,在温度变化小的时候尚可通过增加离散信号离散点和计算噪声上限来尽可能地消除这些误差,但当温度变化来到 10 ℃ 左右,BSS 所导致的波形变形和信号失真就变得无法被忽略^[9]。这就使得 OBS 的适用范围很小,补偿的最大温差最好不超过 5 ℃。

而将 OBS 与 BSS 进行组合,也就是被叫做 OBS+BSS 的温度补偿策略被广泛应用。这种方法在简单结构中可以直接设置波包振幅 A_j 的保守值,不过随着特征密度的增加,多个特征分散而来的波包可能会叠加在一起^[14,24-27],很难能够直接设置 A_j 。

2 变温环境下的充水管道信号补偿策略

通过对已有温度补偿策略的了解得知这些方法或多或少存在其不足,对于温度变化大、结构错中复杂的充水管道系统,需要一种更加适合的方式来温度与充水的双重补偿。下面提出了一种类 OBS+BSS 的复合误差补偿法。

首先建立信号集,与传统的 OBS 有所不同的是只需要在温度变化的范围内采集相同路径不同工况(这里分为充水与空管两种工况)下温度步长为 5 ℃ 的基线信号纳入信号集,信号集中的第 m 个信号可被表示为:

$$u_m(t; T_m) = \sum_{j=1}^N A_j s_j^m [t - t_j^m \beta(\delta T_m)] \quad (4)$$

其中, A_j 是第 j 个波包的幅值, s_j 是第 j 个波包的波形, t 是到达时间, t_j 是第 j 个波包的到达时间, $\beta(\delta T_m)$ 是在对应温度下每个信号的波包到达时间的位移分数。

在获取到监测信号后,将监测信号与信号集中的基线信号做相似性对比,这里需要引入一个相似性的比较标准,在 OBS 中这个标准常用均方差来表示:

$$m_{ms} = \operatorname{argmin}_m \left\{ \int_{t_1}^{t_2} [u(t; T) u_m(t; T_m)]^2 dt \right\} \quad (5)$$

或者用残余幅值最大值:

$$m_{mr} = \operatorname{argmin}_m \{ \max | u(t; T) - u_m(t; T_m) | \} \quad (6)$$

均方差又叫标准差,常用来描述一维数据,对于二维数据则更多的用到协方差:

$$m_{cov} = \operatorname{argmax}_m \{ u(t; T) - E[u(t; T)] \} \times \{ u_m(t; T_m) - E[u_m(t; T_m)] \} \quad (7)$$

其中, $E[u(t; T)]$ 和 $E[u_m(t; T_m)]$ 分别为当前信号和基线信号的期望。当协方差为正值,其值越大,两个信号的相关性越强;当协方差为负值,其值越小,两个信号的负相关性越强。

但是协方差有一个不足之处,如图 2 所示,信号 A 与信号 B 明显更为相似,但是由于信号 C 的幅值比信号 B 大了两个数量级,以至于信号 C 与信号 B 之间的协方差

会大于信号 A 与信号 B 之间的协方差。

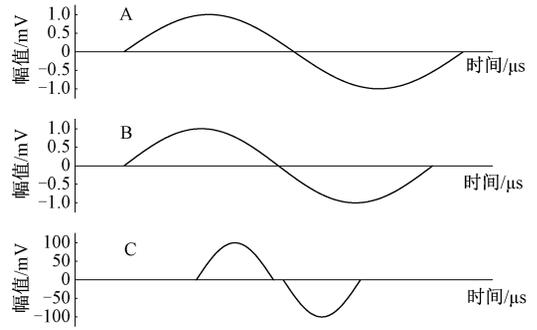


图 2 对比不同信号之间的协方差

Fig. 2 Compares the covariance between different signals

为了避免这种情况,引入相关系数:

$$m_{corr} = \operatorname{argmax}_m \frac{\{ u(t; T) - E[u(t; T)] \} \{ u_m(t; T_m) - E[u_m(t; T_m)] \}}{\int_{t_1}^{t_2} [u(t; T) - u_m(t; T_m)]^2 dt} \quad (8)$$

相关系数是协方差的归一化,消除了两个变量变化幅度不同的影响,能够单纯地反映两个变量在每单位变化的相似程度。在复合误差补偿法中将相关系数作为相似性的比较标准。

在监测信号与信号集中某一基线信号成功匹配后,可以根据匹配到的基线信号判断出当前管道是否为充水管道,并且由于基线信号间温度步长为 5 ℃,可知变温信号与匹配到的基线信号之间温差不超过 3 ℃,符合 BSS 温度补偿的最大温差范围,因此对监测信号进行基线拉升。

在监测信号上进行时间步长为 Δt_1 的采样,得到离散信号 $u_1[n]$,用 0 将 $u_1[n]$ 填充,让其拥有 m_1 个离散点,接着进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),得到离散频谱 $U_1[n]$,它的频率间隔为:

$$\Delta f = \frac{1}{m_1 \Delta t_1} \quad (9)$$

根据 FFT 算法的特性保持整个频谱的共轭对称性,在离散频谱上进行适当截断或者填充零,得到拥有 m_2 个离散点离散频谱 $U_2[n]$,然后对 $U_2[n]$ 进行逆 FFT,得到新的离散信号:

$$u_2[n] = u(n \Delta t_2) \quad (10)$$

$$\Delta t_2 = \frac{1}{m_1 \Delta f} = \Delta t_1 \frac{m_1}{m_2} \quad (11)$$

至此还并没有进行基线拉伸,只不过是离散对变温信号进行了重新采样,可以得到拉伸因子:

$$\beta = \frac{m_2}{m_1} \quad (12)$$

以系数 $1/\beta$ 对变温信号的时域进行拉伸,即 $u_2(t) = u(t/\beta)$, 则:

$$u_2(t) = \sum_{j=1}^N A_j s\left(\frac{1}{\beta} [t - t_j]\right) \quad (13)$$

而最佳的拉伸因子 β 可以通过计算相关系数获得:

$$\beta_{corr} = \arg \max_m$$

$$\frac{\{u(t;T) - E[u(t;T)]\} \{u_m(t;T_m,\beta) - E[u_m(t;T_m,\beta)]\}}{\int_{t_1}^{t_2} [u(t;T) - u_m(t;T_m,\beta)]^2 dt} \quad (14)$$

在进行完信号拉伸之后,用匹配的基线信号与原始信号的温度差 δT (之所以不能直接得到温度差,是因为管道结构复杂,很难测量到它的平均温度)计算出最大残余幅值:

$$u_j^{noise} = A_j \omega_0 | \delta t_j | \quad (15)$$

$$\delta t_j = - \frac{k_{ph}}{v_{ph}^2} d_j \delta T \quad (16)$$

其中, δt_j 是波包内波随温度变化的时移, d_j 是传播距离, δT 是变化的温度, v_{ph} 是导波的相速度, k_{ph} 是温度的变化系数, A_j 是第 j 个波包波包的幅值, ω_0 是波包的中心频率。用最大残余幅值与拉伸过后的监测信号求代数差后,再根据得到的是否为充水管道信息,可以搭建一个类似决策树的简单模型,如图 3 所示。

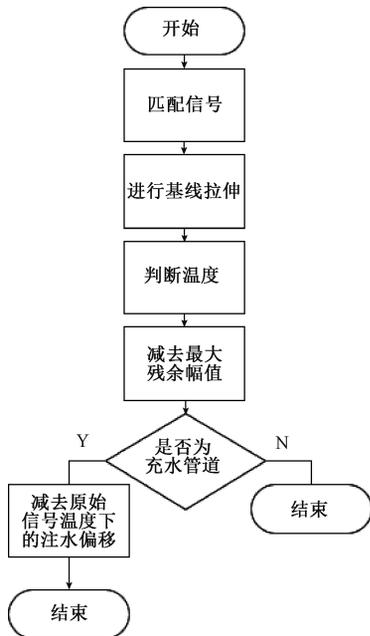


图 3 新版 OBS+BSS 流程

Fig. 3 New OBS+BSS flowchart

复合误差补偿法和 3 种常见温度补偿策略的温度相关条件如表 1 所示,当超过这些限制的时候补偿效果通常视为不可靠的。通过对比可以看出,该方法在变温环

境下的使用范围比起传统的温度补偿策略更为广泛。

表 1 信号补偿的温度相关条件对比

Table 1 Comparison of temperature-dependent conditions for signal compensation

温度补偿方法	温度范围/°C	最大温差/°C
OBS	5~40	5
BSS	22~32	10
OBS+BSS	21.5~31.5	10
复合误差补偿法	22~37	15

3 模拟仿真与实验分析

3.1 模拟仿真

在 COMSOL 上创建长 500 mm, 外径 40 mm, 壁厚 2 mm 的铜质管道,并用 $L(0,2)$ 模态的导波对其进行检测。在 20 °C ~40 °C 的温度范围内分别在充水管道与无充水管道上模拟温度步长为 5 °C 的 10 段信号,建造信号集。用 22 °C 时该管道无充水的工况下的仿真信号作为原始信号,然后采集该管道充水时在 27 °C、28 °C、32 °C、33 °C、37 °C、38 °C、42 °C 这 7 个温度下的仿真信号,并用复合误差补偿法对这 7 个信号进行补偿进行信号补偿,补偿前后的残余信号振幅对比如图 4(a)~(g) 所示,可以看出,复合误差补偿法能够降低由温度与充水引起的双重影响,但随着补偿温度的增加,残余信号的平均幅值也在增加,即补偿的效果也在减弱。图 4(h) 为这 7 个温度下信号补偿后的残余信号平均幅值散点图,在 38 °C 往后平均幅值发生明显增大,视为在此范围的信号补偿并不可靠。

3.2 实验设备的搭建

采集导波信号的实验装置主要由信号发生器、信号放大器、PZT 压电陶瓷片、铜管、示波器和计算机组成。

用电线引出压电陶瓷片的正负极,502 胶作为粘合剂将压电陶瓷片沿周向分布呈两列等距固定在铜管一端,靠近管道口的一列作为信号发生端,远离管道口的一列作为信号接收端,如图 5 所示。实验所用铜管长 0.5 m, 外径 40 mm, 壁厚 2 mm。

用于发射的陶瓷片数量需要大于管中导波的最大模数,本实验选用的导波模态为 $L(0,2)$, 所以选用 16 个尺寸为 $10 \times 5 \times 1$ 的方形陶瓷片来发射激励信号,并在这 16 个陶瓷片下方布置相同尺寸的 8 个陶瓷片用于接收信号。管道在导波监测中对径向裂纹较为敏感,所以方形陶瓷片在固定时的摆放应该为长边与管道的轴向平行,这样能够更好的监测此类裂纹。

把信号发生器与信号放大器连接,所选信号放大器可将信号放大 10 倍。再将用于发射信号的陶瓷片与信

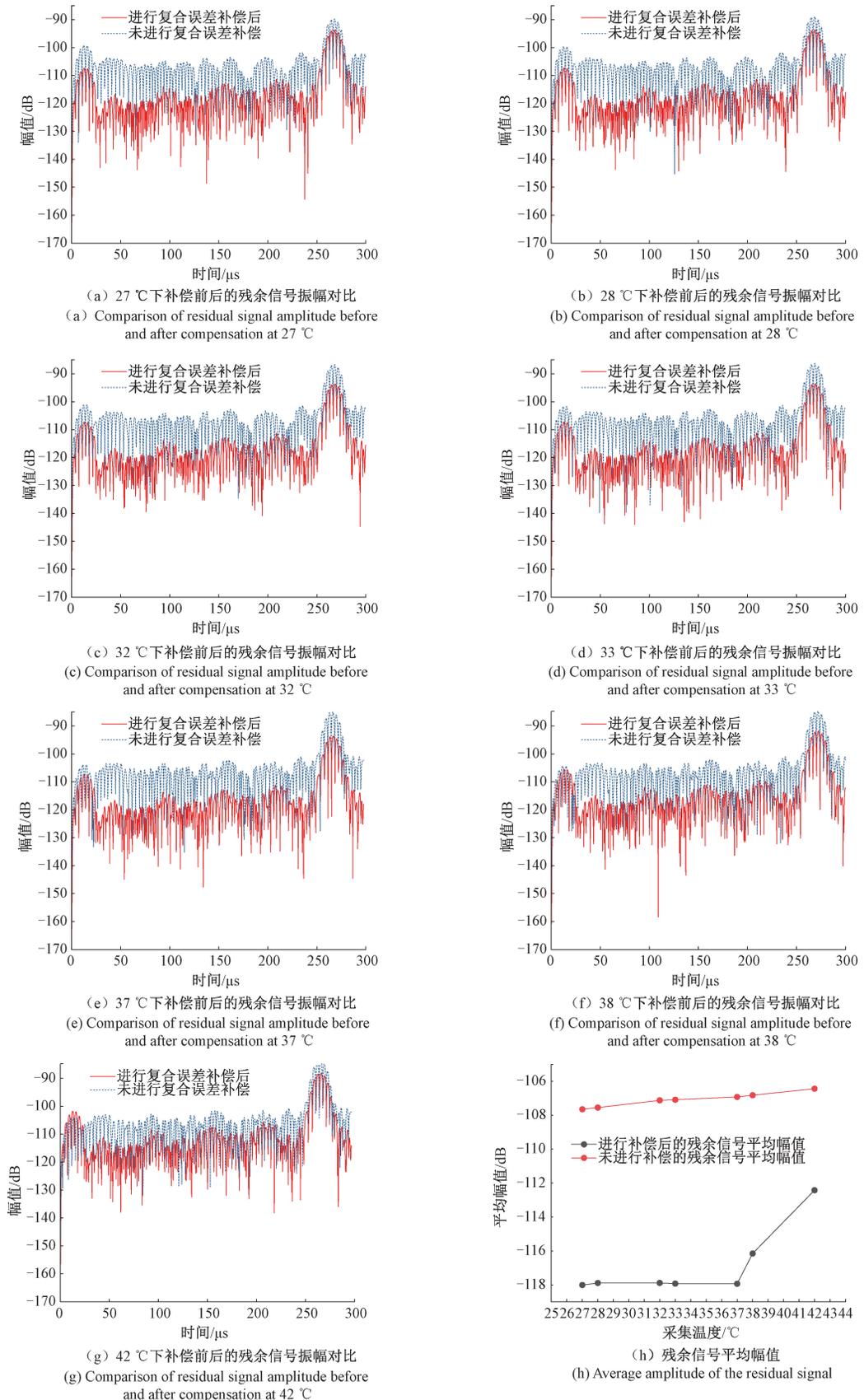


图 4 复合误差补偿法的信号仿真

Fig. 4 Signal simulation of composite error compensation method

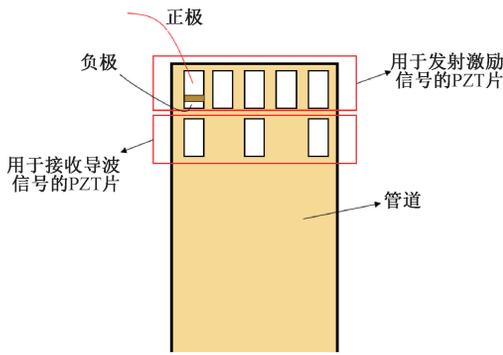


图 5 压电陶瓷片固定位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the fixed position of piezoelectric ceramic sheet

号放大器连接,用于接收信号的陶瓷片与示波器连接,示波器与计算机相连,如图 6 所示。实验所用的信号发生器型号为 SDG1022X,所用示波器型号为 SDS1072X-E。

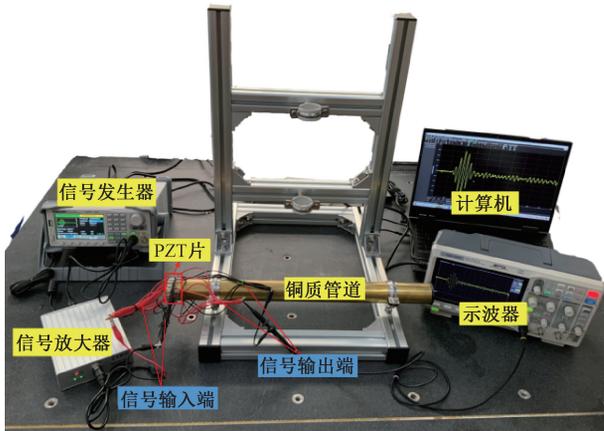


图 6 实验装置的连接

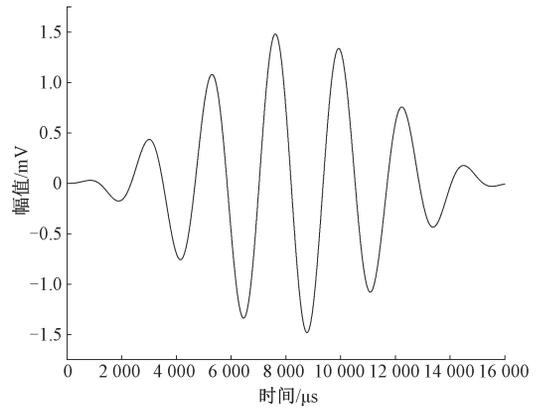
Fig. 6 Connection of the experimental setup

3.3 激励信号的选用

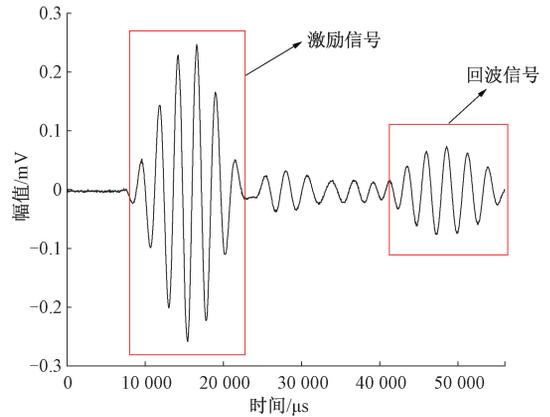
导波在 $L(2,0)$ 模态下的监测成果较为出色,所以本实验也是选用其 $L(2,0)$ 模态进行采集信号。使用导波的 $L(2,0)$ 模态可将正弦波用 Hanning 窗进行调制后的信号作为激励信号,激励信号的周期幅值频率对检测结果的影响与管道的材质、长度和口径都有关系,所以应针对性地取值。基于本实验的铜管规格,使用周期为 7,幅值为 3 V_{pp},频率为 60 kHz 的正弦波进行 Hanning 窗处理,得到激励信号如图 7(a) 所示。将调制过后的信号进行脉冲处理,输入传感器,采集到管道内的导波信号如图 7(b) 所示。

3.4 温度变化下充水管道的信号补偿实验

将铜管远离传感器的一端用耐高温硅胶塞堵住,利用管道架把铜管竖直放置,连接上相关仪器,如图 8 所示。



(a) 调制后的激励信号
(a) Modulated excitation signal



(b) 管道中的导波信号
(b) Guided wave signals in pipes

图 7 采集导波信号

Fig. 7 Acquisition of guided wave signals

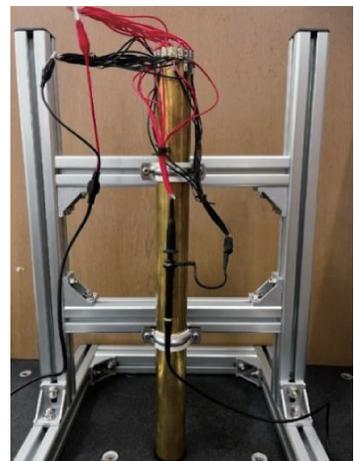


图 8 充水工况温度补偿实验的管道放置

Fig. 8 Piping placement for temperature compensation experiment in water-filled condition

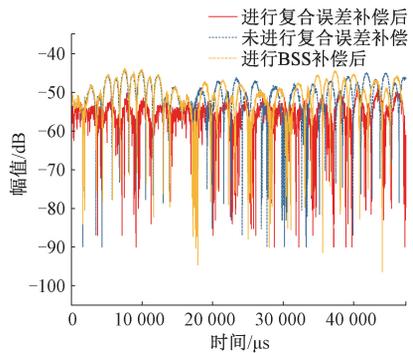
通过漏斗将 80 °C 的热水倒入管道内,累计充水量约为 0.5 L,这样在构建充水管道的同时也能够对管道

的加热。在管道降温的过程中用温度探测仪测得管道的实时温度,并在其 40 °C ~ 20 °C 时进行步长为 5 °C 的信号采集,用作充水管道信号集,此外记录下管道在 33 °C 时的信号作为监测信号。值得注意的是,介于实验监测所用的管道较短,可以直接用温度探测仪测得监测信号的环境温度,然而在实际应用中是无法这么简单地确定复杂管道的平均温度,故需要信号集来做一个温度定位。

在保证其余因素不变的情况下,重复上述步骤,不同的是在利用热水将管道加热到一定温度后选择把水放尽,使其在 40 °C ~ 20 °C 时采集的步长为 5 °C 的信号集为空管信号集。此外记录 22 °C 时的空管信号作为常温下的原始信号。

将监测信号进行复合误差补偿,补偿效果如图 9(a) 所示,分析监测信号分别在未补偿状态、基线信号拉伸 (BSS) 和复合误差补偿后与原始信号间的残余信号,效果比较如图 9(b)、(c) 所示。未进行补偿之前的残余信号平均幅值约为 -51 dB,由于补偿温差过大,进行 BSS 补偿所造成的波形变形和信号失真严重,其残余信号平均幅值约为 -50 dB,仅比未补偿状态低了约 1 dB。而进行复合误差补偿之后的残余信号平均幅值约为 -56 dB,相比未补偿状态降低了约 5 dB。

为了验证复合误差补偿法的鲁棒性,重复 4 次实验并分别记录 37 °C、34 °C、32 °C 和 28 °C 作为监测信号,得出的残余信号对比如图 10 所示。可以看出,在多次实验的验证下该方法依旧能够保持稳定的误差补偿能力,证



(c) 幅值单位分贝的残余信号对比
(c) Comparison of residual signals in decibels of amplitude

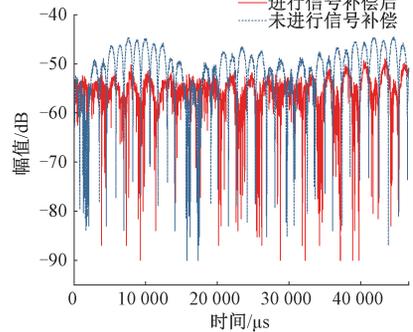
图 9 信号对比

Fig. 9 Comparison of signals

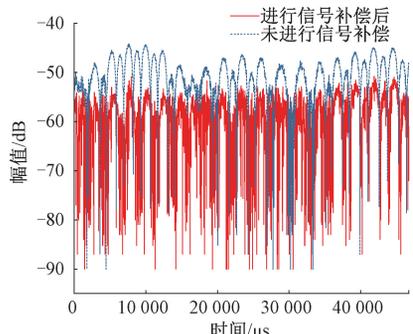
实了其可行性。

4 结 论

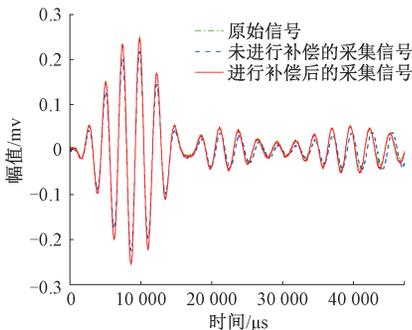
本篇论文从温度变化对导波信号的影响出发,进而讨论了管道导波充水偏差在温度变化时发生的位移,并发现这种随时间增加而增大的振幅改变和相位偏移符合普遍温度补偿策略的补偿范畴。然而传统的温度补偿方法或多或少都有其缺陷与不足,无法胜任充水管道所处环境的监测职责,故而在多种传统温度补偿方法的基础



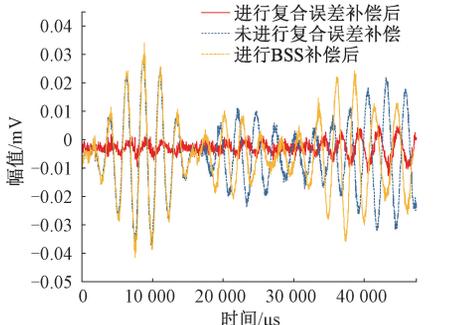
(a) 37 °C 监测信号实验的残余信号对比
(a) Comparison of residual signals from a 37 °C monitoring signal experiment



(b) 34 °C 监测信号实验的残余信号对比
(b) Comparison of residual signals from a 34 °C monitoring signal experiment



(a) 补偿效果
(a) Compensatory effects



(b) 幅值单位毫伏的残余信号对比
(b) Comparison of residual signals in millivolts of amplitude

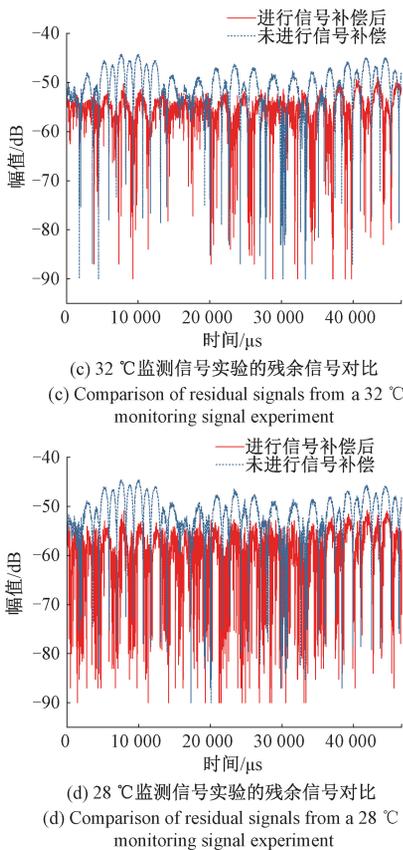


图 10 多次实验的残余信号对比

Fig. 10 Comparison of residual signals from multiple experiments

之上,提出了一种针对变温与充水双重影响下的复合误差补偿法。该方法用信号集进行基线确定和判断充水状况,然后对监测信号向匹配的基线信号进行拉伸,最后与最大残余幅值和充水偏差求代数差,从而达到对监测信号进行变温与充水双重影响补偿的效果。

参考文献

- [1] FARRAR C R, WORDEN K. An introduction to structural health monitoring [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007, 365 (1851): 303-315.
- [2] 徐云飞,孙永顺,丁晓喜,等.基于 Lamb 波的数据传输与缺陷检测同步实现方法[J]. 仪器仪表学报,2022, 43(3):24-31.
- XU Y F, SUN Y SH, DING X X, et al. Synchronous implementation method of data transmission and defect detection based on Lamb wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 24-31.
- [3] 吕灿,陈世利,刘洋,等.手持式超声多通道系统设计与导波成像技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(11): 33-41.

- LYU C, CHEN SH L, LIU Y, et al. Design and guided wave imaging technology of handheld ultrasonic multichannel system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(11): 33-41.
- [4] 李靖,李忠虎,张鑫宇,等.管道缺陷检测全聚焦数据处理及成像方法研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(17): 153-158.
- LI J, LI ZH H, ZHANG X Y, et al. Research on total focus data processing and imaging method for pipeline defect detection [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(17): 153-158.
- [5] 康永乐,邱雷.导波结构健康监测中损伤因子的研究和应用[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (6): 113-119.
- KANG Y L, QIU L. Research and application of damage factors in guided wave structure health monitoring[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(6): 113-119.
- [6] LIU Z, ZHAO J, WU B, et al. Temperature dependence of ultrasonic longitudinal guided wave propagation in long range steel strands[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering-English Edition, 2011, 24(3): 487.
- [7] RAGHAVAN A, CESNIK C E S. Studies on effects of elevated temperature for guided-wave structural health monitoring [C]. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007. SPIE, 2007, 6529: 126-137.
- [8] 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): 601-622.
- [9] LU Y, 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.
- [10] KONSTANTINIDIS G, DRINKWATER B W, WILCOX P D. The temperature stability of guided wave structural health monitoring systems [J]. Smart Materials and Structures, 2006, 15(4): 967.
- [11] 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.
- [12] SATO H, OGISO H. Guided waves propagating in a water-filled stainless steel pipe[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2014, 53(7S): 07KC13.
- [13] WILCOX P D, CROXFORD A J, MICHAELS J E, et al. A comparison of temperature compensation methods for guided wave structural health monitoring [C]. AIP conference proceedings. American Institute of Physics,

- 2008, 975(1): 1453-1460.
- [14] CLARKE T, SIMONETTI F, CAWLEY P. Guided wave health monitoring of complex structures by sparse array systems: Influence of temperature changes on performance[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(12): 2306-2322.
- [15] LU Z, LEE S J, MICHAELS J E, et al. On the optimization of temperature compensation for guided wave structural health monitoring [C]. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2010, 1211(1): 1860-1867.
- [16] YAN X, QIU L, YUAN S. Experimental study of guided waves propagation characteristics under the changing temperatures[J]. *Vibroengineering Procedia*, 2018, 20: 208-212.
- [17] WISKEL J B, KENNEDY J, IVEY D G, et al. Ultrasonic velocity and attenuation measurements in 180 steel and their correlation with tensile properties [C]. *Proceedings of the 19th World Conference on Non-Destructive Testing*, Munich, Germany, 2016: 13-17.
- [18] PHAM V T, PHAM T T N, LUONG T M T, et al. Effect of temperature on ultrasonic velocities, attenuations, reflection and transmission coefficients between motor oil and carbon steel estimated by pulse-echo technique of ultrasonic testing method [J]. *VNU Journal of Science: Mathematics-Physics*, 2015, 31(4).
- [19] PHAM T V, KIEN D T. Influence of temperature on mechanical characteristics of 1018 low carbon steel estimated by ultrasonic non-destructive testing method [J]. *Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP)*, 2017, 55(6): 431-435.
- [20] HAN S J, PALAZOTTO A N, LEAKEAS C L. Finite-element analysis of Lamb wave propagation in a thin aluminum plate[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, 22(2): 185-197.
- [21] GAZIS D C. Three-dimensional investigation of the propagation of waves in hollow circular cylinders. I. Analytical foundation[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1959, 31(5): 568-573.
- [22] BAIK K, JIANG J, LEIGHTON T G. Acoustic attenuation, phase and group velocities in liquid-filled pipes: Theory, experiment, and examples of water and mercury[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2010, 128(5): 2610-2624.
- [23] SATO H, OGISO H. Guided waves propagating in a water-filled stainless steel pipe[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2014, 53(7S): 07KC13.
- [24] WILCOX P D, CROXFORD A J, MICHAELS J E, et al. A comparison of temperature compensation methods for guided wave structural health monitoring [C]. *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, 2008, 975(1): 1453-1460.
- [25] RAGHAVAN A, CESNIK C E S. Effects of elevated temperature on guided-wave structural health monitoring[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2008, 19(12): 1383-1398.
- [26] CROXFORD A J, WILCOX P D, DRINKWATER B W, et al. Strategies for guided-wave structural health monitoring [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2007, 463(2087): 2961-2981.
- [27] CLARKE T, SIMONETTI F, CAWLEY P. Guided wave health monitoring of complex structures by sparse array systems: Influence of temperature changes on performance[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329(12): 2306-2322.

作者简介



谢志峥, 2021年于北京建筑大学获得学士学位, 现为北京建筑大学硕士研究生, 主要研究方向为故障诊断信号处理、超声导波检测。

E-mail: genhzeix@163.com

Xie Zhizheng received his B. Sc. degree from Beijing University of Civil Engineering and Architecture in 2021. He is now a M. Sc. candidate at Beijing University of Civil Engineering and Architecture. His main research interests include fault diagnosis signal processing and ultrasonic guided wave detection.



王衍学(通信作者), 2009年于西安交通大学获得博士学位, 2010~2011年加拿大渥太华大学博士后, 现为北京建筑大学教授、博导, 主要研究方向为装备故障诊断与智能维护、剩余寿命与健康管理及信号处理与特征提取等。

E-mail: wyx1999140@126.com

Wang Yixue(Corresponding author) received his Ph. D. from Xi'an Jiaotong University in 2009 and postdoctoral fellow at the University of Ottawa in Canada from 2010 to 2011. Now he is a professor and Ph. D. supervisor of Beijing University of Architecture. His main research interests include equipment fault diagnosis and intelligent maintenance, RUL prognosis and health management, signal processing and feature extraction etc.



王一, 就读于北京师范大学-香港浸会大学联合国国际学院统计学专业, 主要研究方向为数据挖掘、最大似然最优同步算法。

E-mail: wy13660486708@163.com

Wang Yi studied statistics at Beijing Normal University-Hong Kong Baptist University United International College. His main research interests include data mining and maximum likelihood optimal synchronization algorithms.