Study on Numerical Simulation and Detection Method of Acoustic Vibration Characteristics of Hollowing*

WANG Chi[1], LIU Rui[1], CHEN JinBo[1]*
(Department of Precision Mechanical Engineering, School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: The surface vibration characteristics of hollowing model under acoustic excitation are studied, and the application method of parametric acoustic array in building hollowing detection is explored. The finite element software is used to numerically simulate the vibration effect of the far-field low-frequency sound beam of the parametric acoustic array on the hollowing, the acoustic vibration characteristics under the influence of different factors are analyzed, and an experimental system for hollowing detection is establishe. The parametric acoustic array is used as the excitation source to excite the wall to be detected, and the laser vibrometer is used to detect the weak vibration of the wall. According to the collected signals, the vibration displacement diagram of the particles on the surface of the hollowing is drawn to judge the existence and position of the hollowing. The resonance frequency error of the simulation and experiment of the same model is less than 300 Hz, and the estimation error of empty drum size is less than 10 mm. The results show that the tile above the hollowing defect conforms to the assumption of elastic thin plate fixed around it, and the vibration amplitude of the hollowing surface is obviously higher than that of the non-defective surface, which verifies the feasibility of the hollowing detection method with parameter acoustic array.

Key words: nonlinear acoustics; hollowing detection; finite element simulation; parametric acoustic array
EEACC: 0290T; 7320Q **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.11.010

空鼓声振特性的数值仿真及检测方法研究*

王 驰, 刘 瑞, 陈金波*
(上海大学机电工程与自动化学院精密机械工程系, 上海 200444)

摘 要: 研究声激励下空鼓模型表面振动特性, 探究声参量阵在建筑空鼓检测中的应用方法。有限元软件数值仿真了声参量阵远场低频声束对空鼓的激振效果, 分析了不同因素影响下声振特性, 并搭建空鼓检测实验系统, 声参量阵作为激励源激励待测墙面, 激光测振仪对墙面微弱振动进行检测, 根据采集到的信号绘制空鼓表面质点振动位移图, 判断空鼓的存在性和位置大小。同一模型的仿真和实验共振频率误差不超过 300 Hz, 空鼓大小估测误差不超过 10 mm。结果表明, 空鼓缺陷上方饰面砖符合周边固支的弹性薄板假设, 空鼓表面振动幅值明显高于非缺陷表面, 验证了声参量阵的空鼓检测方法具有可行性。

关键词: 非线性声学; 空鼓检测; 有限元仿真; 声参量阵
中图分类号: TP212.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)11-2000-09

墙体空鼓引发的事故近年来频繁出现。建筑墙体自身不同材料的热胀冷缩不同步及外部因素引起建筑内部产生间隙, 形成空气隔层, 也就是空鼓[1-2]。空鼓会严重损害建筑物的承载力和耐久力, 影响建筑物的正常使用。桥梁、隧道、墙体等社会基础设施的老化正成为全世界都要面临的一个问题, 如何对于建筑空鼓进行高效的检测是亟待解决的问题。

关于空鼓缺陷的检测, 现有的主流方法可分为敲击法、冲击回波法、超声回波法、热红外成像法和 X 射线法等。敲击法是最简便的方法之一, 通过轻敲墙面, 根据音色大致判断空鼓的存在范围[3]。为了避免人耳的主观性, 在敲击法的基础上改良出了冲击回波法, 收集并分析敲击过程中的声信号特征参数, 实现了对建筑墙体和饰面砖空鼓的定量检测[4-5], 但冲击回波法只能探测靠近表面的缺陷, 对于深层缺陷的探测能力有限。超声回波法特别适用于检测混凝土和钢筋混凝土构件, 也能实现对空鼓缺陷的有效检测。超声回波法的缺点是需要将传感

项目来源: 国家自然科学基金项目(62175144)
收稿日期: 2023-11-17 **修改日期**: 2024-01-03

器紧贴在墙面上,且其检测效果受墙表面粗糙程度影响,对表面条件要求严格。近年来,红外热成像技术由于能通过物体表面温度差异直接反映材料的相关物理特性,也逐渐被用于空鼓缺陷检测[6-7],红外热成像法高效、无损、非接触,但检测图像的清晰度受气候条件的影响较大。利用 X 射线等射线对墙体空鼓进行检测是近年来发展起来的无损检测技[8-9],检测精度高,但是射线法只适用于轻质混凝土,使用场景受限。

现有的空鼓检测技术在非接触时检测效果不好或无法检测,声参量阵的远场声场指向性好,在空鼓检测上具有良好应用前景。本文研究了声参量阵理论、弹性薄板理论,对在高指向性声波激励下空鼓模型的振动特性进行数值仿真,先从理论和数值仿真层面论证了声参量阵应用于空鼓检测的可行性,后搭建空鼓检测实验系统,利用声参量阵产生的高指向性声波激励待测墙面,同时用激光测振仪测量其表面振幅,分析空鼓缺陷是否存在以及其位置大小。

1　基于声参量阵的空鼓检测理论

Westervelt 声参量阵理论认为,大振幅声波的非线性传播效应使其在远场产生了高指向性低频波[10]。根据 Helmholtz 的非线性声学理论,当超声换能器同时输出频率为 f_1 和 f_2 两个相近频率的原频波时,两种声波会发生自解调,产出倍频波、差频波、高次谐波等诸多声波产物。如频率为 f_1 和 f_2 的超声波在介质中传播时,会产生和频 f_1+f_2、差频 $|f_1-f_2|$ 以及 $2f_1$、$2f_2$ 等频率的声波(如图 1)。

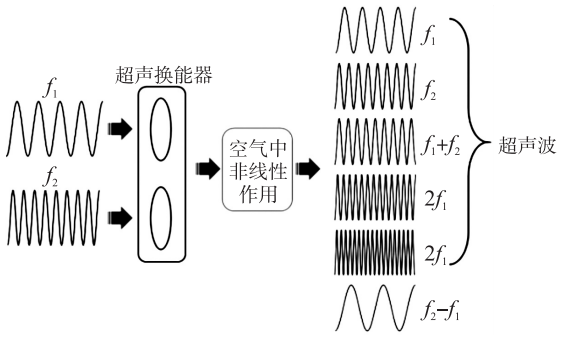


图 1　声波的非线性效应

根据斯托克斯-克希霍夫公式[11],声波的衰减系数 α 可表示为:

$$\alpha=\frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^3}\left[\chi\left(\frac{1}{c_v}-\frac{1}{c_p}\right)+\frac{4}{3}\eta_1+\eta_2\right] \tag{1}$$

式中:f 为声波频率,ρ 为介质密度,c 为声速,χ 为热传导系数,c_v、c_p 分别为定压与定容的比热。由于衰减系数 α 正比于 f^2,因此 f_1、f_2、f_1+f_2 及 $2f_1$、$2f_2$ 等频率较高的声波在传播中衰减较快,远场将只有频率为 $|f_1-f_2|$ 的低频差频波。

声参量阵由多个超声换能器按照一定方式排列而成,可以收获更集中的声场,提高声场的指向性及发射功率。声参量阵发出的声波具有指向性好、无旁瓣、穿透力强等优点[12-13],已被广泛应用于水声工程[14-16]及声频定向技术[17]。

使用声参量阵进行空鼓检测的原理如图 2 所示。声学参量阵产生的高指向性差频声波激励待测对象表面,引起该表面的部分区域产生受迫振动。当被测表面下存在空鼓缺陷时,空鼓上方的饰面砖可以被视为周边固定支撑的薄板。当缺陷上方用于激励的差频声波接近或等于薄板的共振频率时,薄板区域会发生共振现象,出现较大振幅。空鼓区域与完好区域的振动幅度间有较大差异,通过对待测表面各点振动情况的测量、对比,可以判断空鼓的存在性和大小。

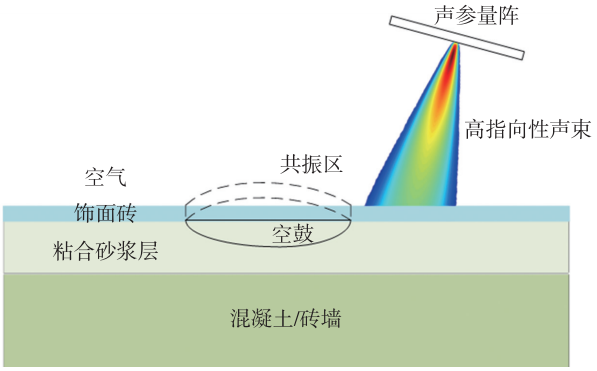


图 2　检测原理图

弹性力学中,薄板是指厚度 h 相较其余两方向尺寸较小的板[18]。通常认为厚度 h 为另外两个方向尺寸 1/5~1/80 的板为“薄板”。假设空鼓缺陷上方的饰面砖是满足一定边界条件的薄板。

对于四周固支的圆形薄板,其一阶共振频率计算公式为[19]:

$$\omega_{mn}=\frac{(\lambda_a)^2_{mn}}{a^2}\sqrt{\frac{D}{\rho h}} \tag{2}$$

式中:$(\lambda_a)_{mn}$ 为基频系数,对于周边固支圆形薄板,基频系数取 3.196;a 为板的特征参数;ρ 为体积密度;h 为板的厚度;$D=\dfrac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$,为薄板的弯曲刚度;$E$ 为弹性模量;μ 为泊松比。

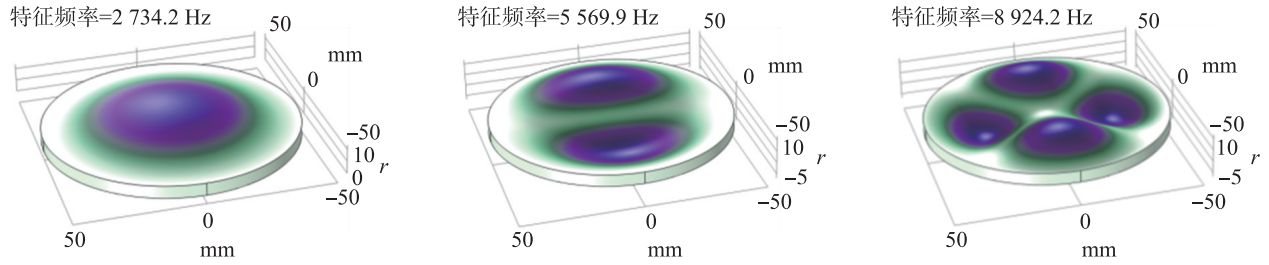
2　声激励下的空鼓模型振动特性数值仿真

采用多物理场仿真软件 COMSOL,对声参量阵检测空鼓的可行性进行数值模拟仿真。

2.1 薄板振动特性

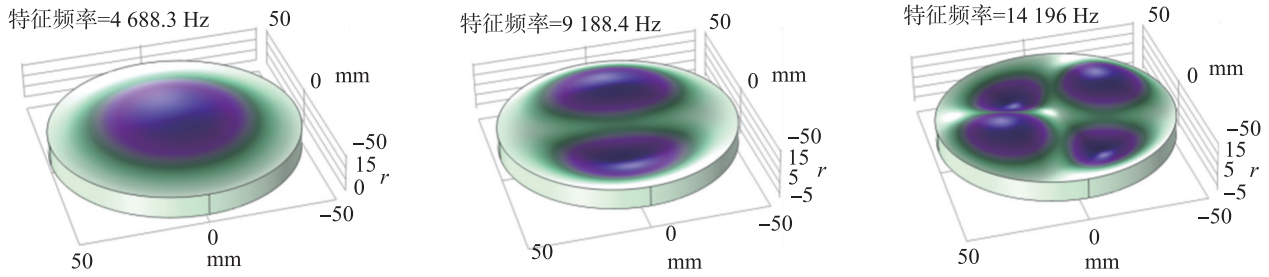
本文认为空鼓上方的饰面砖是满足四周固定支边界条件的、具有一定大小和厚度的薄板。对四周固定支撑的圆形薄板进行固体力学层面的仿真计算,以了解其各阶振型及各阶固有频率。依照市面上饰面砖的常见厚度 5 mm 和 9 mm 分别建模,圆形薄板尺寸分别设为直径 $d=100$ mm 和 $d=120$ mm,材料选择 COMSOL 内置材料库中 Brick(花岗岩)以模拟饰面砖的瓷砖材料,边界条件设置为四周固定约束。求解圆形薄板的各阶固有频率及振型,如图 3~图 5 所示。

据以上结果分析,圆形薄板的各阶共振频率主要受薄板直径和薄板厚度影响,相同条件下,薄板越厚,各阶共振频率越高;薄板直径越大,各阶共振频率越低。一阶振型下,振幅最大的点位于薄板几何中心,而二阶三阶振型下则会出现多个振幅最大的点,为方便测量,应在一阶共振频率下激励薄板,使薄板呈现一阶振型。



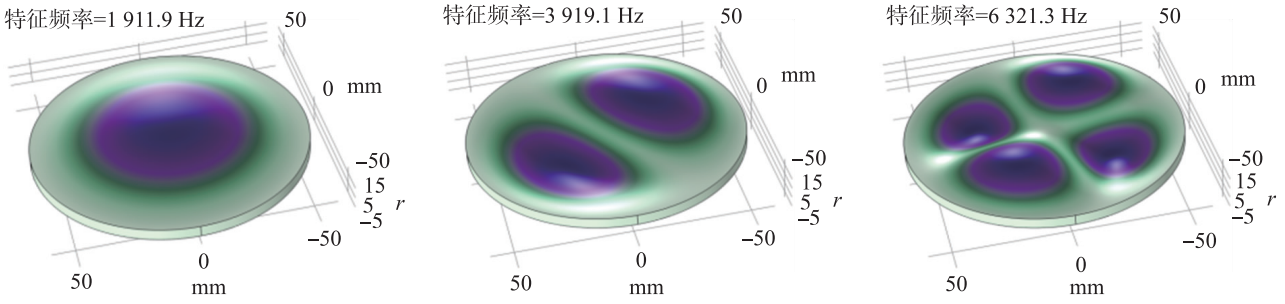
(a) 一阶振型 (2734.2 Hz) (b) 二阶振型 (5569.9 Hz) (c) 三阶振型 (8924.2 Hz)

图 3 直径 100 mm,厚 5 mm 薄板的各阶共振频率及对应振型



(a) 一阶振型 (4 688.3 Hz) (b) 二阶振型 (9 188.4 Hz) (c) 三阶振型 (14 196 Hz)

图 4 直径 100 mm,厚 9 mm 薄板的各阶共振频率及对应振型



(a) 一阶振型 (1 911.9 Hz) (b) 二阶振型 (3 919.1 Hz) (c) 三阶振型 (6 321.3 Hz)

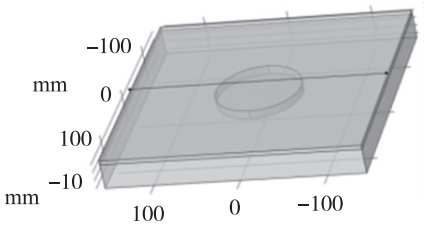
图 5 直径 120 mm,厚 5 mm 薄板的各阶共振频率及对应振型

2.2 空鼓模型仿真

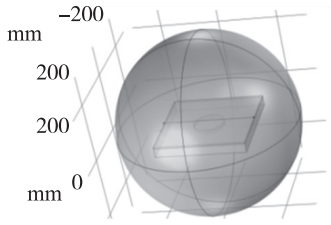
声波激励空鼓属于声-结构相互作用范畴,涉及到声波在空气介质中的传播、声场以单位面积载荷作用于对固体结构、固体沿着交界面的法向加速度反作用于流体(固体上方及内部空气)。本研究中分别使用固体力学和压力声学来计算声波在流体、固体中的传播特性。COMSOL 中选择声-固相互作用接口,在频域下进行稳态研究。

墙砖验收标准为总体空鼓率不超 5%,单块空鼓面积不大于砖面的 15%[20]。对于 300 mm×300 mm 的饰面砖,圆形空鼓的直径不应超过 13.1 cm,采用相对严格的标准,选取直径为 10 cm 和 12 cm 的圆形空鼓缺陷建模。规定要求用于粘结的水泥砂浆厚度应在 2 cm~4 cm,选择 3 cm 的厚度进行建模。饰面砖选取市面最常见的两种尺寸:300 mm×300 mm,300 mm×600 mm 及两种厚度:5 mm 和 9 mm。最终

构建空鼓模型如图 6(a)所示。空鼓模型共分两层,饰面砖层和水泥砂浆层,空鼓缺陷位于水泥砂浆层。



(a) 空鼓模型



(b) 联合体

图 6　空鼓模型及整体示意图

空鼓通常发生在不同介质的分界面,厚度不会贯穿到混凝土层,考虑研究计算量很大,在建模中未加入混凝土层。将整个空鼓模型放入到了一个球体域中进行求解(图 6(b)),球域的边界采用“完美匹配层”,其特性是吸收所有出射波,不反射任何波,使求解域本身不会对声波的传播产生任何影响。

材料从 COMSOL 内置材料库中选取,饰面砖选取 Brick(花岗岩),密度 $\rho=2\ 000\ kg/m^3$,弹性模量 $E=17\times10^9$ Pa,泊松比 $\nu=0.2$。砂浆层选取 Concrete,密度 $\rho=2\ 300\ kg/m^3$,弹性模量 $E=25\times10^9$ Pa,泊松比 $\nu=0.2$。空鼓及球域内剩余部分选择 Air。本文假设是微扰动,结构所产生的变形很小,材料模型选择“线弹性材料”。

对几何模型进行有限元网格剖分,为保证网格的几何尺寸和声波的波长可比拟,设置网格最大单元格尺寸为:该介质中声速/目标频率/5~6。本文对于不同区域采取不同的网格策略,对于空鼓模型中的固体(饰面砖、砂浆层),限制网格最大单元格大小为 1 500 m/s/5 000 Hz/5,对于空鼓模型和球域内的空气,限制网格最大单元格大小为 340 m/s/5 000 Hz/5。5000Hz 根据上文一阶共振频率仿真结果稍取大得到,以保证计算结果符合要求。

利用压力声学接口下的背景压力场模拟声参量阵远场低频声束。实验所用声参量阵的远场声压级经声压计测得为 90 dB~120 dB,94 dB 等效声压为 1 Pa,在整个球域内加上垂直向下的背景压力场,压力幅值为 1 Pa,以模拟声参量阵提供的声场激励。在频域下进行求解,获得该模型在不同情况下的体位移(如图 7、图 8 所示)。

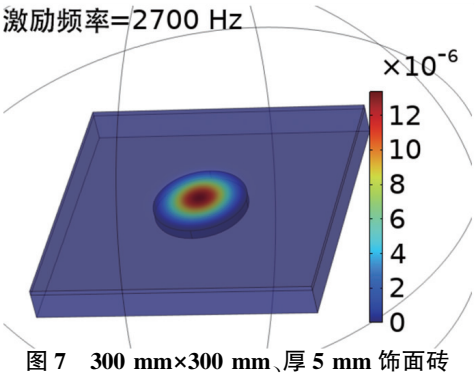


图 7　300 mm×300 mm、厚 5 mm 饰面砖在 2 700 Hz 的背景压力场下体位移

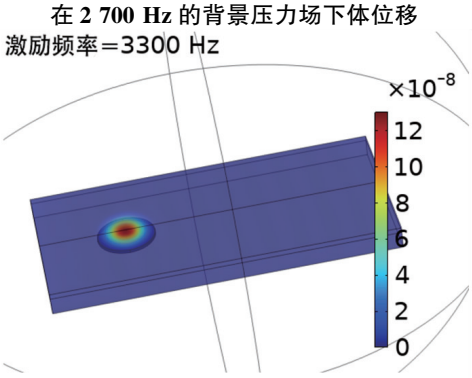
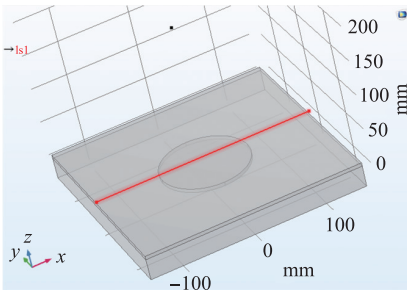


图 8　300 mm×600 mm、厚 9 mm 饰面砖在 3 300 Hz 的背景压力场下体位移

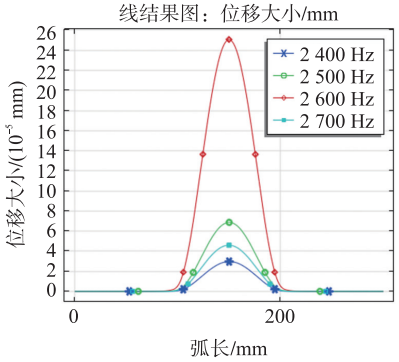
根据以上结果分析,空鼓上方饰面砖的体位移均明显大于没有缺陷的实心部分。在一阶共振频率附近,空鼓上方饰面砖的振型符合圆形薄板的一阶振型,最大振幅分别达到了 12×10^{-6} mm 和 12×10^{-8} mm。对比发现,薄板的厚度对振幅的影响很大,板越厚,可达到的最大振幅越小。振动明显的区域主要在靠近圆心位置,圆弧位置的振幅则和无缺陷的区域接近,实际振动区域的面积略小于空鼓的面积。

在空鼓模型的上表面(饰面砖区域)设置一条贯穿左右的直线,研究该直线上的各质点振动情况(如图 9(a)所示)。在共振频率周围等间距设置多组激励频率,对比不同频率下该直线上各点的振动情况,寻找整个空鼓模型的共振频率,与上文预测的单个薄板的共振频率进行对比,验证此模型的有效性。结果如图 9(b)~(d)所示。

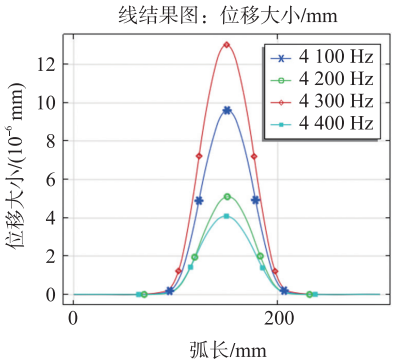
从二维层面看,薄板表面各点的位移依旧满足中间大两边小的拱形特征,在空鼓上方的区域振幅明显高于其他区域,无缺陷的区域则几乎没有位移。在共振频率周围的一段范围内,随着激励频率的升高,轴线上各点的振幅大小先逐渐增大,到某一频率后,再随着频率的升高,轴线上各点振幅开始逐渐减小,振幅峰值对应的频率就是整个空鼓模型的共振频率,由上到下依次为 2 600 Hz、4 300 Hz、1 800 Hz,上文计算薄板的一



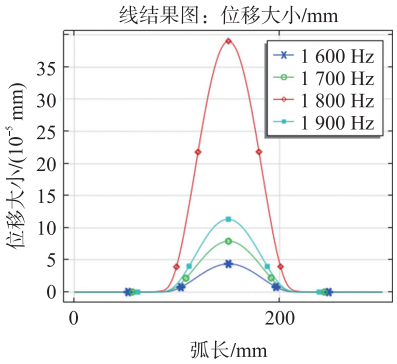
(a) 轴线设置示意图



(b) 缺陷直径100 mm、饰面砖厚5 mm的空鼓模型



(c) 缺陷直径100 mm、饰面砖厚9 mm的空鼓模型



(d) 缺陷直径120 mm、饰面砖厚5 mm的空鼓模型

图 9　不同空鼓模型在不同激励频率下轴线上各点振幅

阶共振频率为 2 734.2 Hz、4 688.3 Hz、1 911.8 Hz，误差均控制在 100 Hz～300 Hz 左右，验证了“空鼓上方的饰面砖是满足四周固定支撑的边界条件的、具有一定大小和厚度的薄板”这一假设的正确性。

根据该轴线上各质点的位移图，可以确定空鼓缺陷的位置和大致大小，拱形起始于横坐标 100 mm 左右，结束于 200 mm 左右，据此确定空鼓的中心位置在 150 mm 处，大小约为 100 mm，这与实验构建的空鼓模型完全一致。结果还表明，共振频率激励下各点的振幅要明显高于非共振频率激励下的振幅，最高可达 2～3 倍的差异，为获得明显准确的实验结果，选取合适的激励频率是必要的。

3　实验系统及方案

搭建基于声参量阵的空鼓检测系统（如图 10 所示）。声参量阵、信号发生器组成声发射模块，激光测振仪、数据采集卡及计算机组成测振模块。声参量阵作为激励源，在远场产生高指向的差频声波，激光测振仪采集饰面砖表面振动信号，经数据采集卡数模转换并传输至计算机，以进行时域、频域的分析。图 11 所示为空鼓检测系统，声参量阵可发出声束角为±15°的高指向性声波，RIGOL DG800 型可编程信号发生器提供输入信号。

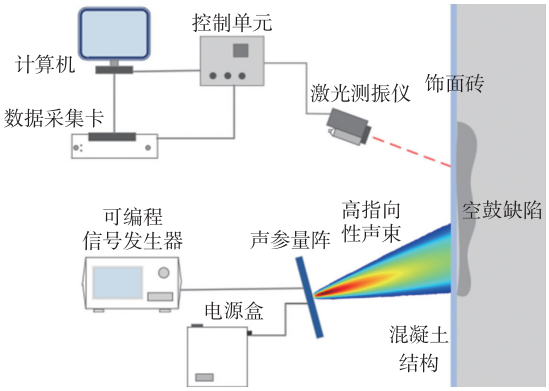


图 10　基于声参量阵的空鼓检测系统示意图

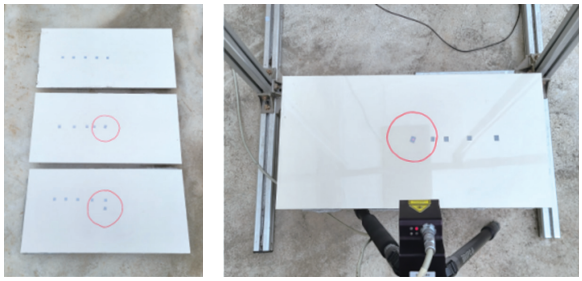
图 11　基于声参量阵的空鼓检测实验系统

声参量阵的差频波声压在有效阵列长度内会随传播距离逐渐提高,超出长度后逐渐减小。为保证实验效果,需要声压级尽可能大,故应该控制声参量阵与空鼓模型表面之间的距离在有效阵列长度附近。当声参量阵原波频率为 40 kHz 时,其有效阵列长度由其衰减特征长度决定[20],即:

$$l=\frac{1}{2\alpha} \tag{3}$$

式中:$\alpha=1.716\times10^{-10}\times f^2$,$\alpha$ 为原波的声衰减系数,f 为原波频率。计算可得实验所使用的声参量阵的有效阵列长度约为 1.7 m。实验中将声参量阵悬挂于待测空鼓模型表面的正上方 1.7 m 处。

实验使用了三个实物空鼓模型(图 12),分别为无空鼓缺陷的完好模型、中心有直径 100 mm 的圆形空鼓缺陷的模型、中心有直径 120 mm 的圆形空鼓缺陷的模型。圆圈表示下方空鼓缺陷轮廓。空鼓缺陷均大致位于饰面砖中心,整个模型左右对称,为减少重复测量次数,仅在模型的一侧设置若干测量点位。使用测试系统对以上三个空鼓模型进行实验,利用激光测振仪测量轴线上各点的振幅及变化,以验证实验方法的有效性。

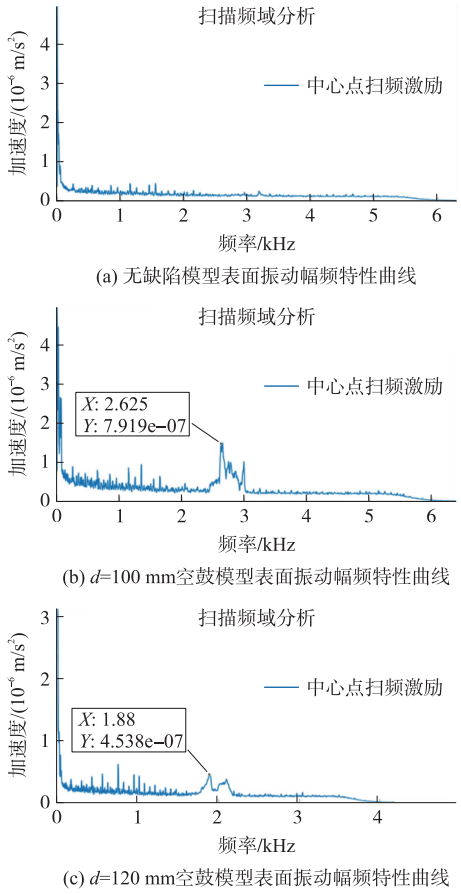


(a) 空鼓模型　　(b) 空鼓模型检测

图 12　空鼓模型实物图

4　实验结果及分析

对空鼓模型进行共振频率的测量,结合上文预测的圆形薄板共振频率以及空鼓模型共振频率,使用信号发生器输出 1 600 Hz~3 000 Hz 的扫频正弦信号,对收集到的空鼓中心点的时域振动信号进行快速傅里叶变换,得到幅频特性曲线(如图 13 所示)。结果显示,无缺陷板在扫频激励下各频率振幅分布平均,没有共振峰。直径 100 mm、厚 5 mm 饰面砖的空鼓模型的一阶共振频率为 2 625 Hz,与上文预测的 2 734.2 Hz 和 2 600 Hz 均十分接近。直径 120 mm、厚 5 mm 饰面砖的空鼓模型的一阶共振频率为 1 880 Hz,与上文预测的 1 911 Hz 和 1 800 Hz 基本吻合。以上结果有效证明了前文理论基础和数值仿真的科学性与准确性。



(a) 无缺陷模型表面振动幅频特性曲线

(b) d=100 mm空鼓模型表面振动幅频特性曲线

(c) d=120 mm空鼓模型表面振动幅频特性曲线

图 13　空鼓模型共振频率测试结果

使用不同频率定频激励 d=100 mm 的空鼓模型,使用激光测振仪对测量轴线上各点的振动信号进行测量和对比。频率分别采取共振频率(2 625 Hz)、偏小的非共振频率(1 900 Hz)、偏大的非共振频率(3 000 Hz)。在共振频率激励下,对于采集到的时域信号,对比下方有空鼓缺陷的测量点位和下方无空鼓缺陷的测量点位,结果如图 14 所示。空鼓上方薄板的振幅明显高于完好部分上方薄板的振动幅度。但二者振幅差异较仿真结果偏小,处于同一数量级(10^{-5} mm),这是因为实验环境存在外界震动干扰、测振仪自身性能限制、电流干扰、光线干扰等多方面因素的影响,不如仿真环境般完全理想。

同时,从时域图可以发现质点的振幅是不断变

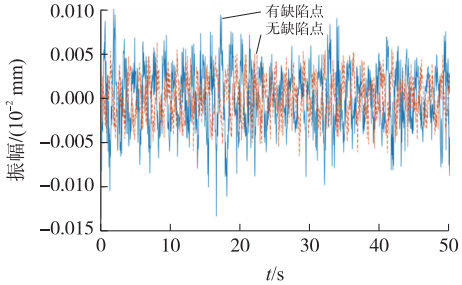


图 14　缺陷上方测量点和无缺陷处上方测量点的时域信号对比

化的,为了量化各质点的振动强度,本实验使用均方根值(RMS)和峰值指标(C)这两个特征指标来表征质点的振动强度,以便量化对比。均方根值 RMS 是信号分析中的常用特征指标,为对均方值开平方计算获得。计算表达式如下:

$$X_{\mathrm{rms}}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}X_i^2}{N}} \tag{4}$$

峰值因子是信号峰值与均方根值(RMS)的比值,可以表征信号中冲击的大小。其计算表达式如下:

$$C=\frac{X_p}{X_{\mathrm{rms}}}=\frac{\mathrm{Max}|x(n)|}{X_{\mathrm{rms}}} \tag{5}$$

使用声参量阵分别在 1900 Hz、2600 Hz、3000 Hz 的频率下激励空鼓模型,使用激光测振仪测量空鼓模型上各测量点的振动信号,经信号采集卡传输至计算机,使用 MATLAB 计算时域信号的均方根值及峰值指标,并根据结果绘制其振动强度-轴向位置曲线,如表 1 及图 15 所示。

表 1 1 900 Hz 激励下各测点的特征参数表

特征参数	1 号测点	2 号测点	3 号测点	4 号测点	5 号测点
均方根值/mm	$5.127\ 1\times10^{-5}$	$4.800\ 1\times10^{-5}$	$4.613\ 9\times10^{-5}$	$4.567\ 5\times10^{-5}$	$4.468\ 8\times10^{-5}$
峰值指标/mm	8.384 2	10.376 3	10.787 6	9.389 2	7.404 5

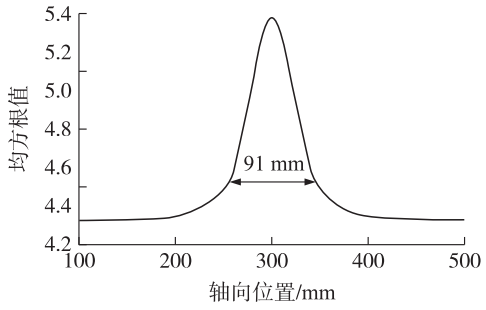


图 15 直径 d=100 mm 空鼓模型在 1 900 Hz 激励下测量轴线上各点振幅的均方根值

分析以上各测量点的均方根值及峰值指标,从 1 号测点到 5 号测点,均方根值呈先大幅下降再缓慢减小的趋势,与数值仿真结果相符合。空鼓中心上方的薄板振幅最大,随着向两边延伸,振幅逐渐减小并趋于平缓,最终稳定在一个较小的数值附近。另一特征指标峰值指标在此组数据中并未呈现出规律性的变化,初步分析原因:峰值因子由信号峰值与均方根值共同决定,非共振频率下饰面砖表面振动幅值较小,时域信号中的峰值来源是环境冲击和仪器周期性的峰值,这些无规律的峰值比上逐渐减小的均方根值最终导致计算结果的无规律。

根据均方根值绘制空鼓模型表面各质点的振动强度随测量轴线的变化图(如图 15 所示),横坐标 100 mm~300 mm 区域为测量结果对应的数值,横坐标 300 mm~500 mm 的区域采取对 100 mm~300 mm 区域轴对称处理,因实验中测量点数有限,为使曲线连续平滑,对折线图采用 spcrv 函数进行平滑处理,获得最终图像,如图 15 所示。分析图 15 发现,1 900 Hz 非共振频率激励下,缺陷尺寸 d=100 mm 的空鼓模型的轴线上各点的振幅均方根值呈现出较明显的拱形曲线,与数值仿真的结果相吻合。通过图 15,可以预测此模型在轴线上 300 mm 处有一空鼓缺陷,空鼓缺陷在此方向上的大小约为 91 mm,比较接近实际缺陷尺寸 100 mm。2600 Hz(共振频率)激励和 3 000 Hz(非共振频率)激励下的各测点特征参数如表 2、表 3 所示。

表 2 2 600 Hz 激励下各测点的特征参数表

特征参数	1 号测点	2 号测点	3 号测点	4 号测点	5 号测点
均方根值/mm	$5.524\ 0\times10^{-5}$	$4.931\ 2\times10^{-5}$	$4.357\ 0\times10^{-5}$	$4.345\ 7\times10^{-5}$	$4.330\ 2\times10^{-5}$
峰值指标	10.342 1	9.253 9	10.787 6	10.931 9	8.803 7

表 3 3 000 Hz 激励下各测点的特征参数表

特征参数	1 号测点	2 号测点	3 号测点	4 号测点	5 号测点
均方根值/mm	$6.599\ 7\times10^{-5}$	$5.128\ 6\times10^{-5}$	$4.319\ 2\times10^{-5}$	$4.313\ 8\times10^{-5}$	$4.301\ 3\times10^{-5}$
峰值指标	8.154 3	9.572 4	8.058 4	9.441 4	9.738 8

分析以上两表数据,振幅的均方根值从一号测量点到 5 号测量点呈现逐渐减小的趋势,但峰值指标仍旧未呈现可遵循的规律,限于测振仪性能及实验环境影响,在本次实验中,峰值指标这一特征指标并不适合用来判断测量点下方空鼓状况。根据表 2 和表 3 的振幅均方根值,分别绘制 2 600 Hz 和 3 000 Hz 激励频率下空鼓模型表面各质点的振动强度在测量轴线上的变化图,并将三条曲线绘制在同一张图中进行横向对比(如图 16 所示)。

分析图 16 发现,在 2 600 Hz 激励和 3 000 Hz 激

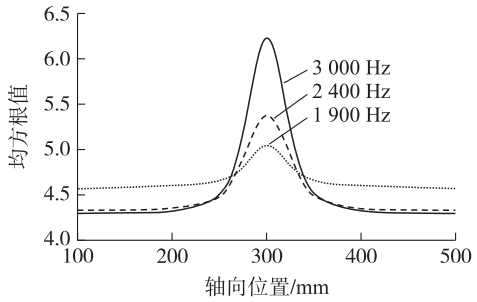


图 16　直径 d=100 mm 空鼓模型在各频率激励下测量轴线上各点振幅的均方根值

励下,据图推测的缺陷大小均为 99 mm 左右,位置为轴向 300 mm 附近,与实物模型十分接近,可以较好地检测空鼓的位置与大小。与数值仿真结果不同的是,非共振频率 3 000 Hz 下的振幅均方根值最高,其次是共振频率 2 600 Hz 和非共振频率 1 900 Hz。产生此现象的主要原因是声参量阵在不同差频波频率下产生的远场声压级是具有明显差异的,3 000 Hz 差频下 1.7 m 处的声压级用声压计实测为 115 dB 左右,转换为声压即 11.24 Pa,而同样条件下 2 600 Hz 差频波的声压级为 110 dB,等效声压为 6.3 Pa,两者声压相差近两倍,这是最终导致共振频率下振幅大于非共振频率下振幅的原因。

综上所述,在不同频率激励实测下,本文提出的基于声参量阵的空鼓检测方法均能检测出空鼓模型中空鼓缺陷的位置与形状。在共振频率、大声压的激励下效果较好,准确度较高;在非共振频率、小声压的激励下效果稍受影响,但误差都在合理的范围内。验证了声参量在远距离声无损检测上的应用前景及其在建筑空鼓检测上的可行性。

5　总结

本文基于声参量阵理论、弹性薄板理论和共振原理,提出了声参量阵的饰面砖空鼓检测方法,从数值仿真和实验两方面进行可行性验证。仿真结果和实验结果初步验证了该检测方法的有效性,可以检测空鼓缺陷是否存在,还能判断空鼓缺陷的位置与大致尺寸。数值仿真方面,本文构建了检测方法的完整数值模拟过程。理论基础方面,对单一圆形薄板和完整空鼓模型在高指向性声束激励下的振动特性进行了研究,预测各阶共振频率。实验方面,本文搭建了一套基于声参量阵的空鼓检测试验系统,研究了不同激励频率、不同检测位置、不同缺陷大小下空鼓检测的效果。使用时域振动信号的均方根值作为特征指标区分空鼓缺陷与完好墙面。实验结果进一步验证了本方法的可行性。然而,由于空鼓缺陷参数和墙面结构是多样的,许多情况还未考虑全面,还需要在未来的工作中进一步完善。

参考文献:

[1] Nakashima Y, Yoshimura T, Ohya T. Prototype of Parametric Array Loudspeaker on Mobile Phone and its Acoustical Characteristics[C]//Audio Engineering Society 118th Convention, Barcelona, Spain, 2005: 6521.

[2] 李海洲. 加气混凝土墙体收缩、开裂及空鼓的研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.

[3] 周志琨,杨淞,金桂华,等. 壁面粘贴质量检测系统设计[J]. 上海交通大学学报,2014,48(11):1536-1539.

[4] 冯少孔,黄涛,李海枫. 大型预应力混凝土立墙内裂缝检测与成因浅析[J]. 上海交通大学学报,2015,49(7):977-980.

[5] 孙牵宇. 基于 SPCE061A 的嵌入式墙体空鼓声无损检测系统[D]. 厦门:厦门大学,2007.

[6] Zendri E, Falchi L, Izzo F C, et al. A Review of Common NDTs in the Monitoring and Preservation of Historical Architectural Surfaces[J]. International Journal of Architectural Heritage 2017, 11(7): 987-1004.

[7] 王玮,米庆仁,肖云,等. 基于可见光和红外图像融合的建筑外墙空鼓与脱落识别方法研究[J]. 工业建筑,2024,54(5):51-59.

[8] 张旭. Research on Wall Hollowing Detection Method Using Gamma Ray Scattering Technology[D]. 成都:成都理工大学,2021.

[9] 邬冠华,熊鸿建. 中国射线检测技术现状及研究进展[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1683-1695.

[10] Gan W S, Yang J, Kamakura T. Parametric Acoustic Array: Theory, Advancement, and Applications[J]. Applied Acoustics, 2012, 73(12): 1209-1210.

[11] 周爱国,阮杰阳,刘凯,等. 超声波流量计影响因素的分析及对策[J]. 中国工程机械学报,2009,7(4):469-473.

[12] Gan W S, Yang J, Kamakura T. A Review of Parametric Acoustic Array in Air[J]. Applied Acoustics, 2012, 73(12): 1211-1219.

[13] Zhou H Y, Huang S H, Li W. Parametric Acoustic Array and its Application in Underwater Acoustic Engineering[J]. Sensors, 2020, 20(7): 2148.

[14] Esipov I, Naugolnykh K, Timoshenko V. The Parametric Array and Long-Range Ocean Research[J]. Acoustics Today, 2010, 6(2): 20-26.

[15] Yin J W, Zhang X, Zhou Y M. Differential Pattern Time Delay Shift Coding Underwater Acoustic Communication Using Parametric Array[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2015, 137(4): 2214-2214.

[16] Qu K, Zou B B, Chen J J, et al. Experimental Study of a Broadband Parametric Acoustic Array for Sub-Bottom Pro-

filing in Shallow Water[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018(1):3619257.
[17] 汤惠,杨文旭,陈飞洋,等. 声频定向系统超声换能器频率特性及匹配[J]. 电声技术,2016,40(5):35-39.
[18] 徐洪涛,关飞飞,周尚武. 弹性薄板小挠度理论在工程设计中的应用举例[J]. 结构工程师,2016,32(2):41-44.
[19] 钟阳,张永山. 四边任意支承条件下弹性矩形薄板弯曲问题的解析解[J]. 应用力学学报,2005,22(2):293-297,341.
[20] 《建筑装饰装修工程质量验收标准》编制组. 国家标准《建筑装饰装修工程质量验收标准》50210—2018 简介[J]. 工程建设标准化,2018(4):52-53.

王 驰(1982—),男,河南周口人,教授,博士生导师,2004 年于河南科技大学获得学士学位,2009 年于天津大学获得博士学位,主要从事融合传感技术的研究,wangchi@ shu.edu.cn;

陈金波(1980—),男,内蒙古人,工程师,2002 年、2014 年于上海大学分别获得硕士和博士学位,主要从事人工智能与机器视觉等方面的研究,jbchen@ shu.edu.cn。