

学校代号 10532

分类号 TU317+.5

学 号 S1501W0076

密 级 公开



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

工程硕士学位论文

基于麦克风冲击共振法的钢-混凝土组合结构脱空损伤诊断研究

学位申请人姓名 刘蒙

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 周云副教授 杨博铭高工

学 科 专 业 建筑与土木工程

研 究 方 向 结构损伤识别

论文提交日期 2018年3月20日

学校代号：10532
学 号：S1501W0076
密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

基于麦克风冲击共振法的钢-混凝土组合结构脱空损伤诊断研究

国家自然科学基金青年基金（51208190）
国家重点研发计划（2016YFC0701308）
湖南省重点研发计划（2017SK2223）
江苏省工程力学分析重点实验室开放基金（LEM16A04）
长沙市科技计划（kq1706019）

学位申请人姓名：刘蒙
导师姓名及职称：周云副教授 杨博铭高工
培 养 单 位：土木工程学院
专 业 名 称：建筑与土木工程
论文提交日期：2018年3月20日
论文答辩日期：2018年3月23日
答辩委员会主席：易伟建教授

Diagnosis of interface debonding in steel–concrete composite
structures using Air–coupled Impact Resonance Test

by

LIU Meng

B.E. (Hunan University)2015

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Architecture and Civil Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Associate Professor ZHOU Yun & Senior Engineer YANG Boming

March, 2018

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密 ，在 _____ 年解密后适用本授权书。
- 2、不保密 。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

摘 要

钢-混凝土组合结构因其具有承载力高、抗震性能好、耐火性能优良和施工方便等优点，被广泛用于高层建筑及桥梁中。受施工质量和混凝土收缩徐变等因素的影响，钢与混凝土界面常发生脱空损伤，从而导致钢材与混凝土的协同工作性能降低，并影响构件的承载能力与变形能力，因此，对此类损伤的识别与评估至关重要。目前传统的检测手段难以对此类损伤进行有效的辨识，本文将采用一种低成本、快速、高效的非接触式无损检测技术-麦克风冲击共振测试，来识别钢-混凝土组合结构界面脱空损伤。

理论方面，本文将局部脱空区域的钢板和钢壳视为四周约束的板壳模型，以四周约束矩形板及四周约束的圆形板的振动理论为基础，对矩形局部脱空损伤与圆形局部脱空损伤的板壳模型的自振频率进行解析解的求解分析，建立基于局部脱空损伤钢板壳几何特征的自振频率预测模型。

试验方面，本文设计了一个钢-混凝土组合板构件和一个钢管混凝土柱构件，两个试件的钢-混凝土界面均设置了相同的两组大小不同、厚度不同的矩形与圆形泡沫板，用于模拟钢-混凝土组合板与钢管混凝土的脱空损伤。利用力锤冲击激励损伤区域的局部钢板和钢壳，进行钢-混凝土界面脱空损伤的脉冲锤击试验，采用非接触式的麦克风声学传感器拾取激励点上空的声压响应信号，对声压响应信号进行频谱分析，对比损伤区域与非损伤区域的信号频谱特性，经过试探性试验确定试验设备及传感器相对位置对信号的影响后，探究不同面积、形状和深度的脱空损伤对信号频谱的影响。利用麦克风传感器进行局部脱空损伤板壳的模式测试，进一步探究声压信号反映板壳振动的准确性。针对特定的损伤工况进行基于麦克风阵列的冲击共振法损伤成像测试，绘出损伤云图，为麦克风冲击共振测试在实际工程中的应用奠定基础。

有限元模拟方面，本文采用显式动力学分析的方法模拟在点脉冲激励下，脱空损伤区域与非脱空区域钢板和钢壳表面上空气中的声压响应分布，提取钢板和钢壳表面振动产生的声波信号，探究麦克风冲击共振法的可行性。对各损伤工况进行有限元模态分析，提取各损伤工况的模式频率与振型，并与理论解析解及试验结果进行对比。

利用常用的四种无损检测方法对试件的局部脱空损伤进行损伤成像测试，分别探究各方法与麦克风冲击共振法相比，各自的探伤效果及实际应用中的优点与缺点，试验结果展现出麦克风冲击共振法良好的探伤效果，表明该方法在钢-混凝土局部界面脱空损伤的检测方面具有良好的应用价值与发展前景。

关键词：钢-混凝土组合结构；脱空损伤；麦克风；声学测试；频谱分析

Abstract

Steel-concrete composite structures are widely used in high rise buildings and bridges because of its advantage of bearing capacity, seismic performance, fire resistance and convenience of construction. Debonding defects tend to appear at the interface between concrete and steel due to lack of quality in construction or the shrinkage and creep of concrete, which could led to the lack of synergy between concrete and steel and further decrease the bearing capacity and deformability of the component. Therefore, it is essential to accurately assess and diagnose the debonding defects of steel-concrete composite structure. While traditional Non Destructive Testing methods can hardly indentify this kind of defect, Air-coupled Impact Resonance Test using microphones is proposed to diagnose the debonding defects cost effectively, rapidly and effectively.

In theoretical aspect, the region of steel slab or shell with any debonding defect is considered as a small slab or shell with all the boundaries constrained. Based on the natural frequency formulation of rectangular slab and circular slab with all the boundaries constained, the natural frequency of debonding defect with specific geometry characteristic could be estimated.

In experimental aspect, two specimens, one steel-concrete composite slab component and one concrete filled steel tube component, are made for the Air-coupled Impact Resonance Test. Two same groups of local debonding defects are made by foams sticked to the inner side of steel plate or steel tube, while each group of defects contain conditions with different shape and different areal. Hammers are used to stimulate the vibration at local debonding defect area, and the microphones are used to collect the following sound pressure response of vibration at the hammered area. Spectural analysis of the sound pressure response is carried out to compare the frequency spectrum characteristics between the condition with stimulation at deffective area and intact area. After tentative test that determine the relative position of the exciting points and microphone sensors, Air-coupled Impact Resonance Test is carried out to figure out how the frequency response function of sound pressure is affected by the areal, shape and depth of the local debonding defects. Modal test is carried out to further ascertain that the impact resonance test based on microphones could accurately reflect the vibration information of the local defect

plates and shells. Imaging test of specific defect condition is carried out using microphone arrays, which shows the potential of Air-coupled Impact Resonance Test to be applied in engineering.

In simulative aspect, the sound pressure field of the air above the impacted surface with or without defect is simulated by means of explicit dynamic analysis. The sound wave signal caused by the vibration of the steel plate or shell was collected and compared to verify the feasibility of Air-coupled Impact Resonance Test. Natural frequency of each debonding defect calculated by modal analysis is used to verify the authenticity of the experiment.

Four types of commonly used Non Destructive Test method which aim at the same two components is used to compare their ability of imaging the defects. Advantages and disadvantages of each method are concluded, which shows the great potential of Air-coupled Impact Resonance Test method in the future.

Key Words: Steel concrete composite structures; Debonding defect; Microphones; Acoustic test; Spectrum analysis

目 录

学位论文原创性声明和学位论文授权使用授权书	I
摘要	II
Abstract	IV
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 钢管混凝土组合结构及其损伤危害	3
1.2.1 钢管混凝土组合结构及其优点	3
1.2.2 钢管混凝土组合结构的损伤	4
1.3 常用的钢管混凝土组合结构脱空检测方法	5
1.3.1 人工敲击法	5
1.3.2 超声波法	6
1.3.3 光纤光栅法	7
1.3.4 红外热像法	8
1.3.5 冲击回波法	9
1.3.6 其他方法	10
1.4 基于麦克风的无损检测方法	10
1.4.1 泄露面波衰减原理检测混凝土裂缝分布	12
1.4.2 冲击回波原理检测混凝土分层损伤	13
1.4.3 面波能量透射原理检测裂缝深度	14
1.4.4 冲击共振原理检测混凝土分层缺陷	14
1.5 本文研究内容	16
第 2 章 声模态理论及四周约束板壳振动理论	18
2.1 声学基础与声模态分析	18
2.1.1 声波及声压的概念	18
2.1.2 线性系统的振声互易性原理	20
2.1.3 声波方程	22
2.1.4 声学模态分析	24
2.2 四周约束板壳的振动理论	27
2.2.1 四周约束矩形平面薄板的自振频率	27
2.2.2 周界约束圆形平面薄板的自振频率	31
2.3 本章小结	34

第 3 章 钢-混凝土组合结构的麦克风冲击共振试验	35
3.1 麦克风冲击共振试验原理	35
3.1.1 试验设备与仪器	35
3.1.2 试件及损伤设计	36
3.1.3 测试及信号处理方法	39
3.2 试探性测试	41
3.2.1 钢-混凝土界面脱空损伤测试典型信号	41
3.2.2 麦克风与被测构件表面的垂直距离对测试信号的影响	42
3.2.3 麦克风与测点的水平距离对测试信号的影响	43
3.2.4 麦克风与被测表面切向角度对测试信号的影响	44
3.3 不同损伤面积与形状的麦克风冲击共振测试	45
3.3.1 钢-混凝土组合板构件麦克风冲击共振测试	46
3.3.2 钢管混凝土构件麦克风冲击共振测试	49
3.3.3 试验结果分析	53
3.4 基于麦克风的声模态测试	53
3.4.1 钢-混凝土组合板的麦克风声模态测试	54
3.4.2 钢-混凝土组合板的加速度模态测试	55
3.4.3 钢管混凝土的麦克风声模态测试	57
3.5 麦克风阵列损伤成像测试	58
3.5.1 麦克风阵列损伤成像测试原理	59
3.5.2 钢-混凝土组合板构件的损伤成像测试	61
3.5.3 钢管混凝土构件的损伤成像测试	63
3.6 本章小结	64
第 4 章 显式动力学有限元模拟与试验模态分析	66
4.1 引言	66
4.2 钢-混凝土组合板构件麦克风冲击共振测试	66
4.2.1 流-固耦合有限元模型的建立	66
4.2.2 非脱空构件与脱空构件在点激励下的声场分布	69
4.3 典型局部脱空损伤的模态	74
4.3.1 钢-混凝土组合板构件局部损伤模态	74
4.3.2 钢管混凝土构件局部损伤模态	78
4.4 模态频率的试验及模拟值与理论解析解的比较	80
4.4.1 钢-混凝土组合板构件各工况的模态频率对比	80
4.4.2 钢管混凝土构件各工况的模态频率对比	82
4.5 本章小结	83

第 5 章 多种无损检测方法对比测试	85
5.1 引言	85
5.2 红外热成像探伤法	85
5.2.1 红外热成像法探伤原理	85
5.2.2 钢-混凝土组合板构件红外探伤测试	87
5.2.3 钢管混凝土构件红外探伤测试	89
5.3 混凝土超声波探伤法	90
5.3.1 混凝土超声波探伤原理	90
5.3.2 钢-混凝土组合板构件超声波探伤测试	91
5.4 钢结构超声波探伤法	94
5.4.1 钢结构超声探伤测试原理	95
5.4.2 钢-混凝土组合板构件超声探伤测试	95
5.5 雷达法	97
5.5.1 雷达法探伤原理	97
5.5.2 雷法法损伤成像测试	99
5.6 基于爬行机器人的麦克风冲击共振成像法	100
5.6.1 麦克风冲击共振法原理	100
5.6.2 麦克风冲击共振法损伤成像测试	102
5.7 各无损检测方法的优劣对比	103
5.8 本章小结	104
总结与展望	106
参考文献	108
致谢	116

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

改革开放以来我国经济欣欣向荣，土木工程建设也得到极大的发展，我国基础设施的建设在速度和规模上都居世界前列，大型复杂建筑和桥梁也日益增多。随着社会的发展和时间的流逝，越来越多的结构进入长期服役状态。目前我国桥梁的数量已超过 28 万座，其中绝大部分桥梁已服役超过三十年。大量的桥梁在长期服役期间积累各种损伤，使相当一部分现役结构物存在不同程度的安全隐患。结构关键部位的损伤将造成结构使用性能的下降甚至无法满足使用需求，若损伤没有被及时发现并采取相应措施，最终可能导致结构的局部破坏甚至整体的失效与毁损，造成巨大的安全隐患。对于重要的大型公共建筑、桥梁等结构，需要定期对结构物的质量安全性能进行鉴定和评估、改造和加固。1999 年，重庆市綦江县彩虹桥突然发生整体垮塌，如图 1.1 所示，造成 40 人伤亡，事故分析发现，该中承式钢管混凝土提篮拱桥在施工中存在巨大的质量问题，包括钢管混凝土的局部漏灌现象，在其主拱的肋板处发现了一米多长的空洞现象。由于桥梁结构的长期服役期间累积损伤导致性能退化，最终发生垮塌，造成巨大的损失和伤亡的事件给了我们深痛的教训^[1]。因此，如何准确的评估和检测现役钢管混凝土结构的界面脱空损伤和病害问题十分重要。



a)重庆彩虹桥全景



b)彩虹桥垮塌事故现场

图 1.1 重庆彩虹桥整体垮塌事件

钢管混凝土(Concrete-Filled Steel Tube)组合结构是指在钢管中填充混凝土形成的组合结构，利用钢管和混凝土在受力过程中相互作用使混凝土处于复杂的应力状态，从而使混凝土的强度得以提高，塑性和韧性得到改善。钢管混凝土组合结构充分发挥了钢材与混凝土两种材料的优点，具有：重量轻，在力学性能方面耐疲劳、强度高、耐冲击、延性好，在施工性能方面架设轻便、省工省料、施工速度快等优势，从而在土木工程中得到广泛应用。

无论是在我国城市桥梁建设中,还是在公路桥梁建设中,钢管混凝土拱桥都得到了广泛的应用。我国自1990年四川旺苍东河大桥的建成后便开始大规模的钢管混凝土拱桥建设,2012年,中国已拥有230座以上的钢管混凝土拱桥。在如此多的钢管混凝土拱桥中,跨径 $l > 300$ 米的约有10座,跨径 $l > 200$ 米的有30余座^[2]。我国钢管混凝土拱桥的建设发展迅速,取得了巨大的成就,然而其设计理论与技术发展却严重滞后于建设的发展,早期建设时缺乏相应的设计、施工及后期维护的规范规程作为技术指导。随着服役时间的推移与交通运输量的逐年增长,结构产生的损伤和病害也逐渐日积月累。从国内的多座钢管混凝土拱桥检测结果中分析发现,钢-混凝土界面脱空问题是钢管混凝土拱桥最为普遍和复杂的问题^[3]。钢管混凝土拱桥拱肋处的钢-混凝土界面脱空主要由于外界环境的温度变化、混凝土的配合比、混凝土自身的收缩、施工过程中所采用的工艺等等因素综合造成^[4]。当钢管混凝土组合结构中钢-混凝土界面出现脱空时,与界面粘结密实的截面相比,其套箍效应不再起作用,同时拱肋截面的应力分布将发生改变,拱肋的刚度也会受到影响,从而影响到整座桥梁结构的极限承载能力以及受力性能。我国钢管混凝土项目投资巨大,一旦由于质量安全隐患造成结构破坏导致工程耐久性降低乃至过早退役,将给我国国民经济造成巨大的损失。因此,针对钢管混凝土组合结构内部缺陷和安全性的评估,提出准确、可靠的控制解决方案,对于提高我国大型钢管混凝土工程的服役寿命至关重要。因此,钢-混凝土界面脱空问题急需简易高效的无损检测技术。

近年来,随着世界范围内钢管混凝土结构的损伤、老化及病害事故的增多,无损检测技术的研究显得更为迫切。准确的结构损伤识别可以帮助准确的评估结构的使用性能和安全性能,并为结构模型的修正、维修和加固奠定基础。1991年,Rytter A^[5]提出,结构损伤识别可分为4个阶段:1)通过定性检测判断结构是否存在损伤;2)进一步确定结构损伤的具体位置;3)确定损伤的程度,判断损伤对结构安全性能的影响;4)评估结构的健康状况,承载能力及寿命。利用简便易行的土木工程无损检测技术进行结构损伤识别具有十分重要的研究意义和工程应用价值,借助现代检测手段的无损检测技术代表了当前无损检测技术发展的最新方向。

无损检测技术(Non Destructive Testing,简称NDT)是指在不影响结构或构件性能的前提下,通过测定某些适当的物理量来判断结构或构件性能的检测方法。整体而言,无损检测技术可以分为两大类:基于整体的结构状况识别和基于局部的构件损伤识别^[6]。整体检测方法主要有静态检测法、基于振动的损伤识别法、模态修正法、动力指纹法、神经网络法和遗传算法等^[7-10]。局部检测方法通过无损检测技术对结构的各个部位进行精细的损伤诊断和排查,准确地评估结构的损伤情况及力学性能。土木工程领域内传统的无损检测技术包括回弹法、超声回弹

综合法、钻芯法、超声法等方法检测混凝土的强度、裂缝等损伤信息，随着信息技术快速的发展，冲击回波法、雷达法、红外热像法、声发射技术、光纤光栅法等新技术在土木工程中也得到了广泛的应用^[11,12]。近年来，一种基于空气耦合传感器的非接触式无损检测技术开始进入人们的视野，目前多用于检测混凝土材料的裂缝与内部孔洞损伤。

1.2 钢管混凝土组合结构及其损伤危害

1.2.1 钢管混凝土组合结构及其优点

钢管混凝土(CFST)组合结构作为一种新兴的组合结构，由于其充分发挥钢材与混凝土材料各自的优点的优越性，被广泛应用于厂房、高层建筑和大跨结构和桥梁中。按截面形式的不同，可分为圆钢管混凝土和方钢管混凝土^[13]，工程中常见的几种截面形式如图 1.2 所示。钢管混凝土组合结构主要有以下方面的优点^[14]：

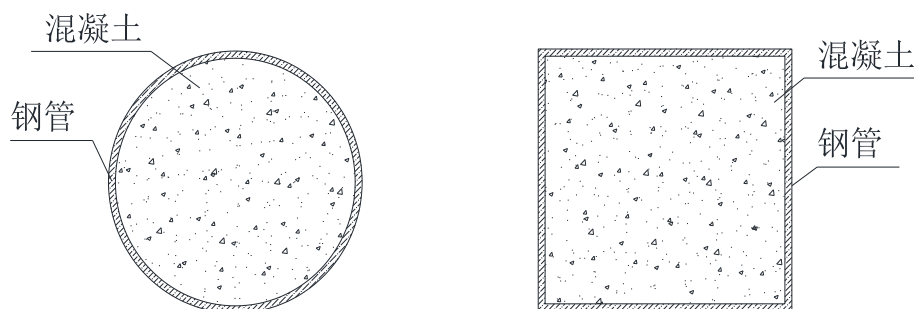


图 1.2 常用的钢管混凝土组合结构截面形式

1.承载力高

钢管内的混凝土在四周钢管的约束下，承受轴向压力时处于三向受压的应力状态，混凝土的强度大幅提高，且钢管在内部混凝土的支撑下极大程度地避免了局部屈曲破坏的可能，两种材料相互取长补短。研究表明钢管混凝土构件的承载力远高于钢管与混凝土二者承载力之和。

2.良好的塑性与抗震性能

混凝土为脆性材料，钢管在轴压下也会发生脆性的屈曲破坏，但在两种材料的相互作用下，当构件轴向受压时，在外部钢管发生屈曲破坏的情况下仍然具有一定的承载能力，且在压弯剪循环荷载作用下，其水平作用力与位移之间的滞回曲线饱满，抗震性能优于传统的混凝土结构。

3.耐火性能和耐腐蚀性能好

火灾作用下钢管内部的混凝土材料可吸收大量的热量，短时间内结构的温度上升得到缓解，大大延迟了结构高温下的破坏，且钢管的外露面积相对纯钢结构而言更少，因此抗腐蚀的性能和维护的费用都较之大大减少。

4.施工方便，经济效益显著

钢管混凝土组合结构构造简单，钢管可以兼任模板的作用，且无需进行钢筋绑扎，运输和施工吊装较为简便，使得工期大大缩短，并节约人力物力，经济效果显著。

1.2.2 钢管混凝土组合结构的损伤

钢管混凝土组合结构被广泛应用于桥梁中，受施工工艺和材料自身特性等因素的影响，加之钢管混凝土拱桥设计规范和理论的不完善，现役钢管混凝土组合结构中已出现不同程度的病害，应当引起高度重视^[2]。钢管混凝土组合结构的损伤类型主要包括：管内混凝土界面脱空现象、钢管局部鼓曲、钢管局部锈蚀等，其中以钢管混凝土的管壁脱空现象最为普遍。钢管混凝土组合结构脱空现象可分为两类，第一类是有混凝土不密实或自身收缩引起的环向脱空，第二类是由于填充不密实或混凝土流动造成的近壁空穴^[15]。第二类脱空损伤常见的形式如图 1.3 所示。我国在设计中对钢管混凝土组合结构脱空现象的考虑是在承载力公式中考虑折减系数，目前脱空损伤的量化指标为脱空深度。我国部分钢管混凝土拱桥的脱空损伤情况如表 1.1 所示^[16]：

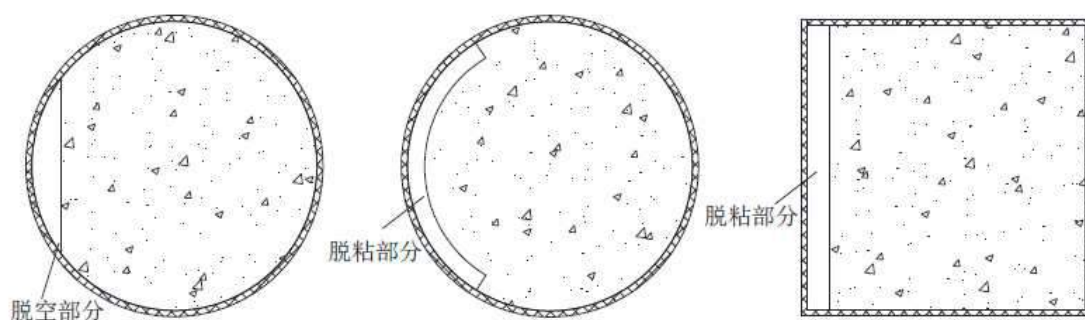


图 1.3 常见的钢管混凝土脱空截面

表 1.1 部分钢管混凝土拱桥脱空损伤情况^[17]

桥梁	检测方法	损伤位置	脱空情况
巫山长江大桥 ^[17]	光纤传感检测	拱顶	平均1.6mm，最大值2.0-2.2mm
茅草街大桥 ^[18]	破损法检测	拱顶	平均值1.54cm，最大值3.9cm
重庆乌江二桥 ^[19]	超声波检测	拱顶	0.3-2.0cm

钢管混凝土组合结构脱空损伤的成因复杂，2010年，刘益华、黄福伟等^[20]对脱空现象及成因进行了分类，认为导致脱空的主要因素有：构件轴向压力、混凝土自身质量问题、施工泵送工艺的缺陷、温差变化、混凝土外加剂的用量、核心混凝土收缩和徐变等。

钢管混凝土组合结构一旦发生脱空现象，管内混凝土的套箍作用将大大削弱，进而降低了构建的承载能力。2003年，姜绍飞等^[21]提出钢管混凝土的脱空损伤削弱了钢管与混凝土的共同作用，降低了构件的承载能力和变形刚度。2008年~2009

年,涂光亚等^[22,23]通过数值模拟和试验对比的方式进行分析,得出结论:脱空损伤对于钢管混凝土组合结构的承载力、动力稳定性和变形性能均有显著的影响。2011年,刘夏平等^[24]研究了脱空率对钢管混凝土构件力学性能的影响,结果表明,随着脱空率的增大,构件的极限承载力出现明显的下降。同年,廖飞宇等^[25]提出,存在界面缺陷的钢管混凝土短柱的荷载-轴向位移曲线大致分为五个阶段:1) O-A 区段:轴向压力荷载增加至极限强度;2) A-B 区段:由于存在界面缺陷的截面处钢管套箍效应不足,管内核心混凝土被压碎,轴向荷载突然下降 20%;3) B-C 区段:被压碎的混凝土块向外扩张并与钢管壁发生接触挤压,随着荷载与变形的增大,钢管继续为混凝土提供环向套箍效应,防止混凝土被进一步压碎;4) C-D 区段:管内另一部位的混凝土突然被压碎,承载力再次突然下降;5) D-E 区段:管内被压碎的混凝土向外扩张与管壁接触,钢管继续提供套箍效应直至构件达承载力极限,发生破坏,如图 1.4 所示。因此,及时发现并识别钢管混凝土组合结构关键部位的脱空损伤是亟需解决的问题。

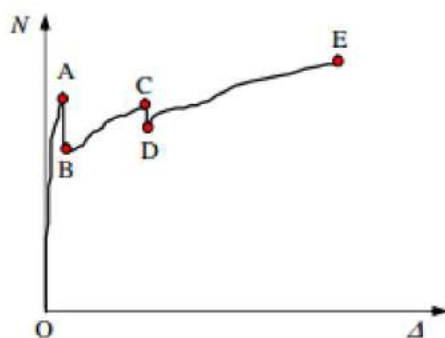


图 1.4 脱空的钢管混凝土构件的位移承载力曲线^[25]

1.3 常用的钢管混凝土组合结构脱空检测方法

目前国内外关于钢管混凝土组合结构脱空损伤的无损检测方法研究并不多,常用检测方法分为有损检测和无损检测两大类,有损检测主要指钻芯取样法,无损检测方法包括人工敲击法、超声波法、光纤传感法、红外热像法、表面波法、X射线断层扫描法等等。上述无损检测方法中以超声波法最为常用,超声波法进行结构损伤检测的仪器设备及相关规程的制定也最为成熟。

1.3.1 人工敲击法

人工敲击法 (Hammering Method) 又称锤击法,是最粗略简单的检测方法。铁路的建设与维护中常用此方法初步检测铁轨的结构损伤,如图1.5所示。

人工敲击法通过检测者人工敲击钢管表面,根据听到的敲击声响应来判断钢管中的混凝土是否存在脱空的情况。根据一般经验,若敲击声沉而哑,则可判断

混凝土与钢管壁紧密粘结，反之若敲击声清脆，钢管壁内的混凝土可能存在脱空现象，需要做出标记，以便进行下一步检查。人工敲击法的准确性常常受到操作人员个人的熟练程度影响，操作时的人为因素过大，是粗略的检测方法，因此常常作为一种辅助的手段，结合其他定性定量检测方法一同操作。



a) 人工敲击铁轨判断损伤



b) 人工敲击列车部件判断损伤

图 1.5 人工敲击铁轨与列车识别损伤

1.3.2 超声波法

超声波法（Ultrasonic Method）是目前较为常用的钢管混凝土构件无损检测方法。由于超声波在不同的介质的界面处的传播方向和路径会发生改变，超声波的传播经过钢-混凝土界面脱空损伤或混凝土内部孔洞时也会发生改变，同时波的能量会在缺陷界面处发生衰减，继而引起频率、振幅、声时的变化。利用超声波信号的这种特性，可以对钢管混凝土构件是否存在损伤进行检测。在实际工程中，采用超声波信号的特性对钢管混凝土进行损伤检测的方法主要有：波形识别法、首波声时法、首波频率法^[26-28]。钢管混凝土界面密实时，超声波纵波的传播路径沿径向，由发射换能器经过管内的混凝土传播至接收换能器。而存在脱空损伤时，截面中超声波的传播路径有三种：a) 在钢管壁内绕过脱空损伤区域后传播至接收换能器；b) 经过脱空损伤区域的空气层，直接传播至混凝土，沿着发射换能器与接收换能器之间直线的方向传播；c) 从发射换能器出发，沿着外侧的钢管壁传播至接收换能器，如图1.6所示^[29]。

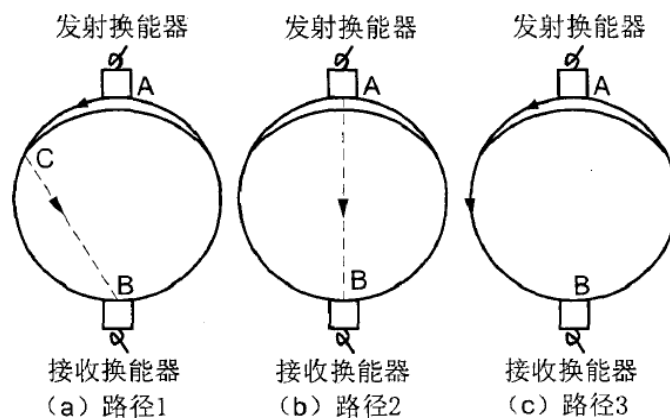


图 1.6 脱空截面超声波传播路径^[29]

2004年至2005年,刘永前等^[30]与潘卫育等^[31]相继提出了脱空量计算的简化公式,假定收发换能器的连线即为脱空量最大处,但误差随着脱空量的增大而增大,因此仅能作为参考。2006年,李天降等^[31]提出了钢管混凝土脱空损伤的定性判断原则。同年,周先雁等^[30]利用超声法的首播声时法对钢管混凝土中的混凝土质量进行了检测与评价。2010年,史新伟等^[33]提出了基于声时的脱空损伤量化计算公式,但测试方法复杂,人为因素影响过大。2012年,杨建江等^[34]利用超声法对方钢管混凝土的内部缺陷进行了检测,证实此方法同样适用于方形界面的钢管混凝土结构。

超声波法无损检测具有穿透力强、灵敏度高、可以检测金属与非金属以及复合材料等多种结构的损伤和设备轻便无害等优点,但对于形状复杂,表面粗糙的小尺寸构件,超声法测试难以操作;对于内部材料非致密,非均匀的结构,超声法的信噪比较差;用超声法进行结构损伤的定性及定量测量要求操作人员的经验丰富;超声测试需要表面耦合剂等,因此超声法的应用具有一定的局限性。

1.3.3 光纤光栅法

光纤光栅法(Fiber Grating Method)是利用光纤的光敏性特征进行损伤检测的方法。其工作原理是,光纤光栅使光纤区的折射率在一定的范围内变化形成小的周期调制,纤芯内入射光也会发生折射率的周期性变化,纤芯中的入射光相干图形将形成永久空间的相位光栅,相当于一个窄宽带的滤波器。纤芯的折射率或者是光纤的周期性会随着外界环境中的应力应变、温度等物理量变化而变化,改变了反射光的波长,据波长的变化可以获得目标物理量的变化情况。

光纤光栅可以分成两大类:均匀周期光栅和非均匀周期光栅,其中,均匀周期光纤光栅分成布拉格光栅(短周期光栅或反射光栅)和透射光栅(长周期光栅),非均匀周期光纤光栅分成相移光栅和啁啾光栅,如图1.7所示^[35,36]。布拉格光栅因其体积小质量轻的优点常被用于复合材料的损伤监测。光纤光栅法与传统的电检测手段相比,可以进行准分布式测量和点测量,适用于需要长时间监测的结构,在土木工程领域尤其是桥梁检测领域获得了广泛的关注度。当光纤光栅传感器应用与钢管混凝土结构时,一旦混凝土与钢管发生界面脱空,预埋其中的光纤传感器受到混凝土的牵动,发生光纤微弯,造成能量传输的损耗。2004年,丁睿等^[37]通过模型试验验证了分布式光纤光栅传感器对钢管混凝土界面脱空检测的可行性。2005年,丁睿等^[38,39]首次在巫山长江大桥的脱空检测和中使用分布式光纤传感系统,检测出了脱空的区域并对其进行了定量分析。2017年,田长彬等^[40]研发了适用于桥梁钢管混凝土的光纤光栅传感器。

对于钢管混凝土界面脱空的损伤检测来说,该方法具有受环境影响小,耐腐蚀,抗电磁干扰、可以对脱空损伤状态进行定性定量分析、长期监测工作量小,

并且能随时追踪钢管内的混凝土的状态和损伤的最新变化，利于及时发现安全隐患、体积小，适用于狭窄空间等优点。但需在结构中预先埋置传感器，且光纤造价昂贵、容易被破坏，所以需要在灌注混凝土时加以保护措施。

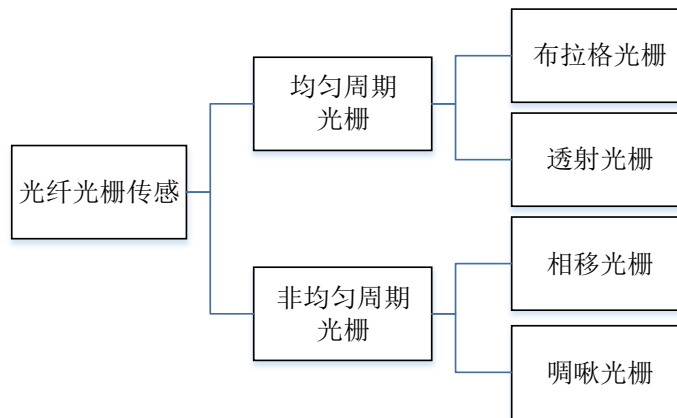


图 1.7 光纤光栅传感器的分类^[35,36]

1.3.4 红外热像法

红外热成像法（Infrared Thermography Method）兴起于上世纪90年代，在航空航天、电力、石油化工、建筑、汽车等领域应用广泛。红外热成像技术以热波理论和红外辐射普朗克定律为理论基础。运用红外热像仪探测物体连续辐射出的红外线能量，根据物体表面温度分布场的特征生成热成像图，直观地描述被测物体表面或内部存在损伤的情况的无损检测技术。被测物体的温度越高，其红外能量的辐射率越大。用红外热成像法进行损伤检测时，加热处理构件后，通过红外热像测试仪对被测表面进行红外摄像，如图1.8所示，直观地反映构件表面的温度场分布，根据缺陷的隔热性能或导热性能的差异判断是否存在损伤缺陷。由于此方法是非接触式的无损检测方法，不会对被测结构产生损坏，且对不同的温度场能够进行广视域的快速扫测与遥感检测，可以作为辅助手段很好地补充与目前已有的无损检测技术。



图 1.8 红外热像仪摄像捕捉温度场

红外热成像法检测钢-混凝土界面脱空损伤的机理是：由于钢-混凝土脱空界面存在隔热性能好、导热系数要远小于密实界面的空气层，通过外部热源对钢板进行升温时，钢-混凝土界面脱空处的热能由钢板经过空气层然后再传给混凝土，界面脱空处的热量较界面密实处的热量更为聚集；利用红外热成像仪可以敏感地捕捉物体表面的温度分布情况，由于缺陷边缘表面投影位置处温度梯度值最大，故等温线最密集的部分即为脱空损伤的边缘，从而推测出脱空损伤的位置与程度。2004年，黄沛等^[41]利用红外热像技术检测混凝土的粘钢加固法中钢板与混凝土的脱粘情况，准确确定了损伤的位置、形状和大小，并得到了较高的检测精度。2016年，胡爽^[42]成功地利用红外热成像技术对钢管混凝土的密实度及空鼓缺陷进行检测与识别。

红外热成像探伤技术适用于大面积普查与远距离非接触式检测，具有检测结果准确可靠、检测速度快并且操作安全等优点。该方法适用大面积的成像检测，无法提供准确的定量损伤信息。

1.3.5 冲击回波法

冲击回波法（Impact Echo Method，简称IE法）是诞生于上世纪80年代的基于应力波理论的无损检测方法^[43,44]。冲击回波法的基本原理是利用钢球或小锤轻敲被测表面带来的短时的机械冲击产生低频的应力波，应力波在结构内部传播，行至缺陷表面或构件底面处发生反射，同侧的构件表面也将接收到反射回来的应力波信息，应力波在构件表面与内部缺陷表面或构件表面底部边界之间的来回反射产生瞬态共振，通过在振幅谱中识别出共振频率的方法，确定构件内部缺陷的深度或构件的厚度。其损伤检测的原理如图1.9所示。

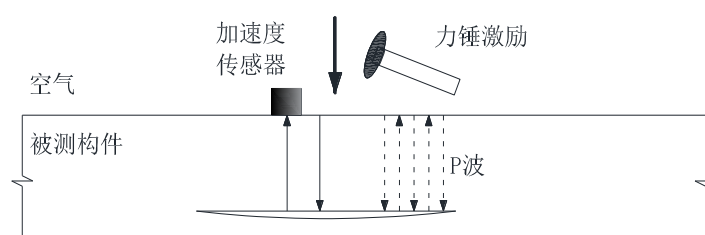


图 1.9 冲击回波法检测原理

传统的单点式冲击回波法经过不断地发展和完善，衍生出扫描式的冲击回波法，目前已经成功应用于大型预制板预应力管道灌浆效果的检测，大大提高了检测效率。2006年，周先雁等^[32]用冲击回波法与超声波法分别进行了钢管混凝土组合结构的脱空研究，证实了冲击回波法进行钢管混凝土组合结构损伤检测的可行性。2009年，张东方等^[45]通过冲击回波法的反射应力波波形及频率特征检测了钢管混凝土拱桥的脱空等混凝土质量缺陷。2016年，杨金^[46]利用希尔伯特-黄变换的信号处理手段对冲击回波法测钢管混凝土组合结构的脱粘信号进行提取分析，

有效检测出了脱空损伤及其大小。

冲击回波法探伤具有设备轻便、操作简便、测试深度范围大和受高频杂波干扰少等优点，但其测试效率不高，对于复杂的内部缺陷其反射波形的特征还有待进一步的研究与完善。

1.3.6 其他方法

1.表面波法

结构在脉冲激励下固体内会产生纵波与横波，二者在固体的自由表面处会形成沿介质表面传播的表面波（Surface Waves）。2003年，王靖涛等^[47]运用表面波的绕射定理研究了表面波在经过钢管混凝土组合结构脱空损伤时透射脉冲频谱的变化，其测点布置示意图如图1.10所示，通过小波分析进行了损伤的定量研究，并通过模型验证了理论方法的正确性。

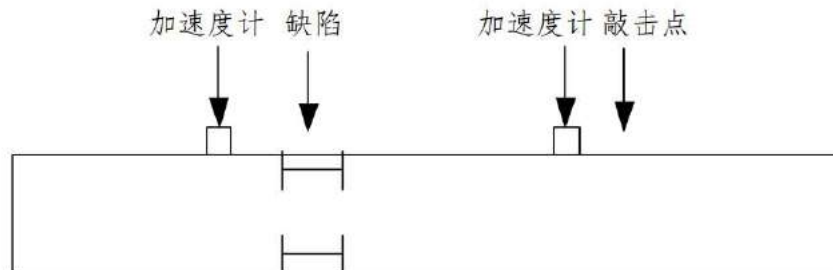


图 1.10 表面波绕射法示意图^[47]

2.基于结构振动信号的检测方法

由于表面波在介质间的自由表面传播，当介质连接紧密时，振动信号呈高频特征，当出现脱空时，振动信号出现低频特征，利用这一原理可检测构件的局部脱空损伤。2008年，陈振宇^[48]利用玻璃幕墙的瞬态脉冲动力响应进行胶损伤的研究。2010年，王骑等^[49]通过瞬态激励方法进行了基于加速度传感器信号的混凝土路面板脱空的试验研究。2013年至2014年，陈良田^[50]和赵海亮^[51]利用分布式加速度传感器阵列进行了基于结构动力特性的钢-混凝土界面局部瞬态激励脱空检测试验。

1.4 基于麦克风的无损检测方法

空气耦合传感器（Air Coupled Sensor）是用于接收从固体材料发射或泄漏到空气中的声波信息的一种非接触式的传感器。利用空气耦合传感器的无损检测方法兴起于上世纪70年代，空气耦合传感技术最初被用来检测木材和纸张的生产质量，在木制品、纸制品和航空航天复合材料的无损检测中得到了广泛的应用^[52]。近年来，利用空气耦合传感器进行土木工程材料无损检测的新方法逐渐进入了人们的视野，空气耦合传感器在不同材料领域的无损检测中的应用进展如表1.2所

示。

表 1.2 空气耦合传感器在无损检测中的研究进展

年份	作者	应用材料	测试内容
1993	Brodeur P H等 ^[53]	纸张	纸张中声波的散射与衰减
1995	Stor-Pellinen J等 ^[54]	纸张	纸张的粗糙度测试
2002	Zhu J等 ^[55]	混凝土	混凝土的表面波检测
2004	Imielinska等 ^[56]	复合材料 分层	测光纤布设层与编织复合材料的冲击损伤点
2004	Purnell P等 ^[57]	混凝土	混凝土中电容膜静电换能器的应用和脉冲压缩信号的增强的研究
2005	Berriman J等 ^[58]	混凝土	空气耦合超声波法测湿度与聚合修正系数
2007	Siddiolo A M等 ^[59]	木材	木质绘画板的测试
2014	Sanabria S J等 ^[60]	木材	通过空气耦合超声波在梁中的折射和阻尼测木材的分层
2014	Thiele S等 ^[61]	铝合金	利用非线性瑞雷波的空气耦合特性测材料的非线性参数
2016	Kim G等 ^[62]	混凝土	通过瑞雷波传播中第二谐波的产生测混凝土的碳化损伤

通常空气耦合传感器的频率响应范围根据被测材料的不同在50kHz至1MHz之间。对于混凝土的无损检测而言，100kHz以下的频率响应最为合适。无损检测技术中的空气耦合传感器可以概括为两大类：压电式超声波换能器和基于静电和电容原理的换能器如电容式麦克风，如图1.11和图1.12所示。前者对固体表面的平整度要求较高，且由于其前表面需配置感兴趣频率对应的四分之一波长厚度的匹配层材料，故受限而用于带宽较窄的测试^[63]。后者则有更宽的带宽适用范围和更高的灵敏度。麦克风的频率响应范围通常在0~25kHz之间，可以作为空气耦合传感器用来检测混凝土泄露到空气中的低频声波。同时，空气耦合传感技术对混凝土表面的粗糙程度并不敏感，因此也可以用于泄露波的能量衰减测量，以此推测损伤信息^[64]。2012年，韩西等^[65]基于声振原理，利用声级计研究瞬态冲击下钢管混凝土的脱空检测，根据声振信号的时域与频域信号的特征对损伤进行定性研究。

近年来，研究学者将麦克风传声器作为空气耦合传感器引入诸多无损检测的原理与方法中，将接触式无损检测技术创新发展至非接触式领域，形成了高效、简洁的无损检测新方法。目前常用的基于麦克风的无损检测原理如下：

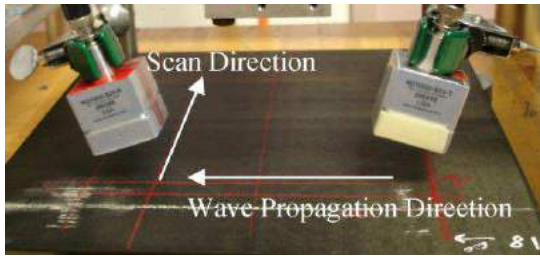


图 1.11 空气耦合超声波换能器^[66]



图 1.12 电容式麦克风

1.4.1 泄露面波衰减原理检测混凝土裂缝分布

点激励下，混凝土半空间体中会产生向四周传播的表面波和体波，包括瑞雷波，纵波和剪切波等，由于表面波在混凝土表面的平面外响应大，产生的响应信号易被传感器拾取，且其波速和能量信息能反映混凝土材料的物理特性，可作为被测量物理量用于混凝土表面的裂缝分布检测试验。

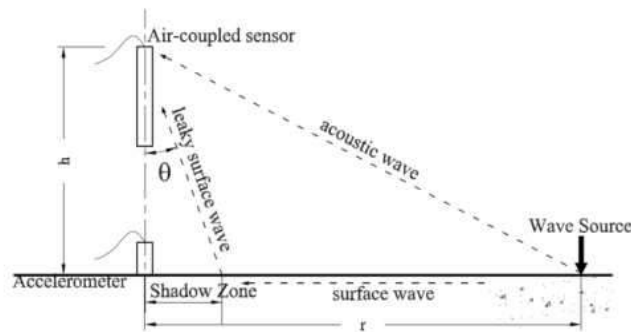


图 1.13 麦克风测点激励下混凝土泄露表面波实验示意^[55]

2002年，Zhu J等^[55]进行了利用空气耦合传感器（麦克风）测量任意点激励下混凝土泄露表面波（Leaky Surface Waves）信号的可行性探究，如图1.13所示，通过实验分析得出结论：在厚墙中施加点式冲击激励，麦克风信号呈现出瑞雷波（Rayleigh Waves）的特性，在薄板实验中，信号呈现出兰姆波的特性（Lamb Waves），从而窥探出麦克风传感器测量混凝土损伤的巨大潜力。2004年，Zhu J等^[67,68]进行了流体-固体弹性半空间内，任意一点激励下的泄露瑞雷波的解析解的研究，为基于麦克风的泄露表面波无损检测原理提供了理论基础。2005年，Zhu J等^[69]进行了基于麦克风的混凝土板裂缝成像实验，结果表明表面波的传播经过裂缝时，声波的能量衰减特性与波速衰减特性相比更为敏感，其衰减程度受裂缝与波的传播方向夹角有一定关系。2006年，Zhu J等^[70]证实可以通过麦克风传感器替代传统的加速度传感器进行面波频谱分析法（Spectral Analysis of Surface Waves, SASW法）和多通道面波分析法（Multi-channel Analysis of Surface Waves, MASW法）的分析，得出面波的频散特性，从而进行混凝土板的损伤成像分析。同年，Ryden N^[71]对人行横道路面成功地进行了基于麦克风的通道面波分析法

实验测量泄露表面波的频散曲线。2009年, Ryden N^[72]设计了麦克风阵列手推车和自动激励系统, 应用于人行路面移动测试, 同样成功地测出了面波频散曲线。2013年, Lu YF等^[73]开发了基于麦克风阵列的移动声学下表面感应系统(MASS)进行公路损伤的快速评估。

1.4.2 冲击回波原理检测混凝土分层损伤

冲击回波法原理是, 通过测量结构在敲击点激励下应力波的反射共振频率, 反映结构的厚度或分层损伤的深度。传统的冲击回波法通过接触式的加速度传感器测量结构表面响应, 通过信号的频谱分析拾取共振频率点。

2005年, Gibson A等^[74]探究了冲击回波法(IE法)原理公式中的经验修正系数的物理基础, 并提出了基于导波理论的新方法: 板的冲击回波共振频率与S1兰姆模态中群速度为零点处的频率相对应。2006年, Zhu J等^[75]首次实现了基于麦克风的冲击回波法混凝土损伤板实验, 如图1.14所示, 并证明了麦克风可以替代传统冲击回波试验中的接触式加速度传感器, 准确地识别出分层损伤和板的厚度。2007年, Zhu J等^[76]设计了麦克风隔音装置并成功进行了冲击回波法的混凝土板损伤的成像实验。2009年, Popovics J S等^[77]进行了基于麦克风冲击回波法的桥面板探伤试验。2011年, Dai XW等^[78]设计出椭球形的信号反射放大装置用于麦克风的冲击回波法。2012年, Shin SW等^[79]发现低成本的动力学麦克风可以替代原有的电容式预极化麦克风进行冲击回波法实验, 且不需要隔音装置。同年Zhang Y等^[80]和Tsai YT等^[81]等提出了简单的基于多传感器测量的数据整合策略, 提高了冲击回波法的测量效率, 并对冲击回波法的兰姆波模态中群速度为零点的频率进行了数值模拟和试验。同年, Algernon D等^[82]提出了移动麦克风阵列冲击回波法的信号处理算法, 使得实验操作在没有物理隔音装置的情况下仍然保持良好的信噪比, 提高了该方法的效率, 为大型混凝土结构的冲击回波法损伤成像检测奠定了技术基础。2015年, Groschup R等^[83]提出利用新兴的声学传感器: 微型机电系统(Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS)麦克风阵列进行冲击回波法测试, 提供了更加快速可靠的无损检测手段。2016年, Bjurström H等^[84]利用加速度传感器和麦克风, 通过波的负相速度检测板的厚度模态, 提高了冲击回波法的信噪比。

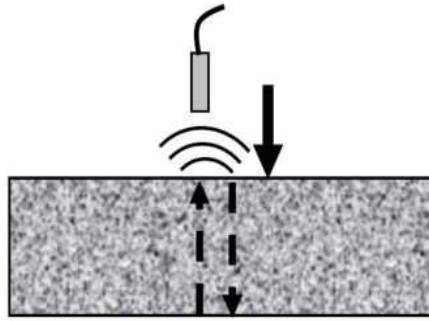


图 1.14 麦克风冲击回波法示意图^[75]

1.4.3 面波能量透射原理检测裂缝深度

面波透射法的原理是，点激励下表面波传播至裂缝处时，能量发生衰减，随着裂缝深度的不同，能量衰减的程度也不同，通过测量表面波传播方向上裂缝前后的波能量透射率指标，推测出混凝土表面裂缝的深度。

2009年，Kee SH等^[85]用麦克风替代了传统的接触式加速度传感器进行了基于面波透射系数的混凝土表面裂缝深度测试，如图1.15所示，克服了传统方法中的裂缝尖端近场散射现象和加速度传感器在混凝土表面的耦合困难等不利因素，提高了测试速度和试验准确性。2011年，Kee SH等^[86~88]利用基于麦克风传感器的面波透射法解决了混凝土表面半闭合状态的裂缝深度检测问题；探究了传感器的布设对麦克风面波透射系数法混凝土裂缝深度测试效率的影响；研究了分布裂缝场中，相邻裂缝对面波传播产生的影响。

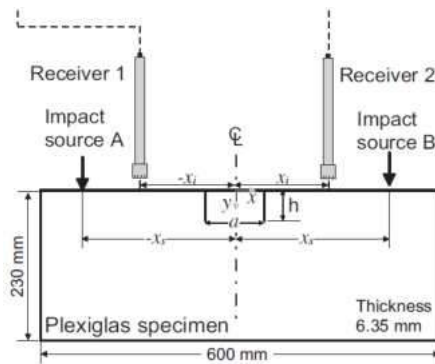


图 1.15 麦克风面波透射法示意图^[85]

1.4.4 冲击共振原理检测混凝土分层缺陷

冲击共振测试（Impact Resonance Test）的原理是基于结构收到脉冲激励时，内部声波的传播遇到缺陷或材料界面时发生连续的反射，引起结构的共振的现象，其冲击共振频率的大小与结构的几何特征及材料特性息息相关，由冲击共振频率的大小及频谱特征推测构件的材料与缺陷特征。冲击共振法通常用于非线性冲击共振声谱法与冲击共振光谱法，1997年，Lee KM等^[89]通过冲击共振测试测量混凝

土早期的杨氏模量。2006年，Kweon G等^[90]接着利用冲击共振法进行了对沥青混凝土的复模量的测量。2001年，Heyliger P等^[91]利用冲击共振法进行了各向异性的平行六面体的无约束自由振动测试，计算了不同材料试件的弹性刚度张量。2004年，潘秀娟等^[92]利用基于数字声级计的冲击共振法对采摘后的梨进行了果实硬度系数的测试，探究其采摘后的质地变化。2011年，Leśnicki KJ等^[93]通过冲击共振光谱法测试识别了由于碱硅反应造成混凝土的微裂缝和滑移损伤。2016年，陈军等^[94]利用加速度传感器与力锤对混凝土受压构件进行非线性冲击共振试验，检测混凝土的内部受压损伤。

2006年，Zhu J等^[75]进行混凝土板麦克风冲击回波法探伤实验时发现，对于混凝土内部的浅层损伤，当其深度小到一定程度时，测得的麦克风信号由低频的弯曲共振模态主导，称之为自然弯曲模态频率，这一现象可被低频敏感的电容式麦克风测得。2012年，Oh T等^[95]提出了固体内，近表面矩形分层损伤上部材料的自然弯曲振动频率的半分析方法，将损伤上部材料看成一块四周约束状态的板构件，结合有限元模拟方法分析其自振频率，得出了一定损伤尺寸与损伤深度下，浅层损伤的自然弯曲振动频率公式。同年，Zhang G等^[96]设计了冲击信号下，利用降噪后的麦克风信号进行混凝土桥面板上层钢筋分层损伤的自动识别系统。2013年，Oh T等^[97]通过麦克风冲击共振法研究了不同形状的浅层分层损伤的共振频谱特性和不同敲击位置对信号频谱图的影响，从而实现了对损伤位置与尺寸的预估。基于麦克风的冲击共振测试的操作方法与冲击回波法类似，如图1.16所示。

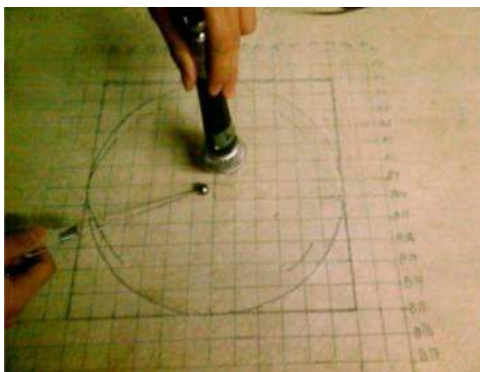


图 1.16 混凝土板的麦克风冲击共振法示意图^[97]

2014年，Oh T等^[98]基于麦克风的冲击共振法和冲击回波法原理设计了桥面板与人行道的麦克风阵列浅层损伤扫描成像试验系统，并取得了较好的适用性和精确度。2015年，Oh T等^[99]提出了多维度的麦克风阵列冲击共振法体系，将频域和空间域的测点数据堆叠起来，并设置一定的阈值区分浅层损伤的自然弯曲振动模态，优化了桥面板浅层损伤的成像扫描系统。2017年，Sun H等^[100]利用拖拽球链的方式对设置矩形脱空损伤的混凝土构件进行基于麦克风频谱信号的损伤识别。

1.5 本文研究内容

我国存在大量钢管混凝土拱桥现役结构，随着服役时间越来越长，其结构损伤积累越来越多，关键部位的结构损伤若不进行及时的检测识别，将造成严重的危害和潜在安全威胁。钢管壁与混凝土的界面脱空损伤是钢管混凝土的常见损伤形式。当前常用于检测脱空损伤的无损检测技术如超声法、红外热成像法等仍然存在各种局限性，缺乏快速、高效的非接触式无损检测方法，本文基于上述背景，提出了利用基于麦克风的冲击共振测试对钢-混凝土界面的脱空损伤进行识别的检测方法。

本文受2012年，Oh T等^[95]对混凝土板浅层损伤麦克风冲击共振法研究的启发，通过麦克风冲击共振法解决钢管混凝土脱空损伤的无损识别问题。本文以四周约束板壳的振动理论为研究基础，提出了适合钢-混凝土组合板构件局部脱空损伤的自振频率公式，以声波的传播理论、声振互易性原理为基础，提出了基于麦克风的冲击共振方法的新思路。针对不同面积、形状的脱空损伤工况分别设计了一块钢-混凝土组合板构件与一块钢管混凝土构件，以力锤激励，麦克风置于激励点上空拾振。对拾取的声压信号进行频谱分析，验证了利用麦克风冲击共振法识别钢-混凝土界面脱空损伤的可行性。并将此方法与其他无损检测技术进行试验对比，分析了各方法的优缺点。为麦克风冲击共振法的深入研究与发展奠定了理论与试验基础。

全文共分五章：

第一章大致介绍了常见的钢管混凝土的无损检测技术、声波的基本理论与目前基于麦克风的无损检测新技术的原理与研究进展，并提出了本文的研究意义及研究思路。

第二章介绍了本文的理论基础，即振声互易性原理、声模态理论与四周约束板的振动理论的内容。

第三章介绍了钢-混凝土界面脱空组合板和脱空钢管混凝土构件的麦克风冲击共振法试探性测试、麦克风声模态测试、基于不同损伤工况的麦克风冲击共振测试及麦克风阵列损伤成像测试的试验过程、信号处理及结果分析。

第四章基于ABAQUS有限元分析的软件工具，通过显式动力学分析模拟了钢-混凝土组合构件与钢管混凝土构件的局部脱空损伤处与不存在损伤的部分在点脉冲激励下各自上空的声压分布即上空一点随时间变化的声压响应。分析了麦克风冲击共振法识别脱空损伤的声波理论依据。对不同的损伤工况进行局部脱空区域的振动模态分析，并将其自振频率与理论解析解及麦克风冲击共振试验结果进行对比验证。

第五章对前述钢-混凝土组合板构件及钢管混凝土构件分别进行红外热像法

探伤测试、混凝土超声探伤测试、钢结构超声探伤测试及雷达法测试，将其测试结果与麦克风冲击共振法测试结果进行对比，分析各方法进行损伤成像测试的优缺点及麦克风冲击共振法的优越性。

总结与展望。对全文进行总结分析，并提出研究存在的不足，对日后的研究提出了新的展望。

第2章 声模态理论及四周约束板壳振动理论

2.1 声学基础与声模态分析

2.1.1 声波及声压的概念

质点的振动产生波，声波是各种弹性介质中的机械波，存在声波的空间称为声场。设想由于某种原因（如一个物体的振动），在弹性介质（如空气）的局部区域产生扰动，此区域的介质质点A离开平衡位置开始运动，质点A的运动必然推动相邻介质质点B，亦即压缩了这部分的相邻介质，如图2.1（a）所示。由于介质的弹性作用，这部分介质被压缩时将产生一个反抗力，反过来作用于介质质点A，使它向原来的平衡位置运动，质点A的惯性力使得其回到平衡位置后继续压缩另一侧的相邻介质质点，如此往复。由于介质的弹性和惯性作用，最初被扰动的介质质点在平衡位置附近进行往复振动，相邻的介质质点也相继振动起来，这种介质质点的机械振动由近及远的传播称为声振动的传播，即声波^[101]。

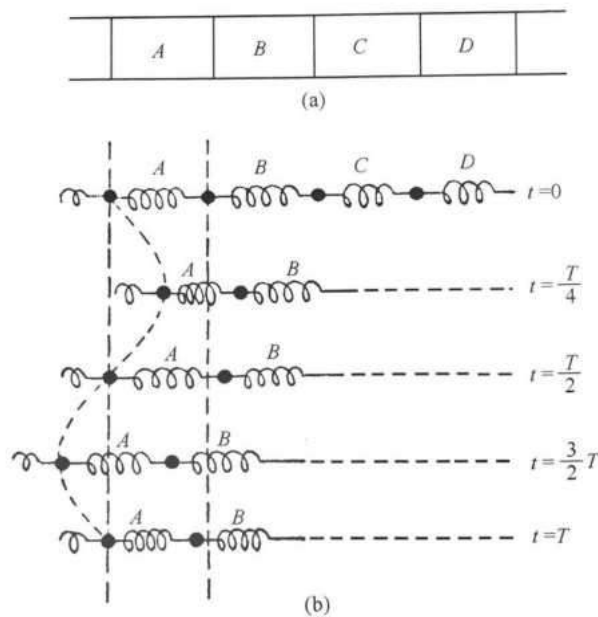


图 2.1 质量-弹簧振子耦合模型^[101]

弹性介质里质点振动的传播过程类似于多个振子相互耦合形成的质量-弹簧-质量-弹簧……的链形系统中，如图2.1（b）所示。弹性介质可视为由无限多个连续分布的质点组成，各质点在宏观上足够小，各部分的物理特性可以视作一个个均匀的小体积元，在微观上包含大量数目的分子，这样的体积元既具有质量又具有弹性。

理想流体媒质的弹性主要体现在体积膨胀或收缩时出现的恢复力，不会产生

切向恢复力。因此，理想流体介质中声振动的传播方向与质点的运动方向一致，本文的讨论范围为纵声波。

由于声波的扰动，介质的压强 $p'(\mathbf{r},t)$ 会随时间和空间变化。若把没有声波时的静压强（大气压、静水压等）记作 p_0 ，则声波扰动后的压强与静压强的差 $p(\mathbf{r},t) = p'(\mathbf{r},t) - p_0$ 称为声压，也称为逾量压强和逾压。声压的大小反映了声波的强弱，声压的单位为Pa（帕）。

在理想流体介质中，只发生体积形变，即纯粹的压缩膨胀形变，介质的弹性可用单一的体弹性系数来表征，介质中只能传播纵波，且传播过程的特性只用声压就能充分描述。然而固体介质中除了体积形变外还存在切形变，即除了体弹性外还具有切变弹性。因此，固体中不仅能传播纵波，还能传播切变波，即横波。除此之外，在固体的自由表面会产生振幅随离表面深度而衰减的表面波。薄板中纵波与横波的反射叠加形成的特殊声场，薄板中的声波常称为兰姆波。如图2.2所示。由此可见固体中的声波传播比流体复杂得多。

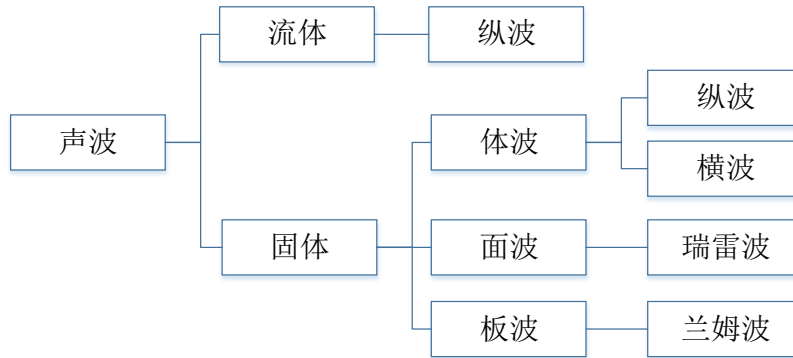


图 2.2 固体与流体中的声波

对于流-固半空间中的固体表面施加一点脉冲激励时，将在固体与流体中产生各种声波，如图2.3所示^[52]。

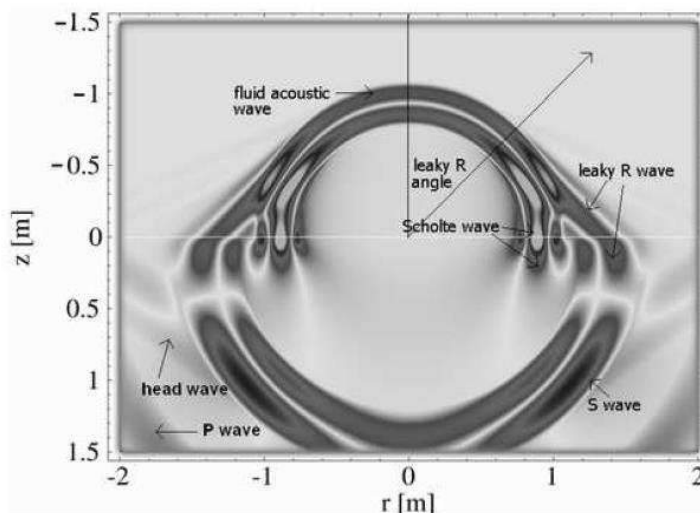


图 2.3 点脉冲激励下流-固半空间的声场快照图^[52]

由图2.3可见，点脉冲激励下，固体中产生了纵波（P wave）、横波（S wave）与首波（head wave）；固体与流体的交界面上产生了界面波（Scholte wave）；流体中产生了泄露的瑞雷波（leaky R wave）与直接声波（fluid acoustic wave）。由于表面波在流体-固体交界面的传播速度比直接声波在流体中的传播速度更快，因此泄露瑞雷波存在于半球形直接声波的外侧，在距离激励点较远处，泄露瑞雷波先于直接声波传播至流体中。并且由图可知，泄露瑞雷波不存在于激励点正上空附近，它存在与泄露瑞雷角（Leaky R angle）的范围之外。

对于一个有限大小的结构，声波传播到结构的边界（介质不均匀处）时，无法保持继续不变的传播，而是发生折射、反射、衍射和散射现象。其中最常见和最重要的是声波的反射现象，有限大小的结构中声波在其边界的反射现象导致结构中的声波在稳态条件下，仅在某些频率存在较大的响应，这些频率称为本征频率。响应在空间的分布仅能按一定形状存在，这种状态称为结构模态。

实际生活中有很大一部分的噪音来自于结构声波的辐射，结构表面的振动推动周围的流体运动，从而辐射声波。以理想化声源的辐射特性为基础，研究具体结构的声辐射特性。

2.1.2 线性系统的振声互易性原理

1873年，Rayleigh J等^[102]提出了线性系统的广义互易性原理，包含振动与振动的互易性、声与声的互易性和振动与声的互易性三部分内容。

1. 振动与振动的互易性

$$\left. \frac{x_j}{f_i} \right|_{f_j=0} = \left. \frac{x_i}{f_j} \right|_{f_i=0} \quad (2.1)$$

对结构的质点*i*施加力激励时，质点*j*处由于激励将产生位移响应，这一过程得到一个频率响应函数；对结构的质点*j*施加力激励时，质点*i*处由于激励将产生位移响应，这一过程同样得到一个频率响应函数，上述两者的频响函数相等。

2. 声与声的互易性

$$\left. \frac{p_j}{q_i} \right|_{q_j=0} = \left. \frac{p_i}{q_j} \right|_{q_i=0} \quad (2.2)$$

对结构的质点*i*施加体积声源的激励时，质点*j*处由于激励将产生声压响应，这一过程得到一个频率响应函数；对结构的质点*j*施加体积声源激励时，质点*i*处由于激励将产生声压响应，这一过程同样得到一个频率响应函数，上述两者的频响函数相等。

3. 振动与声的互易性

$$\left. \frac{p_j}{f_i} \right|_{\dot{q}_j=0} = - \left. \frac{x_i}{\dot{q}_j} \right|_{f_i=0} \quad (2.3)$$

进一步得到

$$\left. \frac{p_j}{f_i} \right|_{\dot{q}_j=0} = - \left. \frac{\dot{x}_i}{q_j} \right|_{f_i=0} \quad (2.4)$$

对结构的质点 i 施加力激励时, 质点 j 处由于激励将产生声压响应, 这一过程得到一个频率响应函数; 对结构的质点 j 施加体积声源激励时, 质点 i 处由于激励将产生速度响应, 这一过程同样得到一个频率响应函数, 上述两者的频响函数大小相同, 方向相反。

1995年, Wyckaert K等^[103]对振声互易性原理及其在声振耦合的模式试验中的应用作出了阐述。

结构在外力荷载激励与未耦合的声激励的共同作用下, 结构动力方程表示为:

$$\left[-\omega^2 M^s - i\omega C^s + K^s \right] \{x\} = \{f\} + \{l_p\} \quad (2.5)$$

其中 $\{l_p\} = \int_{S_b} p dS$, 为声腔中对交界面 S_b 作用的声压荷载。

结构在声激励与流固耦合界面结构的振动激励的共同作用下, 结构动力方程表示为:

$$\left[-\omega^2 M^f - i\omega C^f + K^f \right] \{p\} = \rho \{\dot{q}\} + \omega^2 \{l_f\} \quad (2.6)$$

其中 $\omega^2 \{l_f\} = \omega^2 \int_{S_b} \rho x_N dS$, 为声腔中交界面 S_b 的法向振动 x_N 产生的荷载。

由式 (2.5) 与式 (2.6) 可得声学-振动耦合系统的动力方程:

$$\begin{bmatrix} K^s & -K^c \\ 0 & K^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} - i\omega \begin{bmatrix} C^s & 0 \\ 0 & C^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M^s & 0 \\ -M^c & M^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ \rho \dot{q} \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

上式可整理为:

$$\begin{bmatrix} A_s & -K_c \\ -\omega^2 K_c^T & A^f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ \rho \dot{q} \end{Bmatrix} \quad (2.8)$$

其中

$$\begin{aligned} A_s &= K_s - j\omega C_s - \omega^2 M_s \\ A_f &= (K_f - j\omega C_f - \omega^2 M_f) / \rho \end{aligned} \quad (2.9)$$

由式 (2.8) 和式 (2.9) 可以推导得到两类频响函数矩阵:

$$\begin{aligned} \left. \frac{p}{f} \right|_{\dot{q}=0} &= \left(A_s \frac{(K_c^T)^{-1}}{\rho\omega^2} A_f - K_c \right)^{-1} \\ \left. \frac{\ddot{x}}{q} \right|_{f=0} &= \left(K_c^T - A_f \frac{(K_c)^{-1}}{\rho\omega^2} A_s \right)^{-1} \end{aligned} \quad (2.10)$$

对线性系统，矩阵 A_s ， A_f ， K_c 和 M_c 均为对称矩阵，由此可得振动与声的互易性原理，即式 (2.4)。

振动与声的互易性原理为基于声压响应的脉冲锤击法结构模态试验奠定了基础，然而，只有当声压传感器以及体积声源处于封闭的环境，并且满足线性系统的假设时，上述互易关系才成立。对于平板结构，测试环境通常是不封闭的，此时，体积声源发出的声功率只有一部分转化为板的振动，转化的比例系数为一固定的值 β 。以平板的声振耦合系统为例，以体积声源为圆心，画任意半径的圆球，平板在圆球表面的投影面积 s' ，与圆球表面积 S 的比值即为 β ， $\beta = s' / S$ ，与圆球所取的半径无关，如图2.4所示。

$$\left. \frac{p_j}{f_i} \right|_{\dot{q}_j=0} = - \left. \frac{\dot{x}_i}{\beta q_j} \right|_{f_i=0} \quad (2.11)$$

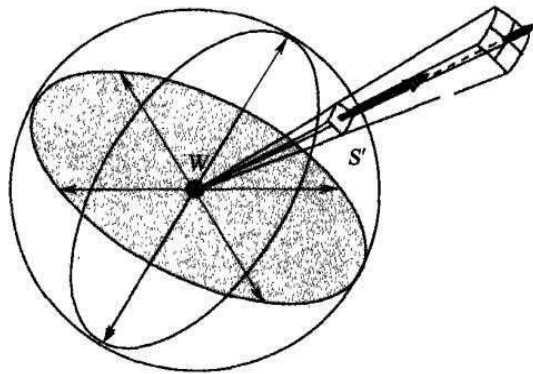


图 2.4 体积声源的声功率转化系数^[104]

β 越大，表示频响函数激励的能量越多，响应的信噪比越高，频响函数的相干性越好。实际操作中，声压测点距离被测表面宜尽可能的近，则 β 越大，能量传递效率越高。

2.1.3 声波方程

声波或声场的特性和规律可以通过介质中的声压 p ，质点速度 v 以及密度变化量 ρ 三个变化量中的任意一个来描述，三者均不是孤立变化的。

为了简化问题，对介质作以下理想化的假设^[101]：

(1) 介质为理想流体，即介质中不存在黏滞和热传导，声波传播时不会发生能量耗损；

(2) 声波尚未形成时，介质在宏观上是均匀、静止不动的，静态压强 P_0 与静态密度 ρ_0 均为常数；

(3) 介质因声波传播而引起的压缩与膨胀的过程是绝热的，介质相互毗邻的部分不会由于声波引起的温度差而产生热交换；

(4) 介质中传播的是小振幅声波，各声学量都是一级微量。

考虑一维情形，假定声波仅在一个方向运动（如 x 方向），在其他两个方向上声场是均匀的，声压仅是 x 的函数。作为流体介质，声压、质点速度密度变化量分别满足三个基本的物理定律^[101]：

(1) 牛顿第二定律：据此得出描述压力变化 p 与质点速度 v 关系的动力学方程：

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (2.12)$$

(2) 质量守恒定律：据此得出描述可压缩介质的密度变化 ρ' 与质点速度 v 关系的连续性方程：

$$-\rho_0 \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \rho'}{\partial t} \quad (2.13)$$

(3) 物态方程：描述介质中压强的变化 p 与密度变化 ρ' 关系：

$$p = c_0^2 \rho' \quad (2.14)$$

其中 c_0 代表声波在介质中的传播速度，即声速。 ρ_0 代表介质的初始密度。对于理想气体中的小振幅声波，利用其物态方程 $PV^\gamma = \text{const}$ ，可求得其声速 $c_0^2 = \gamma P_0 / \rho_0$ 。其中 γ 为气体的定压与定容热容量之比，对于空气， $\gamma=1.402$ 。对于液体，可以通过定义介质的压缩系数 $\beta = -(dV/V)/dP$ ，或体压缩模量 $K = 1/\beta$ （也称体弹性模量）来描述其物态方程，此时 $c_0^2 = 1/\beta\rho_0 = K/\rho_0$ 。

有了公式 (2.12)，(2.13) 和 (2.14) 三个介质基本方程，消去 p ， v ， ρ' 中的任意两个量，即可得到用声压，质点速度，或密度变化量单独表示的一维声波方程。比如，用声压表示的一维声波方程：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.15)$$

方程 (2.15) 忽略了二级以上微量，故称为一维线性声波方程。

上述方程是基于声波仅沿着 x 方向传播的假定得出的，然而实际情况中声波

不会仅在一个方向传播，把一维声波方程推广至三维声波方程可得：

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.16)$$

其中 ∇^2 为拉普拉斯运算符，在直角坐标系中 $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 。

2.1.4 声学模态分析

脉动球源是表面作均匀涨缩运动的一种球面声源，球源表面上各点沿着径向作同振幅、同相位的振动，如图2.5所示。对它的分析有一定的指导意义，半径很小的脉动球源可以用来模拟点声源。任何复杂的面声源均可以视作无限多个点声源的集合^[101]。

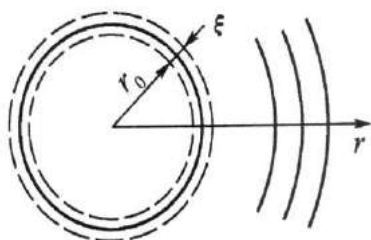


图 2.5 脉动球源辐射声波

因此，小脉动球源是最基本的声源，球面坐标下其一般的数学表达为：

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.17)$$

其中 r 为径向坐标，待定常数 A 一般为复数，而 A/r 的绝对值即为声压幅值。已知声压，由动力学方程式 (2.12) 可得其质点速度的一般表达：

$$v_r = -\frac{1}{j\omega\rho_0} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{A}{r\rho_0 c_0} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.18)$$

其中 v_r 为沿径向 r 处质点的速度。

设球源表面振动速度为

$$u = u_a e^{j(\omega t - kr_0)} \quad (2.19)$$

其中 u_a 为振速的幅值， kr_0 是为了计算方便引入的一个初相位。

球源表面处介质质点的速度应等于球源表面的振速，即满足边界条件：

$$v_r |_{r=r_0} = u \quad (2.20)$$

将式 (2.18) 代入上式，可求得

$$A = |A| e^{j\theta} \quad (2.21)$$

其中

$$|A| = \frac{\rho_0 c_0 k r_0^2 u_a}{\sqrt{1 + (k r_0)^2}}, \quad \theta = \arctan\left(\frac{1}{k r_0}\right) \quad (2.22)$$

将A代入式(2.17)即可求得脉动球源所辐射的声压为:

$$p = p_a e^{j(\omega t - kr + \theta)} \quad (2.23)$$

其中声压振幅为 $p_a = |A|/r$, 将A的值代入式(2.18), 即可求得球源辐射声场的质点速度:

$$v_r = v_{ra} e^{j(\omega t - kr + \theta)}$$

其中

$$v_{ra} = p_a \frac{\sqrt{1 + (k r_0)^2}}{\rho_0 c_0 k r}, \quad \theta' = \arctan\left(\frac{-1}{k r_0}\right) \quad (2.25)$$

v_{ra} 为径向质点速度振幅。

由式(2.22), (2.23)可知, 声压的幅值大小不仅与球源振幅有关, 还与声波的频率, 球源半径相关。

当 $k r_0 \rightarrow 0$ 时, $\theta \approx \pi/2$, 于是(2.23)成为:

$$p \approx j \frac{k \rho_0 c_0}{4\pi r} Q_0 e^{j(\omega t - kr)} \quad (2.26)$$

其中 $Q_0 = 4\pi r_0^2 u_a$, 为小脉动球源的体积速度幅值, 通常称为点源强度。

当声源装在一个障板上时, 由于振动源前后辐射的声波相位相反, 其中障板将相位相反的声波反射至前方, 与原本向前传播的声波相互叠加, 为当障板无限大时, 声波辐射为原来的两倍。对于一个振动结构上的小振动源, 其振动元面积足够小, 因此可视作无限大障板上的振动单元。其振动速度和面积分别为 v_n 和 dS , 其体积速度为 $v_n dS$, 设在该振动结构上的法向振动速度分布为 $v_n(\mathbf{r}_s)$, 由线性叠加原理, 该振动结构在空间所产生的声压为^[101]:

$$p(\mathbf{r}, t) = \frac{j\omega\rho_0 e^{j\omega t}}{2\pi} \int_s \frac{v_n(\mathbf{r}_s)}{R} e^{-jkR} dS \quad (2.27)$$

式(2.27)即为瑞利积分, 其中 \mathbf{r} 是空间观察点, \mathbf{r}_s 是结构表面上振动元的位置, R 是上述两点间的距离。

有了上述理论作为基础, 下面进行声模态理论的推导:

任意振动结构均可等效为各质点处点声源的集合, 各振动元均可视为无限大的障板上的点声源。由式(2.27)可得, 平板结构振动时, 板内 i 点处的声压为:

$$p_i(\omega) = \int_s \frac{j\omega\rho_0 v_n}{2\pi R} e^{-jkR} dS \quad (2.28)$$

其中, R 为平板上各质点至声压测点的距离, v_n 为板内各点的振动速度, p_i 为

质点 i 处的声压。则声压的传递函数为：

$$H_{ij}^p(\omega) = \frac{p_i(\omega)}{F_j(\omega)} = \frac{\int_s \frac{j\omega\rho_0 v_n e^{-jkR}}{2\pi R} dS}{F_j(\omega)} = \int_s \frac{j\omega\rho_0 e^{-jkR}}{2\pi R} H_{nj}^v(\omega) dS \quad (2.29)$$

其中 $H_{nj}^v(\omega)$ 为在 j 点进行激励，板内各点振动速度的频响函数，有

$$H_{nj}^v(\omega) = j\omega H_{nj}(\omega) \quad (2.30)$$

故

$$H_{ij}^p(\omega) = \int_s \frac{-\omega^2 \rho_0 e^{-jkR}}{2\pi R} \sum_{r=1}^n \frac{\psi_{jr} \psi_{nr}}{m_r [(\omega_r^2 - \omega^2) + 2j\xi_r \omega_r \omega]} dS \quad (2.31)$$

其中声压的频响函数为各阶模态的分量之和，当测点的水平位置与高度保持不变时，频响函数保持不变。在工程近似的应用中，板壳结构的阻尼可认为比较小，各模态之间相互耦合作用小，可以解耦。在第 r 阶模态时，忽略其他阶模态在该频率处的影响。且式 (2.31) 中只对板内所有质点 n 进行积分，与 ψ_{jr} 无关，因此有：

$$\left[H_{ij}^p(\omega) \right]_r = \frac{\psi_{jr}}{m_r [(\omega_r^2 - \omega^2) + 2j\xi_r \omega_r \omega]} \int_s \frac{-\omega^2 \rho_0 e^{-jkR}}{2\pi R} \psi_{nr} dS \quad (2.32)$$

令

$$\int_s \frac{-\omega^2 \rho_0 e^{-jkR}}{2\pi R} \psi_{nr} dS = \psi'_{ir} \quad (2.33)$$

则有

$$\left[H_{ij}^p(\omega) \right]_r = \frac{\psi'_{ir} \psi_{jr}}{m_r [(\omega_r^2 - \omega^2) + 2j\xi_r \omega_r \omega]} \quad (2.34)$$

上式即为第 r 模态的声压频响函数表达式，此形式与应变模态的传递函数相似^[105]。

传统的位移模态测试中频响函数矩阵为对称矩阵，故既可以采用固定响应点，激励所有自由度的方法测得频响函数矩阵的一行，也可以采用激励某一固定不变的自由度，在所有自由度上拾取响应信号的方法测得频响函数矩阵的某一行。下面分别探讨使用这两种方法进行声模态测试时的区别：

(1) 当响应点固定，即声压传感器全程固定不动，而力锤激励点移动至所有自由度时，测量频响函数矩阵的某一行，由式 (2.33) 可知，其中 ψ'_{ir} 的值为固定不变的常数，因此有

$$\{H_{i1}^p(\omega), H_{i2}^p(\omega), \dots, H_{in}^p(\omega)\}_r = \frac{\psi'_{ir}}{m_r [(\omega_r^2 - \omega^2) + 2j\xi_r \omega_r \omega]} \times \{\psi_{1r}, \psi_{2r}, \dots, \psi_{mr}\} \quad (2.35)$$

经过归一化后可识别出第 r 阶振型向量 $\{\psi_{1r}, \psi_{2r}, \dots, \psi_{mr}\}^T$ 。此向量与位移模态的振型一致。

(2) 当力锤激励点固定, 而声压测试点移动时, 测量频响函数矩阵的某一行, 此时 ψ_{jr} 为常数, 若保证声压测点与被测表面的距离保持不变, 此时有

$$\{H_{1j}^p(\omega), H_{2j}^p(\omega), \dots, H_{nj}^p(\omega)\}_r = \frac{\psi_{jr}}{m_r[(\omega_r^2 - \omega^2) + 2j\xi_r\omega_r\omega]} \times \{\psi'_{1r}, \psi'_{2r}, \dots, \psi'_{mr}\} \quad (2.36)$$

由此可见, 经过归一化后, 可识别出的第 r 阶振型向量为声模态的振型向量 ψ'_{ir} 。

由式 (2.33) 可知, 声模态振型向量的计算过程中涉及与测点位置有关的变量 R 的积分, 当声压测点 i 不断移动, 求得的声模态振型向量与位移模态中的振型向量不成线性关系, 因此该模态不同于位移模态的振型向量, 为非对称模态。李乐等人提出, 采用力锤激励固定, 声压测点移动的方式进行的模态试验求得的是结构声压场的分布, 即结构振动固有特性产生的声场固有特性^[105]。

综上分析可知, 声模态的测试不同于位移模态的测试, 其区别在于, 位移模态测试中的频响函数矩阵为对称矩阵, 反映结构位移响应与激励的传递函数关系。而声模态测试中的频响函数矩阵为非对称矩阵, 不仅包含结构振动的位移振型信息, 同时还反映结构振动所产生的声场特性。在声模态测试中, 若采取固定声压测点, 移动激励点至所有自由度的测试方法, 即可排除声场特性的干扰, 求得结构模态的振型及频率。

1995年, 李俊宝等^[106]对声模态理论进行了正问题分析, 通过声响应识别了编钟的位移模态。2001年, 黎胜等^[107]利用有限元模拟结构声辐射并进行模态分析。2010年, 李乐等^[105]提出了对结构振动产生的声辐射进行动力参数识别的方法。上述研究从各方面证实了声模态测试的可行性。

在实际测试中, 声压传感器无法接触结构表面, 将置于测点上空某点, 由前述振动与声的互易性原理可知, 激励产生的振动能量无法完全转化为声压传感器处的声功率, 存在一个小于1功率转化系数 β , 测点距离振动表面越近时, β 越接近于1, 当模态测试中各声压测点的高度固定不变时, β 保持不变, 可由此排除对振动测试结果的干扰。

2.2 四周约束板壳的振动理论

钢-混凝土组合结构的局部界面脱空损伤区域中, 损伤中央的钢板与钢壳失去了混凝土的接触与支撑, 可将损伤边界的混凝土视作脱空区域钢板或钢壳的支座, 本文以局部平板的振动理论为基础, 对损伤区域钢板的自振频率进行分析, 为麦克风冲击共振法识别钢-混凝土组合结构的局部脱空损伤提供理论支撑。

2.2.1 四周约束矩形平面薄板的自振频率

实际工程中, 局部脱空损伤的形状并不规则, 为了使问题得到简化, 可将损

伤的平面几何轮廓简化为矩形，通过研究四周约束的矩形板的振动，求得该局部脱空损伤的自振频率解析解，下面介绍矩形四周约束板的振动理论：

1850年，Kirchhoff G等^[108]提出了薄板理论的重要假设：（1）中性面假定，板发生弯曲时，中性面内各点只存在法向位移，不存在平行于中性面的位移；（2）直法线假定，弯曲变形前垂直于中面的直线，在变形后仍然与中面保持垂直，且长度不发生变化，板中面各点剪应变为零；（3）不挤压假定，薄板各层纤维在变形后均互不挤压，垂直于板中面的应力分量与应变分量均忽略不计。

基于上述Kirchhoff假定，薄板弯曲的控制方程表示为：

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p}{D} \quad (2.37)$$

其中 w 为板的弯曲挠度， D 为板的弯曲刚度， $D = Eh^3 / 12(1-\nu^2)$ 。为了研究动力问题，引入时间作为自变量，并考虑结构的惯性力作用，因此方程右边的力函数变为：

$$p(x, y, t) - \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, y, t) \quad (2.38)$$

其中 ρ 为材料密度， h 为薄板的厚度。当研究板的自振时，外作用力 $p(x, y, t)$ 为零，因此差分方程写为：

$$D\nabla^2 \nabla^2 w(x, y, t) + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}(x, y, t) = 0 \quad (2.39)$$

其中 ∇^2 为拉普拉斯运算符， $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 。

引入初始挠度与初始速度，当 $t=0$ 时，

$$w = w_0(x, y), \quad \frac{\partial w}{\partial t} = v_0(x, y) \quad (2.40)$$

式（2.39）为板的无阻尼、线性自由振动的四阶齐次微分方程。假设结构的挠度与时间变化的关系：

$$w(x, y, t) = (A \cos \omega t + B \sin \omega t) W(x, y) \quad (2.41)$$

其中 $W(x, y)$ 为形函数， ω 为自振频率。将式（2.41）代入式（2.39）可得：

$$D\nabla^2 \nabla^2 W - \omega^2 \rho h W = 0 \quad (2.42)$$

解该方程的非零解，由行列式为零即可求得板的各阶自振频率。

对于四边简支的矩形薄板，假设形函数为：

$$W(x, y) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (2.43)$$

其中 a 和 b 分别为矩形薄板的两边边长， C_{mn} 是板的 (m, n) 阶模态的振幅。将式（2.43）代入式（2.42），可求得：

$$\frac{m^4 \pi^4}{a^4} + 2 \frac{m^2 \pi^2}{a^2} \frac{n^2 \pi^2}{b^2} + \frac{n^4 \pi^4}{b^4} - \frac{\omega^2 \rho h}{D} = 0 \quad (2.44)$$

解方程求得四边简支矩形板的各阶自振频率：

$$\omega_{nm} = \frac{\pi^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} (m^2 + n^2) \quad (2.45)$$

本文将钢-混凝土组合结构构件局部界面脱空损伤处的钢板或钢壳视作约束条件未知的板壳振动模型。假设研究的损伤面积相比钢板壁厚度足够大而剪切变形可以忽略不计，因此损伤处的局部钢板模型可以视作薄板。

四边约束条件不明的板的振动模态很难通过经典的分析方法求出，然而，对于边长 a 与板厚 h 之间满足 $5 < a/h < 80$ 的矩形薄板薄板，其振动的“边缘效应系数”可作为一种经验方法，利用该系数可以根据四边简支的矩形薄板模型进行修正得到其他边界约束条件的板振动模型。

1986年，Mitchell AK等^[109]和Hazell CR等^[110]提出四边约束平板的振型可以很好地用四边简支条件的板振型描述，只有约束边界附近的板不符合此规律。因此，只需对约束边界附近的特殊条件作出相应的修正即可利用简支条件板的振动模型得到相应的约束板振动模型。一个四边约束矩形薄板的3-3阶横向振动模态的有限元模态分析结果如图2.6所示，振型的节线将板划分成9个子区域，将其振型曲线与简支板的振型曲线（正弦函数）进行比较，以示四边约束板与四边简支板在边界附近区域的区别。

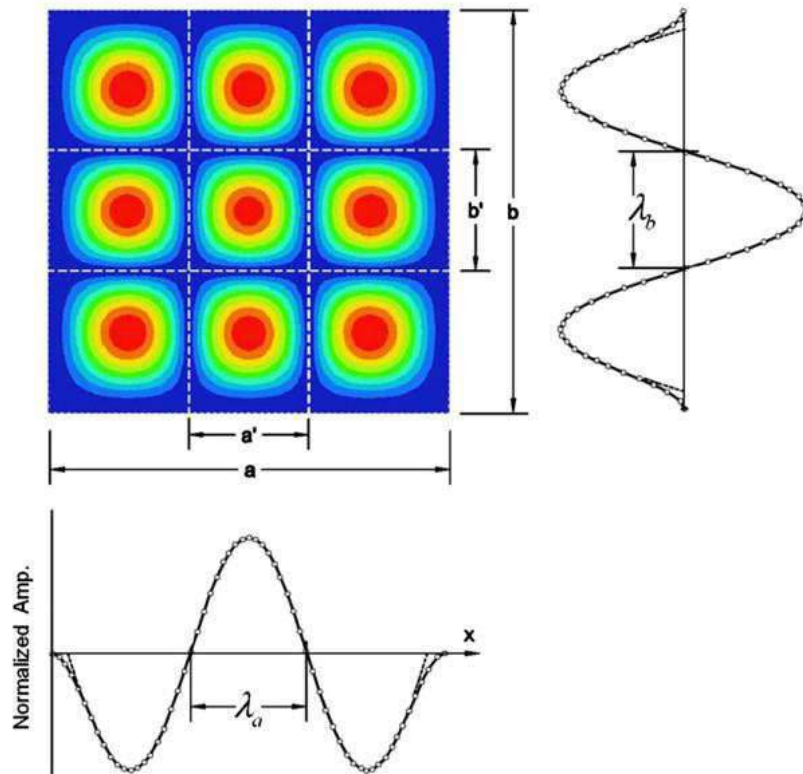


图 2.6 3-3 阶四周约束板的振型节线及其振型曲线与正弦曲线的比较^[95]

在板的高阶振型图中，有部分子区域的四周完全被振型节线所包围，这部分子区域的振动完全符合同等大小的四边简支板的振动规律。因此，整个四周约束条件的板振动频率可以由振型节线所包围的部分子区域的简支板振动频率的解近似而得，振型节线所包围板的振动频率为：

$$\omega_{mn} = \pi^2 \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \left[\left(\frac{m'}{a'} \right)^2 + \left(\frac{n'}{b'} \right)^2 \right] \quad (2.46)$$

其中， a' 和 b' 是由四边最外侧振型节线所包围的矩形区域的各边边长， m' 和 n' 为定义上述节线之间的半波数的正整数，表示内部四边简支板在横向的模态阶数。

为了更好地定义四周约束板的模态振型，AK Mitchell和CR Hazell分别定义了与各方向模态阶数 m 和 n 相对应的“边缘效应系数” Δ_m 和 Δ_n ，通过各方向边长对应的半波长 λ_a 和 λ_b 表示：

$$\Delta_m = \frac{a}{\lambda_a} - m, \quad \Delta_n = \frac{b}{\lambda_b} - n \quad (2.47)$$

式(2.46)中的 m'/a' 和 n'/b' 可以由边缘效应系数表示，频率公式整理为：

$$\omega_{mn} = \pi^2 \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \left[\left(\frac{m+\Delta_m}{a} \right)^2 + \left(\frac{n+\Delta_n}{b} \right)^2 \right] \quad (2.48)$$

通过一系列的试验，AK Mitchell和CR Hazell提出边缘效应系数是四周约束薄板无量纲模态参数（ na/mb 和 mb/na ）的函数：

$$\Delta_m = \frac{1}{\left(\frac{na}{mb} \right)^2 + c}, \quad \Delta_n = \frac{1}{\left(\frac{mb}{na} \right)^2 + c}, \quad c = 2 \quad (2.49)$$

其中 $1/c$ 是边缘效应系数的上界，取决于边界条件，AK Mitchell和CR Hazell提出的经验值为2。

2013年，Oh T等^[95]在此频率经验公式的基础上，通过试验模态分析与有限元模拟，提出了混凝土板内浅分层损伤的局部矩形板振动频率修正公式，并得出了不同损伤尺寸与损伤深度之比的条件下，高阶模态的边缘效应系数修正值。其损伤模型如图2.7所示，边缘效应系数的规律如图2.8所示。可知当损伤尺寸远远大于损伤的深度时，前三阶模态下的边缘效应系数十分接近其上界，此时，内部分层损伤的局部板可近似看成四边完全约束的矩形薄板。

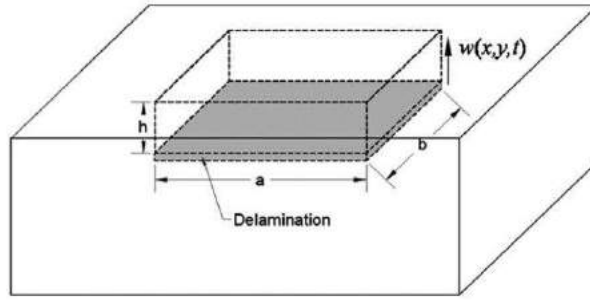


图 2.7 混凝土浅层损伤模型^[95]

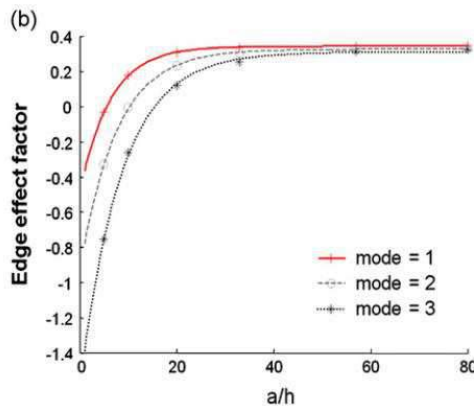


图 2.8 前三阶模态的边缘效应系数与损伤尺寸、深度的关系^[95]

本文所研究的钢-混凝土组合结构界面脱空损伤，局部脱空发生在钢板内侧，其前三阶模态边界效应系数的规律可类比混凝土浅层损伤模型的边界效应系数规律，当损伤尺寸达到一定程度时，局部脱空的钢板可近似看成四周完全约束的矩形薄板，其自振频率的估算可沿用AK Mitchell和CR Hazell提出的频率公式(2.48)和(2.49)及其边界效应系数的上界经验值($c=2$)。

2.2.2 周界约束圆形平面薄板的自振频率

实际工程中，当局部脱空损伤的形状在相互正交的两个方向上尺寸大致接近时，也可将损伤的平面几何轮廓简化为圆形，通过研究四周约束的圆形板的振动，求得该局部脱空损伤的自振频率解析解的近似值，下面介绍圆形形四周约束板的振动理论^[111]：

采用极坐标的方式对周界约束的圆形板振动进行分析，对半径为 a 的圆板进行分析，如图2.9所示， r 为距离极点的径向距离，即极径； θ 为极径 r 与极轴所夹的角，即极角。极坐标与直角坐标之间的关系为： $x=r\cos\theta$ ， $y=r\sin\theta$ 。极坐标下的拉普拉斯算子可表示为：

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \quad (2.50)$$

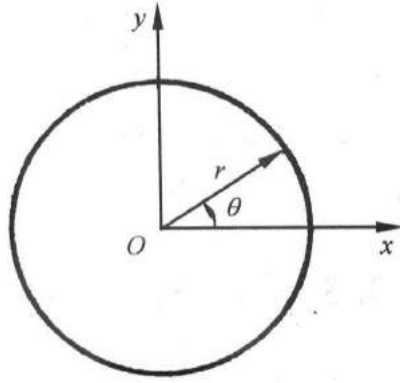


图 2.9 极坐标下的圆形平板

设极坐标下圆板的挠度 $w = w(r, \theta, t)$ ，类似平板的自由振动分析，圆板自由振动的差分控制方程可写为：

$$D\nabla^2\nabla^2w + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2.51)$$

其中 D 为板的弯曲刚度， $D = Eh^3 / 12(1-\nu^2)$ ， h 为板的厚度。

采用变量分离法求解这一方程，令

$$w(r, \theta, t) = W(r, \theta)e^{j\omega t} \quad (2.52)$$

将式 (2.52) 代入式 (2.51) 可得：

$$D\nabla^2\nabla^2W - k^4W = 0 \quad (2.53)$$

其中

$$k^4 = \frac{\omega^2 \rho h}{D} \quad (2.54)$$

式 (2.53) 的解可以用以下方程表达：

$$\begin{aligned} \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + k^2\right)W_1 &= 0 \\ \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} - k^2\right)W_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.55)$$

式 (2.53) 的解为 W_1 与 W_2 的线性组合。作变量变换，令第一个方程 $z_1 = kr$ ，第二个方程 $z_2 = jkr$ 则式 (2.55) 变为：

$$\begin{aligned} \frac{d^2W_1}{dz_1^2} + \frac{1}{z_1} \frac{dW_1}{dz_1} + W_1 &= 0 \\ \frac{d^2W_2}{dz_2^2} + \frac{1}{z_2} \frac{dW_2}{dz_2} + W_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2.56)$$

在此引入贝塞尔方程的概念^[112]：

$$x^2 \frac{d^2y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - \alpha^2)y = 0 \quad (2.57)$$

在柱坐标或球坐标下求亥姆霍兹方程和拉普拉斯方程时，利用分离变量的方式可求得贝塞尔方程，故贝塞尔函数常在圆柱体的电磁波传播、热传导与圆形薄膜振动的问题中被用到。

式 (2.57) 的解无法用初等函数的形式表示，其标准解函数称为贝塞尔函数，在实际应用中， α 通常为整数 n ，此时称该方程的解为 n 阶贝塞尔函数。

式 (2.56) 中的两个方程均为零阶柱贝塞尔方程的标准形式，该方程有两个特解，其中一个为 $J_0(z)$ ，称为零阶柱贝塞尔函数（即第一类贝塞尔函数）；另一个为 $N_0(z)$ ，称为零阶柱诺依曼函数（即第二类贝塞尔函数）。方程的解一般为上述两个函数的线性组合：

$$W(z) = AJ_0(z) + BN_0(z) \quad (2.58)$$

考虑到柱诺依曼函数 $N_0(z)$ 具有在零点发散的的特性，当 $z=0$ 时， $N_0(z) \rightarrow \infty$ ，而对于圆板振动模型，其圆心处的振动总是有限的，为了使解能够描述圆板振动的实际规律，令 $B=0$ ，故式 (2.56) 的解的形式可以表示为： $W(z) = AJ_0(z)$ ， W_1 和 W_2 的具体表示形式为：

$$\begin{aligned} W_1 &= A_1 J_0(kr) \\ W_2 &= A_2 J_0(jkr) = A_2 I_0(kr) \end{aligned} \quad (2.59)$$

其中， $I_0(kr)$ 称为零阶虚宗量柱贝塞尔函数，零阶虚宗量柱贝塞尔函数可以将零阶柱贝塞尔函数中的宗量 x 以 jx 置换而得到。式 (2.59) 为挠度函数 W 的两个特解，其一般解可表示为：

$$W = AJ_0(kr) + BI_0(kr) \quad (2.60)$$

对于半径为 a ，周界完全约束的圆形板，其振动的边界条件为：

$$\begin{aligned} (W)_{(r=a)} &= 0 \\ \left(\frac{\partial W}{\partial r}\right)_{(r=a)} &= 0 \end{aligned} \quad (2.61)$$

将上述边界条件代入式 (2.60)，整理可得：

$$\begin{aligned} AJ_0(ka) + BI_0(ka) &= 0 \\ -AJ_1(ka) + BI_1(ka) &= 0 \end{aligned} \quad (2.62)$$

其中， $J_1(ka)$ 为一阶柱贝塞尔函数， $I_1(ka)$ 为一阶虚宗量柱贝塞尔函数。由于上式中 A 与 B 不能同时为零，故系数行列式为零，即

$$\begin{vmatrix} J_0(ka) & I_0(ka) \\ -J_1(ka) & I_1(ka) \end{vmatrix} = J_0(ka)I_1(ka) + I_0(ka)J_1(ka) = 0 \quad (2.63)$$

利用柱函数的值，用图解法求得上述方程的根，如图 2.10 所示。设上述方程的根 $\mu = ka$ ，则 $\mu_1 = k_1 a$ ， $\mu_2 = k_2 a$ ， \dots ， $\mu_n = k_n a$ 。解式 (2.63) 得 $\mu_1 = 3.20$ ， $\mu_2 = 6.30$ ， $\mu_3 = 9.44$ ， \dots 。当 $n > 3$ 时，可用近似式 $\mu_n = n\pi$ 表示。

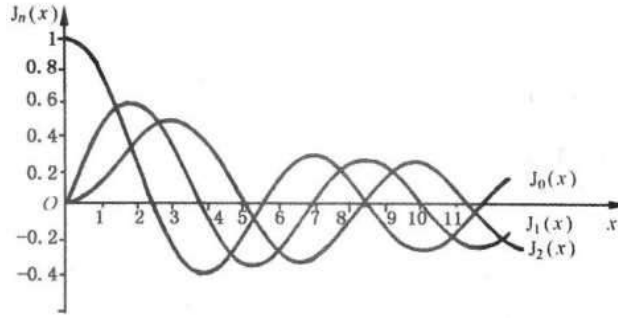


图 2.10 柱贝塞尔函数图

因此，由式（2.54）可得，半径为 a ，周界完全约束的圆形板的振动频率公式为：

$$\omega_n = \frac{\mu_n^2 h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} \quad (2.64)$$

将 $\mu_1 = 3.20$ 代入上式，求得圆板振动的一阶频率为：

$$\omega_1 = \frac{\mu_1^2 h}{4\pi a^2} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}} = 0.467 \frac{h}{a^2} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}} \quad (2.65)$$

二阶频率为：

$$\omega_2 = \left(\frac{\mu_2}{\mu_1}\right)^2 \omega_1 = \left(\frac{6.30}{3.20}\right)^2 \omega_1 = 3.91\omega_1 \quad (2.66)$$

三阶频率为：

$$\omega_3 = \left(\frac{\mu_3}{\mu_1}\right)^2 \omega_1 = 8.75\omega_1 \quad (2.67)$$

与矩形四周约束板的振动相类似，假设当损伤尺寸相比板厚大到一定程度时，钢-混凝土界面脱空的局部圆形损伤板的前三阶模态，状态接近于周界完全约束的圆形板的振动，其一阶振动频率近似用式（2.64）来描述。

2.3 本章小结

本章首先介绍了声波的基本方程及板振动时结构声波产生的声辐射规律，板发生振动时，其上空固定一点的声压响应与板的振动速度响应幅值成正比。接着介绍了振动与声的互易性原理和声学模态分析的基本理论，阐述了基于声压信号的模态分析理论，表明利用麦克风传感器进行基于声压信号的模态分析也能测得结构的模态振型及频率。最后，本章提出了矩形局部脱空损伤与圆形局部脱空损伤的自振频率估计模型，即四周约束的矩形板自振频率公式与四周约束的圆形板自振频率公式。由公式可知，板的自振频率与其材料特性、平面尺寸及板的厚度相关，当局部脱空损伤的尺寸已知时，可以计算得出该损伤工况的自振频率估计值。

第3章 钢-混凝土组合结构的麦克风冲击共振试验

3.1 麦克风冲击共振试验原理

钢-混凝土组合结构发生局部界面脱空损伤时,脱空部位的钢板或钢壳可视为四周支撑在混凝土支座的上板壳模型。对混凝土填充密实的构件表面施加脉冲力激励时,冲击瞬间会发出直接声波。而对构件表面的脱空损伤部位施加脉冲力激励时,局部脱空区域的钢板壳受短时冲击力的作用,将发生持续的振动响应,其响应在局部板壳的自振频率处十分明显。

由于结构的振动在附近空气中将产生声辐射,因此可以通过声压传感器拾取激励点上空的声压信号,对声压信号进行分析处理,判断构件表面的振动情况,以识别结构是否存在脱空损伤。通常,钢-混凝土组合结构内部发生脱空损伤时,损伤的面积与尺寸是未知的,在已知板壳厚度的情况下,利用声压信号的频谱特性,从局部脱空板壳模型的振动特性出发,可推测脱空损伤的尺寸等固有特性。

本文分别设计了一块钢-混凝土组合板构件与一块钢管混凝土构件,并在每个试件中设计了不同大小、形状的脱空损伤区域,两个试件的损伤工况保持一致。利用小力锤激励试件的脱空区域与非脱空区域,通过麦克风声压传感器拾取激励点上空的声压响应信号,并通过数字信号采集仪进行信号处理与分析。首先,进行试探性测试,探究激励点与测点相对位置(水平距离、垂直距离、摆放角度)对声压信号的影响。接着,分别对不同损伤工况进行麦克风冲击共振测试,探究不同损伤面积与形状对响应信号频谱特性的影响。然后,分别对钢-混凝土组合板构件和钢管混凝土构件的 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 矩形脱空损伤工况进行麦克风声模态测试。最后,利用基于模态测试的参数提取手段,对两块构件的 $150 \times 150 \text{mm}^2$ 矩形损伤进行基于麦克风阵列的损伤成像测试。

3.1.1 试验设备与仪器

麦克风冲击共振测试用到了如下的仪器设备,如图3.1(a)~(e)所示。

(1) 激励力锤与力传感器,PCB公司的模态力锤与力传感器208A03,灵敏度: 2.247mV/N ,如图3.1(a)~(b)所示,用于对构件表面进行冲击激振,并将力信号记录;

(2) 声压传感器,B&K公司1/4英寸4958A传声器(0~20kHz),如图3.1(c)所示,用于记录激振后结构振动产生的空气中的声压信号,由于麦克风的灵敏度易受环境温度湿度影响,每次测试前需现场标定其灵敏度,本章节所有的测试中,麦克风的灵敏度范围介于 $10 \sim 11 \text{mV/N}$ 之间,后文不作一一描述。;

(3) 标准声源的声学校准器，B&K公司4231型声学校准器，发出1000Hz的标准声源，如图3.1(d)所示，用于标定麦克风传声器；

(4) 数字信号采集设备，LMS Cadax-8便携式动态信号分析仪，如图3.1(e)所示，用于采集并储存测试过程中的力信号与声压信号；

(5) 计算机工作站，内置LMS Test Lab 9A模态测试软分析件以及Matlab R14a，如图3.1(e)所示，用于对原始数据信号进行处理分析。

(6) 钢支架，用于固定声压传感器；



a)PCB 模态力锤与各材质的锤头



b)PCB 力传感器



c)B&K 1/4 英寸麦克风传声器



d)1000Hz 标准声源



e)LMS 数采设备及计算机工作站

图 3.1 麦克风冲击共振测试的仪器设备

3.1.2 试件及损伤设计

实际工程中，既存在截面为圆形的钢管混凝土组合结构构件，也存在截面为

矩形的方形钢管混凝土构件或钢-混凝土组合板构件。其中，方形钢管混凝土构件中的局部脱空损伤类似于钢-混凝土组合平板构件的局部脱空损伤情况。为了研究两种类型构件的脱空损伤冲击共振响应信号的特性，本文分别设计了一块钢-混凝土组合平板构件与一块钢管混凝土构件进行测试。

其中，钢-混凝土组合板构件尺寸为 $500 \times 950 \text{mm}^2$ ，混凝土板厚度为 120mm ，钢板厚度为 6mm ，在混凝土上表面，设置8种大小、形状不同的矩形凹陷损伤，其平面尺寸设计如图3.2所示。

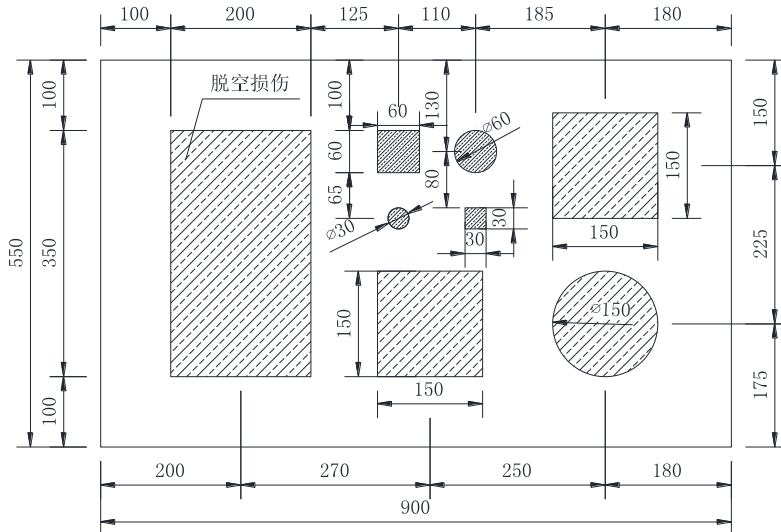


图 3.2 钢-混凝土组合板构件损伤位置与尺寸

为了防止钢-混凝土组合板由于混凝土收缩发生界面脱粘，在钢板内侧设置栓钉。制作损伤时，用AB胶将裁剪好的各种尺寸、形状的珍珠棉泡沫板（可发性聚乙烯）粘贴在钢板内侧，损伤泡沫的设置如图3.3所示。支模后浇筑混凝土，待混凝土养护成型后拆除模板。混凝土板的配筋图如图3.4所示。

钢管混凝土构件直径为 400mm ，钢管壁厚 6mm ，钢管长 1000mm 。在钢管内表面，即混凝土的外表面，设置8种大小、形状不同的矩形凹陷损伤，损伤工况与平板构件中的损伤保持一致。钢管混凝土构件的平面尺寸设计如图3.5所示。

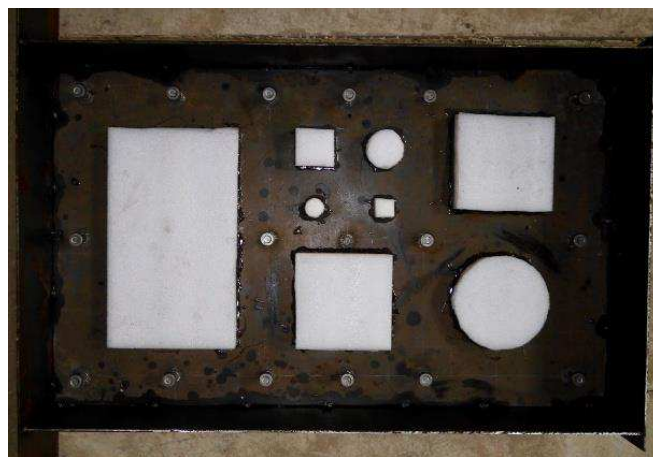


图 3.3 钢-混凝土组合板构件损伤布置图

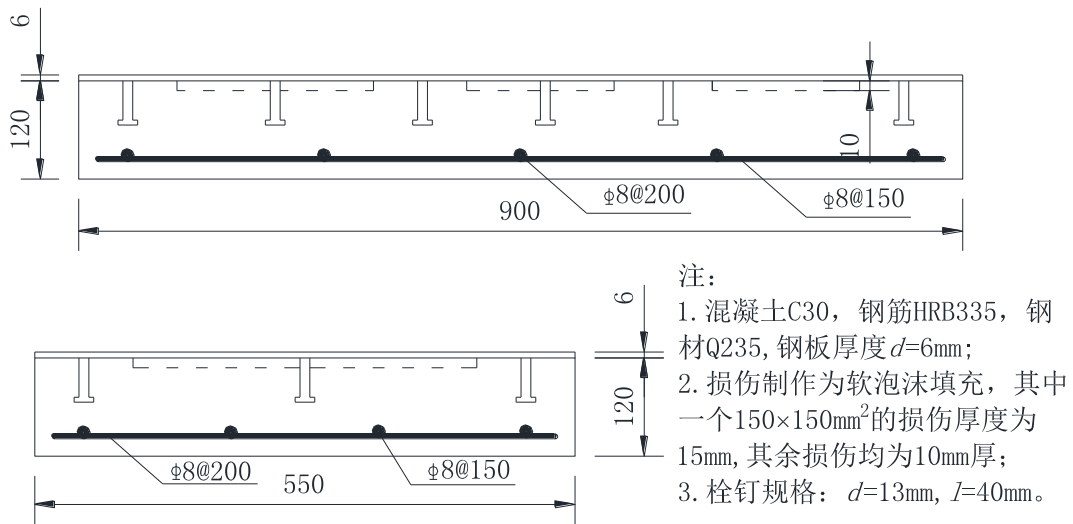


图 3.4 钢-混凝土组合板构件配筋图

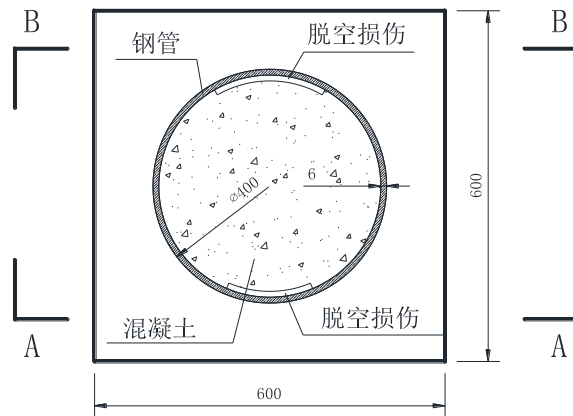
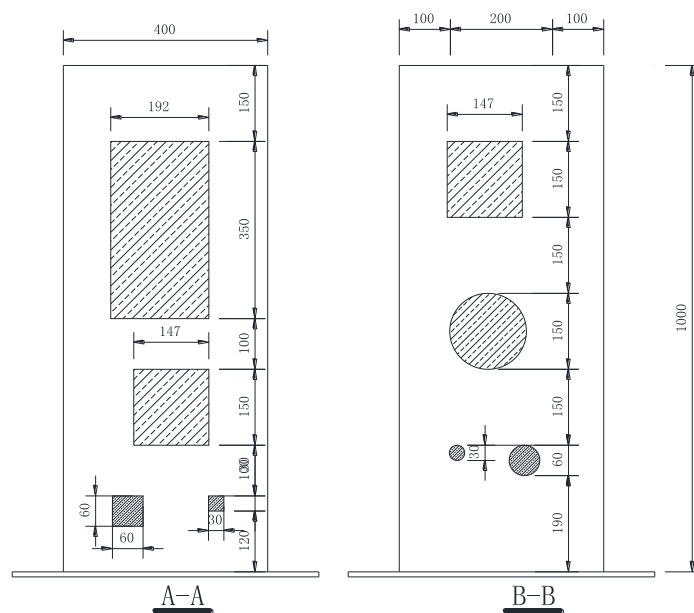


图 3.5 钢管混凝土构件截面

制作损伤时，用AB胶将裁剪好的各种尺寸、形状的珍珠棉泡沫板粘贴在钢管壁内侧，如图3.6所示。



a) 损伤位置与尺寸



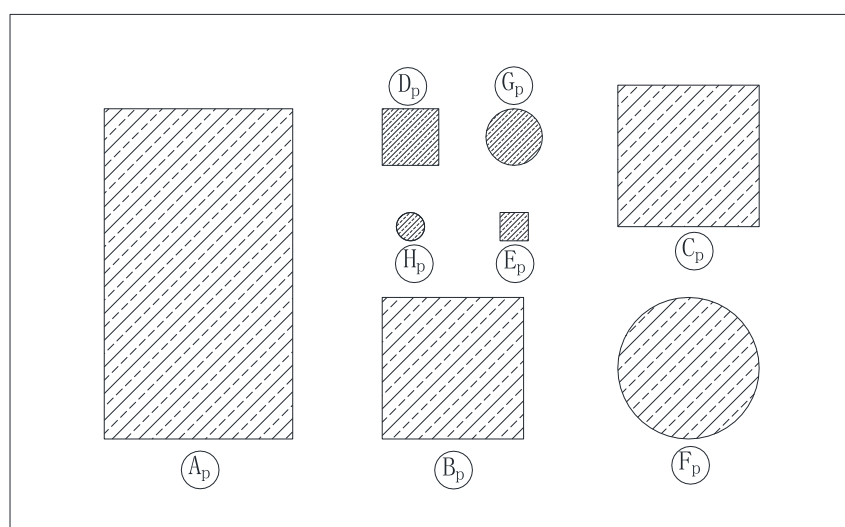
b) 损伤制作

图 3.6 钢管混凝土构件内部损伤设置

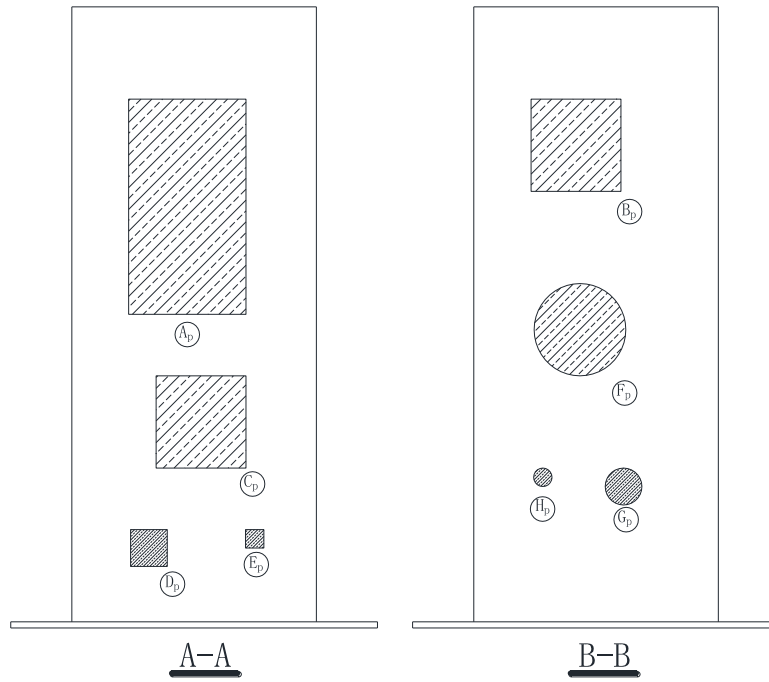
钢管混凝土构件与钢-混凝土组合板构件中的损伤工况保持一致,其具体尺寸与形状如图3.7与表3.1所示。其中损伤工况的下标p表示平面损伤(plane),即钢-混凝土组合板构件的损伤工况;损伤工况的下标c表示曲面损伤(curve),即钢管混凝土构件的损伤工况。

3.1.3 测试及信号处理方法

在构件表面选择一个测点标记,将麦克风传声器通过十字夹固定于钢支架上,为防止构件的振动影响麦克风传声器的测试稳定性,将支架独立于被测构件放置。将麦克风传声器与力锤传感器通过导线连接至LMS-SCM01数字信号采集仪,并将采集仪与笔记本计算机工作站连接,测试现场如图3.8所示。



a) 钢-混凝土组合板构件的损伤工况



b) 钢管混凝土构件的损伤工况

图 3.7 各试件的损伤工况编号

表 3.1 各试件的损伤工况设置

损伤工况	形状	尺寸 (mm)	深度 (mm)
A _p 、 A _c	矩形	200×350	10
B _p 、 B _c	矩形	150×150	15
C _p 、 C _c	矩形	150×150	10
D _p 、 D _c	矩形	60×60	10
E _p 、 E _c	矩形	30×30	10
F _p 、 F _c	圆形	直径 $d=150$	10
G _p 、 G _c	圆形	直径 $d=60$	10
H _p 、 H _c	圆形	直径 $d=30$	10

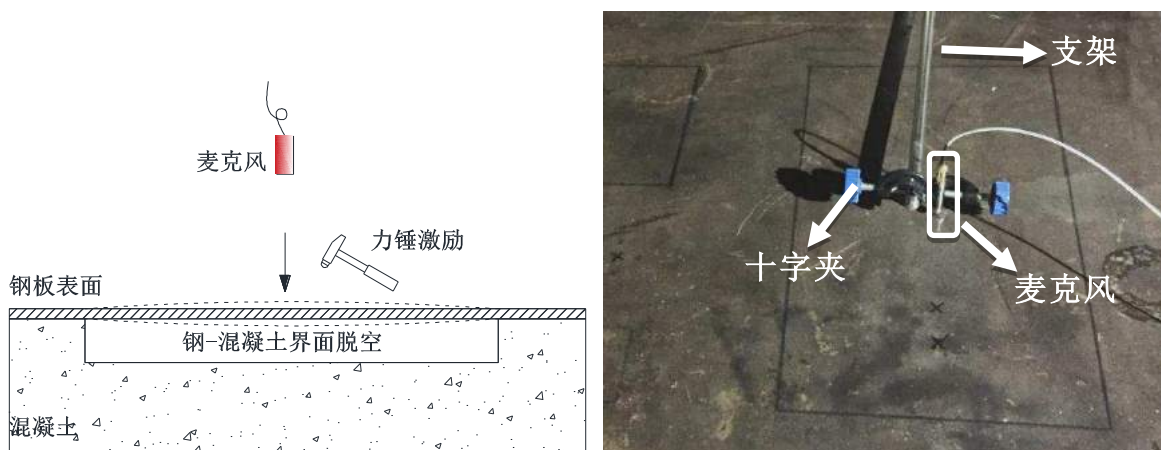


图 3.8 麦克风冲击共振测试示意图

测试时，分别选取不同位置的测点，如脱空区域中心点，和脱空区域外的非脱空点。用力锤在测点处进行敲击，敲击点与麦克风摆放的平面位置尽量接近，并在每个测点反复进行几次敲击。由于麦克风的拾音频率范围在0~20kHz，将采样频率设置为51.2kHz，带宽25.6kHz。采样时间为0.1s，谱线数为16384，频率分辨率为1.5625Hz，做各敲击点的频响函数。

具体的处理步骤如下：

- (1) 检查声压信号数据，剔除因试验操作的不确定性因素造成的异常数据。
- (2) 对信号进行加窗处理，对采集的信号只截取一部分进行处理，本实验对力信号与声压信号加矩形窗，取激励开始后的0.1s力信号与响应信号。
- (3) 对加窗后的响应信号与力信号进行快速傅里叶变换（Fast Fourier Transformation, FFT），求得响应与力的频域信号。
- (4) 对信号进行频域平均，目的是为了减少随机噪声信号对测试信号产生的干扰。
- (5) 计算信号的功率谱与相干函数，并进行频响函数估计。分别计算响应信号的自功率谱 G_{pp} 、激励信号的自功率谱 G_{ff} 与响应信号和力信号的互功率谱 G_{pf} 及其相干函数，推导可得结构的频率响应函数。频响函数的估计方法分 H_1 、 H_2 和 H_v 三种，根据输入信号与输出信号的噪声情况选择合适的方法，对于本文的情况，即输出信号的附加噪声较大或输入信号之间相互独立时，用 H_1 方法效果最佳。

3.2 试探性测试

为了准确地理解麦克风冲击共振测试的结果所反映的信息，分别使用橡胶、树脂材料等软质锤头与钢、铜等硬质锤头进行基于同一脱空测点、同一麦克风摆放位置的敲击测试，并对比各自的声压频响函数图形特征，测试结果表明，软质锤头激励下，声压响应信号的低频特征更显著，高频信号幅值小，特征不明显。钢、铜等硬质锤头的测试结果高频信号更丰富，能全面的反映声压信号的频域特征，故选用钢质锤头进行测试。

为了进一步排除其他因素对测试信号的影响，分别设计四个试探性测试：

- (1) 分别激励脱空点与非脱空点，得到麦克风冲击共振测试的典型信号。
- (2) 探究麦克风与被测构件表面的垂直距离对测试信号的影响。
- (3) 探究麦克风与激励点的水平距离对测试信号的影响。
- (4) 探究麦克风与被测构件表面的切向角度对测试信号的影响。

3.2.1 钢-混凝土界面脱空损伤测试典型信号

探究敲击点在脱空区域中心部位的典型声压信号与敲击非脱空区域点的典型声压信号。选择操作方便的钢-混凝土组合结构平板进行此试验，选取

200×350mm²的矩形损伤，其中心点设为测点1，取脱空区域外一点设为测点2。用力锤对测点进行脉冲激励，将麦克风置于测点正上方约20mm处拾取响应声压信号。

将测得两条时域声压信号除以各自的力时域信号幅值，作归一化处理，得到单位脉冲锤击力作用下的脱空点与非脱空点时域声压信号的比较，测点示意图和两个测点时域信号的对比如图3.9所示。

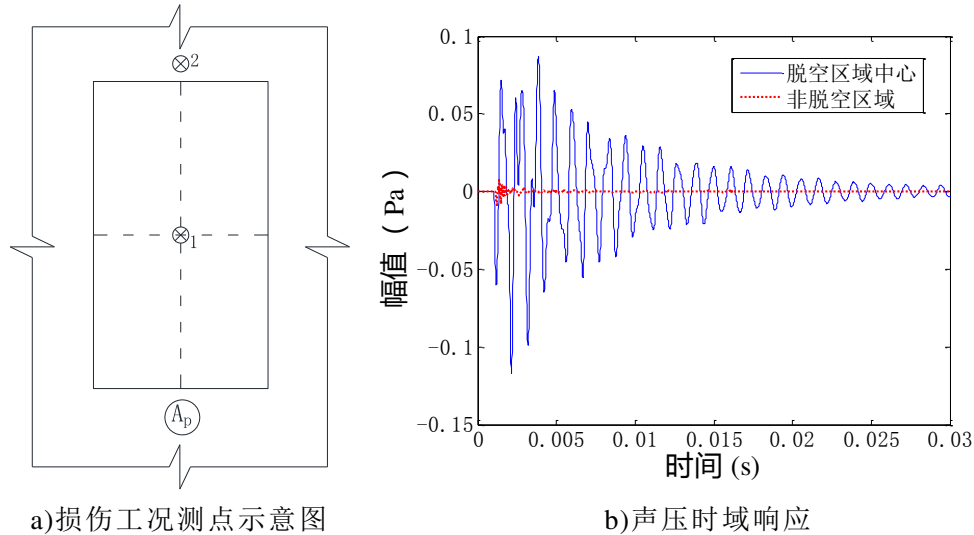


图 3.9 单位脉冲力激励下脱空点与非脱空点的声压时域信号

由图3.9可见，同等大小的激励下，脱空点的声压响应幅值比非脱空点的声压响应幅值大得多，且脱空点响应的持续时间也远远大于非脱空点的响应。故作出推测，在敲击点损伤情况未知的情况下，可通过声压信号的差异判断敲击点是否存在脱空损伤。

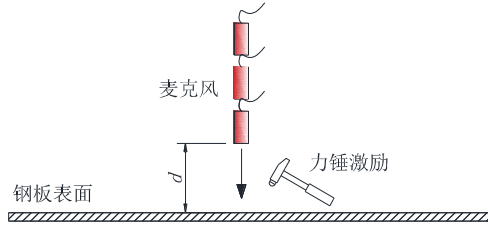
3.2.2 麦克风与被测构件表面的垂直距离对测试信号的影响

为了进一步研究麦克风与敲击点在垂直方向上的相对位置对声压信号的影响，在钢-混凝土组合板构件中选取200×350mm²矩形损伤，在其损伤中心点进行敲击，并将麦克风传感器置于敲击点上空分别5mm，10mm，15mm，20mm，30mm，40mm，50mm，60mm的位置进行拾振。将采集到的声压信号与力信号分别作自功率谱与互功率谱，得到其频率响应函数，对比结果如图3.10所示。

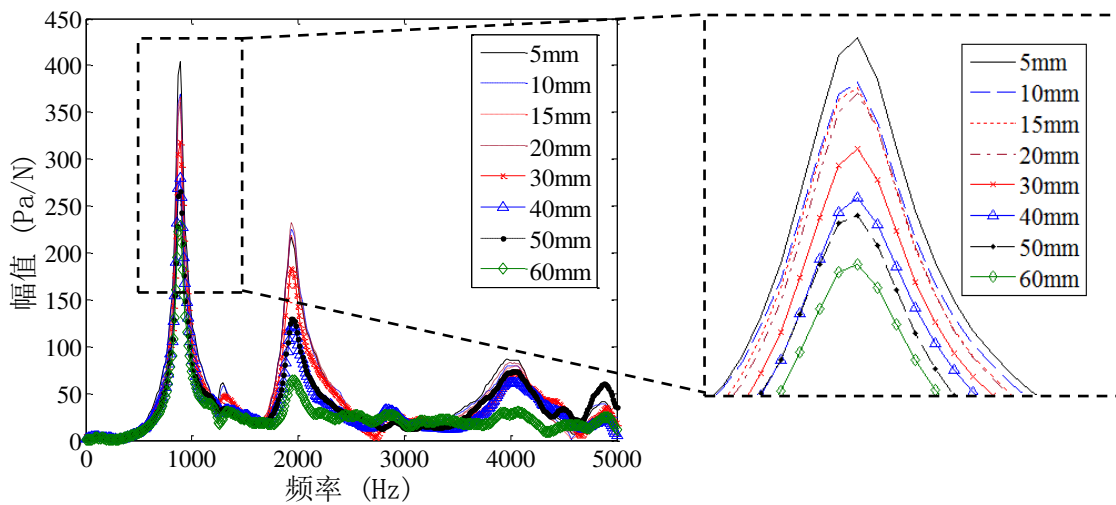
从图3.10中可看出，在0~60mm的范围内，无论麦克风与被测表面距离多远，所测得的频响函数在900Hz、1200Hz和1900Hz附近均表现出了明显的峰值特征，随着垂直距离的增大，声压信号的频响函数大致呈现出峰值的幅值减小的趋势。

有前述理论章节可知，体积声源发出的声功率只有一部分转化为结构的振动响应，由振动与声的互易性原理可知，结构表面力激励产生的声功率也只有一部分转化为声压响应，其转化系数 β 与被测结构和声压测点的相对位置有关，声压测点距离越近， β 越大，因此试验结果基本符合理论预期。

由此可得出结论：麦克风传感器在同一测点的垂直放置高度不影响声压频响函数的基本性质，且麦克风放置距离越近，频率峰值越高，频率识别越明显。因此后续试验中将麦克风置于同一垂直高度，以保证测试结果的声压响应幅值不受传感器的位置影响。



a) 麦克风位置示意图



b) 各垂直距离工况的频响函数

c) 900Hz 附近峰值的放大图

图 3.10 脱空点处麦克风与被测构件表面的垂直距离对声压频响函数的影响

3.2.3 麦克风与测点的水平距离对测试信号的影响

为了进一步研究麦克风与敲击测点在水平方向上的相对位置对声压信号的影响，在钢-混凝土组合板构件中选取 $150 \times 150 \text{mm}^2$ 矩形损伤，在其损伤区域选择一个测点进行敲击，并将麦克风传感器置于敲击点上空约40mm的高度，水平距离分别为25mm，50mm，75mm，100mm，125mm的位置进行拾振。将采集到的声压信号与力信号分别作自功率谱与互功率谱，得到其频率响应函数，对比结果如图3.11所示。

从图3.11中可看出，在麦克风与敲击点水平距离为0~125mm的范围内，无论麦克风与敲击点距离多远，所测得的频响函数在1900Hz和3900Hz附近均表现出了明显的峰值特征，随着水平距离的增大，声压信号的频响函数大致呈现出峰值幅值减小的趋势。值得注意的是，当麦克风与敲击点的水平距离达到100mm，125mm时，麦克风的平面位置已处于脱空区域的边缘及非脱空区域的上空。而此时依然

能在1900Hz与3900Hz附近测得频率峰值。说明声压信号的主要基本特征取决于敲击点处是否存在钢板与混凝土的局部脱空损伤，而不依赖于麦克风的平面位置。与前述理论章节的声功率转化系数概念类似，当麦克风声压测点与激励点的水平距离越近，声功率转化系数越大，试验结果基本符合预期。

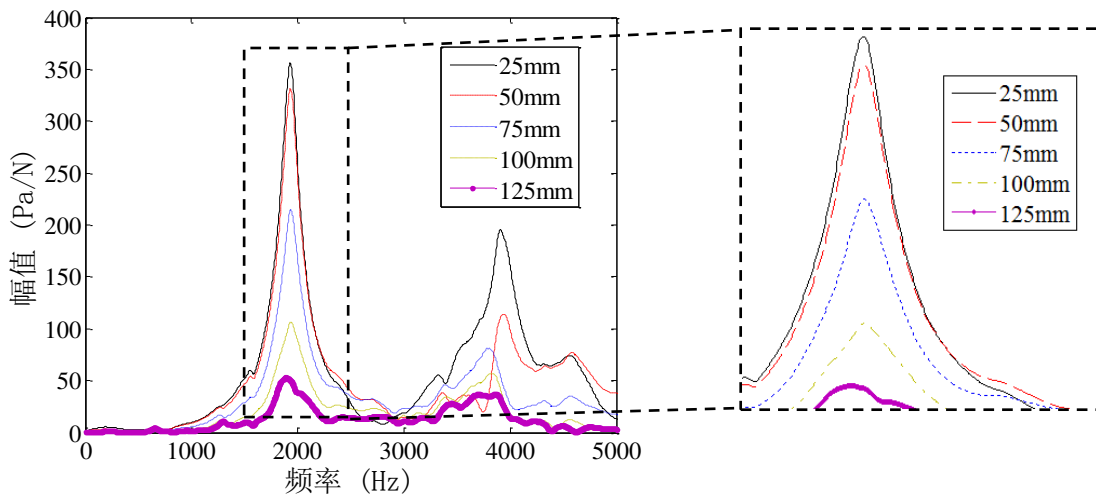
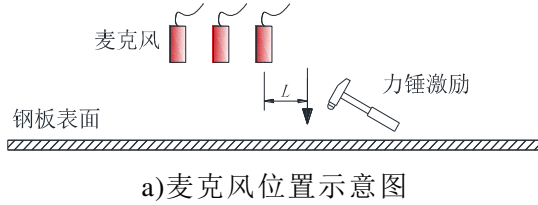


图 3.11 脱空点处麦克风与测点的水平距离对声压频响函数的影响

由此可得出结论：麦克风传感器在同一测点的水平放置距离不影响声压频响函数的基本性质，且麦克风放置距离越近，频率峰值越高，频率识别越明显，且响应信号的基本性质完全取决于激励点的物理损伤情况。因此，为获得尽量明显的频响函数特性，后续的试验将麦克风置于激励点的正上方。

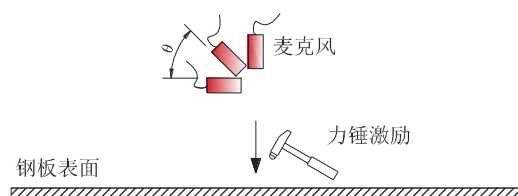
3.2.4 麦克风与被测表面切向角度对测试信号的影响

为了进一步研究麦克风与敲击点的切平面的放置相对角度对声压信号的影响，在钢-混凝土组合板构件中选取 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 矩形损伤，在其损伤中心点进行敲击，并将麦克风传感器置于敲击点上空约50mm的位置，分别与测点切表面成 90° 、 45° 和 0° 进行拾振。将采集到的声压信号与力信号分别作自功率谱与互功率谱，得到其频率响应函数，对比结果如图3.12所示。

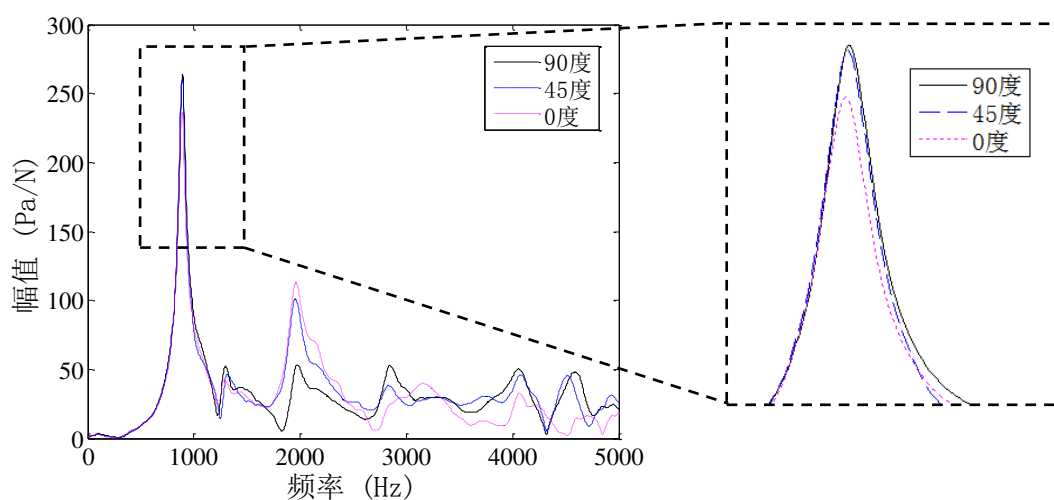
从图3.12可看出，在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内，无论麦克风与测点切表面的角度多大，所测得的频响函数在900Hz、1200Hz和1950Hz附近均表现出了明显的峰值特征，各个角度的工况下，频响函数的峰值大小也没有明显的差别。与前述理论章节的声功率转化系数概念类似，当麦克风声压测点与激励点的相对位置保持不变时，尽

管麦克风传感器的摆放角度发生改变，声功率转化系数仍然保持不变，试验结果基本符合预期。

由此可得出结论：麦克风传感器在同一测点的不同摆放角度不影响声压频响函数的基本性质与频率峰值。因此，为了测试锤击方便，后续的试验将麦克风置于激励点正上方某一高度处，与被测表面平行放置。



a) 麦克风位置示意图



b) 各麦克风放置角度工况的的频响函数

c) 900Hz 附近峰值的放大图

图 3.12 脱空点处麦克风的放置角度对声压频响函数的影响

3.3 不同损伤面积与形状的麦克风冲击共振测试

经过上述试探性试验得知，麦克风冲击共振法测试中，当力锤敲击点位于脱空区域时，声压响应幅值远远大于非脱空点的敲击响应幅值。当敲击点确定时，麦克风在垂直方向和水平方向的位置改变均不影响响应信号的基本性质，且当麦克风离被测点距离越近时，声压信号的频响函数峰值越明显。当敲击点确定时，麦克风与测点的切表面夹角改变不影响声压响应信号的基本性质与频响函数幅值。为了方便锤击，后续的测试中将麦克风以平行与被测构件表面的角度置于敲击点的正上方5mm处进行拾振。

排除了测试方法的因素的影响后，进一步探究损伤工况的不同对测试的声压频响函数的影响。本文在钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件中分别设计了8中不同的损伤工况，如表3.1所示，对各个损伤工况进行麦克风冲击共振法测试，得到不同面积、形状与厚度的钢-混凝土界面脱空损伤对测试声压信号的影响规

律。

3.3.1 钢-混凝土组合板构件麦克风冲击共振测试

对钢-混凝土组合板构件的8种工况分别进行麦克风冲击共振测试，使用钢锤头进行激励，将麦克风置于测点上空约5mm处，采样频率设置为51.2kHz，带宽25.6kHz。采样时间为0.1s，谱线数为16384，频率分辨率为1.5625Hz，做出声压的频响函数曲线。测点布置如图3.13所示，各工况的测试结果如图3.14~3.18所示。

从图3.14~3.17可见，在 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，各点的声压频响函数在880Hz、1270Hz和1960Hz附近均出现了明显的峰值；在 $150 \times 150 \text{mm}^2$ ，脱空厚度为15mm损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，各点的声压频响函数在1950Hz处出现了明显的峰值；在 $150 \times 150 \text{mm}^2$ ，脱空厚度为10mm损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，各点的声压频响函数在1600~2200Hz的频段内出现了明显的峰值，但峰值频率不集中；在 $d=150 \text{mm}$ 损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，各点的声压频响函数在2160Hz的频段内出现了明显的峰值；而非脱空区域的声压频响函数在上述峰值频率上均无明显的响应。

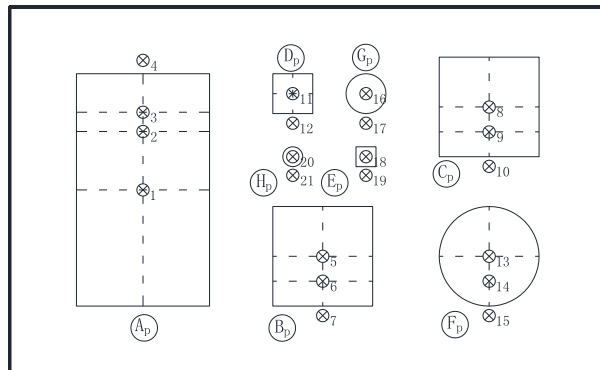


图 3.13 钢-混凝土组合板构件测点布置图

1. 工况 A_p :

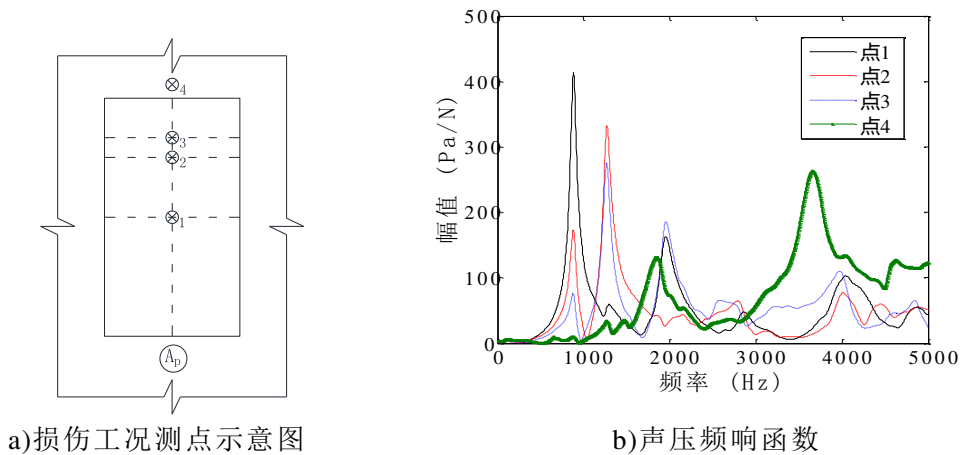


图 3.14 工况 A_p 的各测点频响函数曲线图

2. 工况 B_p :

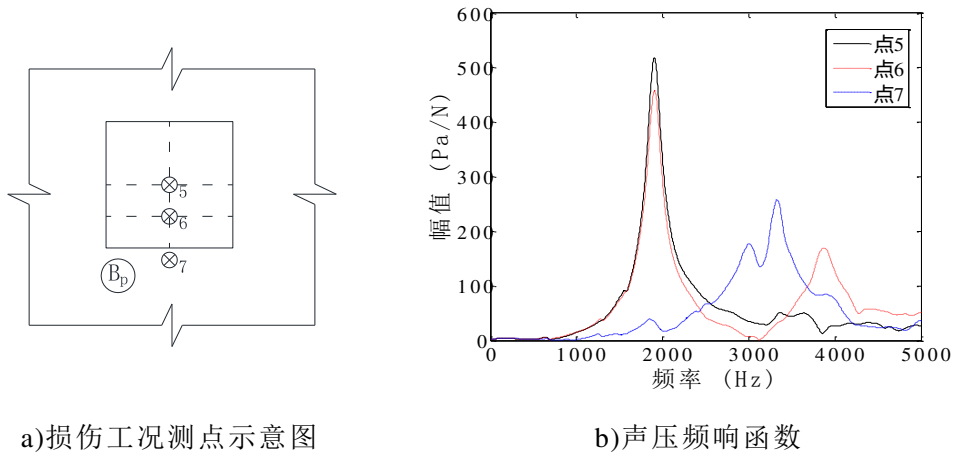


图 3.15 工况 B_p 的各测点频响应函数曲线图

3. 工况 C_p :

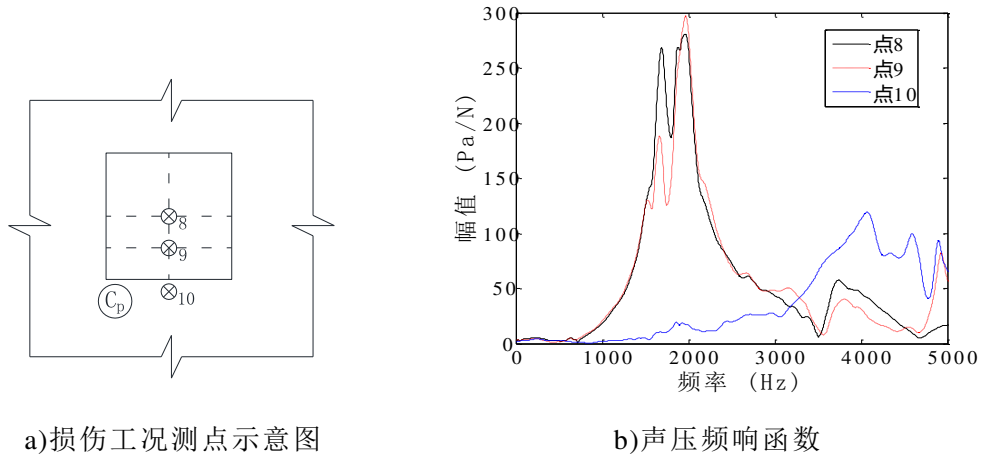


图 3.16 工况 C_p 的各测点频响应函数曲线图

4. 工况 F_p :

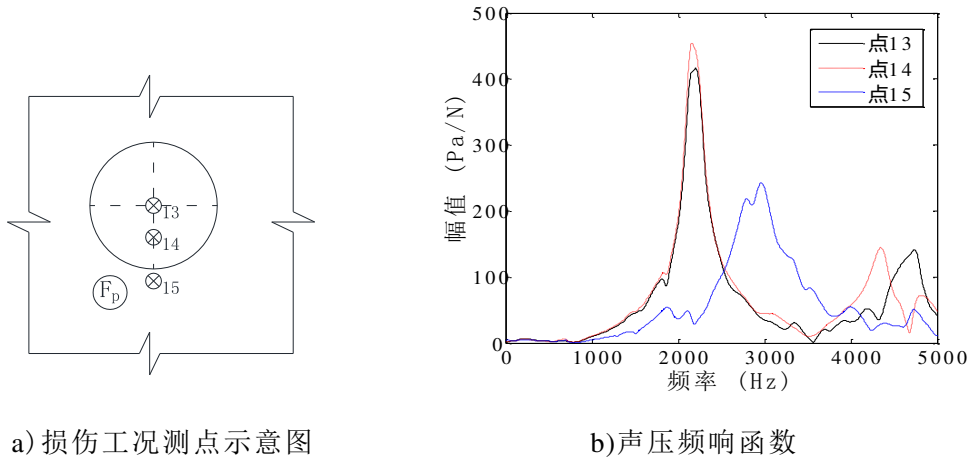


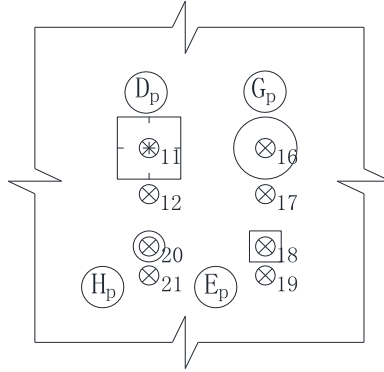
图 3.17 工况 F_p 的各测点频响应函数曲线图

由板的模态理论可知，频率与阻尼为结构振动的全局特性，当敲击点位于局部脱空的板壳模型区域时，各敲击点预期出现的固定不变的第一个频率峰值，应

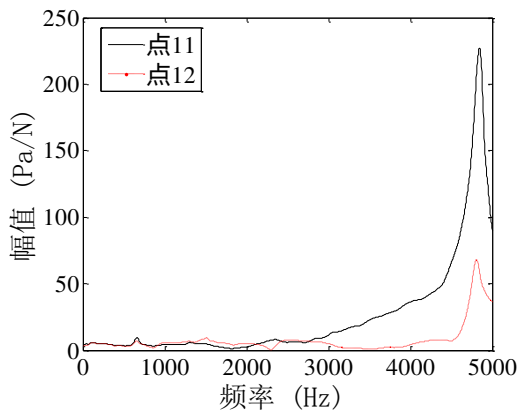
为局部脱空板壳的第一阶自振频率。因此，试验结果的形式符合理论预期。

由此可看出，在上述损伤工况的测试中，当激励点位于同一脱空区域内部的不同位置时，麦克风测得的声压频响函数曲线在某些特定的频率上均出现明显的峰值，而当激励点位于非脱空区域时，声压频响函数在这些频率处无明显的响应，由此可以区分测点是否位于损伤区域。

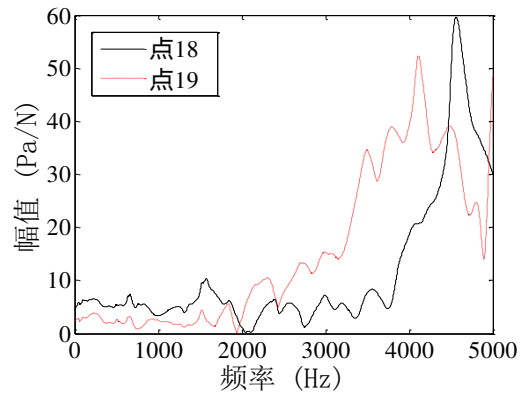
5. 工况 D_p 、 E_p 、 G_p 和 H_p ：



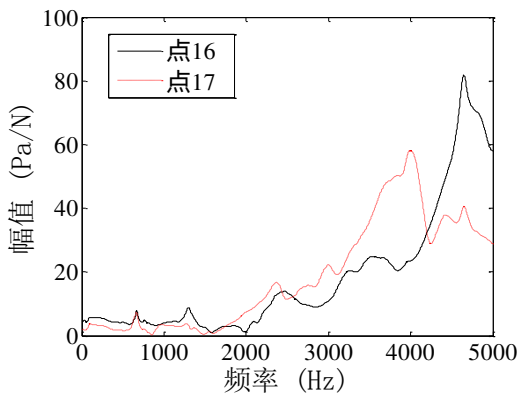
a) 各损伤工况测点示意图



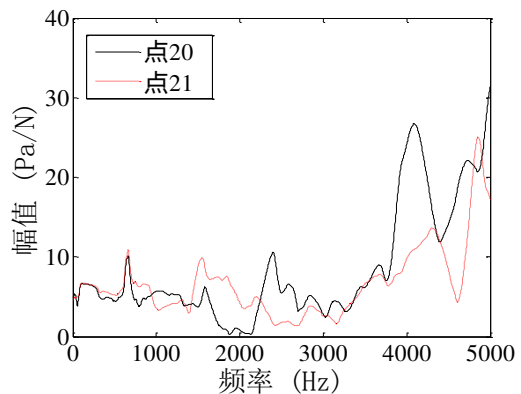
b) 工况 D_p 的各测点频响函数曲线图



c) 工况 E_p 的各测点频响函数曲线图



d) 工况 G_p 的各测点频响函数曲线图



e) 工况 H_p 的各测点频响函数曲线图

图 3.18 工况 D_p 、 E_p 、 G_p 和 H_p 的各测点频响函数曲线图

由图3.18可见，在 $60 \times 60 \text{mm}^2$ 损伤区域 $d=60 \text{mm}$ 损伤区域、 $30 \times 30 \text{mm}^2$ 损伤区域和 $d=30 \text{mm}$ 损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，脱空区域与非脱空区

域的测点声压频响函数的幅值大小接近，无法通过频响函数的区别识别出敲击点是否存在脱空损伤。

各工况的麦克风冲击共振测试激励点布置与频响函数的特征如表3.2所示。

表 3.2 钢-混凝土组合板构件的麦克风冲击共振测试结果

工况	尺寸 (mm)	脱空区中线测点布置	脱空区峰值频率 (Hz)
A _p	200×350	1/2, 1/4, 1/6点	880、1270、1950
B _p	150×150	1/2, 1/4点	1950
C _p	150×150	1/2, 1/4点	1600~2200
D _p	60×60	1/2点	—
E _p	30×30	1/2点	—
F _p	直径d=150	1/2, 1/4点	2160
G _p	直径d=60	1/2点	—
H _p	直径d=30	1/2点	—

综上所述，当损伤边长或直径不小于150mm时，可通过麦克风冲击共振测试的频响函数结果判断激励点处是否存在局部脱空损伤。当损伤的边长或直径小于或等于60mm时，麦克风冲击共振测试无法识别脱空损伤的存在。

3.3.2 钢管混凝土构件麦克风冲击共振测试

对钢管混凝土构件的8种工况分别进行麦克风冲击共振测试，使用钢锤头进行激励，将麦克风置于测点上空约50mm处，采样频率设置为51.2kHz，带宽25.6kHz。采样时间为0.1s，谱线数为16384，频率分辨率为1.5625Hz，测点布置如图3.19所示，各工况的测试结果整理如图3.20~3.24所示：

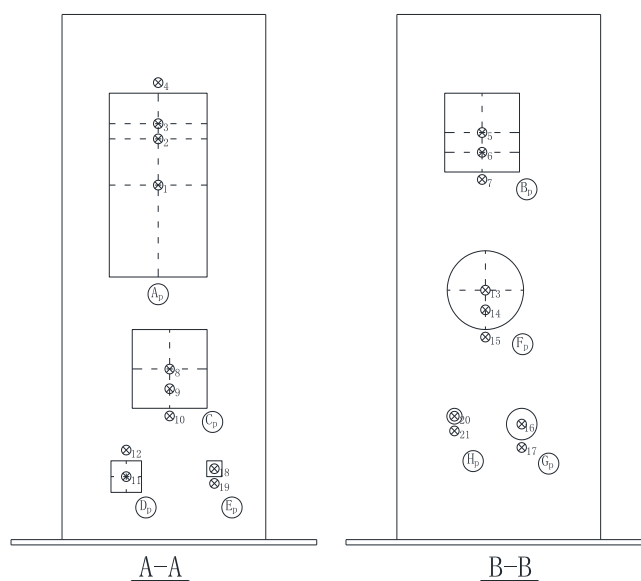
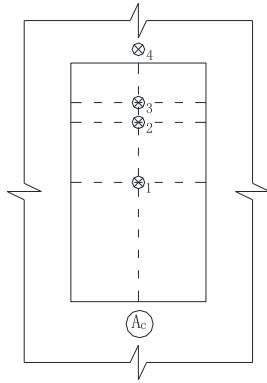
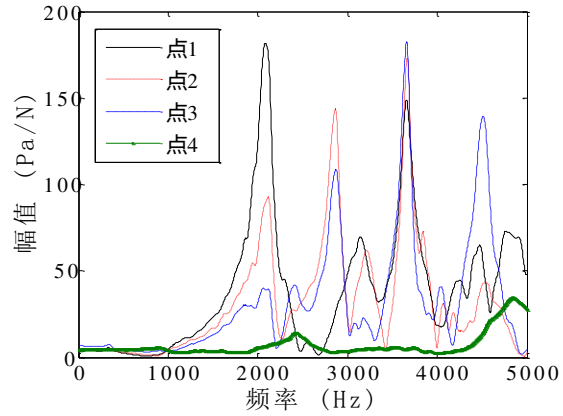


图 3.19 钢管混凝土构件构件测点布置图

1. 工况A_c:



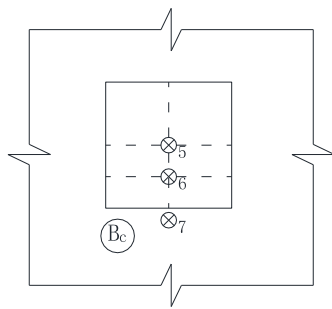
a) 损伤工况测点示意图



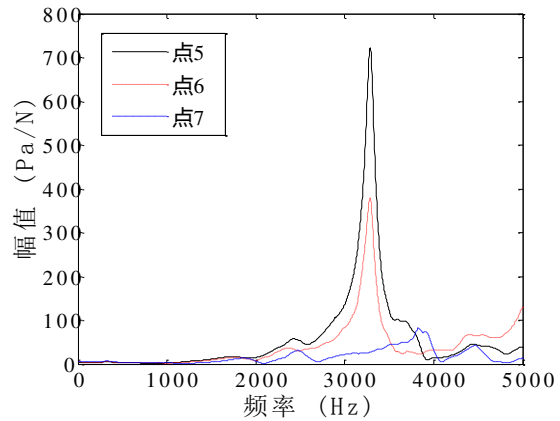
b) 声压频响应函数

图 3.20 工况 Ac 的各测点频响应函数曲线图

2. 工况 B_c:



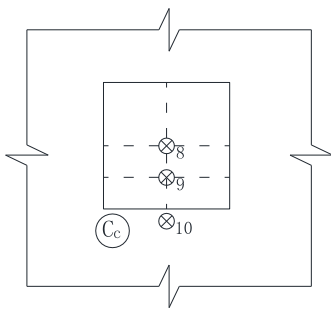
a) 损伤工况测点示意图



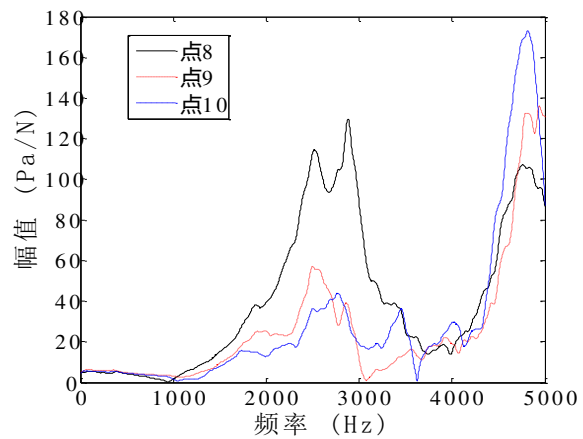
b) 声压频响应函数

图 3.21 工况 B_c 的各测点频响应函数曲线图

3. 工况 C_c:

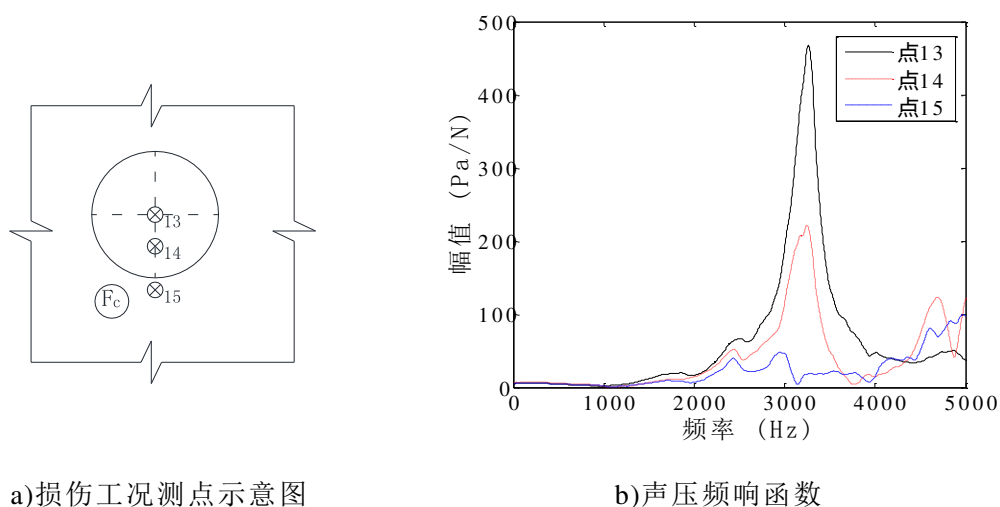


a) 损伤工况测点示意图



b) 声压频响应函数

图 3.22 工况 C_c 的各测点频响应函数曲线图

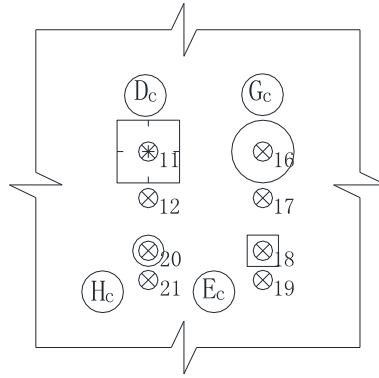
4. 工况 F_c :图 3.23 工况 F_c 的各测点频响函数曲线图

从图 3.20~3.23 可见，与钢-混凝土组合板构件的测试结果类似，在 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，各点的声压频响函数在 2090Hz 和 3660Hz 附近均出现了明显的峰值；在 $150 \times 150 \text{mm}^2$ ，脱空厚度为 15mm 损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，各点的声压频响函数在 3300Hz 处出现了明显的峰值；在 $150 \times 150 \text{mm}^2$ ，脱空厚度为 10mm 损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，各点的声压频响函数在 2500~3000Hz 的频段内出现了明显的峰值，但峰值频率不集中；在 $d=150 \text{mm}$ 损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，各点的声压频响函数在 3260Hz 的频段内出现了明显的峰值；而非脱空区域的声压频响函数在上述峰值频率上均无明显的响应，除了 $150 \times 150 \text{mm}^2$ ，脱空厚度为 10mm 损伤区域的响应，三个敲击点在 4800Hz 附近均出现了较大峰值。从实验结果无法区分脱空区域测点与非脱空区域的测点，推测试件内部 10 点附近的混凝土浇筑出现不密实的情况。

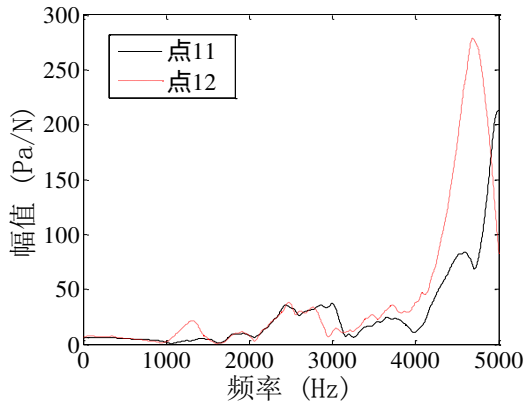
由于钢管混凝土构件的局部脱空损伤模型为开口柱壳模型，而其振动的模态振型暂时未知，推测各敲击点预期出现的固定不变的几个频率峰值，应为局部脱空板壳的某几阶自振频率。因此，试验结果的形式大致符合理论预期。

由此可看出，在上述损伤工况的测试中，当激励点位于同一脱空区域内部的不同位置时，麦克风测得的声压频响函数曲线在某些特定的频率上均出现明显的峰值，而当激励点位于非脱空区域时，声压频响函数在这些频率处无明显的响应，由此可以区分测点是否位于损伤区域。

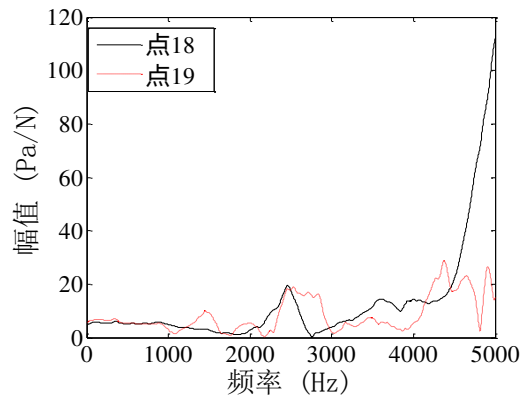
5. 工况 D_c 、 E_c 、 G_c 和 H_c :



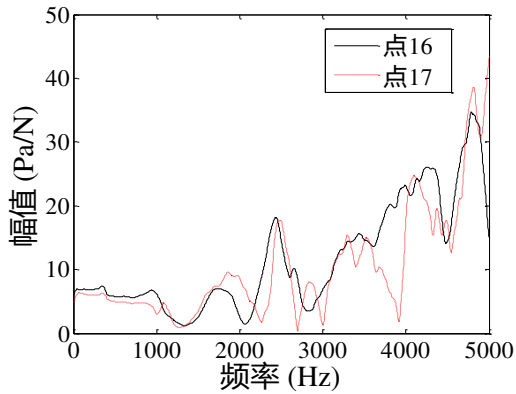
a)各测点示意图



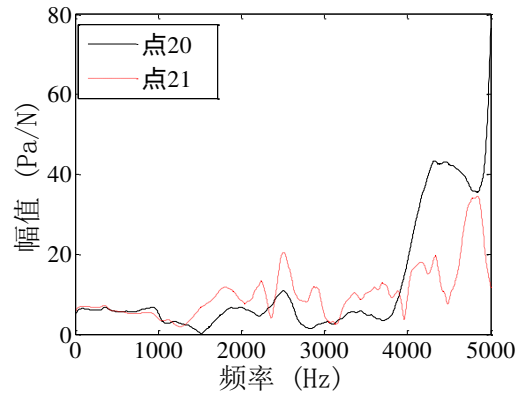
b)工况 D_c 的各测点频响应函数曲线图



c)工况 E_c 的各测点频响应函数曲线图



d)工况 G_c 的各测点频响应函数曲线图



e)工况 H_c 的各测点频响应函数曲线图

图 3.24 工况 D_c、E_c、G_c 和 H_c 的各测点频响应函数曲线图

从图3.24可见，在 $60\times 60\text{mm}^2$ 损伤区域、 $d=60\text{mm}$ 损伤区域、 $30\times 30\text{mm}^2$ 损伤区域和 $d=30\text{mm}$ 损伤区域的不同位置进行单点敲击单点拾振时，脱空区域与非脱空区域的测点声压频响函数的幅值大小接近，无法通过频响函数的区别识别出敲击点是否存在脱空损伤。

各工况的麦克风冲击共振测试激励点布置与频响函数的特征如表3.3所示。

综上所述，与钢-混凝土组合板构件的测试结果类似，当损伤边长或直径不小于 150mm 时，可通过麦克风冲击共振测试的频响函数结果判断激励点处是否存在局部脱空损伤。当损伤的边长或直径小于或等于 60mm 时，麦克风冲击共振测试无

法识别脱空损伤的存在。

表 3.3 钢管混凝土构件的麦克风冲击共振测试结果

工况	尺寸 (mm)	脱空区中线测点布置	脱空区峰值频率 (Hz)
A _c	200×350	1/2, 1/4, 1/6点	2090、3660
B _c	150×150	1/2, 1/4点	3300
C _c	150×150	1/2, 1/4点	2500~3000
D _c	60×60	1/2点	—
E _c	30×30	1/2点	—
F _c	直径 $d=150$	1/2, 1/4点	3260
G _c	直径 $d=60$	1/2点	—
H _c	直径 $d=30$	1/2点	—

3.3.3 试验结果分析

对不同面积、形状、厚度的损伤工况进行麦克风冲击共振法测试，从声压频响函数的结果可以看出，无论是钢-混凝土组合板构件还是钢管混凝土构件，当激励点位于局部脱空区域内时，麦克风冲击共振法的激励均能使其产生局部板壳自由振动的效果，麦克风测得的声压响应信号的频响函数中可以明显地识别前一阶或几阶频率峰值。当激励点位于非脱空区域时，麦克风所测得的频响函数幅值远远小于前述脱空区域的频响函数幅值。根据这一特性，可以初步判断激励点处是否存在局部脱空损伤。

从不同面积尺寸的损伤工况的声压频响函数峰值可以看出，损伤尺寸越大，其响应的一阶频率越低。对比边长与直径相同的正方形损伤与圆形损伤的测试结果，可以发现圆形损伤的冲击共振产生的频响函数频率峰值略大于正方形脱空损伤。

在直径或边长150 mm及以上的损伤区域进行测试，可以根据声压频响函数判断敲击位置是否位于脱空区域内。当局部脱空损伤的直径或边长不大于60 mm时，力锤敲击无法激振出板壳振动的模态，即不能识别脱空损伤。因此麦克风冲击共振测试识别钢-混凝土局部脱空损伤具有一定的损伤面积适用范围。

3.4 基于麦克风的声模态测试

为了进一步验证各损伤的麦克风冲击共振测试测到的声压频响函数是否为局部损伤板壳模型的振动频率，对钢-混凝土组合板构件与钢管混凝土构件的200×350mm²损伤进行麦克风脉冲锤击法测试，测量局部损伤的声模态。并用传统的基于加速度传感器的脉冲锤击法测量钢-混凝土组合板构件的加速度模态，将两者进行对比验证。

测试中，对损伤区域局部脱空板壳进行多点输入多点输出（Multiple Input Multiple Output, MIMO）的频域模态分析，利用复模态指数函数法（Complex Mode Indicator Function, CMIF）进行模态分析。其信号处理的方法为：在求得前述频响函数的基础上，对每个输入-输出测点的 H_1 频响函数估计进行奇异值分解，并识别各阶模态的极点，经过各阶模态的多项式拟合得到最终的模态参数，如频率、振型和阻尼比等。

3.4.1 钢-混凝土组合板的麦克风声模态测试

在钢-混凝土组合板构件的 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 损伤区域划分 5×7 的均匀网格，并将每个网格交界点编号，将三个麦克风传感器固定于点17、点23和点29，做35点输入3点输出的脉冲锤击法声模态测试，布点和麦克风摆放如图3.25所示。

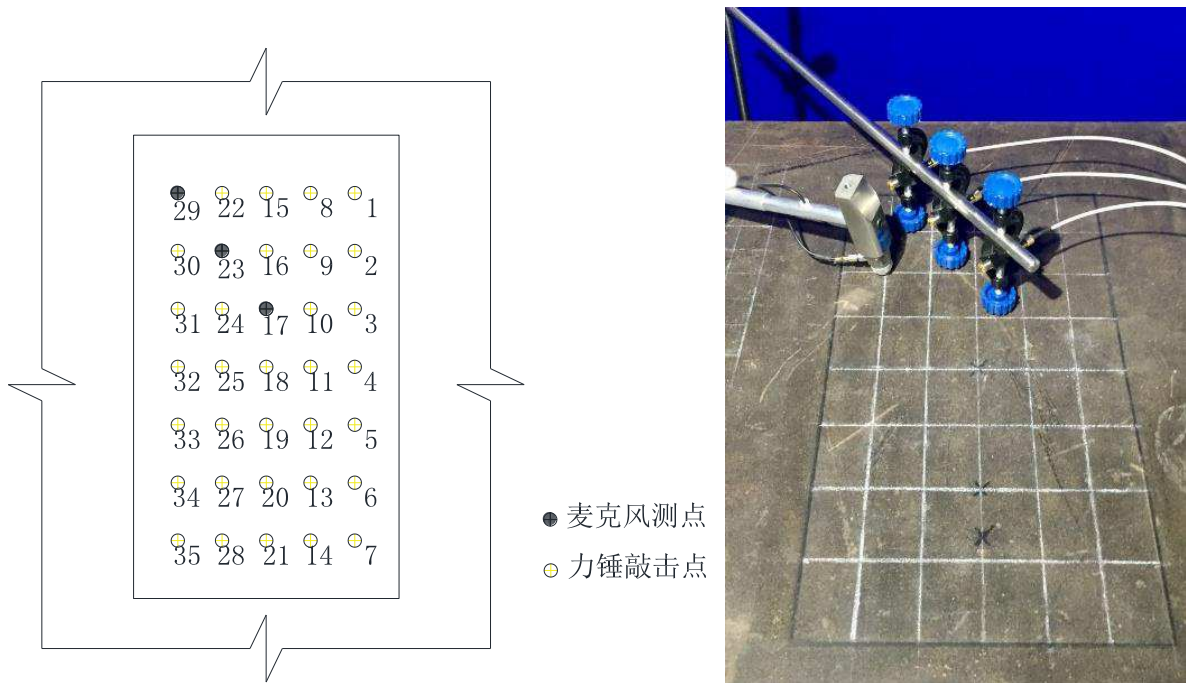


图 3.25 钢-混凝土组合板构件声模态测试测点布置图

麦克风以水平的角度置于17点、23点和29点的正上空50mm处，力锤依次敲击1~35点，采样频率设置为51.2kHz，带宽25.6kHz。采样时间为0.1s，谱线数为16384，频率分辨率为1.5625Hz。每个测点取重复敲击三次的频域平均，测试的CMIF峰值图如图3.26所示。

图3.26中，50Hz以内的峰值频率不在局部脱空损伤板壳模态的考虑范围之内，提取前九阶模态进行多项式拟合，得各阶模态的频率和阻尼比如表3.4所示。

前三阶振型图如图3.27所示。

由图3.27可见，局部脱空板的前三阶模态分别对应矩形板振动的1-1阶模态、1-2阶模态和1-3阶模态。

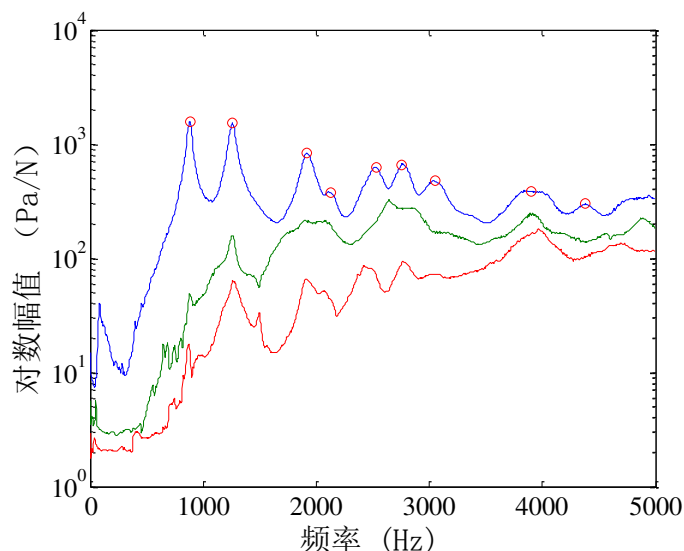


图 3.26 钢-混凝土组合板构件声模态测试 CMIF 峰值图

表 3.4 声模态测试的各阶模态频率及阻尼比

模态	频率 (Hz)	阻尼比 (%)
1	881.25	2.38
2	1259.38	2.34
3	1915.63	2.62
4	2125.00	3.55
5	2528.13	2.84
6	2756.25	2.56
7	3046.88	3.75
8	3896.88	3.75
9	4381.25	2.80

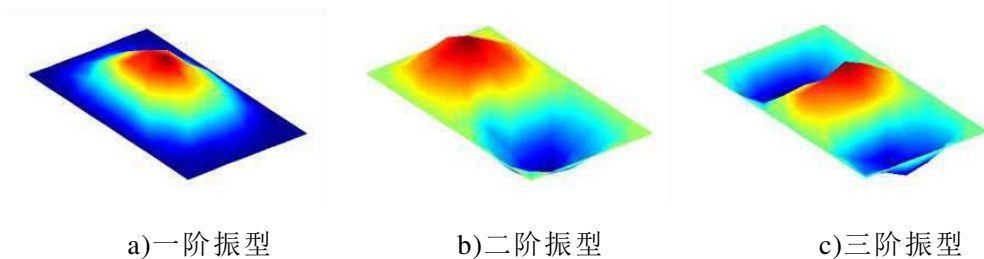


图 3.27 钢-混凝土组合板构件的前三阶声模态振型

3.4.2 钢-混凝土组合板的加速度模态测试

为了进一步验证麦克风声模态试验的可靠性，在钢-混凝土组合板构件的 $200 \times 350 \text{mm}^2$ 损伤区域划分 5×7 的均匀网格，并将每个网格交界点编号，将三个加速度传感器固定于点17、点23和点29，做35点输入3点输出的脉冲锤击法加速度模态测试，布点和传感器的摆放于上述麦克风模态试验保持一致。加速度传感器的

型号为PCB压电式加速度传感器333B40，三个传感器的灵敏度约为512mV/g。

与麦克风声模态测试的测试方案类似，力锤依次敲击1~35点，采样频率设置为51.2kHz，带宽25.6kHz。采样时间为0.1s，谱线数为16384，频率分辨率为1.5625Hz，。测得的CMIF峰值图如图3.28所示。

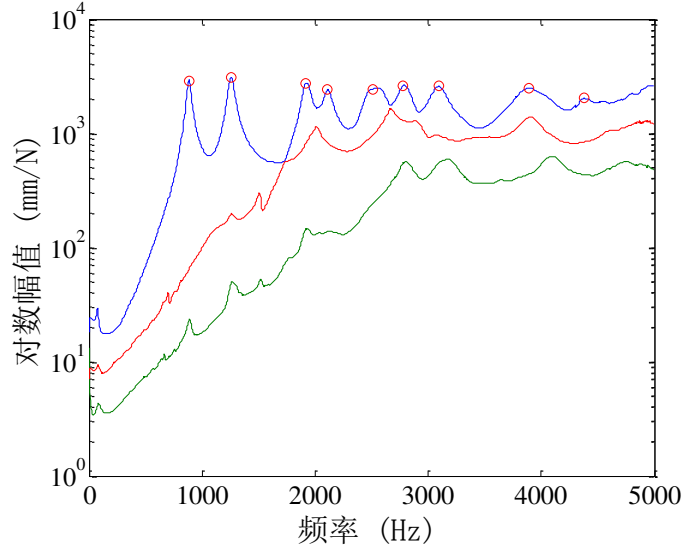


图 3.28 钢-混凝土组合板构件的加速度传感器模态测试 CMIF 峰值图

图3.28中，50Hz以内的峰值频率不在局部脱空损伤板壳模态的考虑范围之内，提取前九阶模态进行多项式拟合，得各阶模态的频率和阻尼比如表3.5所示。

表 3.5 加速度传感器测试的各阶模态频率及阻尼比

模态	频率 (Hz)	阻尼比 (%)
1	896.87	2.56
2	1275.00	2.33
3	1915.62	2.24
4	2106.25	3.76
5	2559.37	2.43
6	2806.25	2.34
7	3109.37	2.58
8	3884.37	4.09
9	4128.12	2.20

对比同一损伤区域的麦克风声模态频率与阻尼结果可知，二者结果十分接近，因此判断麦克风声模态的模态测试结果可靠。

前三阶振型图如图3.29所示。

由图3.29可见，局部脱空板的前三阶模态分别对应板的1-1阶模态、1-2阶模态和1-3阶模态。与麦克风声模态测试结果一致。