

学校代号 10532

学 号 S12011192

分 类 号 TU317+.1

密 级 公开



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

## 硕士学位论文

# 基于分片子结构综合的桥梁结构识别 理论与试验研究

学位申请人姓名 蒋运忠

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 周云副教授 易伟建教授

学 科 专 业 结构工程

研 究 方 向 结构识别与损伤诊断

论文提交日期 2015年5月31日

学校代号：10532

学 号：S12011192

密 级：公开

## 湖南大学硕士学位论文

# 基于分片子结构综合的桥梁结构识别理论与试验研究

国家自然科学基金青年基金(51208190)资助

教育部高校博士点基金青年基金(20120161120028)资助

湖南省自然科学基金(12554053)资助

湖南省优秀青年骨干教师培养计划资助

湖南大学青年教师成长计划资助

学位申请人姓名：蒋运忠

导师姓名及职称：周云副教授 易伟建教授

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：结构工程

论文提交日期：2015年05月31日

论文答辩日期：2015年06月05日

答辩委员会主席：李正农教授

Sub-structural Modal Flexibility Integration Theory and Experiment  
Research for Bridge Structure Identification

by

JIANG Yunzhong  
B.E. (Southwest University) 2012

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Structural Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Associate Professor ZHOU Yun, Professor YI Weijian

May, 2015



# 湖南大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提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-混凝土组合结构是桥梁结构中的一种常见形式,对其进行结构识别研究有着重要的意义。本文在总结之前研究成果的基础上,对一块实验室钢-混凝土组合桥面板和一座钢-混凝土组合结构桥梁进行静动载试验及子结构模态柔度识别研究。具体研究内容如下:

(1)在理论上总结了两种模态柔度计算方法,提出两种模态识别方法在本质上进行模态柔度的求解是一致的。利用两种方法相互转化的特点,可以得到结构的质量归一振型。同时,提出了利用分片测试获取结构整体模态柔度的理论。其过程是对子结构质量归一振型进行拼接得到扩充的整体振型,再利用拼接的振型计算结构的整体柔度矩阵。

(2)对一混凝土板有限元模型和一实验室钢-混凝土组合板进行脉冲锤击测试实验,表明单点输入单点输出(SISO),单点输入多点输出(SIMO)和多点输入多点输出(MIMO)等方法均能较为准确地获取模态柔度系数,并能通过子结构振型拼接的方法获得与静力方法相差很小的模态柔度矩阵。通过对一座实际桥梁的脉冲锤击法分片测试,验证了该方法在实际运用的可行性。同时,进行了随机振动测试下的振型质量归一研究。通过有限元数值试验和实验室的随机振动试验表明,基于集中质量矩阵假设,可以利用随机振动测试获取结构的模态柔度,其结果比实际结构要柔。

(3)基于模态柔度方法进行结构损伤识别研究。首先,设计了支座刚度变化、连接件损伤和横向支撑破坏这三种损伤工况用来模拟实际桥梁结构可能出现的损伤状况。通过对比结构损伤前后的模态柔度位移信息,成功实现了组合板的损伤识别。结果表明模态柔度是极好的损伤指标,其对损伤的敏感程度比频率和振型大得多。其次,通过静力加载造成试验板的静力损伤,并利用模态柔度方法成功地识别出静力损伤的位置和损伤程度。

(4)基于 Strand7 有限元软件和 Matlab 应用程序的 API 交互访问技术对钢-混凝土组合板结构进行有限元模型修正。首先,比较了三种不同建模方式的钢-混凝土有限元模型,结果表明壳-实体模型能够很好地反映出组合结构的真实静动力性能。然后,基于静动力数据对基准模型的物理参数进行灵敏度分析,选取灵敏度高的 4 个参数进行多参数模型校验。最后,基于获得的静动力试验数据和 Strand7 模型分析结果,通过引入 Teughels 损伤函数识别出了试验板的刚度退化分布。

**关键词:** 结构识别; 模态柔度; 子结构模态综合; 模型修正; 钢-混凝土组合结构

---

---

## Abstract

Steel concrete composite structure is a common form of bridge structure, and the research on its structure identification is of great significance. In this paper, static load tests, dynamic load tests and substructural modal flexibility identification were conducted on a laboratory steel concrete composite slab and a real steel-concrete composite structure bridge based on previous research findings. The specific research contents are listed in the following:

(1) Two methods to calculate modal flexibility were reviewed, although the approaches may appear distinct, in reality these two modal flexibility calculation methods are consistent. By using the characteristic of mutual transformation between two methods, the mass normalized mode shapes can be got. A method utilizing the substructural modal test to obtain the global flexibility is proposed. The global structural mode shapes can be assembled by putting together substructural mass normalized mode shapes, further the global modal flexibility can be extracted.

(2) Through a numerical test of simply supported reinforced concrete slab and a laboratory steel concrete composite slab test, it is shown that SISO, SIMO and MIMO impact tests can all generate reliable modal flexibility coefficients. The proposed integration strategy can estimate the global modal flexibility within a few percent of static flexibility. The possibility of utilizing substructural modal tests to get global modal flexibility has been verified by a real bridge test. Meanwhile, the mass normalized mode shapes got by the random vibration test was studied. A numerical test and a laboratory test showed that structural modal flexibility can be extracted based on lumped mass matrix assumption, and the tested flexibility result is bigger than the actual flexibility.

(3) Structural damage identification based on the modal flexibility was researched. Firstly, three damage cases were designed to simulate the damage situation on real bridge, which are removal of cross diaphragm, changes of boundary condition, damage of connectors. By comparing modal flexibility information before and after structural damage, the damage identification of steel concrete composite slab is easily achieved. Test results show that modal flexibility is a good damage index and flexibility coefficients are more sensitive to damage than either frequencies or mode shapes. Secondly, static damage of steel concrete composite slab was made

by the static load test, and the damage location and damage degree was successfully identified based on modal flexibility.

(4) Steel concrete composite structure model updating method based on Strand7-Matlab application programming interface (API) strategy was researched. Firstly, three different finite element model of steel concrete composite structure was compared in this paper. The results show that the shell-brick model can well reflect the real static and dynamic performance of composite structures. Then, sensitivity analysis for the physical parameters was studied based on the static and dynamic data of the benchmark model, and four parameters was selected for model updating. Finally, the concept of Teughels damage function was introduced to model identification. By comparison of test data and finite element analysis results, the stiffness degradation distribution of the tested slab has been identified.

**Key Words:** Structural identification; Modal flexibility; Substructural mode synthesis; Model updating; Steel concrete composite structure

## 目 录

学位论文原创性声明与学位论文版权使用授权书.....	I
摘 要.....	II
Abstract.....	III
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 研究背景、意义.....	1
1.2 结构识别.....	2
1.2.1 结构识别的定义.....	2
1.2.2 用于结构识别的振动测试方法.....	3
1.2.3 基于柔度矩阵的结构识别.....	4
1.2.4 基于模型修正的结构识别.....	5
1.3 组合结构动力识别的研究进展.....	6
1.4 本文研究的主要内容.....	6
第 2 章 基于模态柔度的分片子结构综合法.....	9
2.1 引言.....	9
2.2 模态柔度计算方法.....	9
2.2.1 模态柔度的定义.....	9
2.2.2 方法一：基于圆频率的模态柔度计算方法.....	9
2.2.3 方法二：基于频响函数 $\omega=0$ 的模态柔度计算方法.....	10
2.3 基于子结构综合识别模态柔度的理论和方法.....	11
2.3.1 子结构综合的理论依据.....	13
2.3.2 有重叠区域的子结构模态综合.....	15
2.3.3 无重叠区域的子结构模态综合.....	16
2.3.4 随机振动的振型质量归一理论.....	17
2.4 混凝土简支板的脉冲锤击数值试验.....	18
2.4.1 简支板有限元分析.....	18
2.4.2 模态参数识别方法.....	20
2.4.3 基于脉冲激励的模态参数分析.....	22
2.4.4 子结构综合模态柔度对比.....	25
2.5 混凝土简支板的随机振动数值试验.....	29
2.5.1 随机振动的有限元仿真试验.....	29
2.5.2 基于质量归一振型的模态柔度识别.....	31

2.6 本章小结 .....	33
<b>第 3 章 基于模态柔度分片子结构综合法的试验研究</b> .....	<b>34</b>
3.1 引言 .....	34
3.2 钢-混凝土组合结构的脉冲锤击测试 .....	34
3.2.1 试验对象 .....	34
3.2.2 动力试验装置 .....	35
3.2.3 试验工况 .....	36
3.3 试验过程及结果 .....	37
3.3.1 MIMO 全局测试 .....	37
3.3.2 不同测试工况的模态系数比较 .....	43
3.3.3 分片测试子结构综合结果 .....	43
3.4 钢-混凝土组合结构的随机振动测试 .....	45
3.4.1 随机振动测试工况设置 .....	46
3.4.2 随机振动测试模态参数识别 .....	47
3.4.3 模态柔度位移 .....	48
3.5 脉冲锤击法落锤装置的设计与制作 .....	49
3.5.1 国外脉冲锤击法锤击装置 .....	49
3.5.2 湖南大学落锤的设计与制作 .....	51
3.5.3 脉冲锤击法落锤的反弹控制 .....	51
3.6 钢-混凝土组合梁桥动力试验 .....	52
3.6.1 桥梁概况 .....	52
3.6.2 多参考点脉冲锤击法测试 .....	53
3.6.3 脉冲锤击测试的子结构综合 .....	55
3.6.4 随机振动测试 .....	58
3.7 本章小结 .....	60
<b>第 4 章 钢-混凝土组合板的损伤识别试验研究</b> .....	<b>61</b>
4.1 引言 .....	61
4.2 损伤模拟试验 .....	61
4.2.1 损伤工况设定 .....	61
4.2.2 试验模态分析 .....	63
4.2.3 不同损伤工况模态分析结果 .....	64
4.3 钢-混凝土组合结构的静动载试验 .....	67
4.3.1 试验目的 .....	67
4.3.2 ABAQUS 有限元模型 .....	67
4.3.3 混凝土和钢筋的材性试验 .....	71

4.3.4 分级加载工况 .....	72
4.4 试验现象及结果 .....	74
4.4.1 静载试验裂缝发展情况 .....	74
4.4.2 荷载-位移曲线 .....	76
4.4.3 荷载-应变曲线 .....	78
4.4.4 损伤过程中的试验模态分析 .....	81
4.4.5 模态柔度位移结果 .....	82
4.4.6 模态柔度位移与静载位移 .....	84
4.5 本章小结 .....	86
<b>第 5 章 钢-混凝土组合结构的模型修正研究</b> .....	<b>87</b>
5.1 引言 .....	87
5.2 基于模型修正的结构识别理论 .....	87
5.2.1 基于 Strand7 和 Matlab 交互访问的模型修正方法 .....	87
5.2.2 目标函数的确定 .....	88
5.2.3 模型修正的 Matlab 实现 .....	89
5.3 钢-混凝土组合结构的 STRAND7 有限元模型 .....	90
5.3.1 Strand7 有限元模型的建立 .....	90
5.3.2 有限元模型的静动力分析结果 .....	93
5.4 钢-混凝土组合结构的有限元模型修正 .....	95
5.4.1 修正参数的灵敏度分析 .....	95
5.4.2 参考状态下的模型修正 .....	98
5.4.3 损伤状态下的模型修正 .....	99
5.5 本章小结 .....	102
..... <b>结论与展望</b> .....	103
..... <b>参考文献</b> .....	105
..... <b>致谢</b> .....	111
<b>附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录</b> .....	<b>112</b>



# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景、意义

交通是国民经济的“命脉”，桥梁结构是现代交通网络的“咽喉”。随着国民经济的迅速发展和城市化进程逐步加快，国家大力投资发展交通事业，建立了现代化的交通网络，我国开展全球最大规模的桥梁工程建设，其数量、类型和跨径已跃居世界前列，成为名符其实的桥梁大国。由于受到车辆荷载的反复磨损冲击，以及暴雨洪水、风沙冰雪、日晒冻融等因素的侵蚀影响，此外，由于设计和施工缺陷，再加上交通量的增长以及超载事件的频繁发生，结构材料性质随着时间的增长发生衰变，结构性能发生退化，关键部件出现损伤，造成我国桥梁使用功能退化，甚至发生垮塌事故，人员伤亡和财产损失已有惨痛的教训<sup>[1-3]</sup>。2011年7月份，我国9天内发生4座桥梁垮塌和1座桥梁倾斜的事件，引起了人们广泛地关注和对结构安全的担忧<sup>[4]</sup>。为了随时掌握桥梁的安全状况，应加强对桥梁的健康监测和状态评估，同时通过有效方法来核实桥梁的承载能力<sup>[5]</sup>。

发达国家的桥梁运营情况值得我们借鉴，在美国共有604485座桥梁，超过33%的桥梁建造历史已经超过50年，其中43%的桥梁被鉴定为结构缺陷或功能丧失<sup>[6]</sup>。美国的高速公路桥梁结构维护中，最重要的部分是识别和减轻桥面板的功能退化，50%~85%的桥梁管理的经费被花费到修补和更换桥面板。

我国多数桥梁的建设时间不长，但已经产生了一些病害。截至2011年底，全国仅公路桥梁就达68.94万座，其中危桥9.18万座，占13.3%（2011年交通运输部统计公报）。据统计，自2001年起至2012年年底，全国投入危桥改造资金达438.8亿。在未来10~20年内，既有桥梁仍将出现大范围的桥梁工作性能退化，病害诊治任务依然艰巨。为了随时掌握桥梁的安全状况，应加强对桥梁的健康监测，同时通过有效的方法来核实桥梁的承载能力。与西方发达国家相同的是，我国当前的桥梁检测是以依靠视觉检查为主的测试方法。随着桥梁测试技术的发展，工程师意识到目前的桥梁结构检测评估决策方法不可靠，需要发展更加快速、更加可靠的桥梁结构性能评估动力测试方法。

在实际的桥面板动力测试中，通常需要中断桥面的交通，以便布设大量的传感器，因此需要耗费大量的人力物力和财力。如果能够进行分片子结构试验，即先测试桥面板某子结构区域的模态以及模态柔度，然后再测试其它区域的模态柔度，最后将各分片子结构综合起来，得到整个桥面板的模态特性及整体模态柔度，进一步对桥面板的性能进行评估，这样使得测试过程可以不中断交通，并节约传

传感器布设的个数，从而节省人力物力财力和时间。

相对于房屋建筑，桥梁结构的跨度一般比较大，组合结构是桥梁结构中的一种常见形式。相对于发展比较成熟的钢筋混凝土结构和钢结构，组合结构存在的时间还比较短。由于组合结构同时具有混凝土结构和钢结构这两种结构的优点，能够充分地发挥出构件中各个材料的力学性能，近几十年来已经得到广泛地研究和应用。在欧美等发达国家，钢-混凝土组合梁桥是最常见的一种桥梁形式。经过几十年的发展，我国组合梁桥的数量也很多，已成为一种十分广泛的桥梁形式。因此，本文的研究着重于钢-混凝土组合结构的动力特性和结构识别研究。通过理论分析结合实验室的实验和现场桥梁实验来分片子结构综合方法的可行性。

## 1.2 结构识别

### 1.2.1 结构识别的定义

对于桥梁结构的性能评估，需要进行结构识别。“结构识别”(St-Id)的概念是由 Liu 和 Yao<sup>[7]</sup>在 1978 年最先提出来的，它被 Doebling 等<sup>[8]</sup>定义为“利用试验数据校验后的修正模型来预测与参数相关的结构反应”。



图 1.1 结构识别六步圆

经过 30 年的发展，结构识别成为工程力学界和土木工程界的一个积极和富有活力的研究方向，结构识别的概念已经被 ASCE St-Id of Constructed Systems Committee 所接受，结构识别的范式被描述为理论-试验-决策的六步综合圆<sup>[9]</sup>如图 1.1 所示，它包括：(1)通过观察结构对象建立总体概念；(2)建立初始有限元模型；(3)进行结构实验；(4)分析、验证和阐述测试数据；(5)模型校验和参数识别；(6)利用校验的模型进行决策和预测。2011 年，Brownjohn 等<sup>[10]</sup>对基于振动的结构监控用于大型土木工程结构并成功辅助业主支持的例子进行了总结，另外 ASCE St-Id Committee<sup>[11]</sup>提出了最新的结构识别进展报告，对过去 30 年中结构识别的实验方法和成功的实例进行了总结。

结构识别 6 步圆中的每一步，都对结构识别的成功实现有着重要影响。而对于结构识别在实际桥梁中的运用，存在的主要挑战总结有以下几点：(1)通过对实际结构进行观察建立初始有限元模型，难以就实际结构的边界条件、物理参数等建立精确的模型。(2)无法做到全面地精细测试。如实际桥梁测试中受资金和场地条件的制约，通常只能在多跨中的某一跨进行测试。(3)测试过程无法避免外界噪声的干扰，同时受测试技术的限制，存在测试误差。(4)结构识别通常只能识别一部分模态振型，对于一些对损伤十分敏感的高阶模态振型的识别十分困难。(5)受实际结构的非线性影响，测试得到的频率和振型无法保证其可靠性。(6)无法对耦合模态进行分解。(7)利用实测数据对初始模型进行校验，难以保证校验后的模型符合结构的实际情况。(8)目前对损伤指标的可靠性还没有达成一致的认识，等等。

### 1.2.2 用于结构识别的振动测试方法

在结构识别的第 3 步中，控制试验包括荷载可控试验和荷载不可控试验。对于荷载可控的桥梁结构实验，主要包括静载实验，外部动力激励试验或者两者的结合，测试过程中对输入和输出信号均进行了采集。而对于荷载不可控的桥梁结构实验，主要采用风、车辆、地震等环境激励进行测试，测试过程只采集输出信号。对应于上述两种测试方法，应用于结构动力测试的激励方法也分为两大类，一种是采用外部激励方法，对应的模态分析手段称为实验模态分析；另一种是采用环境激励方法，对应的模态分析手段称为工作模态分析。1996 年 Doebling 等<sup>[12-13]</sup>和 2003 年 Sohn 等<sup>[14]</sup>对之前 15 年基于振动测试的试验应用进行了很好地总结和归纳。

利用结构随机振动的方法进行桥梁结构的模态测试需要很长的采样时间，且基于各态历经平稳随机过程的假设受到激励源频率成分的影响，对刚度较大的中小型桥梁进行工作模态分析得到的模态测试结果离散性较大，仅仅能得到虚拟频响函数(Pseudo-FRF)。外部激励试验是一种强大的实验工具，它不但能提高激励的信噪比，也能获得真实的频率响应函数。不同的外部激励方法包括偏心质量激振器测试<sup>[15]</sup>，电动激励器测试<sup>[16]</sup>，瞬态释放测试<sup>[17]</sup>，多参考点脉冲锤击激励(Multiple Reference Impact Test, MRIT)<sup>[18-20]</sup>和步进式松弛激励<sup>[21]</sup>等等。其中 MRIT 则能够快速有效地在桥梁上实施，并且能够得到重复性较好质量较高的真实频率响应函数(FRF)，因此得到广大工程师和研究者的欢迎。

利用单参考点激励进行模态测试，由于结构振动时会产生能量耗散，不同位置处的振幅存在较大差异，输入点处可能会表现出微小的非线性，且其频响函数矩阵的每一列需要独立确定，测量误差较大。利用多参考点激励，可以使输入点处的振幅变得更均匀，减小了非线性因素的影响，频率响应函数矩阵中的不同列

和不同行可以同时确定，提高了频响函数的一致性，因此其测得的频响函数的准确性较高<sup>[22]</sup>。

从1980年开始，Drexel DI3研究所的A. Emin. Aktan教授和Cincinnati结构动力学实验室David Brown教授领导的团队开始利用多参考点脉冲锤击测试进行了一系列的桥梁试验<sup>[23-28]</sup>。脉冲锤击法相比随机振动法最大的优势在于能够获得模态质量，Aktan教授等人利用锤击法进行模态分析进而得到桥梁上部结构的模态柔度，并发现柔度以及柔度的变化能成为桥梁结构和性能评估的极好指标。根据MRIT激励点和拾振点的数目，它被分为单输入单输出(Single Input Single Output, SISO)、单输入多输出(Single Input Multiple Output, SIMO)、多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)和多输入单输出(Multiple Input Single Output, MISO)四种类型。

### 1.2.3 基于柔度矩阵的结构识别

利用动力测试获得结构的基本模态信息，对比结构在损伤前后的模态信息变化，能够有效地识别出结构的损伤，而用于损伤识别的这些模态参数称为损伤指纹。一些常用的动力损伤指纹主要有频率、阻尼比、振型、模态应变能、模态柔度、模态曲率等。1992年，Raghavendrachar和Aktan<sup>[29]</sup>第一次将模态柔度作为结构识别的状态指标，通过对一座实桥进行脉冲锤击测试，发现模态柔度是一个很好的结构损伤指标。1994年，Pandey等<sup>[30]</sup>对几个数值算例和一个简支梁结构进行动力实验和数据分析，发现只要获得结构的前两阶模态，就能利用模态柔度实现对结构损伤位置和损伤程度的判断。1994年，Allbright<sup>[31]</sup>对预应力混凝土梁结构进行静动力试验，比较了模态柔度矩阵与静力柔度矩阵之间的差别。1999年，Zhao等<sup>[32]</sup>分析了多种损伤指纹对结构损伤的敏感程度，发现模态柔度比模态频率、模态振型对结构的损伤更加灵敏。2003年，孙国等<sup>[33]</sup>通过对比连续梁结构柔度矩阵对角线上元素的差值来识别结构的损伤状态。2006年，Catbas等<sup>[34]</sup>介绍了实际结构模态柔度提取的手段，将基于柔度矩阵的结构识别在实际应用中进行推广。2009年，李永梅等<sup>[35]</sup>进一步发展了利用模态柔度曲率识别结构损伤的方法，发现柔度曲率对损伤的灵敏度更高。2011年，Yang等<sup>[36,37]</sup>提出一种新的柔度分解公式，建立结构刚度扰动参数和柔度扰动参数之间的关系，采用快速的反演算法对结构损伤进行识别，该方法只需经过一次计算即可得到较好的结果。

以往基于模态柔度的结构识别研究，一些有意义的结论总结如下：(1)模态柔度比传统的固有频率、振型对结构损伤具有更高的灵敏度，并且利用模态柔度能够获得结构在荷载下的位移，可以作为静载实验的有力补充；(2)模态柔度识别中一般只需要前面的少数几阶模态，因此在实际测试中能够方便地实现；(3)动力测试获得的模态柔度矩阵是结构真实模态柔度矩阵的一个子集，动力测试手段只能

获得结构拾振点位置的柔度系数，而没有布置拾振点的其他位置的柔度则无法获得；(4)利用模态柔度方法能够获得结构损伤的位置信息，但该方法存在着不确定性，因为模态柔度本质是结构的位移影响系数，而位移是一个累加变量，位移最大的位置并不一定是结构损伤最严重的位置。

## 1.2.4 基于模型修正的结构识别

在对桥梁进行静动力试验的基础上，利用有限元模型修正的方法进行结构物理参数识别，从而进行损伤诊断。其基本的思想是建立目标函数使测试实验结果与理论计算结果相互匹配。而对于大型桥梁结构的有限元模型修正，其应用受到了很大的限制，这是由于各种方法和理论都局限于有限元动力方程，完整的或者缩聚的质量矩阵和刚度矩阵一般很难列出，且与理论模型有着一定的差距。因此，成功地应用模型修正理论仅仅停留在自由度较少的简单结构或实验室模型结构，而对于大型复杂桥梁结构如斜拉桥、悬索桥等的自动识别应用却十分困难。

修正有限元模型使其与测试结果相匹配可以通过手工调整数据或自动有限元模型修正的方法。2000年，Brownjohn等<sup>[38]</sup>证明了手工调整技术可以成功地应用于模型修正。2007年，Daniell Wendy等<sup>[39]</sup>使用系统的手动调整技术对一座三维斜拉桥进行了修正。2001年，Zhang等<sup>[40]</sup>使用有限元模型修正技术对 Kap Shui Mun 桥进行了深入的灵敏度研究来证明不同结构参数对所关心模态的影响。由于手工调整数据的局限性，有学者开始探索利用计算机编程来调用商业有限元程序以实现交互的桥梁结构有限元模型修正研究。许多商业计算机软件也有能力与其它分析软件交互使用，如 Fortran、C++、Matlab 等。2005年，Deng等<sup>[41]</sup>利用计算机辅助的模型修正系统(CAMUS)来进行高层结构的有限元模型修正。2008年，Scott<sup>[42]</sup>利用有限元软件 OpenSees 来进行参数修正以及反应灵敏度识别以支持可靠度、优化和系统识别方面的研究。2009年，Wei等<sup>[43]</sup>利用 ABAQUS 和 C++软件的交互进行了有限元模型修正的优化研究。2009年，Hua等<sup>[44]</sup>利用 ANSYS 和有限差分方法进行灵敏度分析。2011年，Jafarkhani等<sup>[45]</sup>在 NASTRAN 有限元软件中建立初始模型，利用自回归滑动平均模型触发模型修正程序，并基于演化策略进行结构损伤识别研究。2012年，Ribeiro等<sup>[46]</sup>利用 ANSYS、Matlab 和 Oplislang 三个软件的交互对模型参数进行修正，采用遗传算法得到其最优解，并基于模态应变能对模型参数进行配对。2013年，Song等<sup>[47]</sup>利用 Matlab 程序对钢-混凝土剪力墙的 OpenSee 初始模型进行非线性模型修正研究。2014年，Sanayei等<sup>[48]</sup>利用参数识别系统(PARIS)对 SAP2000 有限元模型参数进行自动修正。

以往学者在处理大型复杂结构的模型修正问题时，往往只能在有限元软件中建立有限元模型，用正问题试算的方法来获取参数的灵敏度，从而寻找敏感参数，其局限性在于修正的循环迭代不能直接在有限元商业软件中进行。

### 1.3 组合结构动力识别的研究进展

在钢-混凝土组合梁结构的振动理论方面,国内外相关学者已经进行了较多研究。2000年, Biscontin 等<sup>[49]</sup>采用能量法对钢-混凝土等截面组合梁结构进行有限元数值振动分析,将数值结果与实验室振动结果对比,其结果可以判定出组合结构的损伤状态。2008年, Banerjee 等<sup>[50]</sup>从理论上推导出了钢-混凝土组合梁的弯曲刚度和扭转刚度,从而得到了组合梁的自由振动耦合方程,并利用编程进行求解。2009年, Faruk 等<sup>[51]</sup>采用铁木辛柯梁理论研究了组合梁结构的动力性能。2009年, Girhammar 等<sup>[52]</sup>将钢-混凝土组合梁看成欧拉-伯努利梁,分析了其振动微分方程的解。在国内,2000年,郭向荣等<sup>[53]</sup>推导了考虑混凝土板剪切变形下的组合梁结构振动方程,并结合一座实桥的动力试验验证了所提方法的正确性。2007年, Xu 等<sup>[54]</sup>利用铁木辛柯理论,分析了不完全抗剪组合梁结构的动力性能。2010年,戚菁菁等<sup>[55]</sup>研究了连接件剪切变形、界面相对滑移、连接件掀起效应等因素影响下的组合梁振动特性。

在组合结构的动力试验方面,国内外相关研究主要是通过动力指纹的变化来判定损伤是否存在以及损伤的位置。2002年, Morassi 等<sup>[56]</sup>进行了组合梁结构的栓钉损伤识别试验研究,试验过程中利用移除连接件旁边混凝土来模拟连接件损伤,并基于固有频率的变化来判定连接件的损伤。2004年, Dilena 等<sup>[57]</sup>分析了频率、阻尼和振型对组合结构连接件损伤的敏感程度。2005年,叶梅新等<sup>[58]</sup>对一座组合结构实桥进行有限元模拟,利用模态频率、模态振型、模态曲率等多种动力指纹进行损伤识别。2007年, Xia 等<sup>[59]</sup>利用频响函数构建了新的损伤评估指标,并利用一座实桥的动力试验进行验证。2008年, Ren 等<sup>[60]</sup>成功地实现利用小波能量变换法来识别连接件的损伤,其结果显示该方法能够十分有效地识别出结构的局部损伤。2009年, Liu 等<sup>[61]</sup>利用有限元模拟连接件的刚度下降,并基于曲率模态进行连接件损伤的判断和量化研究。2012年, Zhu 等<sup>[62]</sup>在实验室条件下利用可移除的栓钉来模拟损伤,并基于相对熵方法对结构进行识别研究,不同损伤状态下的振动试验结果表明该方法能够判断出损伤的存在。

由上可见,对于组合结构动力性能的理论研究已经有大量研究,而相关的结构识别研究则集中在对组合结构连接件损伤的研究。以往的研究多是数值仿真试验或实验室模型试验,对于现场桥梁实测数据的研究还比较少。目前,对组合结构损伤的判断,多数还处于判断损伤是否存在的阶段。对于损伤的定位和量化,需要进一步的深入研究。

### 1.4 本文研究的主要内容

本论文在国家自然科学基金青年基金(51208190)、教育部高校博士点青年基

金(20120161120028)、湖南省自然科学基金(12554053)、湖南省优秀青年骨干教师培养计划和湖南大学青年教师成长计划的资助下进行研究。结构识别涉及到多种学科的交叉,经过多年的发展,其基本理论已经十分成熟,但在理论的进一步深化及其实际应用方面还有很多问题有待解决。本文在总结和吸收之前的研究成果基础上,分别从理论和试验两个方面开展了结构识别的相关研究。在结构识别的理论方面,介绍了两种模态柔度计算方法,提出两种模态识别方法在本质上进行模态柔度的求解是一致的,能够相互转化。利用不同子结构的质量归一振型进行拼接可以得到结构的整体振型,并进一步得到全局结构的模态柔度。试验方面,主要进行了钢-混凝土组合结构的分片子结构动力测试和损伤识别试验,从试验研究角度来验证上述结构识别的理论和方法。本文具体的研究内容如下:

第1章为绪论部分,着重阐述了本文的研究背景意义以及国内外相关研究的进展情况。首先,介绍我国桥梁的安全性能现状,指出现有桥梁检测方法无法满足精确的桥梁安全评估和健康监控需要,因此基于结构识别理论的桥梁检测手段有着重要意义;然后,对结构识别的定义和实现方法进行了阐述,分别从模态柔度和模型修正这两个方面总结了国内外关于结构识别的相关研究。最后,总结了钢-混凝土组合结构结构识别的相关研究进展。

第2章为模态柔度及分片模态子结构综合的理论研究。针对现有两种模态柔度计算方法的一致性,提出一种基于分片测试的子结构模态柔度综合技术,即利用分片测试得到的子结构质量归一振型拼接得到结构整体振型,进一步获得全局结构的模态柔度。一块混凝土简支板的有限元仿真试验被用来验证子结构模态柔度综合算法的正确性。同时,为了将子结构综合技术推广到随机振动测试,提出了随机振动测试下振型质量归一的方法,并通过一个数值板的算例验证了该方法的正确性。

第3章为基于分片子结构综合技术的钢-混凝土组合板的模态柔度识别。通过一个实验室钢-混凝土组合结构的动力试验和一座实际桥梁的脉冲锤击分片测试试验,验证了利用子结构振型拼接的方法获取结构模态柔度矩阵的可行性。同时在实验室条件下,进行了随机振动测试振型质量归一的研究。通过一个实验室组合板和一座实际桥梁的随机振动试验表明,基于集中质量矩阵假设,可以利用随机振动测试获取结构的模态柔度,其结果比实际结构要柔。

第4章为基于模态柔度的组合板损伤识别。在实验室条件下对实际桥梁可能出现的损伤进行模拟,其主要研究工作包括多种损伤工况的静动载试验,多种响应数据的模态识别,静载位移与模态柔度位移比较和误差分析。

第5章为基于静动力数据的模型修正研究。首先,建立了钢-混凝土结构的3种有限元模型,对比研究建模方法的准确性。其次,利用静动力数据对钢-混凝土板壳-实体模型的物理参数进行灵敏度分析。然后,选取灵敏度较高的参数进行多

参数模型校验。最后，基于 Teughels 提出的损伤函数，对钢-混凝土组合板进行损伤状态下的混凝土刚度退化识别研究。

最后为结论与展望部分，概括全文的研究成果和主要结论，并指出本文研究的不足之处及未来研究方向。

## 第2章 基于模态柔度的分片子结构综合法

### 2.1 引言

基于多参考点的脉冲锤击法进行桥梁结构动力测试，能够获得结构的模态柔度信息，进而来补充传统的静力载荷试验。将模态柔度计算得到的位移与结构在静载试验下的真实位移进行比较，其结果可以作为判断桥梁结构线弹性条件状况及性能的重要参考依据。在实际桥梁结构的动力测试过程中，通常需要对桥梁进行全封闭测试，阻碍交通正常运行，加大了动力测试的成本。另外，桥梁结构一般跨度较大，要准确测出桥梁的模态振型，往往需要布设较密的测点。而用于桥梁动力测试的传感器一般比较昂贵，传感器的数量通常是十分有限。因此，利用分片子结构模态进行综合得到结构的整体模态，可以大大地降低桥梁动力测试的成本和时间。

### 2.2 模态柔度计算方法

#### 2.2.1 模态柔度的定义

柔度用于表征结构在单位力作用下的弹性变形能力，按照测试结构柔度的试验方法来分类，柔度可分为静力柔度和模态柔度这两种。所谓静力柔度，是指通过静力试验及静力分析方法获得的柔度；而模态柔度则是指利用模态试验及模态分析方法得到的柔度。模态柔度的概念最先由 Clough 和 Penzien<sup>[63]</sup>于 1975 年提出。利用多参考点脉冲锤击法等动力测试手段，可以提取出结构的模态柔度。理论上，只要有足够多的模态用于计算结构的模态柔度，就可以得到柔度的精确解。在不考虑测试误差的情况下，对于线弹性状态下的结构，其模态柔度值与静力柔度值是一致的。模态柔度的计算依赖于 MRIT 试验获取的动力模态参数，有两种方法可以被用于模态柔度的计算：(1) 方法一：基于圆频率和质量归一化振型计算模态柔度；(2) 方法二：基于频率响应函数拟合曲线的截距之和提取模态柔度。

#### 2.2.2 方法一：基于圆频率的模态柔度计算方法

把自然频率和模态振型变换为单位载荷下的柔度矩阵用以下的公式来表达，

$$f = \Phi \Omega^{-2} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} f_{1,1} & \cdots & f_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{n,1} & \cdots & f_{n,n} \end{bmatrix}_{n \times n} = \begin{bmatrix} \varphi^1(1) & \cdots & \varphi^m(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi^1(n) & \cdots & \varphi^m(n) \end{bmatrix}_{n \times m} \times \begin{bmatrix} \frac{1}{\omega_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{\omega_m^2} \end{bmatrix}_{m \times m} \times \begin{bmatrix} \varphi^1(1) & \cdots & \varphi^m(1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi^1(n) & \cdots & \varphi^m(n) \end{bmatrix}_{m \times n}^T \quad (2.2)$$

$$\text{其中,} \quad f_{i,j} = \sum_{k=1}^m \frac{\varphi^k(i) \varphi^k(j)}{\omega_k^2} \quad (2.3)$$

式中,  $[f]_{n \times n}$  为  $n \times n$  阶的柔度矩阵; 下标  $n$  代表结构的自由度数, 下标  $m$  代表模态阶数;  $\Phi$  为质量归一的振型矩阵; 而  $\Omega$  为模态圆频率平方的倒数按照降序排列的对角矩阵;  $\varphi^m(n)$  为振型矩阵中第  $m$  阶模态第  $n$  点的振型模态分量;  $f_{i,j}$  为柔度矩阵中第  $i$  行第  $j$  列的模态柔度系数,  $i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n$ ;  $\omega_k$  为第  $k$  阶模态的圆频率,  $k=1, 2, \dots, m$ 。

在实践中对于复杂的结构很难获得较为精确的质量矩阵, 因此难以获得质量归一的振型, 从而限制了该方法的应用。该方法的特点是, 对于一个  $n$  自由度结构, 无论使用 1 阶模态还是逐步扩大到  $m$  阶模态, 所得到的模态柔度均为  $n \times n$  阶。

### 2.2.3 方法二: 基于频响函数 $\omega=0$ 的模态柔度计算方法

由于质量矩阵信息未知, 通常很难直接从实验中获得。而模态质量系数可以直接从 MRIT 测量得到的频率响应函数(FRF)中提取出来。通常使用部分分式表达频率响应函数来拟合试验测试的频率响应函数, 如下式所示:

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^N \left[ \frac{A_{pqr}}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{A_{pqr}^*}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right] \quad (2.4)$$

式中,  $H_{pq}(\omega)$  为在第  $q$  点敲击第  $p$  点拾振的频响函数,  $j$  为虚数符号,  $\omega$  为频率值,  $\lambda_r$  表示系统的第  $r$  阶极点,  $A_{pqr}$  表示第  $q$  点敲击第  $p$  点拾振时第  $r$  阶模态的留数,  $A_{pqr} = Q_{Ar} \psi_{pr} \psi_{qr}$ , 其中  $Q_{Ar}$  为第  $r$  阶模态的模态比例因子,  $\psi_{pr}$  和  $\psi_{qr}$  分别为第  $p$  点和第  $q$  点第  $r$  阶模态的模态振型系数,  $*$  表示复数共轭。

利用模态参数估计算法<sup>[64]</sup>, 在  $\omega=0$  处计算自由度  $p$  和  $q$  点的频响函数, 得到<sup>[65]</sup>,

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^m \left[ \frac{\psi_{pr} \psi_{qr}}{M_{Ar}(-\lambda_r)} + \frac{\psi_{pr}^* \psi_{qr}^*}{M_{Ar}^*(-\lambda_r^*)} \right] \quad (2.5)$$

式中,  $H_{pq}(\omega)$  为第  $q$  点输入和第  $p$  点输出获得的频率响应函数;  $\lambda_r$  为第  $r$  阶极点;  $\psi_{pr}$  和  $\psi_{qr}$  分别为第  $p$  点和第  $q$  点第  $r$  阶模态的模态振型系数,  $M_{Ar}$  为第  $r$  阶模态的模态质量系数,  $M_{Ar}=1/Q_{Ar}$ 。

在有明确可测量的动力输入情况下, 结构激励和响应在频域上表达为频响函数, 模态质量系数可以直接从 MRIT 测量得到的频率响应函数中提取出来。在传

统的结构动力信号的测试中，为了保证振动测试的高精度，常利用加速度传感器测试结构反应，因此测试得到的频响函数为“加速度导纳”，而要计算模态柔度，则需要将“加速度导纳”转化为“位移导纳”。因此在计算频响函数的过程中，需要在频域中除以 $(j\omega)^2$ 。

上述方法存在一个问题，就是当 $\omega$ 接近等于0时， $(j\omega)^2$ 也无限趋近于0，这将导致加速度导纳除以 $(j\omega)^2$ 后变为无穷大，这显然是不合理的。为了解决这个问题，提出了频率响应函数曲线拟合的方法，对多个自由度的加速度频率响应函数进行拟合，分别提取出每个单自由度拟合曲线在 $\omega=0$ 时的截距，计算它们的截距之和，则可以获得多自由度体系的模态柔度，其柔度矩阵的表达式如下：

$$f = \begin{bmatrix} f_{11} = H_{11}(\omega=0) & \cdots & f_{1q} = H_{1q}(\omega=0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{p1} = H_{p1}(\omega=0) & \cdots & f_{pq} = H_{pq}(\omega=0) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

该柔度矩阵同样为静力柔度矩阵的近似，需要利用多个模态进行截断处理。通常低阶的模态对模态柔度贡献大，当有足够的测试模态被识别，则模态柔度趋近于静力柔度。

上述两种获取模态柔度方法的关键在于得到模态质量系数。只有在有确定的动力信号输入及相应输出的情况下，即通过 FRF 才能得到结构的模态质量，而 MRIT 又是获取 FRF 最方便快捷的途径，因此本文的研究大部分基于 MRIT 测试方法。

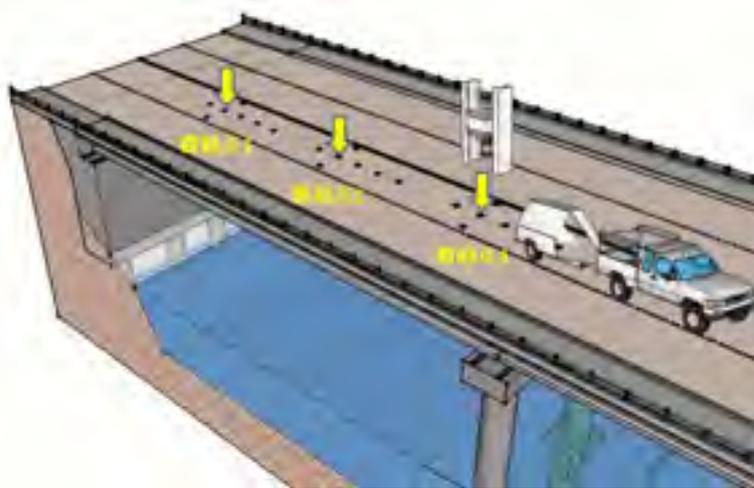
## 2.3 基于子结构综合识别模态柔度的理论和方法

子结构模态综合的思想最早源于上世纪 60 年代大型复杂结构的整体动力分析，Hurty<sup>[66]</sup>和 Gladwell<sup>[67]</sup>最早提出了模态坐标和模态综合等的相关定义，为子结构模态综合的研究提供了理论基础，早期的研究多运用于航天工程和机械工程等领域。子结构模态综合的实现过程主要有两步，第一步是“化整为零”，即先把一个结构分成若干个子结构进行测试，分别获得每个子结构的性能；第二步是“化零为整”，将每个子结构的测试结果进行整合，得到整体结构的性能。

目前在土木工程领域，运用子结构模态综合方法进行动力分析的研究相对较少。2012 年，Prader<sup>[68]</sup>进行了利用子结构测试的频响函数获取结构整体频响函数的研究，提出了有重叠测试区域和无重叠测试区域两种子结构测试手段下振型缩放系数的计算公式。Zhang<sup>[69]</sup>等利用边界点柔度系数相同的条件获取子结构模态振型的缩放系数，融合了分块振动测试的动力结果，得到结构的整体模态柔度，并利用一个实验室桁架结构验证了文中所提方法的准确性。

基于上述研究成果，本文对子结构模态综合的相关理论和方法进行了进一步的深入研究。分片子结构模态参数测试的基本思路是利用脉冲锤击法在桥面板上

进行局部分片测试，获得局部区域的模态柔度系数，然后将各局部区域的子结构柔度集成。脉冲锤击法的实施如图 2.3 所示。利用一轮载机动式落锤，该落锤的核心部分为一自由式落锤，落锤能从一定的高度自由落下，利用反弹控制装置将落锤刹住防止其反弹。该机动式落锤可以由牵引车辆拖拽至结构任何地方，车上可集成信号处理系统等。落锤从一定高度落下后能保持每次的锤击力基本相同，轮载式落锤下部有传感器安装臂，安装臂上可安装各种传感器如加速度、速度、位移或声学传感器等。轮载车辆沿着桥面板一条车道向前行驶，进行单点输入多点输出的锤击并获取锤击信号，测试完一点后，再移动到另一点进行锤击如图 2.3 所示，直至将整个桥梁测试完毕，最终将各个锤击点独自锤击识别得到的局部模态柔度整合得到整个桥面板的全局模态柔度。



(a) 钢筋混凝土桥面板测试假想图



(b) 轮载式落锤机构

图 2.3 轮载机动式落锤测试钢筋混凝土桥面板假想图

采用分片测试手段能够实现中小型桥梁结构健康状态的快速诊断和检测，在不进行桥梁交通的全封闭的情况下，每次测试仅利用车辆运行的 1~2 条机动车道，在桥梁上敲击 2~3 个激励点，每个点重复测试 3 次，利用桥面板上布置的传感器获得响应信号，在测试完成后又可更换到另外的 1~2 条车道上进行试验，最终通过子结构模态柔度综合方法组成整体模态。这样每条车道上测试时间不会超过 1 个小时，而使用无线传感器测试则不会超过半个小时，大大节约了人力物力

财力和时间,有限影响城市道路车辆的正常运营,一天可以进行3~4座桥梁结构的测试。结构的健康状况信息通过测试得到的信号进行内业分析,并建立桥梁结构测试结果的数据库,对桥梁结构进行定期地检测,能够了解结构状况的变化,并了解到结构的损伤和实效的发生,防范危险于未然。

### 2.3.1 子结构综合的理论依据

上一节介绍的两种模态柔度分析方法虽然在表达式上有所不同,但是能够相互转化,当模态向量为质量归一的模态振型时,其频率响应函数能写成类似于公式(2.7)的形式

$$H_{pq}(\omega) = \sum_{r=1}^m \left[ \frac{Q_r \varphi_{pr} \varphi_{qr}}{(-\lambda_r)} + \frac{Q_r^* \varphi_{pr}^* \varphi_{qr}^*}{(-\lambda_r^*)} \right] \quad (2.7)$$

式中:  $Q_r$  为第  $r$  阶模态的模态比例因子,  $Q_r$  与  $Q_{Ar}$  的区别在于,  $Q_r$  是振型质量归一化后的模态比例因子;  $\varphi_{pr}$  和  $\varphi_{qr}$  分别是振型质量归一化后的第  $p$  点和第  $q$  点的第  $r$  阶模态的振型系数; \* 代表复数共轭。如果结构是比例阻尼结构,  $Q_r$  与模态质量以及模态频率的关系如式(2.8)所示<sup>[70]</sup>,

$$Q_r = \frac{1}{2j\omega_r M_r} \quad (2.8)$$

式中,  $M_r$  为振型质量归一化后的第  $r$  阶模态的模态质量系数,  $M_r=1$ 。

当方程(2.5)等于方程(2.7)时,可以得到:

$$Q_{Ar} \psi_p \psi_{qr} = Q_r \varphi_{pr} \varphi_{qr} \quad (2.9)$$

式中:  $\psi$  在为未进行质量归一化的模态振型,  $Q_{Ar}$  为未进行质量归一化振型对应的模态比例因子。

在脉冲锤击法的信号分析和处理中,  $Q_{Ar}$ ,  $\psi_{pr}$  和  $\psi_{qr}$  为已知参数,能直接从模态分析中提取出来,而  $Q_r$  可以由公式(2.7)直接计算得到。当拾振点与输入点相同即  $p=q$  时,则该点称为驱动点或参考点,这时方程(2.9)可被写成方程(2.10),

$$Q_{Ar} \psi_{pr} \psi_{pr} = Q_r \varphi_{pr} \varphi_{pr} \quad (2.10)$$

联立(7)式和(9)式,可得到第  $p$  点的质量归一的模态振型系数,其计算公式如方程(10)所示,

$$\varphi_{pr} = \sqrt{2j\omega_r Q_{Ar}} \cdot \psi_{pr} \quad (2.11)$$

则对第  $r$  阶模态其余点的模态振型系数能直接从方程(2.9)中求得,如方程(2.12)所示,

$$\varphi_{q_r} = Q_r \psi_{p_r} / q_r Q_r \varphi \quad (2.12)$$

利用在参考点求解出的模态振型系数，从而获得其它点的相应振型系数，这样就能把多参考点模态分析中获取到的振型转化为质量归一的振型。获得了质量归一的振型之后，则可利用方法一求解出模态柔度。这种处理手段为两种模态柔度的计算方法之间建立一座桥梁，而且在处理的过程中，并未用到结构的质量矩阵，因为对于复杂结构而言，质量矩阵是很难事先准确获得。

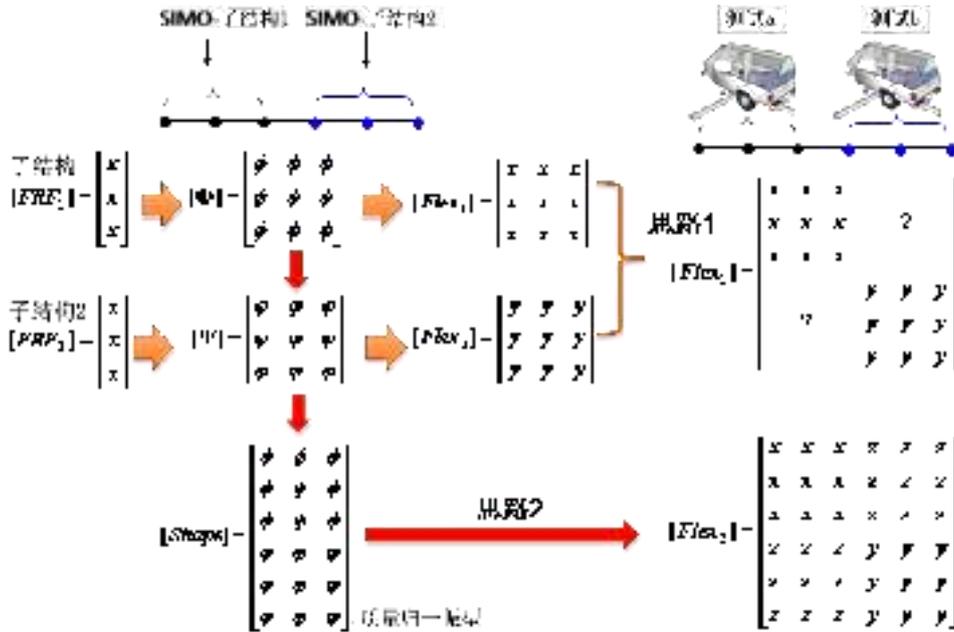


图 2.4 子结构综合示意图

利用分片子结构模态综合的策略进行桥面板测试时，将遇到以下的技术难题，即无论采用单点激励多点拾振（SIMO），还是多点激励多点拾振（MIMO），获得的频响函数矩阵的行数与传感器的拾振点的个数有关。对某点进行 SIMO 试验，能获得与拾振点数目相同行数的频响函数，并能得到与自由度数和模态阶数相同的方阵，这样得到的模态柔度也是方阵。要将两个子结构的方阵综合起来，常规的办法如图 2.4 思路 1 所示，图中  $FRF$  为频响函数矩阵， $Shape$  为振型矩阵， $Flex$  为柔度矩阵，该方法得到的整体柔度矩阵将出现右上角和左下角的缺失。为了解决该问题，则需要利用 2.2 节中的方法。首先利用多参考点脉冲锤击法方法二获取子结构的质量归一的模态振型，然后将两个子结构对应于同一阶的模态振型进行拼接，在振型上把子结构的维数扩充为  $n$  维，再利用公式(2.1)进行计算，最终得到一个  $n$  维的柔度满阵，该方法能够将直接拼接时缺失的右上角和左下角的矩阵填满。

### 2.3.2 有重叠区域的子结构模态综合

在实际桥梁结构的脉冲锤击测试过程中，通常是沿着桥面的一条车道或结构的中心线向前推进来进行动力测试。每一次测试能够得到桥梁结构特定区域的柔度，如节点柔度，主梁柔度，横向支撑柔度以及每一条车道的柔度等。利用相互独立的各次 SIMO 分片测试结果得到桥梁结构的全局模态，其测试工况可以设置为图 2.5 所示的两种情况。为了连接各个独立试验的测试结果，需要采用特殊的数据处理技术和方法来综合整体结构的模态参数，最终获得整个结构的模态柔度。为了使相邻两个子结构之间建立联系，可以在两次测试中选择一些共同的参考点，即两次测试之间有些测点是重叠的，这样就可以得到两次测试结果之间的一致性比例和相位信息。每一个子结构与相邻的子结构组合成一个更大的整体，通过多次组合，就能得到桥梁结构全长范围内的模态信息。

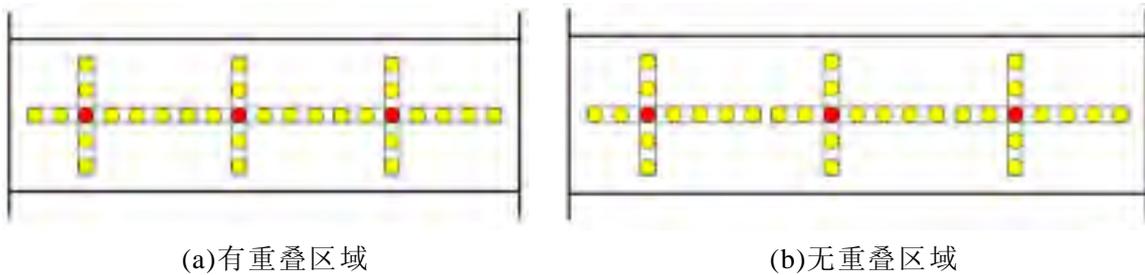


图 2.5 桥梁全局模态分片测试

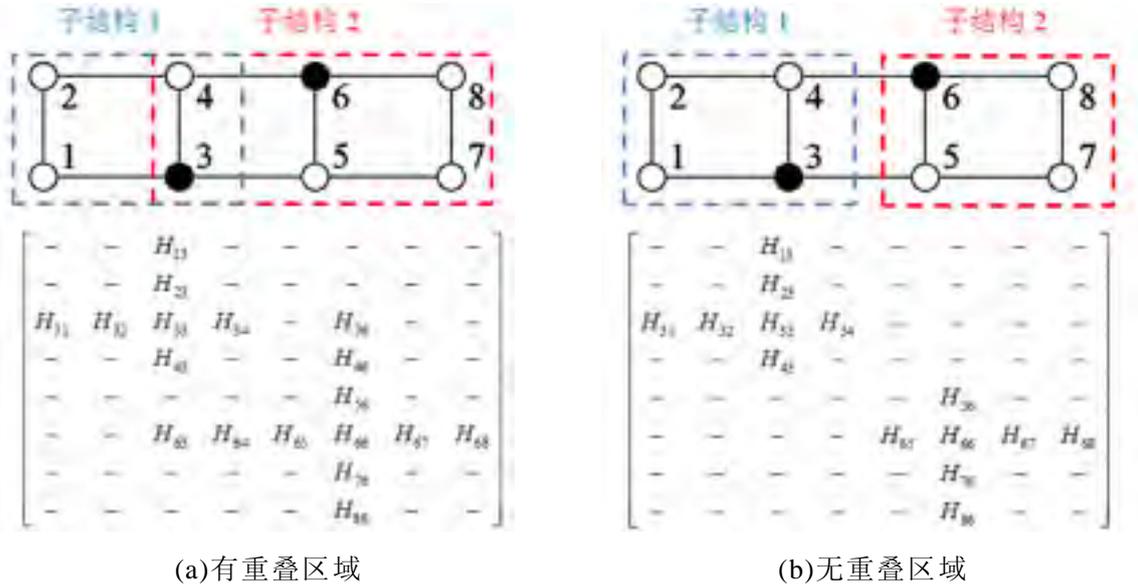


图 2.6 SIMO 测试的频响函数矩阵拼合

以一个 8 自由度简支板为例子，对比有重叠区域和无重叠区域下的模态参数拼接。有重叠区域的分片测试如图 2.6(a)所示，分别对子结构 1 和子结构 2 进行 SIMO 测试，点 3 和点 6 分别选作两次测试的激励点。测试得到的频响函数矩阵也在图 2.6(a)中所示，子结构的模态振型可以通过以下的方法拼接在一起形成整体结构的模态振型。通过两个子结构的共同测点 3 和 4，可以计算出两个子结构

振型拼接的模态振型比例因子。通过最小二乘估计，使两个振型拼接在一起，其振型比例系数的计算公式如公式(2.13):

$$\alpha = \frac{\begin{Bmatrix} \psi \end{Bmatrix}_r^{\text{子结构1}T} \begin{Bmatrix} \psi \end{Bmatrix}_r^{\text{子结构2}*}}{\begin{Bmatrix} \psi \end{Bmatrix}_r^{\text{子结构2}T} \begin{Bmatrix} \psi \end{Bmatrix}_r^{\text{子结构2}*}} \quad (2.13)$$

将子结构 1 选为主结构，对子结构 2 进行 SIMO 测试得到的模态振型，乘以模态振型比例系数  $\alpha$ ，使两个子结构的模态参数统一，得到的整体结构模态振型如公式(2.14)所示:

$$\begin{Bmatrix} \psi \end{Bmatrix}_r^{\text{全局}} = \left\{ \begin{array}{l} \begin{Bmatrix} \psi \end{Bmatrix}_r^{\text{子结构1}} \\ \begin{Bmatrix} \psi \end{Bmatrix}_r^{\text{乘以比例系数的子结构2}} \end{array} \right\} \quad (2.14)$$

对最终得到的全局模态振型进行相对相位检查，以使组合拼接得到的振型能够反映正确的整体结构振型。这种检查的过程，需要工程师对桥梁常见的模态振型有一定的理解，以寻找出合适、正确的子结构模态振型来进行拼接。

### 2.3.3 无重叠区域的子结构模态综合

在实际的动力测试过程中，受交通阻碍、仪器架设和测试时间等方面的限制，有可能无法使得每一次测试之间都有相互重叠的区域，即两个子结构之间可能没有共同的测点。这种情况下，两个子结构之间便无法通过检查重叠区域测点振幅、相位一致等条件来求得它们之间的模态比例系数。无重叠区域分片测试得到的频响函数矩阵如图 2.6(b)所示。由于没有重叠区域，该 8 自由度简支板的整体振型无法通过两个子结构的振型拼接获得。但进行脉冲锤击测试过程中，激励力一般不大，结构处于一种线性受力阶段。因此，仍然可以通过以下方法对无重叠区域分片测试的振型进行拼接组合成结构整体振型。

首先，对子结构 1 进行动力测试得到其频响函数矩阵，利用模态分析技术得到子结构 1 的留数矩阵，以激励点为点 2 计算出一个模态质量归一化比例因子，将留数矩阵乘以该因子得到模态振型矩阵。同理，对于子结构 2 利用相同的方法得到其留数矩阵，以激励点为点 6 计算出相应的模态质量归一化比例因子，将留数矩阵乘以该因子得到模态振型矩阵。将两个归一化后的子结构模态振型进行拼接，可以得到结构的整体振型。对于部分缺失的节点，可以采用曲线拟合或曲面拟合的方法，插入相应的节点振型系数，形成结构整体振型。

对于无重叠区域的子结构模态综合，需要对拼接的模态进行检查和判断。一种方法是依据子结构之间的相位或者结构先验模型的分析结果来判断拼接后的整体模态是否正确。

### 2.3.4 随机振动的振型质量归一理论

脉冲锤击测试的外部激励可以直接从采集仪器中拾取，进一步能够得到结构的模态质量系数，因此能够对模态分析获得的振型进行质量归一。对于一些大型桥梁结构，通常无法通过锤击激励来激发结构的模态，只能采用环境激励的办法对结构进行模态识别。为此，需要假定结构的质量矩阵，对环境激励下测试得到的模态振型进行振型归一。1996年，Doebbling<sup>[71]</sup>等总结了环境激励下振型质量归一的四种方法。对于质量矩阵 $[M]$  已知的情况下，Guyan凝缩质量归一法的计算原理如式(2.15)所示。

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] = [I] \quad (2.15)$$

式中， $\Phi$ 为质量归一后的模态振型， $I$ 为单位矩阵。将振型矩阵按振型系数展开，式(2.15)可以转化为式(2.16)的形式：

$$\Phi_{ij} = \frac{\varphi_{ij}}{\sqrt{\{\varphi_i\}^T [M] \{\varphi_i\}}} \quad (2.16)$$

式中， $\Phi_{ij}$ 为质量归一后第*i*阶模态在第*j*点的模态振型系数， $\varphi_{ij}$ 为未进行归一的模态振型系数。将一个无穷大自由度的结构假设为具有*n*个自由度的结构，式(2.16)可写成式(2.17)：

$$\Phi_{ij} = \frac{\varphi_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^n m_k \varphi_{ik}^2}} \quad (2.17)$$

由上述推导可见，只要能够获得结构的质量矩阵，就能根据公式(2.17)求解出结构的质量归一振型。由于本文主要研究板的结构识别问题，下面对矩形板弯曲单元的质量矩阵的获取进行了介绍。

以一个4节点的矩形板弯曲单元为例，节点编号为*i, j, k, m*。每个节点有3个自由度，分别为板的横向位移 $\omega$ ，转角 $\theta_x = \partial\omega / \partial x$ 和转角 $\theta_y = \partial\omega / \partial y$ 。则该单元的位移向量可以表示为：

$$[D] = \{\varphi_i, \theta_{x_i}, \theta_{y_i} | i \in \{i, j, k, m\}\} \quad (2.18)$$

板单元的刚度矩阵与利用静力有限元法获得的刚度矩阵相同。

板单元的质量矩阵可采用两种形式，分别为集中质量矩阵和一致质量矩阵。对于集中质量矩阵的情况，假设板单元的质量平均分布到单元的各个节点上，并忽略节点的转动自由度，则集中质量矩阵可表示为：

$$[M] = \frac{mA}{4} \begin{bmatrix} G & & & 0 \\ & G & & \\ & & G & \\ 0 & & & G \end{bmatrix}, \quad G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

其中，*m*是单位面积下的质量，*A*是该板单元的总面积。

对于一致质量矩阵的情况，则可以利用形函数矩阵 $[N]$ 获取，表达式为：

$$[M] = \int_v [N^T] m_0 [N] dv \quad (2.20)$$

其中， $m_0$ 是单位体积下的质量。通常，对于一个 $2a \times 2b$ 等厚度的矩形板弯曲单元，式(2.20)可转换为式(2.21)：

$$[M] = m \int_{-a}^a \int_{-b}^b [N^T] [N] dx dy \quad (2.21)$$

上式的求解可以利用高斯积分法进行计算。

## 2.4 混凝土简支板的脉冲锤击数值试验

为了验证上述子结构模态柔度综合计算方法的可行性，一块混凝土简支板被用来进行理论分析与试验仿真。设计一尺寸为 $10.97\text{m} \times 2.74\text{m}$ 的简支混凝土板，厚度为 $0.254\text{m}$ ，边界条件采用一边固定铰支座，一边滚动支座，该板的弹性模量为 $3.448 \times 10^5 \text{MPa}$ ，密度为 $2.4 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。

### 2.4.1 简支板有限元分析

本文采用SAP2000有限元软件建立一块简支板模型，采用壳单元进行建模，按照分析要求将有限元模型划分为36个区域，每个区域在细分成36个单元，总共1296个壳单元。混凝土材料强度为C30，建模过程不考虑结构的剪切刚度，混凝土板的有限元模型、区域划分及测点编号如图2.7所示。有限元分析过程主要定义了静力分析、模态分析和线性时程分析三种工况。



(a)有限元模型

(b)模型区域划分和测点编号

图 2.7 板的有限元模型、区域划分和测点编号

#### 2.4.1.1 静力分析工况

静力分析工况的目的在于获得结构的静力柔度矩阵，可以将其作为模态分析的一个参考柔度。静力分析过程中，依次在测点15~25定义一个单位竖向力，并依次进行静力求解，每次静力求解后输出测点15~25的竖向位移值。每进行1次静力求解，就可以获得结构静力柔度矩阵中的1列，经过11次静力求解后，可以得到结构的完整静力柔度矩阵如式(2.22)所示。

$$f_{static} = \begin{bmatrix} 2.045 & 3.567 & 4.603 & 5.204 & 5.415 & 5.281 & 4.853 & 4.178 & 3.306 & 2.287 & 1.168 \\ 3.567 & 6.643 & 8.768 & 10.015 & 10.484 & 10.266 & 9.458 & 8.158 & 6.464 & 4.474 & 2.287 \\ 4.603 & 8.768 & 12.055 & 14.047 & 14.867 & 14.660 & 13.571 & 11.744 & 9.326 & 6.464 & 3.306 \\ 5.204 & 10.015 & 14.047 & 16.907 & 18.224 & 18.172 & 16.946 & 14.739 & 11.744 & 8.158 & 4.178 \\ 5.415 & 10.484 & 14.867 & 18.224 & 20.212 & 20.510 & 19.339 & 16.946 & 13.571 & 9.458 & 4.853 \\ 5.281 & 10.266 & 14.660 & 18.172 & 20.510 & 21.379 & 20.510 & 18.172 & 14.660 & 10.266 & 5.281 \\ 4.853 & 9.458 & 13.571 & 16.946 & 19.339 & 20.510 & 20.212 & 18.224 & 14.867 & 10.484 & 5.415 \\ 4.178 & 8.158 & 11.744 & 14.739 & 16.946 & 18.172 & 18.224 & 16.907 & 14.047 & 10.015 & 5.204 \\ 3.306 & 6.464 & 9.326 & 11.744 & 13.571 & 14.660 & 14.867 & 14.047 & 12.055 & 8.768 & 4.603 \\ 2.287 & 4.474 & 6.464 & 8.158 & 9.458 & 10.266 & 10.484 & 10.015 & 8.768 & 6.643 & 3.567 \\ 1.168 & 2.287 & 3.306 & 4.178 & 4.853 & 5.281 & 5.415 & 5.204 & 4.603 & 3.567 & 2.045 \end{bmatrix} \times 10^{-5} (\text{mm/N}) \quad (2.22)$$

### 2.4.1.2 模态分析工况

模态分析工况的目的在于得到结构的模态频率和模态振型等信息。利用 SAP2000 有限元分析得到的模态振型是质量归一化振型，因此可以运用本文 2.2.2 节中介绍的方法一来获取结构的模态柔度矩阵。利用 SAP2000 进行模态分析时，将模态的类型定义为特征向量，其最大振型数目设置为 24。

表 2.3 模态分析得到的频率和振型

模态	振型矩阵 $[\Phi]$											MPF	频率 (Hz)
	点 15	点 16	点 17	点 18	点 19	点 20	点 21	点 22	点 23	点 24	点 25		
1 阶	0.085	0.165	0.233	0.285	0.318	0.329	0.318	0.285	0.233	0.165	0.085	0.79	3.63
2 阶	-0.164	-0.283	-0.327	-0.283	-0.163	0.000	0.163	0.283	0.327	0.283	0.164	0.82	14.56
3 阶	-0.049	-0.095	-0.135	-0.165	-0.184	-0.191	-0.184	-0.165	-0.135	-0.095	-0.049	0.87	20.88
4 阶	0.230	0.325	0.229	0.000	-0.230	-0.325	-0.230	0.000	0.229	0.325	0.230	0.90	32.85
5 阶	-0.097	-0.167	-0.193	-0.167	-0.097	0.000	0.097	0.167	0.193	0.167	0.097	0.90	43.56
6 阶	0.281	0.280	0.000	-0.280	-0.280	0.000	0.280	0.280	0.000	-0.280	-0.281	0.90	58.50
7 阶	0.140	0.197	0.139	0.000	-0.139	-0.196	-0.139	0.000	0.139	0.197	0.140	0.90	69.64
8 阶	-0.313	-0.160	0.228	0.278	-0.084	-0.322	-0.084	0.278	0.228	-0.160	-0.313	0.94	91.49
9 阶	0.175	0.173	-0.001	-0.173	-0.173	0.000	0.173	0.173	0.001	-0.173	-0.175	0.94	100.35
10 阶	0.324	-0.001	-0.320	0.003	0.322	0.000	-0.322	-0.003	0.320	0.001	-0.324	0.94	131.76

表 2.3 所示为模态分析工况运行求解后得到结构的前 10 阶模态信息，如模态频率、模态振型 $[\Phi]$ 及质量参与系数(Mass Participation Factor, MPF)。质量参与系数主要用于表征某一阶振型参与结构整体振动的程度，该值越大，表明该模态截断后对振动分析产生的影响越大。

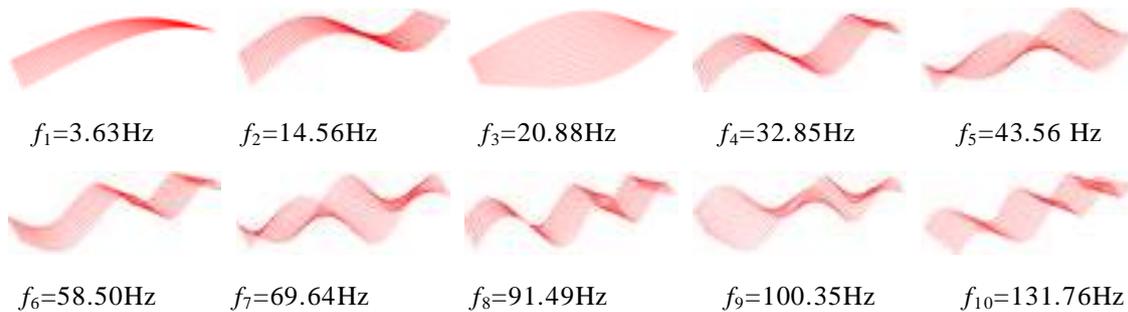


图 2.8 有限元前 10 阶振型图

表 2.3 中列出的 MPF 值是前面各模态振型参与系数的累加值，其分析结果显示，前面 3 阶模态振型的 MPF 值分别为 0.79、0.03 和 0.05，累加值为 0.87，这表明低阶模态，振型的质量参与系数较大，高阶模态振型的质量参与系数很小。因此在识别结构的振型模态时，对前几阶主要模态的准确识别显得尤为重要，有限元分析得到的简支板前 10 阶振型如图 2.8 所示。

### 2.4.1.3 线性时程分析工况

该工况的设置用于模拟实际结构的脉冲锤击测试试验。首先，在有限元软件中定义一个时程函数，单位力乘以该时程函数，则得到一个脉冲激励。运行时程分析工况，导出结构在脉冲激励下测点的加速度响应信号，然后根据 2.2.3 节介绍的方法二计算结构的模态柔度。时程分析过程中，结构的阻尼比设定为 0.01，采样频率 1000Hz，相当于每 0.001s 采集一个数据点，总的采样数据点为 20000。图 2.9 为线性时程分析工况获得的力脉冲信号和加速度响应信号。

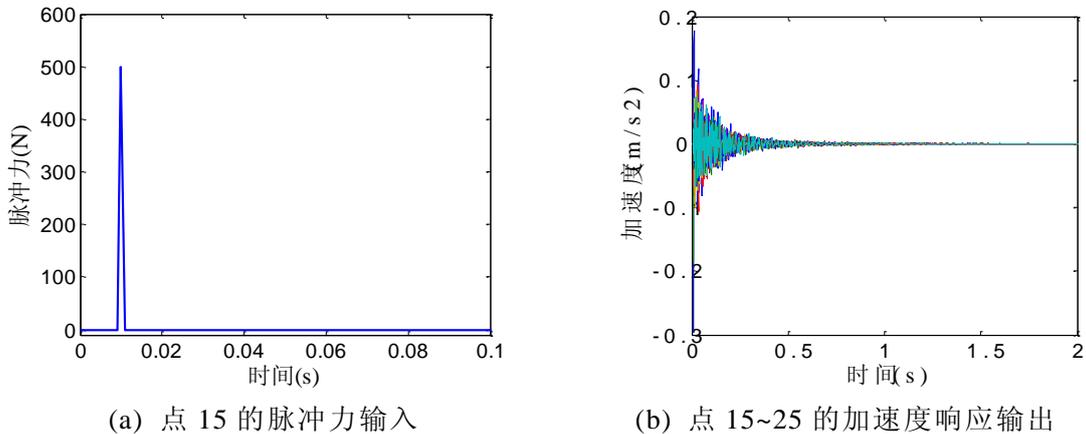


图 2.9 线性时程分析的输入输出信号

### 2.4.2 模态参数识别方法

结构识别六步圆中的第 4 步是进行数据分析与阐述。利用动力测试得到结构在线性状态下的力信号和加速度信号，对其进行实验模态分析，可以得到结构的模态参数信息。实验模态分析是综合运用线性振动理论、动态测试技术、数字信号处理和参数识别等手段，进行系统识别的过程，其核心是模态参数识别。按照分析过程中采用的基础信号进行分类，模态参数识别可分为频域模态参数识别和时域模态参数识别。复模态指示函数法 (Complex Mode Indicator Function, CMIF) 是以频域模态模型为根据的一种多自由度方法。利用 CMIF 法进行实验模态分析的过程如图 2.10 所示。

进行试验模态分析的第一步是检查数据信号。查看测试得到的激励信号和输出信号，将有明显错误的信号进行剔除。

第二步是对信号进行滤波。因为傅里叶变换能够分析的阶数是有限的，为了

获取实验所需的低阶频谱，通常可以利用一个低通滤波器将信号中不必要的高阶信号过滤掉。

第三步是对信号进行加窗。离散傅里叶变换是对信号的有限样本进行的，因此需要对测试得到的信号进行截断处理。而由于对原始信号进行截断，导致分析结果产生的误差，称为泄露。为了控制泄露产生的影响，需要对信号进行加窗处理。加窗只能使泄露得到抑制，但无法完全消除泄露的影响。常用的窗函数有矩形窗、Hanning窗、Hamming窗、Gauss窗和平顶窗等。对于脉冲锤击测试的动力信号，一般对力信号加矩形窗，对响应信号加指数窗。

第四步是对信号进行快速傅里叶变换(FFT)。快速傅里叶变换是离散傅里叶变换中的一种快速算法，该算法能够明显地减少计算机的运算时间，其前提是分析数据点的数目必须是 $2^N$ 。

第五步是对信号进行频域平均。频率平均的目的是为了随机噪声对测试信号产生的干扰。对于脉冲锤击测试，可能通过增加每个测点的锤击次数来实现平均；对于随机振动测试，可以将测试的响应信号分成 $n$ 个分段，分别对分段信号进行傅里叶变换，然后再进行频频平均。

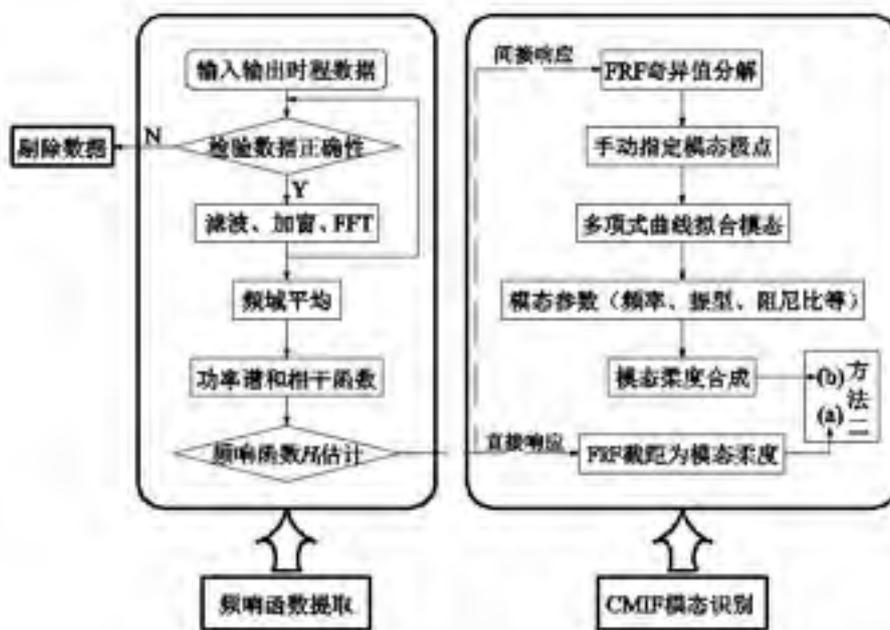


图 2.10 CMIF 法实验模态分析过程

第六步是进行频率响应函数估计。利用上面获得的  $G_{xx}$ 、 $G_{xf}$ 、 $G_{ff}$  功率谱及其相干函数，可以推导出结构的频率响应函数。对于荷载可控的振动测试，如脉冲锤击测试、激振器振动测试等，其频响函数为响应信号的自功率谱除以响应信号与输入力信号的互功率谱。而对于荷载不可控的振动测试，如随机振动测试等，由于无法知道测试过程中的力信号，因此需要假定一个参考点，将参考点看作测试过程中的输入信号。首先求取随机振动的响应信号的自相关函数，使随机信号

变成一个类似于脉冲信号的衰减信号。然后，利用测点的自动率谱除以测点与参考点的互功率谱，可以得到结构的频率响应函数。由于该频响函数并不是结构的真实频响函数，通常称之为伪频响函数(pseudo-FRF)。

通常频率响应函数有  $H_1$ 、 $H_2$  和  $H_v$  估计三种方法，它们的区别在于对信号附加噪声的数学处理。一般来说，当可以用  $H_v$  估计时，它优于  $H_1$  和  $H_2$  估计；如果无法使用  $H_v$  估计，对于输出信号有附加噪声或者输入信号之间相互独立时，采用  $H_1$  估计结果更好，而当输入信号有附加噪声时，则采用  $H_2$  估计结果更好<sup>[72]</sup>。

最后是利用 CMIF 方法进行模态识别。该方法在频率分辨率的精度之内估计结构的阻尼和固有频率，以及与之相对应的未经换算的模态振型，然后求取复数极点并进行模态比例换算。求解过程主要是利用峰值提取这一个过程，在奇异值曲线上的峰值点选取峰值，然后利用程序拟合曲线的方法进行模态参数识别。

### 2.4.3 基于脉冲激励的模态参数分析

#### 2.4.3.1 CMIF 法提取模态信息

在 Sap2000 中建立简支板的模型，对其中一个测点施加 1kN 的三角形脉冲力，力的持续时间为 0.002s，阻尼比取为 1%，采用 Newmark- $\beta$  法对板进行线弹性状态下的动力时程分析，得到结构各个输出点的加速度响应信号以及锤击输入点的力信号，即完成了一次 SIMO 数值测试。如果对模型中不同测点分别施加脉冲力，并利用动力时程分析得到其力信号和响应信号，即完成了一次 MIMO 数值测试。将数值试验得到的力信号和响应信号导出，然后进行信号分析，分析其 FRF 并进行模态参数提取，得到结构的频率、振型等动力信息，最后分别根据方法一和方法二计算模态柔度。

表 2.4 不同工况下模态柔度系数的比较

工况	输入点	输出点	模态柔度系数/(mm · N <sup>-1</sup> )
工况 1 SISO	16	16	6.743×10 <sup>-5</sup>
工况 2 SIMO	16	3, 16, 29, 42	6.571×10 <sup>-5</sup>
工况 3 SIMO	16	14~26 共 13 个点	6.400×10 <sup>-5</sup>
工况 4 MIMO	16, 17	15~18, 29, 42	6.571×10 <sup>-5</sup>
工况 5 MIMO	15~18, 29, 42	15~18, 29, 42	6.628×10 <sup>-5</sup>

设计了 5 种动力测试工况如表 2.4 所示，这些工况包括了各种 SISO，SIMO 和 MIMO 的情形，计算在第 16 点的模态柔度系数如表 2.4 所示，各阶模态柔度系数识别结果基本相似。在无噪声干扰的情况下，产生数据差别的主要原因是在结构的模态提取过程中，激励点和拾振点位于振型节点上，造成了部分模态的缺失。

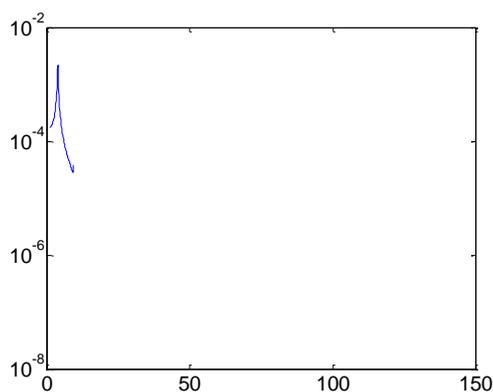


图 2.11 CMIF 峰值提取图

为了进一步验证 CMIF 法提取模态参数的可靠性，沿着板纵向的一条轴线进行了一次 MIMO 测试，作为子结构测试的一个参考工况。采用脉冲力锤击混凝土板，敲击点为 15,17,19,21,23,25 这 6 个点，拾振点为 15~25 这 11 个点，即为多参考点下的脉冲锤击测试。利用 CMIF 法进行峰值提取如图 2.11 所示。由图 2.11 提取得到结构的前 10 阶频率，和有限元分析结果对比如表 2.5 所示。由表 2.5 可以看出，利用 CMIF 法识别得到的模态频率与有限元软件分析得到的频率相差在 0.1% 以内，但阻尼比的误差则比较大，这是由于模态分析过程中对力信号和加速度信号进行了加窗，因此识别得到的阻尼比会比实际的要大。

表 2.5 前 10 阶模态的分析结果

阶数	CMIF		SAP 2000	
	频率(Hz)	阻尼比(%)	频率(Hz)	阻尼比(%)
1	3.6276	3.5734	3.6288	1.0000
2	14.5592	1.6196	14.5601	1.0000
3	20.8816	1.3337	20.8772	1.0000
4	32.8482	1.2758	32.8503	1.0000
5	43.5622	1.1378	43.5593	1.0000
6	58.4997	1.1579	58.5036	1.0000
7	69.6560	1.0667	69.6370	1.0000
8	91.4803	1.1058	91.4887	1.0000
9	100.3806	1.0074	100.3509	1.0000
10	131.7344	1.0773	131.7563	1.0000

采用 CMIF 模态分析方法得到结构的模态振型，利用 2.3.1 节介绍的振型质量归一方法，对模态振型进行归一，再利用 2.2.2 节的模态柔度计算方法，可以得到一个模态柔度矩阵。另外，利用 2.2.3 节的方法，也可以得到一个模态柔度矩阵。两种方法得到的结果与静力分析得到的柔度矩阵进行对比如图 2.12 所示。

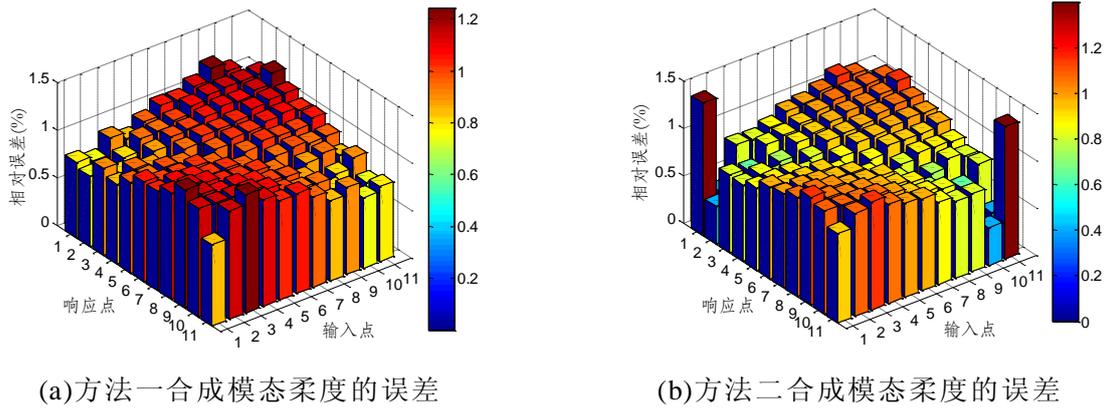


图 2.12 模态柔度与静力柔度的相对误差

图 2.12 清晰地反映出方法一和方法二计算的模态柔度与静力柔度的相对误差，两种方法得到的柔度矩阵误差均在 1.5% 以内。方法一计算模态柔度是基于圆频率和质量归一的振型进行计算，理论上利用无穷阶模态合成的模态柔度是精确解，其主要误差是高阶模态的截断误差。方法二通过频率响应函数拟合曲线的截距之和计算结构的模态柔度系数，其实质是方法一在实际运用中的转化。和方法一相类似，方法二合成模态柔度也是基于识别的前 10 阶模态，高阶模态的截断误差是主要误差。另外，频响函数曲线拟合以及模态参数识别过程中也会产生一定的误差，这是该方法比方法一误差稍大的原因。

### 2.4.3.2 模态柔度位移对比

结构在均布荷载作用下的位移变形通常称为 ULS(Uniform Load Surface)值，该值可以用于检验动力测试结果的准确性。在有限元仿真测试过程中，通常用均布集中力荷载来代替均布线荷载，即沿加速度测点位置处满布集中力荷载，集中力大小为 10kN，运行模型可得到结构在均布集中力荷载作用下的位移。同时，利用上节得到的柔度矩阵乘以力矩阵，也可以得到各个点的位移值。

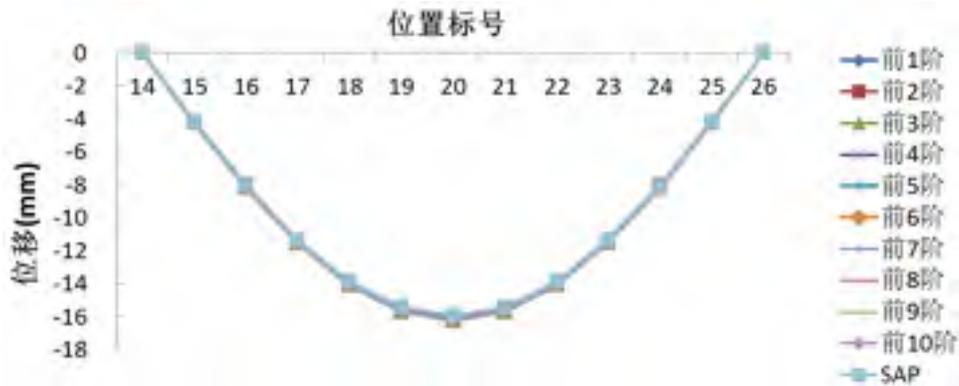


图 2.13 各阶模态合成得到的模态柔度位移

为了研究模态阶数对模态柔度的影响，将参与模态柔度合成的振型从前 1 阶至前 10 阶。分别利用 1 阶、2 阶至 10 阶振型，可以分别得到 10 个不同的柔度矩

阵。把这些不同的柔度矩阵与力矩阵相乘，则可以得到结构不同的位移值，其结果如图 2.13 所示。结果表明，各点利用模态柔度预测的位移值与有限元分析值的误差均在 1% 之内。由图 2.13 可见，第 1 阶模态对模态柔度位移预测的结果影响很大，其贡献值达到 98% 以上，而高阶模态的模态柔度位移值得影响很小，基本可以忽略。因此，在进行模态分析过程中，低阶模态的准确识别显得十分重要。

### 2.4.4 子结构综合模态柔度对比

为了验证分片子结构模态综合理论的可靠性，设计如图 2.14 所示的子结构综合工况，将结构沿着板纵向划分为 2 个子结构，子结构 1 分别为第 28 点输入，第 28~33 点输出，子结构 2 为第 34 点输入，第 34~38 点输出。

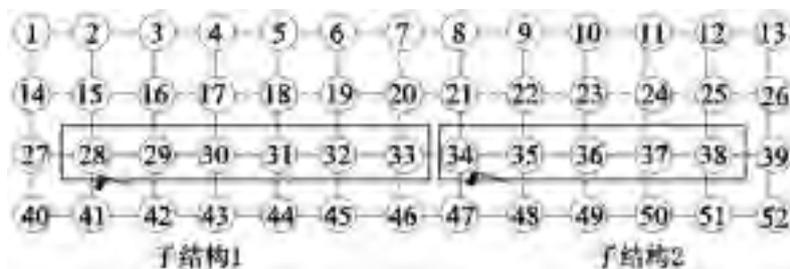


图 2.14 分片子结构测试工况

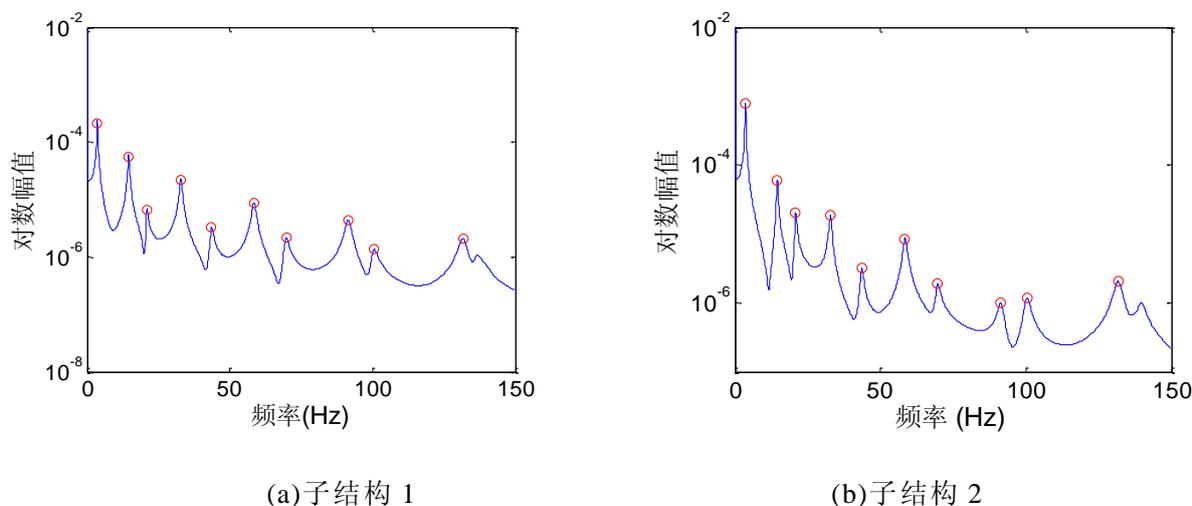


图 2.15 CMIF 模态峰值提取图

对子结构 1 和子结构 2 分别进行有限元脉冲锤击动力分析，将导出的时域信号进行模态分析，其各自的模态提取如图 2.15(a)和图 2.15(b)所示。采取 CMIF 峰值提取的方法进行模态参数的识别，识别得到的前 10 阶模态频率和阻尼比如表 2.6 所示，同时用 Sap2000 进行整体结构模态分析得到的频率也在表 1 列出。

利用子结构 SIMO 试验获取结构的模态之后，再利用子结构综合的方法将子结构的振型进行综合，得到的前 9 阶模态如图 2.16 所示，由图可见分段试验的模态拼接顺滑，与计算模态振型一致，可见该方法的准确性。

表 2.6 前 10 阶模态的分析结果

阶数	子结构一		子结构二		Sap2000	
	Freq(Hz)	Damp(%)	Freq(Hz)	Damp(%)	Freq(Hz)	Damp(%)
1	3.6278	3.5881	3.6276	3.5767	3.6288	1.0000
2	14.5593	1.6028	14.5565	1.5270	14.5601	1.0000
3	20.8796	0.9972	20.8793	1.2158	20.8772	1.0000
4	32.8473	1.2793	32.8477	1.3081	32.8503	1.0000
5	43.5787	1.0182	43.5703	1.0836	43.5593	1.0000
6	58.4960	1.1669	58.5003	1.1412	58.5036	1.0000
7	69.7198	0.9453	69.6641	1.0211	69.6370	1.0000
8	91.4560	1.1236	91.4700	1.1982	91.4887	1.0000
9	100.5421	0.9107	100.4034	0.9912	100.3509	1.0000
10	131.5892	1.1249	131.6803	1.0945	131.7563	1.0000

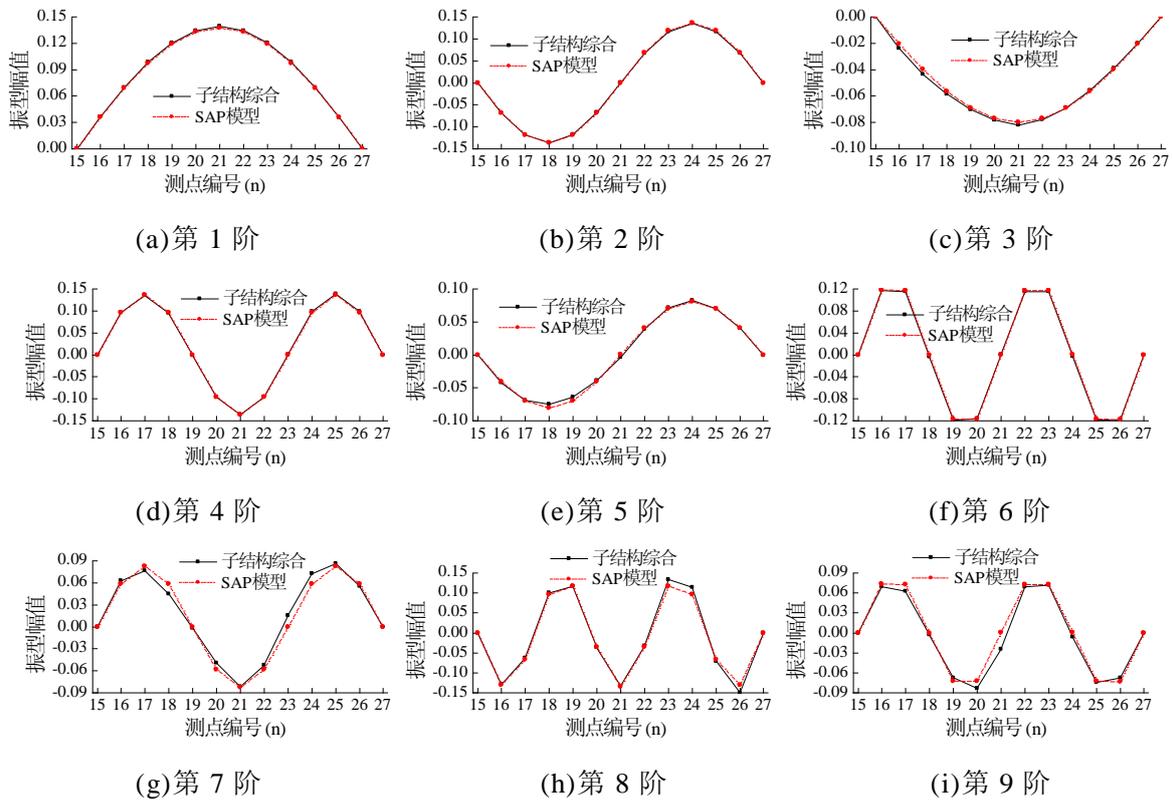


图 2.16 子结构集成前 9 阶模态

利用分片子结构质量归一的振型拼接得到整体结构的振型，再利用 2.2.2 节所述方法得到结构的整体柔度矩阵如式(2.15)所示。将该柔度矩阵与有限元软件得到的振型矩阵进行对比，其误差如图 2.17 所示。从误差矩阵可以看出所有柔度系数在无噪声干扰情况下的误差均在 2% 以内，说明该方法在理论上的可行性，同时其精度满足工程实践要求。

$$f_{\text{total}} = \begin{bmatrix} 2.04 & 3.60 & 4.65 & 5.26 & 5.48 & 5.35 & 4.92 & 4.24 & 3.37 & 2.33 & 1.19 \\ 3.60 & 6.68 & 8.85 & 10.13 & 10.61 & 10.40 & 9.60 & 8.29 & 6.57 & 4.55 & 2.33 \\ 4.65 & 8.85 & 12.15 & 14.19 & 15.04 & 14.84 & 13.76 & 11.92 & 9.47 & 6.57 & 3.36 \\ 5.26 & 10.13 & 14.19 & 17.06 & 18.42 & 18.39 & 17.16 & 14.94 & 11.91 & 8.28 & 4.24 \\ 5.48 & 10.61 & 15.04 & 18.42 & 20.41 & 20.74 & 19.57 & 17.15 & 13.74 & 9.58 & 4.92 \\ 5.35 & 10.40 & 14.84 & 18.39 & 20.74 & 21.59 & 20.74 & 18.38 & 14.82 & 10.38 & 5.35 \\ 4.92 & 9.60 & 13.76 & 17.16 & 19.57 & 20.74 & 20.41 & 18.41 & 15.02 & 10.59 & 5.47 \\ 4.24 & 8.29 & 11.92 & 14.94 & 17.15 & 18.38 & 18.41 & 17.05 & 14.18 & 10.11 & 5.24 \\ 3.37 & 6.57 & 9.47 & 11.91 & 13.74 & 14.82 & 15.02 & 14.18 & 12.14 & 8.84 & 4.64 \\ 2.33 & 4.55 & 6.57 & 8.28 & 9.58 & 10.38 & 10.59 & 10.11 & 8.84 & 6.67 & 3.60 \\ 1.19 & 2.33 & 3.36 & 4.24 & 4.92 & 5.35 & 5.47 & 5.24 & 4.64 & 3.60 & 2.03 \end{bmatrix} \times 10^{-5} (\text{mm/N}) \quad (2.15)$$

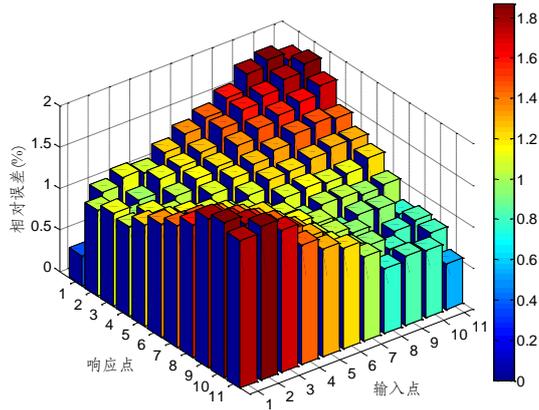


图 2.17 子结构综合模态柔度与静力柔度的相对误差

为进一步验证分片子结构的可靠性，在线拼接的基础上，进行了振型的面拼接数值实验。对板结构进行脉冲锤击法的 SIMO 测试，设计如图 2.18 所示的子结构综合工况，将结构沿着板纵向划分为 2 个子结构，子结构 1 分别为第 31 点输入，其他 28 个点输出，子结构 2 为第 24 点输入，其他 24 个点输出。

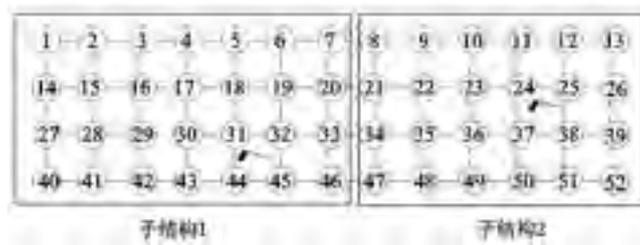


图 2.18 桥面板子结构划分图

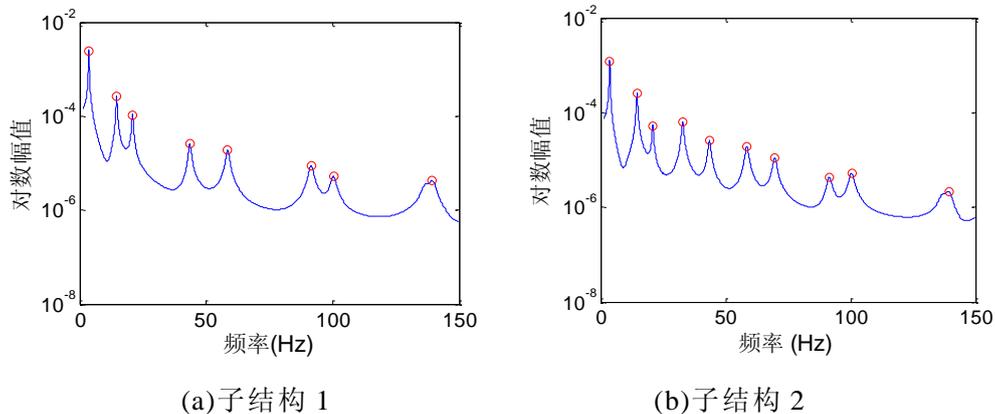


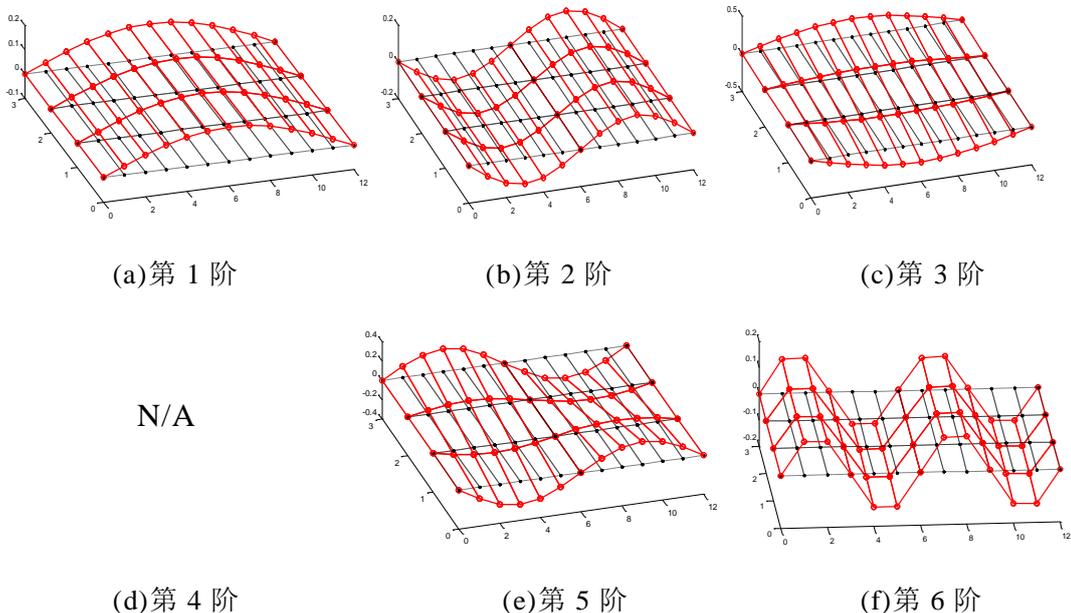
图 2.19 CMIF 模态峰值提取图

对子结构 1 和子结构 2 分别进行有限元脉冲锤击动力分析，将导出的时域信号进行模态分析，其各自的模态提取如图 2.19(a)和图 2.19(b)所示，识别得到的前 10 阶模态频率和阻尼比如表 2.7 所示。子结构 1 未能识别出结构的第 4 阶模态和第 7 阶模态，这是因为子结构 1 的输入点刚好位于这两阶的振型节点。

在得到桥面板各个子结构的模态参数以后，各邻近子结构“模态缝合”和“子结构合成”。由于各子结构均利用了质量归一的模态振型并属于同一个归一标准，因此它们之间没有比例放大系数(scaling factor)。因此，有公共传感器节点的子结构之间可以直接拼合，而无公共传感器节点的子结构则需要进行人为经验判断来确定振型的方向，这样获得了整体结构的模态振型。利用子结构综合的方法将子结构的振型进行综合，得到的前 9 阶模态如图 2.20 所示。

表 2.7 前 10 阶模态的分析结果

阶数	子结构一		子结构二		Sap2000	
	Freq(Hz)	Damp(%)	Freq(Hz)	Damp(%)	Freq(Hz)	Damp(%)
1	3.6284	2.2528	3.6284	2.2548	3.6288	1.0000
2	14.5593	1.2952	14.5591	1.3034	14.5601	1.0000
3	20.8754	1.2177	20.8751	1.2217	20.8772	1.0000
4	/	/	32.8479	1.1323	32.8503	1.0000
5	43.5574	1.0928	43.5558	1.1018	43.5593	1.0000
6	58.4986	1.0793	58.4997	1.0700	58.5036	1.0000
7	/	/	69.6294	1.0688	69.6370	1.0000
8	91.4828	1.0475	91.4795	1.0477	91.4887	1.0000
9	100.3246	1.0513	100.3450	1.0339	100.3509	1.0000
10	139.4624	1.0798	139.4801	1.0576	139.4700	1.0000



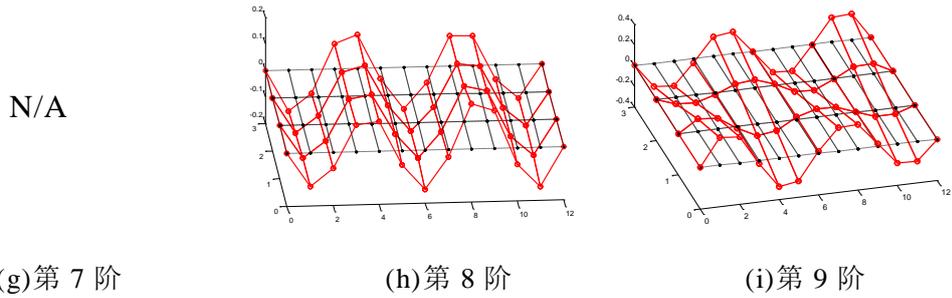


图 2.20 子结构集成前 9 阶模态

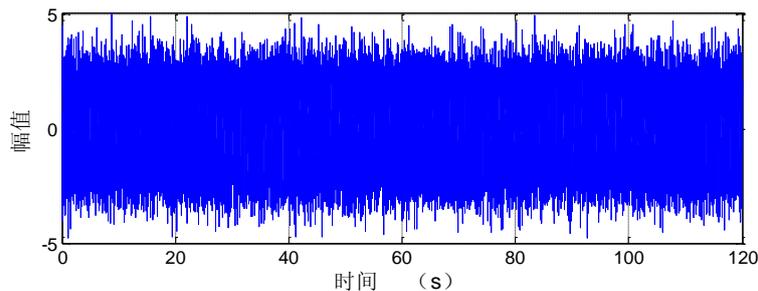
由图 2.20 可见分片试验的模态拼接顺滑，与计算模态振型一致，可见该方法的准确性。利用整体模态振型可进一步得到结构的整体柔度矩阵，该柔度矩阵与有限元分析得到的柔度矩阵进行对比，其误差在 3% 以内。

## 2.5 混凝土简支板的随机振动数值试验

脉冲锤击测试在中小型桥梁结构中的运用较为普遍，而对于大型桥梁结构，由于目前脉冲激励装置可以提供的锤击力较小，其运用受到一定的限制。大型桥梁的振动测试运用最广泛的是环境激励测试，即随机振动测试。随机振动测试的输入信号无法获取，因此随机振动的模态分析无法得到结构的模态柔度。基于前面 2.3.4 节中介绍的随机振动振型归一理论，可以利用随机振动测试得到的模态频率和模态振型，利用式(2.18)对测试得到的振型进行质量归一，再利用式(2.1)求解出结构的模态柔度矩阵。为了验证理论的可行性，设计了一个混凝土简支板的随机振动数值试验。

### 2.5.1 随机振动的有限元仿真试验

随机振动有限元仿真的试验对象与脉冲锤击法数值相同，在 SAP 2000 有限元软件中建立一块混凝土简支板，简支板的材料、单元尺寸和边界条件与前一节的设定值相同。本文采用白噪声信号来模拟随机信号输入，利用 Matlab 编程，定义白噪声信号的采样频率为 2000Hz，最小截止频率 0Hz，最大截止频率为 500Hz，信号的时间长度为 120s，最大幅值为 5。测试过程的输入信号和输出信号如图 2.21 所示。



(a)白噪声输入信号

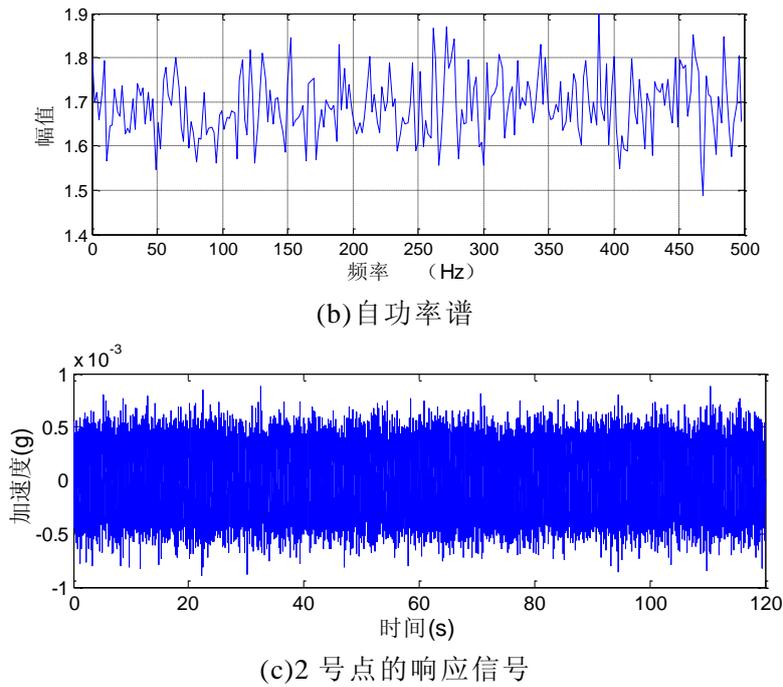


图 2.21 Matlab 生成的随机信号

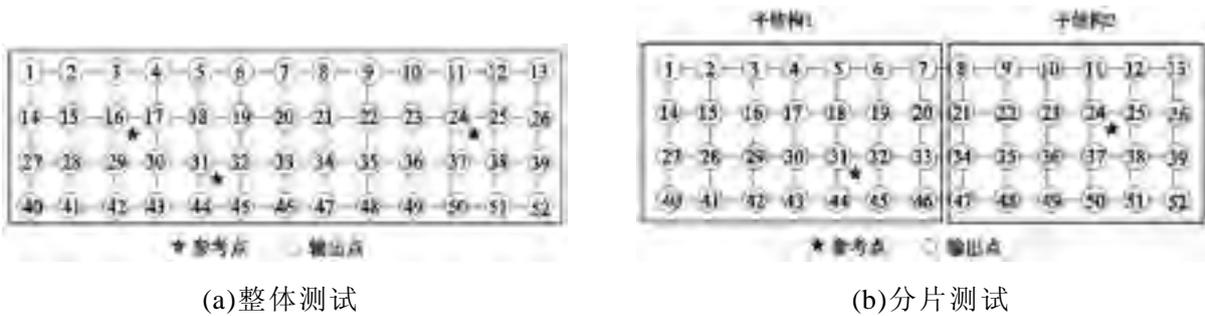


图 2.22 随机振动动力测试工况设置

表 2.8 随机振动测试前 10 阶模态分析结果

模态	SAP2000	全区域测试法		分片子结构测试			
	频率(Hz)	频率(Hz)	差值(%)	子结构 1 频率(Hz)	差值(%)	子结构 2 频率(Hz)	差值(%)
1 阶	3.6288	3.6241	0.13	3.6235	0.15	3.6271	0.05
2 阶	14.5601	14.5607	0.00	14.5613	0.01	14.5632	0.02
3 阶	20.8772	20.8035	0.35	20.8256	0.25	20.7963	0.39
4 阶	32.8503	32.5496	0.92	32.4412	1.25	32.8523	0.01
5 阶	43.5593	43.3685	0.44	43.2679	0.67	43.6325	0.17
6 阶	58.5036	58.9632	0.79	58.1126	0.67	58.6038	0.17
7 阶	69.6370	69.4120	0.32	69.6784	0.06	69.7434	0.15
8 阶	91.4887	91.4232	0.07	91.4031	0.09	91.2013	0.31
9 阶	100.3509	/	/	/	/	/	/
10 阶	139.4700	132.6854	4.86	131.6396	5.61	131.9649	5.38

将白噪声随机信号导入到 SAP2000 有限元模型的时程函数中，定义一个线性

时程分析工况，采样频率设为 1000Hz，采样时间为 120s。运行求解，则可以得到有限元各个测点的加速度响应信号。设置了两组随机振动动力测试工况，如图 2.22 所示。工况 1 为整体测试工况，16,24 和 31 号点选取为随机振动动力测试的参考点，52 个点为加速度响应信号输出点。工况 2 为分片测试工况，点 31 和点 24 分别为子结构 1 和子结构 2 的参考点。求解参考点与其他测点的互相关函数，可以得到结构的伪频响函数曲线。采用 CMIF 方法对频响函数曲线进行极点峰值提取如图 2.23 所示，测试得到的模态参数整理如表 2.8 所示。

由图 2.23 可见，频响函数曲线的后面几个波峰位置出现一些小的波浪形刺，这主要是因为白噪声模拟信号无法完全模拟出现实中的随机振动。但从表 2.8 所示来看，随机振动数值模拟试验能够很好地识别出结构的前 8 阶模态，第 9 阶模态未能识别出来，第 10 阶模态出现较大的误差。

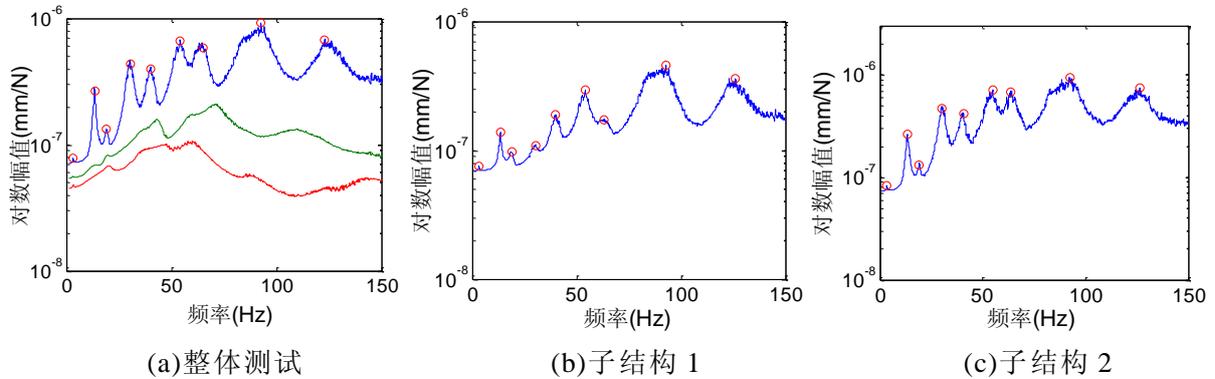


图 2.23 随机振动测试 CMIF 法模态提取图

### 2.5.2 基于质量归一振型的模态柔度识别

利用 CMIF 模态分析方法可以得到随机振动测试下结构的频率和振型。对模态振型进行质量归一后，就可以利用 2.2 节所述的方法—计算结构的模态柔度矩阵。该过程的关键是对结构的质量矩阵进行假设。本文基于集中质量矩阵假设，对随机振动测试得到的模态振型进行质量归一化。将简支板的质量均匀分布到 52 个测点，其单元划分如图 2.24 所示。设简支板的总质量为  $m$ ，则每个角位置处测点的质量为  $1/144m$ ，边线上测点的质量为  $1/72m$ ，中间测点的质量为  $1/36m$ 。

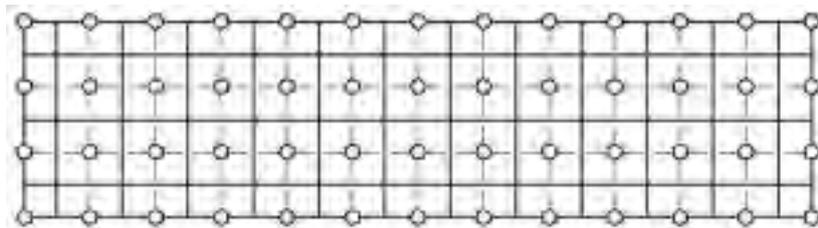


图 2.24 简支板的集中质量划分

基于上述集中质量矩阵假设，可以得到结构的质量矩阵  $[M]$ ，利用式(2.17)则可以得到质量归一化的振型。对于整体测试的情况，在得到结构的质量归一振型

矩阵之后，可以利用式(2.1)可以求解出结构的柔度矩阵。而对于分片测试情况，需要先将分片测试得到的子结构振型进行拼接，利用拼接好的振型按式(2.1)去求解结构的整体柔度矩阵。MAC 值是模态置信因子，振型  $\varphi_i$  和振型  $\varphi_j$  的 MAC 值计算公式如式(2.23)所示，MAC 越接近 1，表明两个振型的相关性越大。

$$MAC_{i,j} = \frac{(\varphi_i^T \varphi_j)^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\varphi_j^T \varphi_j)} \quad (2.23)$$

为了检验整体测试和分片测试所获质量归一振型的正确性，将测试得到的振型与有限元分析得到的振型进行 MAC 值比较如图 2.25 所示。由图可见，基于随机振动测试得到的模态振型，除了后面 2 阶高阶模态，其他主要模态的振型结果基本吻合有限元模型分析结果。

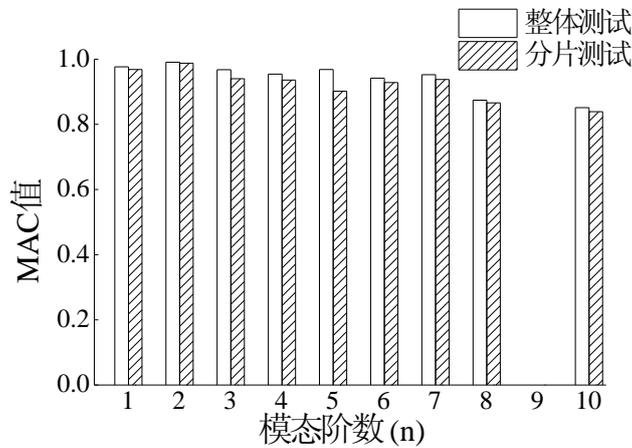


图 2.25 随机振动测试的振型 MAC 值

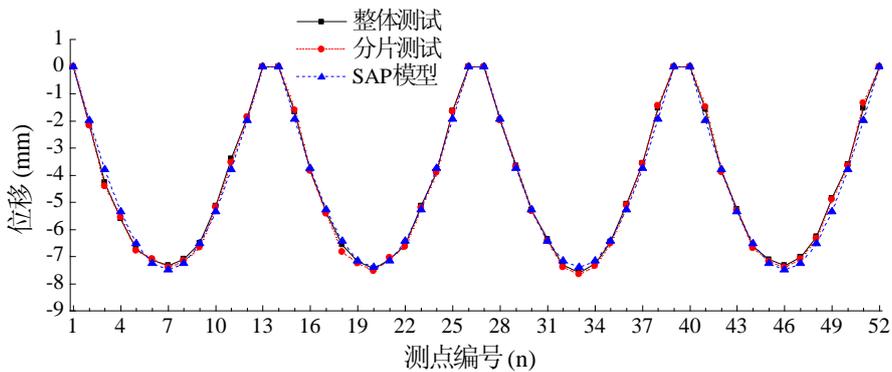


图 2.26 随机振动模态柔度位移与有限元模型位移

利用整体模态振型进一步获得不同工况下结构的模态柔度矩阵。在简支板的 52 个测点位置施加 1kN 的荷载，在有限元软件中运行求解，得到各个测点在均布集中力荷载作用下的位移。同时，利用模态测试得到的柔度矩阵，乘以相应的力矩阵，也可以得到结构各个测点的位移。不同方法得到的均布集中力作用下位移结果如图 2.26 所示。对比结果表明，采用集中质量矩阵假设能够成功地对随机振动测试得到的振型进行质量归一，并利用归一化振型求取结构的柔度矩阵。利用

随机振动测试得到的柔度矩阵去预测结构在均布力作用下的位移，产生的误差基本在 3% 以内，满足工程实践的要求。

## 2.6 本章小结

本章阐述了利用模态参数分析方法识别模态柔度的理论和方法。首先对两种模态柔度的计算方法进行了介绍，指出两种模态柔度计算方法的关键是得到结构的模态质量系数。其次，利用模态柔度两种计算方法的一致性，提取出了脉冲锤击法测试获得质量归一振型的公式。对分片测试得到的子结构质量归一振型进行拼接，得到结构的整体振型，再基于方法一可以得到整体结构的满阵柔度矩阵，解决了传统子结构模态柔度矩阵拼接过程右上角和左下角空白的难题。然后，一个基于 SAP2000 有限元仿真的混凝土板脉冲锤击数值试验被用来验证上述模态柔度算法的正确性。研究结果表明利用方法一、方法二以及分片子结构测试得到的位移模态柔度能够很好地吻合有限元静力分析的结果。模态分析得到的柔度矩阵的主要误差来源于有限元模态分析的模态截断。最后，对混凝土简支板进行了一次随机振动数值试验，基于集中质量矩阵假设对随机振动测试得到的模态振型进行质量归一，并利用归一后振型计算结构的柔度矩阵，进一步获得结构在均布力作用下的位移。结果表明，在无噪声干扰的情况下，基于集中质量矩阵假设得到的柔度矩阵能够很好地预测结构的变形，其误差基本在 3% 以内。

## 第3章 基于模态柔度分片子结构综合法的试验研究

### 3.1 引言

前面一章介绍了分片子结构模态柔度综合的理论和有限元数值试验验证，本章设计了一个实验室的钢-混凝土组合结构的分片测试试验以及一座实际桥梁的脉冲锤击分片测试试验，来进一步验证该方法的可行性。钢-混凝土组合结构是国际上现有桥梁中一种非常常见的结构，利用动力测试对组合结构进行模态识别，对现实桥梁结构的动力识别有着重要意义。动力试验识别的模态参数能够反应出桥梁结构的静力特性，与桥梁结构的静力试验形成比较与互补。该试验的具体目的有以下3点：(1)对直接利用动力信号获取结构模态频率、振型及阻尼比等参数的理论和方法进行研究，验证多参考点脉冲锤击法识别钢-混凝土组合板模态信息的准确性；(2)验证利用分片子结构综合法获取模态柔度的可行性及精确度；(3)对基于随机振动测试的模态振型质量归一方法进行研究。

### 3.2 钢-混凝土组合结构的脉冲锤击测试

#### 3.2.1 试验对象

本试验对象为一钢-混凝土组合板，该试验采用3根Q235工字形钢梁作为主梁，在其上部铺设C50混凝土面板形成组合板结构。整个试件宽2.05m，长4.0m。混凝土面板厚60mm，板内布置双层双向直径6mm的HPB300钢筋，钢筋纵向间距150mm，横向间距80mm。试验构件的截面图及其配筋如图3.1所示。

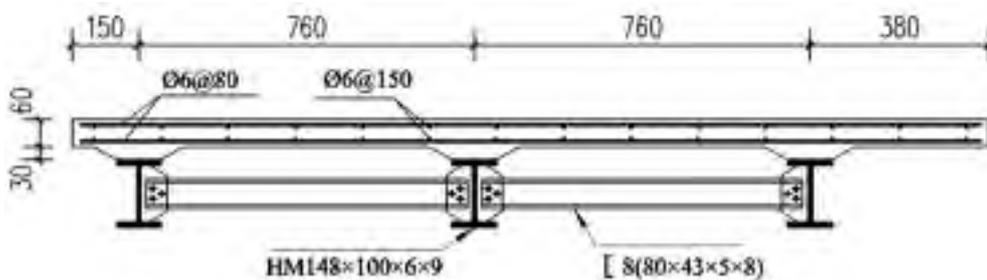


图 3.1 组合桥面板截面图（单位：mm）

组合板试件的平面图和测点布置如图3.2所示。试验板通过固定铰支座和滚动铰支座形成简支结构体系，两端各有100mm悬臂长度。整个试件由6个支座支撑，其中位于1、10、19号点处的为滚动铰支座，位于9、18、27号点处的为固定铰支座。3根主梁之间，设有6根横向支撑，其型号为8号槽钢。

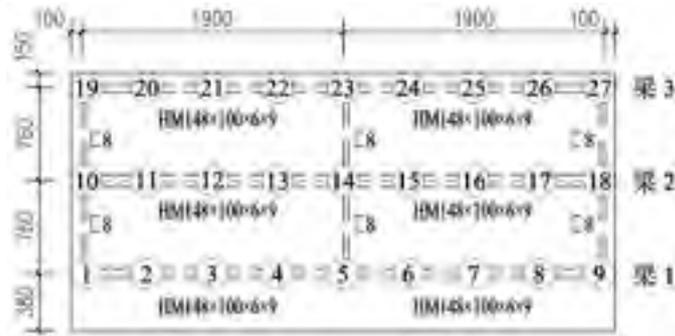


图 3.2 钢梁平面位置和测点布置图(单位：mm)

### 3.2.2 动力试验装置

用于动力测试的外部激励方法包括偏心质量激振器测试，电动激励器测试，多参考点脉冲锤击激励(MRIT)和步进式松弛激励等等。其中，MRIT 能够得到重复性较好质量较高的真实频率响应函数(FRF)，并能够从 FRF 中识别得到模态质量，进一步可以获取结构的模态柔度。



图 3.3 钢-混凝土组合板动力试验照片

利用多参考点脉冲锤击法进行钢-混凝土组合板的动力试验，测试过程的照片如图 3.3 所示，利用力锤敲击产生力脉冲激励，然后用加速度传感器来拾取不同的响应时程信号，为了获得与静载位移对应的模态柔度位移结果，动力传感器的布设位置与静载位移测点一致。对该实验室模型进行了系统地综合试验，进行了多工况的全结构模态测试和分片子结构综合动力测试，模态试验所用动力传感器的相关信息见表 3.1。

表 3.1 动力传感器的相关参数

传感器类型	型号	灵敏度	频响范围	量程
力锤	PCB-086D20	0.23 mV/N	0~6000 Hz	±22.24 kN
加速度计	KD1010L	10 mv/ms <sup>-2</sup>	0.5~7000 Hz	±600 g

钢-混凝土组合板多参考点脉冲锤击法模态测试的传感器安装如图 3.4 所示。

本文采用 PCB 公司生产的力锤进行锤击测试，力锤型号为 086D50，质量 5.5kg，锤头直径 7.6cm，力锤长度 89cm。该型号的力锤大约能提供 22kN 的锤击力，是 PCB 公司生产的最大型号力锤。在力锤端部配置不同硬度的锤头进行锤击，力锤与锤击点的接触时间不同，其范围大概为 0.001s~0.005s。为了能够充分地捕捉脉冲力信号，力锤选用了中硬度的红色橡胶锤头。利用美国 SignalCalc DP730 采集仪器采集试验过程中的力信号和加速度信号，设置分析频率为 1600Hz，对应的采样频率为 4096Hz，每次测试采集的谱线数为 32768，对应的采样时间为 8s。当力信号大于 10N 时，自动触发采样。采样的最初时间点设为触发时的前 0.05s，这样便能够完整地采集到整个力信号。测试过程的锤击点选为除支座外的其他 21 个中间测点以减少噪声干扰，每个测点锤击 5 次。



(a) PCB-086D20 力锤



(b) KD1010L 加速度传感器

图 3.4 组合板模态试验的动力测试仪器

### 3.2.3 试验工况

设计了 6 组动力测试工况，这些工况包括了各种 SISO, SIMO 和 MIMO 的情形，各种工况的激振点和拾振点如表 3.2 所示。工况 1 对结构进行了一次多参考点的全局测试。工况 2~工况 5 为单参考点输入，对比拾振点不同对第 12 点测试柔度的影响。工况 5 和工况 6 作为两次分片测试，其测试结果与工况 1 对比，可以验证分片测试结果的准确性。

表 3.2 MRIT 的 6 个动力测试工况

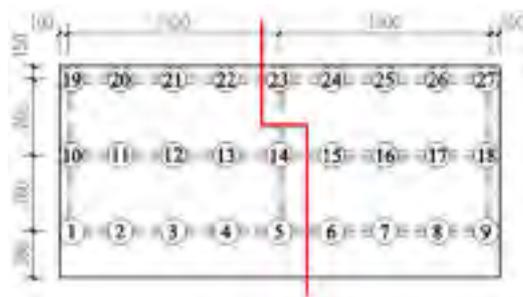
测试工况	测试类型	激振点	拾振点
工况 1	MIMO	2~8,11~17,20~26	1~27
工况 2	SISO	12	12
工况 3	SIMO	12	3,11,12,13,21
工况 4	SIMO	12	3,10~18,21
工况 5	SIMO	12	1~5,10~14,19~23
工况 6	SIMO	17	6~9,15~18,24~27

### 3.3 试验过程及结果

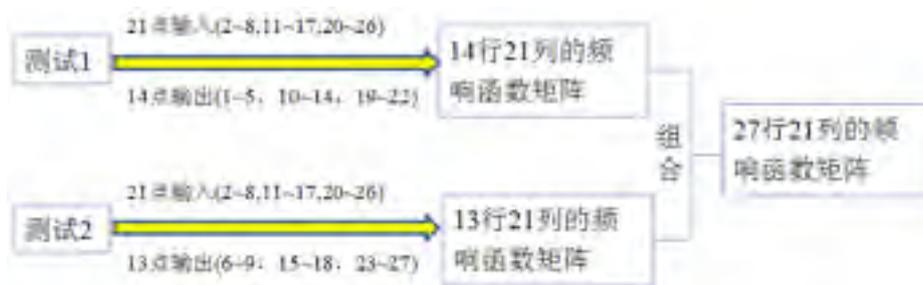
#### 3.3.1 MIMO 全局测试

##### 3.3.1.1 利用不同力锤激励的动力测试结果

为了准确识别组合板的各阶模态，首先对该试验板进行了一次多参考点的脉冲锤击测试。由于测试所用的 DP730 采集仪器只有 14 个通道，因此该测试需要分两次测试完成。两次测试的布点情况如图 3.5(a)所示



(a) MIMO 测点分布



(b) 测试说明和频响应函数矩阵组合

图 3.5 钢-混凝土组合板的 MIMO 全局测试

两次测试结果的频率响应函数组合过程如图 3.5(b)所示。测试 1 的输入点为 2~8、11~17 和 20~26，输出点为 1~5、10~14 和 19~22；测试 2 的输入点为 2~8、11~17 和 20~26，输出点为 1~5、10~14 和 19~22。第 1 次测试得到一个 14 行 21 列的频响应函数矩阵，第 2 次测试得到一个 13 行 21 列的频响应函数矩阵，两次测试组合则可以得到一个 27 行 21 列的频响应函数矩阵。该测试工况与分片测试工况的区别在于，工况 1 两组测试的输入点均是对应于整个结构的所有区域，利用两次测试组合的频响应函数矩阵是一个满阵，不会出现矩阵右上角和左下角空缺的问题。但由于该测试的激励点需要遍布整个结构，在实际桥梁测试过程中对交通的阻碍情况无法改善，同时测试所需花费的时间也较长。

为了选取最合适的锤击力大小和锤头硬度，分别采用了不同锤击力大小和不同锤头硬度的力锤进行锤击，设置了高硬度小力锤、高硬度大力锤、中硬度小力锤三组不同的锤击装置进行脉冲锤击测试。对测试的动力信号进行 CMIF 法模态分析，其典型力信号和模态峰值提取图如图 3.6 所示，得到其频率和阻尼比如表 3.3 所示。

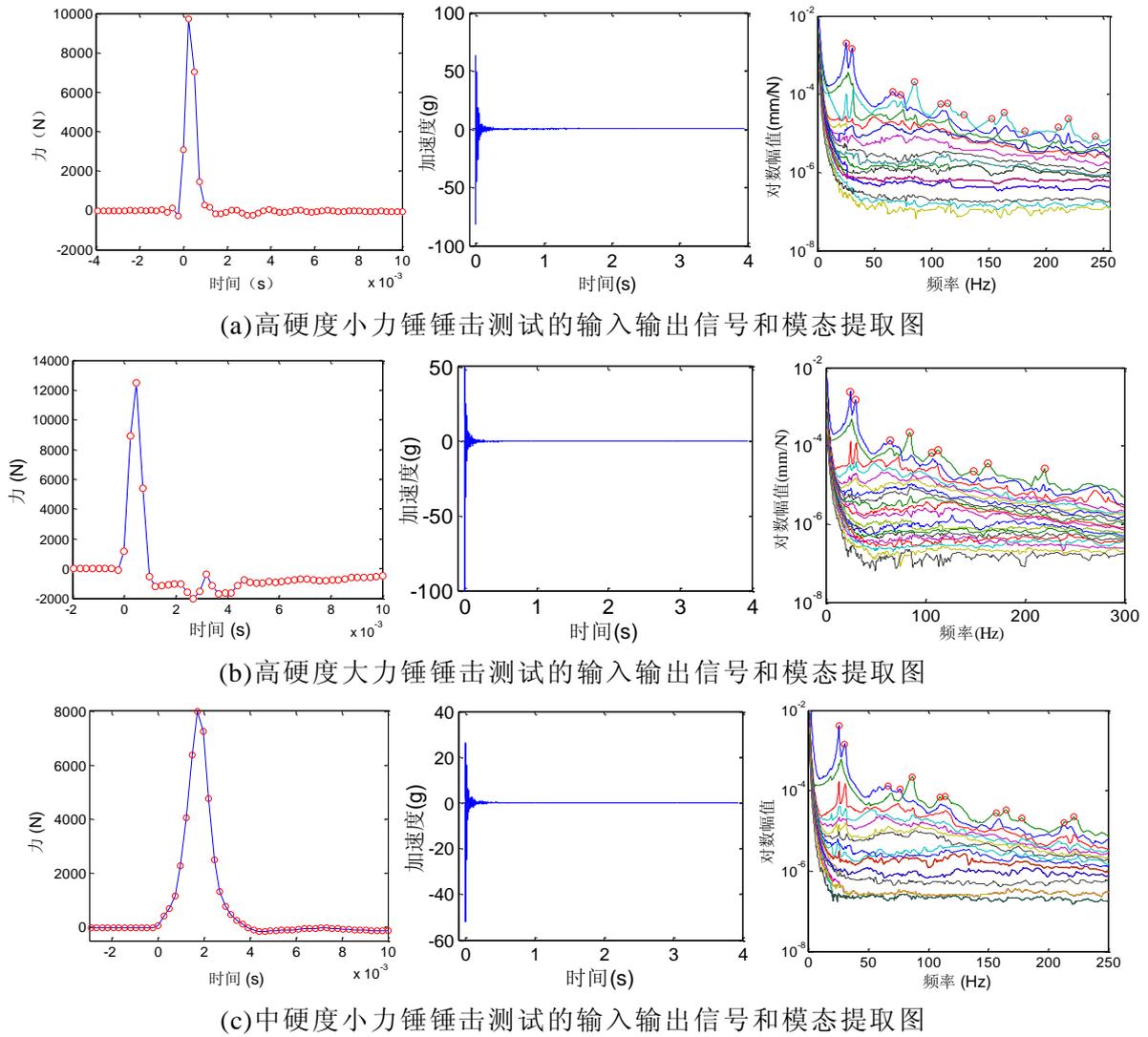


图 3.6 三组脉冲锤击测试的典型输入输出信号和模态峰值提取图

利用三组动力测试获得的模态信息，进一步可以得到结构的模态柔度，利用模态柔度乘以力荷载矩阵，可以预测结构在荷载作用下的位移。为检验模态柔度的准确性，对实际结构进行了一次砝码加载，在 21 个激励点位置布置两个 25kg 的砝码，每根梁等距架设 5 个位移计测量结构在砝码加载下的位移，其试验照片如图 3.7 所示。



图 3.7 钢-混凝土组合板的砝码均布加载试验

表 3.3 MIMO 全局测试的动力测试结果

模态	高硬度小力锤		高硬度大力锤		中硬度小力锤	
	频率(Hz)	阻尼比(%)	频率(Hz)	阻尼比(%)	频率(Hz)	阻尼比(%)
1 阶	24.955	2.39	24.689	2.62	25.118	1.63
2 阶	31.195	2.59	31.697	3.48	31.908	3.38
3 阶	62.152	5.02	62.843	5.20	62.864	5.36
4 阶	73.873	5.80	\	\	75.194	5.27
5 阶	83.275	2.04	83.206	2.02	83.359	2.32
6 阶	109.416	3.69	108.871	3.53	109.237	3.14
7 阶	120.102	3.30	119.218	2.99	119.324	3.08
8 阶	128.187	4.90	\	\	\	\
9 阶	151.487	3.19	149.154	5.17	157.103	3.25
10 阶	164.873	1.87	164.128	2.45	164.793	2.14
11 阶	179.561	2.14	\	\	177.691	1.98
12 阶	210.340	1.33	\	\	212.738	1.82
13 阶	219.894	1.02	219.081	0.88	221.740	1.57
14 阶	242.547	1.46	\	\	\	\

将实测位移值与模态柔度位移值进行对比如图 3.8 所示，结果表明中硬度小力锤的测试结果与实测值最吻合。这是因为小力锤的锤击力能较好地激发结构的振动，提供的力信号较大力锤更加稳定。另外，利用中硬度锤头进行锤击时与结构的接触时间较长，力信号的削波现象得到改善。于是，下文中的动力测试均采用中硬度小力锤来进行脉冲锤击试验。

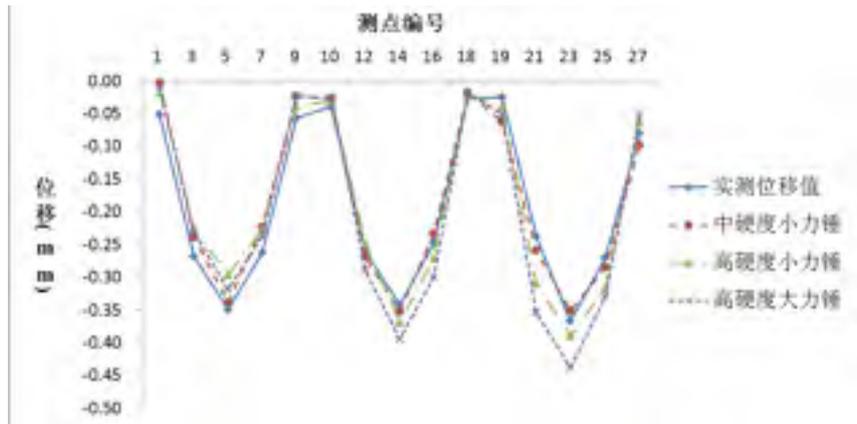


图 3.8 模态柔度位移与实测位移的对比

### 3.3.1.2 CMIF 法分析结果与 PolyMax 模态分析结果对比

本小节对 CMIF 和 LMS PolyMax 两种试验模态识别方法进行比较。复模态指示函数(CMIF)的模态识别过程在前文已经叙述过，其主要步骤是在频响函数曲线峰值处提取模态极点，通常正确的模态极点提取需要分析者具有一定的先验知识。

PolyMax 模态分析方法是比利时研发的动力测试软件 LMS 中的一个模态分析模块，该方法可以方便有效地识别出测试结构的模态参数，其应用范围非常广泛。PolyMax 方法可以对频响函数进行稳态图分析，稳态图能很好地识别出密集模态，而 PolyMax 方法与 CMIF 法同样能够得到模态质量，因此也可以利用本文所提出的模态柔度计算方法获取结构的模态柔度。通过上一节的模态柔度结果比较，表明中硬度小力锤的测试结果最为理想。为了进一步判断全局测试过程中是否有漏掉的模态，对中硬度小力锤的动力测试数据进行了 PolyMax 分析。

图 3.9 是分别利用上述两种方法获得钢-混凝土组合板 MIMO 测试下的模态极点和 MAC 值。由图可见，采用 CMIF 方法很好地识别出钢-混凝土组合板的前 12 阶模态，而第 9 阶模态振型和第 10 阶模态振型之间的 MAC 值较大，说明这两阶振型相关性较大。LMS PolyMax 模态分析过程中的迭代次数设为 250 次，极点稳态图如图 3.9(c)所示。稳态图中的“o”代表该极点不稳定，“f”代表极点的频率稳定，“d”代表极点的频率和阻尼稳定，“v”代表极点的振型稳定，“s”代表极点的频率、振型和阻尼都稳定。利用 PolyMax 稳态分析方法可以识别出组合板的前 14 阶模态，但第 10、11 两阶模态以及第 12、13 两阶模态的 MAC 值较大。

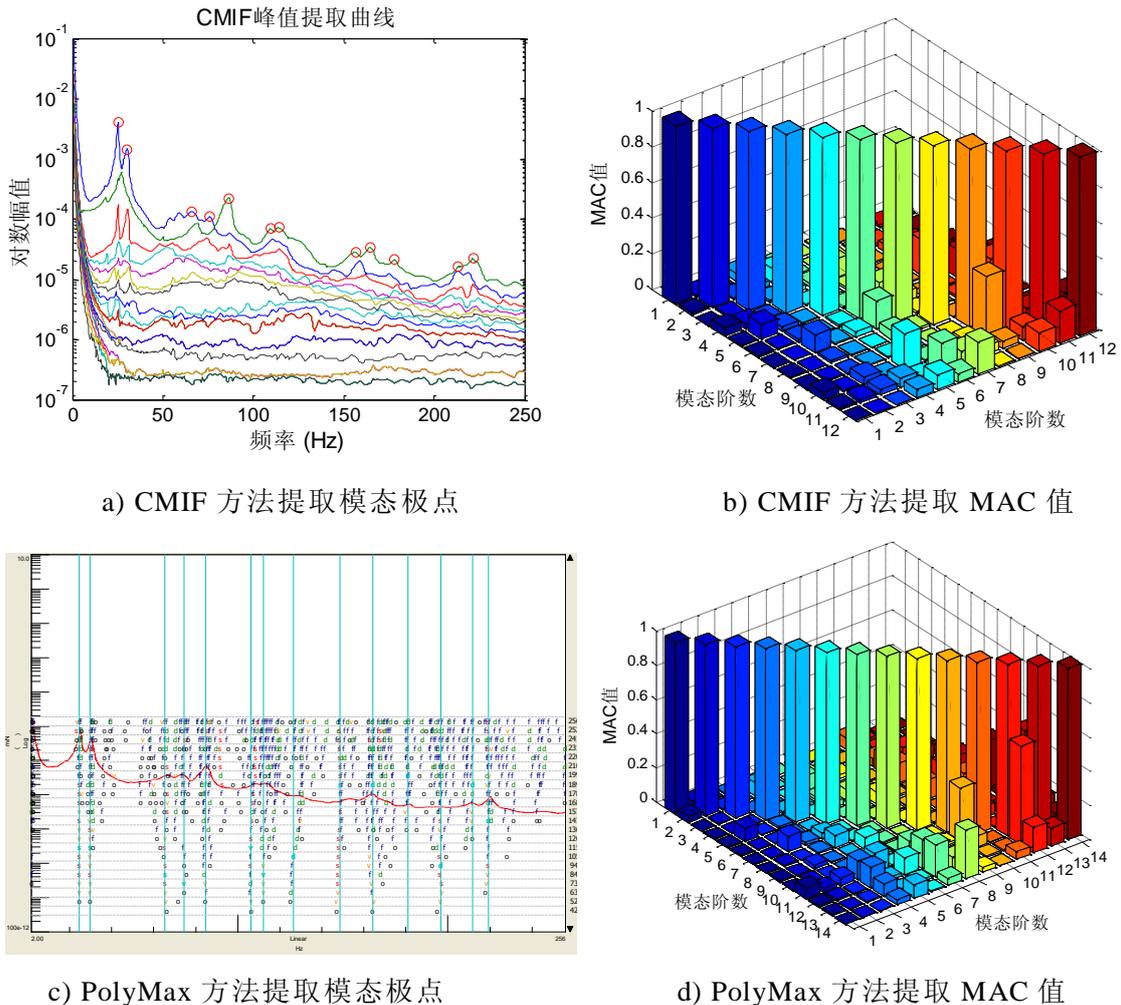


图 3.9 CMIF 方法和 PolyMax 方法模态识别

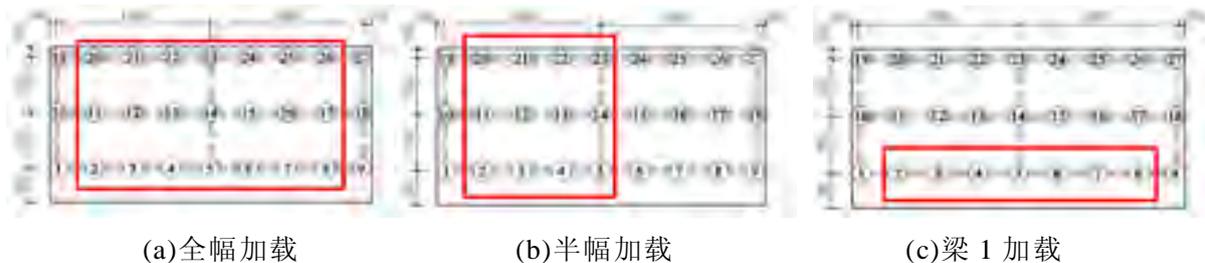
两种模态分析方法得到的频率、阻尼比结果如表 3.4 所示。CMIF 法较 PolyMax 分析方法少识别了 2 阶模态。但这 2 阶模态均是结构的高阶模态，对模态柔度的影响很小。两种分析方法得到的频率值相差在 0.5% 以内，说明全局测试模态参数识别的准确性。同时，结构的主要模态均能被两种方法识别，说明两种方法均可以有效地运用于组合结构的模态识别。

表 3.4 CMIF 法与 PolyMax 分析结果对比

模态	CMIF 法分析结果		PolyMax 分析结果	
	频率(Hz)	阻尼比(%)	频率(Hz)	阻尼比(%)
1 阶	24.783	1.63	24.702	2.58
2 阶	31.268	3.38	31.546	4.11
3 阶	61.864	5.36	61.391	6.89
4 阶	75.194	5.27	75.345	2.12
5 阶	83.359	2.32	82.596	0.76
6 阶	109.237	3.14	109.277	3.67
7 阶	120.324	3.08	120.286	2.35
8 阶	\	\	126.565	5.35
9 阶	152.103	3.25	151.514	5.70
10 阶	165.193	2.14	165.269	2.14
11 阶	177.691	1.98	178.923	0.74
12 阶	\	\	196.684	4.39
13 阶	212.738	1.82	211.828	0.66
14 阶	221.740	1.57	220.426	0.98

### 3.3.1.3 不同荷载作用的位移结果验证

脉冲锤击法测试得到的柔度矩阵乘以力矩阵即可以得到结构在荷载作用下的位移。理论上，利用动力测试得到的柔度矩阵可以用于结构在任何荷载作用下的位移。为了验证模态柔度矩阵预测结构位移的可靠性，设置了 5 组加载工况如图 3.10 所示，图中粗线方框里的测点即砝码加载的位置。对组合板的不同位置进行加载，并利用百分表测试结构在不同荷载作用下的位移。



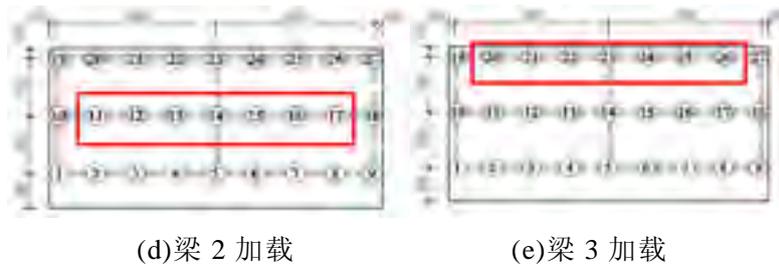


图 3.10 不同荷载作用的工况设置

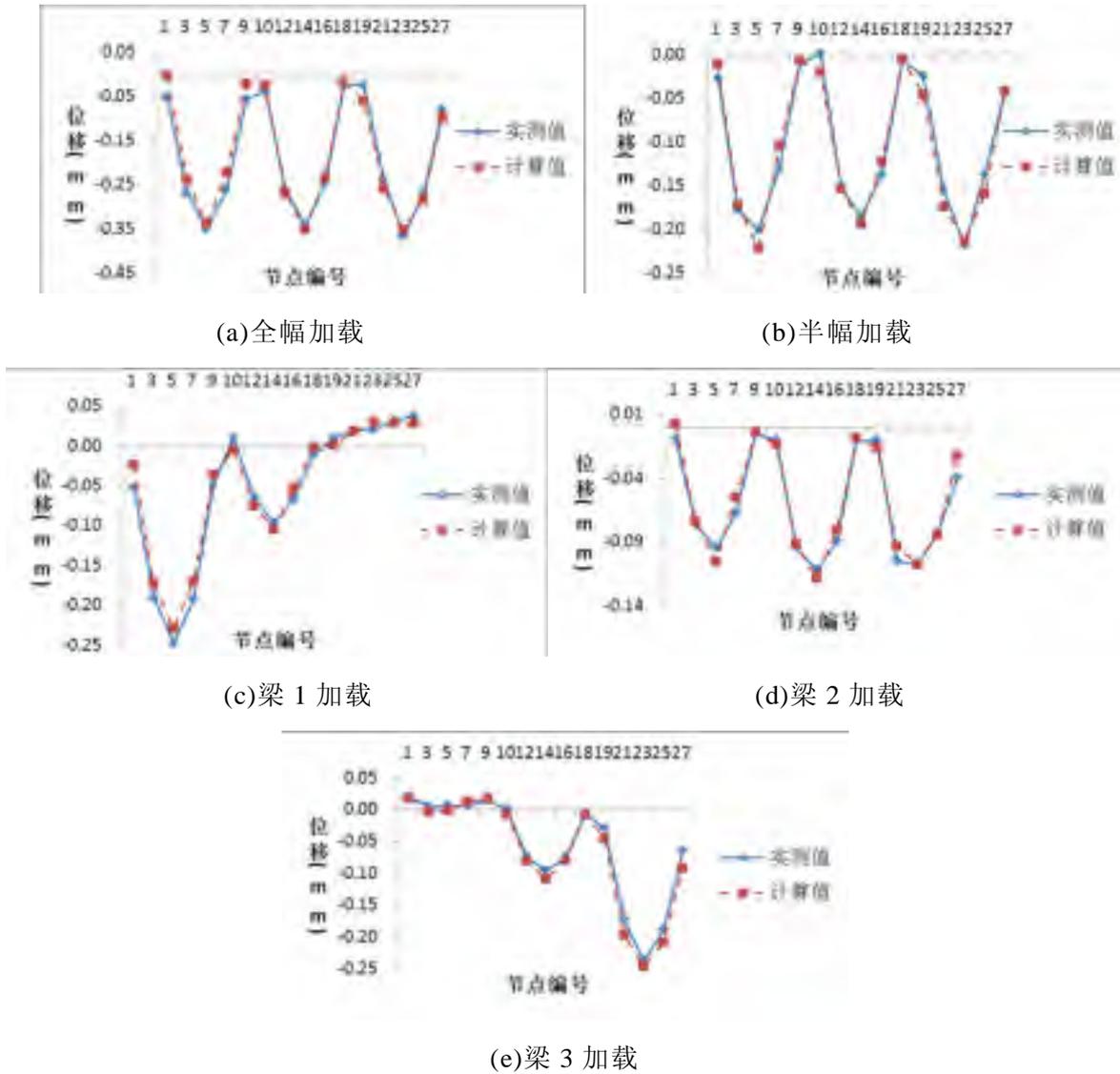


图 3.11 不同荷载作用下模态柔度位移与实测值对比

将砝码加载试验得到的位移与模态柔度预测的位移进行对比，其结果如图 3.11 所示。结果表明：各种荷载作用下的位移实测值均与位移预测值吻合良好，说明脉冲锤击测试得到模态柔度可以用于预测不同荷载作用下的结构位移。同时，各种不同荷载作用下的位移值均与模态柔度预测位移值吻合，也进一步证明了 MIMO 测试得到的模态柔度的准确性。

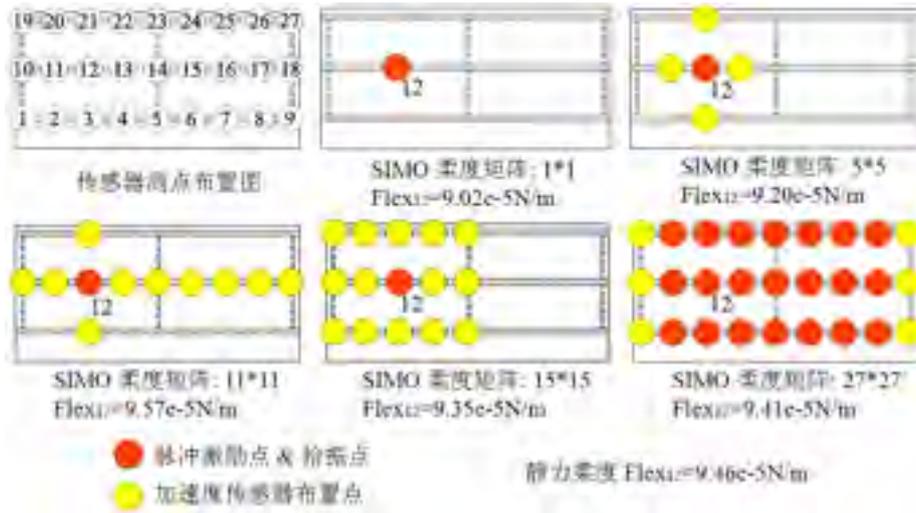


图 3.12 不同测试工况识别的模式柔度系数

### 3.3.2 不同测试工况的模式系数比较

为了验证 SISO、SIMO、MIMO 等动力测试方法识别结构局部模态柔度的准确性，设置了 5 组动力测试工况如图 3.12 所示。利用 CMIF 分析方法得到 5 组测试第 12 点的模态柔度系数。其结果显示所有测试结果和实测的静力结果非常吻合，这说明脉冲锤击动力测试的可靠性。

### 3.3.3 分片测试子结构综合结果

设置了一组无重叠区域的分片测试工况如图 3.13(a)所示，分别对子结构 1 和子结构 2 进行 SIMO 动力测试，对应为表 3.2 中的工况 5 和工况 6。根据子结构分片测试得到的频率响应函数矩阵，利用 CMIF 模态分析方法对子结构的模态参数进行识别，其频率响应函数极点峰值提取图如图 3.13(b)和图 3.13(c)所示。作为对比，设置了一组有重叠区域的分片测试工况，其测点布置、峰值提取如图 3.14 所示。对两组工况测试得到的子结构振型分别进行质量归一，然后将 2 个子结构的振型拼接成就能得到整体结构的振型。运用子结构综合技术得到的结构整体振型如图 3.15 所示。

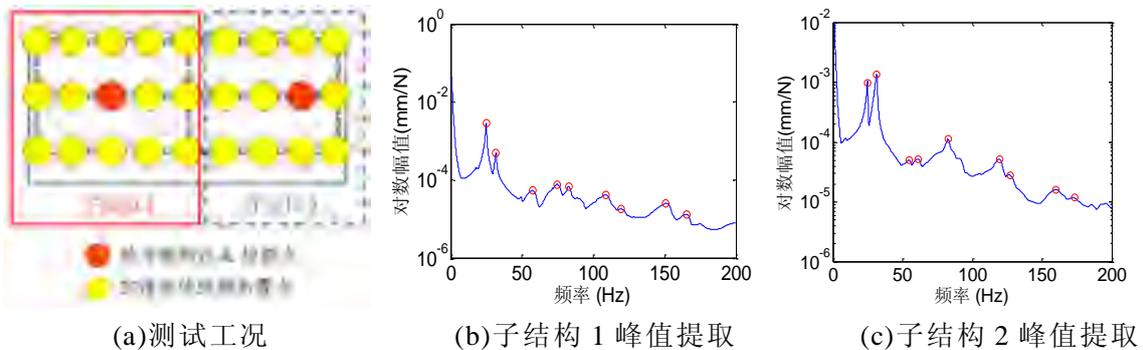


图 3.13 无重叠区域分片测试工况和子结构模态提取图

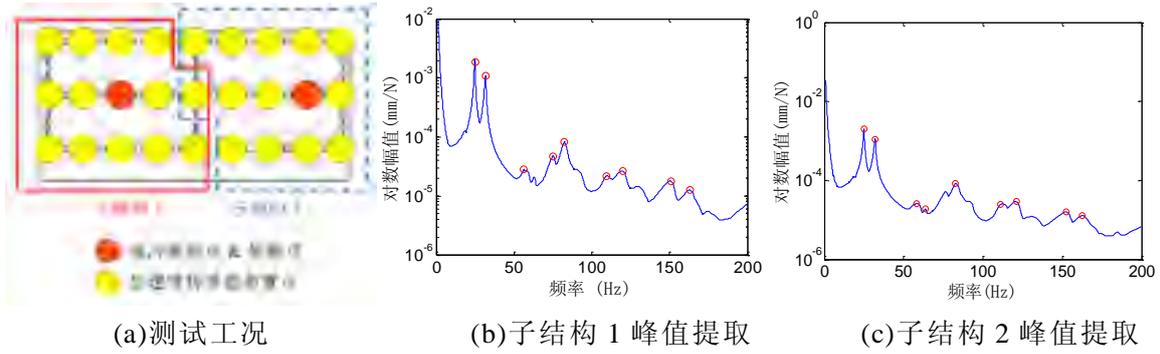


图 3.14 有重叠区域分片测试工况和子结构模态提取图

表 3.5 前 10 阶模态的分析结果

阶数	MIMO 测试		无重叠区域分片测试				有重叠区域分片测试			
	频率 (Hz)	阻尼比 (%)	子结构 1		子结构 2		子结构 1		子结构 2	
			频率 (Hz)	阻尼比 (%)	频率 (Hz)	阻尼比 (%)	频率 (Hz)	阻尼比 (%)	频率 (Hz)	阻尼比 (%)
1	24.78	1.31	24.75	1.33	24.75	1.29	24.76	1.34	24.79	1.32
2	31.26	2.36	31.28	1.79	31.29	2.24	31.25	1.85	31.14	1.42
3	56.77	5.92	56.73	5.75	56.74	6.47	56.76	5.79	56.59	5.86
4	61.80	2.63	/	/	61.75	2.64	/	/	61.89	2.13
5	82.68	2.48	82.66	2.45	82.72	2.61	82.69	2.53	82.54	2.75
6	109.36	3.92	109.34	4.19	109.44	2.84	109.37	4.02	109.38	3.62
7	120.01	3.04	120.11	4.54	120.18	3.15	120.02	4.15	120.14	3.52
8	127.61	3.45	/	/	/	/	/	/	/	/
9	151.98	3.16	151.78	3.32	152.15	4.11	151.85	3.29	152.08	3.98
10	165.06	2.49	165.13	2.45	165.68	4.09	165.06	2.57	165.49	3.86

由图 3.15 可以看出，第 4 阶振型可以有结构的 MIMO 全局测试得到，而在分片子结构测试中无法同时获得该阶模态。对于实验室这种无噪声干扰的环境下，产生数据差别的主要原因是在结构的模态提取过程中，激励点和拾振点位于振型节点上，造成了部分模态的缺失。剩余的 8 阶模态均能在分片测试中很好地识别，分片测试得到的频率、阻尼比和 MIMO 测试的结果对比如表 3.5 所示。

利用子结构质量归一振型拼接得到的结构整体振型，可以获得结构的整体模态柔度矩阵。为了验证该柔度矩阵的准确性，将分片测试得到的模态柔度位移值与实测位移值以及 MIMO 测试得到的模态柔度位移值进行对比，如图 3.16 所示。图中有限元分析结果是指利用有限元软件 Strand7 建立的模型在均布荷载作用下的位移结果。由图可见，分片测试得到的模态柔度能够很好地预测结构位移，证明了该方法在实际结构中的可行性。

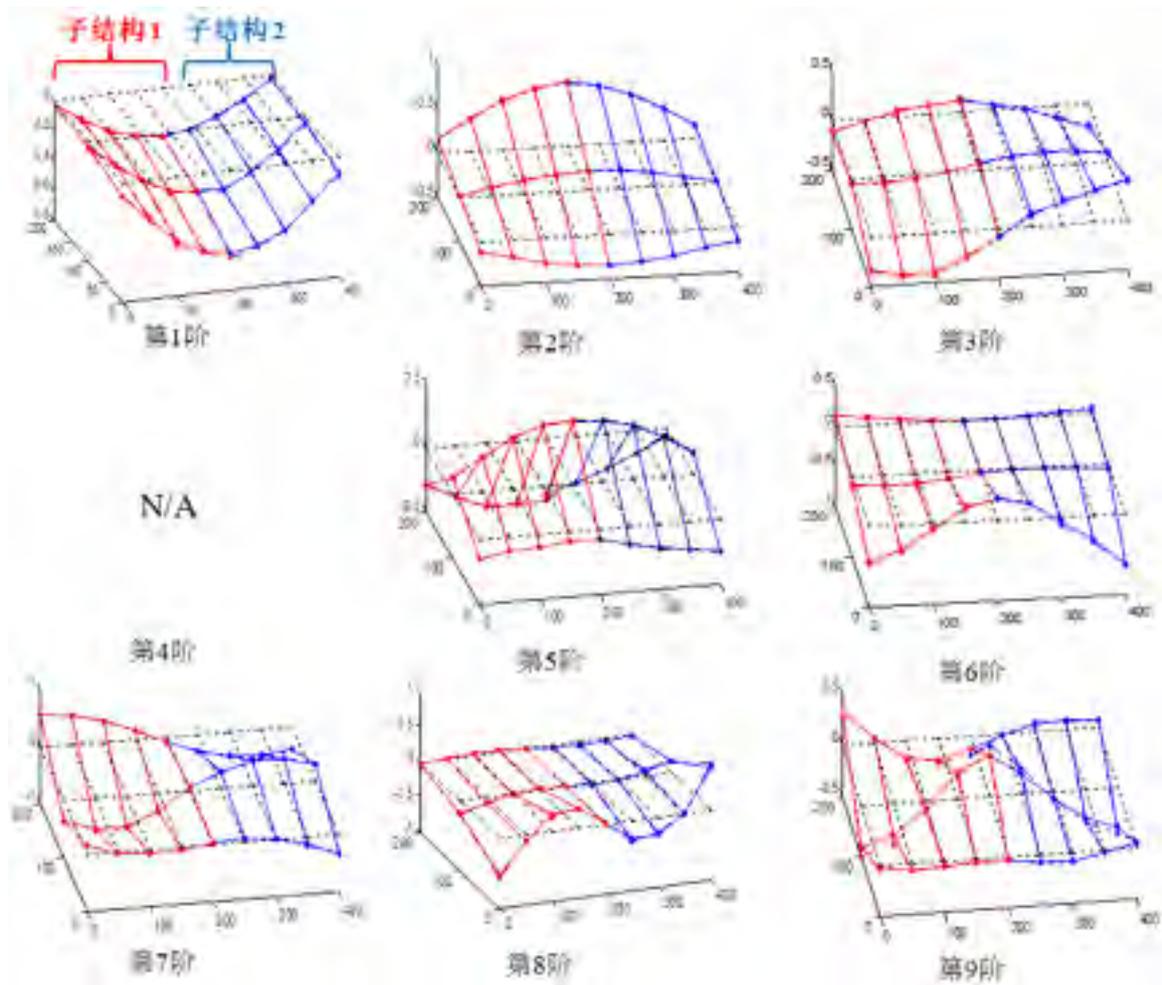


图 3.15 前 9 阶子结构综合模态振型

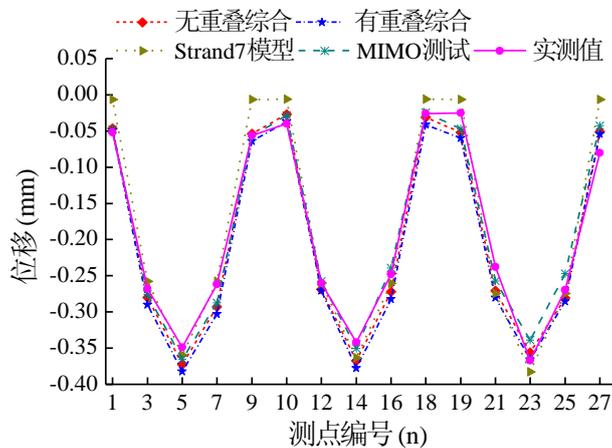


图 3.16 子结构综合柔度位移与实测对比

### 3.4 钢-混凝土组合结构的随机振动测试

模态柔度的获取需要利用对测试得到的振型进行质量归一，其适用条件是在进行模态参数测试的时候，必须采用外部激励的方法。例如脉冲锤击法或者激振器激励的方法，外部激励的力信号能够被测得到，从而能够得到相应输出和输入对应的频率响应函数(FRF)，而采用环境激励(即输入力测试不到)的工作模态分

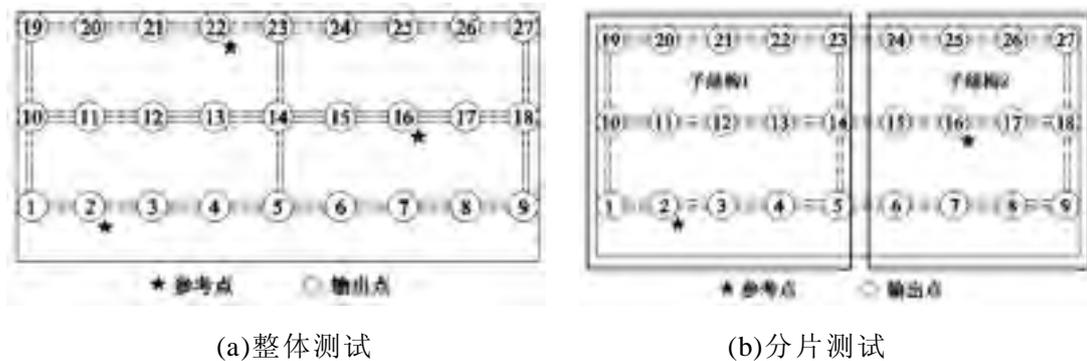
析，由于不能得到 FRF 也就不能得到模态质量，从而不能得到模态柔度。而对于大型桥梁结构，对其进行脉冲锤击法激励，通常较为困难，信号的信噪比较低而难以获得理想的结果。因此，脉冲锤击法主要适用于中小型的各类桥梁结构，例如简支梁桥、连续梁桥和拱桥等等，单跨跨度不超过 50m 效果为宜。为了推广子结构综合技术在大型桥梁中的运用，需要对随机振动测试下的振型质量归一方法进行研究。

### 3.4.1 随机振动测试工况设置

利用 DP730 采集仪器进行随机振动的加速度信号采集，采样频率为 512Hz，采样时间 12min。测试过程中，由两个人利用木槌对组合板的各个位置进行无规律地敲击，以模拟随机振动信号，测试过程照片如图 3.17 所示。设置了两组测试工况如图 3.18 所示，分别是整体测试和分片测试，整体测试的参考点为 2、16 和 22 这 3 个点，分片测试子结构 1 的参考点为 2 号点，子结构 2 的参考点为 16 号点，随机振动测试过程中典型的加速度响应信号如图 3.19 所示。



图 3.17 随机振动测试照片



(a)整体测试

(b)分片测试

图 3.18 随机振动测试工况

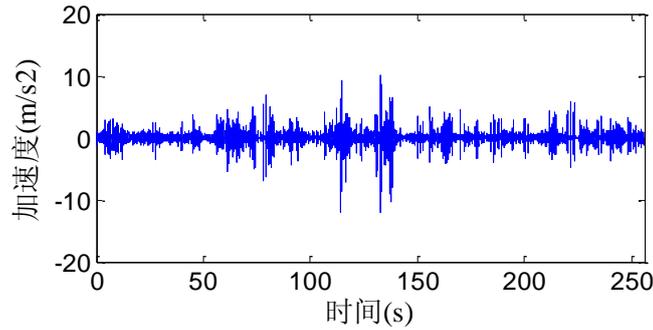


图 3.19 典型的加速度信号(14 号点)

### 3.4.2 随机振动测试模态参数识别

将参考点的加速度参考点输出信号看作是随机振动的激励信号，计算参考点与其他测点的互相关函数，进一步可以得到参考点与测点的伪频率响应函数。利用 CMIF 法对频响函数进行极点峰值提取如图 3.20 所示。两组随机振动测试得到的各阶模态与脉冲锤击测试的结果整理如表 3.6 所示，同时计算随机振动测试获得的模态振型与脉冲测试振型的 MAC 值如图 3.21 所示。由于随机振动测试过程中，结构的第 3、4、9 阶模态未能识别，因此图 3.21 里面没有列出这 3 阶模态的 MAC 值。

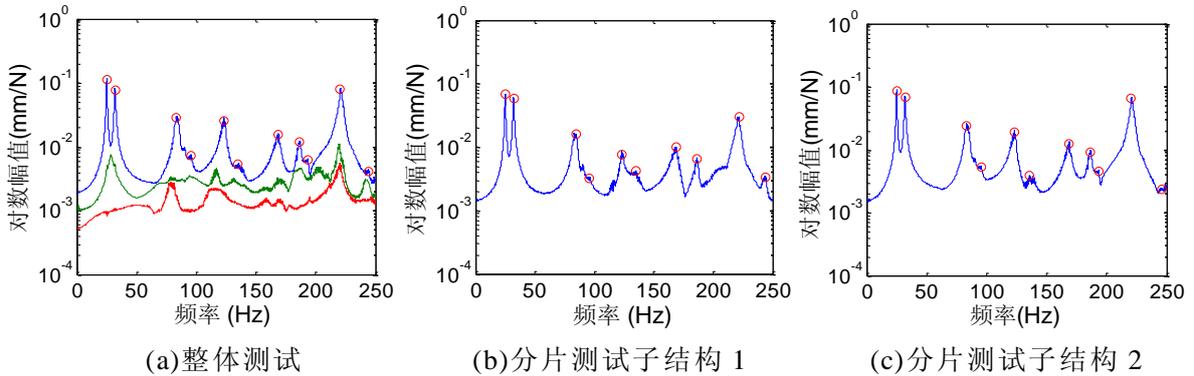


图 3.20 随机振动伪频响应函数 CMIF 峰值提取图

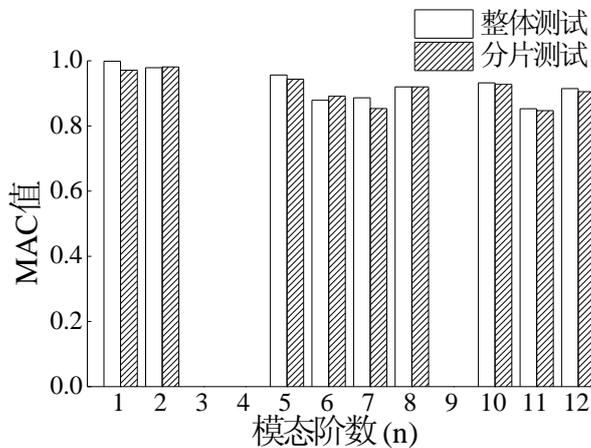


图 3.21 模态振型 MAC 值

表 3.6 随机振动测试与脉冲锤击测试得到的频率对比

模态	脉冲锤击测试	整体随机振动测试			分片随机振动测试		
	频率(Hz)	频率(Hz)	差值(%)	子结构 1 频率(Hz)	差值(%)	子结构 2 频率(Hz)	差值(%)
1 阶	24.78	24.84	0.24	24.85	0.28	24.84	0.24
2 阶	31.26	31.35	0.29	31.38	0.38	31.37	0.35
3 阶	56.77	/	/	/	/	/	/
4 阶	61.80	/	/	/	/	/	/
5 阶	82.68	82.80	0.15	83.07	0.47	83.02	0.41
6 阶	109.36	108.77	-0.54	108.43	-0.85	108.52	-0.77
7 阶	120.01	121.92	1.59	122.05	1.70	122.14	1.77
8 阶	127.61	129.13	1.19	129.42	1.42	129.69	1.63
9 阶	151.98	/	/	/	/	/	/
10 阶	165.06	167.14	1.26	167.08	1.22	166.88	1.10
11 阶	179.56	181.72	1.20	181.50	1.08	181.76	1.23
12 阶	219.89	220.86	0.44	221.87	0.90	220.74	0.39

### 3.4.3 模态柔度位移

本文基于集中质量矩阵假设，对随机振动测试得到的模态振型进行质量归一化。将简支板的质量均匀分布到 27 个测点，其划分如图 3.22 所示。计算每个测点所属区域的质量列出如表 3.7 所示，集成结构的总质量矩阵。利用质量矩阵对模态振型进行归一化，再根据 2.2 节方法一的理论计算结构的模态柔度。为检验模态柔度的准确性，利用模态分析得到的模态柔度去计算结构在均布集中力下的位移，与脉冲锤击测试以及砝码静载试验实测值对比如图 3.23 所示。



图 3.22 集中质量划分

表 3.7 各测点的集中质量(单位: kg)

梁编号	支座	1/8 跨	1/4 跨	3/8 跨	1/2 跨	5/8 跨	3/4 跨	7/8 跨	支座
梁 1	55.31	73.55	73.55	73.55	76.60	73.55	73.55	73.55	55.31
梁 2	58.37	73.55	73.55	73.55	79.66	73.55	73.55	73.55	58.37
梁 3	42.81	55.95	55.95	55.95	59.01	55.95	55.95	55.95	42.81

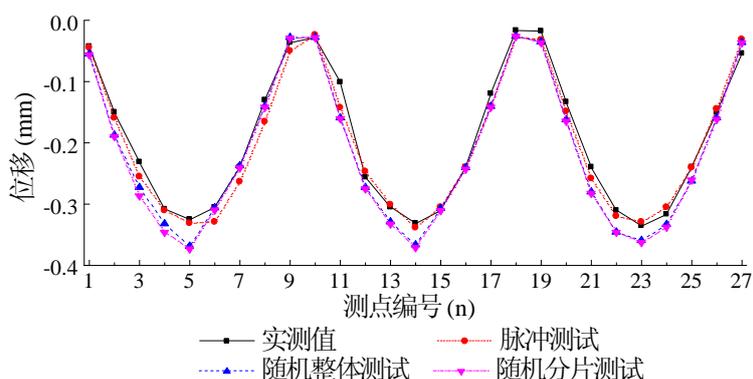


图 3.23 均布力作用下的位移值

由图 3.23 可见,利用随机振动测试获得的柔度矩阵能够预测结构在荷载下的位移,其位移结果偏大,平均每个测点的位移值约增加了 10%左右。这主要是因为采用集中质量矩阵假设过程中,忽略了各个测点之间的耦合作用,相当于降低了结构的自由度,从而使结构变柔。

### 3.5 脉冲锤击法落锤装置的设计与制作

如何从频响函数中有效地识别结构的柔度是一个具有挑战性的问题,主要是实际桥梁结构的频率响应函数受到各种噪声干扰而辨识困难。解决该问题主要从两个方面入手解决,第一是改进脉冲锤击装置,传统的力锤脉冲力有限,发展高等的脉冲激励装置来提供频响范围更广锤击力更大的信号将有助于提高试验的信噪比。目前 Drexel 大学和湖南大学等正在研制一种脉冲可控的落锤装置用于桥梁的激励<sup>[73]</sup>。第二需要发展强大的信号处理手段以提高模态参数识别的准确度。

桥梁的脉冲锤击测试可以通过一个自由落锤来实现。本节的主要研究内容是设计制作出能够用于桥梁结构快速脉冲锤击法测试用途的落锤,在基于单输入多输出(SIMO)脉冲锤击法的基础上,进行桥面局部区域的加速度传感器布设,测试得到子结构的模态信息,并利用子结构模态柔度综合技术进行结构整体模态集成,得到结构的整体的柔度矩阵,从而对桥梁结构健康状况进行评估。该落锤的设计制作及应用成功将成为设想的未来的轮载机动式落锤的雏形(图 2.3)。

#### 3.5.1 国外脉冲锤击法锤击装置

脉冲锤击方法在国际上桥梁的检测中已有很多应用,研究者一般以手锤或落锤的激励为主。力锤激励信号具有较高的信噪比,可以获取高质量的模态频率和振型。落锤相比力锤具有更加大的冲击激励力,能够增加其在实际桥梁动力测试中特别是桥面有车辆等环境激励存在情形下的鲁棒性。但直接利用脉冲锤击方法来获取结构模态质量并进一步获取结构的模态柔度,仅有美国辛辛那提大学的 David Brown 教授团队和德雷塞尔大学 A.Emin.Aktan 教授团队成功地实现。其他的研究团队有利用脉冲锤击法进行桥梁激励试验,如英国谢菲而德大学的

Brownjohn 教授<sup>[74]</sup>和比利时鲁汶大学的 De Roeck 教授<sup>[75]</sup>等分别运用激振器激励和落锤激励，其目的是为了获取高质量的模态参数。目前文献中记载的关于脉冲锤击法的力锤和落锤主要有以下几种类型如图 1 所示，其中手持力锤(图 3.24(a))为美国 PCB 公司生产的标准手持式力锤；落锤形式一为比利时鲁汶大学野外试验所用落锤(图 3.24(b))；落锤形式二为 Drexel 大学研制的可实现气动反弹控制的落锤(图 3.24(c))；落锤形式三为 Modal Test 公司生产的商品化的落锤(图 3.24(d))；另外也有利用 FWD 落锤式弯沉仪进行桥面脉冲锤击测试。



(a)手持力锤进行激励

(b) 落锤形式一

(c)落锤形式二

(d)落锤形式三

图 3.24 不同形式的落锤



图 3.25 湖南大学研制脉冲锤击法落锤

### 3.5.2 湖南大学落锤的设计与制作

根据国内外文献中记载的各种力锤和落锤的式样，设计的新型落锤的具体方案如图 3.25 所示，在结构实验室进行试制成功。该落锤能沿着滑动导杆依靠自重惯性落下，提供可重复的标准力脉冲信号。力锤上可通过砝码进行配重调整，这样使响应信号能够在存在交通车流激励和环境噪声的存在下，具有较高的信噪比。该落锤需要选择合适硬度的橡胶锤头以便于脉冲锤击信号的有效谱宽度能覆盖中小型桥梁结构前 10 阶频率，约为 60~100Hz。为了方便落锤的移动和搬运，落锤下还可设计安装 4 个小型橡胶轮胎。

### 3.5.3 脉冲锤击法落锤的反弹控制

由于弹性锤头的影响以及接触介质的不同，弹性锤头的自由下落总伴随着 5~10 次程度逐次衰减的反弹，而反弹的产生对力信号产生影响而使响应信号产生多次脉冲响应信号的叠加，这样就影响着脉冲锤击法分析。解决力锤的反弹问题其关键是需要锤头撞击接触介质后反弹后防止其第 2 次接触。

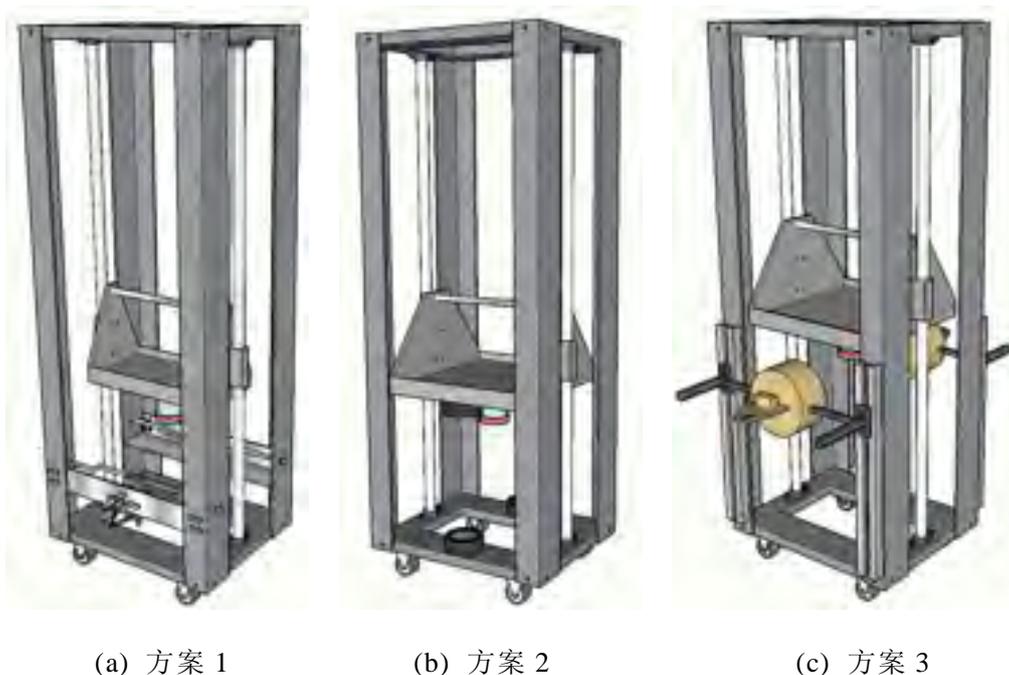


图 3.22 脉冲锤击法落锤反弹控制

考虑到解决该问题的难度，本文研究了 3 种反弹控制的方案并申请了专利：方案一(图 3.26(a))是一套机械反弹控制装置，它通过落锤落下时触碰反弹控制装置上的触发杆使橡胶垫块弹出一定距离，待落锤上升时将反弹装置上的水平可移动撑杆撞开，从而使橡胶垫块完全弹出而将落锤顶住。方案二(图 3.26(b))是利用锤头在第一次脉冲后反弹时，打开电磁铁开关，利用同性相斥的原理使锤头与地面不再接触。方案三(图 3.26(c))则是利用锤头在第一次脉冲反弹时，打开电磁铁开关，利用电磁引力使两侧电磁铁能够把该加载平台抱住。