

学校代号 10532

学 号 S130110107

分 类 号 TU375

密 级 公开



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

大跨钢管混凝土拱桥的静动力试验及 结构识别研究

学位申请人姓名 张军凯

培 养 单 位 土木工程学院

导师姓名及职称 周云 副教授

学 科 专 业 结构工程

研 究 方 向 结构识别与模型修正

论文提交日期 2016年6月1日

学校代号：10532

学 号：S130110107

密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

大跨钢管混凝土拱桥的静动力试验 及结构识别研究

国家自然科学基金青年基金(51208190)资助

高校博士点新教师基金(20120161120028)资助

湖南大学青年教师成长计划资助

湖南省优秀青年骨干教师培养计划

学位申请人姓名：张军凯

导师姓名及职称：周云 副教授

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：结构工程

论文提交日期：2016年6月1日

论文答辩日期：2016年6月2日

答辩委员会主席：沈蒲生教授

Structural identification of a long-span concrete-filled steel tubular
arch bridge based on static and dynamic tests

by

ZHANG Junkai

B.E. (Zhengzhou University) 2013

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

June, 2016

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

模型修正与参数识别隶属于结构识别范畴，依据试验数据完成复杂结构有限元模型的参数识别，对其工作状况评估与健康监测具有重要意义。大跨度拱桥结构的复杂性导致其真实结构中存在较多的认知不确定性，因而有限元模型中普遍存在不确定性参数。本文通过两种方法运用试验数据完成了结构中的不确定性参数的识别研究。第一种方法是基于传统的灵敏度分析筛选重要不确定性参数，通过目标函数最优化方法完成模型校验。第二种方法是基于误差的概率分析，通过一组随机抽样形成的模型群对真实结构进行模拟，以一组模型的后验概率依据参数估计的方法完成结构识别。主要内容概述如下：

(1) 总结了一座大跨度拱桥现场静动力试验结果，根据线型观测结果明确了设计资料对于结构识别的可靠性。通过精确的现场勘测指导结构的精细建模，消除了有限元模拟的几何误差。提取了现场试验数据，为后续识别过程提供支持。

(2) 对拱桥的桥面与钢拱在竖向与横向两个方向上分别进行了工作模态分析，对比了不同分析方法以及数据前处理方法对于模态参数识别结果的影响。在复模态指示函数方法的识别中，分别使用不同子结构测试中的参考点数据识别了模态参数，发现形成整体的结构的频响函数时，使用不同的自谱输入可能会导致虚假模态的识别。此外，本文通过不同构件的模态分析结果验证了大跨度拱桥不同构件振动时的空间模态耦合现象。

(3) 通过目标函数最优化方法识别了有限元模型中的明显不确定性参数。为了避免传统优化方法在复杂问题求解中陷入局部最优的弊端，提出了参数识别的遗传算法。在验证数值仿真模型适用性的基础上将其应用于来华大桥的结构识别。为解决遗传算法在目标函数求解过程中局部搜索能力较差的弊端，进行了模拟退火算法的研究以及改进的遗传退火算法识别研究。

(4) 基于误差理论的基础上，进行贝叶斯理论的多模型识别方法研究，结构的参数识别主要由随机模型群中少数后验概率较高的识别模型决定。根据识别结果不仅可以确定参数的贝叶斯估计，也能明确各不确定性参数的分布情况。

关键词：工作模态分析；认知误差；人工智能算法；模型校验；多模型识别

Abstract

Mode updating and parameter identification belongs to the category of structural identification, which is conducted by pairing the model with field test results, and is of significant importance for condition assessment and structural health monitoring. Due to its complexity inherent in long-span arch bridges, plenty of epistemic uncertainty may be induced during the FE modeling procedure. This paper discussed the two structural identification methods to identify uncertain parameters using the field test results. The first method is based on one optimal model which is best coincide with tests data. Significant updating parameters are selected by sensitivity analysis and model calibration is carried out based on the optimization of objective function which denotes the relative difference between FE model and test data. The second method is based on the theory of uncertainty and probability theory. Model calibration is based on a set of candidate models to simulate the real structure, during which parameters are identified according to the posterior probability calculated by the bayes formula. Major contents of this research are drawn as follows:

(1) Field tests including ambient vibration tests and static loading tests carried out by loaded-trucks were summarized. Results of elevation observation showed that real structure is in strict accordance with design blueprints. Uncertainties due to geometry parameters are mitigated by precise modeling guided by complete field investigation. As the early stage of structural identification, field test results laied the foundation of model calibration and parameter identification.

(2) Ambient vibration tests were carried out on both bridge decks and arch ribs and two kinds of operational modal analysis methods were employed. Before using the complex mode indicator function (CMIF) method, two kinds of pre-processing techniques were used. In order to research the impact of inputs considering acceleration signals of reference point in each sub-structure tests, modal parameters identified were compared. When constructing the frequency response function of the whole structure, considering different kind of auto spectrum may lead to misidentification of modal parameters. Besides, spatial mode coupling is obvious according to modal analysis on arch ribs and bridges decks.

(3) During model calibration, uncertain parameters are identified through optimization of objective function. In order to avoid iterative search trapped into local

minima, model calibration based on artificial intelligence are employed. Afterwards, it was applied to numerical simulation model and FE model of Laihua Bridge. In order to overcome the shortcoming of genetic algorithm in local search ability, simulated annealing algorithm and a hybrid algorithm were also investigated.

(4) After the recognition of error compensation, multi-model identification based on bayes theory was used in this research and uncertain parameters were identified by bayes estimation. According to this method, both the maximum likelihood of uncertain parameters and its distribution could be acquired.

Key Words: Operational modal analysis; Epistemic uncertainty; Artificial intelligence; Model calibration; Multi-model based identification

目 录

学位论文原创性声明	I
摘 要	II
ABSTRACT	III
目 录	V
第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 结构识别	1
1.2.1 模型修正及其发展	3
1.2.2 人工智能方法	7
1.2.3 基于多模型的结构识别	9
1.3 本文主要研究内容	11
第 2 章 大跨钢管混凝土拱桥现场静动力试验	13
2.1 引言	13
2.2 试验对象	13
2.3 试验测试内容及方案	15
2.4 桥梁静载试验	15
2.4.1 加载方式	15
2.4.2 工况设置	16
2.4.3 桥面板挠曲位移测量	17
2.4.4 钢拱挠曲位移测量	18
2.5 全桥模态测试	19
2.5.1 环境振动测试	19
2.5.2 测点与工况布置	19
2.6 本章小结	20
第 3 章 大跨钢管混凝土拱桥工作模态分析	22
3.1 引言	22
3.2 模态参数识别理论	22
3.2.1 系统动力学方程以及模态叠加原理	22
3.2.2 相关函数分析	23
3.2.3 随机减量技术	24
3.3 随机子空间识别方法	24

3.4 复模态指示函数方法.....	26
3.5 工作模态分析.....	27
3.5.1 数据前处理过程.....	27
3.5.2 CMIF 方法数据后处理过程.....	31
3.5.3 模态参数识别.....	32
3.6 模态振型与模态耦合现象.....	37
3.6.1 模态振型结果.....	37
3.6.2 模态耦合.....	38
3.7 本章小结.....	39
第 4 章 基于遗传退火混合算法的单模型桥梁结构识别.....	40
4.1 引言.....	40
4.2 有限元建模方法.....	40
4.2.1 拱肋模拟.....	41
4.2.2 灵敏度分析.....	42
4.2.3 程序应用交互访问技术.....	44
4.3 基于遗传算法的模型修正.....	45
4.3.1 遗传算法.....	45
4.3.2 计算模型验证.....	45
4.3.3 损伤模型.....	46
4.3.4 参数识别结果.....	46
4.4 来华大桥模型修正与参数识别.....	48
4.4.1 模拟退火算法.....	48
4.4.2 遗传退火算法.....	49
4.4.3 参数修正结果.....	50
4.5 结果校验.....	52
4.6 本章小结.....	54
第 5 章 基于贝叶斯统计理论的多模型桥梁结构识别.....	55
5.1 多模型结构识别.....	55
5.2 误差补偿理论.....	56
5.3 贝叶斯统计推断理论.....	57
5.3.1 贝叶斯公式.....	57
5.3.2 基于贝叶斯方法的多模型结构识别.....	58
5.4 多模型方法的数值仿真模拟.....	59
5.4.1 关键参数先验分布选取.....	59
5.4.2 蒙特卡罗随机抽样过程.....	59

5.4.3 模型识别.....	60
5.4.4 参数估计.....	62
5.5 来华大桥多模型识别.....	65
5.5.1 关键参数先验分布选取.....	65
5.5.2 蒙特卡罗随机抽样过程.....	65
5.5.3 模型识别.....	66
5.5.4 参数估计.....	68
5.6 本章小结.....	70
第 6 章 总结与展望.....	71
参考文献.....	73
致 谢.....	81
附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录.....	82

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景与意义

大型桥梁是连接现代化交通网络的“咽喉”，是关系国计民生的命脉工程，其建设与维护是一个地区现代化基础建设的标志。随着国民经济的高速发展和城市化率的提高，我国大型桥梁的数量和类型已居于世界先进水平，成为真正意义上的桥梁大国。由于新型建筑材料、结构形式的选用和施工技术的进步，大跨度拱桥在交通运输中发挥着越来越重要的作用。例如，2009年建成的朝天门长江大桥主跨跨度 552m，是当时最大的钢桁架拱桥；四川境内的合江长江一桥主跨长达 530m，是当前世界上跨度最大的钢管混凝土拱桥。由于城市基础设施建设的高速推进以及先进工程工艺与技术的应用，未来将有更多各种类型的大跨度桥梁出现。随着使用时间的推移，桥梁的交通量和车辆荷载等级都大幅增加。而由于受到车辆和行人荷载的反复作用以及暴雨洪水、风沙冰雪、日晒冻融等环境因素侵蚀的影响，部分构件出现损伤，承载性能下降并导致桥梁结构的整体性能退化，严重威胁着国有财产及人身安全，其状况评估和寿命预测工作的重要性日益突出。

我国的大部分桥梁建成于新中国成立以后，其当前服役年限并不长但主体结构均存在着一定的病害。由于受限于项目经费，桥梁管理部门通常将静动力实验的重点侧重于新建桥梁、结构功能改变和存在隐患的桥梁。通过对比试验和数值计算的结果来评估桥梁的性能，并提供决策技术支持。其中，成桥试验结合使用了现场观测、非破损检测和卡车静载测试，它是在桥梁投入实际运营前通过卡车加载完成的性能预测，反映了结构最初的工作状态，并可以作为长期健康监测的基准。此外，环境振动测试具有应用范围广，易于操作且经济合理，以及不妨碍桥梁上部结构正常工作的特点，逐渐被广泛地应用于现代桥梁结构结构识别与性能评估中。综合基于静力与动力试验的结构识别有助于真实全面地认知结构的实际工作状况，实现可靠的评估与监控。

1.2 结构识别

结构识别是由结构的输出响应反演系统属性的工作，是对应于结构分析的反问题，它属于系统识别理论在工程界的发展。结构识别理论的提出始于上世纪 60 年代末，发展至今已有 50 多年的历史。

结构识别的范式被 Hart G C 和 Yao J T P 于 1977 年首次在工程力学上提出^[1]，然后在 1978 年被引入到土木工程界^[2]，激起了大量土木工程师对于结构识别的研

究。Doebbling S W 等对其明确了一个准确的定义为“利用被试验修正的模型进行与参数相关的结构预测工作”^[3]。结构识别在过去的 30 年中在机械工业领域取得了广泛的发展，然而在土木工程领域的研究则大量停留在实验室阶段，在实际桥梁等大型结构中的应用仍有待发展。2005 年，结构识别的概念被 ASCE St-Id of Constructed Systems Committee 所接受，其范式被描述为“理论-试验-决策”的六步综合圆，识别过程包括对结构的观察、依据设计资料建立的先验模型、为获取结构响应进行现场试验、数据分析过程、模型修正以及基于修正后模型的结构响应预测等，具体步骤如图 1.1 所示。



图 1.1 结构识别六步圆

在结构识别的工程应用中，为保证研究工作的缜密和完善，应当严格按照“六步圆”的顺序开展。在土木工程领域，模态参数识别隶属于系统识别范畴，是结构动力学的反问题。模态参数通常包括模态频率、模态振型和阻尼比，三者从模态方面共同表征了结构的动力特征，是结构工作状况评估、模型校验、损伤诊断以及响应预测和健康监控的基准^[4]。然而，在大跨度拱桥等复杂结构中，模态参数的识别仍旧存在很多困难。如有限元模拟引入误差较多、试验开展难度大、试验受环境影响较大、数据分析工作量大等。

大型桥梁结构动力试验通常可分为冲击测试和环境振动测试，通过对所获取振动信号进行分析提取实际结构的模态参数。模态参数识别的方法可分为实验模态分析(Experimental Modal Analysis, EMA)和工作模态分析(Operational Modal Analysis, OMA)。前者是基于输入、输出数据的识别方法；后者是仅基于输出数据的识别方法。由于环境振动测试相比于传统的冲击振动测试具备诸多优点，现代大跨度拱桥的动力测试大多依靠环境振动（包括风、水流、行人、地脉动等）激励。在环境振动测试中，由于现场激励的假定、测试过程引入的误差以及各种工作模态分析方法均在参数识别的过程引进不确定性因素，导致测试结果和真实结构响应之间的偏离，并影响了结构识别的稳定性和可靠性。此外，基于环境振动的模态试验中，虚假模态的剔除和不同结构之间模态振动的耦合影响着模态分析在工程应用中的可靠性，从而带来了进行准确的模型修正以及参数识别的困难。

1.2.1 模型修正及其发展

如何科学地评估服役桥梁的性能是工程领域的难题之一，而基于静动力试验的结构识别是解决该问题的良好途径。其中，模型修正是基于有限元方法的结构识别的核心内容。有限元技术在兼备数值模拟时间短、运算耗时少和费用经济合理等优点的同时，在建模的过程中引入了对结构的必要简化。此外，设计与施工的脱离以及不同建筑材料的选用均会引入有限元模拟和真实结构之间的误差。通过观测、试验以及关键不确定性参数的识别和修正，使模型实现准确预测结构响应的目的即为模型修正。

传统的模型修正为单模型的识别方法。通过得到单一的精准模型来反映实际结构的真实状况，并以之进行响应预测，其本质属于优化问题的范畴。其具体操作过程是以现场试验的结果为实际结构的真实反映，通过选定的目标函数和优化方法，得到和测试结果最一致的数值模型。根据误差理论，在系统识别中，除测试误差外，有限元模拟误差主要由三方面因素组成。即数值模型选用引入的误差、数值模型偏微分方程求解过程中引入的误差以及建模过程中的假定^[5]。其中，建模假定引入的误差按来源又可分为由于模型结构的假定和模型中的不确定性参数导致，传统的模型修正是针对不确定参数的修正。

目前国际上流行采用多模型的识别方法。由于试验仪器的测量误差和环境误差等偶然误差的存在，应用于模型修正过程的试验数据具备相应的离散性。为更加准确地模拟试验结果和材料特性的统计学特征。多模型方法应用中的主要工作包括：由建模不确定性参数建立模型群，分析各模型与试验数据的拟合程度，被识别模型的筛选，以及通过一组被识别的模型进行状况评估与响应预测。在传统的大跨度桥梁的损伤诊断、工作状况评估和复杂的响应预测中，要以一个真实模拟实际结构的有限元模型为基础。经过校验的有限元模型能够全面、真实地反映结构的物理行为。

如何通过现场勘测以及静动力试验，建立准确描述结构行为的有限元模型，是解决大跨度结构损伤诊断以及健康监控的关键。通常，模型校验首先应修正建模过程中的不合理假设，在全面消除有限元模型几何尺寸和细节模拟误差的基础上，通过参数校验实现模型修正，使修正后的有限元模型全面真实地反映实际结构的几何特征和物理力学行为。作为一种广泛发展的计算仿真技术，模型修正已在机械工程、航空、土木工程等学科领域取得了大量的实践^[6-7]。根据修正方式的不同，模型修正方法分为直接修正方法和基于灵敏度分析的参数修正方法。前者通过改变系统矩阵实现模型与试验结果的匹配，在实际的应用中难以保证修正结果保留合理的物理意义。随着有限元仿真技术的发展，基于灵敏度分析的参数修正方法被日益推广，并在工程应用领域取得了长足的发展。

Friswell M I 等^[8]总结了基于振动测试的模型修正, 对于近 20 年模型校验的主要研究成果进行了综述。在该领域比较活跃的研究方向是基于灵敏度的模型修正方法。

荣见华等^[9]也从动力测试角度对有限元模型修正中的各种问题做了详细阐述。基于灵敏度分析的有限元模型修正主要被应用于参数识别与损伤识别中。不确定性参数如混凝土弹性模量、构件的几何尺寸、相邻构件连接方式以及系统边界条件等均可通过目标函数迭代优化的方式实现准确的识别。

1998 年, Fritzen C P 等^[10]提出了一种基于灵敏度分析的模型校验方法, 将其应用于识别一块铝板内部的损伤。文章通过正交化的方法实现损伤参数的降维, 并在识别过程中考虑了建模误差的对损伤识别结果的影响。

2000 年, Brownjohn J M W 等^[11]根据现场测试的模态分析结果, 通过改变斜拉桥内部混凝土单元的弹性模量和构件的几何尺寸, 对新加坡的 The Safti Link Bridge 进行了基于模态参数灵敏度分析的模型修正, 并完成了其工作状况评估。

2001 年, 张启伟等^[12-13]依据模态频率的相对误差建立目标函数, 通过目标函数最优化的迭代搜索方法完成了香港一座斜拉桥的校验。文章指出, 迭代过程中各参数修正的界限由参数的不确定性程度决定。在此基础上, 作者进行了一座悬索桥缩尺模型的参数识别。

2003 年, Brownjohn J M W 等^[14]通过现场试验和有限元模型校验, 评估了一座新加坡的公路桥梁维修与加固的效果, 其模态测试在桥梁的正常使用状态下测取。文章指出, 模型修正的结果真实地反映了桥梁加固过程中边界条件的变化, 验证了基于现场试验与模型校验的方法在结构识别中的可靠性以及该方法在其他结构的识别与状况评估工作中的适用性。

2003 年, Gorl E 等^[15]选定模态分析的频率与振型建立目标函数, 并用其定位了一个 3 维框架中的节点损伤。

2007 年, Bijaya J 等^[16]使用灵敏度分析筛选模型中重要参数, 并在此基础上通过模态柔度目标函数的最优化完成了不确定参数的识别, 校验了一座服役期内的钢管混凝土拱桥。

2007 年, Daniell W 等^[17]通过手动修正的方法完成了一座斜拉桥的梁板模型的校验, 并进行了手动校验方法与桥梁的自动校验技术的对比分析。作者指出, 手动校验过程中可以修正模型的网格和单元类型是模型的自动修正技术所不具备的。此外, 作者指出有限元建模过程的精确性对于修正具有重要意义。

2009 年, Perera R 等^[18]指出模型修正技术是完成损伤识别的良好方法。目标函数的构成和有限元建模过程中对实际结构的细节模拟通常会对结构识别与损伤诊断产生影响。为了缩短计算时间, 作者认为建模过程适当程度的有限元假定是可取的, 且通过多种目标函数进行有限元模型修正可以极大提高结构识别的鲁棒

性。

2011年,张国刚等^[19]对一座混凝土斜拉桥完成了多种工况静载测试和模态测试,并对其梁板模型完成了基于灵敏度分析的模型校验。校验过程首先考虑了建模过程中边界条件的合理模拟,并通过 ANSYS 有限元软件命令流实现了目标函数的迭代寻优。

2012年, Sanayei M^[20]等通过在 Vernon Avenue Bridge 在早先建造过程中安置的传感器完成了桥梁的静载卡车试验,并通过应变数据修正了一个详细的有限元模型。并对比了基于静载试验的传统桥梁评估方法和基于修正模型的有限元响应预测方法进行桥梁工作状况评估的差异。

2014年, Sipple J 等^[21]对 Powder Mill Bridge 进行了全桥模态测试,并通过相关系数的分析筛除了加速度时程数据中的噪声。依据详细的现场观测以及模态分析频响函数完成了初始有限元模型的修正,修正结果发现了桥梁一处负弯矩区域较大的刚度。

2014年, Xiao X 等^[22]在对 Stonecutters Bridge 进行了静动力试验的基础上建立了一种综合考虑模态频率以及静载应变影响线的多尺度目标函数,通过响应面的方法实现目标函数的最优化完成了桥梁的模型修正。

前述学者在模型修正领域的研究中,指出模型修正前通过详细的现场观测并建立精确的有限元模型对与模型修正的可靠性具有重要意义。通过静动力试验数据建立目标函数,使用各种最优化方法进行迭代运算可实现良好的“模型-试验”匹配。然而,大跨度拱桥结构的模型不确定性参数多,试验测试数据信息有限,且其目标函数的解空间十分复杂,模型校验结果通常容易陷入局部最优解。因而,选定结果中的重要不确定性参数并选取合适的数值优化方法是提高模型校验可靠性的关键。

大跨度桥梁结构识别研究自1980年起,国内外诸多学者,包括美国 Drexel DI3 研究所的 Aktan A E 教授团队等对于环境振动测试以及结构识别在土木工程领域的应用进行了大量的研究。

1997年, Nazmy A S 等^[23]探讨了不同设计参数下钢拱桥结构性能的变化,分析参数变化对拱桥的强度和稳定性的影响,并提出了相应类型拱桥的结构设计优化建议。识别结果指出,同时考虑屈服强度与极限强度的情况下,拱桥保持 0.25 的高跨比将最有利于其承载能力的发挥。

1998年, Aktan A E^[24]等为研究结构识别的理论部分,分别对一个桥梁 3 维模型进行了基于灵敏度分析的传统修正,并使用 Matlab 对两个 2 维模型的修正,并指出修正的结果必须保证不确定性参数物理意义的完备性。

2004年,任伟新等^[25]对田纳西河桥进行了环境振动测试,并对比了峰值提取法和随机子空间识别法的差异,指出随机子空间识别法识别出的模态振型更为准

确。文章中使用两种模型进行了基于模态参数的模型校验，并指出集中质量模型与试验结果吻合较好且可以作为对真实结果模拟的基准。

2005年，任伟新等^[26]使用多种目标函数对北川河桥完成了基于环境振动测试和灵敏度分析的模型校验，并指出校验结果在缩小3维有限元模型与试验数据误差的同时，保留了被校验参数的物理意义。

2005年，Ko J等^[27]统计出当时世界上大概有40座大跨度桥梁装配有健康监测系统，并对大跨度桥梁中健康监测系统的应用与发展做了综述。文章指出，多学科知识融合发展的健康监测技术，对于桥梁结构的修复、保养以及紧急维修具有重要意义。

2007年，Catbas FN等^[28]为了研究结构识别在大型结构中应用的困难，在一座大跨度桥梁上进行了静载试验与环境振动测试，并通过随机减量技术和复模态指示函数法识别了结构的模态参数，通过整体修正和局部修正两阶段的研究完成了一座大跨度桥梁的结构识别研究。

2008年，Filipe M^[29]研究了一种“多通道动态监测系统”，该系统能够实现桥梁的固有频率与频率域分解方法的在线自动识别，跟踪葡萄牙的 Infante D. Henrique Bridge 的前12阶固有频率。并通过有限元模型与频域分解法得到的模态频率进行匹配实现了模型修正。

2008年，Song Y等^[30]使用斯坦福大学和密歇根大学联合开发的无线传感器对厦门五缘大桥进行了模态试验，并使用随机子空间识别法（SSI）进行了工作模态分析。通过无线传感技术模态测试与有限元模态分析的结果对比，证实了无线传感技术在模态分析中的适用性。

2010年，Reynders E等^[31]分别对一座跨径为75.2米的钢拱行人桥和30米的混凝土悬带桥进行了试验模态分析、工作模态分析与混合模态测试，并对比了三者的分析结果。

2010年，Brownjohn J M W等^[32]重新完成了 Humber Bridge 的模态测试并分别使用特征系统实现算法、随机子空间识别法和多参考点最小二乘复频域法（Ploymax）对其模态参数进行了识别。

2010年，Bayraktar A等^[33]对土耳其一座双跨拱桥进行了环境振动测试，并对比了峰值提取法和随机子空间识别法进行工作模态分析的结果。在此基础上，作者通过改变模型的边界条件实现有限元模型的修正，将最大模态频率相对误差从18%降低至7%，实现了模型与试验的良好匹配。

2011年，Wei L等^[34]对一座5跨连续拱桥综合进行了完备的现场观测、环境振动测试、车桥耦合振动试验以及静载试验，通过观测桥梁与钢拱的静动力试验数据对桥梁的健康状况进行了评估，并对桥梁的维修与加固给出了合理的建议。

2011年，Pan Q等^[35]在充分分析结构识别中认知不确定性的影响下，在环境

振动测试的基础上完成了一座大跨度拱桥的结构识别研究，并根据误差理论评估了模型校验的适用性。根据工作模态分析的结果，大跨度拱桥由于其复杂的构型，存在着明显的模态空间耦合作用。

2012年，Álvarez J J等^[36]研究了在地震时程分析中大跨度桥梁的承载力和拱肋的延性，指出桥墩的两端为大跨度拱桥具有显著延性需求的部位，且轴向力的波动对拱桥的地震评估具有较大的影响。

2013年，李晰等^[37]利用设置在一座钢管混凝土拱桥上的健康监测系统，对实际结构的工作模态进行识别，依据识别结果采用零阶近似法对初始有限元模型进行了修正。

2014年，胡志坚等^[38]针对九江长江大桥主桥三联拱桥部分开展大缩尺比的静动力模型试验研究，在验证模型结构有效性与可靠性的基础上，通过各类构件的不同损伤模拟研究了结构的动力特性变化。

2014年，Costa B等^[39]对比了路易斯一世桥加固前后随机振动试验的模态分析结果。结合有模型参与的结构识别技术，论证了桥梁刚度、模态参数和边界条件之间的关系。

大跨度拱桥早期的结构识别以静载卡车试验为主，通过观测静载变形完成模型与试验的匹配。后来，由于模态测试技术以及各种工作模态分析方法的发展，环境振动测试在结构识别中扮演了越来越重要的角色。

1.2.2 人工智能方法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是一种不依赖于被求解的目标函数导数和连续性的启发式算法。它起源于人类对自然界生物遗传与进化过程的模拟，最早于1975年被Holland J教授提出^[40]。遗传算法的优点在于其基于一个种群的并行搜索方式，极大地拓展了算法在解空间的搜索能力并保证遗传迭代过程中种群内部个体之间的有效信息交换。因为算法不依赖于目标函数的导数和先验知识，因此取得了广泛的应用，尤其适用于复杂的非线性问题以及多目标优化问题，属于人工智能的范畴^[41]。随着遗传算法的推广使用，众多学者将其应用于土木工程结构识别问题，并获取了良好的效果。通常，遗传算法在结构识别中的应用通过遗传算法求解最优化的目标函数实现，目标函数通过有限元与真实结构之间的误差建立，识别的结果是得到一个最符合试验结果的数值模型^[42]。自1980年代起，遗传算法已在工程领域取得了大量实践。

1997年，Cooper V A^[43]分别使用遗传算法、模拟退火算法和混合竞争进化方法应用于降水-渗径模型，并取得了良好的效果。

1999年，Lingireddy S^[44]将遗传算法应用于一个供水系统模型，并找到了供水网络的最佳布置。

2001年, Xia Y 等^[45]通过环境振动测试获取了一根实验室悬臂梁的模态参数, 分别使用模态频率、模态振型以及两者的结合, 三种数据建立目标函数, 使用实值编译的遗传算法完成了悬臂梁模型损伤前后的参数识别。并将此方法推广应用于一个框架结构。文章指出, 即使在有限元模型不够精确的情况下, 遗传算法同样能够实现准确的损伤识别。

2005年, Reda T 等^[46]将一种基于人工智能的结构健康监控方法应用于一座预应力混凝土桥梁, 通过模糊模式识别的方法识别出桥梁主跨下部混凝土梁 40% 的刚度损伤。

2006年, Perera R 等^[47]指出遗传算法在识别结构损伤位置以及损伤程度方面的优越性, 并在模态测试数据中加入随机误差, 考虑了噪声对于损伤识别的影响。

2007年, Perera R 等^[48]提出了一种基于模态测试与模型修正技术的两阶段构件损伤识别方法, 分别完成构件损伤发生区域与单元损伤程度的识别。并使用多目标混合优化方法以及遗传算法完成了实验室简支梁和实际桥梁的损伤诊断研究。

2010年, Koh B 等^[49]将遗传算法与粒子群优化算法应用到悬臂梁与桁架结构的损伤识别中, 其目标函数通过结构的模态频率构成。识别结果显示, 基于种群的人工智能方法在结构质量的局部损伤中实现了良好的效果。

2010年, Giuseppe C M 等^[50]进行了遗传算法在大型结构中的识别研究, 并在其中加入了亚种群方法和偏移算子以提高种群的空间搜索能力。

2011年, Thanh N 等^[51]进行了一座 100 层剪力屋架和一个 10 层框架缩尺模型的结构识别反问题研究, 通过遗传算法完成大量模型参数的识别。在加速度时程数据内含 10% 的误差的基础上, 不确定参数识别结果的平均误差被控制在 3% 以内。

2015年, Chisari C 等^[52]在先前完成的静动力试验基础上, 分别使用模态频率及振型、静载变形建立两种目标函数, 并使用遗传算法进行了一座预应力混凝土桥的结构识别研究, 取得了较好的模型修正效果。

遗传算法的迭代寻优过程是随机进行的, 然而并不类似于穷举法在解空间内进行盲目搜索, 遗传算法中种群迭代优化的过程仅占据其繁殖的早期阶段。因而可以避免繁杂的计算工作。然而, 遗传算法的识别过程并不稳定, 每次种群适应度值的计算均需要进行一次有限元分析的过程。在较小种群与较少参数的优化与识别问题中, 遗传算法通常能取得较好的效果, 然而在大型有限元分析领域, 如何提高遗传算法的计算速度成为研究过程的一个重要问题。此外, 遗传算法在参数识别中的应用还应考虑种群过早收敛和解空间局部搜索能力较差的局限性。

模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithms, SAA) 是一种基于概率的启发式全局优化算法, 最早起源于 Metropolis 准则思想, 而后被 Kirkpatrick 引入到工程优化领域^[63]。退火算法是一种全局优化算法, 并拥有强大的局部搜索能力。其

思想启发于金属原子在退火降温过程的运动特征。在温度降低的过程中，算法交替完成“产生扰动——计算新状态目标函数值——判断是否接受扰动——降温”的进程。它的搜索方式异于传统的随机方法，在随机扰动中引入了退火的自然机理。每次迭代不仅接受“较好”的扰动，同时以一定概率接受“较差”的扰动，且随着降温过程的持续，接受较差扰动的概率逐渐降低。因而，在算法运行的初始阶段，模拟退火方法保留了较强的全局搜索能力，并在迭代的后期，通过仅接受较好的扰动使目标函数迅速趋近于附近的最优解。随着计算机科学的迅速推广，模拟退火算法在工程应用领域取得了长足的发展与广泛的应用^[53-55]。最近，工程界普遍认识到遗传算法和模拟退火算法各自的局限性，并考虑将两种算法结合应用于求解多维复杂问题中^[56]，工程界对于遗传算法与退火算法各自优点的理解衍生出最新的遗传退火算法（Genetic annealing hybrid algorithm, GAHA），该方法在保留遗传算法强大并行搜索能力的基础上引进了退火算法的 Metropolis 准则，有效避免了识别过程过早陷于局部最优的危险，并在迭代后期依旧具备了较好的种群局部搜索能力^[57]。

1.2.3 基于多模型的结构识别

由于大跨度结构的复杂特性与结构动力响应的非线性，结构识别的结果通常不具备唯一性。根据误差的参数识别理论，由误差来源的不同，有限元模型与真实结构之间的误差被分为认知误差与随机误差。其中，随机误差通常被假定为服从零均值的高斯分布。基于最优化方法的模型修正的目的在于消除认知误差的影响，然而由于不同误差之间的参数补偿可能导致错误模型被识别的可能。基于概率方法的多模型结构识别，是基于传统的单一模型识别方法和对于识别过程误差与不确定性分析的基础上发展而来。通过准确地模拟结构中两种误差的数理特性，设置合理的随机误差阈值，利用多个被校验的待选模型来预测结构响应，其研究重点在于从众多随机模型群中筛选符合试验结果的待选模型群。近年，以瑞士联邦理工 Smith 教授为首的团队开展了一系列关于多模型系统识别的研究。

1998 年，Raphael B 等^[58]提出了利用多个有限元模型来预测结构反应的概念，他们试图考虑在建模和测量过程中所有的不确定性的来源。以瑞士的 Lutrive 大桥为例，列举了近 24 种建模假设并提出了近百万种不同的模型。他们指出了传统的单模型方法进行推理存在的不足，该方法与确定性方法不同之处在于它通过搜索多候选模型 (Multiple candidate model) 来解释结构的测试结果，并提出了混合推理系统来进行诊断。

2003 年，Raphael B 等^[59]提出了洛桑概率的全局搜索方法 (probabilistic global search lansanne, PGSL)，它是基本思路是优化解能从满意的解答点群附近搜索出来，通过对基准问题的研究发现对于多目标高度非线性目标函数，PGSL 的性能

要优于遗传算法和模拟退火算法，并能用于多模型识别。

2005年，Saitta S等^[60]指出系统识别的可靠性需要通过观测模型群的特性，把主成份分析和决策树的理论结合起来进行数据挖掘的研究。

2005年至2006年，Robert N Y等^[61]及 Saita S等^[62]基于多模型识别的观点，采用了山农熵函数(Shannon's entropy function)^[63]来区分模型，测量点和测量设备通过待选模型熵最大的原则来选取，文中利用了一根实验室连续木梁模型和一瑞士自来水供水系统来验证了该方法的可靠性。

2008年，Smith I F C等^[64]在总结了以往研究工作的基础上正式提出了多模型(Multiple model approach)进行系统识别这个命题。提出了误差源分析方法和模型碎片的观点来定义多模型群，利用洛桑概率的全局搜索方法进行整体搜索，利用主成分分析和K值聚类分析相结合的数据挖掘手段，成功对 Schwandbach 曲线拱桥进行了基于多模型的识别。

2008年，Saitta S等^[65]仔细研究了多模型识别中的聚类技术，利用聚类技术来快速分离不正确的模型群，而快速收敛到正确的模型组群，对如何估计聚类种群和评估聚类种群的质量进行了深入探讨。本文构造的科学问题如何在第一次测量的基础上增加新的传感器及位置提高系统识别的可靠性。

2010年，Goulet J A等^[66]指出所选择的待选模型能够用来理解和预测结构的行为，因此增进结构管理者的决策制定。该方法用来对 Langensand 桥的结构性能进行了性能评估，从一系列的候选模型(Candidate model)预测显示位移测量结果的平均误差仅在4~7%之内，而多模型方法反应出该桥有30%富余承载力。

2010年，Saitta S等^[67]在多模型的识别过程中提出了特征选择(feature selection)的策略，它是基于封装方法(wrapper approach)，结合支持向量基(support vector machine strategy)和 PGSL 方法的一种综合手段。他们用基准数据对该方法进行试验研究表明该方法优于遗传算法，对于 Schwandbach 桥的识别表明该方法能够很好地为决策提供服务。

2015年，Pasquier R等^[68]认为由于建模假定以及不确定参数的影响，通过多模型的方法进行结构识别是一个循序渐进的过程，对于服役期较长的复杂结构提出了一种新颖的迭代识别理论，并将其应用于新泽西州的一座混凝土桥的识别研究。

2015年，Dubbs N C等^[69]对一座钢架进行了若干种方法的多模型研究，指出相比于传统的拉丁超立方抽样与数据相对误差的模型筛选以及误差阈值的模型筛选等方法，基于马尔可夫链与贝叶斯理论的多模型方法体现了最有效率的识别效果。

由于贝叶斯方法强大的数学理论基础与概率观点，基于贝叶斯统计推断的结构识别和模型校验在近年的多模型研究中获得了大量推广^[70]，其优越性体现于工

程实践的不确定参数分析中。Beck J L 和 Katafygiotis L S^[71]建立了基于统计推断的模型修正问题以及建立了利用贝叶斯技术的统计框架来表达随机误差的方法，这一方法被其他学者细化并被 Ching J 等^[72]推广。与之相关的发展还包括基于贝叶斯方法与损伤乘子相结合来修正后验概率^[73]以及发展的混合蒙特卡罗模拟方法^[12]等。

1998 年，Beck J L 等^[74]使用贝叶斯统计推断原理建立了多模型校验和系统不确定性校验的理论框架。

2000 年，Anik M W^[75]使用系统的工作模态分析结果识别了系统刚度，明确了结构性能退化超越界限的概率，以概率理念的视角推广了工程结构健康监控的应用。

2002 年，Beck J L 等^[76]将贝叶斯方法的多模型修正和基于马尔可夫链蒙特卡罗模拟的结合，获得了系统物理参数的后验分布于似然估计。

2009 年，Cheung S H 等^[77]提出了混合蒙特卡罗方法，突破了常规蒙特卡罗方法在高维参数贝叶斯推断应用中的局限性。

2009 年，易伟建等^[78]提出了基于贝叶斯推断的损伤识别方法。

2011 年，Uen K V 等^[79]总结了基于贝叶斯推断的系统识别方法并将其综述为基于结构时域数据的系统识别和基于模态数据的识别。

2013 年，Simoen E 等^[80]使用贝叶斯方法和模型校验完成了加州大学圣地亚哥分校的钢筋混凝土试验模型损伤积累的不确定性分析。

2013 年，Jian Z 等^[81]在对一个实验室框架进行锤击法模态测试的基础上，进行了基于贝叶斯理论的多模型结构识别研究。为了提高抽样的效率，作者在文中引入了带有自适应延迟拒绝技术的马尔可夫链蒙特卡罗抽样方法。

经过多年的发展以及误差理论的推广，多模型的识别方法从早期的由拉丁超立方抽样方法与误差阈值完成的多模型筛选，逐渐发展成熟至由概率的观点完成的贝叶斯理论多模型方法。在贝叶斯理论中，如何进行高效而快速的抽样正成为结构识别领域的热点研究问题。

1.3 本文主要研究内容

为了通过现场试验和有限元方法实现准确的结构不确定性参数识别和模型修正，本文以一座新建的大跨度钢管混凝土拱桥为研究对象，通过静载卡车试验和环境振动测试分别获取了桥梁结构在实际工作状况中的静动力试验数据。在通过振动信号提取结构的模态参数信息的过程中，分别使用了基于频域数据与时域数据的两种识别方法，并在模态参数的频域识别中应用了互相关函数分析与随机减量法两种技术作为数据前处理工作。在模型修正阶段，分别使用两种策略完成了模型修正与结构识别的工作。其中一种研究方法是通过引入人工智能算法和有

限元软件 Strand7 与 Matlab 软件的交互技术实现修正目标函数的自主迭代寻优，得到一个与现场试验最佳匹配的模型。相比于传统的迭代寻优算法，人工智能算法具备不依赖先验知识、提高目标函数收敛的速度并防止收敛过程陷入局部最优等优点。本文分别使用单纯型搜索算法、遗传算法、模拟退火算法、和遗传退火算法进行了传统的基于单一模型的模型修正结构识别研究。另一方面，为了真实地模拟试验结果的数理特性，通过对各种测试数据误差分布的假定，本文从多模型和贝叶斯统计推断的角度分析了依托多种可能性模型强化结构识别可靠性的问题。

本文主要的研究内容如下：

(1)通过一座大跨度拱桥的现场静动力试验得到了实际结构真实全面的实验数据。包括现场观测、静载卡车试验和环境振动测试。并根据设计资料和现场观测结果建立了精确的有限元模型，全面筛除建模过程引入几何参数误差。

(2)对大跨度拱桥现场模态测试数据的工作模态分析过程中，分别使用基于频域数据的复模态指示函数法 (CMIF) 和基于时域数据的随机子空间识别法 (SSI) 完成数据分析。在使用 CMIF 方法的过程中，为了筛选可靠的数据并获得稳定的结果，对比使用了互相关函数法 (Cross Correlation, CC) 和随机减量技术 (Random Decrement, RD) 进行数据前处理工作。为了分析大跨度拱桥中各个构件的振动耦合作用，本文分别分析了实际结构的桥面板与钢拱在竖向和横向两个方向的振动模态。

(3)验证人工智能算法在数值仿真模型的目标函数的迭代寻优和准确结构识别中的适用性。在此基础上使用三种人工智能算法进行了来华大桥的结构识别，并将三种算法的中间过程和迭代结果进行对比，最终得到一个能够真实准确反映结构状况的有限元模型。

(4)使用数值算例验证了多模型方法和贝叶斯统计推断在结构识别问题中的适用性。并将其应用于来华大桥的参数识别研究，使用贝叶斯估计的方法完成结构不确定性参数的识别。

第 2 章 大跨钢管混凝土拱桥现场静动力试验

2.1 引言

在桥梁投入实际使用之前进行现场静动力试验可以全面地获取大跨度桥梁真实的静力及动力性能，通过与有限元建模等数学方法得到的模型分析结果进行对比可以明确结构的当前工作状态，并判定桥梁是否满足通车正常使用要求。为了检验来华大桥当前工作状态是否满足相应的规范和使用要求，确保桥梁在未来服役期内的安全可靠和长期使用性能，湖南大学大型土木工程结构健康监测研究团队（www.hnutest.com）对来华大桥进行了现场勘查、载重卡车试验和全桥模态测试等，收集了全面的试验数据。结合详细的现场勘查获取的桥梁主要构件的几何特性，为后续有限元数值分析以及模型修正奠定基础。此外，本文还依据相关规范规定对结构的正常荷载作用下的使用性能完成评价，全面评估了结构的工作状况。

2.2 试验对象

来华大桥建成于 2012 年，位于广西来宾市，是跨越红水河的一座特大型中承式钢管混凝土拱桥。桥面全长 465m，包括 220 m 的主桥部分以及南北两侧分别为 90 m 和 155 m 的预应力混凝土连续箱梁桥，主桥桥面宽为 32m。拱肋形式为中承式双肋悬链线无铰拱，跨径 210.00 m，矢高 60 m，矢跨比为 1/3.5，拱轴系数 $m=1.543$ 。每片拱肋由 4 根 $\phi 750 \times 20$ (16) mm 的 Q345 钢管组成，内部灌注 C50 微膨胀混凝土。拱肋的上弦和下弦横向两片钢管之间使用 $\phi 550 \times 16$ (12) mm 的平联钢管联接，平联管内亦灌注 C50 混凝土。上、下弦拱肋之间使用 $\phi 450 \times 12$ mm 钢管作为腹杆，组成桁式结构。每片拱肋宽 2.0 m，拱肋截面高度沿桥梁纵向变化，拱脚处的径向高度为 5.5m，拱顶处为 3.5m。桥面上、下游两侧的拱肋间距为 27.0m，桥面以上拱肋之间设置 6 道 K 型横撑、桥面以下设置 2 道 K 型横撑和 2 道对 K 型横撑。每道横撑均为空钢管桁架，由上、下弦 $\phi 500 \times 12$ mm（直撑）和腹杆 $\phi 351 \times 10$ mm 组成，主拱肋共设横撑 10 道。

桥面上、下游两侧各布设 8 根立柱，共 16 根，其材料均为 $\phi 800$ 的钢管混凝土构件，内部灌注 C50 混凝土。42 根吊杆内部的拉索均采用低应力防腐平行钢丝 PES(FD)，屈服强度为 1670 MPa，相邻两根拉索沿纵向的间距为 7.0 m。由于基础的地质条件较好、基岩裸露且承载能力高，桥梁建设过程中采用了扩大基础。其为了承受拱肋传递的荷载，拱肋两端的支座为实体钢筋混凝土墩块，内部嵌固

预埋钢构件。来华大桥现场照片以及来华大桥设计图可见于图 2.1。其中， $\phi 351 \times 10$ 表示钢管构件的直径为 351mm 且厚度为 10mm。

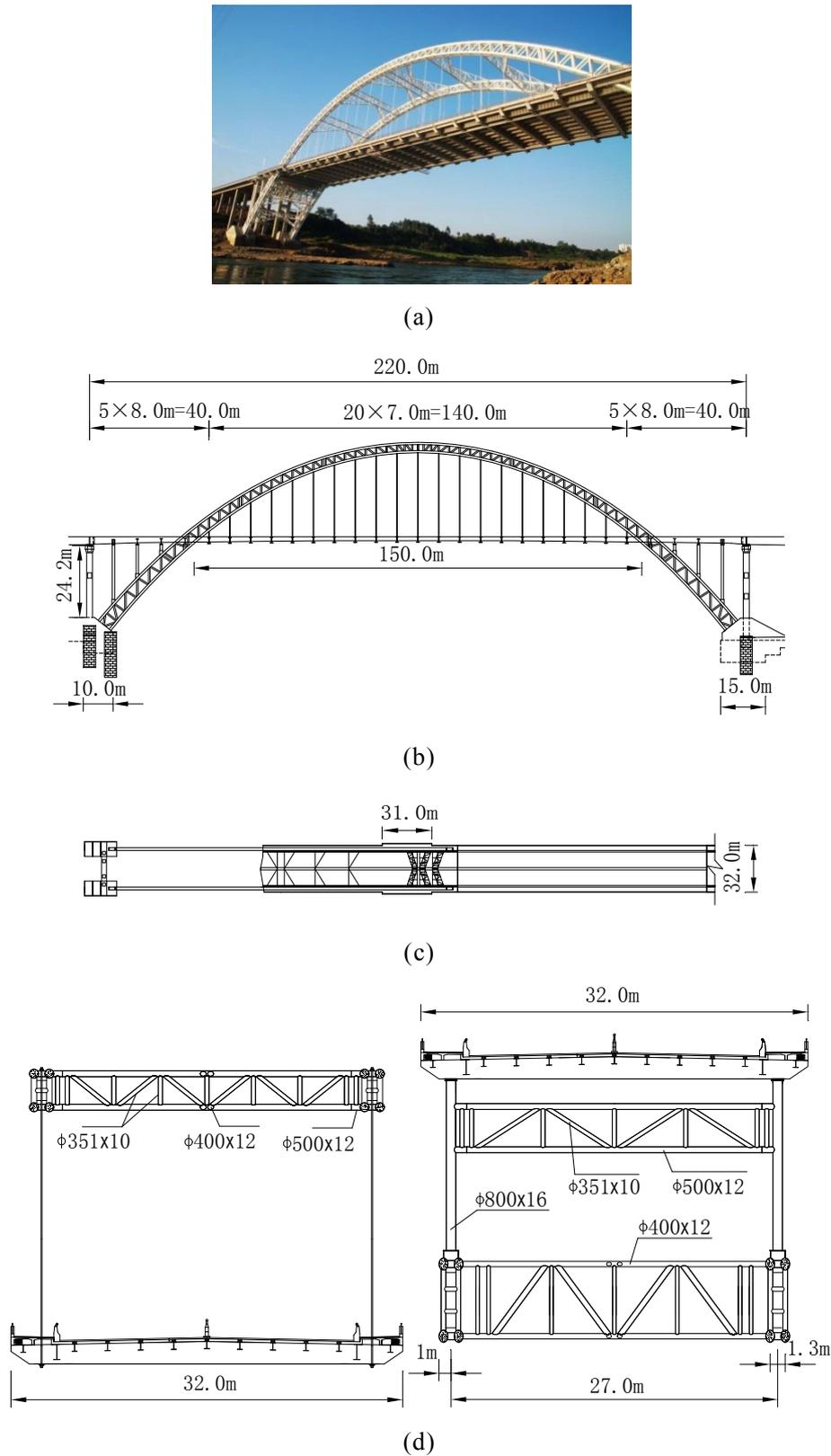


图 2.1 (a)来华大桥照片 (b)来华大桥设计图立面图 (c)来华大桥设计图平面图 (d)来华大桥横断面图

2.3 试验测试内容及方案

为了全面地了解来华大桥成桥状态，湖南大学大型土木工程结构健康监测研究团队于 2013 年 7 月对该桥进行了成桥试验。的静动力特性并实现准确可靠的结构识别，本文对研究对象进行完备的现场静动力试验。测试内容包括：主桥桥面线型测试、基于振动法的索力测试、静载卡车试验，控制截面的应变测试、主跨桥面与钢拱环境振动测试、主桥桥面跑车、刹车和跳车试验。本文为后续研究需要，仅列出桥梁静载试验与环境激励振动试验。

2.4 桥梁静载试验

静载试验是用于认知结构特性最常规的方法。其加载过程通常是从未施加荷载的状况开始，逐级加载至预设的量级。对于初始建成的大跨度拱桥，静载控制试验主要包括在各种不同的卡车荷载组合作用下，钢管混凝土拱和主跨桥面竖向挠曲变形以及部分控制截面的应变。本文所研究的来华大桥建成状态下的静载试验主要目的是为了从静载变形的角度评估桥梁的当前工作状态，并为后续结构识别工作提供依据。

桥面板的测点布置在沿桥面主跨纵向均匀分布的 8 个等分点上，位于桥面防撞栏内侧平坦处。待每个工况下加载稳定后，分别采用电子水准仪和光学水准仪进行测量读数，并相互校核测试结果。钢管拱的竖向变形观测由全站仪完成，测试前预先将全站仪棱镜安放在钢管拱上各个 8 等分点的位置，分别使用上下游河滩安置的全站仪测量各个测点的位移结果。

2.4.1 加载方式

试验采用载重卡车完成加载，每台载重卡车所产生的竖向荷载总计为 300 kN。其中，前轴处为 70 kN，后轴 1 与后轴 2 重力均为 115 kN。加载车辆的尺寸示意图如图 2.2。

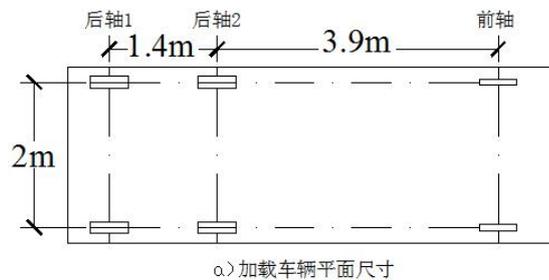


图 2.2 加载车辆平面尺寸图

2.4.2 工况设置

根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》规定，在利用载重卡车进行加载试验时，需要明确来华大桥主桥沿桥面纵向的1/2位置处和1/4位置处截面的最大弯矩。因而，预设工况的加载位置也主要集中在相应位置，按照不同的车辆排列方式分别设置为沿桥梁纵轴对称加载和偏心加载的两种形式。静载试验采用分级加载的方式，包括“空载-加载-卸载”的全过程，共预设了20个加载工况，各个工况的测试内容如表2.1所示。其工况示意图以及部分现场测试照片如图2.3~2.5所示。

表 2.1 主桥加载工况列表

工况编号	主跨 1/2 位置加载	工况编号	主跨 1/4 位置加载
1	空载	11	空载
2	4 台卡车对称放置	12	5 台卡车对称放置
3	6 台卡车对称放置	13	8 台卡车对称放置
4	8 台卡车对称放置	14	10 台卡车对称放置
5	4 台卡车对称放置	15	5 台卡车对称放置
6	空载	16	空载
7	4 台卡车偏向西侧放置	17	5 台卡车偏向西侧放置
8	8 台卡车偏向西侧放置	18	10 台卡车偏向西侧放置
9	4 台卡车偏向西侧放置	19	5 台卡车偏向西侧放置
10	空载	20	空载

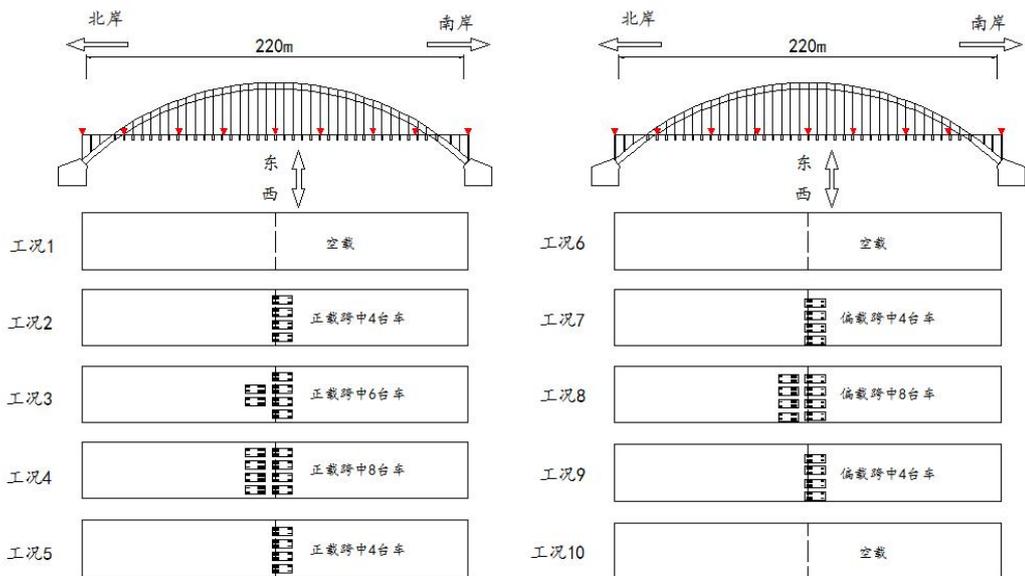


图 2.3 主桥 1/2 位置加载工况示意图

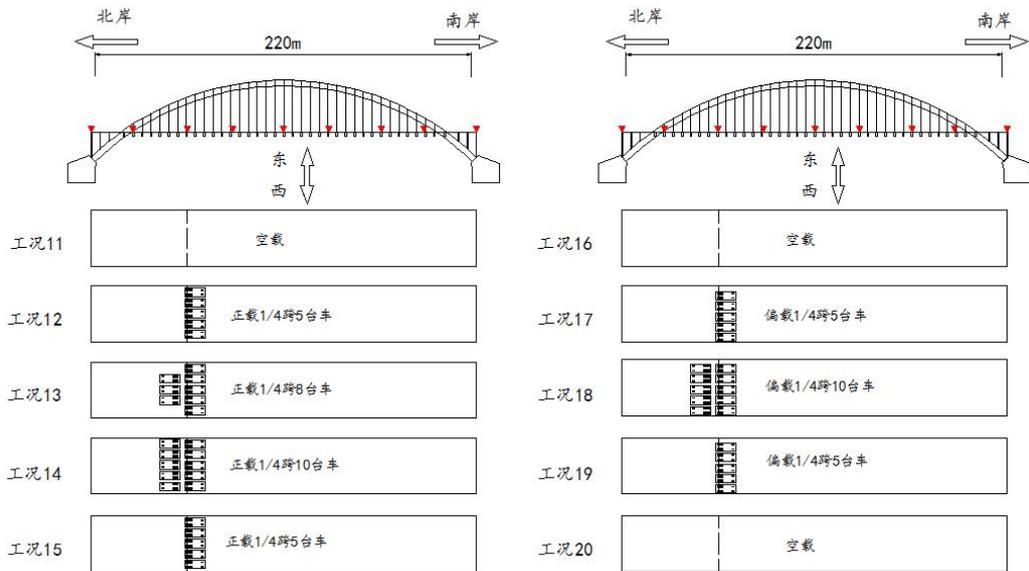


图 2.4 主桥 1/4 位置加载工况示意图



图 2.5 载重卡车加载试验照片 (a)主跨 1/2 位置对称加载 4 台车；(b)主跨 1/2 位置对称加载 8 台车；(c)主跨 1/4 位置加载 5 台车；(d) 主跨 1/4 位置加载 10 台车

2.4.3 桥面板挠曲位移测量

主跨桥面的测点布置在沿桥梁纵向分布的跨中的 8 等分点上，采用水准仪标尺进行水准观测读数，为保持每次读数的一致性，水准尺尺垫安装在桥面防撞栏内侧平坦处，在观测时利用电子读数水准仪和光学人工读数水准仪各一台进行观

测并相互校核结果。由于桥面总长 220m，为保证关键测点的测量数据的准确性，每个水准仪均采用两个测站进行观测。桥面位移水准测点布置图如图 2.6 所示，现场测试照片如图 2.7 所示。

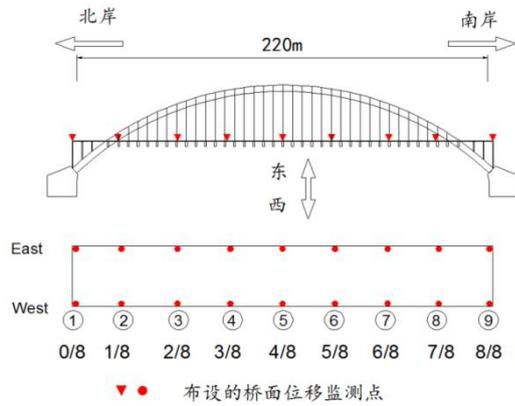


图 2.6 位移水准测点布置图

图 2.7 现场水准观测照片

2.4.4 钢拱挠曲位移测量

在拱圈的测试前，通过在其与桥面板 8 等分测点相对应的位置安放全站仪棱镜，分别在桥梁上游与下游的河滩上利用全站仪观测桥梁在加载过程中的变形。全站仪棱镜布点示意图如图 2.8 所示，现场观测照片以及棱镜的安放照片如图 2.9 所示。

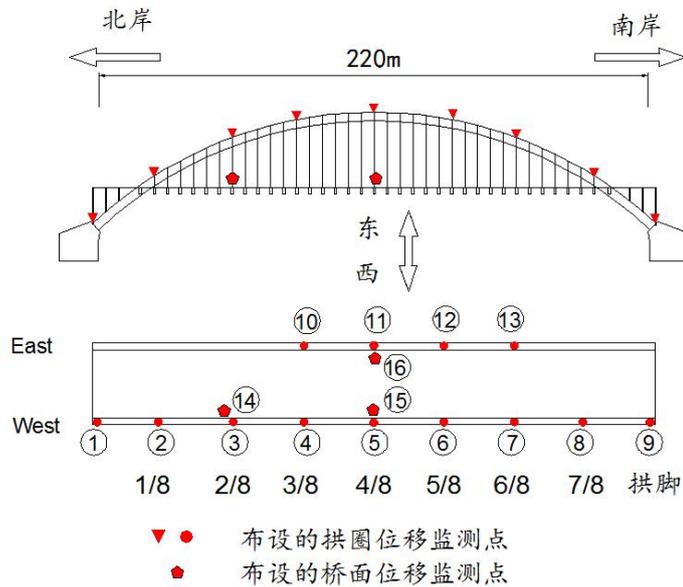


图 2.8 全站仪棱镜布点示意图



图 2.9 现场全站仪观测照片

2.5 全桥模态测试

桥梁的动力特性（自振频率、振型、阻尼系数等），是进行风振和地震响应分析的基础，同时也可作为对结构损伤识别或质量评定的依据。它只与结构本身的固有性质有关（如结构的组成形式、刚度、质量分布、材料性质等），而与荷载等其它条件无关，是桥梁结构振动系统的基本特征。结构的物理特性发生变化时（开裂、尺寸变化、材料力学性能退化等），不仅桥梁结构的静力特性（变形、应力等）会发生变化，动力特性也相应发生变化。通过现场环境振动测试了解桥跨结构的动力特性，测试主桥桥面和钢拱的各控制截面的在使用荷载作用下的随机振动数据，并通过数据筛选处理和工作模态分析提取结构整体的模态参数（模态频率、阻尼和振型等）。因此，通过现场模态测试对于识别桥桥梁的工作状况以及进行可靠的模型修正具有重要意义。

2.5.1 环境振动测试

在桥梁结构的模态试验中，根据输入激励的不同，可将模态测试方法分为冲击振动测试与环境振动测试。其中，冲击振动测试需要足够激发起桥梁结构感兴趣频带内的模态振动的激振器，在测试过程中，环境振动通常被假定为噪声干扰。由于在大跨度拱桥中，现场试验条件复杂、结构激励所需能量高且激振器移动困难往往限制了冲击振动测试在大跨度桥梁中的应用^[82]。目前的大跨度桥梁通常采用环境振动如车辆与行人荷载、风荷载、地脉动等作为系统输入，并将其假定为涵盖了结构感兴趣频带的高斯白噪声。环境激励信号通常代表了结构在真实使用状况下的实际激励输入，因而，基于环境振动的模态测试全面反映了结构最真实的工作状况。此外，相比于冲击振动测试，环境振动测试还具备经济、操作方便、不影响结构正常使用等优点。

2.5.2 测点与工况布设

本文的环境振动测试主要用来测取桥面板以及拱肋在外界环境激励（风力、地脉动、水流和行人荷载等）作用下各个方向的振动模态，测点布置以及相应参

考点的选取如下表 2.2 和图 2.10 所示。数据采集工作通过 8 通道 LMS Cadax-8 系统与 KD12000L 超低频加速度传感器(灵敏度为 20mv/g)完成。在桥面板模态振动测试过程中, 2 个参考点(第 4#和 16#测点)传感器的固定布置, 其余 6 个通道所连接的传感器被作为移动测点。每次测试中, 首先将传感器竖直放置完成竖直方向的加速度时程响应测试, 然后将传感器水平放置测试全桥横向弯曲模态。在对拱圈进行测试的时, 以第 4 #测点为参考点, 其余 7 个测点布设在拱肋上。所有测试的数据采集时间统一为 20 分钟, 采样频率取为 512Hz。

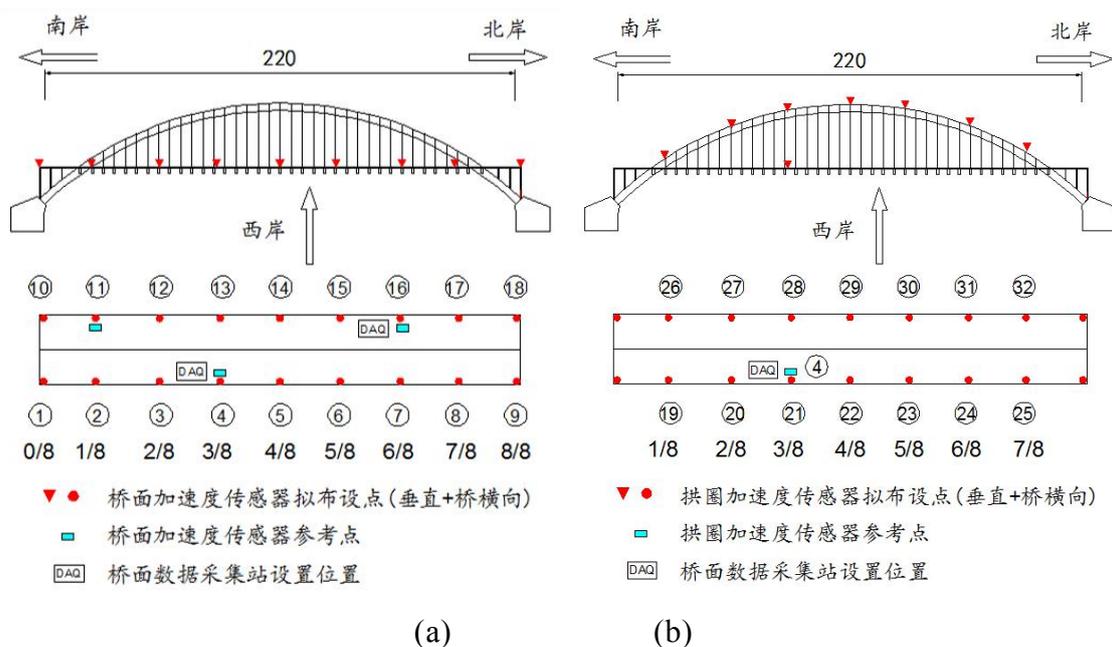


图 2.10 全桥模态测试 (a)桥面测点布置图; (b)拱圈测点布置图

表 2.2 来华大桥全桥模态测试工况

工况	移动测点	参考点	方向	测试位置
1、2	2, 3, 5, 6, 7, 8	4, 16	竖向/横向	桥面
3、4	11, 12, 13, 14, 15, 17	4, 16	竖向/横向	桥面
5、6	1, 2, 3, 10, 11, 12	4, 16	竖向/横向	桥面
7、8	7, 8, 9, 15, 17, 18	4, 16	竖向/横向	桥面
9、10	19, 20, 21, 22, 23, 24, 25	4	竖向/横向	钢拱
11、12	26, 27, 28, 29, 30, 31, 32	4	竖向/横向	钢拱

2.6 本章小结

本章简要介绍了来华大桥现场静动力试验, 包括: 详细的现场勘查、载重卡车试验和环境振动测试。为了准确模拟来华大桥的结构细节, 现场勘查过程采集

了大量结构细节照片，为后文中有限元模型中结构细节的精确模拟以及模型修正过程中几何参数误差的消除奠定了基础。静载卡车试验与环境振动测试分别统计了拱桥在卡车稳定加载作用下的变形和桥面以及钢拱上关键测点沿竖向和横向的加速度时程响应数据，为后文的工作模态分析，基于单一模型目标函数最优化方法的修正以及基于多模型方法的参数识别提供了数据支持。

第 3 章 大跨钢管混凝土拱桥工作模态分析

3.1 引言

大跨拱桥因其跨度较大，在风荷载和地脉动等动力荷载作用下的动力特征明显。相对于静载试验，模态分析致着重于结构动力特征的研究，是系统识别在工程振动领域中的应用。模态是机械结构的固有振动特性，通过振动信号的分析得到相应的模态频率、阻尼比和振型（统称为模态参数）。模态参数可由计算或试验分析取得，每个计算、试验分析过程称为模态分析。若分析过程是通过有限元计算的方法得到的，则称为理论模态分析；若是通过现场试验将采集的输入与输出信号通过参数识别方法取得，则称为试验模态分析。不测取输入信号的试验模态分析过程，则称为工作模态分析（Operational Modal Analysis, OMA）。根据不同的非参数模型又可将模态分析方法区分为基于频域数据和基于时域数据的参数识别，其中基于频域数据的识别方法以频响函数为基础，基于时域数据的识别方法以脉冲响应函数为基础。

本文分别使用基于频域数据的复模态指示函数法（Complex Mode Indicator Function, CMIF）和基于时域数据的随机子空间识别法（Stochastic Subspace Identification, SSI）对来华大桥的桥面和钢拱在竖向、横向两个方向的模态参数进行了分析。在使用 CMIF 方法之前，分别使用了相关函数（Cross Correlation Function, CC）和随机减量技术（Random Decrement, RD）作为数据预处理，并相互校核了最终的模态识别结果。

3.2 模态参数识别理论

3.2.1 系统动力学方程以及模态叠加原理

工程结构的系统振动方程可以写为

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (3.1)$$

其中， M 表示表示系统质量矩阵， C 为阻尼矩阵， K 为刚度矩阵。 $f(t)$ 表示外界输入。根据 Rayleigh 阻尼假定，将比例阻尼矩阵表示为质量矩阵和刚度矩阵的线性叠加，即：

$$C = \alpha M + \beta K \quad (3.2)$$

对坐标系进行变换，令：

$$x(t) = \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i \quad (3.3)$$

其中， ψ_i 是一组相互独立的特征向量。带入方程(3.1)中得到

$$M \sum_{i=1}^n \ddot{q}_i \varphi_i + C \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \varphi_i + K \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i = f(t) \quad (3.4)$$

左乘 φ_i^T 后得到：

$$m_r \ddot{q} + (\alpha m_s + \beta k_s) \dot{q} + k_r q = \varphi_i^T f(t) \quad (3.5)$$

将外界激励写成复数形式， $f(t) = F e^{j\omega t}$ ，则根据式(3.1)可知， $q = Q e^{j\omega t}$ ，式(3.5)转化为：

$$\begin{aligned} (-\omega^2 m_r + j\omega c_r + k_r) Q e^{j\omega t} &= \varphi_i^T F e^{j\omega t} \\ Q &= \frac{\varphi_i^T F}{(-\omega^2 m_r + j\omega c_r + k_r)} \end{aligned} \quad (3.6)$$

则结构的位移响应：

$$x(t) = \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i = \sum_{i=1}^n Q \varphi_i e^{j\omega t} = \sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i^T \varphi_i}{(-\omega^2 m_r + j\omega c_r + k_r)} F e^{j\omega t} \quad (3.7)$$

由此可见，系统的位移响应可以由一组模态求和叠加得到，基于系统动力学振动方程的模态叠加理论成为联系系统动力响应和静载变形的纽带。类似于传统的静载变形试验，环境振动测试从系统的模态分析角度全面地反映了系统关于质量、阻尼与刚度的信息，在大型复杂结构的系统识别中发挥着重大的作用。

3.2.2 相关函数分析

相关是对客观事物之间紧密关系的表达。相关函数表示环境振动信号在不同的瞬间的相互关联程度，也可以定义为一段环境振动信号与另一段振动信号的相似度。对同一个样本信号在不同的时间坐标时的相似度分析称为自相关函数，对两个样本信号随时间的变化进行相似度分析的过程称为互相关函数。自相关函数有助于提取随机信号中的周期信号，周期信号的自相关函数仍旧是周期信号，而随着延迟增加，高斯白噪声信号的自相关函数将衰减到零。类似于自相关函数，频率相同的两个信号的互相关函数仍旧是周期信号且其周期不变，若两个信号之间没有同频率的成分，则随着延迟增加，互相关函数趋于零。因此，互相关函数法可以被广泛地应用于求淹没在噪声中的信号。

互相关函数是研究两个随机信号 $x(t)$ 和 $y(t)$ 在不同时刻的相互关系，它深刻地揭示了环境振动信号的波形结构。自相关函数 $R_{xx}(t)$ 和互相关函数 $R_{xy}(t)$ 的数学表达分别如公式 (3.8) 和 (3.9) [83]：

$$R_{xx}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t_1) x_2(t_2) p(x_1, x_2, t_1, t_2) dx_1 dx_2 \quad (3.8)$$

$$R_{xy}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t_1) y(t_2) p(x, t_1, y, t_2) dx dy \quad (3.9)$$

其中, $p(x, t_1, y, t_2)$ 表示变量 $X(t)$ 与 $Y(t)$ 的联合概率密度函数。

3.2.3 随机减量技术

随机减量法是一种信号预处理方法, 其基本原理是通过将原始信号 $x(t)$ 裁剪成等长度的若干段, 然后在时域内将若干信号叠加并得到一条自由衰减的信号。对公式 (3.1) 进行求解, 系统受到外界环境振动激励作用下的响应可以分为两部分, 即确定性解 (系统自由振动的解) 和受迫振动的解。由于假定环境振动信号为高斯白噪声, 故受迫振动的响应是服从正态分布的, 通过对信号进行多次的平均, 受迫振动的响应部分的影响被缩小至最低, 可视为系统的响应仅仅由确定性解得到。随机减量法通过取一组系统振动的样本数据 $x_k(t) (k=0, 1, 2, 3 \dots n)$ 来估计结构在自由振动情况下的确定性解^[84]。所有样本必须满足:

- (1) 样本来源于同一个分布;
- (2) 样本具有相同的初始条件;
- (3) 样本之间相互独立。

在随机信号 $x(t)$ 上选取一个合适的幅值 r 在信号的上下边界之间, 在信号曲线上找到时间序列 $t_i (i=1, 2, 3 \dots n)$ 满足 $x(t_i)=r$, 则令

$$x_k(t) = x(t + t_i) \quad (3.10)$$

以上操作相当于把原始振动信号 $x(t)$ 的坐标原点分别移动到 $x(t_i)$ 得到一组新的样本, 对新样本数据取平均得到

$$\delta(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_k(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(t + t_i) \quad (3.11)$$

$\delta(t)$ 即为构造出的趋近于自由衰减的信号。

3.3 随机子空间识别方法

随机子空间算法是一种时域模态参数识别方法。主要包括三个方法: 即协方差驱动的随机子空间算法、数据驱动的随机子空间算法和扩展 Kalman 滤波算法, 本节只针对协方差驱动的随机子空间算法做详细介绍。其主要思想是以状态空间模型为识别模型, 以协方差为统计量, 利用信号和噪声的不相关性来去除噪声, 最后采用奇异值分解法来识别结构的模态参数^[85]。其基本假定是假定输入为随机白噪声, 其理论基础是时域的状态空间方程。对公式 (3.1), 令 $f(t) = Bu(t)$, 其中 B 为激励的输入位置矩阵, 同时令:

$$x_1(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}, \quad A_c = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, \quad B_c = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} B$$

则可得到:

$$\dot{x}_1(t) = A_c x_1(t) + B_c u(t) \quad (3.12)$$

其中, A_c -- 系统状态矩阵;

B_c -- 系统输入矩阵;

$x_1(t)$ -- 系统状态向量;

假定输出响应为加速度、速度以及位移的组合:

$$y(t) = C_a \ddot{x}(t) + C_v \dot{x}(t) + C_d x(t) \quad (3.13)$$

则得到:
$$y(t) = C_c x(t) + D_c y(t) \quad (3.14)$$

其中:
$$C_c = [C_d - C_a M^{-1} K \quad C_v - C_a M^{-1} C] \quad D_c = C_a M^{-1} B$$

C_a -- 加速度输出矩阵;

C_v -- 速度输出矩阵;

C_d -- 位移输出矩阵;

可将振动系统的微分方程转化为连续状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = A_c x_1(t) + B_c u(t) \\ y(t) = C_c x(t) + D_c y(t) \end{cases} \quad (3.15)$$

由于试验测试的数据是离散的。因此, 实际应用中需要将连续的状态方程转化为离散的状态方程, 假定采样的时间间隔为 Δt , $t_{k+1} = t_k + \Delta t$, 则由微分方程知识可知系统的离散状态方程为:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ y_k = Cx_k + Du_k \end{cases} \quad (3.16)$$

其中, $A = e^{A_c \Delta t}$, $B = [A - I]A_c^{-1}B_c$ 。由于实际测试中的不确定性, 在公式(3.16)中加上噪声的影响, 将其写为:

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \\ y_k = Cx_k + Du_k + v_k \end{cases} \quad (3.17)$$

w_k, v_k 分别表示由于测试过程的不完备导致的过程噪声与输出响应的量测噪声。为了简化描述, 通常将其假定为均值为零的高斯白噪声, 并且二者的协方差满足:

$$E\left(\begin{bmatrix} w_k \\ v_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_k^T & v_k^T \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{bmatrix} \delta_{pq} \quad (3.18)$$

δ_{pq} 为 kronecker 积算子。

随机子空间算法的步骤包括: 通过输入数据 u_k 和输出数据 y_k 构造 Hankel 矩阵; 将 Hankel 矩阵分块后进行行空间投影; 由投影进行奇异值分解得到广义能观矩阵和状态序列, 并最终确定系统矩阵 A, B, C, D 。Hankel 矩阵的构造方法如下:

$$H = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & \cdots & y_j \\ y_2 & y_3 & \cdots & y_{j+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_i & y_{i+1} & \cdots & y_{j+i-1} \\ y_{i+1} & y_{i+2} & \cdots & y_{j+i} \\ y_{i+2} & y_{i+3} & \cdots & y_{j+i+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{2i} & y_{2i+1} & \cdots & y_{j+2i-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{past} \\ Y_{future} \end{bmatrix}$$

其中, y_k 是测试过程中第 k 时刻所有通道测试的数据, j 为采样点的个数。 Y_{past} 和 Y_{future} 分别被看作为响应输出的 Hankel 矩阵中“曾经的成分”和“将来的成分”。通过一系列投影运算、卡尔曼滤波运算和奇异值分解后得到系统的状态矩阵 A, C 。由矩阵 A 的特征值分解以及连续状态矩阵和离散状态矩阵的关系可得出连续系统矩阵 A_c 的特征值 λ_i^c , 再由式(3.19)可确定系统的模态参数。

$$\lambda_i^c = -\zeta_i w_i \pm j w_i \sqrt{1 - \zeta_i^2} \quad (3.19)$$

3.4 复模态指示函数方法

在基于频域数据的模态参数识别中, 首先应完成数据筛选、滤波、加窗、快速傅立叶变换等工作。在此基础上可以分别使用基于互相关函数法的频域数据平均和频响函数估计, 以及基于随机减量法的时域数据平均和频响函数估计完成数据预处理工作。在数据后处理工作中, CMIF 方法通过对频响函数矩阵中每一条谱线构成的正规矩阵完成奇异值分解得到, 正规矩阵由频响函数矩阵左乘 Hermitian 矩阵求得。对每一条谱线上的频响函数进行特征值分解得到:

$$H(j\omega) = [U][S][V]^H \quad (3.20)$$

U, V 分别为左奇异矩阵和右奇异矩阵。式中, S 是一个 $r \times r$ 的对角矩阵。 r 由在特定频率点的主模态个数决定, 即对特定频率点处对结构响应有贡献的模态个数。在计算中, 由于特征值分解是针对正规矩阵完成。因此, CMIF 等于特征值的 2 范数, 而 CMIF 图峰值处的横坐标则对应相应的模态频率。正规矩阵的分解可表达为:

$$[H(j\omega)]^H [H(j\omega)] = [V(j\omega)][\Sigma^2(j\omega)][V(j\omega)]^H \quad (3.21)$$

$$CMIF_i(j\omega) = \sigma_i^2(j\omega) \quad (3.22)$$

$CMIF_i(j\omega)$ 为第 i 阶模态的副模态指示函数值, σ_i 为频响函数在频率 ω 处的第 i 个特征值。

3.5 工作模态分析

本文所测取的来华大桥桥面板以及钢拱的振动模态均由环境振动作为激励触发产生。模态参数识别过程主要由 CMIF 方法结合互相关函数方法和随机减量技术作为数据前处理完成，共识别了桥梁在横向与竖向两个方向的模态。为了提高桥面竖向振动模态参数的可靠性，在桥面板竖向振动测试中，额外采用了 SSI 方法识别了其模态参数。SSI 方法识别的稳态图中，横轴为频率，左边纵轴为频响函数实部幅值，右纵轴为假定的极点数目。 f, d, v, s 分别表示假定极点增加时，在给定精度内频响函数分别在频率、频率和阻尼、频率和模态参与因子、频率和阻尼以及模态参与因子处均保持稳定状态。通常，稳态图中纵向一致显示 s 处对应的频段预示结构识别相应的模态。在 CMIF 方法应用的过程中，首先假定参考点的加速度信号为振动激励信号，分别通过互相关函数、自相关函数以及随机减量法完成信号平均并由传递函数得到结构的伪频响函数(pseudo-FRF)，而后在 CMIF 图中提取峰值模态，具体的模态提取过程由两部分组成，即数据前处理过程与模态参数识别过程，具体步骤如图 3.1。

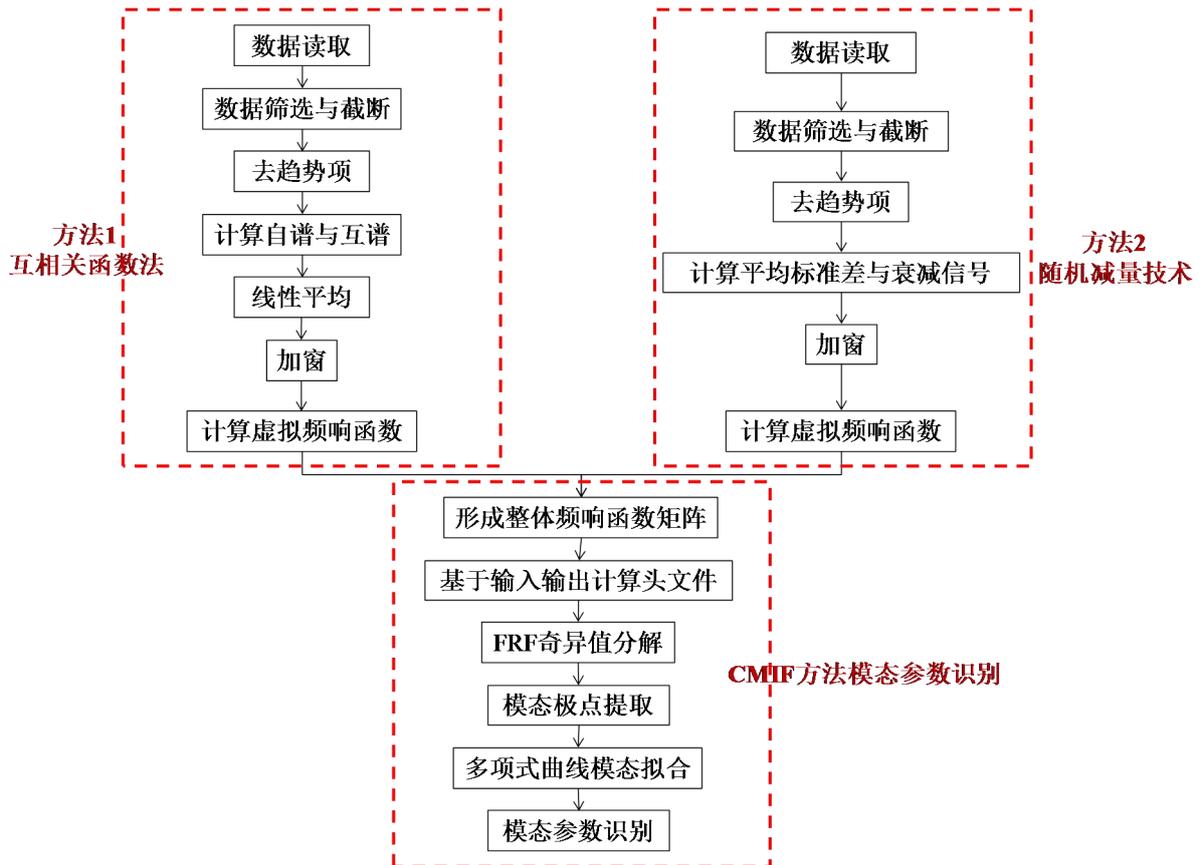
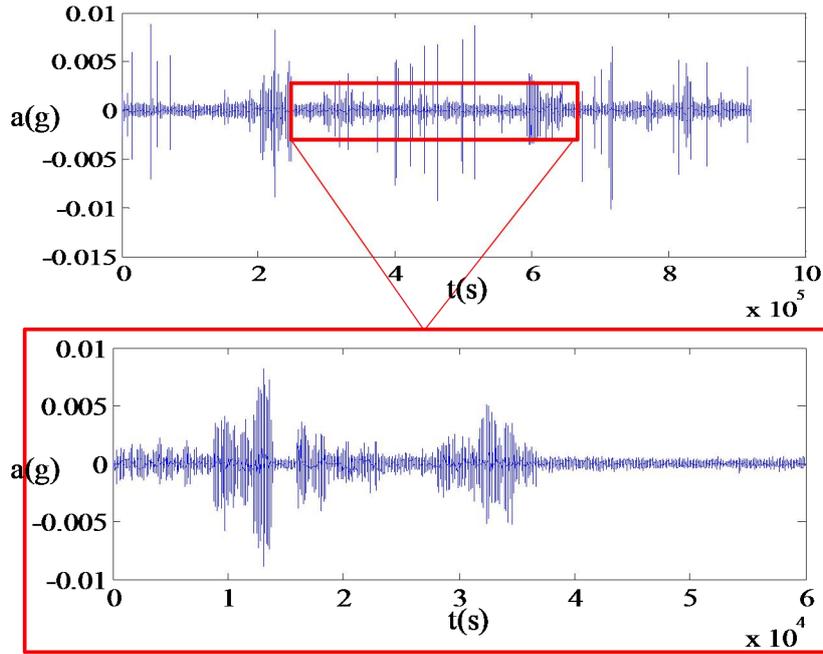


图.3.1 CMIF 方法模态参数识别流程图

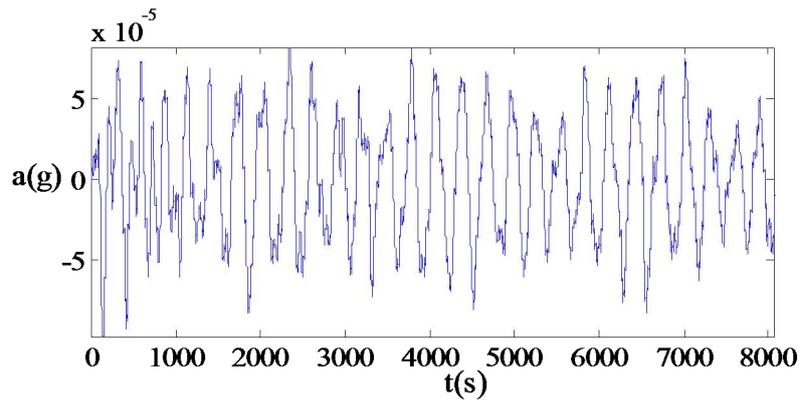
3.5.1 数据前处理过程

为防止测试过程中信号中的噪声干扰，工作模态分析应首先在检查数据的基础上对其进行筛选，截取较好的振动加速度信号。为防止分析过程中因为数据泄

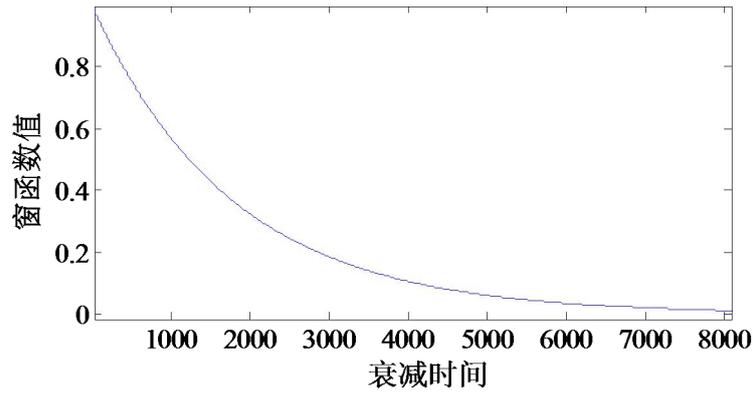
漏导致的误差，需要对数据进行加窗，常用方法有加矩形窗和指数窗等。在互相关函数法中，通过分别计算测点与参考点的互谱以及参考点的自谱，并根据截断数据与谱线数的比值确定线性平均的样本数目。完成数据平均后，伪频响应函数可以由测点的互谱与自谱的比值得到。在运用随机减量法进行数据前处理工作的过程中，数据平均是基于时域衰减信号完成，参与平均的样本数目同样由截取运算的数据长度以及模态测试中的谱线数决定。以随机减量法为例的桥面板竖向振动4号测点的数据前处理过程如图3.2所示。



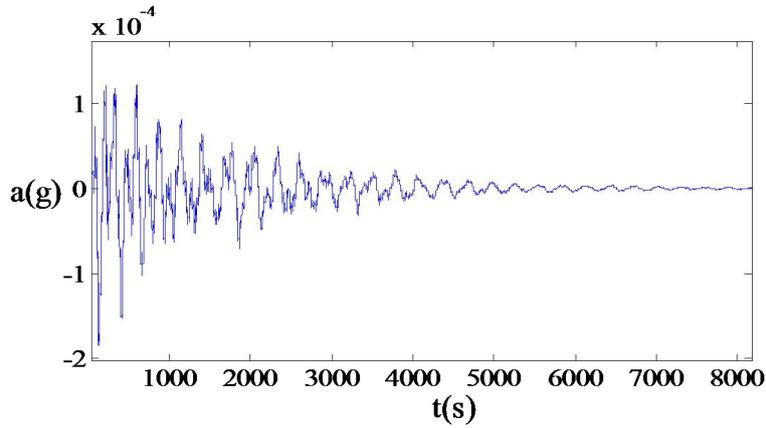
(a)



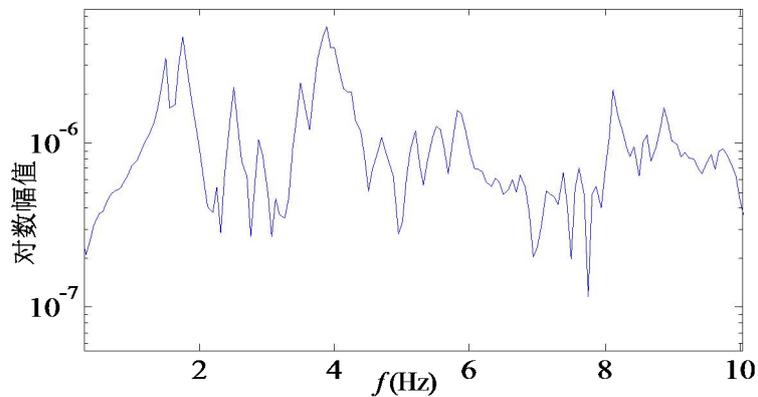
(b)



(c)



(d)

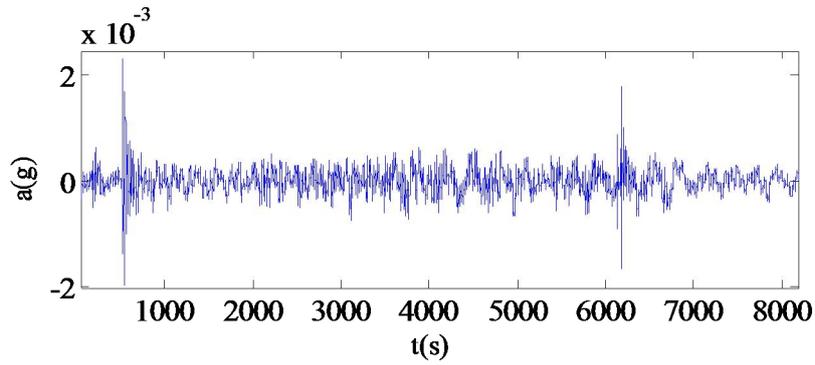


(e)

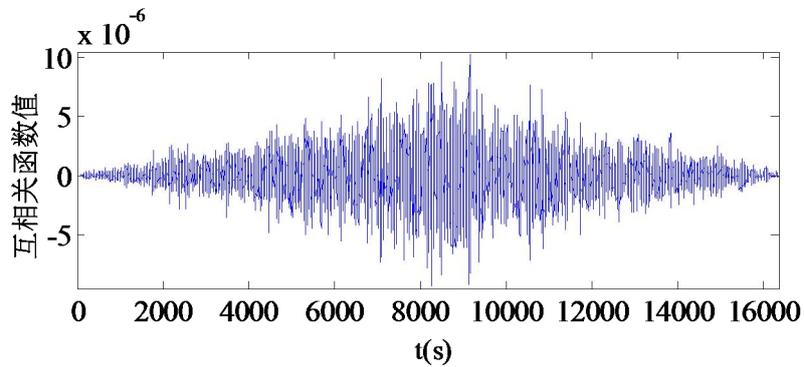
图 3.2 (a)原始数据截断与噪声剔除；(b)数据分段与时域平均结果；(c)指数窗函数；(d)数据衰减信号；(e)伪频响函数

如图(a)，分析过程中，通过人为观测剔除测试过程中的明显误差，计算所得到的平稳振动数据的标准差。随机减量技术的关键在于触发点的选择，本文选取水平穿越触发条件，并选取幅值为振动数据的 1.5 倍标准差作为触发点。将得到的所有数据段移动至坐标原点，对所有数据信号进行叠加与平均，并将其按照 8192 的谱线数截断如图(b)所示。对所有 8192 个数据点施加窗函数如图(c)所示，加窗后的数据见于图(d)。通过一次测试过程得到了伪频响函数如图(e)。与随机减

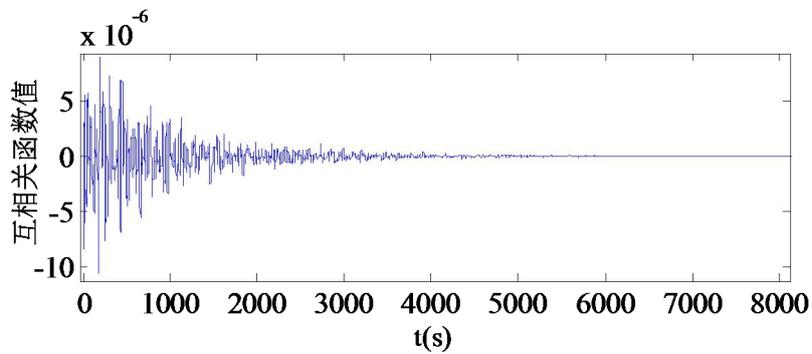
量技术对照，通过互相关函数分析为例的桥面板竖向振动 4 号测点的数据前处理过程如图 3.3 所示。



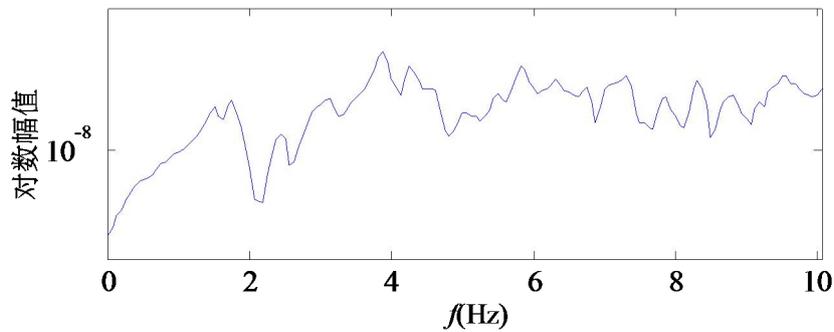
(a)



(b)



(c)



(d)

图 3.3 (a)原始数据去趋势项(b)互相关函数 (c)互谱平均 (d)伪频响应函数