



陈新 等 编著

# 机械结构动态设计

## 理论方法

## 及应用

机械工业出版社

# 机械结构动态设计理论方法及应用

陈 新 等编著



机械工业出版社

本书是作者总结自己近10多年的科研成果,并在参考了大量国内外近期文献基础上写成的,是一本难得的关于机械结构动态设计方法及应用的专著。本书共11章,分别是绪论、机械结构振动系统模型描述、机械结构的模态参数识别与分析、机械结合部动力学参数的识别、结构振动系统阻尼矩阵的估计、机械结构建模与分析的动态子结构方法、设计参数型有限元模型修正及其结构动态设计、特征值逆问题方法及其结构动态设计、基于结构修改与修改结构重分析的结构动态设计、基于人工神经网络的结构动态设计、机械结构动态设计的能量平衡法与优化准则法。

本书的特点是:深入浅出,系统性强,理论与实际结合。

本书可供机械设计领域的工程技术人员、科研人员使用,亦可用作高等院校高年级学生、研究生的专业教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械结构动态设计理论方法及应用/陈新等编著.-北京:机械工业出版社,1997.9  
ISBN 7-111-05792-9

I. 机… II. 陈… III. 机械设计 IV. TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第13543号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)  
责任编辑:贾玉兰 版式设计:王颖 责任校对:张晓蓉  
封面设计:范如玉 责任印制:玉国光

北京市房山区印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1997年8月第1版第1次印刷  
787mm×1092mm 1/16·17.75印张·427千字  
0 001—2 000册  
定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

## 序 言

随着现代工业和科学技术的高速发展,机械产品与设备也日益向着高速、高效、精密、轻量化和自动化方向发展,良好的结构动态性能要求已成为产品开发设计中的重要优化指标之一,用先进的动态设计取代传统的静态设计已成为机械结构设计的必然发展趋势。

机械结构动态设计是一项正在发展的新技术,它包含的内容十分丰富,涉及数学、力学、机械学、计算机科学等众多学科范围。70年代以来,国内外众多学者在该领域进行了大量研究,但可惜丰富多彩的新成果仅散见于各类科技文献中,有系统、完整地介绍机械结构动态设计的理论与方法的专著甚少,本书作者在总结自己近10多年的科研成果,并参考了大量国内外近期文献基础上写成此书,这对从事该领域较高层次工作的工程技术人员、教学和科研人员是一本难得的参考书。

本书有以下特点:

- (1) 深入浅出,系统地介绍了机械结构动态设计的理论与方法;
- (2) 基本反映了国际、国内近10多年来在结构动态设计领域研究与应用的最新成果;
- (3) 反映了作者及其所在单位在该领域的科研成果与实践经验;
- (4) 理论与实际结合,作者用比较丰富的应用实例说明了本书中的理论与方法。

本书作者在文字上也下了功夫,对这样一个复杂的专题,讲得有条不紊、通顺易读、深入浅出。

最后我还想指出,该书的出版,作者不仅付出了极大的劳动,而且在出版方面也克服了不少困难,但愿作者的辛勤劳动能使读者有所受益,愿该书的出版,能促进我国在该领域的研究与应用水平的提高。

中国科学院院士 熊有伦  
华中理工大学教授

## 前 言

随着现代工业与科学技术的高速发展,机械结构系统的振动问题日益突出,良好的结构动态性能已成为产品开发设计中重要的优化目标之一,用先进的动态设计取代传统的静态设计已成为机械结构设计的必然发展趋势。

机械结构动态设计的大体过程是:对满足工作性能要求的初步设计图样,或要进行改进的机械结构实物进行动力学建模,并作动态特性分析,根据工程实际情况,给出其动态特性要求或预定的动态设计目标,再按结构动力学“逆问题”分析方法,求解满足设计目标的结构参数或按结构动力学“正问题”分析方法,进行结构修改与修改结构的重分析,这种修改与修改效果预测反复多次,直到满足结构动特性的设计要求。总之,快速、准确地确定符合机械静、动态特性要求的结构形状和尺寸大小,是整个动态设计的重要任务。

机械结构动态设计是一项正在发展中的新技术,它涉及现代动态分析,计算机技术,产品结构动力学理论、方法和体系,许多问题尚需进行深入广泛的研究。当前,为了提高我国机械产品在国际市场中的竞争能力,如何保证产品的高性能、高质量和低成本,在设计阶段能预估机械结构的静、动态特性,是机械产品设计面临的新问题。为此,机械结构动态设计方法已成为广大设计人员迫切要求了解和掌握的设计手段之一。

本书围绕机械结构动态设计过程中的建模、参数识别与动态优化设计等技术关键进行论述,在讨论机械结构动态建模时,用一定篇幅论述了影响动力学模型精度的关键参数——结合部参数与系统阻尼矩阵的识别问题,然后,重点讨论了目前国内外较典型的几种动态优化设计方法,并列举了大量实际应用例子,突出了结构动态设计理论与方法的系统性和实用性。

全书共分11章。第1章绪论部分,讨论了机械结构动态设计的意义,指出了动态设计的主要内容与技术关键,并分析了国内外的研究现状,介绍了笔者近年来在该领域的主要研究工作。第2、3章分别讨论了机械结构振动系统的描述模型与模态模型中模态参数的识别方法,以及基于结构实验模态分析的直接动态设计原理与方法。第4、5章重点讨论了影响结构动力学建模精度的关键因素:结合部参数与阻尼矩阵的识别与估计方法。第6章介绍了适应于大型结构动力分析与动态设计的几种典型的子结构综合方法。第7章重点讨论了结构有限元模型设计参数型修正方法,特别强调了该方法直接用于结构动态设计的原理与方法。第8章主要介绍了结构动态设计的“逆问题”方法,即基于设计参数型逆特征值问题的动态设计方法。第9、10章重点讨论了结构动态设计的“正问题”方法,其中第9章主要介绍了基于灵敏度分析的结构修改与几重典型的修改结构重分析方法,第10章重点讨论了基于人工神经网络模型的修改结构重分析方法及其动态设计原理。第11章介绍了在工程设计中一直应用比较广泛的两种机械结构动态设计方法,即能量平衡法与优化准则法。

书中在对各种动态建模、参数识别与动态设计方法的叙述中,除给出一定的理论推导与较详细的算法外,均列举了大量工程实例,以便于读者的理解和应用。

本书共11章,主要由广东工业大学陈新编写并负责全书的统稿、校对。陈新度参加了第3、6章的编写和全书文字校对工作;冯文贤参加了第7、8章的编写;秦叶参加了第2章的编

写与全书插图绘制工作。华中理工大学周济教授担任本书的主审，中国科学院院士、华中理工大学熊有伦教授为本书写了序言。

本书的许多内容是笔者在攻读博士学位期间所作的工作，这些研究工作曾得到过华中理工大学余俊教授、周济教授、黄玉盈教授等前辈的指导和帮助，在此表示衷心感谢。

在本书的撰写过程中，得到了广东工业大学孙健教授、郑德涛教授、吴乃优研究员的热情鼓励与有益帮助，特此致谢。

为了反映机械结构动态设计研究及应用的新成果，本书收集了不少国内外公开发表的论文与资料，这些资料使作者受益匪浅，作者一并表示感谢，特别是对部分漏引的作者深表歉意。

本书部分内容的研究工作，得到了国家自然科学基金项目的资助。

由于作者水平有限，加上时间仓促，错误之处在所难免，热忱地欢迎读者批评指正。

编著者

# 目 录

序言	
前言	
<b>第一章 绪论</b> .....	1
第一节 机械结构动态设计的意义 .....	1
第二节 机械结构动态设计的主要内容与技术关键 .....	1
第三节 国内外研究现状 .....	3
第四节 本书的结构 .....	8
<b>第二章 机械结构振动系统模型描述</b> .....	9
第一节 引言 .....	9
一、数学模型 .....	9
二、理论建模和试验建模 .....	9
第二节 描述振动系统的方法 .....	10
一、分布参数振动系统 .....	10
二、离散振动系统 .....	11
三、随机系统 .....	13
第三节 离散振动系统的物理坐标描述 .....	11
一、构造空间法 .....	14
二、状态空间法 .....	14
三、能控性和能观性 .....	17
四、标准型状态方程 .....	17
五、标准型状态方程与离散振动系统模态参数的关系 .....	19
第四节 离散振动系统模态坐标描述 .....	20
一、实模态坐标描述法 .....	20
二、粘性比例阻尼系统 .....	22
三、结构比例阻尼系统 .....	24
四、复模态坐标描述法 .....	25
第五节 离散振动系统的其他模型描述 .....	30
一、非参数模型 .....	30
二、振动系统的人工神经网络模型 .....	31
第六节 机械结构振动系统的建模 .....	32
一、各种模型在动态设计中的作用 .....	32
二、系统建模与动态设计的主要任务 .....	33
三、建模方法 .....	33
第七节 本章小结 .....	34
参考文献 .....	35
<b>第三章 机械结构的模态参数识别与分析</b> .....	36
第一节 引言 .....	36
第二节 模态参数识别的频域方法 .....	36
一、分量分析法 .....	36
二、导纳圆辨识方法 .....	38
三、正交多项式曲线拟合法 .....	43
四、非线性优化识别方法 .....	48
第三节 模态参数的时域识别 .....	51
一、Ibrahim 时域法 (ITD 法) .....	52
二、随机减量时域法 .....	58
第四节 基于实验模态分析的结构动态设计 .....	59
一、基本原理 .....	59
二、机床结构的模态分析与改进设计 .....	60
三、皮革机械结构的模态分析与改进设计 .....	61
四、升高片疲劳断裂原因分析与改进设计 .....	62
第五节 本章小结 .....	64
参考文献 .....	64
<b>第四章 机械结合部动力学参数的识别</b> .....	66
第一节 引言 .....	66
第二节 基于实测传递函数的结构支承部动态参数识别 .....	67
一、支承部动态参数与传递函数的关系 .....	67
二、有限元模型与实测传递函数相结合的识别方法 .....	68
三、基于实测传递函数的识别方法 .....	70

四、识别方法的讨论 .....	73	三、自由度减缩 .....	121
五、实例验证 .....	74	第三节 自由界面模态综合法 .....	124
第三节 基于实测传递函数的一般结合部 动态参数识别 .....	78	一、基本方法及步骤 .....	124
一、一个广义的结合部动态参数 识别公式 .....	78	二、MacNeal 改进方法（一阶 方法） .....	127
二、广义识别公式的讨论 .....	82	三、Rubin 改进方法（二阶方法） .....	130
三、结合部动态参数的识别算法 .....	84	第四节 复模态综合法 .....	131
四、实例验证 .....	86	一、固定界面复模态综合法 .....	131
第四节 基于实验模态参数的结合部 动态参数识别 .....	91	二、自由界面复模态综合法 .....	133
一、基本识别公式 .....	91	第五节 组合结构系统分析法 .....	136
二、识别算法 .....	91	一、多自由度系统的机械阻抗与 导纳 .....	136
三、方法的验证 .....	93	二、机械阻抗子结构方法 .....	137
第五节 本章小结 .....	94	三、机械导纳子结构方法 .....	138
参考文献 .....	95	四、主系统和子系统组合的结构 .....	139
<b>第五章 结构振动系统阻尼矩阵的 估计 .....</b>	<b>97</b>	第六节 本章小结 .....	<b>141</b>
第一节 引言 .....	97	参考文献 .....	<b>141</b>
第二节 比例阻尼矩阵的估计 .....	98	<b>第七章 设计参数型有限元模型修正及其 结构动态设计 .....</b>	<b>143</b>
第三节 非比例阻尼矩阵的描述 .....	98	第一节 引言 .....	143
一、非比例阻尼矩阵的多项式 表达 .....	98	第二节 有限元模型局部修正原理 .....	145
二、非比例阻尼矩阵表达式的 简化 .....	103	一、设计参数的基本修改公式 .....	145
三、阻尼近似表达的精度 .....	105	二、目标振型的扩充 .....	148
四、阻尼近似表达式的物理意义 .....	107	三、设计参数修正量求解的迭代 算法 .....	154
第四节 非比例阻尼矩阵的估计 .....	109	第三节 复模态情况的有限元模型 修正 .....	155
一、估计算法 .....	109	第四节 数值算例 .....	157
二、实例验证 .....	111	第五节 基于设计参数型有限元模型修正的 结构动态设计 .....	159
第五节 本章小结 .....	113	一、基本原理 .....	159
参考文献 .....	113	二、优化算法 .....	159
<b>第六章 机械结构建模与分析的动态 子结构方法 .....</b>	<b>115</b>	三、结构动态优化设计实例 .....	161
第一节 引言 .....	115	第六节 本章小结 .....	162
一、动态子结构方法 .....	115	参考文献 .....	163
二、子结构方法的优点 .....	115	<b>第八章 特征值逆问题方法及其结构动态 设计 .....</b>	<b>165</b>
三、子结构方法的分类 .....	116	第一节 引言 .....	165
四、子结构方法的发展概况 .....	116	第二节 多自由度振动系统的特征值 逆问题 .....	166
第二节 固定界面模态综合法 .....	117	一、简单弹簧—质量系统的特征值 逆问题 .....	166
一、方法及步骤 .....	117		
二、计算程序框图 .....	120		



二、多自由度离散系统的特征值 逆问题 .....	168	二、特征值重分析法(简称 ERM法) .....	224
第三节 结构参数辨识中的微分方程 反问题 .....	174	三、传递函数法 .....	228
一、微分方程反问题的提法 .....	174	四、结构重分析实例 .....	230
二、数值反演算法 .....	175	第四节 基于结构修改与修改结构重分析的 动态设计方法 .....	232
第四节 板杆结构有限元特征值 逆问题 .....	176	一、方法的基本原理 .....	232
一、问题的提出 .....	176	二、动态设计实例 .....	233
二、逆特征方程 .....	177	第五节 本章小结 .....	235
三、算法与算例 .....	183	参考文献 .....	235
第五节 梁系结构有限元特征值 逆问题 .....	187	<b>第十章 基于人工神经网络的结构动态         设计</b> .....	236
一、问题提法 .....	187	第一节 引言 .....	236
二、逆特征方程 .....	187	第二节 基于人工神经网络的结构振动系统 建模理论 .....	236
三、算法 .....	194	一、神经网络简介 .....	236
第六节 基于有限元特征值逆问题的结构 动态设计 .....	194	二、多层神经网络原理 .....	237
一、动态优化设计的描述 .....	194	三、神经网络的非线性映射能力 .....	238
二、逆特征方程的建立与求解 .....	195	四、基于人工神经网络的结构振动系统 建模理论 .....	241
三、设计实例 .....	198	第三节 基于人工神经网络的结构振动系统 重分析方法 .....	247
第七节 基于约束广义特征值逆问题的 结构动态设计 .....	199	一、基本原理 .....	247
一、问题提法 .....	199	二、结构振动系统重分析的神经网络模型 建立 .....	247
二、动态设计的描述 .....	200	三、改进的多层神经网络学习算法 .....	248
三、动态设计问题的求解 .....	201	四、几点说明 .....	249
四、设计实例 .....	201	五、算例 .....	249
第八节 本章小结 .....	202	第四节 基于人工神经网络的机床主轴动态 优化设计实例 .....	250
参考文献 .....	202	一、机床主轴动态优化设计问题的 描述 .....	250
<b>第九章 基于结构修改与修改结构重         分析的结构动态设计</b> .....	204	二、机床主轴支承参数的实验识别 .....	252
第一节 引言 .....	204	三、基于神经网络模型的主轴 动态优化设计 .....	252
第二节 结构动态特性灵敏度分析 .....	205	四、主轴动态优化设计结果 .....	253
一、特征值灵敏度分析 .....	207	第五节 本章小结 .....	253
二、特征向量灵敏度分析 .....	208	参考文献 .....	254
三、无阻尼系统灵敏度分析 .....	210	<b>第十一章 机械结构动态设计的能量         平衡法与优化准则法</b> .....	255
四、动柔度灵敏度分析 .....	211	第一节 引言 .....	255
五、高阶灵敏度分析 .....	212	第二节 基于能量平衡的机床结构	
六、考虑模态截断影响的模态振型 灵敏度分析 .....	213		
七、灵敏度分析实例 .....	215		
第三节 修改结构的重分析 .....	219		
一、摄动迭代法(简称MTM法) .....	219		

动态设计 .....	255	一、动态优化设计数学模型 .....	264
一、机床结构动态设计目标 .....	255	二、库恩-塔克条件 .....	264
二、模态柔度 .....	256	三、库恩-塔克条件的应用 .....	266
三、能量分析 .....	258	四、优化准则法的迭代格式 .....	267
四、阻尼分配 .....	259	五、准则法在动态优化设计中的	
五、优化设计程序 .....	260	应用 .....	268
六、实例 .....	260	第四节 本章小结 .....	274
第三节 具有动态性能约束的优化		参考文献 .....	274
准则法 .....	264		

# 第一章 绪 论

## 第一节 机械结构动态设计的意义

随着生产和科学技术的高速发展,机械产品与设备也日益向高速、高效、精密、轻量化和自动化方向发展,产品的结构日益趋于复杂,对其工作性能的要求也越来越高。为了使这些产品和设备安全可靠地工作,其结构系统必须具有良好的静、动态特性。同时,设备在工作时的振动与噪声,会损害操作者的身心健康,并且污染环境,亦是一个需要致力解决的社会问题。为此,必须对机械产品和设备进行动态分析与动态设计,以满足机械结构静、动态特性与低振动、低噪声的要求。

近40年来,由于电子计算机广泛地应用于社会各领域,给人们的工作和生活带来了深刻的变革。机械CAD便是计算机技术给传统的机械设计方法带来变革的产物。机械CAD改变了设计人员传统的工作方式,它使得今天的设计者有能力从传统的经验设计转向定量设计,从传统的静态设计转向动态设计。

目前,国外在结构动态设计这一领域的研究十分活跃。一年一度的国际模态分析学术会议规模越来越大,发表关于结构动态设计问题的论文也越来越多。特别是,美国、西欧等一些工业发达国家,十分重视关于结构动态设计问题的研究,并将其列为结构设计领域的重点发展方向之一。而我国在这一领域的研究还较落后。因此,为了跟踪国际先进技术,提高我国机械产品的现代化设计水平,增强我国机械产品与设备在国际市场中的竞争能力,我们必须对结构动态设计理论与方法进行深入的研究。这是一项具有战略意义的工作。

## 第二节 机械结构动态设计的主要内容与技术关键

结构动态设计是一项正在发展中的新技术,它包含的内容十分丰富,涉及现代动态分析方法、计算机技术、产品结构动力学理论、设计方法学等众多学科范围。目前,还没有形成一套完整的结构动态设计理论、方法和体系。

结构动态设计的大体过程一般是:对满足工作性能要求的产品初步设计图样,或需要改进的产品结构实物进行动力学建模,并作动态特性分析。然后,根据工程实际情况,给出其动态特性的要求或预定的动态设计目标,再按结构动力学“逆问题”方法直接求解结构设计参数,或按结构动力学“正问题”分析法,进行结构修改设计与修改结构的动态特性预测,其结构的修改与预测过程往往需要反复多次,直到满足各项设计要求,从而得到一个具有良好静、动态特性的产品设计方案。因此,结构动态设计的主要内容包括如下两个方面:

- (1) 建立一个切合实际的结构动力学模型。
- (2) 选择有效的结构动态优化设计方法。

目前,结构动力学理论建模主要是采用有限元方法(Finite Element Method)建模。这种

方法近 20 年来已有很大的发展,市场上也有许多成熟的软件可供选择,如国际流行的 NAS-TRAN、ADINA、SUP-SAP、PAR I 等等。它们已卓有成效地应用于航空、航天、船舶、汽车、机床等许多工程结构的动态分析。然而,对大型复杂结构来说,由于离散化误差、材料物理参数的不确定性、边界条件的近似处理、接头及联接处的联接参数估计不准,以及缺乏阻尼参数等原因,要想直接依据图样资料建立一个能准确反映结构动态特性的有限元模型是比较困难的。近 10 多年来,由于振动测试技术水平的迅速提高,振动实验建模技术也得到了很大发展。所谓振动实验建模,是指对结构系统(实物或模型)进行激振(输入),通过测量与计算获得表达结构动态特性的参数(输出),再利用这些动态特性参数,经过分析与处理建立系统的数学模型。描述振动系统的数学模型主要有:物理坐标模型(如有限元模型、集中质量模型与分布质量模型)、模态坐标模型(能在空间解耦,并直接反映结构动态特性的模型)以及非参数模型。因此,振动实验建模的实质是对一个给定模型(其模型参数为待定的)进行参数识别(辨识)与估计的问题。一般来说,实验建立的模型更能准确地反映结构的动态特性,可弥补理论建模的不足。由于理论建模与实验建模各有长处,目前结构动态设计中广泛采用的是理论与实验相结合的建模方法。在描述振动系统的数学模型中,适合于结构动态设计的是物理坐标模型与模态坐标模型,因为只有物理坐标模型才能与结构的设计变量有直接联系,而只有模态坐标模型才能直接反映结构动态性能的优劣。所以,结构动态设计中动力学建模工作的重要任务是,用理论与实验相结合的方法建立结构振动系统的物理坐标模型与模态坐标模型。

我们知道,一般机械结构总是由许多零部件通过不同种类的结合部联接而成的。理论与实验分析表明,零部件与零部件联接处的结合条件对结构性能的解析计算精度,特别是结构的动态特性解析计算精度影响很大。例如,有的学者估计,一台机床 90% 以上的阻尼与 55% 的动柔度均来自结合部<sup>[四,19,20]</sup>⊖。所以要想建立一个精确的结构动力学模型,进行结构的动态设计与动力分析,就必须准确地了解结合部动态特性。然而,进行结构结合部动态特性的研究一直是动力学研究领域的难点之一,虽然国内外学者对此已作过许多努力,提出了不少结合部动力学参数的识别与估计方法,但目前仍没有一套比较成熟的理论与方法,大多数情况下仍然是靠经验估计。因此,如何准确地辨识结构结合部参数便成为结构动态设计中的关键技术之一。

众所周知,利用有限元建立结构振动系统动力学模型时,最难处理的是系统阻尼矩阵的估计,这是由于阻尼的机理很复杂,它无法像结构的质量与刚度矩阵那样,直接用结构的几何与材料参数计算得到。传统上,总是将系统的阻尼假定为比例阻尼,如应用最广泛的 Rayleigh 阻尼,但实践表明,对许多实际结构来说,Rayleigh 阻尼并不能提供满意的计算结果,它导出的仅仅是实模态,而许多实验结果显示,大多数复杂结构是非比例阻尼,即为复模态情况。因此,要提高结构动力学模型的精度,实现结构的动态设计,就必须考虑非比例阻尼。所以,如何准确而方便地估计结构振动系统中的阻尼矩阵也成为结构动态设计中的关键技术之一。

在结构动力学理论模型中,由于有限元模型(FEM)在处理复杂结构上具有明显优势(较集中质量与分布质量模型而言),因此,近 20 年来,理论与实验相结合的动力学建模研究

⊖ [四:19,20] 表示第四章的参考文献 [19,20],本章其他表示意义相同。

工作,主要集中在以理论 FEM 为先验模型,用实测动态数据,通过不同方法,对其先验模型进行修正。即基于动态实验数据的有限元模型修正。虽然国内外学者对此已进行过大量研究,提供了许多修正方法,但就结构动态设计角度来说,这些方法大都存在两类问题:一是对整体有限元模型修正,其计算工作量相当可观(特别是大型组合结构),二是修正后的有限元模型很难用结构的设计参数解释,其模型也不便应用于结构动态设计。因此,提供一种高精度、高效率,并与结构动态设计相适应的有限元模型实验修正方法也是结构动态设计中的关键技术之一。

建立一个真正反映结构系统动态特性的动力学模型,只是进行结构动态设计的先决条件,而不是最终目的,动态设计的最终目的是,利用系统的动力学模型,选择一种适当的优化算法,对结构进行动态优化设计,以获得一个具有良好静、动态性能的产品结构设计方案。结构的动态优化方法可归纳为“逆问题”与“正问题”两大类处理方法。所谓“逆问题”处理方法,就是给定结构某些动态特性要求,通过某种算法直接反求结构的设计变量。所谓“正问题”处理方法,就是根据实际结构可能变更的设计方案,不断修改设计参数,并通过某种算法快速重分析结构的动态特性参数,以达到动态优化的目的。

在“逆问题”处理方法中,近 20 年来,应用数学领域中的矩阵逆特征值问题已有了较大发展,有些方法已直接应用于结构的动态设计领域。然而,目前的许多方法获得的优化结果是结构的质量与刚度矩阵,而不是结构的设计变量。正如第八章参考文献 [1] 中指出,对于实际工程结构来说,要想通过直接改变结构设计参数来获得一个预定的(或优化结果所要求的)结构质量与刚度矩阵是不可能的。例如,优化结果要求的刚度矩阵为非对称矩阵,则实际中无法设计这样一个结构予以实现。另外,对一般实际结构来说,除了有动态性能要求外,一般还有传统的静态性能以及重量最轻等要求,这就需要将特征值反问题与传统的结构静态优化技术结合起来,从而实现一个完整的结构动态设计。这类问题是一个值得深入研究的问题。目前基于设计参数型的逆特征值问题理论与方法还没有一本专著对其进行系统的介绍,实际应用例子也较少。因此,如何以结构的设计变量为优化变量,实现结构动力学逆问题的直接求解,便成为结构动态设计中的关键技术之一。

对于“正问题”分析方法,我们知道,结构的动态设计是一个渐近的设计过程,为得到良好的结构动态特性,在设计中常需要对结构反复修改,即再设计;为了了解再设计结构的动态特性,需要对修改结构进行分析,即重分析。如果采用原来的分析模型(如有限元模型)进行分析,那将是一项既费时,又费力的事。为此,不少研究者对修改结构的重分析方法进行了大量研究,提出了许多快速、简捷的分析方法,应用最为广泛的是基于矩阵摄动原理的小参数分析方法。这类方法的主要缺点是修改量较大时重分析误差严重。另外,小参数重分析方法在重分析速度上,虽然远远快于在原模型(一般为有限元模型)重分析的速度,但如果将这种快速重分析模型用大型结构的动态优化设计时,当优化迭代次数较多时,其计算效率仍难以满足工程设计的要求。因此,寻找一种更快速、更准确的结构动态特性重分析模型与方法,也是结构动态设计中的关键技术之一。

### 第三节 国内外研究现状

就总体来说,目前还缺乏一套完整的结构动态设计理论与方法。

关于结构振动系统的建模问题是结构动态设计的基础,这方面的研究已有许多成熟理论,例如,基于结构有限元方法的建模理论就有大量的专著对此论述。基于模态模型的实验建模技术也在趋于成熟,本书第二、三章对此做了专门介绍。对于许多大型复杂结构,无论是在建模,还是在动态分析与设计时,人们往往采用动态子结构方法来处理,这类子结构方法的研究目前也有较系统的理论,本书第六章对此进行了简单介绍。目前影响动力学建模准确性的主要困难是结合部与阻尼参数识别问题,这也是国内外动力学建模领域的研究难点与热点。

关于结构结合部动态特性的研究,由于结合面的作用机理很复杂,目前还无法用纯理论分析的方法进行计算,一般都是采用实验方法进行结合部联结刚度与阻尼参数识别<sup>[四:1~27]</sup>。早在70年代初,Ito、Dekominck等人曾用静力变形方法研究过螺栓联接的弯曲刚度与切向刚度<sup>[四:1.2]</sup>。由于静态实验条件下识别的结合部刚度参数难以反映其结合部的动态特性,因此,人们后来的研究重点主要是利用结构的动态实验数据,进行结合部刚度与阻尼参数识别。如Fritzen(1986年)、Napitolela(1992年)、Hielmstad(1992年)等人利用整体结构的动态实验数据,对结构做整体有限元反解,从而获得结构的刚度与阻尼矩阵(其中也包括结合部的刚度与阻尼参数)<sup>[四:3.4.5]</sup>。Thosty(1980年)、Lee(1988年)、向(1993年)等人利用实测模态参数,进行结合面刚度与阻尼参数的识别<sup>[四:6.7.8]</sup>。Yuan(1985年)曾利用有限元模型自由度凝聚与实测模态参数相结合的方法识别了某机床立柱与机座间的联结刚度与阻尼参数<sup>[四:9]</sup>。Yoshimura(1977年,1979年)曾采用迭代方法识别过螺栓结合部的刚度与阻尼参数,并将其应用于机床结合部动态特性的研究<sup>[四:10.11]</sup>。Wang(1991年)、Liou(1989年)曾利用结构实测传递函数,识别过结构支承部(结合部的某一侧为理想约束情况)的刚度与阻尼参数<sup>[四:12.13]</sup>。而Tais(1988年)、徐(1992年)等人考虑结合部两侧均为弹性体时,利用实测传递函数,提出了不同的结合面动态参数的识别方法<sup>[四:14~18]</sup>。笔者(1993~1996年)对此也作过许多探索,提出了一些结合部刚度与阻尼参数的识别方法<sup>[四:25~27]</sup>,所有这些方法各有长短处,本书在第四章中作了较详细的论述。

关于结构的阻尼矩阵估计问题,一直是动力学研究领域的薄弱环节,同时也说明该问题的研究确有一定的难度。目前,应用最广泛的还是Reyleigh比例阻尼估计式,1975年,Clough与Penzien曾建议了一个更广义的阻尼矩阵估计式<sup>[五:1]</sup>,但它仍然只能描述比例阻尼。Caravani和Thomson(1974年)、Berman和Nagy(1983年)、Buhariwala与Hansen(1988年)等人利用实验复模态参数,采用不同的有限元反解方法来辨识结构的非比例阻尼矩阵<sup>[五:2.3.4.27.28.30]</sup>。Golla与Hughes(1985年)则利用结构在时域内的响应数据进行过非比例阻尼矩阵的识别<sup>[五:4.29]</sup>,Mau(1988年)采用子空间模态叠加方法辨识过结构的非比例阻尼矩阵<sup>[五:6.31]</sup>,这些方法所得非比例阻尼矩阵一般都为满阵,其物理意义不明确,难以应用于结构的动态设计中。1992年,美国国家地震研究中心的梁钟博士、李兆智教授等人提出了一种非比例阻尼矩阵的表达方式<sup>[五:10.35]</sup>,即将振动系统的阻尼矩阵表达为质量与刚度矩阵的多项式,并可以给出阻尼矩阵的物理解释。基于这一思想笔者对此也做过一些研究,笔者认为这一思想具有较大发展前途,但其研究还有待深入进行。

基于实验数据的结构有限元模型修正研究工作,近30多年来引起了广泛重视,国内外学者提出了大量的有限元模型修正方法。这些方法从修正的对象来说,大体上可分为矩阵型与设计参数型两大类修正方法。

矩阵型方法的基本思想是,根据一定的准则和结构动力学关系来修正有限元模型的质量矩阵  $M$  与刚度矩阵  $K$ ,使修正后的有限元模型计算的模态数与实验结果一致。这类方法首先由 Berman 等人(1971年)提出<sup>[7:1]</sup>,Berman(1971~1984年)方法分别以修改矩阵  $\Delta M$ 、 $\Delta K$  加权范数最小为目标函数,加上振型正交性、特征方程以及  $M$ 、 $K$  的对称性等为约束,采用约束极小化方法来实现模型的修正<sup>[7:1~6]</sup>。虽然在数学上可以达到由修正后的有限元模型计算的模态参数与实验结果相一致的目的,但这类方法得到的修正结果(修正后的质量与刚度矩阵)却失去了明确的物理意义。如矩阵  $M$ 、 $K$  失去原有的带状稀疏等特性而变为满阵,矩阵中原为正值的元素变成负数等。尽管后来许多学者〔如 Caesar (1986年)、kabe (1985年)、张 (1988年)等〕曾设法加以改进<sup>[7:13,14,22,24]</sup>,但终究因无法用实际结构设计参数解释修正后的模型而难以应用于结构的动态设计。

显然,更合理的方法是直接对设计参数修正,即对结构的材料、截面形状和几何尺寸等参数进行修正。如曾 (1992年)的论文所述,这种修正方法所获得的有限元模型物理意义明确,能与结构动态设计兼容<sup>[7:20]</sup>。即这类修正方法可直接应用于结构动态设计。如 Colluins (1974年)、Chen 与 Garba (1980年、1983年)、曾 (1991年)、陈 (1994年、1996年)等人曾用实验模态参数辨识结构的设计参数<sup>[7:7~10,20,37,38]</sup>,Ewins (1990年)、Link (1992年)等人曾用频率响应函数进行过结构设计参数识别<sup>[7:40,41]</sup>。

有限元模型修正中(不论矩阵型,还是设计参数型修正方法),需要解决的一个困难是实验数据的自由度不完备性。目前主要有两种处理方法:一是用凝聚法,即把自由度较多的有限元模型缩减到与测量自由度一致。如 Lipkin (1987年)、夏 (1993年)等人曾采用过此方法<sup>[7:18,19]</sup>;二是扩充测量自由度,使扩充后的测量振型自由度与有限元模型的自由度一致,如果 Bermen (1981年、1983年)、曾 (1992年)等采用的即为此方法<sup>[7:3,4,20]</sup>。凝聚法获得的有限元模型一般为满阵,其模型的物理意义不明确,无法用于结构的动态设计。测量自由度扩充时需要以原结构的有限元模型为基础进行,而原模型的不准确将直接影响扩充数据的不准确,从而影响模型的修正精度。

为克服这一不足,笔者 (1995年)建议了一种基于迭代的方法<sup>[7:36]</sup>,即在对原有限元模型不断修正过程中完成振型自由度扩充。另外,设计参数型的修正方法中,由于阻尼矩阵难以用设计参数表达,因而目前的设计参数型修正方法中一般都没有考虑阻尼矩阵的修正。笔者对此进行了研究见本书第七章。

关于结构动态设计的“逆问题”方法,事实上就是结构系统的逆特征值问题直接求解。自 50 年代初开始,人们就致力于逆特征值问题的研究。但由于问题的复杂性,它的发展与应用,不像“正问题”那样迅速,随着计算机技术的快速发展,逆特征值问题的研究又日益引起人们的重视。逆特征值问题也分矩阵型与设计参数型两大类。葛 (1991年)在他的《矩阵理论及其在工程技术中的应用》一书中<sup>[8:7]</sup>,较系统地介绍了多种特征值逆问题求解的矩阵型方法,李 (1990年)曾指出<sup>[8:1]</sup>,在获得了满足动态特性要求的质量与刚度矩阵后,要通过结构来实现这种质量刚度矩阵却不是件容易的事。因此从动态设计的角度来说,逆特征值问题求解的对象最好是结构的设计参数,即设计参数型。前面提到的设计参数型有限元模型修正的各种方法,事实上也属于基于逆问题直接求解的动态设计方法。Gladwell (1986年)、白 (1987年)等人对板杆梁类结构有限元逆特征问题的直接求解做了较多研究<sup>[8:13,14]</sup>,提出了一些以结构的材料、截面形状为设计参数的线性问题求解方法,而以结构的尺寸(坐标)为设

计变量时,其问题是非线性的,它的求解过程十分复杂,这也是该问题目前研究的困难所在。宋(1986年)提出过一种基于泛涵优化法的特征值逆问题方法,它也是设计参数型方法<sup>[8,14]</sup>,但它的寻优计算时间长,一般只适用于中小型规模的结构动态设计。直至今日,有关基于设计参数型的特征值逆问题的求解方法一直是人们努力探索的结构动态设计重点之一。

结构动态设计的正问题方法,也就是结构修改与修改结构重分析方法,是目前使用较为广泛的一类动态设计方法。有关结构修改的灵敏度分析,自从Fox(1968年)提出特征值与特征向量灵敏度分析以来<sup>[9,6]</sup>,人们已做了大量工作,并逐步完善了有关结构动态特性灵敏度计算的方法。如陈(1993年)提出的特征向量灵敏度计算的截尾模态展开法,解决了模态截尾对特征向量灵敏度计算精度的影响<sup>[9,11]</sup>。宋(1991年)等人还完善了各种高阶灵敏度计算算法<sup>[9,4]</sup>。修改结构重分析,是基于正问题的动态设计方法的关键,人们对这一主题的研究相对比较活跃。目前修改结构动态特性重分析方法主要有如下几类:基于小参数的矩阵摄动法<sup>[9,12~15]</sup>、基于模态变换的特征值再分析方法<sup>[9,9,16]</sup>、基于模态参数再识别的传递参数法<sup>[9,5,17]</sup>等等。Rayleigh是研究修改结构动态特性重分析问题的先驱,早在100多年前,他就应用摄动分析方法对有阻尼与无阻尼结构振动特征值重分析问题进行了研究,这是特征值问题摄动理论的奠基性工作。后来,人们又做了大量工作,逐步完善与推广了Rayleigh的摄动法,例如,为了进一步提高摄动法的重分析速度与重分析精度,Brooks和Sharp(1987年)、Lui(1993年)等众多学者又对摄动法做了更深入的研究,提出不同类型的迭代摄动法<sup>[9,12,13]</sup>,郑(1990年)、陈(1991年)等人还就复模态情况下的摄动重分析方法进行了讨论<sup>[9,14,15]</sup>。然而,摄动法毕竟是一种局部近似分析技术,当修改量变化较大时,其重分析精度明显下降<sup>[9,15]</sup>,这是人们力图解决而又难以解决的一个问题。特征值再分析方法与传递函数法在计算上稍稍复杂些,但其重分析精度得到了较大改善<sup>[9,9,16,17]</sup>。为解决重分析速度,以实现有效地动态设计,笔者(1995年)提出了一种基于人工神经网络模型的重分析方法<sup>[9,19,20]</sup>,初步的实践表明了这种新型的动态设计思路具有良好的发展前景,但仍有许多问题有待进一步探索。

近年来,笔者就结构动态设计中几个重要而困难的关键技术——动力学系统建模中结合部刚度与阻尼参数识别问题、系统的非比例阻尼矩阵估计问题、有限元分析模型的实验修正问题,结构动态优化设计问题以及结构动态优化重分析问题等,进行了许多理论、方法及实验研究,提出了一系列具有一定理论与实用价值的分析方法。并以此为主要素材写成此书,以期早日形成一套比较完整的结构动态设计理论与方法打下基础。

本书涉及到的笔者近期的主要具体研究工作有:

(1)针对一种特殊结合部——支承部,笔者提出了两种支承刚度与阻尼参数的识别方法,即利用有限元模型与实测传递函数相结合的识别方法和基于实测传递函数的识别方法。这两个方法从识别公式上表达了待识别参数与实测传递函数的低维矩阵关系,从识别算法上避免了对实测传递函数矩阵的直接求逆,与现有的“整体有限元反解识别方法”和“直接求逆识别方法”相比,该方法不仅计算工作量较小,而且识别精度也高。对于支承面内存在难测分量时,该方法也给出了具体的处理策略。特别是,笔者还证明了基于实测传递函数的识别方法的另一个特点——它对实测传递函数测点选择具有灵活性,这大大地方便了工程应用。

(2)针对工程实际中的一般结合部——两侧均为弹性体的情况,笔者提出了一种利用实测传递函数识别结合部刚度与阻尼参数的方法。与现有几个典型的同类方法相比,在识别公式上,笔者导出的识别公式具有广义性,即由它可直接派生出几个同类方法的识别公式;在



实验数据的需求上,该方法比某些同类方法所需要的实测传递函数类型要少;在识别算法上,该方法避免了某些同类方法对实测传递函数矩阵直接求逆的缺陷。理论与实例表明,这种方法不仅实验、计算工作量较少,而且识别精度高。另外,对结合面存在不可测分量时,该方法也给出了具体的处理策略。

(3) 对一般结合部,特别是多层结合部,考虑到结合部全部可测试、部分可测试或不可测试等多种情况,笔者提出了一种基于实验模态参数,依次进行各个结合部参数识别的方法,并与现行的基于实验模态参数的结合部参数识别方法进行了比较,该方法适应性更广。

内容(1)、(2)、(3)在本书第四章中进行了介绍。

(4) 考虑到工程实际结构往往是非比例阻尼情况,笔者研究了美国国家地震研究中心梁钟博士提出的非比例阻尼矩阵的表达形式问题,并在此基础上提出了一种基于实验动态数据估计阻尼矩阵的优化方法。由该方法获得的阻尼矩阵不仅能表达比例阻尼情况,而且具有实际物理意义,方便了工程应用,实例表明了该方法具有良好的估计精度。

内容(4)在本书第五章进行了介绍。

(5) 对于连续体子结构,笔者提出了一种利用非完备实验模态参数局部修正有限元分析模型的迭代方法。由于该方法修正的对象是结构局部某些不准确的物理参数(如不规则的几何参数与具有复杂物理特性的材料参数等),因此,修正后的模型物理意义明确,与结构动态设计相适应。该方法中不完备的实验振型是在每轮迭代中完成扩充的,因此,相对于现有的振型一次扩充方法而言,修正精度要高。另外,笔者还利用非比例阻尼矩阵表达的研究工作,将该方法推广至复模态情况,提出了相应的利用非完备的实验复模态参数修正有限元分析模型的迭代方法,从而克服了有限元模型修正中的一个困难——“设计参数型”修正方法难以考虑阻尼矩阵修正的问题。理论与实例表明了该方法的修正效果良好。

(6) 笔者在研究有限元模型修正方法直接用于结构动态设计的基础上,提出了一种有限元模型修正技术与传统静态优化技术相结合的结构动态优化设计方法,该方法利用基于设计参数型的有限元模型修正技术,较好地解决了动态优化设计中的难点——用设计变量显式地表达结构的动态性能约束问题,从而将一个具有动、静态性能约束的动态优化设计问题转化为一传统的优化设计问题,大大方便了工程应用。

内容(5)、(6)在本书第七章中进行了介绍。

(7) 笔者将人工神经网络理论引入结构振动分析与动态设计领域,在Kolmogorov多层神经网络映射存在定理基础上,从理论上证明了一个三层神经网络可要精确地描述结构设计变量与结构动态特性参数(特征值与动柔度等)之间的非线性映射关系。从而为建立人工神经网络模型进行结构振动分析、结构动态优化设计以及结构的振动控制等提供了一个全新的思路与新的理论基础。

(8) 在上述理论上,笔者提出了一种基于人工神经网络模型进行结构振动系统动态特性快速重分析的方法,给出了具体的振动重分析神经网络模型的建模与重分析算法。由于这种模型具有全局意义,即在整个设计变量空间,其重分析精度稳定,因而适合于大修改量的结构振动重分析,而传统的“摄动法”则只适用于小修改情况。这一模型可代替系统原来的有限元模型,加上它具有全局意义,并具有极快的重分析速度,因此,它将成为结构动态优化设计的有力工具,同时也将会导致许多全新的结构动态设计方法的诞生。作为尝试,本书利用人工神经网络模型对一台机床主轴进行了动态优化设计,并取得了良好效果,证明了