

# 模型修正 与破损诊断

张德文 [美] 魏阜旋 著



科学出版社

# 模型修正与破损诊断

张德文 [美] 魏阜旋 著



科学出版社

1999

## 内 容 简 介

本书系统地讨论了结构计算模型修正技术和结构破损诊断方法的原理与功能,囊括了当前该领域内各主要流派的最新成果.此外,还介绍了近年来创立的实用完备模态空间理论,最新的动力模型减缩技术和特征向量导数计算方法(含修改结构特征导数的快速分析法)等内容.附录中叙述了约束最小二乘法和求解病态方程组的 $\epsilon$ 分解法.

本书可供一切从事结构工程(如航空、航天、土木、船舶、桥梁、车辆等)设计、研究的科技工作者参考,也可供高等学校上述专业的高年级学生,以及从事模型修正和破损诊断、结构动力学研究的研究生和教师阅读.

### 图书在版编目(CIP)数据

模型修正与破损诊断/张德文、〔美〕魏阜旋著.-北京:科学出版社, 1999.2

ISBN 7-03-006931-5

I. 模… II. ①张… ②魏… III. ①结构计算模型-修正-技术②结构破损-诊断-方法 IV. TB115

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 22599 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号  
邮政编码:100717

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1999 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16  
1999 年 2 月第一次印刷 印张:11 1/2  
印数:1-1 200 字数:258 000

定价:18.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

D. W. ZHANG  
F. S. WEI

# MODEL UPDATING AND DAMAGE DETECTION

Science Press  
Beijing, China

# 前 言

模型修正与破损诊断是结构动力学中的典型“逆问题”,它是建立在试验或实测基础上的、采用试验与理论分析相结合的方法来处理工程问题的典型代表.计算模型修正(精化)方法发展于 60 年代末 70 年代初,到了 70 年代末相继兴起了结构破损诊断技术.模型修正与破损诊断从方法论上讲,它俩间的差别越来越小,除固有的不同特点外,不同之处只是模型修正允许在实验室内做一次真实结构的动特性试验,而破损诊断不仅要求对使用中的结构进行实时(在线)监测,还要求保留破损前测量结果的历史记录.这两项技术目前在国内外正处于方兴未艾的发展阶段,不仅在理论研究上取得了不少成果,而且在实际工程结构上获得了应用.

关于模型修正与破损诊断的论述虽在一些专著中有所论述,但详细而又系统地总结、介绍模型修正与破损诊断,以及与之相关技术的专著目前还没有看到.为了满足广大读者对这方面知识的需求,我们编写了这本书,并力求反映当前国内外的最新或较新研究成果.

模型修正与破损诊断是一项前沿课题,它的发展必然在数学和力学学科方面提出一系列新的课题,并带动它们同步发展,如实用完备模态空间理论的创立,逆加权残值法、约束最小二乘法和  $\epsilon$  分解法的出现,以及动力模型减缩技术和特征向量导数计算方法等方面的飞跃进展.这些内容在本书内都有较为详细的介绍,全书共分为九章和四个附录.

第一章,概括模型修正与破损诊断两技术的概貌、作用和原理.

第二章,讨论刚体模态参数(模态形状和惯性特性)的辨识方法,以及真正自由-自由测量振型的提取过程.

第三章,介绍关系到模型修正和破损诊断成败的实测模态预处理的一些主要技术,如实测模态的插值扩阶、统一标定和相关性分析准则等.

第四章,论述作者初步创立的实用完备模态空间理论.该理论可以解决因模态截尾误差而引起精度低的一系列理论问题和工程问题.

第五章,讨论动力模型的三类减缩技术,如物理型、模态型和混合型减缩技术,几乎囊括了当前最先进的减缩方法,这些方法也是对实测模态进行扩阶的重要手段.

第六至第八章,叙述计算模型修正(精化)技术、建模错误的定位和结构破损诊断的步骤:破损的发现、定位、破损程度的评估.这是本书的主体内容.

第九章,较全面地介绍特征导数计算中的三类直接求导方法:直接法(动刚度法)、间接法(模态法)和混合法(动柔度法).特征导数是模型修正与破损诊断领域中许多灵敏度方法不可缺少的信息.

四个附录中列出了此书命题中很有用的一些数学方法与公式,如约束最小二乘法和求解病态方程组的  $\epsilon$  分解法.

模型修正与破损诊断技术正在日新月异地发展,不断有新概念、新方法涌现,本书不可能都将它们包括在内.此书主要是为在第一线工作的广大工程师撰写的,所以大部分数学描述较为通俗,即不求数学上的完美无缺,只求方法上有根有据.由于本书是一本小型

学术专著,对个别理论(如破损程度评估中的最小秩理论)的冗长证明省略了,只列出了可供使用的结论,有兴趣深入研究的读者,可以参阅所列文献.

由于作者水平有限,书中难免会有疏漏和不妥之处,敬请广大读者不吝指教.

张德文

于中国运载火箭技术研究院第七〇二研究所

魏阜旋

于美国凯门航太公司

# 目 录

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 第一章 引论 .....            | ( 1 )  |
| 1.1 模型修正技术 .....        | ( 1 )  |
| 1.1.1 模型修正方法的分类 .....   | ( 2 )  |
| 1.1.2 模型修正技术的功能 .....   | ( 3 )  |
| 1.2 结构破损诊断 .....        | ( 4 )  |
| 1.3 扩阶与减缩 .....         | ( 6 )  |
| 1.4 模态截尾与灵敏度 .....      | ( 6 )  |
| 参考文献 .....              | ( 7 )  |
| 第二章 刚体模态参数辨识 .....      | ( 9 )  |
| 2.1 准刚体模态 .....         | ( 9 )  |
| 2.2 刚体惯性特性辨识 .....      | ( 10 ) |
| 2.3 模态试验支承刚度辨识 .....    | ( 12 ) |
| 2.4 迭代精化(支承影响的消除) ..... | ( 13 ) |
| 参考文献 .....              | ( 14 ) |
| 第三章 测量模态的预处理 .....      | ( 15 ) |
| 3.1 由复模态提取主模态 .....     | ( 15 ) |
| 3.2 插值扩阶 .....          | ( 17 ) |
| 3.2.1 迭代法 .....         | ( 18 ) |
| 3.2.2 误差极小法 .....       | ( 18 ) |
| 3.2.3 最优拟合法 .....       | ( 19 ) |
| 3.3 统一标定 .....          | ( 20 ) |
| 3.4 相关性分析 .....         | ( 21 ) |
| 参考文献 .....              | ( 23 ) |
| 第四章 实用完备模态空间理论 .....    | ( 25 ) |
| 4.1 空间的生成 .....         | ( 25 ) |
| 4.2 等价性证明 .....         | ( 26 ) |
| 4.3 等效性证明 .....         | ( 26 ) |
| 4.4 改进的实用完备空间 .....     | ( 28 ) |
| 4.4.1 逐步分解法 .....       | ( 28 ) |
| 4.4.2 优化正交法 .....       | ( 31 ) |
| 4.5 普遍式精确模态综合法 .....    | ( 33 ) |
| 4.5.1 精确自由界面法 .....     | ( 33 ) |
| 4.5.2 试验模态简便综合法 .....   | ( 39 ) |
| 参考文献 .....              | ( 41 ) |
| 第五章 动力模型减缩 .....        | ( 43 ) |

|            |                 |             |
|------------|-----------------|-------------|
| 5.1        | 物理型减缩           | (43)        |
| 5.1.1      | Guyan 减缩        | (44)        |
| 5.1.2      | 改进减缩系统(IRS)     | (44)        |
| 5.1.3      | 逐级近似缩聚法         | (45)        |
| 5.1.4      | 改进 Guyan-递推减缩   | (47)        |
| 5.1.5      | 双向递推减缩技术        | (52)        |
| 5.2        | 模态型减缩           | (56)        |
| 5.3        | 混合型减缩           | (57)        |
| 5.3.1      | 完备模态法(CMR)      | (58)        |
| 5.3.2      | 改进完备模态法(ICMR)   | (59)        |
| 5.3.3      | 混合减缩系统(HRS)     | (59)        |
| 5.3.4      | 举例              | (59)        |
|            | 参考文献            | (63)        |
| <b>第六章</b> | <b>结构计算模型修正</b> | <b>(64)</b> |
| 6.1        | 概述              | (64)        |
| 6.2        | 有限元模型修正         | (64)        |
| 6.2.1      | 矩阵型法            | (64)        |
| 6.2.2      | 元素型法            | (70)        |
| 6.2.3      | 子矩阵型法           | (80)        |
| 6.2.4      | 设计参数型法          | (82)        |
| 6.3        | 减缩模型修正          | (86)        |
| 6.3.1      | 非直接减缩法          | (86)        |
| 6.3.2      | 矩阵型法            | (87)        |
| 6.3.3      | 子矩阵型法           | (88)        |
| 6.4        | 准完善模型辨识         | (90)        |
| 6.4.1      | 逆加权残值法          | (90)        |
| 6.4.2      | 准完善修正模型         | (91)        |
| 6.5        | 完备空间模型修正        | (91)        |
| 6.5.1      | 完备模态空间法         | (92)        |
| 6.5.2      | 改进完备模态空间法       | (92)        |
| 6.5.3      | 特殊广义逆法          | (95)        |
| 6.5.4      | 实用完备模态空间法       | (96)        |
| 6.6        | 阻尼模型辨识          | (98)        |
| 6.6.1      | Ibrahim 法       | (98)        |
| 6.6.2      | 建议              | (100)       |
|            | 参考文献            | (100)       |

## **第七章 建模错误定位 (103)**

|       |        |       |
|-------|--------|-------|
| 7.1   | 单纯定位法  | (103) |
| 7.1.1 | 误差矩阵法  | (103) |
| 7.1.2 | 单位矩阵法  | (104) |
| 7.1.3 | 模态残余力法 | (105) |



|            |                     |              |
|------------|---------------------|--------------|
| 7.2        | 模型修正型定位法 .....      | (105)        |
| 7.2.1      | 能量定位法 .....         | (105)        |
| 7.2.2      | 摄动/迭代定位法 .....      | (107)        |
|            | 参考文献 .....          | (110)        |
| <b>第八章</b> | <b>结构破损诊断 .....</b> | <b>(111)</b> |
| 8.1        | 概述 .....            | (111)        |
| 8.2        | 破损的发现 .....         | (112)        |
| 8.3        | 破损定位技术 .....        | (113)        |
| 8.3.1      | 振型曲率法 .....         | (113)        |
| 8.3.2      | 振型变化图形法 .....       | (114)        |
| 8.3.3      | 柔度矩阵差值法 .....       | (114)        |
| 8.3.4      | 均载变形-曲率法 .....      | (114)        |
| 8.3.5      | 单元模态能量比法 .....      | (115)        |
| 8.4        | 破损诊断法 .....         | (117)        |
| 8.4.1      | 全局破损评估法 .....       | (117)        |
| 8.4.2      | 残余角-最小秩法 .....      | (120)        |
| 8.5        | 破损大小的评估 .....       | (123)        |
| 8.6        | 破损诊断中的若干问题 .....    | (124)        |
| 8.6.1      | 测量模态选取准则 .....      | (124)        |
| 8.6.2      | 测量模态扩阶技术 .....      | (125)        |
| 8.6.3      | 其它 .....            | (126)        |
|            | 参考文献 .....          | (127)        |
| <b>第九章</b> | <b>特征向量导数 .....</b> | <b>(129)</b> |
| 9.1        | 概述 .....            | (129)        |
| 9.2        | 直接法(动刚度法) .....     | (130)        |
| 9.2.1      | Fox 法 .....         | (130)        |
| 9.2.2      | Nelson 法 .....      | (131)        |
| 9.2.3      | 改进 Nelson 法 .....   | (131)        |
| 9.2.4      | 直接扰动法 .....         | (134)        |
| 9.2.5      | 双向扰动法 .....         | (136)        |
| 9.2.6      | 消元法 .....           | (137)        |
| 9.2.7      | 广义逆法 .....          | (139)        |
| 9.2.8      | 非线性特征导数 .....       | (142)        |
| 9.3        | 混合法(动柔度法) .....     | (144)        |
| 9.3.1      | 近似动柔度法 .....        | (145)        |
| 9.3.2      | 精确动柔度法 .....        | (152)        |
| 9.3.3      | 高精度动柔度法 .....       | (155)        |
| 9.4        | 间接法(模态法) .....      | (158)        |
| 9.4.1      | 完备模态法 .....         | (158)        |
| 9.4.2      | 截尾模态法 .....         | (159)        |
| 9.4.3      | 修正模态法 .....         | (160)        |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 9.4.4 改进模态法 .....             | (163) |
| 9.5 修改结构特征导数的快速分析 .....       | (165) |
| 参考文献 .....                    | (166) |
| <b>附录</b> .....               | (168) |
| 附录 A 约束最小二乘法 .....            | (168) |
| 附录 B 对于误差因子的特征导数 .....        | (169) |
| B.1 非重根情况 .....               | (169) |
| B.2 重根情况 .....                | (171) |
| 附录 C 算符 $\otimes$ 的运算规律 ..... | (172) |
| 附录 D 病态方程组的求解技术 .....         | (172) |
| 参考文献 .....                    | (174) |

# 第一章 引 论

随着当代航空航天器的大型化和复杂化,以及大型海上平台、高耸建筑、大跨度桥梁等新型复杂结构的出现,对它们的建模,仅凭工程师的经验欲建立一个与试验结果相一致的有限元模型几乎是不可能的.然而,没有一个正确的数学模型,要想对结构进行各种环境下的响应分析以及进行主/被动控制设计将是很困难的.这样,就必须求助于一种“模型修正”技术,并通过计算机自动地校正有限元模型,从而获得一个与试验结果相一致的数学模型.所谓模型修正技术就是一种典型结构动力学中的逆问题,即结构动力学物理参数的辨识问题.结构动力学问题可归纳为如下三类:

- (1) 结构分析问题(正问题): 给定结构的外作用力和数学模型,求解结构响应.
- (2) 载荷辨识问题: 给定结构的数学模型和响应,求解结构的外作用力.
- (3) 结构动力学物理参数辨识问题(逆问题): 给定结构的外作用力及响应,求解结构的数学模型.

本书专门就上述第三类问题进行论述.同属这一问题的还有结构破损诊断.在以往,大多采用 X 射线、电磁学检测、光干涉技术和超声波技术等手段对结构缺陷(破损)进行定期检查(或者为了防止破损引起严重的后果而对主要部件进行周期性更换).这些技术虽然很先进,但都只适用于小型结构或材料的检测,而对于一些不可见、不开敞的部位检测,这些技术不仅无法实施,甚至要求结构的某些功能停止使用、停止运转,例如大型民用客机要求在停飞的情况下进行检测,这是很不经济的.更为严重的是,有些重要部位一旦发生破损,它的破损程度将发展很快,而在未及时发现的情况下,就会很快导致整个结构的毁坏,后果不堪设想.对于这种破损,上述的一些检测手段是无能为力的.为此,人们开始寻找简便而又经济的评估结构安全状态的方法,现代发展起来的“结构破损诊断”技术就是这样一种方法.

目前大多数模型修正和破损诊断方法,都以模态参数和有限元模型作为参考基,这是因为模态参数最容易测量,而且来源最丰富.当然,也有直接依赖频率响应函数测量值的.

## 1.1 模型修正技术

模型修正实际上是一个系统建模的问题.系统建模有三类:理论建模、试验建模和系统辨识建模.理论建模在当前一般采用有限元建模,适用于结构的设计阶段,它的精度与建模人员的工作经验、业务水平密切相关,一般很难与实际系统很好地吻合,这是它的最大不足之处.试验建模可以弥补理论建模的这一缺陷.随着动态测试、信号处理、计算机辅助试验等技术的不断提高,以及新设备的不断出现,由动态试验便可以得到比较精确的结构动态特性(如频响函数、模态参数等),因此,由试验建立的数学模型比理论(有限元)模型更能代表实际系统.但由于实测信息的不完整性,因而导致试验建模无法获得完备的数学模型,这种模型只能反映真实系统的低阶模态特性.

由上述可知,理论建模和试验建模各有优点,又各有局限性,因此,若能将理论建模和试验建模结合起来应用,则将是较理想的建模途径.系统辨识建模就是这样的一种途径.它充分利用理论建模和试验建模两者的优点,首先用分析的方法建立具有先验性的有限元模型(FEM),然后依据能反映真实系统动态特性的测量模态参数(或测量频响函数)来修正 FEM,使其在试验频段内,计算模态参数与试验值良好一致,这也就是模型修正技术,有时又称它为结构物理参数辨识技术.

物理参数辨识较早的工作可以追溯到 60 年代中期<sup>[1]</sup>,但真正全面论述模型修正技术的开创性工作应属 Berman 在文献[2]介绍的,同时期的工作还有文献[3,4]所介绍的.发展最早的模型修正技术是矩阵型法,后陆续出现了元素型、子矩阵型和设计参数型等各类方法.

### 1.1.1 模型修正方法的分类

文献[5]首次对模型修正技术进行了较具体的分类,现介绍如下:

#### (1) 按修正对象分类

1) 矩阵型法:指校正模型的整个刚度、质量矩阵的方法.由于这种方法将建模误差分散到了整个矩阵内,带状矩阵被修正成满矩阵,因此无法保持原模型的物理意义;

2) 元素型法:可根据用户的判断或由建模错误定位技术所得结果,指定有误差的非零元素作为待修元素,而让原零元素始终保持为零.当然,也可指定所有非零元素为待修元素.当矩阵为对称时,待修元素仅限于上(或下)三角内的非零元素;

3) 子矩阵型法:将总矩阵表达成各单元或各子结构的扩阶矩阵之线性组合,组合因子为未知数,所以有时又称之为误差因子修正法.这种方法都基于能量观点.

4) 设计参数型法:一般利用泰勒级数展开和摄动法将特征对或物理矩阵(刚度和/或质量矩阵)与设计参数(如  $E, I, A, \rho, \dots$ )联系起来,其中待辨识的是设计参数.

以上 1)~3)三类修正的对象都与矩阵有关,故有人将它们统称为矩阵型法.细分的好处是便于表述这样一个结论:较之矩阵型法而言,元素型法和子矩阵型法可以保持原矩阵的稀疏、带状特点,从而保持原模型的载荷轨迹(指内力分布).设计参数型法最为广大结构设计者和分析工程师所采用,因为它的结果便于解释,便于指导建模,便于优化设计等.

#### (2) 按参考基内模态空间的完备性分类

1) 非完备空间法:仅含测量模态;

2) 实用完备空间法:测量模态加等效高阶理论模态.

#### (3) 按能否满足特征方程分类

1) 完善模型法:满足特征方程;

2) 准完善模型法:仅满足正交条件,近似满足特征方程.

#### (4) 按功能分类

1) 非诊断型法:只能提供修正模型;

2) 诊断型法:既能提供修正模型,又能诊断建模错误区域.

综观以上各种模型修正方法,可以说它们都是基于下列共同问题派生出来的:测量模态信息总是不完备的,即  $\Phi \in R^{N \times m}$ ,  $\Lambda \in R^{m \times m}$ ,  $m \ll N$ ,它所相应的特征关系为

$$\underset{N \times N}{K} \underset{N \times m}{\Phi} = \underset{N \times N}{M} \underset{N \times m}{\Phi} \underset{m \times m}{\Lambda} \quad (1.1)$$

$$\Phi^T M \Phi = I \quad (1.2)$$

$$\Phi^T K \Phi = \Lambda \quad (1.3)$$

这在数学上是一个亚定问题,因为其中未知量是  $K$  和  $M$  矩阵的元素,这样便有无限个  $M$  和  $K$  满足式(1.1)~(1.3).为了获得一个可用的确定解,就得补充所不足的方程个数,或者是减少未知量个数.由于“补充”或“减少”的方式不同,便产生出各种各样的方法,例如矩阵型法中的最优法<sup>[6~11]</sup>,是通过建立某种目标函数来达到增加方程个数的,而变换法<sup>[12,13]</sup>是通过变量代换来减少未知量个数的,子矩阵型法<sup>[14,15]</sup>和元素型法<sup>[16~18]</sup>也属于减少未知量的方法.此外,实用完备空间法<sup>[19]</sup>则属于增加方程个数的方法,其途径是增加参考基内的模态个数.

基于特征对一阶泰勒级数展开式的设计参数型法<sup>[20,21]</sup>的支配方程,一开始就以“高超定”面貌出现,致使拟合出“负质量”,而非进行迭代运算不可.为此便有人想法减少设计参数型中支配方程的个数,从而又产生了一些新的设计参数型技术<sup>[22]</sup>.

### 1.1.2 模型修正技术的功能

除了已叙述过的模型修正技术的一般作用外,一个好的模型修正技术应该具备如下功能:

#### (1) 获取正确模型

所谓正确模型至少应具有以下四个特点:

- 1) 在试验频段内,由它可以计算出与测量值相一致的模态参数或频响函数,更有甚者,它能在一定程度上预示试验频段外的测量模态参数.
- 2) 在各种载荷作用下,能计算出试验频段(或载荷谱的主频段)内的正确响应.
- 3) 能计算出正确的动应力分布.
- 4) 能反映真实结构的物理特性和几何特性.

显然,最具有明确物理意义的应属设计参数型的修正模型,从能量修正的观点讲,子矩阵型也具有物理意义.此外,能反映结构物理、几何特性的相关性(connectivity)条件<sup>[16]</sup>的元素型法也具有明确的物理意义.但在测量模态不完整的情况下,绝对符合“物理意义”的修正模型是不存在的,这正像离散化的有限元模型永远只能是连续结构的近似模型一样,所以,这里所说的物理意义只是相对于测量频段和离散化模型而言.Berman<sup>[23,24]</sup>曾指出过,一个好的有限元模型最多只有二分之一的模态可用,而且只有开头的三分之一甚至更少的低阶特征对能够与试验结果一致.

#### (2) 诊断建模错误

只有诊断型的修正模型才具有诊断建模错误的功能.诚然,当一个有限元模型与试验结果不一致时,就可怀疑建模中存在错误,但这只是怀疑,无法肯定,因为造成不一致的原因很多,比如有分析方面的原因,或者试验方面的原因.

分析方面的原因主要有:

- 1) 物理模拟错误:材料性质常数、尺寸系数不准确;某些等价量(如等价厚度等)取得不准确;某些非线性影响;实际工作状态与分析状态之间的差异等.
- 2) 离散化过程中的误差:粗糙的网格划分;单元类型选择不恰当等.
- 3) 运算(舍入)误差:如系数矩阵的条件坏(病态);不合适的计算方法等.

试验方面的原因主要有：

- 1) 测量数据的不完整：如测点少；转角分量无法测量；数据仅限于低频段等。
- 2) 试验方法选择不恰当：如不适当的激振方法，不适当的数据处理方法等。
- 3) 试验结构与设计结构的不对应：如支承(边界)条件的差异(不能绝对自由)等。
- 4) 存在测量噪声等。

可以预见，即使是一个好的诊断型修正模型，最多也只能诊断分析方面的第 1) 和 2) 两类建模错误，因为这两类错误都会反映到有限元模型矩阵的元素上，故元素型法和子矩阵型法可以诊断这两类错误的“混合源”，即分不清是第 1) 类还是第 2) 类，或者是两者都有之。倘若能保证第 2) 类错误不存在，那就能明确诊断出是第 1) 类建模上的错误。显然，设计参数型修正模型只能诊断分析方面的第 1) 类错误。注意，还有一类单纯的建模错误定位法，它只能判断建模错误的区域，而不能同时提供一个修正模型。

由上述可知，要想发挥一个修正模型的诊断功能，必须将运算误差减小到可忽略的程度，同时要求试验方面的误差降到最低限度，使得试验数据绝对可靠，不可靠的数据宁可抛弃。关于评定模型修正法所用模态试验数据误差的研究可见文献[25]。

既然模型修正技术可用于诊断建模错误，因此也可用来诊断结构的破损。不过从实际出发，模型修正法最好仅用于评估结构破损的程度，至于破损的定位，可改用对破损最为敏感的破损定位技术(其中某些方法所用到的未破损结构的基准模型仍必须由模型修正技术获得)。这种策略对于建模错误诊断也是可用的，即用专门技术确定建模错误区域以后，再用模型修正技术判断建模错误的严重程度。

### (3) 帮助设计人员积累建模经验

每建立一个有限元模型，设计人员便通过建模错误诊断技术对“错误区域”内的建模情况进行分析，从而确定选用一种更合理的假设和新的等价值。如果采用新假设和新等价值后的结果令人满意，说明建立的模型正确。这也使设计人员为今后建立模型积累了经验。

需要指出的是，在物理模型辨识领域中还有一类“直接辨识”技术<sup>[26,27]</sup>，它仅利用试验数据来辨识物理模型，而不采用任何理论信息(如有限元模型)，这就是所谓的“试验建模”。由于试验数据的不完整性，这种试验模型在工程中很难直接应用，故这里不予介绍。

需要强调的是，当前所有模型修正技术都只适用于“小误差模型”的修正，但随着宇航结构的复杂化、大型化，工程师在建模中难免会出现较大误差。目前对较大误差有限元模型的处理办法有两种：一是采用迭代修正过程；二是重新建模。但前者缺乏迭代收敛的理论基础，而且有时由于舍入积累误差而导致迭代不出满意的修正模型；后者是凭工程师的经验，将有限元模型的误差降低到现有模型修正技术可用范围内的，鉴于这种情况，有必要开发大误差模型的修正理论。

## 1.2 结构破损诊断

前面提到的一些检测材料裂纹和结构破损的传统手段(如 X 射线和超声波)都不适用于在线监测，然而在线监测是很重要的，因为破损随时都有可能发生，而且有的构件破损可能扩展很快，故要求及时发现破损的产生，在线监测便可做到这一点。众所周知，任何

结构都可以看作是由刚度、质量、阻尼矩阵(统称结构参数)构成的动力学系统,结构一旦出现破损,结构参数也随之变化,从而导致系统的频响函数和模态参数的改变,因此,模态参数(频率和振型)的改变可视为结构破损发生的标志.利用破损发生前后结构动态特性的变化来诊断结构破损的方法,其最大优点是可将导致振动的外界因素作为激励源,诊断过程不影响结构的正常使用,能方便地完成结构破损的在线监测与诊断.

发展中的结构破损诊断方法有两大类<sup>[28]</sup>:第一类方法类似于有限元模型修正和建模错误定位方法,技术上是相通的;第二类方法是根据先验知识假设一系列可能的破损方案<sup>[29~31]</sup>,然后将所有破损方案预示的结构响应变化与测量的变化进行比较,从而选择最接近的破损方案作为实际破损状态.这类方法成功的前提是要假设一组包含有真实破损情况的方案.然而实际结构的破损位置可能有很多,甚至极有可能同时发生多处破损,因此要正确作出这些假设在实际工作中是很困难的.

本书将重点介绍第一类方法.这类破损诊断方法与模型修正、建模错误定位在技术上完全相通,正像文献[32,33]中指出的,它们犹如“孪生兄弟”.文献[32]认为,结构破损诊断相对于建模错误定位而言,是要诊断“裂纹”类型的刚度小量级变化,这是很困难的.本书介绍的破损诊断方法不包括裂纹发生位置的诊断,也不包括构件生产过程中出现的裂纹和缺陷的诊断,而是介绍结构使用过程中出现的较为明显的破损状态的诊断,因为目前的诊断技术和试验测量水平还未达到可以发现结构使用过程中出现的裂纹等情况,而且微小裂纹的出现还未构成结构的真正破损.此外,即使有些构件发生明显的局部破损时也只会导致局部承载能力的下降,但还不至会立即引起整个结构的破坏.因此当前可以诊断部分构件发生明显破损的方法无疑是具有实际工程意义的.

倘若要将上述第一大类破损诊断方法再进行细分,则有三种分类方法:

(1) 基于诊断中所用信息进行分类

- 1) 基于固有频率的破损诊断;
- 2) 基于振型的破损诊断;
- 3) 基于固有频率和振型的破损诊断;
- 4) 基于频率、振型和 FEM 的破损诊断.

(2) 基于用不用 FEM 信息进行分类

- 1) 基于特征量的破损诊断,这实际是包括前一种分类中的第 1)~3)三类诊断方法;
- 2) 基于数学模型的破损诊断,仅指前一分类中的第 4)类.

(3) 基于功能进行分类

- 1) 仅仅可以发现破损;
- 2) 不仅发现破损,还可确定破损的位置;
- 3) 不仅可以进行破损定位,而且可判断破损的程度.

总之,结构破损诊断技术是一门新兴的科学技术,目前正处于蓬勃发展之中,因此还很难非常确切地、科学地进行分类.而且各种诊断方法的执行过程也各不相同,有的只能进行定位,有的则可以进一步确定破损的程度.不同的破损定位技术都有自己相应的破损程度的评估方法,只能进行破损定位的方法完全类似于建模错误诊断中的单纯定位方法.利用这些破损定位技术确定破损位置以后,进一步对破损程度的评估也是依赖于模型修正技术来完成的.

### 1.3 扩阶与减缩

凡是要同时用到振型和 FEM 信息的结构破损诊断技术,都要求测量振型的自由度数  $n$  与 FEM 的自由度数  $N$  相一致.要实现这一要求,有三种途径:一是 FEM 的自由度上都有振型测量值,但这几乎是不可能办到的;二是扩充测量振型的自由度数(扩阶问题);三是减缩 FEM 的自由度数(减缩问题).然而,实际情况是  $n < N$ ,这与模型修正的要求和情况是一样的.

扩阶与减缩是一个问题的两个方面,任何一种自由度减缩方法(除一种非直接减缩法<sup>[34]</sup>外)都可以充当扩充自由度数量的技术.但不是所有扩阶方法都可以改作减缩工具的,因为扩阶技术中有相当一部分属于或类似于几何插值方法.

无论是对于模型修正还是破损诊断,扩阶与减缩都是非常重要的,它们的精度直接关系到模型修正和破损诊断的成败.以往人们认为,随着扩充的或者减缩的自由度个数的增加,则扩阶或减缩的误差迅速增大,这是基于 Guyan 减缩<sup>[35]</sup>和改进减缩系统(IRS)<sup>[36]</sup>得出的结论.现在已发展了一种递推(迭代)减缩技术<sup>[37]</sup>,虽然理论上还未能证明该递推减缩的收敛性,但实践表明,无论减缩(删除)自由度个数为多少,该递推减缩都可收敛到精确值,只是减缩自由度数越大,收敛得越慢而已.这样,利用这种减缩技术进行测量模态振型的扩阶,应该获得很好的精度,这对于破损诊断是特别有意义的,因为对于破损诊断而言,扩阶比减缩更为有效.不过遗憾的是,像一般模型减缩技术一样,文献[37]的递推减缩的精度直接依赖于在线模型<sup>1)</sup>的刚度和质量矩阵的精度.破损前,模型矩阵的精度通过模型修正基本得以保障.破损后的模型矩阵,至少是刚度矩阵未知,这时若用破损前的刚度矩阵近似代替,然后利用这样的矩阵信息对破损后的测量模态进行扩阶,结果会引入多大的额外误差,这无法估计.但无论如何,在同等条件下,采用文献[37]的递推减缩技术测量模态扩阶的精度较之用文献[35]和[36]方法的精度要好得多.

### 1.4 模态截尾与灵敏度

模态截尾及其误差在结构动力学的理论和实践领域中处处存在,在模型修正与破损诊断领域中也不例外,这主要指严重影响破损诊断效果的模态振型不完整性问题.所谓振型不完整包含两方面的意思:一是测量振型中的转角分量和部分平动分量未能测量;二是测量的振型不完备,即一般只能测得部分模态.此后者就是模态截尾的问题.在模型修正问题中,讨论由测量模态不完备导致的式(1.1)~(1.3)所表述的问题时,就有学者关于给测量模态补充高阶理论模态<sup>[38,39]</sup>进行了探讨.他们提出的补充办法都属特殊方法,不具普遍性.文献[19]利用矩阵投影原理首次建立了获取等效高阶模态组(矩阵)的普遍公式,后来由文献[40~42]将这一思想发展成实用完备模态空间理论.这一理论发源于模型修正领域中<sup>[19]</sup>,后来在特征灵敏度、模态综合法和动力模型减缩等诸多方面获得成功应用.原则上讲,凡用到模态线性组合技术的理论和工程问题,都可利用这一理论来解决由于模态

1) 在线模型是指测试时结构所具有的数学模型.



截尾误差所导致的精度低的问题.就目前预见到的情况而论,实用完备模态空间理论在破损的“设防诊断”中定可发挥作用.这里定义设防诊断为前述第二大类破损诊断法——可能破损方案法中的临界危险破损方案,这种破损方案一旦发生,将即刻危及整个结构的安全.当然,在非临界危险破损方案诊断步骤中,该理论也有用武之地.

在模型修正与破损诊断中,灵敏度分析法是一大流派,尤其被广泛地用于确定结构破损的程度.这一大流派的许多方法都离不开特征灵敏度(导数)的计算,由此导致特征导数计算方法取得了飞速发展.至今已有了以 Fox 和 Wang 为代表的模态法(间接法),以 Nelson 和 Ojalvo 为代表的动刚度法(直接法),以及张德文和魏阜旋的动柔度法(混合法),此外,张德文还提出了修改结构特征导数的快速分析法.这许多计算方法为模型修正和破损诊断提供了有力的工具(详见第九章).

### 参 考 文 献

- [1] W. P. Rodden, Method for Deriving Structural Influence Coefficients from Ground Vibration Test, AIAA Journal, 1967, **5**(5).
- [2] A. Berman and W. G. Flannelly, Theory of Incomplete Models of Dynamic Structure, AIAA Journal, 1971, **9**(8).
- [3] R. Ross, Synthesis of Stiffness and Mass Matrix from Experimental Vibration Modes, SAE 710787, 1971.
- [4] B. M. Hall et al., Linear Estimation of Structural Parameters from Dynamic Test Data, Proc. of the AIAA 11th SDM Conf., 1970, 193—197.
- [5] 张德文, 计算结构模型修正技术, 研究生内部教材, 航空航天工业部第七〇二研究所, 1992.
- [6] A. Berman, Mass Matrix Correction Using an Incomplete Set of Measured Modes, AIAA Journal, 1979, **17**(10).
- [7] F. S. Wei, Stiffness Matrix Correction from Incomplete Test Data, AIAA Journal, 1980, **18**(10).
- [8] A. Berman and F. S. Wei, Automated Dynamic Analytical Model Improvement, NASA CR-3452, 1981.
- [9] A. Berman, F. S. Wei and K. V. Rao, Improvement of Analytical Dynamic Models Using Modal Test Data, Proc. of the AIAA 21st SDM Conf., 1980, 809—814.
- [10] A. Berman and E. J. Nagy, Improvement of a Large Dynamic Analytical Model Using Ground Vibration Test Data, AIAA Paper 82-0743, 1982.
- [11] M. Baruch, Optimal Correction of Mass and Stiffness Matrices Using Measured Modes, AIAA Journal, 1982, **20**(11).
- [12] 周欣, 利用模态试验数据修正结构有限元分析模型, 北京强度环境研究所, 硕士论文, 1986.
- [13] D. W. Zhang and L. Zhang, The Matrix Transform Method for Updating Dynamic Model, AIAA Journal, 1992, **30**(5).
- [14] Q. Zhang and G. Lallement et al., A Complete Procedure for the Adjustment of a Mathematical Model from the Identified Complex Modes, Proc. of the 5th IMAC, 1987, 1183—1189.
- [15] 张景绘、邱阳, 子结构修改过程及灵敏度分析, 强度与环境, 1989, (4).
- [16] A. M. Kabe, Stiffness Matrix Adjustment Using Mode Data, AIAA Journal, 1985, **23**(9).
- [17] D. W. Zhang and J. J. Li, A New Method for Updating the Dynamic Mathematical Model of a Structure Part 1: Quasi-Complete Modified Model and a Concept of the Guide-Type Method for Re-Creating a Model, DFVLR IB 232-87 J05, 1987.
- [18] O. Zhang, A. Zerva and D. W. Zhang, Stiffness Matrix Adjustment Using Incomplete Measured Modes, AIAA Journal, 1997, **35**(5).
- [19] 张德文、魏阜旋、张欧骥, 实用完备模态空间中的相容修正模型, 振动工程学报, 1989, **2**(4).
- [20] J. D. Collins et al., Statistical Identification of Structures, AIAA Journal, 1974, **12**(2).
- [21] J. C. Chen and J. A. Garba, Analytical Model Improvement Using Modal Test Results, AIAA Journal, 1980, **18**(6).
- [22] 曾庆华, 结构动力修改技术若干问题研究, 南京航空航天大学, 博士论文, 1989.