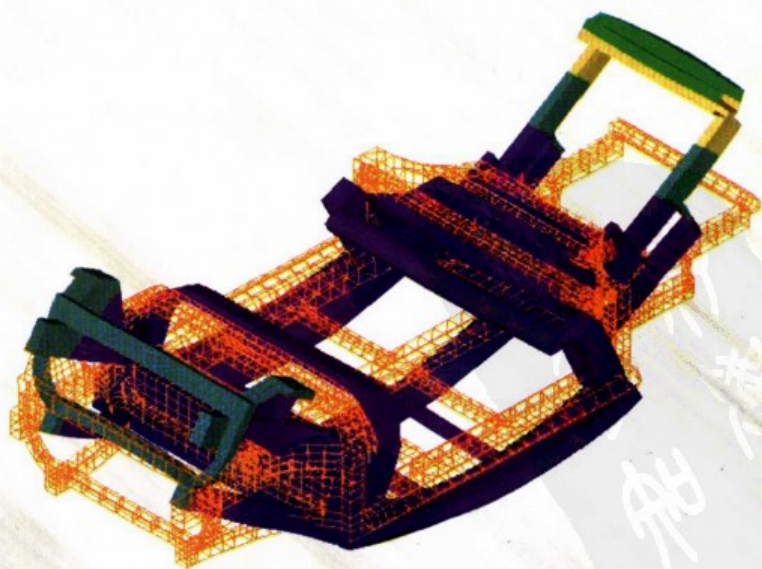


# 模态分析理论与试验

沃德·海伦 斯蒂芬·拉门兹 波尔·萨斯 著

白化同 郭继忠 译 屠良尧 校



北京理工大学出版社



# 模态分析理论与试验

原著：沃德·海伦  
斯蒂芬·拉门兹  
波尔·萨斯

翻译：白化同 郭继忠  
校对：屠良尧

北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

本书阐述了模态分析理论与模态试验。上篇介绍了解析模态分析与实验模态分析、数字信号处理、模态参数识别、模型验证、模态参数应用以及模型修正和预试验分析等基本理论。下篇紧密结合上篇的理论,从更为实际的角度介绍实验模态分析的各种方法。

本书适合于从事结构动力学实验与分析的工程技术人员及大专院校相关专业高年级学生和研究生阅读。

Modal Analysis Theory and Test ing

Ward Heylen Stefan Lammens Paul Sas

Translation copyright © 2001 by Beijing Institute of Technology Press

Copyright © 1997 by Katholieke Universiteit Leuven - Departement werktuigkunde

All rights reserved. Published by arrangement with the original publisher, Prentice-Hall Inc. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopy, recording or any information storage and retrieval system, without written permission from the publisher.

本书中文简体字版由北京理工大学出版社出版,未经出版者书面许可,本书的任何部分不得以任何形式或方式进行复制或采纳。

### 图书在版编目(CIP)数据

模态分析理论与实验/(比利时)海伦等著.白化同,郭继忠译.--北京:北京理工大学出版社,2001.6

ISBN 7-81045-797-7

I. 模… II. ①海… ②白… ③郭… III. ①模态-振动分析 ②模态-振动试验 IV. 032

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 022967 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2001-0550 号

责任编辑:李绍英 责任校对:郑兴

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区中关村南大街5号)

邮政编码 100081 电话(010)68912824

各地新华书店经售

北京房山先锋印刷厂印刷

\*

787毫米×1092毫米 16开本 16.5印张 377千字

2001年6月第1版 2001年6月第1次印刷

印数:1—3000册 定价:30.00元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

# 译 序

现在奉献给读者的《模态分析理论与试验》一书是根据《Modal Analysis Theory and Testing》(1999年版)翻译的。原书作者是比利时卢温大学著名动力学教授,这是他们增删多次的最新一部力作。

本书分上下两篇:上篇讲理论,下篇讲实践。讲理论,简洁明了,深广结合;讲实践,现实中肯,有根有据。全书特别注重理论与实践紧密结合。因此,本书非常适合想在理论上有所提高的实验工程师阅读。当然,对于有关专业的工程技术人员及大专院校的教师和学生,该书都有一定的参考价值。

译者从事结构模态实验与分析多年,但总感到自己的理论不够系统,个人的经验往往跟不上这一领域中理论与实践的飞速发展。充实自己,紧紧跟随模态分析技术前进的步伐,是我们翻译出版本书的主要动力。另一方面,在航天、航空、汽车、船舶、机床、桥梁、石油、农机、建筑等众多工业部门,通过模态实验分析了解结构的动力学特性,进而修改模型,优化设计,已经成为生产过程中不可或缺的必要环节。这些方面的专业工作者如果能够从本书中多少有所收获,哪怕是一点启迪,便足以令译者欣慰。

目前用于实验模态分析的专用软件程序和硬件设备种类繁多,生产厂家林立。附录中列出了几家公司的有关产品及其主要性能指标,也许对读者在配置自己的实验系统时有所帮助。

译者对原书印刷方面的错误,一经发现便予以纠正而不加说明。

本书翻译过程中,得到了哈尔滨工业大学屠良尧教授的鼓励与指导,译者深表感谢。

译者特别感谢北京空间飞行器总体设计部殷礼明研究员、于登云研究员、徐晓权高级工程师等领导同志,他们对本书倾注的热情和支持令人感动。同时,译者对 LMS 公司驻京代表处、KISTLER 公司以及东华测试技术开发有限公司在本书出版过程中给予的支持与帮助表示由衷的感谢。

译文错误仍所难免,诚请读者指正。

译 者

2000年2月

# 前 言

本书试图概要叙述模态分析的理论及实验方法。模态分析是一项对描述系统动力学特性所需参数进行研究和估计的技术,因此有着广阔的应用领域:所有线性动力学系统,只要其输入输出可以测量,均可通过模态分析进行研究。虽然这并不是一项新技术,但主要是因为数字计算机的迅速发展大大增加了模态分析技术的现实可能性。

本书源于比利时卢温大学产品工程、机械设计与自动化分校 1976 年以来每年讲授的基本教程。早年的基础研究在最近几年迅速发展成为一种现代的大好局面。虽然新方法层出不穷,已有方法精益求精,但以系统的、统一的形式写成一本书,将这方面的知识总结一下,显得正当其时。

本书由互为补充、可相互引用的上下两篇组成。

比较讲究理论的工程师或已经有了一些模态分析的实际经验而仍想了解更多理论背景的人,对上篇会产生兴趣。开篇先讨论解析模态分析和实验模态分析所必需的基本理论。由于实验模态分析是建立在数字信号测量基础之上的,所以第二章讨论与实验模态分析有关的数字信号处理方面的内容。第三章阐述从实测得到的输入-输出数据导出模态参数(共振频率、阻尼系数、模态振型向量及模态参预因子)所采用的各种方法。这些参数经验证正确(第四章)后,便可用以对现有结构或处于设计阶段的产品动力学特性加以改进。为达此目标,第五章给出的灵敏度分析、系统动态耦合、结构修改等,都是很有用的工具。这次新版后的第六章讨论两方面的课题:有限元模型修正和预试验分析,由此将有限元分析和实验振动分析联系起来。

下篇旨在讨论模态分析的实际运作:进行模态分析实验时,哪些方面要重点考虑?首先概括介绍必要的仪器设备:激振器、力传感器、位移传感器、数据采集系统、滤波器及分析系统。接着提出一些有关试验设置和测量装置校准的指导性原则。第三章讨论几种可能的激励信号及其优缺点。第四章说明在实际中如何按步骤进行参数估计,怎样使用上篇第三章所讨论的那些理论工具。

根据本课程学生及本书其他读者的意见,这次再版做了一些改进。第六章是重新写过的,不仅包括模型修正,还包括预试验分析方面的某些内容。

# 致 谢

这样一本书决不是一个人的著作。虽然第一作者将本书的几乎全部内容付诸文稿(或输入计算机),但没有其他作者和许多人的直接或间接帮助,使之成书是不可能的。

首先感谢产品工程、机械设计与自动化分校的结构动力学教研组。在前任教授雷蒙德·斯诺思(Raymond Snoeys)和现任教授波尔·萨斯(Paul Sas)的指导下,该小组的所有成员,虽然他们经常变动(而且时有成功),但都是本书的动力源泉。书中许多内容是以该“动态”小组现在或过去的成员撰写的文章、报告或博士论文为基础的,作者在适当的章节将明确提到他们。1976年以来,远在作者涉足模态分析以前很久,动力学小组每学年都开设一期模态分析课程,后来扩大成模态分析国际研讨会。这些课程的准备、关于课程内容的不间断的讨论、其他大学人员的参预、与工业界工程师们的交流等等,使作者们的模态分析知识不断扩展与深化。

第一作者对他的合作者深表感谢。斯蒂芬·拉门兹(Stefan Lammens)为 A.6 章的编写注入了灵感,而且与他的多次讨论使本书整体上得以改进。多谢波尔·萨斯教授的启发、垂询、批评、建议、修改意见及耐心,这对完成本书是不可缺少的。波尔·萨斯教授是多么想亲自撰写这本书啊!只可惜他没有时间。

另一个动力来自美国辛辛那提大学的结构动力学教研组。卢温大学与辛辛那提大学的合作始于30年前,那时雷蒙德·斯诺思和大卫·布朗(Dave Brown)相识并成了朋友。这两所大学的许多研究人员经常互访或一道工作。辛辛那提大学教研组每年对卢温大学基本课程的意见,我们之间就课程内容的讨论以及辛辛那提大学的教材内容,对本书都是极大的帮助。

第一作者还要感谢产品工程、机械设计与自动化分校的员工们,他非常称赞员工们给了他时间和自由撰写本书。各位作者对分校多年来为他们提供和谐而令人鼓舞的研究环境深表谢意。

1997年5月于卢温





# 目 录

## 上 篇 理 论

序言 .....	(1)
<b>A.1 章 解析模态分析和实验模态分析 .....</b>	<b>(3)</b>
A.1.0 引言 .....	(3)
A.1.1 单自由度系统 .....	(4)
A.1.1.1 系统方程 传递函数 .....	(4)
A.1.1.2 系统极点 固有频率 阻尼比 .....	(5)
A.1.1.3 留数 .....	(6)
A.1.1.4 传递函数图 .....	(6)
A.1.1.5 频率响应函数(FRF) 脉冲响应函数 .....	(6)
A.1.1.6 质量、阻尼和刚度变化对 FRF 的影响 .....	(8)
A.1.2 多自由度系统 .....	(9)
A.1.2.1 系统方程 传递函数 .....	(9)
A.1.2.2 系统极点 固有频率 阻尼因子 .....	(11)
A.1.2.3 模态向量 留数 .....	(11)
A.1.2.4 模态参预因子 .....	(13)
A.1.2.5 频响函数矩阵 脉冲响应函数矩阵 .....	(13)
A.1.2.6 无阻尼系统与比例阻尼系统 .....	(16)
A.1.2.7 正交性 模态坐标 .....	(17)
A.1.2.8 模态向量比例换算 .....	(20)
A.1.2.9 解析法和实验法 .....	(21)
A.1.3 单自由度系统举例 .....	(22)
A.1.4 多自由度系统举例 .....	(23)
A.1.4.1 一般粘性阻尼 .....	(23)
A.1.4.2 比例粘性阻尼 .....	(25)
A.1.4.3 无阻尼 .....	(25)
A.1.5 结论 .....	(26)
<b>A.2 章 (数字)信号处理:基本理论 .....</b>	<b>(27)</b>
A.2.0 引言 .....	(27)
A.2.1 各类信号的傅立叶变换 .....	(28)
A.2.1.1 周期信号 .....	(28)
A.2.1.2 非周期函数 .....	(29)
A.2.1.3 采样时间函数 .....	(30)
A.2.1.4 采样时间信号及其变换 .....	(30)
A.2.2 一些分析参数 .....	(31)
A.2.3 性质与关系式 .....	(32)
A.2.3.1 叠加性质 .....	(33)

A.2.3.2	比例相乘性质	(33)
A.2.3.3	时间变换性质	(33)
A.2.3.4	时移性质	(33)
A.2.3.5	频移性质和细化变换	(33)
A.2.3.6	能量关系	(34)
A.2.3.7	积分与微分性质	(35)
A.2.3.8	卷积性质	(35)
A.2.4	误差与窗	(35)
A.2.4.1	迭混	(35)
A.2.4.2	泄漏	(37)
A.2.4.3	窗	(40)
A.2.5	其他变换	(44)
A.2.5.1	拉普拉斯变换	(44)
A.2.5.2	Z变换	(45)
A.2.6	时间函数、频率函数及其应用	(45)
A.2.6.1	自功率谱与自相关函数	(45)
A.2.6.2	互功率谱与互相关函数	(46)
A.2.6.3	平均	(46)
A.2.6.4	频响函数与相干函数	(48)
A.2.7	结论	(52)
<b>A.3章</b>	<b>模态参数估计</b>	(53)
A.3.0	引言	(53)
A.3.1	模态模型的基本方程	(53)
A.3.2	基本概念	(55)
A.3.2.1	单自由度法与多自由度法	(55)
A.3.2.2	局部参数识别与整体参数识别	(55)
A.3.2.3	单输入与多输入	(56)
A.3.2.4	模态模型与直接模型	(56)
A.3.2.5	低阶完整模型与高阶不完整模型	(57)
A.3.2.6	实模态振型与复模态振型	(57)
A.3.2.7	时域估计与频域估计	(58)
A.3.2.8	分类	(58)
A.3.3	单自由度法	(59)
A.3.3.1	峰值检测	(59)
A.3.3.2	模态检测	(59)
A.3.3.3	圆拟合	(60)
A.3.4	多自由度时域法	(61)
A.3.4.1	Ibrahim时域法(ITD)	(61)
A.3.4.2	多参考点最小二乘复指数法(LSCE)	(62)
A.3.4.3	特征系统实现算法(ERA)	(63)
A.3.4.4	时域直接参数识别(TDPI)	(64)
A.3.5	多自由度频域法	(65)
A.3.5.1	(非线性)最小二乘频域法(LSFD)	(65)

A.3.5.2	结构系统参数识别(ISSPA)	(66)
A.3.5.3	正交多项式法(OP)	(67)
A.3.5.4	频域直接参数识别(FDPI)	(68)
A.3.5.5	复模态指示函数(CMIF)	(70)
A.3.6	结论	(71)
<b>A.4章</b>	<b>模型验证</b>	(73)
A.4.0	引言	(73)
A.4.1	模态比例因子(MSF)和模态判定准则(MAC)	(73)
A.4.2	模态参预	(75)
A.4.3	互易性	(76)
A.4.4	模态复杂性	(77)
A.4.5	模态相位共线性和平均相位偏移	(77)
A.4.6	模态置信因子	(78)
A.4.7	频响函数综合	(79)
A.4.8	结论	(79)
<b>A.5章</b>	<b>模态参数的应用</b>	(80)
A.5.0	引言	(80)
A.5.1	强迫响应分析	(81)
A.5.1.1	引言	(81)
A.5.1.2	理论	(81)
A.5.1.3	应用应用	(82)
A.5.2	灵敏度分析	(82)
A.5.2.1	引言	(82)
A.5.2.2	理论	(82)
A.5.2.3	应用领域	(85)
A.5.3	结构动力学修改与集成	(86)
A.5.3.1	引言	(86)
A.5.3.2	方法	(86)
A.5.3.3	应用方面	(99)
A.5.4	结论	(99)
<b>A.6章</b>	<b>数值模型与实验模型相结合</b>	(100)
A.6.0	引言	(100)
A.6.1	模型修正	(100)
A.6.1.1	引言和一般思路	(100)
A.6.1.2	模型匹配	(102)
A.6.1.3	相关技术	(106)
A.6.1.4	修正参数的选择	(110)
A.6.1.5	矫正方法	(113)
A.6.1.6	小结	(118)
A.6.2	预试验分析	(118)
A.6.2.1	引言	(118)
A.6.2.2	频率范围	(119)

A.6.2.3 响应点的选择 .....	(119)
A.6.2.4 激励点的选择 .....	(121)
A.6.2.5 支承点的选择 .....	(122)
A.6.2.6 小结 .....	(123)
A.6.3 结论 .....	(123)

## 下 篇 试 验

序言 .....	(125)
<b>B.1 章 试验设备</b> .....	(127)
B.1.0 引言 .....	(127)
B.1.1 激励系统 .....	(127)
B.1.1.0 引言 .....	(127)
B.1.1.1 固定式激励系统 .....	(128)
B.1.1.2 非固定式激励系统 .....	(130)
B.1.2 力和运动传感器 .....	(131)
B.1.2.0 引言 .....	(131)
B.1.2.1 力传感器 .....	(132)
B.1.2.2 运动传感器 .....	(133)
B.1.2.3 小结与评述 .....	(138)
B.1.3 测量与分析系统 .....	(138)
B.1.3.0 引言 .....	(138)
B.1.3.1 PC 机系统 .....	(139)
B.1.3.2 FFT 分析仪加 PC 机或工作站 .....	(139)
B.1.3.3 数采前端加工作站 .....	(140)
B.1.3.4 数据采集模块的基本构件 .....	(140)
B.1.3.5 评述 .....	(142)
B.1.4 结论与述评 .....	(142)
<b>B.2 章 校准与设置</b> .....	(143)
B.2.0 引言 .....	(143)
B.2.1 校准 .....	(143)
B.2.1.0 引言 .....	(143)
B.2.1.1 高精度校准法 .....	(143)
B.2.1.2 重力校准法 .....	(144)
B.2.1.3 冲击校准、背对背校准和绝对校准 .....	(144)
B.2.1.4 比值校准 .....	(145)
B.2.1.5 小结 .....	(146)
B.2.2 试验设置 .....	(146)
B.2.2.0 引言 .....	(146)
B.2.2.1 悬挂 边界条件 .....	(146)
B.2.2.2 激励 .....	(148)
B.2.2.3 响应点 .....	(149)

B.2.2.4	设备 传感器 .....	(150)
B.2.2.5	试验程序的确定 .....	(150)
B.2.2.6	小结 .....	(151)
B.2.3	FRF 测量 设置验证 .....	(151)
B.2.3.0	引言 .....	(151)
B.2.3.1	设置验证 .....	(151)
B.2.3.2	FRF 测量 .....	(155)
B.2.3.3	小结 .....	(156)
B.2.4	结论 .....	(156)
<b>B.3 章</b>	<b>激励考虑 .....</b>	<b>(157)</b>
B.3.0	引言 .....	(157)
B.3.1	激励信号概述 .....	(158)
B.3.1.1	分类 .....	(158)
B.3.1.2	评估依据 .....	(158)
B.3.1.3	激励信号类型 .....	(159)
B.3.1.4	小结 .....	(168)
B.3.2	激励信号与 FRF 测量 .....	(168)
B.3.2.0	引言 .....	(168)
B.3.2.1	“线性”试验例 .....	(169)
B.3.2.2	非线性动态特性 .....	(178)
B.3.3	总结与结论 .....	(180)
<b>B.4 章</b>	<b>实践中的模态参数估计 .....</b>	<b>(181)</b>
B.4.0	引言 .....	(181)
B.4.1	模态参数估计 .....	(181)
B.4.1.0	引言 .....	(181)
B.4.1.1	方法选择 .....	(181)
B.4.1.2	测量选择 .....	(183)
B.4.1.3	频带选择和/或时段选择 .....	(183)
B.4.1.4	极点数 .....	(184)
B.4.1.5	极点估计 .....	(187)
B.4.1.6	模态向量估计 .....	(189)
B.4.1.7	小结 .....	(190)
B.4.2	模态模型验证 .....	(190)
B.4.2.0	引言 .....	(190)
B.4.2.1	频响函数综合 .....	(190)
B.4.2.2	模态置信准则 .....	(191)
B.4.2.3	模态参预 .....	(193)
B.4.2.4	模态复杂性 模态相位共线性 .....	(194)
B.4.2.5	小结 .....	(195)
B.4.3	结论 .....	(195)
<b>附录</b>		
AA.2.1	几个时间函数和频率函数的应用 .....	(197)

AA.2.1.1	自功率谱与自相关函数	(197)
AA.2.1.2	互功率谱与互相关函数	(203)
AA.2.1.3	倒谱分析	(205)
AA.2.1.4	结论	(207)
AA.3.1	最小二乘复指数法举例	(207)
AA.6.1	模型修正;模型匹配、相关技术和模型修正	(208)
AA.6.1.0	引言	(208)
AA.6.1.1	模型匹配	(211)
AA.6.1.2	相关技术	(212)
AA.6.1.3	修正参数的选择	(217)
AA.6.1.4	修正方法	(219)
BB.1	LMS CADA - X 试验模态分析系统	(222)
BB.2	KISTLER 振动测量设备简介	(234)
BB.3	东华测试技术开发公司产品简介	(238)
<b>参考文献</b>		(241)
<b>符号与说明</b>		(250)

# 上篇 理 论

## 序 言

实验模态分析是若干工程学科的综合,因此要求较为广泛的理论基础。本书上篇的目的是将所有这些理论问题加以总结,重点集中在与实验模态分析直接有关的理论方面。

实验模态分析包括五个步骤。首先是建立试验“装置”,即固定试件、安装传感器、连接数据采集系统、校准测量系统等等。其次是进行数据采集并常常要估计频响函数。步骤三叫做系统识别,即根据测量出来的输入输出数据确定系统的振动特性。步骤四是对所获得的识别结果进行验证。所有这四个步骤是通往步骤五的必由之路;步骤五是应用系统的而不是零散的方法,根据得到的数据对系统加以改进。上述步骤以下列理论为基础:

(1)第一章从基本振动理论推演出模态分析理论,这是实验模态分析与解析模态分析总的理论基础。单自由度系统理论定义了一些概念,如系统极点、共振频率、阻尼比、留数等。将这些概念推广到多自由度系统便产生诸如模态振型、模态参预因子、模态质量、模态比例换算等概念。这些概念适用于一般粘性阻尼、比例阻尼和无阻尼的情形。

(2)第二章讨论有关数据采集的理论,即数字信号处理方法与频响函数的估计方法。作为数据在频域和时域之间互相转换的一种方法,我们先来讨论傅立叶变换及其性质。在数字信号处理过程中,最重要的误差来源是迭混和泄漏现象。最后说明如何从自功率谱与互功率谱来估计频响函数。

(3)第三章简要讨论几种参数识别理论。这些方法用以估计模态参数、系统极点(共振频率及阻尼系数)、模态振型及模态参预因子。模态参数描述的是系统的振动特性。本章指出了单自由度系统识别方法与多自由度系统识别方法之间的区别,单输入法与多输入法的区别,模态参数的局部估计与整体估计的区别,时域法与频域法的区别等等。

(4)第四章介绍一些数学工具,以便对获得的系统模态模型予以评估和验证。这些方法可以帮助我们判断下一步的结果是否靠得住。

(5)第五章说明怎样用测得的模态参数达到预测目的,所用方法有灵敏度分析、结构动力耦合、系统修改预测。所有这些方法的最终目标是改善现有结构(不论是在用结构、样机,还是设计阶段的结构)的动力学特性。

(6)第六章介绍如何将有限元建模与实验模态分析结合起来:要么改进有限元模型,要么优化试验设置。

下篇将讨论实验模态分析更为实际的方面:仪器设备、校准、试验设置、激励、实际的参数估计、误差的检测、预防和减小等。





# A.1 章 解析模态分析和实验模态分析

## A.1.0 引言

为了更好地理解实验模态分析的各种实用性,我们需要透彻理解其基本理论。本章讨论解析模态分析与实验模态分析,目的在于为工程师们研究结构动力学特性提供一个坚实的理论基础。研究一个系统的振动特性,基本上有两种途径。

第一种途径是解析式的,即先要知道结构的几何形状、边界条件和材料特性,把结构的质量分布、刚度分布和阻尼分布分别用质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵表示出来,这样便有了足够多的信息来确定系统的模态参数(固有频率、阻尼系数、模态振型)。理论证明,这些模态参数可以完整地描述系统的动力学特性。

第二种途径是从测量结构(样机)上某些点的动态输入力和输出响应开始,并且一般还要将测量得到的数据转换成频响函数,即作为频率函数的输出输入之比。理论将证明,这些频响函数可以用模态参数表示,因此实验模态分析的第二步就是从测得的频响函数来估计这些模态参数。

本章一个特别用意是说明上述两种研究途径之间的关系。首先讨论单自由度系统,主要是介绍系统极点、固有频率、阻尼比、留数等这样一些概念。然后将这一基本概念推演扩展到多自由度系统,并引出更多的概念,如模态向量、模态坐标、正交性、模态质量、模态刚度、模态阻尼及模态向量比例因子等等。

阐述理论之前,我们先解释自由度(DOF)概念及模态分析的基本假设。

一个刚体质量的自由度数是确定它在空间的位置所需要的最少坐标数目。一个空间刚体共有六个自由度:三个平动自由度( $x, y, z$ )确定质量中心的位置,三个转动自由度( $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ )确定刚体的方位。因为任何连续结构都可以认为是无限多个微元刚体质量的组合,所以这样的结构都有无穷多个自由度。但是,所有这些结构又可以近似看做是有限个小刚体质量(一组我们所关心的实际质量点,每个点有六个自由度)的组合,因此它们又可以认为具有有限个自由度数  $N$ ,该自由度数决定了解析质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵的维数,也决定了理论上存在的固有频率数和模态振型阶数。然而能够测到的自由度数还要受到某些实际条件的限制,如转动自由度的测量极其困难,有限的频率范围也限制了可检测到的模态数目。因此,若解析模型有  $N$  个自由度,而实验只能提供关于  $N_i$  个输入自由度、 $N_o$  个输出自由度以及  $N_m$  个可以检测到的振型的信息。

模态分析理论的基本假设是:

**线性假设:**结构的动态特性是线性的,就是说任何输入组合引起的输出等于各自输出的组合,其动力学特性可以用一组线性二阶微分方程来描述。每次进行模态分析试验时,应当首先检查结构的线性动态特性(B.2.3.1节)。

**时不变性假设:**结构的动态特性不随时间而变化,因而微分方程的系数是与时间无关的常数。由于不得不安装在结构上的运动传感器的附加质量,可能出现典型的时不变性问题(见