

普通高等教育航天类规划教材

结构模态试验分析

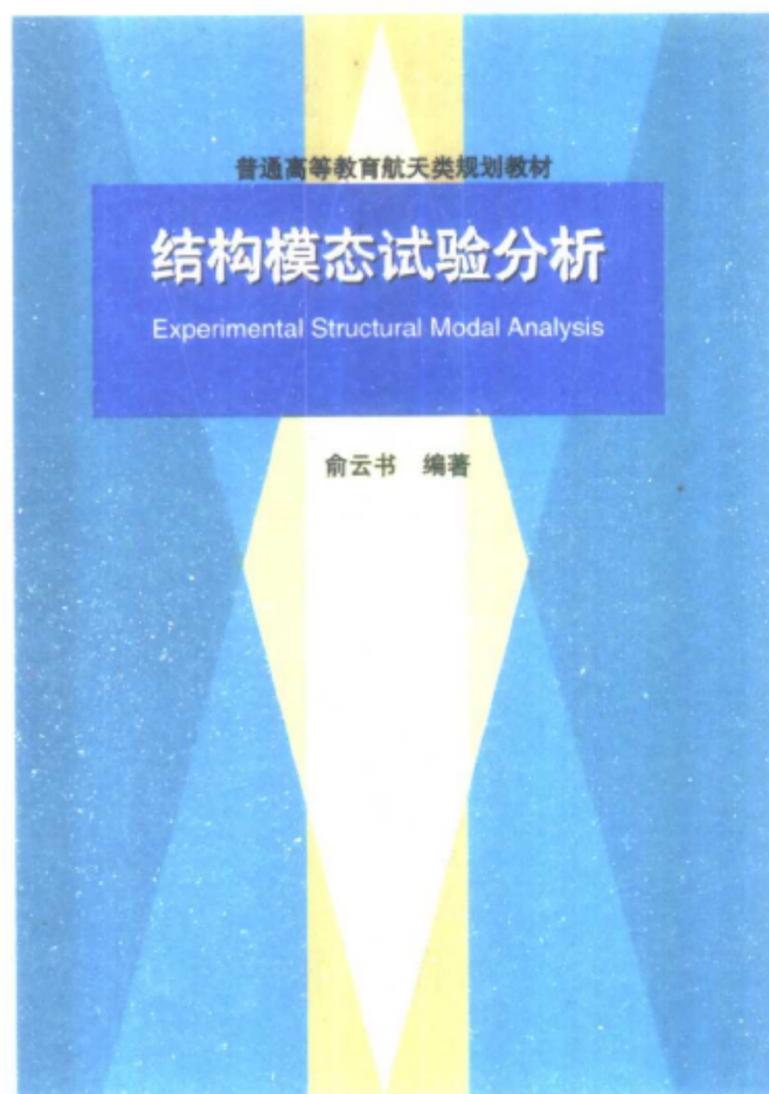
Experimental Structural Modal Analysis

俞云书 编著

宇航出版社

13.

责任编辑：李明观



ISBN 7-80144-363-2



9 787801 443632 >

定价：28.00 元

结构模态试验分析

俞云书 编著

宇航出版社

内 容 简 介

本书按系统辨识的观点,介绍结构模态特性试验分析方法。全书共分10章,分别论述系统辨识的基本概念、非时变线性结构动态特性数学模型的建立、模态试验技术、结构频响函数估计、模态参数辨识(频域法、时域法和经典的多点稳态正弦激励法)、试验分析结果与计算分析结果的相关分析以及结构动态特性的应用等。着重计算机辅助试验、试验与分析一体化和工程应用。

本书可作为航天、航空、机械和土木工程等行业从事结构动力学试验、分析和设计的工程技术人员参考书,也可作为相关专业研究生的补充教材。

Experimental Structural Modal Analysis

This book is devoted to experimental modal analysis of structure from viewpoint of system identification. It covers the basic concepts of system identification, modelling of structural dynamics, modal testing techniques, estimation of frequency response functions, frequency domain and time domain modal parameters estimation and normal mode approach, correlation analysis of experimental and analytical results, and their applications. The book places emphasis on computer aided testing, integration of analysis and testing, and engineering applications. The book intended to serve as a practical reference book for engineer in structural design, and analysis and testing of structural dynamics engaged in aerospace, aeronautical, mechanical and civil engineering etc., and also as complementary textbook for graduate students in related disciplines.

图书在版编目(CIP)数据

结构模态试验分析/俞云书编著.-北京:宇航出版社,2000.7

ISBN 7-80144-363-2

I.结… II.俞… III.人造卫星-结构分析 IV.V474

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第61632号

宇航出版社出版发行

北京市和平里滨河路1号(100013)

发行部地址:北京阜成路8号(100830)

零售书店(北京宇航文苑)地址:北京海淀大街31号(100080)

北京科技印刷厂印刷

新华书店经销

2000年7月第1版 2000年7月第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:18.25 字数:456千字

印数:1—1000册

定价:28.00元

前 言

结构动态特性(模态特性)直接关系到产品研制的质量(性能、寿命、可靠性、安全性和经济性),成为各个产业部门共同关注的问题。80年代以来,结构设计方法已逐步从静态设计向动态设计过渡,通过结构数学模型的建立,进行仿真、预示、控制和优化设计。产品的高性能、轻型化和研制的高效率、低成本的发展趋势,使结构动态特性分析显得更为重要。由于实际结构相当复杂,要建立一个与特定的实际结构动态特性相一致的数学模型(如有限元模型),要求有相当强的力学分析能力和建模经验,建模的假设前提与实际结构的一致性、离散化和算法的精确度以及输入数据(结构的几何尺寸、材料物理特性参数和界面约束条件等)的确切程度都会影响用数学模型模拟实际结构固有动态特性的准确度。因而,有必要用模态试验来验证所建立的数学模型的模拟质量,估计模型的误差和辨识产生误差的原因和部位,进而修改数学模型。结合数学模型的建立、产品的性能评估以及用户对产品动态特性参数的需求,特别是新型结构构形、新材料、新设计概念与方法的引入,使模态试验也和产品鉴定试验和验收试验一样,成为产品研制性试验中一项必不可少的试验项目。

在消化和吸收国外先进动态设计方法的基础上,国内不少产业部门、研究所和高等院校进行了大量的模态试验分析方法研究,并在工程应用方面取得一定效益。有不少部门还制定了本部门产品结构模态试验和分析的行业标准,使承担产品研制任务的设计、制造、分析和试验人员在模态试验目的、试验方案制定和实施上有一个统一的依据和基准,并使所获得结果具有可对比性。

本书试图按系统辨识的观点,根据所经历的工程应用经验,介绍在工程上已实际采用的结构模态特性试验分析技术。全书共分十章。第一章为概论,第二章介绍系统辨识的基本概念,总体构成结构模态特性试验分析方法的基本思路和内容。第三章介绍线性、非时变结构动态特性数学模型的建立,导出结构固有动态特性参数(模态参数)与激励输入和响应输出的关系。第四章介绍结构模态试验技术,包括试验设计与激励、测量和数据采集处理技术,获取激励输入和结构响应输出的时域或频域数据,这些数据作为结构模态特性的载体可以用来辨识得到结构固有动态特性参数。第五章至第八章分别介绍结构频响函数估计、模态参数辨识的频域算法和时域算法以及经典的多点稳态正弦激励法。第九章为试验分析结果与计算分析结果的相关分析,模态试验分析结果的有效性检验和结构动力学模型修改。第十章列举几种典型的模态试验分析结果的应用场合。全面地了解各章的概念和内容,将有助于从事结构动态分析的工程技术人员根据所研制产品或结构的动态特性预分析结果、所具备的试验设备和工程实践的经验,合理进行剪裁和试验设计,通过模态试验分析,获取所试验产品或结构固有模态特性的最佳估计。

编著者感谢航天工业总公司北京卫星环境工程研究所给予的工程实践机会和指导,感谢该所结构动力学研究室的同事们给予的帮助和支持,感谢中国空间技术研究院的大力支持,致

使本书能顺利出版。感谢李明观编审对本书提出的宝贵意见与建议。

在四次“模态分析”讲习班讲稿和力学环境工程“模态试验分析”专业课教学的基础上,本书的内容和内容编排几经修改、调整,试图从工程应用角度加以完善。但由于编著者本人水平有限,书中难免存在错误和不当之处,敬请读者指正。

编著者

1997.1 于北京

目 录

前言	I
第一章 概论	1
1.1 结构动态分析	1
1.2 系统辨识	3
1.3 结构动态特性试验分析	3
第二章 系统辨识的基本概念	6
2.1 基本概念	6
2.1.1 系统辨识的定义	6
2.1.2 系统辨识的基本原理	6
2.1.3 系统辨识问题的分类	7
2.1.4 系统辨识的目的	8
2.2 数学模型的建立	8
2.3 试验设计和试验	10
2.4 参数辨识的准则和算法	11
2.5 模型有效性检验	13
第三章 结构动态特性模型的建立	16
3.1 非时变、线性、多自由度结构的运动方程	16
3.2 多自由度系统的固有振动	17
3.2.1 无阻尼系统的固有振动	17
3.2.2 有阻尼系统的固有振动	22
3.3 初始条件扰动下多自由度系统的响应——自由振动响应	31
3.3.1 比例阻尼情况	31
3.3.2 非比例阻尼情况	32
3.4 多自由度系统的传递函数和单位脉冲响应函数	33
3.4.1 定义	33
3.4.2 具有粘性阻尼的多自由度系统位移频响函数的模态展开式	36
3.4.3 具有结构阻尼的多自由度系统位移频响函数的模态展开式	39
3.5 单阶纯模态激励	40
3.6 时间离散域上描述的线性系统动态模型	42
3.6.1 系统模型的导出	42
3.6.2 自回归滑动平均模型(ARMA 模型)	45
3.7 讨论	47
3.7.1 模型的形式	47
3.7.2 分布参数模型	48
3.7.3 非自伴随系统的动态特性	48

3.7.4	统计能量模型	49
3.7.5	非线性影响	50
3.7.6	应变模态	51
3.7.7	基础激励下的频响函数	52
第四章	结构模态试验技术	55
4.1	试验件和试验件支承	55
4.1.1	试验件	55
4.1.2	试验件支承	55
4.2	试验前的预分析	57
4.3	模态试验系统的硬件配置	59
4.4	模态试验方法的简要综述	60
4.5	激励和激励分系统	61
4.5.1	模态试验的激励信号	61
4.5.2	激励力谱的选择	68
4.5.3	激励分系统	69
4.5.4	激振器的安装	72
4.5.5	激励点的选择	72
4.6	测量量和测量分系统	74
4.6.1	测量量	74
4.6.2	响应测点位置的选择	74
4.6.3	测量分系统	75
4.7	数据采集、记录和处理分系统	77
4.7.1	数据记录方式	77
4.7.2	数据采集处理系统的基本结构	78
4.7.3	常用的数据采集处理系统	79
4.8	测量系统校准	79
4.9	试验设计	82
4.10	试验程序	83
4.11	模态试验技术的参考标准	84
第五章	结构频响函数估计	87
5.1	频响函数估计的测量模型	87
5.2	平稳随机激励情况下的频响函数估计	88
5.2.1	单输入单输出(SISO)结构系统	88
5.2.2	多输入多输出(MIMO)结构系统	93
5.3	正弦激励情况下的频响函数估计	97
5.3.1	单点步进正弦激励输入	97
5.3.2	多点相位相干步进正弦激励	100
5.4	瞬态冲击激励情况下的频响函数估计	101
5.5	谱估计	101

5.5.1	离散傅氏变换(DFT)	101
5.5.2	随机数据的谱估计	102
5.5.3	周期数据的谱估计	107
5.6	模拟数据数字采集处理参数的选择	110
5.7	频响函数估计的误差分析	118
5.8	结构的非线性影响检测	119
第六章	结构模态参数辨识的频域法	122
6.1	辨识算法的要求	122
6.2	频域辨识算法分类	122
6.3	结构传递函数模型的选择和简化	123
6.4	模态参数估计的统计准则	125
6.5	单自由度模型的模态参数估计	126
6.5.1	忽略其它模态的残余影响	126
6.5.2	计及其它模态的残余影响	132
6.6	多自由度模型的模态参数估计	134
6.6.1	局部迭代法(Goyder 法)	134
6.6.2	最优化方法	137
6.6.3	有理分式法	141
6.6.4	由增强的频响函数辨识 Ω_r 和 ζ_r	146
6.6.5	Klosterman 迭代法	148
6.7	多输入多输出系统模态参数辨识	150
6.7.1	频域上的直接参数辨识算法(SFD 法)	150
6.7.2	复模态指示函数法(CMIF 法)	153
6.7.3	其它辨识算法要点	156
6.8	振型的动画显示	157
第七章	结构模态参数辨识的时域法	159
7.1	基于自由衰减振动模型的辨识算法	159
7.1.1	结构在时域上的自由响应模型	159
7.1.2	复指数自由衰减振动模型参数的估计	161
7.1.3	Ibrahim 时域辨识算法(ITD 法)	162
7.1.4	复指数算法	169
7.2	本征系统实现算法(ERA 法)	177
7.2.1	基本概念	178
7.2.2	数学模型和辨识问题的建立	178
7.2.3	单位脉冲响应函数矩阵和广义 Hankel 矩阵	178
7.2.4	本征系统实现算法的推演与实施	179
7.3	离散时间序列分析	184
7.3.1	基本概念	184
7.3.2	ARMA 模型的主要特征	184

7.3.3	建模	186
7.3.4	系统固有频率和阻尼比估计	190
7.4	非线性结构的参数辨识框架	190
第八章	多点稳态正弦激励法辨识结构模态参数	192
8.1	基本方法	192
8.2	结构频响函数矩阵测定	193
8.3	模态检测与激励力矢量估计	193
8.3.1	Asher 法	194
8.3.2	多变量模态指示函数(MMIF)法	196
8.3.3	逆多变量模态指示函数(Inv MMIF)法	196
8.3.4	讨论	196
8.4	模态调谐	197
8.4.1	调谐程序	197
8.4.2	正交分量法调力	197
8.5	模态调谐的纯度指标	198
8.5.1	模态纯度的数字指标	198
8.5.2	模态调谐的可视图像	199
8.6	复功率法估计结构的模态参数	199
8.6.1	复功率函数的定义	199
8.6.2	模态参数辨识	201
第九章	试验分析结果与计算分析结果的相关	204
9.1	试验分析所得模态参数估计的有效性评估	204
9.1.1	影响模态参数估计有效性的因素	204
9.1.2	模态参数估计的有效性评估	205
9.2	试验分析结果与计算分析结果的相关分析	206
9.2.1	相关分析前的预处理	206
9.2.2	试验分析结果与模型预示结果的相关分析	209
9.3	一体化的结构动态分析方法	213
9.4	结构动力学模型修改	213
9.4.1	模型修改的宗旨	213
9.4.2	模型修改前的预处理	213
9.4.3	模型修改方法	216
第十章	应用	223
10.1	响应预示	223
10.2	载荷辨识(载荷重构)	225
10.3	子结构综合	226
10.3.1	组合结构的分析	226
10.3.2	结合界面的协调条件	226
10.3.3	子结构频响函数综合法	227

10.3.4	子结构动刚度综合法	228
10.4	结构设计修改	229
10.4.1	结构动态设计中的正反问题	229
10.4.2	结构设计修改仿真的一般方法	229
10.4.3	结构修改的动态特性灵敏度分析	231
10.4.4	结构小修改的重分析	235
10.4.5	结构局部修改的重分析	236
10.4.6	优化设计	238
10.5	振动控制	239
10.5.1	有源振动控制	239
10.5.2	柔性结构独立模态空间控制	240
附录 A	最小二乘估计	245
附录 B	多自由度结构系统传递函数的模态展开式	248
附录 C	线性多自由度系统传递特性分析	252
附录 D	约束支承结构基础激励的有效质量	267
附录 E	Hilbert 变换	270
附录 F	奇异值分解法	273
附录 G	随机减量法中的特征函数	277
附录 H	振型动画显示的几何说明	279

第一章 概论

1.1 结构动态分析

机电产品研制（或结构工程建设）的过程一般可分为设计、制造（或建造）和使用三个阶段，而设计的流程又可分为方案论证、初步设计、技术设计和设计验证四个子阶段。在整个产品的研制（或工程建设）过程中，会遇到各种技术问题，其中有不少问题与结构动力学有关，要依据结构动态分析的结果去解决。例如：结构动态响应预示、动载荷分析（包括载荷辨识）、控制系统设计和稳定性分析、结构设计更改的效果分析和优化设计、振动与噪声控制、产品（或工程）质量控制（缺陷与损伤预示）、使用寿命以及设计安全储备等。特别是当今产品研制的高性能、高速化和轻型化发展趋势以及高效率 and 低成本的研制要求，结构动态分析显得更为重要，以确保最终产品（或工程结构）在满足设计任务书规定的使用品质前提下产品（或工程结构）的质量（性能、寿命、可靠性、安全性和经济性）。结构的动态特性已成为产品研制或工程质量评估的依据之一，也是必须向用户提供的关键技术信息。同样，现有机电产品（或工程结构）的性能评估和改进、振动噪声、系统不稳定性或者故障诊断等问题的解决，都要求对结构进行动态分析，找出其中的力学原因和关键因素，从而决策解决问题的技术途径。

70年代以来，由于计算机技术的飞速发展，带动了诸如结构有限元分析方法、数字信号处理、系统辨识和测试技术等与结构动态分析相关的学科的发展，使结构动态分析和动态设计的广泛应用成为可能，从费用效益上为工程技术人员所接受。越来越多的工程技术部门，按照各自的分析目的和要求，对所研制的产品或工程结构进行动态分析，用动态设计的概念和方法代替传统的静态设计方法。

如图 1-1 所示，结构动态分析主要涉及到：

- a. 外部激励输入（振动、冲击载荷或环境）；
- b. 结构固有的动态特性；
- c. 响应输出。

通常，结构动态分析就是计算在给定的外部激励输入下结构的响应输出，即响应预示问题；而在新产品研制时，又需要根据类同结构的数学模型和实测的结构响应数据，推测外部激励输入信息，为新产品的结构设计提供确切的输入环境，即是载荷辨识问题。上述两类问题的解决都需要预先准确地构成实际结构固有动态特性的数学模型。

实际结构数学模型的建立一般有下列几种方法：

- a. 解析法（如有限元模型）；
- b. 试验（如实验模态模型或响应模型）；
- c. 解析与试验组合的分析方法。

当今，已有不少通用的有限元分析程序（如 NASTRAN、ASKA、ADINA、ANSYS 和 SAP 等）和专用程序。用这些应用程序，可以根据设计图纸去建立结构的数学模型（有限元模型），

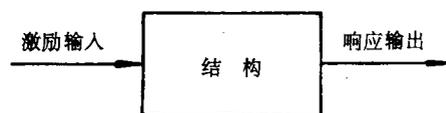


图 1-1 结构动态分析

进行结构固有动态特性分析、响应预示和设计修改。但要建立一个与特定的实际结构特性相一致的有限元模型，仍要求用户有相当高的力学分析能力和丰富的建模经验。建模的假设前提与实际结构之间的符合性、离散化和算法的精确度以及参数（如结构几何形状、材料性质、边界条件和外部激励载荷等）的精确程度，都会影响用有限元方法近似模拟实际结构动态特性的准确度。不同的单元选择、不同的网格划分，有可能得到不同的结果。至今还没有一个有限元程序具有模型误差估计和自适应误差控制的功能。因而，如果说结构数学模型的精确度关系到产品研制的总体性能的话，那就有必要用模态试验（或称结构动态特性试验）来验证所建立的数学模型，估计模型的误差，辨识产生误差的原因和部位，改进用数学模型模拟的质量。

通过模态试验，可从所量测的激励输入和响应输出数据中去辨识所试验结构的数学模型和描述它的动态特性参数（模态参数）。用这些模态试验结果去验证和修改数学模型，综合分析模型，校核动态计算分析结果的有效性，分析造成产品性能不合格的原因，检查结构中的薄弱部位以及鉴定结构总体设计的合理性。对一项关键产品（如航天产品）的研制，结构模态试验也将和产品鉴定试验、验收试验一样，成为一项必不可少的试验项目。如在 1982 年发布的美国军用标准“空间飞行器环境试验要求”（MIL-STD-1540B）和 1994 年发布的“运载器、顶级飞行器和航天器试验要求”（MIL-STD-1540C）已正式将模态试验列为研制性试验项目和鉴定试验项目之一。标准规定：必须对飞行器整体结构或子结构进行模态试验，获得 50Hz 以下频带内结构模态的固有频率、阻尼比和振型，用来建立和验证飞行器结构的数学模型。当然，模态试验要求计算分析支持，这样才能较“合理”地进行试验设计（其中包括试验方法选择、激励点位置和响应测点选择、激励信号的类型、频带和振级选择以及测量系统和数据采集、处理参数设置等），发现和解释试验中出现的问题，提高试验的质量。

实际机电产品（或工程结构）中的某些部件，往往由于形状相当复杂而难以用解析法去建

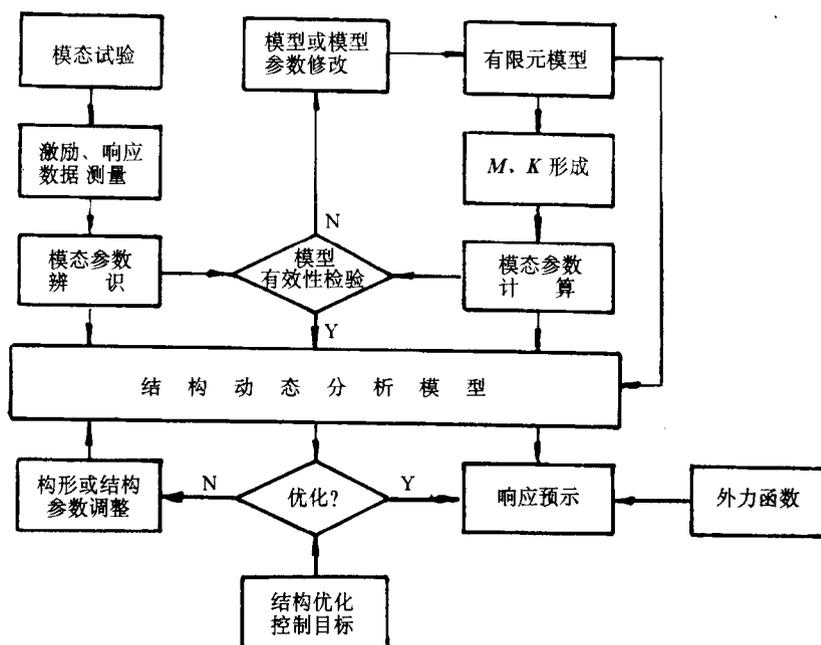


图 1-2 建模与应用

立适当的数学模型，只能采用解析与试验组合的分析方法，互为补充。对这种结构，通常有下列两种处理办法：一种是将这些部件的某些物理参数（如刚度系数）作为待定常数，这些参数需通过模态试验去调整和确定；另一种是用子结构综合法，将这些部件作为其中的一个子结构，通过模态试验确定它的动态特性，再将它与由计算分析确定动态特性的其它子结构，利用子结构之间的力与位移协调进行装配，综合成整体结构进行动态分析。后一种方法特别适用于各子结构分别由不同部门承制的结构系统，因为总体设计部门只能根据各部门提供的子结构动态特性进行综合，去得到结构整体的数学模型和动态特性参数。

通常，计算分析结果与模态试验结果两者往往不一致，需要根据已被证实有效的试验结果去修改和调整数学模型，使修改后的数学模型能模拟实际结构的主要动态特性。然后根据这个修改后的数学模型进行计算机仿真，预示结构在所受外部环境下的响应，控制结构的动态特性，优化在满足产品功能、性能要求的前题下的设计参数（图 1-2）。

在运行条件下的现存结构，要求从实测的响应和（或）输入激励数据中去获取产品结构动态特性信息，作为结构状态评估、故障诊断和性能改进的依据。

1.2 系统辨识

结构动态特性试验分析（模态分析）从学科上讲属于系统辨识问题。系统辨识问题的提出起源于自动控制，要求实时建立控制对象的动态数学模型。根据含有噪声干扰的输入输出数据去研究控制对象的运动规律，从中提取能表征对象因果关系的数学模型。由于用数学模型去量化和分析客观物理现象的特性是各门学科普遍采用的方法，加之计算机技术的发展，促进了系统辨识方法的发展和广泛应用。在可辨识性、模型类型选择、辨识准则、算法和模型有效性检验等问题上都取得一定深度的进展。这些研究成果成为结构动态特性试验分析中概念和方法的依据。

1.3 结构动态特性试验分析

结构动态特性试验分析技术是一门多学科的综合技术，它综合了结构动力学、控制理论、估计理论、最优化方法、信号处理、测试技术和计算机技术等门学科。70年代后期以来，这项试验分析技术取得了显著的进展。

在硬件上

开发了各种档次的以计算机为主体的多通道数据测量、采集和处理系统，形成结构动态特性试验分析的硬件平台。计算机主机可以是配有协处理器的个人计算机，也可以是工作站。模拟信号采集模块作为系统的前端机进行模数转换。通道数一般为 2~64 路，还可扩展到更多路。模数转换器的字长通常为 12 位，还可更高（如 16 位）。单通道的采样率可选，最高可达 10MHz。系统还配置有若干路数模转换器输出，作为模态试验激励信号源。系统各模块之间数据传输速度可达 3MW/s，确保所采集数据实时传递。系统配置有相当完善的外部设备。系统还能与中、大型计算机联网操作，以提高数据处理的容量、速度和精确度。随着硬件性能在结构体系、速度和容量上的更新换代，将进一步促进模态试验技术的发展和运用。

在软件上

从试验方法看，经典的多点稳态正弦激励法（相位共振法）和单点随机激励法（相位分离法之一）分别都已达到各自能力的极限。多输入的随机激励方法和多输入步进正弦激励方法已逐步用于实际结构的模态试验上。

从模态参数辨识算法看，为了能从可量测的输入和输出数据中提高模态分辨能力和参数估计精确度，开发了不少新的参数辨识算法，如多参考点的复指数算法、Ibrahim 时域辨识法、复模态指示函数法、多变量模态指示函数法以及频域和时域上的直接参数辨识算法等。

从软件的内容看，已逐步形成功能较为完善和使用方便、灵活的模态试验分析软件包。它主要包括下列功能：

- 1) 激励信号的发生、数据采集处理、模态参数辨识、模态数据列表与图形输出以及振型的动画显示。如 SDRC 的 I-DEAS-TEST、SMS 的 STAR、CCC 的 Istar 和 LMS 的 CADA-X 等实用程序；
- 2) 有限元分析。如 I-DEAS、ANSYS 和 Super-SAP 等程序；
- 3) 模态试验分析与计算分析结果的接口和相关分析；
- 4) 结构灵敏度分析和动态特性修改（如 FEMTOOLS）；
- 5) 结构动态响应预示；
- 6) 模态模型的子结构综合；
- 7) 系列产品结构动态特性数据库。

为了充分发挥硬件资源的能力，系统还配置有通用的数字信号处理软件和一些专用的应用软件（如转动机械的特征分析）。另外，系统还提供在算法语言支持下的科学计算软件环境（如 MATLAB），具有与应用软件包接口的用户自编程能力，先进的图形显示功能和实用有效的工具箱，大大扩展了系统的功能。系统具有友好的人机界面，软件中的各个模块都给用户提供了多种灵活的菜单式功能选择，适用于不同分析对象的特点，以获得较好的分析结果。从而，形成一套分析与试验一体化（集成）的计算机辅助试验系统。

结构动态特性试验分析是一项面向工程的应用性技术，为从事结构动力学分析与研究的产业部门、科研机构 and 高等院校所广泛关注。以模态分析为主题的国际学术年会主要有由美国 Union 学院与实验力学学会（SEM）共同举办的国际模态分析会议（IMAC）和由比利时 Katholieke 大学机械工程系主办的国际模态分析研讨会（IMAS），促进了国际学术交流和模态分析技术的发展。

国内外还相继出版了不少模态分析方面的专著和文集，从各种不同的观点介绍和论述模态试验分析的理论基础和技术。

参 考 文 献

- [1] 左鹤声 . 机械阻抗方法及其应用 . 北京 : 机械工业出版社 ,1987
- [2] 俞云书 . 结构模态特性的试验分析方法 . 环模技术 ,1987(4),1988(1~3)
- [3] 李德葆 . 振动模态分析及其应用 . 北京 : 宇航出版社 ,1989
- [4] 周传荣 赵淳生 . 机械振动参数识别及其应用 . 北京 : 科学出版社 ,1989
- [5] 傅志方 . 振动模态分析及参数辨识 . 北京 : 机械工业出版社 , 1990
- [6] 杨景义 王信义 . 试验模态分析 . 北京 : 北京理工大学出版社 ,1990
- [7] Ewins D J. Modal Testing: Theory and Practice. Research Studies Press Ltd. , 1984 (有中译本)
- [8] Natke H G. Identification in Vibrating Structures. Springer Verlag Wien - New York, 1982
- [9] Natke H G. Parameter Adjustment of a Model of an Offshore Platform from Estimated Eigenfrequency Data. Journal of Sound and Vibration, 1981,77(2)
- [10] MIL - STD - 1540 B, Environmental Test Requirements for Spacecraft. 1982
- [11] MIL - STD - 1540 C, Test Requirements for Launch, Upper - stage and Space Vehicles. 1994
- [12] Heylen W. et al. Modal Analysis Theory and Testing. Society for Experimental Mechanics, Inc. . 1997
- [13] Avitabile P. Dynamic Decisions' Modal Handbook (电子书籍). Society for Experimental Mechanics, Inc. . 1997
- [14] Nuno Maia. et al. Theoretical and Experimental Modal Analysis. Society for Experimental Mechanics, Inc. . 1997
- [15] 大久保信行 . 机械のモデルアナリシス . 中央大学出版部 ,1981
- [16] 日本机械学会 . モード解析基礎と応用 . 丸善 ,1986
- [17] 长松昭男 . モード解析 . 培风馆 ,1990
- [18] 安田仁彦 . モード解析と动的設計 . コロナ社 ,1993

第二章 系统辨识的基本概念

本章主要介绍系统辨识的基本概念，它是全书主题的一个概括。完整地理解系统辨识的基本概念，将有助于总体构成结构模态特性试验分析方法的基本思路和内容。

2.1 基本概念

2.1.1 系统辨识的定义

系统辨识是用实验手段确定系统特性的方法。1962年,Zadeh L. A. 曾给“辨识”下过这样定义：“根据系统输入和输出观测数据，从一组设定的模型类中确定一个与被辨识系统等价的模型”。1974年,Eykhoff P. 定义“辨识”为：“用一个模型来表示客观系统(或将要构造的系统)本质特性的一种演算，并用这个模型把对客观系统的理解表示成有用的形式”。Strejc V. 对Eykhoff P. 的定义又作了进一步解释：“辨识的定义强调了一个非常重要的概念，最终模型只表征动态系统的本质特性，并将它用适当形式表示。这就意味着，并不期望获得一个确切的系统数学描述，而所要的只是一个适合于应用的模型”。1978年 Ljung L. 给“辨识”下了一个更加实用的定义：“辨识就是按照一定准则，在一组模型类中选择一个与观测数据拟合最好的模型”。从以上几位学者所下的定义中看出，系统辨识包括有下列三个因素：

- 1) 输入输出数据；
- 2) 模型类；
- 3) 等价准则。

其中，数据是辨识的基础；准则是辨识优化的目标；而模型类是寻找模型的范围。另外，按照Zadeh 的定义，寻找一个与实际物理过程完全等价的模型无疑是相当困难的。但从实用观点出发，对模型的要求并非如此苛刻，要求的只是能表征系统本质特性、适合于应用的模型。

2.1.2 系统辨识的基本原理

图 2-1 为系统辨识过程的基本原理图。实际系统作为辨识对象；而数学模型是实际系统的数学描述。在同一输入作用下，比较辨识对象和数学模型的输出。通过试验所测得的、受噪声污染的测量数据与数学模型预示结果的比较，根据一定的辨识准则鉴定它们之间的总体吻合程度。如果对象的特性与数学模型的特性相同，就可以认为，在所规定的试验条件下，指定模型类中的这个特定数学模型就是被辨识对象的模型。如果对象的特性与数学模型的特性不相同，就应该修改模型（模型的结构或相应的模型参数 θ ）使最终

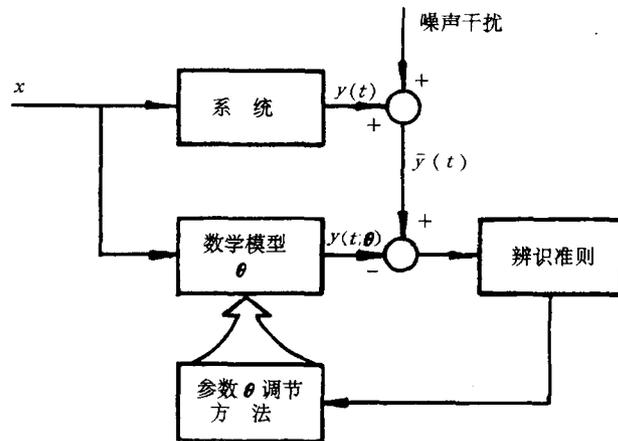


图 2-1 系统辨识原理图