

机械振动参数 识别及其应用

周传荣 赵淳生 编著

科学出版社

机械振动参数识别及其应用

周传荣 赵淳生 编著

科学出版社

1989

内 容 简 介

从 70 年代发展起来的机械振动参数识别法已成为机械动力学中新的学科分支。所谓机械振动参数识别,是指对振动系统进行激励(输入),使用测量仪器获得系统的输入、输出数据,经过对它们进行处理和分析建立振动系统的数学模型。本书分为五部分:第一部分(第一、二章)讨论机械振动参数识别的基本理论和分类;第二部分(第三、四、五章)讨论模态参数识别的适调多点激振法、频域法和时域法;第三部分(第六章)讨论物理参数识别法;第四部分(第七章)讨论非参数模型估计;第五部分(第八章)讨论振动参数识别在工程中的应用,包括结构动态设计中的应用、实验模态分析与有限元素法的相互比较、飞行器颤振试验中的应用等。书末列出了有关的附录及附表。

本书适用于机械(军用及民用)、航空、航天、交通运输、建筑、冶金等部门的教师、科研人员和工程技术人员参考,亦可作为这些部门有关专业研究生教材。

机械振动参数识别及其应用

周传荣 赵淳生 编著

责任编辑 陈德义

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

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

*

1989 年 4 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1989 年 4 月第一次印刷 印张:19 5/8

印数:0001—2,540

字数:510,000

ISBN 7-03-000838-3/TH·4

定 价: 14.00 元

序

通过实测系统的输入(激振力函数)和输出(响应)来确定系统的动态特性,建立系统的数学模型,是结构动力学逆问题的一个主要方面。其内含又可分为系统识别和参数识别两部分。自70年代以来,随着电子计算机和振动测试技术的发展,参数识别技术有很大的进步,世界上许多国家为此研制了很多新型的仪器,编制了大量的软件,广泛应用于飞行器、汽车、火车、轮船、机床和土建机械等结构的动态设计、振动控制、故障诊断、减振降噪以及环境振动工程等方面。

70年代后期,南京航空学院组建了振动研究室,开始对参数识别技术进行研究。从1975年开始,先后从法、日、英、美等国引进了一系列有关模态实验设备和软件,结合教学和各种工程设计、生产、使用和维护,应用各种方法做了大量的模态试验和分析,取得了丰富的数据和经验,同时改进和发展了参数识别方法,取得了一系列成果,多次获得部级、省级科技成果奖。最新成果正在向国家申报。现在该研究室已扩大为振动工程研究所。

尽管国内外有关参数识别的科技文献累累,但有关这方面的专著甚少。反映70年代参数识别技术的著作,有日本中央大学大久保信著《机械模态分析》,该书已由尹传家翻译,上海交通大学出版社1985年出版。另外,偏重于实验和作者本人工作经验的有英国帝国理工学院 Ewins 著的《模态试验理论和实践》(Modal Testing Theory and Practice),该书由赵淳生、周传荣翻译,湖南大学出版社即将出版。南京航空学院振动工程研究所周传荣、赵淳生编著的《机械振动参数识别及其应用》这本书较全面地系统化了结构振动参数识别的理论和方法,并充分反映了本书作者和作者所在单位科研人员在这一领域内可以发表的理论和应用研究成果。

本书有以下特点:

- 深入浅出,比较系统地介绍了结构振动参数识别的理论和方法;
- 反映了作者及其所在单位的科研成果和丰富的实践经验;
- 基本反映了国际、国内80年代在结构振动参数识别方面的最新成果;
- 理论与实际结合得较好,以大量篇幅列举了许多实际应用问题;
- 本书内容可以信赖,其中大部分内容曾多次在南京航空学院举办的学习班、训练班和研究生课程中讲授,并进行过实验,部分内容已形成软件,正在国内一些单位推广使用。

我衷心地希望本书能尽快地与读者见面。我相信各位同行们,广大的振动工程师、技术员都会欢迎这本书的出版。

中国航空学会副理事长、教授

张阿舟

1987年11月5日于南京

• M •

前 言

为了定量、准确地对振动系统进行分析,为了解决工程中各种振动问题,通常都需建立系统的数学模型(简称建模)。振动系统建模分为理论建模与试验建模两大类。所谓理论建模是指采用力学定律建立数学模型。对于复杂结构,目前常采用有限元素法(FEM)建模,用这种方法建模比较方便,特别适用于结构、机械的设计阶段。建模的质量与建模人员的水平、经验密切相关。一般来说,要建立一个能准确地代表系统动态特性的数学模型是比较困难的。因而,理论建模有一定的局限性。为了改进建模的方法,近十多年来,振动试验建模得到了迅速的发展。所谓试验建模,是指对振动系统进行激振(即输入),通过测量获得系统的输入、输出(或仅仅是输出)数据,再经过对它们进行处理和分析建立系统的数学模型。描述振动系统的数学模型有:物理坐标模型(物理参数模型),模态坐标模型(模态参数模型)以及非参数模型。因而,振动试验建模实质上是对一个给定模型、特定模型参数的参数识别(辨识)和估计问题。一般说来,试验建立的模型能更准确地代表系统,可弥补理论建模的不足,因而受到人们普遍的关注。国际、国内的许多振动研究部门、高等院校以及研制测试仪器的公司、工厂,都投入了相当大的力量从事试验建模、振动测试仪器和专用软件的研究。与此同时,国际、国内有关试验建模的学术活动非常频繁。从1982年以来,每年定期召开一次国际模态学术交流会(IMAC),会议的规模是相当可观的,而且还在逐年扩大。此外,还有许多其他的国际学术会议也包含了试验建模的内容。在国内,除了从1978年以来,两年一届的机械阻抗和参数识别交流会外,也还有许多其他的学术会议包含了试验建模的内容。总之,振动试验建模是一个十分活跃的领域,它涉及到许多研究部门、高等院校和工业界的机械(包括军用和民用机械)、航空、航天、

交通运输、建筑、冶金等许多专业。

本书包含五部分内容：第一部分（第一章、第二章）讨论机械振动参数识别的基本理论和分类。它包括振动参数识别的连续时间与离散时间系统以及它们间的关系，描述振动系统的物理坐标模型、模态坐标模型和非参数模型，振动参数识别的分类——频域法、时域法，或按识别时使用的输入/输出数目分为 SISO、SIMO、MIMO 等模态参数识别法。

第二部分（第三章、第四章和第五章）讨论模态参数识别的适调多点激振法、频域法和时域法。它包括适调多点激振的基本理论、模态参数识别的导纳圆法、复数功率法，频域的 SISO 识别法、单模态识别法、多模态迭代识别法、多模态直接识别法、SIMO 和 MIMO 识别法，时域的 ITD 法、STD 法、复指数法、逐步扩阶双递推法、多基准复指数法、ERA 法和随机减量法。

第三部分（第六章）讨论振动系统的物理参数识别。它包括坐标转换法、不需坐标转换的直接识别法以及 EMA 和 FEM 相结合的优化方法。

第四部分（第七章）讨论非参数模型估计。它包括单点、多点激振下的频响函数、脉冲响应函数估计及其动态测试技术。

第五部分（第八章）讨论振动参数识别在工程中的应用。它包括在结构动态设计中的应用、EMA 和 FEM 的相互比较与修改、在飞行器颤振试验中的应用等。

本书大部分内容曾多次作为硕士研究生课程的内容讲授过，不少内容在南京航空学院举办的有关短培训班上讲授过，部分内容已形成专用软件，在国内几十个单位推广使用。因而，本书包括了作者多年来的科研、教学成果，同时还包括了国际、国内近十几年来振动参数识别研究的主要成果。可以说，它是国内首次比较系统、全面地讨论机械振动系统参数识别与应用的一本书。

本书第一、二章是全书的基础部分，其他各章在内容方面基本上是独立的。读者在阅读本书前两章的基础上，其他各章可结合需要选读，进一步的研究可查阅书末所列各章的参考文献。

本书第一、二、五、六、八章由周传荣撰写，第三、四、七章由赵淳生撰写。张阿舟教授对全书的内容作了审阅，包益民同志对全书的内容和文字进行了校对并补充了部分内容。另外，南京航空学院博士研究生曾宪棣、颜玉玲，硕士研究生丁纪平、陈卫东、肖俏，南京大学数学系毕业生、美国 MIT 研究生赵颖，南京微分电机厂助理工程师周羽舟等同志，为本书的校对、抄写、绘图等作了大量的工作，在此向他们表示衷心的感谢。

限于水平，书中不当乃至错误之处难免，热忱地欢迎批评指正，以期今后再版时改进。

编 著 者

1987 年 7 月于南京

缩 写 表

- AR——(Autoregressive) 自回归
- ARMA——(Autoregressive Moving Average) 自回归滑动平均
- DLS——(Double Least Square) 双最小二乘
- EMA——(Experimental Modal Analysis) 实验模态分析
- ERA——(Eigensystem Realization Algorithm) 特征系统实现算法
- FFT——(Fast Fourier Transformation) 快速傅里叶变换
- FEM——(Finite Element Method) 有限元素法
- FRF——(Frequency Response Function) 频响函数
- IRF——(Impulse Response Function) 脉冲响应函数
- ITD——(Ibrahim Time Domain) 艾布拉赫姆时域法
- MA——(Moving Average) 滑动平均
- MEM——(Maximum Entropy Method) 最大熵法
- MDOF——(Multiple Degree of Freedom) 多自由度
- MIMO——(Multi Input Multi Output) 多输入多输出
- NDOF——(N Degree of Freedom) n 自由度
- RFP——(Rational Fraction Polynomial) 有理分式多项式
- RFOP——(Rational Fraction Orthogonal Polynomial) 有理分式正交多项式
- SDOF——(Single Degree of Freedom) 单自由度
- SIMO——(Single Input Multi Output) 单输入多输出
- SISO——(Single Input Single Output) 单输入单输出
- SLS——(Single Least Square) 单最小二乘
- STD——(Spare Time Domain) 节省机时、内存的艾布拉赫姆时域法

目 录

序.....	i
前言.....	ii
缩写表.....	xv

第一章 振动参数识别连续与离散时间系统

1-1 引言	1
1-2 SDOF 系统自由振动	2
1-2.1 无阻尼自由振动	2
1-2.2 粘性阻尼自由振动	3
1-3 分析 SDOF 系统强迫响应的频域法	5
1-3.1 简谐力作用下的响应分析	5
1-3.2 分析周期力作用下稳态响应的傅里叶级数法	8
1-3.3 分析一般激振力作用下强迫响应的傅里叶变换法	12
1-3.4 分析一般激振力作用下强迫响应的拉氏变换法	17
1-3.5 结构阻尼 SDOF 系统强迫响应分析	18
1-4 分析SDOF系统一般激振力作用下强迫响应的时域法...	19
1-4.1 脉冲载荷	19
1-4.2 分析一般激振力作用下强迫响应的卷积法	20
1-5 SDOF 系统随机激振力作用下强迫响应分析	22
1-5.1 随机过程的统计特性描述	22
1-5.2 随机激振下的响应分析	30
1-6 频域法和时域法的关系	32
1-6.1 传递函数与脉冲响应函数	32
1-6.2 频响函数与脉冲响应函数	32
1-6.3 传递函数与频响函数	33
1-6.4 卷积与乘积	34
1-6.5 连续时间系统小结	35

1-7	采样定理	35
1-7.1	理想采样后信号的频谱	35
1-7.2	采样内插公式	38
1-7.3	小结	40
1-8	离散卷积	41
1-8.1	离散时间信号序列	41
1-8.2	离散卷积	44
1-9	离散时间系统的频响函数	45
1-9.1	序列傅里叶变换	45
1-9.2	差分方程	46
1-9.3	频响函数	47
1-10	离散时间系统的传递函数	47
1-10.1	Z 变换	47
1-10.2	传递函数	48
1-11	离散傅里叶变换 (DFT) 和快速傅里叶变换 (FFT)	49
1-11.1	离散傅里叶变换	49
1-11.2	快速傅里叶变换	52
1-12	数字滤波	52
1-12.1	电子滤波器与滤波运算	52
1-12.2	数字滤波器	54
1-13	谱泄漏、窗函数与细化	55
1-13.1	谱泄漏与窗函数	55
1-13.2	细化 (ZOOM)	59
1-14	连续时间系统与离散时间系统	60
1-14.1	拉氏变换、傅里叶变换、序列傅里叶变换、Z 变换之间的 关系	60
1-14.2	离散时间系统小结	63

第二章 振动参数识别和分类

2-1	引言	64
2-1.1	数学模型	64
2-1.2	理论建模和试验建模	65

2-2 描述振动系统的方法	67
2-2.1 分布参数振动系统	67
2-2.2 离散振动系统	68
2-2.3 随机系统	72
2-3 离散振动系统的物理坐标描述	73
2-3.1 构造空间法	73
2-3.2 状态空间法	73
2-3.3 差分方程法	82
2-4 离散振动系统实模态坐标描述	90
2-4.1 无阻尼系统	90
2-4.2 粘性比例阻尼系统	92
2-4.3 结构比例阻尼系统	96
2-5 离散振动系统复模态坐标描述	97
2-5.1 任意粘性阻尼系统	97
2-5.2 任意结构阻尼系统	104
2-6 离散振动系统的非参数模型描述	105
2-7 振动系统参数识别的分类	108
2-7.1 模态参数和物理参数识别	108
2-7.2 频域、时域识别法	108
2-8 建模准则与方法	109
2-8.1 建模准则	109
2-8.2 建模方法	111

第三章 适调多点激振法

3-1 引言	112
3-2 SDOF 系统频响函数的三种图示方法	114
3-2.1 幅-频特性和相-频特性图 (Bode 图)	115
3-2.2 实-频特性和虚-频特性图	117
3-2.3 奈奎斯特图	117
3-3 单点激振的理论基础	120
3-4 单点激振及其模态分离技术	128
3-5 适调多点激振法的理论基础	134

3-5.1	任意粘性阻尼的离散系统	136
3-5.2	任意粘性阻尼的连续系统	144
3-6	系统达到纯模态的判据	147
3-7	适调激振力的主要方法	150
3-7.1	人工调节激振力	152
3-7.2	采用伺服装置适调激振力的方法	158
3-7.3	采用计算机适调激振力	159
3-8	模态参数识别的方法	169
3-8.1	峰值法	169
3-8.2	分量法	171
3-8.3	导纳圆法	173
3-8.4	附加质量法和附加刚度法	176
3-8.5	正交力法	180
3-8.6	复数功率法	184
3-9	适调多点激振法的应用	193
3-10	适调多点激振法的试验过程	200

第四章 频域模态参数识别法

4-1	引言	202
4-2	频响函数、脉冲响应函数和模态参数的关系	204
4-2.1	SDOF 系统	204
4-2.2	MDOF 系统	206
4-3	SISO 识别法	216
4-3.1	单模态识别法	216
4-3.2	多模态迭代识别法	222
4-3.3	多模态直接拟合的 RFP 法	228
4-3.4	多模态直接拟合的 RFOP 法	247
4-4	SIMO 识别法	252
4-5	MIMO 识别法	260

第五章 时域模态参数识别法

5-1	引言	273
-----	----------	-----

5-2	ITD 法	274
5-2.1	ITD 法的单最小二乘法 (SLS)	274
5-2.2	ITD 法的双最小二乘法 (DLS)	280
5-2.3	ITD 法用户参数选择	281
5-2.4	例	285
5-3	STD 法	290
5-4	复指数法	294
5-4.1	复指数法	294
5-4.2	例	298
5-5	逐步扩阶双递推法	298
5-5.1	识别复频率	298
5-5.2	识别复振型	304
5-5.3	复模态与噪声模态的鉴别	305
5-5.4	例	306
5-6	差分方程法	308
5-6.1	方法 I	308
5-6.2	方法 II	311
5-7	MIMO 复指数法	312
5-7.1	多基准复指数参数识别法	312
5-7.2	多点激振复指数法的模态置信因子	317
5-8	特征系统实现法 (ERA)	318
5-8.1	ERA 法	318
5-8.2	ERA 法与 ITD 法间的关系	322
5-8.3	例	324
5-9	随机减量法	325
5-9.1	原理	325
5-9.2	几点说明	329
5-9.3	随机减量法在飞机结构上的应用	333
5-10	从复模态获取固有模态的方法	337
5-10.1	固有模态的用途	337
5-10.2	状态空间法	338
5-10.3	虚拟模态法	339

5-10.4 例	340
----------------	-----

第六章 物理参数识别

6-1 引言	343
6-2 坐标转换法	344
6-2.1 完全模型与非完全模型	344
6-2.2 实模态参数向物理参数的转换	346
6-2.3 复模态参数向物理参数的转换	347
6-3 直接识别物理参数法	354
6-3.1 不需迭代的直接法	354
6-3.2 物理参数识别的迭代法	359
6-4 实验模态分析与有限元相结合的方法	368
6-4.1 艾布拉赫姆法	368
6-4.2 摄动法	370
6-4.3 优化方法	375
6-4.4 以 EMA 和 FEM 部分结果为基准的方法	383

第七章 非参数模型的估计技术

7-1 引言	388
7-2 频响函数的基本测试系统	390
7-2.1 激振系统	391
7-2.2 感受系统	399
7-2.3 分析系统	407
7-3 试件及其支持条件	414
7-3.1 自由支持	415
7-3.2 接地支持	423
7-4 激振器的使用和标定	424
7-4.1 激振器的使用问题	426
7-4.2 激振器的标定	438
7-5 传感器的使用和标定	444
7-5.1 传感器的使用问题	445
7-5.2 传感器的标定	449

7-6	单点稳态正弦激振下系统频响函数的测试	458
7-7	单点宽带激振下系统频响函数的估计	464
7-7.1	SISO 频响函数的估计	465
7-7.2	动态测试系统的应用及其发展	477
7-8	宽带激振技术及其应用	478
7-8.1	随机激振	478
7-8.2	瞬态激振	486
7-9	多点激振下系统频响函数的估计	497
7-9.1	MIMO 频响函数的估计	498
7-9.2	多点随机激振	500
7-9.3	多点全相干激振	501
7-10	脉冲响应函数的估计	506
7-11	估计精度和可靠性检验	511
7-11.1	影响测试和估计精度的因素	511
7-11.2	对测试和估计结果的可靠性检验	514

第八章 参数识别技术在工程中的应用

8-1	引言	517
8-2	逆特征值问题在结构动态设计中的应用	521
8-2.1	逆特征值问题	521
8-2.2	在动态设计中的应用	523
8-3	结构动态的再设计、再分析	533
8-3.1	再分析	533
8-3.2	再设计中的灵敏度分析	547
8-4	EMA 模型和 FEM 模型间的相互比较和修正	554
8-4.1	质量、刚度矩阵的聚缩	554
8-4.2	正交性检验	556
8-4.3	EMA 与 FEM 模型间的比较	557
8-5	组合结构分析	563
8-5.1	组合结构	563
8-5.2	阻抗耦合法	563
8-5.3	模态耦合法	564

8-6 响应分析和载荷识别	565
8-7 在飞行器颤振试验中的应用	566
8-8 振动的利用	567
附录.....	568
附录 I 巴什瓦定理	568
附录 II 复频率的模为固有频率的条件	569
附录 III 最小二乘原理.....	573
附录 IV 奇异值分解	577
附录 V 广义逆矩阵	578
附录 VI 拉格朗日乘子法、向量和矩阵范数、矩阵微分.....	580
附录表 1 傅里叶变换性质表	586
附录表 2 拉氏变换性质表	587
附录表 3 常用函数拉氏变换表	587
附录表 4 序列傅里叶变换性质表	588
附录表 5 Z 变换性质表	588
附录表 6 常用序列 Z 变换表	588
参考文献.....	589
外国人名译名表.....	603
索引.....	605