

动力学系统建模

Modeling of Dynamical Systems

张景绘 著



国防工业出版社

动力学系统建模

Modeling of Dynamical Systems

张景绘 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

动力学系统建模/张景绘著. —北京:国防工业出版社, 2000. 2

ISBN 7-118-02117-2/0.150

I. 动… II. 张… III. 结构动力学—数学模型
IV. 0342

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 14839 号

DL66/28

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 $8\frac{1}{4}$ 207 千字

2000 年 2 月第 1 版 2000 年 2 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 17.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。

4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄 宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾 铎
秘 书 长	崔士义			
委 员 (以姓氏笔划为序)	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
	刘 仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

前 言

在经典振动理论中,通过求解一类振动方程——数学模型,分析振动的特性。那么,怎样从一个工程问题得到相应的数学模型呢?有限元法是一个通用的建模方法,因为它主要借助计算机,故称之为计算机辅助建模。随着试验模态分析技术及环境条件或载荷谱测试技术的发展,可直接通过试验得到系统及响应特性,称之为试验辅助建模。有限元分析结果和试验结果的相关性研究,以及结构控制和重设计理论发展的要求,促进了计算机—试验辅助建模理论和方法的发展。这个术语是1991年国家自然科学基金重点项目《机械结构强度与振动》总结时所发表的论文中首次被使用,相继又在国际合作项目《大系统计算模型的修改》中进一步发展了这个概念和理论,并得到国防系统中多个单位工程应用项目的支持,使理论与工程实际相结合。与此同时,计算模型修改、结构动力学设计修改以及与之有关的基于动力学计算模型的损伤检测和故障诊断成为国际学术界的热门题目。本书试图根据自己的研究体会,总结这个领域的当前发展,感谢国防科技图书出版基金的资助,出版此书,与读者交流。借此,我衷心感谢众多学者,他们的研究成果是本书的基础。衷心感谢自然科学基金委员会、德国科学研究会(DFG)以及资助我的研究工作的各工程部门。

在这里我特别指出,本书不少内容是我与德国汉诺威大学 H. G. Natke 合作研究的结果,并引用了他及众多同行专家的研究成果,一并表示感谢。

以本书的基础内容为教材,开设了固体力学和工程力学博士学位课,多次讲授丰富和发展了它的内容。

感谢中国科学院院士杨叔子教授、中国工程院院士黄文虎教

授对本书的推荐以及提出的宝贵意见。

李俊宝博士通读了全书,提出了不少宝贵意见,深表感谢。

本书作为礼物献给我的妻子任淑文,感谢她对我的研究工作以及出版此书的支持和鼓励。感谢我的学生朱长春夫妇和我女儿张知对整理、抄写和打印此书所付出的辛勤劳动。

本书只是计算机—试验辅助建模理论和技术的基础内容和阶段性评述,定有不少新成果未能论及,作者衷心希望得到广大读者支持,对书中错误及论述不当之处批评和指正,共同促进动力学建模理论和技术的发展。

作 者

目 录

第一章 导论	1
1.1 动力学建模	1
1.1.1 系统和建模	1
1.1.2 建模理论的发展及存在的问题	2
1.1.3 计算机—试验辅助建模	5
1.2 线性结构动力学模型的基本形式	7
1.2.1 时域模型和特征集合	7
1.2.2 频率响应函数	13
1.2.3 状态方程	15
1.2.4 弹性—粘弹性复合结构方程	16
1.2.5 数学模型间的关联	20
1.3 参数估计	25
1.3.1 结构动力学中的参数估计	25
1.3.2 最小二乘估计	26
1.3.3 线性最小二乘法	27
1.3.4 非线性最小二乘法	31
1.3.5 其他估计方法	32
1.4 复杂动力学系统建模的发展	35
参考文献	39
第二章 模型的相关性	41
2.1 解析模态和试验模态的相关性	41
2.2 试验模态和解析模态的综合	46
2.2.1 自由界面综合法	46
2.2.2 综合过程中的问题	49
2.3 数学模型的减缩	50

2.3.1 Guyan 减缩法	51
2.3.2 Kuhar 法	53
2.3.3 Ritz 向量减缩法	54
2.3.4 子模态矩阵法	55
2.3.5 均衡减缩法	58
2.3.6 部件模态综合法	60
2.4 灵敏度分析	60
2.4.1 灵敏度的基本概念	60
2.4.2 特征值导数	63
2.4.3 特征向量导数	64
2.4.4 参数变化对模态参数的影响	64
2.4.5 对局部误差参数的灵敏度	65
2.4.6 弹性—粘弹性复合结构灵敏度分析	67
2.4.7 参数变化对响应的影响	72
参考文献	74
第三章 计算模型的修改	76
3.1 摄动法	76
3.1.1 矩阵摄动法	77
3.1.2 一阶灵敏度摄动法	78
3.1.3 模态参数的一阶摄动	79
3.1.4 频域输出一阶摄动法	79
3.2 BERMAN 方法	81
3.3 子结构误差方法	82
3.3.1 利用特征值修改	83
3.3.2 利用特征值和特征向量修改	84
3.4 最佳矩阵逼近法	86
3.5 频率响应函数方法	89
3.6 模态转换法	91
3.7 两水平修改法	96
3.7.1 自由界面部件计算模型	97
3.7.2 自由界面部件综合	101
3.7.3 两水平修改过程	104

参考文献	110
第四章 非线性系统建模	112
4.1 非线性系统数学模型的概述	112
4.2 非线性检测	116
4.2.1 希尔伯特变换	118
4.2.2 三阶自相关函数	121
4.2.3 非线性互相关函数	124
4.2.4 离差相关函数	125
4.2.5 非线性综合指标	126
4.2.6 非线性检测的数值模拟及分析	129
4.2.7 对非线性检测的再注释	138
4.3 非线性系统的谱分析	139
4.3.1 响应的谱结构	139
4.3.2 多维频率响应函数的估计	148
4.3.3 多项式非线性系统	151
4.4 广义传递函数	160
4.5 多项式等效方法	163
4.6 迟滞非线性系统的模型及谱分析	169
4.6.1 扩充状态变量的多项式模型	170
4.6.2 参数估计方法	171
4.6.3 谱结构	174
4.7 线性化系统的试验模态分析	178
4.7.1 骨架线性系统和等效线性系统	178
4.7.2 骨架线性系统的识别	179
4.7.3 瞬时特征参数的估计	180
4.8 非线性固有模态	188
4.8.1 线性系统固有模态的另一种形式	188
4.8.2 非线性固有模态	192
4.9 非线性时间序列建模	196
4.9.1 NARMA 模型的两种典型形式	196
4.9.2 多步预报	197
参考文献	199

第五章 损伤评估的动力学模型	202
5.1 损伤识别与有限元模型修改	202
5.2 损伤和传递函数	205
5.3 卡尔曼滤波与故障诊断	209
5.4 小波分析与系统的时变性	214
5.4.1 小波变换	214
5.4.2 与系统分析有关的性质	216
5.4.3 正交小波	220
5.4.4 小波映射	223
5.4.5 瞬态参数的提取	226
5.5 人工神经网络	228
5.5.1 损伤检测的基本思路	229
5.5.2 人工神经网络基础	230
5.5.3 恢复力残差检测损伤	234
5.5.4 损伤模式分类器	235
5.5.5 结构地震损伤的快速估计	238
参考文献	240
附录 希尔伯特变换	242

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Modeling of Dynamical Systems	1
1.1.1 System and Modeling	1
1.1.2 Advance on Modeling Theory	2
1.1.3 Computer and Test Aided Modeling	5
1.2 Basic Forms of Dynamical Models for Linear Structures	7
1.2.1 Models in Time Domain and Eigen Sets	7
1.2.2 Frequency Response Function	13
1.2.3 State Equation	15
1.2.4 Equation for Elastic-viscous Composite Structures	16
1.2.5 Correlations between the Mathematical Models	20
1.3 Parameter Estimation	25
1.3.1 Parameter Estimation in the Structural Dynamics	25
1.3.2 Least-square Estimation	26
1.3.3 Linear Least-square Estimation	27
1.3.4 Nonlinear Least-square Estimation	31
1.3.5 Other Estimation Methods	32
1.4 Advance on Modeling for the Complex Dynamical Systems	35
References	39
Chapter 2 Correlativity of Models	41
2.1 Correlativity between Analytical and Experimental Modes	41
2.2 Synthesis of Experimental and Analytical Modes	46

2.2.1	Free Interface Synthesis Method	46
2.2.2	Problems in Synthesis Procedure	49
2.3	Condensation of the Mathematical Models	50
2.3.1	Guyan Condensation Method	51
2.3.2	Kuhar Method	53
2.3.3	Ritz Vector Condensation Method	54
2.3.4	Sub-modal Matrix Method	55
2.3.5	Balanced Condensation Procedure	58
2.3.6	Synthesis Procedure for the Componental Modes	60
2.4	Sensitivity Analysis	60
2.4.1	Principal Concepts on Sensitivity	60
2.4.2	Derivative of Eigenvalue	63
2.4.3	Derivative of Eigenvector	64
2.4.4	Effect of Parameter Variation on Modal Parameters	64
2.4.5	Sensitivity to local Error Parameters	65
2.4.6	Sensitivity Analysis for Elastic-viscous Composite Structures	67
2.4.7	Effect of Parameter Variation on the Response	72
	References	74
Chapter 3	Updating of Computation Model	76
3.1	Perturbation Method	76
3.1.1	Matrix Perturbation Method	77
3.1.2	First Order Sensitivity Perturbation Method	78
3.1.3	First Order Perturbation of the Modal Parameters	79
3.1.4	First Order Perturbation Method for the Frequency Response	79
3.2	Berman Method	81
3.3	Method Using the Residual of the Sub-structures	82
3.3.1	Updating Using Eigenvalues	83
3.3.2	Updating Using Eigenvalues and Eigenvectors	84
3.4	Optimal Matrix Approximation Method	86
3.5	Frequency Response Function Method	89

3.6	Modal Transformation Method	91
3.7	Two-level Updating Procedure	96
3.7.1	Computation Model Using Free-interface Components	97
3.7.2	Free interface Component Synthesis Equation	101
3.7.3	Two-level Updating	104
	References	110
Chapter 4	Modeling of the Nonlinear Systems	112
4.1	Survey on the Mathematical Models of the Nonlinear Systems	112
4.2	Detection of the Nonlinearity	116
4.2.1	Hilbert Transformation	118
4.2.2	Third Order Auto-correlation Function	121
4.2.3	Nonlinear Cross-correlation Function	124
4.2.4	Variation Correlation Function	125
4.2.5	A Composite Index	126
4.2.6	Simulation of Nonlinearity Detection	129
4.2.7	An Additional Notation on Nonlinearity Detection	138
4.3	Spectral Analysis for the Nonlinear Systems	139
4.3.1	Spectral Components of the Response	139
4.3.2	Estimation of the Multi-dimension Frequency Response Function	148
4.3.3	Polynomial Nonlinear System	151
4.4	Extension Transfer Function	160
4.5	Polynomial Equivalence Method	163
4.6	Modeling and Spectral Analysis for Systems with Hystertic Restoring Force	169
4.6.1	Polynomial Model with An Extended State Variable	170
4.6.2	Parameter Estimation Method	171
4.6.3	Spectral Structure	174
4.7	Experimental Modal Analysis for the Linearized Systems	178

4.7.1	Backbone Linear System and Linear Equivalence System	178
4.7.2	Identification of the Backbone Linear System	179
4.7.3	Estimation of Instantaneous Eigen Parameters	180
4.8	Nonlinear Natural Mode	188
4.8.1	Another Form of the Natural Mode for a Linear System	188
4.8.2	Nonlinear Natural Mode	192
4.9	Modeling with Nonlinear Time Series	196
4.9.1	Two Typical Forms for NARMA Model	196
4.9.2	Multi-step Forecasting	197
	References	199
Chapter 5	Dynamical Models for Damage Evaluation	202
5.1	Damage Diagnosis and Updating of Finite Element Model	202
5.2	Damage and Transfer Function	205
5.3	Kalman Filtering and Fault Diagnosis	209
5.4	Wavelet Analysis and Time-variant Characteristic of System	214
5.4.1	Wavelet Transform	214
5.4.2	Properties Related to System Analysis	216
5.4.3	Orthogonal Wavelets	220
5.4.4	Wavelet Mapping	223
5.4.5	Extraction of Instantaneous Parameters	226
5.5	Neural Network	228
5.5.1	Principle of Damage Detection	229
5.5.2	Basic Concepts on Neural Network	230
5.5.3	Damage Detection Using the Residual of the Restoring Force	234
5.5.4	Classifier of Damage Patterns	235
5.5.5	Quick Earthquake Damage Estimation	238
	References	240
Appendix	Hilbert Transformation	242

第一章 导 论

1.1 动力学建模

1.1.1 系统和建模

系统的含义非常广泛,大至宇宙,小至生物的一个细胞,具体如复杂的社会、人口的变迁、质点运动等都可称之为系统(或过程)。本书所讨论的系统是动力学系统,局限在结构动力学范围,具体对象可能是固体的、流体或流固耦合的,也可能是机电耦合系统。本书所讨论的方法可适用于研究其他领域的系统。

建模(modeling)是把系统的本质部分信息简缩成有用的描述方式的过程。这个描述方式称之为系统的模型(model)。

模型有多种形式:

直觉模型 是对一个系统的直观感觉,无疑是最简单的形式,但机理却非常复杂。例如,发电系统的运行工况,用一探棒触及轴承座来判断系统的运行状态,凭经验提取系统的本质信息,是一个真实的专家系统。

图表模型 例如,将发电系统轴承座的振动有效值随时间的变化记录并绘制图表,用来描述发电系统的运行状态。

数学模型 是用数学形式来反映实际系统的特性。这种模型不但便于分析,还可以预测系统尚未出现的现象,例如,发电机转子的振动可用二阶线性常微分方程组描述,机器人手臂的运动可用非线性偏微分方程描述,一航天结构的振动可用一有限元计算模型描述等。

试验模型 是一种物理形式的模型,直接由试验所得到的数