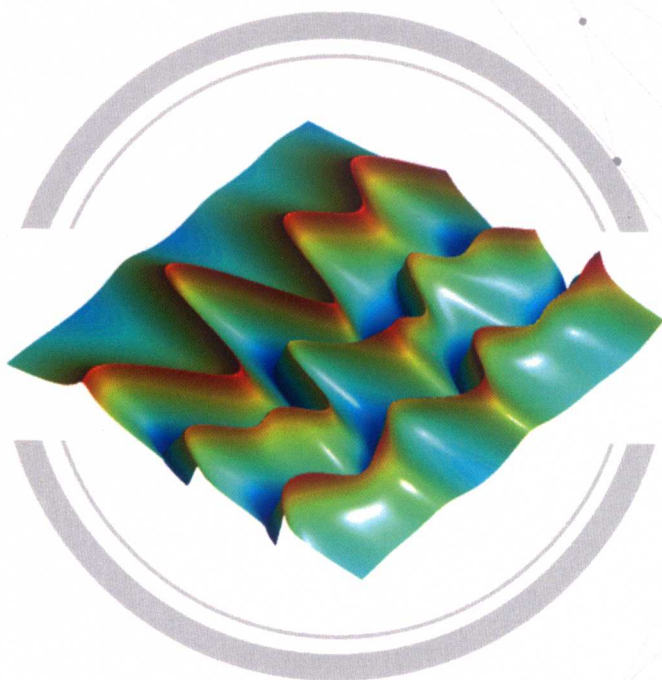




运行时变结构模态参数 辨识理论与方法

周思达 马志赛 杨武 刘莉 著



科学出版社

国家自然科学基金资助项目（编号：11402022）

运行时变结构模态参数 辨识理论与方法

周思达 马志赛 杨 武 刘 莉 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要针对运行工作状态下的时变结构,介绍线性时变系统理论和运行时变结构模态参数的辨识理论与方法,包括参数化时频域的最小二乘和最大似然整体辨识方法、参数化时频域的多步辨识方法、基于前后向时间序列模型的时域方法、基于无网格形函数的时域方法、基于支持向量机和最小二乘支持向量机的时域方法、非结构化的递推方法、核化的递推方法等。此外,本书还通过数值算例和实验演示所介绍方法的运用方式与特点。

本书可作为时变系统辨识理论与方法相关领域学者和研究生的学习资料,也可作为工程实施人员处理相关实际问题的参考材料。

图书在版编目(CIP)数据

运行时变结构模态参数辨识理论与方法 / 周思达等著. —北京: 科学出版社, 2019.3

ISBN 978-7-03-059772-4

I. ①运… II. ①周… III. ①时变系统—结构动力学—研究 IV. ①O231
②O342

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 262248 号

责任编辑: 徐杨峰 / 责任校对: 谭宏宇

责任印制: 黄晓鸣 / 封面设计: 殷 靓

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

[http: //www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

雷纳利(上海)信息技术有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 17

字数: 324 000

定价: 115.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

技术科学研究往往是与工程应用需求以及当前科学理论研究紧密相连的。无论社会经济发展导致工程对象产生新的应用需求，还是在自然科学理论研究领域产生新的突破，技术科学和工程技术研究都会以不同程度的活动产生创新性的成果，解决工程应用需求问题的同时，引发科学理论研究新的思考。从本质来看，技术科学是自然科学理论和工程技术的桥梁，它直接应用于物质生产，又为自然科学理论研究提供事实根源。

本书介绍的运行时变结构模态参数辨识理论与方法是作者在技术科学研究范畴的创新性成果，它来源于工程实践中最为直接的应用需求，又通过严格的数学假设与抽象，成为适用于时变动力学系统辨识、具有一定普适性和通用性的方法论。具体而言，一方面随着工程结构的发展，对工程结构性能的要求越来越高，随时间变化的时变特性已直接影响到系统的性能提升，众多与结构时变相关的动力学问题不可忽略；另一方面，在科学理论研究领域，时变系统理论日臻完善，系统辨识研究越发深入，数据挖掘、机器学习等领域的创新思想使得时变结构动力学系统辨识的技术科学研究成为可能。

由于问题的复杂性和不确定性，单纯基于机理分析来建立能够精确描述结构时变动力学特性的模型往往十分困难。因此，从反问题入手，基于系统辨识来获取结构的时变动力学特性显得尤为必要。实验模态分析具有获取真实工作条件下系统整体动力学特性的能力，是解决结构动力学问题的重要途径。模态分析及其核心内容——模态参数辨识可用于结构动力学特性评估、振动响应预测、动力学修改、模型修正、振动控制、健康监测、故障诊断、损伤探测等诸多方面，为结构的动力学分析与设计提供十分重要的支持。因此，进行时变结构模态参数辨识研究能很大程度地促进时变结构动力学研究领域的发展，并为工程时变结构的分析、设计提供强有力的理论和技术支持。

近年来，时变结构模态参数辨识方法已经成为结构动力学领域的研究热点之一。通过辨识获取真实边界条件下的时变结构模态参数至少具有三方面的应用价值：①反演结构时变特性模型，减小结构设计的冗余，延拓设计边界；②揭示环境真实作用机理，监测结构健康，降低复杂环境下的运行风险，提高可靠性和生存力；③跟踪结构参数变化机制，精细化动力学模型，提高控制效率，削减控制成本。

本书主要介绍作者近十年在时变结构模态参数辨识方面的研究成果, 试图为工程时变结构研究提供一定的理论指导和技术支持。本书共分为 10 章, 除第 1 章总结时变结构模态参数辨识的研究现状以及第 2 章介绍线性时变系统理论及系统参数化模型外, 其余 8 章皆为作者的原创性工作。第 3 章和第 4 章为参数化时频域方法, 第 4 章是在第 3 章基础上的改进和拓展, 在计算复杂度方面得到大幅改善。第 5~10 章为时域方法, 其中第 5 章和第 6 章主要关注参数化模型的改进与拓展; 第 7 章和第 8 章主要关注模型参数估计方法的创新应用, 第 8 章为第 7 章的改进和拓展; 第 9 章和第 10 章主要关注辨识的递推化, 即在线辨识能力。本书的具体安排如下。

第 1 章为绪论。该章较为全面地总结运行时变结构动力学系统模态参数辨识的研究现状, 阐述研究的意义, 分析研究的发展动态, 并初步为该领域的研究工作进行分类。

第 2 章为线性时变系统理论及系统参数化模型。该章从线性时变系统的基本理论出发, 总结介绍线性时变系统的特性描述、“时间冻结”假设、时域和(时)频域的时变系统辨识模型, 为后续内容的展开打下基础。

第 3 章为参数化时频域时变结构模态参数整体辨识方法。该章将经典的针对时不变结构的参数化频域模态参数辨识方法拓展到时频域, 提出了参数化时频域时变结构模态参数单参考和多参考的最小二乘、最大似然辨识方法, 这些方法在高阻尼结构辨识、通过频带选择提高辨识能力和精度等方面具有优势。

第 4 章为参数化时频域时变结构模态参数多步辨识方法。该章针对第 3 章“一步”(整体)辨识中正则方程规模大而导致的对计算资源需求过大的问题进行改进和拓展, 提出参数化时频域的时变结构模态参数两步和多步最小二乘辨识方法, 实现模态辨识与模态参数验证一体化, 并做出振型模糊聚类的四种距离函数等多个改进。

第 5 章为基于前后向时间序列模型的时域时变结构模态参数辨识方法。该章针对预测方向问题, 提出一种前后向线性预测的时变结构模态参数辨识方法, 并将辨识模型从单输出形式拓展为多输出形式, 在抗噪声能力、消除低采样率情况下的时移误差、工作参考向量和反共振点辨识等方面具有优势。

第 6 章为基于无网格形函数的时域时变结构模态参数辨识方法。该章针对模型结构选择问题, 提出基于无网格形函数的时变结构模态参数辨识方法, 包括改进的移动最小二乘时变结构模态参数辨识方法和基于移动 Kriging 形函数的时变结构模态参数辨识方法, 在局部时变特征的跟踪能力方面具有优势。

第 7 章为基于支持向量机的时域时变结构模态参数辨识方法。该章针对最小二乘和最大似然估计方法的固有缺陷, 提出一种基于支持向量机的时域时变结构模态参数辨识方法。该方法继承了支持向量机的优势, 在处理非高斯白噪声情况时具有潜在优势。

第 8 章为基于最小二乘支持向量机的时域时变结构模态参数辨识方法。该章针对支持向量机估计在处理复杂问题时难以接受的计算复杂度问题，将支持向量机估计替换为最小二乘支持向量机估计，并发展基于 Wendland 函数的紧支径向基函数作为参数估计的基函数，将估计问题稀疏化，明显降低计算复杂度。该方法在短数据辨识能力、模型结构敏感度等方面具有优势。

第 9 章为时变结构模态参数的时域非结构化递推辨识方法。该章以经典的非结构化伪线性回归为基础，针对计算效率、应用范围和过拟合问题进行改进，提出基于脊回归的时域时变结构模态参数递推辨识方法和基于贝叶斯线性回归的时域时变结构模态参数递推辨识方法。这些方法在计算复杂度、避免过拟合方面具有优势。

第 10 章为时变结构模态参数的时域核化递推辨识方法。该章针对非结构化方法未对模型参数进行约束而导致的低精度与弱跟踪能力的问题，创新一种“核化”思路，在非结构化和确定结构化之间建立起一种过渡，提出基于核脊回归的时域时变结构模态参数递推辨识方法和基于高斯过程回归的时域时变结构模态参数递推辨识方法。这些方法在辨识精度、时变跟踪能力等方面具有优势。

本书的出版离不开各位师长、同事、同行学者的支持和帮助，这里表示由衷的感谢和敬意。还要特别感谢康杰和王岩松在书稿撰写、资料整理等方面做出的巨大贡献。

由于作者水平有限，书中难免有疏漏之处，敬请各位读者、专家批评指正。

作 者

2018 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 工程中的时变结构	1
1.2 结构模态参数辨识及意义	2
1.3 时变结构模态参数辨识方法的分类	5
1.4 时变结构模态参数的时频域辨识方法	7
1.4.1 非参数化辨识方法	7
1.4.2 参数化辨识方法	10
1.5 时变结构模态参数的时域辨识方法	12
1.5.1 基于时变时间序列模型的辨识方法	12
1.5.2 基于时变状态空间模型的辨识方法	16
1.6 时变结构模态参数的时域仅输出递推辨识方法	19
1.7 时变结构模态参数辨识的发展动态	20
参考文献	21
第 2 章 线性时变系统理论及系统参数化模型	34
2.1 引言	34
2.2 线性时变系统	34
2.2.1 一般线性时变系统	35
2.2.2 线性时变结构系统	35
2.3 线性时变系统的特性描述	35
2.3.1 时变脉冲响应函数	36
2.3.2 时变频率响应函数	37
2.4 “时间冻结”假设	38
2.4.1 频域“时间冻结”假设	38
2.4.2 时域“时间冻结”假设	39
2.5 时域辨识模型	43
2.5.1 VTARMAX 模型	43
2.5.2 VTARMA 模型	44
2.5.3 “时间冻结”模态参数	45

2.6 频域辨识模型	47
2.6.1 时不变矩阵分式模型	47
2.6.2 时变右矩阵分式模型	48
2.6.3 时变公分母模型	49
2.6.4 时不变极点—留数模型	50
2.7 小结	50
参考文献	51
第3章 参数化时频域时变结构模态参数整体辨识方法	53
3.1 引言	53
3.2 时频基函数	53
3.2.1 两变量幂函数多项式形式的时频基函数	54
3.2.2 两变量正交多项式形式的时频基函数	55
3.2.3 正交多项式与 z 域多项式混合形式的时频基函数	56
3.3 单参考时频域最小二乘估计方法	57
3.4 单参考时频域最大似然估计方法	59
3.5 多参考时频域最小二乘估计方法	61
3.6 多参考时频域最大似然估计方法	63
3.6.1 数学模型	63
3.6.2 求解方法	65
3.6.3 基于时频域平均方法的伪协方差矩阵估计方法	66
3.6.4 对数形式的最大似然估计	67
3.7 模态参数计算	68
3.8 数值算例	69
3.8.1 算例一	69
3.8.2 算例二	82
3.9 小结	94
参考文献	95
第4章 参数化时频域时变结构模态参数多步辨识方法	97
4.1 引言	97
4.2 参数化时频域两步最小二乘辨识方法	97
4.2.1 基本数学模型	97
4.2.2 基于最小二乘复频域法的各固定时刻的模态参数辨识	99
4.2.3 基于模糊聚类的模态参数验证与筛选	100
4.2.4 基于加权最小二乘的连续时间变化模态参数辨识	105
4.2.5 小结	107

4.3 参数化时频域多步递推辨识方法	108
4.3.1 多步递推辨识方法	109
4.3.2 步骤 I：功率谱递推伪线性回归估计	111
4.3.3 步骤 II：“时间冻结”模态参数的频域 p-LSCF 辨识	112
4.3.4 步骤 III：模态参数的递推验证	114
4.3.5 步骤 IV：连续时间模态参数辨识	115
4.3.6 实验算例	116
4.3.7 小结	122
参考文献	123
第 5 章 基于前后向时间序列模型的时域时变结构模态参数辨识方法	124
5.1 引言	124
5.2 前向和后向 FS-VTARMA 模型的建立	124
5.3 前后向模型联合估计	127
5.3.1 联合估计的费用函数	127
5.3.2 两步最小二乘法	128
5.4 模型结构问题的讨论	131
5.4.1 模型结构选择	131
5.4.2 半参数化模型	132
5.5 精度和抗噪声能力对比	132
5.5.1 模型描述	132
5.5.2 采样频率	133
5.5.3 信噪比	135
5.5.4 预测格式	137
5.6 数值算例：非平稳振动的时变刚度系统	138
5.6.1 模型描述	138
5.6.2 采样频率	140
5.6.3 信噪比	142
5.7 小结	143
参考文献	144
第 6 章 基于无网格形函数的时域时变结构模态参数辨识方法	146
6.1 引言	146
6.2 无网格法：形函数	146
6.2.1 多项式 PIM 形函数	147
6.2.2 径向 PIM 形函数	148
6.2.3 径向-多项式 PIM 形函数	148

6.2.4	移动最小二乘形函数	150
6.2.5	移动 Kriging 形函数	150
6.3	改进的移动最小二乘时变结构模态参数辨识方法	153
6.3.1	时变系数的移动最小二乘形函数展开	153
6.3.2	引入带权正交基函数	154
6.3.3	时变模型最小二乘估计	155
6.3.4	模型结构选择	156
6.3.5	数值算例: 非平稳振动的时变刚度系统	157
6.4	基于移动 Kriging 形函数的时变结构模态参数辨识方法	160
6.4.1	移动 Kriging 形函数的特殊假定	160
6.4.2	建立移动 Kriging 形函数 VTARMA 模型	161
6.4.3	基于优化的模型估计框架	162
6.4.4	模型阶数的选择	165
6.4.5	数值算例: 突变刚度系统	166
6.5	小结	172
	参考文献	173
第 7 章	基于支持向量机的时域时变结构模态参数辨识方法	175
7.1	引言	175
7.2	基于支持向量机的时变结构模态参数辨识	175
7.2.1	基于支持向量机的参数辨识的原始问题	175
7.2.2	基于支持向量机的参数辨识的对偶问题	176
7.2.3	由对偶问题变量到模态参数的转换	178
7.3	数值算例	178
7.3.1	数值算例描述	178
7.3.2	辨识结果	180
7.4	小结	181
	参考文献	181
第 8 章	基于最小二乘支持向量机的时域时变结构模态参数辨识方法	182
8.1	引言	182
8.2	用于回归的最小二乘支持向量机	182
8.3	基于最小二乘支持向量机的时变结构模态参数辨识方法	184
8.3.1	基于最小二乘支持向量机的参数估计	184
8.3.2	紧支径向基函数与最小二乘支持向量机方法的稀疏化	186
8.3.3	Gram 矩阵稀疏度与计算成本	188
8.3.4	正规因子和宽度缩放因子的超参数选择	190

8.3.5 选择基函数宽度缩放因子	192
8.4 数值算例	195
8.4.1 数值算例描述	195
8.4.2 结果与讨论	197
8.4.3 超参数选择及敏感度	205
8.4.4 过估计与数据长度：最小二乘支持向量机方法与最小二乘方法对比	209
8.5 实验算例	215
8.6 小结	218
参考文献	219
第 9 章 时变结构模态参数的时域非结构化递推辨识方法	221
9.1 引言	221
9.2 基于递推伪线性回归的 VTARMA 模型参数估计	221
9.2.1 指数加权遗忘机制	222
9.2.2 滑动窗遗忘机制	225
9.3 基于卡尔曼滤波的 VTARMA 模型参数估计	227
9.3.1 卡尔曼滤波	227
9.3.2 模型参数的递推估计	227
9.4 基于脊回归的 VTARMA 模型参数估计	229
9.4.1 脊回归	229
9.4.2 模型参数的递推估计	229
9.5 基于贝叶斯线性回归的 VTARMA 模型参数估计	231
9.5.1 贝叶斯线性回归	231
9.5.2 模型参数的递推估计	233
9.6 模型结构选择	236
9.6.1 模型的阶数选择	236
9.6.2 模型的结构参数选择	237
9.7 数值算例	238
9.7.1 模态参数的辨识结果	238
9.7.2 辨识结果对比分析	242
9.8 小结	244
参考文献	245
第 10 章 时变结构模态参数的时域核化递推辨识方法	247
10.1 引言	247
10.2 核化 VTARMA 模型	247
10.2.1 再生核 Hilbert 空间	247

10.2.2 核化 VTARMA 模型	248
10.3 基于核脊回归的 VTARMA 模型参数估计	249
10.3.1 指数加权核递推伪线性回归	249
10.3.2 滑动窗指数加权核递推伪线性回归	251
10.4 基于高斯过程回归的 VTARMA 模型参数估计	251
10.5 模型结构选择	254
10.6 数值算例	255
10.7 小结	259
参考文献	259

第1章 绪 论

1.1 工程中的时变结构

在航空航天、机械、船舶、土木建筑等工程领域中,通常将能够承受和传递载荷的系统称为结构^[1-3]。在把结构当作动力学系统进行研究时,其物理特性主要包括质量(惯性)、刚度(弹性或柔性)和阻尼(能量耗散特性)^[1]。根据结构动力学系统物理特性是否随时间变化,结构可分为时不变(time-invariant)结构和时变(time-varying)结构。以辩证法的观点来看,结构动力学系统是时变的,时不变只是时变的一种特殊状态(或形式)。

然而,传统的结构动力学研究通常以时不变作为基本假设。时不变假设是否合理主要取决于三个方面:①结构被使用或研究的时间尺度;②结构特性变化的程度;③研究者所关心的结构特性。其中,前两方面通常综合起来考虑,即结构对象在被研究的时间范围内其特性变化的程度。例如,桥梁的使用寿命通常为几十年至数百年,在这期间,桥梁的结构特性可能由于结构老化、疲劳、外界温度变化等因素而随时间变化。对于多数的研究和应用场合,如结构设计、结构动力学分析与仿真等,在研究的时间范围内结构特性的变化在工程中可以忽略,因此桥梁等结构通常认为是时不变的。然而,随着结构动力学领域研究的不断深入和拓展,研究者所关心的结构特性和利用这些特性所开展的应用都在不断增加,原来假设为时不变的结构可能考虑为时变的。例如,同样对于桥梁结构,其材料特性随季节的变化引起结构模态参数的改变在“结构有限元模型更新”中有时是不能忽略的^[4]。

同样,在很多领域工程结构表现出了显著的时变特性。例如,车桥耦合系统的结构特性会随着车辆的移动而变化^[5-7]、体育场馆的结构特性会随着比赛过程中人流的移动而变化^[8]、机械臂的结构特性会随着加工过程中几何特征的改变而变化^[9,10]、重物桥吊系统的结构特性会随着重物位置的改变而变化^[11,12]、风机叶轮和直升机旋翼等回转系统会随着叶片的转动而表现出周期时变的结构特性^[13-15]。

在航空航天领域,结构系统表现出的时变特性尤为突出:燃料快速消耗中的运载火箭^[16-19]、气动加热作用下的高速飞行器^[20,21]、颤振发生时气动刚度不断变化的飞行器^[22,23]、具有可展开或可移动部件的航天器^[24-27]以及可变形飞行器^[28]

等。典型的具体实例有：飞行速度从 255mi/h 升高到 340mi/h^①时，某型机翼一阶弯曲模态的固有频率从 9.23Hz 降低到 8.72Hz，阻尼比从 6.25%降低到 4.25%，若仍视其为时不变结构进行设计会产生较大的分析误差^[29]。为了保证良好的气动特性与运载效率，运载火箭常常呈现出大长细比和低结构质量比的特点。例如，Ares-I 运载火箭的长细比约为 17，其起飞状态下一阶弯曲模态频率低至 0.9Hz 左右，与一级飞行状态火箭比例-积分-微分（proportional, integrating, differentiation, PID）控制器的带宽非常接近^[30]。因此，飞行过程中结构系统的时变特性可能会影响到控制系统乃至整箭的性能^[19]。此外，随着运载火箭质量、推力和长细比的进一步增大，其振动特性变得更加复杂，固有频率呈现出低且密集的特点，具有显著时变特性的结构系统与控制、气动、动力等分系统之间的耦合问题也日渐突出^[31-33]。将运载火箭视为时变结构进行设计可降低结构和其他分系统之间的设计冗余，有助于进一步提升运载火箭的整体性能。

近 20 年来，结构的时变动力学问题逐渐被理论研究者和工程师所关注：一方面，正如上述的工程结构，如果忽略其时变特性将带来不容忽视的误差，从而导致性能下降、功能缺失，甚至任务失败；另一方面，相关理论和技术的创新与进步，使得对时变结构特性和行为的分析与综合成为可能。

1.2 结构模态参数辨识及意义

从系统的观点，结构动力学问题可按照输入（激励）、系统（结构）和输出（响应）三部分及其之间的关系进行专门的研究。通常根据研究目的的不同，结构动力学问题可分为三种基本类型：①正问题，即已知输入和系统，求输出；②第一类反问题，即已知输入和输出，求系统；③第二类反问题，即已知系统和输出，求输入^[34, 35]。第一类反问题是结构动力学系统辨识问题，主要关注如何获取结构动力学系统的动特性，这也是本书主要内容。

结构动特性的表达形式有很多，但相较于物理参数（质量、刚度和阻尼）、脉冲响应函数、频率响应函数（或传递函数）等表达，模态参数（包括固有频率、阻尼比和模态振型等）更能从整体上反映出系统的动态固有特性。在结构动力学研究领域，获取模态参数的研究或工程实施活动称为模态分析。

根据获取模态参数的途径，模态分析分为解析模态分析和实验模态分析^[36]。前者是模态分析的“正问题”，即通过推导结构的振动微分方程来建立解析的空间连续形式的结构动力学特征方程，或者通过有限元分析等方法建立数值的空间离散形式的结构动力学特征方程，进一步求解结构动力学特征方程得到所需的模态参数^[36, 37]；

① 1mi = 1609.344m。

后者是模态分析的“反问题”，即利用振动结构的输入（激励）信号和输出（响应）信号，通过模态参数辨识方法得到相应的模态参数^[1,38]。以实验为基础的模态分析能够揭示结构真实的整体动力学特性，能反映出理论模型（如有限元模型）无法精确建模的部分。实验模态分析可分为五个部分（或步骤）^[36]：实验系统搭建与标定、实验数据采集、模态参数辨识、模态参数验证和模态参数应用。其中，模态参数辨识是实验模态分析的关键，是通过实验获取模态参数的核心内容和主要方法论。

以模态参数辨识为核心的实验模态分析有如下几方面的意义和用途^[36, 37, 39-45]。

（1）结构动力学性能的评价。辨识得到的模态参数能够很好地反映结构的动力学性能，为结构分析、设计、安装等方面提供依据。

（2）强迫振动响应分析。通过模态参数辨识可以得到所需的模态参数，从而建立用模态参数表示的结构动力学模型。那么，给定时域或频域形式的外界激励，就可以通过此动力学模型预测结构时域或频域的响应。

（3）灵敏度分析与结构动力学修改。以泰勒展开为基础的灵敏度分析可以用来确定模态参数对质量、阻尼或刚度的变化率。这样的灵敏度分析能够确定在结构的哪一个部分做什么样的改动、对哪一方面的结构动力学特性改进最为有效。在灵敏度分析的基础上，通过结构动力学修改可预测已知系统修改后的结构动力学特性。

（4）动态子结构与结构动力学集成。利用辨识得到的模态参数可以描述对应的动态子结构。这样的子结构可以与同样由实验模态分析得到的子结构或由解析模态分析得到的子结构集成，预测系统整体的结构动力学特性。

（5）模型修正。模型修正是利用实验模态分析来修正对应结构的有限元模型。有限元分析效率高、成本低，可缩短设计周期，降低结构振动实验的高额花费，但是有限元分析与实验结果之间往往存在误差。模型修正使用于分析的有限元模型能够更好地代替真实的结构动力学模型。

（6）载荷辨识。利用辨识得到的模态参数和实际测量的工作状态下的结构动力学响应，可以辨识出工作状态下作用在结构上的外载荷。载荷辨识在航空航天等载荷难以直接测量的领域得到了广泛的应用。

（7）结构健康监测。对结构载荷和响应完成实时的测量，并进行模态参数辨识得到实时的结构模态参数，进而通过检验实时得到的模态参数来监测结构的健康状况。基于模态分析的结构健康监测特别适用于大型结构，如大坝、体育馆、空间站等。

（8）结构故障诊断。通过比较健康结构与故障结构的模态参数可判断结构故障的程度与故障发生的位置。基于模态分析的结构故障诊断成本低，且避免了切割解剖等方式对结构的破坏。

对于很多工程结构，很难在工作状态下测量作用在结构上的动态载荷或很难施加可控可测的激励，或者这些结构运行状态下具有的动特性与实验室状态具有较大

的差异,如大型的桥梁、石油钻井平台、高层建筑、飞行中的火箭和飞机、工业机器人等。同时这样的结构也很难搬到实验室中完成已知输入-输出(input-output)的实验模态分析(experimental modal analysis, EMA)。近十年来,已先后发展出多种针对输入(激励)信号未知的仅输出(output-only)模态分析方法,称为运行模态分析(operational modal analysis, OMA)。严格来说,仅输出的运行模态分析和已知输入-输出的实验模态分析同属广义实验模态分析,本书不讨论解析模态分析,因此为方便叙述,以下将已知输入-输出的实验模态分析简称为实验模态分析,广义的实验模态分析简称为模态分析。运行模态分析与实验模态分析相比有如下优点和不足^[46, 47]。

(1) 运行模态分析保持结构真实的工作状态,包括边界条件、与环境的相互作用等。这样的工作状态很难在实验室中模拟,如高速运行的轮船会受到周围水的附加作用,从而导致其模态参数不仅与结构特性有关,还与周围的水环境和航行速度有关。

(2) 对于大型桥梁结构,人工激励花费高昂,在某些情况下甚至无法实施^[48],而运行模态分析无须施加人工激励,可极大地节省开支,并可完成无法施加人工激励情况下的模态分析。

(3) 运行模态分析的模态参数辨识结果反映的是结构在实际工作状态下的动态特性,可实现连续在线的结构健康监测和结构振动控制。

(4) 由于输入(激励)信号未知,运行模态分析无法直接得到模态比例因子。

(5) 在运行模态分析中,通常假设未知的环境激励信号为白噪声。然而,当激励中含有谐波分量时,响应信号功率谱密度函数会出现额外的峰值并导致虚假模态的产生。

(6) 在运行模态分析中,当环境激励较弱时,响应信号功率谱密度函数的信噪比较低,会降低模态参数辨识的质量。

时变结构往往在工作状态中才显示出其时变的特性,并且多数的时变结构无法在实验室完成相应的模态实验,如运载火箭、大型工业机械臂、铁路桥等,因此通常情况下在实验室中对时变结构完成已知输入-输出的模态分析不具有足够的实用价值。因此,时变结构的模态分析通常对应的是结构在实际工作状态下的运行模态分析,也是本书所介绍的范围。一方面,工程实际中存在众多的时变结构,并且随着科学技术和工程应用的不断进步,将出现越来越多的时变结构,工程应用中需要对这些结构的动力学性能有深入的了解和掌握^[49];另一方面,结构的模态参数可用于上述的多个领域,为结构模型修正、健康监测、故障诊断、结构振动控制等提供强大的技术支持。因此,开展时变结构的模态参数辨识研究,不但可以拓展时变系统辨识理论研究的广度和深度,还在航空航天等领域时变结构的分析与设计方面具有很高的工程实用价值。

1.3 时变结构模态参数辨识方法的分类

对时不变结构模态参数辨识方法的分类可以按照图 1.1 进行。按照辨识域的不同可分为频域 (frequency domain) 和时域 (time domain); 按照是否采用参数化的辨识模型可分为非参数化 (non-parametric) 和参数化 (parametric); 按照是否包含输入数据可分为输入-输出辨识方法和仅输出辨识方法; 按照辨识过程对数据的运用方式可分为批量 (batch) 和递推 (recursive)。各种分类的方式是交叉的, 可以相互组合, 如经典的基于频率响应函数的最小二乘复频域法就是属于频域的参数化的采用输入-输出数据的批量方法。当然也并非所有组合都存在, 如时域与非参数化 (如图 1.1 中的 “×”)。

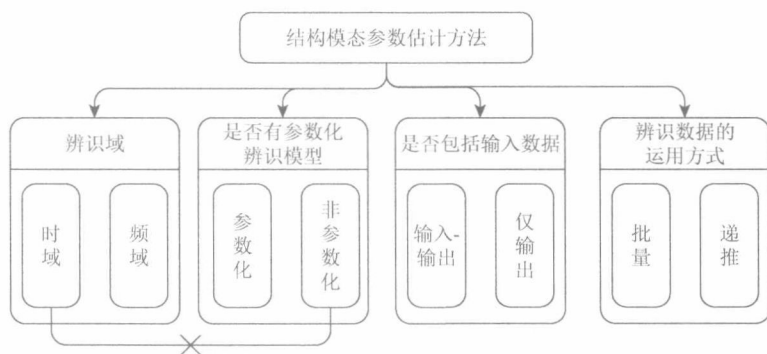


图 1.1 时不变结构模态参数辨识方法的分类

类比于时不变结构模态参数辨识方法, 对时变结构模态参数辨识方法进行分类。时变结构通常仅在运行状态才表现出其时变的动特性, 因此仅考虑辨识数据为仅输出的情况。对于时变结构模态参数辨识方法可以用三个维度进行分类。如图 1.2 所示, 按照三个维度将时变结构模态参数辨识方法在三维空间中划分为八个象限, 除不存在非参数化的时域方法外 (占图 1.2 中的两个象限), 1.4 节~1.6 节将分类综述各类方法。

频域辨识方法是指以频率响应函数 (或传递函数) 等为基础的模态参数辨识方法; 时域辨识方法是指以时域信号为基础的模态参数辨识方法^[35]。相较于频域辨识方法, 时域辨识方法无须将时域信号变换到频域中去, 避免了由于数据变换 (如 Fourier 变换等) 而引起的误差 (如泄漏等), 且为直接从输出信号中获取模态参数创造了条件。需要说明的是, 对于时变结构, 在将时域信号变换到频域