

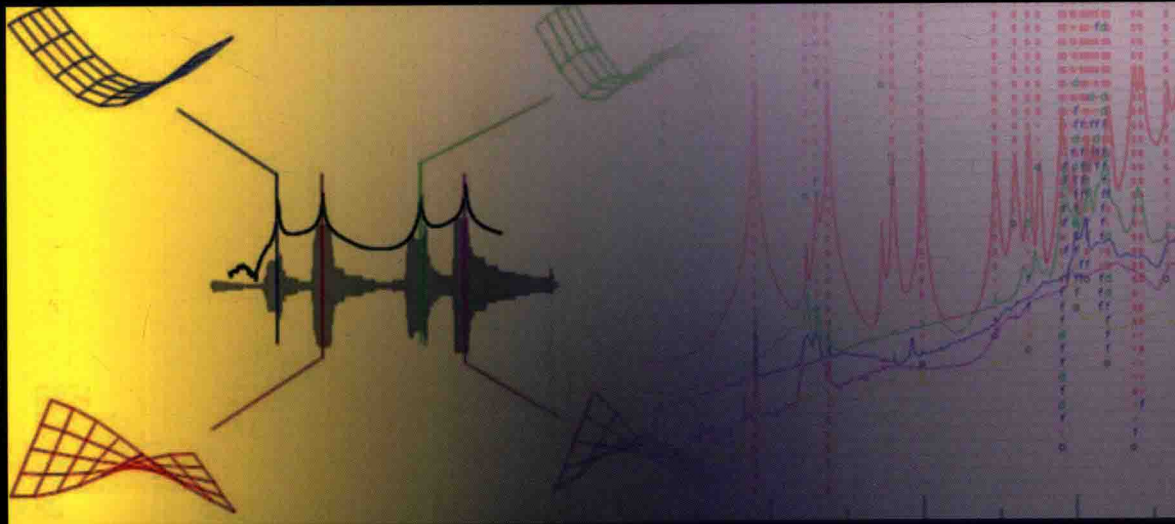
# 模态试验实用技术

## 实践者指南

Modal Testing: A Practitioner's Guide

[美] 彼得·阿维塔比莱 (Peter Avitabile) 著  
谭祥军 钱小猛 译

一本书读懂、读透模态测试技术  
模态大师Peter Avitabile教授经典之作  
畅销书《从这里学NVH》作者谭祥军主译



模态空间系列丛书

# 模态试验实用技术

## 实践者指南

[美] 彼得·阿维塔比莱 (Peter Avitabile) 著  
谭祥军 钱小猛 译



机械工业出版社

本书分为两个部分：第一部分从非数学角度简要综述了解决结构振动问题的方法，并介绍了一些试验模态分析所需的基本理论、信号处理、激励技术、模态参数识别等内容；第二部分主要从现实经验出发，讲述了测试设置、锤击测试、激振器测试和参数估计的注意事项，以及试验过程中的一些经验与技巧，并介绍了一些模态实例。本书语言生动，通俗易懂，内容侧重于模态测试实用技术及实践经验，可以帮助模态测试相关人员轻松、快速、准确地掌握基本概念、方法和技巧，提升工程实践能力。

本书可以作为机械制造、汽车、航空航天、石油化工、海洋工程、船舶等领域的工程技术人员和科研工作者从事模态测试工作的参考书，也可以作为理工类院校师生学习模态测试理论和方法的参考教材。

Copyright © 2018 John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Modal Testing: A Practitioner's Guide*, ISBN: 978-1-119-22289-7, by Peter Avitabile, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder. Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字：01-2018-4440 号。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

模态试验实用技术：实践者指南/(美)彼得·阿维塔比莱 (Peter Avitabile) 著；谭祥军，钱小猛译. —北京：机械工业出版社，2019.8  
(模态空间系列丛书)

书名原文：Modal Testing: A Practitioner's Guide

ISBN 978-7-111-63234-4

I. ①模… II. ①彼… ②谭… ③钱… III. ①模态分析 IV. ①O3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 144297 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑：徐 强 责任编辑：徐 强

责任校对：刘雅娜 封面设计：鞠 杨

责任印制：李 昂

北京瑞禾彩色印刷有限公司印刷

2019 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 27.75 印张 · 666 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-63234-4

定价：139.00 元

电话服务

客服电话：010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机 工 官 网：www.cmpbook.com

机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

金 书 网：www.golden-book.com

机工教育服务网：www.cmpedu.com

首先，能翻译出版 Peter Avitabile（彼得·阿维塔比莱）教授这本书，我感到非常高兴，也很欣慰。毕竟之前翻译的他的 *Modal Space in Our Own Little World*（《我们小小世界中的模态空间》）没能出版，多多少少有些遗憾。好在这本书拿到了版权，总算弥补了之前的遗憾。

Peter Avitabile 教授的这本 *Modal Testing: A Practitioner's Guide* 于 2017 年 11 月由威立集团出版上市，在知悉这一情况之后，我立即通读了全书。这本书不同于其他的模态书籍，市面上的模态书籍往往包含太多的理论公式，而这本书更偏向于模态实践，解决模态测试与分析过程中的现实问题。这本书也整合了 Peter Avitabile 教授的 *Modal Space in Our Own Little World* 中的诸多主题。*Modal Space in Our Own Little World* 是 Peter Avitabile 教授从 1998 年开始，每两个月撰写一篇长度不超过 2 页的试验模态测试与分析方面的小文章集合，截至 2014 年 12 月，他已持续撰写了 17 年。这些小文章不涉及太多的理论公式，通俗易懂，使读者更易于明白这些知识点。同样的道理，在本书中，Peter Avitabile 教授仍采用通俗易懂的语言撰写，很少涉及过多的理论公式，第 2 章是个例外，因为第 2 章介绍的是单自由度系统和多自由度系统的模态分析理论。

在通读全书之后，我将情况反馈给了机械工业出版社的徐编辑，不久之后，出版社就从威立集团拿到了这本书的版权。英文原著共 524 页，为了尽快完成这本书的翻译工作，以期尽早出版，我邀请了同事钱小猛一起翻译。钱小猛硕士期间就从事模态分析软件开发工作，对模态分析有很深的理解与认识。他一听是 Peter Avitabile 的著作，简单翻看了目录后欣然应允。在翻译分工方面，我负责翻译全书的前 5 章和附录部分，钱小猛负责翻译 6~11 章，最后由我负责校订和统筹全文。2018 年 9 月中旬，我们就完成了初稿，但为了翻译得更准确，我们又花费了近 4 个月的时间对初稿进行校订，终于在 2019 年 1 月底校订完成并提交给徐编辑。

本书的译稿在未经仔细校订之前就发布在“模态空间”微信公众号中，所以最初的翻译可能存在一些不准确，或者不通顺的地方，但是交给出版社的稿件，是经过我们多次校订，甚至某些地方是经过反复讨论的。有几处当拿不准译义时，我们请教了西门子工业软件（北京）有限公司的技术专家 Luc Pluym 先生，并得到了他的指导，在此表示感谢！

现今，模态分析越来越受到各个行业的重视，这是因为模态分析是分析

结构的固有属性，可以帮助用户评价现有结构的动态特性、控制结构的辐射噪声、降低产品的噪声水平并找到振动噪声产生的根源，以及进行结构动力学修改、产品优化设计、验证有限元模型、提高数字模型的精度等。通过模态分析，用户可以深入了解产品的动力学特性，使得系统动力学设计对产品开发决策带来积极的影响。用户也可以使用模态分析的结果来检测产品的变化或损坏，以便及时采取优化对策。因此，获得准确的模态参数对产品设计或解决运行中的实际问题至关重要，但获得准确的模态参数的前提是掌握模态测试与分析的基本技巧与方法。而这本书在不涉及太多理论的前提下，可以迅速地帮助读者提高模态测试与分析的实践经验，指导读者解决测试分析过程中可能遇到的各种问题。

因此，如果你有模态试验任务，或者研究课题涉及模态试验，那么这本书你值得拥有，它能快速地指导你进行模态试验。当然一本书很难囊括模态分析的方方面面，如果你还想了解信号采集与处理方面更详细的内容，可以参考模态空间系列丛书的第一本图书《从这里学 NVH》。如果你还关心 NVH 其他方面的内容，如声学知识、旋转机械 NVH、TPA 分析等方面，那么推荐你关注“模态空间”微信公众号，该微信公众号的二维码为：



由于译者水平有限，翻译过程中难免出现误译、错译等情况，敬请广大读者批评指正，并提出宝贵意见。谭祥军的电子邮箱：linmue@qq.com，钱小猛的电子邮箱：zjuchien@qq.com。

谭祥军  
2019 年春于北京

这是一本关于试验模态分析的书。当然，关于这个主题，市面上有许多其他教材，但这本书不同于那些教材。那些教材包含了模态研究人员或这方面的博士生期待的大量理论知识，但从实用角度来讲，模态试验人员不需要这些深厚的理论基础，他们更希望得到执行日常模态测试和从测量数据中开发一个模型所需要的一些关键信息。

本书是为各类新手、管理人员、工程师和工程技术人员而写的，适合于：

- 需要具备一些基础知识进行模态测试的新手们。
- 未涉及实验动力学测试的工程师。
- 需要做一些测试但又没有人指导的研究生。
- 具有模态试验任务的小公司里的工程师。
- 经验丰富的模态测试工程师晋升为管理者或者退休，需要承担他们之前工作的其他工程师。
- 需要理解模态基础知识，以便为重要的模态项目寻求资金支持的管理人员。
- 需要撰写测试方案、开展测试以及从获得的数据中提取有用的信息的工程师。
- 需要采集有用的数据开发模型的工程技术人员。
- 为了提供用于评估系统、理解动态特性和解决复杂的结构动力学问题的模型，需要理解每一步都要做什么的所有人。

虽然本书并不是为了给那些精通模态分析的人留下深刻印象，但是如果他们从来没有在实验室环境中工作过，并且只开发了解决这些问题的理论方法，那么这些人会在本书中找到关于模态测试非常实用的信息。本书同样适合于做研究的博士生，他们的研究课题需要开发实验结构动力学模型，他们并不直接专注于实验模态分析，而他们的导师又不熟悉模态分析，但他们的确需要有意义的测量，使他们不至于陷入复杂的实验模态分析中去。

本书也可以作为本科生的课堂教材，给他们介绍进行实验模态测试必备的基本概念。同样可以作为研究生结构动力学课程中与实验相关的教材，或者作为振动课程的补充。本书材料丰富，便于高年级本科生或低年级研究生进行实验模态分析学习时参考。

本书原本专注于实验模态分析的实践方面，但为了说明实验模态测试的

某些方法论，以及这些方法的理论基础来源，本书也有少量的理论描述部分。但多数情况下，只给出了相应理论（或者是一些推导的最终公式），因为本书不是要描述理论的详细细节，而是要应用这些理论去解决现实问题。在振动领域，市面上有大量的好教材，但很少有教材包含本书中的内容。市面上也有许多实验模态分析的教材，但它们包含了太多的理论，都假设现实的测试很简单或很直观。

早在 20 世纪 90 年代末，实验力学学会下属的 *Experimental Techniques*（《实验技术》）杂志连载了“模态空间——回归基础”的系列文章，这个系列持续连载了 17 年。这个系列解决了实验模态分析测试人员经常会遇到的各类简单的问题。这些文章长度从没有超过两页，介绍了实验模态分析的各类主题。这些文章是一篇一篇发布的，之所以这样做，是因为这些材料来源于每年的行业模态研讨会、模态教学和在这个领域工作 20 多年中收到的许多有关模态问题的邮件。本书将之前所有的那些材料放置在一起形成了一个更加完整的知识体系。

因此，本书分为两大部分，第一部分更多地介绍传统的计算模态与实验模态分析相关的理论知识，第二部分主要介绍了与实验模态分析相关的实践问题，之后的附录介绍了一些实用信息。第 1 章是对整个实验模态测试的简单概述，这对于从事模态分析的新人来说是非常有帮助的。第 2 章从物理空间、模态空间、拉氏域和频域描述了与单自由度系统和多自由度系统相关的理论方程。第 3 章总结了所有与数字信号处理技术相关的问题，采集数据时需要使用这些数字信号处理技术，同时也描述了与频域数据和干扰相关的采样问题。第 4 章介绍了当今模态测试常用的激励技术——锤击激励和激振器激励。第 5 章包含了模态参数估计必备的一些基本信息。第 6 章与测试设置有关，贯穿整个模态测试过程。第 7 章列举了许多与锤击测试相关的实例，锤击测试是传统实验模态测试应用最为广泛的激励技术。第 8 章进一步讨论了激振器激励技术，以及与执行这类测试相关的问题，也包括多输入多输出测试。第 9 章提供了采用不同的模态参数提取方法时需要考虑的数据缩减思路。第 10 章和 11 章给出了与模态测试相关的各种不同问题，这些问题很难放在之前的章节中，因为它们跨越了多个主题，对于特定的一章来说，放置在哪里都是不合适的。书中同时也有几个附录，给出了一些非常简单的分析模型，这可以帮助展示一些数学处理过程。这些附录提供的信息对模态测试工程师来说是极其有帮助的。最后几个附录给出了一些数据用于模态参数估计，同时也给出了结果。这些数据在本书的网页上提供了通用数据格式，读者可以自行下载，使用自己的软件进行处理，处理后的结果可与书中的结果进行对比。

最后，我在模态分析领域工作这些年里，有太多的人需要感谢。我于 20 世纪 70 年代中期参加工作，早期遇到了 John O'Callahan 和 G. Dudley Shepard，他们当时就读于洛厄尔大学（前洛厄尔理工大学）。John 是分析人员，而 Dudley 是实验人员，他们在马萨诸塞州立大学洛厄尔校区模态分析和控制实验室是一对搭档。我曾以顾问、导师和同事等多种不同的身份与 John 共事。他的分析能力很强，我从他那里学到了很多。从 20 世纪 80 年代后期到 20 世纪末，我同 Chuck Van Karsen 共同教授了许多实验模态分析研讨班，这些研讨班经常被称为 Chuck 和 Peter 秀。许多人评论说，这些教材彼此相互补充，讲座应该总是以相同的方式进行，因为他们都是安排好的。但现实情况是，在每次讲座之前，我们

都精心挑选，从不教授相同的内容，每次都是相互补充。我希望 Chuck 从我这里学到的东西与我从他那里学到的东西一样多，这些年教授模态讲座积累成了本书。Rose Hulman 的 Phillip Cornwell 是我这些年作为这个领域的学者遇到的优秀教师之一。在创作本书的过程中，Phillip 提出了许多宝贵的建议。

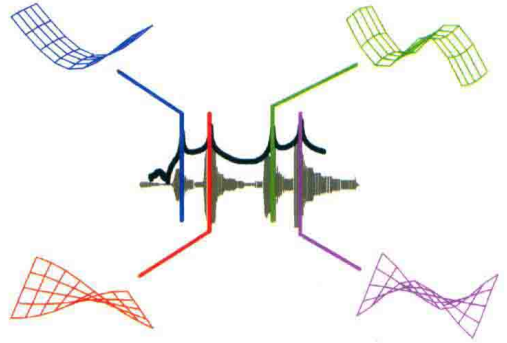
在马萨诸塞州立大学洛厄尔校区前模态分析和控制实验室及现今的结构动力学和声学系统实验室工作的这些年里，我非常幸运地遇到了许多优秀的学生。他们当中的许多人对我的研究课题都做出了非常重大的贡献。虽然不能一一列出他们的名字，但我确实知道他们对本书有贡献。必须提及他们当中的几位，因为他们付出了远比别人更多的支持与努力。Pawan Pingle 为校对本书付出了太多的时间，同时也对一些方面提供了不同的观点。为了说明一个或两个观点，Louis Thibault 和 Tim Marinone 提供了一些特别的支持。Sergio Obando 进行了多个模态测试，为本书提供了模态数据支持。Julie Harvie 为本书提供了有用的反馈，同时为了说明书中的许多问题，也进行了许多次测试。Patrick Logan、Tina Dardeno 和 Dagny Joffre 也是本书的贡献者，他们在不同的方面做出了贡献，特别是将这些材料组织在一起方面。所有这些都使我这几十年的工作变得更有价值。在此只能简单描述，但我对他们所有人的感激之情是不能用这几句话就能简单描述的。他们是我模态家族的成员，他们都愿意满足我向他们提出的疯狂要求。

有一次，我们需要对一个大型复杂的结构进行锤击测试，测试时采用了不同的方法。学生站在车载升降台上，使用一个 3ft (1ft = 0.3048m) 长的大力锤对待测结构进行激励。单次锤击获得的测量受噪声干扰明显，频带低，且纪录时间长。于是，我决定尝试一些不同的方法。我对着对讲机喊道：“请听仔细了”，然后我继续说，“请你采用随机方式对结构进行锤击，锤击持续时间为采集时间 30s 的前 20s，当你锤击结构同一点时，保持测量的随机性。”在学生迟疑了 5 ~ 10s 之后，回复了我：“什么？您能重复一下吗？”当然，我重复了一遍，但说得非常慢以确保他能听清楚我说的每个字。在我附近负责数据采集的学生也停止了采集，他也相当诧异，与站在升降台上负责锤击的学生一样诧异。负责数据采集的学生说：“我的天呀，你不是一直告诉我们锤击时要防止连击，而且你从来没有要求我们采用多次锤击进行测试！你言语不一致呀，我简直难以相信。”当然，一旦评估了每个方面，多次锤击测试真的与我们经常进行的激振器猝发随机测试没什么不同，只不过是用力锤激励而已。本书中有许多这样的实例，测试过程中采用了不同寻常的方法，数据采集表明这些测试中长期遵行的原则并不真的正确。本书使你理解一些基础，同时也使你思考之前遵行的原则是否正确。本书使你明白一些基本的潜在概念，同时也提供一些方法，以便模态测试能合理地进行，获得尽可能好的测量结果，从而提取到有效的模态参数。

事实上，我仍然每天都在学习一些新的东西。当采集测量数据时，检查工作是一项基本的技能，检查测量数据的每一项，试图理解测量和模态参数提取中的各项影响，理解模态分析的基本理论。这的确不容易。希望本书能为你提供模态测试和模态参数提取的一些基本信息。每次测试都是不同的，所有的答案不可能都包含在这一本书中，但这些概念和思路确实能帮助你更好地进行实验模态测试。

## 最后一件事

对于所有的模态测试人员  
过去，现在和将来……  
质疑假设！



本书相关内容对应的网页：[www.wiley.com/go/avitabile/modal-testing](http://www.wiley.com/go/avitabile/modal-testing)

译者序  
前言

## 第一部分 使用频响函数方法的实验模态分析概述

<b>第 1 章 实验模态分析介绍：非数学角度的简单概述</b> .....	<b>2</b>
1.1 你能为我解释模态分析吗？ .....	4
1.2 什么样的测量称为 FRF？ .....	8
1.3 锤击测试和激振器测试有什么不同？ .....	13
1.4 锤击测试最需要考虑什么？ .....	16
1.5 激振器测试最需要考虑什么？ .....	17
1.6 请告诉我窗函数的更多方面，它们似乎相当重要！ .....	19
1.7 从平板的 FRF 怎样得到模态振型？ .....	20
1.8 模态数据和工作数据 .....	23
1.8.1 什么是工作数据？ .....	23
1.8.2 什么是好的模态数据？ .....	27
1.8.3 采集模态数据还是工作数据？ .....	28
1.9 总结 .....	30
<b>第 2 章 实验模态分析的一般理论</b> .....	<b>31</b>
2.1 引言 .....	31
2.2 基本模态分析理论——SDOF .....	32
2.2.1 单自由度系统方程 .....	32
2.2.2 简谐激励下的单自由度系统响应 .....	34
2.2.3 单自由度系统的阻尼估计 .....	35
2.2.4 阻尼变化下的响应评估 .....	36
2.2.5 单自由度系统的拉普拉斯域方法 .....	39
2.2.6 系统传递函数 .....	40
2.2.7 传递函数的不同形式 .....	41
2.2.8 单自由度系统的留数 .....	41
2.2.9 单自由度系统的频响函数 .....	41
2.2.10 单自由度系统的传递函数、频响函数、S 平面 .....	42

2.2.11	单自由度系统频响函数的控制区域	42
2.2.12	频响函数的不同形式	46
2.2.13	复数频响函数	46
<b>2.3</b>	<b>基本模态分析理论——MDOF</b>	<b>48</b>
2.3.1	多自由度系统方程	48
2.3.2	多自由度系统的拉氏域	56
2.3.3	频响函数	58
2.3.4	从频响函数中得到模态振型	59
2.3.5	点到点的频响函数	62
2.3.6	正弦激励下的多自由度系统响应	65
2.3.7	实例：三个测量自由度的悬臂梁	66
2.3.8	时域、频域和模态域总结	74
2.3.9	使用模态叠加计算强迫响应	74
<b>2.4</b>	<b>总结</b>	<b>78</b>
<b>第3章</b>	<b>与实验模态分析相关的信号处理和测量方法</b>	<b>80</b>
<b>3.1</b>	<b>引言</b>	<b>80</b>
<b>3.2</b>	<b>时域和频域</b>	<b>80</b>
<b>3.3</b>	<b>数据采集的一些通用信息</b>	<b>82</b>
<b>3.4</b>	<b>时域信号数字化</b>	<b>83</b>
<b>3.5</b>	<b>量化</b>	<b>84</b>
3.5.1	ADC 欠载	84
3.5.2	ADC 过载	86
<b>3.6</b>	<b>AC 耦合</b>	<b>87</b>
<b>3.7</b>	<b>采样定理</b>	<b>87</b>
<b>3.8</b>	<b>混叠</b>	<b>90</b>
<b>3.9</b>	<b>什么是傅里叶变换？</b>	<b>91</b>
3.9.1	傅里叶变换和离散傅里叶变换	92
3.9.2	FFT：周期信号	93
3.9.3	FFT：非周期信号	93
<b>3.10</b>	<b>泄漏和最小化泄漏</b>	<b>95</b>
<b>3.11</b>	<b>窗函数和泄漏</b>	<b>96</b>
3.11.1	矩形窗	98
3.11.2	汉宁窗	98
3.11.3	平顶窗	99
3.11.4	比较窗函数可能的最严重泄漏失真情况	99
3.11.5	比较矩形窗、汉宁窗和平顶窗	99
3.11.6	力窗	99
3.11.7	指数窗	99

3. 11.8	窗函数的频域卷积 .....	102
<b>3.12</b>	<b>频响函数公式 .....</b>	<b>103</b>
<b>3.13</b>	<b>典型的测量 .....</b>	<b>104</b>
3. 13.1	时域信号和自功率谱 .....	104
3. 13.2	典型测量: 互功率谱 .....	104
3. 13.3	典型测量: 频响函数 .....	104
3. 13.4	典型测量: 相干函数 .....	104
<b>3.14</b>	<b>时域和频域的关系定义 .....</b>	<b>107</b>
<b>3.15</b>	<b>带噪声的输入-输出模型 .....</b>	<b>108</b>
3. 15.1	$H_1$ 估计: 只有输出有噪声 .....	108
3. 15.2	$H_2$ 估计: 只有输出有噪声 .....	108
3. 15.3	$H_1$ 估计: 只有输入有噪声 .....	109
3. 15.4	$H_2$ 估计: 只有输入有噪声 .....	109
<b>3.16</b>	<b>总结 .....</b>	<b>109</b>
<b>第4章</b>	<b>激励技术 .....</b>	<b>110</b>
<b>4.1</b>	<b>引言 .....</b>	<b>110</b>
<b>4.2</b>	<b>锤击激励技术 .....</b>	<b>112</b>
4. 2.1	力锤 .....	113
4. 2.2	力锤锤头选择 .....	114
4. 2.3	锤击激励有效频率范围 .....	114
4. 2.4	锤击激励的力窗 .....	116
4. 2.5	预触发延迟 .....	117
4. 2.6	二次连击 .....	117
4. 2.7	锤击的响应 .....	118
4. 2.8	移动力锤与固定力锤的对比和互易性 .....	119
4. 2.9	锤击测试: 一组测量实例 .....	121
<b>4.3</b>	<b>激振器激励 .....</b>	<b>131</b>
4. 3.1	模态激振器设置 .....	132
4. 3.2	激振器激励技术的发展 .....	134
4. 3.3	正弦扫频激励 .....	134
4. 3.4	纯随机激励 .....	134
4. 3.5	加窗的纯随机激励 .....	135
4. 3.6	纯随机激励重叠处理 .....	136
4. 3.7	伪随机激励 .....	137
4. 3.8	周期随机激励 .....	137
4. 3.9	猝发随机激励 .....	138
4. 3.10	正弦快扫激励 .....	140
4. 3.11	数字步进正弦激励 .....	140

<b>4.4 通过焊接结构对比不同的激励</b>	<b>141</b>
4.4.1 不加窗的随机激励	142
4.4.2 加汉宁窗的随机激励	142
4.4.3 不加窗的猝发随机激励	142
4.4.4 不加窗的正弦快扫激励	143
4.4.5 比较随机激励、猝发随机和正弦快扫	144
4.4.6 比较共振峰处的随机激励和猝发随机	145
4.4.7 使用正弦快扫做线性检查	145
<b>4.5 多输入多输出测量</b>	<b>146</b>
4.5.1 对比多输入和单输入测试 (一)	147
4.5.2 焊接件的多输入和单输入对比 (一)	148
4.5.3 对比多输入和单输入测试 (二)	148
4.5.4 焊接件的多输入和单输入对比 (二)	150
4.5.5 多部件结构的 MIMO 测量	150
<b>4.6 总结</b>	<b>154</b>
<b>第5章 模态参数估计技术</b>	<b>155</b>
<b>5.1 引言</b>	<b>155</b>
<b>5.2 实验模态分析</b>	<b>155</b>
5.2.1 数据的最小二乘近似	155
5.2.2 模态参数估计方法分类	158
<b>5.3 模态参数提取</b>	<b>163</b>
5.3.1 峰值拾取技术	163
5.3.2 圆拟合——Kenedy 和 Pancu	163
5.3.3 SDOF 多项式	164
5.3.4 带外模态的残余影响	164
5.3.5 MDOF 多项式	166
5.3.6 最小二乘复指数法	166
5.3.7 时域和频域估计的高级形式	167
5.3.8 通用的时域技术	167
5.3.9 通用的频域技术	168
5.3.10 时域和频域表示的一般考虑因素	168
5.3.11 模态参数估计的其他方面	168
5.3.12 模态参数估计的两个步骤	169
<b>5.4 模态识别工具</b>	<b>170</b>
5.4.1 集总函数	170
5.4.2 模态指示函数	170
5.4.3 复模态指示函数	171
5.4.4 稳态图	171

5.4.5 PolyMAX .....	174
<b>5.5 模态模型验证工具 .....</b>	<b>175</b>
5.5.1 使用提取的参数综合频响函数 .....	175
5.5.2 模态置信准则 .....	176
5.5.3 模态参与因子 .....	178
5.5.4 模态超复杂性 .....	179
5.5.5 平均相位共线性和平均相位偏差 .....	179
<b>5.6 工作模态分析 .....</b>	<b>179</b>
<b>5.7 总结 .....</b>	<b>182</b>

## 第二部分 试验模态测试实践中的注意事项

<b>第6章 试验设置的注意事项 .....</b>	<b>184</b>
6.1 测试方案 .....	185
6.2 需要多少阶模态? .....	186
6.3 感兴趣的频率范围 .....	189
6.4 可能的传感器 .....	191
6.5 测试配置 .....	193
6.6 需要多少测点? .....	194
6.7 激励技术 .....	197
6.8 需要考虑的杂项 .....	197
6.9 总结 .....	203
<b>第7章 锤击测试注意事项 .....</b>	<b>204</b>
7.1 锤击位置 .....	204
7.2 锤头和频率范围 .....	204
7.3 用于不同尺寸结构的力锤 .....	206
7.4 锤击方向倾斜和位置偏差是如何影响测量的? .....	211
7.4.1 锤击方向倾斜 .....	211
7.4.2 锤击位置不一致 .....	211
7.5 力锤的分析带宽 .....	214
7.6 使用 ICP 型加速度计进行低频测量时的注意事项 .....	219
7.7 互易性测量的注意事项 .....	220
7.8 移动力锤与移动加速度计 .....	222
7.9 挑选合适的参考点位置 .....	223
7.10 连击难题和注意事项 .....	223
7.10.1 学术型结构 .....	224
7.10.2 大型风机叶片 .....	227
7.11 锤击测量中的“滤波器振铃”是什么? .....	229

7.12	测试带宽远大于期望的频率范围 .....	230
7.13	为什么结构的响应需要在采样末端衰减到零? .....	233
7.14	测量未过载但传感器却饱和了 .....	236
7.14.1	第一种情况:非常灵敏的加速度计施加指数窗 .....	236
7.14.2	第二种情况:非常灵敏的加速度计不加窗 .....	236
7.14.3	第三种情况:不太灵敏的加速度计不加窗 .....	239
7.15	力谱衰减多少是可以接受的? .....	240
7.16	可以在测试过程中更换力锤来避免连击吗? .....	242
7.17	总结 .....	245
<b>第8章</b>	<b>激振器测试注意事项 .....</b>	<b>246</b>
8.1	硬件相关的一般问题 .....	246
8.1.1	激振器和功率放大器的一般信息 .....	246
8.1.2	激振器功放设置为恒流或恒压模式有什么区别? .....	246
8.1.3	有些激振器有耳轴:是否真的需要,为什么要有它? .....	247
8.1.4	模态测试中激振器最佳的激励位置在哪里? .....	247
8.1.5	测试时如何约束激振器? .....	248
8.1.6	悬挂激振器进行横向激励的最佳方式是什么? .....	248
8.1.7	激振器设置中最常见的现实故障是什么? .....	249
8.1.8	激振器的正确激励量级是多大? .....	249
8.1.9	模态测试应该使用几个激振器? .....	249
8.1.10	激振器和顶杆对准问题 .....	250
8.1.11	何时将激振器与结构连接? .....	250
8.1.12	不测试时是否应该断开顶杆连接? .....	251
8.1.13	力传感器或阻抗头必须安装在顶杆的结构侧吗? .....	252
8.1.14	什么是阻抗头?为什么要用它?哪里用到它? .....	252
8.2	顶杆相关问题 .....	254
8.2.1	为什么要使用顶杆? .....	254
8.2.2	一个设计较差的激振器/顶杆设置会产生不正确的结果吗? .....	255
8.2.3	顶杆和顶杆在测量频响函数中的影响 .....	257
8.3	激振器相关问题 .....	263
8.3.1	具有强方向性模态的结构是否需要 MIMO? .....	263
8.3.2	激振器推力量级和 SISO 与 MIMO 的注意事项 .....	264
8.4	总结 .....	273
<b>第9章</b>	<b>洞悉模态参数估计 .....</b>	<b>274</b>
9.1	引言 .....	274
9.2	模态指示工具帮助识别模态 .....	275
9.3	简单系统的 SDOF 和 MDOF 拟合对比 .....	277
9.4	局部拟合和整体拟合对比:MACL 框架 .....	278

9.5	重根：复合梁 .....	280
9.6	风机叶片：相同的结构但模态大不相同 .....	281
9.7	揭秘稳态图 .....	283
9.8	揭秘曲线拟合 .....	286
9.9	曲线拟合不同频带的极点和留数 .....	289
9.10	使用多个频带拼接的模态参数综合 FRF .....	290
9.11	一个大型多参考点模态测试的参数估计 .....	291
9.11.1	第一种情况：使用所有测量的 FRF .....	292
9.11.2	第二种情况：使用挑选的测量 FRF 数据 .....	296
9.11.3	第三种情况：使用 PloyMAX .....	300
9.12	工作模态分析 .....	304
9.13	总结 .....	308
<b>第 10 章</b>	<b>一般注意事项 .....</b>	<b>309</b>
10.1	试验模态测试：思维过程揭秘 .....	314
10.2	FFT 分析仪设置 .....	322
10.2.1	FFT 分析仪通用设置 .....	322
10.2.2	锤击测试设置 .....	322
10.2.3	激振器测试设置 .....	323
10.3	日志页 .....	324
10.4	实践中的注意事项：清单 .....	324
10.4.1	分析仪设置清单 .....	324
10.4.2	锤击测试清单 .....	326
10.4.3	激振器测试清单 .....	327
10.4.4	测量充分性检查清单 .....	329
10.4.5	杂项检查清单 .....	331
10.5	总结 .....	333
<b>第 11 章</b>	<b>建议、技巧和其他事宜 .....</b>	<b>334</b>
11.1	模态测试入门 .....	334
11.1.1	锤击设置 .....	335
11.1.2	激振器设置 .....	336
11.1.3	驱动点测量 .....	336
11.1.4	互易性 .....	337
11.1.5	不合适的参考点位置 .....	337
11.1.6	多输入多输出测试 .....	338
11.1.7	多参考点测试 .....	338
11.2	力锤和脉冲激励 .....	338
11.2.1	为测试选择合适的力锤 .....	338
11.2.2	力锤的挥锤技巧 .....	338

11.2.3	力锤三脚架 .....	339
11.2.4	锤头选择 .....	339
11.2.5	没有力锤：即兴发挥 .....	340
11.2.6	Peter 锤击测试规则 .....	341
<b>11.3</b>	<b>加速度计问题 .....</b>	<b>341</b>
11.3.1	质量载荷 .....	341
11.3.2	三向加速度计的质量载荷影响 .....	342
11.3.3	加速度计灵敏度选择 .....	345
11.3.4	三向加速度计 .....	346
<b>11.4</b>	<b>曲线拟合注意事项 .....</b>	<b>349</b>
<b>11.5</b>	<b>带有三个平板子系统的蓝色框架 .....</b>	<b>352</b>
<b>11.6</b>	<b>杂项问题 .....</b>	<b>359</b>
11.6.1	模态测试方向标识 .....	359
11.6.2	测试不需要从测点 1 开始 .....	360
11.6.3	测试更宽的频率范围 .....	360
11.6.4	$U_i$ 乘以 $U_j$ ：很多问题的关键 .....	360
<b>11.7</b>	<b>总结 .....</b>	<b>361</b>
<b>附录</b>	<b>.....</b>	<b>363</b>
<b>附录 A</b>	<b>线性代数：模态分析所需要的基本运算 .....</b>	<b>363</b>
A.1	矩阵 .....	363
A.2	列向量 .....	363
A.3	行向量 .....	363
A.4	对角阵 .....	363
A.5	矩阵相加 .....	364
A.6	矩阵与标量相乘 .....	364
A.7	矩阵乘法 .....	364
A.8	矩阵乘法规则 .....	365
A.9	矩阵的转置 .....	365
A.10	矩阵转置规则 .....	366
A.11	对称矩阵规则 .....	366
A.12	逆矩阵 .....	366
A.13	逆矩阵属性 .....	366
A.14	特征值问题 .....	366
A.15	广义逆矩阵 .....	367
A.16	奇异值分解 .....	367
<b>附录 B</b>	<b>两自由度系统实例：特征值问题 .....</b>	<b>367</b>
<b>附录 C</b>	<b>两自由度系统的极点、留数和 FRF 问题 .....</b>	<b>370</b>
<b>附录 D</b>	<b>三自由度系统实例 .....</b>	<b>375</b>