

【英】D·J·EWINS 著

赵淳生 周传荣 译

陈树年 陈弘武 校

# 模态试验 理论与实践

东南大学出版社

# 模态试验理论与实践

[英] D. J. Ewins 著

赵淳生 周传荣 译

陈树年 陈弘武 校

东南大学出版社

## (苏)新登字第 012 号

### 内 容 提 要

本书反映了 70 年代到 80 年代模态理论、试验方法和分析技术的新发展。全书共分六章：第一章，概论；第二章，模态试验的理论基础；第三章，导纳测试技术；第四章，模态参数识别方法；第五章，建立数学模型；第六章，应用。

本书可供高等工科院校振动专业的研究生以及从事机械振动研究的工程技术人员参考。

### 模态试验理论与实践

[英] D. J. Ewins 著

赵淳生 周传荣 译

陈树年 陈弘武 校

---

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号)

南京航空学院飞达印刷厂印刷

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 9.125 字数 237 千

1991 年 8 月第 1 版 1991 年 8 月第 1 次印刷

印数：1—3000 册

---

ISBN 7-81023-581-8

## 译者序

通过实测振动系统的输入（激振力）和输出（响应）来确定其动力参数，以建立振动系统的数学模型，我们称之为动力学的“逆”问题。试验模态分析就是为了解决这一“逆”问题而发展起来的一个新的动力学分支。尽管经典的模态试验已有 30 多年的历史，但自 70 年代以来，随着电子计算机和振动测试技术的发展，试验模态分析有了许多新的发展。特别是系统识别技术的应用，使模态分析技术进入了一个新的阶段。本书正是反映了 70 年代到 80 年代模态理论、试验方法和分析技术的新发展。

本书作者 D.J.EWINS 是英国帝国理工学院 (Imperial College of Science and Technology) 机械工程系教授。多年来，他一直从事机械振动研究工作，尤其在模态分析方面，他不仅有较高的理论水平，而且有极为丰富的实践经验。可以说，在国际上，他是该领域内的权威人士之一。他曾多次应邀来上海交通大学和南京航空学院讲学。在他的实验室里，曾接受过不少的中国留学生。他和中国人民有着十分深厚的友谊。

可以说，本书是 D.J.EWINS 教授从事模态试验和分析一个总结，从理论到实践，叙述得非常全面、扼要和透彻，对于正在进修振动专业的研究生以及从事机械振动研究工作的工程技术人员，都是一本很有价值的参考书。

正如作者在序言中所述，本书是根据作者一系列模态分析短训班教材而发展起来的。其中最主要的教材是作者 1983 年 9 月撰写的“模态试验的理论和实践” (Theory and Practice of Modal Testing)。曾在 D.J.EWINS 实验室进修的上海交通大学教师韩祖舜 1984 年回国时带回了该教材的复制件（以下简称“教材”），

译者有幸阅读了该“教材”，觉得内容确实很不错，并当即采用它作为振动专业硕士研究生学位课程“振动系统参数识别”主要参考教材。该课程进行了一段时间，南京航院振动研究室留美教师顾仲权寄回由 D.J.WEINS 教授著的、于 1984 年 9 月正式出版的“模态试验：理论和实践”（Modal Testing: Theory and Practice）的复制件。这本书（为了区别，以下简称“专著”）和“教材”大同小异。但“专著”毕竟是在“教材”的基础上作了许多修改和补充。自然，我们的注意力便转向到“专著”上来了。

本译本先由南京航空学院 84 级进修“振动系统参数识别”学位课程的硕士生和参加辅导的教师，根据“专著”进行了粗译。后由南京航空学院振动研究室赵淳生教授、周传荣教授根据“专著”1984 年版以及后来发行的 86 年修订版进行了精译。最后，由湖南大学力学系陈树年教授、陈弘武副教授进行了全面而仔细的校对。

参加粗译本书的人员有：

- 序言、第一章——潘斐霞（硕士生）；
- 第二章——包益民（教师）刘强（硕士生）；
- 第三章——邓宗伯（硕士生）；
- 第四章——吴永健（硕士生）；
- 第五章——温冶如（硕士生）；
- 第六章——包益民；
- 一般名词、附录——刘强。

在翻译和出版过程中，受到南京航空学院振动工程研究所所长张阿舟教授的指导，东南大学数力系汪凤泉教授、东南大学出版社以及宝应县应用技术开发中心的支持，华东工程学院研究生吴鹏飞在付印前又进行了仔细的校对，译校者对他们表示衷心的感谢！

译者 赵淳生 周传荣

# 作者序

本书试图对模态试验技术作一较详细的介绍。虽然其最有用的技术最近才发展起来，同时这些方法的潜力也是最近才被人们所认识，但这不是一个新的课题。模态试验，实际上就是根据试验数据构造数学模型来描述结构振动特性的过程，而不是传统的理论分析。这门技术，在整个工程领域内有着广泛的应用。

本书的主要内容之所以按照特定的次序来安排，是有其特殊理由的：为了最充分利用模态试验方法的优越性，不仅要对测试技术和分析方法，而且对测试技术的理论基础，都要求达到一定的专业水平。因此，建议读者在进入第三章的更实际的测试过程之前，先详细地研究或复习第二章的理论，然而，即使对于第三章，也要求有比较高的理论水平，以便正确理解不同类型的测试方法（如正弦、随机和瞬态激振等）及其应用上的限制。

第四章叙述了模态分析中测量数据处理方法，其范围从基本的和比较简单的方法一直到比较先进的以及借助于计算机的方法。分析方面的叙述延续到了第五章。在这一章，概述了建模的全过程，处理了不同复杂程度、适用于各种不同情况的模型。接着，第六章列举了许多有关模态试验结果的实例。毫无疑问，在今后的几年里，将会有更多的例子提供出来。

起始的一章是比较概括的，既可作为本书的引言，也可作为本学科的一个概论。这样，它不仅引导勤奋的学生作进一步的工作，而且还为那些希望了解模态试验技术的一般范围和内容，但又缺乏广泛的实践（这对于精通本学科是必需的）机会的读者，提供了有关本学科的概貌。本书是在短训班课程的基础上编写的。第一章不仅是为那些自始至终参加听课的人，而且也是为那些只能挤出几小时来参加听课的管理人员编写的。

## 作者致谢

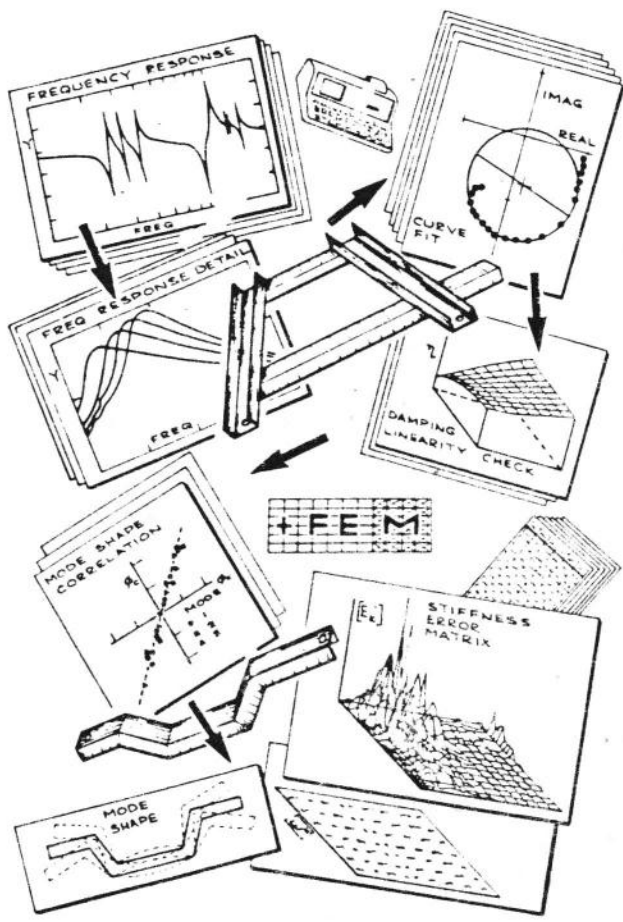
自然，许多人对本书作了贡献。我要感谢我的几位朋友和同事给我的支持和帮助。

首先，我必须感谢 P.Grootenhuis 教授。我荣幸地和他一起进行研究和工作的约 20 年。他给我的支持和鼓励，使我开始从事并坚持我的工作。本书的出版就是这些工作的果实。这本书是根据一系列模态试验的短训班教材而发展起来的。这些短训班是我和我的同事 D.Robb 一起在帝国理工学院开设的。我非常感谢 D.Robb 对本书所作的有益的评论及其许多实际的贡献。我也非常感谢在伦敦以及外地的大学同事们，他们热情地提供一些实例并多次开展过对本学科各个方面的讨论；我也必须感谢几届学生，因为本书所列举的许多例子是他们研究的成果。我也得感谢工业界的许多同事，他们使我们有机会接触实际问题，使我们的研究更加切题。他们还允许我从他们那里选取一些实例，作为本书的例子。没有所有这些人的合作，是不会有这本书问世的。

本书的实际准备是一项主要工作。我感谢我的秘书 L.Micklem，他愉快地一遍又一遍地打印出手稿，直到出版截止日期我无法再作进一步修改为止。通过仔细检查每一页手稿，发现了其中不少错误。我希望出版者 F.Lacey 和我本人最近所作的努力已经成功地把这些错误减少到最低限度。但是，我想，不可避免地还多少会存在一些错误。实例的来源有许多，但大部份是由 J.Parkes 和 R.Potter 准备的。我非常感谢他俩作出的有效而细致的努力。

最后，我得感谢我的家人对我的理解和支持。在 1984 年的几个最美好的月份里，他们一直耐心地守候着这本书最后完成。

D.J.Ewins 1984.4. 于伦敦





# 目 录

## 第一章 概论

§ 1-1 模态试验引言 .....	1
§ 1-2 模态试验的应用 .....	2
§ 1-3 模态试验的基本原理 .....	5
§ 1-4 理论概述 .....	7
§ 1-5 测试方法概述 .....	13
§ 1-6 分析概述 .....	15
§ 1-7 试验过程概述 .....	18

## 第二章 理论基础

§ 2-0 引言 .....	19
§ 2-1 单自由度(SDOF)系统 .....	21
§ 2-2 单自由度系统频响函数(FRF)数据的表示及特性 .....	25
§ 2-3 无阻尼多自由度(MDOF)系统 .....	37
§ 2-4 比例阻尼 .....	47
§ 2-5 滞后阻尼——一般情况 .....	50
§ 2-6 粘性阻尼——一般情况 .....	58
§ 2-7 多自由度系统的 FRF 数据的表示与特性 .....	64
§ 2-8 完全和不完全模态 .....	76
§ 2-9 非正弦振动和 FRF 特性 .....	78
§ 2-10 弱非线性结构的分析 .....	87

## 第三章 导纳测试技术

§ 3-0 引言 .....	92
§ 3-1 基本测试系统 .....	93

§ 3-2	结构的准备 .....	95
§ 3-3	结构的激励 .....	98
§ 3-4	传感器和放大器 .....	110
§ 3-5	分析仪 .....	117
§ 3-6	数字信号处理 .....	121
§ 3-7	不同类型激励的使用 .....	131
§ 3-8	标定 .....	147
§ 3-9	质量的消除 .....	150
§ 3-10	转动导纳的测量 .....	152
§ 3-11	非线性结构的测量 .....	154
§ 3-12	多点激振法 .....	158

#### 第四章 模态参数的识别方法

§ 4-0	引言 .....	160
§ 4-1	频响函数数据预检 .....	161
§ 4-2	单自由度模态分析法 I——峰值法 .....	164
§ 4-3	单自由度模态分析法 II——导纳圆拟合法 .....	167
§ 4-4	单自由度模态分析法 III——动刚度法 .....	176
§ 4-5	剩余项 .....	178
§ 4-6	频域多自由度曲线拟合法 .....	182
§ 4-7	时域多自由度曲线拟合法 .....	189
§ 4-8	多曲线拟合法 .....	199
§ 4-9	非线性系统 .....	202

#### 第五章 建立数学模型

§ 5-0	引言 .....	206
§ 5-1	模态模型 .....	207
§ 5-2	模态模型的显示 .....	210
§ 5-3	响应模型 .....	213

§ 5-4 空间模型 .....	217
§ 5-5 速度导纳基架图和系统模型 .....	218

## 第六章 应用

§ 6-0 引言 .....	225
§ 6-1 实验与理论分析的比较 .....	225
§ 6-2 模型的修改或修正 .....	235
§ 6-3 结构修改 .....	242
§ 6-4 耦合结构分析 .....	245
§ 6-5 响应预计和力的确定 .....	257

参考文献 .....	263
------------	-----

一般符号表 .....	267
-------------	-----

## 附录

1. 复代数在简谐振动中的应用 .....	269
2. 矩阵符号及性质的复习 .....	271
3. 付里叶分析 .....	275

# 第一章 概 论

## § 1-1 模态试验引言

长期以来，结构振动的实验研究，一直为我们认识和控制实际中遇到的许多振动现象作出重要贡献。人们从最初意识到振动时起，就开始进行实验研究，其目的主要有二：a) 确定振动响应水平的性质和范围；b) 检验理论模型及其预估。今后，结构振动问题已广泛地成为工程产品设计和破坏的主要极限。首先，许多结构，从涡轮叶片到吊桥，它们的整体是最受关注的，因而对它们的动力特性必须有一个详细分析、精确的了解；其次，是范围更广的部件或装配件，它们的振动直接关系到其工作性能。这表现在：由剧烈运动造成的短暂的故障，或是产生包括噪声在内的干扰和不舒适性。对于所有这些实例，在工作或运转中所遇到的振级进行预估和适当的控制是极其重要的。

上述两种振动测试目的代表了两种相应的试验类型。第一类是以所研究的机器或结构，在它们运转时测量其激振力，或更一般地测量其响应；第二类是用已知的激振力对一些结构或部件进行激振，而这些结构往往处于非正常的工作环境中。第二类试验，一般在比前一类严格得多的控制条件下进行。因此，它能提供更准确、更详细的信息。这种类型的试验同时包括了数据采集及其后继分析，即今天所谓的“模态试验”。它是下文的主要论题。在定义要涉及到特定的量和参数之前，我们先明确地叙述“模态试验”这个名称的涵义。这里，它被用来概括部件和结构试验的过程。这个过程的目的是为了得到部件和结构的动力或振动特性的数学描述。数学描述或模型的型式在很大程度上随应用的

不同而变化：它可以是预计固有频率和阻尼因子；而另一种情况是用来建立一个完整的质量—弹簧—阻尼模型。

虽然模态试验是一个比较新的名称，但是它的原理在许多年以前就已建立起来了。这些原理经过了不同的发展阶段。在这些发展过程中“共振实验”和“机械阻抗法”被用来描述一般的研究领域。Kennedy 和 Pancu[1]在 1947 年所发表的论文，为这门学科树立了一个极为重要的里程碑。他们当时所提出的用来准确地确定飞行器结构固有频率和阻尼的方法，在以后的许多年里，一直在使用着，直到测试和分析技术迅速发展的 60 年代才告过时。他们的努力为更精确的测量和更有效的应用开辟了道路。1963 年，Bishop 和 Gladwell[2]发表的文章，叙述了共振试验理论的状况。该文在当时的实际成就方面是相当先进的。同一时期的另一项工作是 Salter[3]用完全不同的观点写的另一本书。作者在该书中提出了整理测量数据的非分析法。当时，同样一个工作，人们所付出的劳动比起今天用计算机辅助自动完成所花劳动要多得多，Salter 的方法的好处是，能够从物理角度来透彻地理解所研究的结构振动。到 1970 年，传感器、电子学和数字分析仪以及现代模态试验技术取得了重要进展。由于人们进一步的发展和使用，出现了许多文献。现在，象这样的参考文献已有数百篇 [4]、[5]。下面我们将把本学科各方面的主要特征汇总起来，为模态试验的理论和实践提供一个很好的响导。

最后，在引言中附带说一下：本学科象许多其它学科一样，或许比大多数学科更突出，产生了大量难懂的术语。这些术语在各处并非都完全相同。因此，在本书中，虽然，采用了一些特殊的符号与术语，但为了使本专著术语与其它参考文献相一致，特别是与广泛应用的各种分析设备和软件手册一致，我们将随着各种参数的引进，给出同一参数的各种不同的名称。

## § 1-2 模态试验的应用

在概括和详述本学科各个方面之前，我们提出这样一个重要问题：为什么要进行模态试验？模态试验结果有许多应用，而事实上有些结果的确是非常有用的。然而，必须记住：没有一个唯一的试验方法或分析过程对所有情况都是最适用的。因此，在进行任何试验之前，确定明确的目的以便采用最佳的方法或技术是很重要的。关于这种过程，最好仔细地考虑下列问题：希望通过研究（模态试验是该研究的一部份）得到什么？为了最大限度地使用试验结果，所求的结果应该是什么形式？

首先有必要让我们综述一下当前模态试验的主要应用。总的来说，是为了得到结构的数学模型，但是这些模型在以后的应用是有差别的：

(A) 或许最常见的一个应用是测量振动模态，以便与有限元或其它理论模型所得到的相应数据进行比较。因为在预估冲击等复杂激励下的响应水平，或进行其它更深入的分析之前，需要或希望检验理论模型的可靠性。一般认为，对测试得到的主要振动模态进行相关分析，基本上可以保证模型的可靠性，因而，这种模型能得到进一步的使用。对于这种特定的应用，我们通过测试所要达到全部目的是：(1) 准确地估计固有频率；(2) 足够细致和准确地表示振型，以使它们能识别理论模型得到的结果并与之相关。在这个阶段，振型数据精确不是主要的。一般来说，从理论模型预估每个模态的阻尼是不可能的，因而无法比较从试验测得的模态阻尼。然而，这样的信息是有用的。因为它能够用来建立理论模型。虽然这样建立起来的理论模型是近似的，但它能更好地预估结构的响应水平（因为响应水平通常极大地受阻尼影响）。

(B) 通过每个步骤和简单的比较而得到一系列结果后，各种情况的实验和理论比较就此告一段落。有时，为了使理论的模态特性更接近测量结果，我们常试图对它作些调整和修改。通

常这是用逐步逼近法来完成的。

上述过程的一个合乎逻辑的发展是理论和实验结果相关，而不是两者的比较。它是这样一个过程：把（实验和理论的）两套数据定量地结合起来，以便更好地认识造成计算和测试的特性之间出现差异的原因。显然，这样的应用比以往的传统的应用更加有效。但是，它对模态试验结果的准确性要求也就更高。尤其是对振型数据（即“特征向量”）精度的要求比一般振型图高得多。

(C) 其次，另一个要叙述的应用领域是用模态试验来建立部件的数学模型，然后把这种模型装配地整个结构中去。这种方法通常称为“子结构法”，它在复杂结构的理论分析中得到广泛的应用。这里所求的模型完全是定量的，即要求固有频率、模态阻尼和振型的正确数据。并且，还有个附加的约束条件：要求所有模态必须都同时包括进来。把模型限制在某些（部分）模态上是不够的（前面所述的比较或相关可局限于部分模态）因为对于一个完整的结构，在感兴趣的频率范围内，结构的动态特性将受到频率范围以外部件模态的影响。同样在感兴趣的频率范围内，我们也不能忽略在测试和分析上有困难的某些模态。总而言之，这类应用比前面的一类更为需要，但往往被低估。因而，也没有受到适当的对待，以致不能达到预期的结果。

(D) 前面各种应用，越来越变得十分有趣和有潜力。由这些应用所建立的数学模型，可以用来预计对被试验的原始结构进行修改的效果。

从理论上讲，它同样属于子结构法的范畴，因而它同样对数据有精度和定量的要求。然而，有时修改过程只对原始结构作微小的更动，就能精确调整结构的动力特性。在这种情况下，可以放宽对数据的要求。

有一种过去和现在都要研究的特殊情况：要求有关旋转运动的信息，即力矩（相对于力）和转动位移（相对于平动位移）。这很自然包括在理论分析中。但是，在基于实验研究中却往往

被忽视。理由很简单：因为要测量它们，十分困难。然而，它们通常在耦合或修改应用中是一个很主要的方面。

(E) 由模态试验建立的模型的另一个应用是确定载荷。在许多情况下，需要知道造成结构振动的动载荷，但直接测量这些载荷却又做不到。针对这种情况，提出了一种解决办法：就是把载荷作用下的响应和结构传递函数结合起来，从而导出动载荷。这种分析方法对结构所采用的模型很敏感。所以，通常要求模型本身是从测量导出的。换句话说，是通过模态试验获得的。

(F) 最后，在我们回顾模态试验的应用时，再说明一下测试的一般过程：a) 测量；b) 分析测量结果；c) 导出结构的数学模型。但在有些情况下，这不是最佳过程。通常，最后一条(c)只是在大量的实测结果中提取一小部份有效数据来构造所谓的“模态模型”。这种提炼过程的一个附带的好处是：能够消除测量数据中不可避免的差错。然而，这一步所包含的平滑和平均过程有时会降低模型的可靠性。在应用中，由于后继分析对输入数据的准确性十分敏感，这样就可能出现这个问题。这个问题的一些例子特别可能在(E)（载荷确定）和(C)（子系统耦合）中找到。解决的办法是用原始测量数据，即用未经平滑或（相对来说）未经处理的数据，来建立结构的数学模型。这要求更加细心地进行测量，以保证所需的准确度。

### § 1-3 模态试验的基本原理

模态试验这门学科一个主要的要求是综合应用下列三方面的知识：

- (i) 振动理论基础；
- (ii) 准确的振动测量；
- (iii) 真实的和详细的数据分析。

过去，有一种倾向：认为它们是三个不同的专门领域，彼此



有各自的专家。然而，我们现在要研究的模态试验这门学科，就需要很好地理解和掌握这三个分支。如果不能恰当地和灵活地把这三个方面结合起来，就不能充分发挥本学科的潜力。

例如，当测量激振和响应水平时，必须充分了解如何处理测得的数据，才能对有关数据的性质和适宜性作出正确的判断。再者，全面地了解表示复杂结构的频响函数的多种形式的图象及其趋势，可以防止我们在分析非正确测试结果上无谓的浪费精力。这些图象有许多特征，它们很快就能被那些了解基本原理的人看出来。

贯穿全书，我们要反复强调：理论必须与实验技术相结合。事实上，在进一步介绍本学科的详细内容时，我们首先要复习结构振动必需的理论基础。这些理论是以后研究测试技术、信号处理和数据分析的必要条件。

当我们掌握了振动理论基础后（即使没有掌握内容的全部细节，但至少了解其中许多细节），我们就可以把注意力集中到实践方面来：对被试结构施加激振力，并在控制导纳测量的试验条件下测量输入和响应水平。现在有几种试验方法：简谐、随机、瞬态激励等等可供使用。选择哪一种方法最适宜，要视具体应用而定。试验者如果想有效地运用现在广泛流行的复杂的信号分析设备，他就必须充分熟悉当前在这一测试方面广泛采用的方法和各种技术。

下面，我们考虑分析阶段。在此阶段，对测量数据（不外乎频响函数或导纳）进行一系列的曲线拟合，试图找出一个最能反映实际观测所得情况的数学模型。这方面有许多计算方法。实际上，不存在一种适用于所有问题的唯一方法。因此，对于一个希望最有效利用时间和精力和精力的试验者来说，他必须了解可供选择的各种方法。

一般来说（虽然并不总是如此），对每条测量曲线都要进行分析。如果这一步完成了，那么下一步，就是所谓的“模型化”。