

● 研究生用书 ●

获全国高等学校
机电类专业优秀教材一等奖

MECHANICAL VIBRATION SYSTEM
— ANALYSIS · MEASUREMENT
· MODELING · CONTROL
华中理工大学出版社



师汉民
湛刚
吴雅

机械振动系统

—— 分析 · 测试 · 建模 · 对策

(上册)

TH113

S50

1

442709

机械振动系统

— 分析 · 测试 · 建模 · 对策

(上册)

师汉民

湛 刚

吴 雅

华中理工大学出版社



0281/06

· 研究生用书 ·

机械振动系统

—— 分析 · 测试 · 建模 · 对策

(上册)

师汉民 湛刚 吴雅

责任编辑 刘继宁

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉市新华印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 12 插页: 2 字数: 294 000

1992年11月第1版 1999年6月第3次印刷

印数: 2 001—3 000

ISBN 7-5609-0677-X/TH · 58

定价: 16.80 元

内 容 简 介

本书讲述现代振动工程中有关振动系统的分析、测试、建模与对策方面的基础理论、基本知识以及常用的方法和技巧。全书分上下两册,上册(基础篇)包括单自由度与多自由度系统振动的基础知识,随机激励下的振动,振动系统的测试、辨识与建模,振动的抑制与利用;下册(深化篇)包括分析动力学基础,多自由度系统振动分析的常用方法,连续系统与非线性系统的振动,工程中的自激振动以及振动问题分析求解的计算方法。

本书注意联系工程实际,可作为机械类专业硕士研究生教材;其中上册也可作为本科生教材使用。此外,本书还可供工程技术人员参考。

Abstract

The fundamental theory, basic knowledge and the methods and techniques most in use for analysing, measuring, testing modeling and controlling vibration systems in modern vibration engineering are discussed in this book. The book is divided into two volumes, the first volume (fundamental one) consists of basic knowledge about the vibration of single-or multidegree-of-freedom systems, vibration induced by random excitation, vibration measuring, testing, identifying and modeling, vibration suppression and vibration application, the second volume (deepening one) is devoted to elements of analytical dynamics, the methods in common use for analysing vibration in multi-degree-of-freedom systems, vibration of continuous and non-linear systems, self-excited vibration in engineering and computation techniques for vibration problem solving.

Paying attention to integrating theory with engineering practice the book may be used by the Master degree students in the disciplines related to mechanical engineering as well as the first volume of the book can be used by the undergraduates as a textbook. Besides, the book can be used also by engineers or researchers as a reference book.

“研究生用书”总序

研究生教材建设是提高研究生教学质量的重要环节,是具有战略性的基本建设。各门课程必须有高质量的教材,才能使学生学习掌握各门学科的坚实的基础理论和系统的专门知识,为从事科学研究工作或独立担负专门技术工作打下良好的基础。

我校各专业自1978年招收研究生以来,组织了一批学术水平较高,教学经验丰富的教师,先后编写了公共课、学位课所需的多种教材和教学用书。有的教材和教学用书已正式出版发行,更多则采用讲义的形式逐年印发。这些讲义经过任课教师多年教学实践,不断修改、补充、完善,已达到出书的要求。因此,我校决定出版“研究生用书”,以满足本校各专业研究生教学需要,并与校外单位交流,征求有关专家学者和读者的意见,以促进我校研究生教材建设工作,提高教学质量。

“研究生用书”以公共课和若干门学位课教材为主,还有教学参考书和学术专著,涉及的面较广,数量较多,准备在今后数年内分批出版。编写“研究生用书”总的要求是从研究生的教学需要出发,根据各门课程在教学过程中的地位和作用,在内容上求新、求深、求精,每本教材均应包括本门课程的基本内容,使学生能掌握必需的基础理论和专门知识;学位课教材还应接触该学科的发展前沿,反映国内外的最新研究成果,以适应目前科学技术知识更新很快的形势;学术专著则应充分反映作者的科研硕果和学术水平,阐述自己的学术见解。在结构和阐

述方法上,应条理清楚,论证严谨,文字简炼,符合人们的认识规律。总之,要力求使“研究生用书”具有科学性、系统性和先进性。

我们的主观愿望虽然希望“研究生用书”的质量尽可能高一些,但由于研究生的培养工作为时尚短,水平和经验都不够,其中缺点、错误在所难免,尚望校内外专家学者及读者不吝指教,我们将非常感谢。

华中理工大学研究生院院长

黄树槐

1989. 11

前 言

本书是为华中理工大学硕士研究生的学位课程“机械振动”所编写的教材。此课程旨在帮助研究生掌握机械振动的基础理论、基本测试、建模技能与分析计算方法，培养他们对机械系统和工程结构进行振动分析与控制、有效地处理机械工程中各种振动问题的能力。

为实现上述目的，本书力图在“少而精”的前提下，覆盖机械工程类的硕士研究生在他们未来的工作中为处理种种动态分析与振动控制问题，可能需要的基础理论、基本知识以及常用的方法和技巧。我们试图突破现有机械振动方面的书籍或教材的一般体系，而将现代振动工程中有关振动系统的分析、测试、建模与对策方面的知识组织成为一个有机的整体，供研究生学位课程教学之用。

本书以机械类工科专业本科的课程（理论力学、材料力学、高等数学和工程数学）作为起点，在取材与编排上有以下特点：

突出联系工程实际的观点，在遵循振动学科的基本体系、讲清振动科学的基础理论的同时，注意阐述有关理论、知识和方法的工程背景与实际意义；

注意反映由于电子计算机在振动分析中的广泛深入的应用，而发展起来的一些新的方法与技巧；

在适应于教材的容量与深度的范围内，本书还介绍了作者近年来在金属切削机床自激振动的非线性理论及其在线监控技术方面的主要研究成果，作为工程实际中的振动问题的分析与处理之一例。

全书分上下两册，上册（基础篇）包括单自由度与多自由度

系统振动的基础知识，随机激励下的振动，振动系统的测试、辨识与建模，振动的抑制与振动的利用；下册（深化篇）包括分析力学基础，多自由度系统振动分析的常用方法，连续系统与非线性系统的振动，工程中的自激振动以及振动问题分析求解的计算方法。

在叙述方法上我们尽力注意突出重点，讲清难点，分清层次，以利教学；特别是注意以启发诱导的方式，激发研究生的学习兴趣，引导他们去钻研与理解。

在每章之末均附有若干“思考题”，这些思考题“貌似简单”，其实并不容易，它们有助于帮助学习者澄清模糊概念，并激发学习兴趣。在书末附有各章思考题的答案，但我们希望读者在经过认真思考以后，再去查阅答案。各章之后还附有若干习题，供读者选作。

按照我们的教学经验，如果讲授得法，而且研究生们能努力学习，积极配合，那么80学时已足够讲授本书的基本内容，课内外学时之比约为1:2。

如果研究生们在本科期间已修有关振动方面的课程，则可略去第一篇，而由第二篇开始讲授，大约40~60学时已能讲完。

本书第一篇（第一至第七章）还可作为机械类专业大学本科生的必修或选修课教材，约需40~60个课堂学时。

本书除作为教材之外，还可供从事机械产品与机械设备的振动测试、分析、抑制或利用等方面工作的广大工程技术人员作为技术参考书。

湛刚与吴雅参与了这门课程的教学实践与大纲制订，并分别提供了第三、四、六、七、九章与第一、二章的初稿，全书由师汉民编写与修改、定稿。湛刚与吴雅负责整理、校核全书的文字、公式与插图。伍良生校阅了部分章节，并提出了宝贵建议。周辉、张保国与刘国祥为缮写书稿付出了辛勤的劳动。

杨叔子教授对于这门课程的开设与教材编写给予了热情的支

持和关怀。杜润生为本课程的实验开设作出了贡献。邓星钟、卢文祥等同志都为此课程教学活动的正常进行付出了劳动。

限于编者的水平，书中定有许多不恰当甚至错误之处，切望读者批评指正。

编者

1990年11月28日

目 录

绪论	(1)
第一篇 基础篇	(7)
第一章 单自由度线性系统的自由振动	(9)
§ 1.1 振动系统的简化及其模型	(9)
§ 1.2 单自由度线性系统的运动微分方程	(22)
§ 1.3 无阻尼系统的自由振动	(27)
§ 1.4 有阻尼系统的自由振动	(42)
第二章 单自由度线性系统的强迫振动	(56)
§ 2.1 谐波激励下的强迫振动	(56)
§ 2.2 周期激励下的强迫振动, Fourier 级数法	(74)
§ 2.3 非周期激励下的强迫振动, Fourier 变换法	(85)
§ 2.4 非周期激励下的强迫振动, 脉冲响应函数法	(92)
§ 2.5 冲击与系统的冲击响应	(104)
第三章 两自由度系统的振动	(113)
§ 3.1 两自由度振动系统的运动微分方程	(113)
§ 3.2 无阻尼系统的自由振动, 自然模态	(116)
§ 3.3 坐标变换与坐标耦合	(123)
§ 3.4 自然坐标	(126)
§ 3.5 拍击现象	(129)
§ 3.6 两自由度系统在谐波激励下的强迫振动	(133)
第四章 多自由度系统振动的基本知识	(142)
§ 4.1 广义坐标	(143)
§ 4.2 线性系统的运动方程及其矩阵表达式	(144)
§ 4.3 线性变换与坐标耦合	(152)
§ 4.4 无阻尼自由振动, 特征值问题	(154)
§ 4.5 模态向量的正交性与展开定理	(160)

§ 4.6	系统对初始激励的响应	(165)
§ 4.7	影响系数,系统机械能与互易定理	(169)
§ 4.8	系统矩阵、动力矩阵	(176)
§ 4.9	有阻尼多自由度系统的自由振动	(179)
§ 4.10	多自由度系统的一般响应	(183)
§ 4.11	多自由度振动系统的几种特殊情况	(188)
第五章	随机激励下的振动	(205)
§ 5.1	引言	(205)
§ 5.2	随机过程的基本概念	(207)
§ 5.3	线性系统对于平稳随机过程的响应	(228)
§ 5.4	随机过程的联合性质	(236)
§ 5.5	多自由度系统对于随机激励的响应	(243)
§ 5.6	窄带随机过程分析	(256)
第六章	振动系统的测试、辨识与建模	(271)
§ 6.1	振动测试传感器	(272)
§ 6.2	激振器	(283)
§ 6.3	振动测试系统	(286)
§ 6.4	模态参数识别	(293)
§ 6.5	物理参数识别与修改	(305)
第七章	振动的抑制与利用	(317)
§ 7.1	抑制振源	(317)
§ 7.2	隔振	(331)
§ 7.3	减振	(338)
§ 7.4	振动的主动控制	(353)
§ 7.5	振动的利用	(358)
	思考题参考答案	(368)

绪 论

振动学科（包括声学）曾经是物理学或力学的一个分支，原属于基础科学。这一学科以力学和数学为基础，以现代测试技术、计算技术为手段，并从系统论、控制论及信息论等新兴学科吸取营养，而发展起来。它面向工程实际，以振动学科的理论、知识和方法来解决工程中日趋复杂的各种动力学问题，作出了富有成效的贡献，且日臻成熟，终于由基础学科发展成为一门工程学科——振动工程。本书将讲述振动工程的基础理论与技术，这里先介绍振动工程的意义、特点和方法。

一、振动工程是发展工业生产和国民经济的需要

在机械工业和其它工业部门存在着难以数计的有害振动问题，这些问题正在招致巨大的损失或者隐藏着可怕的祸根。以振动工程的理论、技术和方法来研究与解决这些问题，是当务之急。

大型、高速回转机械，如汽轮发电机组，因动态失稳而造成的重大恶性事故，在国内外都屡见不鲜。在事故中急剧上升的振动可在几十秒钟之内，使大型发电机组彻底解体，甚至祸及厂房，造成巨大的财产损失和人员伤亡。至于国外某些核电站事故所造成的后果，就不仅仅是经济损失，而且危及社会安定。而事故的原因或征兆之一，也是机组的强烈振动。

大型工程结构因振动而引起事故，也时有发生。历史上曾发生过桥梁由于在其上正步行进的队伍的周期激励，发生共

振，而突然崩塌的事故。近代还发生过大型桥梁或冷却塔因“风激振动”而断裂、倒塌的事故。十几万吨级的油轮也会由于振动而在海上折成两段，究其原因，是船体的固有频率设计不妥。

各种商品从生产厂到达消费者手中，往往要经过漫长的运输过程，在此过程中难免存在冲击与振动。为了使商品完好无损地到达消费者手中，一般都需要设计合适的商品包装，以便缓冲防振，保护商品。而因为包装不善，每年所造成的商品损失，也是非常巨大的。

此外，过量的振动和因振动而引起的噪声，还会污染环境，损害人们的健康。

以上仅仅是部分事例。事实上，可以说振动问题普遍地存在于工业生产和工程的各个领域。科学技术发展到今天，对许多工程项目来说，振动分析与控制，已经不再是“画蛇添足”的赘举，而是决定一个项目命运的必要措施。

振动并非只能为害，如能合理运用，亦能造福人类。目前已在很多方面对振动进行有效的利用，诸如振动加工（超声加工）、振动时效、振动筛、振动破碎、振动夯土、振动检测等等。

从上述可知，振动工程作为一门新兴的工程学科，它与工业生产及国民经济紧密相关。对于这一领域的忽视或轻视，会受到自然规律的严厉报复，而自觉地运用这一学科的理论、技术与方法，则可能获得极其显著的技术经济效益与社会效益。

二、振动工程以解决工程中的各种 动态问题为其目的

动态载荷作用于动态系统，就构成一个动态问题。所谓动态载荷即迅速变化的载荷，包括交变载荷与突变载荷。当载荷的频

率成分之一接近或超过系统的某一个自然频率时，就必须作为一个动态问题（而不是一个静态问题）来处理。事实上，工程中的许多问题都必须看作是动态问题。

与静态问题比较起来，动态问题有以下特点：

1. 复杂性

造成动态问题的复杂性的主要原因是其载荷作用的“后效性”与其响应对于过去经历的载荷的“记忆性”。前者指某时刻作用在系统上的载荷不仅只影响系统在该时刻的响应，而且影响系统在此后各时刻的响应；后者指系统在任一时刻的响应不只由该时刻的载荷决定，而是由在该时刻之前系统所经受的载荷的全部历程来决定，好象系统能记住它过去的经历一样。动载荷对系统的作用是首先改变系统在各个时刻的初态，这些受扰的初态按照系统内在的模式，向前运动发展，然后才能决定系统在其后各个时刻的总的响应。由此可见，一个动态系统在受到外加扰动时，其响应并不亦步亦趋地跟踪载荷的变化，而是力图表现出它的个性；而对一个动态系统施加的控制，只有顺应该系统的内在模式，才能收到预期的效果。由于上述特性，使得对一个动态系统的辨识、响应预测或控制，都要比对静态系统复杂得多。

2. 危险性

动态系统可能十分危险。其危险性主要是由两种因素引起的，其一为共振现象，当扰动频率接近系统的自然频率时，微小的载荷可以引起“轩然大波”，在结构中激起比静态响应大很多倍的动态位移响应与应力响应，产生巨大的破坏力；其二为自激振动，在一定的条件下，一个动态系统（例如金属切削机床、轧钢机或飞机等等），可以在没有外加交变激励的情况下，突然振动起来，振幅猛烈上升，而产生巨大的破坏性。例如，机床上如果发生这种振动，便难于正常地进行切削加工，而飞机如果产生这种振动，往往会导致机毁人亡的后果。这种振动即自激振动，又称为“颤振”。它似乎是“无缘无故”地发生的。对其产生机

理的剖析及对其防治都比较困难。

3. 超常性

振动的现象、规律及其防治方法往往都超越人们的生活常识之外，无法以直观的方法来说明和理解，而必须通过严谨的理论分析，才能得以解释或加以预测。振动问题的许多解答当然是在乎道理之中，却往往又出人意料之外。这里举一个很简单的例子，例如，一个工作机械，受到一定频率的扰动，而扰动频率又正好等于机械的自然频率，于是产生强烈的共振，无法正常工作。如果不是基于理论分析，而凭“想当然”，恐怕谁也不敢想象以下的消振方案：在该工作机械上再加装上一个子系统，并使此子系统的自然频率也正好等于扰动频率。人们可能“直观”地以为，这样一来，振动将会加倍厉害。但事实是工作机械的振动竟完全被消除了，此即所谓“无阻尼调谐消振器”。振动理论对其工作原理给出了满意的解释。需要看到，振动工程作为一门现代新兴的工程学科，它是先有了比较严谨的理论，然后才发展成工程学科的。在这一点上，它与冶金、建筑等工程学科是不相同的，后者是先有了建立在经验基础上的工程学科，然后才从理论上加以总结和提高。

总而言之，振动工程所处理的动态问题在本质上不同于静态问题，不能归结为静态问题。以静态的观念与方法来看待与处理动态问题是十分危险的。而动态的观念与动态的知识不是自然而然地可以得到的，而必须经过刻苦的学习与钻研才能掌握。

三、振动工程解决工程问题的策略与方法

振动工程在方法上兼采各相关学科之长，而具有以下特点。

1. 全方位地处理振动问题的策略

过去习惯于静态设计，待产品制造出来以后，如果发现在动态特性方面有问题，则再加以动态补救。今天，对于许多工程项

目来说，这种“静态设计-动态补偿”的方法已难于奏效，而必须采取在设计、制造、运行与保养等诸环节分别考虑动态性能的预测、优化、实现、监视与维护的策略，即“全方位地处理振动问题”的策略。

2. 模型化的方法

振动工程处理问题一般都要通过测试与理论分析，建立一定的理论模型。这种理论模型通常是微分方程。精确的理论模型是研究一个振动系统、预测其动态响应的前提。

除了理论模型之外，有时也采用实物模型与模型测试的方法。

3. 优化设计的方法

基于理论模型，采用数字仿真的方法，可以预测系统在各种载荷下的动态响应。如果响应不合要求，可以反过来修改系统的设计参数，再进行预测，再修改（这在计算机上是很容易实现的事）。如此反复迭代，可使系统在指定的载荷下，具有合乎要求的响应或最佳响应，此即优化设计方法。采用这种方法，不仅在设计阶段可以预测系统的动态特性与动态响应，而且可按照对其响应的要求，对设计参数进行修改与优化。

4. 规范与标准

基于实践经验、科学实验和理论分析的结果，制定各种规范与标准，以指导或约束人们的实践，也是振动工程处理实际问题的一种常用方法。

