

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

机械振动系统

—— 分析 · 测试 · 建模 · 对策 (下册)

(第二版)

Vibration Systems ——

Analyzing · Testing · Modeling · Controlling

(本书曾获全国高等学校机电类优秀教材一等奖)

师汉民

华中科技大学出版社

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

机械振动系统

——分析 · 测试 · 建模 · 对策(下册)

(第二版)

(本书荣获全国高等学校机电类优秀教材一等奖)

师汉民

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

机械振动系统——分析·测试·建模·对策(下册)(第二版)/师汉民
武汉:华中科技大学出版社, 2004年3月
ISBN 7-5609-3101-4

I. 机…

II. 师…

III. 机械振动-振动分析-高等学校-教材

IV. TH113

机械振动系统——分析·测试·建模·对策(下册)
(第二版)

师汉民

责任编辑:黎秋萍

封面设计:刘 卉

责任校对:朱 霞

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社 武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×960 1/16

印张:22.5

字数:380 000

版次:2004年3月第2版

印次:2004年3月第5次印刷

定价:34.00元

ISBN 7-5609-3101-4/TH·130

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

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,混沌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

This book covers the fundamental theory, practical methods, and techniques widely used in analyzing, testing, modeling and controlling vibration systems in modern vibration engineering. It is divided into two volumes. The first volume (Fundamental) explains the essential theory of single-or multi-degree-of-freedom systems vibration vibrations induced by random excitations, vibration systems testing, indentifying and moedling, vibration suppressions, and the beneficial inducement of vibrations in certain applications. The second volume (Advanced) expounds on the fundamentals of analytical dynamics, standard methods for analyzing vibration in multi-degree-of-freedom systems, vibration of continuous and non-linear systems, self-excited vibration, chaotic vibration in engineering, and computation techniques for problem solving.

Emphasizing practical applications this books is intended as a textbook for graduate stuedents in mechanical engineering, while the first volume can also be used as a textbook for undergraduates. Engineers and researchers in the field may find it a valuable reference as well.

写在“研究生教学用书”出版 15 周年前岁

“接天莲叶无穷碧，映日荷花别样红。”今天，我国的教育正处在一个大发展的崭新时期，而高等教育即将跨入“大众化”的阶段，蓬蓬勃勃，生机无限。在高等教育中，研究生教育的发展尤为迅速。在盛夏已临，面对池塘中亭亭玉立的荷花，风来舞举的莲叶，我深深感到，我国研究生教育就似夏季映日的红莲，别样多姿。

党的十六大报告以空前的力度强调了“科教兴国”的发展战略，强调了教育的重大作用，强调了教育的基础性全局性先导性，强调了在社会主义建设中教育的优先发展的战略地位。从报告中，我们可以清楚看到，对高等教育而言，不仅赋予了重大的历史任务，而且更明确提出了要培养一大批拔尖创新人才。不言而喻，培养一大批拔尖创新人才的历史任务主要落在研究生教育肩上。“百年大计，教育为本；国家兴亡，人才为基。”国家之间的激烈竞争，在今天，归根结底，最关键的就是高级专门人才，特别是拔尖创新人才的竞争。由此观之，研究生教育的任务可谓重矣！重如泰山！

前事不忘，后事之师。历史经验已一而再、再而三地证明：一个国家的富强，一个民族的繁荣，最根本的是要依靠自己，要以“自力更生”为主。《国际歌》讲得十分深刻，世界上从来就没有什么救世主，只有依靠自己救自己。寄希望于别人，期美好于外力，只能是一种幼稚的幻想。内因是发展的决定性的因素。当然，我们决不应该也决不可能采取“闭关锁国”，自我封闭，固步自封的方式来谋求发展，重犯历史错误。外因始终是发展的必要条件。正因为如此，我们清醒看到了，“自助者人助”，只有“自信、自尊、自主、自强”，只有独立自主，自强不息，走以“自力更生”为主的发展道路，才有可能在向世界开放中，争取到更多的朋友，争取到更多的支持，充分利用好外部的各种有利条件，来扎扎实实地而又尽可能快地发展自己。这一切的关键就在于，我们要有数量与质量足够的高级专门人才，特别是拔尖创新人才。何况，在科技高速发展与高度发达，而知识经济已初见端倪的今天，更加如此。人才，

高级专门人才,拔尖创新人才,是我们一切事业发展的基础。基础不牢,地动山摇;基础坚牢,大厦凌霄;基础不固,木凋树枯;基础深固,硕果葱绿!

“工欲善其事,必先利其器。”自古凡事皆然,教育也不例外。教学用书是“传道授业解惑”培育人才的基本条件之一。“巧妇难为无米之炊”。特别是在今天,学科的交叉及其发展越来越多及越快,人才的知识基础及其要求越来越广及越高,因此,我一贯赞成与支持出版“研究生教学用书”,供研究生自己主动地选用。早在 1990 年,本套用书中的第一本即《机械工程测试·信息·信号分析》出版时,我就为此书写了个“代序”,其中提出:一个研究生应该博览群书,博采百家,思路开阔,有所创见。但这不等于他在一切方面均能如此,有所不为才能有所为。如果一个研究生的主要兴趣与工作不在某一特定方面,他也可选择一本有关这一特定方面的书作为了解与学习这方面知识的参考;如果一个研究生的主要兴趣与工作在这一特定方面,他更应选择一本有关的书作为主要的学习用书,寻觅主要学习线索,并缘此展开,博览群书。这就是我赞成要为研究生编写系列的“研究生教学用书”的原因。今天,我仍然如此来看。

还应提及一点,在教育界有人讲,要教学生“做中学”,这有道理;但须补充一句,“学中做”。既要在实践中学习,又要在实践中实践,学习与实践紧密结合,方为全面;重要的是,结合的关键在于引导学生思考,学生积极主动思考。当然,学生的层次不同,结合的方式与程度就应不同,思考的深度也应同。对研究生特别是对博士研究生,就必须是而且也应该是“研中学,学中研”,在研究这一实践中,开动脑筋,努力学习,在学习这一过程中,开动脑筋,努力研究;甚至可以讲,研与学通过思考就是一回事了。正因为如此,“研究生教学用书”就大有英雄用武之地,供学习之用,供研究之用,供思考之用。

在此,还应进一步讲明一点。作为一个研究生,来读“研究生教学用书”中的某书或其他有关的书,有的书要精读,有的书可泛读。记住了书上的知识,明白了书上的知识,当然重要;如果能照着用,当然更重要。因为知识是基础。有知识不一定有力量,没有知识就一定没有力量,千万千万不要轻视知识。对研究生特别是博士研究生而言,最为重要的还不是知识本身这个形而下,而是以知识作为基础,努力通过某

种实践,同时深入独立思考而体悟到的形而上,即《老子》所讲的不可道的“常道”,即思维能力的提高,即精神境界的升华。《周易·系辞》讲了:“形而上谓之道,形而下谓之器。”我们的研究生要有器,要有具体的知识,要读书,这是基础;但更要有“道”,更要一般,要体悟出形而上。《庄子·天道》讲得多么好:“书不过语。语之所贵者意也,意有所随。意之所随者,不可以言传也。”这个“意”,就是孔子所讲的“一以贯之”的“一”,就是“道”,就是形而上。它比语、比书,重要多了。要能体悟出形而上,一定要有足够数量的知识作为必不可少的基础,一定要在读书去获得知识时,整体地读,重点地读,反复地读;整体地想,重点地想,反复地想。如同韩愈在《进学解》中所讲的那样,能“提其要”,“钩其玄”,以达到南宋张孝祥所讲的“悠然心会,妙处难与君说”的体悟,化知识为己之素质,为“活水源头”。这样,就可驾驭知识,发展知识,创新知识,而不是为知识所驾驭,为知识所奴役,成为计算机的存储装置。

这套“研究生教学用书”从第一本于 1990 年问世以来,到明年,就经历了不平凡的 15 个春秋。从研究生教育开始以来,我校历届领导都十分关心研究生教育,高度重视研究生教学用书建设,亲自抓研究生教学用书建设;饮水思源,实难忘怀!“逝者如斯夫,不舍昼夜。”截至今日,“研究生教学用书”的出版已成了规模,蓬勃发展。目前已出版了用书 69 种,有的书发行了数万册,有 22 种分别获得了国家级、省部级教材奖、图书奖,有数种已为教育部列入向全国推荐的研究生教材,有 20 种一印再印,久销不衰。采用此书的一些兄弟院校教师纷纷来信,称赞此书为研究生培养与学科建设做出了贡献。我们深深感激这些鼓励,“衷心藏之,何日忘之?!”没有读者与专家的关爱,就没有我们“研究生教学用书”的发展。

唐代大文豪李白讲得十分正确:“人非尧舜,谁能尽善?”我始终认为,金无足赤,物无足纯,人无完人,文无完文,书无完书。“完”全了,就没有发展了,也就“完”蛋了。江泽民同志在党的十六大报告中讲得多深刻:“实践没有止境,创新也没有止境。”他又指出,坚持“三个代表”重要思想的关键是与时俱进。这套“研究生教学用书”更不会例外。这套书如何?某本书如何?这样的或那样的错误、不妥、疏忽或不足,必然会有。但是,我们又必须积极、及时、认真而不断地加以改进,与时俱进,奋发前进。我们衷心希望与真挚感谢读者与专家不吝指教,及时批

评.当局者迷,兼听则明;“嚶其鸣矣,求其友声.”这就是我们肺腑之言.当然,在这里,还应该深深感谢“研究生教学用书”的作者、审阅者、组织者(华中科技大学研究生院的有关领导和工作人员)与出版者(华中科技大学出版社的编辑、校对及其全体同志);深深感谢对“研究生教学用书”的一切关心者与支持者,没有他们,就决不会有今天的“研究生教学用书”.

我们真挚祝愿,在我们举国上下,万众一心,在“三个代表”重要思想的指引下,努力全面建设小康社会,加速推进社会主义现代化,为实现中华民族伟大复兴,“芙蓉国里尽朝晖”这一壮丽事业中,让我们共同努力,为培养数以千万计高级专门人才、特别是一大批拔尖创新人才,完成历史赋予研究生教育的重大任务而做出应有的贡献.

谨为之序.

中国科学院院士

华中科技大学学术委员会主任

杨叔子

2003 年 7 月于喻园

再版前言

《机械振动系统——分析·测试·建模·对策》一书(上、下册)于1992年由华中理工大学出版社出版,至今已历十年.其间,重印过四次.现在终于有了再版的机会.

当时此书是作为硕士研究生教材出版的.我校机械工程一系于1984年开始对本系机械制造专业和机械学专业的硕士研究生开出“机械振动学”的学位课程.选修此课程的,除了本系的研究生以外,还有力学系、动力系、土木系和船海系等其他系的研究生.随后,对博士生的入学考试又相应地增设了“机械振动学”的科目.这门研究生学位课程的讲授一直坚持至今,已历时18年.在教学中,教师和学生都表现出很大的兴趣和很高的积极性与主动性.

在开设这门课程之初,所面临的一个主要困难是找不到一本合适的教材.当时已有的关于振动的教材或书籍多是属于基础学科,是从力学的角度来讲述关于振动的知识.这并不符合我们的目的——我们是要从振动工程的角度来讲述振动科学与振动知识及其在工程领域中的实际运用.除了讲清振动科学的基础概念和基本知识以外,这门课程特别需要教给学生如何运用这些概念和知识来分析与解决工程实际中的振动问题或动态问题.此外,当时已有的一些机械振动方面的书籍在编写方式、讲述深度与篇幅方面也不甚适合作为机械类工程专业的硕士研究生教材之用.鉴于此,我们编写、出版了这本研究生教材.

虽然当初出版此书的直接目的是为了解决本校研究生的教学之需,可是出版后,此书也受其他院校师生的关爱,为许多兄弟院校作为教材采用.

此书于1996年6月获全国高等学校机电类优秀教材一等奖.

此书于2001年被国家教育部遴选为全国推荐研究生教学用书.

借此书改版、再版的机会,我们对它做了某些补充、删改与修订,以答谢广大师生和工程技术人员厚爱.

首先,增补了“混沌振动”一章(第十四章).混沌的发现与研究,应该说是20世纪在非线性系统和复杂性领域最令人鼓舞的研究成果之一.近十年来,我国在混沌知识的传播以及对于工程系统中的混沌现象的揭示和研究方面都已取得可喜的成绩.混沌知识的工程应用也已经初见端倪.

时至今日,机类专业的硕士研究生如果对于混沌的认识仍然是一团混沌,将严重地限制他们认识事物的眼界和解决问题的能力.所增补的这一章简略讲述了混沌振动的含义、机制、特点和规律,其目的在于深化对于非性动态过程的认

识,并提高分析和处理非线性问题的能力.

其次,删去了第一版的第七章和第十三章中有关机床的非线性颤振方面的内容.其原因是,在教学实践中我们感觉到这些内容过专、过深,不适合作为硕士研究生的教学内容.

第三,删去了第一版的第九章第四节关于模态综合法的部分.除了因为这部分内容也是比较专门化,在教材容量的限度内难于阐述清楚以外,还为了平衡教材的分量.我们不希望这部教材由于增补了新的内容而导致篇幅膨胀,增加教学的困难.

第四,对全书的文字、插图和公式进行了少量校改.

黄其柏为此书的改版和修改提出了宝贵的建议.李高正为本书的再版做了大量的校对工作.在此谨致谢意.

我十分怀念在编写此书中,与谌刚、吴雅合作共事的那一段时光.他们的努力为此书的形成和出版做出了重要的贡献.如今,吴雅已离开人世,给我们留下了永久的怀念.愿以此书的新版告慰她的在天之灵!谌刚已出国多年,不可能再参与此书的修改和再版的工作,在此,谨对他道一声珍重!

由于编者的水平有限,时间仓促,书中一定还有不少未能尽善之处、不妥之处、甚至错误之处,切望广大读者不吝指正,将你们的意见或建议反馈给我们.

华中科技大学 师汉民

于喻家山下

2003-9-1

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。

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,供读者选做。

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 学时就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 学时就能讲完。

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与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

第二篇 深化篇	(1)
第八章 分析力学基础	(3)
8.1 引言	(3)
8.2 功和能	(5)
8.3 虚功原理	(6)
8.4 势能与动能的广义坐标表达式	(12)
8.5 D'Alembert 原理	(14)
8.6 Lagrange 方程	(15)
8.7 系统的线性化及线性系统的 Lagrange 方程	(19)
思考题	(21)
习题	(21)
第九章 多自由度系统振动分析的常用方法	(24)
9.1 估算多自由度系统自然频率与模态向量的几种方法	(24)
9.2 子系统综合法(一)——传递矩阵法	(35)
9.3 子系统综合法(二)——机械阻抗法	(46)
思考题	(60)
习题	(60)
第十章 连续系统的振动及其精确解	(63)
10.1 弦的横向振动	(63)
10.2 杆的纵向振动	(72)
10.3 轴的扭转振动	(76)
10.4 弦、杆、轴振动方程的相似性	(77)
10.5 边界条件	(78)
10.6 对于初始激励的响应	(82)
10.7 对于过程激励的响应	(85)
10.8 波动方程	(87)
10.9 梁的弯曲振动	(91)
10.10 模态正交性	(97)
10.11 以振型叠加法研究梁的响应	(100)
10.12 连续系统的动能、势能、符号确定性与瑞利商	(106)
思考题	(110)

习题	(111)
第十一章 连续系统的离散化与近似解法	(114)
11.1 估算系统基频的几种方法	(114)
11.2 集中质量法	(122)
11.3 特征函数参数化方法	(131)
11.4 有限元法	(144)
思考题	(171)
习题	(172)
第十二章 非线性系统的振动	(176)
12.1 引言	(176)
12.2 状态空间与相图	(178)
12.3 奇点邻域中相图的特性	(186)
12.4 保守系统及其在大范围的运动	(195)
12.5 极限环	(198)
12.6 平均法	(201)
12.7 迭代法	(207)
12.8 摄动法	(213)
12.9 时变系统	(220)
思考题	(222)
习题	(222)
第十三章 自激振动	(225)
13.1 自激振动的现象和特点	(225)
13.2 由于速度反馈引起的自激振动	(228)
13.3 由于位移的延时反馈而引起的自激振动	(238)
13.4 由于模态耦合引起的自激振动	(251)
13.5 自激振动的识别、建模与防治	(258)
思考题	(259)
习题	(259)
第十四章 混沌振动	(261)
14.1 混沌的成因与特点	(261)
14.2 通向混沌之路	(274)
14.3 奇异吸引子	(282)
思考题	(293)
习题	(293)
第十五章 振动问题分析求解中的计算方法	(295)

15.1 求解特征值问题的计算方法	(295)
15.2 有阻尼线性系统的状态转移矩阵分析法	(318)
15.3 求解系统响应的计算机数字仿真方法	(327)
思考题	(335)
习题	(335)
思考题参考答案	(338)
参考文献	(341)

第二篇 深 化 篇

- 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
- 自激振动
- 混沌振动
- 振动问题分析求解中的计算方法

