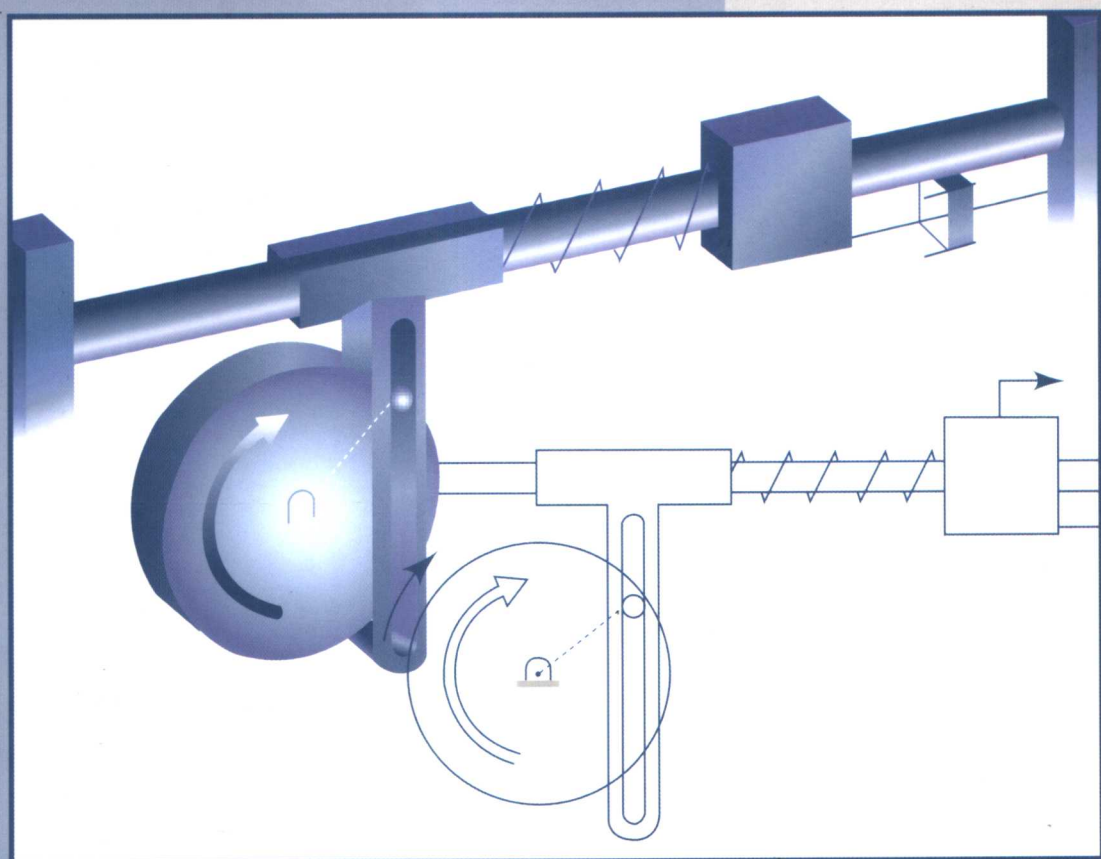


机械与 结构振动

—— 理论与应用

Mechanical
and Structural Vibrations
Theory and Applications



[美] J·H·金斯伯格 著

白化同 李俊宝 译

TH113.1
J-742

机械与结构振动 ——理论与应用

**Mechanical and Structural Vibrations
Theory and Applications**

[美] J·H·金斯伯格 著

白化同 李俊宝 译

中国宇航出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是机械与结构振动的基础教程。1~5章讨论单自由度、多自由度系统的激励与响应问题,第6、7章分别用 Ritz 级数法与场方程法研究连续系统。第8、9章介绍有限元与子结构概念。第10章讨论阻尼模态分析法,第11章对回转系统进行模态分析,最后一章是转子动力学简要介绍。

该书内容丰富,例题多而有趣,既可作为教学用书,也可作为力学专业的本科生、研究生以及机械与结构工程师的参考书。

版权所有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

机械与结构振动:理论与应用 / (美)金斯伯格著;白化同,李俊宝译. —北京:中国宇航出版社,2005.1

书名原文:Mechanical and Structural Vibrations;

Theory and Applications

ISBN 7-80144-893-6

I.机... II.①金...②白...③李... III.①机械振动-教材②结构振动-教材 IV.①TH113.1②O327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 121537 号

责任编辑 李之聪 封面设计 元 麦 责任校对 王 妍

出 版 行 **中国宇航出版社**

社 址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830
(010)68768548

网 址 www.caphbook.com/ www.caphbook.com.cn

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900 (010)88530478(传真)
(010)68768541 (010)68767294(传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑
(010)68371105 (010)62529336(传真)

承 印 北京京科印刷有限公司

版 次 2005 年 1 月第 1 版

2005 年 1 月第 1 次印刷

规 格 787 × 1092

开 本 1 / 16

印 张 38.5

字 数 1025 千字

书 号 ISBN 7-80144-893-6

定 价 76.00 元

本书如有印装质量问题,可与发行部调换

译者的话

《机械与结构振动——理论与应用》一书终于与读者见面了。译作依据的原著是 JOHN WILEY & SONS 出版公司出版的 *Mechanical and Structural Vibrations—Theory and Applications* (2001 年第 1 版), 其作者是佐治亚理工学院的杰里·H·金斯伯格 (Jerry H. Ginsberg) 教授。

我拿到原著时, 原是想随时翻阅参考一下的, 但刚刚读了前几页, 就被作者的敬业精神所感染。金斯伯格教授已经儿孙满堂, 当步花甲之年, 仍笔耕不辍, 为青年学子修桥铺路, 希冀他们在自己的领域内顺利通向成功的彼岸。可以看出, 他为此书倾注了大量的心血。再往下看, 觉得该书行文流畅, 论述细腻, 插图精良, 不由得生出了翻译出版的念头。谋与中国科学院声学研究所李俊宝博士, 他欣然答应合作。

本书专注于线性系统的确定性振动, 目的是在有限的篇幅内比较深入地论述这一课题。作者认为, 透彻理解线性系统的振动特性对于学习随机振动、非线性振动以及板壳振动等具有重要意义。本书特点是深入浅出, 读者既容易入门, 也能够了解到较高层面的问题。另一个特点是例题多, 习题多。全书共讲解例题 105 个, 其中有许多鲜见于其他教科书, 实践性比较强, 读来饶有兴味。如果读者结合阅读能从 532 个习题中选取一部分练习一下, 对于掌握本书所讲的理论与方法将有极大帮助。此外, 书中很多例题采用了目前比较流行的 MATLAB 和 Mathcad 计算软件, 不但使许多题目的求解成为可能, 而且对读者学习这两种计算技能将起到引领作用。我们相信, 读者通过本书可以学到新颖的振动知识, 打好自己的理论基础, 同时还可领略作者的授课经验与著述风格。

但是我们必须提醒读者, 作者对于某些理论问题的阐述可能会引起争论。事实上, 国内已有学者指出, 该书有些观点值得商榷。比如作者不用拉格朗日第二类方程而用功率平衡公式推导系统的运动方程, 理论根据有不足之嫌。再比如, 6.4 节关于 Ritz 级数的收敛性证明也值得进一步商榷。译者所见, 只要我们的翻译没有曲解作者原义, 这种能够激发人们求真热情的争论并没有什么坏处。科学技术的进步正是在永无休止的争论中实现的。

原著有一些文字或印刷方面的错误, 译者识别出来的在译文中均已改正, 但是未加注明, 以避免累赘。

本书的出版得到了许多人的支持, 译者向他们表示由衷的感谢。

中国空间技术研究院总体部于登云、徐晓权、殷礼明等领导同志, 一贯爱护技术人员的积极性, 鼓励大家结合工作多出书, 出好书。正是他们的支持, 本书才得以立项。

唐致亭、赵坚成同志经常关心本书的进展情况。

中国宇航出版社的编辑和领导为本书的出版花费了很多精力。几年来我们一直保持密切联系, 并且合作愉快。

限于译者水平, 书中肯定有不少欠妥之处甚至错误, 恳请读者批评指出。纠正一个错误, 等于一个进步。

第一译者

前 言

我给本科学生与研究生讲授振动课时用过好几种教科书,但都不很满意。没有人同意我对教科书的看法,而我认为对工程实践与科学研究极为重要的一些概念,却很少有人认真对待。尽管如此,当时我并不认为试图给众多的教科书再增加一个版本有什么价值。1996年佐治亚理工学院用做奥林匹克村一事,让我改变了观点。那时为了适应奥运会的日程安排,要求缩短教学课时,这就迫使我重新考虑怎样在我讲授的课程中将一般内容都包括在内。我探索出了一种方法向学生介绍梁的振动,而不必解偏微分方程。当我就这一课题准备每一堂课时,我认识到所涉概念的确十分深刻而广博。这使我确信,我在课堂上的所作所为不同于大部分教科书。我的工作根本上改变了以往的标准授课方法,而学生和导师均可从中获得巨大益处。

线性振动理论的基础是其统一性,它反映了这样的事实:各种系统的物理过程是相似的。我们强调这个基础性论题而不是强调分析某一具体概念性模型所需要的数学方法,就是要把我们的课题研究跟“不同类型的模型系统彼此可能密切相关”这样一个事实相联系。由此,学生可逐步取得一种经验,根据这种经验,认识与每一种系统相联系的现象,加速建模过程。此外,现代软件大大拓宽了可解例题和作业的范围。要注意这些软件的应用。其特点之一是,为了发挥软件的效能,其中所用的算法不同于我们所理解的正规数学关系式。

读者将会发现,书中内容的展开按不同层次将许多标准课题集合起来,并加进了一些基础教科书中不常见到的材料。我不知道有哪一本教科书把我们所讲授的所有课题都包括了进去。讲授这些课题时尽可能地予以强化,使本书的篇幅不超出一般教科书的限制。我省略了三个重要课题——板壳振动、随机振动和非线性振动,其主要理由是为了避免肤浅,这三个课题许多优秀教科书都有论述。

朋友问,我是否写成了一本毕业生或研究生水平的书。我回答,读者对象是每个人。不应把本书看成是纯粹的研究生读本,因为具有基本技能的任何人都能理解其大部分内容。同时,我也不希望过分简化内容,因为即将走上工作岗位的学生必须迎战实际工程实践的复杂性。确实,我的基本经验是,一本好的教科书应当构造一个对每个学生来说都可触及的复杂世界,而不应当极力简化其真实性,直至失却合理性。

为了适应像毕业生、研究生这类读者的需要,我适当考虑了第2章至第6章的结构。每章前面几节讨论后面章节要用到的核心概念和方法,后面几节介绍较高层次的非基本课题。每一节都有许多例题和练习,包括了各种难度的题目,可供讲授时使用。我的同事皮特·罗杰斯(Pete Rogers)评论此书说,大多数教科书写得一章难似一章,而本书有一系列的高峰与低谷。一个更形象的说法是:难点锯齿状分布,前一章构建了一座山峰,后一章又回到了前一章最低层面的基础之上。

本书各章的主要特点如下。

2 机械与结构振动

- 第1章讨论由质点和刚体组成的离散系统的建模问题,讨论简单系统的牛顿-欧拉运动方程。复杂一点的系统,我们通过功率平衡公式来论述。功率平衡公式仅对线性时不变系统是正确,这种方法与拉格朗日方程完全平行,但对本科学生来说更容易接受。对拉格朗日方程已经熟悉的学生可以把精力放在线性化方法上;我们对线性化方法将做详细讨论。

- 第2章相当传统地叙述单自由度系统的自由振动和暂态强迫振动。讨论强迫响应时,我们把叠加原理、时延概念及表格化标准解法结合在一起加以分析,这是主要的改进之处。我了解到学生在应用拉普拉斯变换时常常依靠表格,因此我采用上述讲授方法,以期加深学生对于系统响应的基本理解。这种方法也很适合数学软件。

- 第3章致力于谐波激励的讨论。这里的切入点之一是让学生熟悉 FFT 技术。许多学生毕业后从事实验工作和数据解释任务,但对迭混与泄漏这类概念及有关问题并不熟悉。而且,音频数据与视频数据的数字信号处理具有深远的技术意义,所以使工程师熟悉这些方法是绝对必要的。达到这个目标,要使用复变量来计算稳态谐波响应。自然,周期激励的复数傅里叶级数也要用到。讨论了包括吉布斯现象在内的正常数学问题之后,作为计算傅里叶系数的一种途径,我们来推导离散傅里叶变换(DFT)和 Cooley-Tukey FFT 算法。然后讨论怎样使用程序软件分析单自由度系统的周期性响应,这是进一步正确使用 FFT 分析暂态振动的一个跳板。

- 第4章致力于多自由度系统的模态分析。为了演示得到振动模态所需的一般特征值问题的正规推导方法,我们要手工分析二、三自由度系统。一旦深刻掌握了基本概念,再来讨论计算方法。许多振动课本把精力集中在数字特征值算法问题上。但是我们已经把特征值的计算方法结合进数学软件和用各种编程语言编制的科学计算子程序中。因此这些工具的使用法和潜在的误差识别是我们最为关心的。本章的剩余部分是关于模态方程的极为常规性的处理,但我想读者将会发现所举例子意趣盎然。

- 第5章研究传递函数的用法,以便研究多自由度系统对谐波激励的响应。传递函数法的这种直观性可以使我们把注意力集中在一些基本现象上,如调谐减振器时所遇到的。频域传递函数的概念很自然地引出实验模态分析的概念,这个概念我认为在基础阶段还没有加以充分讨论。

- 第6章最具创造性。我们将把 Ritz 级数法作为杆件振动建模的分析工具;Ritz 级数法通常叫做假设模态法。这个概念是作为建立离散化运动方程的一种近似方法而介绍的,这些离散运动方程的形式类似于支配多自由度系统的那些方程。这样便可使学生平稳过渡到连续系统的振动,而不必同时逾越求解偏微分方程所要求的极其复杂的手续。该方法的另一个优点是,在杆的任意位置附加的质量、弹簧和阻尼器可直接描述,从而加强了可分析系统的真实性,强化了“连续体与集中部件模型没有本质上的不同”这样一种认识。然后我们的讨论转到模态分析。沿此路线前进时,我十分惊讶地发现,我们不仅可以计算模态函数,而且可以导出数学上的正交性关系式。由于考虑到了任意位置上质量和弹簧的存在,因此在这个意义上,这些关系式较之通常根据关于场方程的 Sturm-Liouville 理论推导出来的那些关系式更具一般性。关于收敛性问题,我们通过研究 Rayleigh 比及其推论来加以讨论。在举例中将碰到由病态方程派生出来的一个特别有趣的现象。

- 第7章用场方程来研究连续系统的振动。先讲变量分离。我们的分析将任意混合边界条件合并考虑,但其他方面的分析却是相当标准的。我们的目的是证明 Ritz 级数公式的正

确性,并把某些基本物理现象放在突出的位置。例如,关于模态振动的波动性那一节将引出估计高频模态函数所需要的逼近识别法。在其他书中我还没有发现与这种表达方式相应的处理。用解析模态函数推导强迫响应之后,我们来研究波动描述,从中得出传输矩阵。最后一节应用 Timoshenko 梁理论,就波的传播及模态分析来验证经典梁理论的正确性。这里有个新特点,我们将讨论在任意边界条件下如何计算 Timoshenko 梁的模态。

- 第 8 章阐述梁的有限元分析。它的源头是一组符号,我半开玩笑地说,“这组符号是你了解有限元需要知道的一切事情,除非你想运行一个有限元程序。”这里,我的目的是对那些程序中的每一项基本操作给出一个评价,说明程序所提供的某些强化振动分析能力。

- 第 9 章讨论子结构合成问题。这一概念连同使用拉格朗日算子的一个约束公式一起来介绍。导出基本方法之后,我们将把部件模态综合的 Hurty 公式剪裁成 Ritz 级数描述,以便对拉格朗日算子公式怎样加以推广给出一个评述。我们选了一些例子来说明这些操作步骤、基本的振动现象(如各种不同类型位移的耦合)以及模态的局部性等。

- 从基础教科书的观点看,第 10 章又是一个新东西。任意的阻尼特性使模态分析的标准方法失去了意义,但这些阻尼特性可以在状态-空间中进行讨论。有些人在论述这一问题时所选用的方法会导致非对称的系统矩阵,从而产生了怎样与回转系统的分析结合起来的课题。然而,我们这里导出的特征值问题是对称的,这样便可以在状态-空间中进行分析,而不必大幅度更改早已定型的程序与算法。

- 第 11 章将状态-空间法加以扩展,使之涵盖回转惯性效应与 Coriolis 惯性效应、跟随力及反馈力。在此情形下,矩阵特征值问题本来就是非对称的,因而也不是自伴的。上一章所揭示的状态-空间公式大大简化了向这种系统的扩展。同样,这里我们也选了一些例子,为的是既说明一般方法,又解释一些特殊现象。具体说,传输线缆的横向振动和内部有流动液体的管道稳定性问题这些例子,不久以前曾经是研究课题。

- 第 12 章将上一章的一般成果应用于旋转机械的许多典型模型。我相信,了解高速旋转机器中碰到的这些问题,对于现代工程实践来说是非常重要的。我们所选每个模型都是为了说明动态现象的多样性,包括阻尼与刚度的非直观效应。这里,我们的意图是提供关于基本问题的实际知识,激励一些读者更仔细地研究这一课题。

我力图赋予各章以某些共同的属性。所选例题是为了说明一般概念和方法。适用于大部分例题的另一个准则是介绍并讨论有趣而重要的振动现象,目标是使学生能够解释某件事为何会发生。这方面一个次要的特点是,对每个例题,开头我都加了一些说明,指出学生应该从演算中得到些什么。

在选择数学工具时,我尽量因题制宜。在这方面,不要求多少基础知识。某些基本技能,如复数代数、矩阵代数、微分方程的待定系数法等,是最重要的数学必备知识。很显然,数学软件的应用能力,如 MATLAB 和 Mathcad,也是重要的。

数学软件应该怎样与课本结合起来是个困难问题。有各种各样的软件可以利用,每一种都拥有众多的支持者。在这种情况下我相信,只盯着其中的一种必定是个错误。我的经验,特别是对我的学生的调查表明, MATLAB 和 Mathcad 最适合学习振动。另一方面,某些研究性的题目用 Maple 之类的符号语言可能更好,而工程应用中的某些大型计算模型,利用汇编语言如 FORTRAN,可能会处理得最好。适当场合,本书将讨论与各种程序的执行过程有关的一般性问题。举例说明 MATLAB(5.2 版本)及 Mathcad 的一些特殊算法和程序段,目的是给学生

4 机械与结构振动

完成他们自己的工作开个头。然而,学生和导师具体采用何种软件,都不予限制,因为 MATLAB 和 Mathcad 包括了其他大多数同类软件中所采用的基本程序。

我希望本书是导师和学生急切要阅读的一本书,也愿你分享我在本书中不遗余力的探讨热情。

致 谢

对本书的最大贡献者是佐治亚理工学院的众多本科生和研究生,我曾经用本书的讲稿教授过他们。不管是他们直接提出的评论、问题和修改建议,还是通过作业和课堂发言间接反馈给我的意见,所有这些积极的参与让我了解到他们的要求的满足程度。在这些学生中,我要特别感谢哈里·加纳,瑞安·赖伊和迈克·斯文森,他们在书稿校对工作中十分专注。我的两个博士研究生研究助理对我的帮助极大。尼科尔·L·齐克尔巴克在我指导下教授本科课程期间,就本科学生看问题的角度提供了很多信息。她还是我撰写转子动力学部分的信息源和咨询人,并在子结构概念的处理方面提出了中肯的意见。迈克尔·V·德雷克塞尔对本书的贡献则集中体现在状态-空间模态概念和实验模态分析部分。

我的同事是我的坚强后盾。奥尔多·费里,正如他对我撰写高级动力学教科书所起的作用一样,是我完成本书的宝贵源泉。我早已记不清他给我提出了多少优秀的见解和建议。我借鉴了他用本书初稿给本科生讲课的经验,所以本书头几章深受他的影响。我必须感谢伍德拉夫机械工程学院院长沃德·O·下纳对撰写本书一事的理解;当我忘记赴约或迟到时,这种理解得到了充分的证明。

得克萨斯州 A & M 大学和特文特大学的路易斯·圣·安德列斯为本书花费了许多心血。他从尼科尔·L·齐克尔巴克(后者毕业于得州 A & M 大学)那里得知这本书稿,并请求允许他在课堂上使用。他就使用书稿的体验和一些课外练习题的答案提出了详细意见。他还成功地从学生那里征得了关于本书的许多建议和意见,这些信息对开篇几章的最后定稿起到了关键作用。

本书的审阅者是波士顿大学的 J·格雷戈里·麦克丹尼尔,奥克兰大学的 S·J·塞沃沙尼,南伊利诺伊大学的瑟格·阿布雷特,德克萨斯大学奥斯汀分校的劳尔·朗戈利亚,奥伯恩大学的乔治·弗劳尔斯,伍斯特理工学院的侯致昆(音译),以及克莱蒙森大学的 E·哈里·劳。他们对本书富有见地的评价(不管是正面还是反面的)时刻提醒我,本书的目标是要满足许多不同的读者对象。我期待着再次从他们以及我的读者那里听到中肯的意见。

我要特别感谢约翰·威利父子出版公司的编辑约瑟夫·海顿。他认真负责的敬业精神对我集中精力完成本书是重要鞭策。

我把对家人的感谢留在最后,因为他们给我的帮助是无止境的。我可爱的孙子孙女利厄·摩根·金斯伯格,伊丽莎白·雷切尔·金斯伯格和刚刚来到世上的阿比盖尔·罗斯·金斯伯格给了我许多欢乐。我无法用语言感谢他们的父母米切尔·罗伯特·金斯伯格和特蕾西·西尔斯·金斯伯格把三个孙子女带进我的生活,并充分理解我对本书孜孜不倦的投入。我的儿子丹尼

6 机械与结构振动

尔·布莱恩·金斯伯格虽然和我的领域不同,但却有着共同的学术追求,我因此而拥有一种特别的成就感。最后,我要对我的妻子罗娜·阿克塞尔罗德·金斯伯格表示爱敬之意。在我撰写本书过程中她分担的工作比谁都重。我已无法数清有多少次因此书而晚归,多少次不知不觉地冷落了。妻子不仅是我忠诚的伴侣,又是一位出色的编辑。有她在,写作格式手册对于我便成了多余。

目 录

第 1 章 离散系统的运动方程	(1)
1.1 振动研究概述	(1)
1.2 系统元件	(3)
1.3 广义坐标	(7)
1.4 牛顿 - 欧拉运动方程	(10)
1.5 时不变系统的功率平衡法	(15)
1.5.1 功率平衡定律	(15)
1.5.2 线性化能量与功率	(16)
1.5.3 线性化运动方程	(19)
1.5.4 实现方法	(20)
参考文献与选读材料	(40)
习题	(41)
第 2 章 单自由度系统的暂态响应	(50)
2.1 谐波函数	(50)
2.1.1 基本参数	(50)
2.1.2 复变量表示法	(52)
2.1.3 代数运算	(54)
2.2 自由振动	(58)
2.2.1 无阻尼系统	(59)
2.2.2 欠阻尼系统	(61)
2.2.3 过阻尼系统	(68)
2.2.4 临界阻尼系统	(69)
2.2.5 库仑摩擦	(73)
2.3 对基本激励的暂态响应	(76)
2.3.1 待定系数法	(76)
2.3.2 叠加与时延	(78)
2.3.3 脉冲激励	(80)
2.3.4 阶跃响应与冲激响应	(83)
2.3.5 冲击谱	(85)
参考文献与选读材料	(87)
习题	(87)
第 3 章 对谐波激励的稳态响应	(94)

8 机械与结构振动

3.1 复频响应	(94)
3.2 功率消耗	(101)
3.2.1 共振品质因数	(102)
3.2.2 结构阻尼	(104)
3.3 共振响应	(107)
3.4 转动不平衡	(111)
3.4.1 基本模型	(111)
3.4.2 频率响应	(113)
3.5 轴的回旋	(117)
3.6 力传输率	(119)
3.7 周期激励	(120)
3.7.1 复数傅里叶级数	(120)
3.7.2 离散傅里叶变换	(123)
3.7.3 离散傅里叶反变换	(126)
3.7.4 FFT 算法的解释与实现	(127)
3.7.5 用 FFT 计算周期响应	(130)
3.7.6 加速度计和地震仪表	(136)
3.8 再论暂态响应	(140)
3.8.1 卷积积分	(141)
3.8.2 用 FFT 计算暂态响应	(143)
参考文献与选读材料	(161)
习题	(162)
第 4 章 多自由度系统的模态分析	(172)
4.1 背景知识	(172)
4.2 特征值问题——无阻尼系统	(175)
4.2.1 固有频率与模态	(175)
4.2.2 正交性与标准化	(181)
4.2.3 计算机实现方法	(184)
4.2.4 柔度系数	(189)
4.2.5 重复固有频率	(192)
4.2.6 刚体模态	(196)
4.3 模态方程	(200)
4.3.1 坐标变换	(200)
4.3.2 模态坐标	(201)
4.3.3 机械能与功率的模态坐标描述	(203)
4.3.4 自由振动响应	(203)
4.3.5 强迫响应	(207)
4.3.6 模态阻尼	(210)
4.3.7 谐波稳态响应	(214)

参考文献与选读材料	(221)
习题	(222)
第 5 章 多自由度系统的谐波激励	(231)
5.1 频域传递函数	(231)
5.2 结构阻尼与模态分析	(233)
5.3 减振器	(236)
5.4 FFT 技术	(240)
5.4.1 暂态响应分析	(240)
5.4.2 实验模态分析	(245)
参考文献与选读材料	(249)
习题	(249)
第 6 章 弹性杆件的振动:Ritz 级数法与 Rayleigh 比	(255)
6.1 运动方程	(256)
6.1.1 轴向位移	(257)
6.1.2 圆杆的扭转	(265)
6.1.3 弯曲位移	(269)
6.1.4 实现方法与求解	(277)
6.2 特征解	(281)
6.3 模态分析	(290)
6.3.1 模态函数的正交性	(290)
6.3.2 模态响应	(293)
6.3.3 初始条件:展开定理	(294)
6.3.4 自由振动	(296)
6.3.5 冲激响应	(296)
6.3.6 谐波稳态响应	(297)
6.4 Rayleigh 比与收敛性	(301)
6.5 时间相关边界条件	(311)
6.6 离散系统的 Ritz 法	(318)
参考文献与选读材料	(320)
习题	(321)
第 7 章 振动杆件的场描述	(328)
7.1 运动方程的推导	(328)
7.1.1 场方程	(329)
7.1.2 边界条件	(332)
7.2 拉伸与扭转的特征解	(336)
7.3 弯曲的特征解	(341)
7.4 模态的波动解释与高频逼近法	(349)
7.5 对称性与模态函数	(353)
7.6 正交性	(356)

10 机械与结构振动

7.7 响应的模态分析	(361)
7.7.1 模态方程	(361)
7.7.2 稳态响应与暂态响应	(362)
7.8 时间相关边界条件	(372)
7.8.1 Mindlin-Goodman 分解	(372)
7.8.2 谐波边界激励的波动解	(375)
7.9 Timoshenko 梁理论	(381)
7.9.1 场方程	(382)
7.9.2 波动解	(385)
7.9.3 模态分析	(387)
参考文献与选读材料	(393)
习题	(394)
第 8 章 有限元法	(401)
8.1 插值函数	(401)
8.2 单元矩阵	(403)
8.3 向整体坐标的转化	(407)
8.4 单元的集合	(409)
8.5 反作用力和约束条件	(414)
参考文献与选读材料	(417)
习题	(418)
第 9 章 子结构概念	(421)
9.1 拉格朗日乘法	(421)
9.1.1 约束方程和反作用力	(421)
9.1.2 运动方程的综合	(426)
9.1.3 求解方法	(429)
9.2 部件模态综合	(436)
9.2.1 约束释放	(437)
9.2.2 部件参数	(440)
参考文献与选读材料	(443)
习题	(444)
第 10 章 阻尼模态分析:状态空间	(447)
10.1 状态空间方程	(447)
10.2 特征值问题	(448)
10.3 与以前结果的关系	(450)
10.4 正交性	(455)
10.5 模态坐标	(458)
10.5.1 自由振动	(460)
10.5.2 冲激力	(460)
10.5.3 稳态谐波振动	(461)

10.5.4 刚体运动	(462)
10.5.5 结语	(462)
参考文献与选读材料	(467)
习题	(467)
第 11 章 回转系统的模态分析	(471)
11.1 一般线性运动方程	(471)
11.2 左右特征值问题	(478)
11.3 动态稳定性	(484)
11.4 双正交性与运动模态方程	(489)
11.5 运动的连续系统	(495)
参考文献与选读材料	(506)
习题	(507)
第 12 章 转子动力学介绍	(512)
12.1 转子动力学模型的要素	(512)
12.2 内、外阻尼的影响	(514)
12.3 正交各向异性柔性轴承	(519)
12.4 回转效应	(523)
12.5 正交各向异性柔性轴	(529)
参考文献与选读材料	(533)
习题	(533)
附录 A 拉格朗日方程	(536)
附录 B 欠阻尼单自由度系统的暂态响应	(542)
附录 C 均匀杆的变形模态	(543)
附录 D 奇数号习题参考答案	(545)

课程安排实例

以下所列课程设置可以作为安排教学计划时的参考。在这两种课程设置中,各章的深度可根据需要来选取。

高级单学期课程安排

第 1 章 离散系统的运动方程

- 1.1 振动研究概述
- 1.2 系统元件
- 1.3 广义坐标
- 1.4 牛顿 - 欧拉运动方程
- 1.5 时不变系统的功率平衡法

第 2 章 单自由度系统的暂态响应

- 2.1 谐波函数
- 2.2.1 ~ 2.2.4 自由振动
- 2.3.1 ~ 2.3.4 对基本激励的暂态响应

第 3 章 对谐波激励的稳态响应

- 3.1 复频响应
- 3.2 功率消耗
- 3.4 转动不平衡
- 3.6 力传输率
- 3.7.1 ~ 3.7.5 周期激励

第 4 章 多自由度系统的模态分析

- 4.1 背景知识
- 4.2.1 ~ 4.2.4, 4.2.6 特征值问题——无阻尼系统
- 4.3 模态方程

第 5 章 多自由度系统的谐波激励

- 5.1 频域传递函数
- 5.2 结构阻尼与模态分析
- 5.3 减振器

第 6 章 弹性杆件的振动: Ritz 级数法与 Rayleigh 比

- 6.1 运动方程
- 6.2 特征解

初级研究生一学期课程安排(适用于具有应用拉格朗日方程经验的学生)

第 1 章 离散系统的运动方程

- A.2 功率平衡与拉格朗日方程
- 1.5.4 用于时不变系统的功率平衡法

第 2 章 单自由度系统的暂态响应

- 2.1 谐波函数
- 2.2 自由振动
- 2.3 对基本激励的暂态响应

第 3 章 对谐波激励的稳态响应

- 3.1 复频响应
- 3.2 功率消耗
- 3.3 共振响应
- 3.4 转动不平衡
- 3.5 轴的回旋
- 3.6 力传输率
- 3.7 周期激励
- 3.8 再论暂态响应

第 4 章 多自由度系统的模态分析

- 4.1 背景知识
- 4.2 特征值问题——无阻尼系统
- 4.3 模态方程

第 5 章 多自由度系统的谐波激励

- 5.1 频域传递函数
- 5.2 结构阻尼与模态分析
- 5.3 减振器
- 5.4 FFT 技术

第 6 章 弹性杆件的振动:Ritz 级数法与 Rayleigh 比

- 6.1 运动方程
- 6.2 特征解
- 6.3 模态分析
- 6.4 Rayleigh 比与收敛性

第 7 章 振动杆件的场描述 *

- 7.1 运动方程的推导
- 7.2 拉伸与扭转的特征解

* 这里之所以列出第 7 章是为了便于讨论场方程。但是将后面任何章节中所涉场方程内容——特别是关于子结构法的 9.1 节包括进来,也是一种合理的课程设置。