

(美) Singiresu S. Rao 著 李欣业 张明路 编译

Li Xinye Zhang Minglu

PEARSON
Prentice
Hall

Fourth Edition

Mechanical Vibrations

机械振动

(第4版)



清华大学出版社

Mechanical Vibrations

机械振动

(第4版)

清华大学出版社
北京

北京市版权局著作权合同登记号 图字 01-2007-2035 号

Simplified Chinese edition copyright © 2009 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and TSINGHUA UNIVERSITY PRESS.

Original English language title from Proprietor's edition of the Work.

Original English language title: Mechanical Vibrations. Fourth Edition by Singiresu S. Rao.

Copyright © 2004

ISBN: 0-13-048987-5

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体翻译版由 Pearson 授权给清华大学出版社在中国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区)出版发行。

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

机械振动(第4版) / (美)饶(Rao, S. S.)著;李欣业,张明路编译. —北京:清华大学出版社, 2009. 8

书名原文: Mechanical Vibrations, Fourth Edition

ISBN 978-7-302-19506-1

I. 机… II. ①饶… ②李… ③张… III. 机械振动 IV. TH113.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 016630 号

责任编辑: 张秋玲

责任校对: 刘玉霞

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者: 北京密云胶印厂

装 订 者: 北京市密云县京文制本装订厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×230

印 张: 45.75

字 数: 991 千字

版 次: 2009 年 8 月第 1 版

印 次: 2009 年 8 月第 1 次印刷

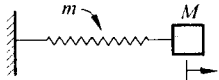
印 数: 1~3000

定 价: 79.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。
联系电话: 010-62770177 转 3103 产品编号: 024889-01

等效质量、等效弹簧与等效黏性阻尼器

等效质量



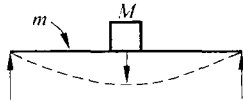
质量为 m 的弹簧末端连接一个质量 M

$$m_{eq} = M + \frac{m}{3}$$



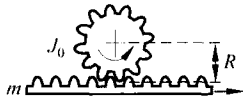
质量为 m 的悬臂梁在自由端具有一个集中质量 M

$$m_{eq} = M + 0.23m$$



质量为 m 的简支梁在跨度中点具有一个集中质量 M

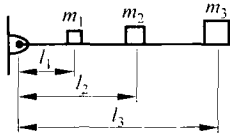
$$m_{eq} = M + 0.5m$$



平动质量与转动质量耦合的情况

$$m_{eq} = m + \frac{J_0}{R^2}$$

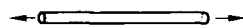
$$J_{eq} = J_0 + mR^2$$



铰支杆上的若干集中质量

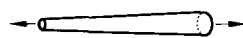
$$m_{eq1} = m_1 + \left(\frac{l_2}{l_1}\right)^2 m_2 + \left(\frac{l_3}{l_1}\right)^2 m_3$$

等效弹簧



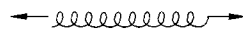
受轴向载荷作用的杆
(l 为杆的长度, A 为杆的横截面积)

$$k_{eq} = \frac{EA}{l}$$



受轴向载荷作用的变截面杆
(D 和 d 分别为两个端面的直径)

$$k_{eq} = \frac{\pi EDd}{4l}$$



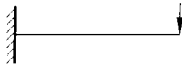
轴向载荷作用下的螺旋弹簧
(d 为簧丝直径, D 为簧圈的平均直径, n 为有效圈数)

$$k_{eq} = \frac{Gd^4}{8nD^3}$$



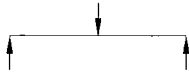
载荷作用在跨度中点的两端固定梁

$$k_{eq} = \frac{192EI}{l^3}$$



载荷作用在自由端的悬臂梁

$$k_{eq} = \frac{3EI}{l^3}$$



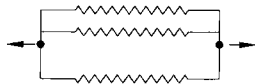
载荷作用在跨度中点的简支梁

$$k_{eq} = \frac{48EI}{l^3}$$



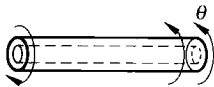
串联弹簧

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$$



并联弹簧

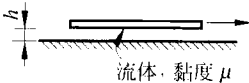
$$k_{eq} = k_1 + k_2 + \dots + k_n$$



发生扭转变形的空心轴
(l 为长度, D 为外径, d 为内径)

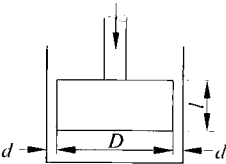
$$k_{eq} = \frac{\pi G}{32l} (D^4 - d^4)$$

等效黏性阻尼器



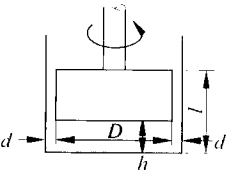
两个平行表面间有相对运动
(A 为较小板的面积)

$$c_{eq} = \frac{\mu A}{h}$$



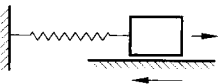
缓冲器(活塞在缸体中作轴向运动)

$$c_{eq} = \mu \frac{3\pi D^3 l}{4d^3} \left(1 + 2 \frac{d}{D}\right)$$



扭转阻尼器

$$c_{eq} = \frac{\pi\mu D^2 (l-h)}{2d} + \frac{\pi\mu D^3}{32h}$$



干摩擦(库仑阻尼)
(fN 为摩擦力, ω 为频率, X 为振幅)

$$c_{eq} = \frac{4fN}{\pi\omega X}$$

原著前言

本书是为本科大学生准备的一本关于振动工程课程的入门读物,依然保持了前几版的风格,比如在振动理论、计算与应用方面的介绍都是以尽可能简单的方式给出的。与前3版一样,第4版仍然加强了关于振动分析中的计算机技术的介绍。此外,还对一些基本概念和原理做出了进一步说明,以便加强对物理含义和概念的理解,这些都有赖于在本科生阶段学习力学所积累的经验。书中所选的大量例题和习题都是为了说明一些重要的原理和概念。来自我身边的教授和学生们的良好反应和鼓励促使我写出了这本书的第4版。在第4版中,还增加了一些新的特色,并对许多题目进行了修改和重写。而这些新增加的内容大多数都是由这本书的旧版的使用者和评论者提出的。一些重要的变化体现在以下几个方面:

(1) 新增加了900多道思考题,以帮助学生复习和检查对课本内容的理解。这些思考题包括多项选择题、简答题、判断题、连线题和填空题。

(2) 专门增加了一个附录以对MATLAB程序的设计作一个基本的介绍。

(3) 每一章都包括若干应用MATLAB求解的算例。

(4) 每一章都给出了若干应用MATLAB、C++和Fortran程序求解振动问题的通用程序。

(5) 在每一章的结尾还给出了一些新的问题包括习题,这些问题是要利用MATLAB、C++和Fortran程序进行求解的,为的是使学生充分领略许多重要的计算和编程细节。

(6) 思考题的答案以及MATLAB、C++和Fortran程序的源代码都放在这本书的网站上。

(7) 全书新增加了50多个说明性的例子。

(8) 全书新增加了100多道习题。

1. 特点

机械振动中的每一个题目都自成一章,所有的概念都给出了详尽的解释,所有的推导都给出了全部的细节。全书加强了利用计算机进行数值计算的介绍。每一章中都给出了基于MATLAB的例题。每一章中都有一些交互式的MATLAB、C++和Fortran程序,这些程序中的大多数都是以用来求解一般问题的子程序形式出现的。这些程序是为初学者专门设计的。虽然这些程序都经过了调试,但是不承诺保证它们的精度。在每一章里都给出了基于利用各种计算机程序的例题和习题,以使使学生充分领略许多重要的计算和编程细节。

在某种程度上,某些题目的介绍可能是以不太方便的方式给出的。第9~11章讨论的问题可以划为此类。大多数教科书都会在不同的场合讨论隔振器、吸振器和平衡问题。既

然研究振动的主要目的之一就是要控制振动响应,所以第9章中的每一个题目都是和振动控制直接相关的。第10章介绍振动测量仪器和激振器、实验模态分析以及设备状态监测。类似地,所有可应用于单自由度和多自由度以及连续系统的数值积分方法构成了第11章的全部内容。

本书的特色之处体现在以下几个方面:

- (1) 200多道例题涉及大多数题目。
- (2) 900多道思考题帮助复习和检验学生们对教材内容的理解。
- (3) 1000多道习题的全部解答专门作成了一个教师手册。
- (4) 在各章的最后,共有30多道设计性题目。

(5) 70多个MATLAB、C++和Fortran计算机程序帮助学生理解如何实现教材中讨论的数值方法。

(6) 在每一章和附录的起始页给出了那些对振动理论的发展曾做出过重要贡献的科学家和工程师的传记信息。

(7) 书中给出的MATLAB、C++和Fortran程序、思考题和习题的答案可以在这本书的网站上找到: www.prenhall.com/rao。

2. 符号和单位

在本书的例题和习题中,同时采用了国际制单位和英制单位。在致谢的后面,不仅给出了符号表,还列出了各种物理量的国际制单位和英制单位。在附录E中,又给出了国际制单位应用于振动领域时的简要讨论。用符号上面的箭头表示列向量,用方括号表示矩阵。

3. 内容

本书包括14章正文和6个附录。不同层次的机械振动教学可以灵活地选择这些内容进行讲授。如果此课程只为高年级或二年级的本科生安排一个学期,那么可以讲授第1~5章、第6~8章和第10章的部分内容以及第9章。本课程也可以侧重于计算机应用从而以第11章代替第8章。可供选择的方案还有,如果此课程为高年级安排讲授一年的话,第12~14章也提供了足够的内容。如果对于此课程的学时安排较少,教师可根据学生的基础和教学倾向选择其中的一些题目讲授。由于本书的讲解通俗易懂,所以也可以作为培训工程师的自学教材以及参考文献和计算机程序的源文献。

第1章以简要地讨论振动研究的历史和重要性开头,同时还介绍了振动分析中要用到的基本概念和术语。第2章介绍单自由度无阻尼平动和扭振系统的自由振动分析,还讨论了黏性阻尼、库仑阻尼和滞后阻尼的影响。第3章讨论单自由度系统在简谐激励下的响应。第4章讨论单自由度系统在一般力函数作用下的响应。在这一章里还讨论了卷积积分、拉普拉斯变换以及数值方法的作用。此外,这一章还介绍了响应谱的概念。第5章介绍两自由度系统的自由振动和受迫振动。在这一章里还讨论了自激振动和系统的稳定性问题。第6章介绍多自由度系统的振动分析,在理论上使用了矩阵分析方法。针对受迫振动问题的求解,详细地给出了模态分析的全部过程。第7章介绍了求解离散系统固有频率的几种近

似方法,包括邓克莱(Dunkerley)法、瑞利(Rayleigh)法、霍尔茨(Holzer)法、雅可比(Jacobi)法和矩阵迭代法。第8章讨论连续体的振动,包括弦的振动、杆的振动、轴的振动、梁的振动和薄膜的振动。此外,这一章也介绍了求解连续系统固有频率的近似方法——瑞利(Rayleigh)法和瑞利-李兹(Rayleigh-Ritz)法。第9章讨论如何进行振动控制,包括消振问题、隔振问题和吸振问题。这一章还讨论了旋转和往复运动机械的平衡问题以及轴的弓形回转问题。第10章介绍振动测量仪器、激振器以及信号分析问题。第11章介绍求离散和连续系统动力学响应的几种数值积分方法,包括中心差分法、龙格-库塔法(Runge-Kutta)、侯伯特(Houbolt)法、威尔逊(Wilson)法、纽马克(Newmark)法等。第12章以一维单元为例介绍有限单元方法。第13章介绍非线性振动问题如亚谐和超谐振动、极限环、时变参数系统和混沌问题的一般处理方法。第14章介绍线性系统的随机振动问题。附录A和附录B分别介绍数学关系以及梁和板的变形。附录C、附录D和附录E分别介绍矩阵及其运算、拉普拉斯变换对和单位制。最后,在附录F中简要介绍了MATLAB软件。

S. S. Rao

序

振动问题广泛存在于人们的生活和生产活动中,对各类振动问题进行分析、控制和优化,不但可以改善人们的生活环境,提高各类机械和结构的运行品质,并可延长使用寿命和提高生产率。同时,振动这种周期运动模式也是进一步研究各种复杂动力学行为和过程的基础。结合各种机械的振动问题来讲述机械和结构振动的基本理论与分析方法,可为广大的工程技术人员提供必要的专业技术基础。在国外,动力学已经成为大多数工科专业本科生和研究生的必修课。

美国迈阿密大学 Singiresu S. Rao 教授所著 *Mechanical Vibrations* 一书的第 4 版,不仅详尽地给出了线性振动问题的理论分析与处理方法这些传统内容,还分别介绍了非线性振动和随机振动的分析方法。此外,还有两章专门介绍振动控制与振动测量问题。本书的另外两个显著特色之一是大量丰富的来自工程实际的习题与设计性题目以及特别适合于中国读者的思考题,包括简述题、判断题、选择题、填空题和连线题;其次,本书特别加强了利用计算机(MATLAB 软件、C++ 和 Fortran 语言)进行振动分析的内容。这不仅使得本书的实用性更强,还可以提高读者尤其是年轻读者的兴趣。所有这些特点决定了本书可以使读者充分领略振动问题的机理和培养自己具备利用它们解决实际工程问题的能力。

我相信本书中译本的面市一定会使广大读者受益。

中国工程院院士 陈予恕
2009 年 6 月

前 言

由美国迈阿密大学 Singiresu S. Rao 教授所著的《机械振动(第 4 版)》一书,给人的第一感觉是锐意创新,引领潮流。其翔实的内容、理论与实用并重的风格、与广泛应用的计算机软件的完美结合不仅反映了作者深厚的专业积淀,同时也反映了美国作为世界第一科技强国所崇尚的学术风范。

作为一门传统的专业基础课,机械振动理论与应用可以惠及许多专业的工科大学生,翔实的内容不仅可以为将来从事具体工作打下坚实的理论基础,还可以拓宽专业视野,激发专业嗅觉;理论与实用并重是当今学术界的主流趋势,本书的风格同样可以影响它的使用者;本书的使用者可以充分领略现代计算机技术在振动分析中的魅力,这种魅力同样可以助推他们在从事振动理论与应用方面的研究时取得更大的成就。

引进原版教材虽然是吸收国外先进知识的一条捷径,但一个不可回避的问题是国人的英语水平而译著就可以作到两者兼顾。本书中文译本的面市必将推动我国机械振动课程的教材建设。

本版保留了前几版以尽可能简洁的方式介绍机械振动的基本理论与应用的风格,强调计算机技术与传统理论分析的融合,对基本原理的解释更加详尽,习题和例题更加丰富多彩。一些重要的变化原著作者已在前言中作了说明。

目前国内出版的关于机械振动方面的新书无论是在内容的系统与全面上,还是在实用性及计算技术的融合上,都不能与本书相比。

原著包括 14 章正文内容和 6 个附录,适合于不同层次和学时的“机械振动”课程选用。由于振动分析中的数值积分方法(原著第 11 章)和有限元方法(原著第 12 章)的内容,在后续课程中有更详尽的介绍,再加上篇幅的限制,所以这两章和原著第 13.11(非线性振动的数值分析方法)未作编译。至于原著中的 6 个附录(数学关系、梁和板的变形、矩阵及其运算、拉普拉斯变换对、单位制和 MATLAB 简介),则只保留了拉普拉斯变换对和单位制。此外,第 7 章内容变化较大。一是增加了李兹法和子空间迭代法这两节内容;二是对瑞利法和矩阵迭代法进行了改写。这主要是基于如下考虑:一是李兹法和子空间迭代法在利用计算机求多自由度系统的前若干阶固有频率和固有振型方面的优势是其他方法都不能比拟的;二是原著对瑞利法和矩阵迭代法的介绍还不够深入、系统。例如,瑞利法中并未区别瑞利第一商和第二商的概念;矩阵迭代法中,不是从讨论如何求第一阶固有频率及其振型开始,再过渡到如何在此基础上求出各高阶固有频率和高阶振型。

第 1 章介绍振动理论的基础知识;第 2 章讨论有阻尼单自由度系统和无阻尼单自由度

系统的自由振动;第3章讨论单自由度系统在简谐激励下的受迫振动问题;第4章讨论单自由度系统在任意激励下的受迫振动问题;第5章讨论两自由度系统的自由振动和受迫振动问题;第6章借助矩阵运算讨论多自由度系统的振动分析方法;第7章介绍确定多自由度系统固有频率和固有振型的近似方法如 Rayleigh 法、Dunkerley 法和矩阵迭代法等;第8章讨论弹性体包括弦、杆、轴、梁和薄膜的振动问题;第9章讨论振动的控制问题;第10章介绍振动的测量与信号分析问题;第11章(对应原著第13章)介绍非线性振动问题的分析方法;第12章(对应原著第14章)介绍随机振动问题的处理方法。

第1~8章的部分内容可以作为本书的基本部分;第9~10章可以作为本书的拓展部分;第11,12章可以作为本书的提高部分。指导者也完全可以根据需要选用本书的部分内容作为辅导材料。

本书第2,4,5,12章和11.8~11.14节由李欣业执笔,第3章由胡竟湘执笔,第6,8章由杨理诚执笔,第7章由钟顺执笔,第9,10章由张明路执笔,第11.1~11.7节由李银山执笔。

特别感谢清华大学出版社张秋玲教授,作为本书的责任编辑,她的慧眼相识才使得此译著的出版成为可能。同时在编辑过程中,为保证译著的质量,她与译者进行了大量的沟通与求证。

硕士研究生杨彦龙、张华彪、杨延鹏、张丽娟和许多本科生在部分章节、习题和程序的编译及校对方面提供了大量的帮助,在此一并致谢。

衷心感谢中国工程院院士陈予恕教授为本书作序。

限于水平,错误与不妥之处难免,恳请广大同行与读者指正。

李欣业 张明路

2008年8月于天津

目 录

| | |
|---------------------|----|
| 第 1 章 振动理论基础 | 1 |
| 1.1 振动的基本概念 | 2 |
| 1.2 振动的分类 | 4 |
| 1.3 振动分析的一般步骤 | 6 |
| 1.4 弹簧元件 | 8 |
| 1.5 质量或惯性元件 | 15 |
| 1.6 阻尼元件 | 19 |
| 1.7 简谐运动 | 24 |
| 1.7.1 简谐运动的矢量表示 | 25 |
| 1.7.2 简谐运动的复数表示 | 26 |
| 1.7.3 复数的代数运算 | 27 |
| 1.7.4 简谐函数的运算 | 27 |
| 1.7.5 定义和术语 | 30 |
| 1.8 谐波分析 | 32 |
| 1.8.1 傅里叶级数展开 | 33 |
| 1.8.2 傅里叶级数的复数形式 | 34 |
| 1.8.3 频谱 | 34 |
| 1.8.4 时域表示法与频域表示法 | 35 |
| 1.8.5 奇函数和偶函数 | 35 |
| 1.8.6 半区间展开 | 37 |
| 1.8.7 系数的数字计算 | 37 |
| 1.9 利用 MATLAB 求解的例子 | 41 |
| 1.10 C++ 程序 | 45 |
| 1.11 Fortran 程序 | 47 |
| 1.12 振动方面的参考文献 | 48 |
| 参考文献 | 48 |
| 思考题 | 51 |
| 习题 | 54 |
| 设计题目 | 67 |

| | |
|----------------------------------|-----|
| 第2章 单自由度系统的自由振动 | 71 |
| 2.1 引言 | 71 |
| 2.2 无阻尼平动系统的自由振动 | 73 |
| 2.2.1 根据牛顿第二定律建立系统的运动微分方程 | 73 |
| 2.2.2 用其他方法建立系统的运动微分方程 | 74 |
| 2.2.3 铅垂方向上弹簧-质量系统的运动微分方程 | 75 |
| 2.2.4 运动微分方程的解 | 76 |
| 2.2.5 简谐运动 | 77 |
| 2.3 无阻尼扭转系统的自由振动 | 85 |
| 2.3.1 运动微分方程 | 86 |
| 2.3.2 运动微分方程的解 | 87 |
| 2.4 运动的稳定性条件 | 89 |
| 2.5 瑞利能量法 | 90 |
| 2.6 黏性阻尼系统的自由振动 | 94 |
| 2.6.1 运动微分方程 | 94 |
| 2.6.2 方程的解 | 94 |
| 2.6.3 对数衰减系数 | 98 |
| 2.6.4 黏性阻尼消耗的能量 | 99 |
| 2.6.5 有黏性阻尼的扭振系统 | 100 |
| 2.7 库仑阻尼系统的自由振动 | 105 |
| 2.7.1 运动微分方程 | 105 |
| 2.7.2 方程的解 | 107 |
| 2.7.3 有库仑阻尼的扭振系统 | 109 |
| 2.8 滞后阻尼系统的自由振动 | 110 |
| 2.9 利用 MATLAB 求解的例子 | 114 |
| 2.10 C++ 程序 | 119 |
| 2.11 Fortran 程序 | 120 |
| 参考文献 | 121 |
| 思考题 | 122 |
| 习题 | 125 |
| 设计题目 | 146 |
| 第3章 单自由度系统在简谐激励下的振动 | 148 |
| 3.1 引言 | 148 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 3.2 | 运动微分方程 | 148 |
| 3.3 | 无阻尼系统在简谐力作用下的响应 | 149 |
| 3.3.1 | 总响应 | 151 |
| 3.3.2 | 拍振现象 | 152 |
| 3.4 | 简谐力作用下有阻尼系统的响应 | 154 |
| 3.4.1 | 总响应 | 156 |
| 3.4.2 | 品质因子与带宽 | 158 |
| 3.5 | $F(t) = Fe^{i\omega t}$ 作用下阻尼系统的响应 | 159 |
| 3.6 | 基础作简谐运动时阻尼系统的响应 | 161 |
| 3.6.1 | 所传递的力 | 163 |
| 3.6.2 | 相对运动 | 164 |
| 3.7 | 具有旋转不平衡质量的阻尼系统的响应 | 166 |
| 3.8 | 库仑阻尼系统的强迫振动 | 169 |
| 3.9 | 滞后阻尼系统的强迫振动 | 172 |
| 3.10 | 其他类型阻尼系统的强迫振动 | 173 |
| 3.11 | 自激振动与稳定性分析 | 174 |
| 3.11.1 | 动力稳定性分析 | 174 |
| 3.11.2 | 流体导致的动力不稳定 | 176 |
| 3.12 | 利用 MATLAB 求解的例子 | 182 |
| 3.13 | C++ 程序 | 188 |
| 3.14 | Fortran 程序 | 189 |
| | 参考文献 | 190 |
| | 思考题 | 191 |
| | 习题 | 194 |
| | 设计题目 | 207 |
| 第 4 章 | 单自由度系统在一般激励下的振动 | 208 |
| 4.1 | 引言 | 208 |
| 4.2 | 一般周期力作用下的响应 | 208 |
| 4.3 | 不规则形式的周期力作用下的响应 | 213 |
| 4.4 | 非周期力作用下的响应 | 215 |
| 4.5 | 褶积积分 | 215 |
| 4.5.1 | 对冲量的响应 | 216 |
| 4.5.2 | 对一般力的响应 | 219 |
| 4.5.3 | 对基础激励的响应 | 219 |

| | | |
|------------|-------------------------|------------|
| 4.6 | 响应谱 | 225 |
| 4.6.1 | 基础激励的响应谱 | 227 |
| 4.6.2 | 地震响应谱 | 229 |
| 4.6.3 | 冲击环境下的设计 | 232 |
| 4.7 | 拉普拉斯变换 | 234 |
| 4.8 | 应用数值方法求解不规则激励下的响应 | 238 |
| 4.9 | 利用 MATLAB 求解的例子 | 244 |
| 4.10 | C++ 程序 | 248 |
| 4.11 | Fortran 程序 | 251 |
| | 参考文献 | 252 |
| | 思考题 | 253 |
| | 习题 | 255 |
| | 设计题目 | 265 |
| 第5章 | 二自由度系统的振动 | 267 |
| 5.1 | 引言 | 267 |
| 5.2 | 受迫振动的运动微分方程 | 269 |
| 5.3 | 无阻尼系统的自由振动分析 | 270 |
| 5.4 | 扭振系统 | 276 |
| 5.5 | 坐标耦合与主坐标 | 280 |
| 5.6 | 受迫振动分析 | 284 |
| 5.7 | 半正定系统 | 286 |
| 5.8 | 自激振动与稳定性分析 | 288 |
| 5.9 | 利用 MATLAB 求解的例子 | 289 |
| 5.10 | C++ 程序 | 296 |
| 5.11 | Fortran 程序 | 296 |
| | 参考文献 | 297 |
| | 思考题 | 298 |
| | 习题 | 300 |
| | 设计题目 | 312 |
| 第6章 | 多自由度系统 | 314 |
| 6.1 | 引言 | 314 |
| 6.2 | 连续系统模型化为多自由度系统 | 314 |
| 6.3 | 运用牛顿第二定律推导运动微分方程 | 316 |

| | | |
|--------------|-----------------------------|------------|
| 6.4 | 影响系数 | 319 |
| 6.4.1 | 刚度影响系数 | 319 |
| 6.4.2 | 柔度影响系数 | 323 |
| 6.4.3 | 惯性影响系数 | 327 |
| 6.5 | 以矩阵形式表示的势能与动能 | 328 |
| 6.6 | 广义坐标与广义力 | 330 |
| 6.7 | 用拉格朗日方程推导运动微分方程 | 331 |
| 6.8 | 以矩阵形式表示的无阻尼系统的运动微分方程 | 334 |
| 6.9 | 特征值问题 | 335 |
| 6.10 | 特征值问题的解 | 336 |
| 6.10.1 | 特征方程的解 | 336 |
| 6.10.2 | 主振型的正交性 | 340 |
| 6.10.3 | 重特征值 | 342 |
| 6.11 | 展开定理 | 344 |
| 6.12 | 无约束系统 | 344 |
| 6.13 | 无阻尼系统的自由振动 | 347 |
| 6.14 | 用模态分析法求无阻尼系统的强迫振动 | 349 |
| 6.15 | 黏性阻尼系统的强迫振动 | 354 |
| 6.16 | 自激振动及其稳定性分析 | 358 |
| 6.17 | 利用 MATLAB 求解的例子 | 360 |
| 6.18 | C++ 程序 | 368 |
| 6.19 | Fortran 程序 | 369 |
| | 参考文献 | 370 |
| | 思考题 | 371 |
| | 习题 | 375 |
| | 设计题目 | 385 |
| 第 7 章 | 多自由度系统固有频率与振型的近似计算方法 | 386 |
| 7.1 | 引言 | 386 |
| 7.2 | 邓克莱法 | 387 |
| 7.3 | 瑞利法 | 388 |
| 7.3.1 | 瑞利第一商 | 389 |
| 7.3.2 | 瑞利第二商 | 390 |
| 7.4 | 霍尔茨法 | 392 |
| 7.4.1 | 扭振系统 | 392 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 7.4.2 弹簧-质量系统 | 394 |
| 7.5 李兹法 | 395 |
| 7.6 矩阵迭代法 | 397 |
| 7.6.1 用矩阵迭代法求第一阶固有频率和主振型 | 397 |
| 7.6.2 用矩阵迭代法求较高阶的固有频率及主振型 | 400 |
| 7.7 雅可比法 | 401 |
| 7.8 子空间迭代法 | 403 |
| 7.9 标准特征值问题 | 407 |
| 7.9.1 切比雪夫(Chebyshev)分解 | 408 |
| 7.9.2 其他解法 | 409 |
| 7.10 利用 MATLAB 求解的例子 | 409 |
| 7.11 C++ 程序 | 412 |
| 7.12 Fortran 程序 | 414 |
| 参考文献 | 416 |
| 思考题 | 417 |
| 习题 | 420 |
| 设计题目 | 424 |
| 第 8 章 连续系统的振动 | 425 |
| 8.1 引言 | 425 |
| 8.2 弦或索的横向振动 | 425 |
| 8.2.1 运动微分方程 | 425 |
| 8.2.2 初始条件与边界条件 | 427 |
| 8.2.3 等截面弦的自由振动 | 427 |
| 8.2.4 两端固定弦的自由振动 | 428 |
| 8.2.5 行波的解 | 430 |
| 8.3 杆的纵向振动 | 431 |
| 8.3.1 运动微分方程及其解 | 431 |
| 8.3.2 振型函数的正交性 | 433 |
| 8.4 圆杆或轴的扭转振动 | 437 |
| 8.5 梁的横向振动 | 439 |
| 8.5.1 运动微分方程 | 439 |
| 8.5.2 初始条件 | 441 |
| 8.5.3 自由振动 | 441 |
| 8.5.4 边界条件 | 442 |