



研究生用书

机械振动基础

Principles of Mechanical Vibration

● 陈奎孚 编著



中国农业大学出版社
CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY PRESS



研究生用书

机械振动基础

Principles of Mechanical Vibration

陈奎孚 编著



中国农业大学出版社

CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书由绪论、单自由度系统的自由振动、单自由度系统的受迫振动、两自由度系统的振动、多自由度系统的振动、固有频率与振型的数值方法和弹性体振动等共计七章组成。本书的理论循序渐进,并配有大量的例题、习题和插图。

本书可作为高等院校的力学、机械、土木、航空航天等专业研究生和本科生的教材,也可供相关的工程人员自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械振动基础/陈奎孚编著. —北京:中国农业大学出版社,2010.12
ISBN 978-7-5655-0129-6

I. ①机… II. ①陈… III. ①机械振动-研究生-教材 IV. ①TH113.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 203883 号

书 名 机械振动基础
作 者 陈奎孚 编著

策划编辑 梁爱荣 席 清

封面设计 郑 川

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路 2 号

电 话 发行部 010-62731190,2620

编辑部 010-62732617,2618

网 址 <http://www.cau.edu.cn/caup>

经 销 新华书店

印 刷 涿州市星河印刷有限公司

版 次 2011 年 1 月第 1 版 2011 年 1 月第 1 次印刷

规 格 787×980 16 开本 25 印张 458 千字

定 价 39.00 元

责任编辑 洪重光

责任校对 王晓凤 陈 莹

邮政编码 100193

读者服务部 010-62732336

出 版 部 010-62733440

e-mail: cbsszs @cau.edu.cn

图书如有质量问题本社发行部负责调换

出版说明

我国的研究生教育正处于迅速发展、深化改革时期,研究生教育要在研究生规模和结构协调发展的同时,加快教学改革步伐,以培养高质量的创新人才。为加强和改进研究生培养工作,改革教学内容和教学方法,充实高层次人才培养的基本条件和手段,建设研究生培养质量基准平台,促进研究生教育整体水平的提高,中国农业大学通过一系列的改革、建设工作,形成了一批特色鲜明的研究生教学用书,本书是其中之一。特别值得提出的是,本书得到了“北京市教育委员会共建项目”专项资助。

建设一批研究生教学用书,是研究生教育教学改革的一次尝试,这批研究生教学用书,以突出研究生能力培养为出发点,引进和补充了最新的学科前沿进展内容,强化了研究生用书在引导学生扩充知识面、采用研究型学习方式、提高综合素质方面的作用,必将对提高研究生教育教学质量产生积极的促进作用。

中国农业大学研究生院

2008年1月

序

振动是自然界和工程技术中十分普遍的物理现象。它们通常是指物体或系统在其平衡位置附近的往复运动,但是随着现代工程和科学的飞速发展,振动的内涵已经变得越来越广泛了。刻画振动现象的本质规律需要使用微分方程和偏微分方程等数学工具,所以它在传统上似乎是力学和数学的专属领域。然而许多工程技术领域,如航空航天、能源化工、机械制造、交通运输、工程材料、土木建筑、核工业等等,在机电装备设计和运行过程中都会遇到大量振动问题,因此振动研究已经成为很多工程学科的核心内容。

为了适应现代工程教育对于振动知识的需求,陈奎孚博士在长期从事振动领域教学和科研工作的基础上,新编了《机械振动基础》一书。本书首先介绍振动的基本概念和研究特点,然后对单自由度系统的自由振动和受迫振动问题的基本理论方法进行详细的分析,为进一步学习打下良好基础。接着考虑两自由度和多自由度系统的各种振动问题,侧重由于多自由度因素所带来新问题和新方法。考虑到工程振动问题的实际计算需要,专门给出固有频率与振型的数值解法。最后,重点地介绍一些典型的弹性体的振动问题及处理方法。

尽管国内已经出版了多种振动教材,这本教材有其自身的显著特点。首先,本书的内容安排独具匠心,振动分析对象以离散系统为主,兼顾连续系统;研究工具以理论方法为主,数值方法为辅。做到由浅入深,难点分散,逐步展开,条理清楚。其次,进行振动分析离不开数学工具,这往往使一些数学基础较弱的工程技术人员望而却步,因此善于处理力学分析与数学方法之间的关系是十分重要的。在该书里,数学概念和工具是紧密围绕振动分析的需要而引进的。例如要对振动现象做定量分析,就需要用微分方程描述其力学模型。又如多自由度振动问题的解耦需要利用线性变换,在数学上就要求解特征值问题去确定这个变换;至于弹性体振动问题的解耦,就需要利用振型的正交性了。作者注意对这些数学问题进行适当剪裁和加工,善于配合相应的力学问题进行表述,使得内容编排如行云流水,浑然一体,读者能够深刻地体会到它们的力学本质,有效地理解和掌握这些内容。再者,本书特别重视启发式的叙述和教学。比如对振型矩阵的特征值和特征向量的确定、解常微分方程的待定系数法和分离变量法等内容的处理,作者不仅给出运算步骤和重要公式,更注重引导读者去探究解法的思路。隐含在这种启发式教学中方法论是先将复杂的问题退化成简单的读者熟悉的问题,这种思路始终贯穿于全书。最后,作者精选了大量例题和习题,有些详尽地介绍了求解方法,有些来自典型的

工程实际问题,对于读者学习和掌握理论方法,以及培养分析和解决实际问题能力都将发挥重要作用。

本书内容丰富,重点突出,力学背景清晰,工程实用性强。在表述上图文并茂,语言流畅。特别是作者在选图上下了很大功夫,有些图还是作者亲自绘制而在其他著作中很难找到的。大量的图形不仅能够直观地说明问题,有助于理解抽象的数学和力学概念,而且能令读者感受到力学美的魅力。书中语言生动活泼,不时的幽默也使得读起来酣畅淋漓,意犹未尽。

值得指出,本书的特色亦归因于作者长期从事跨学科交叉领域研究的积累。作者先后在力学和生物医学工程专业学习和研究,其后又赴日本和美国深造。尽管专业跨度很大,但是作者一直在振动领域耕耘不辍,求索不止,取得出色的成果。本书有广泛的适用性,可以作为高等学校工程振动课程的教学用书,供教师 and 研究生、高年级大学生在课程学习中使用,同时对于广大从事振动理论和应用研究的工程技术人员和科研人员也有重要参考价值。

陆启韶

2010年11月于北京航空航天大学

前 言

很多人从记事起对振动就有切身的体会,因为在幼儿园有的小朋友自己可以把秋千荡得很高,而有的小朋友在没有别人来回推动的帮助下,秋千很快就会停下来。从小学科学课、中学物理到大学物理都有振动内容,我们已经反反复复地学习了几轮。作为定性感觉,振动似乎早已是陈词滥调。然而工程上一旦想定量预测高楼、大桥、大坝、海洋平台等在地震、风、海浪诸类作用下屹立不倒的寿命,依然是路漫漫其修远兮。本门课程机械振动基础仅是其中的一段旅途,当然这段旅途自己也能解决很多工程问题。

学科上,机械振动的研究对象主要指机械系统,它的自由度比较少。像上海金茂大厦、台北 101 大楼这样的高层建筑振动往往划归结构动力学。机械振动与结构动力学的假设、控制方程和目标没有本质差异,只是后者涉及的自由度成千上万乃至上百万,因此而需要发展高效率的处理手段。动力学的概念更广泛,它的自由度可多可少,但更强调某些特殊的物理现象,尤其是目前趋之若鹜的非线性动力学。

早期的振动研究大多为数学和力学工作者的“专利”。但是目前很多工程问题规模大、速度高、控制复杂,比如航天飞机、三峡大坝、微型机器人等等,振动对系统性能影响往往非常巨大,相关的工程人员对振动再也不能视而不见了。当然,随着科学技术发展的需要,诸如线性代数、计算方法、程序设计等课程在相关专业的教育中也得以逐步强化,这也为系统地学习振动理论准备了必要的基础。振动理论得以普及的另外一个重要因素是 ANSYS、ABQUS 和 NASTRAN 等计算软件的广泛运用。这类软件在轻松的鼠标点击之间可以产生很多漂亮的图形,大大降低了振动分析的难度。但是对这些漂亮图形的解释,以及其工程意义的挖掘则需要系统的振动知识。

本书是对笔者多年的振动教学讲义的总结,由绪论、单自由度系统的自由振动、单自由度系统的受迫振动、两自由度系统的振动、多自由度系统的振动、固有频率与振型的数值方法和弹性体振动等总计七章组成。本书名为《机械振动基础》,所以内容基本限于线性系统的固有特性和线性系统受到确定性激励的响应。

第 1 章绪论,除了千篇一律地介绍课程的重要性和教材的基本内容外,笔者也花费一些笔墨介绍自己对科学和科学研究的感悟。第 2 章的经典内容包括自由振动的特性(无阻尼和有阻尼)和参数(振幅、相位、固有频率和阻尼比),振动方程的推导和固有频率的计算方法(微分方程法、能量法、静位移法和瑞利法)。独特内容

有等效质量和等效刚度的系统论述。

第3章的经典内容包括单自由度系统强迫振动、共振、频响特性、简谐量的复数表示、强迫振动理论应用、阻尼理论和杜哈梅积分。为了能与振动实验课对接,简要介绍位移、速度和加速度三种频响函数及五种特殊频率和离散谱等。此外,对用傅立叶级数求周期激励的响应进行了颇为详尽的论述。

越来越多的工程问题必须使用多自由度系统建模才能达到工程的要求,特别是当代的计算力学软件对多自由度系统的分析也非常方便,因此多自由度系统理论非常重要,而这部分内容又非常多,所以本书将两自由度系统振动和多自由度系统振动分成两章来叙述,各自侧重点不同。第4章强调耦合方程的解耦、模态和振型的理解。经典内容包括无阻尼自由振动和强迫振动的完整解法,强迫振动理论的应用。独特内容有两自由度系统特征值的显式解等。

多自由度系统微分方程的建立方法放在第5章,包括柔度系数法、刚度系数法和拉格朗日方程法等。本章将解耦、模态和振型、自由响应拓展到任意自由度。多自由度系统的阻尼仅考虑阻尼矩阵可对角化的情形。对这种情形,振动分析可以套用无阻尼情形的处理方法。本章还讨论零频和重频系统。本书独特地通过方程解耦来引入特征值问题。

特征值问题是多自由度振动分析的重要内容。第6章介绍适用于振动分析的特征值数值方法,包括瑞利法、李兹法、矩阵逆迭代法和子空间迭代法,以及针对特殊结构的传递矩阵法和邓克莱法。迭代在数值解法中地位极其重要,本章以迭代法求特征方程根为例,总结它的思想和模式,并给出三个用 MATLAB 语言实现的 M 函数。

第7章介绍弦、杆、轴和梁的振动分析,内容包括方程建立、主振动、自由响应和强迫响应分析。本章还分析纵向力、转动惯量和剪切变形对梁的主振动的影响;讨论针对连续体的两种近似分析方法:瑞利法和李兹法。

在成书过程中,笔者尽量考虑读者的潜在范围,因为涉及振动的工程学科越来越多。本书要求的前期课程有高等数学、线性代数、大学物理、计算机语言、理论力学和材料力学,这些课程基本上是相关工程专业所要求的通识课程。除了上面提及的前期课程,编写过程中特别注重材料的自含性,比如尽量回避结构力学内容,如有个别例题涉及的,也尽量用材料力学的语言来叙述。再比如现在大多数工科院校的理论力学课程对拉格朗日方程已不要求,所以本书对相应内容作了必要介绍。

除了在读学生,目前从事振动以及相关行业的人员庞杂,各自的教育背景五花八门。为了兼顾后者,本书除了在理论体系上循序渐进外,也精选了大量的例题和

习题，习题配有答案，以便自学。部分新例题和新习题是笔者根据学习需要而自行设计和制作的。为了增加阅读兴趣，降低理解难度，书中加入了大量插图，特别是“快照叠放图”等在其他教材中很难找到。

全书由哈尔滨工业大学屠良尧教授精心审阅。屠老一直活跃于振动的科研和教学前线，能挤出时间为本书把关，既是笔者也是读者的福分。承蒙北京航空航天大学陆启韶教授提携于百忙中为本书欣然作序。暨南大学张森文教授也提供了很多有益的建议。刘亚欣、霍庆等娴熟的排版和作图技术，为本书的质量提供了保障。

本书的顺利完成离不开力学系全体同事的鼓励、支持和帮助。焦群英、付志一、王永岗等教授对部分章节提供了很多建设性意见。张平老师对例题习题选择和实验相关内容提供了指导性意见。在长期的振动教学互动过程中，笔者从学生那里汲取了丰富的营养，有些学生仔细审读了部分章节，在此一并感谢。特别感谢的是李英和刘钊等同学，他们在这网络躁动和游戏鸦片泛滥的年代，依然能够安静地坐下来逐一校核枯燥繁琐的公式，润色佶屈聱牙的陈述。

本书得到了中国农业大学研究生院重点课程建设教材项目的资助。在成书期间，笔者还得到了如下与振动研究相关基金的资助：国家自然科学基金(30971692)、北京市优秀人才培养资助(PYZZ090428001149)、中央高校基本科研业务费专项资金(2009JS30)。

虽然笔者花费了大量的时间和精力来降低笔误、错误和偏见的频次，但是肯定还有许多不当之处。欢迎读者的批评和指正，来函请发到本人电子邮箱 Chen-KuiFu@hotmail.com。

陈奎孚

符 号 表

符号	说 明	符号	说 明
a	几何长度或距离;加速度 [4.6.2] ^①	g	重力加速度大小
a_1	傅立叶级数的余弦项系数	\mathbf{g}	重力加速度向量
b	地面(支座)激励振幅;宽度(厚度)或距离	h	高度
b_1	傅立叶级数的正弦项系数	$h(t)$	单位脉冲响应函数
c	阻尼系数;波速[第7章]	i	整数;整数计数器
c_1, c_2, c_3, c_4	积分常数;局部常数	j	虚数符号, $j^2 = -1$
c_c	临界阻尼系数	J	整数, 整数计数器
c_{eq}	等效阻尼系数	k	弹簧刚度系数
c_i	傅立叶级数复系数	kg	千克
d	微分	k_{eq}	等效刚度系数
d	直径	k_T	扭簧刚度系数
dB	分贝	l	长度
e	偏心矩	l_0	原长
f_0	简谐激励的力幅;恒定不变的力	m	米
f_d	阻尼固有频率	m	质量;质量块
f_n	自然频率;固有频率	m_{eq}	等效质量
$f(t)$	随时间变化的外力;随时间变化的函数	min	分
$f_i(x, t)$	沿长度分布力的集度	m_T	总质量
$\{f(t)\}$	多个力组成的力列阵(向量)	n	相对固定的整数;转速
		n_T	轮系传递比
		p	单自由度系统的固有圆频率($p = 2\pi f_n$)
		p_d	单自由度系统的阻尼固有圆频率($p_d = 2\pi f_d$)

① 存在两个以上的意义时,大体按照使用的频度排列顺序。方括号内表示仅在该处使用。

续表

符号	说明	符号	说明
p_{di}	多自由度系统的第 i 阶阻尼固有频率	A_1, A_2, \dots, A_n	单自由度衰减振动的递减峰幅; 复谐波中的各简谐波的幅值
p_i	多自由度系统的第 i 阶固有频率	B	单自由度强迫振动振幅
$q, q(t)$	模态坐标; 广义坐标	B_1, B_2, B_3, B_4	振型函数的四个系数 [第 7 章]
r	半径	B_{\max}	单自由度强迫振动的最大振幅
\mathbf{r}	位移向量	C	质心位置; 轮心; 常数 (积分常数)
rad	弧度	$[C]$	阻尼矩阵 ^①
s	秒	$[C]_P$	模态阻尼矩阵 (对角阵)
s	拉普拉斯变换参数; 复频率; 模态截断 (近似) 的阶数	D	直径; 瑞利耗散函数 [5. 6. 1]
t	吨	$[D]$	动力矩阵 [6. 4, $[S]^{-1}$]
t	时间	E	总机械能; 弹性模量 (多以 EI 形式出现)
u	轴向位移	F	不变集中力的大小
v	速度	\mathbf{F}	不变的集中力向量
$w, w(x, t)$	梁的挠度; 弦的横向位移	F_c	粘性阻尼力
w_P	P 点挠度	F_d	流体阻力; 摩擦力
x	响应; 笛卡儿坐标	F_k	弹簧的弹性力
$x(t)$	响应	F_I	惯性力
$x_b(t)$	基座 (支撑) 位移	F_N	轴力; 正压力; 纵向力
$x_c(t)$	复简谐量	F_Q	剪力
$x_r(t)$	相对位移	F_T	拉力; 张力
y	坐标	G	切变模量
z	坐标		
A	自由振动的幅值		
A, B, C, D, \dots	点或位置		

① 本书的矩阵符号一般用大写字母外加方括号表示。在不引起歧义的情况下, 有时略去方括号。

续表

符号	说 明	符号	说 明
H	高度	P, P_1, P_2, \dots	点的位置
H_z	赫兹	Q	广义力;共振锐度,品质因数[3.3.3]
$H(s)$	传递函数	R	半径
$H(j\omega)$	复频响函数	Re	复数的实部
$H_A(j\omega)$	加速度频响函数	$R_1(\{\psi\})$	第一瑞利商
$H_D(j\omega)$	位移频响函数	$R_{II}(\{\psi\})$	第二瑞利商
$H_V(j\omega)$	速度频响函数	S	面积;横截面积
I	梁截面形心主惯性轴矩	$[S]$	系统矩阵(5.4, $[D]^{-1}$)
Im	复数的虚部	T	动能
I_p	截面形心极惯性矩	T_b	拍周期
$[I]$	单位阵	T_d	阻尼固有周期
J	转动惯量	T_n	固有周期
J_o	绕 O 的转动惯量	T_p	周期
K_i	第 i 个模态主刚度	τ	矩阵转置(右上角标)
$[K]$	刚度矩阵	$[T]$	总传递矩阵
$[K]_p$	主刚度矩阵(对角阵)	$[T]_i$	第 i 个单元的传递矩阵
L	拉格朗日算符($L = T - U$);自感系数[5.6.1]	U	势能
M	力(偶)矩;截面弯矩	W	功
M_i	第 i 阶主质量	W_c	粘性阻尼的功
M_i^L, M_i^R	传递矩阵法中的左端扭(弯)矩和右端扭(弯)矩[6.7]	X	复简谐量的复振幅
M_i	扭矩	X_r	相对运动的振幅
N	牛顿(力的单位)	$[Y]$	子空间迭代法的中间矩阵[6.5]
N	多自由度系统的自由度	$[Z]$	子空间迭代法的中间矩阵[6.5]
n	正则(右下角标)	$\{Z\}$	传递矩阵法中的状态向量[6.7]
O	坐标原点;传递矩阵法的起点[6.7]	α	简谐振动的初相角
		α_i	第 i 个简谐分量的相位角

续表

符号	说明	符号	说明
β	放大系数[3.1.2]	$[\mu]$	系数矩阵[6.5]
χ	阻尼比容[3.6.2]	ν	激励频率与固有频率之比
δ	变分算符	π	圆周率
δ	柔度系数; 对数减幅 [2.6.2]	θ	角位移
δ_{ij}	跨点柔度系数(在 j 点加力, i 点输出)	θ_p	摆式吸振器的摆角[4.6.2]
δW	虚功	θ_0	常量角位移
$\delta(x), \delta(t)$	单位脉冲函数	ρ	体积密度;
δ_{st}	静位移; 静伸长	ρ_l	线密度;
$[\delta]$	柔度矩阵	σ	正应力
ϵ	应变; 偏差分量[6.2]	τ	切应力; 时间积分变量 [3.7]
ϵ_x	沿 x 轴应变	ω	外激励圆(角)频率; 傅立叶分析的基频
ϕ_{ij}	第 j 阶振型第 i 个分量	ψ_{ij}	假设(近似) j 阶振型第 i 个分量(真实为 ϕ_{ij})
$\phi(x)$	振型函数	$\{\psi\}$	假设(近似)振型(真实为 $\{\phi\}$)
$\{\phi\}$	模态向量或模态振型	ζ	阻尼比
$\{\phi\}_N$	正则模态振型	Δ	增量符号; 判别式[2.6.1; 4.3]
γ	切应变; 梁横截面平均剪切角[7.7.2]	$\Delta\omega$	频率增量
η	波峰(振幅)衰减系数 [2.6.2]; 耗损因子 [3.6.2]	$\Delta(\omega)$	行列式[4.5.1]
η_F	传递系数(力传递率) [3.4.2]	$[\Delta]$	以特征值 λ_i 为对角元素组成的特征值矩阵
η_M	传递系数(运动传递率) [3.4.2]	$[\Phi]$	振型矩阵
φ	频响函数的相位	$[\Phi]_N$	正则振型矩阵
λ	系统矩阵的特征值(固有频率的平方)	Ω	轴转动角速度[例题 2.6, 4.5.2]
μ	摩擦因子[3.6.2]	\sum	求和
$\mu_{\text{下标}}$	局部比例系数(由下标区别意义)	$[\Psi]$	近似振型矩阵

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 概述	(1)
1.1.1 振动现象的广泛性(1)	1.1.2 研究振动的目的(2)
1.1.3 振动研究的内涵和外延(4)	
1.2 本书的主要内容	(6)
1.2.1 预测响应要解决的相关问题(7)	1.2.2 简明的回答与本书的安排(7)
第 2 章 单自由度系统的自由振动	(10)
2.1 无阻尼自由振动.....	(10)
2.1.1 建立振动微分方程(11)	2.1.2 无阻尼振动的参数(13)
2.1.3 平衡位置与坐标原点(15)	2.1.4 常见振系(17)
2.2 能量法建立微分方程.....	(19)
2.2.1 基本原理(19)	2.2.2 运用示例(19)
2.3 固有频率的计算方法.....	(23)
2.3.1 建立微分方程求固有频率(23)	2.3.2 能量法求固有频率(25)
2.3.3 静位移法求固有频率(28)	
2.4 等效参数.....	(29)
2.4.1 能量法(29)	2.4.2 等效刚度的计算(33)
2.5 瑞利法.....	(37)
2.6 有阻尼自由振动.....	(41)
2.6.1 控制方程的求解(41)	2.6.2 欠阻尼情形(43)
2.6.3 过阻尼和临界阻尼情形(45)	
第 2 章习题	(48)
第 3 章 单自由度系统的受迫振动	(57)
3.1 对简谐激励的强迫响应.....	(57)
3.1.1 振动微分方程及其解(57)	3.1.2 幅频特性(59)
3.1.3 相频特性(60)	3.1.4 瞬态响应(61)
3.2 简谐振动的表示方法.....	(66)
3.2.1 复简谐形式(67)	3.2.2 旋转向量(67)
3.2.3 频响特性(69)	3.2.4 强迫振动时各力的向量表示(70)

3.3	频域特性曲线	(72)
3.3.1	三种频响	(72)
3.3.2	共振频率	(73)
3.3.3	半功率点与半功率带宽	(76)
3.4	强迫振动理论的应用	(78)
3.4.1	偏心转子引起的强迫振动	(78)
3.4.2	基座激励与隔振	(81)
3.4.3	转轴的旋曲与临界转速	(84)
3.4.4	惯性式测振仪的基本原理	(87)
3.5	任意周期激励下的强迫振动	(91)
3.5.1	傅立叶级数	(91)
3.5.2	对周期激励的强迫响应	(94)
3.5.3	频谱图	(98)
3.6	阻尼理论	(102)
3.6.1	粘性阻尼的功	(102)
3.6.2	等效粘性阻尼系数的求法	(102)
3.7	杜哈梅积分法求任意激励的响应	(106)
3.7.1	单位脉冲响应	(106)
3.7.2	杜哈梅积分	(108)
3.7.3	阶跃响应	(111)
3.7.4	支座激励	(113)
	第3章习题	(115)
第4章	两自由度系统的振动	(120)
4.1	无阻尼振系	(120)
4.1.1	弹簧-质量系统	(120)
4.1.2	坐标耦合	(123)
4.2	方程解耦与主振动	(126)
4.2.1	数学解耦	(126)
4.2.2	物理意义	(128)
4.2.3	示例	(130)
4.3	自由振动的完整解法	(135)
4.3.1	两自由度特征值	(135)
4.3.2	自由振动解	(137)
4.3.3	示例	(138)
4.4	双摆——再论拍的现象	(144)
4.4.1	模型	(144)
4.4.2	求解	(145)
4.4.3	拍	(146)
4.5	强迫振动	(148)
4.5.1	响应表达式	(148)
4.5.2	稳态响应	(150)
4.5.3	频响函数矩阵	(151)
4.6	应用	(154)
4.6.1	动力吸振器	(154)
4.6.2	离心摆式吸振器	(157)
4.6.3	阻尼减振器	(159)

第 4 章习题	(163)
第 5 章 多自由度系统的振动	(167)
5.1 振动微分方程的建立	(167)
5.1.1 分离体法(167)	5.1.2 柔度系数法(169)
5.1.3 刚度系数法(174)	
5.2 拉格朗日方程	(177)
5.2.1 虚功原理(177)	5.2.2 动能与势能(181)
5.2.3 拉格朗日方程(185)	
5.3 自由振动方程的解耦	(190)
5.3.1 方程解耦(190)	5.3.2 主振动(192)
5.3.3 自由振动的显式解(195)	
5.4 主振动与特征值问题	(198)
5.4.1 固有频率与振型(199)	5.4.2 主振动的特性(203)
5.5 固有频率为零和相等的情况	(210)
5.5.1 特征方程有零根(210)	5.5.2 特征方程有重根(213)
5.6 有阻尼振动	(217)
5.6.1 控制方程(217)	5.6.2 阻尼可对角化(220)
5.6.3 自由响应(221)	5.6.4 对简谐激励的强迫响应(225)
5.6.5 振型截断法(232)	
5.7 阻尼矩阵的对角化处理	(233)
5.7.1 可对角化阻尼矩阵(233)	5.7.2 近似对角化(234)
第 5 章习题	(235)
第 6 章 固有频率与振型的数值方法	(242)
6.1 迭代法求特征多项式的零点	(242)
6.1.1 牛顿迭代法(243)	6.1.2 弦割法(251)
6.2 瑞利能量法	(253)
6.2.1 基本方法(253)	6.2.2 改进方法(256)
6.3 李兹法	(259)
6.3.1 理论基础(259)	6.3.2 示例(262)
6.4 矩阵迭代法	(264)
6.4.1 一阶模态(264)	6.4.2 高阶模态(269)
6.5 子空间迭代法	(273)
6.5.1 思路(274)	6.5.2 算法步骤(275)

6.5.3 收敛性(276)	6.5.4 示例(278)	
6.6 邓克莱法		(280)
6.6.1 理论基础(280)	6.6.2 示例(281)	
6.7 传递矩阵法		(282)
6.7.1 弹簧-质量系统(283)	6.7.2 轴系扭转振动(287)	
6.7.3 分叉系统(291)	6.7.4 梁的横向振动(293)	
第6章习题		(298)
第7章 弹性体振动		(302)
7.1 弦振动		(302)
7.1.1 波动方程的建立(302)	7.1.2 波动方程的求解(303)	
7.2 杆的纵向振动		(312)
7.2.1 方程的建立(312)	7.2.2 主振动(313)	
7.3 轴的扭转振动		(319)
7.3.1 方程的建立(319)	7.3.2 主振动(320)	
7.4 波动方程的一般解法		(324)
7.4.1 振型正交性(324)	7.4.2 正则模态(325)	
7.4.3 强迫响应(327)		
7.5 梁的振动		(330)
7.5.1 微分方程的建立(331)	7.5.2 分离变量法(332)	
7.5.3 典型的边界条件(333)	7.5.4 典型梁的横振模态(335)	
7.6 梁的响应		(338)
7.6.1 振型函数的正交性(338)	7.6.2 正则坐标变换(342)	
7.6.3 初条件引起的响应(342)	7.6.4 任意激励的响应(344)	
7.7 纵向力、转动惯量和剪切变形的影响		(347)
7.7.1 纵向力的影响(347)	7.7.2 转动惯量和剪切变形的影响(349)	
7.8 近似解法求特征值问题		(353)
7.8.1 瑞利法(353)	7.8.2 李兹法(357)	
第7章习题		(362)
习题参考答案		(367)
参考文献		(381)