

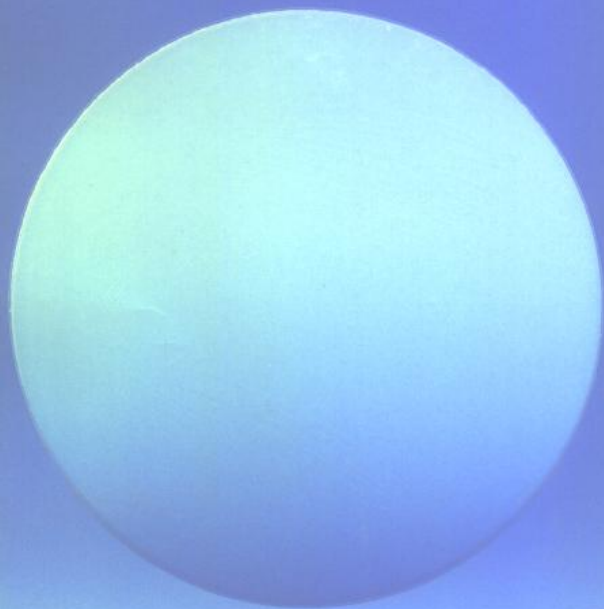
● 研究生用书 ●

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

(下册)

TH113

SJ0

2

442714

机械振动系统

— 分析·测试·建模·对策

(下册)

郑汉民

湛 刚

吴 雅

华中理工大学出版社

· 研究生用书 ·

机械振动系统

——分析·测试·建模·对策

(下 册)

师汉民 湛刚 吴雅

责任编辑 叶翠华

*

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:14.375 插页:2 字数:354 000

1992年10月第1版 1999年6月第3次印刷

印数:2 001—3 000

ISBN 7-5609-0686-9/TH·61

定价:19.80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，可能需要的理论基础、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

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	(6)
§ 8.3 虚功原理	(8)
§ 8.4 势能与动能的广义坐标表达式	(16)
§ 8.5 D'Alembert原理	(19)
§ 8.6 Lagrange方程	(20)
§ 8.7 系统的线性化及线性系统的Lagrange方程	(26)
第九章 多自由度系统振动分析的常用方法	(33)
§ 9.1 估算多自由度系统自然频率与模态向量的几种方法	(33)
§ 9.2 子系统综合法 (一) ——传递矩阵法	(48)
§ 9.3 子系统综合法 (二) ——机械阻抗法	(64)
§ 9.4 子系统综合法 (三) ——模态综合法	(81)
第十章 连续系统的振动及其精确解	(100)
§ 10.1 弦的横向振动	(100)
§ 10.2 杆的纵向振动	(113)
§ 10.3 轴的扭转振动	(119)
§ 10.4 弦、杆、轴振动方程的相似性	(120)
§ 10.5 边界条件	(121)
§ 10.6 对于初始激励的响应	(128)
§ 10.7 对于过程激励的响应	(131)
§ 10.8 波动方程	(135)
§ 10.9 梁的弯曲振动	(140)
§ 10.10 模态正交性	(148)

§ 10.11	以振型叠加法研究梁的响应	(152)
§ 10.12	连续系统的动能、势能、符号确定性与瑞利商	(160)
第十一章	连续系统的离散化与近似解法	(172)
§ 11.1	估算系统基频的几种方法	(173)
§ 11.2	集中质量法	(183)
§ 11.3	特征函数参数化方法	(195)
§ 11.4	有限元方法	(212)
第十二章	非线性系统的振动	(254)
§ 12.1	引言	(254)
§ 12.2	状态空间与相图	(257)
§ 12.3	奇点邻域中相图的特性	(269)
§ 12.4	保守系统及其在大范围的运动	(281)
§ 12.5	极限环	(286)
§ 12.6	平均法	(290)
§ 12.7	迭代法	(299)
§ 12.8	摄动法	(307)
§ 12.9	时变系统	(315)
第十三章	自激振动	(322)
§ 13.1	自激振动的现象和特点	(322)
§ 13.2	由于速度反馈引起的自激振动	(326)
§ 13.3	由于位移的延时反馈而引起的自激振动	(340)
§ 13.4	由于模态耦合引起的自激振动	(370)
§ 13.5	自激振动的识别、建模与防治	(379)
第十四章	振动问题分析求解中的计算方法	(384)
§ 14.1	求解特征值问题的计算方法	(384)
§ 14.2	有阻尼线性系统的状态转移矩阵分析法	(414)
§ 14.3	求解系统响应的计算机数字仿真方法	(426)
参考文献	(441)
思考题参考答案	(442)

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·振动
问题分析求解的计算方法

第八章 分析力学基础

§8.1 引言

8.1.1 牛顿力学方程的缺陷与改造

我们在前面推导振动系统的运动方程时，主要是用到牛顿第二定律，

$$F = m \ddot{r}, \quad (8.1-1)$$

式中 m 是质点的质量， F 是作用在质点上的力， \ddot{r} 是质点的加速度向量。 r 是质点的向径 (图 8.1-1)。向量 F 可以写成坐标式：

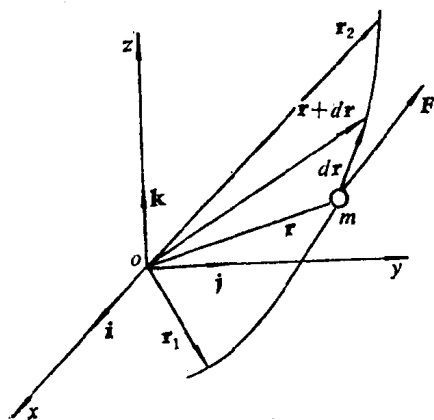


图 8.1-1

$$\mathbf{F} = F_x \mathbf{i} + F_y \mathbf{j} + F_z \mathbf{k}, \quad (8.1-2)$$

式中 F_x , F_y , F_z 分别是 \mathbf{F} 在 x 、 y 、 z 三个坐标轴上的投影， \mathbf{i} 、 \mathbf{j} 及 \mathbf{k} 分别是在该三个坐标轴方向上的单位向量(图8.1-1)。向量 \mathbf{r} 也可写成坐标式：

$$\mathbf{r} = x \mathbf{i} + y \mathbf{j} + z \mathbf{k}. \quad (8.1-3)$$

以(8.1-2)、(8.1-3)式代入(8.1-1)式，可得到三个标量式：

$$F_x = m \ddot{x}, \quad F_y = m \ddot{y}, \quad F_z = m \ddot{z}. \quad (8.1-4)$$

(8.1-1)或(8.1-4)式所表示的牛顿力学方程有如下两个缺点：

第一，它是就质点写出的，或者说是就可以视为质点的“脱离体”写出的。当一个系统中存在多个质点时，就必须分别就多个质点列出方程

$$\mathbf{F}_i = m_i \ddot{\mathbf{r}}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (8.1-5)$$

式中， \mathbf{F}_i 是作用在第 i 个质点上的合力，其中当然也包括其它质点与第 i 个质点之间由于存在约束关系而引起的约束力，以及外界环境对该质点的约束力，即支反力； $\ddot{\mathbf{r}}_i$ 是第 i 个质点的加速度； m_i 是第 i 个质点的质量。 N 是系统中的质点数。这种将一个系统分成若干脱离体来分别列出方程的方法，就必须涉及约束力，而这往往会造成一种累赘，因为在求解系统的运动时，往往对其各部分之间的约束力并不感兴趣。例如第四章图4.1-1所示的双摆，如分别就 m_1 、 m_2 两个质点列出运动方程，就必须将 m_1 与 m_2 之间的约束力以及悬挂点 O 对 m_1 的约束力纳入考虑。可是如果我们只希望分析此双摆的运动，就没有必要计算以上内力与支反力。

第二，牛顿方程是就质点的物理坐标列出的，在图4.1-1所示双摆的情况下，就是分别就质点 m_1 、 m_2 的四个直角坐标 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 列出四个方程。可是这四个坐标显然不是相互独立的，其间存在(4.1-1)、(4.1-2)式所示的两个约束条件。正如

§ 4.1已经讲过的，事实上只需以图中 θ_1 、 θ_2 这两个角度作为坐标，就能完全确定系统在任一时刻的形状或位置，因为该系统其实是一个两自由度的系统。在以物理坐标列出多质点的运动方程时，必须将形如(4.1-1)、(4.1-2)式的诸约束条件纳入考虑，方程才能求解。

总之，采用牛顿的力学方程求解动力学问题时，划分脱离体导致计算约束力的必要；采用物理坐标又导致考虑约束条件的必要，这里明显地走了弯路。为了克服牛顿力学方程的上述缺陷，由Lagrange等人创立的分析力学采取了另一种策略：首先，它把一个系统作为一个整体，列出其运动方程，而不再取脱离体，也不一定要求计算约束力（当然，如果需要，这些力也可方便地计算出来）；其次，它采用所谓广义坐标（例如，图4.1-1中的 θ_1 、 θ_2 作为双摆的广义坐标），将对于系统的描述参数减小到最少而又不失去其充分性的程度，而约束条件也就自动地得到了保证。此外，分析力学摒弃了位移与力这些向量概念，而采用能量和功等标量来描述力学系统，这些量与具体的坐标系无关，因此以这些术语表述的力学方程具有更广阔的用途，其适用范围甚至超出了力学本身而被用于物理学的其它领域。

8.1.2 直角坐标、约束条件与广义坐标

如果系统中有 N 个质点，其间不存在任何约束，那么， $3N$ 个直角坐标 x_i 、 y_i 、 z_i ，($i=1,2,\dots,N$)即可选为该系统的广义坐标。此系统的自由度亦为 $3N$ 。如果系统中存在 l 个约束，

$$p_j(x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2; \dots; x_N, y_N, z_N) = c_j, \quad j=1,2,\dots,l, \quad (8.1-6)$$

则系统的自由度数当为

$$n = 3N - l, \quad (8.1-7)$$

而广义坐标 q_1, q_2, \dots, q_n 亦为 n 个。

对于具体的系统来说，广义坐标 q_1, q_2, \dots, q_n 与直角坐标 $x_i, y_i, z_i, i = 1, 2, \dots, N$ 之间存在确定的关系。如第四章图4.1-1所示的双摆系统，如果取 θ_1 与 θ_2 作为广义坐标，则他们与质点 m_1, m_2 的直角坐标 x_1, y_1, x_2, y_2 之间即存在(4.1-3)式所示的关系。一般而言，基于对所选取广义坐标的几何定义，总可以将系统中各质点的直角坐标表示成为广义坐标的函数，

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x_i(q_1, q_2, \dots, q_n), \\ y_i &= y_i(q_1, q_2, \dots, q_n), \\ z_i &= z_i(q_1, q_2, \dots, q_n), \end{aligned} \right\} \quad (8.1-8)$$

$$i = 1, 2, \dots, N.$$

以上 $3N$ 个等式可以综合成为 N 个向量函数，

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_i(q_1, q_2, \dots, q_n), i = 1, 2, \dots, N. \quad (8.1-9)$$

本章讲述分析力学的基本原理，从虚功原理和D'Alembert原理开始，然后推导出用途广泛的Lagrange方程，并说明如何基于这种方程推导一个系统，特别是线性系统的运动方程。

§ 8.2 功和能

从(8.1-1)式的牛顿力学方程出发，将其两端点乘微分位移 $d\mathbf{r}$,

$$\mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = m \ddot{\mathbf{r}} \cdot d\mathbf{r} = d\left(\frac{1}{2} m \dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\mathbf{r}}\right).$$

上式左端表示力 \mathbf{F} 在微分位移 $d\mathbf{r}$ 上所做的功，将它记为 dW ；而右端表示一标量函数，

$$T = \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{r}} \cdot \dot{\mathbf{r}} = \frac{1}{2} m \dot{\mathbf{r}}^2 \quad (8.2-1)$$

的增量，此函数就是动能，于是上式可写为

$$dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = dT. \quad (8.2-2)$$