



普通高等教育“十二五”规划教材

机械振动

理论与应用

李有堂◎编著

 科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材

机械振动理论与应用

李有堂 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据高等院校机械工程专业硕士研究生学位课程“机械振动理论”的教学要求,结合多年讲授“机械振动理论”和“机械系统动力学”课程的教学经验与科研实践,参考多种同类教材与专著编著而成。

全书分为三篇,共 13 章。第一篇为基础理论篇,内容包括:振动问题的力学基础;单自由度系统的振动;两自由度系统的振动;多自由度系统的振动。第二篇为应用篇,内容包括:机械振动系统利用工程;机械振动系统防治工程;振动系统的测试、辨识与分析。第三篇为深化理论篇,内容包括:多自由度系统振动的分析方法;连续系统的振动;随机激励下的振动;非线性振动;自激振动。各章均有相当数量的例题、思考题和习题,便于读者理解和练习。

本书可作为高等院校机械工程等相关专业硕士生的“机械振动理论”课程教材,也可供土木工程、工程力学等专业的硕士生、博士生及从事相关领域教学、研究和设计的工程技术人员参考与使用。

图书在版编目(CIP)数据

机械振动理论与应用/李有堂编著. —北京:科学出版社,2012
(普通高等教育“十二五”规划教材)
ISBN 978-7-03-035736-6

I. ①机… II. ①李… 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(2012)第 238503 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:张怡君
责任印制:张 倩 / 封面设计:科地亚盟

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 10 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 10 月第一次印刷 印张: 33 3/4

字数: 660 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

机械振动是机械学的一个重要分支,其研究任务和内容包括机械系统的振动、机械结构动强度和机构动力学分析。现代机械与设备日益向高效率、高速度、高精度、高承载能力及高度自动化方向发展,而工程结构却又向着轻型、精巧的方向发展,这使得振动问题更加突出,因此振动学科也得到了飞速的发展;同时,电子计算机与现代测试、分析设备的迅速发展与完善,又为机械系统动力学的发展提供了良好条件。随着机械系统动力学的迅速发展,出现了许多新理论、新方法和新成果,总结这些新的理论和成果,并将其运用于教学实践中,使学生掌握现代动态设计的基本理论和方法,是机械工程学科发展的迫切需要。另外,目前的教学模式向厚基础、宽口径的方向发展,迫切需要既注重基础理论,又重视应用技巧的教材。

本书根据高等院校机械工程专业硕士研究生学位课程“机械振动理论”的教学要求,结合多年讲授“机械振动理论”和“机械系统动力学”课程的教学经验与科研实践,参考多种同类教材与专著编著而成。本书在指导思想、内容选材、结构体系和写作方面具有以下特点:注重结构体系的完整性,将振动基础理论、振动应用和深化基础理论有机结合起来,内容全面,结构完整;注重内容的合理衔接,突出机械振动和相关课程的逻辑关系;注重学习与实践的结合,各章均有若干思考题,便于学习和理解;注重课堂学习和课后巩固的结合,每章附有大量的习题,便于读者理解和练习。

在本书的编著过程中,冯瑞成博士、党兴武博士参加了部分章节初稿的编写,研究生望紫薇、杨瑞芳、刘金锋、顾东开、李怀清、冀伟、周强、雷翼凤、张媛媛、郭亚林、李翔和郑建欣等参加了部分章节习题的选择和文稿的录入工作;西安交通大学徐华教授、北京工业大学孙启国教授、兰州理工大学黄建龙教授认真审阅了本书,并提出了宝贵意见。本书的出版得到教育部“长江学者和创新团队发展计划”的支持。在此特表示衷心的感谢!

限于作者水平,书中不妥之处在所难免,恳请使用本书的师生和广大读者批评指正。

作 者

2012年4月

目 录

前言

第一篇 基础理论篇

第 1 章 绪论	3
1.1 系统与机械系统	3
1.1.1 系统	3
1.1.2 机械系统	4
1.1.3 系统组成	4
1.2 材料变形与动力学分类	5
1.2.1 动态系统问题的类型	5
1.2.2 材料的变形和断裂	5
1.2.3 动力学分类	6
1.3 系统模型与振动分类	6
1.3.1 力学模型与数学模型	6
1.3.2 振动及其分类	6
1.3.3 振动问题的求解步骤	8
1.4 系统模型分类与处理方法	8
1.4.1 系统模型分类	8
1.4.2 离散系统与连续系统	9
1.4.3 线性系统与非线性系统	9
1.4.4 确定性系统与随机性系统	11
1.4.5 无阻尼系统与有阻尼系统	11
1.4.6 定常系统与参变系统	13
1.5 机械振动的理论体系与研究内容	14
1.5.1 机械振动的研究意义	14
1.5.2 机械振动的理论体系	15
1.5.3 机械振动的研究内容	15
思考题	18
第 2 章 振动问题的力学基础	19
2.1 自由度与广义坐标	19

2.1.1	自由度	19
2.1.2	广义坐标	21
2.2	虚位移原理与广义力	23
2.2.1	功和能	23
2.2.2	虚位移	24
2.2.3	理想约束	25
2.2.4	虚位移原理	26
2.2.5	广义力	26
2.3	影响系数、系统机械能与互易定理	28
2.3.1	影响系数	28
2.3.2	势能及其线性化	30
2.3.3	动能的广义坐标表达式及其线性化	33
2.3.4	互易定理	34
2.4	建立振动方程的原理与常用方法	35
2.4.1	达朗贝尔原理	35
2.4.2	动力学普遍方程	37
2.4.3	拉格朗日方程	37
2.4.4	线性系统的拉格朗日方程	39
2.4.5	凯恩方程	40
2.5	振动方程的求解方法	40
2.5.1	欧拉法	40
2.5.2	龙格-库塔法	41
2.5.3	微分方程组与高阶微分方程的四阶龙格-库塔法	41
	思考题	42
	习题	42
第3章	单自由度系统的振动	45
3.1	振动系统模型及其简化	45
3.1.1	单自由度系统的基本模型	45
3.1.2	单自由度系统模型的简化	46
3.2	单自由度系统的自由振动	47
3.2.1	单自由度线性系统的运动微分方程及其系统特性	47
3.2.2	振动系统的线性化处理	49
3.2.3	单自由度无阻尼系统的自由振动	50
3.2.4	自然频率的计算方法	62
3.2.5	有阻尼系统的自由振动	65

3.3 谐波激励下的强迫振动	70
3.3.1 谐波激励下系统振动的求解方法	70
3.3.2 谐波激励下的无阻尼强迫振动	73
3.3.3 谐波激励下的有阻尼强迫振动	78
3.4 周期性激励下的强迫振动	83
3.4.1 傅里叶级数分析法	84
3.4.2 任意周期激励下的稳态强迫振动	85
3.5 任意激励下的强迫振动	86
3.5.1 脉冲响应法与时域分析	86
3.5.2 傅里叶变换法与频域分析	91
3.5.3 拉普拉斯变换法	94
思考题	96
习题	97
第4章 两自由度系统的振动	109
4.1 引言	109
4.2 两自由度系统的自由振动	110
4.2.1 两自由度振动系统的运动微分方程	110
4.2.2 无阻尼系统的自由振动与自然模态	111
4.3 坐标耦合与自然坐标	119
4.3.1 坐标耦合	119
4.3.2 自然坐标	122
4.4 两自由度系统振动的拍击现象	124
4.5 两自由度系统在谐波激励下的强迫振动	127
4.5.1 无阻尼系统的强迫振动	127
4.5.2 有阻尼系统的强迫振动	130
思考题	133
习题	133
第5章 多自由度系统的振动	144
5.1 引言	144
5.2 多自由度系统的振动微分方程	145
5.2.1 用牛顿运动定律或定轴转动方程建立运动方程	145
5.2.2 用拉格朗日方程建立运动微分方程	147
5.2.3 用刚度影响系数法建立运动微分方程	148
5.2.4 用柔度影响系数法建立运动微分方程	152
5.3 线性变换与坐标耦合	154

5.4	多自由度系统的自由振动	155
5.4.1	无阻尼自由振动,特征值问题	155
5.4.2	模态向量的正交性与正规性	158
5.4.3	模态矩阵与正则矩阵	160
5.4.4	自然坐标与正则坐标,微分方程解耦	162
5.4.5	多自由度系统对初始激励的响应	163
5.4.6	系统矩阵与动力矩阵	166
5.4.7	有阻尼多自由度系统的自由振动	168
5.5	多自由度系统的强迫振动	170
5.5.1	无阻尼系统的强迫振动	170
5.5.2	有阻尼系统的强迫振动	171
	思考题	175
	习题	175

第二篇 应用篇

第6章	机械振动系统利用工程	185
6.1	机械振动系统利用工程概述	185
6.1.1	振动利用的途径	185
6.1.2	振动利用的分类	185
6.2	材料和结构参数的确定	187
6.2.1	转动惯量的确定	187
6.2.2	摩擦系数的确定	190
6.2.3	动载荷系数的确定	191
6.2.4	轴的临界转速的确定	193
6.3	振动机械的工作原理与构造	195
6.3.1	振动机械的分类与用途	195
6.3.2	惯性振动机械的工作原理与构造	197
6.3.3	弹性连杆式振动机械的工作原理与构造	210
6.3.4	电磁式振动机械的工作原理与构造	212
6.3.5	液压式振动机械的工作原理与构造	215
6.4	非共振型振动机械	217
6.4.1	平面运动单轴惯性式非共振型振动机械	217
6.4.2	空间运动单轴惯性式非共振型振动机械	221
6.4.3	双轴惯性式非共振型振动机械	224
6.5	近共振型振动机械	228

6.5.1 惯性式近共振型振动机械	228
6.5.2 连杆式近共振型振动机械	232
6.5.3 电磁式近共振型振动机械	237
思考题	240
习题	240
第7章 机械振动系统防治工程	242
7.1 机械振动系统防治工程概述	242
7.1.1 振动防治的途径	242
7.1.2 振动防治的分类	242
7.2 隔振原理及其应用	242
7.2.1 隔振原理	243
7.2.2 隔振器的设计	248
7.2.3 冲击隔离	251
7.3 减振原理及其应用	253
7.3.1 动力减振器	254
7.3.2 变速减振器	258
7.3.3 阻尼减振器	260
7.3.4 摩擦减振器	262
7.3.5 冲击减振器	264
7.4 挠性转子的系统振动与平衡	265
7.4.1 转子在不平衡力作用下的振动	266
7.4.2 单圆盘挠性转子的振动	269
7.4.3 多圆盘挠性转子的振动	273
7.4.4 挠性转子的平衡原理	278
7.4.5 挠性转子的平衡方法	280
7.5 发动机的振动与减振	285
7.5.1 发动机位形描述	285
7.5.2 发动机的自然频率	286
7.5.3 发动机的临界转速	289
7.5.4 发动机的共振避免	290
7.5.5 发动机的耦合度缩减	291
思考题	292
习题	292
第8章 振动系统的测试、辨识与分析	294
8.1 振动系统的测试	294

8.1.1	振动测量的力学原理	294
8.1.2	振动测试传感器与测振仪器设备	297
8.1.3	激振设备与激振方法	300
8.1.4	振动测试系统	303
8.2	振动系统的辨识	308
8.2.1	模态参数识别	308
8.2.2	物理参数识别与修改	315
8.3	振动与故障诊断	319
8.3.1	机械故障诊断概述	319
8.3.2	齿轮故障产生机理及其诊断方法	322
8.4	凸轮机构的振动分析与控制	323
8.4.1	凸轮机构的振动模型	324
8.4.2	凸轮机构的振动分析	326
8.5	机械传动系统的振动分析	330
8.5.1	汽车起重机传动系统的振动分析	330
8.5.2	汽轮机-压气机喘振分析	333
8.5.3	轧钢机的冲击现象	334
8.5.4	桥式起重机起升机构振动分析	337
	思考题	340
	习题	340

第三篇 深化理论篇

第9章	多自由度系统振动的分析方法	345
9.1	引言	345
9.2	估算多自由度系统自然频率与模态向量的常用方法	345
9.2.1	瑞利商	345
9.2.2	迹法	348
9.2.3	里茨法	350
9.3	子系统综合法	354
9.3.1	传递矩阵法	354
9.3.2	机械阻抗法	357
9.4	求解特征值问题的计算方法	368
9.4.1	实对称正定方阵的楚列斯基三角分解法	369
9.4.2	矩阵迭代法	370
9.4.3	子空间迭代法	373

9.5 求解系统响应的分析方法	375
思考题	380
习题	380
第 10 章 连续系统的振动	383
10.1 引言	383
10.2 连续系统的自由振动	383
10.2.1 弦的横向振动	383
10.2.2 杆的纵向振动	387
10.2.3 轴的扭转振动	389
10.2.4 弦、杆、轴振动方程的相似性	390
10.2.5 梁的弯曲振动	390
10.3 边界条件	392
10.4 系统对于激励的响应	394
10.4.1 系统对于初始激励的响应	394
10.4.2 系统对于过程激励的响应	396
10.4.3 剪切变形和转动惯量的影响	398
10.5 连续系统的强迫振动	400
10.5.1 弦的横向强迫振动	400
10.5.2 杆的纵向强迫振动	401
10.5.3 轴的扭转强迫振动	403
10.5.4 梁的横向强迫振动	403
思考题	407
习题	407
第 11 章 随机激励下的振动	410
11.1 引言	410
11.2 随机过程的基本概念	410
11.2.1 随机过程	410
11.2.2 随机过程的统计参数	411
11.2.3 平稳随机过程和各态历经随机过程	414
11.2.4 几种典型的随机过程	415
11.3 随机过程的描述	417
11.3.1 随机过程的幅域描述	417
11.3.2 随机过程的时域描述	419
11.3.3 随机过程的频域描述	420
11.4 单自由度系统的随机响应	426

11.4.1	单自由度系统振动响应的基本形式	426
11.4.2	初始条件是随机时的振动响应	427
11.4.3	系统受基础运动随机激励	428
11.4.4	对输入是白噪声的响应	429
11.5	多自由度系统的随机响应	430
	思考题	434
	习题	435
第 12 章	非线性振动	438
12.1	引言	438
12.2	状态空间与相图	440
12.2.1	状态空间	440
12.2.2	相图	443
12.2.3	奇点领域中相图的特性	447
12.3	保守系统及其在大范围的运动	455
12.3.1	相图与轨线	455
12.3.2	振动周期与极端位移	456
12.4	非线性振动分析的常用方法	457
12.4.1	极限环	457
12.4.2	平均法	460
12.4.3	迭代法	465
12.4.4	摄动法	470
12.5	非线性振动的应用	476
12.5.1	利用复摆测量轴与轴套的干摩擦系数	476
12.5.2	利用弗洛特摆测量滑动轴承的动摩擦系数	477
12.5.3	利用硬式光滑非线性振动系统来增加振动机振幅的稳定性	479
12.5.4	硬式对称分段线性振动系统	481
12.5.5	软式不对称分段线性振动系统	484
	思考题	486
	习题	487
第 13 章	自激振动	490
13.1	引言	490
13.2	由于速度反馈引起的自激振动	492
13.2.1	速度反馈与负阻尼	492
13.2.2	爬行现象及其机理	494
13.2.3	爬行的数学模型	497

13.3 由于位移的延时反馈引起的自激振动·····	501
13.3.1 位移反馈、负刚度与静态不稳定性·····	501
13.3.2 位移的延时反馈·····	505
13.3.3 金属切削过程中的再生颤振·····	506
13.4 由于模态耦合引起的自激振动·····	513
13.4.1 模态耦合系统的稳定性·····	513
13.4.2 金属切削中的模态耦合自激振动·····	515
13.5 自激振动的识别、建模、防治及应用·····	518
13.5.1 自激振动的识别·····	518
13.5.2 自激振动的建模·····	519
13.5.3 自激振动的防治·····	519
13.5.4 自激振动的应用·····	520
思考题·····	521
习题·····	522
参考文献·····	523

第一篇 基础理论篇

第 1 章 绪 论

动力学是研究惯性效应不能忽略的那些力学问题,虽然其控制方程仅比静力学方程多出了惯性项和时间变量,但相对而言,动力学问题不仅在数学求解上困难得多,而且其物理本质也复杂得多。振动是一类特殊的动力学问题,机械、车辆、飞机、桥梁等工程系统经常处在各种激励的作用下,因此不可避免地产生响应,即发生各种各样的振动。现代工程技术对振动问题的解决提出更高、更严格的要求,因此振动理论在工程实际上有着广泛的应用。

机械振动是机械学的一个重要分支,振动理论是许多科学技术领域的基础理论。其研究任务和内容包括机械系统的振动、机械结构动强度和机构动力学分析。现代机械与设备日益向高效率、高速度、高精度、高承载能力及高度自动化方向发展,而工程结构却又向着轻型、精巧的方向发展,使得振动问题更加突出,因此振动学科得到了飞速的发展。本书系统讨论机械振动的基础理论,分析各类振动的解决方法,阐述机械振动的应用问题。

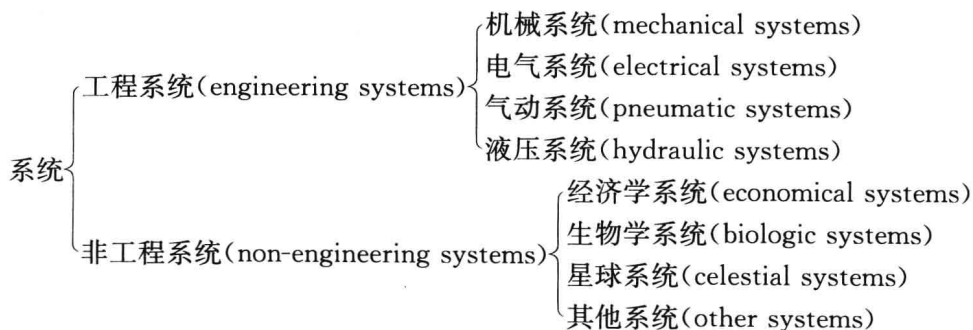
1.1 系统与机械系统

1.1.1 系统

系统可定义为一些元素的组合,这些元素之间相互关联、相互制约、相互影响,并组成为一个整体。从此定义来看,系统是由多个元素组成的,单一元素不能构成系统。系统的概念范围很广,大到天体系统,小到微观系统。

按照受力性质,系统可以分为静态系统和动态系统。

按照应用性质,系统一般可分为工程系统和非工程系统两类:



从工程应用的角度来考虑,把研究和处理的对象定义为一个工程系统。例如,对于一个机械设备而言,一般由下列三大部分组成:动力装置、传动装置和工作装置。而将每一部分作为对象来研究时,就形成一个系统,即动力系统、传动系统和执行系统,如图 1-1 所示。对图 1-1 中的传动系统,在机床和车辆中大多数是齿轮传动箱,而齿轮传动箱要完成传递动力的任务,需要齿轮箱内部各元件(如齿轮、轴、轴承等)协调配合起来完成工作,不得出现卡死、干涉等现象,这样才能实现自身功能,发挥自己的作用与任务。除了系统中各个元件(元素)协调工作之外,系统与系统之间也必须协调工作,才能完成机械分配给系统的任务。

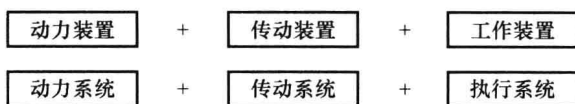


图 1-1 机械设备的系统组成

1.1.2 机械系统

所谓机械系统是由一些机械元件组成的系统。例如,平面连杆机构系统,由凸轮元件组成的凸轮机构系统,由齿轮元件组成的齿轮系统等。这些元件常常与电气系统、液压系统等结合起来,组成一种新的系统,如机和电结合形成的机电一体化系统、机和液压结合形成的机液控制系统等。

1.1.3 系统组成

在研究和分析一个系统时,常用“信号”这一物理量来描述。

信号是在系统之间连接通道中“流动”着的物理变量,是一个“动态”量。例如,对如图 1-2 所示的车辆传动系统, M_1 是动力源(发动机)输入给传动系统的转矩, M_2 是经过系统后输出给执行系统(驱动车轮)的转矩。由于输入转矩 M_1 较小,而输出转矩 M_2 较大,故转矩 M 经过传动系统后由小变大,是一个动态量,可视为信号。同样,转速 n 也可看成是一个信号。由于发动机输入的转速 n_1 较高,而经过传动系统后输出给车轮的转速 n_2 较低,是一个动态量。也就是说,传动系统的作用是减速增矩,转矩 M 和转速 n 都可以作为信号来处理。

在研究一个系统的动力学问题时,总是给系统施加一个输入信号,观察和检测其输出信号,来辨明系统的特性,常采用图 1-3 的框图来表示。

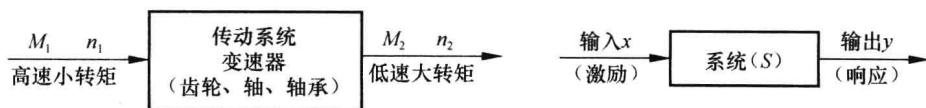


图 1-2 车辆传动系统

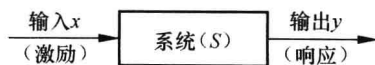


图 1-3 系统组成