



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械动力学基础

刘正士 高荣慧 陈恩伟 编

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机械动力学基础

Jixie Donglixue Jichu

刘正士 高荣慧 陈恩伟 编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书讲述机械动力学基础理论、建模与分析计算方法以及若干典型机构的动力学问题。本书分为9章。第1章到第5章为上篇(机械动力学基础),内容包括机械动力学概述、振动基础知识、单自由度系统的振动、多自由度系统的振动、振动控制技术及其应用。第6章到第9章为下篇(机械动力学的几个专题),内容包括凸轮机构动力学、转子动平衡、往复机械动力学和飞轮设计。

本书可作为高等院校机械类专业的必修或选修课教材,也可供机械制造和机械设备等方面的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械动力学基础/刘正士,高荣慧,陈恩伟编. —北京:高等教育出版社,2011.6
ISBN 978-7-04-031396-3

I. ①机… II. ①刘…②高…③陈… III. ①机械动力学—高等学校—教材 IV. ①TH113

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第030695号

策划编辑	卢广	责任编辑	李文婷	封面设计	李卫青
责任绘图	尹莉	版式设计	张杰	责任校对	杨雪莲
责任印制	张泽业				

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社址	北京市西城区德外大街4号	网址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印刷	北京机工印刷厂	网上订购	http://www.landaco.com
开本	787×960 1/16		http://www.landaco.com.cn
印张	9.75	版次	2011年6月第1版
字数	180 000	印次	2011年6月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定价	16.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 31396-00

前 言

机械动力学是研究机械结构在动载荷作用下动力学行为的科学,是20世纪中叶才发展起来的一门学科。随着工程结构和机械产品向大型、高速、大功率、高性能和轻结构方向发展,机械动力学问题越来越突出,越来越严重。例如高速机床的加工精度问题,机组状态监测和诊断问题,车辆减振降噪和舒适性问题,建筑物、桥梁的抗震问题,动态精度与动态测量等问题。机械动力学不仅是基础力学的一个重要分支,同时也是工程科学的重要领域,在机械、车辆、船舶、航天航空、建筑、水工等工业技术领域中占有愈来愈重要的地位。

本书是为高等院校机械类专业开设的“机械动力学基础”课程所编写的教材,旨在加强学生对机械动力学基础理论、建模与分析计算方法以及若干典型机构的动力学问题的学习,以培养他们对机械系统和工程结构进行动力分析与控制,理论联系实际以及有效地处理机械工程中各种机械动力学问题的能力。

由于学时有限,本书力图在“少而精”的前提下,精选教学内容,突出机械动力学的基本理论和基本方法,但不做系统、详尽的论证和推导。同时,注重结合工程应用,阐述如何运用有关理论、方法来分析几种典型机构的动力学问题。

本书分为9章。第1章到第5章为上篇(机械动力学基础),内容包括机械动力学概述、振动基础知识、单自由度系统的振动、多自由度系统的振动、振动控制技术及其应用;第6章到第9章为下篇(机械动力学的几个专题),内容包括凸轮机构动力学、转子动平衡、往复机械动力学和飞轮设计。本书各章均有少量习题,为便于教学安排,编写时尽量保持了各章的相对独立性,以便选学。

本书可作为高等院校机械类专业的必修或选修课教材(需30~50学时),也可供机械制造和机械设备等方面的工程技术人员参考。

本书上篇由刘正士、高荣慧编写,下篇由刘正士、陈恩伟编写。

中国科技大学张培强教授审阅了本书,并提出了宝贵的意见和建议,使编者获益匪浅,特向张培强教授致以诚挚的谢意。中国科技大学王棋民教授,合肥工业大学王勇、陆益民副教授参与了本书部分章节的修改和审校,在此表示深切的感谢。

在编写本书时虽尽心尽力,但由于编者水平有限,仍难免有错误和不妥之处,敬请读者斧正。

编者

2011年3月

符 号 表

m	质量	r	挠度,半径,频率,斜坡函数
k	刚度,周期数	M	力矩,力偶,模态质量
c	阻尼系数	a	加速度
c_{cr}	临界阻尼系数	α	角加速度
J	转动惯量	p	压力
ξ	阻尼比	A	幅值,面积
θ	角度	K	模态刚度,波动系数
T	周期,转矩,力矩	I	截面极惯性矩
f	频率	u	位移
F	力	G	剪变模量
E_k	动能	V	弹性势能
E_p	势能	φ	初相位
t	时间	β	振幅放大因子
x	位移,响应	λ	频率比
$\dot{x}$	速度	E	单位矩阵
$\ddot{x}$	加速度	M	质量矩阵
E	弹性模量	C	阻尼矩阵
ω	角速度,圆频率	K	刚度矩阵
π	圆周率	u	模态向量,主振型
n	转速	U	模态矩阵
δ	弹簧变形成量,对数衰减率	Z	阻抗矩阵
v	速度	q	广义坐标
ϕ	压力角	X	稳态响应幅值
μ	滑动摩擦系数,质量比	η	隔振系数
e	偏心距	ε	隔振效率
ω_n	固有角频率	Δ_{st}	静变形成量
ω_d	有阻尼固有角频率	H	频率响应函数

目 录

符号表	I
-----------	---

上篇 机械动力学基础

第 1 章 机械动力学概述	3
1.1 工程中的动力学问题	3
1.2 机械系统动力学的内容	4
1.3 机械动力学的研究方法	5
习题	6
第 2 章 振动基础知识	7
2.1 振动的分类及表示方法	7
2.1.1 振动的分类	7
2.1.2 振动的表示方法	8
2.1.3 简谐振动的特征	10
2.2 机械振动的动力学模型	13
2.2.1 机械振动系统的三要素	13
2.2.2 动力学模型	22
习题	23
第 3 章 单自由度系统的振动	25
3.1 单自由度系统的运动微分方程	25
3.2 单自由度系统的自由振动	26
3.2.1 无阻尼情形	26
3.2.2 有阻尼情形	27
3.3 等效单自由度系统	29
3.3.1 单自由度扭转振动系统	30
3.3.2 单摆	30
3.3.3 简支梁横向振动	30
3.4 对数衰减率及阻尼比的测定	31
3.5 单自由度系统的强迫振动	33
3.5.1 简谐激励下的响应	33
3.5.2 周期激励下的响应	35

3.5.3 任意激励下的响应	36
习题	39
第4章 多自由度系统的振动	41
4.1 两自由度系统的运动微分方程	41
4.2 两自由度系统的模态	43
4.2.1 主振动	43
4.2.2 固有频率和主振型(模态)	44
4.2.3 系统的通解	45
4.3 两自由度系统的强迫振动	46
4.4 多自由度系统的运动微分方程、模态和强迫振动	48
4.4.1 运动微分方程	48
4.4.2 模态	48
4.4.3 强迫振动	51
习题	55
第5章 振动控制技术及其应用	57
5.1 抑制振源	57
5.2 隔振技术	58
5.2.1 基本原理	58
5.2.2 隔振特性	60
5.2.3 隔振装置设计的一般步骤	60
5.2.4 隔振材料	61
5.3 减振技术	61
5.4 振动主动控制	66
5.4.1 概述	66
5.4.2 基本原理与系统	67
5.5 振动实验	68
5.5.1 振动信号的采集	69
5.5.2 振动测试系统	75
习题	80

下篇 机械动力学的几个专题

第6章 凸轮机构动力学	83
6.1 引言	83
6.2 凸轮机构动力学分析——正向问题	83
6.2.1 动力学模型	83

6.2.2 等效系统模型	84
6.3 凸轮从动系统的响应——避免共振	85
6.4 凸轮机构的动力学分析——逆向问题	86
6.4.1 力封闭凸轮机构的作用力	86
6.4.2 形状封闭的凸轮机构的作用力	90
6.4.3 凸轮轴转矩	91
6.4.4 带有往复式滚子从动杆的圆盘凸轮的力学分析	91
习题	94
第7章 转子动平衡	95
7.1 概述	95
7.1.1 转子的不平衡及其危害	95
7.1.2 临界转速、刚性转子与挠性转子	95
7.2 不平衡旋转质量的激励	96
7.3 挠性转子的弓形回旋	98
7.4 转子的平衡	101
7.4.1 静平衡——单平面平衡	101
7.4.2 刚性转子的动平衡——双平面平衡	102
7.4.3 挠性转子的动平衡——多平面、多转速平衡	107
习题	110
第8章 往复机械动力学	111
8.1 平面连杆机构的动力学分析	111
8.1.1 平面铰链四杆机构的动力学分析	111
8.1.2 摆动力和摆动转矩	117
8.2 连杆机构的平衡	117
8.2.1 连杆机构平衡的基本条件	117
8.2.2 平面连杆机构惯性力的平衡方法	119
8.3 发动机动力学概述	122
8.3.1 引言	122
8.3.2 单缸发动机的力学分析	122
8.3.3 多缸发动机的动力学分析	129
习题	135
第9章 飞轮设计	137
9.1 引言	137
9.2 飞轮的力学模型	137
9.3 飞轮能量	138

9.4 飞轮设计	139
习题	140
部分习题参考答案	142
参考文献	144

上篇

机械动力学基础

- 第 1 章 机械动力学概述
- 第 2 章 振动基础知识
- 第 3 章 单自由度系统的振动
- 第 4 章 多自由度系统的振动
- 第 5 章 振动控制技术及其应用

第 1 章 机械动力学概述

1.1 工程中的动力学问题

随着科学技术的飞速发展,部分工程结构和机械产品向大型、高速、大功率、高性能和轻结构方向发展,这使得机械动力学问题越来越突出。大型、高速回转机械发生重大事故在国内外屡见不鲜,大型工程结构因动力学问题所引起事故也时有发生。

工程中一些常见的动力学问题如机床的加工精度问题主要是由机床的切削振动引起的,飞机由于强度原因引发事故绝大多数是由振动疲劳所致,大功率汽轮发电机组频繁的出现事故促进了转子动力学的发展,高速火车的发展使得人们不得不研究轮轨振动力学以及随之而来的噪声污染问题,大型火箭导航陀螺的位置安排必须考虑火箭的模态振型。此外还有车辆减振降噪和舒适性问题,建筑物、桥梁的抗震问题,动态精度与动态测量问题等。

现代机械结构设计中,传统经验设计、类比设计和静态设计方法已不能满足工程要求,必须作动态分析和动态设计,而机械动力学是研究动态设计的基础。机械动力学还是机械结构动态优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计等学科的基础。此外,机械动力学不仅是基础科学的一个重要分支,同时也是工程科学的重要领域,在机械、航天航空、车辆、船舶、建筑、水工等工业技术领域中占有愈来愈重要的地位。

下面是机械动力学在工业技术领域中应用的两个典型实例。

1 洗衣机的动力学问题

自 1767 年舍费尔 Schaffer 发明第一台洗衣机以来,其结构及性能得到了不断的革新。目前,按照滚筒旋转轴线方向来分洗衣机主要有两种类型:垂直轴洗衣机及水平轴洗衣机。垂直轴洗衣机主要在美国和亚洲地区使用,其填装方便、容量大、强度大;水平轴洗衣机在欧洲被普遍使用,它节水、节电、占用空间小、容易安装在空间小的厨房与卫生间。洗衣机的振动主要是由旋转着的不平衡衣物所引起的。市面上还存在着一种倾斜轴洗衣机,由于旋转轴倾斜,其惯性力的分布较水平轴洗衣机更为复杂,由此引发了一系列动力学问题。

在洗衣机的设计中要解决的问题有:

- (1) 减小洗衣筒的振幅及机身的滑动和跳动,使洗衣时更安静。
- (2) 容量及甩干时的速度尽量大。
- (3) 进行减振、降噪的自动平衡装置设计。
- (4) 对悬架进行优化设计。
- (5) 减小占地面积,降低成本。
- (6) 人性化设计,如倾斜轴洗衣机除兼有水平轴、垂直轴洗衣机的优点外,还更加“宜人”。

2 汽车 NVH 问题

国际汽车界制定了一项新标准,简称为 NVH 标准,即噪音(noise)、振动(vibration)、声振粗糙度(harshness)三项标准,通俗地被称为乘坐轿车的“舒适感”。

汽车界的技术专家们根据收集到的资料进行统计得出结论说:以 2004 年在美国汽车市场上的销售情况为例,日本丰田公司生产的凯美瑞(Camry)牌轿车、本田公司生产的雅阁(Accord)牌轿车和美国克莱斯勒公司生产的 Tolos 牌轿车在市场上的销售比率都一跃上升到前列。其原因是它们在 NVH 领域里的技术处于领先地位。对 NVH 标准的一项试验表明,用顾客较喜欢的轿车做试验,在用水泥铺得较平坦的公路上,轿车以 40 公里的时速行驶,如将欧洲产轿车的 NVH 以 100%作标准,日本轿车则为 75%,韩国轿车为 50%。欧洲轿车的悬架技术较高,所以乘坐舒适;日本轿车设计时将人体工程学考虑在内,对提高乘坐舒适感有很大帮助。

汽车 NVH 的研究内容有:

- (1) 汽车的噪声源分析与治理方案,包括发动机、排气系统,高速行驶时的风噪声、轮胎噪声,及其他运动部件可能发出的噪声。
- (2) 汽车的振动分析与治理方案,包括发动机、传动系统、不平路面的激励。
- (3) 汽车的噪声和振动对整车性能和舒适性的影响。

由以上两个实例可见,现代结构设计已不仅仅是静力学问题,更是动力学问题,设计时必须考虑动力学的影响。

1.2 机械系统动力学的研究内容

什么是机械系统动力学呢?机械系统动力学是研究机械结构在动载荷作用下的系统动力学行为的科学。

系统是一些元素的有机组合,这些组合在一起的元素通过相互作用共同完成给定的任务。系统的概念可以推广到任何动态现象,包括自然系统如太阳系、生态系统和人工系统如经济系统、交通运输系统、商业系统等。

人们经常说用系统的观点分析和解决问题,那么什么是系统的观点呢?“系统的观点”就是把研究对象作为具有许多要素组成的整体即系统,研究整个系统的运行而不只是关心各组成部分的工作状态。

真实系统动力学研究中的主要思想是把系统模型化。各种系统的模型都是对被研究系统的行为所作的简化和抽象化的产物,因此这些模型的特征性能所反映的是真实系统的某些特性,而不是全部。

如图 1-1 所示,机械系统动力学主要研究三方面的问题:

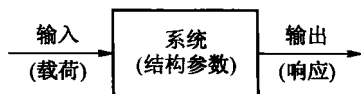


图 1-1 系统模型

(1) 已知载荷和结构参数求结构的响应,称为响应预估问题,这是机械动力学的正问题,也是机械动力学研究的核心问题。此类问题一般借助多种动态分析方法(模态分析法、机械阻抗分析法、有限元法等)对结构的动态特性进行研究。

(2) 已知载荷和结构响应求结构参数或数学模型^①,称为参数辨识或系统辨识问题,这是机械动力学的第一类逆问题。此类问题通常要借助模态分析法来识别结构参数,正确地建立结构的数学模型,并完成从模态参数到物理参数的转换。这样才能搞清结构的薄弱环节,为改进结构提供依据。

(3) 已知结构参数和响应求载荷,称为载荷辨识问题,是机械动力学的第二类逆问题。此类问题通常先进行第一类逆问题的计算和测试,求得结构参数,然后方能进行载荷识别,以搞清外界干扰力的水平和规律。

与动力学三类问题相应的三类工程应用问题:

- (1) 动刚度,动强度,平顺性,舒适性,振动、噪声级评价等。
- (2) 故障诊断,薄弱环节确定,质量控制等。
- (3) 载荷谱,道路谱,误差源等。

1.3 机械动力学的研究方法

机械动力学的研究方法可分为两类。

(1) 结构动态分析

对于机械动力学正问题,动态分析一般借助于多种动态分析法(如模态分析

^① 对系统性能的分析、预测等是建立在对系统的数学描述之上的,这种数学描述称为数学模型。机械系统的数学模型通常可分为离散系统和连续系统两大类,也可根据描述系统的微分方程分为线性系统和非线性系统。常用的数学模型主要有微分方程、差分方程、状态方程及传递函数等。

法、模态综合法、机械阻抗分析法、状态空间分析法、模态摄动法及有限元法等)建立结构或系统的数学模型,进而对结构的动态特性进行分析(如动态仿真等)。

对于机械动力学逆问题,动态分析通常先进行动态实验,在此基础上根据一定的准则建立结构或系统的数学模型,然后借助参数辨识或系统辨识的方法进行分析。

(2) 动态实验

结构动态实验包括模态实验、力学环境实验、模拟实验等,它是产品设计和生产过程中不可缺少的环节,不仅可以直接考核产品的动力学性能,也为动态分析建立可靠的数学模型提供必要的数据。

习 题

1-1 机械动力学的研究内容及研究方法有哪些?

1-2 试举出工程中几个动力学问题的实例。

第2章 振动基础知识

机械振动是研究机械动力学的基础,本章从机械系统动力学的观点介绍机械系统振动的基本知识,为研究机械系统动力学打下基础。

2.1 振动的分类及表示方法

为了便于研究,人们把振动按不同的方式进行分类并给出几种常用的表示方法。

2.1.1 振动的分类

2.1.1.1 按振动产生的原因分类

(1) 自由振动 自由振动是指系统受初始干扰或原有外激励力取消后产生的振动。

(2) 强迫振动 强迫振动是指系统在外激励力的作用下产生的振动。

(3) 自激振动 自激振动是指在没有周期外力的作用下,由系统内部激发及反馈的相互作用而产生的稳定的周期振动。

2.1.1.2 按结构参数的特性分类

(1) 线性振动 线性振动是指,一般在微小振动条件下,系统内的恢复力、阻尼力和惯性力分别与振动位移、速度和加速度成线性关系的一类振动,可用常系数线性微分方程来描述。

(2) 非线性振动 非线性振动是指,因材料非线性本构关系或运动大变形引起的,系统内上述参数有一组或一组以上(恢复力与振动位移,阻尼力与速度,惯性力与加速度)不成线性关系时的振动,此时微分方程中出现非线性项。

2.1.1.3 按系统的自由度数分类

(1) 单自由度系统振动 单自由度系统振动是指只用一个独立坐标就能确定的系统振动。

(2) 多自由度系统振动 多自由度系统振动是指需要多个独立坐标才能确定的系统振动。

(3) 连续体振动 连续体振动是指无限多自由度系统的振动,一般也称为弹性体振动,需用偏微分方程来描述。

2.1.1.4 按振动的规律分类

(1) 简谐振动 简谐振动是指振动量为时间的正弦或余弦函数的一类周期振动。

(2) 周期振动 周期振动是指振动量可表示为时间的周期函数的一类振动,可用谐波分析法将其展开成一系列简谐振动的叠加。

(3) 瞬态振动 瞬态振动是指振动量为时间的非周期函数的一类振动,通常只在一定的时间内存在。

(4) 随机振动 随机振动是指振动量为时间的非确定性函数的一类振动,只能用概率统计的方法进行研究。

本书只研究线性系统的振动问题,对于非线性系统的振动问题已有专著论述,有兴趣的读者可参阅相关论著。

2.1.2 振动的表示方法

机械振动是指振动系统围绕其平衡位置作往复运动。在许多情况下,机械振动是有害的,它影响机械设备的工作性能和寿命,产生不利于工作的噪声和有益于机械或结构的动载荷,严重时会使零部件失效甚至破损而造成事故。从运动学的观点来看,机械振动是振动系统的某些物理量(位移、速度、加速度)随时间 t 变化的规律。

2.1.2.1 机械振动的一般表示方法

如果机械振动的规律是确定的,则可用函数关系式

$$x = x(t) \quad (2-1)$$

来描述其运动。也可用函数图形来表示,通常以时间为横坐标,以振动的物理量为纵坐标。

图 2-1、图 2-2、图 2-3 所示是以位移 x 为纵坐标的几种典型的机械振动。

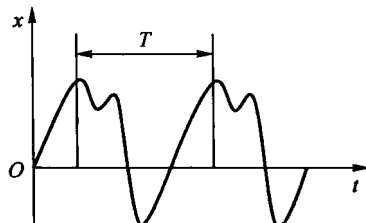


图 2-1 周期振动

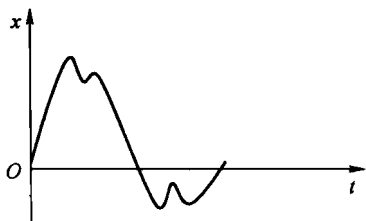


图 2-2 瞬态振动

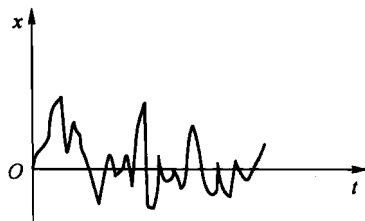


图 2-3 随机振动

对于周期振动,可用时间的周期函数表示为