

高等学校 机械类专业“十三五”规划教材

# 机械系统动力学

主编 何芝仙 张杰 徐震



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校 机械类专

# 机械系统动力学

主 编 何芝仙 张 杰 徐 震

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书根据机械工程专业“机械系统动力学”课程的教学要求,结合多年机械工程专业研究生课程“机械系统动力学”的教学和科研实践体会,参考多种同类教材编写而成。

全书共七章,分别为绪论、机械系统运动微分方程的建立、机械系统运动微分方程的求解、固有频率的实用计算方法、考虑构件弹性的机械系统动力学、动力学专题 I: 轧钢机动力学、动力学专题 II: ADAMS 软件简介及应用。前三章阐述机械动力学的基本理论与方法,后四章讨论工程应用。机械系统动力学基本理论部分按照机械系统动力学模型建立、数学模型建立和求解的线索展开讨论,突出动力学方法的论述。专题应用部分选择轧钢机动力学、压缩机主传动系统动力学以及内燃机曲轴-轴承系统动力学等若干典型问题阐述如何应用动力学基本理论与方法解决机械系统动力学问题。书中还对动力学仿真软件 ADAMS 作了简要介绍,并在附录中给出典型机械系统动力学算例 Matlab 程序,以方便读者理解和应用机械系统动力学的基本理论和方法。

本书可作为高等学校机械工程等相关专业本科生、研究生“机械系统动力学”课程教材,也可供从事机械工程 CAD、CAE 方面工作的工程师参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

机械系统动力学/何芝仙,张杰,徐震主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2017.1

高等学校 机械类专业“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5606-4356-4

I. ① 机… II. ① 何… ② 张… ③ 徐… III. ① 机械工程—动力学—高等学校—教材 IV. ① TH113

## 中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 320666 号

策划编辑 高 樱

责任编辑 王 静

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西大江印务有限公司

版 次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 11

字 数 252 千字

印 数 1~3000 册

定 价 22.00 元

ISBN 978-7-5606-4356-4/TH

**XDUP 4648001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

## 机械类专业规划教材编审专家委员名单

主任：张 杰(南京工程学院 机械工程学院 院长/教授)

副主任：杨龙兴(江苏理工学院 机械工程学院 院长/教授)

张晓东(皖西学院 机电学院 院长/教授)

陈 南(三江学院 机械学院 院长/教授)

花国然(南通大学 机械工程学院 副院长/教授)

杨 莉(常熟理工学院 机械工程学院 副院长/教授)

成 员：(按姓氏拼音排列)

陈劲松(淮海工学院 机械学院 副院长/副教授)

郭兰中(常熟理工学院 机械工程学院 院长/教授)

高 荣(淮阴工学院 机械工程学院 副院长/教授)

何芝仙(安徽工程大学 建筑工程学院 副院长/教授)

胡爱萍(常州大学 机械工程学院 副院长/教授)

刘春节(常州工学院 机电工程学院 副院长/副教授)

刘 平(上海第二工业大学 机电工程学院 教授)

茅 健(上海工程技术大学 机械工程学院 副院长/副教授)

唐友亮(宿迁学院 机电工程系 副主任/副教授)

王荣林(南理工泰州科技学院 机械工程学院 副院长/副教授)

王树臣(徐州工程学院 机电工程学院 副院长/教授)

王书林(南京工程学院 汽车与轨道交通学院 副院长/副教授)

吴懋亮(上海电力学院 能源与机械工程学院 副院长/副教授)

吴 雁(上海应用技术学院 机械工程学院 副院长/副教授)

许德章(安徽工程大学 机械与汽车工程学院 院长/教授)

许泽银(合肥学院 机械工程系 主任/副教授)

周 海(盐城工学院 机械工程学院 院长/教授)

周扩建(金陵科技学院 机电工程学院 副院长/副教授)

朱龙英(盐城工学院 汽车工程学院 院长/教授)

朱协彬(安徽工程大学 机械与汽车工程学院 副院长/教授)

# 前 言

《中国制造 2025》中指出“制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基”。制造业的发展，迫切需要大量新型、高效、大功率、高速、高精度、重载荷、高度自动化的机械与技术装备。发展先进制造业，创新是原动力，先进的设计理论是先导。尽管现代机械产品大都是机电一体化的集成产品，但其动力学性能对机械产品的性能却起着决定性的作用，机械系统动力学问题是现代机械设计面临的关键问题之一。高速机械运动部件的惯性力平衡、振动与噪声、减振与隔振、疲劳强度计算等一系列问题，都是机械系统动力学研究的问题。机械系统动力学的基本理论已经成为机械工程师必须具备的基本知识。正因为如此，机械系统动力学课程已经成为高等学校机械类专业本科生和研究生的必修课程。

根据机械工程专业研究生“机械系统动力学”的学时教学需要，笔者结合多年的教学和科研体会，编写了本书。本书内容主要由机械系统动力学基本理论和专题应用两大部分组成。机械系统动力学基本理论部分将机械振动和机械动力学知识融为一体，按照机械系统动力学模型的建立、数学模型的建立和求解为线索展开讨论，并将机械系统动力学运动微分方程求解方法归纳为解析法、数值法和半解析半数值法进行分类讨论，突出动力学方法的论述。专题应用部分选择轧钢机动力学、压缩机主传动系统动力学以及内燃机曲轴-轴承系统动力学等若干问题阐述如何应用动力学基本理论与方法解决机械系统动力学问题。由于计算机的飞速发展和广泛应用，机械系统动力学仿真软件 ADAMS 在工程中得到广泛应用，已经成为机械工程师必须掌握的工具，书中对 ADAMS 软件及其应用实例也作了介绍。本书附录中还提供了典型的机械系统动力学问题求解的 MATLAB 程序，以方便读者学习。

由于编者水平有限，书中不足和疏漏之处在所难免，诚请读者批评指正。

编 者

2016 年 9 月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 系统、机械系统及其分类 .....	1
1.2 动力载荷及其分类 .....	4
1.3 机械系统动力学的研究内容及任务和研究方法 .....	5
1.3.1 机械系统动力学的研究内容及任务 .....	5
1.3.2 机械系统动力学的研究方法 .....	7
第 2 章 机械系统运动微分方程的建立 .....	9
2.1 机械系统的动力学特征参数 .....	9
2.1.1 自由度 .....	9
2.1.2 动力自由度的确定 .....	10
2.1.3 基本动力元件与特性 .....	11
2.2 机械系统动力学模型的建立 .....	13
2.3 机械系统运动微分方程的建立 .....	14
2.3.1 涉及的基本定理 .....	14
2.3.2 单自由度系统 .....	15
2.3.3 单自由度多刚体系统 .....	17
2.3.4 多自由度系统 .....	19
2.3.5 连续系统 .....	28
2.3.6 非线性系统 .....	31
第 3 章 机械系统运动微分方程的求解 .....	34
3.1 机械系统的运动方程求解方法——解析法 .....	34
3.1.1 单自由度系统的振动 .....	34
3.1.2 多自由度系统的振动 .....	42
3.1.3 连续系统 .....	53
3.1.4 非线性系统 .....	56
3.2 机械系统的运动方程求解方法——数值法 .....	60
3.2.1 欧拉法 .....	60
3.2.2 Newmark- $\beta$ 法 .....	62
3.2.3 Runge-Kutta 法 .....	63

3.3 机械系统的运动方程求解方法——解析-数值法 .....	64
3.3.1 等效力矩是等效构件转角的函数 .....	65
3.3.2 等效力矩是等效构件和角速度的函数 .....	69
<b>第4章 固有频率的实用计算方法 .....</b>	<b>72</b>
4.1 单自由度系统 .....	72
4.2 多自由度系统 .....	74
4.2.1 求特征值法 .....	74
4.2.2 计算固有频率的近似法 .....	74
4.3 传递矩阵法 .....	77
4.3.1 传递矩阵法分析轴的纵向振动 .....	77
4.3.2 传递矩阵法分析圆轴的扭转振动 .....	81
<b>第5章 考虑构件弹性的机械系统动力学 .....</b>	<b>85</b>
5.1 齿轮传动系统 .....	85
5.1.1 齿轮传动系统运动微分方程 .....	85
5.1.2 轮齿变形的计算 .....	88
5.1.3 齿轮传动系统运动微分方程求解 .....	90
5.2 凸轮机构 .....	92
5.3 平面连杆机构的动力学分析 .....	97
5.3.1 引言 .....	97
5.3.2 单元划分 .....	97
5.3.3 单元运动方程 .....	98
5.3.4 机构运动方程的组成 .....	103
5.3.5 机构运动方程的求解 .....	105
5.4 轴-滚动轴承系统动力学 .....	107
5.4.1 系统模型 .....	107
5.4.2 系统建模和求解方法 .....	110
5.4.3 刚性轴-滚动轴承系统的动力学行为 .....	110
5.4.4 弹性轴-滚动轴承系统的动力学行为 .....	112
5.4.5 结论 .....	114
<b>第6章 动力学专题 I: 轧钢机动力学 .....</b>	<b>115</b>
6.1 动力学模型的建立 .....	115
6.2 动力学方程的解 .....	117
6.2.1 数值法和平均法 .....	117

6.2.2	加权平均法	119
6.3	具有随机系数的初轧机自激振动问题	120
6.3.1	近似解析法	121
6.3.2	近似解析法的局限性	122
6.3.3	Runge - Kutta 法与人工神经网络相结合的数值解法	122
<b>第 7 章</b>	<b>动力学专题 II:ADAMS 软件简介及应用</b>	<b>126</b>
7.1	ADAMS 软件简介	126
7.1.1	用户界面模块(ADAMS/View)	127
7.1.2	求解器模块(ADAMS/Solver)	128
7.1.3	后处理模块(ADAMS/PostProcessor)	128
7.2	活塞式压缩机主传动系统动力学仿真	129
7.2.1	弹性曲轴-滚动轴承系统 ADAMS 动力学仿真模型	130
7.2.2	求解理论基础	130
7.2.3	求解与仿真结果分析	133
7.2.4	结论	135
7.3	内燃机曲轴-轴承系统动力学与摩擦学耦合仿真	135
7.3.1	系统建模和求解理论基础	135
7.3.2	曲轴动力学行为	139
7.3.3	主轴承摩擦学特性	141
7.3.4	结论	144
<b>附录</b>	<b>计算程序</b>	<b>145</b>
一、	曲柄滑块机构刚体动力学计算程序	145
二、	凸轮机构动力学问题计算程序	149
三、	弹性连杆机构动力学有限元分析程序	151
四、	Runge-Kutta 法求解初轧机自激振动问题计算程序	155
五、	Runge-Kutta 法与人工神经网络相结合的解法程序	157
六、	传递矩阵法计算圆轴扭转振动固有频率的计算程序	159
七、	齿轮传动系统动力学分析程序	160
<b>参考文献</b>		<b>166</b>



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 系统、机械系统及其分类

从系统论的观点看,系统可以定义为一系列元素的组合,组成系统的元素之间相互关联、相互作用,以实现特定的功能。一般而言,系统由多个元素构成,单个元素不能构成系统。自然界中存在丰富多样的系统,大到天体系统,小到微观系统。按照不同的分类方式,可以得到不同的系统。如按照系统的自然属性分类,系统可分为自然系统和人工系统,如图 1-1-1 所示。

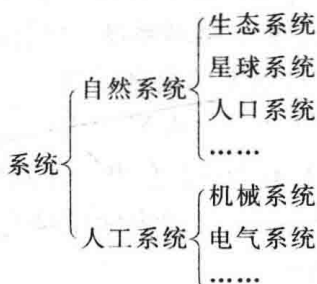


图 1-1-1 系统组成

所谓机械系统,是指由一些机械元件组成的系统。一部现代机器常由动力系统、主传动系统、辅助系统(如润滑系统)、电气控制系统等若干子系统组成。我们可以将一部机器的动力装置、传动装置和执行装置视为一个系统进行研究,也可以将传动装置或执行装置视为一个系统进行研究。

研究系统的特性,也常采用“系统”和“信号”的概念来进行描述。系统是指构成机器或研究过程的实际硬件,而信号则是在系统间的连接通道中流动的物理量。由于系统可以视为一系列相互连接的元件的总体,因此,系统中的每一个元件都有一个或几个由其他元件流入的信号,并有一个或几个流向其他元件的信号。前者称为输入,后者称为输出。同样的,对于整个系统而言,流入系统的信号称为系统的输入(又叫系统的激励),而由系统流出的信号称为系统的输出(又叫系统的响应)。分析机械系统的动力学特征,首先要建立系统的数学模型,建立一个合理的数学模型是分析过程的关键。机械系统的数学模型对于动力学问题而言,就是机械系统动态特征的数学描述。通常,机械系统的数学模型用二阶微分方程组描述。根据描述机械系统的微分方程是否是线性的,机械系统可以分为线性系统 and 非线性系统。

如果一个系统的数学模型可以用线性微分方程来描述,则该系统为线性系统。如常见的质量-弹簧-阻尼系统,其运动微分方程可以表示为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1-1-1)$$

如果一个系统的数学模型可以用非线性微分方程来描述,则该系统为非线性系统。如常见的长为  $l$ 、质量为  $m$  的平面单摆,其运动微分方程为

$$ml^2 \ddot{x} + mgl \sin x = 0 \quad (1-1-2)$$

关于线性系统与非线性系统,以下两点必须注意:

(1) 对于线性系统,叠加原理成立,对于非线性系统,叠加原理不成立,故不能用叠加原理求解非线性问题。

(2) 严格的线性系统在实际中是不存在的,或者说,实际存在的系统都是非线性系统。但许多实际系统进行线性化处理后具有足够的精度,可以视为近似线性系统。

如果按照描述系统的自由度分类,系统可以分为连续系统和离散系统。严格地说,组成机器的构件都是质量连续分布、具有无穷个自由度的连续体。所谓连续系统,就是分布参数组成的、具有无穷多个自由度的系统。严格地说,机械系统都属于连续系统。由于连续系统求解困难,计算量大,人们对连续系统进行简化,将无穷自由度的连续系统简化为有限个自由度的离散系统。所谓离散系统,就是对连续系统进行简化得到的由集中参数元件组成的系统,它具有有限个自由度。对于机械系统,如忽略构件的弹性变形,认为系统是由刚性构件组成的,则系统为有限个自由度的离散系统。工程中绝大多数机械系统一般为单自由度系统,如常见的内燃机、活塞式压缩机等。图 1-1-2(a) 所示的安装在混凝土地基上的机器,为了隔振,在基础下面装有弹性隔振垫。在隔振分析时,将机器与混凝土基础视为刚体,弹性地基视为弹簧阻尼器,系统的动力学模型可以简化为具有一个自由度的质量弹簧阻尼系统,如图 1-1-2(b) 所示。

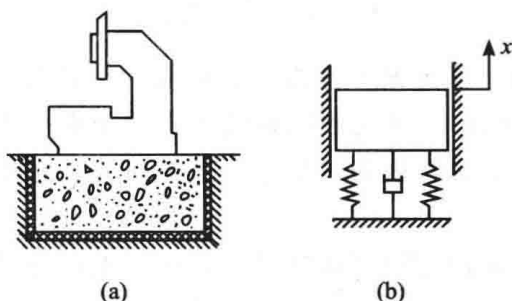


图 1-1-2 单自由度系统实例

当构件的弹性变形不能忽略时,若采用分布参数的连续模型,则机械系统变为连续系统;若采用集中参数的离散模型,则机械系统变为离散系统。研究图 1-1-3(a) 所示的两端固定杆的纵向振动,若采用连续模型,取杆的纵向作为  $x$  轴,每个截面位置对应的弹性位移为  $u(x, t)$ 。取杆的微元  $dx$  为研究对象,画出其受力图,根据牛顿第二定律,可得杆的微元  $dx$  的运动微分方程为

$$\rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = AE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx$$

式中,  $A$  为杆件的截面面积,  $E$  为材料的弹性模量,  $\rho$  为材料密度。令  $c^2 = E/\rho$ , 则上式可简化为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1-1-3)$$

式(1-1-3)称为波动方程。对于图1-1-3(a)所示杆件,其纵向振动除了满足式(1-1-3)的波动方程外,还必须满足下列边界条件:

$$u(0, t) = u(l, t) = 0 \quad (1-1-4)$$

式(1-1-3)和式(1-1-4)即为用连续模型描述的杆件纵向振动偏微分方程。

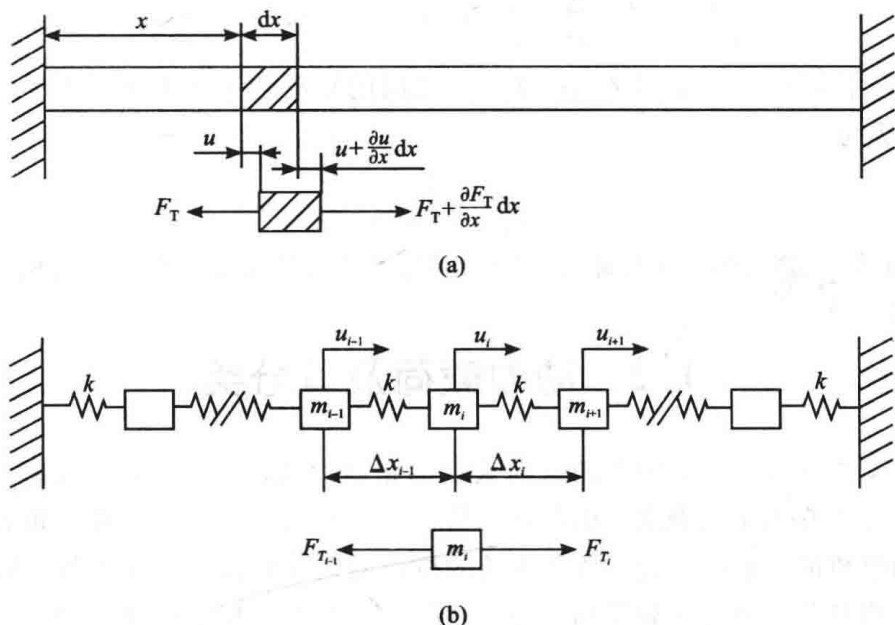


图 1-1-3 连续系统和离散系统实例

若采用离散模型研究杆件的纵向振动问题,首先将系统离散成  $n$  个自由度的质量弹簧系统,如图1-1-3(b)所示。取第  $i$  个质点  $m_i$  为研究对象,根据牛顿第二定律可得质点  $m_i$  在水平方向的运动方程为

$$\begin{cases} m_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = k(u_{i+1} - u_i) - k(u_i - u_{i-1}), & i = 2, 3, \dots, n-1 \\ m_1 \frac{d^2 u_1}{dt^2} = k(u_2 - u_1) - ku_1 \\ m_n \frac{d^2 u_n}{dt^2} = -ku_n - k(u_n - u_{n-1}) \end{cases} \quad (1-1-5)$$

式(1-1-5)即为杆的纵向振动为  $n$  个自由度的振动微分方程。

可以证明,式(1-1-5)与式(1-1-3)具有所谓的一致性,即当  $n \rightarrow +\infty$  时,式(1-1-5)的极限就是式(1-1-3)。

引入符号如下:

$$\begin{aligned} u_{i+1} - u_i &= \Delta u_i, & u_i - u_{i-1} &= \Delta u_{i-1} \\ k &= \frac{AE}{\Delta x_i}, & m_i &= \rho A \Delta x_i \end{aligned}$$

则微分方程(1-1-5)的第一式可以转化为

$$\rho A \Delta x_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = AE \frac{\Delta u_i}{\Delta x_i} - AE \frac{\Delta u_{i-1}}{\Delta x_i} \quad (1-1-6)$$

即

$$\rho A \Delta x_i \frac{d^2 u_i}{dt^2} = AE \Delta \left( \frac{\Delta u_i}{\Delta x_i} \right)$$

两边同除以  $\rho A \Delta x_i$  得

$$\frac{d^2 u_i}{dt^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\Delta}{\Delta x_i} \left( \frac{\Delta u_i}{\Delta x_i} \right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-1-7)$$

若式(1-1-7)中  $n \rightarrow +\infty$ , 即质点  $m_i$  与  $m_{i-1}$  之间的距离趋于无穷小, 亦即  $\Delta x_i \rightarrow 0$ , 则式(1-1-7)就成为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

其结果与式(1-1-3)一致。此即证明了同一问题离散系统模型与连续系统模型的一致性。

## 1.2 动力载荷及其分类

一般而言, 作用在机械系统上的载荷大多都是动力载荷。所谓动力载荷, 就是作用在机械系统上的力是随时间变化的, 引起运动构件的惯性力(矩)不能忽略。如活塞式压缩机的活塞力、内燃机的气缸爆发力、高速运转的机器的运动构件的惯性力等。根据动力载荷的确定性, 可将其分为确定性载荷和非确定性载荷两大类, 如图 1-2-1 所示。

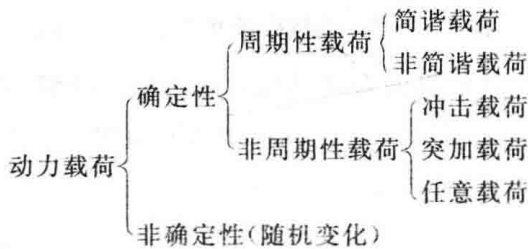


图 1-2-1 动力载荷的分类

所谓确定性动力载荷, 是指载荷随时间的变化是确定的, 不论动力载荷变化规律如何复杂, 下一时刻的值是可以预知的。非确定性动力载荷又叫随机性动力载荷, 即已知  $t$  时刻载荷值  $F(t)$ , 而  $t + \Delta t$  时刻载荷值  $F(t + \Delta t)$  不可以确定, 但服从一定的统计规律, 即动力载荷  $F(t)$  是一种随机过程。根据载荷随时间的变化规律, 确定性动力载荷又可以分为两类, 即周期性载荷和非周期性载荷。根据周期性动力载荷的变化特点以及对应采用的动力分析方法的不同, 周期性载荷又可分为简谐载荷(见图 1-2-2(a))和非简谐载荷(见图 1-2-2(b))。非周期性载荷又分为突加载荷(见图 1-2-2(c))、冲击载荷(见图 1-2-2(d))和任意载荷等(见图 1-2-2(e))。简谐载荷可以用正弦或余弦函数表示其变化规律, 非简谐载荷随时间作周期性变化, 是时间的周期函数, 但不能简单地用简谐函数来表示, 例如轴承内、外圈受到滚动体的作用力等。突加载荷一般是指作用载荷大小从 0 突加到某一数值后保持不变; 冲击载荷的幅值(大小)在很短时间内急剧增大或急剧减小, 例如发动机气缸气体的爆发力。任意载荷的幅值变化复杂, 一般难以用解析函数表示。随机性动力载荷  $F(t)$  实际上是一种随机过程, 其变化规律如图 1-2-2(f)所示。

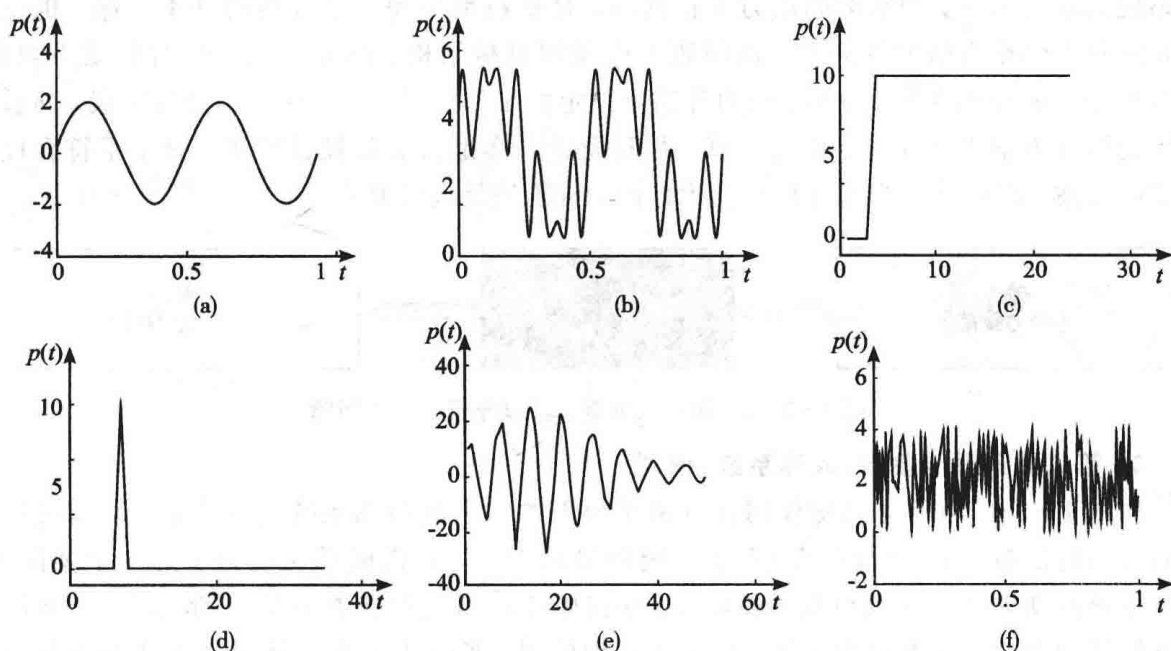


图 1-2-2 动力载荷的类型

动力载荷的上述分类,对于机械系统动力学分析方法的选择和零部件的疲劳强度计算方法的选择具有十分重要的指导意义。一般而言,确定性动力载荷作用的动力系统,其动力学分析采用确定性理论求解,而非确定性动力载荷作用的动力系统,其动力学分析采用随机过程的理论来求解。类似地,零部件疲劳强度计算,若其应力为对称循环变应力,则采用经典的疲劳强度计算方法。如零部件的应力为不稳定循环变应力,应采用损伤积累理论与经典的疲劳强度计算方法相结合的方法进行疲劳强度计算。而当零部件的应力随机变化时,其疲劳强度计算需采用随机理论、损伤积累理论与经典的疲劳强度计算方法相结合的方法来解决问题。

## 1.3 机械系统动力学的研究内容及任务和研究方法

### 1.3.1 机械系统动力学的研究内容及任务

一般地,机械系统受到力的作用并产生相应的周期性运动。机械系统动力学就是研究动力载荷作用下,机械系统动力特征和动力反应规律的科学。概括地说,机械系统动力学的研究内容和任务主要有机械系统的振动分析、机械系统动力响应分析和机械零部件动强度等。随着现代机械设备日益朝着高效率、高速度、大功率、高精度及高度自动化方向发展,而机械系统的结构却又朝着轻量化、轻巧化方向发展,机械系统动力学问题特别是考虑构件弹性变形的弹性动力学问题也日益突出。具体地说,机械系统动力学问题可以归纳为以下几个方面。

#### 1. 第一类问题:反应分析——正问题

如图 1-3-1 所示,已知机械系统的动力参数和作用在机械系统上的动力载荷,求机

机械系统的动力响应,即所谓的动力学正问题,是机械系统动力学分析的基本问题,也是机械系统动力学重点研究的问题。该问题可以预测机械结构、产品等在工作时的动力响应,使得其动力响应如变形、位移、应力等满足预定的工作要求。在机械产品设计阶段,通过对具体的设计方案进行动力学响应计算,判断设计方案是否满足设计要求,对于不符合设计要求的方案,提出修改措施并作出动力修改,直至满足设计要求。



图 1-3-1 第一类问题：反应分析——正问题

## 2. 第二类问题：参数(或称系统)识别

如图 1-3-2 所示,已知作用在机械系统上的动力载荷和系统的动力响应,求机械系统的动力特征参数,即所谓的动力学系统的参数识别,是机械系统动力学的一个逆问题。机械系统的动力特征参数与系统的输入、输出响应三者之间存在着特定的关系,涉及的机械系统其动力特征是客观存在的,但由于种种原因,难以用分析或测量的方法获得其全部的动力特征参数。此时,将系统视为未被认识的“黑箱”或未被完全认识的“灰箱”,通过分析系统输入和输出间的关系,并对系统模型作适当的假设,识别系统的动力特征参数。动力系统的动力参数识别方法常应用于动力系统的参数测定、机器故障诊断等领域中。



图 1-3-2 第二类问题：参数(或称系统)识别

## 3. 第三类问题：载荷识别

如图 1-3-3 所示,已知机械系统的动力特征参数和系统的动力响应,求作用在机械系统上的动力载荷,即所谓的载荷识别问题,这也是机械系统动力学的一个逆问题。



图 1-3-3 第三类问题：载荷识别

## 4. 第四类问题：控制问题

如图 1-3-4 所示,动力学控制系统是在动力系统中增加一个控制装置或控制系统,测定动力系统输出响应,并与目标响应相比较,得到动力系统响应的偏差,通过控制装置或控制系统反馈作用于动力系统,使得动力系统按照目标响应进行工作。动力学控制系统增加了控制装置或控制系统,相对比较复杂,动力学问题也很复杂,但机械系统动力学的基本理论和方法是解决此类问题的基础。

作为机械系统动力学课程,本书主要研究机械主传动系统动力响应分析问题,即动力学正问题。应用于机械主传动系统的常用机构有连杆机构、凸轮机构、齿轮机构、轴-轴承

系统等，它们是机械系统动力学研究的主要研究对象。动力学分析着重讨论考虑构件弹性变形时机械系统的动力学行为。

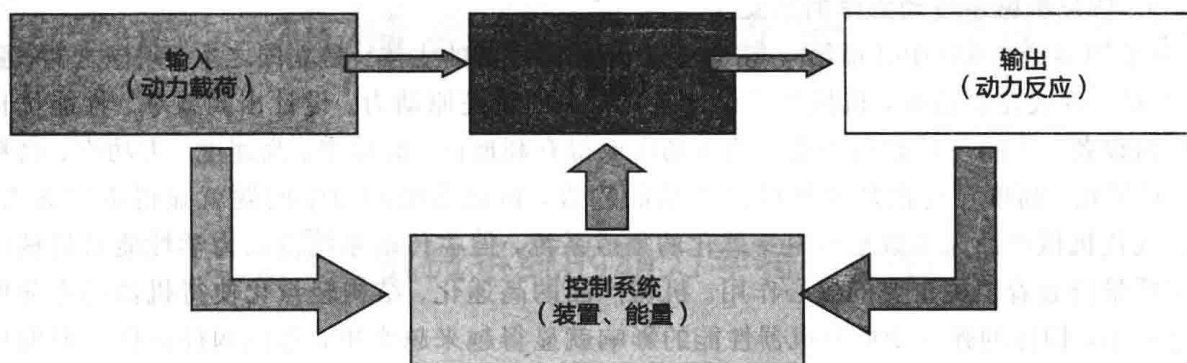


图 1-3-4 第四类问题：控制问题

### 1.3.2 机械系统动力学的研究方法

与研究一般的动力学问题类似，机械系统动力学的研究方法可分为两大类，即理论分析和试验研究。

#### 1. 理论分析

机械系统动力学问题求解的基本方法如图 1-3-5 所示。它是求解一般工程中的力学问题的一般方法，也是研究机械系统动力学问题的基本方法。对于待求解的工程问题(机械系统动力学问题)，首先要根据求解问题的需要进行简化，提炼出力学模型。工程问题的简化原则：针对问题，分清主次，忽略细节，追求“神似”。所谓“神似”，就是提炼的力学模型的力学本质与所求解的工程问题一致，求解精度符合工程要求。对于机械系统动力学问题，其力学模型就是以机械系统动力特征参数(动力系统的自由度、质量、刚度和阻尼系数等)表示的计算简图。根据力学模型可以建立机械系统动力学问题的数学模型，其力学原理主要有牛顿第二定律、达朗贝尔原理、动能定理、第二类拉格朗日方程等。机械系统动力学问题的数学模型一般为二阶微分方程(组)，其求解方法可分为解析法、半解析半数值法和数值法。随着计算机的普及和各种专业软件的应用推广，数值法已经成为求解机械系统动力学问题的主要方法。除了分析计算，机械工程师的另一个重要任务是对计算结果可行性作出正确评价，这样才能真正解决工程问题。

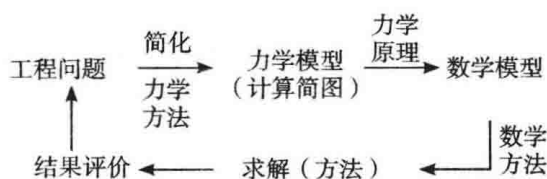


图 1-3-5 动力学分析的基本方法

#### 2. 试验研究

动力学试验研究包括模态实验、动力参数测量、模型试验、现场测试等，它是机械产品设计和运行使用过程中不可缺少的重要环节，也是机械系统动力学理论分析的重要补充。

一方面,理论分析的结果需要试验验证其正确性;另一方面,一些动力系统的动力特征参数如阻尼比需要试验测量方可获得。

### 3. 研究机械系统动力学的意义

《中国制造 2025》中开篇第一句“制造业是国民经济的主体,是立国之本、兴国之器、强国之基”。现代化制造业,机械产品设计是先导,创新是原动力。设计出高效率、性能优良的机械设备,才能在日益激烈竞争的市场中取得有利地位。高效率、高速度、大功率、高精度、轻量化、高度自动化是现代机械产品的趋势,机械系统动力学问题就显得更加突出。尽管现代机械产品大多数是机电一体化的集成系统,但主传动系统的动力学性能对机械产品的质量仍起着至关重要的核心作用。机械产品的高速化、结构轻量化使得机器的零部件尺寸减小,构件的弹性变形对机器性能的影响就显得越来越突出,考虑构件弹性变形的机械系统动力学分析的动态设计方法就显得十分必要。

对于精密机械,影响其精度的主要因素有运动副间隙、构件弹性变形、制造误差等。高速运转条件下的精密机械,其动态性能与静态时的性能存在十分显著的区别。进行动力学分析时必须考虑运动副间隙、构件弹性变形、制造误差等因素,方能准确地预测精密机械的性能。动态设计是精密机械设计的重要方法之一。

降低机器运转时的振动与噪声,长期以来一直是机械产品设计面临的重要问题之一。机器的振动与噪声分析与预测,必须从整个机械系统出发,采用动力学的基本理论和方法进行分析,方可找到解决问题的有效途径。如旋转机械惯性力平衡、减振与隔振技术、避开共振频率等方法都是以机械系统动力学理论为基础提出来的。

现代机械产品的另一个重要特点是机电产品的集成化、一体化,除了机械主传动系统外,控制系统也是其主要组成部分。这类机械产品设计必须要进行机械系统动力学及控制分析。尽管本书未涉及机械系统动力学及控制分析问题,但机械系统动力学理论是解决机械系统动力学及控制分析问题的基础。

长期以来,机械设计采用“静态设计,动态补救”的设计方法,从 20 世纪 80 年代开始,动态设计方法已经开始应用于国内工程设计中。现代计算机的普及和各种专业软件的广泛应用,特别是动力学仿真软件的流行,CAD 和 CAE 技术的日趋成熟,对机械系统进行动态分析与综合,计算与编程工作量和难度已大大下降。以机械系统动力学为理论基础的动态设计方法已经成为机械产品设计的必要手段。掌握机械系统动力学基本理论并学会一种动力学仿真软件的使用,已经成为现代机械工程师的基本技能。



# 第2章 机械系统运动微分方程的建立

## 2.1 机械系统的动力学特征参数

### 2.1.1 自由度

有关自由度的概念,我们并不陌生,在理论力学中,对于质点或质点系而言,所谓质点(系)的自由度,是指描述质点(系)位置的独立参数的数目或独立坐标的数目。与理论力学中质点(系)的动力自由度的定义类似,对于机械系统的动力自由度,可以定义为:描述机械系统运动构件位置的独立运动参数(或独立坐标)的数目。动力自由度是机械系统的一个非常重要的动力特性。

动力系统按自由度划分可分为单自由度系统、多自由度系统和连续系统。

#### 1. 单自由度系统

如图2-1-1(a)所示的典型的质量-弹簧-阻尼系统、图2-1-1(b)所示的四杆机构(当不考虑构件弹性时)均为单自由度系统。

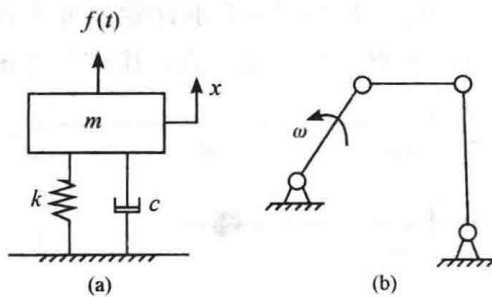


图2-1-1 单自由度系统

#### 2. 多自由度系统

如图2-1-2所示为多自由度串联质量弹簧系统,而图2-1-3所示为常见的两个自由度机械手的多刚体动力系统的计算简图。

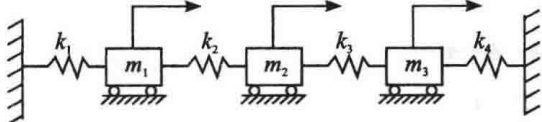


图2-1-2 多自由度串联质量弹簧系统

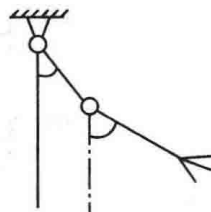


图2-1-3 两个自由度机械手的多刚体动力系统