



“十二五”普通高等教育规划教材

# 机械系统动力学

主编 贺利乐 副主编 郑建校

主审 段志善

J I X I E X I T O N G / D O N G L I X U E



国防工业出版社

National Defense Industry Press

“十二五”普通高等教育规划教材

# 机械系统动力学

主 编 贺利乐  
副主编 郑建校  
主 审 段志善

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书分机械振动基本理论篇和应用分析篇两篇共9章内容。

本书在阐述机械系统动力学分析的基本理论的基础上,讲述了机械系统动力学数值计算与仿真方面的应用等知识,并重点对几种典型的传动机构及振动机械的动力学进行了分析,介绍了设计计算以及实际应用中应注意的问题,此外,为便于读者加深理解和巩固所学内容,在各主要章节后附有习题。

本书可作为高等工科院校机械类专业的本科生教材,也可作为研究生参考教材,还可供从事机械振动领域研究和设计的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机械系统动力学/贺利乐主编.—北京:国防工业出版社,2014.9

“十二五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-118-09634-7

I. ①机... II. ①贺... III. ①机械工程—动力学—高等学校—教材 IV. ①TH113

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第199054号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$  字数 292千字

2014年9月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价30.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

本书是根据长期的教学、实践经验,结合当前学科技术研究水平发展的现状和趋势编写的。

本书在编写过程中,以机械系统动力学分析的基本理论为主线,将机械振动学与机械动力学的相关知识有机结合起来,理论联系实际,注重基本概念、基本原理及动力学分析方法的阐述,注重突出理论知识的实际应用,加强针对性和实用性,着重反映动力学分析的基本理论在机械工程中的应用技术。

全书分基本理论篇、应用分析篇共9章内容。本书在全面阐述机械系统动力学基本理论的基础上,重点对几种典型的传动机构及振动机械的动力学进行了分析,介绍了设计计算以及实际应用中应注意的问题,并结合实例讲述了 MATLAB 在机械系统动力学数值计算与仿真方面的应用等知识,以帮助读者尽快达到提高综合应用能力的目的。此外,为便于读者加深理解和巩固所学内容,在各主要章节后均附有典型习题。

本书由贺利乐任主编、郑建校任副主编。参加编写的有:郑建校(第1~4章),刘强(第5章),贺利乐(绪论、第6~8章),罗丹(第9章)。

中国振动工程学会振动利用专业委员会主任段志善教授认真地审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,特表示衷心的感谢。

此外,本书编写过程中,参考了相关书籍、文献资料中的有关内容,在此向各位作者一并表示感谢。

由于水平有限,加之时间短促,书中难免存在错误和不妥之处,敬请广大读者批评指正。

编者  
2014年8月

# 目 录

绪论 .....	1
0.1 机械系统动力学的研究内容 .....	1
0.2 机械系统动力学研究的问题及研究方法 .....	2
0.3 机械振动系统的类型及动力学模型 .....	3
0.4 建立机械系统动力学模型的方法 .....	6
0.5 机械动力学当量系统的转化和参数计算 .....	7
0.6 机械系统的数字仿真 .....	7
0.7 本书内容与章节安排 .....	9

## 第一篇 机械振动基本理论

第1章 单自由度系统的振动 .....	10
1.1 概述 .....	10
1.2 单自由度系统的自由振动 .....	11
1.3 单自由度系统的有阻尼振动 .....	15
1.4 单自由度系统的受迫振动 .....	18
1.5 拉普拉斯变换及应用用于求解任意激励的响应 .....	29
习题 .....	34
第2章 二自由度系统的振动 .....	36
2.1 二自由度系统的自由振动 .....	36
2.2 二自由度系统的受迫振动 .....	41
2.3 模态分析法 .....	46
习题 .....	49
第3章 多自由度系统的振动 .....	51
3.1 用影响系数法建立系统的运动方程 .....	51
3.2 确定系统固有频率与主振型的近似方法 .....	57
3.3 多自由度系统的模态分析 .....	69

习题 .....	75
<b>第4章 连续体的振动 .....</b>	<b>76</b>
4.1 弦的振动 .....	76
4.2 杆的纵向振动 .....	79
4.3 轴的扭转振动 .....	82
4.4 梁的横向振动 .....	85
习题 .....	95

## 第二篇 应用分析

<b>第5章 机械振动系统数字仿真 .....</b>	<b>96</b>
5.1 机械系统的数学模型 .....	96
5.2 传递函数形式机械系统数字仿真 .....	99
5.3 状态空间形式的机械系统数字仿真 .....	104
5.4 微分方程形式的机械系统数字仿真 .....	111
<b>第6章 典型传动机构的动力学分析 .....</b>	<b>121</b>
6.1 凸轮传动系统的动力学分析 .....	121
6.2 齿轮传动系统的动力学分析 .....	127
6.3 高速皮带传动系统的动力学分析 .....	130
6.4 起重机起升机构动力学分析 .....	135
<b>第7章 典型振动机械的动力学分析 .....</b>	<b>143</b>
7.1 双电机自同步振动给料机的动力学分析 .....	143
7.2 立式振动磨机的动力学分析 .....	146
7.3 振动压路机动力学模型的建立及分析 .....	153
<b>第8章 机械振动的控制技术 .....</b>	<b>158</b>
8.1 振源的振动控制 .....	158
8.2 隔振理论与技术 .....	160
8.3 减振技术 .....	169
8.4 振动的主动控制简介 .....	175
<b>第9章 机械振动的测试 .....</b>	<b>177</b>
9.1 激振器 .....	177

9.2 振动试验台 .....	182
9.3 振动测试传感器 .....	187
9.4 振动测试系统 .....	192
<b>参考文献</b> .....	<b>197</b>

# 绪 论

机械系统动力学是研究机械系统在力的作用下产生的运动和机械系统在运动中产生的力的科学,是机械学的一个重要分支,它建立在机械振动学科理论与具体机械结构、工况和性质分析的双重基础之上。

## 0.1 机械系统动力学的研究内容

机械系统动力学研究的对象被称作系统,它可以是一个零部件、一台机器或一个完整的工程结构等。通常,当一个系统受到外界激励(输入)等因素的作用时,系统会产生振动响应(输出),这三者之间的关系可以用图 0-1 来表示。

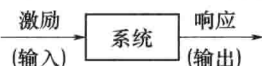


图 0-1 研究对象关系示意图

因此,机械系统动力学所研究的内容可以根据求解激励、系统和响应这三个环节中的任一环节归纳为三类。

### 1. 已知激励和系统,求响应

这类问题称为系统动力响应分析或响应预估。它是机械系统动力学的正问题,也是机械系统动力学的核心问题。

这类问题一般是借助于多种动态分析方法(如模态分析法、机械阻抗分析法、有限元分析法等)对系统的动态特性进行研究。

其主要任务是验算结构、产品等在工作时的动力响应(如变形、位移、应力等)是否满足预定的安全要求和其他性能要求。在产品的设计阶段,对具体的设计方案进行动力响应计算,若不符合要求再作修改,直到达到要求而最终确定设计方案,这一过程称为振动设计。

### 2. 已知激励和响应,求系统

这类问题称为系统识别。这里所谓“求系统”,主要是指获得所研究系统的物理参数(如质量、刚度及阻尼系数等)和系统关于振动的固有特性(如固有频率、主振型等)。

实际上处理这类问题时,待求的“系统”实物是现实存在的,由于种种原因,难以用分析的方法完善地建立力学模型和掌握它的振动固有特性。这时就把实际存在的系统仍然作为未被认识的“黑箱”或未被完全认识的“灰箱”,通过对它进行振动试验,记录输入/输出数据并作数据处理,反过来求出系统的物理参数和固有特性。

系统识别以估计物理参数为任务的叫做物理参数识别;以估计系统振动固有特性为任务的叫做模态参数识别或试验模态分析。

系统识别是振动的第一种逆问题,振动力学是它的基础理论和依据。



### 3. 已知系统和响应,求激励

这类问题可以称为载荷辨识问题或振动环境预测问题。它是机械系统动力学的第二类逆问题。这类问题首先进行第一类逆问题的计算和测试,求得结构参数,然后进行载荷识别,研究外界干扰力的水平和规律。

总之,机械系统动力学的分析过程及研究内容,按其任务之不同,可分为两类问题:

(1) 动力学反问题:已知机构的运动状态和工作阻力,计算输入转矩和各运动副反力,并获得其变化规律(即已知运动求力)。

(2) 动力学正问题:给定机器的输出转矩和工作阻力,研究机器的实际运动规律(即已知力求运动)。

由于动力学研究的复杂性,人们常常引入一些假设,使问题简化。随着生产实践的发展,对动力学分析的准确度提出了新的要求;而科学技术的发展,为动力学分析提供了新的理论基础和研究手段。因而,动力学研究发展的总趋向是:逐步地将各种人为的假设抛弃,逐渐使分析更接近客观实际情况。力学理论的发展、计算机技术和软件技术在设计领域的应用,为机械系统动力学研究提供了四种不同水平的分析方法:静力分析、动态静力分析、动力学分析、弹性动力分析。在前述三种分析方法中,构件均被假定为刚性的。随着机械向高速化方向发展,惯性力急剧增大,在这种情况下,构件的弹性变形对系统精度的影响越来越大。机械系统的柔度增加,使得系统固有频率下降;而机械运转速度的提高,使得激振频率上升。随着激振频率和固有频率的靠近,可能会发生较强的共振现象,从而既破坏机械的运动精度,又影响构件的疲劳强度,并引发噪声。在这种情况下,就必须计入构件的弹性变形,进行弹性动力分析。目前,对凸轮机构、连杆机构、齿轮机构和传动系统的动力学分析已发展到计入构件弹性影响的阶段。

## 0.2 机械系统动力学研究的问题及研究方法

机械系统动力学研究的问题大体可归纳为以下几个方面:

- (1) 确定系统的固有频率,进行共振分析,预防共振的发生。
- (2) 计算系统的动力响应,以确定机械或结构受到的动载荷或振动的能量水平。
- (3) 研究平衡、减振、隔振与降噪技术。
- (4) 研究自激振动及其他不稳定振动产生的原因,以便有效地加以控制。
- (5) 振动利用技术的研究。

为了简化问题,在具体研究时,常把机械系统看做具有理想、稳定约束的刚体系统来处理。对单自由度的机械系统,用等效力和等效质量的概念,可以把刚体系统的动力学问题转化为单个刚体的动力学问题;对多自由度机械系统动力学问题一般用拉格朗日方程求解。机械系统动力学方程常常是多参量非线性微分方程,只在特殊条件下可直接求解,一般情况下需要用数值方法迭代求解,大多机械动力学问题能够借助计算机和相应软件进行计算分析。

机械运动过程中,各构件之间相互作用力的大小和变化规律是设计运动副的结构、分析支撑和构件的承载能力以及选择合理润滑方法的依据。首先,求出机械实际运动规律,然后,计算出各构件的惯性力,最后,依据达朗贝尔原理,用静力学方法求出构件间的相互

作用力。

机械振动的分析是机械系统动力学的基本内容之一,随着机械运转速度的提高,机械系统动力学已成为分析和研究高速机构时不可缺少的内容。近代机械发展的一个显著的特点是:自动调节和控制装置日益成为机械不可缺少的组成部分。机械系统动力学的研究对象已扩展到包括不同特征的动力机械和控制调节装置在内的整个机械系统,控制理论已渗入到机械动力学的研究领域。在高速、精密机械设计中,为了保证机械的精确度和稳定性,构件的弹性效应已成为设计中不可忽视的因素。各种模拟理论和方法以及运动和运动参数的测试方法,已成为机械系统动力学研究的重要手段。

总而言之,机械系统动力学的研究方法可分为两大类,即动态分析和动态实验。

### 1. 动态分析

(1) 对于机械系统动力学正问题,动态分析一般借助于多种动态分析方法(如模态分析法、模态综合法、机械阻尼分析法、四端参数法及有限元法等),建立结构或系统的数学模型,将系统的输入和输出联系起来,对结构的动态特性进行分析。

(2) 对于机械系统动力学逆问题,动态分析首先进行动态实验,在此基础上根据一定的准则建立结构或系统的数学模型,然后应用参数辨识的方法或系统辨识的方法进行分析。

### 2. 动态实验

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,而且也可为建立可靠的动态分析数学模型提供必要的数据库。

## 0.3 机械振动系统的类型及动力学模型

机械系统之所以会产生振动是因为它本身具有惯性和弹性。从能量的观点看,惯性是系统保持动能的特性,而弹性则是系统储存势能的特性。此外,一个实际的机械系统在振动时总要耗散能量,将所有耗散振动能量的因素归结为一种特性,即阻尼。当外界对系统做功时,系统的惯性就吸收动能,使质量获得速度,弹簧就获得变形能,具备了使质量回到原来状态的能力。这种能量的不断转换就导致了系统质量围绕平衡位置的往复振动。系统如果没有外界不断地输入能量,由于阻尼的存在,振动现象将逐渐消失。

因此,惯性、弹性和阻尼是机械振动系统的三要素。

### 0.3.1 振动系统的系统类型

#### 1. 离散系统和连续系统

任何机器、结构或它们的零部件都具有弹性与质量。当机械各构件的弹性变形很小,可以忽略不计时,可以认为系统是由刚体构件组成的;当构件的弹性变形不能忽略时,机械系统的动力学模型可以分为离散系统(或称集中参数系统)和连续系统(或称分布参数系统)两大类。

##### 1) 离散系统

离散系统是由集中参数元件组成的,基本的集中参数有三种,即质量、弹簧和阻尼器。

例如,图 0-2 所示的安装在混凝土基础上的精密机器,为了隔振,在基础下面一般装有弹性衬垫。

在对图 0-2 所示的系统进行振动分析时,可以从质量、弹簧和阻尼器三个方面考虑:  
① 把机器与基础看做一个刚体,起着质量的作用且具有惯性;② 弹性衬垫起着弹簧的作用;③ 衬垫的内摩擦以及基础与周围约束之间的摩擦起着阻尼的作用。

通过上述分析,可将图 0-2 简化成图 0-3 所示的离散系统(或称集中参数系统)。

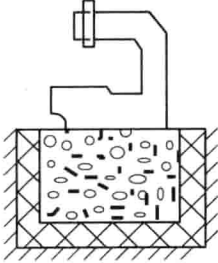


图 0-2 机器及其安装基础示意图

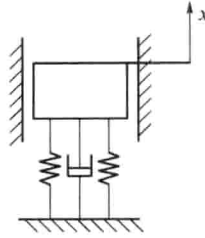


图 0-3 机器的离散系统模型示意图

## 2) 连续系统

连续系统是由弹性元件组成的,典型的弹性元件有杆、梁、轴、板、壳等。弹性体的质量、弹性和阻尼实际上是连续分布的,故也称为分布参数系统,此类系统的运动在数学上是用偏微分方程来描述的。

机械系统中有不少问题需要简化为连续系统的模型。例如,涡轮盘可简化为变厚度的圆板,涡轮叶片简化为变截面的梁或壳,装载机工作装置系统可简化为平面连杆机构等。

值得说明的是,离散系统和连续系统在形式上是代表不同类型的系统,似乎它们具有不同的动态特性,但事实上恰恰相反,因为离散系统和连续系统只不过是表示同一物理系统的两个数学模型而已,实质上它们具有类似的动力学性态,存在着本质上的内在联系。

在工程实际应用中,许多连续系统的问题,尤其是复杂的连续系统总可以离散化进行近似计算。

## 2. 线性系统和非线性系统

### 1) 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,则该系统称为线性系统。

当机械系统的质量不随运动学参数(如坐标、速度和加速度等)变化,并且系统的弹性力与阻尼力都可以简化为线性模型时,则该系统通常为线性系统。线性系统的一个重要特征就是能够应用叠加原理。叠加原理指出:对于同时作用于系统的两个或多个不同的输入(或称激励函数),所产生的输出(或称响应)是这两个或多个输入单独作用产生的响应之和。在实际情况下,严格的线性系统是不存在的,但在许多情况下,只要位移不大,按照线性弹簧与线性阻尼的假设所得到的结论是具有足够的准确性,有较大的实用价值。

### 2) 非线性系统

凡是不能简化为线性系统的动力系统都称为非线性系统。它的数学模型是由非线性微分方程来表示的。

求解非线性系统的问题大多十分复杂,通常不可能求出封闭解。因此,在工程实际中总是尽量地将非线性系统在给定条件附近线性化,近似地用线性数学模型来代替。这样,许多只适用于线性系统的方法都可以应用。

### 0.3.2 机械系统动力学模型

机械系统动力学研究需要建立在简洁、可靠的模型基础上。分析和研究一个实际机械系统,首先要建立一个描述该系统输入与输出之间定量关系的数学表达式,简称数学模型。这种定量关系的模型,实质上是该机械系统本身的固有特性(惯性、弹性、阻尼特性等因素)决定的。因此,系统的数学模型也可以说成是描述系统动态特性的数学表达式。

一个完整系统的力学模型不但与实际机器的结构有关,而且与所研究问题的内容有关。因此,根据需解决的问题和所要求的精度不同,即使对同一个实际系统,也可建立不同的力学模型。图 0-4(a) 表示桥式起重机示意图,图 0-4(b) 表示当货物离地提升时,桥式起重机桥架及滑轮组系统的力学模型。其中  $m_1$  是货物的质量,  $k_1$  是滑轮组的刚度,而  $m_2$  是桥架在中部的等效质量与小车质量之和。实践证明,若研究的桥架跨中和绳索的动力响应,则图 0-4(b) 所示的二自由度系统是合适的。若研究的是桥式起重机小车碰撞缓冲器的动力过程,则力学模型应为图 0-4(c),这是一个单自由度系统。

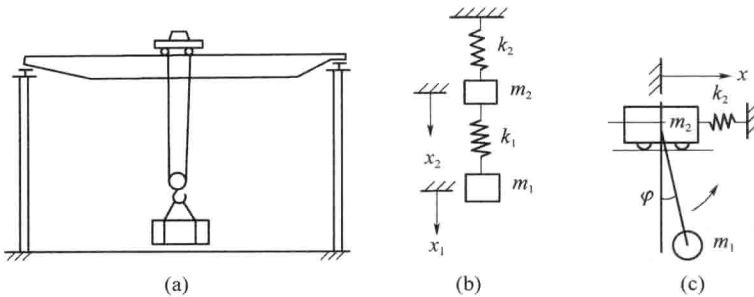


图 0-4 桥式起重机及其力学模型

但在研究连续系统的振动时,由于连续系统具有无限多的自由度,因此,应明确建立连续系统振动理论的前提是假设材料是均匀连续和各向同性的,并在弹性范围内服从胡克定律。另外,连续系统的偏微分振动方程只在一些比较简单特殊情况下才能求得解析解,例如均匀的弦、杆、轴和梁等不复杂的振动问题。但实际问题往往是复杂的,并不能归结为这些简单的情形,因而,在建立模型时,通常需要将复杂结构离散化成有限自由度系统进行计算。

因此,根据实际系统的复杂程度和所采用的方法,动力学模型可分为以下三类:

- (1) 集中参数模型。由惯性元件、弹性元件和阻尼元件等离散元件组成。
- (2) 有限单元模型。由有限个离散单元所组成,每一个单元是连续的。
- (3) 连续弹性体模型。将实际结构简化为质量和刚度均匀分布或按简单规律分布的弹性体。

上述前两种模型属于离散系统,其自由度是有限的,而第三种模型属于连续系统。

## 0.4 建立机械系统动力学模型的方法

### 1. 机械系统动力学理论建模

如果对系统的内部结构、尺寸、材料的性能参数(如质量、刚度、阻尼等)、连接条件和约束条件均有详尽而又足够的了解,则可利用近代结构动力学或其他力学的理论和方法,按照系统结构的设计图,建立系统的数学模型,这就是动力学理论建模。

当系统的力学模型建立之后,首要任务是正确地确定描述系统运动的动力学方程。对于单自由度、二自由度或某些简单类型的多自由度问题,可以使用牛顿定律、达朗贝尔原理、动量定理或动量矩定理来建立振动微分方程或方程组。对于一般的多自由度系统,往往应用分析力学的方法;另一方面,应用达朗贝尔原理将静力学中的虚位移原理推广到动力学问题中去,从而建立动力学普遍方程式,可以推导出可广泛应用的拉格朗日(Lagrange)方程来建立系统的运动方程。

拉格朗日方程是机械系统动力学建模的理论基础,基于拉格朗日方程的动力学建模则是机械系统理论的主要方法。有限元建模方法本质上也是一种系统动力学理论建模方法,由于该方法本身具有相对独立性,因而,此处不具体阐述。

### 2. 机械系统动力学试验建模

如果对系统的内部结构及其特性不能确定,在这种情况下,也可通过激振试验,直接测量系统的输入与输出,然后采用系统参数识别等理论与方法,建立该系统的数学模型,这就是系统动力学实验建模方法。

机械系统动力学试验建模的目的主要有:

(1) 提供材料(如黏弹性材料和复合材料)和元件(如轮胎、减振器、隔振垫)的刚度和阻尼特性。

(2) 验证系统动力学理论计算的动力特性,包括动态响应、原点、跨点导纳和振动分析中系统或部件的振动模态参数。

(3) 确定系统中一些难以由动力学理论分析得到的复杂因素,如系统和部件的非线性、系统时滞、系统阻尼、磁悬浮轴承刚度、约束和支撑处的间隙、摩擦等。随着控制速度的提高,时滞已成为影响控制系统稳定性和性能的重要因素,必须在建模中予以考虑。从含测量噪声的数据中辨识系统时滞,特别是多个时滞,是具有相当难度的技术问题。采用简单的数学关系来逼近,精度不够;而高精度模型又很难用于后继动力学分析。

因此,有时必须采用动力学试验建模的方法来确定上述复杂因素,把试验建模得到的结果与系统动力学理论建模的结果进行综合比较,才能减小系统建模误差。

### 3. 机械系统动力学联合建模

工程实际中的机械系统动力学分析问题大多出现这样一种情况,即对系统的内部结构与性能仅有部分了解和认识,其数学模型可以或已经被导出,但模型中的某些参数尚有待于采用其他方法来确定,这时就需要综合使用动力学理论建模和试验建模(即系统动力学联合建模方法)来解决问题。

机械系统动力学建模的上述两种基本方法,即动力学理论建模与试验建模,各有优、缺点。在分析和研究工程中的机械系统分析问题时,欲建立某一实际机械系统

的数学模型,如单纯地采用一种方法,有时难以有效而又方便地确定所需要的全部参数。也就是说,一个实际机械系统的建模,这两种基本方法常常需要相互补充、相互修正。

## 0.5 机械动力学当量系统的转化和参数计算

在对一个实际机械系统建立动力学模型时,还要考虑机械系统的动力特性,即质量和刚度的分布。

### 1. 当量系统转化的方法

在研究机械系统的动力学运动规律时,应把多种多样的实际机械系统用一个“相当”的系统来代替,但代替后的系统要确保与原系统运动参数的物理量产生同等效应,这种代替的“相当”系统就叫做“当量系统”,或称“等效系统”,表示这个简化的当量系统的图形即为动力学模型。需要强调的是,建立这种当量系统时,必须把实际运动系统的有关参数进行当量转换,把一个复杂的机械系统简化成一个简单、易于计算的抽象模型。这样,才能依据外载荷变化特性求解弹性系统的变形与动载荷,进而进行零部件的强度设计和疲劳计算。

不论是简单的或是复杂的机械系统,其简化后的当量系统中物理量主要有四个,即质量(或转动惯量)、刚度、作用力(或力矩)、阻力。那么,如何对这四个物理量进行转化计算便是一个非常重要的问题。

### 2. 当量系统参数计算原则

实际的机械系统根据其运动的形式可以分成三类:直线运动,旋转运动,直线运动和旋转运动同时存在的复合运动。所以,当换算时也可以根据需要,将系统按上述三种形式换算。换算力(力矩)、换算质量(转动惯量)和换算刚度系数也可分别称为等效力(力矩)、等效质量(转动惯量)和等效刚度系数。

根据功能守恒原理,进行实际系统向当量系统的转化计算。

(1) 质量(或转动惯量)与刚度在振动过程中分别产生动能与积蓄势能,故必须使质量(或转动惯量)和刚度在转化前后振动过程中所产生的动能与势能保持不变,即

$$\begin{cases} T_{\text{当量系统的动能}} = T_{\text{实际系统的动能}} \\ W_{\text{当,势}} = W_{\text{实,势}} \end{cases}$$

(2) 作用力及阻力在振动系统中做正功与负功,这些力在当量系统中所做的功必须保持不变,即

$$\begin{cases} A_{\text{当,力}} = A_{\text{实,力}} \\ A_{\text{当,阻力}} = A_{\text{实,阻力}} \end{cases}$$

为方便起见,可以用单位时间内所做的功(即功率)来进行计算。对于大多数的机器来说,其机构均是单自由度的系统,在这种情况下可能位移和实际位移的方向是相同的。因此,对做直线运动的系统,任意一个作用力  $F_j$  的功率  $N_j$  可以表示为

$$N_j = F_j v_j \cos \alpha_j$$

式中  $v_j$ —— $F_j$  力作用点的速度；  
 $\alpha_j$ —— $F_j$  力和  $v_j$  速度方向之间的夹角。

同样,对做旋转运动的系统,任意一个扭矩  $M_j$  的功率  $N_j$  也可以表示为

$$N_j = M_j w_j$$

式中  $w_j$ ——相应构件的角速度。

如果用  $F_D$  表示换算力,  $v_D$  表示换算中心或换算构件的速度;  $M_D$  表示换算扭矩,  $w_D$  表示换算构件的角速度。分别可以表示如下:

$$F_D = \sum_{j=1}^n F_j \frac{1}{i_j}$$

$$M_D = \sum_{j=1}^n M_j \frac{1}{i_j}$$

式中  $i_j$ ——传动速比,  $i_j = \frac{v_D}{v}$  或  $i_j = \frac{w_D}{w}$ 。

对于做复合运动的系统也可以根据需要而定,换算成做直线运动的系统或作旋转运动的系统:

$$F_D = \sum_{j=1}^n F_j \frac{v_j \cos \alpha_j}{v_D} + \sum_{j=1}^n M_j \frac{w_j}{v_D}$$

$$M_D = \sum_{j=1}^n F_j \frac{v_j \cos \alpha_j}{w_D} + \sum_{j=1}^n M_j \frac{w_j}{w_D}$$

因为引入摩擦力后在计算上会造成很大的困难,所以往往用机构的传动效率  $\eta$  来考虑摩擦力的影响。传动效率  $\eta$  的值可以参照实际机器的数值选用。

## 0.6 机械系统的数字仿真

从上述分析知,一个机械系统的动态特性通常可以用一组数学表达式来描述,如微分方程、传递函数或者状态方程。描述这个机械系统的数学表达式又称为系统的数学模型。要研究和分析一个连续的机械系统,首先要建立该系统的数学模型;然后对数学模型求解、仿真,从而分析和研究系统的性能是否满足所要求的指标。

仿真是根据被研究系统的真实系统的数学模型来研究系统性能的一门学科,现在尤指用计算机去研究数学模型行为的方法。计算机仿真又称数字仿真,它是一门利用计算机软件模拟实际环境进行科学实验的技术。数字仿真的基本内容包括系统、模型、算法、计算机程序设计与仿真结果显示、分析与验证等环节。通常情况下,数字仿真实验包括三个基本要素,即实际系统、数学模型与计算机。联系这三个基本要素有如下三个基本活动,即模型建立、仿真实验与结果分析。

数字仿真软件是一类面向仿真用途的专用软件,它的特点是面向问题、面向用户。机械系统动力学的各个分支领域,在运用计算机方面取得了丰硕的成果,如 *MATLAB*、*ADAMS*、*ANSYS*、*Pro/E* 和 *UG* 等大型仿真软件得到了广泛的应用。



## 0.7 本书内容与章节安排

机械系统动力学的发展有赖于专业机械与机械振动学的有机结合,这是一个有着广阔前景的学术领域。作为教材,本着强调理论知识,注重实际应用和理论联系实际的原则,本书着重讲述机械系统动力学的基本概念及其物理含义,阐述机械系统动力学分析的基本方法及其原理,并结合工程实际应用给出必要的计算和实例分析,以便读者能深刻理解并能学以致用。

全书共二篇9章,分成基本理论篇和应用分析篇。

基本理论篇(第1~4章)主要从机械系统动力学的观点出发介绍机械系统振动方面的基本理论。包括单自由度系统的振动、二自由度系统的振动、多自由度系统的振动和连续体的振动。主要阐述这些振动系统的振动特征、数学模型的建立以及进行动力学分析的方法等。上述振动理论和技术应用研究比较成熟,因此在工程应用中占主导地位,也是全书的理论基础。

应用分析篇(第5~9章)在学习机械系统动力学的基本理论的基础上,结合实例讲述 MATLAB 在机械系统动力学数值计算与仿真方面的应用,重点对几种典型的传动机构及工程机械的动力学进行分析,并介绍机械系统振动控制及振动测试等知识,以帮助读者尽快学以致用、提高综合应用能力。



# 第一篇 机械振动基本理论

振动是日常生活和工程实际中普遍存在的一种现象,也是整个力学中最重要的研究领域。机械振动是现代许多科学技术领域的基础理论。所谓机械振动是指在平衡位置(或平均位置)附近来回往复的运动。这时,表示物体运动特征的某些物理量(如位移、速度、加速度等)将时而增大、时而减小地反复变化。振动在多数情况下对机械是有害处的。它使机械或机构产生载荷,出现疲劳迫害以及环境噪声等。但是另一方面,人们也可以利用机械振动原理制成各种振动机械,完成有益的工作。因此,研究和掌握机械振动的规律,使人们能更好地利用振动有益的一面,而减少有害的一面。

本篇介绍机械振动的基本理论,包括单自由度系统的振动、二自由度系统的振动、多自由度系统的振动和连续体的振动。

## 第 1 章 单自由度系统的振动

### 1.1 概 述

所谓单自由度振动系统,是指用一个独立参变量便可确定系统位置的振动系统。单自由度系统的振动理论是整个振动理论的理论基础。要掌握多自由度系统振动的基本规律,就必须掌握单自由度系统的振动理论。振动系统有三个基本要素,即振动质量、弹簧刚度和阻尼系数,有时在振动系统上还持续作用有一个激励。

在许多工程技术上许多具体的振动系统在一定条件下,也可以转化为单自由度振动系统来研究。例如对图 1-1 所示悬臂镗杆,如果忽略这些零部件中的镗杆的质量,而只考虑它们的弹性,就可以将镗杆视为只有弹性而无惯性的弹簧;同样,也忽略那些支撑在弹性元件上的镗刀头的弹性,而只考虑它们的惯性,则就可将镗刀头看做为集中质点。因此,可将上述实际系统近似地转化为如图 1-2 所示的单自由度线性振动系统的动力模型。由于在实际的振动系统中必然存在各种阻尼,故模型中用一个阻尼器表示。

所有单自由度振动系统经过简化都可以抽象成单振子,其方法是将系统中全部起作用的质量都认为集中到质点上,这个质点的质量成为当量质量,所用弹性都集中到弹簧中,此弹簧的刚度称为当量弹簧刚度。