机械系统动力学建模与仿真

杨国来 郭锐 葛建立 编著

国防工业出版社
National Defense Industry Press

机械系统动力学建模与仿真

杨国来　郭　锐　葛建立　编著

国防工業出版社
·北京·

内容简介

本书共分7章。第1章介绍了机械系统的基本概念、机械系统数学模型及其分类、机械系统动力学的研究任务和迫切性等；第2、3、4章对机械振动的基本知识进行了阐述，包括单自由度振动系统、两自由度振动系统和多自由度振动系统的基本理论和建模方法；第5章讲述了弹性体振动；第6章介绍了多刚体系统动力学建模理论和方法；第7章对机械振动试验和多刚体系统动力学仿真试验进行了介绍。

本书是在多年从事机械系统动力学、机械振动、多体系统动力学、武器虚拟样机技术等教学和科研实践的基础上，根据机械类专业本科生教学需要，编著而成书。本书可作为机械类专业本科生高年级教材，总学时计划48学时左右，也可供从事机械动态设计的科技人员作参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械系统动力学建模与仿真/杨国来，郭锐，葛建立编著.
—北京：国防工业出版社，2015.10
ISBN 978-7-118-10446-2

Ⅰ.①机… Ⅱ.①杨… ②郭… ③葛… Ⅲ.①机械动力学—系统建模②机械动力学—系统仿真 Ⅳ.①TH113

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第241851号

※

国防工業出版社 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** 13½ **字数** 333千字
2015年10月第1版第1次印刷 **印数** 1—3000册 **定价** 29.50元

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

随着工业和科学技术的不断发展,各部门迫切需要大量高效率、高速度、高精度和高度自动化的机械和技术装备,这对机械产品的动态性能提出了越来越高的要求,因此机械系统动力学的研究日益受到重视。

目前,国内许多高校的机械类专业已经开设了“机械系统动力学”课程,并作为重点课程来建设,但已有的教材和著作尚不能充分适应机械类专业本科生教学的需要,尤其缺乏将机械系统动力学理论与计算机建模仿真方法有机结合起来的教科书。因此,作者在多年从事机械系统动力学、机械振动、多体系统动力学、武器虚拟样机技术等教学和科研实践的基础上,根据机械类专业本科生教学需要,编著了本书。

本书共分 7 章。

第 1 章介绍了机械系统的基本概念、机械系统数学模型及其分类、机械系统动力学的研究任务和迫切性等。

第 2、3、4 章对机械振动的基本知识进行了阐述,包括单自由度振动系统、两自由度振动系统和多自由度振动系统的基本理论和建模方法,重点讨论固有振动频率和振型的基本概念和工程求解方法。

第 5 章讲述了弹性体振动,主要介绍杆的纵向振动、轴的扭转振动和梁的横向振动,并对变截面梁和矩形薄板的振动理论和有限元建模方法进行了初步介绍。

第 6 章简明扼要地介绍多刚体系统动力学建模理论和方法,以 ADAMS 软件为建模平台,结合工程实例,给出了机械系统动力学建模和仿真的基本方法和一般流程。

第 7 章对机械振动试验和多刚体系统动力学仿真试验进行了介绍。

本书可作为机械类专业本科生高年级教材,总学时计划 48 学时左右,也可供从事机械动态设计的科技人员作参考。

本书第 1、6 章和第 2、4 章(部分)由南京理工大学杨国来教授编写,第 3 章和第 2、4 章(部分)由南京理工大学郭锐副教授编写,第 5、7 章由南京理工大学葛建立副教授编写,全书由杨国来教授统稿。由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作　者

2015 年 6 月

目　录

第1章 绪论

动力学(Dynamics)是研究系统状态变化规律的学科,机械系统动力学建模与仿真(Dynamics Modeling and Simulation for Mechanical Systems)是机械学的一个重要分支,是一门基于牛顿力学和计算机仿真技术,研究机械系统宏观动态行为的学科。该学科的研究对象包括几乎所有具有机械功能的系统,其研究范围涵盖了这类系统的建模与仿真、动力学分析与设计、动力学控制、运行状态监测和故障诊断等。该学科的主要任务是采用尽可能低的代价使产品在设计、研制、运行各阶段具有最佳的动力学品质。

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,使得动力学问题更加突出,极大地促进了复杂机械系统动力学建模与仿真、动力学分析与设计、动力学控制、状态监测和故障诊断等方面的发展;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。

近年来,随着信息科学和非线性科学的发展,机械系统动力学建模与仿真的研究内涵更加深入,其特征是:在系统的建模阶段计入各种重要而又复杂的非线性因素、柔性因素、边界与结合部效应,应用非线性动力学分析与仿真技术研究系统的大范围动力学特性,基于对机械系统动力学的深刻理解和采用最新的优化方法实现系统的动力学设计,对系统实施各种主动控制乃至智能控制来获得所需的运动,在研究机电一体化的受控系统时考虑动力学和控制的相互耦合问题,采用各种最新的信息提取和分析方法诊断系统的故障等。

1.1 机械系统的概念

1.1.1 系统

现代的工程问题不仅要对系统进行动态特性的分析,而且还需要对系统进行综合,即将所要研究和处理的对象当作一个系统,看其中元素和元素之间的关联,并从整体的角度协调好这种关联,使这个系统在所要求的某种性能指标下达到最佳状态,这正是系统论的基本思想。从系统论的观点看,系统(System)是一组相互关联、相互制约、相互影响的元素组成的整体,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。系统的概念不仅适用于物理系统，而且可以推广到任何动态现象，包括自然系统（如太阳系统、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。

在系统分析中，常采用“系统”和“信号”等概念来描述工程问题。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”的物理变量。当把系统看作是相互连接的元件的整体时，显然每一个元件都有一个或几个其他元件流入的信号，并有一个或几个由它流向其他元件的信号。前者称为输入，而后者称为输出。当研究一个系统时，总是将其在一定输入条件下具有什么输出（响应）相联系，也就是要研究动态系统。

1.1.2 机械系统

本书所要研究的是由机械元件组成的机械系统（Mechanical System），一般由动力装置、传动装置、执行机构、操控系统和支承部分等组成（图 1.1），它常与电气系统、液压系统相结合组成某一技术装备。除机械设备外，即使一些电气设备及其他装置的执行机构，也常是由机械系统组成的。机械系统的大小可因所研究的任务而有所不同：由构件经运动副连接组成的机构，如凸轮机构、曲柄连杆机构、齿轮传动箱等；由原动机、传动机构和执行机构组成的机器，如牛头刨床、冲压机等；由机械和控制元件组成的整机，如机器人、数控机床等，它们均可称为机械系统。

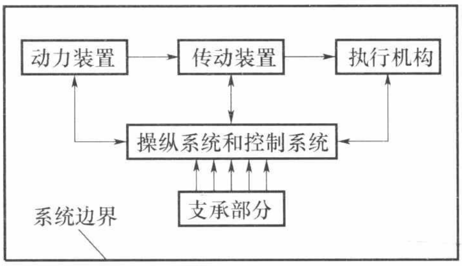

图 1.1　机械系统的一般组成

在工程应用中，需要从系统的角度对机械设备进行设计与分析，例如研究齿轮传动箱时，需要综合考虑齿轮传动箱内部各元件如齿轮、轴、轴承等的协调配合，不得出现卡死、干涉等现象，这样才能保证齿轮传动箱实现其自身功能，发挥其作用与任务。除了系统中各个元件协调工作外，系统与系统之间也必须协调工作，配合默契，并且还要考虑环境因素（系统边界条件）的影响，才能完成机械分配给系统的任务。

1.1.3 机械系统的数学模型

分析任何一种动态系统，都应首先建立它的数学模型（Mathematical Model），建立一个合理的数学模型是分析过程的关键。

模型是为研究系统而构造的用来收集有关信息的替代物，利用这些信息预测系统的性能或运动状态进行设计或控制。机械系统的数学模型是指对机械系统动态特性的数学描述，通常机械系统的数学模型是用微分方程来描述的。

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；也可以根据描述系统的微分方程是否为线性的，分为线性系统和非线性系统；有时也根据其数学模型的确定性、随机性和模糊性进行分类。

1.2 离散系统和连续系统

机械系统动力学是借助于模型进行研究的。模型是将实际事物抽象化而得到的。例如质点、刚体、梁、板、壳、弹簧、质量系统等都是抽象化的模型。抽象化的方法并不是脱离实际，而是为了抓住事物的主要因素，忽略次要因素，在一定的条件下更能深刻地反映客观实际。

任何机器、结构或它们的零部件都具有弹性和质量。若机械各构件的弹性变形很小,以致可以忽略不计,则可近似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,则机械系统的动力学模型可分为离散系统(Discrete Systems),或称集中参数系统(Lumped Parameter Systems)和连续系统(Continuous Systems),或称分布参数系统(Distributed Parameter Systems)两大类。

1.2.1 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3种,即质量、弹簧与阻尼器。例如图1.2(a)所示的安装在混凝土基础上的精密仪器或机床,为了隔振,在基础下面一般装有弹性衬垫。在隔振分析中需要考察机器与基础的整体振动,这时机器与基础可视为一个刚体,起着质量的作用,具有惯性。弹性衬垫起着弹簧的作用,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,因而这一系统可以简化成图1.2(b)所示的弹簧—质量系统。离散系统的运动在数学上用常微分方程来描述,例如图1.2所示系统的数学模型为

$$m\ddot{x} + kx + c\dot{x} = F(t) \tag{1.1}$$

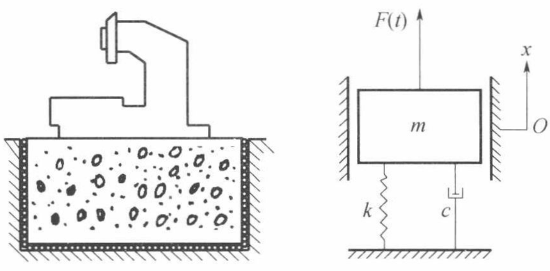

图1.2 离散系统实例一

如图1.3(a)所示的简支梁,其质量为m,研究其某点的横向振动位移v,则可简化为图1.3(b)所示的弹簧—质量系统,若不考虑外力作用和阻尼,则该点振动的数学模型为

$$m\ddot{v} + kv = 0 \tag{1.2}$$

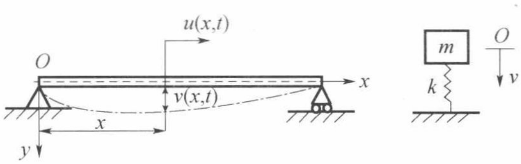

图1.3 离散系统实例二

1.2.2 连续系统

连续系统是由弹性元件(Elastic Elements)组成的。典型的弹性元件有杆、梁、轴、板、壳等。弹性体的惯性、弹性和阻尼实际上是连续分布的,也称为分布参数系统。机械系统中有不少问题需要简化为连续系统的模型。例如,涡轮盘简化为变厚度的圆板,涡轮叶片简化为变截面的梁或壳,等等。以图1.3(a)所示的简支梁为例,研究梁上任意点的纵向变形和横向变形,由于这些变形既是空间坐标x的函数,又随时间变量t发生变化,分别记为$u(x,t)$和$v(x,t)$,

因此反映这些变量变化的数学模型一般用偏微分方程来描述。

在工程实际应用中，许多连续系统的问题，不可能求出封闭形式的精确解，只能求出近似解，例如非均匀杆等复杂结构，总是把连续系统离散化，然后再集中为离散系统进行计算。

1.2.3 离散系统和连续系统的辩证统一

离散系统和连续系统的数学模型分别用常微分方程和偏微分方程来表征，似乎它们具有不同的动态特性，事实上这两种模型是辩证统一的，这里用杆的纵向振动模型来说明离散系统模型和连续系统模型之间的内在联系。

如图 1.4 所示，一等截面杆两端固定，设杆的长度为 l，截面积为 A，杆的弹性模量为 E，密度为 ρ，现研究其纵向振动（变形）方程。建立坐标系 Ox，其中 O 为杆的左端中心，x 轴为杆的纵向对称轴，向右为正。杆 x 处的纵向变形为 $u(x,t)$，应变为 $\varepsilon(x,t)$，张力为 $F_T(x,t)$。取长度为 $\mathrm{d}x$ 的微元为研究对象，则微元右端的变形和张力分别为 $u(x,t)+\partial u/\partial x\mathrm{d}x$ 和 $F_T(x,t)+\partial F_T/\partial x\mathrm{d}x$。

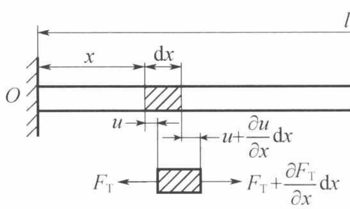

图 1.4 杆的纵向振动连续系统模型示意图

根据材料力学中应变的定义，有

$$\varepsilon(x,t)=\frac{u(x,t)+\frac{\partial u(x,t)}{\partial x}\mathrm{d}x-u(x,t)}{\mathrm{d}x}=\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} \tag{1.3}$$

微元的质量为 $\rho A\mathrm{d}x$，根据牛顿第二定律可知微元的运动微分方程为

$$F_T(x,t)+\frac{\partial F_T(x,t)}{\partial x}\mathrm{d}x-F_T(x,t)=\rho A\mathrm{d}x\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \tag{1.4}$$

而张力为

$$F_T(x,t)=A\sigma(x,t)=AE\varepsilon(x,t) \tag{1.5}$$

因此，有

$$\frac{\partial F_T(x,t)}{\partial x}=AE\frac{\partial\varepsilon(x,t)}{\partial x}=AE\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} \tag{1.6}$$

将式(1.6)代入式(1.4)，得

$$AE\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}\mathrm{d}x=\rho A\mathrm{d}x\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \tag{1.7}$$

令 $c^2=E/\rho$，c 为声波在杆中纵向传播的速度，则式(1.7)可简化为

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2}=\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \tag{1.8}$$

此即为杆的纵向振动方程，也称为波动方程。由于上述方程为偏微分方程，在求解时需具备边界条件和初始条件。根据杆的连接情况可知其边界条件为

$$u(0,t)=u(l,t)=0 \tag{1.9}$$

假设杆初始时刻任意点处的纵向位移(变形)和速度均为0,则初始条件为

$$u(x,0)=0,\left.\frac{\partial u(x,t)}{\partial t}\right|_{t=0}=0 \tag{1.10}$$

式(1.8)~式(1.10)构成了封闭形式的杆纵向振动偏微分方程,其求解方法将在第5章介绍。

下面利用离散系统模型来研究上述杆的纵向振动问题。如图1.5所示,将杆离散为n个无质量的弹簧k_i和集中质量$m_i(i=1,2,\cdots,n)$,集中质量m_i处的纵向变形为u_i,集中质量m_i和m_{i-1}的距离为Δx_i。以集中质量m_i为研究对象,由牛顿第二定律可知其运动微分方程为

$$k_i(u_{i+1}-u_i)-k_{i-1}(u_i-u_{i-1})=m_i\frac{\mathrm{d}^2u_i}{\mathrm{d}t^2} \tag{1.11}$$

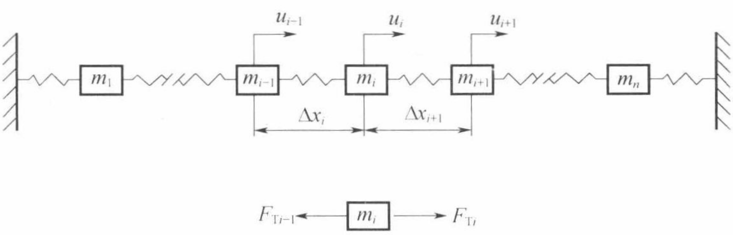

图1.5 杆的纵向振动离散系统模型示意图

质量m_i右边的弹簧刚度k_i计算可参见图1.6,即

$$F_i=k_i\Delta u_i=k_i(u_{i+1}-u_i)=AE\varepsilon_{i+1}=AE\frac{\Delta u_i}{\Delta x_{i+1}} \tag{1.12}$$

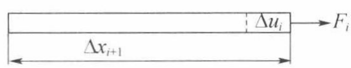

图1.6 弹簧刚度计算示意图

因此,有

$$k_i=\frac{AE}{\Delta x_{i+1}} \tag{1.13}$$

将$m_i=\rho A\Delta x_i$和式(1.13)代入式(1.11),得

$$\frac{AE}{\Delta x_{i+1}}\Delta u_i-\frac{AE}{\Delta x_i}\Delta u_{i-1}=\rho A\Delta x_i\frac{\mathrm{d}^2u_i}{\mathrm{d}t^2} \tag{1.14}$$

即

$$\frac{\dfrac{\Delta u_i}{\Delta x_{i+1}}-\dfrac{\Delta u_{i-1}}{\Delta x_i}}{\Delta x_i}=\frac{\rho}{E}\frac{\mathrm{d}^2u_i}{\mathrm{d}t^2} \tag{1.15}$$

令

$$y_i=\frac{\Delta u_i}{\Delta x_{i+1}} \tag{1.16}$$

代入式(1.15),得

$$\frac{y_i-y_{i-1}}{\Delta x_i}=\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i}=\frac{\rho}{E}\frac{\mathrm{d}^2u_i}{\mathrm{d}t^2} \tag{1.17}$$

令 $\Delta x_i \to 0$，则由式(1.16)和式(1.17)，得

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \tag{1.18}$$

可以看出式(1.18)与式(1.8)是完全一样的，由此可见，尽管离散系统和连续系统的数学模型具有不同的形式，但它们之间却存在本质的内在联系。事实上，工程中许多连续系统(研究变量不仅是机械系统的位移，还包括表征流场、电场、磁场等的物理量)由于直接建模的难度较大，需要将其离散成若干个单元再进行近似计算，这就是有限元的建模思想。

1.3 线性系统和非线性系统

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)而变化，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。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具有足够的准确性，则线性系统有很好的实用价值。

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

线性系统的重要特征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几个不同的输入(或称激励函数)，所产生的输出(或称响应)是这几个输入单独作用产生的响应之和。与叠加原理等价的结论是线性微分方程的复杂解可分解为简单解之和。可以根据叠加原理是否成立来判断一个系统是否为线性系统。如果通过试验可以验证一个动态系统的响应与输入是成正比的，则可以推断该系统是一个线性系统。

虽然对于许多实际系统都可以简化为线性系统来处理，但是这样的简化必须受到一定的限制，例如弹性变形只有在一定的范围内才具有线性特征，当系统的运动超出了假设的范围时，就有可能破坏其线性特性。例如，对于大家所熟悉的由摆长 l 和质量 m 组成的平面单摆，其运动方程为

$$ml^2\ddot{x} + mgl\sin x = 0 \tag{1.19}$$

式中：x 为单摆角位移。

式(1.19)是典型的非线性微分方程。利用泰勒级数展开 $\sin x$，得

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \cdots \tag{1.20}$$

当单摆角位移较小时，式(1.20)简化为

$$\ddot{x} + \frac{g}{l}x = 0 \tag{1.21}$$

这是一个典型的二阶线性方程，其解的周期为 $T = 2\pi\sqrt{l/g}$，即周期不依赖于初始位移和初始速度，系统的运动具有等时性。在大位移的场合，上述结论是不正确的，因为式(1.21)对于大位移是不精确的。如果将式(1.20)右边的前 2 项代替 $\sin x$，则式(1.21)可简化为

$$\ddot{x} + \frac{g}{l}\left(x - \frac{x^3}{6}\right) = 0 \tag{1.22}$$

这是一个非线性微分方程。根据非线性微分方程理论，系统已不具有运动等时性。

在非线性系统中,叠加原理已不再适用。非线性系统的数学建模往往是十分复杂的,其求解也同样复杂,通常难以求出其封闭解。因此,在实际工程应用中总是尽量地将非线性系统在给定条件附近线性化(逐段线性化),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。

1.4 确定性、随机性与模糊性

一个实际的动力学系统,在外界激励(输入)作用下产生的动态行为称为响应(输出)。输入、输出与机械系统之间的关系可用图 1.7 所示的框图来表示。

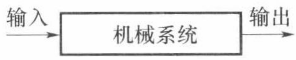

图 1.7 输出、输入与机械系统之间的关系

系统的激励可通常分为确定性的和随机性的两大类。如果外部激励可以用确定的时间函数来描述,则称该激励是确定性的,例如脉冲函数、阶跃函数、周期函数、谐和函数等都是典型的确定性函数。如果一个系统的惯性、弹性与阻尼以及激励都是确定性的,则系统的运动可以用确定性的微分方程来描述,如果其初始状态也是确定性的,那么就可以由初始运动求出用时间函数表示的系统响应函数。这种由系统在某一时刻的状态(称为初始条件)就可以确定其以后任一时刻状态的现象称为确定性现象。

随机激励则与确定性激励相反,它们不能用时间的确定函数来描述,而只具有一定的统计规律性,必须用随机过程来描述,与其对应的系统运动方程为随机微分方程。随机微分方程不再存在确定的时间函数解,只能研究其所谓“几乎所有”的解。在求解时,并不逐个地考察解过程的样本函数,而是从概率等于 1 的总体上去研究随机微分方程的解。求解随机微分方程的“几乎所有”的解时,要涉及随机过程的较多的概率特性和样本函数的性质,因此在实用中通常只求其较弱的解,即均方解。可以说,随机系统动力学的基础理论都是建立在随机微分方程均方解的基础上的。

目前,机械系统和结构系统设计的发展趋势是不断地从确定性设计方法过渡到概率设计方法,如可靠程度指标法和直接的可靠性法等,这是人们认识和研究不断深入的结果。近年来,在机械系统和结构系统的设计中又提出了模糊优化设计。人类在认识世界的过程中,从模糊发展到精确,从心中无数到心中有数,这是一个飞跃。而今为了分析和处理模糊现象,又突破了精确数学的框架,产生了模糊数学。从模糊到精确,又从精确到模糊,这不是倒退,而是螺旋式的上升。如果一个系统的激励是模糊的,则它应该用模糊过程来描述,对应的运动方程应为模糊微分方程。关于模糊过程的定义、性质、构造与描述方法,以及模糊微分方程的解法等问题,目前还没有得到完全解决,有待于今后的进一步发展。

1.5 机械系统动力学的任务

对于一般的系统,通常需要用状态参数来描述,它们由系统固有的特征参数和外界条件所决定,状态参数的变化都遵循一定的规律,研究这些规律便是“动力学”的任务,而机械系统的

运动状态参数(位移、速度、加速度)、受力状态参数(力、力矩)或功率参数(输出功率、效率)等与其几何参数、结构设计、构件的质量(惯量)、原动力、工作对象以及外界条件密切相关,研究这些因素之间的关系、状态变化规律、设计理论和控制方法,便是机械系统动力学的研究任务,一般包括机械系统动力学建模与仿真、机械系统动力学设计、机械系统动力学控制、状态监测和故障诊断等。

1.5.1 机械系统动力学建模与仿真

机械系统的动力学分析、设计和控制需要建立在简洁、可靠的模型基础上。由于实际问题的复杂性,机械系统动力学模型往往要由理论和试验相结合来确定。

机械系统动力学建模与仿真一般包括物理建模、数学建模、数值计算和结果后处理等4个环节。物理建模是对实际机械系统进行抽象,用运动副、驱动约束、力元和外力、杆、梁、板、壳、质量、弹簧、阻尼等要素建立与实际机械系统一致的物理模型,这个过程中,对实际部件进行合理的抽象与简化是操作关键。抽象之后的物理模型是机械系统数学建模的基础。数学建模是指由物理模型根据相关动力学理论推导数学模型,其本质是建立可表征机械系统运动和受力状态的数学公式,所建立的数学模型是联系机械系统输入和输出的桥梁。数值计算是通过调用专门的数值求解器实现的,数值求解器对数学模型进行解算得到分析结果。数学建模和数值求解是建模与仿真中最复杂的过程,所幸的是,在通用的机械系统动力学建模与仿真软件系统中,这两个过程是自动进行的,除了求解的控制界面外,内部过程对于用户是不可见的。得到分析结果之后,通常要与试验结果进行对比,这些对分析结果进行处理的过程是在后处理器中完成的。后处理器一般都提供了曲线及图表显示、曲线运算和动画显示功能。

由于理论模型与实际系统的差异,一般情况下二者所得结果不可能完全一致。如果差别太大,将失去指导机械产品设计分析的意义,需要查找差别较大的原因。造成差别的原因是多方面的,包括模型简化时遗漏的某些因素、模型中所用参数的准确性、计算方法的误差、测量误差等,需要根据具体情况进行分析和判断,必要时需要对模型进行修正,建立符合实际情况的模型。正确的系统模型是对机械系统进行仿真的充要条件,只有这样才能为机械系统的设计、控制、诊断等提供有效的技术支撑。

1.5.2 机械系统动力学设计

机械系统动力学设计是指根据机械系统工作所处的动力学环境,按照功能、强度等方面的要求,对机械系统的振型、频率等动态特性参数进行修正和设计,以使它具有良好的动态特性,达到控制机械系统动力学特性的目的,从而降低机械系统的动载荷。因此,通过机械系统动力学设计使待设计的机械系统具有良好的静态和动态特性。它主要可分为机械系统振动特性设计和动响应设计,其中前者是要求在机械系统满足静强度的同时,使机械系统的固有频率、固有振型等振动特性满足设计要求;后者是要求在机械系统满足静强度、固有特性等要求的同时,还要满足动态响应(包括应力、应变、位移、速度、加速度等)的要求。

振动特性设计主要针对线性时不变系统。从数学角度看,这是一逆特征值问题,只有在雅可比矩阵等特殊情况下可直接求解。对于实际工程问题,通常将逆特征值问题表述为优化问题,求取某种范数下的最优解。如果采用基于目标函数梯度的优化方法,还需解决特征值和特征矢量灵敏度的计算问题。近年来,对特征值和特征矢量灵敏度的计算方法日趋成熟,解决了有多阶固有频率和振型要求的复杂结构设计问题。

动态响应设计概念适用于各类机械系统,其设计目标是寻求给定激励下系统的最优动响应。对于线性时不变系统,已导出任意确定性激励和平稳随机激励下系统响应。关于设计变量的灵敏度,可采用优化方法解决动响应设计问题。对于弹性连杆机构,引入 KED(Kineto - Elastodynamics,弹性动力学)分析中的瞬时结构假设,也可采用灵敏度分析方法对其进行动态设计。

对于快时变线性系统和非线性系统,其动力学设计应理解为系统动响应设计,这方面的研究还不深入,有待进一步的探讨研究。

1.5.3 机械系统动力学控制

有些机械系统的工作环境是变化的,需要利用相应的手段来控制其动力学特性,以保证系统在不同条件下按预期要求工作。控制的因素包括输入的动力、系统的参数或外加控制力等。在分析控制方法的有效性和控制参数的范围等问题上,均需要动力学分析。

对于以机器人、数控机床等为代表的现代机械,机械系统动力学的有关理论与方法占有重要的地位。由于自动调节和控制装置已经成为机械不可缺少的组成部分,机械系统动力学也相应地扩展到包括不同特性的动力机构和控制调节装置在内的整个机械系统,控制理论也已深入到机械系统动力学的研究领域中。各种建模理论和方法以及运动和动力参数的测试方法,日益成为机械系统动力学研究的重要手段。

随着计算机技术和测控技术的发展,机械系统动力学控制技术有了长足进展,已在航空、航天、机械和土木工程领域得到了一些成功应用。近年来,振动主动控制技术最引人注目的进展是集传感器、控制器、作动器与结构为一体的智能结构。当前,研究的热点是基于压电传感器和作动器的智能结构,控制策略则来自 H_∞ 控制、自适应控制、神经网络控制、非线性控制、混合控制等控制理论的新成果。经过大量的数值模拟、优化设计和试验,这类智能结构已有许多成功的应用,例如,大到对空间可展天线、太阳能帆板等张开时的振动进行主动控制,小到对提琴和吉他的音箱进行振动控制以改善其音响效果。

由于振动半主动控制技术具有能耗低、勿需对原系统作大修改等优点,近年来日益得到人们关注。例如,已研制了多种电流变和磁流变可控阻尼器,针对转子轴承、车辆悬架等开发了半主动控制技术。此外,采用半主动控制的动力吸振器技术也有新的进展。

1.5.4 我国机械系统设计的现状

整个国民经济的技术水平和现代化程度依赖于机械工业的技术水平和现代化程度,机械工业在向未来迈步的战略规划中占据着极其重要的超前发展位置。发达国家的工业化程度和发展中国家的崛起都证明了这一点。我国要在未来若干年后达到国际上中等发达国家的水平,必须振兴能够标志我国现代化水平的机械工业,而做到这一点的关键是能否设计和制造出具有竞争能力的产品。

随着现代化技术的发展,工、农业各部门都迫切需要大量新的高速、高效、高精度、重载、大功率和高度自动化的机械,而我国机械工业的综合水平却落后于世界先进水平 15 ~20 年,其关键之一是设计水平的落后。要改变我国目前还处于以类比设计和静态设计为主的现状,急需建立一个能够指导设计过程的统一原则和方法体系的基础,其中首要的任务是必须由静态设计走向动态设计,对动态条件下工作的动力学系统做更精确的计算。

静态设计是指设计机械和结构时,常常只考虑到静载荷和静特性,待产品试制出来后再做