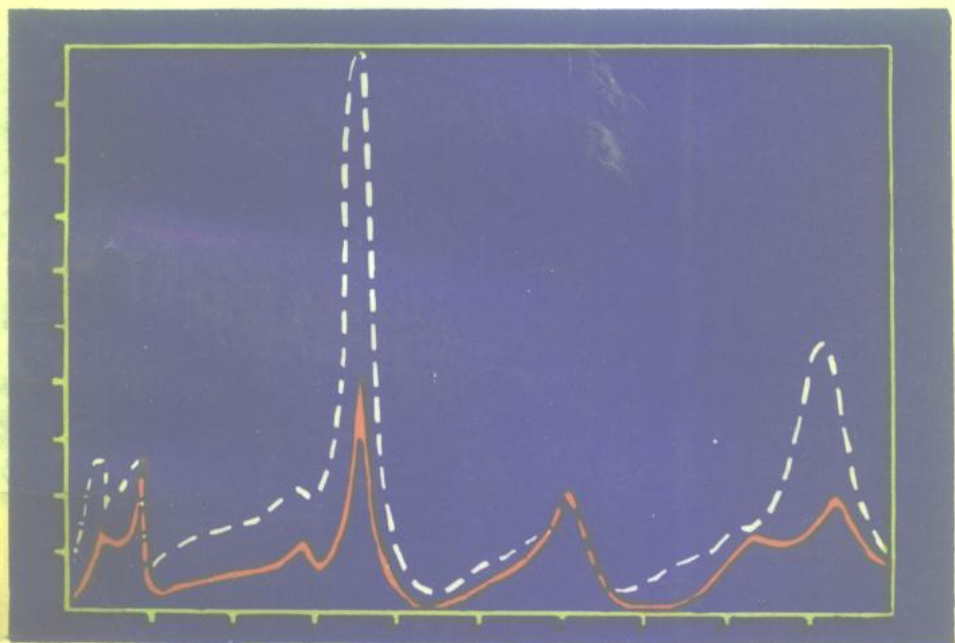


机电产品现代设计统一培训教材

机械动态设计

徐燕申 主编



机械工业出版社

TH122
X90

机电产品现代设计统一培训教材

机械动态设计

徐燕申 主编



机械工业出版社

(京) 新登字054号

内 容 简 介

本书围绕如何使所设计的机械产品和设备的结构系统具有良好的动态特性这一问题,系统地论述了建立动力学模型的各种方法,如有限元法、传递矩阵法、试验模态建模法以及基于上述模型的混合建模法。根据机械结构的动特性要求,介绍了常用的动力修改和动特性预测方法,并对动态优化方法作了简要的介绍。全书分6章,附有部分应用实例。本书可作从事机械设计人员进修、培训的教材和教学参考书,亦可作为高等院校机械类专业高年级学生和研究生的教学参考书。

机械动态设计

徐燕申 主编

责任编辑: 薛永友 版式设计: 朱淑珍

封面设计: 姚毅

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 850×1168¹/₃₂·印张8.125·字数218千字

1992年11月北京第1版·1992年11月北京第1次印刷

印数 0,001—5,000·定价: 6.40元

*

ISBN 7-111-03442-2/TH·386

编辑委员会

主任委员：郭志坚

副主任委员：李宜春 潘兆庆

委 员： 周长源 孙靖民 张存库 杨敢新 刘元杰

陈康民 赵松年 赵学仁 万耀青 李光泉

郭青山 范祖尧 束鹗程 毕振南 计有为

卢玉明 雷闻宇 徐宗俊 薛继良 许大中

黄纯颖 欧宗瑛 周 济 洪如娟 韩中光

序 言

在各级领导部门、高等院校的倡导和宣传下，机电行业的现代设计方法推广和培训工作取得了很大进展，并且已经见了成效。1990年，机电部颁发了机电科[1990]213号文件及附件《加强机电产品设计工作的规定》，明确地指出了推广和普及现代设计方法的重要性，并把现代设计方法推广纳入了宏观管理的轨道。从1989年到现在，有关部委和地方的机电制造主管部门在充分酝酿和讨论的基础上，制定了机电产品现代设计试点项目共1401项。到目前为止，1/3的项目已经完成。一些企业在完成这些项目的过程中，创造了明显的经济效益，尝到了甜头。

管理干部培训对现代设计方法推广起了很大的促进作用。从1988年到现在，有关部委和几乎所有的地方主管部门都举办了各种形式的管理干部现代设计方法学习班、研讨班，大部分领导同志都是通过这些培训才对现代设计方法有所了解，并认识到了推广现代设计方法的紧迫性。很多负责同志在接受培训后积极主动地要求承担项目试点任务。

推广现代设计方法的中心环节和中心内容是对设计人员尤其是骨干设计人员的培训。因为只有让大多数设计人员掌握了现代设计理论和设计技术，并将之应用于产品开发和设计，从根本上提高机电产品的设计水平和产品水平，才会产生巨大的经济效益，促进整个行业的迅速发展。为此，机电部科技司于1990年9月在上海专门召开了一次由行业主管部门、高等院校的领导、专家、学者参加的现代设计统一培训联席会议，决定对设计人员进行有计划、有步骤的统一培训，并由一直协助科技司进行现代设计方法推广工作的机电产品设计信息中心负责组织有关专家编写一套融科学性与实用性为一体的培训教材，即《机电产品现代设计统一培训教材》。这套教材共分14册，各分册的名称是：计算机辅助设计、优化设计、可靠性设计、工业艺术造型设计、设计

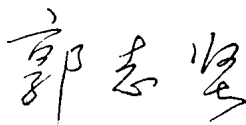
方法学、反求工程技术、有限元法、价值工程、机械动态设计、三次设计、疲劳设计、专家系统、智能工程、模块化设计。

现代设计方法，既不是单纯指计算机技术，也不单纯指以设计的一般规律和一般途径为研究对象的设计方法学。它应当包括一切先进的设计理论、设计技术和设计方法，是一切先进而行之有效的设计思想的集成与统一。现代设计培训应当把学以致用作为基本原则。正因为如此，被邀请参加编写教材的作者大都是现代设计方法推广中有丰富实践经验的专家和学者，而这套教材不仅系统地介绍了现代设计方法的基本内容，还列举了大量应用实例。

设计是一项涉及多种学科、多种技术的交叉工程。它既需要方法论的指导，也依赖于各种专业理论和专业技术，更离不开技术人员的经验和实践。现代设计方法是在继承和发展传统的设计方法的基础上融汇新的科学理论和新的科学技术成果而形成的。因此，推广现代设计方法，并不是要完全抛弃传统方法和经验，而是要让广大设计人员在传统方法和实践经验的基础上掌握一把新的思想钥匙。

设计是产品生产和经营的先导，企业实现自主设计是我国企业自力更生的主要标志。要想以优秀的产品占领国内外市场，就要在设计上下大工夫。这就要求我们尽快更新设计人员的知识结构，更新设计基础数据和设计手段，提高产品开发和改进的速度和效益。希望大家在实践中了解和学习这套教材，更希望现代设计方法在产品开发的实践中结出累累硕果！

机械电子工业部副总工程师



1991年8月

前 言

机械产品和设备日益向高速、高效、精密、轻量化和自动化的方向发展，产品结构日趋复杂，对其工作性能的要求越来越高。为使这些设备和产品安全可靠地工作，其结构系统必须具有良好的静、动特性。同时，机械在工作时的振动和噪声，会损害操作者的身心健康，并且污染环境，亦是需要致力解决的一个社会问题。为此，必须对机械产品和设备进行动态设计，以满足机械静、动特性和低振动低噪声的要求。

机械结构动态设计的大体过程是对满足工作性能要求的初步设计图纸，或要进行改进的机械结构进行动力学建模，并作动特性分析。根据其动特性要求或预定的动态设计目标，进行结构修改预测、再设计和结构的重分析，直到满足结构动特性的设计要求。确定符合机械静、动特性的结构形状和尺寸大小，是整个设计过程的关键环节。

机械动态设计是正在发展中的一项新技术，涉及现代动态分析、计算机技术、产品结构动力学理论、设计方法学等众多学科范围，还没有形成完整的动态设计理论、方法和体系，许多问题尚需进行深入广泛的研究。当前，为了提高我国机械产品在国际市场中的竞争能力，如何保证产品的高性能、高质量和低成本，是机械产品设计面临的新问题。为此，要求在设计阶段能预估机械结构的静、动特性。因此，机械动态设计方法已成为设计人员想迫切了解和掌握的设计手段。

本书主要介绍机械结构系统主要的动力学建模分析的理论和方法。在此基础上简要介绍结构动力修改预测技术，并扼要地简述了动力优化设计的主要过程，使读者能得到一个动态优化设计的基本概念。

全书共分6章：第1章讲述线性振动基础知识，是全书的预备知识；第2章介绍有限元法中的动力学建模方法；第3章叙述

传递矩阵建模方法；第4章介绍试验模态建模技术；第5章主要介绍基于有限元法和试验模态分析的混合建模技术；第6章介绍结构动力修改预测和动态优化设计方法。每章编入相应的应用实例，以帮助读者加深理解和掌握有关基本理论和方法。本书可作为从事机械设计人员进修、培训的教材和教学参考书，亦可作为高等工业院校机械类专业高年级学生和研究生的教学参考书。

本书由天津大学徐燕申主编，曾子平教授主审。第1、4章由徐燕申编写，第2章由黄田编写，第3章由哈尔滨工业大学张士义编写，第5章由刘晓平编写，第6章由张士义和宋健伟合编。

鉴于编者的学术水平有限，编写时间又较紧，书中错误和不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

1991年11月

符号说明

a	加速度
A	振动幅值
b_j	第 j 个设计变量
$[B]$	特征矩阵; 几何矩阵
c	阻尼系数
c_e	等效阻尼系数
$[C]$	阻尼矩阵
d	位移, 同 x
$[D]$	弹性矩阵
e	正则待定常数; 有限元单元符号 (用于上、下标时)
E	弹性模量
f	频率; 力矢量 (时间域函数)
$\{f\}$	力列矢量
F	力幅值; 富氏变换符号
$\{F\}$	力矢量
g	重力加速度
$h(t)$	单位脉冲响应
$H(\omega)$	传递函数
i	虚数单位 $i = \sqrt{-1}$
$[I]$	单位矩阵
k	刚度系数
$[k]$	单元刚度矩阵
$[K]$	刚度矩阵; 总体刚度矩阵
L	拉氏变换符号
m	质量
$[m]$	单元质量矩阵
$[M]$	质量矩阵; 总体质量矩阵
M	激振力矩

n	阻尼系数 ($n = \frac{c}{2m}$)
N	作下标时表示正则化; 形函数
$[N]$	形函数矩阵
q	模态坐标; 面力矢量
s	时间(秒); 拉氏算子; 复频率
t, τ	时间
T	上角标表示转置; 振动周期
$[T]$	坐标变换矩阵
$\{u(t)\}$	单元内任意点位移矢量
v	振动速度, 同 \dot{x}
x	振动位移, 同 d
X	振动位移幅值
$\{z\}$	状态向量(矢量)
α	相位, 相角
$\gamma_{x,f}^2$	x 对 f 的相干函数
δ	衰减系数; 变分符号; 单元结点位移
$\{\delta\}$	单元结点位移矢量
$\delta(t)$	单位脉冲力
Δ	三角形面积
Δf	函数 f 的梯度
ϵ	应变
ζ	相对阻尼系数
η	损耗因子
θ	振动角位移
λ	频率比 ($\frac{\omega}{\omega_n}$); 特征值
$[A]$	谱矩阵
μ	阻尼比容; 泊桑比
Π	总势能
ρ	质量密度
σ	应力, 正应力
τ	切应力

$\{\phi\}$	复振型矢量
$\{\varphi\}$	实振型矢量
$\{\psi\}$	振型矢量
$[\Psi]$	振型矩阵
ω	圆频率
ω_n	固有圆频率
ω_d	阻尼固有频率

目 录

序言

前言

符号说明

第 1 章 机械结构线性振动基础	1
1.1 结构振动系统的简化.....	1
1.2 机械振动的分类.....	2
1.3 单自由度系统.....	6
1.3.1 自由振动.....	7
1.3.2 受迫振动.....	10
1.3.3 系统的阻尼.....	13
1.3.4 多自由度系统振动.....	15
第 2 章 机械结构动力分析中的有限元建模法	33
2.1 概述.....	33
2.2 用有限元建立结构动力学模型的基本原理和方法.....	34
2.2.1 结构的离散化.....	34
2.2.2 单元的动力学方程.....	35
2.2.3 单元的特性分析.....	39
2.2.4 整体结构的动力学方程.....	46
2.3 结构动力分析中常用单元及其选用.....	52
2.3.1 杆状单元.....	53
2.3.2 薄板单元.....	53
2.3.3 多面体单元.....	55
2.3.4 等参单元.....	56
2.3.5 单元划分与结点编号要点.....	58
2.4 特征值问题的求解.....	59
2.4.1 特征值问题的定义及其数学性质.....	59
2.4.2 特征值问题的常用算法简介.....	61
2.5 结构动态响应的求解方法.....	66
2.5.1 阻尼矩阵.....	66

2.5.2	振型叠加法	67
2.5.3	逐步积分法	69
2.6	有限元法在机械结构动力分析中的应用	71
第3章	传递矩阵建模法	74
3.1	轴组件的弯曲振动分析	74
3.1.1	元件的状态传递方程和传递矩阵	75
3.1.2	轴组件的状态传递方程和传递矩阵	86
3.1.3	计算应用	87
3.1.4	应用实例	96
3.2	传动系统的扭转振动分析	97
3.2.1	传动系统扭振动力学模型的建立和元件参数的转换	98
3.2.2	元件的状态传递方程和传递矩阵	103
3.2.3	系统的状态传递方程和传递矩阵	106
3.2.4	分支传动系统	107
3.2.5	计算应用	109
第4章	试验模态分析建模方法	113
4.1	概述	113
4.2	试验模态分析基本理论	114
4.2.1	机械阻抗与频响函数	114
4.2.2	基于传递函数测量的模态分析	122
4.3	传递函数的测量技术	131
4.3.1	结构的激励和响应测量仪器	131
4.3.2	激振方式	137
4.3.3	数字信号处理中应注意的问题	140
4.4	模态参数识别方法	144
4.4.1	单模态识别法	144
4.4.2	多模态识别法	147
4.5	模态振型的动画显示	153
4.5.1	实模态振型	153
4.5.2	复模态振型	153
4.6	模态分析技术的工程应用	155
4.6.1	在机床结构改进中的应用	155

4.6.2	在皮革机械结构改进中的应用	159
4.6.3	升高片疲劳断裂成因的试验模态分析	161
第5章	机械结构动力学混合建模方法	165
5.1	概述	165
5.2	自由度的凝聚	166
5.2.1	静态凝聚	166
5.2.2	动态凝聚	168
5.3	有限元模型的修正	171
5.4	结构结合面动力学参数的识别	174
5.4.1	实测结构传递函数识别法	175
5.4.2	模态分析和有限元分析相结合的识别方法	178
5.5	动态子结构综合法	181
5.5.1	自由界面下子结构试验模态模型的获取	182
5.5.2	子结构综合	185
5.5.3	结构混合建模举例	189
第6章	机械结构动力修改和动态优化设计	191
6.1	概述	191
6.2	结构动力修改的理论和方法	191
6.2.1	结构动力修改的准则	191
6.2.2	结构动力修改和动特性预测方法	204
6.2.3	结构动力修改的工程应用	210
6.3	机械结构的动力优化设计	217
6.3.1	优化设计的基本概念	218
6.3.2	优化准则法	227
参考文献		242

第 1 章 机械结构线性振动基础

机械动态设计的建模过程是基于对系统的数学描述，即根据所研究结构对象的基本物理定理，用运动方程或者振动方程加以表达。通常，把机械结构作为一个多自由度系统来处理。

1.1 结构振动系统的简化

一个复杂结构系统很难用运动方程来全面地描述。通常，为了限制求解实际结构系统的数学规模，对问题必须作合理的简化。如汽车是有许多振动模态的复杂系统，它的振动由发动机、道路和其它外力所产生。理论模型的选择要根据所需解决问题的具体要求来确定。如果要研究的问题是关于汽车乘坐舒适性和安全性的低频垂直振动，那么可采用图1-1所示一个三体系统的模

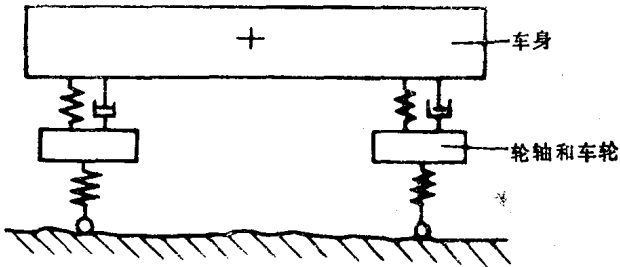


图1-1 分析汽车垂直振动的三体系统

型来描述，在这个模型中，将车体和车轮固结在一起的轴看作为彼此用弹簧和阻尼器联结起来的刚体；轮胎的弹性用无阻尼的弹簧表示，其相应的弹性常数比支承车体弹簧的常数大得多。对于车体的高频弯曲振动的分

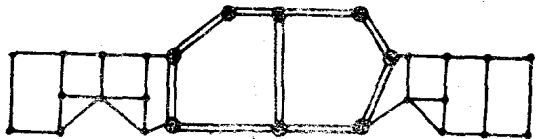


图1-2 分析汽车车体弯曲振动的有限元模型

析, 最合适的模型是用离散的集中质量模型, 根据有限元法, 采用如图 1-2 所示相互联结的梁单元和三角形或矩形板单元表示。这些单元的每一个都是弹性体, 其质量、刚度和阻尼均离散到结点上, 因而可得到一个具有许多节点的机械结构系统, 并得到由结点自由度为未知量的, 由微分方程组构成的运动方程组。

1.2 机械振动的分类

机械系统绕其平衡位置作周期运动叫做机械振动。从运动学的观点看, 机械振动是指机械系统的位移 d 、速度 v 和加速度 a 在某一定值附近随时间 t 的变化关系, 若这种关系是确定的, 则可用函数关系描述其运动为

$$d = x = x(t) \quad (1-1 a)$$

$$v = \dot{x} = \dot{x}(t) \quad (1-1 b)$$

$$a = \ddot{x} = \ddot{x}(t) \quad (1-1 c)$$

在任何时刻, 系统的位置只需用一个坐标就可以确定的叫做单自由度系统; 若系统的位置要用两个以上坐标才能确定, 则叫做二自由度或多自由度系统。

如图 1-3 所示, 振动运动可用时间历程表示, 以 t 为横坐标, 以 x (\dot{x} 或 \ddot{x}) 为纵坐标,

图上示出了几种典型的机械振动。图 a 表示在相等的时间间隔内作周期运动, 称为周期振动, 往复一次所需时间间隔 T 称为周期, 单位以秒计。周期振动可用时间的周期函数表达:

$$x(t) = x(t + nT) \quad n = 1, 2, \dots, n \quad (1-2)$$

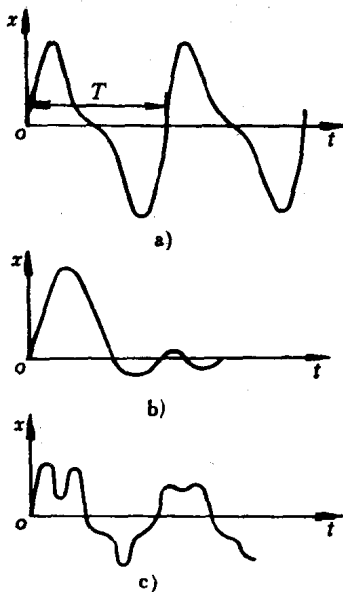


图 1-3 几种典型机械振动的时间历程

最简单的周期振动是简谐振动，它按时间的正弦函数（或余弦函数）所作的运动为

$$x = X \sin \omega t \quad (1-3)$$

式中， X 为振动的最大幅值，单位为长度单位，如米（m），厘米（cm），毫米（mm）和微米（ μm ）。此运动可看作一个等速圆周运动的点 P 在垂直轴 x 上投影的结果，如图1-4所示，长度为 X 的直线 OP 从水平位置开始，以等角速度 ω 绕 O 点转动，任一瞬时 t 在垂直轴 x 上的投影。 ω 的单位为 rad/s ， $\omega t = \alpha$ 称为相位，表示直径 OP 在时间 t 内的转角

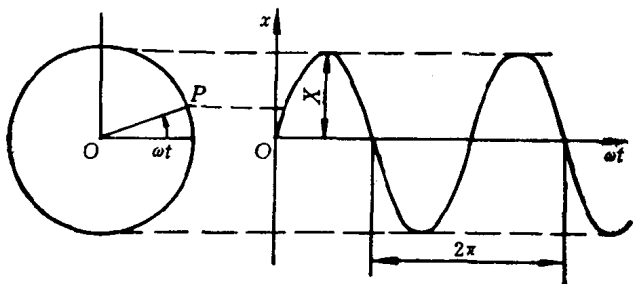


图1-4 作简谐振动的运动模拟

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1-4)$$

在周期振动中，周期的倒数定义为频率

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-5)$$

单位为 $1/\text{s}$ ，即赫芝（Hz），它与 ω 的关系为

$$\omega = 2\pi f \quad (1-6)$$

式中， ω 为圆频率。

简谐振动还可用复数的矢量表示，在复平面上的一个复数 z 代表复平面上的一个矢量，如图1-5中 \vec{OP} 所示。矢量的模为 X ，位置由复角 α 表示，若用虚数 i （ $=\sqrt{-1}$ ）表示虚轴长度单位，则

$$z = X(\cos \alpha + i \sin \alpha) = X e^{i\alpha} \quad (1-7a)$$