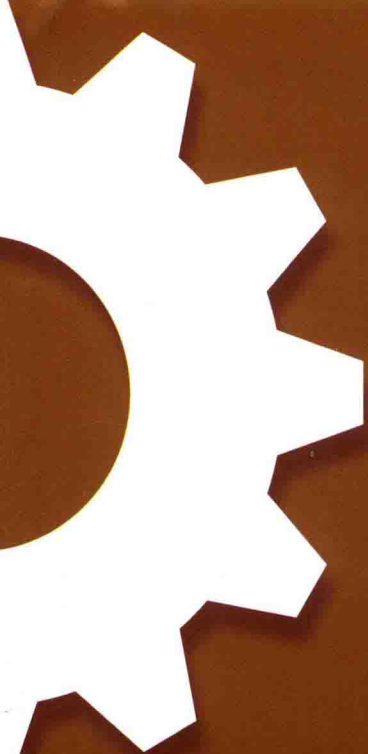




机械振动

刘 钊 秦仙蓉 朱传敏 孙远韬 著



机械振动

刘 钊 秦仙蓉 朱传敏 孙远韬 著



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书详尽地给出了单自由度和多自由度机械振动系统的建模和求解,在兼顾频域和时域分析的同时,从系统输入/输出的角度强调对频率响应特性的分析及应用。本书从最基本的机械振动概念开始,由浅入深,对于初学者来说,也十分有益。作者对于每一章内容都配套了相关的实用计算工具,便于读者学习和掌握机械振动相关理论。

本书可供机械工程、交通运输工程、车辆工程、工程力学、航空航天工程等专业的本科生或研究生使用,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械振动/刘钊等著. --上海:同济大学出版社,
2016.9

ISBN 978-7-5608-6470-9

I. ①机… II. ①刘… III. ①机械振动—高等学校—
教材 IV. ①TH113.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 182525 号

机械振动

刘 钊 秦仙蓉 朱传敏 孙远韬 著

责任编辑 常科实 李小敏 责任校对 徐春莲 封面设计 张 微

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 10.25

字 数 256 000

版 次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-6470-9

定 价 39.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前言

机械振动是自然界的一种普遍现象,广泛存在于人们的日常生活和工程技术领域。机械振动的研究常涉及力学模型的抽象、力学原理的应用,以及微分方程、线性代数等数学知识,其理论研究在早期多为数学和力学工作者所关注。随着现代工程技术的发展,研究和解决各类工程领域中出现的机械振动问题已成为一项迫切的任务,要求工程技术人员掌握必要的振动知识。由于计算机的普及应用,机械振动学得到了迅速的发展,使求解工程实践中的复杂振动问题成为可能。目前,机械振动学已成为机械工程专业学生的必修专业基础课程。

本书内容包括单自由度和多自由度机械振动系统的建模和求解,以及从对解的分析获得有用结论等方面的振动知识。在兼顾频域和时域分析的同时,从系统输入/输出的角度强调对频率响应特性的分析及应用是本书的一个特点。机械振动问题的求解及对解的分析通常比较复杂繁琐,因而成为该课程的一个难点。本书特别注意在机械振动问题的求解及解的图示方面的计算机应用,并为每一章配套了相关的实用计算工具(计算工具请到同济大学出版社网站下载)。对于固有频率、模态等机械振动基本概念则注重讲清楚其物理意义,对于模态的加权正交特性、方程解耦、振型叠加等重要知识则兼顾其理论意义和应用实践。本书中关于张衡地动仪复原的研究内容是作者近年来在这一领域的最新研究成果。本书第8章提供的大型工程应用实例分析,可作为机械振动知识实际应用的参考。

本书是在多年教学实践讲义基础上总结而成的。其前身的教学讲义于2004年成稿,由同济大学刘钊教授、金洵浩教授、邱惠清教授、朱传敏副教授四人合作编写。上述讲义在同济大学多年教学实践的基础上,这次又作了大幅度的修改提高。本书的编写分工是:刘钊完成第1,2,4章全部,第3,5,6,7章的1,2节,以及对全书的统稿;秦仙蓉完成第3章3~7节,第7章3~8节;朱传敏完成第5章3~7节,第6章3~6节,第8章3节;孙远韬完成第8章1,2节。

作者

2016年7月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 机械振动研究的基本问题	1
1.2 机械振动系统的力学模型与数学模型	2
1.3 机械振动的分类	3
第 2 章 机械振动系统	4
2.1 构成力学模型的基本元件	4
2.2 连接、约束和激励	6
2.3 建立力学模型的基本原则	6
2.4 机械振动系统力学模型的建立	7
第 3 章 单自由度系统的振动理论	12
3.1 单自由度振动系统的运动方程	12
3.2 单自由度系统的自由振动	15
3.3 单自由度系统简谐激励下的强迫振动	21
3.4 等效阻尼	28
3.5 非简谐激励下的强迫振动——频域分析法	29
3.6 非简谐激励下的强迫振动——时域分析法	35
3.7 本章小结	38
第 4 章 单自由度系统振动理论的应用	41
4.1 单自由度振动系统的输入、输出方程	41
4.2 振动隔离(隔振)	44
4.3 动力吸振器	46
4.4 惯性力激励	48
4.5 旋转轴的临界转速	49
4.6 振动传感器原理	52
4.7 张衡地动仪复原研究	53
4.8 单自由度振动系统典型频响函数	57
4.9 本章小结	59

第 5 章 多自由度系统运动方程和无阻尼自由振动	61
5.1 拉格朗日方程	61
5.2 刚度矩阵和柔度矩阵	68
5.3 两自由度振动系统的运动方程	70
5.4 两自由度系统固有频率和主振型	71
5.5 多自由度系统固有频率和主振型	74
5.6 多自由度无阻尼系统的自由振动	76
5.7 本章小结	80
第 6 章 多自由度系统强迫振动的稳态响应	84
6.1 多自由度系统简谐激励下的稳态响应	84
6.2 多自由度系统输出对输入的频率响应特性	88
6.3 有阻尼的动力吸振器	92
6.4 非单盘刚性转子的振动分析	95
6.5 多自由度瞬态响应的数值解法	97
6.6 本章小结	98
第 7 章 多自由度系统求解的模态法	101
7.1 振型的加权正交性	101
7.2 系统运动方程的解耦	103
7.3 自由振动响应求解的模态叠加法	103
7.4 无阻尼系统强迫振动的求解	106
7.5 有阻尼系统强迫振动的求解	111
7.6 模态截断	114
7.7 模态解法实例:多自由度简支梁的横向振动	114
7.8 本章小结	121
第 8 章 机械振动理论的工程应用实例浅析	123
8.1 车辆行走振动的建模分析	123
8.2 起重机金属结构瞬态振动的数值仿真	130
8.3 齿轮传动振动系统分析	144
符号对照表	155

第1章 概 论

1.1 机械振动研究的基本问题

波和粒子是物质存在的两种基本形式。最常见的机械波即是机械振动的传播。机械振动是机械系统在其平衡位置附近的往复运动。振动可以说无所不在,无时不在。振动在科学的运用下,可以造福于人类。振动机械是一种利用振动来完成某种工艺过程的机械。振动筛、振动给料机、振动时效处理机等振动机械在工业生产各领域得到了广泛的应用。超声波振动碎石机和振动按摩机可用于治病和保健。但是振动也常常造成危害。振动会降低机械动态精度和使用性能,如机床振动会降低工件加工精度,导弹鱼雷振动会影响命中率等。振动产生的巨大动态载荷,可导致机械或结构寿命降低乃至失效破坏,如地震造成家破人亡,大桥因共振而断裂,高耸结构因风振而倒塌,飞机因颤振而坠毁,发电机组因共振而“飞车”等。振动及其伴随的噪声污染环境,危害人类的生命健康与生活质量。所以振动研究不仅指从理论上研究振动规律和特性,而且指研究在工程中如何消除振动、控制振动,避免振动的危害,利用振动为人类服务。

机械振动是机械运动的一种特殊形式。研究机械振动的机械振动学属于研究机械运动与受力关系的机械动力学的一个分支。由于机械振动的普遍存在性,机械振动学已成为一个独立的将理论和工程应用结合的学科。现代机械一方面不断地向高速、轻量、重载、复杂的方向发展;另一方面又要求其更精密、可靠、舒适、环保。工程中的振动问题越来越受到人们重视。以往采用的机械静态设计已越来越不能适应现代机械的设计要求。机械静态设计是以静力学为基础的,动力学只作为辅助的设计手段,将动态性能通过验算作为对设计进行修正补救的依据。机械动态设计则在设计的全过程应用动力学原理全面考虑机械的动态性能指标,它正逐步成为现代机械设计的主流。

在研究振动时,一般把研究对象(机械或结构)作为系统,把初始干扰和外界对振动系统的作用称为激励,把振动系统在激励作用下的动态行为称为响应。振动研究包含极其丰富的内容,但本质上都是研究激励、系统特性和系统响应三者之间的关系。在以上三者中,如果已知其中二者就可以求出第三者。对确定系统在已知激励作用下的响应问题的研究称为振动分析,已知系统激励和系统响应求振动系统问题称为系统识别,已知振动系统和系统响应求激励问题称为载荷识别或环境预测。通常将这三类问题称为机械振动研究的基本问题,其中振动分析是最常见,也是最基础的问题,是本书研究的重点。

振动分析的一般步骤可分为五步。

- (1) 把工程实际问题简化为振动分析的力学模型;
- (2) 根据力学模型,运用力学原理导出数学模型(即系统的运动微分方程);

- (3) 求解系统微分方程, 得到系统响应;
- (4) 对求解出来的结果, 进行讨论分析, 从中获取解决工程实际问题的有用信息;
- (5) 实验验证上述理论分析结果。

1.2 机械振动系统的力学模型与数学模型

任何实际问题都是非常复杂的, 没有一个模型可以完整地、没有任何偏差地反映出真实的实际情况。**力学模型**是对实际问题的近似, 是用简化的、理想的元件和输入、输出要素构造的假想模型。这样的假想模型易于运用力学原理来研究其运动规律。力学模型没有正确的正确与错误之分, 只有对实际问题逼近程度的差别, 以及在合理性和适用性方面的差异。当一个力学模型与实际情况差异太大, 甚至其已完全偏离了实际情况时, 我们才认为它是“错误”的。**数学模型**是在力学模型的基础上建立的能够完全确定系统运动规律的数学方程式。数学模型的建立是力学原理的应用, 可以对其正确性进行明确的判断。

针对已建立的力学模型, 运用力学原理就可以建立系统的数学模型。系统的运动方程是系统数学模型的重要组成部分。运动方程是力学模型在振动的所有时刻都必须满足的微分方程。由离散元件或集中参数元件构造的有限自由度振动系统称为**离散系统**或**集中参数系统**。离散系统对应的运动方程通常为以下 n (n 为系统自由度数) 元的二阶的常微分方程组:

$$\left. \begin{aligned} f_1\left(x_1, \frac{dx_1}{dt}, \frac{d^2x_1}{dt^2}, x_2, \frac{dx_2}{dt}, \frac{d^2x_2}{dt^2}, \dots, x_n, \frac{dx_n}{dt}, \frac{d^2x_n}{dt^2}, t\right) &= 0 \\ f_2\left(x_1, \frac{dx_1}{dt}, \frac{d^2x_1}{dt^2}, x_2, \frac{dx_2}{dt}, \frac{d^2x_2}{dt^2}, \dots, x_n, \frac{dx_n}{dt}, \frac{d^2x_n}{dt^2}, t\right) &= 0 \\ &\vdots \\ f_n\left(x_1, \frac{dx_1}{dt}, \frac{d^2x_1}{dt^2}, x_2, \frac{dx_2}{dt}, \frac{d^2x_2}{dt^2}, \dots, x_n, \frac{dx_n}{dt}, \frac{d^2x_n}{dt^2}, t\right) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

包含连续体或分布参数元件的系统称为**连续系统**或**分布参数系统**。连续系统的运动微分方程则为**偏微分方程**。以下主要针对离散系统进行分析。

描述离散系统运动的独立坐标称为离散系统的自由度, 根据离散系统的自由度数, 可以进一步分为**单自由度**、**两自由度**和**多自由度**振动系统。对于单自由度振动系统运动方程式(1-1)简化为

$$f(x, \dot{x}, \ddot{x}, t) = 0 \quad (1-2)$$

如果构造系统的惯性元件、弹性元件、阻尼元件及连接元件都是线性元件, 则对应的运动方程(1-1)将是线性(一次)的。运动方程为线性微分方程的系统称为**线性系统**, 否则称为**非线性系统**。单自由度线性振动系统的运动微分方程为以下一元二阶线性常微分方程

$$a_2\ddot{x} + a_1\dot{x} + a_0x = p(t) \quad (1-3)$$

其中, a_0, a_1, a_2 称为线性微分方程的**系数**, 它们分别由弹性元件、阻尼元件、惯性元件的参数和连接元件的运动传递关系所决定; $p(t)$ 称为线性微分方程的**非齐次项**, 对应于系统的外部激励。

1.3 机械振动的分类

根据不同的分类原则,可以把机械振动分为不同的类型。

如振动系统的惯性元件、弹性元件、阻尼元件和连接元件的参数是随时间变化的,则运动微分方程的系数将是时间的函数,称为**时变系统**。如果振动系统的惯性元件、弹性元件、阻尼元件和连接元件的参数是固定的,则对应的运动方程成为**常系数线性微分方程**,对应的振动系统称为**时不变系统**。

如果系统不受外界激励的作用,仅由系统初始扰动引起的振动称为**自由振动**。由外界激励产生的振动则称为**强迫振动**或**受迫振动**。线性振动系统自由振动时,对应微分方程的非齐次项等于零,运动方程简化为齐次线性微分方程。强迫振动对应的运动方程为**非齐次线性微分方程**。此外,根据系统有无阻尼可分为**无阻尼振动**和**阻尼振动**。

机械振动还可以根据振动的形式、类型及其他不同角度进行分类。如根据振动时间历程的特征可分为**简谐振动**(系统响应可用正弦或余弦函数表示)、**非简谐周期振动**(系统响应可用周期函数表示)、**非周期性振动**。还可以根据振动是否可以完全预测分为**确定性振动**和**随机振动**。根据实际振动形态,可分为**线振动**和**角振动**。线振动包括**刚体直线振动**、**轴的纵向(拉压)振动**和**轴的横向(弯曲)振动**等;角振动包括**回转(摆动)振动**和**轴的扭转振动**等。

思考题

- 1-1 机械振动研究的三类基本问题是什么?
- 1-2 振动分析的一般步骤是什么?
- 1-3 什么是力学模型? 什么是数学模型?
- 1-4 什么是微分方程、常微分方程和偏微分方程?
- 1-5 微分方程组的元、阶、次分别是什么意思?

第2章 机械振动系统

一般来说,机械振动系统通常包含三种基本元件,即存储动能的惯性元件、存储势能的弹性元件和消耗机械能的阻尼元件。三种基本元件通过连接、约束元件组成系统,在激励作用下产生机械振动。对实际机械振动系统通过简化与抽象建立适当的力学模型,往往是研究机械振动问题的首要步骤。

2.1 构成力学模型的基本元件

构造振动系统力学模型的元件是从实际物理对象中抽象出来的,这些元件能够反映实际物理对象的基本特性,并且适于用应用力学原理进行分析。在构造机械振动分析的力学模型时,一般需要涉及三类最基本的元件:惯性元件、弹性元件和阻尼元件。

惯性元件是指在运动时产生与(角)加速度成线性关系的惯性力(矩)的元件。最常见的惯性元件有质点/质量块、平动刚体、回转刚体盘、平面运动刚体等。描述惯性元件特性的参数通常称为**参振质量**,简称(广义)质量。

图2-1所示为常见惯性元件的通用图形符号。惯性力大小正比于加速度大小。惯性元件在运动时会储存动能。一个刚体在运动时,其动能一般由平动动能和回转动能两部分组成,即

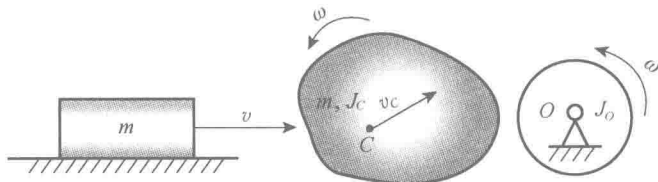


图2-1 常见惯性元件的通用图形符号

$$E_k = \frac{1}{2}mv_C^2 + \frac{1}{2}J_C\omega^2 \quad (2-1)$$

其中, m 为构件质量, v_C 为质心 C 的运动速率, J_C 为刚体关于质心 C 的转动惯量, ω 为刚体加速度。

与平动动能对应的参振质量一般用 m 表示,其国际单位为 kg ,与回转运动动能对应的参振质量也称为转动惯量,一般用 J 表示,其国际单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ 。对于定轴转动的构件,上式可简化为

$$E_k = \frac{1}{2}J_O\omega^2$$

其中, J_O 为刚体关于回转轴 O 的转动惯量,当质心 C 与回转轴 O 不重合时, $J_O = J_C + mR_C^2$, R_C 为质心 C 至回转轴的半径。

弹性元件是指元件在变形时将产生与变形相关、抵抗变形的弹性恢复力(矩)的元件。

最常见的弹性元件有拉压弹簧、扭转弹簧、弹性构件等。如果弹性元件的弹性恢复力与弹性变形的关系是线性的,则称为线性弹性元件。除非特别说明,本书涉及的弹性元件一般指线性弹性元件。描述线性弹性元件特性的参数通常称为**刚度系数**,简称**刚度**。

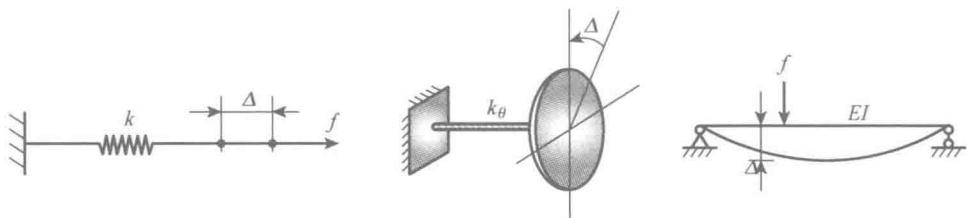


图 2-2 常见弹性元件的通用图形符号(线弹簧、扭转弹簧、板弹簧)

图 2-2 所示为常见弹性元件的通用图形符号。线性弹性元件的弹性恢复力大小等于刚度系数和变形量的乘积。弹性元件变形时会储存势能。单个线性弹性元件变形时储存的势能为

$$E_p = \frac{1}{2} k \Delta^2 \quad (2-2)$$

其中, k 为刚度系数。当对应的变形量 Δ 为线位移时, k 的国际单位为 N/m ; 当对应的变形量 Δ 为角位移时, 刚度系数 k 常增加下标用 k_θ 表示, 其国际单位为 N/rad 。

当两个弹簧串联或并联时, 整体等效为一个弹簧。串联时等效弹簧的刚度为

$$k_{\text{eq}} = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}} \quad (2-3)$$

并联弹簧的等效刚度为

$$k_{\text{eq}} = k_1 + k_2 \quad (2-4)$$

阻尼元件是指元件在变形时将产生与变形速度相关、阻碍变形变化的阻尼力(矩)的元件。如果阻尼元件的阻尼力与变形速度的关系是线性的, 则称为**线性阻尼**或**黏性阻尼**元件。除非特别说明, 本书涉及的阻尼元件一般指线性阻尼。描述线性阻尼元件特性的参数通常称为**阻尼系数**, 简称**阻尼**。

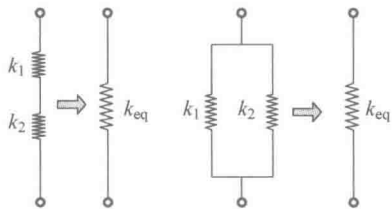


图 2-3 串联和并联弹簧的等效

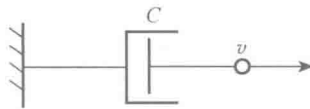


图 2-4 常见阻尼元件的通用图形符号

图 2-4 所示为常见阻尼元件的通用图形符号。线性阻尼元件的阻尼力大小等于阻尼系数与变形速率的乘积。阻尼元件在变形变化时会消耗机械能。其变形变化时消耗机械能的功率的一半称为**散逸函数**。单个线性阻尼元件变形变化时对应的散逸函数为

$$E_d = \frac{1}{2} c v^2 \quad (2-5)$$

其中, c 为阻尼系数。当对应的变形量为线位移时, c 国际单位为 $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$; 当对应的变形量为角位移时, 阻尼系数 c 常增加下标, 用 c_ϕ 表示, 其国际单位为 $\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ 。

可以看出, 上面三种基本元件(惯性元件、弹性元件和阻尼元件)事实上已将实际物体的惯性、弹性和阻尼进行了分离, 即: 惯性元件只考虑其惯性而忽略其弹性和阻尼, 弹性元件只考虑其弹性而忽略其惯性和阻尼, 阻尼元件只考虑其阻尼而忽略惯性和弹性。只考虑上述一种因素(惯性、弹性或阻尼)的元件通常称为**离散元件**或**集中参数元件**。而实际上, 惯性、弹性和阻尼都是连续分布在实际构件上的, 是无法将惯性、弹性和阻尼分离开来的。同时考虑物理构件惯性、弹性和阻尼作用的模型元件通常称为**连续体**或**分布参数元件**。同时考虑分布惯性、弹性和阻尼的连续体或分布参数元件的典型元件为有质量的弹性元件, 如有质量弹性杆、梁、板、壳、实体等。由连续体构造的振动系统的分析都较为复杂, 其对应的运动方程通常为偏微分方程。如果集中参数元件能够满足分析问题的要求, 应该尽量避免使用分布参数元件。

2.2 连接、约束和激励

在建立机械振动力学模型时, 除 2.1 节所述的三类基本元件外, 还需要描述运动和力传递关系的连接、约束元件。最常见的连接元件包括无质量刚性构件(如轻杆、无质量刚体等)、无质量和弹性的柔性构件(如绳索等)、运动副(如铰链、移动副等)、支座(如铰链支座、固定支座、光滑平面)等。

在振动分析中, 除以上基本元件产生的作用力(矩)外, 其他作用于系统的外力都假定为是时间的显函数。力学模型中的作用力也是被抽象后的模型, 并不是指实际的作用力。抽象后的力模型有集中力(图 2-5)和分布力两种。系统的外部激励一般可分为力激励、惯性激励和强制运动激励三种。

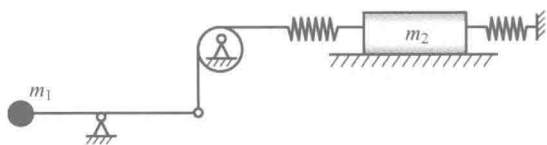


图 2-5 由集中参数元件组成的振动系统

2.3 建立力学模型的基本原则

建立力学模型一般应遵循等效性、简易性和逐步逼近三个原则, 其中的最基本原则是**等效性**, 即所建立的力学模型必须能够近似反映真实物理过程的主要特性。为此必须分析影响振动的主要因素和次要因素, 要保留主要因素, 忽略次要因素。在分析各影响因素的重要性时, 通常首先分析振动系统在平衡位置附近, 使系统回复平衡位置的恢复力的产生机理和影响因素。需要分析在实际振动时有哪些构件将发生振动和变形, 系统振动时可能伴随多处构件的变形, 这样就需要分析所有影响振动的弹性变形中, 哪些构件变形的影响是主要的, 哪些构件变形的影响是次要的。对于变形影响较小的构件通常可以采用刚性元件模型。对于变形影响较大的构件, 需要进一步分析其恢复力的性质和类型, 根据恢复力与变形的关系选用对应的弹性元件模型。在确定弹性元件模型后, 可以进一步分析需要考虑哪些惯性

因素和阻尼因素。在确定了系统的惯性元件、弹性元件和阻尼元件及它们的连接关系后,还必须考虑系统的外部激励情况,应根据系统激励的实际情况,选用对应的外部激励模型。

建立力学模型的第二个基本原则是**简易性**,即所建立的力学模型应该尽可能简单,以便于数学模型的建立、求解及其对解特性的分析。在满足工程分析要求的前提下,越是简单的模型越好。振动系统的自由度数是反映系统模型复杂程度的重要指标。一个振动系统的自由度是指确定系统运动所需要的独立坐标的数目。由离散元件或集中参数元件构造的系统为有限自由度的系统,其自由度通常决定于被弹性元件隔离的惯性元件的数目。包含连续体或分布参数元件的系统具有无穷多自由度。建立力学模型时,应该尽可能采用离散元件或集中参数元件,并且尽可能减少弹性元件和惯性元件的数目以减少力学模型自由度。此外,应该尽可能避免使用复杂的元件模型,如尽可能避免使用非线性元件、参数随时间变化的元件、运动传递关系复杂的连接元件等。

建立力学模型的第三个基本原则是**逐步逼近原则**,即在对系统特性了解不够充分时,先抓住一两个最主要的因素,从简单的模型着手。在简单模型分析的基础上,由简入繁,逐步提高模型的精确度。

2.4 机械振动系统力学模型的建立

在前面已经说明,任何实际的振动系统都是非常复杂的系统。如何将一个复杂的振动系统近似地简化为适于分析的力学模型,不仅依赖于分析者的经验与知识,还与分析的目的和要求有关。建立力学模型的三个基本原则可作为建立力学模型的原则指导。按照以上三个基本原则的指导,建立机械振动系统力学模型需要考虑的基本问题和主要步骤可大体归纳如下:

- (1) 预测系统振动的基本振动形态,了解分析的目的和要求;
- (2) 了解或预测系统振动时哪些构件会变形及其变形的形式;
- (3) 分析储存振动动能的主要惯性因素;
- (4) 分析引起系统振动的主要激励来源;
- (5) 分析振动系统的主要阻尼因素。

下面结合一个典型的例子来说明振动系统力学模型的具体建模过程。设一机器置于板A上,板A又通过两个支撑块B安装在地基上,试建立该振动系统的力学模型(图2-6)。

在实际工程振动问题中,往往是从一个很粗略的描述开始的。上面对振动系统的初始描述就是一个非常粗略的描述。这就要求建模者根据自己已有的经验和知识来逐步加深对问题的理解,以便建立起最适合该振动问题分析的力学模型。针对上面的例子,首先要问的问题是:这个振动系统会如何振动?这个振动会造成什么危害?一个机器的振动可分为机器的整体振动和机器内部的结构振动两大类。根据已有的经验和知识可知:机器的整体振动一般和较低频率的振动相关联,

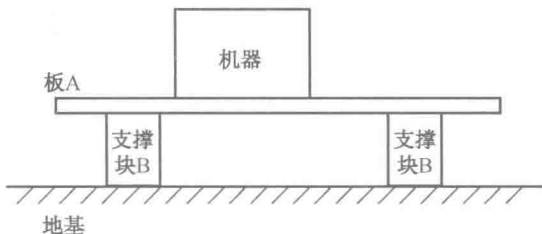


图 2-6 一个典型振动问题例子的初步描述

而机器内部的结构振动通常与较高频率的振动相关联;机器的振动会危害机器的正常工作或相关零部件的强度;机器的振动还可能对附近其他机器的工作造成影响,并且较高频率的振动容易伴随噪声辐射而影响环境。根据以上不同的情况,可能对应适合的力学模型是完全不同的。

如果假定在上述典型例子中,根据对实际问题的调研或对实际情况的预测,机器的振动主要是机器的整体振动,这样就可以把机器作为一个整体来研究而抽象为一个刚体模型。一个刚体具有 3 个平动和 3 个转动,共 6 个自由度。根据建立力学模型的简易性原则,应该尽可能地减少系统自由度的数目。根据经验,在多数情况下,机器的回转振动的影响要小于平动振动的影响。如果忽略机器的回转振动,就可以把具有 6 个自由度的刚体模型进一步简化为只具有 3 个平动自由度质点的模型。另一方面,根据这个例子的初始描述,通常板的纵向刚度远大于其弯曲刚度。也就是根据经验,图 2-6 中的机器的上下振动会明显大于其左右和前后振动。因此,作为简化,在比较粗略的分析时,开始可以只考虑机器的上下振动 1 个自由度。当然上面这样的简化是基于我们对问题的初始描述并根据通常的经验估计的。

在确定用只有一个上下振动自由度的质点模型代替机器的基础上,需要问的第二个问题是:当机器上下振动时,对应于哪些构件的变形及它们的变形形式?与回答第一个问题同样,对问题二的初始描述仍然显得过于粗略。根据经验,图 2-6 中的机器在上下振动时,可能会有四个地方发生变形:①板 A 可能产生弯曲变形;②支撑块 B 可能产生压缩变形;③在机器和板 A 之间可能安装有刚度较小的减振垫;④如果基础较软也可能发生变形。所以需要^①对实际的振动系统进行进一步了解,比较上述四个因素刚度的大小,对于其中刚度明显大于其他刚度的构件可以简化为刚体。

如果假定在上述典型例子中,板 A 的弯曲刚度明显小于其他 3 个因素的刚度,即在机器上下振动时以板 A 的弯曲变形为主,其他因素的变形可以忽略不计。在上述假定下,被研究的问题就可以简化为如图 2-7 所示的初步力学模型,其中板 A 被简化为具有截面参数 EI 的梁模型。



图 2-7 典型振动问题初步力学模型

建立了图 2-7 所示的初步力学模型后,需要问的第三个问题是:当机器上下振动时,有哪些构件在振动时会储存振动动能?对于图 2-7 所示的初步力学模型,当机器振动时,除机器本身振动储存动能外,梁的振动也要储存动能。如果板 A 的质量远小于机器质量而可以忽略,图 2-7 中的弹性梁就可以不考虑质量,简化为无质量弹性梁模型。这时弹性梁模型就等价于一个无质量的普通弹簧,从而模型简化为图 2-8 所示的单自由度振动系统模型。其中, m_j 为机器质量, k_{eq} 为弹性梁的等效刚度。

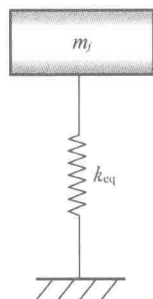


图 2-8 简化的单自由度振动系统模型

如果板 A 的质量不能忽略,那么图 2-7 所示的初步力学模型中的梁就需要考虑其质量,即图中的弹性梁就是一个具有分布质量的弹性梁模型。因为具有分布质量的弹性梁是一个分布参数元件,从而构造的系统力学模型就成为求解比较困难的分布参数系统。在分析要求较低的场合,应该或尽量采用简单的力学模型而避免采用

复杂的分布参数力学模型。因此,在分析精度允许的情况下,可以用若干个独立的集中质量模型来近似代替分布质量模型。例如,用3个集中质量 m_i 来近似替代分布质量时,图 2-7 所示分布参数模型就简化为图 2-9 所示的三自由度力学模型。

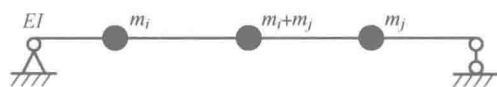


图 2-9 具有集中质量的三自由度振动系统模型

通常用于替代分布质量的集中质量的个数越多,模型的近似性就越好。

建立完整力学模型要问的第四个问题是：引起系统振动的主要激励来自哪里？对于上面的研究问题,根据经验系统的激励大体有两种可能：一是由于机器运转造成对系统的振动激励；二是由于地基的振动构成对系统振动的激励。机器在运转时,由于工作部件与外界的相互作用可产生对机器的直接振动激励力,这种由外部力产生的激励称为**力激励**；机器运转时,由于内部构件运动惯性力(如不平衡转子产生的惯性力等)也是系统的振动激励,称为**惯性力激励**；系统外部的强制运动也对系统构成振动激励,称为**强制运动激励**。对于图 2-7 所示单自由度的情况,对于不同的激励情况可分别转化为图 2-10 所示的不同力学模型。

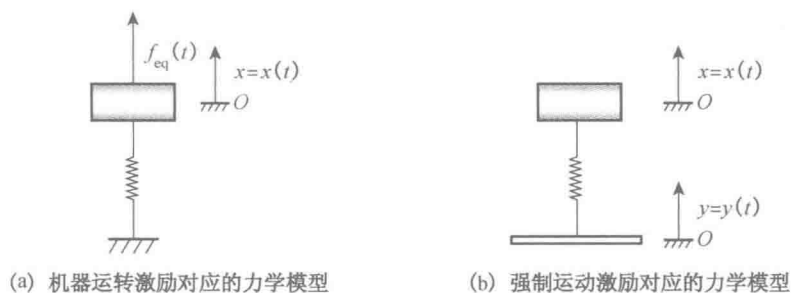


图 2-10 不同激励对应的系统力学模型

建立力学模型还需要问的第五个问题是：在系统振动时,有哪些消耗振动能量的阻尼因素？机械振动系统的阻尼有可能来自以下四个方面：①来自空气、润滑油等对运动构件的流体阻尼；②运动副相对运动的摩擦阻尼；③构件变形时材料变形的内摩擦阻尼；④专门设计的减振垫、阻尼器等大阻尼元件的阻尼。通常运动构件的流体阻尼、金属构件的内摩擦阻尼,以及滚动摩擦或有润滑的滑动摩擦的阻尼都较小,仅包含以上三类小阻尼因素构成的机械振动系统都是小阻尼振动系统,其对应的系统阻尼比(关于阻尼比的概念将在第3章学习)一般都小于 0.03。非金属材料的内摩擦阻尼较大,包含有橡胶等较大阻尼材料的振动系统的阻尼比有可能达到零点几以上。对于上面所研究的振动系统,如果在机器的下方没有安装减振垫,按经验就是一个小阻尼系统。对于这样的小阻尼系统,开始可以不考虑其阻尼因素,而在后续分析时再考虑阻尼对分析结果进行适当的矫正。

由以上分析可知:针对实际振动问题建立合理的力学模型不仅依赖于对被研究对象的了解,而且还依赖于建模者的经验和知识。建模者的经验和知识需要在实践中不断地积累,而后续学习的振动知识反过来对于合理地建立力学模型也是有很大帮助的。在第8章中,我们还要对振动系统力学模型的建立进行更深入的讨论。

大家对车辆行驶时由不平路面而引起的颠簸震动有较多实际体会,以下我们对这类震

动分析的力学模型作一个粗略的讨论。车辆行驶时,发动机、传动系统及附件运动造成的振动一般都频率较高。目前车辆大多采用充气轮胎,而由于充气轮胎具有明显的消除路面局部不平造成的高频振动的作用,从而使车辆行驶时由于路面不平引起的颠簸震动大多体现为较低频率的机械振动。这样较低频率的机械振动造成的车架、车身的变形振动较小,从而大多体现为车身的整体振动。如果把车身整体作为刚体,其6个自由度的振动,按对乘坐车辆人体舒适性的影响大小的排序大体为:上下平动、前后摆动、左右摆动、前后平动、左右平动和水平摆动。因此,车辆行驶时由路面不平引起的颠簸震动分析的最简单模型是只考虑车辆整体上下平动的单自由度模型。车辆在因路面不平引起整体振动时,最主要的弹性变形构件不是轮胎的变形,而是车辆悬架的变形(车辆悬架的常见结构参见图2-11所示)。在车辆的悬挂系统中通常都设计有大阻尼的减震器或避震器元件。

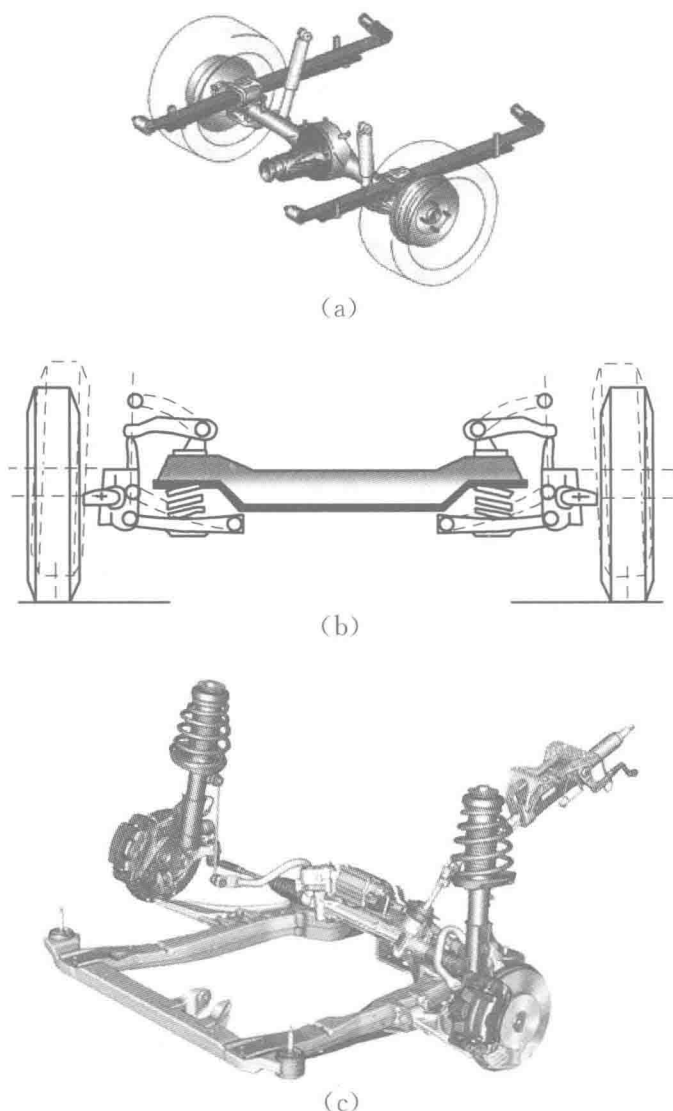


图 2-11 车辆的常见悬架结构

思考题

- 2-1 组成机械振动系统力学模型的最基本元件有哪些?
- 2-2 简述建立机械振动系统力学模型所应遵循的基本原则。
- 2-3 简述建立机械振动系统力学模型需要考虑的基本问题和主要步骤。
- 2-4 针对轿车行驶时由于路面不平引起颠簸震动对人体舒适性的影响,讨论在不同分析精度要求下力学模型的建立。
- 2-5 为什么大客车在不平路面上行驶时,其后部的颠簸震动一般都明显大于其前部?
- 2-6 考察常见起重机的机械结构,分析有哪些引起其振动的激励因素。