

机 械 工 程 学 科
研 究 生 教 学 用 书

机械振动理论及应用

*Theory of Mechanical Vibration
and Its Applications*

闻邦椿 刘树英 陈照波 李 鹤 编著

高等教育出版社

机械工 程 学 科
研 究 生 教 学 用 书

机械振动理论及应用

Theory of Mechanical Vibration
and Its Applications

闻邦椿 刘树英 陈照波 李 鹤 编著

高等教育出版社

内容简介

本书论述机械振动的基本理论及其在工程技术部门中的应用。首先介绍各技术部门中有关机械振动的应用概况及遇到的有关振动问题,进而论述机械振动的若干基本概念,线性振动、非线性振动和随机振动的特点,以及单自由度、二自由度与多自由度线性振动,非线性振动,随机振动,弹性体振动与波动的基本理论,最后介绍机械振动的试验与仿真及其利用与控制。

本书可作为工程类专业研究生的教材,也可供从事机械振动的科研人员与技术工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械振动理论及应用/闻邦椿等编著. —北京:高等教育出版社, 2009.5

ISBN 978-7-04-026263-6

I.机... II.闻... III.机械振动—研究生—教材
IV.TH113.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第027042号

策划编辑 宋晓 刘占伟 责任编辑 查成东 封面设计 李卫青
责任绘图 尹莉 版式设计 范晓红 责任校对 殷然
责任印制 陈伟光

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京七色印务有限公司		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×1092 1/16	版 次	2009年5月第1版
印 张	23.25	印 次	2009年5月第1次印刷
字 数	550 000	定 价	36.70元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 26263-00

机械工程学科研究生教学用书专家委员会

主任 高峰
副主任 张以都 赵升吨
委员 (以姓氏拼音为序)
邓兆祥 韩江
黄洪钟 蒋业华
李原 李柏林
刘冲 潘晓弘
潘毓学 史金飞
史铁林 宋锦春
宋轶民 孙文磊
王安麟 吴佩年
夏伟 许立忠
张杰 左敦稳
左正兴
秘书 宋晓

总 序

随着中国高等教育持续发展,研究生教育发生了很大变化,我国已经迅速跨入了世界研究生教育大国的行列。为了满足研究生教育的需求,高等教育出版社组织了若干套丛书作为研究生教学参考用书。其中,机械工程学科研究生教学用书是在对全国机械工程学科研究生教育及其教学用书进行全面调研的基础上,由“机械工程学科研究生教学资源建设委员会”组织编写的。组织、编写、出版这套研究生教学用书是一件既有教学价值,又有学术价值的工作。

培养研究生应当特别重视能力的培养。所谓能力,包括自我充实的能力,即独立从一个领域进入另一个领域的的能力,以及解决问题的能力。知识是一个动态的集合:昨天的新知识,今天就可能变成一般的知识,明天也许就要变为需要加以更新的知识。竞争迫使人们不断更新自己的知识和进入新的领域。任何人都不能将他一生中解决问题需要用到的知识都在学校里装进大脑,也不可能年轻时学了就可以用一辈子。因此,如何培养自我充实能力是非常重要的教育课题,特别是在研究生培养阶段。

自我充实主要有三个途径:浏览、读书和实践。在信息技术高度发展的时代,为一个名词搜集几万条信息,往往只是几秒钟的事。因此,需要将浏览和读书作为两个不同的学习方法区分开来。浏览是遍历广泛的信息而可以不甚了了,读书则不同,读书是为了对所描述的领域进行深入的了解。要了解一个领域,并且想进入这个领域,最好的办法就是先找一本这个领域的经典著作,老老实实地读完。不仅要掌握书中阐述的基本概念,还要弄懂书中介绍的基本理论,学好书中采用的基本方法。如果有计算公式,那么最好一个一个地推导,如果有作业,最好一个一个做一遍。读完以后,再依照书和借助其他工具的引导,去浏览可能得到的信息以丰富自己。此时,对于得到的信息,不仅要能够辨别信息的可信程度,而且要估计它的重要性并判断是否需要花时间和需要花多少时间去进一步了解。这样就完成了从不了解到进入一个领域的第一步。一本好书,还应当起到帮助初学者掌握正确的学习方法和以严谨、科学的治学态度潜移默化地感染读者的作用。

进入一个领域的第二步,也是不可缺少的一步,就是实践。一个人,不论他读了多少书,如果没有亲自做过,他就不可能真正领会很多理论和方法的精髓。当他要用读到的知识去解决问题时,就会觉得没有把握。另外,任何书都不可能完美无缺,经过实践,不仅能够更深入地理解书中正确的方面,更可以发现书中论点和方法的不足之处。读书不是为了做书呆子,而是为了在前人成功的基础上找到自己前进的方向。

从上面的分析可以看到,一本经典著作,对于引领一个人进入一个领域,是多么的重要。可惜现在这样的好书太少了,按照这种要求来写的书太少了。另外,能够这样读书的人也太少了。很多人往往满足于在网络上浏览,或者用对待查手册的态度对待读书。读得也不少,但是越读越理不出头绪。另一方面,没有好书可读也是事实。读文献不等于读书,一篇文献讲的往往是很局部的问题,不可能从一条缝隙中看到一片天;综述文献又太概括,对于还不熟悉这个领域的人,很难从中了解问题的本质。

高等教育出版社组织的若干套研究生教学用书,按照人们的期望,应当走出过去写本科生教材的框框,应当能够向专门的学术著作方向发展,希望其中一部分,能够在一段时间以后成为相应领域中的经典著作。从组织这套机械工程学科研究生教学用书已经确定的选题来看,覆盖了机械工程学科许多非常重要的基础领域,如果能够写好,将会对研究生培养起到重要作用,对于工作在非教育岗位上的同行,也是自我充实的宝贵资源,是继续教育的重要组成部分。从研究生自我充实能力培养的角度出发,这些领域的好书太重要了。研究生不能再靠听课来充实自己,也不能再靠以考试打分去考察他们的能力。这就是为什么人们对这套机械工程学科研究生教学用书寄以殷切期望的原因。

愿它们能够早日与大家见面。

中国工程院 院士 谢友柏
上海交通大学 西安交通大学 教授
2008年6月

前 言

在物质世界里到处存在着各种形式的振动(包括波动),人类自身的许多器官每时每刻都在振动之中,例如,心脏的搏动、脉搏的跳动、血液的循环、胃的蠕动、肺部的张缩呼吸及耳膜和声带的振动等,人类的生存和生活离不开这些有用的振动。在人类的日常生活中,振动也是无处不在,如汽车、火车、飞机及机械设备的振动,家用电器、钟表的振动,地震以及电、磁、声、光的波动等;从广义的角度来看,在社会经济生活中,经济发展过程中速度的增长与衰减、股市的升跌和振荡等,都可以归纳为不同形式的振动;在自然界及宇宙中,振动和波动的例子也不胜枚举,例如月亮的圆缺、潮汐的涨落等。

振动可分为有害的振动和有用的振动两大类。例如,运载工具的振动会使乘客感到不舒适;环境噪声使人烦躁不安;共振及次谐波共振会引起机械设备、桥梁结构及飞机的破坏;地震使人民生命财产遭受巨大损失。对于这些有害振动,科技工作者已付出了很大的努力,提出了一些有效措施来限制以至完全消除这些有害振动,但直到现在仍然有许多有害的振动问题还没有进行深入的研究及得到解决,例如对于地震人类还没有更有效的办法进行准确的预报和预防。

振动也有诸多的用途,合理地利用振动能给人类造福,改善人民的生活。例如,拨动琴弦能演奏出美妙动人的音乐;在医疗方面,利用超声波能够诊断和治疗疾病;在土建工程中,广泛采用了振动沉桩、振动拔桩及混凝土灌注时的振动捣固等;在电子和通信工程方面,录音机、电视机、收音机、程控电话等诸多电子器件,以及电子计时装置和通信设备中使用的谐振器等都是由于振动才能有效的工作;在工程地质方面,利用振动进行检测和地质勘探;在原油开采上,利用振动提高原油产量;在海洋工程方面,海浪波动的能量可以用来发电;在许多工矿企业,利用振动设备可完成许多工艺过程,或者提高某些机器的工作效率。最近 30 多年来,应用振动原理而工作的机器(振动机械)得到了迅速发展。据不完全统计,目前已用于工业生产的振动机有数百种之多,如各种形式的振动筛、振动压路机、振动给料机和振动成型机等。

为了最大限度地抑制有害的振动,有效地利用有用的振动,首要的任务是弄清振动的机理,揭示和了解振动的内在规律及其外部影响因素。因此,对振动的机理进行研究是一项十分迫切的任务,在此基础上,进一步采取有效措施,对振动与波施行有效的控制及利用,以便防止和减轻它对人类生活和生产所造成的有害影响,或者使有用的振动与波更好地为人类服务。

振动按其特性可分为线性振动和非线性振动两类。严格地说,绝大多数振动系统都是非线性的,在非线性因素较弱的情况下,非线性振动系统可近似地按线性振动系统处理。但是,工程中的不少非线性振动问题在忽略非线性因素的情况下进行分析与计算,所得结果与实际相比会有很大的误差,甚至会得出错误的结论。这是因为在非线性振动与线性振动之间存在着许多本质的区别,因此只有利用非线性振动的理论和方法才能弄清那些非线性振动问题。国内外的许多科学技术工作者都致力于非线性振动理论的研究,力图提出较完善的方法来处理这些非线性振动问题。最近一个时期,由于现实生活和工程实际对解决非线性振动问题的迫切需求,有关非线性振动理论的应用研究得到了较快的发展,无论是定量研究或是定性研究都提出了一些新的

方法。特别是对混沌现象的揭示及对其研究得到的一些结果,被认为是20世纪科学领域的重大发现和重要成就之一。从这一实际情况出发,本书特别地增加了有关非线性振动的论述。

本书主要讲解机械振动的一般理论及其在工程中的应用,主要内容包括:①工程技术部门中的若干工程应用实例;②振动系统的建模及其求解方法;③振动系统的若干特性及其工程应用;④振动的测试与仿真;⑤某些振动系统的利用与控制。

本书编写的出发点是使读者更多了解振动的工程应用,因此本书以讲述工程中振动问题的定量计算方法为重点,并介绍如何运用这些方法,列举了一些应用实例,有关定性方面的问题只讲述一些必要的基本知识。

本书力图从以下几个方面突出其特点:

1) 突出实践性 讲解振动问题时从工程实际情况出发。

2) 考虑普遍性 为使读者较全面地掌握振动系统的特点及其建模和求解方法,本书力图较系统地讲述单自由度、二自由度、多自由度振动系统,并对非线性振动、随机振动、连续体振动、波动等各类振动问题进行了介绍;还研究了工程中振动系统的一些动态特性,如振动系统的共振与非共振、非线性振动系统的稳定振动与不稳定振动等。

3) 注意前沿性 除介绍非线性振动系统、随机振动和波动的一般原理和求解方法外,还对分岔和混沌问题进行了介绍。

4) 重视实用性 给出了工程中振动系统及其动态特性具体利用的实例。随着工业自动化的发展,工程振动的控制技术得到了突飞猛进的发展,为此书中也叙述了非线性振动系统控制的内容。

本书共分11章,第1章介绍研究振动问题的目的及基本概念;第2章至第4章分别讨论单自由度、二自由度和多自由度系统振动的理论及应用;第5、6章讨论非线性振动系统和随机振动系统的求解方法及应用等;第7、8章讨论连续体振动和弹性波与声波及噪声的控制;第9章讨论振动的测试及动态仿真;第10、11章讨论振动的利用与控制。

本书为硕士和博士研究生而编写。为适应高级科技人才培养的需要,本书内容的选择既注意了广度,又注意了深度,因此内容较为广泛,并有一定的深度,学习起来自然会有相当的难度。对于硕士和博士研究生来说,教学的特点常常是其中一部分课程内容通过自学来掌握。为使读者自学方便,书中许多内容的讲述较为详细。此外,编写时注意读者的要求,编写内容上也考虑给读者以较大的选择机会。本书第1章至第4章可作为必读内容,而其他各章可根据读者的要求适当选择。

本书由闻邦椿、刘树英、陈照波和李鹤编著,在完成书稿过程中得到了黄文虎院士、郑兆昌教授、张文教授、张义民教授等的热情帮助,他们对本书的内容提出了不少宝贵的修改意见。在此一并向他们致以衷心的感谢。

由于水平有限,书中一定有许多不妥之处,希望读者给以指正。

作者

2008年10月28日

目 录

第 1 章 绪论 (**)	1
1.1 人类生活及工程中的振动问题	1
1.2 振动的分类及若干基本概念	3
1.3 研究振动问题的基本方法	13
1.4 振动问题的研究概况及其发展	14
计算与思考题	15
第 2 章 单自由度系统振动的理论及应用 (**)	16
2.1 单自由度系统振动微分方程式的建立	16
2.2 无阻尼单自由度系统的自由振动	18
2.3 固有频率的计算	21
2.4 等效质量与等效刚度	27
2.5 具有粘性阻尼的自由振动	32
2.6 无阻尼系统的受迫振动	36
2.7 具有粘性阻尼系统的受迫振动	41
2.8 等效粘性阻尼	46
2.9 非简谐周期激振的响应	50
2.10 非周期任意激振的响应	52
2.11 单自由度振动理论的工程应用	56
计算与思考题	62
第 3 章 二自由度系统振动的理论及工程应用 (*)	64
3.1 无阻尼二自由度系统的自由振动	64
3.2 无阻尼二自由度系统的受迫振动	68
3.3 具有粘性阻尼二自由度系统的自由振动	72
3.4 具有粘性阻尼二自由度系统的受迫振动	74
3.5 二自由度振动系统工程实例	79
计算与思考题	84

注: (**) 为一般专业研究生必读的内容。

(*) 为一般专业研究生学习参考的内容。

其他部分为根据不同专业的需要选择学习的内容。

第 4 章 多自由度系统振动的理论及工程应用 (**)	86
4.1 多自由度系统的数学模型	86
4.2 柔度影响系数与刚度影响系数	93
4.3 固有频率与主振型	98
4.4 振型向量 (模态向量) 的正交性	103
4.5 特征方程有重根和零根的情况	107
4.6 主坐标与正则坐标	111
4.7 矩阵迭代法	119
4.8 无阻尼系统的响应	126
4.9 多自由度系统的阻尼	134
4.10 有阻尼系统的响应	137
4.11 应用实例	141
计算与思考题	145
第 5 章 非线性系统的振动 (**)	148
5.1 引言	148
5.2 等价线性化法与谐波平衡法	148
5.3 多尺度法	153
5.4 渐近法	160
5.5 非线性振动方程图解方法简介	173
5.6 非线性振动系统的稳定振动与不稳定振动	179
5.7 非线性振动系统的解的一些物理性质	186
5.8 非线性振动系统的分岔与混沌简介	191
5.9 应用实例	200
计算与思考题	203
第 6 章 随机振动	205
6.1 引言	205
6.2 随机振动的基本概念	205
6.3 随机过程的幅域描述	210
6.4 随机过程的时域描述	212
6.5 随机过程的频域描述	213
6.6 单自由度系统的随机响应	216
6.7 多自由度系统的随机响应	219
计算与思考题	222
第 7 章 连续体振动	223
7.1 引言	223
7.2 弦的振动	223
7.3 轴的扭转振动	230

7.4 杆纵向激振的响应	233
7.5 梁的弯曲振动	237
7.6 薄板的振动	241
计算与思考题	245
第 8 章 弹性波与声波及噪声的控制 (*)	247
8.1 引言	247
8.2 弹性波 (应力波)	247
8.3 声波与超声波	254
8.4 噪声及其控制	260
计算与思考题	265
第 9 章 振动的测试及动态仿真	266
9.1 引言	266
9.2 振动测试的主要内容	266
9.3 振动测试系统及传感器	267
9.4 振动测试的主要方法	274
9.5 试验模态分析	280
9.6 振动系统的动力学修改与灵敏度分析	284
9.7 振动系统动态仿真的内容与方法	288
计算与思考题	292
第 10 章 振动的利用 (*)	294
10.1 引言	294
10.2 线性振动与近似于线性振动的利用	294
10.3 非线性振动的利用	302
10.4 波及波能的利用	317
10.5 振动规律在社会经济及生物工程领域中的应用	320
计算与思考题	321
第 11 章 振动的抑制与控制 (*)	323
11.1 引言	323
11.2 隔振器的种类与特点	325
11.3 简谐激励的隔振和冲击隔离	330
11.4 吸振与动力吸振器	334
11.5 转子的静平衡与动平衡	340
11.6 振动主动控制简介	344
11.7 振动半主动控制简介	350
11.8 混合控制简介	353

计算与思考题	355
参考文献	357

第 1 章 绪 论

1.1 人类生活及工程中的振动问题

在人类生活的物质世界里, 振动 (包括波动) 随处可见, 这不只是说人的周围环境存在着振动, 而且人体自身的许多器官及循环系统也都处在持续的振动之中。人类很早就开始和那些有害的振动展开了百折不挠的斗争, 总是千方百计地预防和限制以至消除它带来的危害, 如对待地震就是如此; 另一方面, 人类也设法利用那些有用的振动, 使它更好地为人民服务, 为人类造福。

振动的种类繁多, 形式各异, 它们存在于各个角落、各种场所和各个部门。例如, 建筑物的振动、机器的振动、地震、声和光的波动、无线电技术和电工学中的振动、磁系中的振动、控制系统中的振动、同步加速器与火箭发动机中的振动。此外, 还有生物力学及生态学中的振动, 化学反应过程中的振动, 以及社会经济领域中的振动等。

自然界与工程技术各部门中存在的振动可分为线性振动与非线性振动两大类。就机械振动而言, 线性振动是指该系统中的恢复力、阻尼力和惯性力分别是位移、速度和加速度的线性函数, 即它们之间的关系在直角坐标系中呈直线变化的形式。不具备上述线性关系的振动则称为非线性振动。

线性振动可以由线性微分方程式加以描述。一般机械系统的线性振动方程可表示为

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

式中, m 为振动质量; c 为阻尼系数; k 为弹簧刚度; \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别为振动的加速度、速度和位移; $f(t)$ 为干扰力或激振力; t 为时间。

式 (1-1) 中的惯性力 $m\ddot{x}$ 、阻尼力 $c\dot{x}$ 及弹性力 (或称恢复力) kx 分别是加速度 \ddot{x} 、速度 \dot{x} 及位移 x 的线性函数, 也就是说质量 m 、阻尼系数 c 、弹簧刚度 k 为常数, 所以方程 (1-1) 是线性微分方程, 用线性微分方程描述的振动系统称为线性系统。

非线性振动可以由非线性微分方程加以描述。多数机械系统的非线性方程可表示为

$$m\ddot{x} + f_c(\dot{x}, x) + f_k(\dot{x}, x) = f(t) \quad (1-2)$$

式中, $f_c(\dot{x}, x)$ 为非线性阻尼力; $f_k(\dot{x}, x)$ 为非线性弹性力。

在某些特殊情况下, 惯性力、阻尼力和弹性力是加速度 \ddot{x} 、速度 \dot{x} 及位移 x 的非线性函数, 这时非线性方程式为

$$f_m(\ddot{x}, \dot{x}, x) + f_c(\ddot{x}, \dot{x}, x) + f_k(\ddot{x}, \dot{x}, x) = f(t) \quad (1-3)$$

式中, $f_m(\ddot{x}, \dot{x}, x)$ 为非线性惯性力; $f_c(\ddot{x}, \dot{x}, x)$ 为非线性阻尼力; $f_k(\ddot{x}, \dot{x}, x)$ 为非线性弹性力。

在非线性振动的微分方程式中,非线性惯性力、非线性阻尼力或非线性弹性力不是加速度 \ddot{x} 、速度 \dot{x} 及位移 x 的线性函数,也就是说,惯性力、阻尼力或弹性力并不分别与加速度 \ddot{x} 、速度 \dot{x} 及位移 x 的一次方成正比。

在某些振动系统中,干扰力也是加速度 \ddot{x} 、速度 \dot{x} 及位移 x 的非线性函数,其表示式为 $f(\ddot{x}, \dot{x}, x, t)$ 。这类方程也是非线性方程。

自然界与工程技术各部门中的振动,严格地说,绝大多数都属于非线性振动这一类。在许多情况下,不少弱非线性振动可近似地按线性振动来处理。但也有不少非线性振动问题若用线性问题来处理,不仅会有较大误差,而且会发生质的错误。

随着工业生产与科学技术的迅速发展,在工程技术各部门中遇到的大量振动问题亟待进行深入研究和解决。对这类问题的研究工作大致可以分为以下三方面的内容:① 振动的机理;② 振动的抑制和控制;③ 振动的利用。

1. 有关振动的机理

目前在工程技术部门中,许多振动问题机理的研究还很不深入,或者说还没有获得充分的研究,特别是有关非线性振动问题的研究。例如,对于一些在复杂非线性因素作用下的强非线性多自由度系统的精确求解、复杂时变过程的特性、复杂系统失稳的机理、复杂自激振动的起因和发展过程,一些重大机械设备产生重大事故和发生破坏的原因,亚谱分岔解的形成,混沌运动的产生等。

2. 有关振动的抑制与控制

在很多情况下,振动是有害的。当振动量超出容许的范围后,振动将会影响机器的工作性能,使机器的零部件产生附加的动载荷,从而缩短其使用寿命。机器的强烈振动还会影响周围仪器仪表的正常工作,严重影响其度量的精确度,甚至给生产造成重大损失。振动往往还会产生巨大的噪声,污染环境,损害人们的健康,已成为最引人关注的公害之一。例如,某矿井多绳提升机,由于其减速装置产生强烈振动,曾被迫降速减载运行,严重影响了该提升机的工作性能;某露天矿用潜孔钻机冲击器的缸体曾因冲击振动而导致缸壁产生纵向裂纹;风动凿岩机的高频冲击产生强烈的噪声,严重影响作业环境和工人的健康。

在抑制与控制有害振动的研究工作方面,存在着大量问题亟待解决。众所周知,地震会给人民的生命财产造成重大损失。但目前有关地震的预报及预防还停留在有限的水平上,直到现在还没有一种较完善和可靠的技术对地震进行准确的监测、预报和预防。在国内外,重大机械设备屡屡发生严重的破坏事故,每一事故的发生都会造成重大的经济损失,目前虽已研制出一些可进行在线监测和诊断的设备,但其准确性和可靠性还没有达到理想的地步。火箭发射失败常常也是由于振动或控制失灵所引起的,提高其工作可靠性仍是研究工作者一项迫切的任务。在水下航行的潜艇,由于噪声过大,极易暴露目标,如何降低噪声和对噪声进行控制,自然是研究开发与设计潜艇的头等重要的课题。因此,加强对振动抑制和控制的研究是一项十分迫切的任务。

3. 有关振动的利用

近 50 多年来振动的利用得到了迅速的发展,在人类生活与生产活动中几乎任何时刻都离不开振动。目前,振动已成为人类生活与工农业生产各领域一种不可缺少的手段和必要的机制。例如,一些作物的种子采用射线适当处理,可以提高产量;在医疗方面,利用超声可治疗与诊断多种疾病;在工程地质领域,利用振动可以对地下资源进行勘探;在石油开采工作

中, 利用振动可提高原油产量; 在海洋工程方面, 海浪波动的能量可以用来发电; 在土建工程中广泛利用了振动, 例如振动沉拔桩、振动夯土、用筑路机械振动压实(压路)与振动摊铺以及浇灌混凝土时的振动捣实等; 在冶金、煤炭、化工、轻工、机械、电力、食品加工等部门, 广泛应用振动给料、振动输送、振动筛分、振动冷却、振动烘干、振动破碎、振动粉磨和振动脱水等作业过程; 在电子仪器和仪表及通信工程方面, 如录音机、电视机、收音机、程控电话、电子计时装置和通信设备中使用的谐振器等都是由于利用了振动才能有效地工作; 人类借助于电磁波实现无线电通信, 传递信息, 成为当今信息时代人类相互联系不可缺少的桥梁和纽带; 光在光导纤维中的传播也是一种特殊形式的波, 利用光纤代替导线, 其重大的应用价值是无法估量的。从前面举出的一些例子不难看出, 振动对人类的生活和生产十分重要。这些问题的研究和解决将会大大地促进工农业生产和科学技术的发展, 并造福于人类。

1.2 振动的分类及若干基本概念

1.2.1 振动的分类

机械振动可根据不同的特征加以分类。

1. 按振动的输入特性分

自由振动 系统受到初始激励作用后, 仅靠其本身的弹性恢复力自由地振动, 其振动的特性仅决定于系统本身的物理特性(质量 m 、刚度 k)。

受迫振动 又称强迫振动, 系统受到外界持续的激振作用而被迫地产生振动, 其振动特性除决定于系统本身的特性外, 还决定于激励的特性。

自激振动 有的系统由于具有非振荡性能源或反馈特性, 从而产生一种稳定持续的振动。

2. 按振动的周期特性分

周期振动 振动系统的某些参量(如位移、速度、加速度等)在相等的时间间隔内作往复运动。往复一次所需的时间称为周期; 每经过一个周期以后, 运动又重复前一周期的全过程如图 1-1 所示。

非周期振动 振动系统的参量变化没有固定的时间间隔, 即没有一定的周期, 如图 1-2 所示。

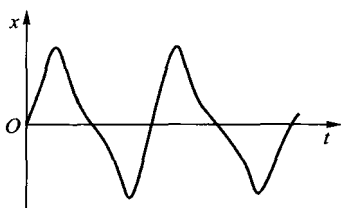


图 1-1 周期振动

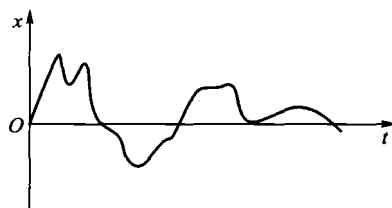


图 1-2 非周期振动

3. 按振动的输出特性分

简谐振动 可以用简单正弦函数或余弦函数表述其运动规律的振动。显然, 简谐振动属于周期性振动。

非简谐振动 不可以直接用简单正弦函数或余弦函数表述其运动规律的振动,如图 1-2 所示的振动。非简谐振动也可能是周期性振动。

随机振动 不能用简单函数或简单函数的组合来表述其运动规律,而只能用统计的方法来研究其规律的非周期性振动,如图 1-2 所示。

4. 按振动系统的结构参数特性分

线性振动 振动系统的惯性力、阻尼力、弹性恢复力分别与加速度、速度、位移成线性关系,系统中质量、阻尼和刚度均为常数,该系统的振动可用常系数线性微分方程表述。

非线性振动 振动系统的阻尼力或弹性恢复力具有非线性性质,系统的振动可以用非线性微分方程表述。

5. 按振动系统的自由度数目分

单自由度系统 确定系统在振动过程中任何瞬时的几何位置只需要一个独立坐标的振动。

多自由度系统 确定系统在振动过程中任何瞬时的几何位置需要多个独立坐标的振动。

无限多个自由度系统 弹性体需用无限多个独立坐标确定系统在振动过程中任何瞬时的几何位置。

6. 按振动的位移特征分

纵向振动 振动体上的质点沿轴线方向发生位移的振动。

横向振动 振动体上的质点在垂直于轴线方向发生位移的振动。

扭转振动 振动体上的质点作绕轴线方向发生位移(角位移)的振动。

纵向振动和横向振动又统称为直线振动,扭转振动又称为角振动。

摆的振动 振动体上的质点在平衡位置附近作弧线运动。

1.2.2 振动系统的物理参数(质量、刚度、阻尼与干扰力)及特性

1. 质量及其特征

质量是衡量物质惯性大小的量,表征系统物理特征。质量包括集中质量、分布质量和转动惯量。

2. 刚度及其特征

当质量的位移(即弹性元件的变形)为 x , 弹性元件的弹性力(等于施加的外力)为 F_k 时,弹性力和位移的关系可表示为

$$F_k = f(x) \quad (1-4)$$

式中, F_k 为弹性元件的刚度特性,表示了系统内部弹性力的变化性质。各种弹性元件的刚度特性如图 1-3 所示。

当位移很小时,作为一阶近似,各种刚度特性曲线均可用过原点的切线代替,即

$$F_k = kx \quad (1-5)$$

前述将弹性元件的弹性力与位移的关系简化为线性关系,称为线性化。如果线性化以后改变了振动系统的性质,则应按非线性特性处理。

式(1-5)表明,弹性元件的弹性力 F_k 与位移 x 的一次方成正比,其比例系数 k 即产生单位位移(线位移或角位移)所需的载荷(力或力矩)称为刚度,其单位是 N/cm , 或 $\text{N} \cdot \text{cm/rad}$ 。

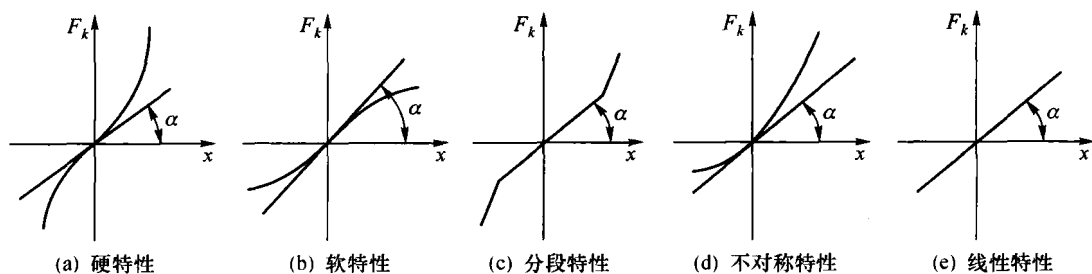


图 1-3 各种刚度特性曲线

下面举例说明根据此定义计算弹性元件的刚度。

如图 1-4 所示, 悬臂梁端部作用一物体, 若不计梁质量的影响, 求梁端点的弯曲刚度。

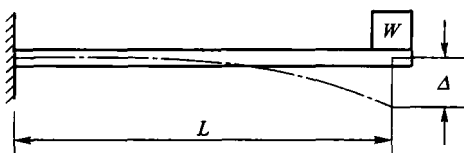


图 1-4 悬臂梁的刚度计算图

由材料力学知, 梁端受物体的重力作用产生的弯曲挠度 (变形) 为

$$\Delta = \frac{WL^3}{3EJ} \quad (1-6)$$

式中, E 为梁材料的弹性模量; J 为梁截面对中性轴的惯性矩; W 为物体的重力; L 为梁的计算长度。

这时梁端点的刚度应为

$$k_{\Delta} = \frac{W}{\Delta} = \frac{3EJ}{L^3} \quad (1-7)$$

实际系统中的同一构件所受载荷不同, 在研究不同方向的振动时, 构件具有不同的刚度表示。

一简支的等截面轴如图 1-5 所示, 轴的截面面积为 A (cm^2), 长度为 L (cm), 轴截面惯性矩为 J (cm^4), 极惯性矩为 J_p (cm^4), 材料的弹性模量为 E (N/cm^2), 剪切弹性模量为 G (N/cm^2)。

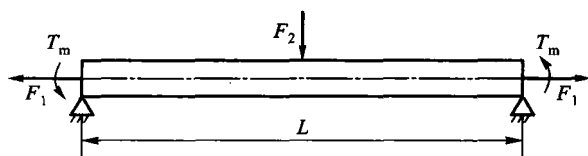


图 1-5 轴的刚度计算图

当轴受到轴向载荷 F_1 (N) 的作用时, 产生的轴向变形为

$$\delta = \frac{F_1 L}{EA}$$