



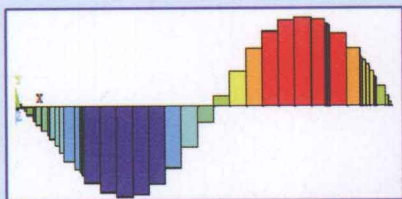
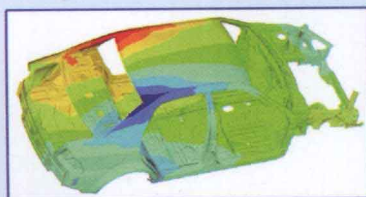
普通高等教育“十二五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU "12·5" GUIHUA JIAOCAI

机械振动学

(第2版)

闻邦椿 刘树英 张纯宇 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press



普通高等教育“十二五”规划教材

机械振动学

(第2版)

闻邦椿 刘树英 张纯宇 编著

北京
冶金工业出版社
2011

内 容 提 要

本书是为高等院校机械类专业本科生编写的简明教材。首先论述机械振动的若干基本概念及其种类和特点；然后分别论述单自由度系统的自由振动和受迫振动及其应用，二自由度系统的自由振动和受迫振动及其应用，多自由度系统的振动及应用，单自由度非线性系统的振动；最后简要介绍振动的利用与控制。每章后附有一定量的思考题、习题及参考答案。

本书可作为高等院校机械工程类专业本科生的教材，也可供相关领域的科研与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械振动学/闻邦椿, 刘树英, 张纯宇编著. —2 版. —北京:
冶金工业出版社, 2011. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5024-5648-1

I. ①机… II. ①闻… ②刘… ③张… 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 (2011) 第 139825 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010) 64027926 电子信箱 yjcbbs@cnmip.com.cn

责任编辑 宋 良 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-5648-1

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销
2000 年 2 月第 1 版; 2011 年 8 月第 2 版, 2011 年 8 月第 1 次印刷
787mm × 1092mm 1/16; 14 印张; 336 千字; 211 页

28.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

第2版前言

随着国民经济的发展和现代工业对工程质量、产品精度及其可靠性方面要求的提高，振动理论已成为科研人员和工程技术人员正确进行产品设计、结构优化以及开发新产品等必备的基础知识。因此，机械振动学课程也成为高等工科院校机械工程类专业学生必修的基础理论课之一。

振动是日常生活和工程实际中普遍存在的一种现象，人类就生活在振动的世界里，地面上的车辆、空中的飞行器、海洋中的船只等都在振动着，房屋建筑、桥梁水坝等受到激励后也会发生振动。人类自身的许多器官每时每刻都处在振动之中，例如，心脏的跳动、脉搏的搏动、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。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。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。

本书主要介绍机械振动的一般理论及其在工程中的应用。首先介绍在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、振动力学模型及振动的分类；然后叙述单自由度系统无阻尼、有阻尼的自由振动和受迫振动及其应用；接着叙述无阻尼、有阻尼二自由度系统的自由振动和受迫振动，着重介绍振动方程的建立和求解的一般方法及其在工程中的应用；还介绍多自由度系统的振动，着重介绍用矩阵法建立系统的振动方程、矩阵迭代法求固有频率及振型、坐标变换与解耦，并举出若干应用实例；而后介绍单自由度非线性系统的振动；最后简要介绍

振动的利用与控制。每章后附有一定量的思考题、习题及参考答案，以便巩固和消化所学课程的基本内容。

本书曾作为东北大学和其他某些高等院校机械类本科生教材使用多年。此次在2000年版《机械振动学》的基础上做了较大的修订，如增添了振动利用与控制性等内容。书中吸收了作者多年积累的教学经验和最新科研成果，使其更具有科学性和实用性。本书的特点是：(1) 突出实践性，讲解振动问题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，本书系统地介绍了单自由度、二自由度和多自由度的振动问题，既突出重点又照顾一般，能够在有限的课时内提供尽可能多的信息和本科生应具有的必要知识；(3) 注意先进性，把最新研究成果引入本书中，介绍了振动（波动）的利用与控制及单自由度非线性振动的理论和求解方法，使本教材具有先进性；(4) 重视实用性，特别注意有关理论与工程用机械的联系，给出了工程振动系统及其动态特性具体利用实例，使理论的应用更具有典型性和鲜明性。

本书由闻邦椿、刘树英、张纯宇编著。在编写和出版过程中，编者所在单位东北大学机械工程与自动化学院给予了大力支持，韩清凯、任朝晖、赵春雨、李鹤、孙伟、李小彭、马辉、姚红良、李朝峰等同志参与了书稿内容的讨论及整理工作，在此一并向他们表示衷心感谢。

由于水平所限，书中不妥之处，诚望读者给以指正。

编者
2011年5月

第 1 版前言

振动理论及其应用技术的发展已经取得了引人注目的成就，有力地推动了设计与新产品的不断出现。随着现代工业对工程质量、产品精度及其可靠性方面要求的提高，振动理论已经成为工程技术人员正确进行产品设计、结构优化以及开发新产品等必备的基础知识。因此，机械振动学课程已经成为高等工科院校机械工程类专业学生必修的基础理论课之一。目前，国内出版发行的几种教材和著作均已使用多年，根据国家教委新近颁布的专业目录和高等学校机械工程类专业四年制本科教学大纲的要求，我们编写了这本教材。

本书内容：第一章概论，叙述了振动的基本概念、振动力学模型、振动的分类、振动在国民经济建设中的应用及地位；第二章及第三章叙述了单自由度系统的振动，包括无阻尼、有阻尼的自由振动和受迫振动、隔振原理及其应用，重点是建立起振动学基本概念及对其重要性的认识；第四章叙述了无阻尼及有阻尼二自由度系统的自由振动和受迫振动，着重介绍系统振动方程的建立和求解的一般方法及其在工程中的应用；第五章叙述多自由度系统的振动，着重介绍矩阵法建立系统振动方程，求固有频率及固有振型的矩阵迭代法，坐标变换与解耦，并举出了若干应用实例；第六章介绍单自由度非线性系统的振动。书中带“*”号部分可留给学生自学。书后给出了一定量习题与答案，以便巩固和消化所学课程的基本内容。

本书曾作为东北大学本科内部教材使用多年。此次出版是在原有基础上进行了重新编写。书中吸收了作者多年积累的教学经验和本学科科学研究的成果，使其更具有科学性和实用性。本书的特点是简明扼要，既突出重点又照顾一般，能够在有限的课时内提供尽可能多的信息和本科生应具有的必要知识。在编写过程中，我们特别注意了有关理论基础与工程用机械的联系，使理论的应用更具有典型性和鲜明性，并且尽量反映近年来国内外有关的最新研究成果，使本教材具有先进性。

担任本书主审的有：大连理工大学马孝江教授，东北大学张维屏教授、关立章教授。在此对三位教授表示衷心感谢。

本书在编写出版过程中，得到了东北大学等院校许多老师的指导并提供资料，冶金工业出版社教材编辑室同志给予大力帮助和支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促及我们的水平有限，对书中可能存在的疏漏之处，恳切希望师生及读者不吝赐教。

编者
1999年10月

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价(元)
机电一体化技术基础与产品设计(第2版)	刘 杰 等编	46.00
现代机械设计方法(第2版)(本科教材)	臧 勇 主编	36.00
机械可靠性设计(本科教材)	孟宪铎 主编	25.00
机械优化设计方法(第3版)(本科教材)	陈立周 主编	29.00
机械电子工程实验教程(本科教材)	宋伟刚 等编	29.00
液压与气压传动实验教程(本科教材)	韩学军 等编	25.00
机器人技术基础(本科教材)	柳洪义 等编	23.00
机械制造装备设计(本科教材)	王启义 主编	35.00
环保机械设备设计(本科教材)	江 晶 编著	45.00
机械制造工艺及专用夹具设计指导(第2版)	孙丽媛 主编	20.00
机械基础实验综合教程(本科教材)	常秀辉 主编	32.00
机械工程材料(本科教材)	王廷和 主编	22.00
液压传动与气压传动(本科教材)	朱新才 主编	39.00
电液比例与伺服控制(本科教材)	杨征瑞 等编	36.00
工业设计概论(本科教材)	刘 涛 主编	26.00
工业产品造型设计(本科教材)	刘 涛 主编	25.00
包装设计与制作(本科教材)	刘 涛 主编	22.00
轧钢机械(第3版)(本科教材)	邹家祥 主编	49.00
炼铁机械(第2版)(本科教材)	严允进 主编	38.00
炼钢机械(第2版)(本科教材)	罗振才 主编	32.00
冶金设备(本科教材)	朱 云 主编	49.80
冶金设备及自动化(本科教材)	王立萍 等编	29.00
金属学与热处理(本科教材)	陈惠芬 主编	39.00
炼铁设备及车间设计(第2版)(高职国规教材)	万 新 主编	29.00
炼钢设备及车间设计(第2版)(高职国规教材)	王令福 主编	25.00
机电一体化系统应用技术(高职高专教材)	杨普国 主编	36.00
液压传动(高职高专教材)	孟廷军 主编	25.00
通用机械设备(第2版)(高职高专教材)	张庭祥 主编	26.00
高炉炼铁设备(高职高专教材)	王宏启 等编	36.00
机械工程材料(高职高专教材)	于 钧 主编	32.00
机械制造工艺与实施(高职高专教材)	胡运林 编	39.00
金属材料热加工技术(高职高专教材)	甄丽萍 主编	37.00
采掘机械(高职高专教材)	苑忠国 主编	38.00
矿山固定机械使用与维护(高职高专教材)	万佳萍 主编	39.00
矿冶液压设备使用与维护(高职高专教材)	苑忠国 主编	27.00
机械设备维修基础(高职高专教材)	闫家琪 等编	28.00
冶金通用机械与冶炼设备(高职高专教材)	王庆春 主编	45.00
液力偶合器使用与维护 500 问	刘应诚 编著	49.00
液力偶合器选型匹配 500 问	刘应诚 编著	49.00
液压可靠性与故障诊断(第2版)	湛丛昌 等著	49.00
矫直原理与矫直机械(第2版)	崔 甫 著	42.00

目 录

1 概论	1
1.1 人类生活及工程中的振动问题	1
1.2 机械振动的分类及若干基本概念	3
1.2.1 机械振动的分类	3
1.2.2 振动系统的若干基本概念	4
1.3 振动系统的简化及力学模型的建立	6
1.3.1 自由度的概念	6
1.3.2 振动系统力学模型的建立	6
1.4 振动系统的物理参数（质量、刚度、阻尼与干扰力）及特性	9
1.4.1 质量及其特征	9
1.4.2 刚度及其特征	9
1.4.3 阻尼及其特征	11
1.4.4 干扰力（激振力）及其特征	11
1.5 简谐振动及其表示法	11
1.5.1 简谐振动的运动学特征	11
1.5.2 简谐振动的表示法	12
思考题	14
2 单自由度系统振动的理论及应用	15
2.1 单自由度系统振动微分方程的建立	15
2.1.1 纵向振动微分方程的建立	15
2.1.2 扭转振动微分方程的建立	16
2.1.3 微幅摆动微分方程的建立	16
2.2 无阻尼单自由度系统的自由振动	17
2.3 固有频率的计算	20
2.3.1 静变形法	20
2.3.2 能量法	20
2.3.3 瑞利法	22
2.4 等效质量与等效刚度	25
2.4.1 等效质量	25
2.4.2 等效刚度	26
2.5 具有黏性阻尼单自由度系统的自由振动	29

2.5.1	具有黏性阻尼的自由振动	29
2.5.2	黏性阻尼对自由振动的影响	30
2.6	无阻尼系统的受迫振动	33
2.6.1	受迫振动的稳态振动	34
2.6.2	受迫振动的过渡过程	37
2.6.3	“拍振”现象	37
2.7	具有黏性阻尼系统的受迫振动	38
2.7.1	简谐激振的响应	38
2.7.2	影响振幅的主要因素	39
2.7.3	引起的受迫振动实例	40
2.8	等效黏性阻尼	43
2.8.1	简谐激振力在一个周期内做的功	44
2.8.2	阻尼力在一个周期内所消耗的能量	45
2.8.3	等效黏性阻尼	45
2.9	非简谐周期激振的响应	46
2.10	非周期任意激振的响应	49
2.11	单自由度振动理论的工程应用	53
2.11.1	单圆盘转子的临界转速	53
2.11.2	隔振原理及应用	54
2.11.3	单自由度系统的减振	56
	习题及参考答案	59
3	二自由度系统振动的理论及工程应用	63
3.1	系统振动微分方程的建立	63
3.1.1	应用牛顿第二定律建立系统振动微分方程式	63
3.1.2	应用动静法(达伦培尔原理)建立系统振动微分方程式	64
3.1.3	应用拉格朗日方程的方法建立系统振动微分方程式	65
3.2	振动方程的一般形式及其矩阵表达式	68
3.2.1	作用力方程的一般形式及其矩阵表达式	68
3.2.2	位移方程的一般形式及其矩阵表达式	69
3.3	耦联与质量矩阵	70
3.3.1	弹性耦联和惯性耦联	70
3.3.2	质量矩阵和惯性影响系数	72
3.4	无阻尼二自由度系统的自由振动	73
3.4.1	固有频率和主振型	73
3.4.2	初始条件的响应	76
3.5	无阻尼二自由度系统的受迫振动	77
3.6	具有黏性阻尼二自由度系统的自由振动	81
3.7	具有黏性阻尼二自由度系统的受迫振动	84

3.7.1	受迫振动方程及其通解	84
3.7.2	求受迫振动方程稳态解的一般方法	84
3.7.3	求受迫振动方程稳态解的复数法	85
3.8	二自由度振动系统工程实例	89
3.8.1	双轴惯性式旋振机的振动	89
3.8.2	双质体弹性连杆式振动机的振动	91
	习题及参考答案	94
4	多自由度系统振动的理论及工程应用	101
4.1	多自由度系统的振动方程式	101
4.1.1	多自由度系统的作用力方程	101
4.1.2	多自由度系统的位移方程	102
4.2	刚度影响系数与柔度影响系数	103
4.2.1	刚度影响系数与刚度矩阵	103
4.2.2	柔度影响系数与柔度矩阵	106
4.3	固有频率与主振型	109
4.3.1	固有频率	109
4.3.2	主振型	111
4.4	主振型的正交性	116
4.5	特征方程有重根和零根的情况	119
4.5.1	特征方程重根的情况	119
4.5.2	特征方程零根的情况	121
4.6	主坐标与正则坐标	122
4.6.1	主坐标	122
4.6.2	正则振型矩阵与正则坐标	124
4.7	矩阵迭代法	128
4.8	无阻尼系统的响应	135
4.8.1	对初始条件的响应	135
4.8.2	对激励的响应	138
4.9	多自由系统的阻尼	142
4.9.1	比例阻尼	142
4.9.2	振型阻尼	143
4.10	有阻尼系统的响应	144
4.10.1	简谐激振的响应	144
4.10.2	周期激振的响应	147
4.11	应用实例	149
4.11.1	浮阀隔振系统	149
4.11.2	齿轮轴的扭振	150
4.11.3	汽车的三自由度模型	150

习题及参考答案	153
5 单自由度非线性系统的振动	157
5.1 非线性振动系统的分类及实例	157
5.1.1 惯性力项为非线性的振动系统	157
5.1.2 阻尼力项为非线性的振动系统	158
5.1.3 弹性力项为非线性的振动系统	159
5.2 求解非线性振动系统的方法	161
5.3 等价线性化法	162
5.4 传统小参数法与多尺度法	165
5.4.1 传统小参数法	165
5.4.2 多尺度法	166
5.5 渐近法	170
5.5.1 自治系统	170
5.5.2 非自治系统	175
5.6 非线性振动系统的某些物理性质	179
习题及参考答案	181
6 振动利用与振动控制	183
6.1 引言	183
6.2 振动的利用	184
6.2.1 线性振动与近似于线性振动的利用	184
6.2.2 非线性振动的利用	189
6.2.3 波及波能的利用	191
6.2.4 振动规律在社会经济及生物工程领域中的应用	194
6.3 振动的抑制与控制	195
6.3.1 吸振与动力吸振器	196
6.3.2 动力消振	202
6.3.3 阻尼减振	202
6.3.4 隔振	202
6.3.5 振动主动控制简介	202
6.3.6 振动半主动控制简介	205
6.3.7 混合控制简介	207
习题及参考答案	209
参考文献	211

1 概 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，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，建筑物的振动和机器的振动、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。

在多数情况下，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，从而缩短使用寿命；强烈的机器振动还会影响周围的仪器仪表正常工作，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，这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，被迫降速减载运行，严重影响了该提升机的工作性能；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。

在许多场合，振动是有益的。利用振动可有效地完成许多工艺过程，或用来提高某些机器的工作效率。例如，利用振动可以使物料在振动体内运动，输送或筛分物料；利用振动可以减少物料的内摩擦及物料的抗剪强度，进行充填或将物料密实；利用振动还可降低松散物料对贯入物体的阻力，从而提高作业机械的生产率；利用振动可以提高物料在烘干箱内的干燥效率，节省能源；利用振动还可以完成破碎粉磨、成形、整形、冷却、脱水、落砂、光饰、沉拔桩等各种工艺过程。因此，随着各种不同的工艺要求，就出现了各种类型的振动机械，如振动输送机、振动筛分机、振动破碎机、振动磨机、振动成形机、振动整形机、振动冷却机、振动脱水机、振动落砂机、振动光饰机、振动沉拔桩机、振动压路机、振动装载机等，已经在不同的生产工艺过程中发挥了重要作用。

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：

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

式中, m 为振动质量; r 为阻力系数; k 为弹簧刚度; \ddot{x} , \dot{x} , x 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 $r\dot{x}$ 及弹性力(或称为恢复力) 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 、阻力系数 r 、弹簧刚度 k 为常数, 所以方程式(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:

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

式中, $f_r(\dot{x}, x)$ 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:

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

式中, $f_m(\ddot{x}, \dot{x}, x)$ 为非线性惯性力; $f_r(\ddot{x}, \dot{x}, x)$ 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 3 个方面的内容:

(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、一些重要机械设备发生重大事故和发生破坏的原因、亚谐分岔解的形成、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, 必须对其进行抑制与控制。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的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, 几乎在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等方面的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、筑路机械的振动压实(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, 广泛应用振动給料、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, 利用光纤来代替通电的导线, 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是多么的重要! 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 机械振动的分类及若干基本概念

1.2.1 机械振动的分类

机械振动可根据不同的特征分为不同的种类:

(1) 按振动的输入特性分, 机械振动可分为自由振动、受迫振动和自激振动。

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, 其振动的特性仅取决于系统本身的物理特性(质量 m 、刚度 k)。

受迫振动: 又称为强迫振动, 系统受到外界持续的激振作用而“被迫地”产生振动, 其振动特性除取决于系统本身的特性外, 还取决于激励的特性。

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, 机械振动可分为周期振动和非周期振动。

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做往复运动。往复一次所需的时间间隔称为“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: 即瞬态振动, 振动系统的参量的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。

(3) 按振动的输出特性分, 机械振动可分为简谐振动、非简谐振动和随机振动。

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 1-1

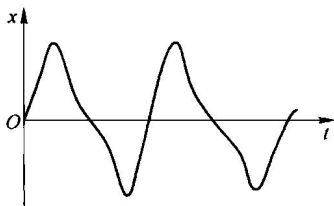


图 1-1 周期振动

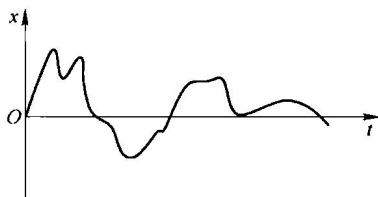


图 1-2 非周期振动

所示的振动。非简谐振动也可能是周期振动。

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，机械振动可分为线性振动和非线性振动。

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、位移呈线性关系，系统中质量、阻力系数和刚度均为常数，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，机械振动可分为单自由度系统振动、多自由度系统振动和无限多个自由度系统振动。

单自由度系统振动：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。

多自由度系统振动：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振动：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，机械振动可分为纵向振动、横向振动、扭转振动和摆的振动。

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：振动体上的质点做绕轴线方向发生位移(角位移)的振动。

摆的振动：振动体上的质点在平衡位置附近做弧线运动。

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。

1.2.2 振动系统的若干基本概念

机械振动是一种特殊形式的机械运动，可以解释为：机器或结构物在其静平衡位置附近所做的“往复运动”。这个往复运动的机器或结构物称为振动体。实际中为了便于说明问题，人们总是把振动体假设成没有弹性而只有集中质量的刚体，并且把它与一个被忽视了质量而只具有弹性的弹簧联系在一起，组成一个“弹簧-质量”系统，称为振动系统。简化后的单自由度弹簧-质量系统力学模型见图 1-3。

如图 1-3 所示, 当物体 (振动体) 处于静力平衡位置 (即图 1-3(a) 所示位置) 时, 物体的重力与支持它的弹簧的弹性恢复力相互平衡, 其合力 $F=0$, 所以物体处于静止状态, 物体的速度 $v=0$, 加速度 $a=0$ 。

当物体受到向下的冲击力作用便向下运动, 弹簧被拉伸。随着弹簧越来越拉长, 弹簧的恢复力逐渐增大, 物体做减速运动。当物体的运动速度减少到 $v=0$ 时, 物体运动到最低位置 (图 1-3(b) 所示位置), 此时由于弹簧的恢复力大于物体的重力, 所以合力 F 的方向向上, 物体产生向上的加速度 a , 物体即转而向上运动。

当物体返回到平衡位置 (图 1-3(c) 所示位置) 时, 它所受的重力与弹簧弹性力的合力 F 又为零。但由于物体的惯性作用, 物体继续向上运动。随着物体向上运动, 弹簧逐渐被压缩, 则弹性恢复力渐渐增大, 且与重力的合力方向向下, 所以物体又做减速运动; 当物体向上运动的速度减少到零时, 物体即运动到最高位置 (图 1-3(d) 所示位置), 此时由于被压缩弹簧的弹性恢复力与重力的合力 F 大于惯性力, 物体又开始向下运动, 直至再次回到平衡位置 (图 1-3(e) 所示位置)。此后, 由于惯性的作用, 物体继续向下运动, 重复前面的运动过程。如此物体在其平衡位置附近做往复运动。当系统内无阻尼存在时, 这种往复运动将进行无穷次。

物体从平衡位置起始, 向下运动到最低位置, 然后向上运动, 经过平衡位置继续向上运动至最高位置, 然后再向下运动回到平衡位置, 即从图 1-3(a) 到图 1-3(e), 算做完成一次振动。物体完成一次振动所占用的时间称为周期。振动物体每经过一个周期后, 便重复前一个周期全部过程。周期以 T 表示, 单位为 s。

单位时间内振动的次数称为频率, 它是周期的倒数。以 f 表示频率 (Hz 或 1/s), 即:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1-4)$$

研究振动问题的目的是: 根据生产实际中提出的各种各样的振动问题, 不断地认识和掌握各种情况下机械振动的规律, 以便控制振动的危害, 发挥其有益的作用。由此就提出了进行机械或结构的振动分析和振动设计这两个方面的问题。前者的问题大致可分为三类: 第一类是固有特性问题, 如振动系统的固有频率、固有振型等; 第二类是振动的响应问题, 即振动系统受外界激励作用而产生的振动效应, 其中一方面是研究振动引起的结构动态变形、其加速度是否超出允许值以及所产生的噪声等; 另一方面是研究构件动应力、结构疲劳强度或其寿命等问题; 第三类问题是振动的稳定性问题, 即研究影响系统稳定性的主要因素以及确定稳定性临界条件等。

振动设计或振动控制是振动分析的逆问题, 其主要任务是在产品设计中采取必要措施来满足振动要求, 如避开共振、限制振动响应水平、不使发生自激振动等。但由于问题的复杂性, 一般仍将问题转化为振动分析问题来处理, 即先根据经验选取振动系统的质量, 确定其系统刚度分布以及必要时外加减振装置等; 然后再分析其固有特性、振动响应及其振动稳定性问题。

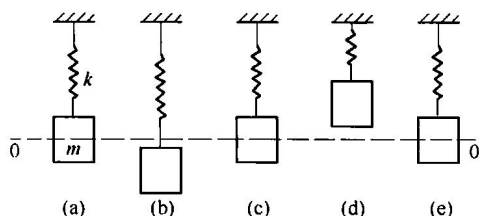


图 1-3 弹簧-质量系统力学模型