

振动传感

与

驱动原理

刘 宇 路永乐 欧 毅 方 针 著
刘期烈 闫 河 邓 杰 陈永炜



科学出版社

振动传感与驱动原理

刘 宇 路永乐 欧 毅 方 针 著
刘期烈 闫 河 邓 杰 陈永炜

科学出版社

北 京

内 容 简 介

振动是宇宙普遍存在的一种现象。振动原理被广泛应用于音乐、建筑、医疗、制造、建材、探测、军事等领域,其又可划分出许多细小的分支,对任何分支的深入研究都能够促进科学的向前发展,推动社会进步。振动传感是一个有巨大发展潜力的领域,基于振动原理的传感器及其系统极大地影响我们的生活方式和工作方式。振动能量收集作为振动传感的逆过程,同样具有重要的理论研究意义和实际应用价值。本书在参考国内外其他学者研究方法的基础上,根据近几年的研究成果,较系统地论述了振动与振动系统,基于电学和光学激励的振动与控制,集中研究目前主要的振动传感器及其应用,提出多种振动传感器结构与传感原理。本书同时也对振动能量收集技术进行理论研究和应用设计。

本书适用于光电信息类、机械电子类和电子信息类及计算机应用等专业高年级本科生、研究生、教师和科研人员,也可作为相关专业机械振动与传感器相关课程的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

振动传感与驱动原理/刘宇等著. —北京:科学出版社, 2016.11

ISBN 978-7-03-047304-2

I. ①振… II. ①刘… III. ①机械振动 IV. ①TH113.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第026613号

责任编辑:张展孟锐/责任校对:杜子昂

责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年11月第一版 开本:B5(720×1000)

2016年11月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:248 000

定价:69.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

振动传感与驱动技术就是对机械振动中产生的外界信息进行传感,设计驱动(激励)机械振动的技术,振动传感技术也包括对振动能量的收集和利用技术。机械振动的无处不在和振动传感所具有的稳定性、可靠性、长寿命、结构简单和易于集成等优点,决定这一技术领域将突破传统的信息传感技术限制,从而具备更多更广泛的应用价值。近年来,振动的驱动技术发展迅猛,新的驱动方式和驱动原理层出不穷。本书研究了传统压电振动技术的原理,提出了改进振动抗冲击结构设计的多项技术,同时首次系统研究了光致机械振动的原理和技术,因此对现代新型振动传感器的设计具有重要借鉴意义。

本书致力于系统研究振动传感与驱动技术,分别对电致振动和光致振动传感技术进行了深入的研究,同时也研究振动能量收集技术,从而构建出完整的振动应用基础理论。本书也着重讨论这些理论在惯性传感器设计和优化中的应用,可为新的传感器设计提供理论和设计方法上的指导。

本书在出版过程中得到科学出版社的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢。同时还要感谢国家自然科学基金面上项目(光脉冲驱动与全光纤检测的哥氏振动微陀螺关键技术研究,项目编号:51175535;移不变抗混叠多尺度几何分析基础理论研究,项目编号:61173184)、重庆市自然科学基金重点项目(微尺度下的固态振动陀螺光梯度力驱动机制与敏感原理研究,项目编号:cstc2015jcyjBX0068)、重庆市科委科技平台与基地建设(国际科技合作基地建设)项目(MEMS振动传感与微姿态组合测井技术国际联合研究中心,项目编号:cstc2014gjh0038)对本书出版的资助。由于本书引用的参考文献较多,难以一一列出,在此向原作者致敬。

鉴于作者学识水平和视野所限,加之本书成书时间仓促,书中出现不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

刘 宇

2015年12月

目 录

第一篇 机械振动的介绍与概述

第 1 章 绪论	3
1.1 振动的基本概念	3
1.2 振动的基本分类	8
1.3 振动分析	10
1.4 激励振动与振动能量吸收	13
第 2 章 集总参数振动系统分析	19
2.1 单自由度系统振动	22
2.1.1 无阻尼系统的自由与受迫振动	22
2.1.2 阻尼系统的自由与受迫振动	24
2.1.3 运动微分方程求解	28
2.2 多自由度系统振动	32
2.2.1 二自由度无阻尼系统的自由与受迫振动	32
2.2.2 受迫振动的分析	35
2.2.3 多自由度系统的自由振动	36
2.2.4 多自由度系统的受迫振动	37
2.2.5 黏稠阻尼系统的受迫振动	39
第 3 章 分布参数振动系统分析	42
3.1 应变与位移关系	42
3.2 应力与应变关系	48

第二篇 振动激励与控制

第 4 章 基于压电激励陶瓷的振动与控制	55
4.1 压电现象与压电原理	55
4.1.1 极化与压电效应	55
4.1.2 压电材料晶体结构	56
4.2 压电材料本征常数	57
4.3 基于压电激励(驱动)的应用	58

4.3.1 压电型精密驱动器	58
4.3.2 压电型运动机构	58
第 5 章 基于压电激励的振动陀螺	60
5.1 振动陀螺基本原理	60
5.1.1 哥氏加速度	60
5.1.2 振动陀螺基本模型	61
5.1.3 振动陀螺的驱动方式	63
5.2 压电振动陀螺	65
5.2.1 压电音叉陀螺	65
5.2.2 压电环形陀螺	68
5.2.3 压电悬臂梁振动陀螺	71
5.2.4 压电自由梁振动陀螺	75
5.3 压电激励(驱动)振动陀螺的驱动接口电路	77
5.3.1 压电激励片的分布	77
5.3.2 压电换能器等效电路	77
5.3.3 压电振动陀螺驱动电路	80
5.4 振动隔离	82
5.4.1 噪声振动隔离(节点设计等)	82
5.4.2 冲击隔离(抗冲击方面设计)	83
第 6 章 基于光学激励的振动和振动检测	96
6.1 光操纵技术	96
6.1.1 基本概念	96
6.1.2 光捕获	98
6.1.3 微粒操纵	99
6.2 光力分析	105
6.2.1 基于 Mie 粒子的光力分析	105
6.2.2 基于电磁理论的光力分析	105
6.2.3 基于自旋光束的光力分析	106
6.3 光驱动微纳机械结构	108
6.3.1 光梯度力驱动光机械结构	108
6.3.2 自旋光驱动弯曲波导结构	109
6.4 光力驱动的振动陀螺(传感器)设计	112
6.4.1 光力驱动的振动陀螺的总体结构与工作原理	112
6.4.2 光力驱动的振动陀螺仿真	116
6.4.3 光力驱动的振动陀螺工作模态固有频率的解析模型	120

第三篇 振动能量吸收、转换与采集

第 7 章 振动能量吸收与转换	123
7.1 能量转换概念	123
7.2 转换基本方式	126
7.3 MEMS 振动能量收集器的研究现状	128
7.4 目前 MEMS 振动能量收集器的不足	130
第 8 章 压电振动能量采集技术	131
8.1 压电转换	131
8.1.1 压电转换基本原理	131
8.1.2 压电材料的工作模式	133
8.1.3 能量转化原理	134
8.2 压电参数	135
8.2.1 机电耦合系数	135
8.2.2 机械品质因数	136
8.2.3 压电应变常数	136
8.2.4 压电电压常数	136
8.2.5 转换效率	136
8.3 振动方程	137
8.4 谐振频率	138
8.5 转换等效电路分析	139
8.6 基于压电振动能量采集技术的应用	140
8.6.1 基于回折非对称 M 形悬臂梁的多模振动宽频能量采集	140
8.6.2 多自由度电磁复合低频宽带振动能量采集器	143

第四篇 传感系统的振动与驱动

第 9 章 梁型振动体传感器	151
9.1 面支撑抗高冲击振动梁	151
9.1.1 一种基于惯性测量技术的双悬臂振动梁陀螺	151
9.1.2 惯性测量技术的双悬臂振动梁陀螺	153
9.1.3 面支撑的抗冲击振动计算	155
9.1.4 惯性测量技术的双悬臂振动梁陀螺的结构特点	156
9.2 二轴角速度传感器	161
9.3 十字形振动角速率传感器	164

第 10 章 光致振动传感器	167
10.1 光子自旋力原理	167
10.2 光机械振动陀螺	168
10.3 光机械振动加速度计	169
10.3.1 光纤光栅振动与加速度特性	169
10.3.2 光纤光栅应变测量的基本公式	173
10.3.3 悬臂梁和简支梁结构	173

第一篇 机械振动的介绍与概述

第1章 绪 论

振动是指整个系统在静平衡位置附近做往返运动的一种特殊形式的机械运动，静平衡位置简称为平衡位置。很明显这是一种特殊形式的机械运动。振动是宇宙普遍存在的一种现象，总体分为宏观振动（如地震、海啸）和微观振动（基本粒子的热运动、布朗运动）。在人类的日常生活中，机械振动无处不在。例如，听见附近有声音是由于鼓膜振动引起的；看见周围的物体是由于光波振动的结果；动物的呼吸与肺的振动密切相关；当我们行走时，腿和手臂也都在做机械运动；过去关于振动的研究，大多数研究者都将注意力放在解释自然现象并建立相应的数学模型来表达整体的机械振动。振动原理广泛应用于音乐、建筑、医疗、制造、建材、探测、军事等行业，有许多细小的分支，对任何分支的深入研究都能够促进科学的向前发展，推动社会进步。

一些振动拥有比较固定的波长和频率，而另一些振动则没有固定的波长和频率。两个振动频率相同的物体，其中一个物体振动时能够让另外一个物体产生相同频率的振动，这种现象叫作共振，生活中，共振现象尽管能够给人类带来许多好处，但有时会造成危害，如部队齐步走造成桥梁坍塌的例子。

许多工程应用中，振动都是其中的一个重要组成部分。振动传递会降低人们的工作效率。因此研究振动的主要目的就是通过适当的方法及基础设计减小振动的影响。在此基础上，研究者进行设计时会想尽一切办法将系统的不平衡减到最小，例如，改革工艺，从根本上取消或减少手持风动工具的作业，用液压、焊接、粘接代替铆接；改进风动工具，改革工具排气口的位置；采用自动、半自动操纵装置，以减少肢体直接接触振动体等。

尽管振动存在有害的一面，但它常常应用于生活和生产实践中。事实上，20世纪60年代以后，计算机和振动测试技术取得重大进展，为综合利用分析、实验和计算方法解决振动问题开拓了广阔的前景。近年来，振动设备的应用迅速增长，如振动运输机、振动布料器、振动筛选机及电子推拿设备。另外，利用振动特性也可以提高某些机械加工、锻造和焊接过程的效率。

1.1 振动的基本概念

振动是物体或质点在其平衡位置附近所做的往复运动。振动的强弱用振动量

来衡量, 振动量可以是振动体的位移、速度或加速度。用函数的关系来描述其运动为

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

式中, t 为横坐标, x 为纵坐标, 振动图像如图 1.1 所示。

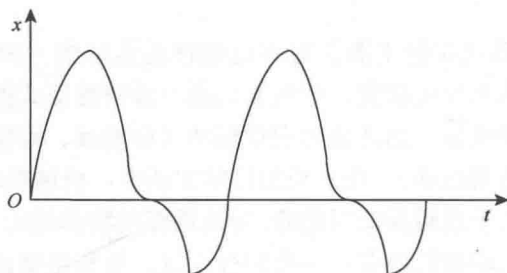


图 1.1 振动图像

在相等的时间间隔内做往复运动称为周期振动。往复一次所需要的时间间隔称为周期, 用 T 代表, 单位是 s。周期的倒数定义为频率, 用 f 表示, $f = 1/T$, 单位 1/s, 亦称为赫兹 (Hz), 即每秒钟振动的次数。

简谐运动既是最基本也是最简单的一种机械振动。当某物体进行简谐运动时, 物体所受的力跟位移成正比, 并且力的方向总是指向平衡位置。其运动方程为

$$x = A \sin \omega t \quad (1-2)$$

式中, A 为振幅, 是振动位移的最大值。 ω 为角频率, 单位是 rad/s。 ωt 称为相位, 表示在时间 t 内的转角, 如图 1.2 所示。

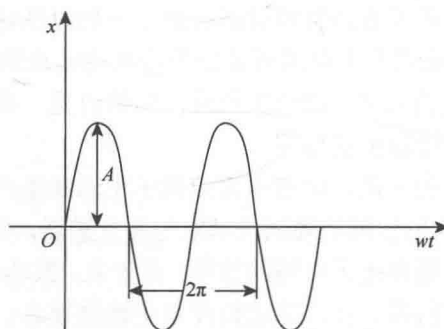


图 1.2 简谐运动

因为振动 $2\pi \text{rad}$ 为一个周期, 式 (1-2) 满足条件:

$$A \sin \omega(t + T) = A \sin(\omega t + 2\pi) \quad (1-3)$$

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

因此, 振动理论中把 ω 称为圆频率。

对简谐振动方程求一阶和二阶倒数即可得简谐振动的速度和加速度。

$$v = \dot{x} = A\omega \cos \omega t = A\omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-5)$$

$$a = \ddot{x} = -A\omega^2 \sin \omega t = A\omega^2 \sin(\omega t + \pi) \quad (1-6)$$

可见, 简谐函数的速度和加速度也是简谐函数, 而且与位移具有相同的频率。但是, 速度的相位比位移的相位超前 $\pi/2$, 加速度的相位比位移的相位超前 π 。

通常来说, 完整的振动系统包含若干个部分, 如储存势能的元件、储存动能的元件和消耗能量的元件。

当系统振动时, 会存在能量的转化过程, 势能会连续转化为动能, 反过来, 动能也会不断转化为势能。由于系统存在阻尼, 每经过一个周期, 系统的能量就会消耗。因此, 只有增加外力补偿损失的能量才能使整个系统保持连续的振动。

图 1.3 所示为单摆运动。使单摆偏离垂直方向一个角度 θ , 然后释放。在位置 1, 速度为零; 但到位置 2 时, 势能大小为 $mgl(1 - \cos\theta)$ 。相对于悬挂点 O 有力矩 $mg l \sin\theta$, 因此振子会从第一个位置向左运动, 而且角速度沿顺时针方向。当振子到达位置 2 时, 到达最低点, 势能全部转化为动能, 速度最大, 振子会继续运动, 到达位置 3。然而, 当振子到达位置 2 时, 由于重力的存在, 会引起一个沿逆时针方向的外力矩。振子的速度就会慢慢减小。到达最左边的位置时速度降为零。此时, 振子的全部动能转化为势能。因为还有重力矩的作用, 振子获得一个逆时针方向的角速度, 逐渐增加, 到达位置 2 时达到最大。这个过程持续的进行, 就是摆的振动。事实上, 由于外界存在阻尼, 角位移 θ 会逐渐减小, 最后会停下来。这说明由于阻尼的存在, 每经过一个周期, 就会消耗一定的能量。

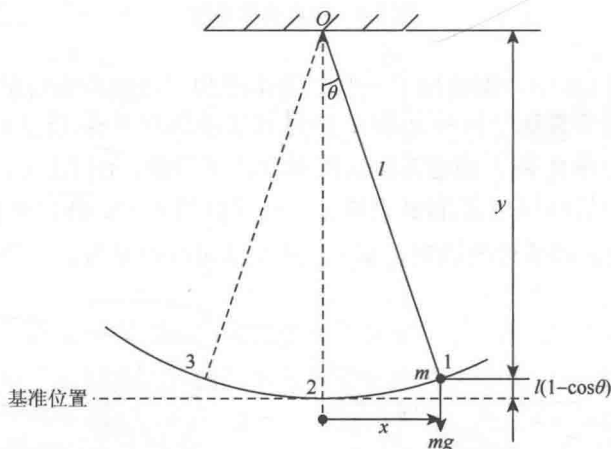


图 1.3 单摆运动

自由度是用来描述整个系统中的全部单元在振动过程中任何瞬间的空间所需要的独立坐标的数目。如图 1.3 所示的单摆和如图 1.4 所示的几个系统的自由度均为 1。对于单摆的运动可用笛卡儿直角坐标系 $q_1, q_2, \dots$ 和 y 或角坐标 θ 描述。当用笛卡儿坐标系时, 必须注意它们不是独立的, 存在约束条件: $x^2 + y^2 = l^2$, 其中 l 是摆绳的长度。对于单摆运动来讲, 用角坐标系 θ 来描述系统的运动更加简单。图 1.4 (a) 中的滑块, 可以用笛卡儿坐标系或角坐标系来描述。图 1.4 (b) 中的弹簧-质量系统可以使用线坐标系来描述系统的运动。图 1.4 (c) 所示的扭振系统 (长杆的端部固结着一个重盘), 可以用角坐标来描述系统的运动。

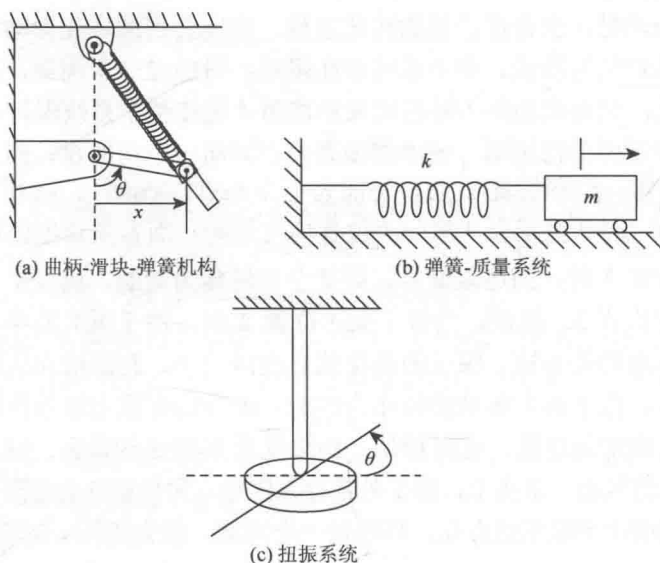
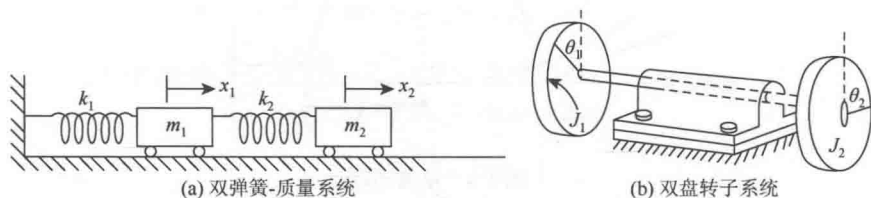


图 1.4 单自由度系统

图 1.5 和图 1.6 中分别给出了一些二自由度和三自由度系统的例子。图 1.5 (a) 给出了一个用两个直线坐标系 x_1 和 x_2 描述其运动的双弹簧-质量系统。图 1.5 (b) 是一个用角坐标系 θ_1 和 θ_2 描述其运动的双盘转子系统。图 1.5 (c) 所示的复合运动系统的运动不仅可以用 X 和 θ 来描述, 也可以用 x , y 和 X 来描述。如果使用后者, x 和 y 受下列条件的约束: $x^2 + y^2 = l^2$, 其中 l 是常量。



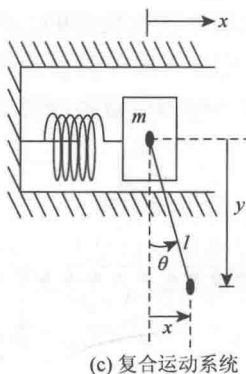


图 1.5 二自由度系统

在图 1.6 (a) 和 (c) 所描述的系统中, 其运动可以分别用 $x_i (i=1,2,3)$ 和 $\theta_i (i=1,2,3)$ 来描述。对于图 1.6 (b) 所示系统, $\theta_i (i=1,2,3)$ 可以准确描述质量块 $m_i (i=1,2,3)$ 所处的位置。其运动过程也可以用坐标 $x_i (i=1,2,3)$ 和 $y_i (i=1,2,3)$ 来描述, 但需要注意约束条件: $x_i^2 + y_i^2 = l_i^2 (i=1,2,3)$ 。

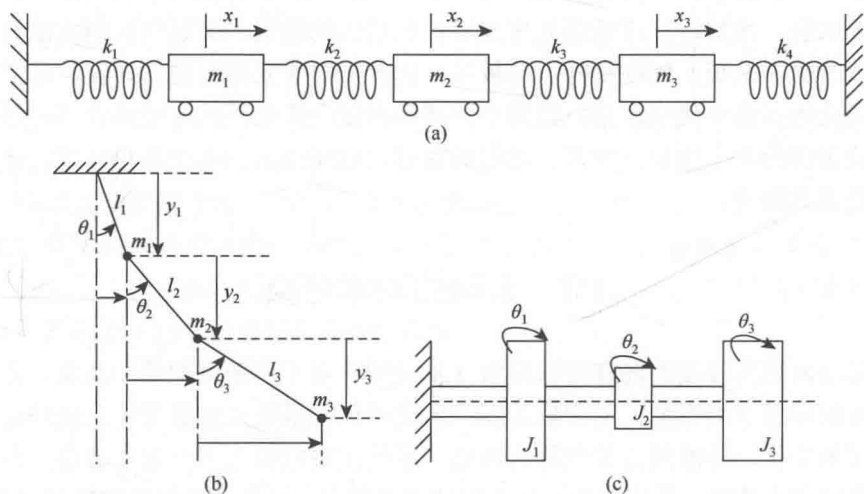


图 1.6 三自由度系统

系统的广义坐标是一组可以用来描述系统运动的独立坐标, 通常用 $q_1, q_2, \dots$ 表示。需要说明的是, 它们既可以是笛卡儿坐标, 也可以不是笛卡儿坐标。

事实上, 很多系统都可以用有限多个坐标系来描述其运动, 如之前所列举的图 1.3~图 1.6 的系统。但也有一些系统例外, 如包含弹性体的系统, 其运动需要用无限多个坐标来描述, 所以具有无限多个自由度。举一个简单的例子, 如

图 1.7 所示, 一个梁是由无限个质点构成的, 需要无限个坐标来描述其变形后的形状。这无限个坐标系可以定义其发生弹性形变后的挠曲线, 因此, 这个悬梁臂具有无限个自由度。大多数结构和机械系统都含有可以发生形变的单元, 所以也都具有无限个自由度。

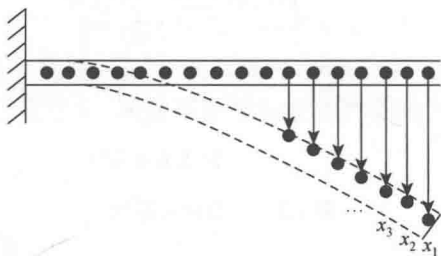


图 1.7 悬臂梁 (无限自由度系统)

系统可以分为离散系统与连续系统。若系统的自由度是有限的, 则称为离散系统或集中参数系统; 若系统的自由度是无限的, 则称为连续系统或分布参数系统。

在一些情况下, 连续系统可以用离散系统近似, 这样就可以使用简单的方法对系统求解。虽然对连续系统处理能够得到精确的结果, 但这些解析方法只能用于少数的简单系统, 如细长杆、薄板等。因此, 对于实际问题的研究, 通常是把它们简化为有限个集中质量、有限个弹簧和有限个阻尼系统。通常来说, 增加简化系统包含的集中质量、弹簧、阻尼的数目, 也就是增加系统的自由度, 会使得到的结果更精确。

1.2 振动的基本分类

振动问题所涉及的内容可以用图 1.8 说明。对于所研究的振动对象, 都可以理解为框图所示的系统, 通常称为振动系统或机械系统。外界对于系统的输入, 包括初始干扰、外激振力等统称为激励。系统在对应输入下产生的输出, 通常称为系统的动态响应, 简称响应。在工程技术问题中, 最普遍的问题在于振动设计, 即在已知输入情况下, 设计系统的振动特性, 使得它的动态响应能满足一定的要求。此外, 通过已知的输入和输出来研究系统的特性, 称为系统识别; 已知系统特性和输出来研究输入, 称为环境预测。

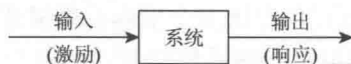


图 1.8 振动系统

振动的分类也可以用图 1.8 加以说明。

1. 自由振动与受迫振动

系统受到一个初始扰动后任其自身振动称为自由振动。系统做自由振动时，并不受外力的作用。例如，单摆运动就是自由振动。

系统在外力作用下做的振动称为受迫振动。例如，柴油发动机中的振动是受迫振动。另外，当外部的振动频率与系统的固有频率相同时，系统就会发生振动，即系统的振动幅度将会非常大。

2. 有阻尼振动与无阻尼振动

当系统振动时，由于摩擦或其他原因使能量发生损耗时，称为有阻尼振动。而无摩擦或其他形式的阻力引起的能量的损失，称为无阻尼振动。

3. 线性振动与非线性振动

对于一个系统来说，假如系统的全部元件即弹簧、质量块和阻尼器的行为都遵循线性规律，则这个系统的振动称为线性振动。反之，如果一个系统中任何一个元件的振动都是非线性的，则这个系统的振动称为非线性振动。在线性振动系统中，叠加原理是成立的；然而，在非线性振动系统中，叠加原理不成立。由于所有的振动系统在振动幅度不断增加时都趋于非线性，所以，在解决实际问题时，人们总是希望了解更多非线性振动知识。

4. 确定性振动与随机振动

当加在振动系统上的激励的值或幅值在任一给定的时间都是确定的，则这种激励称为确定性激励，相应的振动称为确定性振动。然而，许多情况下，激励是不能确定的或者是随机的。通过对这些激励的大量记录，它们表现出某种统计规律。因此，估计激励的某种平均（如均方值）是可以实现的。水流速度、风速和地面的平整度等都是随机的。如果一个系统所受的激励是随机的，那么相应的振动就称为随机振动。由于输出也是随机的，因此只能用统计量来描述。如图 1.9 所示分别为确定性激励和随机性激励。