



机械设备故障诊断实用技术丛书

机械振动基础

杨国安 编著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

机械设备故障诊断实用技术丛书

机械振动基础

杨国安 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

本书是《机械设备故障诊断实用技术丛书》之第1分册。本分册共分四部分：第一部分是第一章和第二章，主要介绍了机械振动的基本概念和基本特征；第二部分是第三章到第五章，主要介绍了单自由度、二自由度和多自由度系统的振动问题；第三部分是第六章，简单介绍了随机振动的基本概念；第四部分是第七章，主要介绍了相关的振动标准。

本书内容详尽，通俗易懂，以为企业解决实际问题为根本，主要供现场从事机械设备管理与维护的工程技术人员使用，同时也为高等工科大学相关专业研究生或本科生在深入理解机械设备故障诊断理论体系提供了详尽的参考资料。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械振动基础 / 杨国安编著. —北京: 中国石化出版社, 2012. 1
(机械设备故障诊断实用技术丛书; 1)
ISBN 978-7-5114-1330-7

I. ①机… II. ①杨… III. ①机械振动 IV. ①TH113.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 276793 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京科信印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 10.5 印张 228 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

定价: 30.00 元

序

现代化工业生产越来越大型化、高速化、自动化，特别是石化、冶金、电力等过程工业，设备投资大，连续生产流程长，机械装备故障停机可以造成重大经济损失，甚至导致机毁人亡的重大事故。现代生产和某些特种装备对人的依赖程度越来越低，对设备的依赖程度越来越高，对故障的预示和诊治越来越重要。设备状态监测和故障诊断作为一门工程技术，是20世纪60年代以后才发展起来的。

近二三十年来国内设备诊断技术的研究开发异常活跃，发展迅速，在工厂应用经常取得出人意外的实效，设备诊断技术在工厂企业得到了普及和应用。为此，迫切需要提供一批适合不同层次科技人员特别是企业一线技术人员实用的书，同时也需要一些适合本科生和研究生学习用的参考书。杨国安教授编著的《机械设备故障诊断实用技术丛书》就是应这一需求编写的。

对设备的状态监测和故障诊断，实际上从机器诞生之日就已产生。当时人们通过听、摸、看、闻机器的振动、温度、噪声等异常情况，凭借工匠的经验，可以判断机器某些故障并采取对策或者修复。设备状态监测和故障诊断作为一门工程技术正在成为信息、监控、通信、计算机和人工智能等集成技术，并逐步发展成为一个多学科交叉的新学科。我曾在工厂工作32年，1979年开始研究应用设备故障诊断技术。我很赞赏本丛书的出版，因为它既有基础理论知识，又有工程应用技术，对企业工程技术人员是一套难得的实用技术丛书；对缺少工程实践经验的院校研究生也是很好的参考书。

设备状态监测及诊断技术，是将运行中的机器看成“活”的，它时时刻刻在“说话”——发出信息，对其中的故障征兆信息进行采集、处理、分析，对故障进行早期诊断、预测，在机器没损坏之前查明故障原因并适时采取修复、预防和改进对策。故障诊断工作的决定作用在人，好的仪器有了真正掌

握了故障诊断技术的人才能够发挥作用。本丛书较全面地介绍了机械设备故障诊断技术的基础知识，包括设备故障诊断中的机械振动基础及信号处理，将理论与实践紧密结合，由浅入深，是一套很好的基础理论培训教材，也可供自学之用。本丛书还介绍了机电设备故障诊断实用技术、转子动平衡实用技术、轴承和齿轮故障诊断实用技术，并总结汇集了编者的若干科研成果，其内容实践性强，直观，便于掌握，可指导设备诊断工程实践。我对编者近几年不遗余力地编写这部内容丰富的丛书所付出的辛苦和做出的贡献表示钦佩。

机械装备故障诊断终极目标是有效防治故障，确保机器健康。其一是除故障：探测原因，有的放矢，消除故障；其二是防发展：早期预警，防微杜渐，预防故障；其三是防发生：查明根源，根治维修，防止故障。机械故障诊断是一门新兴的工程科学技术，它源于工程实践又应用于工程实践。企业技术人员作为机械故障诊断的“临床医生”会发现许多故障的征兆、积累丰富的诊断经验。希望读者对本书提出宝贵意见，使其不断修改完善。本人和作者同在一个科研团队，我们团队愿与读者一道，务实，求真，协力，创新，为提高我国设备诊断理论和技术水平作出应有的贡献。

深信丛书的出版能够在推广和普及机械故障诊断技术，培养更多的从事故障诊断的工程技术人员和后备力量方面发挥重要作用。是为序。

中国工程院院士

高金吉

编者的话

设备诊断技术是在设备管理和维修的基础上发展起来的。设备诊断技术就是掌握设备的现在状态与异常或故障之间的关系，以预测未来的技术。它包含两方面的内容：一是对设备的运行进行监测；二是在发现异常情况后对设备的故障进行分析和诊断。

设备诊断技术首先出现在欧洲，主要是以英国倡导的设备综合诊断学为指导，在上世纪 60~70 年代，英国机械保健和状态监测协会最先开始故障诊断技术，美国的发展则是以后勤学为指导的设备服务维修，美国在 1961 年开始执行阿波罗计划后，出现了一系列因故障造成的事故。1967 年在美国航天局的倡导下，由美国海军研究室主持成立了美国机械故障预防小组，积极从事技术诊断的开发，他们在航空、航天、军事及核能等尖端领域处于领先地位。

日本则吸收了英美两国的优点，提出了全员维修(TPM)的观点。日本的新日铁自 1971 年开始开发诊断技术，1976 年达到实用化。日本的钢铁、化工、电力等行业处于世界领先。

我国自 1979 年才初步接触开发诊断技术，1984 年开始真正在企业推广故障诊断技术，并逐步形成了一支较有实力的故障诊断研究队伍，做出了许多卓有成效的研究成果，特别是自上世纪末，随着计算机技术的发展，彻底改变了故障诊断系统的软、硬件面貌，各种数据采集，分析，诊断功能的仪器被相继开发出来，各种专家系统也不断涌现，给工程技术人员提供了更有效的手段来分析解决问题。但问题也相继出现，现场工程技术人员由于受到专业知识的限制，面对琳琅满目的分析功能、界面、曲线，知其然不知其所以然；专家系统由于受到样本数量的影响，其可靠性、准确性也受到质疑。这使得故障诊断技术浮于研究层面，未有效地深入到基层，深入到生产第一线。应该讲故障诊断技术是一门实践性极强的应用科学，研究内容应本着“从实践中来，到实践中去”的原则，切实解决好生产一线存在的问题。

编者从上世纪 90 年代初开始接触大型装备预知维修技术，先后为几十家国有大型企业开展讲座和项目合作。通过这些项目的开展和与现场工作人员的广泛交流，使编者深深地认识到设备维护工作不仅直接关系到企业的生产效益和安全，而且与节能降耗和低碳环保也密切相关，甚至成为关键制约因素。当前故障诊断工作的推广应用最大的障碍是从事故障诊断技术的现场人员知识结构不合理和缺乏。他们懂得设备的结构、运行机制，却对时频变换不清楚，应该讲，故障诊断技术背后有严谨的数学知识作支撑。众多学科相互渗透构成了故障诊断技术的知识体系。有人说故障诊断就是传感器，有人说

是信号处理，有人说是数据挖掘、专家系统等等。这就充分说明了故障诊断技术知识结构的交叉性和多样性，编者近年来为很多企业培训故障诊断技术人员，和他们的亲密接触丰富了编者，也使编者感到编写一套适合于从事设备管理和维护工作的工程技术人员的实用技术丛书的必要性和迫切性。编者曾在2007年出版了《机械设备故障诊断实用技术》，该书的出版受到了企业设备管理维护人员的广泛欢迎，曾连续多次印刷。近几年通过与企业技术人员交流感到2007年出版的单行本内容上过于简捷，生产一线人员希望在内容体系、原理方法方面更细化些。鉴于此，编者决定出版一套系列丛书，以满足广大生产一线的设备管理和维修人员的需要。近几年，以一己之力编写这套丛书，虽殚精竭虑，仍力所不及，在这套丛书的编写过程中，现场技术人员和我的研究生提供了巨大的帮助。如果这套丛书对您有微薄之用，望不忘感念他们的辛勤付出。

本套丛书的目的是要较全面地对机械设备故障诊断技术的基础知识、机理、方法和应用技术进行较详尽地解释说明。尽量用一目了然的方式明确地说明关于故障诊断技术的一切。本书的宗旨是能用图形说明的尽量不去用文字解释，能用文字解释的不用数学去推演，即使用到的数学也尽量是初等的，从故障诊断基本概念出发，努力用最简单的数学来分析故障机理，而只有在确实需要时才使用复杂的方法。本书的内容参考了大量文献，包括网络上的一些优秀资源，综合汇编而成，这些内容为本书增添了许多新的知识。编者将在书后参考文献中尽量列出，争取不遗漏每一篇参考文献。但由于编者的疏忽可能存在遗漏现象，在此向遗漏参考文献的作者致以歉意，同时对这些优秀资源的作者和编者致以衷心的感谢！

这套丛书共分九分册，分别介绍了设备故障诊断中的机械振动基础、信号处理基础、旋转机械故障诊断实用技术、转子动平衡实用技术、往复机械故障诊断及管道减振实用技术、滚动轴承故障诊断实用技术、滑动轴承故障诊断实用技术、齿轮故障诊断实用技术和电动机故障诊断实用技术。在编写过程中，编者尽量照顾到整套丛书内容的系统性和完备性，尽力做到各分册间内容不重叠，但考虑到读者有选择地使用本套丛书的方便，有些内容各分册间是相通的，于是编者特意安排了适当的重叠，以加强每本分册的相对独立性，使每本分册也形成一个单独的知识体系，如第一分册和第二分册作为故障诊断技术的基础知识，各分册都会用到，但在每分册中也有相关知识的简介。

第一分册机械振动基础重点说明故障诊断中常用到的基本概念及基本原理的讲解和阐述，有针对性地介绍了与故障诊断技术相关的振动诊断标准。有些标准不同国家间可能略有差异，书中尽量同时列出，相同标准可能存在不同版本，考虑到目前现场的使用习惯，只要内容未变，也尽量照顾使用习惯列出，比如ISO2372，目前已有ISO10816，但考虑到使用习惯仍以ISO2372列出。

第二分册信号处理基础是本套丛书中的难点内容，重点说明信号处理的基础知识。本分册对数学基础有一定的要求，特别在傅里叶变换理论的阐述上，重点参考了国外的

经典教材和一些优秀的网络资源，对傅里叶变换的说明有独到之处，读者细读之必有所收获。该分册还较详尽地阐述了常用的故障诊断方法，这些知识对加深理解3~9分册的内容大有裨益。

第三分册旋转机械故障诊断实用技术重点说明旋转机械常见的故障诊断方法，该部分内容较成熟，也是故障诊断技术的重点内容之一。该分册还介绍了常用旋转机械和联轴器的点检方法和点检标准，这部分内容是企业实现预知维修和安全生产的重要保障。

第四分册转子动平衡技术主要说明轴及轴系动平衡原理，重点说明轴系现场动平衡技术，现场动平衡作为一门实用技术，广泛应用于多转子连接的轴系系统，简便易行，行之有效。书中以实例介绍了现场动平衡过程中的一些经验和方法。

第五分册往复机械故障诊断及管道减振技术主要说明往复压缩机的失效形式、故障诊断方法和常用点检方法。重点说明管道减振技术，阐述管道减振必须和往复机械整体考虑，标本兼治，才能做到本质安全，书中还以编者亲历的实例作了简要说明。往复机械故障诊断一直是世界性的难题，因此可参考的资料很少，且不系统。本书部分内容是编者结合自己多年来在往复机械及管道减振方面解决现场实际问题过程中所取得的一手资料和经验整理编辑而成。

第六分册滚动轴承故障诊断实用技术、第七分册滑动轴承故障诊断实用技术和第八分册齿轮故障诊断实用技术三分册均主要说明三种常用零件的失效形式，重点说明常用的故障诊断方法，简要说明各自的点检方法和标准，三分册分别介绍了基于油样分析的故障诊断技术。其中第六分册还介绍了滚动轴承的基础知识，以便读者查阅更方便。第七分册介绍了滑动轴承常用材料和液体润滑的基本原理，以便读者在分析滑动轴承故障时，能够与润滑理论相结合考虑，因为滑动轴承任何形式的故障无不与润滑油膜有关，至于气体润滑轴承只为增广读者知识面而考虑。第八分册介绍了齿廓啮合基本定律，以便读者在分析齿轮故障时，能充分考虑到齿轮齿廓形状，因为齿轮的大多数故障都与齿廓曲线被破坏有关，最常用的渐开线齿廓满足五线合一，不同的故障形式归结起来都是不同程度地破坏了五线合一原则。滚动轴承和滑动轴承作为独立的零件很难制定其零件的点检标准，且这样做也不存在任何意义，因为这两种零件的使用离不开机器本身，因此，所列点检标准为其所安装的相关机械设备的点检标准。

第九分册电动机故障诊断实用技术简要说明常用电动机的基本原理，以便读者分析故障时，能够结合电动机运行机制加以考虑。重点说明电动机振动故障诊断和电气故障诊断方法，简要介绍了电动机温度和噪声故障诊断方法。考虑到电机日常维护，本书还介绍了电动机的点检方法和日常修理和保养方法。

总之，故障诊断技术的终极目标是保证设备长周期、安全稳定运行，投入大量资金购买最现代化的仪器设备是必要的，但首要任务是充实现场工程技术人员的知识储备，包括理论和实际的经验。现在从事故障诊断的人员，通过望、闻、问、切能对设备的运

行状况作出评价的越来越少。当振动异常的时候，对于常见故障，能借助仪器得出诊断结论，能够对问题给出合理解释的人才越来越缺乏，故障诊断工作的决定作用在人，不在仪器。仪器仅仅是人的工具，如果人不行，再好的仪器也无用；好的仪器有了有准备的人才能够发挥作用。真正掌握了故障诊断技术，加上得力的仪器设备，才能使设备维护人员大有用武之地，而成为别人无法替代的人才！

近几年，编者有幸得到国家自然科学基金的支持，对科学基金的研究深化了编者对故障诊断技术的认识，如果说企业合作项目丰富了编者的实践知识，那么，国家自然科学基金项目则提升了编者的基础理论水平，使编者在更高的层面上更加理性地分析、判断每一种故障形式，所以，对近年来国家自然科学基金项目(50875016)的支持表示感谢。

本分册在资料查阅、收集、整理和编排上，我的研究生贾乐乐、张卫攀做了卓有成效的工作，这本书的出版与他们的辛勤付出密不可分。在此对贾乐乐、张卫攀同学表示谢意。

由于本套丛书的编写工作十分浩大，限于编者水平，恳切希望读者对本套丛书中出现的错误和不妥之处提出批评指正，编者将不胜感激。编者网址：www.ygazd.cn，E-mail：yangga@mail.buct.edu.cn 或 ygapublic@163.com。

谨以此书献给辛勤工作在生产第一线的机械设备管理维护人员和有志于故障诊断技术研究的科学技术人员！

编 者

2011年10月于北京化工大学

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 机械振动的基本概念	(1)
第二节 振动系统的分类	(1)
第三节 离散系统各元件特征	(3)
一、弹性元件	(4)
二、阻尼元件	(5)
三、惯性元件	(5)
第四节 振动形式的分类	(6)
一、激励与响应	(6)
二、振动分类方法	(6)
第五节 工程实际中的振动问题	(8)
一、共振	(8)
二、自激振动	(8)
三、不平衡惯性力	(9)
四、非线性振动	(9)
第六节 机械振动的研究内容及研究方法	(11)
一、机械振动的研究内容	(11)
二、机械振动的研究方法	(11)
第二章 简谐振动及其基本特征	(13)
第一节 简谐振动的运动方程	(13)
第二节 简谐振动常用的表示方法	(14)
一、简谐振动的矢量表示法	(14)
二、简谐振动的复数表示法	(15)
第三节 振动的三要素	(16)
一、振动的幅值	(16)
二、振动的频率	(16)
三、振动的相位	(17)
第四节 简谐振动的合成	(17)
一、同方向的两个简谐振动的合成	(17)
二、方向互相垂直的两个简谐振动的合成	(19)
第五节 谐波分析	(20)

一、描述波的术语	(20)
二、谐波分析	(21)
第三章 单自由度系统的振动	(24)
第一节 单自由度系统的自由振动	(24)
一、无阻尼的自由振动	(24)
二、有阻尼的自由振动	(27)
第二节 单自由度系统的强迫振动	(30)
一、简谐激振力引起的强迫振动	(31)
二、偏心质量引起的强迫振动	(35)
三、支承运动引起的强迫振动	(37)
四、非简谐激振力引起的强迫振动	(39)
第三节 单自由度系统振动理论的应用	(41)
一、振动控制过程概述	(41)
二、隔振原理	(43)
三、转轴的临界转速	(45)
四、转子的平衡	(47)
五、振动机械的应用	(50)
第四章 二自由度系统的振动	(51)
第一节 二自由度系统概述	(51)
第二节 运动微分方程的建立	(52)
第三节 二自由度系统的自由振动	(54)
一、无阻尼的自由振动	(54)
二、有阻尼的自由振动	(58)
第四节 二自由度系统的强迫振动	(60)
第五节 拍击现象	(63)
第五章 多自由度系统的振动	(67)
第一节 多自由度系统概述	(67)
第二节 运动微分方程的建立	(68)
一、直接法	(68)
二、拉格朗日方程法	(69)
三、刚度系数法和柔度系数法	(72)
第三节 固有频率与主振型	(75)
一、固有频率	(75)
二、主振型	(76)
三、主振型的正交性	(79)
第四节 无阻尼多自由度系统的模态分析	(80)

一、坐标耦合与解耦	(80)
二、主坐标与正则坐标	(83)
三、模态分析的一般过程	(86)
第五节 无阻尼多自由度系统的响应计算	(87)
一、自由振动的响应	(87)
二、强迫振动的响应	(88)
第六节 有阻尼多自由系统的模态分析	(90)
一、比例阻尼系统的实模态分析	(90)
二、一般阻尼系统的复模态分析简介	(92)
第六章 随机振动简介	(93)
第一节 概述	(93)
第二节 随机过程的基本概念	(94)
一、总体平均与平稳随机过程	(94)
二、时间平均与各态历经随机过程	(95)
第三节 随机振动的统计特性	(96)
一、幅值域(时域)特性	(96)
二、相关域(时差域)特性	(98)
三、频域特性	(101)
四、随机振动的概率描述	(102)
第四节 矩的概念	(106)
第七章 振动测量参数及标准	(108)
第一节 振动诊断标准的制定	(108)
一、振动标准的参数类型	(108)
二、振动参数选择的理论依据	(108)
三、振动诊断标准的分类	(109)
四、振动诊断标准的制定方法	(110)
五、企业设备振动相对标准的制定	(111)
第二节 振动量及其测量	(113)
一、振动量及其量级	(113)
二、振动量之间的关系	(114)
三、振动测量位置	(115)
第三节 振动与冲击标准简介	(117)
一、振动与冲击标准和 ISO TC 108	(117)
二、我国的标准分类与制定	(118)
三、机械振动相关国际标准与国家标准	(119)
第四节 机械振动国际标准介绍	(121)

一、ISO 2372—1974 标准	(121)
二、ISO 3945—1985 标准	(123)
三、ISO 10816 系列标准	(124)
四、ISO 7919 系列标准	(131)
五、振动诊断标准的选用	(136)
第五节 常用各类设备振动标准	(138)
一、旋转机械振动标准	(138)
二、往复机械振动标准	(140)
三、汽轮机及汽轮发电机组振动标准	(140)
四、压缩机振动标准	(143)
五、泵类机械振动标准	(144)
六、电动机振动标准	(147)
七、齿轮装置振动标准	(148)
八、管道振动标准	(149)
九、其他振动标准	(151)
参考文献	(154)

第一章 概 述

第一节 机械振动的基本概念

所谓振动，就是物体或某种状态随时间作往复变化的现象。振动包括机械振动与非机械振动。例如，钟摆的来回摆动，房屋由于风力、地震或机器设备引起的振动，桥梁由于车辆通过引起的振动，轨枕由于火车行驶引起的振动，以及水坝、阀门的振动等，这一类振动属于机械振动；另一类振动属于非机械运动的振动现象，例如声波、光波、电磁波等。本书仅仅是研究物体在机械运动中出现的振动现象，它包括机械方面及工程结构方面的振动现象，重点是为工程结构振动的研究提供基础。

机械振动所研究的对象是机械或结构，在理论分析中要将实际的机械或结构抽象为力学模型，即形成一个力学系统。可以产生机械振动的力学系统，称为振动系统，简称系统。一般来说，任何具有弹性和惯性的力学系统均可能产生机械振动。

振动系统发生振动的原因是由于外界对系统运动状态的影响，即外界对系统的激励或作用。如果外界对某一个系统的作用使得该系统处于静止状态，此时系统的几何位置称为系统的静平衡位置。依据系统势能在静平衡位置附近的性质，系统的静平衡位置可以分为稳定平衡、不稳定平衡和随遇平衡等几种情况。机械振动中的平衡位置是系统的稳定平衡位置。系统在振动时的位移通常是比较小的，因为实际结构的变形是比较小的。

对于工程实际中的结构振动问题，人们关心振动会不会使结构的位移、速度、加速度等物理量过大，因为位移过大可能引起结构各个部件之间的相互干涉。比如汽车的轮轴与大梁会因为剧烈振动而频繁碰撞，造成大梁过早损坏，并危及行车安全。又如，汽车行驶中如果垂直振动加速度过大，将会影响汽车的平顺性，给乘员带来不适或危及所载货物的安全。振动过大也造成结构的应力过大，即产生过大的动应力，有时这种动应力比静应力大的多，容易使结构早期损坏。另外，振动过大会引起其他的副作用，如剧烈的振动会使结构产生强烈的噪声，等等。为了避免振动危害，甚至利用振动进行工作，我们应了解结构振动的规律，在实际工作中应用这些规律。随着科学技术的进步，结构的设计向高强度低重量方向发展，振动问题尤显突出，对结构的设计制造提出了更高的要求。因此，现代的工程技术人员应该掌握必要的机械振动知识，并将它应用于实际工作中。

第二节 振动系统的分类

机械振动是指机械系统(即力学系统)中的振动。任何力学系统，只要它具有弹性

和惯性，都可能发生振动，这种力学系统称为振动系统。振动系统可分为两大类，离散系统和连续系统。连续系统具有连续分布的参量，但可通过适当方式化为离散系统。

按自由度划分，振动系统可分为有限多自由度系统和无限多自由度系统。前者与离散系统相对应，后者与连续系统相对应。

离散系统由集中参量元件组成。力学系统中的集中参量元件有三种：质量、弹簧和阻尼器，它们都是理想化的力学模型。质量(包括转动惯量)是只具有惯性的力学模型。弹簧是不计本身质量、只具有弹性的力学模型；弹性力和形变一次方成正比的弹簧，称为线性弹簧。阻尼器模型既不具有惯性，也不具有弹性，它是耗能元件，在运动时产生阻力；阻力与速度一次方成正比的阻尼器，称为线性阻尼器。

离散系统在工程上有广泛的代表性。例如，固定在混凝土基础上的精密机床，基础下面还铺有弹性衬垫，如图 1-1 所示。进行隔振分析时，需要考察机床和基础的整体振动。这时，考虑到机床和基础的弹性远比衬垫小得多，故可略去其弹性而把它们视为集中质量；另一方面，衬垫的质量远比机床和基础的质量小得多，可以略去，而把衬垫看作弹簧；而衬垫本身的内摩擦以及基础和周围约束之间的摩擦起着阻尼的作用，可以把它们合在一起看作是一个阻尼器。因此，在隔振分析中，这一系统可简化为离散系统，如图 1-2 所示。当然，在分析机床本身的振动或机床、工件、刀具系统的振动时，必须考虑机床本身的弹性。通过适当简化，机床本身又可看作一个离散系统。离散系统的运动，数学上用常微分方程描述。

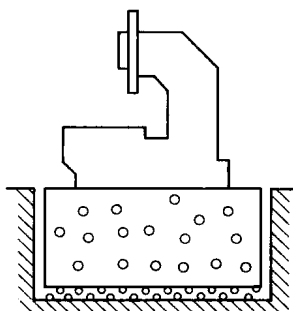


图 1-1 铺有弹性衬垫的机床混凝土地基

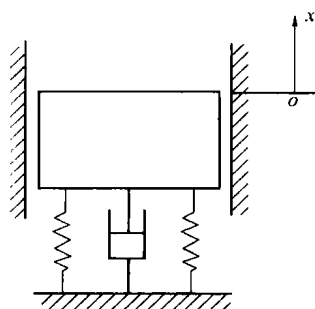


图 1-2 简化成离散系统

连续系统是由弹性体元件组成的。弹性体可以看作由无数质点组成。各质点间有弹性联系，只要满足连续性条件，任何微小的相对位移都是可能的。因此，一个弹性体有无限多个自由度。典型的弹性体元件有杆、梁、轴、板、壳等。

弹性体的惯性、弹性与阻尼是连续分布的，故称为连续系统。工程上许多振动系统取连续系统的模型。例如，涡轮盘通常取为变厚度的圆板，涡轮叶片通常取为变截面的梁或壳等。连续系统的运动，数学上用偏微分方程描述。

参量的变化规律可用时间的确定函数描述的振动系统，称为确定系统(又称定则系统)。如果系统中的各个特性参量(质量、刚度、阻尼系数等)都不随时间而变，即它们不是时间的显函数，就称这类系统为常参量系统(定常系统)；反之，则称为变参量系统(非定常系统)。常参量系统的运动用常系数微分方程描述，而描述变参量系统需要

用变系数微分方程。

若系统参量变化无常，无法用时间的确定函数描述，而只能用有关统计特性描述，这种系统就称为随机系统。

一个质量不随运动参量(坐标、速度、加速度等)的变化而变化，且其弹性力与阻尼力都可以简化为线性模型的振动系统称为线性系统。线性系统的运动用线性微分方程描述。凡是不能简化为线性系统的振动系统都称为非线性系统。

严格地说，实际振动系统的弹性力和阻尼往往不符合线性模型。但在许多情况下，只要系统振幅不大，从线性弹簧和线性阻尼的假设出发，常可得出足够准确的有用结论。但也有不少振动过程，如果不考虑非线性因素，就无法说明有关现象，各种自激振动现象就是最典型的例子。为方便起见，有时故意引入一些非线性因素来达到预期的目的。例如，采用各种限位器、继电器控制器等。在这种情况下，可以按非线性问题来处理。

一个实际振动系统应该采用何种简化模型，需要根据具体情况来确定。同一系统，在不同条件下，可采用不同模型。例如，强迫振动中阻尼的影响，如远离共振情况下可不考虑，从而能使计算大为简化。但在共振的情况下，阻尼起决定性作用，绝对不能略去。又如在计算简支梁的最低阶固有频率时，可假设它的一半质量集中于梁的中点处，由此可得到很准确的结果，而在研究梁受冲击载荷引起的响应时，上述假设将导致错误的结论。因此，所采用模型的正确与否，还得由实践加以检验。

综上所述，振动系统的分类如图 1-3 所示。

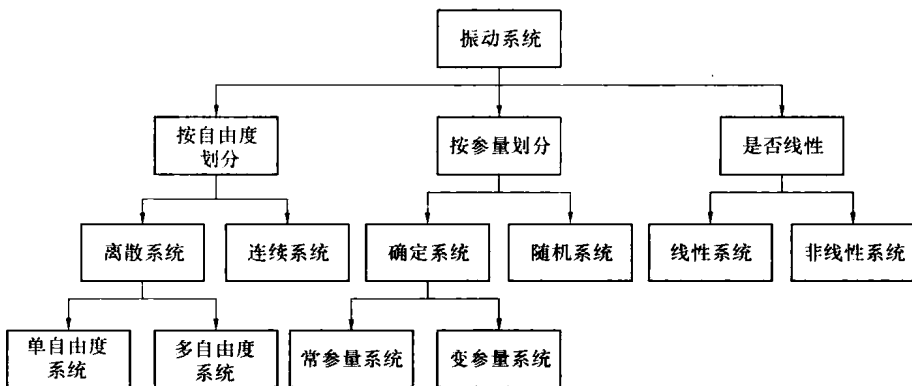


图 1-3 振动系统分类

本书采用的系统模型限于确定、定常、线性、离散的模式。

第三节 离散系统各元件特征

机械或结构产生振动的内在原因是本身具有在振动时储存动能和势能，而且释放动能和势能并能使动能和势能相互转换的能力。我们以图 1-4 所示的弹簧质量振动系统的振动为例，看在振动中系统的动能和势能是如何变化的。

如图 1-4 所示系统，质量 m 只沿水平方向运动。这是一个典型的单自由度无阻尼振动系统，它代表可用一个自由度描述而且可以不考虑阻尼影响的结构的振动模型。

如果把质量 m 向右移动 x_0 ，然后无初速度地放开质量，在弹簧 k 的弹性力作用下，质量将以 O 为中点做往复运动。由于有质量和弹簧，在运动时系统具有动能和弹性势能。当质量移动到 x_0 或 $-x_0$ 时，弹簧变形最大，因而弹性势能达到最大，此时速度为零，因而动能为零。当质量移动到 O 点时，速度和动能达到最大，但弹簧无变形，弹性势能为零。系统就这样以静平衡位置 O 点为中心往复振动，在振动过程中，弹簧储存和释放势能，质量储存和释放动能，并且动能与势能不停地相互转换。

在实际的振动中，当外界对系统的干扰消失后，通常系统会逐渐停止振动。也就是说，系统本身有把振动能量转变为其他能量（如热能等）的能力，这称之为能量耗散。通常在振动模型中引入阻尼元件以计及系统的能量耗散。有阻尼元件的单自由度系统见图 1-5。

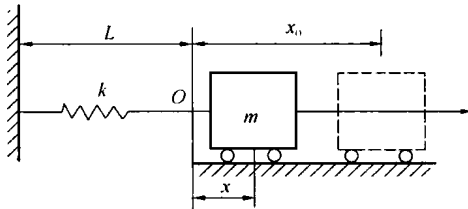


图 1-4 单自由度无阻尼系统

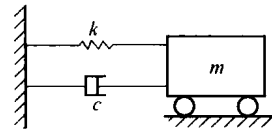


图 1-5 单自由度有阻尼系统

惯性元件、弹性元件和阻尼元件是离散振动系统三个最基本的元件。在系统振动过程中惯性元件储存和释放动能，弹性元件储存和释放势能，阻尼元件耗散振动能量。如果振动时系统能量耗散很小，说明系统的阻尼很小，在某些情况下可以忽略。称这种不耗散振动能量的系统为无阻尼系统，无阻尼系统中没有阻尼元件。

对于一个具体结构，有时这三种元件不像图 1-5 那样可以一目了然，要对结构做具体分析。如图 1-6 所示的单摆，质量 m 在振动中既储存动能，又储存势能，身兼惯性元件和弹性元件二职。另外，单摆在自由振动时受到空气阻力和悬挂点处阻力的作用会逐渐停振，但从结构上看不到有阻尼元件，必须在振动系统中人为加上阻尼元件才能计及能量耗散。

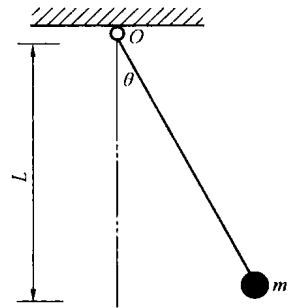


图 1-6 单摆

下面讨论惯性元件、弹性元件和阻尼元件在线性振动条件下的基本特征。

一、弹性元件

如弹簧和扭簧。它的特征是：忽略它的质量和阻尼，在振动过程中储存势能。弹性力与其两端的相对位移成正比，方向相反。如图 1-7 所示的直线弹簧，它 1、2 端的位移为 x_1 和 x_2 ，则弹簧 2 端对外界的作用力为