



F
oundation of
Mechanical
Vibration

高等教育轨道交通“十二五”规划教材 • 机车车辆类

机械振动基础

主 编 胡准庆
副主编 万 一



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·机车车辆类

机械振动基础

胡准庆 主 编

万 一 副主编



北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书系统地论述了机械振动的理论、分析方法和振动测试技术。重点介绍了机械振动的基本概念和基本分析方法的理论基础。本书内容丰富、概念清晰、阐述详尽、系统性强，主要内容包括单自由度系统的振动，两自由度系统的振动，多自由度系统的振动，多自由度系统的数值计算方法，机械振动的测试及振动控制的基本知识。

本书可作为高等院校机械工程等学科的本科生、专科生教材或参考书，也可供有关科学研究人员和工程技术人员参考。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

机械振动基础 / 胡准庆主编. — 北京: 北京交通大学出版社, 2013. 2

(高等教育轨道交通“十二五”规划教材·机车车辆类)

ISBN 978 - 7 - 5121 - 1381 - 7

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 027715 号

责任编辑: 刘隽华 杨 硕

出版发行: 北京交通大学出版社 电话: 010 - 51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编: 100044

印刷者: 北京泽宇印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 13.75 字数: 343 千字

版 次: 2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5121 - 1381 - 7/TH·48

印 数: 1~3 000 册 定价: 30.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010 - 51686043, 51686008; 传真: 010 - 62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

高等教育轨道交通“十二五”规划教材·机车车辆类

编委会

顾问：施仲衡

主任：司银涛

副主任：李建勇 陈庚

委员：（按姓氏笔画排序）

王文静 史红梅 刘伟

刘志明 齐红元 宋永增

宋雷鸣 张励忠 张欣欣

周明连

编委会办公室

主任：赵晓波

副主任：孙秀翠

成员：（按姓氏笔画排序）

吴嫦娥 郝建英 徐琤

总 序

我国是一个内陆深广、人口众多的国家。随着改革开放的进一步深化和经济产业结构的调整,大规模的人口流动和货物流通使交通行业承载着越来越大的压力,同时也给交通运输带来了巨大的发展机遇。作为运输行业历史最悠久、规模最大的龙头企业,铁路已成为国民经济的大动脉。铁路运输有成本低、运能高、节省能源、安全性好等优势,是最快捷、最可靠的运输方式,是发展国民经济不可或缺的运输工具。改革开放以来,中国铁路积极适应社会的改革和发展,狠抓制度改革,着力技术创新,抓住了历史发展机遇,铁路改革和发展取得了跨越式的发展。

国家对铁路的发展始终予以高度重视,根据国家《中长期铁路网规划》(2005—2020年):到2020年,中国铁路网规模达到12万千米以上。其中,时速200千米及以上的客运专线将达到1.8万千米。加上既有线提速,中国铁路快速客运网将达到5万千米以上,运输能力满足国民经济和社会发展需要,主要技术装备达到或接近国际先进水平。铁路是个远程重轨运输工具,但随着城市建设和经济的繁荣,城市人口大幅增加,近年来城市轨道交通也正处于高速发展时期。

城市的繁荣相应带来了交通拥挤、事故频发、大气污染等一系列问题。在一些大城市和一些经济发达的中等城市,仅仅靠路面车辆运输远远不能满足客运交通的需要。城市轨道交通节约空间、耗能低、污染小、便捷可靠,是解决城市交通的最好方式。未来我国城市将形成地铁、轻轨、市域铁路构成的城市轨道交通网络,轨道交通将在我国城市建设中起着举足轻重的作用。

但是,在我国轨道交通进入快速发展的同时,解决各种管理和技术人才匮乏的问题已迫在眉睫。随着高速铁路和城市轨道新线路的不断增加以及新技术的开发与引进,管理和技术人员队伍需要不断壮大。企业不仅要对新员工进行培训,对原有的职工也要进行知识更新。企业急需培养出一支能符合企业要求、业务精通、综合素质高的队伍。

北京交通大学是一所以运输管理为特色的学校,拥有该学科一流的师资和科研队伍,为我国的铁路运输和高速铁路的建设作出了重大贡献。近年来,学校非常重视轨道交通的研究和发展,建有“轨道交通控制与安全”国家级重点实验室、“城市交通复杂系统理论与技术”教育部重点实验室,“基于通信的列车运行控制系统(CBTC)”取得了关键技术研究的突破,并用于亦庄城轨线。为解决轨道交通发展中人才需求问题,北京交通大学组织了学校有关院系的专家和教授编写了这套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材”,以供高等学校学生教学和企业技术与管理人员培训使用。

本套教材分为交通运输、机车车辆、电气牵引和土木工程四个系列,涵盖了交通规划、运营管理、信号与控制、机车与车辆制造、土木工程等领域,每本教材都是由该领域的专家执笔,教材覆盖面广,内容丰富实用。在教材的组织过程中,我们进行了充分

调研，精心策划和大量论证，并听取了教学一线的教师和学科专家们的意见，经过作者们的辛勤耕耘以及编辑人员的辛勤努力，这套丛书得以成功出版。在此，我们向他们表示衷心的感谢。

希望这套系列教材的出版能为我国轨道交通人才的培养贡献绵薄之力。由于轨道交通是一个快速发展的领域，知识和技术更新很快，教材中难免会有诸多的不足和欠缺，在此诚请各位同仁、专家予以不吝批评指正，同时也方便以后教材的修订工作。

编委会
2012年11月

出版说明

为促进高等轨道交通专业机车车辆类教材体系的建设，满足目前轨道交通类专业人才培养的需要，北京交通大学机械与电子控制工程学院、远程与继续教育学院和北京交通大学出版社组织以北京交通大学从事轨道交通研究教学的一线教师为主体、联合其他交通院校教师，并在有关单位领导和专家的大力支持下，编写了本套“高等教育轨道交通‘十二五’规划教材·机车车辆类”。

本套教材的编写突出实用性。本着“理论部分通俗易懂，实操部分图文并茂”的原则，侧重实际工作岗位操作技能的培养。为方便读者，本系列教材采用“立体化”教学资源建设方式，配套有教学课件、习题库、自学指导书，并将陆续配备教学光盘。本系列教材可供相关专业的全日制或在职学习的本专科学生使用，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

本系列教材得到从事轨道交通研究的众多专家、学者的帮助和具体指导，在此表示深深的敬意和感谢。

本系列教材从2012年1月起陆续推出，首批包括：《设计与制造公差控制》、《可靠性基础》、《液压与气动技术》、《测试技术》、《单片机原理与接口技术》、《计算机辅助机械设计》、《控制理论基础》、《机械振动基础》、《动车组网络控制》、《动车组运行控制》、《机车车辆设计与装备》、《列车传动与控制》、《机车车辆运用与维修》。

希望本套教材的出版对轨道交通的发展、轨道交通专业人才的培养，特别是轨道交通机车车辆专业课程的课堂教学有所贡献。

编委会
2012年11月

前 言

随着现代工程和科学的发展,振动问题的内涵已经变得越来越广泛了。用微分方程和偏微分方程等数学工具描述的振动现象,在传统上似乎是力学和数学的专属领域,然而许多工程技术领域,如航空航天、能源化工、机械制造、交通运输、工程材料、土木建筑及核工业等,都会遇到大量振动问题。因此振动研究已经成为很多工程学科的核心内容。机械振动理论及其分析技术已经逐渐成为工程技术人员必备的知识。

为了适应现代工程教育对于振动知识的需求,编者在长期从事振动领域教学和科研工作的基础上,新编了《机械振动基础》一书。在编写中既做到包含现代工程振动分析、测试和控制的基本方法,但内容又不过多、过深;既充分应用数学工具尤其是现代计算数学这一有力工具,但又不花过多的篇幅去证明定理,去作繁琐的推导;要实用性,不要公理化;对于较难理解的概念和方法,采用从特殊到一般的原则,多举例进行说明。这样可以使初学者更容易理解理论,掌握计算方法。

在内容方面,本教材由浅入深,条理清楚,结构合理,易于理解。首先介绍了机械振动的基本概念和研究特点等振动分析所需要的必备知识,然后对单自由度系统振动问题的基本理论方法进行了详细的分析,为进一步研究打下了良好基础。接着分析了两自由度和多自由度系统的各种振动问题,考虑到在工程振动问题的实际计算需要,重点给出了固有频率与振型的数值解法。最后,介绍了机械振动测试和振动控制的基本知识。

本教材除了注重理论的系统性和完整性外,还特别注重工程应用,有其自身显著的特点。本教材的振动分析对象以离散系统为主,兼顾连续系统;数学概念和工具是紧密围绕振动分析的需要而引进,并配合相应的力学问题进行表述,很好地解决了力学分析与数学方法之间的关系,使得读者能够深刻地体会到它们的力学本质,有效地理解和掌握了这些内容;重视启发式的叙述和教学,注重引导读者去探究解法的思路,将复杂的问题简化成读者熟悉的问题,这种思路始终贯穿着全书。对于读者学习和掌握理论方法,以及培养分析和解决实际问题能力都发挥了重要作用。

本教材由北京交通大学胡准庆老师担任主编,中国石油化工股份有限公司洛阳分公司万一担任副主编,北京交通大学刘建华老师和张良老师也参加了编写工作。第1章由胡准庆和万一编写,第2章由胡准庆、张良和刘建华编写,第3章由万一、刘建华编写,第4章由胡准庆、张良编写,第5章由胡准庆、刘建华编写,第6章由万一、张良编写,第7章由万一、胡准庆编写。

由于作者的水平有限和时间仓促,书中的缺漏和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2013年1月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2.5 主振型的正交性	63
1.1 引言	1	3.3 两自由度系统的受迫振动	65
1.2 振动的分类	3	3.3.1 系统的运动微分方程	65
1.2.1 按输入类型分类	4	3.3.2 振动特性的讨论	66
1.2.2 按系统类型分类	4	3.3.3 动力减振器	68
1.2.3 按振动的规律分类	5	习题	73
1.2.4 按系统的自由度分类	5	第 4 章 多自由度系统	80
1.3 振动系统的分析	6	4.1 多自由度系统的数学模型	81
1.3.1 振动系统的特征参数	6	4.1.1 多自由度系统的基本概念	81
1.3.2 动态分析	8	4.1.2 多自由度系统振动微分方程的建立	82
1.3.3 防振措施	8	4.2 多自由度系统的固有频率和主振型	91
习题	9	4.2.1 固有频率	91
第 2 章 单自由度系统	10	4.2.2 主振型	92
2.1 单自由度系统的自由振动	11	4.2.3 固有频率的特殊情形	97
2.1.1 无阻尼系统的自由振动	11	4.3 主坐标和正则坐标	102
2.1.2 阻尼系统自由振动	23	4.3.1 振型向量的正交性	102
2.2 单自由度系统的强迫振动	29	4.3.2 主坐标	104
2.2.1 简谐激振力引起的受迫振动	29	4.3.3 正则坐标	106
2.2.2 周期激振力引起的受迫振动	38	4.4 系统对初始条件的响应	107
2.2.3 任意激振力引起的受迫振动	40	4.5 多自由度系统的阻尼	111
2.2.4 受迫振动理论的应用	44	4.6 多自由度系统的受迫振动	115
习题	49	4.6.1 多自由度系统简谐激励响应	115
第 3 章 两自由度系统振动	56	4.6.2 多自由度系统任意激励响应	116
3.1 概述	56	习题	119
3.2 两自由度系统的自由振动	58	第 5 章 多自由度系统的数值计算方法	126
3.2.1 系统的运动微分方程	58	5.1 瑞利法	126
3.2.2 固有频率和主振型	59		
3.2.3 系统对初始条件的响应	61		
3.2.4 振动特性的讨论	62		

5.1.1 瑞利第一商	126	6.5.2 激振设备	169
5.1.2 瑞利第二商	127	6.5.3 振动信号分析仪器	173
5.2 李兹法	130	6.5.4 其他激振方法	174
5.3 矩阵迭代法	134	6.6 拾振器	176
5.3.1 第一阶固有频率和主振型	134	习题	179
5.3.2 较高阶的固有频率及主振型	136	第7章 振动控制	180
5.4 子空间迭代法	137	7.1 引言	180
5.5 邓克莱法	143	7.1.1 振动控制研究背景	180
5.6 传递矩阵法	145	7.1.2 振动控制的分类	181
5.6.1 弹簧质量链状系统	145	7.2 振动的主动控制	182
5.6.2 轴盘扭转振动系统	147	7.3 振动的被动控制	183
5.6.3 梁的横向弯曲振动系统	151	7.4 隔振技术	184
习题	153	7.4.1 隔振原理	184
第6章 机械振动的测试	155	7.4.2 主动隔振	188
6.1 振动测试的目的和意义	155	7.4.3 被动隔振	189
6.1.1 振动的特点	155	7.4.4 阻振	190
6.1.2 振动测试的目的	157	7.5 阻尼减振技术	190
6.1.3 振动测试的意义	157	7.5.1 阻尼的特点	191
6.2 振动测试的内容	158	7.5.2 阻尼产生的机理	192
6.2.1 振动测试的形式	158	7.5.3 阻尼材料	193
6.2.2 振动测试系统的组成	158	7.5.4 阻尼结构及其应用	195
6.2.3 振动测试的对象	160	7.5.5 磁流变阻尼器	197
6.3 振动测试的方法	160	7.6 减振器	199
6.4 振动测试的原理	162	7.6.1 无阻尼减振器	199
6.4.1 振动测量原理	162	7.6.2 有阻尼减振器	201
6.4.2 系统特征参数的测定	163	7.6.3 动力减振器	204
6.4.3 振动运动量的测量	164	习题	206
6.5 振动的激励	166	附录A 模拟试卷	207
6.5.1 激振的方式	167	A1 模拟试卷(一)	207
		A2 模拟试卷(二)	208
		参考文献	210

第 1 章

绪 论

内容概要

主要讲述机械振动的概念，机械振动的分类方法，机械振动的主要特征，振动系统的分析及防止措施。

学习重点

掌握机械振动的概念；
了解机械振动的分类方法；
掌握机械振动的主要特征；
理解振动系统的分析；
理解防止措施。

学习难点

振动系统的分析。

1.1 引 言

机械振动现象在日常生活和工程中经常碰到。例如钟摆的摆动、船只和车辆的振动、各种机器和仪表的振动等。随着科学技术的迅速发展，振动已日益成为解决工程技术问题不可缺少的一门学科。

机械振动是物体或质点在其平衡位置附近所作的往复运动。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。机械设备因振动会产生较大的动载荷和噪声，从而影响其工作性能和使用寿命，严重时会导致零、部件的早期失效。例如，桥梁由于剧烈振动而坍塌，机床由于振动会影响加工零件的精度和粗糙度等。振动还伴随有噪声会引起工作人员的疲劳，降低生产效率。由于现代机械结构日益复杂，运动速度日益提高，振动的危害更为突出。另一方面，机械设备利用机械振动的原理，产生所需的振动，例如利用设备的振动可以完成打桩、压路、研磨、造型等各项工作。所以研究机械振动的目的就是要认识和掌握振动的基本规律，避免和减少振动的危害，充分利用其有利的一面。

1656—1657 年，荷兰的惠更斯首次提出物理摆的理论，并创制了单摆机械钟。20 世纪初，人们关心的机械振动问题主要集中在如何避免共振，因此，研究的重点是机械结构的固有频率和振型的确定。1921 年，德国的霍尔泽提出解决轴系扭转振动的固有频率和振型的计算方法。20 世纪 30 年代，机械振动的研究开始由线性振动发展到非线性振动。20 世纪

50年代以来,机械振动的研究从规则的振动发展到用概率和统计的方法才能描述其规律的不规则振动——随机振动。随着自动控制理论和电子计算机技术的发展,过去认为困难的多自由度系统的计算,已成为容易解决的问题。振动理论和实验技术的发展,使振动分析成为机械设计中的一种重要工具。

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,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得多,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。为了避免振动危害,利用振动进行工作,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。

在机械振动研究中,通常把所研究的对象,如一台机器,称为系统,其可以分为离散系统和连续系统。当系统各个物理量随时间变化的规律不能用连续函数描述,而只在离散的瞬间给出数值,这种系统称为离散系统;具有无限个广义坐标的机械动力学系统称为连续系统。离散系统具有有限个自由度,描述离散系统的数学模型为常微分方程,最基本也是最简单的离散系统就是单自由度系统。连续系统是指弦、杆、轴、梁、板和壳等弹性连续体构成的系统,其质量、弹性和阻尼特性及状态变量由连续分布的函数来表示,因此系统具有无穷多个自由度,描述连续系统的数学模型为偏微分方程,在连续系统中的连续体的边界上,也可以具有弹簧、集中质量和阻尼器等元件。

由质量、刚度和阻尼各元素以一定形式组成的系统,称为机械系统。实际的机械结构一般都比较复杂,在分析其振动问题时往往需要把它简化为由若干个无弹性的质量和无质量的弹性元件所组成的力学模型,这就是一种机械系统,称为弹簧-质量系统。弹性元件的特性用弹簧的刚度来表示,它是弹簧每缩短或伸长单位长度所需施加的力。例如,可将汽车的车身和前、后桥作为质量,将板簧和轮胎作为弹性元件,将具有耗散振动能量作用的各环节作为阻尼,三者共同组成了研究汽车振动的一种机械系统。

把外界对振动系统的激励或作用,如作用在结构上的外力,道路不平对行驶车辆的影响等,称为振动系统的激励或输入;而系统对外界影响的反应,如振动系统某部位产生的位移、速度、加速度及应力等,称为振动系统的响应或输出。振动分析就是研究激励、系统和响应三者之间的关系,如图1-1所示。



图 1-1 实际振动系统

从理论上讲,激励、系统和响应三者知其二可求出第三者。因此常见的振动问题可以分成下面几种基本课题。

1. 系统设计

在已知外界激励的条件下设计合理的系统参数,使其响应满足预期的要求。比如汽车的

平顺性设计, 已经知道激励及路面的性质, 根据人体所能承受振动的情况和其他要求, 设计汽车的悬架系统。

2. 系统识别

根据已知的激励与响应的特性分析系统的性质, 并可进一步得到振动系统的全部参数。比如振动实验, 给系统施加规定的激励, 测出系统的响应, 通过分析, 得到系统的振动性质。

3. 环境预测

已知系统振动性质和响应, 研究激励的特性。比如用加速度传感器测量结构的振动加速度。把加速度传感器看做一个振动系统, 它的振动性质是已知的, 把它安放在检测结构上, 它将随结构一起振动。因而, 系统受到的外界激励就是结构的振动。加速度传感器能测出在外界激励下它自身的响应, 根据加速度传感器的响应与它的振动性质及所受的激励之间的关系, 可以得到结构的加速度响应。

这些基本课题在工程实际中应用很广, 研究它们需要深入了解振动系统的性质和它与外界激励、系统响应之间的关系, 这些是机械振动课程的基本内容。

1.2 振动的分类

机械振动有不同的分类方法。按产生振动的原因或输入类型可分为自由振动、受迫振动和自激振动; 按振动的规律可分为简谐振动、非谐周期振动和随机振动; 按系统类型或振动系统结构参数的特性可分为线性振动和非线性振动; 按系统的自由度可分为单自由度系统振动、多自由度系统振动和连续弹性体振动; 按振动位移的特征可分为扭转振动和直线振动。为了研究的方便, 需要根据不同的特征将振动进行分类, 如表 1-1 所示。

表 1-1 机械振动的分类

分类	名称	主要特征与说明
按振动产生的原因分	自由振动	系统受初始干扰或外部激励力取消后, 系统本身由弹性恢复力和惯性力来维持的振动。当系统无阻尼时, 振动频率为系统的固有频率; 当系统存在阻尼时, 其振动幅度将逐渐减弱
	受迫振动	由于外界持续干扰引起和维持的振动, 此时系统的振动频率为激励频率
	自激振动	系统在输入和输出之间具有反馈特性时, 在一定条件下, 没有外部激励力而由系统本身产生的交变力激发和维持的一种稳定的周期性振动, 其振动频率接近于系统的固有频率
按振动的规律分	简谐振动	振动量为时间的正弦或余弦函数, 为最简单、最基本的机械振动形式。其他复杂的振动都可以看成许多或无穷个简谐振动的合成
	周期振动	振动量为时间的周期性函数, 可展开为一系列的简谐振动的叠加
	瞬态振动	振动量为时间的非周期函数, 一般在较短的时间内存在
	随机振动	振动量不是时间的确定函数, 只能用概率统计的方法来研究

续表

分类	名称	主要特征与说明
按系统的自由度分	单自由度系统振动	用一个独立变量就能表示系统振动
	多自由度系统振动	须用多个独立变量表示系统振动
	连续弹性体振动	须用无限多个独立变量表示系统振动
按系统结构参数的特性分	线性振动	可以用常系数线性微分方程来描述, 系统的惯性力、阻尼力和弹性力分别与振动加速度、速度和位移成正比
	非线性振动	要用非线性微分方程来描述, 即微分方程中出现非线性项

1.2.1 按输入类型分类

1. 自由振动

自由振动是指去掉激励或约束之后, 机械系统所出现的振动。振动只靠其弹性恢复力来维持, 当有阻尼时振动便逐渐衰减。自由振动的频率只决定于系统本身的物理性质, 称为系统的固有频率。

2. 受迫振动

受迫振动是指机械系统受外界持续激励所产生的振动。简谐激励是最简单的持续激励。受迫振动包含瞬态振动和稳态振动。在振动开始一段时间内所出现的随时间变化的振动, 称为瞬态振动。经过短暂时间后, 瞬态振动即消失。系统从外界不断地获得能量来补偿阻尼所耗散的能量, 因而能够作持续的等幅振动, 这种振动的频率与激励频率相同, 称为稳态振动。例如, 在两端固定的横梁的中部装一个激振器, 激振器开动短暂时间后横梁所作的持续等幅振动就是稳态振动, 振动的频率与激振器的频率相同。系统受外力或其他输入作用时, 其相应的输出量称为响应。当外部激励的频率接近系统的固有频率时, 系统的振幅将急剧增加。激励频率等于系统的共振频率时则产生共振。在设计和使用机械时必须防止共振。例如, 为了确保旋转机械安全运转, 轴的工作转速应处于其各阶临界转速的一定范围之外。

3. 自激振动

自激振动是指在非线性振动中, 系统只受其本身产生的激励所维持的振动。自激振动系统本身除具有振动元件外, 还具有非振荡性的能源、调节环节和反馈环节。因此, 不存在外界激励时, 它也能产生一种稳定的周期振动。维持自激振动的交变力是由运动本身产生的且由反馈和调节环节所控制。振动一旦停止, 此交变力也随之消失。自激振动与初始条件无关, 其频率等于或接近于系统的固有频率。如飞机飞行过程中机翼的颤振、机床工作台在滑动导轨上低速移动时的爬行, 钟表摆的摆动和琴弦的振动都属于自激振动。

1.2.2 按系统类型分类

1. 线性振动

从物理上看, 线性振动是指系统在振动过程中, 振动系统的惯性力、阻尼力(即耗散振动能量的力)、弹性力分别与绝对加速度、相对速度、相对位移成线性关系。做线性振动的系统称为线性振动系统。从对系统振动的数学描述方法来看, 所谓线性振动系统, 指该系统的振动可以用线性微分方程描述。

2. 非线性振动

非线性振动系统在振动过程中,系统的惯性力、阻尼力、弹性力与绝对加速度、相对速度、相对位移的关系没有线性振动那样简单。比如,系统阻尼力可能是相对速度的非线性函数,也可能是位移的函数或同时是位移和速度的函数。因而系统的振动过程只能用非线性微分方程描述。

将一个具体结构抽象为振动系统时,究竟采用线性系统,还是采用非线性系统,这往往取决于结构振动时的运动范围或者是否便于分析和解决问题,而不是结构的固有性质。具有理想线性性质的结构是不存在的。

1.2.3 按振动的规律分类

1. 简谐振动

简谐振动是描述系统运动的物理量随时间按正弦或余弦变化的运动过程。简谐振点是单自由度无阻尼系统微幅自由振动的抽象模型,悬挂在弹簧下端物体的振动可以近似地看做是简谐振点。

2. 周期振动

周期振动是指振动的物理量为时间的周期函数,可用谐波分析的方法归结为一系列简谐振动的叠加,显然,简谐振动也是周期振动。

3. 瞬态振动

瞬态振动是指振动量为时间的非周期函数,通常只在一定时间内存在。

4. 随机振动

随机振动是指一个振动系统的振动,如果对任意时刻 t ,都可以预测描述它的物理量的确定的值 x ,即振动是确定的或可以预测的,这种振动称为确定性振动。反之,对许多振动,我们无法预料它在未来某个时刻的确定值。比如,汽车行驶时由于路面不平引起的振动,地震时建筑物的振动等。这种振动称为随机振动。在确定性振动中,振动系统的物理量可以用随时间变化的函数描述。而随机振动只能用概率统计方法描述。

1.2.4 按系统的自由度分类

1. 单自由度系统振动

只用一个独立坐标就能确定的系统振动。分析一个实际机械结构的振动特性时需要忽略某些次要因素,把它简化为动力学模型,同时确定它的自由度数。简化的程度取决于系统本身的主要特性和所要求分析计算结果的准确程度,最后再经过实测来检验简化结果是否正确。最简单的弹簧-质量系统是单自由度系统,它是由一个弹簧和一个质量组成的系统,只用一个独立坐标就能确定其运动状态。根据具体情况,可以选取线位移作为独立坐标,也可以选取角位移作为独立坐标。以线位移为独立坐标的系统的振动,称为直线振动;以扭转角位移为独立坐标的系统的振动,称为扭转振动。

2. 多自由度系统振动

用多个独立坐标才能确定的系统振动。不少实际工程振动问题,往往需要把它简化成两个或两个以上自由度的多自由度系统。例如,只研究汽车垂直方向的上下振动时,可简化为以线位移描述其运动的单自由度系统。而当研究汽车上下振动和前后摆动时,则应简化为以

线位移和角位移同时描述其运动的两自由度系统。两自由度系统一般具有两个不同数值的固有频率。当系统按其中任一固有频率自由振动时,称为主振动。系统做主振动时,整个系统具有确定的振动形态,称为主振型。主振型和固有频率一样,只决定于系统本身的物理性质,与初始条件无关。多自由度系统具有多个固有频率,最低的固有频率称为第一阶固有频率,简称基频。

3. 连续弹性体振动

即无限多自由度系统振动,也称弹性体振动。系统需用偏微分方程来描述其运动。研究梁的横向振动时,就要用梁上无限多个横截面在每个瞬时的运动状态来描述梁的运动规律。因此,一根梁就是一个无限多个自由度的系统,也称连续系统。弦、杆、膜、板、壳的质量和刚度与梁相同,具有分布的性质。因此,它们都是具有无限多个自由度的连续系统,也称分布系统。

1.3 振动系统的分析

1.3.1 振动系统的特征参数

1. 质量

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。

在力学模型中,质量被抽象为不变形的刚体。根据牛顿第二定律,若质量作用一个力 F_m ,则此力与质量在与 F_m 相同方向获得的加速度 a 成正比,表示为:

$$F_m = ma \quad (1-1)$$

式中的 m 为刚体质量,是惯性的一种量度,单位是千克(kg)。对于扭振系统,广义力为扭矩 M ,广义加速度为角加速度 $\ddot{\varphi}$,则扭矩与角加速度成正比表示为:

$$M = J\ddot{\varphi} \quad (1-2)$$

式中的 J 为刚体绕其旋转中心轴的转动惯量,单位是千克·米²(kg·m²),质量 m 和转动惯量 J 是表示力(力矩)和加速度(角加速度)关系的元件。

2. 刚度

1) 基本定义

作用在弹性元件上的力或力矩的增量与相应的位移或角位移的增量之比称为刚度。它表示机械零件和构件抵抗变形的能力。在弹性范围内,刚度是零件载荷与位移成正比的比例系数,即引起单位位移所需的力。它的倒数称为柔度,即单位力引起的位移。刚度可分为静刚度和动刚度。

一个机构的刚度(k)是指弹性体抵抗变形(弯曲、拉伸、压缩等)的能力。计算公式:

$$k = F_k / x \quad (1-3)$$

其中 F_k 是作用于机构的恒力;

x 是由于力而产生的形变。

刚度的国际单位是牛顿/米(N/m),扭转弹簧刚度的单位为牛·米/弧度(N·m/rad)。

2) 小位移和大位移

计算刚度的理论分为小位移理论和大位移理论。大位移理论根据结构受力后的变形位置建立平衡方程，得到的结果精确，但计算比较复杂。小位移理论在建立平衡方程时暂时先假定结构是不变形的，由此从外载荷求得结构内力以后，再考虑变形计算问题。大部分机械设计都采用小位移理论。例如，在梁的弯曲变形计算中，因为实际变形很小，一般忽略曲率式中的挠度的一阶导数，而用挠度的二阶导数近似表达梁轴线的曲率。这样做的目的是将微分方程线性化，以大大简化求解过程；而当有几个载荷同时作用时，可分别计算每个载荷引起的弯曲变形后再叠加。

3) 静刚度和动刚度

静载荷下抵抗变形的能力称为静刚度。动载荷下抵抗变形的能力称为动刚度，即引起单位振幅所需的动态力。如果干扰力变化很慢（即干扰力的频率远小于结构的固有频率），动刚度与静刚度基本相同。干扰力变化极快（即干扰力的频率远大于结构的固有频率时），结构变形比较小，即动刚度比较大。当干扰力的频率与结构的固有频率相近时，有共振现象，此时动刚度最小，即最易变形，其动变形可达静载变形的几倍乃至十几倍。

构件变形常影响构件的工作。例如齿轮轴的过度变形会影响齿轮啮合状况；机床变形过大会降低加工精度等。影响刚度的因素是材料的弹性模量和结构形式，改变结构形式对刚度有显著影响。刚度计算是振动理论和结构稳定性分析的基础。在质量不变的情况下，刚度大，则固有频率高。静不定结构的应力分布与各部分的刚度比例有关。在断裂力学分析中，含裂纹构件的应力强度因子，可根据柔度求得。

4) 与弹性模量的关系

一般来说，刚度和弹性模量是不一样的。弹性模量是物质组分的性质；而刚度是固体的性质。也就是说，弹性模量是物质微观的性质，而刚度是物质宏观的性质。

5) 工程中的应用

在工程应用中，结构的刚度是十分重要的，因此在选择材料时弹性模量是一个重要指标。当有不可预测的大挠度时，高的弹性模量是十分必要的。当结构需要有好的柔韧性时，就要求弹性模量不要太高。

3. 阻尼

阻尼是指任何振动系统在振动中，由于外界作用（如流体阻力、摩擦力等）或系统本身固有的原因引起的振动幅度逐渐下降的特性，以及此特性的量化表征。

在物理学和工程学上，阻尼的力学模型一般是一个与振动速度大小成正比，与振动速度方向相反的力，该模型称为黏性阻尼模型，是工程中应用最广泛的阻尼模型。黏性阻尼模型能较好地模拟空气、水等流体对振动的阻碍作用。本条目以下主要讨论黏性阻尼模型。必须指出的是，自然界中还存在很多完全不满足上述模型的阻尼机制，譬如在具有恒定摩擦系数的桌面上振动的弹簧振子，其受到的阻尼力就仅与自身重量和摩擦系数有关，而与速度无关。

在力学模型中，阻尼器被抽象为无质量而具有线性阻尼系数的元件。在振动系统中，阻尼元件提供系统运动的阻尼力，其大小与阻尼器两端相对速度成正比：

$$F_d = -c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (1-4)$$

式中，负号表示阻尼力的方向与阻尼器两端相对速度的方向相反， c 为比例常数，称为