

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

现代机械工程系列精品教材



Fundamentals of
Analysis and Control for
Engineering Vibration

工程振动分析与 控制基础

吴成军 © 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材

工程振动分析与 控制基础

Fundamentals of Analysis and Control for
Engineering Vibration

吴成军 编著



机械工业出版社

本书可帮助读者快速掌握一定的工程振动基本理论,同时通过工程实例使读者提升解决工程实际问题的能力,以适应振动工程领域飞速发展的需要。全书共分11章,由绪论和上、下两篇组成,其中上篇简明地介绍了工程振动分析的五种实用而有效的方法;下篇系统地阐述了目前工程振动控制领域的五种主流的控制技术,同时介绍了工程振动控制领域当前的应用与研究进展及工程应用实例。全书适时地引入了国内外前沿的研究成果,力求将近年来航天、航空、海洋、机械、车辆以及桥梁与建筑工程等领域中涌现出来的新技术、新概念、新装置和新材料介绍给读者。全书突出“淡化枯燥理论、突出工程实用”的特色,论述简明精练,内容丰富、图文并茂,理论与实际紧密结合,实用性强。

本书适合于高等院校工科专业研究生或高年级本科生与振动相关的课程使用,也可供工程领域从事产品研发和结构设计的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程振动分析与控制基础/吴成军编著. —北京:机械工业出版社, 2018.11

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代机械工程系列精品教材
ISBN 978-7-111-61486-9

I. ①工… II. ①吴… III. ①工程力学-振动分析-高等学校-教材②工程力学-振动控制-高等学校-教材 IV. ①TB123

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第267833号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:舒恬 责任编辑:舒恬 张丹丹 任正一

责任校对:张征 封面设计:张静

责任印制:张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2019年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·363千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61486-9

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前言

振动作为自然界最普遍的物理现象之一，是结构动力学领域一门传统而又重要的学科，与人类的生产活动息息相关。随着科技的发展和时代的进步，这门学科又焕发出前所未有的勃勃生机。在工程领域，随着现代装备和产品向着精密、高速、高效和轻量化方向的不断发展，越来越多复杂且棘手的振动问题需要人们加以解决，由此带来了新技术、新方法和新材料研究的热潮。了解和掌握振动的基本理论，合理有效地控制振动乃至利用振动，既是工程领域从事产品研发和结构设计的技术人员必须掌握的专业技能，同时也是即将步入社会、从事上述相关工作的高等院校工科专业本科和研究生需要积淀的基本认知能力。

《工程振动与控制》一书是编者第一部将实用的振动分析方法与控制技术有机结合的研究生教材，自2008年出版以来受到了学生们和读者的认可。在该书出版后的10年时间里，振动工程领域发生了日新月异的变化，该书中的很多内容显得陈旧、落后，不能适应飞速发展的社会需求。为此，在继续保持原书“淡化枯燥理论、突出工程实用”特色的基础上，重新编写一部更能适应新形势发展的研究生教材已成为必然。

本书是编者在总结20年研究生振动课的教学经验以及科研成果的基础上，通过对《工程振动与控制》一书大幅修改、完善与补充，并参考近年来200余篇国内外研究文献而重新编写完成的，秉承了简明精练、深入浅出、内容丰富、实用性强的特点。全书共11章，包括绪论和上、下两篇。其中上篇主要介绍实用而有效的工程振动分析方法，包括机械阻抗法、频响函数法、模态分析法、传递矩阵法和有限元法这五种方法；下篇主要介绍目前在工程振动控制领域中使用的主流振动控制技术，包括隔振技术、动力吸振技术、黏弹阻尼技术、颗粒阻尼技术和振动主动控制技术这五种技术。本书的新颖之处在于针对每种振动控制技术，配置了“应用与研究进展”一节，力求将近年来航天、航空、海洋、机械、车辆以及桥梁与建筑工程等领域中涌现出来的新技术、新概念、新装置和新材料引入到书中，同时配以大量实例。

本书涵盖的内容可供32~54学时的高等院校工科专业研究生或高年级本科生的相关课程使用，也可供相关的教师与工程技术人员参考。

衷心感谢西安交通大学研究生院研究生精品课程建设项目的宝贵资助！

限于编者的水平，书中难免存在疏漏错误之处，恳请读者批评指正。

编者
于西安交通大学

目 录



前 言

第 1 章 绪论	1	1.3 振动分析方法	7
1.1 振动的基本概念	1	1.4 振动控制方法	7
1.2 工程中的振动问题	2		

上篇 工程振动分析方法

第 2 章 机械阻抗法	10	4.4 一维弹性体的模态分析	37
2.1 引言	10	4.4.1 纵向振动杆的模态分析	37
2.2 机械阻抗的定义	11	4.4.2 横向振动梁的模态分析	41
2.3 基本元件的机械阻抗	12	4.5 动态特征灵敏度分析	44
2.4 系统的机械阻抗	13	4.5.1 一阶特征值灵敏度	45
2.5 系统的稳态响应	14	4.5.2 一阶特征向量灵敏度	45
第 3 章 频响函数法	18	4.6 试验模态分析	47
3.1 引言	18	4.6.1 分类	47
3.2 单自由度系统的频响函数分析	18	4.6.2 技术流程	49
3.2.1 黏性阻尼情形	18	4.6.3 工程应用	51
3.2.2 结构阻尼情形	21	第 5 章 传递矩阵法	63
3.3 多自由度系统的频响函数分析	23	5.1 引言	63
3.3.1 约束系统	24	5.2 状态向量	63
3.3.2 自由系统	25	5.3 基本单元的传递矩阵	64
3.4 多自由度系统的稳态响应	26	5.4 系统的固有振动分析	68
第 4 章 模态分析法	28	5.4.1 系统的传递矩阵方程	68
4.1 引言	28	5.4.2 离散系统的固有振动分析	68
4.2 多自由度系统的实模态分析	29	5.4.3 扭转振动轴系的固有振动分析	70
4.2.1 无阻尼情形	29	5.4.4 弯曲振动梁的固有振动分析	71
4.2.2 经典阻尼情形	31	5.5 系统的稳态响应	72
4.2.3 实模态频响函数矩阵	31	第 6 章 有限元法	75
4.3 多自由度系统的复模态分析	35	6.1 引言	75

6.2 假设模态法	75	6.3.3 梁单元的质量阵和刚度阵	79
6.3 一维弹性体振动的有限元分析	77	6.3.4 单元集成与稳态响应求解	80
6.3.1 网格划分	77	6.4 常用有限元分析软件	94
6.3.2 杆单元的质量阵和刚度阵	78		

下篇 工程振动控制技术

第7章 隔振技术	100	8.4.2 主动式动力吸振技术	134
7.1 引言	100	8.5 工程应用实例	137
7.2 隔振原理	100	8.5.1 多跨转子轴系临界振动控制	137
7.2.1 积极隔振	101	8.5.2 轻型客车动力总成振动控制	139
7.2.2 消极隔振	101	8.5.3 卫星飞轮振动控制	139
7.3 隔振特性	102	8.5.4 硬岩掘进机推进系统振动控制	141
7.4 基础阻抗对隔振效果的影响	103		
7.5 隔振器	106	第9章 黏弹阻尼技术	144
7.5.1 钢弹簧隔振器	106	9.1 引言	144
7.5.2 橡胶隔振器	107	9.2 材料的阻尼耗能机理	144
7.5.3 橡胶空气弹簧	107	9.3 黏弹材料	145
7.5.4 钢丝绳隔振器	109	9.3.1 概述	145
7.5.5 金属橡胶隔振器	109	9.3.2 使用方法	146
7.6 隔振系统	111	9.3.3 附加阻尼结构/阻尼器	146
7.6.1 单级隔振系统	111	9.4 应用与研究进展	148
7.6.2 双级隔振系统	111	9.4.1 直升机旋翼摆振阻尼器	148
7.6.3 浮筏隔振系统	113	9.4.2 车辆与飞机的阻尼减振	150
7.7 应用与研究进展	114	9.4.3 主动约束层阻尼技术	156
7.7.1 航天器隔振	114	9.4.4 阻尼合金	157
7.7.2 舰船隔振	120	9.5 工程应用实例	161
7.8 工程应用实例	121	9.5.1 16m 立式车床的振动控制	161
7.8.1 纳米光刻机平台超低频隔振	121	9.5.2 飞机发动机叶片的振动控制	162
7.8.2 光学遥感卫星微振动隔离	123	9.5.3 机床床身摇摆振动控制	162
7.8.3 机载光电吊舱隔振	124		
7.8.4 海洋平台隔振	125	第10章 颗粒阻尼技术	165
第8章 动力吸振技术	127	10.1 引言	165
8.1 引言	127	10.2 冲击阻尼技术	165
8.2 无阻尼动力吸振器	128	10.3 颗粒阻尼技术	167
8.2.1 基本原理	128	10.3.1 概述	167
8.2.2 设计要点	128	10.3.2 颗粒阻尼器	167
8.3 有阻尼动力吸振器	129	10.3.3 非阻塞性颗粒阻尼技术	168
8.3.1 基本原理	129	10.3.4 颗粒阻尼减振机理与特性	169
8.3.2 设计要点	130	10.4 应用与研究进展	170
8.4 应用与研究进展	131	10.4.1 航天工程领域	170
8.4.1 被动式动力吸振技术	131	10.4.2 其他工程领域	174
		10.4.3 理论分析方法	176

10.5 工程应用实例	181	11.4.5 磁流变流体	204
10.5.1 全自动捆钞机的振动控制	181	11.4.6 磁流变弹性体	206
10.5.2 卫星低温结构冷级面板的振动 控制	183	11.5 工程应用实例	208
10.5.3 船用压缩机组机架振动控制	184	11.5.1 快走丝线切割机电极丝的振动 主动控制	208
第 11 章 振动主动控制技术	189	11.5.2 滚筒洗衣机的半主动振动 控制	209
11.1 引言	189	11.5.3 铣床托盘式夹具系统的振动 主动控制	212
11.2 基本概念与技术原理	189	11.5.4 基于视觉反馈的光学 P&T 转台 的超低频振动主动控制	213
11.3 应用与研究进展	190	11.5.5 齿轮箱的振动主动控制	215
11.3.1 主动振动控制	190	11.5.6 卫星激光通信望远镜机敏复合 平台设计	217
11.3.2 半主动振动控制	193	参考文献	220
11.4 机敏材料	195		
11.4.1 压电材料	195		
11.4.2 磁致伸缩材料	198		
11.4.3 形状记忆合金	200		
11.4.4 电流变流体	203		

绪 论

1.1 振动的基本概念^[1-4]

振动一词来源于拉丁语“Vibrationem”，意为“颤动”(Shaking)和“舞动”(Brandishing)，是描述某一运动的物理量在平衡位置附近做反复振荡的物理现象，是自然界最普遍的现象之一。大至宇宙，小至原子粒子，无不存在着振动。在工程领域，随着现代装备和产品向着精密、高速、高效和轻量化方向的发展，振动问题更显得突出，已成为影响结构动态性能的关键指标之一，越来越受到学术界和工程界的高度关注。作为结构动力学领域的一个重要分支，振动已发展成为一门独立的学科，而且随着新技术、新材料的不断涌现，该学科势必将得到蓬勃发展，在国民经济各领域中发挥越来越大的作用。

一般地，振动可按以下几种方法分类。

1. 按照振动产生原因分类

按照振动产生的原因，振动主要分为自由振动和强迫振动两大类，其中自由振动是系统受初始干扰或原有外部激励撤销后产生的振动；而强迫振动（又称受迫振动）则是系统在持续的外部激励作用下产生的振动。

此外，还有一种振动也可归结为这一类，即自激振动，它是一种由系统本身产生的激励所维持的非线性周期振动。维持自激振动的交变力是由系统本身的运动产生的，运动一旦停止，交变力随之消失，自激振动也随即停止。和强迫振动一样，它也是工程中最常见的一种振动，但其产生的机理却复杂得多。常见的自激振动有切削工件时引起的切削颤振，飞机机翼由于气流引起的颤振，高压输电线路导线的舞动等。

2. 按照系统自由度分类

按照系统的自由度（完全描述系统的一切部位在任何瞬时的位置所需要的独立坐标个数），振动可以分为单自由度系统振动、多自由度系统振动和连续体振动。其中，单自由度系统振动是指仅用一个独立坐标就能确定的系统的振动，多自由度系统振动是指需要多个独立坐标才能确定的系统的振动，这两者常用常微分方程或方程组来描述；而连续体振动是指无限多自由度系统的振动，一般也称弹性体振动，需用偏微分方程或偏微分方程组来描述。

3. 按照振动规律分类

按照振动规律，振动可以分为周期振动、瞬态振动和随机振动，其中周期振动是指振动力可以表示为时间的周期函数的一大类振动，最简单的一类周期振动是简谐振动，其振动力为时间的正弦或余弦函数。瞬态振动是指振动力只在一定时间内存在的振动；而随机振动是指振动力为时间的非确定性函数的一大类振动。

4. 按照系统的参数特性分类

按照系统的参数特性，振动可以分为线性振动和非线性振动。线性振动是系统的弹性力、阻尼力和惯性力分别与振动位移、速度和加速度呈线性关系的一类振动，可用线性微分方程或方程组来描述；非线性振动则是系统的上述参数有一组以上不呈线性关系时的振动，此时微分方程中将出现非线性项。

1.2 工程中的振动问题

工程领域中的振动问题，主要以机械振动（所描述的物理量为机械量或力学量）为主。对于机械装备或工程结构来说，振动问题在大多数情况下是有害的，必须加以抑制或控制。振动问题涉及的工程领域非常多，本节将主要针对如下领域进行概述。

1. 航天工程领域

空间开发及探测活动中运载火箭发射所承受的力学环境极为复杂，其中高空气流是主要的外界激励源之一。风切变 [风矢量（如风向、风速等）在空中水平和（或）垂直距离上变化的一种大气现象] 作用极易引发箭体附件共振，导致发射失败。最具代表性的例子是“长征二号 E”运载火箭发射“亚太二号”通信卫星失败^[5-6]，如图 1-1 所示。1995 年 1 月 26 日，“长征二号 E”火箭在西昌卫星发射中心发射美国休斯空间通信国际公司研制的“亚太二号”通信卫星，在火箭正常飞行到约 50s 时发生爆炸，造成星箭全部损失。故障原因一是在冬季高空切变风条件下，卫星和上面级与运载火箭的特殊连接方式出现谐振（即共振），造成卫星局部结构破坏；二是在冬季高空切变风条件下，运载火箭整流罩的局部结构破坏。

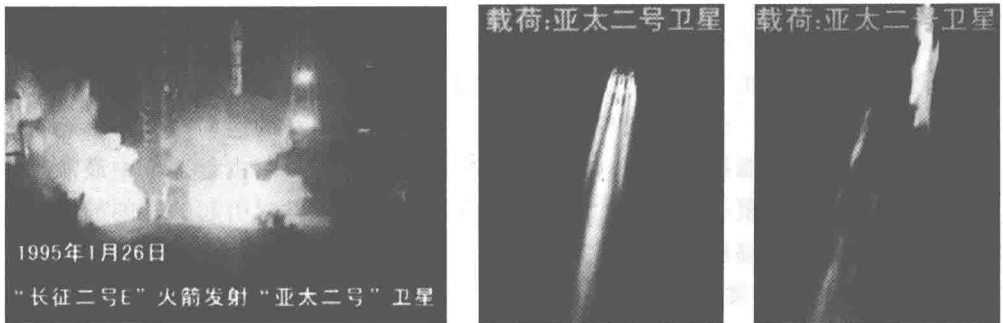


图 1-1 “亚太二号”通信卫星发射失败视频截图^[6]

此外，在航天器（如卫星、空间站、返回舱等）随火箭发射升空以及返回阶段，也要经历极为恶劣的声振以及冲击载荷作用。而且在轨运行阶段，航天器上的动量轮、控制力矩陀螺、低温制冷压缩机、太阳帆板驱动机构和调姿陀螺等的正常工作往往容易引发航天器结

构产生宽频微振动，直接影响所携带的科学试验或观测仪器的工作性能，特别是对光学敏感设备的成像质量造成影响。

2. 航空工程领域

飞机在高空高速飞行的过程中，受气流影响极易引发机翼颤振，直接威胁飞机的安全，为此早在20世纪60年代美国就投入巨资对该问题进行了研究并取得了显著的成效。另外，目前影响飞机乘坐舒适性的舱内噪声也主要来自湍流边界层引发的机身侧向蒙皮（壁板）的振动。

直升机在地面运行与空中飞行过程中，在气流以及旋翼、尾桨等高速旋转部件的共同作用下，机体往往产生严重的振动问题，甚至引发灾难性的机毁人亡。防止直升机产生“地面共振”和“空中共振”，即旋翼-机体耦合自激振动，一直是直升机设计极为重要的关键环节之一。2012年2月23日，巴西北部帕拉州的一架救援直升机在降落过程中发生“地面共振”，驾驶舱损毁，如图1-2所示。

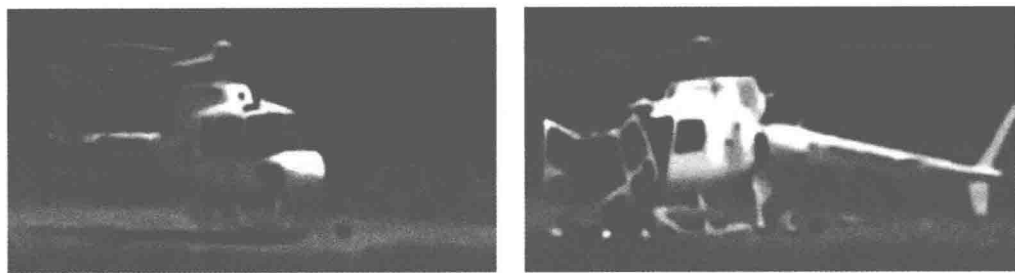


图1-2 巴西救援直升机共振损毁视频截图^[7]

此外，机载光电吊舱作为航空侦察的主要装备，是一种利用光电载荷对地面目标进行搜索、识别、定位与跟踪的航空探测监视系统，以获得高质量的图像。但载机的振动往往导致光电吊舱抖动，影响成像质量。

3. 船舶与海洋工程领域

重型燃气轮机组作为现代船舶的重要动力系统组件，在运转过程中往往产生强烈的振动，不仅影响其自身的使用寿命以及船舶上其他设备的正常工作，对于军用舰船来说还直接影响其隐身性能，威胁自身安全以及影响战斗力。

海洋工程领域中的离岸设备（如海洋平台）是海洋石油天然气资源开发的基础性设施，是海上生产作业的重要基地，长期处于恶劣的海洋环境中，受风、浪、流、海冰、地震等自然环境作用，在使用过程中也存在明显持续不断的振动问题，影响平台的正常工作。

4. 机械工程领域

金属切削机床在加工工件的过程中，刀具与工件之间往往产生周期性往复振动，不仅破坏工件与刀具之间的正常运动轨迹，影响工件的表面质量，还容易缩短刀具乃至机床的使用寿命。此外机床床身的低频摇摆振动也一直是机床设计与制造领域急需解决的关键问题。

齿轮箱是机械工程领域广泛应用的重要传动部件，其内部的齿轮副在啮合过程中，由于齿形误差、装配误差以及弹性变形等影响，往往引发啮合冲击而产生振动，容易引起齿轮副产生疲劳裂纹（见图1-3）而失效，甚至引发事故，直接威胁齿轮箱的正常工作。

超精密测试或加工设备（如P&T转台、纳米光刻机等）由于精度要求极为苛刻，即使

超低频微振动环境，也极易影响到其工作性能。

此外，许多大型旋转机械（如压缩机组、发电机组等）在运行过程中，在启、停车阶段无法避免地必须经过临界转速，由于转子不平衡往往会引发强烈的共振，严重影响机组的稳定运行，甚至引发灾难性事故。图 1-4 所示为某航空发动机停车后不久再起动，发生转子热弯曲，热弯曲转子在通过临界转速时，产生的剧烈振动导致压气机叶片偏磨、轴承烧伤并“抱轴”，造成了发动机的严重损坏。

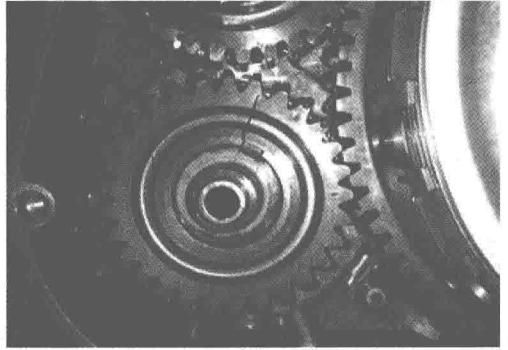


图 1-3 齿轮的疲劳裂纹^[8]



图 1-4 某航空发动机轴承烧伤（源自网络）

近年来，随着我国道路与城市建设的飞速发展，作为隧道掘进的重大装备，硬岩掘进机在掘进作业时，滚刀破岩产生的强冲击激励会引起推进系统的剧烈振动。这样不仅严重影响工作效率，而且极易诱发关键构件的损伤以及过早失效，甚至发生断裂等危害，影响使用寿命。

5. 车辆工程领域

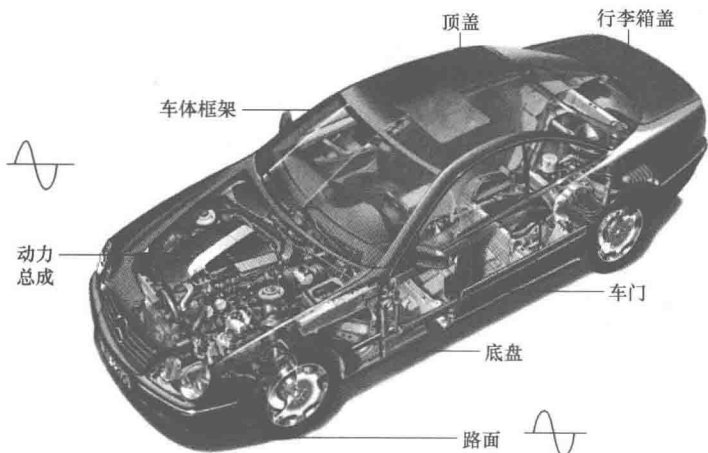
由发动机、变速器及其附件组成的汽车动力总成，是汽车的动力源和动力传输机构，也是汽车最主要的振动和噪声源。此外，路面的随机激励也极易通过轮胎和悬架系统引发车体产生振动并诱发辐射噪声，如图 1-5 所示。关于汽车振动、噪声以及声振粗糙度的 NVH（Noise, Vibration and Harshness）技术是当前国内外汽车行业最为重视的关键技术问题之一，已占到整车研发费用的近 20%。

轨道车辆（普通列车、高速动车组列车、地铁列车、轻型单轨列车等）在运行过程中，由于轮轨之间复杂的相互作用而导致的轮轨振动以及通过悬架系统传向车体引发的车体振动，直接影响乘坐舒适性和安全运行。

目前，我国的高速铁路正处在蓬勃发展期，随着高速列车运行速度的不断提高，人们在享受其所带来的快速和便捷的同时，对其行驶安全性和乘坐舒适性更为关注。与普通低速列车相比，高速列车轮轨动力作用更为剧烈，所处的动态环境更为恶劣，这就要求车辆系统具有更高的运行稳定性、安全性和良好的减振性能。

6. 桥梁与建筑工程领域

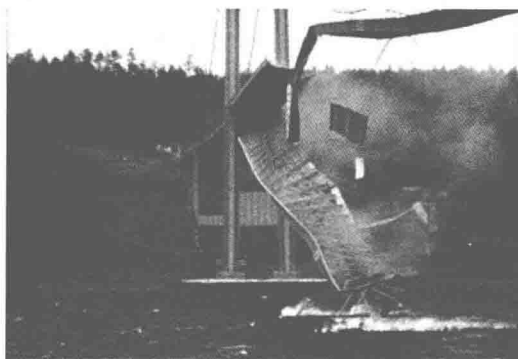
振动对于桥梁和建筑的危害极大，其中最著名的例子是 1940 年 11 月美国华盛顿州塔科马海峡吊桥因大风产生的风切变和湍流的影响而引发共振坍塌，如图 1-6 所示。当今，高层建筑和斜拉索桥梁得到了广泛应用，但它们极易受到风载荷和地震载荷的影响而引发振动问

图 1-5 汽车主要的振源以及车体易振部件^[9]

题。如何有效地抵抗风致振动和地震的冲击破坏，一直是工程师必须着重考虑的重要技术环节之一。



a) 坍塌前



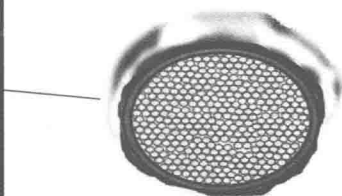
b) 坍塌后

图 1-6 美国华盛顿州塔科马海峡吊桥共振坍塌^[10]

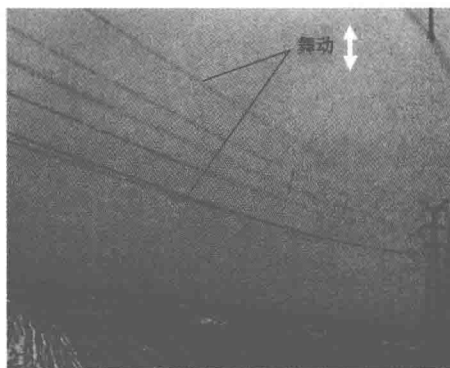
7. 电力工程领域

电力工程领域的振动问题也普遍存在，其中最具有代表性的就是输电线路导线的舞动。舞动是冬季，特别是高纬度地区常见的一种典型的自激振动现象，即带有不均匀覆冰的导线在横向风力作用下产生低频、大幅度垂向振动（见图 1-7），是长期影响电网输电线路安全度冬的重要因素。不仅可以引起电网短路跳闸，还会导致杆塔螺栓松动以及绝缘子等附件损坏，甚至发生导线断股、断线，塔基受损乃至倒塔等安全事故，对电网的正常运行威胁极大。

除了上述工程领域，其他工程领域的振动问题也普遍存在，这里不再一一赘述。上述工程中的振动问题主要体现为振动的危害，然而振动也有其积极的一面，例如利用振动原理工作的振动夯实和振动筛选设备以及振动电动机（如广泛应用在光学相机镜头中的超声电动机）等，另外还可以利用振动信号进行设备故障和医疗疾病的诊断、无损检测与超声探伤、振动加工、振动时效处理以及振动能量俘获等，图 1-8 给出了工程领域中利用振动的经典例子。

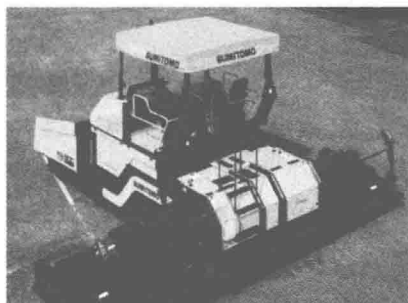


a) 导线非均匀覆冰



b) 某高压输电线路导线舞动现场的视频截图：未舞动(左图)发生舞动(右图)

图 1-7 输电线路导线舞动 (源自网络)



a) 振动摊铺机



b) 振动筛

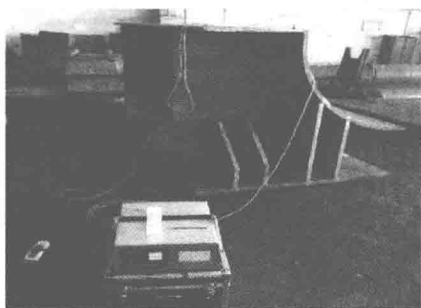


c) 超声电动机



d) 无损检测

图 1-8 振动的利用 (源自网络)



e) 振动时效处理



f) 核磁共振医学诊断

图 1-8 振动的利用 (源自网络) (续)

本书主要围绕工程中绝大多数的振动危害问题介绍相关的振动控制技术, 而关于振动的利用问题, 读者可自行参阅相关资料进行学习。

1.3 振动分析方法

随着国民经济的迅猛发展, 工程中的振动问题越来越突出。传统的经验设计、类比设计以及静态设计方法已不能满足工程要求。为了更好地了解工程振动产生的机理, 掌握工程结构的振动特性, 预测结构的振动响应, 辨识结构的物理或模态参数以及载荷激励, 以便能够有的放矢地采取合适的振动控制方法进行工程振动的抑制, 同时借助于计算机数字化设计技术对工程结构进行动力修改或低振动优化设计, 进行工程结构的振动分析非常必要而且具有重要的意义, 也是振动控制、可靠性设计、故障诊断乃至振动能量回收等诸多研究的基础。

作为结构动力学的重要分支之一, 振动分析同样涉及三大动力学研究内容: ①已知激励和系统求响应, 属于响应预估的范畴, 为第一类动力学问题, 也称动力学正问题; ②已知激励和响应求系统, 属于系统辨识的范畴, 为第二类动力学问题, 也称第一类动力学逆问题; ③已知系统和响应求激励, 属于载荷识别的范畴, 为第三类动力学问题, 也称第二类动力学逆问题。

经典的振动分析方法主要以牛顿第二定律或达朗贝尔原理为代表的牛顿矢量力学体系以及以拉格朗日方程为代表的分析力学体系为主, 现有的绝大多数振动相关书籍均是基于这两类力学体系进行振动分析的。而工程上还有一些基于学科交叉而衍生出来的、简单有效的实用方法, 也可以快速地进行结构的振动分析, 如机械阻抗法、频响函数法以及传递矩阵法等。本书将对这些方法予以介绍, 作为补充也对基于上述力学体系的模态分析法和有限元法进行介绍。

限于篇幅, 本书主要对于了解和掌握振动控制技术具有重要指导作用的第一类动力学问题进行振动分析, 主要以线性系统的稳态响应(谐响应)求解为目标进行上述方法的介绍。

1.4 振动控制方法

如前所述, 工程中的振动问题在大多数情况下是有害的, 因此有效地控制振动就显得非常必要和迫切。一般来说, 振动控制的基本流程首先从振源特性调查入手, 通过传输路径分

析、减振量确定等一系列步骤选定最佳方案并付诸实施，最后对振动控制效果进行评价。

众所周知，振动的产生以及振动能量的传输过程中有三个基本环节，即振源、传输路径和受体（需要保护的對象，主要指需要防振的设备，当然有时也指人员），如图 1-9 所示。振动控制的基本方法就是从这三个环节入手：对振源进行控制、在传输路径上控制和对受体进行防护。然而，某一具体的振动控制措施的制定，要求从振动控制指标、经济效益、技术可行性诸方面综合平衡，以求得最佳效果。

对振源进行控制是最根本的振动控制方法，因为受体的振动通常是由振源激励而引起的，外部激励的消除或减弱，受体的振动自然也消除或减弱。本书介绍的动力吸振技术、黏弹阻尼技术、颗粒阻尼技术等均属于这一范畴。

在传输路径上控制即振动隔离是最为有效而常用的振动控制方法，振动能量在结构内的传播具有明显的波传递特征，对其进行阻隔是防止振动能量传递到受体的最为有效的方式。工程中往往通过在振源和受体之间置入一种通常称为隔振器的弹性装置，依靠该装置的变形来削弱振源对受体的影响，从而实现控制振动的目的，本书介绍的隔振技术就属于这类方法。

当然，当上述两种方法均不能有效地抑制振动对受体的影响时，对受体本身进行防护就显得非常必要，这时所采用的控制技术与振源控制所采用的技术是一样的。

为了方便读者了解和掌握本书的知识点，本书的内容共分为上、下两篇，其中上篇主要介绍工程振动分析方法，包括机械阻抗法、频响函数法、模态分析法、传递矩阵法以及有限元法这五种方法；而下篇主要介绍目前工程振动控制领域主流的振动控制技术，包括隔振技术、动力吸振技术、黏弹阻尼技术、颗粒阻尼技术以及振动主动控制技术这五种技术，同时每种技术介绍了当前的应用与研究进展以及工程应用实例。

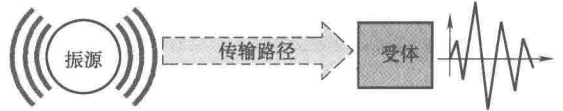


图 1-9 振动产生与传播的基本环节

上 篇

▶▶ 工程振动分析方法

机械阻抗法

2.1 引言

任何线性机械系统，在确定的激励力（输入）作用下，就会有确定的响应（输出），这说明输入、系统和输出三者之间存在确定的函数关系，这一点与电路系统存在相似性。对于由阻尼、惯性和弹性元件组成的机械系统来说，在振源的作用下将会产生机械振动；而由电阻、电感和电容组成的电路系统，在交流电源的作用下将会产生电磁振荡。在一定的条件下，这两个物理过程都可以用相似形式的微分方程来描述（见表 2-1）。数学形式的相似，反映了物理本质上的相似规律。利用这一点，进行机-电模拟，为机械系统的分析带来了很大的方便。在这一背景下，机械阻抗法（Mechanical Impedance Method）就应运而生。由于机械阻抗是描述系统输入和输出之间关系的一个重要的物理量，只与系统本身的特性参数有关，因此知道了系统的机械阻抗和激励力就可以通过简单的代数运算得到系统的响应，而不需要求解系统的运动微分方程，这就是机械阻抗法的基本思想。

表 2-1 机械系统与电路系统的对应关系^[11]

机械系统		电路系统	
直线振动	扭转振动	串联电路	并联电路
