

机械振动学

张义民

编著

*Introduction of
Mechanical Vibrations*

漫谈



科学出版社

www.sciencep.com

机械振动学漫谈

张义民 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书深入浅出地介绍了机械振动学的总体框架,通过众多事例直观生动地阐明了机械振动学的基本知识与物理机理。本书内容丰富、概念清晰、阐述详尽、剪系统性强,为读者展现了一个绚丽多彩的机械振动世界,有助于开阔读者的视野、提升读者的思维能力、培养读者的探索精神。希望读者能从中体会到机械振动学的奇妙性和实用性。

本书可作为大学生和研究生学习机械振动的教学用书,也可作为有关科学技术人员和工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机械振动学漫谈 / 张义民编著. —北京: 科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-027580-6

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 088804 号

责任编辑: 耿建业 于宏丽 / 责任校对: 鲁素
责任印制: 赵博 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 5 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2010 年 5 月第一次印刷 印张: 14

印数: 1—4 000 字数: 150 000

定价: 36.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者简介



张义民, 1958年9月生, 工学博士, 东北大学机械工程与自动化学院教授, 博士生导师, “长江学者”特聘教授, 国务院学位委员会学科评议组(机械工程学科)成员, 国家自然科学基金委员会机械学科评审组专家, “长江学者和创新团队发展计划”创新团队带头人, 享受国务院政府特殊津贴人员, 中国机械工业青年科技专家, 国家安全重大基础研究项目专家组专家, 亚洲-太平洋地区振动会议国际指导委员会委员, 《机械工程学报》、《振动工程学报》等期刊杂志编委会编委。

主持和承担国家自然科学基金、国家自然科学基金重点项目、国家自然科学基金重大项目及 GM 中国科学研究基金、“863”目标导向类项目、“973”项目、国家科技支撑计划项目、“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项课题、国家高技术产业化示范工程项目、教育部高等学校骨干教师资助计划、中国博士后科学基金等省部级以上的科研项目 30 多项。获国家科技进步奖二等奖 2 项, 教育部自然科学奖一等奖 1 项, 教育部科学技术进步奖一等奖 2 项, 通用汽车中国高校汽车领域创新人才奖一等奖 1 项, 省级科技进步奖 11 项, 国家自然科学基金优秀(十佳)项目 1 项, 吉林省第三届青年科技奖 1 项。

截至 2009 年, 在国内外著名期刊《中国科学》(E 辑)、*Comput Method Appl M*、*J Vib Acoust-T ASME*、*AIAA J*、*P IMechE D-J Aut*、*J Sound Vib* 等上发表论文 300 余篇, 其

中有 150 多篇（次）论文被 SCI、EI 等检索系统收录；被 SCI 和国内核心期刊等他引约 800 余次；独立撰写专著和教材 3 部、主编论文集 1 套，合作撰写专著 2 部；申请并获批发明专利和软件著作权 5 项。

前 言

“知识就是力量”乃是一句至理名言，它影响了几代人。然而，如今人类步入信息时代，人们已经不可能完全掌握浩如烟海的知识。如何培养获取知识的能力，以便在知识的天空里自由地翱翔；如何提高自身的素质，以便在浩瀚的海洋里乘风破浪；如何培养发现、提出并形成问题的能力，以便在芸芸众生里出类拔萃，是现今时代的重要因素。因此，当代的至理名言应该是“知识+能力+素质+毅力+机遇+伯乐才真正具有力量，并逐步走向成功”。

苏联著名教育家赞科夫（Zankov, 1901~1977）把“能力”归纳成5种：观察力、记忆力、思维能力、想象力和操作能力。他认为，教师的任务不仅仅是传授知识，更重要的是要发掘和提高学生在这些方面的能力，特别需要培养学生的兴趣和激发各种想象力。爱因斯坦（Einstein, 1879~1955）对此也曾发表过精辟的见解，他指出：“想象力比知识还重要，因为知识是有限的，而想象力概括着世界上的一切，推动着进步，并且是知识进化的源泉。严格地说，想象力是科学研究中的实在因素。”想象力升华到一定程度，就有可能出现灵感思维，而灵感思维的出现是发明创造的源泉。可见，不仅要培养学生掌握、分析和解决问题的能力，更重要的是要培养学生发现、提出并形成问题的能力。只有这样，才能为国家造就出成千上万的高科技人才。

然而，创造性思维的出现，首先应是对所思考的问题有着十分浓厚的兴趣和非常广泛的知识基础。可见，在求知成才的道路上，应该培养和激发学生的兴趣。兴趣不仅是求知的先导，也是锲而不舍的动力，更是激发灵感的要素。作为教师，不仅要传授知识，更重要的是培养学生的兴趣、激发学生的各

种能力、提高学生的素质。本书力图达到激发学生的兴趣、增强学生的各种能力、教导学生如何观察世界和认识世界、拓宽学生的思路、挖掘学生的潜能、激发学生的想象力，为培养各类高级人才打下坚实的基础。

本书阐明了各种振动现象的物理机理以及分析振动问题的数学方法，主要介绍了机械振动力学的基本理论与方法及其在实际工程与日常生活中的应用。读者只需具备大学的基础知识，就可以阅读本书。本书可以作为高等院校各类专业学生的教材，也可供大学生与研究生阅读参考，还可作为有关科学技术人员和工程技术人员的参考用书。

本书始于 2000 年面向全校各专业学生开设的选修课“振动漫谈”的讲义，经过逐年积累与修改而成书，因此在编写过程中，参考了国内外的有关文献和 Internet 网上资料。限于篇幅，本书的参考文献中只列出了其中的一部分。在此，谨向所有原作者表示衷心的感谢。

本书的编写得到了中国科学院院士、东北大学闻邦椿教授和多方人士及团队成员的热情鼓励和大力支持，在此一并向他们表示深深的谢意。

鉴于作者并非专业的科普作家，书中疏漏和不妥之处在所难免，敬请读者不吝批评、指正。

作者

2010 年 2 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 力学简介	1
1.2 振动力学简介	2
1.3 发展简史	4
1.4 振动系统模型.....	12
1.5 激励与响应.....	13
1.6 振动的分类.....	15
1.7 振动问题及其解决方法.....	17
1.8 单位.....	18
1.9 机械振动学的内涵.....	20
第 2 章 振动的基本理论	41
2.1 自由振动.....	41
2.2 自由振动的应用.....	45
2.3 有阻尼系统的自由振动.....	46
2.4 有阻尼自由振动的应用.....	50
2.5 强迫振动.....	52
2.6 工程中的共振问题.....	57
第 3 章 无处不在的振动学	68
3.1 计算动力学.....	68
3.2 机构动力学.....	70
3.3 传动(齿轮)动力学.....	72
3.4 转子动力学.....	74
3.5 机床振动学.....	76
3.6 车辆振动学.....	78
3.7 航空航天器动力学.....	81

3.8	船舶振动学	84
3.9	机器人动力学	86
3.10	振动压路机的振动分析	87
3.11	流体诱发的振动问题	90
第4章	防范有害的振动	94
4.1	汽车减振	94
4.2	大型汽轮机的振动分析	99
4.3	内燃机的振动分析	102
4.4	船舶的稳定	103
4.5	机床的抗振分析	108
4.6	漫话机械减振措施	110
4.7	地震与波	118
第5章	利用有益的振动	129
5.1	振动设备及相关技术的应用与发展	130
5.2	非线性振动利用技术的应用与发展	134
5.3	波动与波能利用技术的应用和发展	139
5.4	电、磁、光的振荡器在工程技术中的应用	146
5.5	共振理论的利用	148
5.6	自然界中的振动现象与振动规律及利用	151
5.7	有趣的“同步运动”的利用	165
5.8	人类社会中的振动现象与振动规律及利用	171
第6章	振动与声	174
6.1	声音的基本概念	174
6.2	耳蜗力学	178
6.3	噪声及其危害	182
6.4	机械产品的噪声与控制	185
6.5	车辆的噪声与控制	198
6.6	声音杀手	204
6.7	奇妙的声学现象	208
	参考文献	215

1.1 力学简介

力学是研究力对物体作用的科学。首先，它是所有自然科学的主要部分。近代科学的发展始于牛顿（Newton）对力学定律的阐明，牛顿在建立经典力学过程中创造的现代自然科学方法论不仅奠定了科学大厦的基础，而且始终贯穿着整个自然科学的研究，指导着各门自然科学的发展。其次，力学又是众多应用科学（特别是工程科学）的基础，它是人类改造自然的工具。当代许多重要工程技术，如宇航工程、土木工程、机械工程、海洋工程等都是以力学为基础的，在这些工程中遇到的许多重大技术难题多属于力学问题，不仅如此，力学的定量建模方法还广泛应用到经济、金融和管理等其他学科领域。因此，力学已从一门基础学科发展成为以工程技术为背景的应用基础学科，当今几乎所有的工程技术领域都离不开力学，它已渗透到工程技术的各个领域。

力是力学中的最基本概念之一，是使物体发生形变或产生加速度的外因。物体受力的作用往往同时产生两种效应：一种是使物体发生形变，称为力的内效应；另一种是使物体运动状态发生改变，称为力的外效应。当一个物体受到另一个物体的力的作用时，无论受力物体是否运动它都会发生形变，但在研究物体的运动时（如地球受万有引力作用围绕太阳运动）其形变通常可以忽略，也就是说不考虑力的内效应，这时受力物体称为刚体。在我们的日常生活中天天都与力打交道，在汉语辞典中有关“力”的词条多达 700 多个，如“力所能及”、“力透纸背”、“声嘶力竭”等。直到 1687 年牛顿才在他的《自然哲

学的数学原理》^[1]中给出了力的严格科学定义。在牛顿之前的经典力学中力只是一种方法论性质的工具，但牛顿提出的力是一种定量的概念，它代表刚体质量和加速度的乘积，这个正确概念的引进为物理学乃至整个自然科学奠定了理论基础。在国际单位制中，力学家用 N（牛顿）作为力的单位，以纪念这位伟大的先驱。使质量为 1kg（千克）的物体产生 1m/s^2 （米/秒²）加速度所需要的力就为 1N。

1.2 振动力学简介

振动是在日常生活和工程实际中普遍存在的一种现象。事实上，人类就生活在振动的世界里，地面上的车辆、空中的飞行器、海洋中的船舶等都在不断振动着。房屋建筑、桥梁水坝等在受到激励后也会发生振动。就连茫茫的宇宙中，也到处存在着各种形式的振动，如风、雨、雷、电等随时间的不断变化，从广义的角度来理解，就是特殊形式的振动（或波动），而电磁波不停地在以振动的方式发射和传播。就人类的身体来说，心脏的跳动、肺叶的摆动、血液的循环、胃肠的蠕动、脑电的波动、肌肉的抽搐、耳膜的振动和声带的振动等，在某种意义上来说也是一种振动，就连组成人类自身的原子，也都在振动着。

所谓机械振动，是指物体（或物体系）在平衡位置（或平均位置）附近来回往复运动。在机械振动过程中，表示物体运动特征的某些物理量（如位移、速度、加速度等）将时而增大、时而减小地反复变化。在工程实际中，机械振动是非常普遍的，钟表的摆动、车厢的晃动、桥梁与房屋的振动、飞行器与船舶的振动、机床与刀具的振动、各种动力机械的振动等，都是机械振动。

工程中有大量的振动问题需要人们研究、分析和处理，特别是近代机器结构正向大功率、高速度、高精度、轻型化、大

型化和微型化等方向发展，振动问题也就越来越突出，因此掌握振动规律就显得十分重要了。只有掌握了振动规律和特征以后，才能有效地利用振动的有益方面并限制振动的有害方面。众所周知，振动在日常生活和工程中会带来危害，例如，振动引起噪声污染、影响精密仪器设备的功能、降低机械加工的精度和光洁度、加剧构件的疲劳和磨损、缩短机器和结构物的使用寿命；机械振动还要消耗能量，降低机器效率；振动有时会使结构发生较大变形而破坏，甚至造成灾难性的事故，有些桥梁就是因振动而坍塌；机翼的颤振、机轮的摆振和航空发动机的异常振动，曾多次造成飞行事故；飞机和车船的振动恶化了乘载条件；地震、暴雨、台风等造成了巨大经济损失等。然而，振动也可以用来为人类服务，例如，利用钟摆振动原理制造的钟表；工程实际中数以万计的振动机器和振动仪器已用来完成许多不同的工艺过程，如送料、上料、输送、筛分、布料、烘干、冷却、脱水、选分、破碎、粉磨、光饰、落砂、成型、整形、振捣、夯土、压路、摊铺、钻挖、装载、振仓、犁土、沉桩、拔桩、清理、捆绑、采油、时效、切削、检桩、检测、勘探、测试、诊断等，这些机器和仪器包括振动给料机、振动输送机、振动整形机、振动筛选机、振动脱水机、振动干燥机、振动冷却机、振动冷冻机、振动破碎机、振动球磨机、振动光饰机、振动压路机、振动摊铺机、振动夯土机、振动沉拔桩机、振动造型机、振动采油机、海浪发电机、各种形式的振捣器和激振器等，它们极大地改善了劳动条件，甚至成百倍地提高了劳动生产率；人们可以根据逐年气象要素统计得出气象波动的规律，根据这些规律可预估某一年度的气象要素；人们可以利用潮汐的周期性振动，预报重大灾难的来临、开发能源、保护环境、排涝灌溉、安排航运、建设海港和防护海岸等；人们可以利用树木的年轮中的一疏一密波动变化，进行地质考古、环境污染、森林更新、自然灾害、冰川进退、医疗卫生、农牧业产量预测等方面的研究；美妙动听的音乐（包括人声）也是源于振动而产生出来的。可见研究和掌握振动规律有

着十分重要的意义，可以使人们能更好地利用振动有益的一面，而减少有害的一面。

1.3 发展简史

1.3.1 力学发展梗概

从总的发展趋势来看，在牛顿运动定律建立以前，力学的研究主要是积累经验，并在理论和实验中不断修正力学概念。从时间史上可分为两个时期：

(1) 古代（从远古到公元 5 世纪）：人类对力学的平衡和运动有了初步了解。

(2) 中世纪（从 6 世纪到 16 世纪）：对力、运动以及它们之间的关系认识也有进展。在这段时期内，中国的科学技术水平总体上处于世界领先地位，但力学的知识与概念大多融合在一些工程技术之中，缺乏逻辑分析推理。在中国的古代科技文献中有大量关于力、速度等的描述，但始终没有“加速度”概念的提炼，因此，在明末宋应星的《天工开物》之后，中国古代的经验力学也宣告终结。

在牛顿运动定律建立之后，力学的发展进入现代科学时期，主要有下面四个阶段：

17 世纪初~18 世纪末，在伽利略（Galileo）建立的加速度概念的基础上，牛顿建立了经典力学并不断得到完善；

19 世纪，力学的各个分支建立，特别是在 1832 年和 1845 年纳维（Navier）和斯托克斯（Stokes）等提出了固体力学和流体力学的基本方程后，力学脱离物理学而成为一门独立学科；

1900~1960 年，近代力学诞生，并与工程技术关系密切。这段时期新的工程技术发展较快，原先主要靠经验的办法跟不上时代了，这就产生了应用力学这门学科。但当时计算工具落后，解决具体工程问题主要靠实验验证；

1960 年以后是现代力学阶段, 计算机技术的快速发展使原来复杂的力学计算成为可能, 用力学理论和数值模拟计算方法解决工程设计问题成为主要途径之一。

1.3.2 振动力学发展简史

机械振动学是当今机械学科领域的一个非常重要的方向^[2~8]。虽然人类对振动现象的了解和利用已经有漫长的历史, 人类创造和使用机械已经有几千年的历史, 但是早期主要是人力机械与畜力机械, 速度与效率都很低, 根本不用也不能考虑振动问题。17 世纪下半叶, 牛顿创立了经典动力学, 奠定了机械动力学与机械振动学的基础, 两次工业革命推动了机械振动学的发展。

人们对与振动相关问题的研究起源于公元前 6 世纪毕达哥拉斯 (Pythagoras) 的工作, 他通过实验观测得到弦线振动发出的声音与弦线的长度、直径和张力的关系。在我国, 早在战国时期成书的《庄子》就已明确记载了共振现象。现代物理科学的奠基人伽利略对振动问题进行了开创性的研究。他发现了单摆的等时性并利用他的自由落体公式计算单摆周期。在 17 世纪, 惠更斯 (Huygens) 注意到单摆大幅摆动对等时性的偏离以及两只频率接近时钟的同步化两类非线性现象。梅森 (Mersenne) 在实验基础上系统地总结了弦线振动的频率特性。胡克 (Hooke) 于 1678 年发表的弹性定律和牛顿时于 1687 年发表的运动定律分别为振动学的发展奠定了物性和物理的基础。

早期机械振动研究起源于摆钟与音乐。至 20 世纪上半叶, 线性振动理论基本建立起来。欧拉 (Euler) 于 1728 年建立并求解了单摆在有阻尼介质中运动的微分方程。1739 年他研究了无阻尼简谐强迫振动, 从理论上解释了共振现象。1747 年他对 n 个等质量质点由等刚度弹簧连接的系统列出微分方程组并求出精确解, 从而发现系统的振动是各阶简谐振动的叠加。1762 年拉格朗日 (Lagrange) 建立了离散系统振动的一般理

论。最早研究的连续系统是弦线。1746年达朗伯(d'Alembert)用偏微分方程描述弦线振动而得到波动方程并求出行波解。1753年伯努利(Bernoulli)用无穷多个模态叠加的方法得到弦线振动的驻波解。1759年拉格朗日从驻波解推得行波解,但严格的数学证明直到1811年傅里叶(Fourier)提出函数的级数展开理论才完成。其他连续体的振动问题也相继被研究,欧拉于1744年、伯努利于1751年研究了梁的横向振动,导出了自由、铰支和固定端梁的频率方程和模态函数;1802年开拉尼(Chladni)研究了杆的轴向和扭转振动。

19世纪后期以来,随着航海运输和动力机械技术的发展,振动力学的工程应用受到重视。实际工程结构复杂而不规则,难以精确求解,于是各种近似的计算方法相继被提出。1873年瑞利(Rayleigh)基于系统的动能和势能分析给出了确定基频的近似方法,里茨(Ritz)发展了瑞利法使之推广为几个低阶固有频率的近似计算,这一方法被伽辽金(Galerkin)于1915年进一步推广。1894年邓克利(Dunkerley)分析旋转轴振动时提出一种近似计算多圆盘轴横向振动基频的简单实用方法。1904年斯托多拉(Stodola)计算轴杆频率时提出一种逐步近似方法,成为矩阵迭代法的雏形。1902年法莫(Frahm)计算船主轴扭振时提出离散化的思想,以后发展为确定轴系和梁的频率的实用方法。1950年汤姆孙(Thomson)将这种方法发展为矩阵形式而最终形成传递矩阵法。

非线性因素在机械系统中都不同程度地存在,它们来自系统物理的、几何的、耗散的以及运动的因素。非线性振动的研究开始于19世纪后期。非线性振动的理论基础是由庞加莱(Poincaré)奠定的,他开辟了振动问题研究的一个全新方向:定性理论。1881~1886年,庞加莱在一系列论文中讨论了二阶系统奇点的分类,引入了极限环概念并建立了极限环的存在判据,定义了奇点和极限环的指数;此外还研究了分岔问题。定性理论的一个特殊而重要的方面是稳定性理论,最早的结果是1788年拉格朗日建立的保守系统平衡位置稳定性判据,

1879 年开尔文 (Kelvin) 和泰特 (Tait) 考察了陀螺力和耗散力对保守系统稳定性的影响, 其结论后来由切塔耶夫 (Четаев) 给出了严格证明。1892 年李雅普诺夫 (Lyapunov) 给出了稳定性的严格定义, 并提出了研究稳定性问题的直接方法。在定量求解非线性振动的近似解析方法方面, 1830 年泊松 (Poisson) 研究单摆振动时提出摄动法的基本思想。1883 年林滋泰德 (Lindstedt) 解决了摄动法的久期项问题。1918 年达芬 (Duffing) 在研究硬弹簧强迫振动时采用了谐波平衡和逐次迭代的方法。1920 年范德波尔 (von der Pol) 研究电子管非线性振荡时提出了慢变系数法的基本思想。1934 年克雷洛夫 (Kryloff) 和博戈留博夫 (Боголюбов) 将其发展为适用于一般弱非线性系统的平均法; 1947 年他们又提出一种可求任意阶近似解的渐近法。1955 年米特罗波尔斯基 (Митропольский) 推广这种方法到非定常系统最终形成 KBM 法。1957 年斯特洛克 (Sturrock) 在研究电等离子体非线性效应时用两个不同尺度描述系统的解而提出多尺度法。非线性振动的研究使人们对振动的机制有了新的认识。除自由振动和强迫振动以外, 还广泛存在另一类振动, 即自激振动。1926 年范德波尔研究了三极电子管回路的自激振动。1932 年邓哈托 (den Hartog) 利用自激振动分析输电线的舞动。1933 年贝克 (Baker) 的工作表明有能源输入时干摩擦会导致自激振动。非线性振动的研究还有助于人们认识一种新的运动形式: 混沌振动。1939 年, 著名力学家冯·卡门 (von Kármán) 在美国科学促进会演讲“工程师与非线性问题拼搏”中, 论证了非线性科学将对世界产生的重大影响。庞加莱在 20 世纪末已经认识到不可积系统存在复杂的运动形式, 运动对初始条件具有敏感依赖性, 现在称这种运动为混沌。1945 年卡特莱特 (Cartwright) 和李特尔伍德 (Littlewood) 对受迫范德波尔振子及莱文森 (Levinson) 对一类更简化的模型分析表明, 两个不同稳态运动可能具有任意长时间的相同瞬态过程, 这表明运动具有不可预测性。为解释卡特莱特、李特尔伍德和莱文森的结合

果, 斯梅尔 (Smale) 提出了马蹄映射的概念。1973 年上田和林千博在研究达芬方程时得到一种混乱、貌似随机且对初始条件极度敏感的数值解。由于非线性振动问题的复杂性, 非线性振动微分方程的求解要比线性微分方程的求解困难得多, 至今仍没有统一的解法, 仅有极少数的非线性振动方程可求得精确解, 因此, 只能用定性方法、近似解法和数值解法求解。对于非线性问题的研究包括定性理论和定量理论两个方面, 1979 年奈弗 (Nayfeh) 在著作《非线性振动》^[9] 中, 对非线性振动的先期的工作成果进行了总结, 此专著堪称非线性振动领域里具有代表性的著作之一。

激励、结构特性等的离散性使工程实际中存在着大量的随机振动问题, 因而, 随机振动的研究和工程应用是当前机械振动学研究中一个重要而又令人瞩目的研究方向。1905 年, 爱因斯坦 (Einstein) 首次给出了分子布朗运动的理论解释, 引领了随机模型的建立与研究。20 世纪 50 年代, 航空和航天工程的发展对振动力学提出了更高要求, 确定性的力学模型无法处理包含随机因素的工程问题, 工程的需要促使人们用概率统计的方法研究承受非确定性载荷的机械系统和结构的响应、稳定性和可靠性等, 从而形成随机振动这一振动力学的重要组成部分。在工程问题中, 振动信号的采集和处理是随机振动理论应用的前提, 20 世纪 70 年代以来, 由于电子计算机的迅速发展和快速傅里叶变换算法的出现, 随机振动的应用越来越广泛。理论研究也趋于深入, 非线性随机振动尤其受到重视。

应用确定振动的理论与方法, 曾经解决了许多工程实际中的振动问题, 并得到了满意的结果。随机系统的系统特性不能用时间的确定函数给出, 只具有概率统计的规律性。自然界和工程中大量振动现象都是非确定性的, 对许多物理现象的观测和分析表明了任何观察数据都可分为确定性和不确定性两大类。在模拟和预测许多振动现象的特性时, 其数据往往是随机的。例如, 车辆因路面的高低不平, 工程机械因不同的工作环境, 飞行器因大气湍流, 地面上的结构物因地震, 船舶因不规