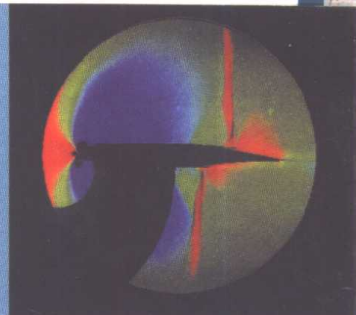


力学

MECHANICS &
MODERN LIVING

与现代生活



■ 丁光宏 编著

■ 复旦大学出版社

力学与现代生活

丁光宏 编著

复旦大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

力学与现代生活/丁光宏编著. —上海:复旦大学出版社,
2001.4
ISBN 7-309-02786-8

I. 力… II. 丁… III. 力学-基本知识 IV. 03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 05330 号

出版发行 复旦大学出版社

上海市国权路 579 号 200433

86-21-65102941(发行部) 86-21-65642892(编辑部)

fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

经销 新华书店上海发行所

印刷 复旦大学印刷厂

开本 787×960 1/16

印张 8.5

字数 162 千

版次 2001 年 4 月第一版 2001 年 4 月第一次印刷

印数 1—4 000

定价 13.50 元

如有印装质量问题,请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

本书是上海市重点教材之一,是一本面向大学人文学科和社会学科等各专业学生的综合知识与文化素质教材.书中通过分析人类生活中和人类建设的重大工程中所遇到的力学问题,阐述力学的基本方法、基本概念和基本内容.通过本课程的学习,学生能初步了解力学这门既古老又朝气蓬勃,既有系统理论又在人类生活中广泛应用的学科的大概轮廓.

本书主要解释一些人类生活和重大工程中的力学原理,对力学理论不作系统阐述,这是一本高级科学知识和科学方法的普及读物,可作为综合性大学和工科大学综合知识或素质教育的教材,也可作为力学学科入门的启蒙教材,同时也可作为行政和人力资源管理部门了解力学学科在经济建设中作用的参考资料.

前 言

力学是自然科学中最古老的一门学科,也是自然科学中运用定量分析工具——数学最多最深的一门学科.在社会上人们或认为力学太难,力学没有什么用,或认为力学就是物理学.

为了让学生,特别是一些在大学教育中很难接触到力学的文科和社会科学的学生了解人类现代生活中每时每刻都离不开的力学,复旦大学力学与工程科学系前任系主任张文教授于 1997 年末安排我为全校本科生开设一门综合知识课程——“力学与现代工程”.经过匆忙准备,我于 1998 年春季开始上课,当时编写了一本教学大纲和讲授提纲,并配置了多媒体课件.经过三年多的教学实践,这门课程在复旦大学受到学生的广泛欢迎.许多高中喜欢物理后来在大学学习人文和社会科学的同学在大赞力学伟大的同时,后悔自己高考时没有选择力学专业.为了能进一步在学生和社会中普及力学知识,弘扬科学方法和科学精神,我决定将以前的讲义修改出版.

力学是一门应用基础学科,它研究自然界普遍存在的机械运动的普遍规律.20 世纪工程技术的迅猛发展极大地推动了力学的发展,使力学成为工程技术的基础,直接为工程技术服务.航天、航空、建筑、交通、能源、材料、环境、生物医学等都需要力学.同时,力学的研究方法和手段还渗透到经济、金融和管理等其他领域.

我国的两弹一星、三峡工程、秦山核电站、长江大桥、东方明珠电视塔等重大工程无一不包含了力学工作者的辛勤劳动.我国的一批著名科学家,如钱学森、钱伟长、周培源、郭永怀、李国豪等在国际上都享有盛誉.钱学森先生最近指出:“展望 21 世纪,力学加计算机将成为工程设计的主要手段”.力学在 21 世纪的全球经济发展中将扮演着重要角色,在推动我国经济发展,特别在自主高新技术发展中将起着重要作用.掌握必要的力学知识和力学研究的方法与手段应该成为新世纪高素质人才的基本修养.

本书既是一本力学的科普读物,也是一本力学启蒙课程的教材.在配合多媒体课件的教学手段下,我们曾用 36 学时,讲完本教材的内容,在讲课中可以根据具体情况加入一些解释国内外发生的重大事件的力学原理(如空难、地震等)的内容.因为每章基本是相互独立的,因此也可对某些章节的内容进行删减.本书中的绝大多数内容只需要高中基础知识,只有个别方程涉及到高等数学,没有学过的读者可以跳过,并不影响后面内容的阅读与理解.

在本书出版之际,我要衷心感谢复旦大学教务处,他们为本教材的编写与课程建设多次召开沙龙或研讨会.在研讨会上,刘旦初、倪光炯、王炎森、廖佩娟、平郑骅、胡守钧等十多位教授给了作者许多好的建议,作者参加这样的沙龙受益匪浅,在此一并致谢参加沙龙研讨的所有教授们.同时,我要特别感谢张文教授,正是在他的不断鼓励下,作者才能坚持将这本教材写完,在本书的编写过程中,他提供了许多有价值的材料,并阅读了本书的初稿.我还要感谢一起工作的研究生和选修这门课程的同学,他们在本书文字和校对等方面给予作者很大帮助.我还要感谢复旦大学出版社的同志,是他们的辛勤劳动才使得本书能早日和读者见面.最后,我要感谢我的妻子和孩子,感谢他们无私的支持与鼓励.

由于力学学科涉及的知识面太广太深,作者一人不可能把握所有方面,书中错误和不足在所难免,敬请专家和读者批评指正.联系 e-mail: ghding @ fudan.edu.cn.

丁光宏

2000 年 12 月 20 日于复旦园

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 力学是怎样的一门学科	1
§ 1.2 历史的启迪	2
第二章 力与振动	5
§ 2.1 自由振动	6
2.1.1 无阻尼自由振动	6
2.1.2 阻尼自由振动	8
§ 2.2 受迫振动	10
2.2.1 受迫振动分析	10
2.2.2 共振	12
§ 2.3 有害振动的防范	15
2.3.1 汽车减震	15
2.3.2 船舶的稳定	16
§ 2.4 地震与波	17
2.4.1 构造性地震与地震波	17
2.4.2 地震参数测定	20
§ 2.5 夜半钟声怎样到客船	22
§ 2.6 人耳是怎样听到钟声的	23
2.6.1 声音的基本特性	23
2.6.2 人耳的结构	25
2.6.3 耳蜗力学模型	25

第三章 力学——航天航空的基石	29
§ 3.1 从运动中采集活力:流体动力学	29
§ 3.2 空气动力学是飞机飞得又快又稳的保证	34
3.2.1 升力	34
3.2.2 阻力	37
3.2.3 层流与湍流	39
3.2.4 流动分离	42
§ 3.3 超音速飞行——从梦想到现实	46
3.3.1 超音速流动的特殊现象:激波	46
3.3.2 跨音速飞行面积律	50
3.3.3 跨音速飞行能手——变后掠翼飞机	50
§ 3.4 从“阿波罗”登月计划谈火箭	51
3.4.1 运载火箭的基本结构	53
3.4.2 运载火箭的飞行程序	54
3.4.3 “阿波罗”登月工程	55
§ 3.5 挑战太空的航天器	59
3.5.1 人造地球卫星	59
3.5.2 载人飞船(宇宙飞船)	60
3.5.3 载人航天飞机	62
附录 A 卡门—钱学森公式	65
附录 B 火箭运动的齐奥尔科夫斯基公式推导	65
第四章 材料工程中的力学	67
§ 4.1 材料的功能与力学特性	67
§ 4.2 力学在新材料开发中的应用	75
4.2.1 多层膜微细结构	75
4.2.2 复合材料	75
4.2.3 新型陶瓷	75
4.2.4 智能材料	76
4.2.5 高分子材料	77
§ 4.3 生物大分子构象与最小能量原理	78

第五章 生命、人类健康与力学	79
§ 5.1 心脑血管疾病与血液动力学	79
§ 5.2 肌肉力学与心脏功能	83
§ 5.3 生理流动与医学听诊	86
5.3.1 心脏听诊	87
5.3.2 血压测量原理	87
§ 5.4 太空中的生物为什么长不大 ——应力与生长关系	89
§ 5.5 中医经络的科学基础 ——组织液的定向流动	92
第六章 人类的生存环境与力学	97
§ 6.1 从尼罗河上惨案说起	97
§ 6.2 力学在 1998 年我国抗洪救灾中的作用	101
6.2.1 严防死守的科学决策	101
6.2.2 九江大堤溃堤的原因	102
6.2.3 九江堵口,历史第一	103
6.2.4 退却的洪水仍潜在着极大的危害	103
§ 6.3 上海苏州河的污染与治理	104
§ 6.4 空气污染	105
6.4.1 空气污染物与空气污染事件	106
6.4.2 大气污染与气象动力学	106
6.4.3 大气污染的控制	112
第七章 能源工业的核心问题	115
§ 7.1 全球与中国能源状况	115
§ 7.2 火力发电中的力学问题	116
7.2.1 煤燃烧问题	118
7.2.2 汽轮机的安全稳定运行	118
7.2.3 散热与传热	119
§ 7.3 磁流体发电	119
§ 7.4 三次采油与渗流力学	121

§ 7.5 高压水射流采煤	122
§ 7.6 核反应堆力学	123
参考文献	126

第一章 绪 论

§ 1.1 力学是怎样的一门学科

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。近代科学的发展发端于牛顿对力学定律的阐明,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都是力学问题。不仅如此,力学的定量建模方法还广泛应用到经济、金融和管理等其他领域。因此,力学已从一门基础学科发展成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,它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。根据牛顿第三定律,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。但直到 1687 年牛顿(Newton)才在他的《自然哲学的数学原理》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 $1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ (米/秒²)加速度所需要的力就为 1N.

§ 1.2 历史的启迪

一部力学发展史就是人类科学的诞生史.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:

从 17 世纪初到 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;

从 1900 年到 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,由于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.

力学的发展史也是人类从经验技术上升到科学技术的发展史.我们可从牛顿建立万有引力定律的过程来看科学与经验的差别:

1609—1619 年,德国科学家开普勒(Keppler)用了 10 年时间将他的老师第谷(Tycho Brache)30 年辛勤积累的天文观察数据总结成行星运动的三大定律,指出行星运动的轨迹是一椭圆,而太阳正是椭圆的一个焦点;

1638 年,意大利科学家伽利略总结出了惯性定律,指出自由落体的加速度与

其重力成正比；

1659 年,荷兰科学家惠更斯(Huygens)给出动量与能量守恒的早期萌芽形式；

1661 年,英国科学家胡克(Hooke)等人提出星体之间相互吸引,提出引力的概念；

1673 年,惠更斯再次推导了引力大小与距离平方成反比关系；

1680 年以后,牛顿才对引力问题发生兴趣,但这时关于天体力学剩下的关键问题只有一个:如果行星在太阳引力作用下运动,并且假设引力与距离平方成反比,那么行星运动的轨迹应该是什么？

当时实验观测的结果是行星运动的轨迹为椭圆(开普勒定律),但是没人能回答为什么是椭圆. 牛顿在数学上比别人略高一筹,他掌握了当时最先进的数学工具——微积分,他从数学上严格证明了在上述条件下行星运动的轨迹一定是椭圆,这与近百年的天文观察结果相吻合,并据此建立了万有引力定律,完善了经典力学的科学体系.

从牛顿建立万有引力定律的过程中我们发现,如果没有前人的工作,牛顿从一个苹果落地是绝对创造不出来万有引力定律的. 而如果没有牛顿的系统理论总结,前人的工作包括开普勒的工作最多只能是经验,是技术,不是科学,也不会有万有引力的概念,或许也就没有当今人类引以自豪的航天航空事业了. 牛顿的工作或许只是别人画龙他点睛,如果从工作量来讲,他远不如第谷的三十年如一日,也不如开普勒的十年磨一剑,他比胡克等人更晚懂得天体运行规律,甚至他当时在天体力学界或许只是一个小学生,但是,发现万有引力的殊荣非牛顿莫属,这就是科学发现的机遇,就是科学发现的规律.

从牛顿建立经典力学的过程中,我们还可以看出科学研究中的另一个重要因素,就是研究对象或方向的选择. 在牛顿的研究中,他选择了行星,虽然天体运动对当时人类来讲是那么遥远,又完全不可控制,虽然当时关于行星运动已积累了大量的观察数据,前人也做了大量的总结,但最关键的是行星在运动中只受到一个力——太阳引力的作用,并且当时计时和测距的精度对测量行星运动已是很精确了,在这样简单单一的条件下牛顿才得到了力与运动的基本规律,并将此推广到其他情况下力与运动的问题. 可以想像,如果当时牛顿像伽利略那样,从苹果落地来研究地球对苹果的引力,那他就没那么幸运了,他或许要遗憾终生. 因为对当时研究而言行星受力要比苹果简单得多.

牛顿在建立经典力学过程中创造的这种将复杂问题最简单化的还原论(Reductionism)方法一直主宰着西方科学的发展. 英国著名的百科全书式学者卡尔·皮尔逊(Kar - Pearson)在它的《科学的规范》中曾写道:“科学的统一仅仅在于它的方

法,而不在于它的材料,科学方法是通向绝对知识或真理的唯一入口。”皮尔逊这里指的科学方法论就是牛顿创立的还原论方法。而比之更早或同时代的中国古代科学思维则采用了另外一种综合法模式。300多年过去了,古代的中国科学技术除了中医药外,其他几乎全军覆没了,在现代科技的大厦中很难寻觅到中国古代科学的踪影,这没有采用恰当的科学方法是直接相关的。因此从这方面讲,牛顿对人类的贡献不仅是建立了经典力学,更重要的是建立了正确的科学研究方法。

还原论方法是牛顿通过建立经典力学而产生的科学方法,随着近代力学的发展,这一方法本身又受到了新的挑战。近年来,跨物质层次的力学现象(从原子到宏观)和非线性非平衡行为(有内在的确定性、随机性和高度自组织结构,如生命体)等是近代力学的重点,这种认识将突破简单还原和叠加的经典方法,突破确定性和随机性的简单对立,这方面的研究如同当初牛顿研究万有引力一样,它不仅丰富了力学的内容,而且将产生科学方法论上的革命。

从力学的发展历史中我们得到下面三点启示。

(1) 科学研究最终要建立科学的体系,要从众多的观察中总结出理论,否则只能是经验或技术,而不能成为科学。

(2) 科学研究的对象与时机选择非常重要,太早,研究手段与研究工具都不全,不会有很好的结果;太晚,没有新意,只能做一些二流的工作。如何选择突破点,进行创造性思维,是一个科学家一生成败的最关键因素之一。

(3) 对探索自然科学而言,知识本身可能显得并不十分重要,因为一些实际知识很容易被忘记,而我们所关心的则是更一般的理解,这种理解对一个受过教育的人来说将会有长远的价值——但是这些知识又是我们去达到更重要的目的的手段。

第二章 力与振动

我们生活在一个振动的社会中. 当我们步入高雅的音乐厅时, 流畅、悠扬的旋律给人以一种美的享受; 而在遭受一场地动山摇的大地震后, 家毁人亡, 给人的是撕心裂肺的哀伤. 我们乘坐的汽车、火车和飞机在运行中都不停地振动; 我们建造的楼房、桥梁甚至水坝受外界干扰也会发生振动. 远眺浩瀚的宇宙, 有电磁波在不停地发射、传播; 近观家中的录音机、洗衣机、电冰箱乃至电动刮须刀, 一旦它们启动后, 就始终伴随着振动. 对人体来说, 心脏的跳动、肺的呼吸、肌肉的收缩、脑电波的涨落等等, 都是振动. 所以, 振动现象比比皆是, 对振动的研究领域广阔、意义深远.

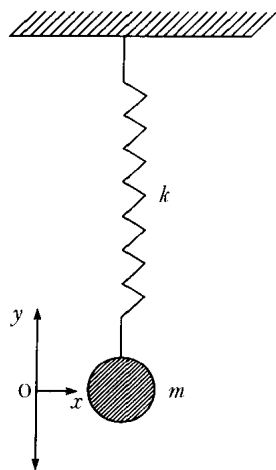
那么什么是振动呢? 振动就是物体经过它的平衡位置所作的往复运动, 或者某个物理量在其平衡值(平均值)附近的来回波动. 为了能精确地研究振动现象, 科学家们定义了一些参量来描述振动的特性, 例如, 将一个振动量完成一次振动过程所需的时间称为周期(一般记为 T), 而将周期的倒数称为频率(记为 f), 它是表示单位时间内振动的次数, 是反映振动快慢的参量, 单位是 Hz(赫兹). 在振动中, 振动量偏离平衡位置的最大值称作振幅, 它是反映振动强度的量.

当我们研究的对象, 比如苏州寒山寺的古钟(在力学中常称为系统), 在受到外界的作用时, 比如和尚用木棒敲击它(在力学中常称为激励), 系统就会发生振动而产生声音输出(在力学中常称为响应). 振动力学主要就是研究系统、输入激励和输出响应之间的关系.

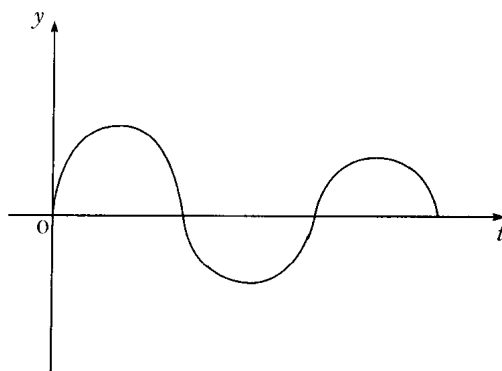
振动是力学最早研究的课题之一. 在我们身边发生的振动现象往往很复杂, 为了弄清振动的本质, 找到振动的主要矛盾, 我们采用牛顿的还原论方法, 从最简单的振动问题入手, 逐步揭示振动的内在规律, 并将之应用到科学研究和生产实践中.

§ 2.1 自由振动

先看一个简单的实验. 如图 2-1(a)所示, 一根弹簧下面悬着一个质量是 m 的小球, 如果弹簧的刚度常数为 k , 建立如图所示的直角坐标系, 平衡位置时小球的位置纵坐标 $y = 0$. 如果将小球拖离平衡位置再放手, 则小球将作上下往复振动. 这时, 如果在小球上缚一根铅笔, 就可以记录到如图 2-1(b)所示的振动曲线, 这是一条振幅递减的正弦曲线.



(a) 弹簧—质量振子系统



(b) 自由振动曲线

图 2-1 弹簧—质量振子系统在作自由振动

2.1.1 无阻尼自由振动

我们可以从理论上很容易分析小球的振动规律, 假设忽略所有的阻力和弹簧质量等因素, 那么小球只受到两个力的作用: 重力与弹簧恢复力.

首先考虑平衡状态. 由于重力 (mg) 的作用, 使弹簧较原始伸长了 y_0 , 根据力的平衡原理, 重力的大小应该等于弹簧的恢复力 ky_0 , 即

$$mg = ky_0. \quad (2-1)$$

如果我们将小球向下拉到 $-y$ 位置, 如图 2-2 所示, 然后突然放手, 这时小球受到的合力大小为

$$F = -mg + (ky_0 - ky) = -ky. \quad (2-2)$$

根据牛顿第二定律,这个力将使小球作加速运动,加速度 a 等于速度 v 关于时间 t 的一次导数,等于位置 y 的二次导数,于是有

$$F = ma = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2 y}{dt^2}. \quad (2-3)$$

由方程(2-2)和(2-3)相等,我们很容易得到小球的振动幅度 y 关于时间 t 的微分方程:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + ky = 0. \quad (2-4)$$

这个方程在数学中很容易求解出来,它的解为

$$y = A \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t + \varphi\right). \quad (2-5)$$

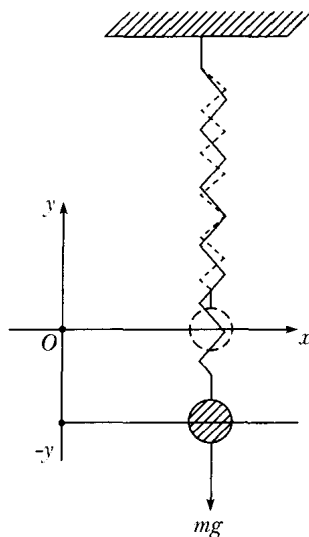


图 2-2 小球的受力分析

其中 A, φ 是和初始位置 y_0 及观察的初始时刻有关的常数, A 称为振幅, φ 称为幅角. 对这样的振动单元,在外力初始作用消失后系统所作的振动称为自由振动. 如果我们按小球振动的位移 y 随时间 t 变化的规律(式(2-5))作图,会发现它是一条正弦曲线,如图 2-3 所示. 它的振动圆频率 ω_N 、频率 f 和振动周期 T 分别为

$$\omega_N = \sqrt{\frac{k}{m}}, f = \frac{\omega_N}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}, T = \frac{1}{f} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (2-6)$$

从表达式(2-6)和图 2-3 中不难发现,系统在作自由振动时,振动的频率和外界激励的大小没有关系,而只和自身的特性,如质量及弹簧常数等有关. 也就是说,外力作用的大小只会影响系统响应的振幅,不会影响响应的频率. 自由振动的响应频率是由系统的自身特性所决定的,因此,在力学中又称 ω_N 为系统的固有频率. 工程上常利用自由振动固有频率的这种特性来判断系统及材料的特性.

例如,在火车站上,我们经常会看到检修工人手持榔头敲击火车的车轮等部位,这就是通过听敲击后车轮等部位发出的声音来检测列车的关键部位是否有损