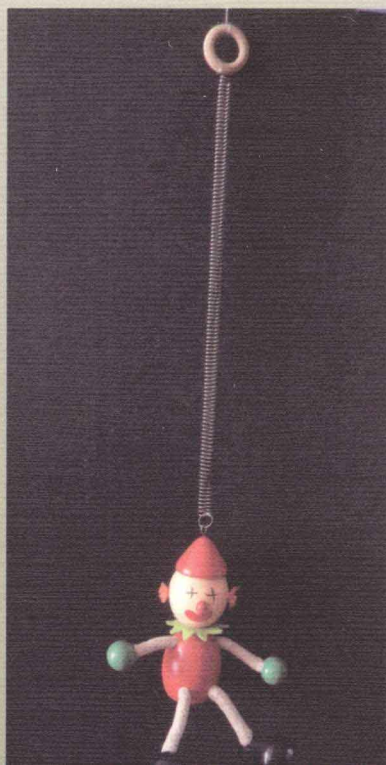
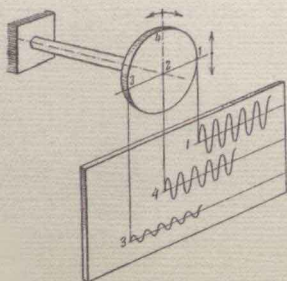


刘延柱 著

趣味振动力学

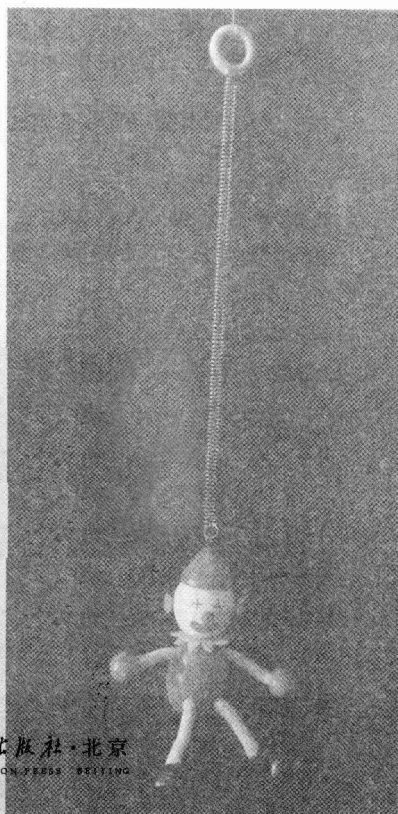
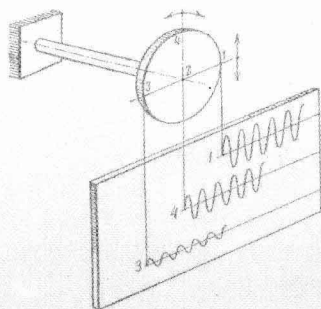


高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

Quwei Zhendong Lixue

趣味振动力学

刘延柱 著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

图书在版编目(CIP)数据

趣味振动力学 / 刘延柱著. — 北京: 高等教育出版社, 2012.3

(大众力学丛书)

ISBN 978-7-04-034345-8

I. ①趣… II. ①刘… III. ①工程力学—振动理论—通俗读物 IV. ①TB123-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第011962号

策划编辑 王超 责任编辑 王超 封面设计 赵阳 版式设计 范晓红
插图绘制 尹莉 责任校对 金辉 责任印制 尤静

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400-810-0598
社 址	北京市西城区德外大街4号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	北京铭成印刷有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	850 mm × 1168 mm 1/32		http://www.landaco.com.cn
印 张	7	版 次	2012年3月第1版
字 数	170千字	印 次	2012年3月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	29.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34345-00

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

陈立群 戴世强⁺ 刘延柱 苗天德 佘振苏

隋允康 王振东 武际可^{*} 叶志明 张若京

仲 政 朱克勤 朱照宣

(注：后加^{*}者为主任委员，后加⁺者为副主任委员)

中国力学学会《大众力学丛书》

总 序

科学除了推动社会生产发展外，最重要的社会功能就是破除迷信、战胜愚昧、拓宽人类的视野。随着我国国民经济日新月异的发展，广大人民群众渴望掌握科学知识的热情不断高涨，所以，普及科学知识，传播科学思想，倡导科学方法，弘扬科学精神，提高国民科学素质一直是科学工作者和教育工作者长期的任务。

科学不是少数人的事业，科学必须是广大人民参与的事业。而唤起广大人民的科学意识的主要手段，除了普及义务教育之外就是加强科学普及。力学是自然科学中最重要的一门基础学科，也是与工程建设联系最密切的一门学科。力学知识的普及在各种科学知识的普及中起着最为基础的作用。人们只有在对力学有一定程度的理解后，才能够深入理解其他门类的科学知识。我国近代力学事业的奠基人周培源、钱学森、钱伟长、郭永怀先生和其他前辈力学家非常重视力学科普工作，并且身体力行，有过不少著述，但是，近年来，与其他兄弟学科（如数学、物理学等）相比，无论从力量投入还是从科普著述的产出来看，力学科普工作显得相对落后，国内广大群众对力学的内涵及在国民经济发展中的重大作用缺乏有深度的了解。有鉴于此，中国力学学会决心采取各种措施，大力推进力学科普工作。除了继续办好现有的力学科普夏令营、周培源力学竞赛等活动以外，还将举办力学科普工作大会，并推出力学科普丛书。2007年，中国力学学会常务理事会议决定组成《大众力学丛书》编辑委员会，计划集中出版一批有关力学的科普著作，把它们集结为

《大众力学丛书》，希望在我国科普事业的大军中团结国内力学界人士做出更有效的贡献。

这套丛书的作者是一批颇有学术造诣的资深力学家和相关领域的专家学者。丛书的内容将涵盖力学学科中的所有二级学科——动力学与控制、固体力学、流体力学、工程力学以及交叉性边缘学科。所涉及的力学应用范围将包括——航空、航天、航运、海洋工程、水利工程、石油工程、机械工程、土木工程、化学工程、交通运输工程、生物医药工程、体育工程等等。大到宇宙、星系，小到细胞、粒子，远至古代文物，近至家长里短，深奥到卫星原理和星系演化，优雅到诗画欣赏，只要其中涉及力学，就会有相应的话题。这套丛书将以图文并茂的版面形式、生动鲜明的叙述方式，深入浅出、引人入胜地把艰深的力学原理和内在规律介绍给广大读者。这套丛书的主要读者对象是大学生、中学生以及有中学以上文化程度的各个领域的人士。我们相信本套丛书对广大教师和研究人員也会有参考价值。我们欢迎力学界和其他各界的教师、研究人員以及对科普有兴趣的作者踊跃撰稿或提出选题建议，也欢迎对国外优秀科普著作的翻译。

丛书编委会对高等教育出版社的大力支持表示深切的感谢。出版社领导从一开始就非常关注这套丛书的选题、组稿、编辑和出版，派出了精兵强将从事相关工作，从而保证了这套丛书以优质的内容和崭新的形式亮相于国内科普丛书之林。

中国力学学会《大众力学丛书》编辑委员会

2008年4月

序 言

Preface

振动可能是自然界中最普遍的运动形式。大海的波涛起伏、钟摆的摆动、机器的轰鸣、心脏的跳动，小到微观世界中电子围绕原子核的运动，大到太空中地球和其他行星围绕太阳的运动都是各种形式的振动现象。在工程技术中，振动不仅是降低机械加工精度，导致结构损坏的消极因素，也是执行传输、筛选、粉碎、压实等任务的有效方法。振动也是物理学中电学、光学和热学的理论基础。电系统的振动与通讯、广播、电视、雷达等工作密切相关。不仅在机械制造、飞机和船舶制造以及土木水利结构等与机械运动相关的传统工业部门，而且在电子信息等新兴技术部门中，振动都是重要的研究课题。

振动力学是动力学的一个分支，它研究振动现象的普遍性原理和各种特殊类型的振动。振动力学也是理工科大学的一门专业基础课程。各种振动力学教材系统地叙述了振动力学的丰富内容。传统的叙述方式是首先对振动对象建立数学模型，然后利用数学知识，主要是微分方程知识作必要的数学分析，以解释实际发生的振动现象。学习振动力学课程必须具备必要的力学和数学基础知识。

本书的写作目的是以通俗有趣的方式讲述振动力学的各方面

内容, 既包括线性振动的传统内容, 从单自由度振动到多自由度和连续体的振动, 也涉及非线性振动, 如干摩擦阻尼振动、自激振动、参数振动和混沌振动等内容, 以及多频响应、跳跃、颤振、喘振、摆振等非线性现象。在叙述方式上力图避免或减少数学公式和数学推导, 着重从物理概念上解释振动现象。较多篇幅用于列举实际生活中存在的形形色色振动现象, 以及对这些现象的理论解释。在与振动力学理论基础有关的章节中, 难以完全避免数学公式, 但在正文中已减少到最低程度。需要借助数学公式的深入分析, 在有关章篇末以附录形式给出。这部分内容, 读者如具备理工科大学的一般数学知识就能顺利阅读。这部分所占篇幅极小的内容或许对大学生读者群有用, 但读者如省略不读也不影响对正文的理解。

本书作为科普读物可供未学习过振动力学课程, 希望了解振动力学基本知识的读者阅读, 也可供正在学习这门课程的学生和教师参考。作为课外参考书, 希望有助于提高学生对振动力学课程的理解和学习兴趣。书中部分插图选自参考文献。

陈立群教授对书稿作了详细审阅并提出许多宝贵意见, 谨表示衷心感谢。

刘延柱

2011年6月于上海交通大学

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

Contents

第1章

振动 / 1

1.1 振动及其产生条件 / 1

1.2 我们生活中的振动 / 4

1.3 振动力学的研究内容 / 6

第2章

自由振动 / 8

2.1 振子 / 8

2.2 胡克定律 / 8

2.3 简谐振动 / 10

2.4 数学模型 / 14

2.5 相轨迹 / 15

2.6 机械能守恒 / 17

2.7 硬弹簧和软弹簧 / 18

附录 保守系统的周期和相轨迹 / 19

第3章

- 阻尼振动 / 23
- 3.1 振动的衰减 / 23
- 3.2 库仑定律 / 25
- 3.3 黏性阻尼 / 26
- 3.4 等效黏性阻尼 / 29
- 3.5 弹性材料的内阻尼 / 30
- 3.6 有干摩擦的自由振动 / 31
- 3.7 振动传送 / 32
- 3.8 干摩擦的杰作 / 34
- 附录 阻尼自由振动的相轨迹 / 35

第4章

- 摆的故事 / 38
- 4.1 教堂里的发现 / 38
- 4.2 摆的实验 / 39
- 4.3 单摆和复摆 / 40
- 4.4 天平和杆秤 / 44
- 4.5 傅科摆 / 47
- 4.6 舒勒周期 / 49
- 4.7 摇摆的船舶 / 51
- 附录1 单摆的周期和相轨迹 / 52
- 附录2 舒勒周期摆 / 54

第5章

- 摆钟的诞生 / 56
- 5.1 古人如何计时 / 56
- 5.2 早期的机械钟 / 58
- 5.3 用摆计时的关键问题 / 60
- 5.4 擒纵机构 / 60
- 5.5 惠更斯钟 / 64
- 5.6 惠更斯钟的同步现象 / 64
- 附录 惠更斯摆的等时性 / 65

第6章

- 受迫振动 / 68
- 6.1 周期性激励和响应 / 68
- 6.2 简谐激励的受迫振动 / 71
- 6.3 倍频响应和跳跃现象 / 73
- 6.4 惯性力激励的受迫振动 / 74
- 6.5 共振现象 / 78
- 6.6 振动的隔离 / 80
- 6.7 非周期性激励 / 81
- 6.8 随机振动 / 84
- 6.9 振动的量测 / 87
- 附录 阻尼受迫振动 / 89

第7章

- 自激振动 / 92
- 7.1 自激振动现象 / 92

7.2	自激振动的特征 / 98
7.3	摆钟的原理 / 95
7.4	干摩擦激发的振动 / 96
7.5	输电线的舞动 / 99
7.6	管内流体的喘振 / 102
7.7	汽车转向轮的摆振 / 104
7.8	荡秋千和振浪 / 106
7.9	张弛振动 / 107
附录	摆钟的相轨迹 / 109

第8章

	多自由度振动 / 112
8.1	多自由度系统 / 112
8.2	振动的合成 / 113
8.3	汽车的振动 / 116
8.4	弹簧耦合的双摆 / 119
8.5	动力吸振器 / 121
8.6	串联的双摆 / 123
8.7	船舶稳定器 / 124
8.8	游离的振动系统 / 125
附录	二自由度系统的振动 / 126

第9章

	连续体的振动 / 128
9.1	弦的振动 / 128
9.2	梁的弯曲振动 / 129

9.3	轴的扭转振动 / 135
9.4	参数振动 / 136
9.5	飞机机翼的颤振 / 137
9.6	杆系结构的振动 / 139
9.7	膜和板的振动 / 141
9.8	转经碗和半球陀螺仪 / 144
9.9	佛钟和编钟 / 146
附录	杆的纵向振动固有频率 / 147

第10章

	振动与波动 / 150
10.1	一维波动 / 150
10.2	行波和驻波 / 152
10.3	声波和超声波 / 154
10.4	水波 / 157
10.5	波的干涉和衍射 / 161
10.6	多普勒效应 / 164
10.7	艏波 / 166
附录	声波在空气中的传播速度 / 167

第11章

	振动与音乐 / 169
11.1	交响乐中的振动 / 169
11.2	毕达哥拉斯的发现 / 170
11.3	弦乐器的发声 / 171
11.4	管乐器的发声 / 174

11.5 乐器的音色 / 175

11.6 三分损益律 / 176

11.7 十二平均律 / 178

第12章

生物中的振动 / 181

12.1 心跳和呼吸 / 181

12.2 肢体震颤 / 182

12.3 人类的发声 / 183

12.4 人类的听声 / 184

12.5 动物的发声 / 185

12.6 扑翼和振翅 / 189

12.7 苍蝇和蜻蜓 / 191

第13章

混沌振动 / 194

13.1 混沌 / 194

13.2 规则激励的无规则响应 / 194

13.3 对初始条件的极端敏感性 / 197

13.4 庞加莱映射 / 200

13.5 奇怪吸引子 / 203

13.6 分形几何 / 205

13.7 混沌振动的实际意义 / 207

参考文献

/ 209

1.1 振动及其产生条件

我们生活的世界存在着周而复始的振荡现象。大海的波涛起伏、花的日开夜闭、钟摆的摆动、心脏的跳动、经济发展的高涨和萧条等都是形形色色的振荡现象。古人关于日月、四季轮回交替的记载是对振荡现象的早期认识。如

“日精建明，星辰度理，

阴阳五行，周而复始”《汉书·礼乐志》

振动是具有振荡性质的机械运动。就是物体在平衡位置附近的微小或有限的往复运动。能产生振动的机械系统称为**振动系统**。

将一个物体投掷出去，物体就沿着抛物线飞向前方直至落地。因为不存在能将物体往回拉的作用力，这种运动不可能具有往复性。如果将物体与弹簧连接，它的运动就会使弹簧变形，产生与运动方向相反的拉力，迫使它回到原来的平衡位置。物体的运动才可能在平衡位置附近具有振荡性。这种迫使物体回归平衡位置的作用力称为**恢复力**。就一切机械系统而言，恢复力是运动具有往复性必须具备的因素。

实际的恢复力可以是各式各样的。上面提到的弹簧是最普通也是最直观的恢复力。其实不仅限于弹簧，任何具有弹性的物体变形后都能产生恢复力。图 1.1 给出与弹簧等效的几种弹性部件，其中 (a) 是带弹簧的机构，(b) 是工程中常见的弹性梁，(c) 和 (d) 是能产生弹性恢复力矩的扭簧和弹性轴。

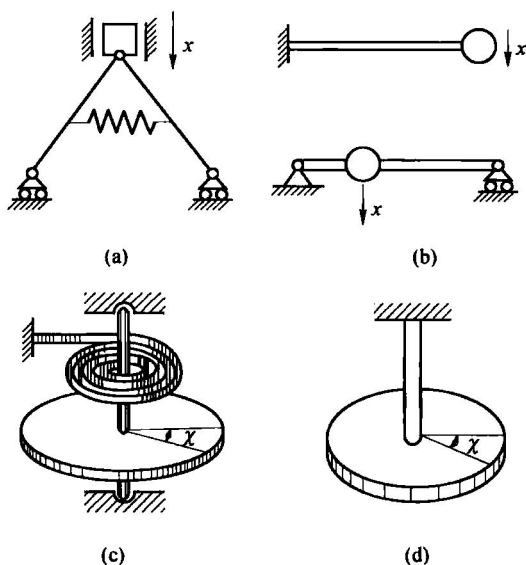


图 1.1 各种弹性恢复力

在特殊的约束条件下，重力也能起恢复力作用。将一颗小绿豆放在半球形碗里，它在碗底的最低处保持平衡。豆子如偏离这个位置，由于碗壁的约束，垂直向下的重力会将豆子推回到原处 (图 1.2a)。将细绳的一端固定，另一端拴一个坠子。这种简单的装置称为单摆 (图 1.2b)。单摆平衡时坠子将细绳沿铅垂线拉直。偏离平衡位置时由于受细绳的约束，坠子只能在以固定端为中心的球面上运动。因此它和碗里的豆子很相似，也是重力起着恢复力作用。将单摆的细绳和坠子改成刚性物体，就成为复摆