

基础与应用 听力学

BASES AND APPLICATIONS OF HEARING SCIENCE

主编 / 谢鼎华
By Xie Dinghua

湖南科学技术出版社

X435
703
C-1

基础与应用 听力学

BASES AND APPLICATIONS OF HEARING SCIENCE

主 编 / 谢鼎华
副主编 / 伍伟景 徐立 丁大连

湖南科学技术出版社

基础与应用听力学

主 编：谢鼎华

责任编辑：汪 华 康建新

出版发行：湖南科学技术出版社

社 址：长沙市湘雅路 280 号

<http://www.hnstp.com>

邮购联系：本社直销科 0731-4375808

印 刷：湖南新华印刷集团有限责任公司（邵阳）

（印装质量问题请直接与本厂联系）

厂 址：邵阳市双坡岭

邮 编：422001

出版日期：2003 年 9 月第 1 版第 1 次

开 本：880mm×1230mm 1/16

印 张：16.25

插 页：4

字 数：398000

书 号：ISBN 7-5357-3772-2/R·843

定 价：48.00 元

（版权所有·翻印必究）

编写组

主 编：谢鼎华

副主编：伍伟景 徐立 丁大连

编 者：

谢鼎华 中南大学湘雅二医院 教授

伍伟景 中南大学湘雅二医院 教授

徐 立 美国俄亥俄大学听力及言语学院 副教授

丁大连 美国纽约州立大学布法罗分校 副教授

孔维佳 华中科技大学同济医学院协和医院 教授

龚树生 华中科技大学同济医学院协和医院 教授

李晓春 中南大学物理科学与技术学院 副教授

于黎明 中国人民解放军军医进修学院 副主任技师

肖自安 中南大学湘雅二医院 副教授

任基浩 中南大学湘雅二医院 教授

杨新明 中南大学湘雅二医院 教授

王洪田 中国人民解放军军医进修学院 副教授

专家述评

“《基础与应用听力学》是我国第一部基础理论与实际应用密切结合的听力学专著。我感觉这本书内容全面、系统，反映了听力学的最新研究进展，既是一本很好的听力学教材，又是耳鼻咽喉科医师和听力学研究工作者的的重要参考书，对我国听力学的发展和听力学科的建设将起积极作用。”

中华医学会耳鼻咽喉科学会 主任委员

中华耳鼻咽喉科杂志 总编

中国人民解放军总医院耳鼻咽喉科研究所所长 杨伟炎教授

“有幸首先阅读了本书第6章和第7章，感到本书不仅内容全而新，而且文笔深入浅出，通俗易懂，相信它将会得到广大读者的珍爱。总的印象是，第6章关于心理声学的叙述与国内现有资料相比较是写得最好的。第7章关于实验听力学研究技术系统介绍了有关听力学研究的形态学、电生理和分子生物学的基本方法，并且反映了目前国内外相关研究领域的新进展和新技术，将对听力学研究者有很大裨益。”

中华耳鼻咽喉科杂志 副总编

华中科技大学协和医院耳鼻咽喉科 汪吉宝教授

“我很有兴趣仔细阅读了第4章和第5章，即听觉系统感受、传输、分析、处理声音的重要部分。这两章写得很好、很精彩，文字叙述简练流畅，条理清晰，丝丝入扣，对基础理论说理透彻，比喻形象，深入浅出，并联系应用实际，便于读者对深奥理论的理解和引起了解其奥秘的兴趣，可读性很强，内容方面具先进性、实用性和科学性，介绍有关方面的发展和新进展、新观点和新思路，反映了参编专家们对听力学专业的深厚功底和渊博的知识，将是一本听力学专业方面很好的参考书。”

陕西医学会耳鼻咽喉科学会名誉主任委员

第四军医大学西京医院耳鼻咽喉科 王锦玲教授

“毋庸讳言，国内系统论述并紧跟学科发展水平的基础听力学专著不多，将基础听力学与临床紧密联系的专著则更少。谢教授留学美国多年，专攻听力学基础，特别是对听觉系统的传出机制颇多独到的心得。现从临床问题出发，深入阐述相关先进基础理论，继而以此新理论指导临床实践，促进临床应用水平的提高；同时，又从科研角度出发，全面但又扼要地介绍了各种最新的听力学研究技术和方法，进一步推动基础研究与临床应用的结合，为实现基础与临床听力学的突破性进展创造良好的条件。此书的出版必将成为我国听力学界一大盛事，读者幸甚！”

中南大学湘雅医院耳鼻咽喉科 俞诺教授

前 言

试图编写《基础与应用听力学》这本书由来已久，原因是多方面的。首先是1996年从美国回来后就有这个想法，想结合理论学习和国内现状把自己多年来研究工作的体会总结一下；后来成立了听力研究机构，并在听力学领域开展多渠道的国际交流及人才培养，更加强了这个意念。再则，1999年我向原湖南医科大学申请为研究生开设听力学基础课程获得批准，自2000年5月正式开课，至今已是第4个年头，一直没有一本教材，写这本书的愿望也就更强烈。其三，在我国听力学领域可供学生和专业工作者参阅的著作虽不少，但缺乏一本系统论述听力学基础与应用方面的专著。因此，我邀请了国内外从事相关领域研究的部分专家共同撰写了这本书。

为了适应听力学和耳鼻咽喉科学专业工作者、研究生和大学生等不同层次人员学习和研究的需要，本书在编写过程中力求做到全面系统，文字深入浅出，通俗易懂，概念准确，并坚持先进性、科学性、逻辑性、理论性和实用性等原则。在此思想指导下，全书编写了8章内容，即声的物理学基础、声及其测量、耳解剖学、听觉周围系统的生理声学、听觉神经生理学、心理声学概论、实验听力学研究方法及临床听力学检查方法。希望本书对广大读者有所裨益，并对我国听力学的发展起到积极的作用。

在本书编写过程中，得到了美国俄亥俄大学听力及言语学院徐立副教授，美国纽约州立大学布法罗分校丁大连副教授，华中科技大学同济医学院协和医院孔维佳、龚树生教授，解放军总医院耳鼻咽喉研究所于黎明、王洪田副教授，中南大学物理科学与技术学院李晓春副教授的全力支持，以及我的助手和学生伍伟景、杨新明、任基浩教授、肖自安副教授等的大力协助，还得到国家自然科学基金的资助，在此一并致谢。

特别感谢杨伟炎、顾瑞、汪吉宝、王锦玲、胡纪湘、俞诺、李学正教授，在百忙中审阅该书，提出了许多宝贵的修改意见，并为本书的出版给予极大的鼓励和支持。

衷心感谢为本书绘制和提供插图以及参考文献的国内外作者和单位。因篇幅有限，许多重要的文献未能一一列举，请予谅解。

由于水平有限，加之时间仓促，书中错误难免，敬请广大读者批评和指正。

谢鼎华

2003年5月于长沙

目 录

前 言

第 1 章 声的物理学基础 (1)

- 第 1 节 摩擦力 (1)
- 第 2 节 简谐振动 (2)
- 第 3 节 阻尼振动、受迫振动和共振 (6)
- 第 4 节 简谐振动的合成 (8)
- 第 5 节 波动 (11)

第 2 章 声及其测量 (15)

- 第 1 节 声波 (15)
- 第 2 节 声场 (18)
- 第 3 节 耳机声传递 (18)
- 第 4 节 共振现象 (19)
- 第 5 节 分贝 (21)
- 第 6 节 频谱分析 (23)
- 第 7 节 声音种类 (25)
- 第 8 节 非线性 (28)

第 3 章 耳的解剖学 (30)

- 第 1 节 颞骨大体解剖 (31)
- 第 2 节 外耳 (33)
- 第 3 节 中耳 (34)
- 第 4 节 内耳 (40)
- 第 5 节 螺旋器的精细结构 (44)
- 第 6 节 耳蜗的神经支配 (49)
- 第 7 节 耳蜗的血液供应 (49)
- 第 8 节 耳蜗的淋巴系统 (50)

第 4 章 听觉周围系统生理声学 (53)

- 第 1 节 感觉生理学的基本概念 (54)
- 第 2 节 毛细胞兴奋 (56)

第 3 节 耳蜗的宏机械力学 (61)

- 第 4 节 耳蜗的微机械特性 (65)
- 第 5 节 中耳的功能 (69)
- 第 6 节 外耳的功能 (78)
- 第 7 节 听觉周围系统的激活 (81)

第 5 章 听觉神经生理学 (89)

- 第 1 节 神经元的结构和功能 (89)
- 第 2 节 听觉神经通路 (94)
- 第 3 节 频率编码 (100)
- 第 4 节 强度编码 (105)
- 第 5 节 听觉中枢的初级处理 (107)
- 第 6 节 皮质下双耳信号的处理 (110)
- 第 7 节 听觉周围系统的中枢控制 (112)
- 第 8 节 皮质对听觉信息的处理 (113)

第 6 章 心理声学概述 (117)

- 第 1 节 阈值的概念及听阈 (117)
- 第 2 节 辨别敏感性 (120)
- 第 3 节 响度 (123)
- 第 4 节 音调 (124)
- 第 5 节 掩蔽 (127)
- 第 6 节 时间的敏感性 (132)
- 第 7 节 声源定位及双耳听觉 (135)

第 7 章 实验听力学研究方法 (141)

- 第 1 节 听觉系统的形态学方法 (141)
- 第 2 节 听觉电生理方法 (172)
- 第 3 节 听觉系统的分子生物学方法 (185)

第 8 章 临床听力学检查方法 (197)

- 第 1 节 音叉检查 (197)

第2节 纯音听力计检查	(201)	第6节 听觉诱发电位检查	(220)
第3节 言语测听	(207)	第7节 耳鸣及其测量	(237)
第4节 声导抗检查	(209)		
第5节 耳声发射检查	(214)	索 引	(241)

Contents

Preface

Chapter 1 Physical basis of sound

- (1)
- 1. Frictional force (1)
- 2. Simple harmonic vibration (2)
- 3. Damped vibration, forced vibration and resonance (6)
- 4. Synthesis of simple harmonic vibration (8)
- 5. Wave (11)

Chapter 2 Sound and its measurements

- (15)
- 1. Sound wave (15)
- 2. Sound field (18)
- 3. Transmission of earphone (18)
- 4. Resonance phenomenon (19)
- 5. Decibel (21)
- 6. Frequency spectrum analysis (23)
- 7. Types of sounds (25)
- 8. Nonlinearity (28)

Chapter 3 Anatomy of the ear

- (30)
- 1. Gross anatomy of the temporal bone ... (31)
- 2. The outer ear (33)
- 3. The middle ear (34)
- 4. The inner ear (40)
- 5. Fine structure of the organ of Corti (44)
- 6. Innervation of the cochlea (49)
- 7. Cochlear blood supply (49)
- 8. Cochlear fluid systems (50)

Chapter 4 Physiological acoustics of the auditory periphery

..... (53)

- 1. Some basic sensory physiology (54)
- 2. Excitation of hair cells (56)
- 3. Cochlear macromechanics (61)
- 4. Cochlear micromechanics (65)
- 5. Function of the middle ear (69)
- 6. Function of the outer ear (78)
- 7. Activation of the auditory periphery (81)

Chapter 5 Neurophysiology of the auditory system

- (89)
- 1. Structure and function of neuron (89)
- 2. The auditory pathways (94)
- 3. Frequency encoding (100)
- 4. Intensity encoding (105)
- 5. Initial stages of central auditory processing (107)
- 6. Subcortical binaural information processing (110)
- 7. Central control of the peripheral system (112)
- 8. Cortical auditory information processing (113)

Chapter 6 Introduction to psychoacoustics

- (117)
- 1. The concepts of threshold and hearing threshold (117)
- 2. Differential sensitivity (120)
- 3. Loudness (123)
- 4. Pitch (124)
- 5. Masking (127)
- 6. Time sensitivity (132)

7. Sound localization and binaural hearing	(135)	1. Tuning fork tests	(197)
Chapter 7 Research methods of hearing science	(141)	2. Pure tone audiometry	(201)
1. Morphological methods	(141)	3. Speech audiometry	(207)
2. Methods of electrical physiology	(172)	4. Acoustic immittance measurements ...	(209)
3. Methods of molecular biology	(185)	5. Otoacoustic emissions	(214)
Chapter 8 Clinical audiometry ...	(197)	6. Auditory evoked potentials	(220)
		7. Tinnitus and its measurements	(237)
		Index	(241)

第 1 章

声的物理学基础

物理学是研究物质的基本结构及基本运动规律的科学。由于物理学研究对象的基本性和普遍性，这使物理学知识成为研究其他自然科学所不可缺少的基础。

本章介绍在听力学中用到的一些基本的物理学知识，以帮助理解声音的产生、传播及其与物质相互作用的规律。

第1节 摩 擦 力

摩擦力是一种常见的力。两物体表面相互接触，且物体间有正压力（本质为弹力），则当物体间有相对运动或相对运动趋势时，在物体的接触表面之间便出现摩擦力（frictional force）。图 1-1 表示的是物体 m 的受力情况，地面对物体的支撑力 N 的大小等于物体对地面的正压力 mg ，物体 m 在拉力 F 的作用下向右运动的趋势，这时，地面对物体 m 就会产生向左的摩擦力 f ，物体 m 对地面则会产生向右的摩擦力，即摩擦力是成对出现的。

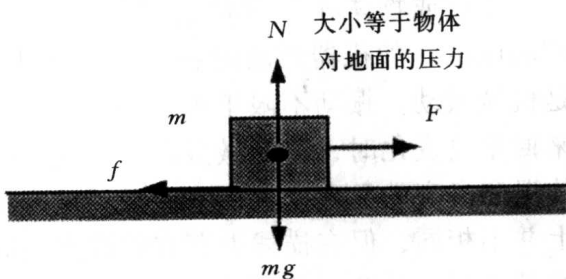


图 1-1 摩擦力

摩擦力的大小，随着两个物体表面的性质和运动的相对速度而变化。摩擦力的方向沿着物体接触面的切线方向，其作用是阻止物体的相对滑动，故通常称摩擦力为摩擦阻力。

一、静摩擦

固体和固体接触面上的摩擦叫干摩擦。两个物体因外力作用而有运动的趋势但并未产生相对运动时，它们的接触面之间存在的摩擦力叫做静摩擦力。图 1-1 中，当力 F 不够大，没有把物体拉动，这时的 f 就是静摩擦力。静摩擦力的大小等于拉力的大小，且随着拉力的增大而增大。对于一个确定的系统来说，静摩擦力的大小有一个限度，最大静摩擦力与两物体之间的正压力 N 成正比，即

$$f_{s,\max} = \mu_s N$$

式中 μ_s 为静摩擦因数 (coefficient of friction), 它与接触面的材料和性质有关。因此静摩擦力的大小在 $0 < f < f_{s,\max}$ 之间变化。

二、滑动摩擦

物体所受外力超过最大静摩擦力后, 物体就开始滑动。物体滑动后的摩擦力称为滑动摩擦力。滑动摩擦力的作用是阻止物体间的相对滑动。滑动摩擦力与接触面的正压力 N 成正比, 即

$$f_k = \mu_k N$$

式中 μ_k 称为滑动摩擦因数, 它与物体的相对滑动速率有关, 同时也与接触面的材料和表面的性质有关, 如物体表面的硬度、光滑度、湿度、温度等均与滑动摩擦因数有关。

推动静止的物体比较费力, 一经推动以后, 维持物体的匀速运动则比较省力, 这说明滑动摩擦小于静摩擦。圆柱体或车轮在其他物体表面或地面滚动时要受到滚动摩擦阻力。与滑动摩擦比, 滚动摩擦要小得多。

我们每日每时都受到摩擦力的影响。摩擦力有有害的一面, 也有有利的一面。在结冰的马路上行车, 常需要增加车轮与地面之间的摩擦以防止打滑, 而车轮和轴承之间需要加润滑剂以减少摩擦。声波的能量也会由于摩擦力的作用而减少。没有摩擦力, 我们很难想象世界会是什么样子。

第2节 简谐振动

质点或物体在一定位置附近沿同一路线来回重复的运动, 称为机械振动 (mechanical vibration)。如机器开动时各部分的微小振动、声带的振动、鼓膜的振动、钟摆的摆动等都是机械振动。振动不限于机械振动, 凡是描述物质运动状态的物理量, 在某一确定值附近做来回重复变化时, 都叫做振动。电流、电压、电磁场等在某一定值附近来回重复变化, 人的体温和身高的日夜变化, 血液酸、碱度的变化, 也都是振动, 这些振动和机械振动虽然性质上并不相同, 但在描述上存在着许多共同之处。因此, 学习机械振动的基本规律是学习和研究其他振动及波动的基础。

一般振动是比较复杂的, 其中最简单和最基本的是简谐振动 (simple harmonic vibration), 任何复杂的振动都可以分解为许多简谐振动。

一、简谐振动

将一质量为 m 的物体系于弹簧一端, 并把弹簧的另一端固定。弹簧和物体平放在光滑的平面上, 使弹簧伸到自然长度, 这时物体所处的位置为平衡位置。以物体的质心为坐标原点, 然后拉一下弹簧, 使物体在平衡点附近振动。在弹簧本身的质量和摩擦阻力忽略不计的情形下, 这种模型称为弹簧振子, 或称为简谐振子。

我们以图 1-2 为例来分析弹簧振子的受力和运动情况。图 1-2 (a) 是静止时弹簧的自然长度, 即平衡状态, 这时弹簧不受力。图 1-2 (b) 是弹簧拉伸时的状态。弹簧拉伸到一定长度后被释放, 这时物体只受弹簧恢复力的作用, 向左运动。图 1-2 (c) 是弹簧回到平

衡状态, 物体受弹簧的力为零, 所以物体的加速度为零。但是因为这时物体还具有动能, 继续向左运动。如果物体不再受力的作用, 就应该以这一速度匀速地运动下去, 但是物体刚过平衡点 O , 就因弹簧被压缩而受到一向右的力, 物体做减速运动。当速度减到零后, 物体就因受一向右的弹力而开始向右加速度运动, 图 1-2 (d) 就是这一状态。随后物体到达平衡点, 以同样原因经过平衡点 O 继续向右运动, 直到速度为零后又再向左加速度运动, 即重复图 1-2 (b) 的情形。如此往复一次所需要的时间称为振动的周期 (period)。周期的长短取决于弹簧的性质和物体的质量。

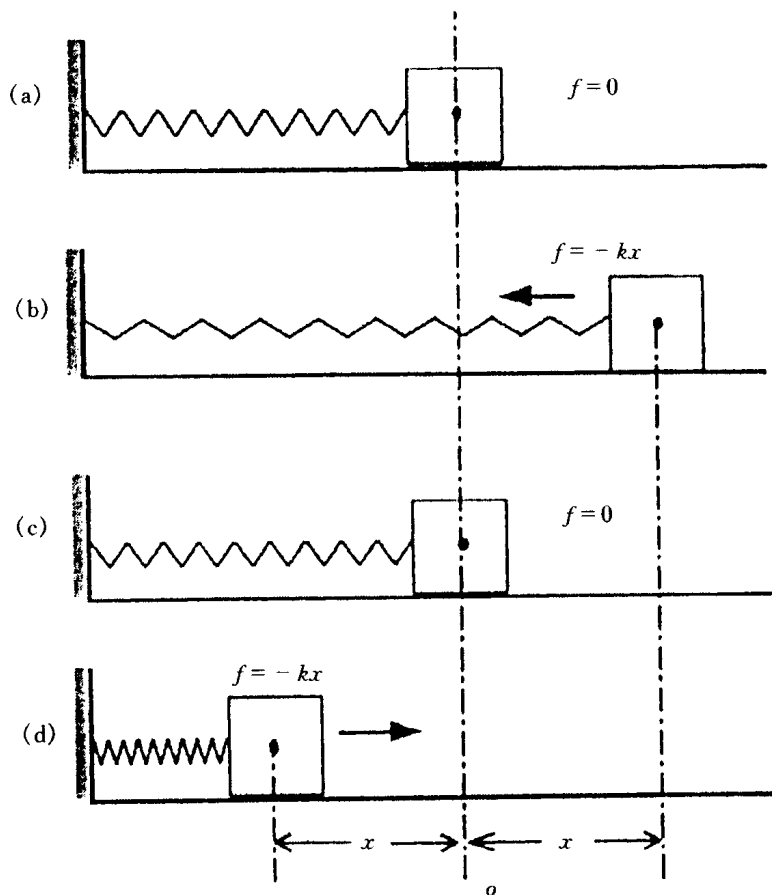


图 1-2 弹簧振子运动图

物体受到弹簧的恢复力用胡克定律描述为

$$f = -kx \quad (1-1)$$

式中 k 是弹簧的劲度系数, 它表示弹簧的固有性质, 负号表示力 f 的方向与位移 x 的方向相反。凡是服从上述动力学关系的系统所做的运动就是简谐振动。

根据牛顿第二定律, $F = ma$, a 用 $\frac{d^2x}{dt^2}$ 表示, 则简谐振动应服从下面的运动方程

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x \quad (1-2)$$

这是一个二阶微分方程。其解为:

$$x = A\cos(\omega t + \varphi) \quad (1-3)$$

其中 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 称为系统的角频率 (angular frequency)。式 (1-3) 表示振动质点的位移随时间变化的关系, 称为简谐振动的表达式, 凡是能用式 (1-3) 表示的运动就是简谐振动。

$x(t)$ 对时间求一阶、二阶导数, 就得到简谐振动质点的速度和加速度表达式:

$$v = \frac{dx}{dt} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-4)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x \quad (1-5)$$

二、简谐振动的特征量

式 (1-3) 中的 A 、 ω 、 φ 一确定, 简谐振动也就确定了。因此, 它们是简谐振动的特征量。

1. 振幅 式 (1-3) 中余弦函数的值只能在 -1 和 $+1$ 之间变化, 因此, 做简谐振动的物体的位移只能在 $-A$ 到 $+A$ 之间变化, A 是它的最大位移, 称为振幅 (amplitude)。

对于弹簧振子, 在前面讨论的过程中, 由于忽略了弹簧本身的质量和所有的摩擦阻力, 振动一旦建立起来, 系统就会以等幅的方式一直继续振动下去, 这种振动称为自由振动。自由振动是一种理想的振动, 实际情况中, 摩擦是不可避免的, 不补充能量, 振动幅度会逐渐衰减, 直到最后静止。

2. 周期和频率 式 (1-3) 是一周期函数, 振动物体完成一次完整振动所需要的时间称为振动的周期, 用 T 表示。由振动表达式可知

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1-6)$$

这是一个仅由振动系统本身性质决定的量, 与初始时刻振动物体所处的位置和速度无关, 因此 T 被称为系统的固有周期, T 的倒数称为频率 f (frequency), 即 $f = \frac{1}{T}$, 单位为赫兹 (hertz, Hz), ω 为角频率。

3. 相与初相 式 (1-3) 中的 $(\omega t + \varphi)$ 称为简谐振动的相 (phase), 单位为弧度 (rad)。其中 φ 是 $t=0$ 时的相, 称为初相 (starting phase)。相是随时间而变的, 不同时刻相不同。相是决定质点在 t 时刻振动状态的重要物理量, 一定的相对应于振动质点一定时刻的运动状态, 即一定时刻的位置和速度。因此, 在说明简谐振动时, 常不分别指出位置和速度, 而直接用相表示质点的某一运动状态。例如, 当用余弦函数表示简谐振动时, 若 $\omega t + \varphi = 0$, 则 $x = A$, $v = 0$, 表示质点处于极大正位移处而速度为零; 若 $\omega t + \varphi = \pi/2$, 则 $x = 0$, $v < 0$, 表示质点正越过原点以最大速率向 x 轴负向运动; 若 $\omega t + \varphi = \pi$, 则 $x = -A$, $v = 0$, 表示质点处于极大负位移处而速度为零; 若 $\omega t + \varphi = (3/2)\pi$, 则 $x = 0$, $v > 0$, 表示质点正越过原点以最大速率向 x 轴正向运动。在一个周期内没有相同的振动状态, 虽然质点可能在某一位置经过两次, 但两次运动的方向不同, 所以振动状态也不同。

在 ω 已知的情况下, A 和 φ 由振动物体初始时刻的运动状态决定。设 $t=0$ 时, 物体的初始位移为 x_0 , 速度为 v_0 , 则

$$x_0 = A \cos \varphi, \quad v_0 = -\omega A \sin \varphi$$

由此得

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}; \quad \varphi = \arctg \frac{-v_0}{\omega x_0} \quad (1-7)$$

当研究两个简谐振动的关系时, 常常要比较它们的相是否一致。设有两个简谐振动, 频率

相同(振幅不一定相同),但初相不同,表达式为

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

在任何时刻,两者的相差(phase difference)为

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_2) - (\omega t + \varphi_1) = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (1-8)$$

知道相差 $\Delta\varphi$ 的数值就可以知道两个同频率的谐振动在步调上的差异。下面分3种情形来讨论。

(1) 当 $\Delta\varphi = 0$, 或 $2k\pi$ 时, 两振动同相。这时, 两振动质点将同时达到正向最大值, 同时越过原点而且向同方向运动, 又同时到达反向最大值, 它们的步调一致。图 1-3 (a) 所示的两振动即为同相的振动。

(2) 当 $\Delta\varphi = \pi$, 或 $(2k+1)\pi$ 时, 两振动反相。这时, 两振动质点将同时到达各自的相反方向的最大值, 并且同时越过原点向相反方向运动。它们的步调相反。图 1-3 (b) 所示的两振动就是反相的。

(3) 超前与落后。当 $\Delta\varphi > 0$ 时, x_2 将先于 x_1 到达各自的正向最大值, 我们就说 x_2 振动超前于 x_1 , 或者说 x_1 振动落后于 x_2 振动。由于相差的周期是 2π , 所以我们将

$|\Delta\varphi|$ 的值限制在 π 以内。例如, 当 $\Delta\varphi = 3\pi/2$ 时, 通常不说 x_2 振动超前 x_1 振动 $\frac{3\pi}{2}$, 而改写成 $\Delta\varphi = \frac{3\pi}{2} - 2\pi = -\frac{\pi}{2}$, 因此说 x_2 振动落后于 x_1 振动 $\frac{\pi}{2}$ 。

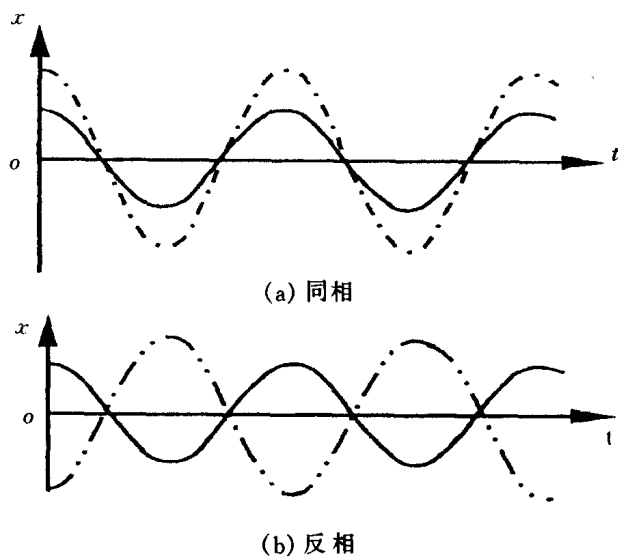


图 1-3 振动相的比较

三、简谐振动的矢量图法

简谐振动表达式中 A 、 ω 和 φ 3 个物理量的意义, 可以用一个矢量来表示。如图 1-4 所示, 取一以 x 为轴的直线, 从原点 O 出发作一矢量 A , 它的长度等于振幅 A 。设矢量 A 以角速度 ω 绕原点逆时针匀速旋转, ω 的数值 (以 rad/s 为单位) 就等于谐振动的角频率。当 $t=0$ 时, 矢量 A 与 x 轴的夹角为 φ ; 在时刻 t , A 与 x 轴之间的夹角等于 $(\omega t + \varphi)$ 。矢量 A 称为旋转矢量 (rotational vector), 它的末端在 x 轴上的投影点的位移是

$$x = A \cos(\omega t + \varphi)$$

此式与谐振动的表达式相同。由此可见, 以角速度 ω 匀速旋转的矢量 A 的端点在 x 轴上的投影点做的就是简谐振动。

旋转矢量的大小对应简谐振动的振幅; 角速度对应角频率; 初始时刻, 矢量 A 与 x 轴的夹角对应于初相 φ ; t 时刻, A 与 x 轴之间的夹角对应于相 $\omega t + \varphi$ 。这种表示法使我们对谐

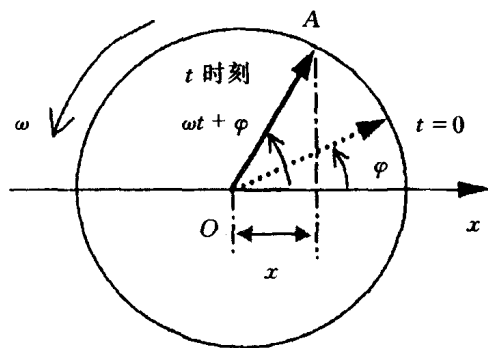


图 1-4 谐振动的矢量图示法

振动的 3 个特征量 ω 、 A 和 φ 有更形象的理解。

通常我们只画 A 在 $t=0$ 时的位置, 给出初相 φ 和振幅 A , 并注明 ω , 想象 A 在旋转, 就把简谐振动表示清楚了。简谐振动的这种表示方法就叫做旋转矢量图法。

四、简谐振动的能量

任何振动系统都必定会受到外力的作用, 使它有初位移或初速度, 或两者兼而有之, 才能开始振动。前者使它获得势能, 后者使它获得动能, 因此, 振动着的系统都具有一定的机械能——势能和动能。现以弹簧振子为例说明简谐振动的能量。物体处在平衡位置时, 系统的势能为零, 物体的位移为 x 时, 弹簧势能和动能分别为

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2, \quad E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

将式(1-3)和式(1-4)分别代入上两式, 并考虑到 $k = m\omega^2$, 得

$$E_p = \frac{1}{2} kA^2 \cos^2(\omega t + \varphi) = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (1-9)$$

$$E_k = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi) \quad (1-10)$$

由上两式可见, 系统的势能和动能也是作周期变化的, 而且 E_p 和 E_k 总是正值, 并且动能和势能的变化频率是弹簧振子频率的 2 倍。当物体位移的绝对值为最大时 $v=0$, 故此时势能达到最大值, 而动能为零; 当物体位移为零时, v 达到最大, 此时势能为零, 而动能达到最大值。由此可见, 弹簧振子动能和势能的变化趋势相反, 但其总能量为

$$\begin{aligned} E &= E_p + E_k = \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \cos^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi) \\ &= \frac{1}{2} m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2} kA^2 \end{aligned} \quad (1-11)$$

上式表明, 振动系统的总机械能不随时间而改变, 势能和动能只交替转变。对于一定的振动系统, 其总机械能和振幅的平方成正比, 这一结论对任何简谐振动系统都是正确的。

第 3 节 阻尼振动、受迫振动和共振

前面所讨论的是理想的振动, 即在振动过程中, 振动系统的机械能是守恒的。在实际问题中, 振动系统不可能不与外界发生联系。振动系统受外来阻力或驱动力的影响, 可发生阻尼振动或受迫振动。

一、阻尼振动

振动系统在振动过程中受到外界的阻力而不断地损失能量。因为振动系统的能量与振幅的平方成正比, 所以能量随时间减少时, 振幅也随之减小。这种振幅随时间减小的振动称为阻尼振动或减幅振动 (damped oscillation)。

通常的振动系统都处于空气或液体中, 它们受到的阻力就来自周围的这些介质。介质的阻力与质点的运动速度有关。在质点运动速度不大的情况下, 它所受的阻力 f 与它的速度 v 成正比, 方向与速度方向相反。即