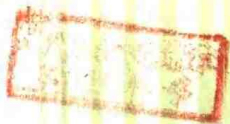


高等医学专科类院校试用教材

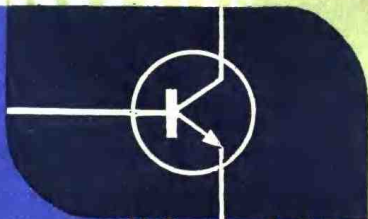
(供临床、预防、基础医学和检验学各专业用)

医用物理学

第 二 版



主 编 秦任甲
副主编 毛旭峰 高同信



广西师范大学出版社

内 容 简 介

本书是为适应医学专科类院校教学需要而编写的。共编入十一章内容。与其它专科医用物理教材相比,本书在流体动力学、交流电、生物医学电子测量技术和物理学在医学中的应用等方面的内容得到明显加强。还编入了一些机动内容,供各院校根据具体情况选用。章末编有习题,书末附有部分习题答案。文字叙述清楚,有利于学生自学。

本书可供专科类院校临床、预防、基础医学和检验学类专业用作教材,也可作为各类医学院校物理教学参考书,还可供医务人员,有志自学者参考。

(桂)新登字04号

高等医学专科类院校试用教材

医用物理学

秦任甲 主编

☆

广西师范大学出版社出版发行

(广西桂林市中华路36号)

广西桂林漓江印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/16 印张12 字数292千字

1993年6月第2版 1993年6月第1次印刷

印数: 0001—4200

ISBN7-5633-0881-4/G·744

定价: 5.20元

二 版 前 言

本教材1990年8月首次出版,受到读者的好评。第二版保留了原教材的基本内容,并作了适当增删修改,校正了错漏。

本教材是根据医学专科类院校培养目标的需要,结合我们的教学经验编写而成。在选材上,尽量减少与中学物理内容重复,选取与现代医学联系较密切的物理基础理论和应用技术作为基本内容。鉴于医用电子测量技术、交流电和血液流变学知识,已广泛应用于医学,因此本书用了一定篇幅介绍这些知识,力求在十分有限的教学时间内,使学生获得更多的物理知识。教材较好地体现了医用性,形成自身的科学系统性,并做到循序渐进,叙述清楚,定义准确,深入浅出,有利于学生自学。

本教材计划讲授42~45学时,部分内容可供各院校根据情况选择讲授或供学生自学。

本书可供高等医学专科类院校有关专业作为教材,也可供其它高等医药院校和中等医药学校有关人员参考。

参加编写的院校有桂林医学院、武汉市职工医学院、菏泽医学专科学校、牡丹江医学院、上海市奉贤医学专科学校、湖南医学专科学校、开封医学专科学校。

在编写和出版过程中得到各院校有关领导、广西师范大学出版社和其他人士的大力支持,桂林医学院绘图室绘制了全部插图,在此一并致谢!

虽经修订,但水平有限,书中疏漏乃至错误之处仍难免,恳请读者批评指正。

编 者

1993年1月

目 录

绪论	(1)	二 理想流体中的伯努利方程	(22)
第一章 振动和波	(3)	三 粘滞流体中的伯努利方程	(24)
第一节 谐振动	(3)	四 伯努利方程的应用	(24)
一 谐振动方程	(3)	第三节 牛顿粘滞定律	(27)
二 频率、周期和相位	(4)	第四节 泊肃叶定律	(28)
三 谐振动的能量	(5)	一 泊肃叶定律	(28)
四 谐振动的合成	(5)	二 流阻	(29)
五 谐振动分析	(8)	三 湍流和雷诺数	(30)
第二节 简谐波	(8)	第五节 血液的流动	(31)
一 波动方程	(9)	一 脉搏波	(31)
二 波的能量	(10)	二 体循环系统中的血流速度	(32)
三 波的衰减	(10)	三 体循环系统中的血压分布	(32)
第三节 声波	(11)	第六节 血液的流变性	(33)
一 声波的物理性质	(11)	一 非牛顿流体与表现粘度	(33)
二 声压、声强和声阻	(12)	二 血液粘度	(34)
三 声波的反射与折射	(13)	三 影响血液粘度的因素	(34)
四 声强级和响度级	(13)	四 血液粘度的测量仪器	(36)
五 叩诊和听诊的物理基础	(14)	习题二	(36)
第四节 多普勒效应	(15)	第三章 热学基础	(38)
第五节 超声波	(16)	第一节 理想气体的压强公式和能量 公式	(38)
一 超声波的性质	(16)	一 理想气体的压强公式	(38)
二 超声波的作用	(16)	二 理想气体的能量公式	(40)
三 超声波的发射和接收	(16)	三 道尔顿分压定律	(41)
第六节 超声波在医学中的应用	(17)	四 玻尔兹曼分布率	(41)
一 超声波诊断	(17)	第二节 液体的表面现象	(42)
二 超声波治疗	(18)	一 表面张力	(42)
附录 多普勒效应频率公式的推导	(19)	二 表面能	(43)
习题一	(19)	三 弯曲液面的附加压强	(44)
第二章 流体动力学	(21)	四 毛细现象和气体栓塞	(45)
第一节 连续性方程	(21)	第三节 表面活性物质和表面吸附	(47)
一 稳定流动	(21)	一 表面活性物质	(47)
二 连续性方程	(21)	二 固体的吸附作用	(47)
第二节 伯努利方程	(22)	三 表面活性物质在肺呼吸中的	
一 理想流体	(22)		

作用	(48)	三 触电事故	(82)
第四节 液晶	(48)	习题五	(83)
一 液晶的发现	(48)	第六章 磁场	(84)
二 液晶的分类	(49)	第一节 磁场	(84)
三 液晶的物理性质及其应用	(49)	一 磁感应强度	(84)
第五节 热力学第一定律	(50)	一 毕奥-萨伐尔定律	(85)
一 系统与环境的	(50)	三 几种电流的磁场	(86)
二 热力学第一定律	(50)	第二节 磁场对运动电荷的作用	(87)
三 热力学第一定律的应用	(51)	一 磁场对运动电荷的作用	(87)
习题三	(52)	二 磁场对载流导体的作用	(89)
第四章 电场	(54)	第三节 物质的磁性	(91)
第一节 电场	(54)	一 磁介质中的磁场	(91)
一 电场强度	(54)	二 磁介质	(92)
二 电势	(55)	三 磁化强度和磁化率	(92)
三 电场强度与电势梯度的关系	(58)	第四节 生物磁现象	(93)
第二节 电偶极子的电场	(59)	一 磁场的生物作用	(93)
一 电偶极子的电势	(59)	二 磁诊断	(94)
二 电偶极层的电势	(60)	三 磁治疗	(95)
第三节 静电场中的电介质	(61)	习题六	(95)
一 电介质的极化	(61)	第七章 生物医学电子测量	
二 电介质对电场的影响	(62)	技术	(96)
第四节 能斯特方程	(63)	第一节 测量系统	(96)
习题四	(64)	一 测量系统的组成	(96)
第五章 电流	(66)	二 测量系统的传递函数	(96)
第一节 电流密度	(66)	第二节 生物电测量电极	(97)
一 电流密度	(66)	一 电极的电势	(97)
二 欧姆定律的微分形式	(68)	二 宏电极	(98)
三 电流密度在人体导电中的		三 微电极	(99)
意义	(69)	第三节 医用换能器	(100)
第二节 简单交流电路	(69)	一 电阻应变式换能器	(100)
一 纯电阻电路	(70)	二 电容式换能器	(101)
二 纯电容电路	(70)	三 热敏式换能器	(102)
三 纯电感电路	(71)	四 光敏式换能器	(104)
四 电阻、电容和电感串联电路	(72)	第四节 放大器及其主要性能指标	
第三节 电流对人体的基本作用	(75)		(105)
一 人体的导电性和电流的效应	(75)	一 晶体管放大器	(105)
二 直流电对人体的主要作用	(75)	二 放大器的主要性能指标	(107)
三 交流电对人体的主要作用	(77)	第五节 显示与记录	(109)
第四节 触电	(80)	一 机械描记装置	(109)
一 影响触电的因素	(80)	二 电子显示装置	(110)
二 人体阻抗	(82)	习题七	(115)

第八章 波动光学..... (117)	第十章 原子核外结构..... (149)
第一节 光的干涉和衍射..... (117)	第一节 原子结构..... (149)
一 惠更斯原理..... (117)	一 玻尔的氢原子理论..... (149)
二 光的干涉..... (117)	二 原子的电子壳层结构..... (151)
三 光的衍射..... (120)	三 电子的概率分布..... (152)
第二节 光的偏振..... (123)	第二节 光谱..... (152)
一 自然光和偏振光..... (123)	一 原子光谱..... (152)
二 起偏和检偏..... (124)	二 分子光谱..... (153)
第三节 旋光性..... (124)	三 光谱分析..... (153)
一 旋光性..... (124)	第三节 激光..... (154)
二 旋光仪..... (125)	一 激光产生原理..... (154)
第四节 光的吸收..... (126)	二 激光的特性..... (155)
一 光的吸收..... (126)	三 激光的生物作用..... (156)
二 朗伯-比尔定律..... (126)	四 激光的医学应用..... (157)
三 比色法原理..... (126)	第四节 X射线..... (158)
第五节 红外线和紫外线..... (127)	一 X射线的性质..... (158)
一 红外线和紫外线..... (127)	二 X射线发生装置..... (158)
二 热象图..... (128)	三 X射线的强度与硬度..... (159)
第六节 波粒二象性..... (129)	四 X射线谱..... (160)
一 光的二象性..... (129)	五 X射线的吸收..... (161)
二 微观粒子的二象性..... (129)	六 X射线在医学上的应用..... (163)
习题八..... (130)	习题十..... (165)
第九章 几何光学..... (132)	第十一章 原子核物理..... (166)
第一节 球面折射..... (132)	第一节 原子核..... (166)
一 单球面折射..... (132)	一 原子核的组成..... (166)
二 共轭球面系统..... (133)	二 原子核的结合能..... (166)
第二节 透镜..... (133)	三 核力..... (167)
一 透镜成像..... (133)	第二节 放射性核素的衰变..... (168)
二 薄透镜的组合..... (136)	一 α 衰变..... (168)
三 透镜的色差..... (136)	二 β 衰变..... (169)
四 柱面透镜..... (138)	三 γ 跃迁与内转换..... (170)
第三节 眼睛..... (138)	第三节 放射性衰变规律..... (171)
一 眼睛的光学结构..... (138)	一 衰变规律..... (171)
二 眼睛的调节..... (139)	二 放射性活度..... (172)
三 眼的分辨本领和视力..... (139)	第四节 射线与物质的相互作用..... (172)
四 眼睛的屈光不正及矫正..... (140)	一 带电粒子与物质的相互作用..... (172)
第四节 放大镜 纤镜 显微镜..... (142)	二 光子与物质的相互作用..... (173)
一 放大镜..... (142)	三 中子与物质的相互作用..... (174)
二 纤镜..... (143)	第五节 辐射剂量..... (174)
三 光学显微镜..... (144)	一 照射量..... (175)
四 电子显微镜..... (147)	二 吸收剂量..... (175)
习题九..... (147)	三 剂量当量..... (175)

第六节 放射性核素在医学上的

应用	(175)
一 示踪原理	(176)
二 诊断	(176)
三 治疗	(177)

习题十一	(177)
------------	-------

部分习题答案	(178)
--------------	-------

附录一 国际单位制	(180)
-----------------	-------

附录二 常用的物理常量	(184)
-------------------	-------

绪 论

物理学是自然科学和应用技术中的基础学科,对科学技术的发展起着极其重要的作用。医学院校学生学习物理学的目的在于掌握所需要的物理基础知识,为实现专业培养目标服务,为今后继续学习提高打下必要的物理基础。

第一节 物理学研究对象

辩证唯物论认为,世界是由物质组成的。尽管组成世界的物质形形色色,千差万别,但可归纳为两类最基本的物质形态:一类是实物,它包括一切由分子、原子组成的物质,另一类是场,如引力场、电场、磁场、核力场等,它们都不是由原子、分子所组成,这是这类物质有别于实物的最明显的特征。无论实物还是场,都是不依赖人们的主观意识而独立存在的,并能为人们所认识的客观实在。

实物和场是不可分割地联系在一起的。没有任何一种实物周围不存在场,也没有任何一种场不与实物相联系。例如,任何实物周围都存在引力场,静止电荷周围存在静电场,运动电荷周围存在电场和磁场。场是实物间相互作用的传递者。任何实物间的万有引力,带电粒子间的电力,运动电荷所受的磁力,核子间的相互作用力都是通过与各自相联系的场来传递的。场和实物还可以互相转化,例如一定能量的光子在核力场作用下可转化为正负电子对,而正负电子对湮灭时又可转化为光子。

世界上一切物质都处于永恒不停地运动着。这里讲的运动是广义的,它不仅包括机械运动,即位置的变动,还包括化学的变化,生物的变化,乃至人的思维过程等等。物质与运动是不可分割的,运动是物质的存在形式,是物质的固有属性。没有不运动的物质,也没有非物质的运动,运动是绝对的,静止是相对的。

物质的运动形态各种各样,有基本的、普遍的运动形态,也有高级的、复杂的运动形态。不同的学科以不同的物质运动形态作为自己的研究对象。物理学研究的是物质的最基本、最普遍的运动形态,包括机械运动、分子热运动、电磁运动、原子和原子核内部的运动等等,研究这些运动的普遍性质及基本规律。物理学所研究的运动形态也普遍存在于其它高级的、复杂的运动形态之中,例如化学变化、生物过程都是高级的、复杂的运动形态,其中必然包含着物理的运动形态。物理现象与一切自然现象都有不可分割的内在联系。例如,一切自然现象,无论有生命的,还是无生命的,时刻都必然遵从能量守恒定律。物理学与其它自然科学,互相渗透,不可能绝然分开。正是由于物理学与医学科学之间的互相渗透,才产生了生物物理学、量子生物学、医学物理学等等边缘科学,开拓了物理学的研究范围,促进了物理学、医学科学和其它自然科学的发展与提高。

第二节 物理学与医学的关系

物理学和医学有着不可分割的联系,物理学的理论是医学科学的基础,物理学的技术和方法是医学科学研究、医学临床实践的强有力手段。

1. 物理学是医学科学的基础

医学所研究的是高级的、复杂的物质运动形态——生命现象。物理学所研究的运动形态普遍存在于生命现象之中,生命现象也必然服从有关的物理学规律,因此物理学必然是医学科学的基础。要懂得生命科学,就必须掌握一定的物理知识。

要了解血液循环和呼吸过程必须掌握一定的流体力学和分子物理学知识;要了解人体各种各样的生物电现象、生物磁现象,并进行生物电、生物磁的检测,必须掌握一定的电学、电磁学和电子学的知识;要了解热辐射、光辐射、X射线、 γ 射线和其它粒子射线对人体疾病的诊断原理和治疗作用,除必须掌握一定的电磁学知识外,还必须掌握原子物理和原子核物理的基本知识。正是由于物理学的发展,人类对生命现象的认识才得以逐步深入,生物科学和医学科学才从宏观形态的研究进入到微观机制的探讨,从细胞水平的研究深入到分子水平的研究。物理学的发展,使物理学在医学科学中的应用日益广泛。核物理的成就,促成了核医学的建立和发展。量子生物学、生物物理学等等物理学和生物科学、医学科学相结合而产生的边缘科学的不断建立和发展,对揭示生命现象的本质做出了新的巨大贡献。物理学的新发现,常促使医学获得新的发展。

2. 物理学的方法和技术,为医学科学研究和医疗实践开辟了新的途径,提供了强有力的手段。

物理学的理论是设计制造各种各样医学科研仪器和医疗仪器的依据。随着物理学、电子技术的不断发展,医学仪器不断创新,不断提高,物理学的实验方法不断改进,为医学科研和医疗实践提供了强有力的手段,极大地推动基础医学和临床医学的发展。光学显微镜使人们的研究达到细胞水平,而电子显微镜的出现使人们的研究进入到分子水平。X射线为临床诊断开辟了新的途径。红外技术、超声技术、同位素技术、图像处理技术、光纤内窥镜技术、激光技术、核磁共振等等,使医学研究和临床实践获得迅速发展和提高。可以说没有物理学的理论、技术和方法,就没有现代化的医学。

第一章 振动和波

物体在某一平衡位置附近往复运动,称为机械振动。机械振动是自然界中很普遍的运动形式。例如,钟摆的运动,一切声源的振动,心脏的跳动等都是机械振动。

振动和波动存在着十分密切的关系,波动是振动在媒质中的传播过程,是能量传播的重要方式。波动现象不仅是宏观世界的重要现象,也是微观世界的基本现象。

第一节 谐振动

物体在跟位移成正比并且总是与位移方向相反的回弹力作用下的振动,称为谐振动。按照胡克定律,弹簧振子振动时位移 x 与力 F 的关系为 $F = -kx$,故弹簧振子是谐振动,简称谐振子,如图1-1。谐振动是最简单、最基本的振动。自然界中一切复杂的振动都可以看作是若干个振幅和频率不同的谐振动的合成。因此,研究谐振动具有重要的意义。

一、谐振动方程

(一) 谐振动方程 如图1-1所示是谐振动的演示实验。在屏前放一弹簧振子 M 和一可以匀速旋转的圆盘,圆盘边缘立一小球 M' ,用平行光照射小球和弹簧振子,使它们的影子都落在屏上。调节弹簧振子的振幅,使其等于小球 M' 作圆周运动的半径。调节圆盘旋转的角速度 ω ,当 ω 为某一合适的值时,在屏上可以看到,在任何时刻两个影子振动的位移和速度都相等。由此我们可得出结论:作匀速圆周运动的质点,它在圆的任一径上的投影的运动是谐振动。

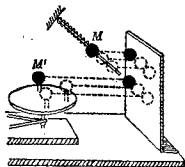


图1-1 谐振动的演示实验

一质点在其上面作匀速圆周运动的圆称为参考圆。现借助参考圆来研究谐振动的基本规律。

如图1-2所示 若圆周上的质点在 $t=0$ 时刻从 M_0 点起以角速度 ω 绕圆心 O 沿逆时针方向作匀速圆周运动,则 t 时刻它在 Ox 轴上的投影 P ,在圆心 O 两侧来回作谐振动。

由图可见,任一时刻 t 质点在圆周上 M 点处,它在 x 轴上的投影点 P 对平衡位置 O 的位移 x 为

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

(1-1)

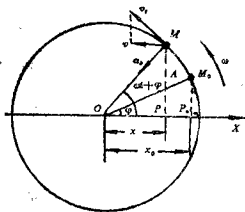


图1-2 谐振动参考圆

(1-1)式称为谐振动方程。它表明:质点作谐振动时,位移是时间的正弦或余弦函数。位移的大小在 A 与 $-A$ 之间周期性地变化。根据谐振动方程,可作出位移-时间曲线,即谐振动曲线,如图1-3所示。

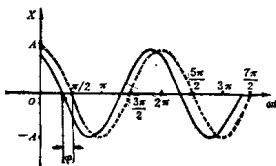


图1-3 谐振动曲线

(二) 谐振动的速度和加速度 质点作匀速圆周运动时,它的切向速度 $v_t = \omega A$,向心加速度 $a_t = \omega^2 A$,在时刻 t ,质点达到 M 点,其在 X 轴上的投影 P 的速度 v 和加速度 a ,应分别等于 v_t 和 a_t 在 X 轴上的分量,由图1-2可得

$$v = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1-2)$$

$$a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-3)$$

上述两式表明:作谐振动的质点,它的速度和加速度都按正弦或余弦函数随时间作周期性变化。式中 ωA 和 $\omega^2 A$ 分别是速度和加速度的幅值。将(1-1)式代入(1-3)式即得

$$a = -\omega^2 x \quad (1-4)$$

式中 ω^2 是常量,根据牛顿第二定律 $F = ma$,可知作用在质点上的力是

$$F = -m\omega^2 x \quad (1-5)$$

式(1-4)和(1-5)表明:谐振动过程中,加速度 a 和力 F 都与位移 x 成正比,方向与位移相反。前面讲过,弹簧振子就是这样的振动。摆动幅度不大时单摆的振动也是谐振动。我们把上两式称为振动的特征方程。如果把(1-5)式与弹簧振子在振动过程中小球所受的力 $F = -kx$ 对比,显然得到

$$k = m\omega^2 \quad \text{或} \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1-6)$$

二、频率、周期和相位

谐振动的基本特征是它的周期性。我们把完成一次全振动所用的时间称为谐振动的周期,用 T 表示,单位为秒(s)。在参考圆上它等于质点在参考圆上旋转一周所用的时间。即

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1-7)$$

质点在1s内所作的全振动次数称为频率。用 ν 表示,单位是1/秒(1/s),称为赫兹(Hz)。频率和周期的关系是

$$\nu = \frac{1}{T} \quad (1-8)$$

将(1-7)式代入(1-8)式得

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} \quad \text{或} \quad \omega = 2\pi\nu \quad (1-9)$$

ω 称为圆频率。在谐振动中, ω 表示的不是质点绕圆周作匀速圆周运动的角速度,而是表示质点在2 π 秒时间内完成振动的次数。由(1-6)式可得 $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ 称为弹簧振子的固有

频率。

振动方程中的 $(\omega t + \varphi)$ 称为振动的**相位**。它是一个极为重要的物理量。振动质点的运动状态可以由位移和速度来表述,但更为方便的是由相位来表述。例如,从(1-1)式和(1-2)式看出:当 $\omega t + \varphi = -\frac{\pi}{2}$ 和 $\omega t + \varphi = \frac{3\pi}{2}$ 时,振动质点都在平衡位置上,但速度方向正相反。由此可见,振动的相位不仅决定振动质点的位移,而且也决定振动质点在该时刻的速度。因此,相位是一个决定振动质点运动状态的物理量。

φ 表示振动在开始时(即 $t=0$)的相位,称为**初相位**。它决定振动质点在初始时刻的运动状态。由图1-3可见两振动的初相位一个为零(虚线),一个为 φ (实线)。两振动的相位差为 φ 。

三、谐振动的能量

现以弹簧振子为例讨论谐振动的能量。设振子在某一时刻的位移为 x ,速度为 v ,则此时振子的动能、势能分别为

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2, \quad E_P = \frac{1}{2}kx^2$$

将(1-1)式、(1-2)式分别代入这两个方程,便得到动能和势能随时间变化的关系式

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

$$E_P = \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (1-11)$$

可见,在整个振动过程中,动能和势能都随时间作周期性的变化。势能为0时,动能最大;动能为0时,势能最大。任何时刻,振子的总能量应为该时刻动能和势能之和,即

$$E = E_K + E_P = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 \sin^2(\omega t + \varphi) + \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega t + \varphi) \quad (1-12)$$

将 $k=m\omega^2$ 代入(1-12)式得

$$E = \frac{1}{2}m\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}kA^2 \quad (1-13)$$

式中 k 、 A 、 ω 、 m 都是常量。所以,弹簧振子在振动过程中的总能量是常量,同时可以看出,总能量与振幅的平方成正比,与圆频率的平方成正比。在整个过程中,弹性势能和动能是互相转换的,但总的机械能是守恒的。虽然(1-13)式是从弹簧振子这一特例推导出来的,但对其它谐振动也适用。

四、谐振动的合成

实际的振动问题,常常是几个振动的合成。例如,两列声波同时传播到空间某处,则该处空气分子的振动就是两个振动合成的结果。合振动一般是比较复杂的,下面我们分析较几种简单的情况。

(一)在同一直线上两个同频率谐振动的合成 设有两个谐振动在同一直线上进行,它们的圆频率同为 ω ,振幅分别为 A_1 、 A_2 ,初相位为 φ_1 、 φ_2 ,则在任意时刻 t ,这两个振动的位移分别为

$$x_1 = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad x_2 = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

由于两个振动是在同一直线上进行,因此,合振动的位移应该是两个分振动位移的代

数和, 即

$$x = x_1 + x_2$$

下面用矢量作图法求合振动。设O点为平衡位置, 由O点作矢量 A_1 和 A_2 , 使他们的长度等于两个分振动的振幅 A_1 和 A_2 , 并使它们和X轴的夹角分别等于两个分振动的初相位 φ_1 和 φ_2 。因两个矢量以同一角速度 ω 沿逆时针方向绕O点匀速旋转, 因此, 其夹角 $\varphi_2 - \varphi_1$ 为一常量, A_1 和 A_2 在X轴上的投影分别为两个分振动的位移 x_1 和 x_2 。按矢量求和法(平行四边形法则), 求出合矢量 A 。由于矢量 A_1 、 A_2 的长度不变, 而且以同样的角速度 ω 绕O点旋转, 因此, 合矢量 A 的长度也保持不变, 而且也以同一角速度 ω 绕O点旋转。此时 A 在X轴上的投影即为所求合振动的位移 x ,

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

式中 A 为合振动的振幅, φ 为初相位, 两者分别由下式决定

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos(\varphi_2 - \varphi_1)} \quad (1-14)$$

$$\tan \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2} \quad (1-15)$$

由上面结果可知: 在同一直线上同频率的两个谐振动的合成振动, 仍然是一个同频率的谐振动, 它的振幅和初相位由(1-14)、(1-15)两式决定。下面我们讨论两种特殊情况:

(1) $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm 2k\pi, k=0, 1, 2, \dots$ 。即两分振动同相位, 则 $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = 1$, 由(1-14)式知

$$A = A_1 + A_2$$

即合振动的振幅达到最大值, 等于原来两个分振动的振幅之和。

(2) $\varphi_2 - \varphi_1 = \pm (2k+1)\pi, k=0, 1, 2, \dots$ 。即两分振动相位相反, 则 $\cos(\varphi_2 - \varphi_1) = -1$, 由(1-14)式知

$$A = |A_1 - A_2|$$

即合振动的振幅达到最小值, 等于原来两个分振动的振幅之差。

上面讨论了两种特殊情况。一般情况下, 两个分振动的相位差 $(\varphi_2 - \varphi_1)$ 可以取任一值, 其合振动的振幅介于 $|A_1 - A_2|$ 和 $A_1 + A_2$ 之间, 即 $A_1 + A_2 \geq A \geq |A_1 - A_2|$ 。

由以上分析可知: 两个分振动的相位差 $(\varphi_2 - \varphi_1)$ 对合振动的振幅起着重要作用。

(二) 在同一直线上两个不同频率谐振动的合成 如果两个谐振动在同一直线上进行, 但频率不同, 则合振动比较复杂, 并且不再是谐振动。在这种情况下, 求合振动简单的方法是图解法, 即由两条谐振动曲线求出它们叠加后的曲线。图1-5的(a)和(b)表示两个频率之比为1:2的谐振动合成。由于相位差 $(\varphi_2 - \varphi_1)$ 不同, (a)和(b)的合成结果就不一样。从图中可以看到, 合振动虽然不是谐振动, 但仍然是一个周期性的振动。

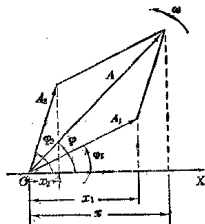


图1-4 振动合成

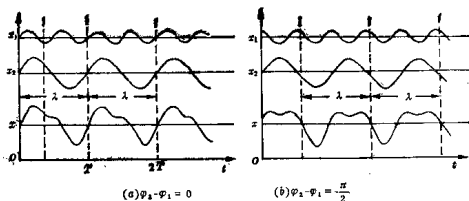


图1-5 不同频率谐振动的合成

(三) 相互垂直的两个频率相同的谐振动的合成 设两个振动方向相互垂直、频率相同的谐振动的位移方程为

$$x = A_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad y = A_2 \cos(\omega t + \varphi_2)$$

消去参量 t , 就得到合振动的轨迹方程

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} - \frac{2xy}{A_1 A_2} \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (1-16)$$

可见, 这是一个椭圆方程。合振动的轨迹由两个分振动的振幅和相位差来决定。下面讨论几种特殊情形:

(1) $\varphi_2 - \varphi_1 = 0$ 即两个分振动的相位差为0或相位相同, 这时椭圆方程为

$$\left(\frac{x}{A_1} - \frac{y}{A_2} \right)^2 = 0$$

$$\text{即 } \frac{y}{x} = \frac{A_2}{A_1}$$

这是一条通过坐标原点而斜率为 $\frac{A_2}{A_1}$

的直线, 质点的实际振动就是沿着这条直线, 如图1-6(a)所示。在任意时刻合振动的位移

$$\begin{aligned} s &= \sqrt{x^2 + y^2} \\ &= \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \cos(\omega t + \varphi) \end{aligned}$$

所以, 合振动也是谐振动, 且圆频率、初相位与分振动的相同, 振幅

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$$

(2) $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2}$, 这时椭圆方程

程(1-16)式变为

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1$$

即质点运动的轨迹是长短轴分别与

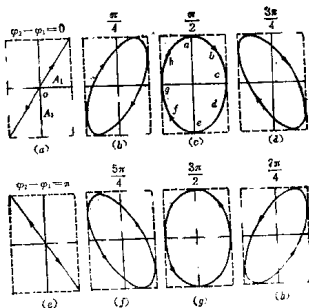


图1-6 相互垂直、同频率二个谐振动的合成

Y 、 X 轴重合的椭圆,如图1-6(c)所示,图中箭头表示质点的运动方向。

(3) $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$,这时椭圆方程(1-16)式变为

$$\frac{y}{x} = -\frac{A_2}{A_1}$$

这是一条如图1-6(e)所示的直线,质点就在这条直线上振动。

(4) $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{3\pi}{2}$ (或 $-\frac{\pi}{2}$),这时质点的运动轨迹如图1-6(g)所示。运动方向与(c)图相反。

当相位差是其它角度时,椭圆的长短轴不再与原来两个振动方向重合,它们的方位及质点的运动方向完全决定于分振动的相位差。

五、谐振动分析

法国数学家傅里叶证明了质点的任意一个复杂的周期性运动都可以分解为一系列的谐振动,且各个分振动频率都是原振动频率的整数倍。其中频率最低的与原振动频率相等,这个分振动称为**基频振动**,其它的分振动则依各自的频率相对于基频的倍数而相应地称为二次、三次、……**谐频振动**。这种把一个复杂的周期性运动分解为许多个谐振动之和的方法称为**谐频分析**。

谐频分析无论对实际应用或理论研究,都是一种十分重要的方法。因为实际存在的振动基本上都不是严格的谐振动,而是比较复杂的振动,它们产生的实际效果跟组成它们的基频及高次谐频振动有关。例如,钢琴和胡琴同时发出C音,我们很容易听出这是完全不同的两个声音(即音色不同),这就是因为它们包含的高次谐频振动不同的缘故。

第二节 简谐波

机械振动在弹性媒质中的传播过程称为**机械波**。应该注意,在波动过程中,传播的只是振动状态,媒质中各质点仅在各自的平衡位置附近振动,并不随波前进。

引起波动的初始振动的物体称为**波源**。如果波源的形状和大小可以忽略的就称为**点波源**。点波源发出的波向各个方向传播,由任一时刻在各个方向上振动相位相同的点连成的而称为**波阵面或波面**,最前面的波阵面通常称为**波前**。在一个各向同性的媒质中,波动在各个方向的传播速度都相等,所以各时刻的波阵面都是以点波源为中心的球面,这种波称为**球面波**,如图1-7(a)所示。波阵面为平面的波称为**平面波**,如图1-7(b)所示。表示

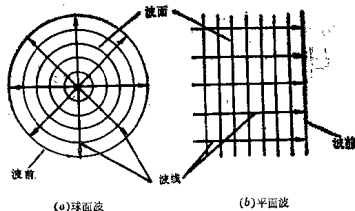


图1-7 波阵面和波线

波进行方向的线称为波线。在各向同性媒质中,球面波和平面波的波线总是和波阵面垂直。

如果波源作谐振动,所发出的波就是简谐波。实际上任何复杂的波都可以看成是由许多简谐波合成。因此研究简谐波的规律具有很重要的意义。

一、波动方程

现在介绍平面简谐波的波动方程。在图1-8中,设波沿着X轴正方向传播。如果波源在坐标系的原点处,波源沿Y轴方向振动,则波源的振动方程(初相位 $\phi=0$)为

$$y = A \cos \omega t$$

式中 A 为振幅, ω 为圆频率, y 表示波源质点在 t 时刻离开平衡位置的位移。

当波源在O点开始振动后,在OX方向上媒质质点由近及远依次开始振动。显然离波源较远的质点比之较近的质点振动相位落后一些。图1-8是某一时刻的波形图线。设任一质点的平衡位置为P,它离开原点的距离为 x ,若振动从O点以速度 v 传播,经过一段时间传到P点,P点处质点将以相同的振幅和频率重复O点的振动。因振动

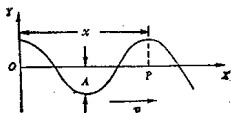


图1-8 波形图线

从O点传到P点所需时间为 $\frac{x}{v}$,所以O点处质点振动了 t 时间,P点处质点只振动了 $(t - \frac{x}{v})$ 时间。因此P点处质点的振动方程应为

$$y = A \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (1-17)$$

由于P点是任意取的,所以(1-17)式表示在波线上任意质点在 t 时刻离开平衡位置的位移。我们把这一方程称为平面简谐波的波动方程。方程中的 v 代表波速,它与波长 λ 的关系为 $v = \lambda \nu = \frac{\lambda}{T}$ 。又因为 $\omega = 2\pi \nu = \frac{2\pi}{T}$,所以(1-17)式也可以写成

$$y = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1-18)$$

可见波动方程中有两个独立变量 x 和 t 。如果 x 不变,那么位移 y 只是 t 的周期函数。这时它表示在距原点为 x 处的质点,在各时刻位移随时间变化的情况,于是波动方程就变成一个质点的振动方程。方程表明该质点和原点作同频率、同振幅的谐振动,只是相位比原点落后了 $2\pi \frac{x}{\lambda}$ 。如果 t 不变,则位移 y 仅为 x 的周期函数。这时方程表示在 t 时刻波线上各个不同位置上质点离开它们的平衡位置的位移分布。如图1-8所示,就是 t 时刻的波形曲线。

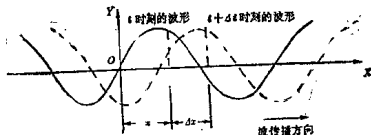


图1-9 波的传播

如果 x 和 t 都变化,则波动方程表示波线上各个不同质点在不同时刻的位移,如图1-9所示。实线表示某一时刻 t 的波形图线,虚线表示另一时刻 $(t + \Delta t)$ 的波形图线。这就是说在 Δt 时间整个波形沿着波的传播方向向前移动了 Δx 的距离。故波动方程反映了波的传播情形。

【例1-1】已知简谐波的周期 $T=0.5s$, 波长 $\lambda=1m$, 振幅 $A=0.1m$, 试写出波源初相为0的波动方程, 并求出距波源为2m处的质点的振动方程。

【解】将 $T=0.5s$, $\lambda=1m$, $A=0.1m$ 代入波动方程 $y=A\cos 2\pi(t/T - x/\lambda)$ 即得

$$y=0.1\cos 2\pi(2t-x)$$

将 $x=2m$ 代入波动方程, 则得距波源2m处质点的振动方程为

$$y=0.1\cos 2\pi(2t-2)$$

二、波的能量

波动是一种能量传递的方式, 各媒质质点不断地获得能量, 又不断地把能量沿波线传递出去, 而媒质质点本身却在各自的平衡位置附近振动。这些振动的质点都具有动能和势能。我们把媒质中单位体积的总能量称为能量密度, 用 $\bar{\epsilon}$ 表示。在波动过程中, 能量密度不是一个常量, 而是随时间作周期性变化。在一个周期内它的平均值为

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 \quad (1-19)$$

式中 ρ 是媒质的密度。

媒质中的能量是以波速 v 传播的。在单位时间内通过垂直于波传播方向单位面积的平均能量称为波的强度。如图1-10所示, 在垂直于波的传播方向上取面积 S , 以 S 为截面做一长方体, 使它的长度等于波速 v , 那么这个长方体内的能量在1秒时间内将全部通过面积 S 。所以, 波的强度 I 为

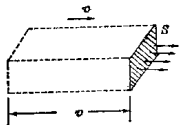


图1-10 波的强度

$$I = \frac{v \cdot S \cdot \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2}{S} = \frac{1}{2} v \rho \omega^2 A^2 \quad (1-20)$$

由上式可见, 波的强度和振幅的平方成正比, 也和频率的平方成正比。

三、波的衰减

在(1-17)式的波动方程中, 我们假定 A 是一个常数。这意味着在波动过程中, 波的振幅始终保持不变, 也就是波的强度不变。这只能看作是一种理想情况。事实上由于媒质中存在着内摩擦或其它原因, 波的强度或多或少会逐渐减弱, 振幅将随着距离的增加而减小。

理论和实践证明, 若一平面波沿 X 轴传播, 且在 $x=0$ 处的强度为 I_0 , 则在 x 处的强度 I 为

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (1-21)$$

式中常数 μ 称为媒质的吸收系数, 单位是1/厘米(1/cm), 它的数值与媒质的性质有关。上式表明, 波的强度在传播过程中是按指数规律衰减的。

由于强度与振幅的平方成正比, 故有

$$A^2 = A_0^2 e^{-\mu x}$$