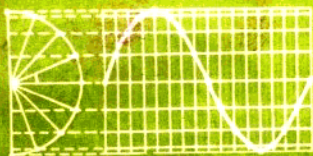
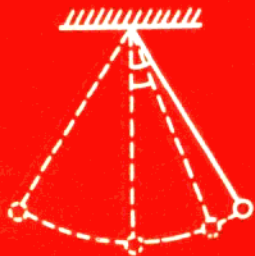


振动和波 声学

上海教育出版社



高中物理教学参考读物

振动和波 声学

上海市物理学会
中学物理教学研究委员会编
上海教育出版社

高中物理教学参考读物

振动和声学

上海市物理学会

中学物理教学研究委员会

上海教育出版社出版

(上海永福路 123 号)

新华书店上海发行所发行 江苏印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 3.875 字数 82,000

1957 年 8 月新知识第 1 版 1959 年 4 月第 1 版

1981 年 10 月第 2 版 1981 年 10 月第 11 次印刷

印数 257,731—305,730 本

统一书号: 7150·496 定价: 0.34 元

修订版前言

上海市物理学会中学物理教学研究委员会曾主编一套《高中物理教学参考读物》，共为14册，从1956年开始，先后经过四年的时间，到1959年陆续出齐。编写目的是以当时的《中学物理教学大纲》为依据、结合中学物理教学的需要，帮助教师更好地掌握教材，以提高教学质量。问世以来颇得读者的支持和关怀。在文化大革命前曾多次重印，个别部分印数多达数十万册。其间也曾根据读者所提意见作过修订和适当补充，重新排版出了几次修订本。粉碎“四人帮”后，为了满足广大师生对物理参考书的需求，又重印了一次。但物理科学近年来发展较快，它在社会主义建设和实现“四化”的过程中起着重要的作用，为了适应这些要求，原书不足之处很多，须作进一步的修订。为此，我们在维持原书面目不过多改变和原篇幅不过多扩大的前提下，根据教育部最近颁布的《全日制十年制学校中学物理教学大纲》（试行草案）和当前中学物理的教学情况，在内容上适当加深加广；处理教材的方法力求新颖，以供教师备课时的参考，并对学有余力的同学提供课外补充读物。加深理论和扩大知识面。单位制以SI制为主，如有必要亦适当介绍其他单位制。适当更新插图内容，增补一些比较有参考价值的例、习题。删去比较陈旧烦琐的内容。努力做到取材精练新颖，争取能够反映我们国家的新成就。

本书原由贾冰如,徐昌权,王良佐,杨逢挺等同志编写,现参加修改的为胡则梁同志。由于我们对中学物理的教学经验不足,又是在匆忙中完稿,疏忽和错误不妥之处在所难免。请读者随时予以指正。

目 录

第1章 振动	1
一、简谐振动	2
二、振动的振幅、周期和频率	8
三、简谐振动的图线	10
四、相位和相位差	14
五、单摆的振动	19
六、单摆的振动定律	21
七、在振动过程中能量的转变	24
八、振动的合成	27
九、阻尼振动	37
十、受迫振动	39
十一、共振及其在技术上的意义	40
第2章 波	45
一、弹性体的振动	45
二、振动在弹性体里的传播	48
三、横波	50
四、纵波	56
五、波长、频率和波速的关系	61
六、波前、波面和波线	63
七、简谐波及其表达式	64

八、波的能量体密度和能流密度	67
九、惠更斯原理	69
十、波的衍射	71
十一、波的反射和折射	72
十二、波的叠加原理	73
十三、波的干涉	74
十四、驻波	78
十五、多普勒效应	82
第 8 章 声学	85
一、声音	86
二、乐音的三要素	89
三、乐器的基音和泛音	94
四、声波的反射	97
五、声音的共鸣	98
六、机械录音	101
七、噪声及其控制	105
八、超声波	107
附录 复习题	111

第 1 章

振 动

在本会编的《运动学》里，我们讨论过机械运动，即物体与物体间或物体的一部分和另一部分间相对位置的变动，它是最基本最简单的运动形式。那里谈的是平动或质点的运动。现在我们要研究另一种很普遍的机械运动：振动。它是物体沿直线或曲线经过其平衡位置附近来回重复的运动。例如钟摆、气缸里的活塞、音叉等等的运动。

振动理论很重要，它是声学、地震学、造船学等的基础。此外，光学、电学、无线电学等也要用到振动的基本规律，所以它的应用范围很广。考虑到新的中学教学大纲要求讲解振动的合成、光的偏振及其应用，我们增加了“振动的合成”一节，并且在不用高等数学的前提下，尽量介绍得详细些。当然这里谈的只是些最基本的东西。

一、简 谐 振 动

简谐振动也称“谐振动”、“简谐运动”。我们之所以首先研究这种振动形式，是因为它最为简单。任何复杂的振动都可分解为某些简谐振动的和。简谐振动可用图 1-1 的装置来进行研究。为了使讨论较为简单，我们把一个直径方向上有孔的重球穿在一根光滑的水平棒上，以避免重力对运动的影响。球的孔壁和棒都很光滑，可以不考虑它们之间的摩擦力。在棒上还穿了一条钢制的轻弹簧，弹簧的一端固定在棒的端点，另一端固定在重球上。

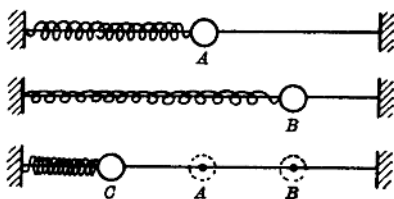


图 1-1

球在位置 A 时，弹簧是原长，作用于球上的弹力是零，所以这个位置是物体的平衡位置。如果把球拉到位置 B 后再放开，它就要在平衡位置 A 的左右振动。

重球为什么会振动呢？我们把它分为四个阶段来讨论。

第一阶段是从 B 到 A 。把球拉到 B 时，弹簧因伸长产生了弹力，但这时弹力为手拉球的力所抵销，球不动。手放开，弹力立即起作用，使球向左方运动。在这阶段里，弹力方向和运动方向都向左，球作加速；回到 A 时，速度最大，弹力等

于零。

重球在 B 时, 弹性势能最大, 动能等于零。在从 B 到 A 的过程中, 势能逐渐减小, 动能逐渐增大。当到达 A 时, 势能等于零, 动能最大。

第二阶段是从 A 到 C 。重球在 A 时, 弹力虽等于零, 但此时它具有速度, 且为最大, 当然不会停驻在这个位置上, 而要继续向左运动。当它一离开位置 A , 弹簧因被压缩而产生了弹力, 阻止重球向左运动。所以在这个阶段里, 弹力的方向向右, 和重球运动的方向相反, 球作减速运动。在运动过程中, 弹力逐渐增大, 速度逐渐减小。到达 C 时, 速度等于零, 不能再向左运动。

在运动过程中, 动能逐渐减小, 势能逐渐增大; 到达 C 时, 势能最大, 动能等于零。

第三阶段是从 C 到 A 。这阶段和第一阶段相似, 只是弹力方向和运动方向都向右, 球作加速运动。在运动过程中, 弹力逐渐变小, 速度逐渐增大; 到达 A 时, 弹力又变为零, 速度达到最大值, 能量又从势能逐渐变为动能; 在位置 A , 动能最大, 势能等于零。

第四阶段是从 A 到 B 。这阶段和第二阶段相似, 不过弹力方向向左, 运动方向向右, 球作减速运动。在运动过程中, 弹力逐渐增大, 速度逐渐减小; 到达 B 时, 速度变为零, 能量又从动能全部变为势能。

这样, 球就完成了一次振动, 只要条件不改变, 球就这样继续振动下去, 每次的振动都可以分成上述四个阶段。图 1-1 中的弹簧和球所构成的振动系统叫做弹簧振子, 弹簧振子中的小球叫做振子。任何作简谐振动的振子都叫做谐振子。

胡克定律告诉我们: 在弹性限度内, 弹力跟弹簧的伸长或

阶段	位 置	弹 力	加 速 度	速 度	能 量
1	在 B	最大, 向左	最大, 向左	零	势能最大, 动能等于零
	从 B 到 A	从最大变到零, 向左	从最大变到零, 向左	从零变到最大, 向左	势能从最大变到零, 动能从零变到最大
2	在 A	零	零	最大, 向左	势能等于零, 动能最大
	从 A 到 C	从零变到最大, 向右	从零变到最大, 向右	从最大变到零, 向左	势能从零变到最大, 动能从最大变到零
3	在 C	最大, 向右	最大, 向右	零	势能最大, 动能等于零
	从 C 到 A	从最大变到零, 向右	从最大变到零, 向右	从零变到最大, 向右	势能从最大变到零, 动能从零变到最大
4	在 A	零	零	最大, 向右	势能等于零, 动能最大
	从 A 到 B	从零变到最大, 向左	从零变到最大, 向左	从最大变到零, 向右	势能从零变到最大, 动能从最大变到零

压缩成正比。所以振动物体离开平衡位置的位移增加时, 弹簧的弹力也成正比地增加。设球离开平衡位置的位移为 x , 它在这个位置上所受的弹力 F 可写成:

$$F = -kx.$$

式中 k 是弹簧的弹性系数, 也称倔强系数, 它在数值上等于弹簧伸长和压缩单位长度时所产生的弹力。负号表示力和位移的方向相反。因为弹力 F 总是指向平衡位置的, 所以它的方向跟从平衡位置量起的位移 x 的方向总是相反的。例如在球从 B 向 A 的运动过程中, 弹力指向左方, 球在平衡位置的右方; 球从 A 到 C 时, 弹力指向右方, 球在平衡位置左方。

根据牛顿第二运动定律 $F = ma$, 代入上式得

$$a = -\frac{k}{m}x_0. \quad (1)$$

式中 k 和 m (球的质量) 都是不变的, 所以它们的比值是一个恒量。

重球的振动是简谐振动的一个例子, 所以根据上面两个式子, 我们知道简谐振动就是: 物体在跟位移成正比的, 并且总是指向平衡位置的力的作用下的振动。在简谐振动中, 物体的加速度总是跟位移的大小成正比, 加速度的方向总是跟位移的方向相反。

公式 (1) 是弹簧振子简谐振动的运动方程。由它可以得到小球的速度、位移和时间的关系式。现在我们就来研究简谐振动中位移和时间的关系, 以及速度、加速度和时间的关系。这个答案完全可以从公式 (1) 推导出来, 但它已超出了本书的范围, 我们将采用一种物理概念清晰、表述方法生动的办法来解决这个问题。为此, 我们先来做实验: 在水平圆盘边缘的竖直小柱子上固定一个小球, 并且用水平的平行光照射, 于是小球的影子就落在和光线垂直立着的竖直屏上 (图 1-2)。当圆盘匀速转动时, 小球的影子就在一条直线上来回振动。

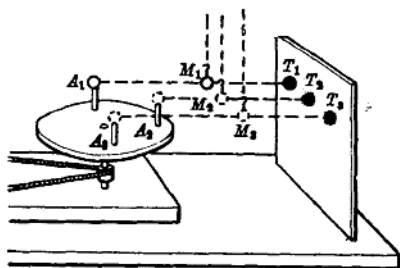


图 1-2

现在,在同一屏前,悬一个摆线很长的摆,使摆锤运动的影子和转动小球的影子落到同一直线上。然后使摆在平行于屏的平面上振动,这时再调节圆盘转动的速度,使屏上的小球影子在每一点都和振动着的摆锤的影子相重合;当然这种重合,只有当摆的振幅很小的时候才能做到。

这种重合表示:沿着直线振动的摆锤,可以看做是匀速圆周运动的物体 A 在该直线上的投影的运动。我们知道,摆锤的振动是简谐振动(见第四节单摆的振动),因此作匀速圆周运动的物体在其直径上的投影运动,也是简谐振动。这个重要的结果,为我们利用圆周运动来研究简谐振动提供了实验基础。现在我们利用参考圆这个辅助工具来推导简谐振动的公式。

设质点 M 以匀角速度 ω 在半径为 A 的圆周上运动,那末它在水平直径 BC 上的投影 P 点就在 BC 作简谐振动(图 1-3)。因为作简谐振动的是质点 M 在直径 BC 上的投影 P 点,所以 P 点的运动情况可以从质点 M 的运动推导如下(我们叫

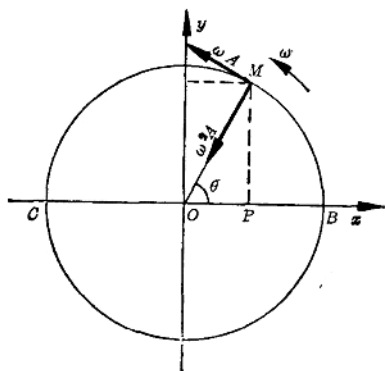


图 1-3 研究简谐振动的参考圆

质点 M 为研究简谐振动的辅助点, 叫质点 M 的圆轨迹为研究简谐振动的辅助圆或参考圆):

设在任何时刻 t , P 点离开圆心的位移是 OP , 用 x 表示。 OM 和直径 BC 间的夹角用 θ 表示, 则

$$x = A \cos \theta.$$

为简单起见, 假定 M 点从 B 点开始运动, 则 $\theta = \omega t$, 因此上式变成

$$x = A \cos \omega t. \quad (2)$$

此式表示 P 点在任何时刻 t 的位移。要特别注意式中的 x 是代表 P 点离开振动中心即平衡位置 O 的距离, 而不是离开运动起点 B 的距离。

圆的半径是 A , M 点的角速度是 ω , 从这套丛书的第四册《曲线运动、万有引力》里, 我们知道, M 点的线速度是 ωA , 向心加速度是 $\omega^2 A$, 方向如图所示。 P 点的速度 v 和加速度 a 分别是 M 点的速度和加速度在 BC 上的分量, 即

$$v = -\omega A \sin \omega t, \quad (3)$$

$$a = -\omega^2 A \cos \omega t. \quad (4)$$

(3)式中 v 表示任何时刻 P 点的速度, 式中负号是因为: M 点在水平直径上方时, P 点的速度 v 和 x 轴反方向, 而此时 ωA 和 $\sin \omega t$ 都是正数; 当 M 点在水平直径下方时, P 点速度 v 沿 x 轴的正方向, 而此时的 $\sin \omega t$ 却是负的。(4)式中的负号也是因为: M 点在竖直直径右方时, P 点的加速度 a 和 x 轴反方向, 此时 $\cos \omega t$ 是正数; 而当 M 点在竖直直径左方时, P 点的加速度和 x 轴方向相同, 而此时 $\cos \omega t$ 却是负数。

把位移公式(2)和加速度公式(4)结合起来, 得

$$a = -\omega^2 x$$

式中 ω^2 是一个正的恒量。因而上式就表明, P 点加速度 a

的大小总是跟位移 x 的大小成正比, 而它的方向又总是跟位移的方向相反, 这是简谐振动的特征, 和前面说的重球振动的性质完全一致。公式(2)、(3)和(4)是简谐振动的位移、速度和加速度公式, 它们都是时间的正弦或余弦函数, 统称谐函数。

二、振动的振幅、周期和频率

各种各样的振动虽然存在着很大差别, 但也具有许多共同之处, 特别是振幅、周期和频率之间的关系。

振动物体在平衡位置两边离开平衡位置的最大位移, 称为振动的振幅。在图 1-1 中重球振动的振幅等于 AB 或 AC 。

在位移公式 $x = A \cos \omega t$ 中, 由于余弦的最大绝对值是 1, 因而 x 的最大绝对值是 A , 所以 A 就是振动物体离开平衡位置的最大位移, 也就是振幅。

物体完成一个全振动(来回一次)所需的时间称为振动的周期, 用 T 表示。在讨论重球的振动时, 我们曾把它分做四个阶段, 这四个阶段完成一个全振动。经过这四个阶段完成一个全振动所需的时间就是周期。

在图 1-3 中, 对质点 M 来说, ω 是角速度, 所以 M 沿圆周运动一周所需的时间是

$$T = \frac{2\pi}{\omega}。$$

质点 M 每转一周, P 点就作一个全振动, 所以上式也就是振动点 P 的振动周期。

物体在单位时间(1 秒钟)内完成全振动的次数称为振动的频率。它的单位叫做赫兹。每秒钟振动一次, 频率就是 1

赫兹。如果物体振动的周期等于 $\frac{1}{10}$ 秒 (即 1 秒钟振动 10 次), 频率就等于 10 赫兹。一般说来, 如果用 ν 代表物体振动的频率, 那么它跟同一物体的周期 T 之间的关系是

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}。$$

由上述两式知道 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 和 $\omega = 2\pi\nu$ 。由于 ω 是频率 ν 的 2π 倍, 因此称为简谐振动的圆频率。在运算中, 用 ω 往往比用 ν 更方便, 所以 ω 是很重要的物理量。把 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ 和 $\omega = 2\pi\nu$ 依次代入位移、速度和加速度公式, 得

$$x = A \cos \frac{2\pi}{T} t, \quad \text{或} \quad x = A \cos 2\pi\nu t。$$

$$v = -\frac{2\pi}{T} A \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad \text{或} \quad v = -2\pi\nu A \sin 2\pi\nu t。$$

$$a = -\frac{4\pi^2}{T^2} A \cos \frac{2\pi}{T} t, \quad \text{或} \quad a = -4\pi^2\nu^2 A \cos 2\pi\nu t。$$

同样, $a = -\omega^2 x$ 变为

$$a = -\frac{4\pi^2}{T^2} x,$$

$$\text{或} \quad a = -4\pi^2\nu^2 x。$$

和 $a = -\frac{k}{m}x$ 相比, 得

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

或

$$\nu = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}。$$

这个公式告诉我们, 周期和频率是由振动系统内部的弹性力

和量度物体惯性的质量所决定的，因此它们是由振动系统本身的性质所决定的量。这种由系统本身性质所决定的周期和频率称为固有周期和固有频率。在研究共振现象时，它们是很重要的概念。

三、简谐振动的图线

它是作简谐振动物体的位移随时间变化的图线。振动的图线在研究振动过程时特别有用，它使我们有可能对振动过程的每一个阶段分别进行研究。

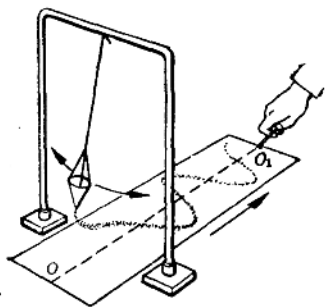


图 1-4

绘制简谐振动图线的方法很多，最直观的一种方法是利用图 1-4 所示的装置，一只装沙的漏斗在框架所在的竖直平面内振动。再用一块硬纸板或薄木板，先在板上画一根零线 OO_1 ，这根零线要通过摆的平衡位置并和它的振动平面垂

直。这样，一面使摆振动，一面匀速地拉动薄板，从漏斗下漏出的沙就在木板上记出摆在各该时刻的位置。任何一部分沙跟零线 OO_1 的垂直距离就等于该时刻摆的位移。位移的最大值就等于摆的振幅。接连不断地漏下来的沙，就在木板上画出了摆的位移-时间图线。

如果在图 1-5 中的重球上装一个笔尖，使它和匀速运动的纸相接触，则重球的振动图线可在纸上记录下来。

我们已经知道，当质点 M 在作匀速圆周运动时，它在直径