



高中物理教学参考读物

振动和波 声学

中国物理学会上海分会
中学物理教学研究委员会编

新 知 識 出 版 社

振 动 和 波 声 学

中国物理学会上海分会
中学物理教学研究委员会編

新 知 識 出 版 社

一九五七年·上海

高中物理教学参考讀物

振 动 和 波 声 学

中国物理学会上海分会
中学物理教学研究委员会編

*

新 知 識 出 版 社 出 版

(上海湖南路9号)

上海市書刊出版業營業許可証出015号

上海市印刷四厂印刷 新華書店上海發行所总經售

*

开本: 787×1092 1/32 印張: 2 3/8 字數: 54,000

1957年8月第1版 1957年12月第2次印刷

印數: 160,001—190,000本

統一書号: 13076·85

定 价: (7) 0.22 元

前 言

为了适应当前中学物理教学的需要，帮助教师更好地掌握教材，本会决定根据“中学物理教学大纲”修订草案和高中物理新教材编写一套“高中物理教学参考读物”。共計十二册，从1956年9月开始，陸續出版。本書是这套参考读物中的第五本，内容相当于高二物理教材的第一章“振动和波”和第二章“声学”，分“振动”、“波”和“声学”三章。第一章主要討論簡諧振动、阻尼振动、受迫振动以及共振現象；第二章主要討論振动在彈性媒質中的傳播情况；第三章主要討論跟声音有关的一些物理現象。

为了便于說明問題，本書内容比較課本稍有增刪，但在实际教学中，教师仍應該根据課本进行教学。

本書根据編委会拟定的提綱，由賈冰如、徐昌权、王良佐三位同志負責編写，由楊逢挺同志进行整理。但因限于教学經驗和业务水平，难免有許多不妥当的地方，希望从事物理教学的同志們予以批評和指正，以便在再版时修正和改进。

中国物理学会上海分会

中学物理教学研究委员会

1957年5月

目 录

第一章 振 动

1. 簡諧振动	1
2. 振动的振幅 周期和頻率	6
3. 簡諧振动的图綫	8
4. 單摆的振动	13
5. 單摆的振动定律	16
6. 在振动过程中能量的轉变	19
7. 阻尼振动	22
8. 受迫振动	23
9. 共振及其在技术上的意义	24

第二章 波

1. 彈性体的振动	29
2. 振动在彈性体里的傳播	31
3. 橫波	32
4. 縱波	37
5. 波長	41
6. 波的合成	42
7. 波的反射	46
8. 駐波	49

第三章 声 学

1. 声音	51
2. 乐音的特性	54
3. 乐器的基音和泛音	59
4. 声波的反射	61
5. 声音的共鳴	61
6. 超声波	64

附录 复習題

第一章 振 动

在本会編的“运动学”里，我們討論过机械运动，它的涵义是指物体与物体間或物体的一部分和另一部分間相对位置的变动，它是最基本最簡單的运动形式。那里談的是平动或質点的运动。現在我們要研究另一种很普遍的机械运动，就是**振动**。它是物体在一定位置附近来回重复的运动。例如摆、气缸里的活塞、发声体等等的运动。

振动理論很重要，它是声学、地震学、造船学等的基础知識。此外，光学、电学、无綫电学等也要用到振动中的基本規律，所以它的应用范围很广。当然，这里談的只是些最最基本的东西。

1. 簡諧振动 簡諧振动可用图 1 的裝置来进行研究。为了使討論較為簡單，我們把一个直徑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，可以不考虑它們之間的摩擦力。在棒上还穿了一条鋼制的彈簧，彈簧的一端固定在棒的端点，另一端固定在重球上。

球在位置 A 时，彈簧是原長，作用于球上的彈力是零，所以这个位置是物体的平衡位置。如果把

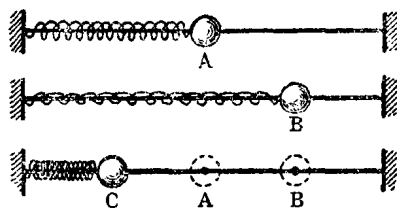


图 1

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？我們把它分为四个阶段来討論。

第一阶段是从B到A。把球拉到B时，彈簧因伸長产生了彈力，但这时彈力为手拉球的力所抵消，球不动。手放后，彈力立即起作用，使球向左方运动。在这阶段里，彈力方向和运动方向都向左，球作加速运动；回到A时，速度最大，彈力等于零。

重球在B时，彈性势能最大，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，彈力虽等于零，但它的速度最大，当然不能停驻在这个位置，而必須繼續向左运动。当它一离开位置A，彈簧因被压缩产生了彈力，阻止重球向左运动。所以在这个阶段里，彈力的方向向右，和重球运动的方向相反，球作减速运动。在运动过程中，彈力逐渐增大，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，彈力方向和运动方向都向右，球作加速运动。在运动过程中，彈力逐渐变小，速度逐渐增大；到达A时，彈力又变为零，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，不过彈力方向向左，运动方向向右，球作减速运动。在运动过程中，彈力逐渐增大，速度逐渐减小；到达B时，速度变为零，能量又从动能变为势能。

这样，球完成了一次振动，以后重复同样的振动。把上面講的归納起来得下表：

胡克定律告訴我們：在彈性限度內，彈力跟彈簧的伸長或压缩成正比。所以振动物体离开平衡位置的位移增加时，彈簧的

阶段	位置	彈力	加速度	速度	能 量
1	在位置 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	在位置 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	在位置 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	在位置 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

彈力也正比地增加。設球离开平衡位置的位移为 x , 它在这个位置上所受的彈力 F 可写成:

$$F = -kx。$$

式中 k 是彈簧的彈性系数, 也称倔强系数, 它在数值上等于彈簧伸長或压縮單位長度时所产生的彈力。負号表示力和位移的方向相反。因为彈力 F 总是指向平衡位置的, 所以它的方向总是跟从平衡位置量起的位移 x 的方向相反的。例如在球从 B 向 A 的运动过程中, 彈力指向左方, 球在平衡位置的右方; 球从 A 到 C 时, 彈力指向右方, 球在平衡位置左方。

根据牛頓第二运动定律 $F = ma$, 代入上式得

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

式中 k 和 m (球的質量) 都是不变的, 所以它們的比值是一个恒量。

重球的振动是簡諧振动的一个例子, 所以根据上面两个式子, 我們知道簡諧振动就是: 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。在簡諧振动中, 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。

現在我們再来进一步研究 簡諧振动中位移和時間的关系, 以及速度、加速度和時間的关系。为此, 我們先来做一个这样的实验: 在水平圓盤邊緣的豎直小柱上固定一个小球, 并用水水平的平行光照射, 于是小球的影子就落在和光綫垂直立着的屏上(图 2)。当圓盤匀速轉动时, 小球的影子就在一条直綫上来回振动。

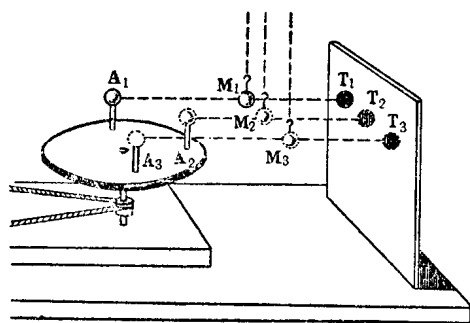


图 2

現在, 在同一屏前, 悬一个摆綫很長的摆, 使摆錘运动的影子和轉动小球的影子落到同一直綫上。然后使摆在平行于屏的平面上振动, 这时再調节圓盤轉动的速度,

就可能使屏上的小球影子在每一点都和振动着的摆錘的影子相重合; 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: 沿着直綫振动的摆錘, 可以看做是匀速圓周

运动的物体A在該直綫上的投影的运动。我們知道,摆錘的振动是簡諧振动(見第4节單摆的振动),因此,作匀速圓周运动的物体在其直徑上的投影运动,也是簡諧振动。这个重要的結果,使我們能够利用它来推导簡諧振动的公式。

設質点M以匀角速度 ω 在半径为A的圓周上运动,那末它在水平直徑BC上的投影P点就在BC上往返运动(图3),或者說作簡諧振动。因为作簡諧振动的是質点M在直徑BC上的投影P点,所以P点的运动情况可以从質点M的运动推

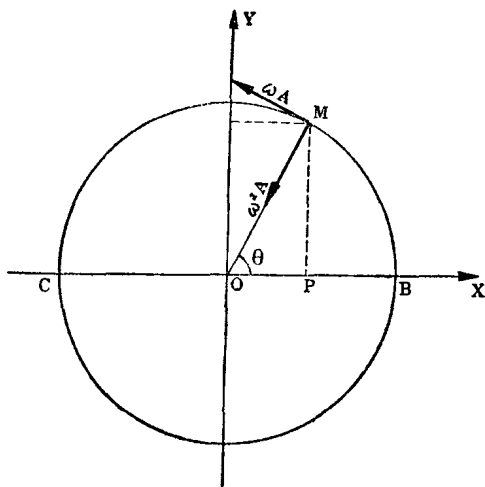


图 3

导如下(我們叫質点M为研究簡諧振动的輔助点,叫質点M的圓軌迹为研究簡諧振动的輔助圓):

設在任何时刻 t , P点离开圓心的位移是 OP , 用 x 表示。OM 和直徑間的夾角用 θ 表示,則

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

为簡單起見,假定M点从B点开始运动。則 $\theta = \omega t$, 因此上式变为

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

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的距離,而不是离开运动起点的距離。

圓的半徑是 A , M 点的角速度是 ω , 从第四本“曲綫运动万有引力”里, 我們知道, M 点的綫速度是 ωA , 向心加速度是 $\omega^2 A$, 方向如图所示。 P 点的速度和加速度分别是 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)式表示任何时刻 P 点的速度, 負号是因为它的方向向左的緣故。当 M 点在水平直徑 BC 的下方时, P 点的速度向右, 但因此时 $\sin \omega t$ 都是負值, 所以式中的負号仍然需要。(4)式表示任何时刻 P 点的加速度, 負号也是因为它的方向向左的緣故。当 M 点在豎直直徑的左方时, P 点的加速度向右, 但因此时的 $\cos \omega t$ 是負值, 所以式中的負号仍然需要。

把位移公式(2)和加速度公式(4)結合起来, 得

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

式中 ω^2 是一个正的恒量, 因而上式就表明 P 点的加速度 a 总是跟位移 x 的大小成正比, 而它的方向总是跟位移的方向相反, 这是簡諧振动的特征, 和重球振动的性質完全一致。因此公式(2)(3)和(4)是簡諧振动的位移、速度和加速度公式, 它們都是時間的正弦或余弦函数, 統称諧函数。

2. 振动的振幅 周期和頻率 各种各样的振动虽然存在着很大差別, 但也具有許多共同之处, 特別是振幅、周期和頻率之間的关系。

振动物体在平衡位置兩边离开平衡位置的最大位移, 称为振动的振幅。在图 1 中重球振动的振幅等于 AB 或 AC 。

从位移公式 $x = A \cos \omega t$ 中, 由于余弦的最大絕對值是 1, 因而 x 的最大絕對值是 A , 所以 A 就是振动物体离开平衡位置的最大位移, 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 代表。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,完成这四个阶段所需的时间就是周期。

在图 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 点做一个全振动,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,即每秒振动 1 次,频率是 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 $\omega = 2\pi\nu$ 。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

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

或

$$a = -4\pi^2\nu^2x_0.$$

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,振动物体的周期和频率,由物体本身的性质决定,称为物体的固有周期和固有频率。在研究共振现象时,是一个很重要的概念。

3. 简谐振动的图线 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。

现在我们先来研究物体作简谐振动时位移随时间变化的图线。

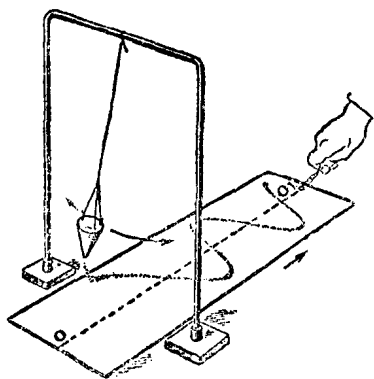


图 4

最直观的一种方法是利用图 4 所示的装置,一只装沙的漏斗在一个一定的平面上振动。再用一块硬纸板或薄木板,先在板上画一根零线 CO_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,从漏斗下漏出来的沙就在木板上记出摆在各该时刻的位

置。任何一部分沙跟零綫 OO_1 的垂直距离就等于該时刻摆的位移。位移的最大值就等于摆的振幅。接連不断地漏下来的沙，就在木板上作出了摆的位移—時間图綫。

如果在前面討論的重球上裝一針，使它和勻速移动着的燻了黑烟的玻璃板接触，則重球的振動，也就在玻璃板上表示出来。

我們已經知道，当質点在作勻速圓周运动时，它在直徑上的投影在作簡諧振動。根据这点，我們又可用作图法作出簡諧振動的图綫如下：

設圓周上一点按反时針方向运动，从位置 1 开始，連續經

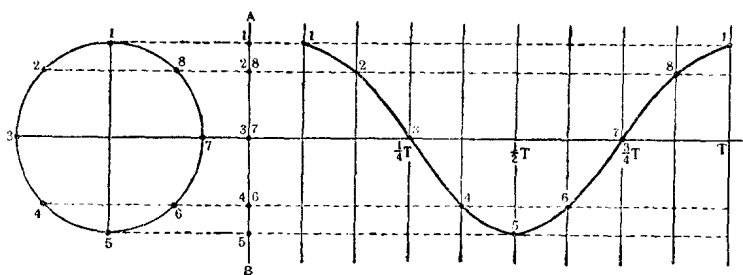


图 5

2、3、4……各位置。兩連續位置的角度差是 45° ，時間差为 $\frac{1}{8}$ 周

期(图 5)。把这些位置投射于和圓的豎直直徑平行的直綫 AB 上。再在 AB 的右边画出許多彼此間距离相等并和 AB 平行的直綫。这些直綫依次和圓上的各位置联系，例如位置 1 联系第一条直綫，位置 2 联系第二条直綫等。因此在图 5 中，相鄰兩直綫間的角度差也是 45° ，時間差也是 $\frac{1}{8}$ 周期。現在把位置 1 画在第一条直綫上，位置 2 画在第二条直綫上，位置 3 画在第三条直綫

上,这是各位置在 AB 直綫上的投影的振动中心。这样一点一点地画,就得到簡諧振动的位移图綫。

实际作图时,把質点在圆周上运动的各位置,不經投射于 AB 直綫上,而直接画到右边的許多平行等距的相应直綫上,也是一样。图 11 里的几个图就是这样画的。

我們也可用公式

$$x = A \cos \frac{2\pi}{T} t$$

来画。設時間用周期的分数表示,每隔 $\frac{1}{8} T$ 計算位移一次。計算

結果如下:

t	0	$\frac{1}{8} T$	$\frac{2}{8} T$	$\frac{3}{8} T$	$\frac{4}{8} T$	$\frac{5}{8} T$	$\frac{6}{8} T$	$\frac{7}{8} T$	T
$\frac{2\pi}{T} t$	0	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°	360°
$\cos \frac{2\pi}{T} t$	1	0.7	0	-0.7	-1	-0.7	0	0.7	1
x	A	0.7A	0	-0.7A	-A	-0.7A	0	0.7A	A

用橫軸表示時間,縱軸表示位移,即得图 6。我們看見,这样画出来的两个位移图綫是一样的。

用同样方法,从公式

$$v = -\frac{2\pi}{T} A \sin \frac{2\pi}{T} t$$

和

$$a = -\frac{4\pi^2}{T^2} A \cos \frac{2\pi}{T} t$$

也可以画出簡諧振动的速度图綫和加速度图綫(图 7 和图 8)。

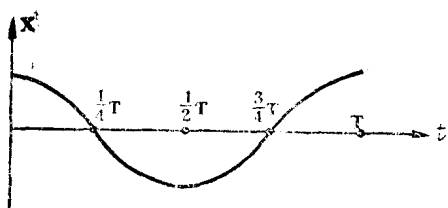


图 6

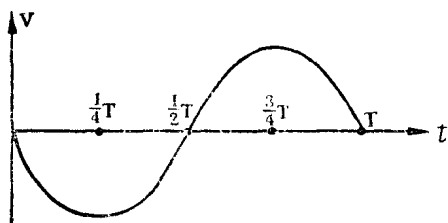


图 7

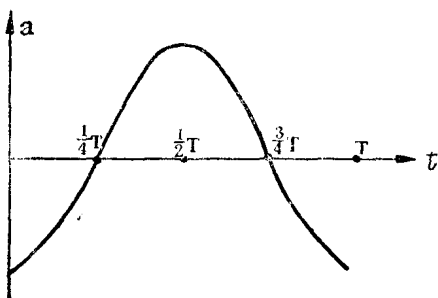


图 8

把三个图线联系起来看,我们可以看出:(1)当位移为零时(即在振动中心处),速度最大,加速度为零。位移最大时,速度等于零,加速度最大。(2)三图线的位相不同,速度图线和位移图线相差 90° ,加速度图线和位移图线相差 180° 。

位相是什么?怎样比較兩图綫的位相差呢?讓我們来看下面几个图。

在图 9 里,我們重复一下在水平的圓周上作匀速运动的輔助点M在豎直平面上的投影的运动情形。連接圓心与輔助点的直綫,叫做动徑。当

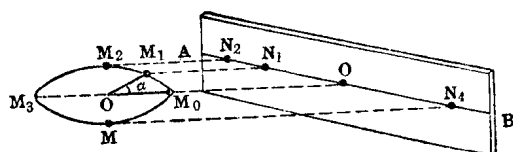


图 9

輔助点在最初位置 M_0 时,它的投影落在豎直平面的 O 点上。当輔助点轉到 M_1 时,动徑轉了 α 角,它的投影在 N_1 上。經過 $\frac{1}{4}$ 周期,輔助点到 M_2 ,动徑离开最初位置 90° ,投影移到 N_2 。經過半周期,輔助点到 M_3 ,动徑离开最初位置 180° ,投影又移到 O 。經過 $\frac{3}{4}$ 周期,动徑轉了 270° ,輔助点到达 M ,投影在 N_4 。經過一周期,輔助点和它的投影又都回到原来出发的位置。

动徑离开最初位置所轉动的角度叫做振动的位相 所以,在上图中,輔助点 M_0 和投影 O 的位相都等于零。 M_1 和 N_1 的位相是 α 度, M_2 和 N_2 的位相是 90° , M_3 和它的投影重回到 O 的位相是 180° , M 和 N_4 的位相是 270° , 最后又都回到原来出发点,位相是 360° 。 N_1 和 N_2 的位相差是 $90^\circ - \alpha$ 。 N_4 和 N_2 的位相差是 180° 等等。

从簡諧振动的位移—時間图

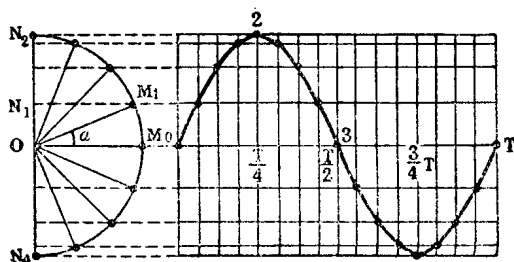


图 10