工業專科學校試用教科書

普通物理学

PUTONG WULIXUE

下 册

（各专业通用）

湖北省三年制工业专科学校
普通物理学教材选編組选編

工業專科学校試用教科書

普通物理学

下册

（各專業通用）

湖北省三年制工業專科学校
普通物理学教材选編組选編

湖北人民出版社

內 容 提 要

本書可供三年制工业專科学校各專业作普通物理学的教材，二年制工业專科学校各專业也可以适用。

全書共分五編：第一編为力学的物理基础；第二編为分子物理学与热力学；第三編为电磁学；第四編为振动与波动过程；第五編为近代物理基础。

为配合电工学教学及專业需要，在电磁学部分統一采用了合理化实用單位制。

書后編有复習思考題及習題，供教学参考。

工业專科学校試用教科書

普 通 物 理 学

下 册

（各專业通用）

湖北省三年制工业專科学校
普通物理学教材選編組選編

湖北人民出版社出版（武漢解放大道332號）

武漢市書刊出版業營業許可証新出字第1號

湖北省新华書店发行

湖北省地方国营新生印刷厂印刷

787×1092毫米 $\frac{1}{32}$ · $7\frac{7}{8}$ 印張 · 186,000字

1961年 7 月第 1 版

1961年 7 月第1次印刷

印數：1— 8,550

統一書號：13106 · 27

定 價：0.75 元

下 册 目 录

第四編 振动和波动过程

第五編　近代物理学基础

第四編　振动和波动过程

§4-0-1　振动和波动过程的研究內容

振动和波动是緊密联系着的物質的运动形式，振动是波动产生的根源，波动是振动傳播的过程。

振动可分为兩大类：机械振动和电磁振盪。按照本性来說，机械振动和电磁振盪是兩种完全不同的物理現象，但是按照它們所遵循的一般規律来說，兩者却具有深刻的相似性。例如，在自由振动、阻尼振动、受迫振动和共振等現象中的規律性是完全相同的，不論所指的是关于机械的还是关于电磁的。这种看来是不同种类的現象却存在着相同的規律，对于研究自然界具有重大的意义。它使我們有可能通过某一方面的探討，就能更好地了解完全是另一方面的現象，这不但便于研究，而且往往推动了新現象的發現。

同样的情况，波动也可分为兩大类：一类是屬于机械振动范圍的，称为机械波，例如水波、声波以及在液态和固态介質內部傳播的彈性波等都是机械波；另一类是屬于电磁振盪范圍的，称为电磁波，例如无綫电波、紅外綫、可見光、紫外綫、倫琴射綫和γ射綫等都是电磁波。

机械波的实質是質点振动在介質中的傳播过程，电磁波的实質是变化电場和变化磁場在空間中傳播的过程。兩者在本性上是完全不同的，但是它們都具有波动过程的共同特征。例如，它們都是由于物質之間相互影响而形成的，具有一定的速度，并伴随着能量的傳播，在不均匀的介質中都产生反射、折射和繞射等現象，兩个波动相遇时都有可能产生干涉現象，而且这些現象都遵

循共同的規律。

在物質世界中，振动和波动現象是很普遍的。研究广义的振动和波动，闡述它們的共同特征、現象和規律，不論对科学研究或技術应用来說，都是很重要的。

第一章　振动学基礎

§ 4-1-1　諧振动

物体在一定位置附近作来回重复的运动称为振动。例如，摆的运动，气缸中活塞的运动等，都是可以直接看到的振动。又如，一切發音体的运动，机器开动时各部分的微小运动，固体中分子的热运动等，則是不易或是不能直接看到的振动。

我們先用彈簧振子来說明諧振动。为避免重力对运动的影响，將一輕彈簧和与它連在一起的物体穿在光滑的水平玻璃棒上（图 4-1-1），并使彈簧左端固定。將物体略为移动后，物体就在彈簧力的作用下作左右来回的运动。这种振动系統称为彈簧振子。現在我們来分析彈簧振子的运动。設物体在位置 O 时，彈簧作用在物体上的力是零，这个位置是物体的平衡位置。現在用外力把物体向右移到位置 B，这时彈簧被拉長，相应地有指向左方

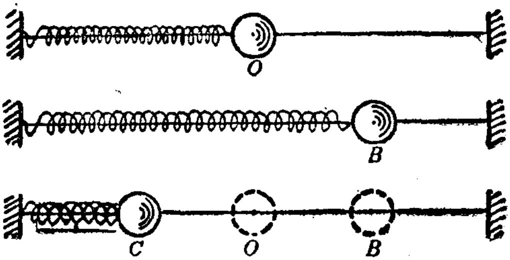

图 4-1-1　彈簧振子的振动

即指向平衡位置的力作用在物体上，当外力撤去后，此力使物体返回平衡位置。当物体回到平衡位置时，彈簧的作用力等于零，但因为物体在返回时获得速度，由于慣性作用，物体并不停止运动

而繼續向左移动。当物体在平衡位置左边时，彈簧被压縮，所以物体所受的力指向右方卽指向平衡位置。这时力的作用是阻撓物体运动，直至物体靜止在位置 C。在这以后，物体在彈性力的作用下向右移动，情形和上述向左移动相似。这样，在彈簧的力的作用下，物体就在平衡位置左右方向作来回重复的振动。

取平衡位置 O 为 x 軸的原点，并設 x 軸的正向向右。按照虎克定律，物体所受彈簧的彈性力 f 和彈簧的伸長或物体以平衡位置为起点的位移 x 的关系是

$$f=-kx,$$

式中 k 是彈簧的倔强系数，（在彈性极限以內，彈簧伸長每單位長度所需的力称为倔强系数），負号表示力和位移的方向相反。設物体的質量为 m，根据牛頓第二运动定律，它的加速度是

$$a=\frac{f}{m}=-\frac{k}{m}x。$$

因为 k 和 m 都是正数，所以它們的比值可用另一恆量 ω 的平方来表示，卽令

$$\frac{k}{m}=\omega^2, \tag{4-1-1}$$

代入上式，得

$$a=-\omega^2x \tag{4-1-2}$$

或

$$\frac{d^2x}{dt^2}+\omega^2x=0。 \tag{4-1-2a}$$

上式指出，物体的加速度 a 恆与位移 x 反向。所以上述振动的特征是加速度和位移成正比而反向，我們把这种振动称为諧振动。由上可知，物体在彈性力作用下發生的运动是諧振动。

根据微分方程理論，式（4-1-2a）的解是

$$x = A\cos(\omega t + \varphi)。\qquad (4\text{-}1\text{-}3)$$

式中 A 和 φ 是兩个恆量，它們的意义和数值將在后面討論。又因为 $\cos(\omega t+\varphi)=\sin\left(\omega t+\varphi+\frac{\pi}{2}\right)$，所以如令 $\varphi'=\varphi+\frac{\pi}{2}$，則式（4-1-3）可改写为

$$x = A\sin(\omega t + \varphi')。\qquad (4\text{-}1\text{-}3a)$$

式（4-1-3）或（4-1-3a）都是諧振动的运动方程（位移和时間的关系式）。因此，物体作諧振动时，位移是时間的正弦或余弦函数。所以我們也可以說，位移用时間的正弦或余弦函数来表示的振动称为諧振动。为确定起見，在本章中我們用余弦函数来表示諧振动。

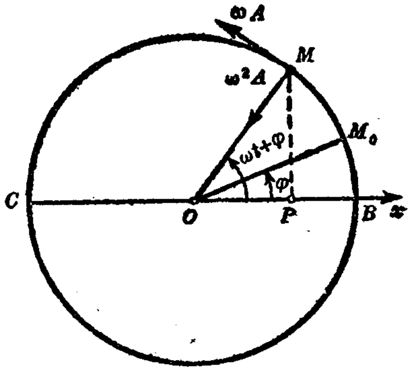

图4-1-2　質点諧振动的参考圓

下面我們再用几何的方法来研究諧振动中位移和时間的关系，并同时求出諧振动中速度、加速度和时間的关系。如图4-1-2所示，設有質点 M 以匀角速度 ω 在半徑为 A 的圓周上作反时針的运动，那么它在直徑 BC 上的投影 P 点就在 BC 上作来回的运动。設在 $t=0$ 时，M 点在 M_0 处，半徑 OM_0 和 OB 間的夾角是 φ。經过时間 t 后，M 点到达 M 处，半徑 OM 和 OB 間的夾角变为 $\omega t+\varphi$，这时投影 P 点离开圓心的位移是

$$x = A\cos(\omega t + \varphi)。$$

因为 M 点的角速度是 ω，半徑是 A，所以它的速度是 ωA，在切綫方向；而它的加速度是 $\omega^2 A$，指向圓心。P 点既是 M 点在 BC

上的投影，可知 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

$$v = -\omega A\sin(\omega t+\varphi); \qquad (4-1-4)$$

$$a = -\omega^2 A\cos(\omega t+\varphi)。 \qquad (4-1-5)$$

把位移方程式代入加速度方程式，得

$$a = -\omega^2 x。$$

这就是諧振动的定义。由此可知，当质点作匀速圓周运动时，它在直徑上的投影的运动是諧振动。上述方法同时告訴我們，当质点作諧振动时它的位移、速度和加速度都是时間 t 的余弦或正弦函数。

应該注意，諧振动是 M 点的投影 P 点在直徑 BC 上的运动，不是 M 点本身在圓周上的运动。M 点的运动在这里只有輔助的

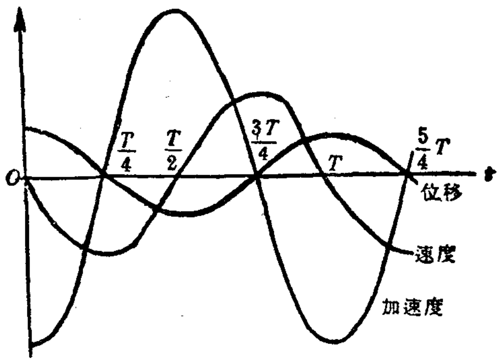

图4-1-3　諧振动的位移、速度和加速度与时間的关系

意义，所以我們称 M 点为輔助点，称它所走的圓为参考圓。

如以 t 为横坐标，位移、速度和加速度为縱坐标，就可画出三条曲綫，如图 4-1-3 所示（图中假定 $\varphi=0$）。从三条曲綫，可以清楚地看出諧振动中的位移、速度和加速度的周期性，就是

說，它們都在每隔一定的时間后，重复一次原来的数值。所以諧振动是一种周期运动。

从上面各点的分析，可將諧振动归納为以下两个特征：

1）物体凡是在彈性力或准彈性力（即力与位移成正比而反向）的作用下就产生諧振动。物体在作諧振动时，它的加速度与位移恆成正比而反向。

2）諧振动是一种周期性的运动，它的位移，速度，加速度都是时間的正弦或余弦函数。

§4-1-2　諧振动中的振幅、周期、頻率和周相

現在来說明諧振动方程 $x=A\cos(\omega t+\varphi)$ 中各量的意义。式中 A 称为振动的振幅。因余弦的絕对值不能大于一，故 x 的絕对值不能大于 A，可知振幅 A 是振动点离开平衡位置的最大位移。

式中 $(\omega t+\varphi)$ 称为振动的周相，这是个极其重要的物理量，由式（4-1-3）可知，当 A 为已知时，根据周相的大小，可以决定振动点在某一时刻 t 的位置。不仅如此，由于振动是質点所作的往复周期性运动，所以在一个完全振动的过程中（即来回一次），任何一个位置，質点都將两次經过它。但每次通过的方向不同。例如，在图4-1-2中，当 $(\omega t+\varphi)=\frac{\pi}{2}$ 时，P 点的位置是 O 点，运动方向向左；当 $\omega t+\varphi=\frac{3\pi}{2}$ 时，P 点的位置也是 O 点，而运动方向向右。由此可見，振动的周相不仅决定振动点在任一时刻 t 的位置，而且也决定这时質点运动速度的大小和方向。恆量 φ 是 $t=0$ 时的周相，称为振动的初周相，簡称初相，从图4-1-2上可知，φ 的数值决定于我們开始計算时間的

时刻。

对于輔助点 M 說，ω 是角速度，对于諧振动講，ω 称为圓頻率。輔助点 M 旋轉一周所需的时間是

$$T=\frac{2\pi}{\omega}, \tag{4-1-6}$$

这就是振动点 P 完成一个完全振动（来回一次）所需的时間，称为振动的周期。周期的倒数称为頻率，它代表單位时間內振动点所作完全振动的次数。頻率的單位是每秒振动一次，称为[赫芝]。例如，頻率为 200 [赫芝]就是在一秒鐘內振动 200 次。用 ν 代表頻率，則

$$\nu=\frac{1}{T}=\frac{\omega}{2\pi} \tag{4-1-7}$$

或

$$\omega=2\pi\nu。 \tag{4-1-7a}$$

因此，圓頻率表示振动点在 2π 秒时間內所作的振动次数。諧振动方程也常用周期或頻率表述：

$$x=A\cos\left(\frac{2\pi}{T}t+\varphi\right),$$

或

$$x=A\cos(2\pi\nu t+\varphi)。$$

由上所述，可知諧振动的周期（或頻率）、初相和振幅三个量完全确定一个諧振动。現在說明在具体問題中何种因素决定这三个量。

彈簧振子的圓頻率是 $\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}$，所以周期和頻率分別是

$$T=\frac{2\pi}{\omega}=2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},\quad \nu=\frac{1}{T}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

因为质量 m 和倔强系数 k 代表彈簧振子本身的性質，所以上述兩

式說明，当振动系統作諧振动时，它的周期或頻率完全由系統本身性质所决定。我們常称之为固有周期或固有頻率。在其它諧振动例子中也可得到同样結論。但因振动系統的性質各不相同，所以周期与頻率的具体公式也有所不同。

对于一定的振动系統（ω 为已知），还可以有振幅不同和初相不同的振动。但是不論一个振动的振幅和初相的数值为何，它的位移和时間及速度和时間的关系总是

$$x = A\cos(\omega t+\varphi), \quad v = -\omega A\sin(\omega t+\varphi)。$$

所以，如果已知某一时刻的 x 值和 v 值，那么振幅 A 和初相 φ 就可从上述兩方程式求出。設在 $t=0$ 时，初位移是 x_0，初速度是 v_0，則 $x_0 = A\cos\varphi$，$\frac{-v_0}{\omega} = A\sin\varphi$。把这兩式平方相加，再在等式兩边开方，得

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}},$$

再把兩式相除，得

$$\operatorname{tg}\varphi = -\frac{v_0}{\omega x_0}。$$

初位移和初速度称为起始条件或位速条件。上述結果說明，对于一定的振动系統，諧振动的振幅和初相由起始条件或位速条件所决定。

§4-1-3　諧振动的能量

現在用图 4-1-1 的彈簧振子来說明諧振动的能量。設物体的質量为 m，在某一时刻的速度为 v，則物体的动能是 $\frac{mv^2}{2}$。再設在这时刻，物体的位移即彈簧的伸长为 x，彈簧的倔强系数是 k，則彈簧还具有位能。如果把彈簧在原长时(即伸长 x 为零时)

的位能算作零，那么，在彈簧伸長为 x 时彈性位能的数值等于从伸長为 x 变到伸長为零时彈性力所作的功。因为彈性力是变力，正比于伸長，所以伸長为零时，彈性力为零，伸長为 x 时，彈性力为 kx，因而伸長从 x 变到零时，彈性力的平均数值是 $\frac{1}{2}kx$，于是所作的功为 $\frac{1}{2}kx\cdot x=\frac{1}{2}kx^2$。这就是伸長为 x 时彈簧所具有的彈性位能。因此彈簧振子振动时的总能量是

$$W=\frac{1}{2}mv^2+\frac{1}{2}kx^2。$$

这振动过程中，v 和 x 都随时間而变，所以动能和位能也都随时間而变。把 v 和 x 的方程代入上式，得

$$W=\frac{1}{2}m\omega^2A^2\sin^2(\omega t+\varphi)+\frac{1}{2}kA^2\cos^2(\omega t+\varphi)。\tag{4-1-8}$$

因 $\omega^2=\frac{k}{m}$ 或 $k=m\omega^2$，所以代入上式，得

$$W=\frac{1}{2}m\omega^2A^2\{\sin^2(\omega t+\varphi)+\cos^2(\omega t+\varphi)\}$$

$$=\frac{1}{2}m\omega^2A^2=\frac{1}{2}kA^2。\tag{4-1-9}$$

当一定的彈簧振子作一定的諧振动时，m、k 和 A 都是恆量，因此上式說明尽管动能和位能都随时間变化，但諧振动的总能量在振动过程中是一个恆量。这結論和机械能守恆定律符合。

上式又說明，对于一定的振动系統，振动的总能量同振幅的平方成正比。这一結論在其它形式的諧振动中也是正确的。

应該指出：不仅在机械运动中有諧振动，在其它形式的物質

运动中，也有諧振动。例如在无綫电学、波动光学中、电流、电位差、电动势或电場强度等等的变化，也常常是时間的正弦或余弦函数，这些运动的規律和机械的諧振动相同，所以这里虽然只討論了机械的諧振动，但是它的理論可以广泛地应用。

[例題] 一輕彈簧受了3[千克力]的作用时，伸长为9[厘米]。在彈簧下端悬一質量为$m=2.5$[千克]的物体，将物体从平衡位置拉下6[厘米]，然后放开任其自由振动，求振动方程。

[分析] 求振动方程时，要先求出振幅、頻率（或周期）、初相三量。

分析題中所給条件、振幅和初相可以直接得到，根据彈簧受力时的伸长可以求出彈簧的倔强系数，然后根据物体的質量可以求出振动的頻率。

[解] 彈簧的倔强系数是

$$k=\frac{3\,[\text{千克力}]}{9\,[\text{厘米}]}=\frac{1}{3}[\text{千克力}]\,[\text{厘米}]^{-1}$$

化为厘米克秒制单位，得

$$K=3.27\times10^{5}[\text{达因}]\,[\text{厘米}]^{-1}$$

按式（4-1-1）得振动圓頻率为

$$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}}=\sqrt{\frac{3.27\times10^{5}}{2.5\times10^{3}}}=11.4[\text{秒}]^{-1}$$

取向下的方向作为位移的正向，并取重物的平衡位置作为原点，則从題意，初位移为$x_0=6$[厘米]，而初速度为$v_0=0$。所以振动的振幅和初相分別为

$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}}=x_0=6\,[\text{厘米}]$$

$$\varphi=\tan^{-1}\left(-\frac{v_0}{\omega x_0}\right)=0$$

因此得振动方程是

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