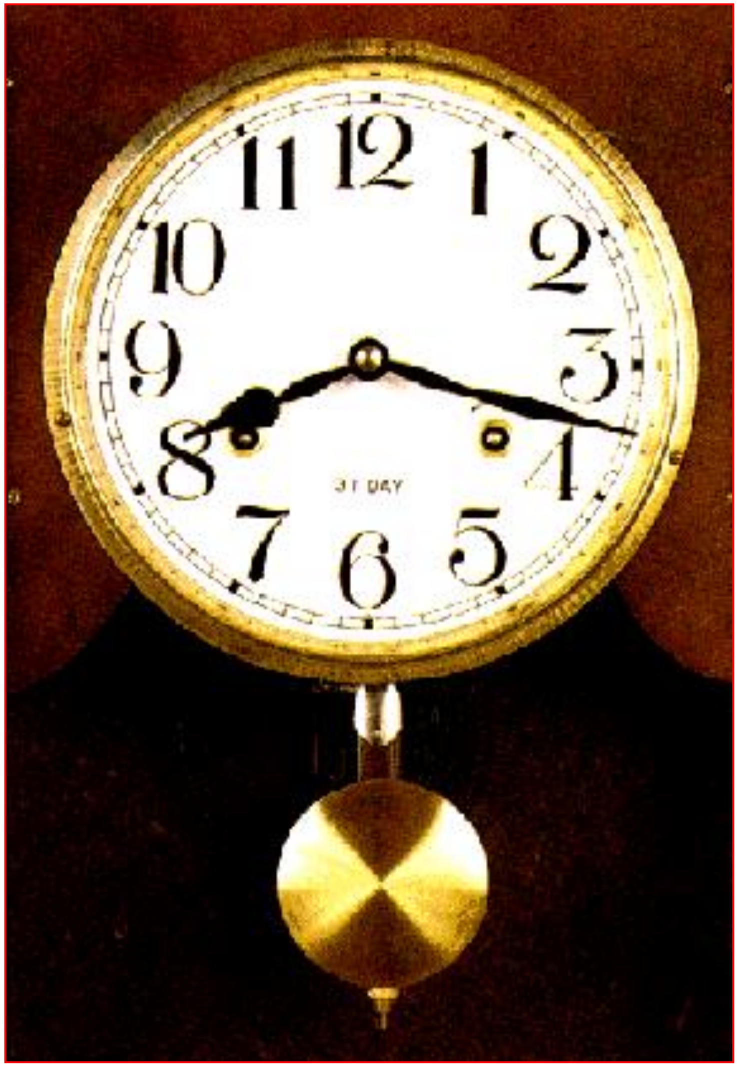
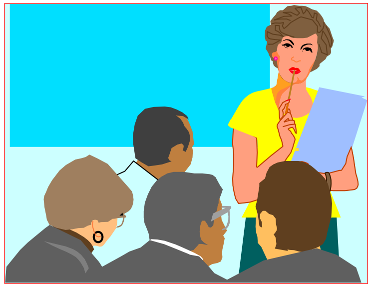


同学们好

星期一 2:57 PM 02

第四篇　振动和波动



振动

- 振动是自然界最常见的运动形式之一；
- 周期性振动（狭义）、非周期性振动（广义）与简谐振动的关系；
- 振动包括机械振动与非机械振动。虽然各自遵循不同的运动规律，但它们具有共同的物理特征。

波动

- 波是振动在空间的传播；
- 波的世界；
- 各类波特性各自不同，但也具有共同的物理特征；
- 光波或电磁波。

星期一 2:57 PM 02

振　动

教学基本要求

一　掌握描述简谐运动的各个物理量（特别是相位）的物理意义及各量间的关系。

二　掌握描述简谐运动的旋转矢量法和图线表示法，并会用于简谐运动规律的讨论和分析。

三　掌握简谐运动的基本特征，能建立一维简谐运动的微分方程，能根据给定的初始条件写出一维简谐运动的运动方程，并理解其物理意义。

四　理解同方向、同频率简谐运动的合成规律。

简谐振动

一、振动的一般概念

机械振动 物体（或物体的一部分）围绕一固定位置作往复运动。

例如：发声、机器振动、船摇摆、心脏、耳膜、鼓膜、原子的振动等。

广义振动 描述物体状态的某个物理量在某一值附近往复变化，称该物理量在作振动。

例如：电量、电流、电磁场、温度、脉冲星的密度、体积等。各种振动的物理本质往往不同，但数学表述都是相同的。

周期和非周期振动

周期性振动是每隔一固定的时间T，运动状态就完全重复一次。

二、简谐振动

最简单、最基本的周期性振动。物体运动时，离开平衡位置的位移(或角位移)按余弦(或正弦)规律随时间变化。

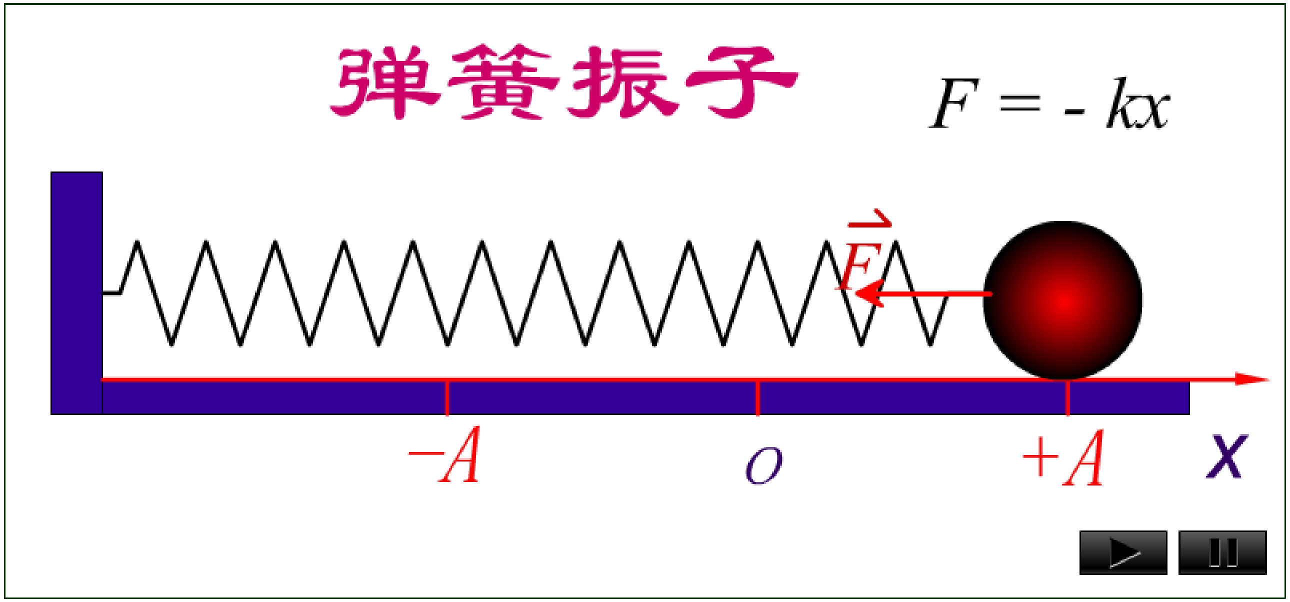
合成

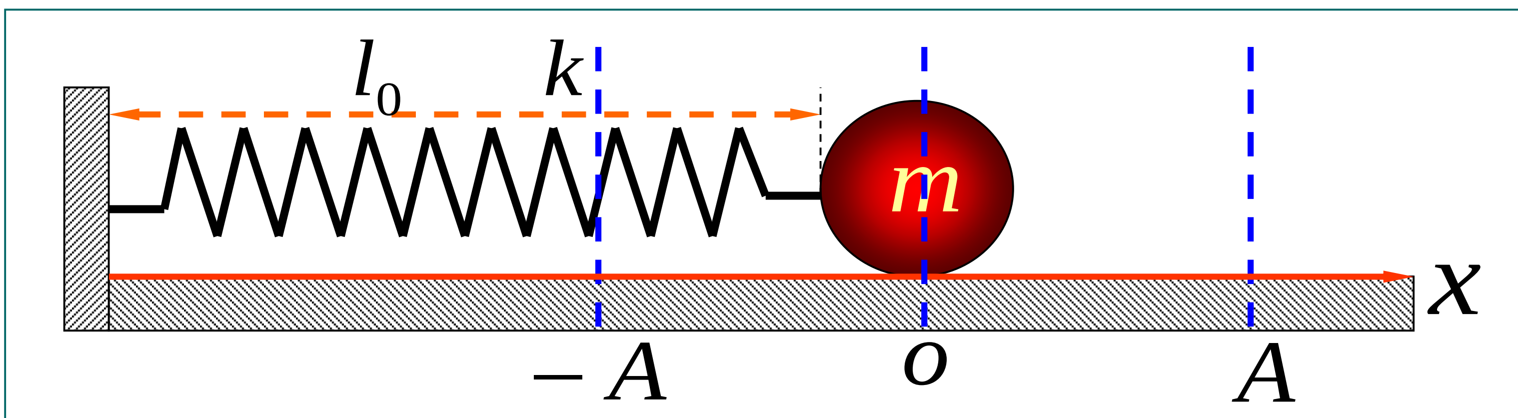
简谐运动 ⟷ 复杂振动

分解

谐振子模型 弹簧振子是作简谐运动的物体，是一种重要的物理模型。

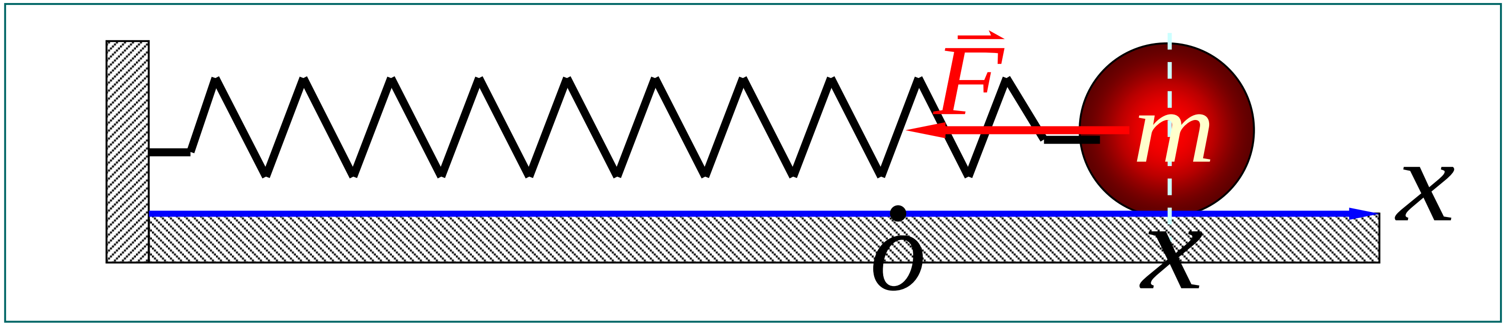
弹簧振子的振动





$$x = 0 \quad F = 0$$

（一）谐振动的特征及其表达式



$$F = -kx = ma \qquad x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$$

令 $\omega^2 = \dfrac{k}{m}$

积分常数，根据初始条件确定

$$a = -\omega^2 x \qquad v = \frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t} = -A\omega\sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$\frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} = -\omega^2 x \qquad a = \frac{\mathrm{d}^2 x}{\mathrm{d}t^2} = -A\omega^2\cos(\omega t + \varphi_0)$$

判断物体是否作简谐振动

判据1：物体所受回复力与位移成正比且反向时（弹性力或准弹性力），物体作简谐振动。

$$F=-kx$$ → 简谐振动的动力学特征

判据2：若某物理量对时间的二阶导数与其自身成正比且反号时，该物理量的变化称为简谐振动。

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\omega^2x=0$$ → 简谐振动的微分方程

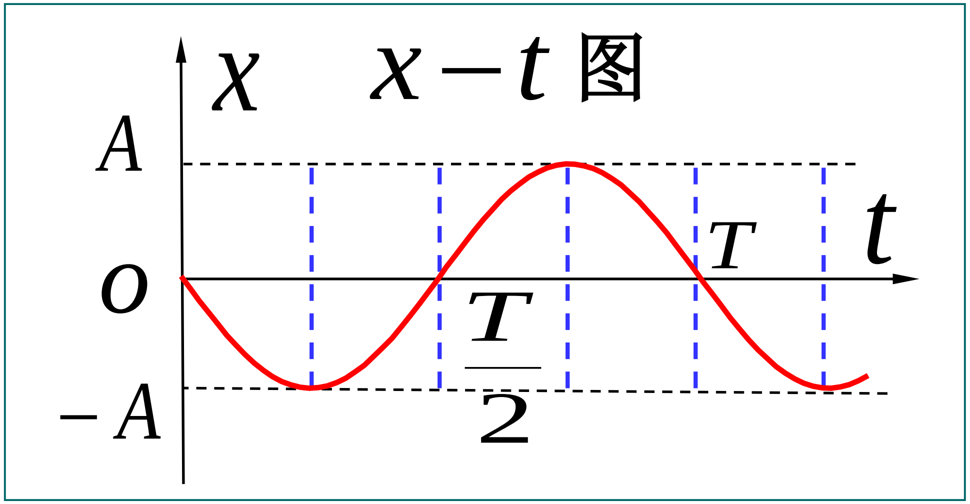
判据3： 任何一个物理量如果是时间的余弦（或正弦）函数，该物理量的变化称为简谐振动。

$$\boxed{x = A\cos(\omega t + \varphi_0)} \longrightarrow \boxed{\text{简谐振动的运动方程}}$$

A, φ_0 为积分常数

（二）描述简谐振动的特征量

$$\boxed{x = A\cos(\omega t + \varphi_0)}$$



（1）振幅　　$\because \left|\cos\left(\omega t + \Phi_0\right)\right| \le 1$

$$\boxed{\therefore A = \left|x_{\max}\right|}$$

（2）周期和频率

$$\boxed{x = A\cos(\omega t + \varphi_0)}$$

$$\because x = A\cos\left(\omega t + \varphi_0\right) = A\cos\left(\omega t + \varphi_0 + 2\pi\right)$$

$$= A\cos\left[\omega\left(t + \frac{2\pi}{\omega}\right) + \varphi_0\right] = A\cos[\omega(t+T) + \varphi_0]$$

周期 $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$

频率 $\nu = \dfrac{1}{T} = \dfrac{\omega}{2\pi}$

圆频率 $\omega = 2\pi\,\nu = \dfrac{2\pi}{T}$

例：弹簧振子周期

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

周期和频率由振动系统本身决定，故称作**固有周期**和**固有频率**。

（3）相位（位相、周相）$\boxed{x = A\cos(\omega t + \varphi_0)}$

相位 $\omega t + \varphi_0$ 决定简谐运动状态的物理量

1） $\omega t + \varphi_0 \rightarrow (x, v, a)$ 存在一一对应的关系；

2）相位在 $0 \sim 2\pi$ 内变化，质点无相同的运动状态，

相差 $2n\pi$ (n为整数)质点运动状态全同（周期性）；

3）初相位 φ_0 $(t=0)$描述质点初始时刻的运动状态。

（φ_0 取 $[-\pi \rightarrow \pi]$ 或 $[0 \rightarrow 2\pi]$）

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$$

$T = \dfrac{2\pi}{\omega}$ 取 $\varphi_0 = 0$

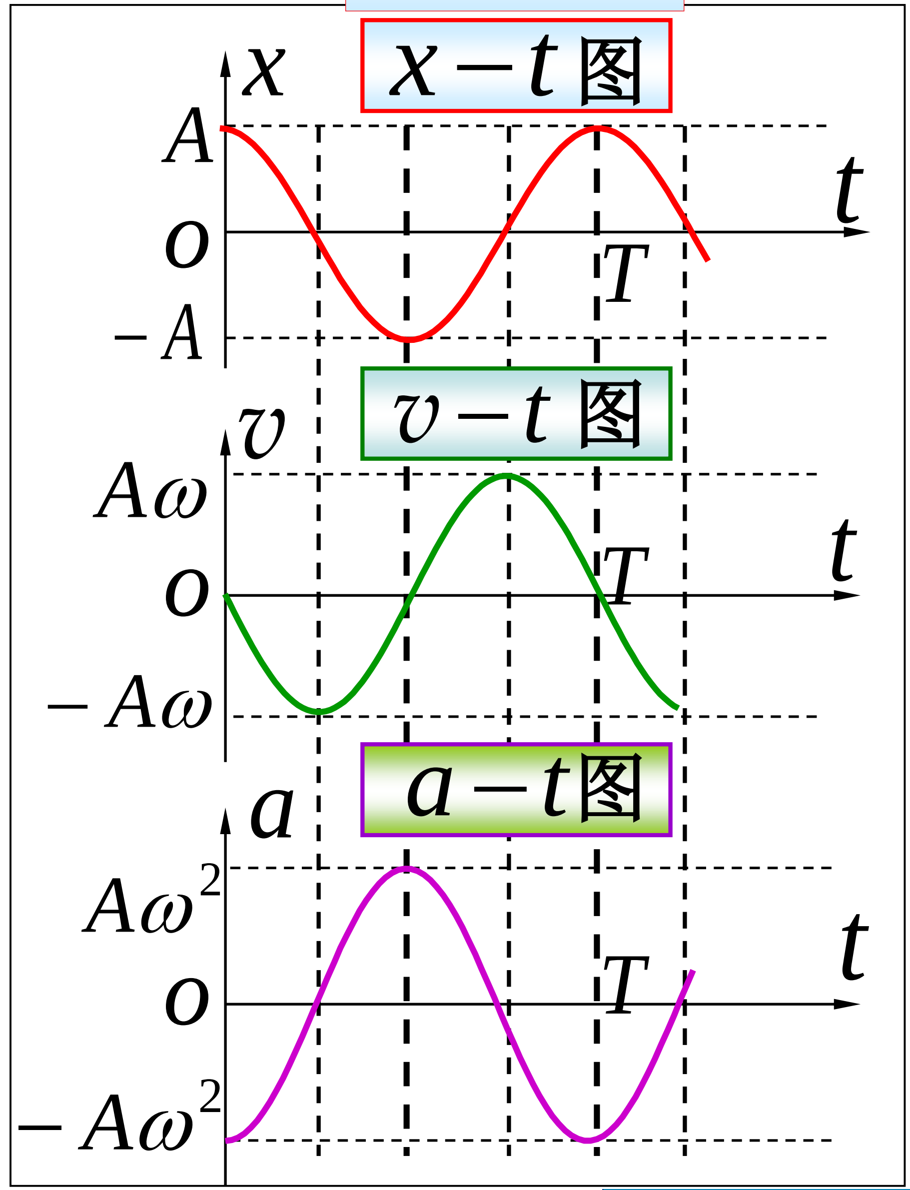
$$v = -A\omega\sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$= A\omega\cos(\omega t + \varphi_0 + \frac{\pi}{2})$$

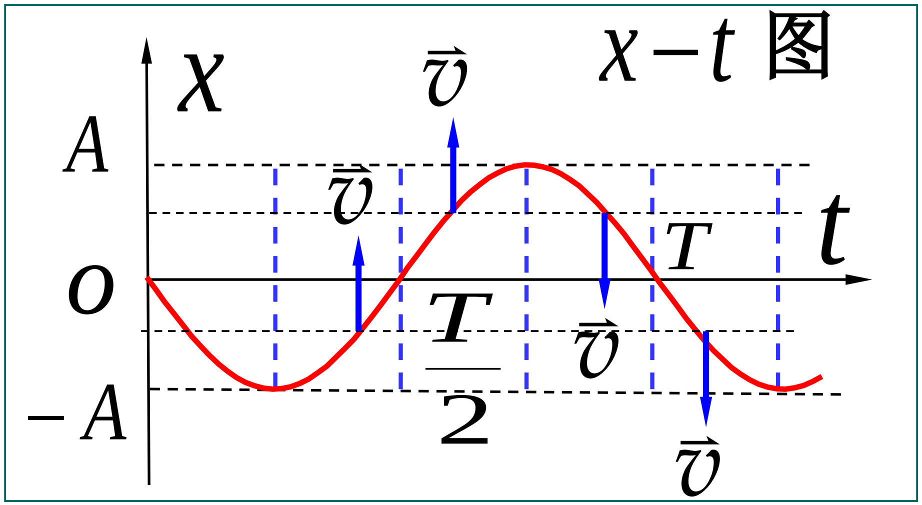
$$a = -A\omega^2\cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$= A\omega^2\cos(\omega t + \varphi_0 + \pi)$$

振动曲线



简谐运动中，x和v间不存在一一对应的关系.



$$\begin{cases} x = A\cos(\boxed{\omega t + \varphi_0}) \\ v = -A\omega\sin(\boxed{\omega t + \varphi_0}) \end{cases}$$

（4）常数 A 和 φ_0 的确定

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$\begin{cases} x = A\cos(\omega t + \varphi_0) \\ v = -A\omega\sin(\omega t + \varphi_0) \end{cases}$$

初始条件 $t = 0 \quad x = x_0 \quad v = v_0$

$$\begin{cases} x_0 = A\cos\varphi_0 \\ v_0 = -\omega A\sin\varphi_0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = \sqrt{x_0^2 + \dfrac{v_0^2}{\omega^2}} \\ \tan\varphi_0 = \dfrac{-v_0}{\omega x_0} \end{cases}$$

对给定振动系统，**周期**由系统本身性质决定，**振幅和初相**由初始条件决定。振幅、周期和初相称为振动**三要素**。

[例1]　已知：$t=0 \quad x=0 \quad v<0$，求 φ_0

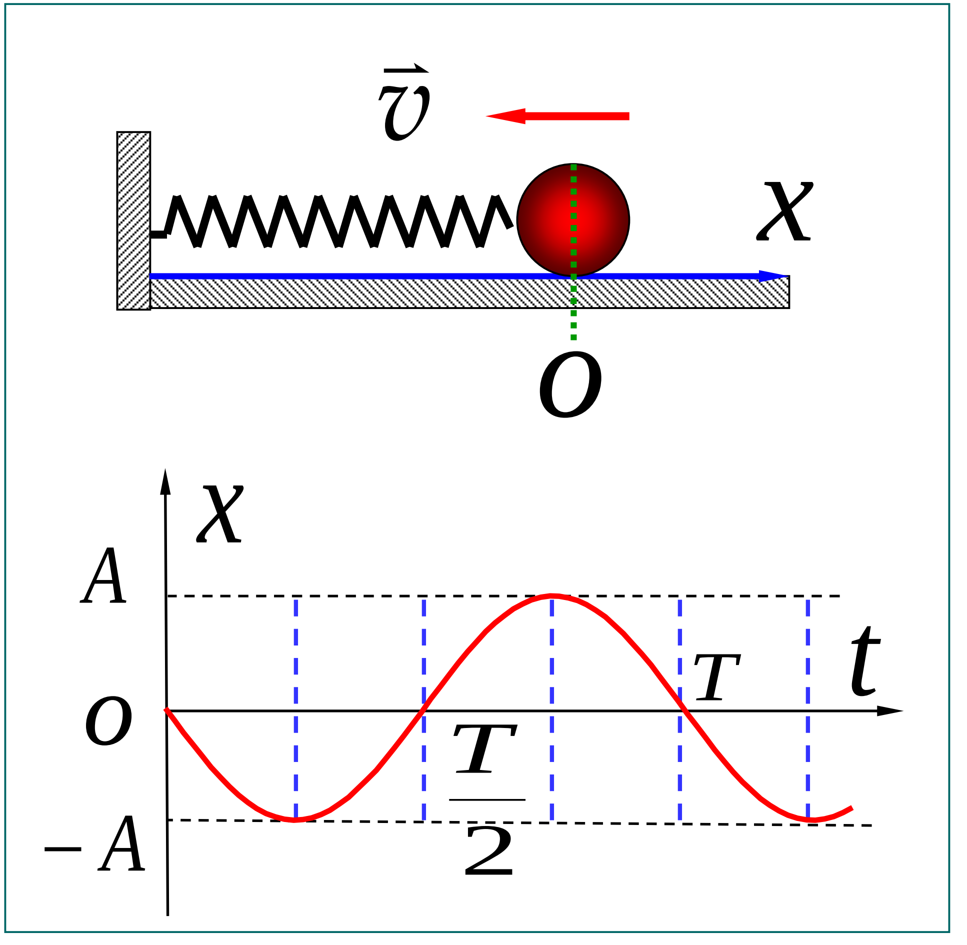
$$0 = A\cos\varphi$$

$$\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$$

$$\because v_0 = -A\omega\sin\varphi_0 < 0$$

$$\therefore \sin\varphi_0 > 0 \text{取} \varphi_0 = \frac{\pi}{2}$$

$$x = A\cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

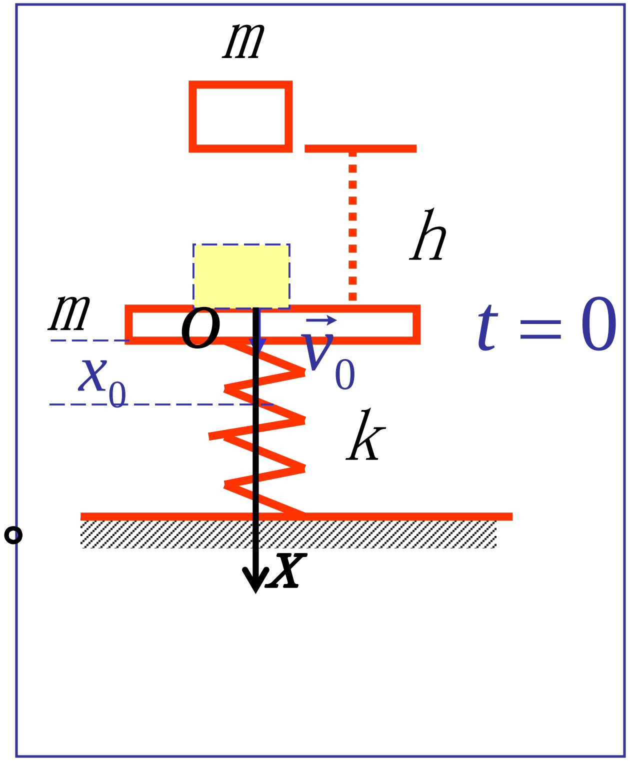


［例 2］ 已知： k、m、h完全非弹性碰撞

求： T, A, φ_0

解：振动系统为（2 m, k）

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



以平衡位置为坐标原点，向下为正。

确定初始条件：以物块和平板共同运动时刻为 $t = 0$

$$有 \begin{cases} x_0 = -\dfrac{mg}{k} < 0 \\ m\sqrt{2gh} = 2mv_0 \end{cases} \Rightarrow v_0 = \sqrt{\frac{gh}{2}} > 0$$

星期一 2:57 PM 02

得

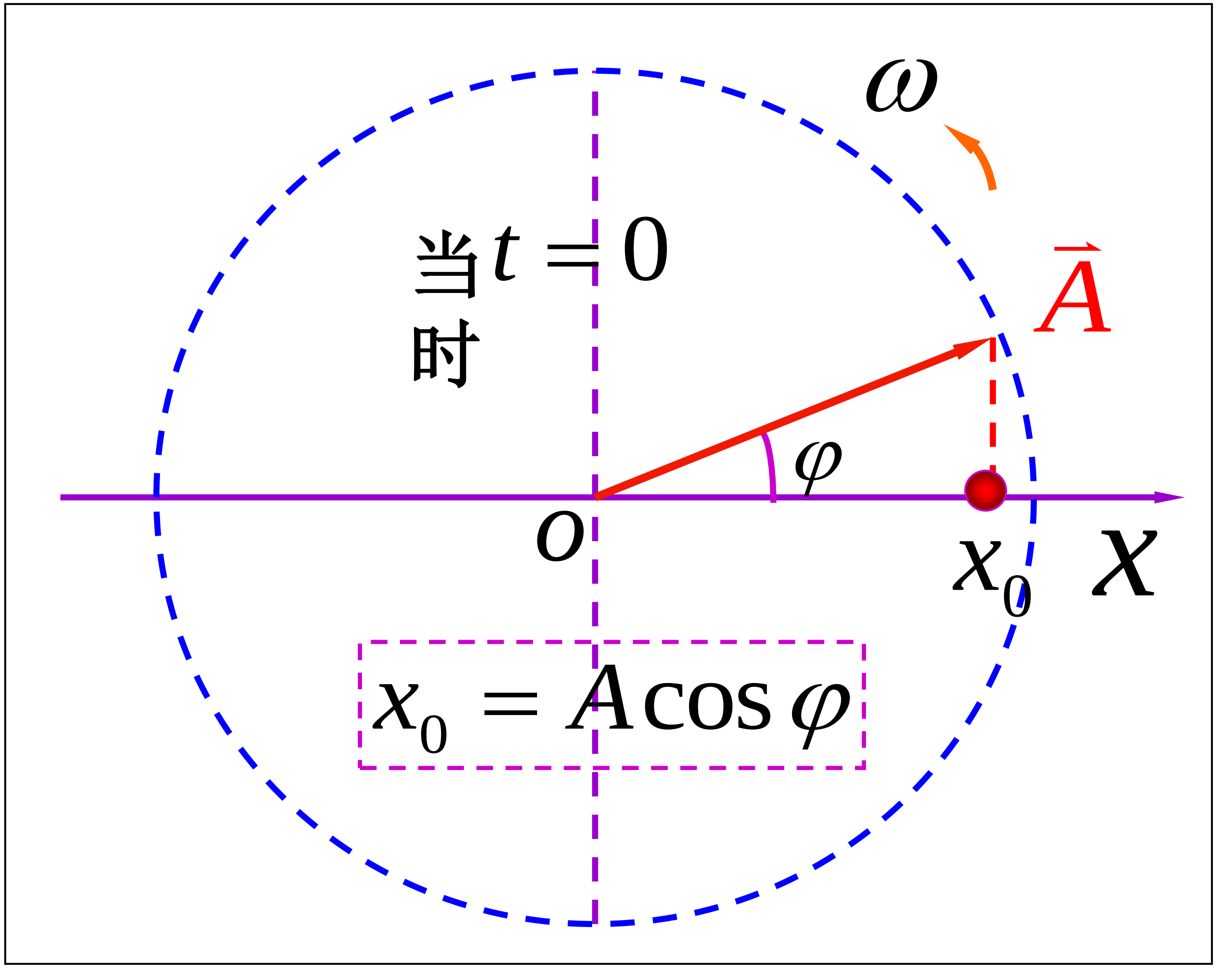
$$A=\sqrt{x_0^2+\frac{v_0^2}{\omega^2}}=\sqrt{\frac{m^2g^2}{k^2}+\frac{mgh}{k}}=\frac{mg}{k}\sqrt{1+\frac{kh}{mg}}$$

又 $\begin{cases}\cos\varphi_0=\dfrac{x_0}{A}<0\\ v_0=-A\omega\sin\varphi_0>0\end{cases}\Rightarrow$ $\sin\varphi_0<0$

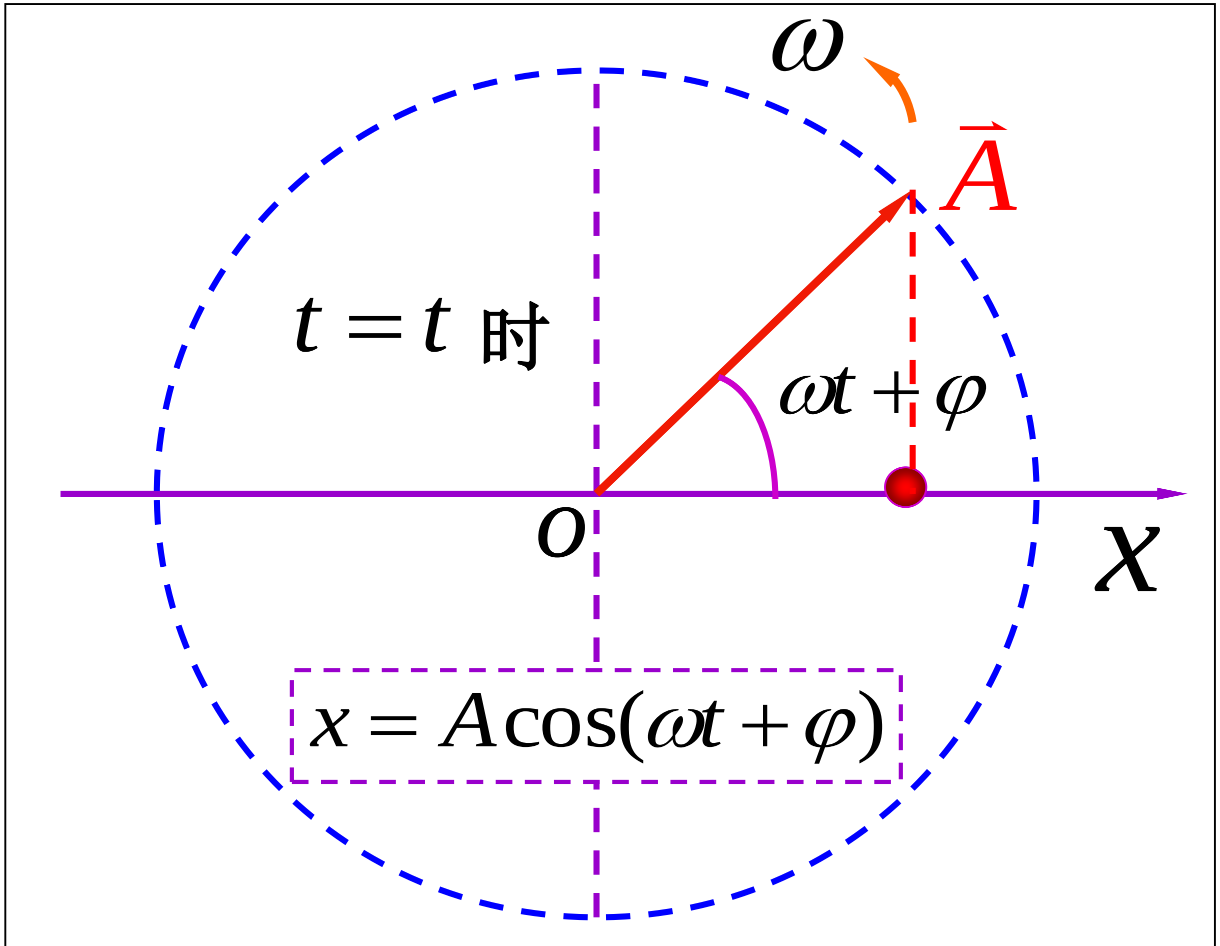
φ_0 为三象限角

$$\varphi_0=\mathrm{arctg}(-\frac{v_0}{\omega x_0})+\pi=\mathrm{arctg}\sqrt{\frac{kh}{mg}}+\pi$$

（5）简谐振动的旋转矢量图示法

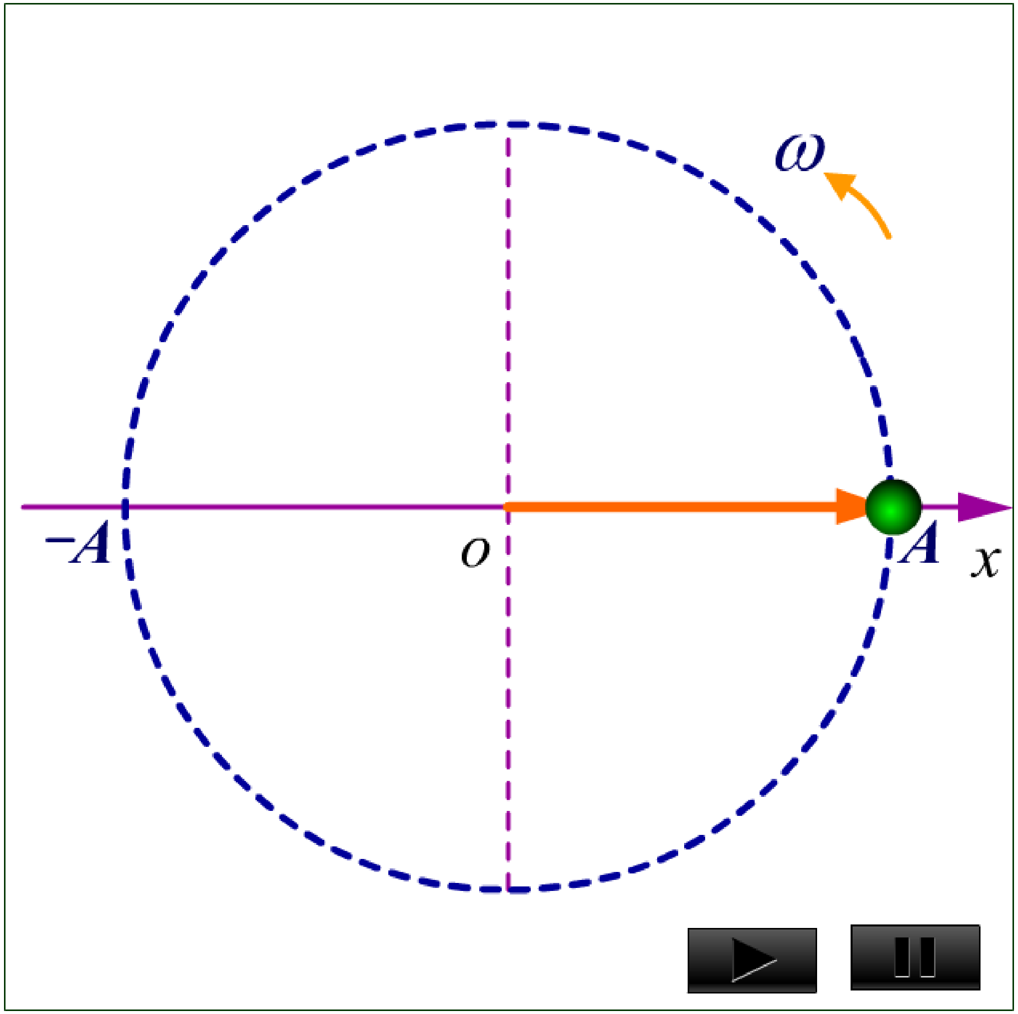


以 o 为原点旋转矢量 $\vec{A}$ 的端点在 X 轴上的投影点的运动为简谐运动.

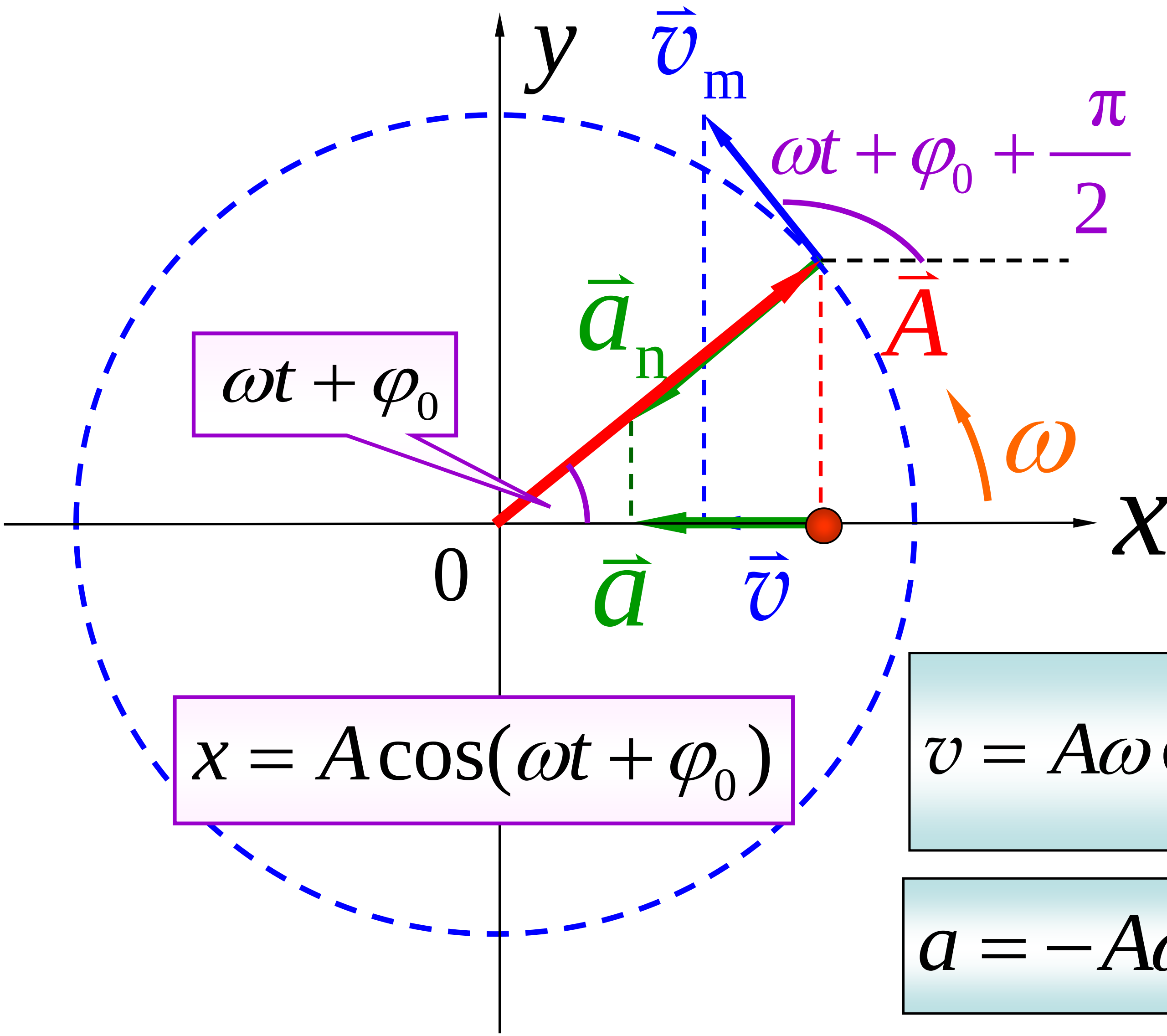


以 o 为原点旋转矢量 $\vec{A}$ 的端点在 X 轴上的投影点的运动为简谐运动.

$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$$



旋转矢量 $\vec{A}$ 的端点在 X 轴上的投影点的运动为简谐运动.



$$x = A\cos(\omega t+\varphi_0)$$

$$v_{\mathrm{m}} = A\omega$$

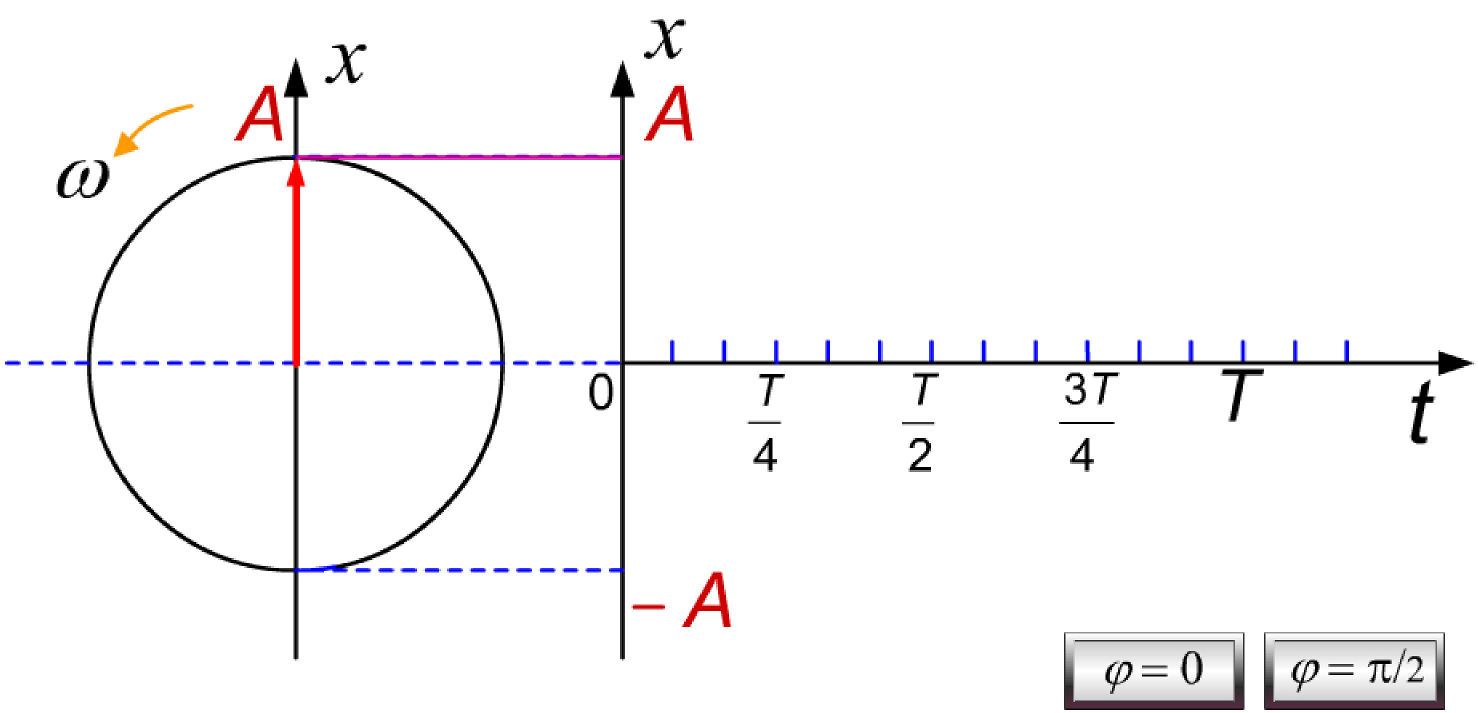
$$a_{\mathrm{n}} = A\omega^2$$

$$v = A\omega\cos(\omega t+\varphi_0+\frac{\pi}{2})$$

$$a = -A\omega^2\cos(\omega t+\varphi_0)$$

用旋转矢量图画简谐运动的 $x-t$ 图

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



$T = 2\pi/\omega$（旋转矢量旋转一周所需的时间）

旋转矢量法优点：

- 直观地表达谐振动的各特征量
- 便于解题，特别是确定初相位
- 便于分析振动合成

讨论

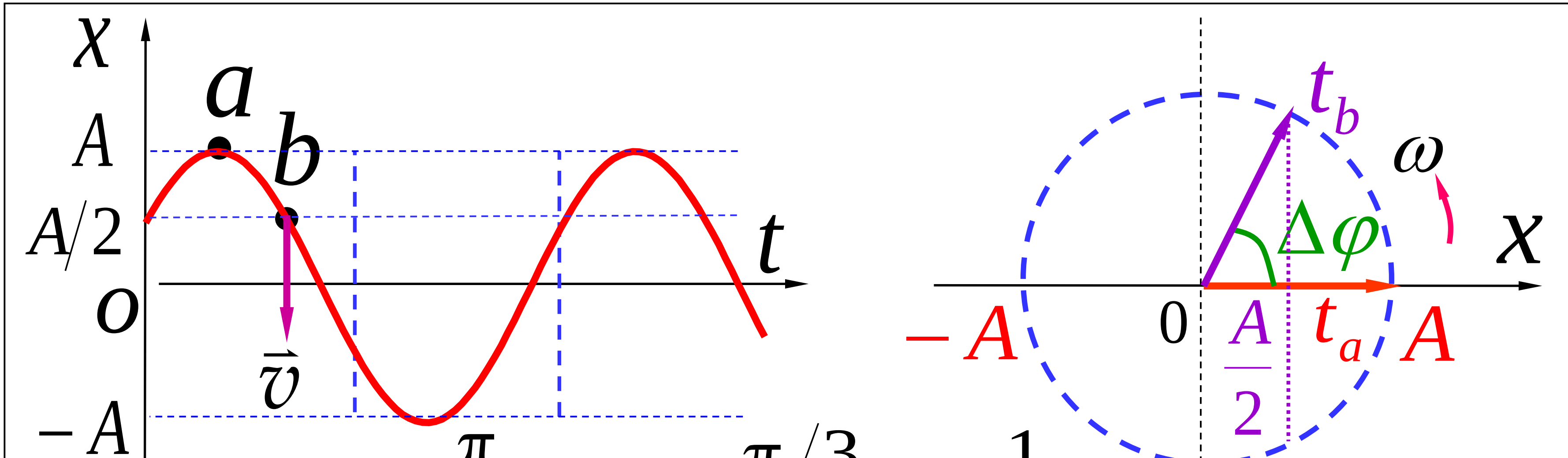
➢ 相位差：表示两个相位之差 .

1）对同一简谐运动，相位差可以给出两运动状态间变化所需的时间. $\Delta\varphi=(\omega t_2+\varphi_0)-(\omega t_1+\varphi_0)$

$$x=A\cos(\omega t_1+\varphi_0)$$

$$x=A\cos(\omega t_2+\varphi_0)$$

$$\Delta t=t_2-t_1=\frac{\Delta\varphi}{\omega}$$



$$\Delta\varphi=\frac{\pi}{3}\qquad \Delta t=\frac{\pi/3}{2\pi}T=\frac{1}{6}T$$

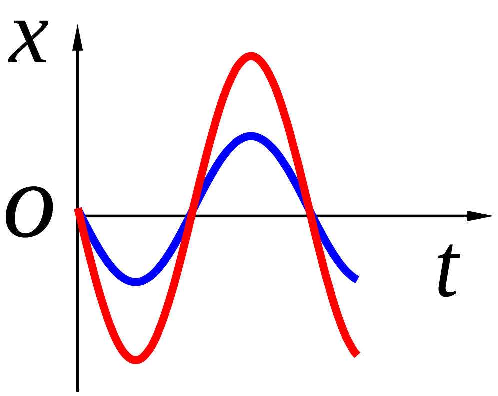
星期一 2:57 PM 02

2）对于两个同频率的简谐运动，相位差表示它们间步调上的差异.（解决振动合成问题）

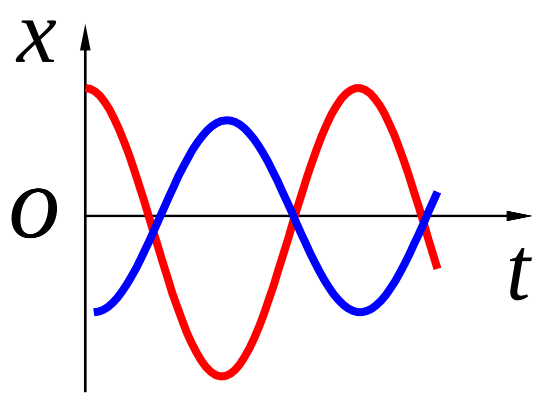
$$x_1 = A_1\cos(\omega t + \varphi_1) \qquad x_2 = A_2\cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$\Delta\varphi = (\omega t + \varphi_2) - (\omega t + \varphi_1) \qquad \boxed{\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1}$$

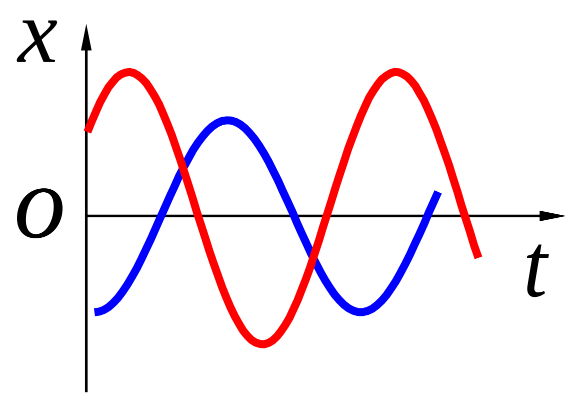
$\Delta\varphi = 0$ 同步



$\Delta\varphi = \pm\pi$ 反相



$\Delta\varphi$为其它 $\begin{cases} \text{超前} \\ \text{落后} \end{cases}$

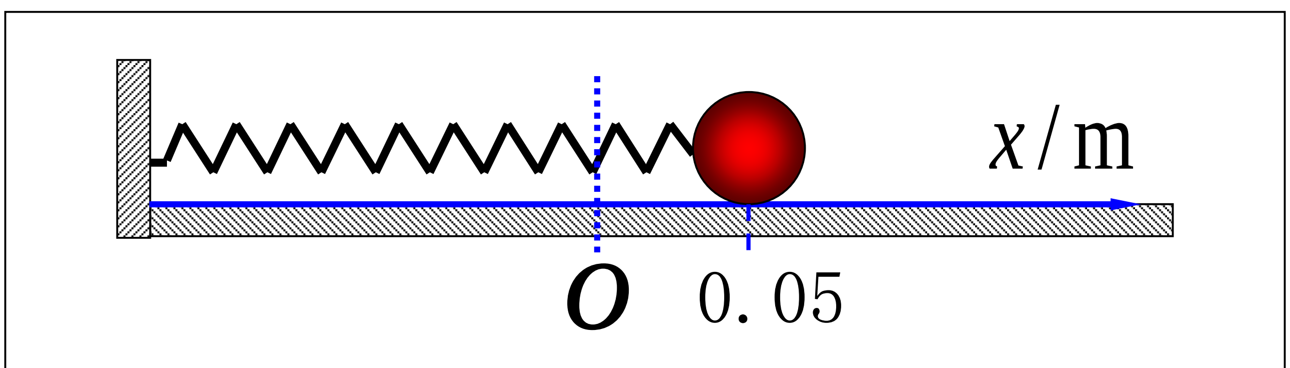


例 3　如图所示，一轻弹簧的右端连着一物体，弹簧的劲度系数 $k = 0.72\,\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1}$，物体的质量 $m = 20\mathrm{g}$.

（1）把物体从平衡位置向右拉到 $x = 0.05\mathrm{m}$ 处停下后再释放，求简谐运动方程；

（2）求物体从初位置运动到第一次经过 $\frac{A}{2}$ 处时的速度；

（3）如果物体在 $x = 0.05\mathrm{m}$ 处时速度不等于零，而是具有向右的初速度 $v_0 = 0.30\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$，求其运动方程.

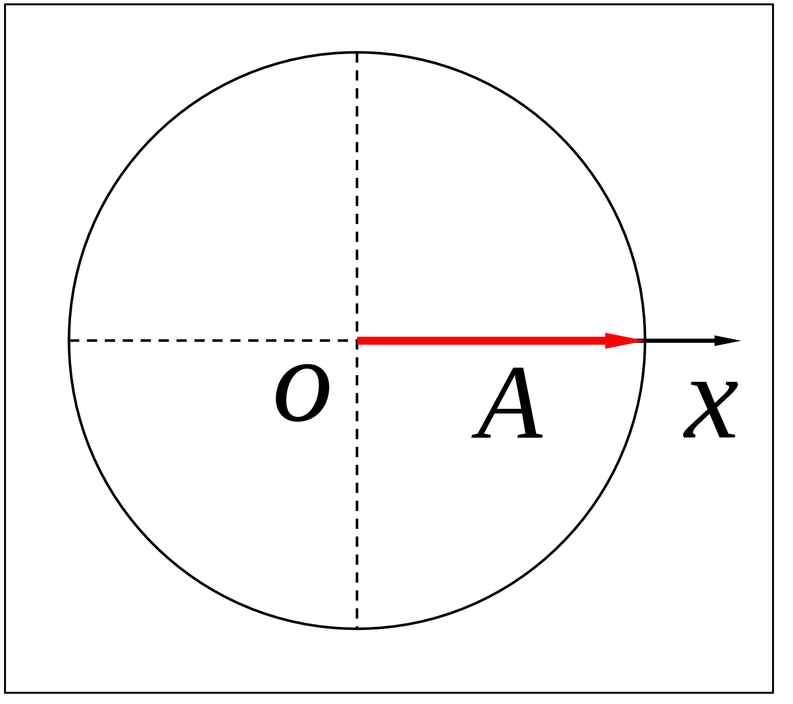


解：（1）$\omega = \sqrt{\dfrac{k}{m}} = \sqrt{\dfrac{0.72\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1}}{0.02\mathrm{kg}}} = 6.0\mathrm{s}^{-1}$

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}} = x_0 = 0.05\mathrm{m}$$

$$\tan\varphi = \frac{-v_0}{\omega x_0} = 0$$

$$\varphi_0 = 0 \text{ 或 } \pi$$



由旋转矢量图可知$\varphi_0 = 0$

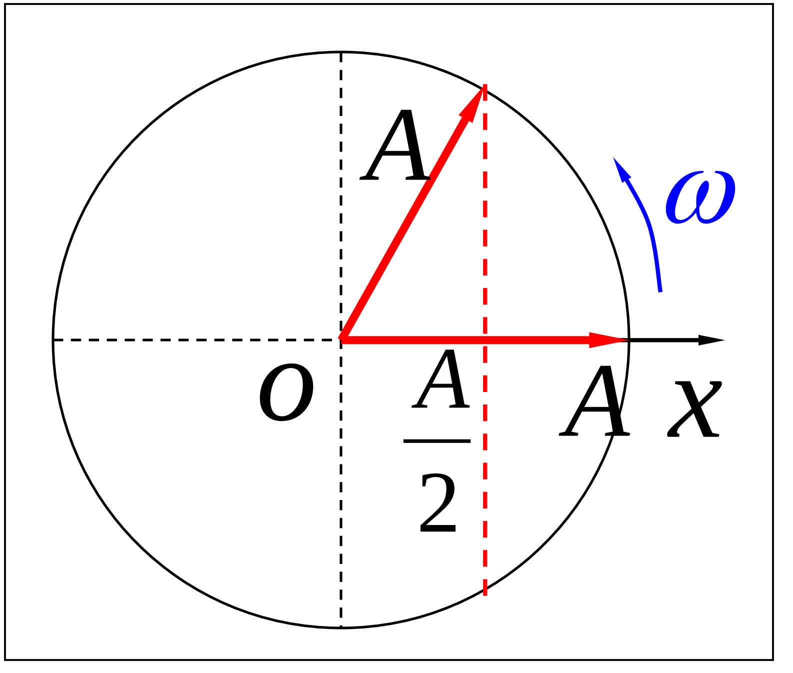
$$x = A\cos(\omega t + \varphi_0) = (0.05\mathrm{m})\cos[(6.0\mathrm{s}^{-1})t]$$

（2）求物体从初位置运动到第一次经过 $\frac{A}{2}$ 处时的速度；

解 $x = A\cos(\omega t + \varphi_0) = A\cos(\omega t)$

$$\cos(\omega t) = \frac{x}{A} = \frac{1}{2}$$

$$\omega t = \frac{\pi}{3} \text{ 或 } \frac{5\pi}{3}$$



由旋转矢量图可知 $\omega t = \frac{\pi}{3}$

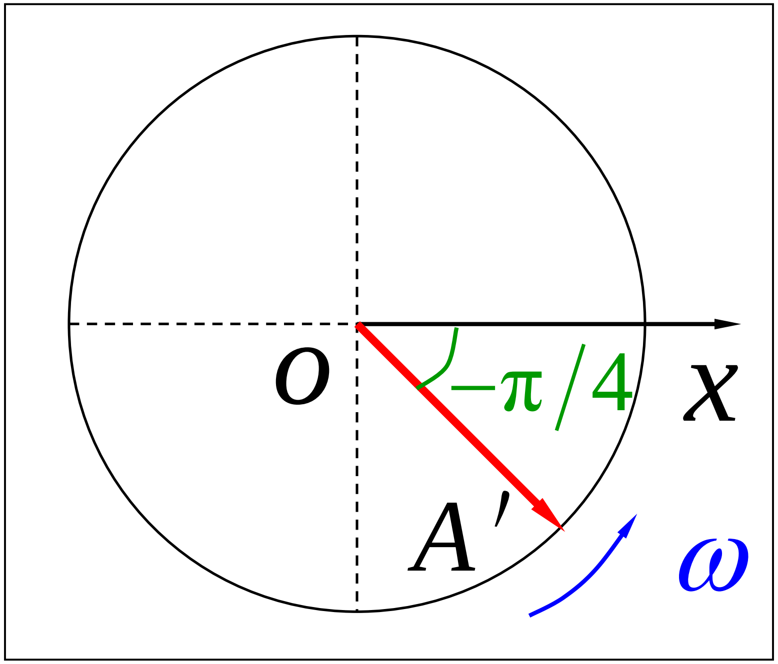
$$v = -A\omega \sin \omega t$$

$= -0.26\mathrm{m \cdot s^{-1}}$（负号表示速度沿 Ox 轴负方向）

星期一 2:57 PM 02

（3）如果物体在 $x=0.05\mathrm{m}$ 处时速度不等于零，而是具有向右的初速度 $v_0=0.30\mathrm{m\cdot s^{-1}}$，求其运动方程.

解 $A'=\sqrt{x_0^2+\dfrac{v_0^2}{\omega^2}}=0.0707\mathrm{m}$



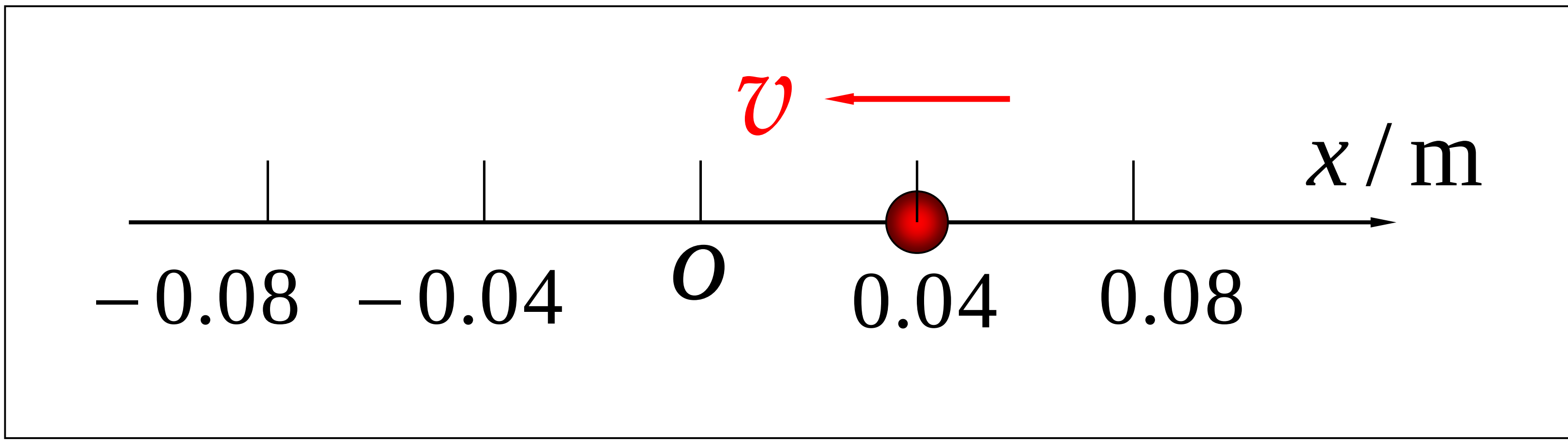
$$\tan\varphi'=\frac{-v_0}{\omega x_0}=-1$$

$$\varphi'=-\frac{\pi}{4} \text{ 或 } \frac{3\pi}{4}$$

因为 $v_0>0$ ，由旋转矢量图可知 $\varphi'=-\pi/4$

$$x=A'\cos(\omega t+\varphi')=(0.0707\mathrm{m})\cos[(6.0\mathrm{s}^{-1})t-\frac{\pi}{4}]$$

例 4 一质量为 $0.01\mathrm{kg}$ 的物体作简谐运动，其振幅为 $0.08\mathrm{m}$ ，周期为 $4\mathrm{s}$ ，起始时刻物体在 $x=0.04\mathrm{m}$ 处，向 Ox 轴负方向运动（如图）。**试求：**



（1） $t=1.0\mathrm{s}$ 时，物体所处的位置和所受的力；

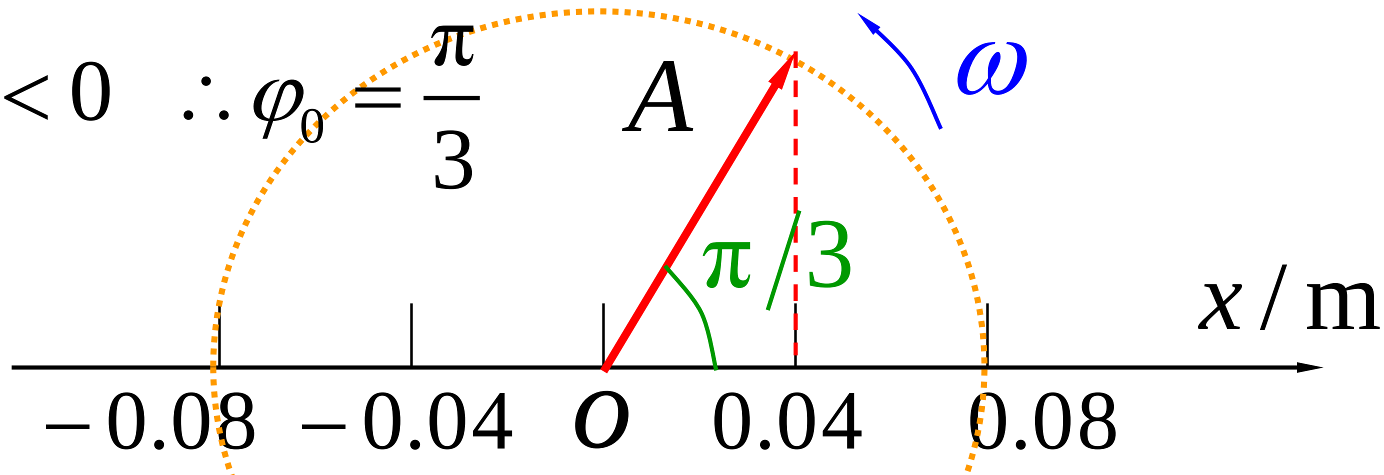
（2） 由起始位置运动到 $x=-0.04\mathrm{m}$ 处所需要的最短时间.

解： $A = 0.08\text{m}$ $\qquad \omega = \dfrac{2\pi}{T} = \dfrac{\pi}{2}\text{s}^{-1}$

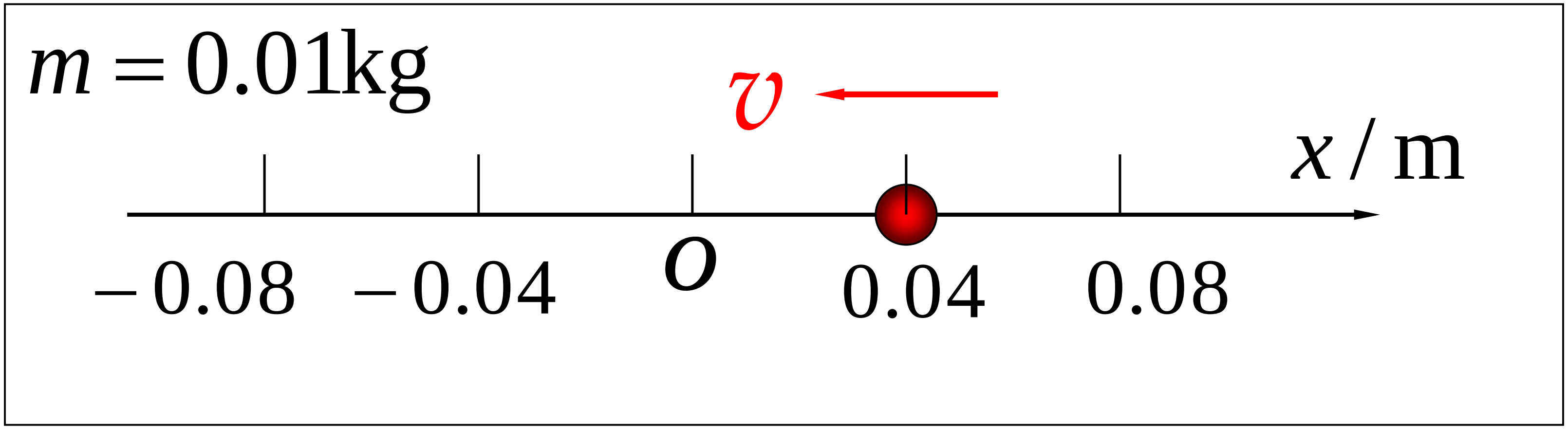
$t = 0, x = 0.04\text{m}$ 代入 $x = A\cos(\omega t + \varphi_0)$

$0.04\text{m} = (0.08\text{m})\cos\varphi \qquad \varphi_0 = \pm\dfrac{\pi}{3}$

$\because v_0 < 0 \quad \therefore \varphi_0 = \dfrac{\pi}{3}$



$$x = (0.08\text{m})\cos[(\frac{\pi}{2}\text{s}^{-1})t + \frac{\pi}{3}]$$



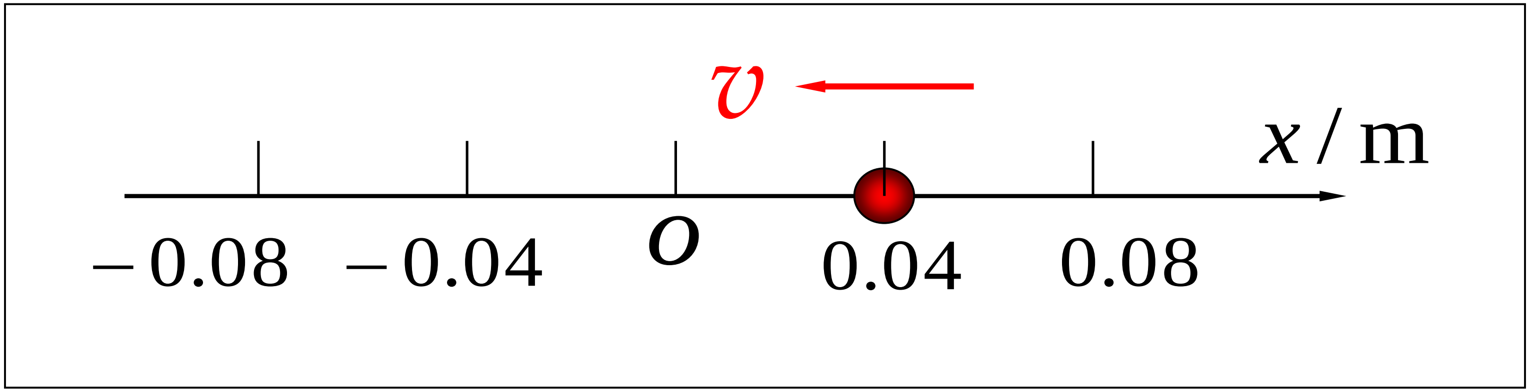
$$x = (0.08\text{m})\cos[(\frac{\pi}{2}\text{s}^{-1})t + \frac{\pi}{3}]$$

$t = 1.0\text{s}$ 代入上式得 $\quad x = -0.069\text{m}$

$$F = -kx = -m\omega^2 x$$

$$= -(0.01\text{kg})(\frac{\pi}{2}\text{s}^{-1})^2(-0.069\text{m}) = 1.70\times10^{-3}\,\text{N}$$

（2）由起始位置运动到 $x=-0.04\text{m}$ 处所需要的最短时间.



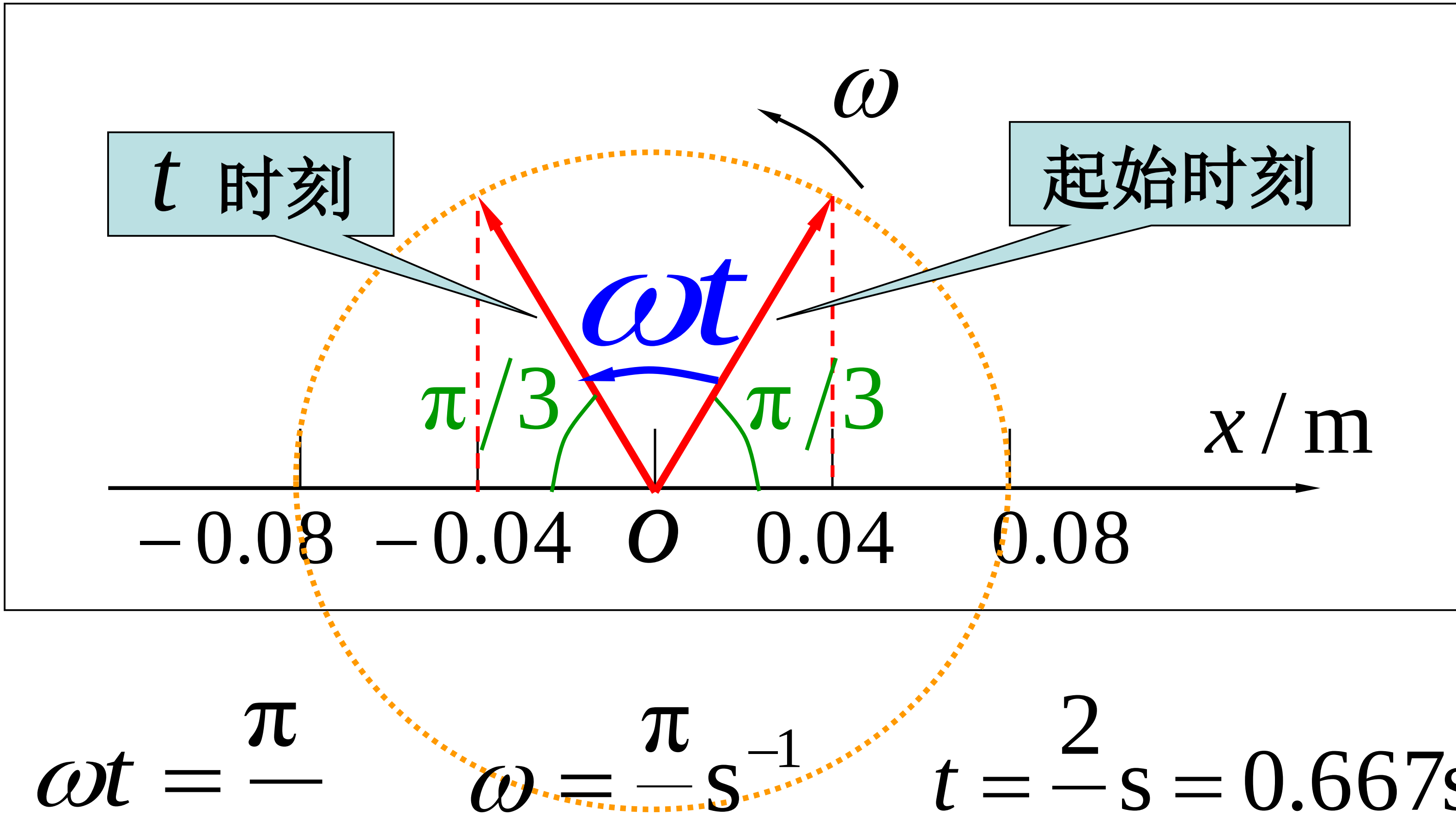
解法一　设由起始位置运动到 $x=-0.04\text{m}$ 处所需要的最短时间为 t

$$-0.04\text{m}=(0.08\text{m})\cos[(\frac{\pi}{2}\text{s}^{-1})t+\frac{\pi}{3}]$$

$$t=\frac{\arccos(-\frac{1}{2})-\frac{\pi}{3}}{\pi/2}\text{s}=\frac{2}{3}\text{s}=0.667\text{s}$$

星期一　2:57 PM 02

解法二



$$\omega t = \frac{\pi}{3} \qquad \omega = \frac{\pi}{2}\mathrm{s}^{-1} \qquad t = \frac{2}{3}\mathrm{s} = 0.667\mathrm{s}$$

（6）几种常见的简谐振动

$\theta < 5^\circ$ 时，$\sin\theta \approx \theta$

复摆 $M \approx -(mgl)\theta$ 准弹性力

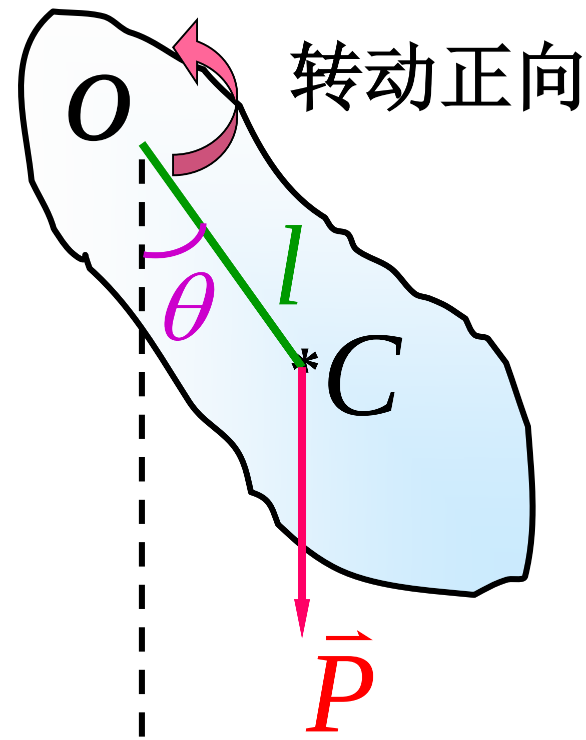
$$-mgl\theta = J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}$$

令 $\omega^2 = \dfrac{mgl}{J}$

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} = -\omega^2\theta$$

$$\theta = \theta_\mathrm{m}\cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$T = 2\pi\sqrt{J/mgl}$$



（C点为质心）

单摆 $\theta < 5^\circ$ 时，$\sin\theta \approx \theta$

$$M = -mgl\sin\theta \approx -mgl\theta$$

$$-mgl\theta = J\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2}$$

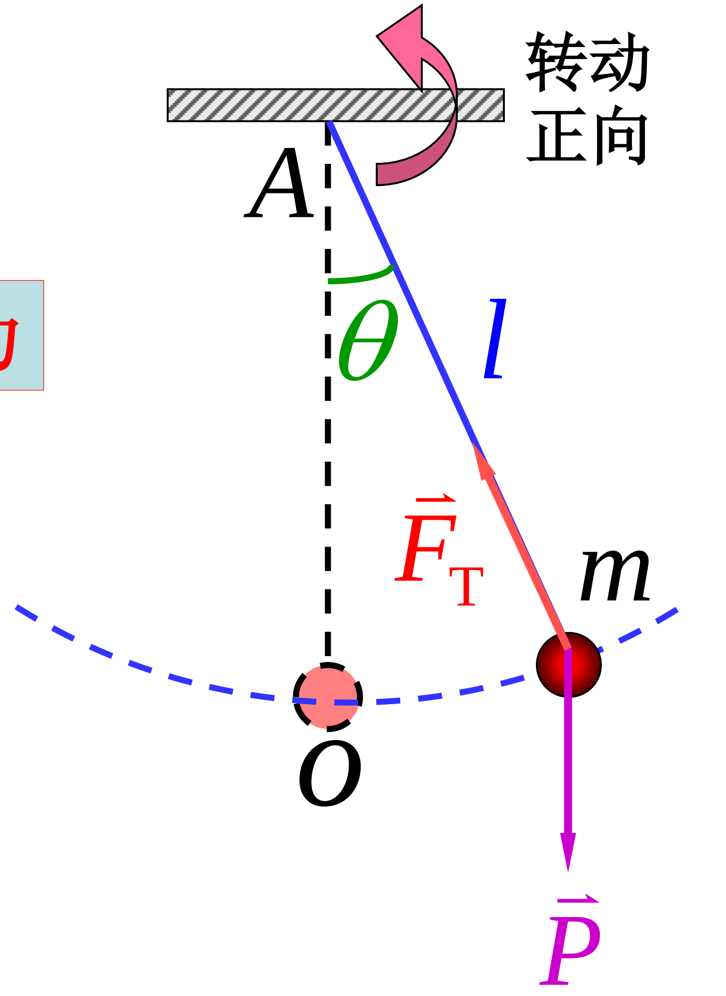
准弹性力

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} = -\frac{g}{l}\theta$$ 令 $$\omega^2 = \frac{g}{l}$$

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} = -\omega^2\theta$$

$$\theta = \theta_\mathrm{m}\cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}$$

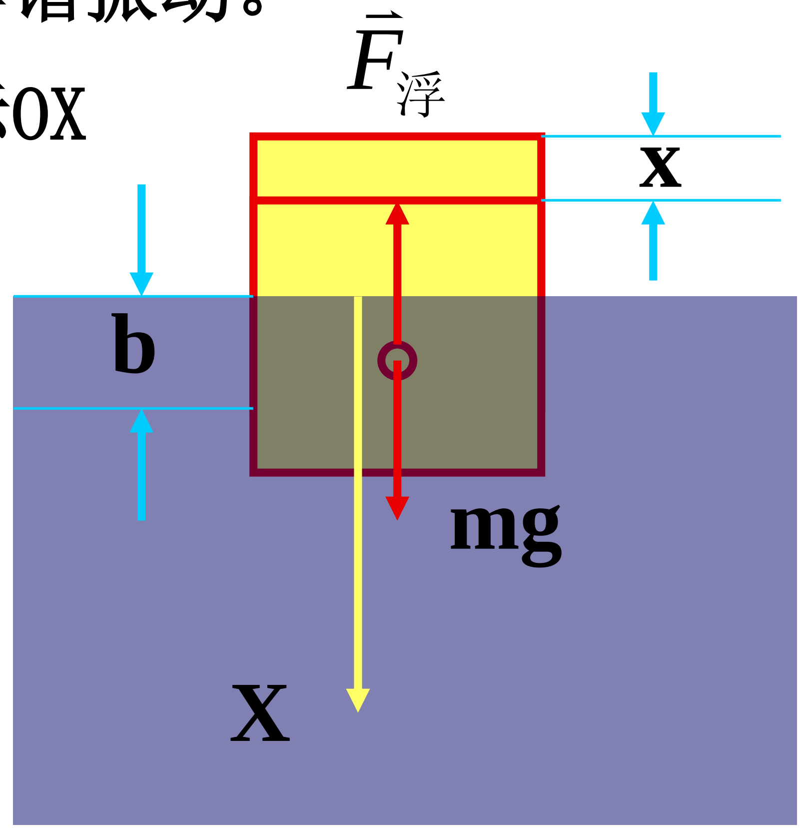


$$J = ml^2$$

星期一 2:57 PM 02

例 5：如图所示，一长为L的立方体木块浮于静水中，浸入水中部分的高度为b。今用手将木块压下去，放手让其开始运动。若忽略水对木块的阻力，并且水面开阔，不因木块运动而使水面高度变化，证明木块作谐振动。

解：以水面为原点建立坐标OX



受力分析

$$mg = \rho_{水} b l^2 g$$

$$F_{浮} = \rho_{水}(b+x) l^2 g$$

星期一 2:57 PM 02

列方程 $mg - F_{浮} = ma$

$$\rho_{水} b l^2 g - \rho_{水} l^2 (b + x) g = ma$$

$$-\rho_{水} l^2 g x = m\frac{d^2 x}{dt^2}$$

准弹性力

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\rho_{水} l^2 g}{m} x = 0$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{g}{b} x = 0$$

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{b}}$$

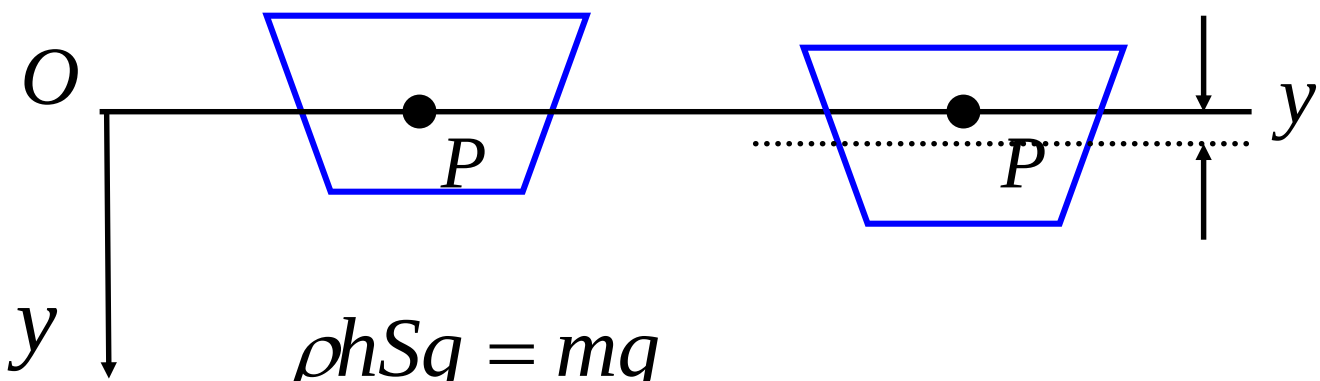
$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$$

故木块作谐振动（证毕）

星期一 2:57 PM 02

例 6 * 一质量为m 的平底船，其平均水平截面积为S，吃水深度为h，如不计水的阻力，求此船在竖直方向的振动周期。

解：船静止时浮力与重力平衡



$$\rho h S g = mg$$

船在任一位置时，以水面为坐标原点，竖直向下的坐标轴为y 轴，船的位移用y 表示。

船的位移为y 时船所受合力为

$$f = -(h+y)\rho Sg + mg = -(\rho Sg)y$$ 准弹性力

船在竖直方向作简谐振动，其角频率和周期为

$$\omega = \sqrt{\frac{\rho Sg}{m}} \qquad T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\rho gS}}$$

$$\because \quad m = \rho Sh$$

$$\therefore \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{h}{g}}$$

（7）简谐振动的能量

以弹簧振子为例 $F=-kx$ $\begin{cases} x = A\cos(\omega t+\varphi_0) \\ v = -A\omega\sin(\omega t+\varphi_0) \end{cases}$

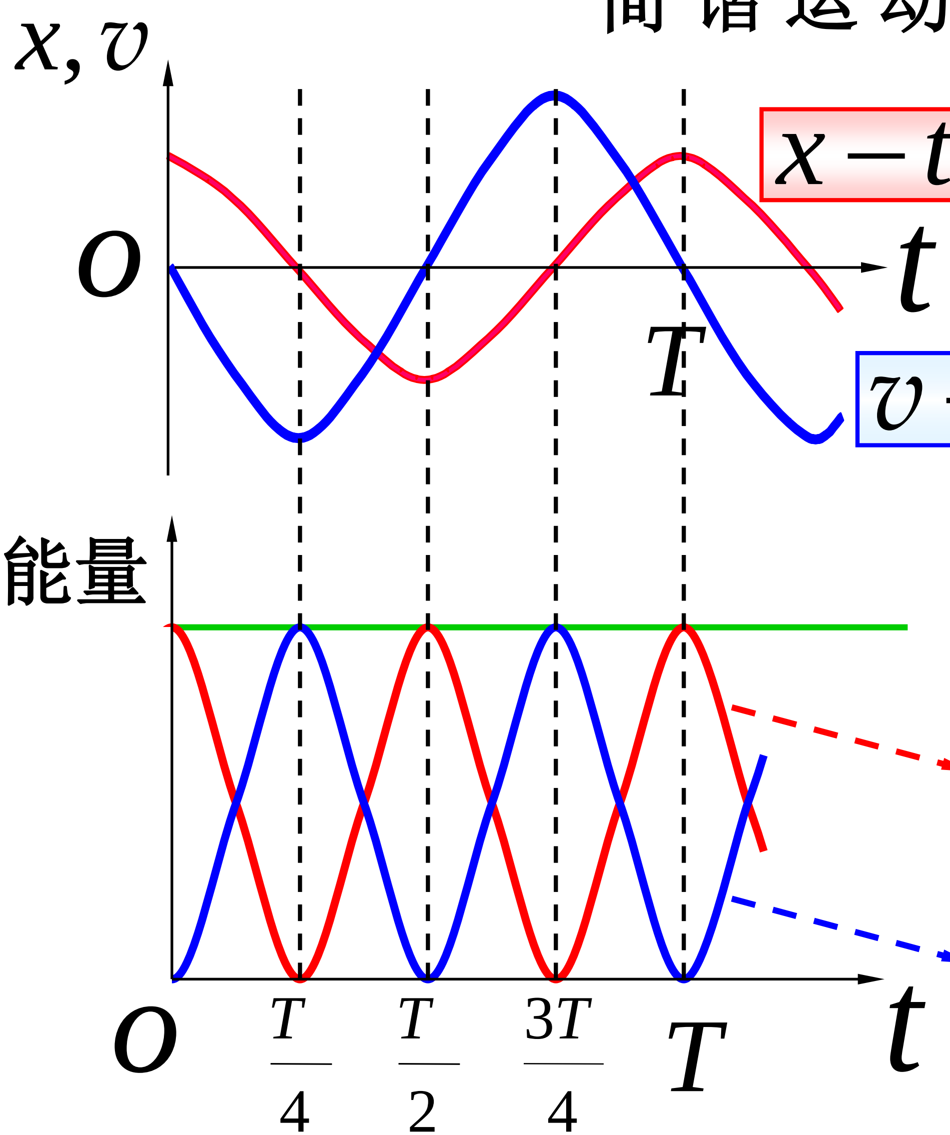
$$\begin{cases} E_{\mathrm{k}} = \dfrac{1}{2}mv^2 = \dfrac{1}{2}m\omega^2A^2\sin^2(\omega t+\varphi_0) \\ E_{\mathrm{p}} = \dfrac{1}{2}kx^2 = \dfrac{1}{2}kA^2\cos^2(\omega t+\varphi_0) \end{cases}$$

$$\omega^2 = k/m$$

$$E = E_{\mathrm{k}} + E_{\mathrm{p}} = \frac{1}{2}kA^2 \propto A^2$$（振幅的动力学意义）

线性回复力是保守力，作简谐运动的系统机械能守恒

简谐运动能量图



$$\varphi = 0$$

$$x = A\cos\omega t$$

$$v = -A\omega\sin\omega t$$

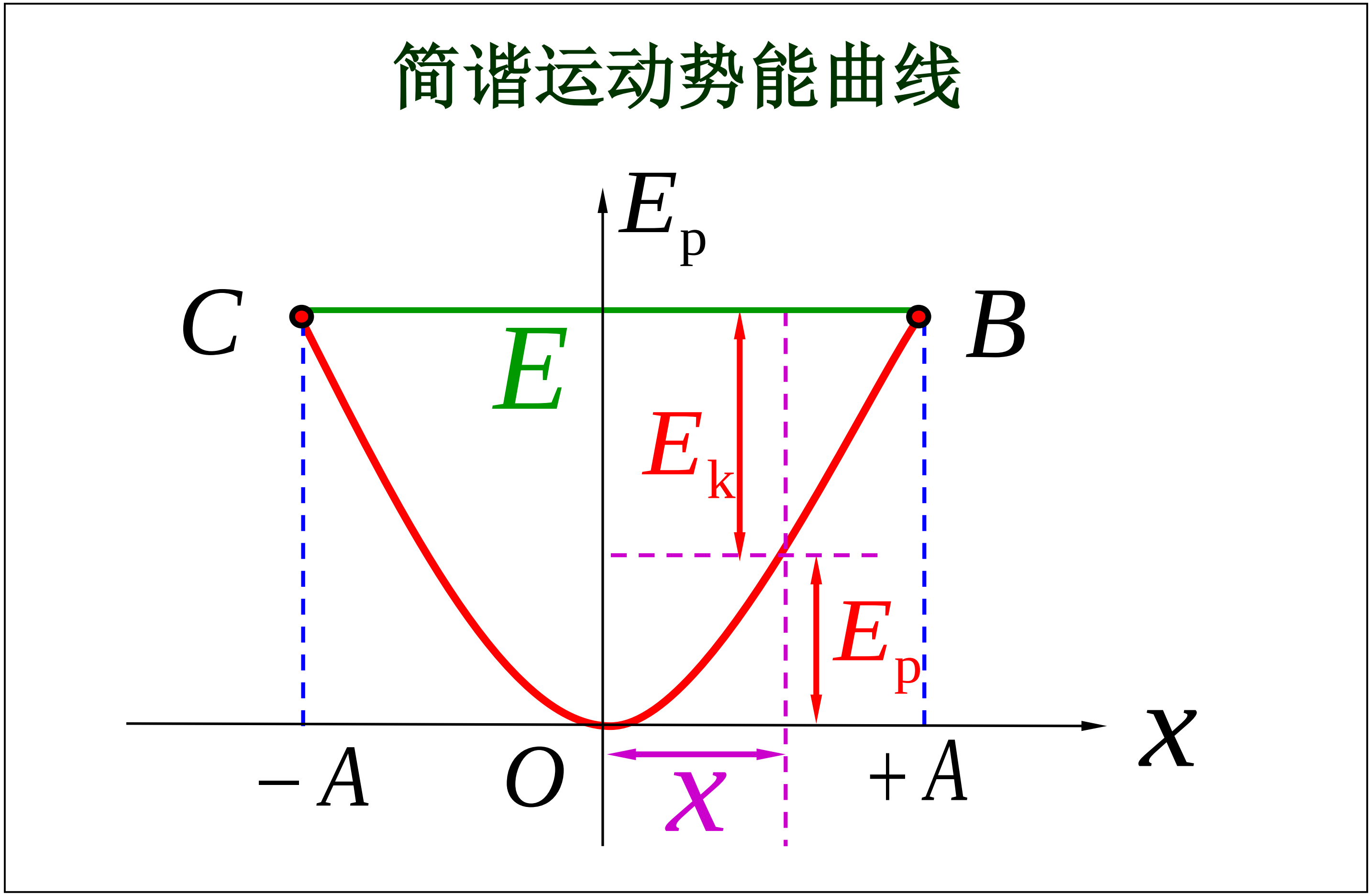
$$E = \frac{1}{2}kA^2$$

$$E_{\mathrm{p}} = \frac{1}{2}kA^2\cos^2\omega t$$

$$E_{\mathrm{k}} = \frac{1}{2}m\omega^2A^2\sin^2\omega t$$

$$E=\frac{1}{2}kA^2$$

简谐运动能量守恒，振幅不变



能量守恒 $\xrightarrow{\text{推导}}$ 简谐运动方程

$$E=\frac{1}{2}mv^2+\frac{1}{2}kx^2=\text{常量}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{1}{2}mv^2+\frac{1}{2}kx^2\right)=0$$

$$m\cancel{v}\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}+kx\cancel{\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}}=0$$

$$\frac{\mathrm{d}^2x}{\mathrm{d}t^2}+\frac{k}{m}x=0$$

例 7 质量为0.10kg的物体，以振幅$1.0\times10^{-2}\text{m}$作简谐运动，其最大加速度为$4.0\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$，**求**：

（1）振动的周期；

（2）通过平衡位置的动能；

（3）总能量；

（4）物体在何处其动能和势能相等？

解 （1） $a_{\max} = A\omega^2$ $\omega = \sqrt{\dfrac{a_{\max}}{A}} = 20\text{s}^{-1}$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 0.314\text{s}$$

星期一 2:57 PM 02

（2） $E_{\mathrm{k,max}}=\frac{1}{2}mv_{\max}^2=\frac{1}{2}m\omega^2A^2=2.0\times10^{-3}\,\mathrm{J}$

（3） $E=E_{\mathrm{k,max}}=2.0\times10^{-3}\,\mathrm{J}$

（4） $E_{\mathrm{k}}=E_{\mathrm{p}}$ 时， $E_{\mathrm{p}}=1.0\times10^{-3}\,\mathrm{J}$

由 $E_{\mathrm{p}}=\frac{1}{2}kx^2=\frac{1}{2}m\omega^2x^2$

$$x^2=\frac{2E_{\mathrm{p}}}{m\omega^2}=0.5\times10^{-4}\,\mathrm{m}^2$$

$$x=\pm0.707\mathrm{cm}$$

例 8　竖直悬挂的弹簧振子

以平衡位置为坐标原点

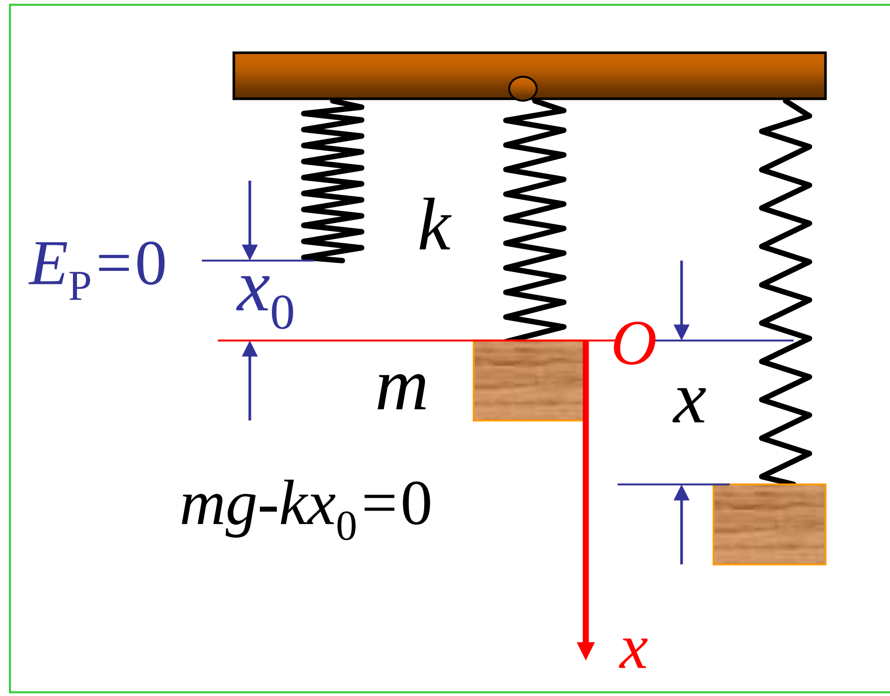
以弹簧原长处为重力势能、弹性势能零点

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2$$

$$E_p = \frac{1}{2}k(x+x_0)^2 - mg(x+x_{0)})$$

$$= \frac{1}{2}k(x+x_0)^2 - kx_0(x+x_0)$$

$$= \frac{1}{2}kx^2 - \frac{1}{2}kx_0^2$$



$$E = E_P + E_K = (\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2) - \frac{1}{2}kx_0^2 = \frac{1}{2}kA^2 - \frac{1}{2}kx_0^2 = \text{恒量}$$

$$E=\frac{1}{2}kA^2-\frac{1}{2}kx_0^2=\text{恒量}$$

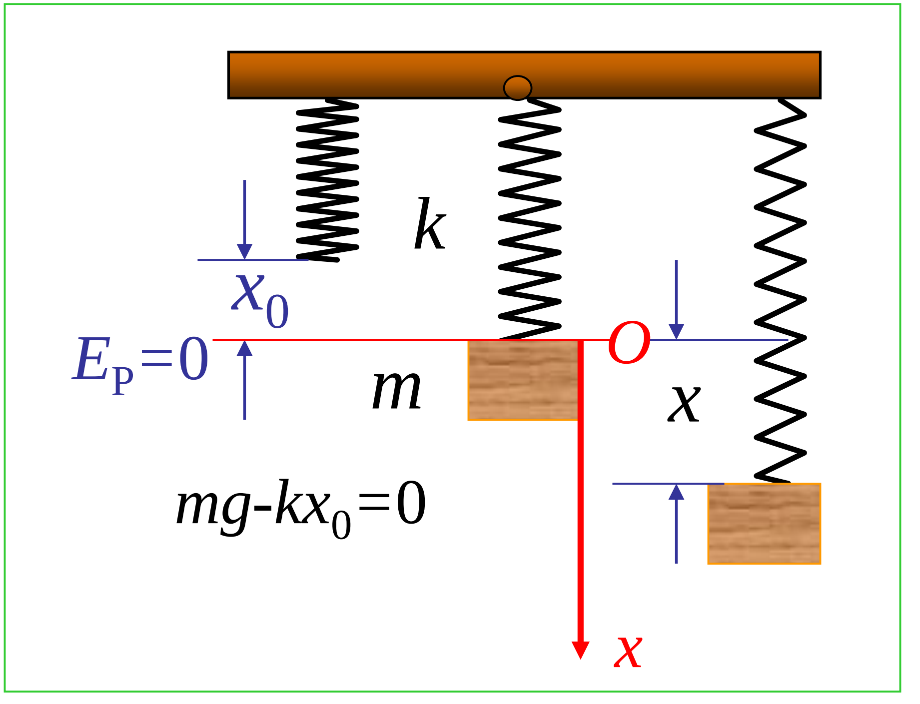
恰当选择零势点，可去掉第二项。如何选?

以平衡位置为坐标原点和势能零点

$$E_p=\left[\frac{1}{2}k(x+x_0)^2-\frac{1}{2}kx_0^2\right]-mgx$$

$$=\frac{1}{2}k(x+x_0)^2-\frac{1}{2}kx_0^2-kx_0x$$

$$=\frac{1}{2}kx^2$$



$$E=E_k+E_p=\frac{1}{2}mv^2+\frac{1}{2}kx^2=\frac{1}{2}kA^2$$

星期一 2:57 PM 02

注意：

只要以平衡位置为坐标原点和零势点

$$\boxed{E_{\mathrm{p}} = \frac{1}{2}kx^2}$$

准弹性势能：

（包括重力势能、弹性势能）

$$\boxed{E = \frac{1}{2}kA^2}$$

振动系统总能量