



高等院校经典教材配套指导丛书

配清华社张三慧主编《大学物理学》(第2版)

大学物理学

释疑与习题详解

(下册)

何丽珠
刘 兵 编著
武 青

- ▲考核知识点
- ▲专题释疑
- ▲原教材习题详解
- ▲原教材思考题详解
- ▲自测试卷及答案

 海洋出版社

高等院校经典教材配套指导丛书

大学物理学 释疑与习题详解

Daxue Wulixue Shi yi yu Xiti Xiangjie

(配清华大学张三慧主编《大学物理学》第2版)

何丽珠 刘 兵 武 青 编著

下 册



海洋出版社

2005年·北京

内 容 提 要

本书是一本与清华大学出版社出版的由张三慧主编的《大学物理学》(第2版)教材相配合的辅导教材,内容上紧扣本课程教学大纲,体例上与原教材保持一致。

本书特点:针对学生平时学习和考研需要,总结了各知识点的主要内容和基本概念,给出各章的基本要求、考点和难点。并对教材中较难理解的部分进行了专题论述,剖析典型例题,提供解题思路。对教材上的习题及思考题进行了详细的分析与解答,并在题后进行了总结或提示,以达到举一反三的目的。每一章提供了自测题及答案以供自测,其中部分试题筛选自近年各重点高校考研真题。

读者对象:本书可作为工科院校非物理类专业本科生的辅导教材和报考硕士研究生的复习资料,同时也可供有关教师及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学释疑与习题详解.(上、中、下册)/何丽珠等编著.

北京:海洋出版社,2005.10

ISBN 7-5027-6467-4

I. 大… II. 何… III. 物理学—高等学校—教学参考资料
IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 123020 号

策划编辑:邹华跃

责任编辑:郑安敏 张丽萍

责任印制:严国晋

海洋出版社 出版发行

http://www.oceanpress.com.cn

(100081 北京市海淀区大慧寺路8号)

北京顺义兴华印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2005年10月第1版 2005年10月北京第1次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:41.75

字数:1000千字 印数:1~3000册

总定价:60.00元(本册定价:19.00元)

海洋版图书印、装错误可随时退换

前言

本书是与张三慧先生主编的《大学物理学》(第2版)教材相对应的辅导教材。它包括例题、思考题解答、有关问题说明和测验题四部分。例题的选择有两个目的:一是为了加深学习对基本概念、基本定律的理解和掌握;二是为了和教材上的例题、习题相对应,力求在方法和内容上起到辅助作用。本书对《大学物理学》第二版教材上的思考题做了全面的解答,有助于学生自学,也有利于激发学生学习物理的兴趣。书中说明的一些问题,有的是教学中的体会,有的是对某些问题的强调,有的是学生感兴趣经常问及的问题。安排测验题则是为学生提供自我检查学习的机会,一些选择题是有目的地针对一些基础概念,有助于学生对一些基本概念的理解。本书可以作为使用《大学物理学》教材的院校学生的自学辅导书,也可以作为教研者的参考书。

物理学是自然科学的许多领域和工程技术的基础。大学物理(普通物理)课程是高等工科院校各专业学生的一门重要的必修基础课。它包括的经典物理、近代物理和物理在科学技术上应用的初步知识等都是一个高级工程人员所必备的。

通过大学物理课的教学,使学生对课程中的基本概念、基本理论、基本方法能够有比较全面和系统的认识和正确的理解,并具有初步应用的能力。

全书由三册组成,其中上册含力学、热学部分;中册含电磁学部分;下册含波动与光学、量子物理部分。

本书在内容上以清华大学出版社出版、由张三慧主编的《大学物理学》(第2版)为准,各章的章名与顺序、习题与思考题的编号都与原教材篇章顺序一致。各篇的每一章由考核知识点、专题释疑、配套教材习题解析、配套教材思考题参考解、自测试卷五部分组成。

考核知识点由基本要求、重点、难点、内容提要等四部分组成,内容提要对本章的基本内容进行了归纳,加强了知识的系统性;专题释疑是对基本内容的理解提出的一些看法,作了一定的分析及应注意的问题;配套教材习题解析是对原教材习题进行了分析、列出参考答案和说明;配套教材思考题参考解是对原教材中的思考题列出参考答案;自测试卷供学生学完各章节后作自我练习和复习巩固之用,自测试题大多选自清华大学主编的工科物理试题库试题和历年考研试题,试题综合性较强,具有一定的难度,使学生从中学习一些物理学的研究方法,提高分析问题和解决问题的能力。

本书《力学》、《热学》部分由何丽珠编写,《电磁学》由武青编写,《波动与光学》中的振动和波部分由何丽珠编写,光学由刘兵编写,《量子物理》由刘兵编写。本书在编写过程中参考了原教材及习题解答,还参考了许多其他相关书籍。李文文等录入了全部书稿与插图,在本书编写过程中,得到刘海疆老师和出版社的大力帮助,在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促,编者水平有限,书中难免有不妥之处,望读者批评指正。

编 者

2005年7月

目 次

第 4 篇 波动与光学

第 1 章 振动	(439)
1.1 考核知识点	(440)
1.1.1 基本要求	(440)
1.1.2 内容提要	(440)
1.2 专题释疑	(442)
1.2.1 物体作简谐振动的判断	(442)
1.2.2 应用旋转矢量图确定振动相位和相关的计算	(444)
1.3 配套教材习题解析	(445)
1.4 配套教材思考题参考解答	(466)
1.5 自测试卷及答案	(468)
1.5.1 自测试卷	(468)
1.5.2 自测试卷答案	(471)
第 2 章 波动	(473)
2.1 考核知识点	(474)
2.1.1 基本要求	(474)
2.1.2 内容提要	(474)
2.2 专题释疑	(477)
2.2.1 通过波函数方程求特征量	(477)
2.2.2 关于平面简谐波的波函数方程的建立	(478)
2.2.3 关于波的干涉和驻波	(479)

2.3	配套教材习题解析	(481)
2.4	配套教材思考题参考解答	(492)
2.5	自测试卷及答案	(496)
2.5.1	自测试卷	(496)
2.5.2	自测试卷答案	(498)
第3章	光的干涉	(499)
3.1	考核知识点	(500)
3.1.1	基本要求	(500)
3.1.2	内容提要	(500)
3.2	专题释疑	(503)
3.2.1	关于引起干涉条纹变化的因素	(503)
3.2.2	关于干涉条纹的清晰度	(504)
3.2.3	解题中应注意的问题	(504)
3.3	配套教材习题解析	(505)
3.4	配套教材思考题参考解答	(514)
3.5	自测试卷及答案	(516)
3.5.1	自测试卷	(516)
3.5.2	自测试卷答案	(518)
第4章	光的衍射	(521)
4.1	考核知识点	(522)
4.1.1	基本要求	(522)
4.1.2	内容提要	(522)
4.2	专题释疑	(524)
4.2.1	用惠更斯-菲涅耳原理解释衍射图像	(524)
4.2.2	干涉和衍射的异同点	(525)
4.2.3	光栅衍射	(525)
4.2.4	光栅光谱与玻璃棱镜的色散光谱比较	(526)
4.2.5	解题要点	(526)
4.3	配套教材习题解析	(527)
4.4	配套教材思考题参考解答	(534)
4.5	自测试卷及答案	(536)
4.5.1	自测试卷	(536)
4.5.2	自测试卷答案	(538)

第5章 光的偏振	(539)
5.1 考核知识点	(540)
5.1.1 基本要求	(540)
5.1.2 内容提要	(540)
5.2 专题释疑	(543)
5.2.1 偏振光的获取	(543)
5.2.2 马吕斯定律的应用	(543)
5.2.3 布儒斯特定律的应用	(543)
5.3 配套教材习题解析	(544)
5.4 配套教材思考题参考解答	(551)
5.5 自测试卷及答案	(552)
5.5.1 自测试卷	(552)
5.5.2 自测试卷答案	(555)

第5篇 量子物理

第1章 波粒二象性	(557)
1.1 考核知识点	(558)
1.1.1 基本要求	(558)
1.1.2 内容提要	(558)
1.2 专题释疑	(560)
1.2.1 关于黑体	(560)
1.2.2 普朗克的“能量量子”假设与爱因斯坦光子论的联系和区别	(561)
1.2.3 关于光电效应和康普顿效应	(561)
1.2.4 关于微观粒子的波粒二象性	(562)
1.2.5 关于不确定关系	(562)
1.3 配套教材习题解析	(563)
1.4 配套教材思考题参考解答	(572)
1.5 自测试卷及答案	(574)
1.5.1 自测试卷	(574)
1.5.2 自测试卷答案	(577)

第2章 薛定谔方程	(579)
2.1 考核知识点	(580)
2.1.1 基本要求	(580)
2.1.2 内容提要	(580)
2.2 专题释疑	(581)
2.2.1 对波函数的理解	(581)
2.2.2 关于薛定谔方程应注意以下几点	(582)
2.2.3 解题要点	(582)
2.3 配套教材习题解析	(583)
2.4 配套教材思考题参考解答	(586)
2.5 自测试卷及答案	(587)
2.5.1 自测试卷	(587)
2.5.2 自测试卷答案	(588)
第3章 原子中的电子	(589)
3.1 考核知识点	(590)
3.1.1 基本要求	(590)
3.1.2 内容提要	(590)
3.2 专题释疑	(592)
3.2.1 描述氢原子状态的量子数	(592)
3.2.2 关于电子自旋	(593)
3.2.3 解题要点	(593)
3.3 配套教材习题解析	(594)
3.4 配套教材思考题参考解答	(605)
3.5 自测试卷及答案	(607)
3.5.1 自测试卷	(607)
3.5.2 自测试卷答案	(609)
第4章 固体中的电子	(611)
4.1 考核知识点	(612)
4.1.1 基本要求	(612)
4.1.2 内容提要	(612)
4.2 专题释疑	(613)
4.2.1 自由电子怎样理解	(613)
4.2.2 晶体能带结构特点	(614)

4.3	配套教材习题解析	(614)
4.4	配套教材思考题参考解答	(618)
4.5	自测试卷及答案	(619)
4.5.1	自测试卷	(619)
4.5.2	自测试卷答案	(620)
第5章	核物理	(621)
5.1	考核知识点	(622)
5.1.1	基本要求	(622)
5.1.2	内容提要	(622)
5.2	专题释疑	(624)
5.2.1	关于放射性	(624)
5.2.2	学习要点	(624)
5.3	配套教材习题解析	(624)
5.4	配套教材思考题参考解答	(630)
5.5	自测试卷及答案	(632)
5.5.1	自测试卷	(632)
5.5.2	自测试卷答案	(633)

第4篇 波动与光学

第1章 振动

本章考点

- 简谐振动的特征和规律
- 同方向、同频率简谐振动合成的规律
- 描述简谐振动的旋转矢量法

本章难点

- 相位的概念及有关计算
- 简谐振动的判断

1.1 考核知识点

振动是自然界常见的一种运动,任何一个物理量在某一定值附近往复变化的过程就是振动。机械振动是指物体在其平衡位置附近做来回往复的运动,简谐振动是机械振动中最简单、最基本的一种,它具有严格的周期性,是研究复杂振动的基础。本章从动力学和运动学的角度来描述振动过程,分析振动的一般规律。

1.1.1 基本要求

- 掌握简谐振动的特征和规律,掌握描述简谐振动的两种方法——解析法和旋转矢量法;
- 掌握两个同方向同频率的简谐振动的合成的方法和规律;
- 理解拍振动;
- 了解两相互垂直的简谐振动的合成;
- 了解阻尼振动和受迫振动和共振的特点。

1.1.2 内容提要

(1) 简谐振动

①简谐振动的基本特征。

a. 质点的运动是在大小与位移成正比、方向与位移方向相反的力的作用下发生的一种周期性运动,这种力也称为线性回复力。即

$$f = -kx$$

其中 k 为常数, x 为物体相对于平衡位置的位移。

b. 质点运动的动力学方程具有如下形式:

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

其中 ω 为圆频率或角频率,由振动系统本身的性质决定。

c. 质点的运动学方程为:

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

②描述简谐振动的特征量。振幅、频率(或周期)和相位是确定振动状态的三个重要的物理学量,常称它们为描述或确定简谐振动的特征量。

a. 振幅 A : 振动物体离开平衡位置的最大距离。振幅是描述振动物体运动范围和运动幅度的物理量,由初始条件定。

b. 角频率 ω 频率 ν 和周期 T : 角频率 ω 是单位时间内相位的变化,或振动物体在

2π 秒内振动的次数, 由振动系统本身性质决定。这种性质包括两方面, 一方面是系统所受线性回复力的性质, 另一方面是系统的惯性。第一个方面的性质使运动趋于平衡位置, 第二个方面的性质使系统到达平衡位置不会立即停止运动, 于是系统就振动起来了。

对弹簧振子 $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 单摆 $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$, 复摆 $\omega = \sqrt{\frac{mgh}{J}}$ 。角频率 ω 与频率 ν 和周期 T 的关系分别为

$$\omega = 2\pi\nu \quad \text{或} \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

频率是单位时间内振动系统所作完全振动的次数, 周期是系统完成一次完全振动所需的时间, 是两个相邻的相同振动状态之间的时间间隔。周期与频率之间有关系式

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

c. 相位 ($\omega t + \varphi$) 和初相位 φ : 初相位 φ 决定零时刻简谐振动的运动状态, 由初始条件定。相位 ($\omega t + \varphi$): 决定 t 时刻简谐振动的运动状态。一定的相位对应一定的运动状态, 用相位表征质点振动状态的优点在于它充分反映了振动周期性特征。

③简谐振动的矢量图解法。

a. 对简谐振动的描述——矢量图解法 (相量图法)。
质点做匀速圆周运动时, 它在直径上投影的运动就是简谐运动, 因此可用一个长度等于振幅 A 的旋转矢量表示一个简谐运动。这样的旋转矢量图叫相量图。如图 4.1.1 矢量旋转的角速度为 ω , 矢量的初角位置为初相 φ , 旋转矢量的角位置与振动相位 ($\omega t + \varphi$) 相对应, 则旋转矢量端点在 x 轴上的投影随时间的变化就是旋转矢量所代表的简谐振动 $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$ 。

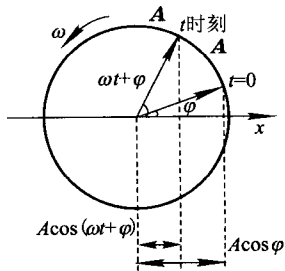


图 4.1.1

b. 对简谐振动的描述——振动曲线法。简谐振动 $x(t) = A \cos(\omega t + \varphi)$ 也可用振动曲线表示。以位移 x 为纵坐标、以时间 t 为横坐标, 所描绘的振动物体相对于平衡位置的位移随时间变化的关系曲线, 称为振动曲线。

④简谐振动的能量。

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} kx^2 = \frac{1}{2} kA^2$$

$$\bar{E}_k = \bar{E}_p = \frac{1}{2} E = \frac{1}{4} kA^2$$

(2) 简谐振动的合成

①同方向两个同频率简谐振动的合成。同方向、同频率两个简谐振动的合成, 其

合成运动仍是同频率的简谐振动。两个振动的相位差对合振动起着重要作用。

②同方向两个频率相近的简谐振动的合成。当同方向两个频率相近的简谐振动合成时,合振动的振幅会时而加强,时而减弱,这一现象称为拍,即合振动振幅周期性变化的现象。拍频为

$$\nu_{\text{拍}} = |\nu_2 - \nu_1|$$

③互相垂直、同频率两简谐振动的合成。互相垂直、同频率两简谐振动的合成,其合成轨迹一般为椭圆,两振幅相等时为圆;当质点同时参与两个不同方向的简谐振动时,质点的位移是这两个振动位移的矢量和,在一般情况下,质点将在平面上做曲线运动。任何一个直线简谐振动,椭圆运动或匀速圆周运动都可分解为两个相互垂直的简谐振动。

④互相垂直,不同频率两谐振合成。当两简谐振动的频率为整数比时,这时合振动为有一定规则的稳定的闭合曲线,即利萨茹图形。当频率之比为无理数时,其合成运动将永远不重复已走过的路径,它的轨迹将逐渐密布在振幅所限定的整个矩形面内。

(3) 阻尼振动、受迫振动和共振

①阻尼振动。阻尼振动是振幅(或能量)随时间不断减少的振动。对弱阻尼

$$A = A_0 e^{-\beta t}$$

②受迫振动。受迫振动是振动系统在周期性外界强迫力作用下的振动。从实质上说,振动系统的能量由于阻尼的存在而减小,振动也随着衰减,直至消失。外界向振动系统提供能量,振动得以维持,当外界提供的能量等于由阻尼所引起的能量损失时,振动就达到了稳定状态。

③共振。稳态时受迫振动的频率等于强迫力的频率,当强迫力的频率等于振动系统的固有频率时发生共振,这时系统最大限度地从外界吸收能量。

1.2 专题释疑

1.2.1 物体作简谐振动的判断

对简谐振动基本特征的三种描述中的任何一种,都可以作为简谐振动的定义。但是,由于振动的概念已经扩展到物理学的各个领域,一个物理量在某定值附近作往复变化的过程,都称为振动。在这种情况下,第一种描述不再有效,所以,第二种描述是简谐振动的普遍定义,即任何物理量 x 的变化规律满足方程式:

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

式中, ω 是由系统本身的性质所决定的常量, 则该物理量作简谐振动。为了确定一个系统是否作简谐振动, 就应写出其动力学方程, 若和上式形式相同, 则可判断此系统作简谐振动。

【例】 质量为 M 的圆盘挂在劲度系数为 k 的轻弹簧下, 并处于静止状态。一质量为 m 的物体, 从距圆盘为 h 的高度自由下落, 并粘在盘上和盘一起振动。设物体和盘相碰瞬间, 而且碰撞时间很短。取碰后系统的平衡位置为坐标原点, 竖直向下为坐标的正方向。试证明该系统作简谐振动并写出系统的振动方程。

【证明】 判断一个系统是否做简谐振动, 则需写出质点受力的动力学方程。其分析方法与要求和应用牛顿第二定律时相同。用解力学题的方法求出物体是否受到与其对平衡位置的位移成正比而反向的合力(回复力)。简谐振动的固有频率就是动力学方程中位移一次项系数的平方根。

根据受力分析, 在碰后物体和盘一起向下运动位移为 x 时, 由牛顿第二定律有

$$(m+M)g - (x + \Delta l_0)k = (m+M)\frac{d^2x}{dt^2}$$

式中: Δl_0 为系统处于平衡位置时弹簧的伸长量, 因而 $(m+M)g = k\Delta l_0$, 代入到上式中, 有

$$-kx = (m+M)\frac{d^2x}{dt^2}$$

即

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m+M}x = 0$$

因而该振动为简谐振动, 得证。

振动角频率为

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m+M}}$$

振动方程为

$$x = A \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m+M}}t + \varphi\right)$$

式中的振幅 A 和初相 φ 由 $t=0$ 时系统的状态确定。

由于碰撞时间很短, 因而可以认为碰撞过程动量守恒, 所以 $t=0$ 时, $v_0 = \frac{m}{m+M}v$, 并且 $x_0 = -(\Delta l_0 - \Delta l_1)$, 其中 Δl_1 为碰撞前弹簧的伸长量, v 为物体碰撞前的瞬间所具有的速度, 其值分别为

$$\Delta l_1 = \frac{Mg}{k}, \quad v = \sqrt{2gh}$$

因而

$$x_0 = -\left(\frac{m+M}{k}g - \frac{M}{k}g\right) = -\frac{m}{k}g$$

$$v_0 = \frac{m}{m+M}\sqrt{2gh}$$

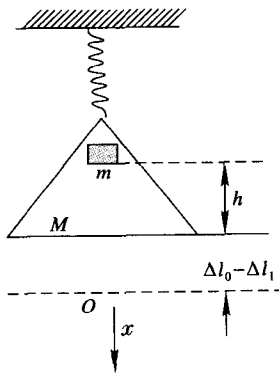


图 4.1.2

由 $A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega^2}}$ 和 $\varphi = \arctan\left(-\frac{|v_0|x}{\omega x_0}\right)$, 可得

$$A = \frac{mg}{k} \sqrt{1 + \frac{2kh}{(m+M)g}} \quad \varphi = \arctan \sqrt{\frac{2kh}{(m+M)g}}$$

由于 $x_0 < 0$, $|v_0| > 0$, 所以 φ 角应为第三象限角, 将 A , φ 代入到振动方程中去, 即为所求系统的振动方程。

1.2.2 应用旋转矢量图确定振动相位和相关的计算

确定振动系统的相位是重点之一。除可用解析法外, 用旋转矢量法更方便。应用旋转矢量法确定振动相位, 首先必须熟练掌握将一个谐振动用旋转矢量描述出来, 或者根据已知的旋转矢量来描述该谐振动; 其次会用旋转矢量描述相位差及相关的计算。

【例】 如图 4.1.3 (a) 所示, 一质点作简谐振动, 在一个周期内相继通过距离为 12 cm 的两点, 历时 2 s, 并且在 A, B 两点具有相同的速度; 再经过 2 s 后, 质点又从另一方向通过 B 点。试求质点运动的周期和振幅。

【解答】 (a) 取坐标 OX 沿 AB 连线, 坐标原点 O 处在 A, B 连线中点, 如图 (a) 所示, 设质点的简谐振动方程为

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

由于 $\overline{AB} = 12 \text{ cm}$, 且 $v_A = v_B > 0$, 所以 A, B 两点的坐标为

$$x_A = -\frac{12}{2} = -6 \text{ cm},$$

$$x_B = \frac{12}{2} = 6 \text{ (cm)}$$

根据题意, A, B 两点为质点振动过程中相继经过的点, 在一个周期内, 质点从 O 到 B 所用的时间为 1 s, 从 B 到最大振幅处所用的时间也为 1 s, 所以从 O 到最大振幅处所用时间为 2 s, 因而 $\frac{1}{4}T = 2 \text{ s}$, 振动的周期为

$$T = 8 \text{ (s)}$$

(b) 用旋转矢量法求振幅。质点从 O 点到 B 点经过的时间为 $\Delta t = 1 \text{ s}$, 旋转矢量从 P_0 点旋转到 P_B 点, 转过的角度为 $\Delta\varphi = \omega\Delta t = \frac{\pi}{4}$, 如图 4.1.3 (b) 所示。在 $\triangle OP_B B$ 中, 有

$$x_B = A \sin(\omega\Delta t)$$

所以振幅

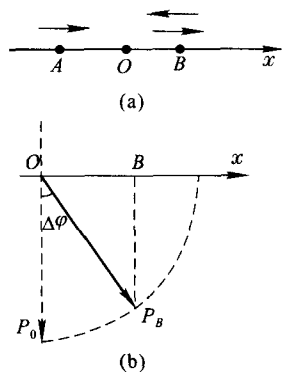


图 4.1.3

$$A = \frac{x_B}{\sin(\omega \Delta t)} = \frac{6 \times 10^{-2}}{\sin \frac{\pi}{4}} = 6\sqrt{2} \times 10^{-2} \text{ (m)}$$

在本题中仔细分析质点在一个周期内的运动过程是非常重要的。A, B 两点为质点振动过程中相继经过的点, 且 $v_A = v_B$, 因而 A, B 连线的中点为平衡位置。

在物体的总能量容易计算的情况下, 也可以先计算物体的总能量, 然后将其和简谐运动的标准能量公式对比而得出结果。

1.3 配套教材习题解析

1.1 (教材 P.43)

【分析】与简谐振动运动方程标准式对比, 求相应的特征参量。

【解答】(1) 标准 $x = A \cos(\omega t + \varphi)$

原式 $x = 0.05 \cos(8\pi t + \frac{\pi}{3})$

对比得 $\omega = 8\pi = 25.1 \text{ s}^{-1}$

$$T = 2\pi/\omega = 0.25 \text{ s}$$

$$A = 0.05 \text{ m}$$

$$\varphi = \pi/3$$

$$\therefore v = \frac{dx}{dt} = -0.05 \times 8\pi \sin(8\pi t + \frac{\pi}{3})$$

$$\therefore v_m = \omega A = 8\pi \times 0.05 = 1.26 \text{ m/s}$$

$$\therefore a = \frac{d^2x}{dt^2} = -0.05 \times (8\pi)^2 \times \cos(8\pi t + \frac{\pi}{3})$$

$$a_m = \omega^2 A = (8\pi)^2 \times 0.05 = 31.6 \text{ m/s}^2$$

(2) 相位 $\varphi = \omega t + \varphi_0$

$$\varphi_1 = \omega t_1 + \varphi_0 = 8\pi \times 1 + \pi/3 = 25\pi/3$$

$$\varphi_2 = \omega t_2 + \varphi_0 = 8\pi \times 2 + \pi/3 = 49\pi/3$$

$$\varphi_3 = \omega t_3 + \varphi_0 = 8\pi \times 10 + \pi/3 = 241\pi/3$$

(3) x , v , a 和 t 的关系线如图 4.1.4 所示。 x , v , a 相位各差 $\frac{\pi}{2}$ 。