

# 大學物理學精要

問題與習題詳解

第七版

下冊

F. W. 西爾斯 等原著  
M. W. 澤曼斯基

曉園出版社

世界圖書出版公司

## 内 容 简 介

本书是《大学物理学》第7版的问题和习题详解。

### 大学物理学精要问题与习题详解(下册)

F. W. 西尔思 M. W. 泽曼斯基等 原著

刘威志 游信胜等 译著

\*

晓园出版社出版

世界图书出版公司北京重印

北京朝阳门内大街137号

新燕印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1992年10月第一版 开本:850×1168 1/32

1992年10月第一次印刷 印张:24.75

印数:0001—2200

ISBN:7-5062-1324-9/O·43

定价:16.20元(WB9201/23)

世界图书出版公司通过中华版权代理公司向晓园出版社购得重印权

限国内发行

# 前 言

研習理工的同學，都有一種認識，那就是：一本書的習題往往是該書的精華所在，藉着習題的印證，才能對書中的原理原則澈底的吸收與瞭解。

有鑒於此，曉園出版社特地聘請了許多在本科上具有相當研究與成就的人士，精心出版了一系列的題解叢書，為各該科目的研習，作一番介紹與鋪路的工作。

一個問題的解答方法，常因思惟的角度而異。曉園題解叢書，毫無疑問的都是經過一番精微的思考與分析而得。其目的在提供對各該科目研讀時的參考與比較；而對於一般的自修者，則有啓發與提示的作用。希望讀者能藉着這一系列題解叢書的幫助，而在本身的學問進程上有更上層樓的成就。

# 目 錄

## 第四篇 波

第二十一章	機械波	1
第二十二章	振動體	23
第二十三章	聲音現象	41

## 第五篇 靜電學與電流

第二十四章	Coulombs 定律	65
第二十五章	電 場	97
第二十六章	電 位	131
第二十七章	電容與介電質	171
第二十八章	電流、電阻、電動勢	211
第二十九章	直流電路	239

## 第六篇 電動力學

第三十章	磁場與磁力	297
第三十一章	磁場源	341
第三十二章	電磁感應	383
第三十三章	電 感	419
第三十四章	交流電	461
第三十五章	電磁波	499

## 第七篇 光 學

第三十六章	光的本質和傳播	521
第三十七章	單反射片所成之像	559

第三十八章	透鏡與光學儀器	587
第三十九章	干涉與繞射	635

## 第八篇 現代物理

第四十章	相對論力學	669
第四十一章	光子電子和原子	701
第四十二章	量子力學	725
第四十三章	原子、分子和固態	751
第四十四章	核子與高能物理	767

# 第四篇 波

## 第二十一章 機械波

1. 波是任何偏離平衡狀態的擾動，隨時間由空間中一區域傳到另一區域。
2. 在以下三章中，我們討論機械波，這是在某物質中傳播的波，這物質稱為介質。

### 21-1 機械波現象

1. 若質點的運動和波傳播的方向垂直，即稱為橫波。若質點沿波傳播方向來回振動，則稱為縱波。
2. 很多機械波都以某定速傳播，此定速稱為波速，隨介質的性質而定。

### 21-2 周期波

1. 在週期波裏，介質中每個質點都以定週期和定頻率作週期運動，其中最重要的，是作簡諧運動的情形，由此產生正弦波。
2. 在波中，反覆波型上相同位置的相鄰兩點之距離，稱為波長  $\lambda$ 。若波速  $C$ ，頻率  $f$ ，則有

$$C = \lambda f$$

的關係。

### 21-3 波的數學描述

1. 考慮  $x$  軸上的弦以橫波形態振動，弦上的每個部分都有離開平衡位置的橫向位移  $y$ 。 $y$  和位置、時間有關

$$y = f(x, t)$$

## 2 大學物理詳解(下)

$f(x, t)$  描述波的運動，稱為波函數。

2. 一正弦型波上每一點都做簡諧運動。在原點 ( $x = 0$ ) 處，

$$y = A \sin \omega t = A \sin 2\pi f t$$

把這擾動由原點傳到  $x$  點需要時間  $\frac{x}{c}$

故  $x$  點在  $t$  時的運動和原點在  $t - \frac{x}{c}$  時的運動相同

$$\begin{aligned} \therefore y(x, t) &= A \sin \omega \left( t - \frac{x}{c} \right) \\ &= A \sin 2\pi f \left( t - \frac{x}{c} \right) \end{aligned}$$

也可表示成 
$$= A \sin 2\pi \left( \frac{t}{\tau} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

### 3. 定義 $k$ 為波數

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

則角頻率  $\omega = 2\pi f = ck$

而波函數可寫成  $y(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$

4.  $c$  是波傳播的速度，和質點的移動速度  $v$  不同。正弦橫波中，質點的速度  $v$  為

$$v = \frac{\partial y}{\partial t} = \omega A \cos(\omega t - kx)$$

加速度為 
$$a = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 A \sin(\omega t - kx)$$

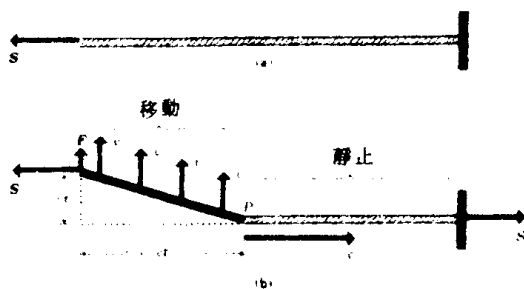
因 
$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -k^2 A \sin(\omega t - kx)$$

$$\therefore \frac{\partial^2 y / \partial t^2}{\partial^2 y / \partial x^2} = \frac{\omega^2}{k^2} = c^2$$

故， $\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$  稱為波方程式，這對縱波也一樣適用

## 21-4 橫波的速度

1. 橫波的速度決定於弦的單位長度質量和弦的張力。



弦上的橫向擾動傳播

如上圖，弦的張力為  $S$ ，單位長度質量為  $\mu$ ，在  $t = 0$  時，左端施加一橫向固定力  $F$ 。

(b)圖是時間  $t$  以後的情形， $p$  點右邊的弦還靜止，最左端移動了  $vt$ 。從圖上的相似三角形可得

$$\frac{F}{S} = \frac{vt}{ct}, \quad F = S \frac{v}{c}$$

橫向衝量為  $S \frac{v}{c} t$

而橫向動量  $mv = \mu ctv$

$$\therefore S \frac{v}{c} t = \mu ctv$$

$$c = \sqrt{\frac{S}{\mu}} \quad (\text{橫波})$$



### 21-5 縱波的速度

1. 下圖是流體在管中縱向擾動的傳播。t = 0時，活塞以速度 v 向右推。圖(b)表示時間 t 後的情形。在 P 點左方流體以速度 v 運動；在 P 點右方的流體靜止。設波速為 c，縱向動量為  $mv = \rho ct Av$ ，壓力的增加是  $\Delta p$ ，體彈性係數為 B，

$$B = \frac{\Delta p}{\Delta V / \Delta l}$$

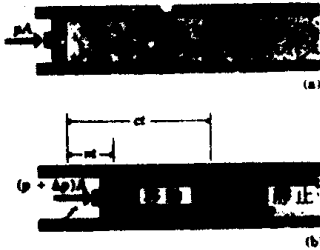
$$\therefore \Delta p = B \frac{v}{c}$$

縱向衝量  $Ft = \Delta p At = B \frac{v}{c} At$

$$B \frac{v}{c} At = \rho ct Av$$

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (\text{縱波})$$

縱波的速度只和體彈性係數 B 及密度有關。



2. 而在固體棒中，波速為

$$c = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (\text{縱波})$$

Y 為楊氏係數。

## 21-6 氣體中的聲波

1. 氣體絕熱壓縮時，溫度升高；絕熱膨脹時，溫度降低。而縱波在氣體中傳播時，被壓縮區域的溫度會比膨脹區域的溫度高，但因空氣的傳熱性質和聲波頻率，由實驗可知聲波的傳播是絕熱的。
2. 體彈性係數隨等溫或絕熱過程而異，絕熱的寫作  $B_{ad}$ ，理想氣體的絕熱過程中  $pV^\gamma = \text{常數}$ ， $B$  定義為

$$B = -V \frac{dp}{dV}$$

將  $pV^\gamma$  對  $V$  微分，得到

$$\frac{dp}{dV} V^\gamma + \gamma p V^{\gamma-1} = 0$$

故理想氣體的  $B_{ad} = \gamma p$ ，而聲速  $c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}}$

若是等溫過程，則  $pV = \text{常數}$

$$\text{可得 } B_{is} = p$$

3. 對理想氣體： $\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{M}$

$$\therefore c = \sqrt{\frac{B_{ad}}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma p T}{M}}$$

對空氣  $\gamma = 1.40$ ， $T = 300 \text{ K}$ ，代入，可得

$$c = 348 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

和測量值只差 0.3%。

## 21-7 波運動的能量

1. 波會傳播能量，以弦上的橫波為例，弦上某一點對其右側的點施一橫向力

$$F_y = -S \frac{\partial y}{\partial x}$$

功率

$$P = F_y v = -S \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial t} \right)$$

設波長為正弦波,

$$y(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$

可得出  $p = S k \omega A^2 \cos^2(\omega t - kx)$

由  $\omega = ck, c^2 = \frac{s}{\mu}$

可寫作  $p = \sqrt{\mu s} \omega^2 A^2 \cos^2(\omega t - kx)$

其平均值  $P_{av} = \frac{1}{2} \sqrt{\mu s} \omega^2 A^2$

2. 波每單位截面積的功率, 稱為強度,

$$I = \frac{1}{2} \sqrt{\rho B} \omega^2 A^2 \quad (\text{對管中的流體})$$

$$= \frac{1}{2} \sqrt{\rho Y} \omega^2 A^2 \quad (\text{對固體棒})$$

## 問 題

21-1 “波”這個字, 在日常用語中有很多種意義。想出幾種來, 且討論其與本章使用這字的精確物理意義的關係。

☒ 如“波及”, 如“眼波”, “秋波”, 如“波濤”等。只有“波濤”是以水波現象作形容, “波及”是以波的傳播來形容, 其他和波的物理意義無直接相關。

21-2 那種能量和拉緊的弦上之波相關? 如何由實驗來偵測此能量?

☒ 此能量為機械能, 包括動能和位能的轉換。可以在弦上連上一質點, 當波動時, 質點會上下運動, 可知有能量的傳播。

21-3 拉緊的弦上可能有縱波嗎? 鋼棒上會有橫波嗎?

☒ 因弦上質點一般說來不能在弦的長度方向上運動, 故不會有縱波。而鋼棒上的質點可以前後或橫向運動, 故可以有縱波和橫波。

21-4 空氣中的聲速和溫度有關, 而光速則否, 為什麼?

☒ 因空氣的密度和壓力都和溫度有關, 而聲速又和這些相關。

而光（電磁波）在空氣中的速度只和空氣的折射率有關。空氣的折射率受溫度影響不太大。

21-5 對本章中討論的波動，其傳播速度和振幅有關嗎？

答 在振幅很小時，波速和振幅無關。但振幅大時，弦上的波，水波，棒上的波其速度都會和振幅有關。

21-6 小孩作玩具電話，是把一條長線兩端穿過紙杯底部的孔，且打結避免線拉出。線拉緊時，聲音可自紙杯傳到另一個紙杯，為什麼可以這樣作？為什麼所傳遞的聲音比同一距離空氣中所傳遞的聲音更響？

答 因聲波使杯中的空氣振動，又帶動紙杯底部及黏在上面的線，使弦上張力起伏振動，使另一端的線頭，杯底、空氣也跟着振動。這是將聲波能量局限在繩上，使其不散至空氣中，故傳到的能量較大，因而較響。

21-7 回聲是聲音自遠處物體，如牆壁或岩壁，反射回來。解釋你如何由回聲的時間來決定你與物體的距離。

答 聲波由目標物反射再回到你的耳朵時，聲波所走的距離等於你和物體距離的兩倍，故（回聲時間×聲速）/ 2 即為你和物體間的距離。

21-8 為什麼你先看見閃電而後聽到雷聲？一熟悉的經驗法則是，當你看到閃電時，慢慢地數數目，每秒一次，直到你聽到雷聲時，將所數得的數除以 5，就可得到你和閃電間的距離（哩）。為什麼這樣作？或這樣作可以嗎？

答 因光波速度比聲波速度大得多，故先見到閃電再聽到雷聲。因光的速度非常快，故可以不計它傳播到眼睛的時間。聲波的速度約  $340 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；乘以 5，約為  $1700 \text{ ms}^{-1}$ ，約等於一哩（1609m），故可用這種方式來計算，大約估計出閃光到我們之間的距離。

21-9 雖然事實上海浪由不同方向而來，但海浪到達海灘時，波浪總是幾乎平行於海岸，為什麼？

答 因水波的波速受水的深淺影響，水深處行進較快，因此水波

會向海岸線而彎曲，故感覺上波浪幾乎是平行於海岸的。

**21-10** 海浪到達岸邊時振幅會增加，而浪頂會捲起而後碎開。爲什麼會如此？

☞ 海浪到達岸邊時，因爲不能再向前傳播，故波的能量會疊加起來；使振幅增加。而浪頂受到的阻力比底部小，故浪頂會超過浪底，形成捲起來的樣子。繼而散落。

**21-11** 把石頭丟到池塘裡，會激起圓形漣漪，一圈圈向外擴散，漣漪的振幅會因遠離中心而逐漸縮小。爲什麼？

☞ 因波傳播範圍擴大，波前長度就增加。波前每一單位長度上所能分配到的能量就減小，故波的振幅也越來越小。

**21-12** 高傳真音樂再生的喇叭系統裡，高音喇叭爲何總比低音喇叭小？

☞ 因高頻聲波的波長短。在小的喇叭上形成共振的特性波長也較短，故可以把高頻部分加強地播放出來。低頻則相反。且低音要鼓動大量的空氣作大振幅的振動，這要喇叭面積較大才能作到。

**21-13** 聲音自空氣傳到水中時，其頻率，波長，及速率會改變嗎？

☞ 聲音由空氣進入水中，是由疏介質進入密介質，故頻率不變，速率增加，波長變長。

**21-14** 用來描述正弦型波的量中，那一個跟音高關係最密切？和響度關係最密切的呢？

☞ 頻率與音高相關，和音高成正比。振幅和響度相關，振幅大的，則響度強。

**21-15** 由不同的樂器（如橫笛，雙簧管）發出的樂音，可能具有相同的音高和響度，但聽起來卻不相同。用物理術語來說，不同的是什麼？

☞ 兩樂器音質（或稱音色）不一樣，其主要原因是不同樂器發出同一音時，其相關諧音的強度分布（稱爲“頻譜”）不同，或說其泛音強度不同。

20°C 的空氣中，聲速為  $344 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 習題

- E21-1 (a) 一聲波頻率為 32 Hz，這是中型管風琴最低的音，其波長為何？  
 (b) 波長 1.22 m (4 ft)，其頻率為何？這近似對應於鋼琴中音 C 上的 D 音。

解 由  $C = \lambda f$

$$(a) \lambda = C / f = 344 / 32 = 10.8 \text{ m}$$

$$(b) f = C / \lambda = 344 / 1.22 = 282 \text{ Hz}$$

- E21-2 真空中的無線電波其波速（等於光速）為  $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。  
 試求下列波長：

(a) 頻率 1000 kHz 的調幅廣播電台；

(b) 頻率 100 MHz 的調頻廣播電台。

解 (a)  $\lambda = c / f = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / 1 \times 10^6 \text{ Hz} = 3 \times 10^2 \text{ m}$

$$(b) \lambda = c / f = 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} / 100 \times 10^6 \text{ Hz} = 3 \text{ m}$$

- E21-3 若振幅夠大，人耳能感覺的縱波範圍，約自 20 Hz 到 20,000 Hz。對下列情況計算此二頻率的波長。

(a) 空氣中的波 ( $C = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )；

(b) 水中的波 ( $C = 1480 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

解 (a) 由  $\lambda = c / f$

$$\begin{aligned} \text{在空氣中 } \lambda_1 &= \frac{345}{20} = 17.2 \text{ m}, \lambda_2 = \frac{345}{20000} \\ &= 0.0172 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (b) \text{在水中, } \lambda_1 &= \frac{1480}{20} = 74.0 \text{ m}, \lambda_2 = \frac{1480}{20000} \\ &= 0.0740 \text{ m} \end{aligned}$$

- E21-4 揚聲器發出的聲波波長比其直徑大時，會幾乎均勻地向所有方向傳播，而波長比揚聲器直徑小時，大部分聲音能量都聚集向前方。揚聲器直徑為 25 cm，計算在空氣中，聲波波長

爲(a)揚聲器直徑的10倍；(b)等於揚聲器直徑；(c)揚聲器直徑的1/10倍時的聲波頻率， $c = 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

解 (a)  $\lambda_1 = 10 \times 25 \text{ cm} = 2.5 \text{ m}$

$$f_1 = \frac{c}{\lambda_1} = \frac{345}{2.5} = 138 \text{ Hz}$$

(b)  $\lambda_2 = 25 \text{ cm} = 0.25 \text{ m}$

$$f_2 = \frac{c}{\lambda_2} = \frac{345}{0.25} = 1380 \text{ Hz}$$

(c) 當  $\lambda_3 = \frac{1}{10} \times 25 \text{ cm} = 0.025 \text{ m}$

$$f_3 = \frac{c}{\lambda_3} = \frac{345}{0.025} = 13800 \text{ Hz}$$

E21-5 證明(21-4)式可以寫成

$$y = -A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct)$$

$$\begin{aligned} \text{解 } y(x, t) &= A \sin 2\pi \left( \frac{t}{\tau} - \frac{x}{\lambda} \right) \\ &= A \sin \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{\lambda}{\tau} t - x \right) \\ &= A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (f\lambda t - x) \\ &= A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x) \\ &= A \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \end{aligned}$$

E21-6 某行進橫波的方程式爲

$$y = 2 \sin 2\pi \left( \frac{t}{0.01} - \frac{x}{30} \right),$$

$x$  及  $y$  以  $\text{cm}$  爲單位， $t$  以  $\text{s}$  爲單位。波的(a)振幅，(b)波長，(c)頻率，(d)傳播速率爲何？

解 (a) 由  $y = 2 \sin 2\pi \left( \frac{t}{0.01} - \frac{x}{30} \right)$

振幅為 2 cm

(b) 因波函數可寫作  $y = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{\tau} - \frac{x}{\lambda} \right)$

$$\frac{x}{\lambda} = \frac{x}{30} \quad \therefore \text{波長 } \lambda = 30 \text{ cm}$$

(c) 由(b)中知  $f = \frac{1}{\tau}$ ，故  $f = \frac{1}{0.01} = 100 \text{ Hz}$

(d) 傳播速率  $= c = f\lambda = 100 \times 30 = 3000 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$

**E21-7** 在弦上行進的一橫波可以 E21-5 中的方程式表示。令  $A = 8 \text{ cm}$ ， $\lambda = 16 \text{ cm}$ ，及  $c = 2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(a) 在時間  $t = 0$  時，就  $x = 0$  到  $x = 32 \text{ cm}$ ，以 2-cm 的  $x$  間隔（即在  $x = 0$ ， $x = 2 \text{ cm}$ ， $x = 4 \text{ cm}$  等等）計算橫向位移  $y$ 。把結果畫在圖上，這就是  $t = 0$  時弦的形狀。

(b) 以相同的  $x$  值，在時間  $t = 1 \text{ s}$ ， $t = 2 \text{ s}$ ， $t = 3 \text{ s}$  及  $t = 4 \text{ s}$ ，重複計算。將這些瞬間弦的形狀繪於相同的圖上。波向那個方向行進？

解  $y(x, t) = -8 \sin \frac{2\pi}{16} (x - 2t)$

$$= -8 \sin \frac{\pi}{8} (x - 2t)$$

(a)  $t = 0$

$$y(x, 0) = -8 \sin \frac{\pi x}{8}$$

代入計算



t	0	2	4	6	8	10	12	14	16
x	0	$-4\sqrt{2}$	-8	$-4\sqrt{2}$	0	$4\sqrt{2}$	8	$4\sqrt{2}$	0

t	18	20	22	24	26	28	30	32
x	$-4\sqrt{2}$	-8	$-4\sqrt{2}$	0	$4\sqrt{2}$	8	$4\sqrt{2}$	0

(b) 仿(a)計算可得。其圖類似課本圖 21-3。波向正 x 方向行進。

**E21-8** 6 m 長的鋼線，0.060 kg 質量，以 1000 N 的張力拉緊。在此線上的橫波傳播速率為何？

解 此線線密度  $\mu = \frac{0.060}{6} = 0.010 \text{ kg/m}$ ，故此線上橫波傳播速度

$$c = \sqrt{\frac{S}{\mu}} = \sqrt{\frac{1000}{0.010}} = 316 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

**E21-9** 水平弦的一端繫在電動音叉上，其振動頻率為 240 Hz。弦另一端跨過滑輪，吊著 5 kg 的物塊，弦上的線密度為  $0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

(a) 弦的橫波速率為何？

(b) 波長為何？

解 (a) 弦的張力  $T = 5 \times 9.8 = 49.0 \text{ N}$

弦上橫波速率為

$$c = \sqrt{\frac{S}{\mu}} = \sqrt{\frac{49.0}{0.02}} = 49.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

(b) 由  $f = \frac{c}{\lambda}$

$$\text{波長 } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{49.5}{240} = 0.206 \text{ m}$$