

物理學

第二冊

Sears 原著

王子昌譯

龍門聯合書局出版

物 理 學

Principles of Physics

第 二 冊

流體力學·熱學·聲學

F. W. Sears 原著

王 子 昌 譯

門 聯 合 書 局 出 版

本書係美國 F. W. 席爾斯教授所編。原書共分三冊,第一冊包括力學、熱學和聲學,於 1944 年出版。本書內容是原書的第一冊流體力學、熱學和聲學部份:流體靜力學和表面張力、流體動力學和粘滯性、溫度和膨脹、熱量、熱的轉移、相的變化、理想氣體、實際氣體、熱力學第二定律、氣體分子運動論、波動學、弦和氣體的振動、聲波等十三章。

本書可作理工大專同學以及中等學校、師範學校、中等技術學校教師的參考資料。

物 理 學

第 二 冊

F. W. Sears 原著

王 子 昌 譯

★ 版權所有 ★

龍 門 聯 合 書 局 出 版

上海市書刊出版業營業許可證出 029 號

上海茂名北路 300 弄 3 號

新 華 書 店 總 經 售

新 中 央 印 刷 所 印 刷

上 海 康 定 路 158 號

開本: 787×1092 1/23 印數: 11,701—12,200 冊

印張: 10 2/23

1951 年 11 月 第 一 版

字數: 161,000

1955 年 8 月 第 七 次 印 刷

定價: (8) 一元四角二分

目 錄

第十六章	流體靜力學和表面張力	289
16-1.	引言	289
16-2.	流體的壓力	289
16-3.	壓力計	292
16-4.	阿基米德原理	294
16-5.	船舶的穩度	295
16-6.	流體靜力學的佯謬	296
16-7.	作用於水壩的力	297
16-8.	表面的物理學	298
16-9.	表面張力係數	300
16-10.	接觸角	304
16-11.	毛細現象	304
16-12.	表面張力的另一論述	306
16-13.	皂泡內外的壓力差	308
16-14.	液滴的形成	308
16-15.	表面張力和表面能	310
	第十六章 習題	311
第十七章	流體動力學和粘滯性	314
17-1.	流線流動	314
17-2.	柏努利等式	315
17-3.	管子的放流率	317

17-4.	柏努利等式的應用.....	318
17-5.	粘滯性	322
17-6.	史托克斯定律.....	327
17-7.	粘滯流體在管中的流動.....	328
17-8.	泊謨葉定律的導出.....	329
	第十七章 習題.....	331
第十八章	溫度——膨脹.....	335
18-1.	溫度.....	335
18-2.	溫度計.....	335
18-3.	溫標.....	336
18-4.	其他計溫法.....	338
18-5.	線膨脹.....	341
18-6.	面膨脹和體膨脹.....	343
18-7.	熱應力.....	345
	第十八章 習題.....	346
第十九章	熱量.....	349
19-1.	熱、能的一種形式.....	349
19-2.	熱量.....	350
19-3.	熱的功當量.....	351
19-4.	熱容量。比熱.....	352
19-5.	量熱學.....	354
19-6.	燃燒熱.....	356
19-7.	內能.....	357
	第十九章 習題.....	358
第二十章	熱的轉移.....	360
20-1.	傳導.....	360

20-2.	經過複壁的熱流.....	363
20-3.	經過一圓筒形管套的熱流.....	364
20-4.	運流.....	365
20-5.	輻射.....	366
20-6.	史忒藩定律.....	367
20-7.	理想輻射體.....	368
	第二十章 習題.....	370
第二十一章	相的變化.....	372
21-1.	相的變化.....	372
21-2.	因體積改變而做的功.....	375
21-3.	溶質對於凝固點和沸點的影響.....	378
21-4.	熔解熱和汽化熱的測定.....	379
	第二十一章 習題.....	380
第二十二章	氣體的性質——理想氣體.....	382
22-1.	波義耳定律.....	382
22-2.	給呂薩克定律.....	384
22-3.	理想氣體的物態方程式.....	386
22-4.	氣體的內能.....	390
22-5.	氣體的比熱.....	391
22-6.	內能和熱.....	395
22-7.	絕熱過程.....	396
22-8.	氣體的壓縮係數.....	399
	第二十二章 習題.....	401
第二十三章	實際氣體.....	404
23-1.	氣體的液化.....	404

23-2.	壓力對於液體的沸點和凝固點的影響.....	408
23-3.	克勞修斯-克拉拍龍方程式.....	409
23-4.	濕度.....	412
23-5.	威爾遜雲室.....	414
23-6.	熱力面.....	415
23-7.	范德伐耳物態方程式.....	416
	第二十三章 習題.....	417
第二十四章 熱力學第二定律.....		419
24-1.	熱力學第二定律.....	419
24-2.	內燃機.....	422
24-3.	狄塞爾機.....	423
24-4.	蒸汽機.....	424
24-5.	噶爾諾機.....	425
24-6.	致冷機.....	427
24-7.	熵.....	429
24-8.	熵增加原理.....	431
24-9.	愷氏絕對溫標.....	434
	第二十四章 習題.....	435
第二十五章 氣體分子運動論.....		437
25-1.	理想氣體定律的導出.....	437
25-2.	比熱.....	441
25-3.	布朗運動.....	444
25-4.	平均自由程.....	444
25-5.	氣體的粘滯性.....	446
25-6.	麥克斯韋-波爾茲曼的分子速率分佈.....	448
	第二十五章 習題.....	449

第二十六章	波動學	450
26-1.	引言	450
26-2.	絃上的橫波	450
26-3.	傅立葉級數	455
26-4.	波的方程式	456
26-5.	氣體中的聲波	459
26-6.	聲波中的壓力變化	464
	第二十六章 習題	466
第二十七章	絃和氣柱的振動	468
27-1.	邊界條件	468
27-2.	駐波	470
27-3.	二端固定的絃	473
27-4.	膜和板的振動	475
27-5.	氣柱中的駐波	476
27-6.	拍音	478
27-7.	合音	480
	第二十七章 習題	481
第二十八章	聲波——耳和聽覺	483
28-1.	強度	483
28-2.	強度級。分裴耳	485
28-3.	耳和聽覺	487
28-4.	都卜勒效應	493
28-5.	聲波的反射	495
28-6.	室內的聲學。交混回響時間	497
28-7.	聲波的折射	499

28-8.	聲波的干涉.....	499
28-9.	聲波的繞射.....	501
	第二十八章 習題.....	502
附錄	三角函數表.....	504
索引		

第十六章

流體靜力學和表面張力

16-1 引言。“流體靜力學”祇討論靜止的流體的問題；關於運動的流體的研究，則屬於“流體動力學”範圍內。流體動力學的一部份，專論空氣和其他氣體流動的，稱為“氣體動力學”。

流體是指會流動的物質，包括液體和氣體。液體的形狀雖隨容器而改變，但有一定的體積。氣體盛於容器內時，不論該器大小如何，恆充滿它的全容積。液體和氣體最顯著的差別是它們的壓縮係數的不同，氣體很易壓縮，而液體實際上則幾乎是不能壓縮的。本章內對於液體由壓力而產生的微小體積變化，通常都略去不計。

各種流體在粘滯性方面亦彼此不同，粘滯性是表示流體流動難易的程度。氣體的粘滯性極微小。液體如水、酒精和煤油等的粘滯性，遠小於甘油、蜜糖或重油的。像瀝青這種物質是介於液體和固體之間。一塊瀝青受到衝擊會像固體一樣地破碎，但若把它放在一平面上，它就會慢慢地展延開來，成為一薄片。這種物質可當作粘滯性極大的液體看待。現在我們先假定液體是無粘滯性和不可壓縮的。

16-2. 流體的壓力。貯藏在容器內的流體（液體或氣體）有力作用於容器的四壁，按照牛頓第三定律，器壁有反向的力作用於器中的流體。在任何一點的壓力的大小，是作用於包含該點的微小面積 dA 上的力 dF 和 dA 的比值。

$$p = \frac{dF}{dA}, \quad dF = p dA. \quad (16-1)$$

在我們所用的三種單位制中，壓力是以磅/呎²、牛頓/米²或達因/厘米²來表示。

當流體保持靜止時，它作用於任何一微小部份器壁的力，都和壁面垂直，故器壁作用於流體的反作用亦必和壁面垂直。此可由流體不能永久承受切應力來解釋之。任何側面的或沿切線方向的力，由器壁加於流體，即會造成一個切應力，使流體沿器壁流動。若流體為靜止的，即無此種流動，因之不會有沿切線方向的力，所以在流體表面上各點的作用力都和面正交。

以上的論述，對於流體內任何一假想面，都可適用。在流體內，任何方位的一小立方形流體的各面上都受到向內的正交力。因之，此立方形流體在每一面上都有正交力作用於其四周的流體。在流體內各處都有應力作用。此種應力和受壓的桿中的縱向應力頗為相似，但亦略有不同之處，主要的是：在流體內任何一假想面上的力，不論該面的方位如何，都和該面正交。我們常說“流體內的壓力沿所有方向作用”，就是這個意義。雖然壓力不是矢量，與方向並無關係，但在任一平面一邊的流體對另一邊流體所作用的力，不論該平面的方位如何，總和該面正交。

大氣壓力隨高度增加而漸減，和湖沼或海洋中的壓力隨深度而增加，都為熟知的事實。現在我們要求在一流體內壓力和高度的關係。任何一極小矩體形的流體（圖 16-1）都在四周流體所施於每一面上的向內力和本身的重量作用下成平衡。作用於每一對面上的水平向的力

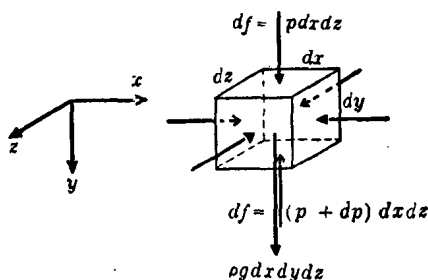


圖 16-1. 作用於一部份流體的力。

顯然是相等而相反，但作用於底面的向上力必須足夠和作用於頂面的向下力以及矩體內流體的重量相平衡。令 p 代表在頂面上的壓力， $p+dp$ 代表在底面上的壓力， dx 、 dy 和 dz 各代表一邊的長， ρ 代表流體的密度。由平衡條件，

$$(p+dp)dx dz = p dx dz + \rho g dx dy dz.$$

展開後，將等號兩邊相同的項消去，得

$$dp = \rho g dy, \quad (16-2)$$

此式為表示壓力隨高度而變化的基本式。（ y 坐標以向下為正。）式中 ρg 是流體單位體積內的重量，或流體的“重度”。

現在應用此等式來計算液面下一點的壓力，此液體是貯在開口的水槽內（圖 16-2）。若液體是不可壓縮的，則其密度 ρ 和 p 與 y 無關，為一常數，因之上式很易積分，得

$$p = \rho g y + C,$$

C 為一積分常數。若令 p_0 表示在液體頂面上的壓力，該處 $y=0$ ，則 $p_0 = C$ 和

$$p = p_0 + \rho g y. \quad (16-3)$$

亦即，在液面下任何一深度 y 處的壓力 p 是等於在液面的壓力 p_0 加以“重度”和深度的乘積。注意，容器的形狀不影響壓力，並且在液面下同深度各點的壓力都相等。由 (16-3) 等式更可推知，若壓力 p_0 由任何方式增加，譬如在容器上面添裝一活塞，將液面的壓力加大，則在任何深度的壓力 p 亦必等量地增加。此事實 在 1653 年首先由法國的科學家巴斯噶 (1623—1662) 發現，一般稱為“巴斯噶定律”。此定律常陳述如下：“作用於一完全封閉的液體面上的壓力，立即毫不減小地傳遞到該液體中的每一部份，和容器的四壁”。現在我們已知，這並非一有獨立性的原理，而為力學定律的一必然結果。

其次我們應用 (16-2) 等式來計算大氣的壓力。為更便利起見，將原點規定在地面上，並且令 Y -軸以鉛直向上為正，所以 (16-2) 等式變

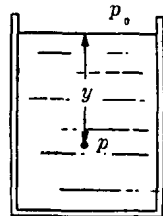


圖 16-2.
開口水槽內的
靜止液體。

爲

$$dp = -\rho g dy.$$

氣體是有壓縮性的流體，其密度依氣體定律(參閱 22-3 節)隨壓力和溫度而改變。

$$\rho = \frac{pM}{RT},$$

式中 p 是壓力， M 是分子量， T 是絕對溫度，和 R 是一普用常數。所以對於一氣體，

$$dp = -\frac{pMg}{RT} dy,$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{Mg}{RT} dy.$$

若假定大氣的溫度不隨高度而改變(事實並非如此)，則

$$\ln p = -\frac{Mgy}{RT} + C.$$

若以 p_0 表示地面上的大氣壓力，該處 $y=0$ ，則 $\ln p_0 = C$ 和 $\ln \frac{p}{p_0} = -\frac{Mgy}{RT}$ ，或

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgy}{RT}}. \quad (16-4)$$

此式有時稱爲“氣壓等式”。

16-3. 壓力計。 最簡單的壓力計是開管流體壓力計，如圖 16-3 所示。圖中 U 型管內貯有液體，管的一端和所要測量的壓力， p ，的地方相連通，他端開向大氣。U 管的最低點可看作管中二液柱的底端。在該點由於左面液柱所產生的壓力是

$$p + \rho g x,$$

由於右面液柱所產生的是

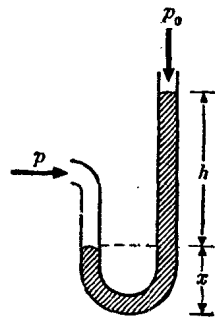


圖 16-3.
開管流體壓力計。

$$p_0 + \rho g(x+h)$$

(ρ 是流體壓力計中液體的密度)。因爲此二壓力是對同一點而言，它們應當相等。因之

$$p + \rho g x = p_0 + \rho g(x+h),$$

$$p - p_0 = \rho g h. \quad (16-5)$$

所以液柱的高度差正比於壓力 p 和大氣壓力 p_0 二者的差。此差， $p - p_0$ ，稱爲計示壓力，而壓力 p 則爲絕對壓力。

水銀氣壓計就是一 U 型管，一臂的頂端是固封的，且抽成真空，使該臂頂端的壓力爲零（圖 16-4）。我們很易證明

$$p_0 = \rho g h, \quad (16-6)$$

式中 p_0 是大氣壓力， h 是氣壓計兩臂中水銀柱的高度差。因爲壓力是和 h 成正比例，在習慣上常以水銀柱的高度來表示大氣壓力（其他壓力亦常如此表示），例如，若干“吋水銀柱高”，或“厘米水銀柱高”。但“1 吋的水銀柱”不是一壓力單位（壓力是力和面積的比）。

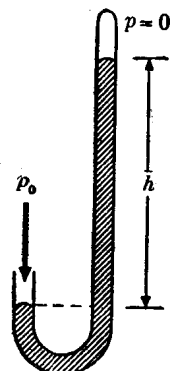


圖 16-4. 氣壓計。

【例題】 當氣壓計中水銀柱的高度是 76.0 厘米時，試求此時的大氣壓力。

由 (16-6) 等式可知水銀柱的高度非但和大氣壓力，且和 ρ 與 g 有關。因此我們必須知道水銀的密度和所在地的重力加速度。密度隨溫度而變， g 隨緯度和距海平面的高度而變。所有精密的氣壓計都附裝一溫度計和一表格，以備查考而作由於溫度和高度而起的必需的改正。若假定 $g = 980$ 厘米/秒²，和 $\rho = 13.6$ 克/厘米³，則

$$\begin{aligned} p_0 &= \rho g h = 13.6 \times 980 \times 76 \\ &= 1,013,000 \text{ 達因/厘米}^2. \end{aligned}$$

(約每平方厘米一百萬達因。)

在英制中，

$$\begin{aligned} 76 \text{ 厘米} &= 30 \text{ 吋} = 2.5 \text{ 呎}, \\ \rho g &= 850 \text{ 磅/呎}^3, \\ p_0 &= 2120 \text{ 磅/呎}^2 = 14.7 \text{ 磅/吋}^2. \end{aligned}$$

1.013×10^6 達因/厘米²，或 14.7 磅/吋² 的壓力稱為 1 大氣壓。每平方厘米一百萬達因的壓力稱為 1 巴⁽¹⁾，一千分之一巴的壓力稱為 1 毫巴。即，1 巴 = 1,000 毫巴。地面上的大氣壓力約 1,000 毫巴左右。目前各國氣象局中都用毫巴表示大氣壓力。

鮑敦式壓力計有時要比流體壓力計更為便利。其主要部分為一端封閉且彎成環形的黃銅管。用大小齒輪將管的閉端和一可在標尺上轉動的指針相連接。管的開端和要測量壓力的地方相連通。當管內有壓力時，管即稍為伸直，此正和彎曲的消防橡皮管中注入水後要稍為伸直的情形一樣。銅管閉端就將如此所得到的運動傳遞給指針。

16-4. 阿基米德原理。 一物體的全部或一部沒入流體中，該物體即要被流體浮起，或其視重減輕。和巴斯噶原理一樣，這種效果的解釋可直接由力學定律推得，而且這與流體的任何特性無關。圖 16-5 表示一高為 h ，截面為 A 的直圓柱體，沈沒於密度為 ρ 的流體中。流體作用於柱體的諸水平力是一平衡力系，因此不在圖中示出。作用於柱體頂面的向下力 F_1 是

$$F_1 = p_1 A = (p_0 + \rho g x) A,$$

式中 x 為頂面在流體表面下的深度。同樣，

$$F_2 = p_2 A = [p_0 + \rho g (x + h)] A.$$

作用於柱體的向上淨力，或浮力，為

$$F_2 - F_1 = \rho g h A.$$

但 hA 是物體的體積， ρg 是每單位體積流體的重量。因此， $\rho g h A$ 即為與物體等體積的流體的重量，或，如一般所稱的，“排開的流體的重量”。所以

一物體浸沒在流體中所受到的浮力等於它所排開的流體的重量。

此即阿基米德原理。雖然這原理是從直圓柱體這特殊情形導出，

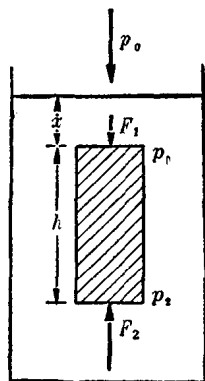


圖 16-5.
浮力等於排開流體的重量。

(1) 在聲學方面有時採用“巴”表示 1 達因/厘米² 的壓力。

但亦不難證明，對於任何形狀物體同樣適用。傳說，阿基米德（紀元前 287—212）因欲解決 Hero 皇帝的皇冠是否為純金所製一問題時，而發現了這個關係。

若物體沒有全部浸沒於流體中，浮力是等於和物體浸沒部份同體積的流體的重量。如物體逐漸下沉，在已達到排去和其重量相等的流體時，則物體即可停留在這位置。若尚未到達這狀態，則繼續下沉；若超過時，則上浮。

應用靈敏的分析天平“稱”物體時。如物體和砝碼（大抵用黃銅做的），二者密度相差懸殊，則必須將空氣浮力的影響計入。例如，一密度為 0.4 克/厘米³ 的木塊在等臂天平上和密度為 8.0 克/厘米³ 的黃銅砝碼 20 克平衡。每一物體的視重為其實重和空氣浮力的差。設 ρ_w 、 ρ_b 和 ρ_a 各為木塊、黃銅和空氣的密度， V_w 和 V_b 各為木塊和砝碼的體積，它們的視重相等，所以

$$\rho_w V_w g - \rho_a V_w g = \rho_b V_b g - \rho_a V_b g.$$

木塊的質量為 $\rho_w V_w$ ，以及砝碼的質量為 $\rho_b V_b$ 。因之，

$$\text{木塊的質量} = \rho_b V_b + \rho_a (V_w - V_b).$$

$$= \text{砝碼的質量} + \rho_a (V_w - V_b).$$

在此例題中，

$$V_w = \frac{20}{0.4} = 50 \text{ 厘米}^3, \text{ (極近似地)}$$

$$V_b = \frac{20}{8} = 2.5 \text{ 厘米}^3, \quad \rho_a = 0.0013 \text{ 克/厘米}^3.$$

因之 $\rho_a (V_w - V_b) = 0.0013 \times 47.5 = 0.062$ 克。

木塊的質量 = 20.062 克。

若所稱的質量要準確到 1 克的千分之一，則顯見這千分之 62 的改正不可忽略。

16-5. 船舶的穩度。 阿基米德原理只表明浮力的大小，而未曾論及它的作用線。我們可以證明該作用線是經過排開流體的重心。此

對於浮體如船艦等的穩度有極重大的意義。圖 16-6 表示船身在平時和在側傾時的截面。重量 w 和浮力 B 合成一力偶，其作用為使船回到平正位置。

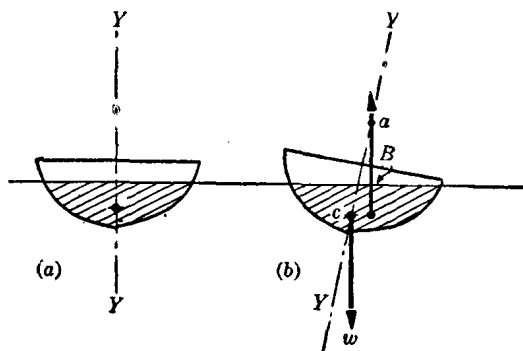


圖 16-6. 作用於船舶的力， a 點是定傾中心。

浮力作用線和 YY 線的交點 a 稱為定傾中心，距離 ca 稱為定傾中心的高度。定傾中心高度愈大，穩度愈大。使船身回復平正位置的力偶是與船身懸於定傾中心時所受到的正相同。

若 B 的作用線和 YY 線相交於重心的下面，船身即不穩定而將傾覆。

16-6. 流體靜力學的佯謬。 若有許多形狀不同的容器互相連通，如圖 16-7 所示，注入液體後，各容器中的液面等高。在未完全了解流

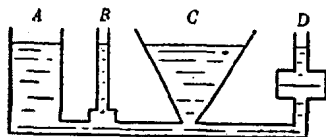


圖 16-7. 在各容器中液面等高。

體靜力學各原理時，這似乎是一個很使人迷惑的現象，因之稱為“流體靜力學的佯謬”。初看時，容器 C 底面所受到的壓力好像應比容器 B 底面所受到的為大，而液體將受迫由 C 流入 B 中。

但 (16-3) 等式表明壓力僅和液面下的深度有關，而和容器的形狀