

物理基礎觀念

第2冊

吳友仁編



東江圖書公司印行

G633.7
883
2

016354

物理基礎觀念

第二冊

吳友仁編

國立師範大學物理系教授



東江圖書公司印行

實施的

王課教



S9000140

理科數

的煩惱。



版權所有・翻印必究

中華民國七十五年一月初版

物理基礎觀念 (全四冊)

第二冊 新臺幣玖拾元整

(外埠酌加運費滙費)

編者	吳友仁
發行人	朱世衡
出版者	臺灣東江書局股份有限公司 臺北市博愛路一〇五號 郵撥：00064813

印刷者 合興印刷廠

行政院新聞局登記證 局版臺業字第三〇八六號
(75010)

編輯大意

- 一、本書旨在：(一)紓解修習高中物理學生所遭遇的困難。(二)供應教授物理的高中教師教學所需的資料。
- 二、本書編撰方式與體裁與教科書有別，未必適合作為教科書之代用品。但編者認為適當應用，對學習者與授課者均當有所助益。
- 三、初涉物理的學生，通常多存有不少先入為主、自以為是或“想當然耳”的錯誤觀念，乃致在學習過程中感受到百思不解、莫名其妙之困惑；若指導不當，則易患囫圇吞棗、不求甚解的通病。最後，不得不以強記、背誦作為痛苦學習的方式。以故，本書在各個單元中，除對觀念之闡釋特求詳盡、明瞭之外，對容易發生誤解之處所，特以“舛誤辨正”方式指明必須澄清改進的錯誤想法，期以導正學習者之思考路線，使能順暢習研，無有扞格。
- 四、本書既非“題庫”，亦非“聯考必讀”，所列習題與例解，均特選其對教材了解有所幫助者，按序編列。教師可自行擷選，隨機講授，增進教學效果；學生可隨時演練，再與書中解答部分比對，藉以祛除畏難、倚賴、不知從何著手等的學習心態。
- 五、數學為處理物理問題不可缺少的工具，在“新課程實驗教材物理”第一冊（高二修習）中，即以積分學應用於力學某些部分，但在同時實施的“新課程數學”中，則至高三理科數學中方始列入，致使任課教師與學生有不能“學以致用”的煩惱。事實上，

微分與積分基本原理及運算法則均屬高二學生可以理解的範圍，教師自不妨選摘其中可以應用於物理之部分，作簡略介紹，指導學生作些簡單運算練習，然後應用於物理課程某些章節，常能收事半功倍之益。本書特於附錄中列作參考資料，以資教師選用。

六、書中有關平面三角、解析幾何中平面曲線等數式，學生或已於高一時修習，或在高二與物理平行修習，本書亦將其運算公式提要等一併列於附錄中，以便翻閱參考。

七、新課程標準中將近代物理部分，如相對論、量子力學、基本粒子等列入教材大綱。本書針對高中學生理解力所能達到之範圍作簡明淺顯之敘述與譬喻，使學生雖尚未能登其堂奧，却可略窺其理論概要，作為現代國民所應具有的科學常識。

八、新課程規定物理等科目每週授課時數為3小時（包括實驗），估計進度，恐難如期達成。若能令學生在課前先行預習，則教師在講授時，僅需提綱挈領，對其中較難了解之部分指導其思考方法，則課程進行自感通暢順適；進而督促複習演練，使能充足消化吸收。本書循此方向設計，文字力求淺顯，說理力求明白；學生自行閱讀，對學理觀念當可領悟其大略，復經指導、複習，必能融會貫通，舉一反三，油生興味。

九、本書編撰前，參閱國內歷年教科用書並參考英、美、日、港及新加坡等國外同類書籍十數種，在練習題中並擷選近年國內大專聯考試題。學生若認真演練，必有成就。

十、本書編撰過程中，承出版書局編輯部特聘助理編輯李宏珠小姐專責為本書蒐集資料，選演習題，整理並校繕稿件，特表謝忱。

十一、本書編校匆促，謬誤難免，至祈教學同仁隨時賜正，俾作修訂參考，至深感禱。

目 次

第六章 功和力學能	1
(一) 教材大綱	1
6.1 功	1
6.2 合力與分力所作之功	3
6.3 能與力學能	3
6.4 動能	3
6.5 位能	3
6.6 力學能的守恆	4
6.7 彈性碰撞	5
6.8 非彈性碰撞	7
(二) 觀念闡釋	8
(I) 作功的力	8
(II) 位移與力	10
(III) 動能與動量	11
(IV) 碰撞後合為一體之動能	12
(V) 兩物體間之位能	13
(VI) 恢復係數 (反跳係數)	15
(VII) 位能式 $U = -G\frac{Mm}{r}$ 之由來	16
(VIII) 脫離能與束縛能	17
(IX) 在接近地表軌道上運行物體 (人造衛星) 之力學能	20
(三) 舛誤辨正	21
練習(六)	25
練習題(六)解答	39
第七章 轉動	69
(一) 教材大綱	69
7.1 角位移	69
7.2 角速度與角加速度	70
7.3 角量與線量	71

7.4 力矩和動量矩（角動量）	72
7.5 轉動慣量	74
7.6 力矩和動量矩的關係	76
7.7 角動量守恆定律	77
7.8 力矩所作之功與轉動動能	77
7.9 移動（線量）與轉動（角量）各量之類似關係	79
(二) 觀念闡釋	80
(I) 角量的向量表示法	80
(II) 質點和剛體的轉動慣量	80
(III) 力矩和動量的“臂”	81
(IV) 角動量守恆定律與（線）動量守恆定律	82
(V) 質量中心與迴轉半徑	83
(三) 舛誤辨正	84
練習題(七)	88
練習題(七)解答	95
第八章 彈性學	107
(一) 教材大綱	107
8.1 彈性體與剛體	107
8.2 應力與應變，虎克定律	107
8.3 有關彈性的一些名詞	108
8.4 伸長彈性及楊氏係數	109
8.5 切變彈性及切變彈性係數	110
8.6 體積彈性及體彈性係數	111
(二) 觀念闡釋	112
(I) 彈性係數與彈簧的彈力常數（力常數）	112
(II) 應力與應變的關係	113
(III) 張應力與切應力	114
練習題(八)	116
練習題(八)解答	120

第九章 靜止的流體	131
(一) 教材大綱.....	131
9.1 流體力學.....	131
9.2 靜止液體的壓力.....	131
9.3 巴斯噶原理.....	132
9.4 阿基米得原理.....	132
9.5 浮體在水面上下體積之比.....	133
9.6 大氣壓力.....	133
9.7 表面張力.....	134
9.8 接觸角.....	135
9.9 毛細現象.....	136
(二) 觀念闡釋.....	138
(I) 總壓力與壓力.....	138
(II) 靜液中傾斜面的平均壓力.....	138
(III) 同一深度，但不同方向之面積所受壓力.....	139
(IV) 液面受壓力作用時，液內一點的壓力.....	139
(V) 密閉容器內同一液體中，同高度兩點之壓力恆相等.....	140
(VI) 測量大氣壓力的托里切利實驗.....	141
(VII) 接觸角為鈍角時的毛細現象.....	142
(VIII) 阿基米得原理的理論根據.....	143
(IX) 阿基米得原理的引伸——物體在液中浮沈的加速度.....	144
(X) 受浮力作用物體的力學能.....	145
(XI) 浮力與比重的測定.....	146
(XII) 分子力與接觸角.....	147
(XIII) 虹吸管.....	148
(三) 舛誤辨正.....	149
練習題(九).....	154
練習題(九)解答.....	160
第十章 流動的流體	175
(一) 教材大綱.....	175

10.1 穩定流與連續方程式.....	175
10.2 對流體所作之功... 176	10.3 白努利方程式..... 177
10.4 托里切利定理.....	178
(-) 觀念闡釋.....	179
(I) 流體動力學..... 179	(II) 白努利效應的應用..... 179
練習題(+).....	184
練習題(+)解答.....	188
第十一章 氣體的性質與分子運動學說	193
(-) 教材大綱.....	193
11.1 氣體分子模型.....	193
11.2 氣體壓力與理想氣體動力論.....	194
11.3 氣體溫度與分子質心動能.....	194
11.4 波以耳定律.....	195
11.5 理想氣體狀態方程式.....	196
11.6 壓力計..... 197	11.7 平均自由路徑..... 199
(-) 觀念闡釋.....	200
(I) 氣體分子模型.....	200
(II) 分子運動與氣體壓力(氣體動力論)	201
(III) 理想氣體狀態方程式.....	206
(IV) 馬克士威(Maxwell) 分子速率分布律與史特恩(Stern) 的實驗證明.....	207
(V) 平均自由路徑的理論根據.....	210
(VI) 理想氣體——微觀定義.....	212
練習題(十一)	214
練習題(十一) 解答.....	218
第十二章 熱現象與熱能	229
(-) 教材大綱.....	229

12.1 溫度與溫度計.....	229	12.2 定容氣體溫度計.....	229
12.3 熱的單位, 熱容量與比熱.....	230		
12.4 氣體的定容比熱與定壓比熱.....	232		
12.5 固體的熱膨脹.....	233	12.6 線膨脹的熱應力.....	235
12.7 熱的傳播.....	236	12.8 物態變化.....	238
12.9 熱功當量.....	240		
(二) 觀念闡釋.....	240		
(I) 溫度與熱量.....	240	(II) 力學能與位能.....	241
(III) 單原子氣體與多原子氣體分子的動能.....	244		
(IV) 熱流.....	244		
(V) 熱動學第一、第二定律、能量守恆.....	244		
(VI) 熱容量與比熱.....	246		
(VII) 壓力對熔點之影響——復冰實驗.....	246		
(VIII) 液體的膨脹、水的反常膨脹.....	247		
(IX) 溫度不同的兩物體、熱平衡後的共同溫度.....	249		
(三) 舛誤辨正.....	249		
練習題 (十二)	252	練習題 (十二) 解答.....	257

第六章 功和力學能

(一) 教 材 大 綱

6.1 功

功的定義: [功]=[力]×[在力方向上的分位移]

或: [功]=[位移方向上的分力]×[位移]

若以 W 表功, $\vec{F}$ 表力, $\Delta\vec{s}$ 表位移, θ 表力與位移兩向量間之夾角(圖 6-1 (a)及(b)), 則

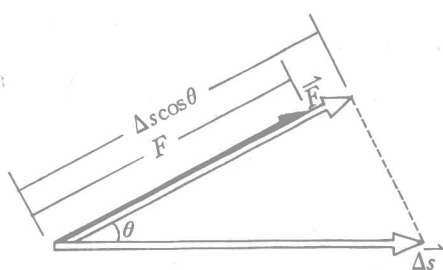
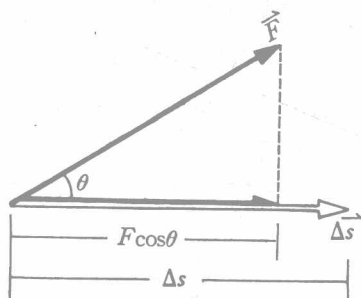


圖 6-1 (a) $W = F(\Delta s \cos \theta)$



(b) $W = (F \cos \theta) \Delta s$

$$W = |\vec{F}| \times (|\Delta\vec{s}| \cos \theta) = F \Delta s \cos \theta$$

或
$$W = (|\vec{F}| \cos \theta) \times |\Delta\vec{s}| = F \Delta s \cos \theta$$

特例:

(1)若: $\theta = 0^\circ$ 則 $W = F \Delta s$

$\theta = 90^\circ$ 則 $W = 0$

2 物理基礎觀念 (二)

$$\theta = 180^\circ \text{ 則 } W = -F\Delta s$$

$$(2) \text{若: } F=0, \Delta s \neq 0 \text{ 則 } W=0$$

$$F \neq 0, \Delta s=0 \text{ 則 } W=0$$

$$F=0, \Delta s=0 \text{ 則 } W=0$$

雖然功的定義中所含力 ($\vec{F}$) 和位移 ($\vec{\Delta s}$) 都是向量，但功卻是純量。所以功可以看作是力和位移兩個向量的“純量積”，亦稱無向積或內乘積，可寫作

$$W = \vec{F} \cdot \vec{\Delta s}$$

在向量的運算裡，上式右邊兩個向量中的圓點“ $\cdot$ ”使運算的結果為純量，而其大小則為 $F\Delta s \cos \theta$ ，式中 θ 表兩向量間的角度。見本書附錄(一)。

若力以牛頓，位移以米為單位，則功之單位為焦耳 (joule)

即 焦耳 = 牛頓 · 米

其基本單位之組成為 (千克 · 米/秒²) · 米 = 千克 · 米²/秒²

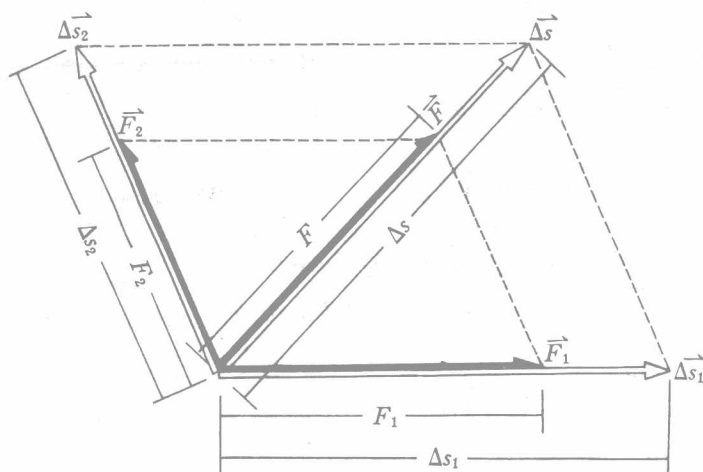


圖 6-2 合力所作之功與分力所作之功

6.2 合力與分力所作之功

[合力所作之功]=[各分力所作功的代數和]

F 表合力, Δs 表合力方向的分位移, F_1, F_2 表其兩分力, $\Delta s_1, \Delta s_2$ 表在兩分力方向之分位移, (圖 6-2) 則

$$F\Delta s = F_1\Delta s_1 + F_2\Delta s_2$$

6.3 能與力學能

可以作功的物理量稱為“能”。所以，能是作功的“本領”。

力學能 (*Mechanical energy* 亦譯機械能) 是能的一種，包括動能 (物體因運動而具有的能) 和位能 (物體因位置或形狀改變而具有的能) 兩種。

能亦為純量，其單位與功同。

6.4 動能

質量為 m ，速度為 v 的物體，其動能 (以 E_k 表之) 為：

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

若物體相對於理想的靜止點而言， $\frac{1}{2}mv^2$ 表物相對於靜止點的動能，若 v 表甲對乙的速度，則 $\frac{1}{2}mv^2$ 表甲對乙所具有的動能。

6.5 位能

(1) 重力位能

(a) 地表附近 (均勻重力場中) 的重力位能

h 表物體高度的改變, m 表物之質量, 則位能為:

$$U = mgh$$

(訂定高度 h 之起算點作位能之“參考水平”，物體在該水平時位能為零)。

4 物理基礎觀念 (二)

(b)空間兩物體間的重力位能

質量為 m 、 M 兩物體相距為 r ，則重力位能為

$$U = -G \frac{Mm}{r} \quad (\text{定 } r = \infty \text{ 時, 兩物間之重力位能爲零。})$$

(2)彈簧的位能

彈力常數為 k 之理想“線性”彈簧，伸張量（或壓縮量）為 x 時，其位能（稱畸變位能）為：

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

6.6 力學能的守恒

摩擦力或空氣阻力等均可將力學能轉變為熱能，若力學能中的位能與動能僅祇互相轉變，而不轉變為其他之能（物體僅受重力、電力、磁力、彈簧恢復力等“保守力”作用，而不受摩擦力、空氣阻力等“非保守力”作用），則力學能的總和 E 為一定值。

$$\text{即 } E = E_k + U = \text{定值}$$

(1)重力位能與動能

$$(a) \text{地表附近: } E = \frac{1}{2}mv^2 + mgh = \text{定值}$$

若 v_1 與 v_2 分別表變化前後之速率， h_1 ， h_2 表變化前後之高度，

$$\text{則: } E = \frac{1}{2}mv_1^2 + mgh_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgh_2 = \text{定值}$$

$$(b) m \text{ 距重力源 } M \text{ 爲 } r \text{ 處: } E = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-G \frac{Mm}{r}\right) = \text{定值}$$

若 r_1 與 r_2 表變化前後與重力源之距離，

$$\text{則: } E = \frac{1}{2}mv_1^2 + \left(-G \frac{Mm}{r_1}\right) = \frac{1}{2}mv_2^2 + \left(-G \frac{Mm}{r_2}\right) = \text{定值}$$

(2)若 x_1 與 x_2 分別表一彈簧不同兩伸張量 (或壓縮量),

$$\text{則: } E = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}kx_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + \frac{1}{2}kx_2^2 = \text{定值}$$

本節所討論者為同一物體在不同速度或不同位置時動、位能之互變, 下兩節討論不同兩質點互相以力作用 (碰撞) 前後, 能量的授受。我們只限於討論動能和動量, 不涉及位能問題。

6.7 彈性碰撞

在第三章 (§3.9) 中提及兩質點碰撞前後動量之和不變。

$$m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$$

$$\text{移項得 } m_1(\vec{v}_1 - \vec{u}_1) = -m_2(\vec{v}_2 - \vec{u}_2)$$

意為: 甲質點動量之變化與乙質點動量之變化等量而反向。

茲僅就一直線而言, 以純量式表之:

$$m(v_1 - u_1) = -m_2(v_2 - u_2) \dots\dots\dots ①$$

今假定兩質點碰撞時, 重力位能均無改變, 又假定碰撞前後, 力學能守恆關係仍能成立, 則兩質點動能之和應為不變。

$$\frac{1}{2}m_1 u_1^2 + \frac{1}{2}m_2 u_2^2 = \frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2$$

消去 $\frac{1}{2}$, 移項得

$$m_1(v_1^2 - u_1^2) = -m_2(v_2^2 - u_2^2)$$

$$\text{即 } m_1(v_1 - u_1)(v_1 + u_1) = -m_2(v_2 - u_2)(v_2 + u_2) \dots\dots\dots ②$$

將①②式相除得

$$v_1 + u_1 = v_2 + u_2$$

$$\text{再移項得 } u_1 - u_2 = v_2 - v_1 \dots\dots\dots ③$$

式左 $u_1 - u_2$ 係兩質點碰前之“接近速度”, 而 $v_2 - v_1$ 為“遠離速度” (見圖 6-3)。

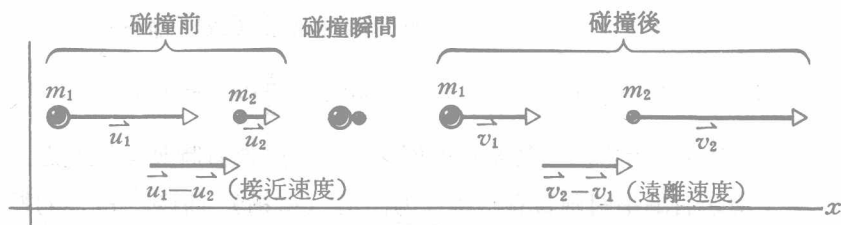


圖 6-3 在發生彈性碰撞前後的兩球

故：在彈性碰撞（碰撞前後兩質點動能之和不變），則兩質點接近速度與遠離速度相等。

將③式中 $v_2 = u_1 + v_1 - u_2$ 代入①式

$$\text{得} \quad v_1 = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) u_1 + \left(\frac{2m_2}{m_1 + m_2} \right) u_2$$

同理 $v_1 = v_2 + u_2 - u_1$ 代入①式

$$v_2 = \left(\frac{2m_1}{m_1 + m_2} \right) u_1 + \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right) u_2$$

特殊情況——碰撞前 m_2 為靜止（稱為靶點）則 $u_2 = 0$

$$\text{故} \quad v_1 = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) u_1 \dots\dots\dots ④$$

$$v_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} u_1 \dots\dots\dots ⑤$$

討論：

若 $m_1 = m_2$ 則由④： $v_1 = 0$ 由⑤： $v_2 = u_1$

意即 m_1 在碰撞後立即停止，而 m_2 則取代 m_1 而以 m_1 之原速度運動。

若 $m_1 > m_2$ 則 v_1 與 u_1 同號，即碰後 m_1 仍繼續向前。

若 $m_1 < m_2$ 則 v_1 與 u_1 異號，即碰後 m_1 反彈而回。

若 $m_1 \ll m_2$ (m_1 遠小於 m_2) 在④式中 m_1 幾可略而不計，故

$v_1 \simeq -u_1$ 意即 m_1 幾以原速反跳而回。又若⑤式中 v_2 近於零，表 m_2 幾乎不為所動。

6.8 非彈性碰撞

上節所敘述的彈性碰撞係假定兩質點互相以力作用（碰撞）之前後兩質點動能之和不變（彈性碰撞，即互相作用之力為保守力）的情況，亦即動量守恆與能量守恆均可成立之情況。事實上，以“質點”代表“物體”，是理想化的說法，物體在受力之際其形狀必有或多或少的改變。在變形至恢復原狀期間，內部組織間的阻力（黏性力），必將動能的一部分轉變為熱能等其他能量，所以，在碰撞前後，動能並非守恆不變。在此種情況下，式

$$\frac{1}{2}m_1 u_1^2 + \frac{1}{2}m_2 u_2^2 = \frac{1}{2}m_1 v_1^2 + \frac{1}{2}m_2 v_2^2 \text{ 不能成立。}$$

牛頓訂定碰撞後兩物體遠離速度 $v_2 - v_1$ 與接近速度 $u_2 - u_1$ 之比為“恢復係數” (coefficient of restitution)，以 e 表之，即：

$$e = \frac{v_2 - v_1}{u_1 - u_2}$$

上節所論彈性碰撞，知 $v_2 - v_1 = u_1 - u_2$ ，故 $e = 1$ ，屬“完全彈性”之碰撞。又如第三章 (§3.9) 所述兩物碰後合為一體之情況，則因碰後 $v_1 = v_2$ 故 $e = 0$ 屬“完全非彈性”碰撞。日常一般物體的恢復係數介於 0 與 1 之間，即 $0 < e < 1$ 。

6.9 功率

單位時間所作之功稱為功率。在 Δt 時間內完成 ΔW 之功，則功率：

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}$$

因力與位移同向時 $\Delta W = F\Delta x$

$$\text{故 } P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = F \frac{\Delta x}{\Delta t} = Fv$$