大學叢書

普通物理學實驗

薩本棟著

商務印書館發行

大學叢書

普通物理學實驗

薩本棟著

中華教育文化基金董事會編譯委員會編輯

商務印書館發行

中華民國二十五年十一月初版
中華民國二十六年三月再版

㊥(58324·2精)

大學叢書(教本)普通物理學實驗一冊

定價國幣 [illegible]

著作者 薩本棟

編輯者 中華教育文化基金董事會編譯委員會

發行人 王雲五 上海河南路

印刷所 商務印書館 上海河南路

發行所 商務印書館 上海及各埠

(本書校對者曹鈞石)

三一九四上

目　錄

實驗一　槓桿原理及其應用

(A)力矩定律

原理及定義　(1)凡可使吾人之肌肉感受輕重之感覺者，均名爲力。在靜力學中，力之大小，常借用重量之單位(例如克)以表示之。

設有一物體可以旋轉於一固定之支點或軸線。今若加一力以旋轉之，則此力所產生效果之大小，不僅由力之大小而定，且亦視加力點至固定支點或軸線之距離，及力之方向而異。茲名自固定支點(或軸線)至與力之方向垂直之距離爲槓桿臂；力與桿臂之乘積則名爲此力對於支點或軸線之力矩。力矩之單位，可以力之單位至長度單位連疊名之，例如克－厘米。如 A 表加力點，P 表支點，FA 表力 F 之方向，l 表加力點至支點之距離（如物體係轉動於一軸線時，則 l 爲 A 至軸線之垂直距離），θ 表 PA 與 FA 所作之角度(見圖1.1)，則力 F 對於支點 P(或軸線)之力矩爲

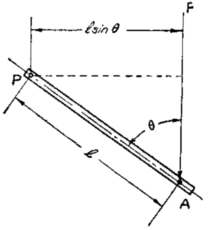

圖 1.1

$$L=Fl\sin\theta \qquad (1)$$

當物體受數力之作用而不轉動時，此數力對於支點或軸線之力矩

(向一方轉動者爲正,反方轉動者爲負)之代數和必等於零。爲是力矩定律。

(2)設將一物體支托於某一點時,物體可以靜止不動,此點名爲物體之重心。在力學中,凡遇須計及物重之影響時,可注意物之重量乃一通過其重心之垂直力。

目的 證實力矩定律。

儀器述要 (1)木桿 R 及附架;(2)三足架及懸掛裝置 T;(3)砝碼 W 及 W';(4)尺,M;(5)托盤 P,P';(6)鉛垂線 p_1,p_2(圖1.2)。

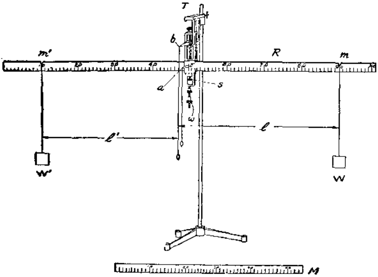

圖 1.2

一木桿 R(通常卽用尺)可穿過一小金屬架。架下有螺旋 S 可藉以拴桿於架。架附有兩刃口 a 及 b,a 係固定,b 之位置則可垂直的上下調

變。桿兩邊可懸掛重量 (W, W') 或托盤 P, P'。a 及 b 兩刃口處鑽有小孔可任鉛垂線由之下垂。各垂線之距離可以尺 M 量之。桿 R 附架下小重量 w 之位置可以上下調變，以便變更桿及附架之重心。

實驗步驟 (1)令 b 在 a 上約 1 厘米。以 b 為支點而懸之於架 T，左右滑動桿至桿取水平方向時，然後藉螺旋 S 以拴固之。

(2)在桿之一端以細線懸掛 W(約150克)，在他端懸掛 W' (包括托盤重量)。調變 W' 之位置，使桿復水平。量 W 及 W' 至由 b 下垂之鉛垂線之距離 l 及 l'。改變 W' 之值及其位置三次；並計算各次 W' 對於支點之力矩，以與 W 對於支點之力矩相比較。所得結果可登記如下：

實驗次數	W(克)	l (厘米)	Wl	W'(克)	l'(厘米)	$W'\ l'$
1						
2						
3						

(3)將 W 懸於桿之一端如前，在桿之他端兩處各懸一重量 W_1' 及 W_2' 而復求桿水平時各力矩之值。改變 W_1' 及 W_2' 之值，試驗三次。(各次所用 W_1' 及 W_2' 之值須先徵得教員同意!) 結果可登記如下：

實驗次數	W克	l (厘米)	Wl	W_1'(克)	l_1'(厘米)	W_2'(克)	l_2(厘米)	$W_1'l_1'+W_2'l_2'$
1								
2								
3								

(4)取去桿上重量。將桿懸於 a 點,並調變架下小重量 w 之位置,使桿可靜止於任何方向。此時桿之重心適在 a 點。求得桿之重心後,乃復將桿支於 b 點。次於桿兩邊各懸一重量使桿與水平方向約作 45°角(圖1.3)。試由所觀察得之結果計算桿及其附架之重量,以與用天秤稱得之值相較。結果可登記如下:

(a) $W_1=$; $l_1=$; $W_2=$; $l_2=$;

$l_3=$; $W_3=\dfrac{W_2l_2-W_1l_1}{l_3}=$ 。

(b) 直接稱得之 $W_3'=$; 差 $=\dfrac{W_3-W_3'}{W_3'}\times 100=$ %

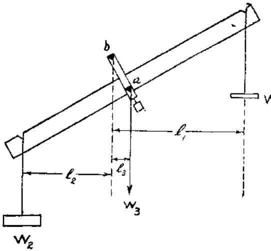

圖 1.3

(5)將桿仍懸於 b 點。分別置兩托盤 P 及 P' 於桿之兩邊使桿水平。在 P 中置一重量 W(假定係欲稱之重),在 P' 中增置砝碼 x 使桿水平。

次將W置於P中，加砝碼y於P中以使桿水平(托盤位置仍舊不變)。假若托盤P,P'之重量及其距支點之遠度均不知，試由所加之x及y各砝碼之值計算W之重。此種稱法常名爲複稱法。改用不同之W，試驗三次。登記結果如下：

試驗次數	物在左，右方砝碼 x	物在右，左方砝碼 y	$\sqrt{xy}$	$\frac{x+y}{2}$	物重 W(已知值)
1					
2					
3					

問　題

(1)試推求複稱法所用之公式。若用複稱法所求得之兩值x及y相差不多時，可否以x及y之平均作所欲求之結果，何故？

(2)今以中國秤稱物。當所稱之重適使秤桿水平時，若再加少許重量，則桿之傾斜略增後，仍復可靜止，試言其故，並作簡圖以示其理。

(3)作上述各實驗時，支點所受之力若干，試分別計算之。

(4)設無法支托物體於其重心，試述以實驗尋求此點之方法。

(B)靈敏天秤之使用法

原理及定義　當一天秤靜止時,其指針停止之位置,名為其停點。若天秤兩托盤均未載有重量,其停點則名為零點。若欲令兩托盤所載之重量相等,則載重時之停點須與不載重時之零點脗合(求停點之方法見下)。

設當天秤兩盤所載之重相差不多時,在右盤中增加一毫克之重量,則天秤指針向左方偏傾之值將略增加;此增加之度數常名為天秤之靈敏度。如已知天秤之靈敏度,及停點與零點之值,則右盤中重量應增或減若干方能使停點與零點脗合,可由二者之差計得之。例如天秤之零點為 -0.5,稱某物時,右盤中共加重 15.0010 克,其停點則為 2.5。設此時之靈敏度為 0.60,則知右盤中尙應再加$\frac{2.5-(-0.5)}{0.6}=5.0$ 毫克方能使停點與零點脗合,故物之實重為 $15.0010+0.0050=15.0060$ 克。用複稱法(見本實驗 A,步驟 5)時,不但可免去天秤臂不等長所引起之誤差,且不必先知秤之零點,卽可計得物體之實重。例如當右盤中砝碼共重 w_1,其停點為 u,則右盤中所應加之重量須為 $W_1=w_1+\frac{u-c}{S}$ 方能使停點與零點符合,此中 S 表天秤之靈敏度,c 表未知之零點。若將物體置於右盤中,砝碼 w_2 放於左盤中,所得之停點為 v,則左盤應加之重量須為 $W_2=w_2-\frac{v-c}{S}$。因物體之實重約等於 W_1 與 W_2之平均值(見本實驗 A),故實重為

$$W=w_1+w_2+\frac{u-v}{2S} \qquad (1)$$

目的　學習靈敏天秤之用法。

儀器述要　(1)靈敏天秤，(2)砝碼一付。

靈敏天秤之上部爲一輕質之秤梁 B。梁之中點及兩端均有刃口(參閱圖 1.4)。中間之刃口置於支柱 C 上端之平面上，其接觸點名爲支點。

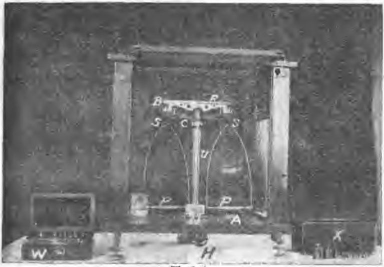

圖 1.4

兩端之刃口 S 及 S' 各懸等重之托盤 P, P'。自 S 或 S' 至 C 之距離名爲梁臂。秤梁下有止動架 A，可藉螺旋 H 以調節之。不用之時，或更換重量時，均須旋轉 H 使 A 上升，以令三刃口不與接觸平面相觸，而免刃口尖鋒之損傷。自梁前面下垂者，有一指針 N，可自由擺動於一標度前。秤箱右方有一勾桿，可用以移置游碼 R 於梁上。游碼重 10 毫克，欲用 10 毫克或更輕之重量時，均得以游碼代之；因梁之右臂上刻有十度(有時兩臂上均刻有度數)，置游碼於一度上，即等於右盤中加重 1 毫克。秤箱下有三個螺旋，可藉以調節秤梁是否水平。

用天秤時，下列各點須特別注意：

(1)不得稱超過天秤所能負之最大重量。

(2)不用天秤及更換重量時,須提起止動架,以免秤之擺動。

(3)停止秤之擺動,須於指針約在垂直方向時行之,且不得過於急促。

(4)欲令秤梁擺動,可放下止動架,切勿以手推動秤梁。

(5)稱時,較重之砝碼須放在托盤之中部。

(6)最後稱衡,須關閉秤箱行之。

(7)不用之砝碼,均須還置匣中原位。異匣之砝碼不得互相調用。

(8)移取砝碼,均須用匣中所備之銅夾,不得用手指舉之。

(9)非萬不得已時,勿稱熱物。凡足以損傷秤盤之物體,均不得直接置於盤中。

實驗步驟 (1)測定零點三次,取其平均值。每次所得之結果與平均值之差不得大於$\frac{1}{10}$刻度。作法如下:放下止動架,令指針 N 擺動於標度之前。依次記錄其左右回轉點(左爲負,右爲正)。所記次數,總共須爲單數(例如右方記二次,左方須記三次)。記畢,停止擺動,將右方之平均與左方之平均相加,除以 2,即得所欲求之停點(盤不載重時,停點卽零點)。結果可登記如下:

	左	右	左	右	左	右
	—		—		—	
平均						
零點						

總平均=

(2)令兩盤負重各約爲 0, 50, 100 克，次第求其靈敏度各二次。作法同前(靈敏度之意義見前)。測定停點之記錄可仿前登記之。所計得之各停點可按下列格式登記之。

天秤號數：　　；製造者：　　。

載重(克)	起始停點	在右邊加一毫克後之停點	靈敏度	平均
0				
50				
100				

(3)用複稱法求某一物之重，結果登記如下：

靈敏度	物在左時		物在右時		物之實重，W
	右盤中砝碼	停點	左盤中砝碼	停點	(克)
S	w_1(克)	u	w_2(克)	v	方程(1)

問　題

(1)天秤之靈敏度與其所載之重量有何關係？

(2)測定停點時，何以所記回轉點之總次數須爲奇值？

(3)問所用之天秤，其兩臂之長之比若何，試由複稱結果推算之。

(4)設有等臂天秤，其兩盤之重不等，今用複稱法以測某物之重，所得之結果爲 W_1 與 W_2，問物之實重若干？又問兩盤重量之差若干？

(5)問秤梁重心之高低與支點之位置，對於天秤之靈敏度有何關係？

(C)砝碼之校準法

原理 各砝碼之重常與其上所刻定者相差不少。當作精密實驗時，此等差值甚爲重要。在許多問題中，例如化學上之定量分析，所欲求者僅爲兩質量之比值，則只須知所用各砝碼相對的誤差爲何即可。至若必須求得質量之絕對值時，則其絕對誤差亦應先行求得。

設有 n 個砝碼待校，所須作之權衡次數最少亦須爲 n 次。如僅有標準砝碼一枚而欲校準一付砝碼時，可將此付砝碼分組互相比較 $(n-1)$ 次，而後將其中之一(或一組)再與標準砝碼比較。由是卽可求得各砝碼之誤差。例如有 A(約 100 克)，B(約 50 克)，C,D(各約 20 克)，E 及 F(各約 10 克)砝碼六個，標準砝碼 S (100 克)一個，則可先以 A 與 S 相衡以求其差 x；次以 A 與 B,C,D,E 四者相衡以定其差 a；次以 B 與 C,D,E 三者相衡以定其差 b；次以 C 及 D 相衡定其差 c；次以 D 與 E 及 F 相衡得其差 d；再以 E 與 F 相衡得其差 e。由此等權衡結果可推出下述之六個聯立方程：

$$A=S+x$$

$$A=B+C+D+E+a$$

$$B=C+D+E+b$$

$$C=D+c$$

$$D=E+F+d$$

$$E=F+e$$

聯解之即可計得各砝碼之準確值矣。

上述諸方程中之 x,a,b,c,d,e 六值，如砝碼誤差不過大時，常可由天秤之靈敏度推求之，否則須另備一付準確之小砝碼，或將匣中其他大小各砝碼，依照已述方法，分組悉行校準之。

目的　校準一付砝碼。

儀器　(1)靈敏天秤，(2)待校之砝碼一付，(3)標準砝碼一個，(4)準確之小砝碼數枚(用否視待校各砝碼誤差之大小而定)。

實驗步驟　用復稱法按照上述將各砝碼分組互相比較。例如將 A 置於左盤，B,C,D,E 四砝碼於右盤，而求其停點 u (必要時可加微小之砝碼 m 於右或左盤以免停點落於標度之外)。將兩盤中各砝碼對換後，再求其停點 v。從所得兩停點 u,v 及所加用之小砝碼 m(m 是否與 B,C,D,E 四者同在一盤，可以正負號區別之)，即可計得前述方程中之 a；其他各值 b,c,d,e,x 可仿此求之。實驗結果可列表如下：

天秤號數：
製造者：

載重(克)	0	50	100
靈敏度，S			

待校砝碼 W	上刻重量 W_a (克)	用以衡 W 之砝碼 W'	在 W' 盤中另加之小砝碼 m (毫克)	停點 u	停點 v	$W-W'$ (毫克)	實有重量 W_c (克)	誤差 W_a-W_c (毫克)	誤差百分率% $\frac{W_a-W_c}{W_c}\times100$
A	100	S				$x=$	……	……	……………
A	100	$B+C+D+E$				$a=$			
B	50	$E+C+D$				$b=$			
C	20	D				$c=$			
D	20	$E+F$				$d=$			
E	10	F				$e=$			
F	10	……	……	…	…	……			

問　題

設全匣中除上述者外，尚有下列各砝碼：5,2,2,1 克各一；500, 200, 200, 100, 50, 20, 20 及 10 毫克者各一及準確 10 毫克之游碼一枚，若不用標準砝碼 S，問應如何校正各砝碼？

實驗二　力之合成及其分解

(A)力之三角形及平行四邊形原理

原理及定義　設有靜止物體受數個會聚力之作用，致不能靜止，今另加一力以使之靜止，此後加之力名爲其他各力之平衡力。數個會聚力之作用，既可以一力平衡之，故與平衡力相等惟方向相反之力，可視爲各力之總效果。此總效果名爲各力之合力。數個會聚力之效果，既可以一單力表之，故任何單個力所生之效果，亦可以數個會聚力代之。此數力名爲該單力之分力。某力 F 在某方向 Ox 之分力 X，即等 F 之大小乘以 F 之方向與 OX 方向所作之角 θ 之餘弦(圖2.1)，即

$$X=F\cos\theta \tag{1}$$

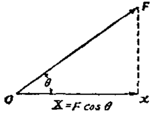

圖 2.1

若有二力 P 及 Q 互作直角，則其合力 R 之値爲(圖2.2)

$$R=\sqrt{P^2+Q^2} \tag{2}$$

合力 R 與 P 力方向所作之角度爲

$$\phi=\tan^{-1}\frac{Q}{P} \tag{3}$$

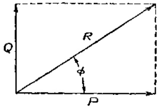

圖 2.2

利用方程(1)，(2)及(3)以求數力(假定均在一平面上)之合力時，先任意選擇兩正交方向(此兩方向以與多數

力平行或正交者爲佳),例如 Ox 及 Oy,以求各力在此兩方向之各分力 X_1, X_2,……及 Y_1, Y_2,……等,然後分別加之,以求在此兩方向之總分力:

$$X=X_1+X_2+\cdots\cdots, \qquad Y=Y_1+Y_2+\cdots\cdots \tag{4}$$

X 與 Y 之合力 R 及其方向 ϕ 均可按方程(2)及(3)求得之。

目的 證實力之合成及其分解定律。

儀器 (1)力盤;(2)砝碼及托盤(圖 2.3)。

圖 2.3

一圓盤之周圍,刻有角度。有滑車三四個可裝於盤周任何角度處。跨過各滑車之繩,其下垂之端懸以托盤及重體,其他端則連結於小環 r。未作實驗之前,此環當套於盤中心之小桿 p。測驗平衡時,可拔起 p,以視環 r 是否仍能靜止於中心。

實驗步驟 (1)置一滑車於盤周 θ_1 處,又一滑車於 θ_2 處。懸 W_1 克重體於前處,W_2 於後處(θ_1, θ_2, W_1 及 W_2 之值須先徵得教員同意)。依前述方法,計得 W_1 及 W_2 之合力 R 及其方向 ϕ。在此合力之對方(卽離合力 180°度處),另置一滑車,並懸所計得之重體 $W=R$。拔起盤中之桿 p,略動環 r,以視環能否仍舊回到中心。在 W 上,增置(或減去)砝碼(w)少許,至可以測得各力之不平衡爲止。w 之大小卽可用以示此實驗誤差之範圍。計算結果可登記如下:

W_1	θ_1	W_2	θ_2	X_1	X_2	X	Y_1	Y_2	Y	R	ϕ
實驗結果為 $R\pm w=$											

(2) 用三力 W_1, W_2, W_3 及三不同方向 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$（各值均須先徵得教員同意）。依前述方法以計此三力之合力 R 及方向 ϕ，並仿前段所述，作實驗以測驗計算結果是否無誤，及實驗誤差之範圍。結果登記如下：

	W	θ	X	Y
1				
2				
3				
和	…………………	…………………	$\Sigma X=$	$\Sigma Y=$
R（計算值）=		；	實驗值 $R\pm w=$	
$\phi=\tan^{-1}\dfrac{\Sigma Y}{\Sigma X}=$				

問　題

設有二力 A 及 B，其方向互作之角為 α，試推證其合力 C 之值可自下列方程求之：

$$C^2=A^2+B^2+2AB\cos\alpha$$

試利用此公式以逐步計算本實驗前後兩次所應得之合力。問如是計算，與用方程(1)，(2)及(3)時，孰較迅速便利？

(B)舉重機之平衡

原理 簡單舉重機中各部之力約如圖(2.4)所示。當機之橫桿 ab 取水平位置時，若以 b 為支點，則引用力矩定律卽可推得：

$$T\cos\phi = M + \frac{W}{2} \quad (1)$$

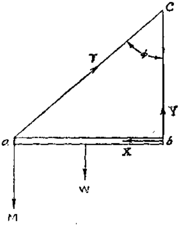

圖 2.4

至於 b 點之反作用，可分解之為 X 分力（卽 ab 橫桿中之力）及 Y 分力兩正交部分。引用本實驗 A 之結果卽知

$$X = T\sin\phi = \left(\frac{W+2M}{2}\right)\tan\phi, \qquad (2)$$

及
$$Y = \frac{W}{2}。 \qquad (3)$$

目的 求舉重機模型各部所受之力。

儀器 (1)舉重機模型，鐵鏈，橫桿 ab，簧秤 B 等；(2)重量 M；(3)尺 R；(4)矩 S（圖 2.5 及 2.6）。

實驗步驟 (1)將舉重機模型各部按圖(2.6)裝好。

(2)在托盤上置重量 M(約 6 仟克)。調節機使其橫桿 ab 取水平方向(可用矩 S 定之)。量 ab 及 ac 邊之長。記錄簧秤 B 中之力 T，橫桿中

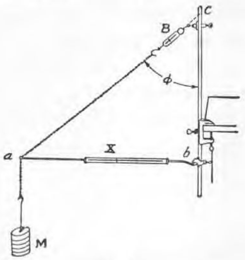

圖 2.5

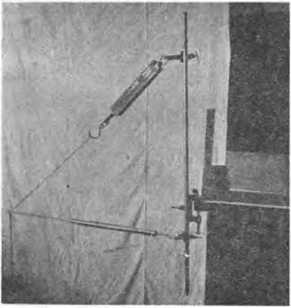

圖 2.6

之力 X,及橫桿之重 W(可問教員或先行稱之)。用不同之 M,試驗三次。將所測得之 T 及 X 與按方程(1)與(2)所計得者相較。結果可登記如下:

實驗次數	W(克)	M(克)	ab(厘米)	ac(厘米)	ϕ	(T)克		X(克)	
						觀察值	方程(1)	觀察值	方程(3)
1									
2									
3									

問 題

問在各次試驗中,b 點所受之力之大小及方向各如何,試推算之。

實驗三　等加速運動

(A)自由落體

原理及定義　(1)物體在某時刻移動之瞬時速度係指其在單位時間內所將行之距離及其移動之方向。速度之單位常用每秒若干厘米表之。凡速度改變(快慢或方向改變)之運動名爲加速運動。在單位時間內，物體速度所將增加之値名爲其瞬時加速度。加速度之單位常用每秒每秒若干厘米，簡可寫作厘米/秒^2。凡加速度方向及價值不變之運動名爲等加速運動。物體自由的降落卽爲最常見等加速運動之一種。

(2)若物體之速度 v 不變，其在 t 秒鐘內所行之距離，按前段定義，將爲

$$d=vt \tag{1}$$

設有物體以不變之加速度 a 沿直線移動，其起始之速度爲 v_0 (方向與 a 同)，則在 t 秒時刻，其速度將爲

$$v=v_0+at \tag{2}$$

而在此 t 秒鐘內，物體之平均速度乃

$$v_{av}=\frac{v+v_0}{2}=v_0+\frac{1}{2}at \tag{3}$$

是以物體在此 t 秒鐘內所行之距離爲

$$d=v_{av}t=v_0t+\frac{1}{2}at^2 \tag{4}$$

若物體之起始速度 v_0 爲 0，則方程(4)可簡化爲

$$d=\frac{1}{2}at^2 \tag{5}$$

是爲物體從靜止位置自由降落時其所行之距離與時間之關係。惟當作此種實驗時，因物體起始降落之速度甚小，降落某距離所需之時間不易量得準確，故整理實驗結果之方法，常根據下述原理。

(3)令 $d_1, d_2, \cdots\cdots d_{n-1}$ 及 d_n 表物體自由降落1秒，2秒，……，$(n-1)$秒，及 n 秒所行之各距離，即

$$\left.\begin{aligned}
d_1&=v_0\cdot 1+\frac{1}{2}a\cdot 1^2=v_0+\frac{a}{2}\\
d_2&=v_0\cdot 2+\frac{1}{2}a\cdot 2^2=2v_0+\frac{4a}{2}\\
d_3&=v_0\cdot 3+\frac{1}{2}a\cdot 3^2=3v_0+\frac{9a}{2}\\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\\
d_{n-1}&=(n-1)v_0+\frac{(n-1)^2a}{2}\\
d_n&=nv_0+\frac{n^2a}{2}
\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

令 $\Delta_1=d_2-d_1$；$\Delta_2=d_3-d_2$；…………；$\Delta_{n-1}=d_n-d_{n-1}$，

則 $$\Delta_1=v_0+\frac{3a}{2};\quad \Delta_2=v_0+\frac{5a}{2};\cdots\cdots\cdots;\Delta_{n-1}=v_0+\frac{(2n-1)a}{2} \tag{7}$$

由此等方程卽知(參較圖 3.1)

$$a=\Delta_2-\Delta_1=\Delta_3-\Delta_2=\cdots\cdots\cdots\cdots=\Delta_{n-1}-\Delta_{n-2} \tag{8}$$

用方程(8)之結果以量 a 之值時,勿須知 d_1, d_2,……個別之價值,只須知各差值 Δ_1,Δ_2,……之差。此等差值 Δ_1,Δ_2,……頗易量準,故凡遇所求之關係爲一二次方程如(4)者,均可利用此法。在實施此法之時,對於下述兩點須特加注意:(1)如所用之時間單位爲 T 秒而不等於1秒,則用方程(8)所計得之值復當除以 T^2。(2)計算時如欲充分的利用所量得之 Δ_1, Δ_2,…………全體各值,不應以 $(\Delta_2-\Delta_1)$, $(\Delta_3-\Delta_2)$,…………$(\Delta_{n-1}-\Delta_{n-2})$各項之平均爲 a 之平均值,因若如是計算,其結果實與只用 Δ_{n-1} 及 Δ_1 兩觀察值無異。蓋 $(\Delta_2-\Delta_1)$, $(\Delta_3-\Delta_2)$, ………, $(\Delta_{n-1}-\Delta_{n-2})$ 等值(共 $n-2$ 項)之平均係等於:

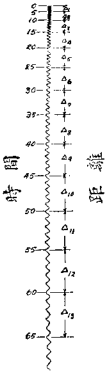

圖 3.1

$$\frac{(\Delta_2-\Delta_1)+(\Delta_3-\Delta_2)+(\Delta_4-\Delta_3)+\cdots\cdots+(\Delta_{n-1}-\Delta_{n-2})}{n-2}$$

$$=\frac{\Delta_{n-1}-\Delta_1}{n-2}$$

也。較完善之計算法係如下:

將 $\Delta_1,\Delta_2,\cdots\cdots\Delta_{n-1}$ 分作前後兩半(如遇項目共爲奇數,則令前半多一項),分別求後半第一項 Δ_{p+1} 與前半第一項 Δ_1 之差,後半第二項 Δ_{p+2} 與前半第二項之差,餘類推(遇前半多一項時,所多之一項即不用)。

次求此等差值之平均，而後以 p（卽後半第一項與前半第一項相隔之位數）除之（例如後半第一項原居第六位，則 $p=5$）。爲更求明瞭起見，茲舉一例於下：

位數(n)	時間(t)	d(厘米)	$\Delta_{n-1}=d_n-d_{n-1}$
1	t_0	1.60	……
2	t_0+1	4.80	3.20
3	t_0+2	9.65	4.85
4	t_0+3	16.10	6.45
5	t_0+4	24.20	8.10
6	t_0+5	33.95	9.75
7	t_0+6	45.25	11.30
8	t_0+7	58.30	13.05
9	t_0+8	72.95	14.65
10	t_0+9	89.15	16.20

$\Delta_{p+k}-\Delta_k \quad (p=5)$

$8.10(=11.30-3.20)$
$8.20(=13.05-4.85)$
$8.20(=14.65-6.45)$
$8.10(=16.20-8.10)$

平均 $=8.15$

$$a=\frac{8.15}{5}=1.630$$

如所用之時間單位係等 $\frac{1}{24.5}$ 秒，則 a 之值爲

$$a=1.630\times24.5^2=978.4\ \text{厘米/秒}^2。$$

目的 求自由落體之加速度。

儀器 (1)音叉及架 F；(2)導軌及架 G；(3)粉版；(4)電池；(5)尺；(6)木條。

一金屬架，上裝週期已知之音叉 F。叉可順長約 120 厘米之兩導軌 GG 降落。音叉一端釘有小針 N，當叉及架降落時，若通電流以激動音

叉，則此針在架後粉版上描畫波紋曲線。由此曲線卽可測得音叉降落路程與其所需之時間。

實驗步驟　(1)自叉架下端懸一鉛垂線。調節架底之螺釘，使叉架能垂直的降落毫不偏斜。調節畢，務必取去此線。次將架後玻版取下，用粉水平勻塗白後，任其蒸發至乾。調節音叉端之小針，使與版接觸。令電流通過叉中線圈，撥開掛鈎任叉降落。將粉版向旁略移，再試驗一次。兩次所得曲線均須明晰無缺，否則當重行試驗。

圖 3.2

(2)版上描有曲線後，停止電流，取下粉版，放於棹上兩木條上。在各波紋起始分開之波頂處，作一短橫線，並注 O 字於其旁。自此點起，數版上波數。在每 5 波頂旁作一短線，並依次記之爲 1,2,3……等。用尺量各短線至原點 O 之距離 d_1, d_2,………等。量時須將尺邊豎立在波線之上，觀察方向須與粉版垂直，以免視差。所量之距離須估準至 $\frac{1}{10}$ 毫米。自音叉之頻率(刻在叉旁)計算其振動 5 次所需之時間。結果及計算，可仿照前此所述者登記如下：

音叉頻率(f)=　　週/秒；　振動 5 次所需之時間 $=T=$　　秒

記號(n)	波數	d(厘米)	$\Delta_{n-1}=d_n-d_{n-1}$	$\Delta_{p+1}-\Delta_1$ ($p=$)
0	0	0	----	
1	5		—	
2	10			
3	15			
4	20			
5	25			
6	30			平均 $m=$
7	35			$g=\frac{m}{T^2}=$ 厘米/秒^2
8	40			誤差$=\frac{g-980}{980}\times 100=$ %
9	45			
10	50			

問題

(1)試量O點至叉未落前之遠度(大約值)。問叉自靜止位置落至此點所需之時間 t 爲若干秒? 又問在此時刻,叉之速度若干?根據所計得之 t 及所觀察得各結果,試繪曲線於方格紙上以表音叉自靜止位置降落,其所行距離 d 與時間 t 之關係。試將此關係表於對數格紙上,問所得者爲何,並言其故。

(2)假設所得之 a 與公認值 $g=980$ 厘米/秒^2 相差之值係因各種摩擦阻力而起,試計算此等阻力之總值若干(叉及架之質量須先知,可問教員)。

(B)Newton 第二運動定律

原理　在動力學中，吾人名凡足以改變物體之靜止或沿直線之等速運動狀態者爲力。力之大小，按 Newton 第二定律，係與其所產生之動量改變率成正比，此改變率之方向與力之方向同。所謂動量者，蓋即物體之質量 m 與其速度 v 之乘積也。若物體之質量不變，則此定律可寫爲

$$F=ma \qquad (1)$$

此中之 a 卽質量 m 受 F 之作用而有之加速度。若加速度以厘米/秒^{2}計，m以克計，則 F 之值係以達因計；換言之，1 達因之力加於 1 克之質量，將產生 1 厘米/秒^2 之加速度。

目的　證實 Newton 之第二運動定律。

儀器　(1) 音叉及架，導軌，粉版，電池，尺等均與本實驗 A 同，惟導軌上部附有滑車及短圓管；(2) 特備重量 W，可拴固於叉架上；(3) 砝

圖 3.3

碼及天秤(圖 3.3)。

將叉架懸於繩之一端,令繩之他端跨過滑車後,復穿出圓管,乃繫以托盤或布袋。置 W 及其他砝碼或重量 M 於托盤上或布袋中,以平衡叉架之重。調節M之值使略加微小之力後,叉架卽可無加速度的漸次降落。如是摩擦阻力之影響可以免除。

實驗步驟 (1)將儀器按上述裝好。自托盤上(或布袋中)取去重量若干(値約與 W 相等,惟 W 須留在盤上或袋中)。仿本實驗 A 測量叉架之加速度 a_1 並記下所取去重量之實重 W_1。

(2)次將 W 自托盤上(或布袋中)取出而拴固之於叉架上,再按前法量叉架降落之加速度 a_2。稱 W 之重。

(3)試計 a_1/a_2 及 $W_1/(W_1+2W)$ 並比較之。實驗及計算結果可仿本實驗 A 之表格登記之如下:

音叉頻率(f)= 週/秒; 振動 5 次所需之時間 = T = 秒。

運動之質量(卽音叉及平衡砝碼等總重)= 克

記號(n)	波數	推動之力(W_1)= 克		推動之力(W_1+2W)= 克	
		距離 d (厘米)	$\Delta_{n-1}=d_n-d_{n-1}$	距離 d (厘米)	$\Delta_{n-1}=d_n-d_{n-1}$
0	0	0	——	0	——
1	5		——		——
2	10				
3	15				
4	20				
5	25				

6	30				
7	35				
8	40				
9	45				
10	50				
11	55				
12	60				
13	65				
14	70				
15	75				
$\Delta_{p+1}-\Delta_1$ ($p=$)				$\Delta_{p+1}-\Delta_1$ ($p=$)	
平均 $m_1=$ $a_1=\frac{m_1}{T^2}$				平均 $m_2=$ $a_2=\frac{m_2}{T^2}$	
$\frac{a_1}{a_2}=$			$\frac{W_1}{W_1+2W}=$		

問　題

(1)作本實驗時,前後兩次繩中之張力各若干,試計之。

(2)問物體之質量與其重量之關係如何?

(3)設重力加速度爲 g 厘米/秒^2,問質量爲 10 克之物體,其重量爲

若干達因?其重量爲若干克?

(4)試推證本實驗所示之公式:

$$\frac{a_1}{a_2}=\frac{W_1}{W_1+2W}$$

(C)拋射體之軌跡

原理　設有物體在空中以速度 v_0 向水平方向射發。倘 v_0 不甚大則其所遇之空氣阻力可以不計，而其在水平方向之速度將永不變。換言之，其距出發點之水平遠度 x 在任何時刻 t 將為

$$x=v_0t \tag{1}$$

至於物體沿垂直方向之速度，其始雖為零，因其常受地心吸力之故，將均勻的以 g 厘米/秒^2 向下遞增。於是在任何時刻 t，物體距出發點之垂直距離將為

$$y=\frac{1}{2}gt^2 \tag{2}$$

從方程(1)及(2)消去 t，即得拋射體之軌跡為

$$y=\frac{g}{2v_0^2}x^2 \tag{3}$$

若物體之速度 v_0 係因降落 h 高度而來，則 $v_0^2=2gh$，而方程(3)可寫作

$$y=\frac{1}{4h}x^2 \tag{4}$$

目的　繪描拋射體之軌跡。

儀器　(1)導軌 G 及電磁鐵 m；(2)鋼球 B；(3)沙土一盤；(4)鉛垂線；(5)尺；(6)電池(圖 3.4)。

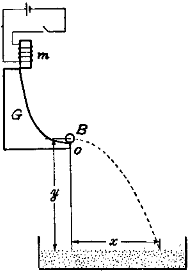

圖 3.4

鋼球 B 可藉電磁鐵吸住於導軌 G 之上部。若斷絕電流以釋放此球，則球將沿導軌滾下，當其離開導軌之最低點 O 後，其所作之軌跡，可以沙盤置於相當高度各處承接而求之。

實驗步驟 (1)令導軌G最低點O至沙盤面之距離每次約增 5 厘米。將磁鐵吸住鋼球，然後開啓電鍵以任球沿導軌滾下落於沙盤中。量球落於沙盤中之點至 O 點之水平及垂直距離 x 及 y。每對 x 及 y 之値須由三次觀察之平均定之。

(2)變更導軌至沙盤之距離十次，重作實驗。並量導軌之垂直距離 h。將結果登記如下：

觀察次數	y	x	x^2
1	0	0	0
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
和	$\Sigma y=$	....	$\Sigma x^2=$

計得之 $h=\dfrac{\Sigma x^2}{4\,\Sigma y}=$

量得之 $h=h'=$

誤差　　$=h'-h=$

誤差百分率$=\dfrac{h'-h}{h'}\times 100=$

作圖　作曲線於方格紙上，以分別表示 y 與 x，及 y 與 x^2 之各關係。

問　題

(1)若拋射體射發之方向與水平方向作 θ 角，試推求其軌跡之方程。若射發速度不變，問射程最大之角度 θ 爲何？又問高度最大之值爲何？

(2)當向上拋射之物體，上升及降落時，在某一定高度處之快慢係相等，試證之。

實驗四　向心力及離心力

原理及定義　當物體以一定快慢沿一圓周而運動，其速度之値雖不改變，然因其方向常改之故，物體之運動亦爲加速的。設物體之快慢爲 v，其所作之圓之半徑爲 r，則其加速度 a 之値爲

$$a = \frac{v^2}{r} \tag{1}$$

其方向係向圓周之中心，故常名爲向心加速度。若物體之質量爲 m，則維持物體作等速圓周運動之向心力爲

$$F = ma = \frac{mv^2}{r} \tag{2}$$

如以 ω 表物體作圓周運動時之角速度(即每秒轉動之角，以弧度計)，n 表每秒轉動之周數，則 $v = \omega r = 2\pi nr$，而方程(2)亦可寫作

$$F = m\omega^2 r = 4\pi^2 mn^2 r \tag{3}$$

今將方程(2)或(3)寫爲

$$F - ma = 0 \tag{4}$$

則見如令 F 爲主動之向心力，則 $(-ma)$ 可視作因此主動力而生之反作用，此反作用之値等於 F，其方向則與 F 相反：是爲離心力。

目的　證實向心力與速度 v 及半徑 r 之關係。

儀器　(1)向心力儀器；(2)電動機及皮帶；(3)計轉器；(4)錶；(5)尺。

向心力儀器之構造如下：一可以旋轉於垂直軸線之橫桿 ab，上有兩質量 m, m'。m, m' 係繫於兩繩之端，繩跨過位於儀器中部 p 匣內

之兩滑車後乃懸於匣下之重體 c。當 m, m' 旋轉之速度達某一定之值時，其離心力卽足以舉起 c。

實驗步驟 將儀器按圖(4.1)及圖(4.2)裝好。通電動機以電流，漸次改變電阻 R(圖4.2)至其速度適可使 c 被舉起。維持此速度；以計轉

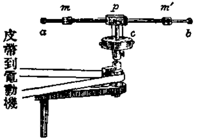

圖 4.1

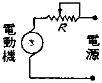

圖 4.2

器量儀器每分鐘轉動之次數 N；量 m 與 m' 至中心之距離 r 及 r' 並稱 m 與 m' 之重。改換另一對 m, m' 試驗五次。結果登記如下：

c(克)	m(克)	m'(克)	r	r'	N（每分鐘轉數）	$\frac{4\pi^2N^2}{3600}(mr+m'r')=F$	%誤差$=\frac{F-cg}{cg}\times100$

問題

(1)在上述實驗中試陳述何物係受向心力之作用，及何物係受離心力之作用。

(2)作本實驗時，何以 m 與 m' 須旋轉於一垂直軸線?

(3)設地球之半徑爲 6370 仟米，問在赤道處或在緯度爲 45°處維持 1 克質量之物體於地面所需之力各若干達因?若地球不轉，問此力若干? 又問地球之轉動速度須達何值方可使在赤道上之物體適無重量? (假定地心吸力所生之加速度爲 981.36 厘米/秒^2)。

(4)試自速度及加速度之定義推證本實驗所用之方程(1)。

實驗五　轉動定律

原理及定義　(1)當可轉之物體不轉動時，所加於物體之力矩總和必等於零，已見前實驗一。設所加於物體之力矩不等於零，則物體將以一定之角加速度轉動。此角加速度 a 之值係與所加之力矩 L 成正比，而與物體之轉動慣量 I 成反比。寫作方程卽有

$$L=Ia \tag{1}$$

此方程與 Newton 第二運動定律 $F=ma$ 完全相似，其實亦可自第二運動定律推導而來。

(2)物體之轉動慣量之大小，不但由其質量而定，且視此質量對於轉動軸線係如何分配而大有差別。若有質量 m，其所佔之空間甚小，而可視作集中於一點時，則此質量對於轉動軸線(m至轉動軸線之垂直距離爲 r)之轉動慣量爲

$$I=mr^2 \tag{2}$$

如欲求一體積非極小之物體轉動於某軸線之 I，須先將該物體分爲甚多之微小部分，再分別按方程(2)求各部分對於軸線之轉動慣量，而後計其和。計算之時，以用積分法爲最便利。

物體之轉動慣量 I 旣由其各部分之質量，與其距軸線之遠度之平方之乘積推算而來，其值實等於物體之總質量 M 與一適當之距離 k 之平方相乘，卽

$$I=Mk^2 \tag{3}$$

方程(3)中之 k 常名爲物體之迴轉半徑，其值完全由物體質量對於軸線分配之情形而定，與質量之總值無關。因此，除敍述轉動之軸線及物體之幾何形狀外，常只述其迴轉半徑之價值以備計算時之應用。例如半徑爲 r 之薄圓環，其轉動於通過環中心而與環面正交之軸線之 k 卽等於 r。又如一實心圓柱形或圓盤，當其轉動於其中心軸線時，其迴轉半徑 k 爲 $\frac{r}{\sqrt{2}}$（r 爲盤之半徑）。

儀器　(1)轉動實驗儀器，上有轉動圓盤 D，音叉 F 及放大鏡 M 等。(2)電池 E 及電鈴 S;(3)布袋及重量 W;(4)細線及蠟;(5)粉水(圖 5.1)。

圖 5.1

圓盤 D 係支於一架，可以自由旋轉於其軸線。在盤周繞以細線，線之一端以蠟粘固於盤周，其他端則懸重量 W。令重體 W 下落，牽轉盤 D，同時令一電動音叉之小針在盤之一面描畫波形曲線。如是自音叉所描之波紋及叉之週期卽可測得盤在某時刻 t 所轉之角度 θ。音叉 F 之架可與盤面平行進退，用時須令音叉漸進，以免盤轉動一周後各波線互相重疊。

實驗步驟　(1)將音叉一面用粉水刷白。繞細線於盤周四五匝，繞時各匝互相旁倚勿令其重疊。以蠟少許將線之一端粘固於盤周，在其他端懸布袋並裝輕鉛丸數枚，以等衡摩擦阻力之影響。通電流於叉中線圈使叉振動。調節叉針與盤之接觸點，使針可在盤面畫明晰曲線。加 100 克於袋內，釋放圓盤任其轉動。同時旋轉齒輪頭令叉徐徐前進。袋落地後卽停止電流。將圓盤 D 謹慎的取下。在波紋起始分開之波頂處，畫一記號，並注 O 字於其旁。(此記號離盤未動時之角度若干，其大約值須記下，以備計算問題(2)之用。從此點起，數盤面波數。在每 20 波處作一記號，依次注明 1，2，……等數碼。復置盤於架，將架一邊放大鏡之細絲次第對準所畫各符號而在架他端之放大鏡讀出其相關之角度（讀時須注意盤曾完全轉動幾次，每轉一周，卽應將所測得之角，加以360度)。自此等角度 θ 仿照第二實驗之方法求出兩連續 θ 之差 $\Delta=\theta_n-\theta_{n-1}$，及 $\Delta_{p+1}-\Delta_1$ 之平均 A。由此及音叉振動 20 次所需之時間 T，推算角加速度 α 之值。復由使盤轉動之力矩 L 及 α 之值，計算盤之 I_0

(2)在袋中增加重量 100 克(卽總重 200 克)，再試驗一次。將兩次所得之 I 平均之，以與由盤之質量及半徑等所計得之 I' 相較。結果可

登記如下：

音差頻率(f)＝　　週/秒；　振動 20 次所需之時間(T)＝　　秒

盤之半徑(R)＝　　厘米；盤軸半徑＝　　；盤之質量(M)＝　　；

盤之轉動慣量 I'＝

第一次實驗 W＝100 克

記號	波數	θ	$\Delta=\theta_n-\theta_{n-1}$	$\Delta_{p+1}-\Delta_1$
0	0		——	——
1	20		——	
2	40			
3	60			
4	80			
5	100			
6	120			
7	140			
8	160			
9	180			平均 A＝
10	200			$m=\frac{A}{p}=$
11	220			$d=\frac{m}{T^2}=$
12	240			$a=$　　厘米/秒²
13	260			$L=100(g-a)R$
14	280			$I=\frac{L}{\alpha}=$
15	300			

第二次實驗　$W=200$ 克

波數	θ	$\Delta=\theta_n-\theta_{n-1}$	$\Delta_{p+1}-\Delta_1$
0		——	——
20		——	
40			
60			
80			
100			
120			
140			
160			
180			平均 $A=$
200			$m=\frac{A}{p}=$
220			$\alpha=\frac{m}{T^2}=$　　弧度/秒^2
240			$a=$　　厘米/秒^2
260			$L=200(g-a)R$
280			$I=\frac{L}{\alpha}$
300			

I(平均)$=$　　；　　差$=\frac{I-I'}{I'}\times 100=$　　%

問　題

(1)設有質量,外直徑,及高度完全相等之圓柱體兩個,其一空心但係鐵製,其他則爲木製實心柱體。設二者同時自一斜面頂滾下,問孰先滾到斜面之底?

(2)試由本實驗之記號 0 至盤開始轉動時之角度 θ_0，計算盤自靜

止位置轉至該處之時間及達到該點時之角速度。

(3)若盤之角加速度爲 a,盤之半徑爲 R,繩端所懸之質量爲 m,重力加速度爲 g,則使盤轉動之力矩爲

$$L=m(g-a)R,$$

試推證之。

實驗六　擺子

(A')單擺

原理　懸一重球於細繩之一端，固定其他端，卽得一單擺。單擺擺動之週期 T（卽自右擺至左復回於右所需之時間），如擺動之振幅不太大（通常以 2 度爲限，卽懸線離開垂直方向之角度不得超過 $2°$，例如擺長約 1 米時，擺錘左右之最大距離約以 8 厘米爲限），係與擺長 L 之平方根作正比，卽

$$T=2\pi\sqrt{\frac{L}{g}} \qquad (1)$$

此中之 g 爲重力加速度。

目的　證擺長與週期之關係。

儀器　(1)單擺；(2)尺；(3)測徵計；(4)有秒針之錶(圖6.1)。

圖 6.1

實驗步驟　(1)令擺長約爲 1 米。在其靜止位置之後置一小物，(在圖 6.1 中此物係由另一垂線充任之。) 拉開擺錘使之離垂直線約 1 厘米，任其擺動。記錄擺錘經過其垂直位置之時間 t_1。自此時始，數至擺錘復自同方向擺過其垂直位置第五十次時再記下準確之時間 t_2〔注意：數時，最好令擺初次擺過其垂直位置(卽在 t_1 之時)時之次數爲 0，然後依次叫出 1，

2,……以至於 49,50)。共試驗三次,由三次平均結果,計算擺之週期。以尺量懸點至懸線末之距離 l;量擺錘直徑 d;將 l 加以 $\frac{d}{2}$ 作擺長 L。

(2)將擺長改短三次(約各爲 75,50,25 厘米),復各試驗三次。結果可登記如下:

實驗次數		d(厘米)	l(厘米)	(L)厘米	t_1	t_2	$T=\frac{t_2-t_1}{50}$	T 平均	L/T^2
1	a								
	b								
	c								
2	a								
	b								
	c								
3	a								
	b								
	c								
4	a								
	b								
	c								

$\frac{L}{T^2}$(平均)= ; $g=(2\pi)^2\frac{L}{T^2}=$; 誤差 $\frac{g-980}{980}\times 100=$ %

問 題

(1)試推導方程(1)。

(2)何謂"秒擺"?

(3)在何時刻,擺錘之速度爲最大?何時爲最小?

(4)在何時刻，擺錘之加速度爲最大？何時爲最小？

(5)求方程(1)兩邊之對數則可得

$$\log\frac{g}{4\pi^2}=\log L-\log T^2 \tag{2}$$

今若將每次觀察得之 L 及 T 分別代入此方程式之右方，然後由各 $\log\frac{g}{4\pi^2}$ 之平均計算 g 之值，結果是否較本實驗之算術的平均更佳？何故？試按此法計算所測得 g 之平均值。

(6)問擺之振幅對於週期之影響若何？試作實驗以大約求之。

(B)重力加速度

原理 本實驗 A 所用以測量時間之方法不甚準確,故以其法證實 L 與 T 之關係則可,以之測定 g 之準確值則所犯之誤差有時可甚大。通常藉單擺 C 以測算重力加速度之值,須先有週期已知至甚準價值之擺 A (常為一複擺) 以作標準。當 A 與 C 共同擺動後,因其週期不同,故須經歷若干次振動後,兩擺始共同擺過其垂直位置。茲稱此情況為一"符合"。自某一次符合始,至其復符合之時,擺動較速之擺必多擺過其垂直位置一次,故如已知標準擺 A 之週期,單擺 C 之週期亦可測至同等準確程度,因兩連續符合所隔離之時間可為擺之半週期之甚大倍數也(幾百倍以上)。

目的 自單擺之長及週期求重力加速度之值。

儀器 (1)標準擺 A;(2)單擺 C;(3)電池,電鑰 S 及電鈴 B;(4)擺架及水銀接觸(圖 6.2)。

標準擺 A 與單擺 C 同懸於一架。兩擺之下端各夾一針。當兩擺同時擺過其垂直方向時,針尖與架底之兩水銀接觸相遇,於是電流乃通行於電鈴線路中以振動電鈴。

實驗步驟 (1)調節兩擺末之針及水銀接觸,使擺均不動時,針與穴內水銀中心適接觸。針端不可太高,以免有時不能與水銀接觸,亦不可太低致擺動時針將拖水銀至穴外。調節妥後,令單擺振動,注意其能否保持在一平面上擺動,因開動如不小心,單擺末常依一小橢圓形曲線

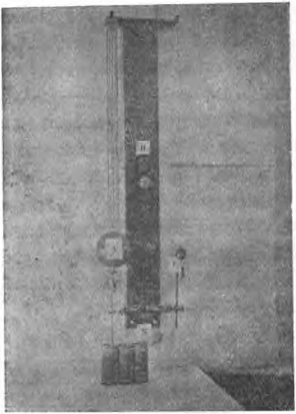

圖 6.2

而動，致針端不與穴中水銀接觸。單擺旣能保持在一平面上擺動，乃令複擺亦振。注意 A 與 C 之振動孰爲較速。

(2)當電鈴響時，記其時刻，是爲第一次符合。在每次符合之前後，電鈴常連續響四五次。各次之時刻均須記下，以其居中之值爲符合發生之準確時刻。同法，測定其第二，第三，第四及第五各次符合之準確時刻。令此等時刻爲 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5。

(3)任兩擺繼續擺動，但可停止觀察約二十至三十分鐘，然後復行測定兩擺五個連續符合之準確時刻。在停止觀察之時間內，各符合之時刻雖可不記，惟所用以測時刻之錶仍須繼續進行。令此次所測定之各時刻爲 t_1',t_2',t_3',t_4',t_5'，則 $(t_1'-t_1),(t_2'-t_2),\cdots\cdots(t_5'-t_5)$ 五值之平均(τ)卽等於符合 n 次所需之總時間。至於 n 值爲何，可自 T 及兩個連續符合之大約時間計得之，因 n 之值必須爲一整數也。例如兩連續符合所隔離之時間約爲 t，則與 $\frac{\tau}{t}$ 最近之整數卽爲 n。在 τ 秒內標準擺 A 之振動次數爲(卽擺過垂直位置之次數) $N=\frac{\tau}{t_a}$，t_a 表其振動一次所需之秒數(卽其半週期)。若 A 之振動較速於 C，則在同時期內，C 之振動次數爲 $N-n$；反之，如 A 之振動較慢於 C，則在同時期內，C 之振動次數爲 $N+n$。於是 C 振動一次所需之時間爲 $t_c=\frac{\tau}{N\pm n}=\frac{\tau}{\tau\pm nt_a}t_a$，其週期卽爲雙倍此值，結果登錄如下：

標準擺振動一次之時間 $t_a=$　；振動比單擺快(或慢)(快慢二字塗去一字)

次數	第一組符合各時刻						第二組符合各時刻						$\tau=t'-t$
	1	2	3	4	5	正確值	1	2	3	4	5	正確值	
1						$t_1=$						$t_1'=$	
2						$t_2=$						$t_2'=$	
3						$t_3=$						$t_3'=$	
4						$t_4=$						$t_4'=$	
5						$t_5=$						$t_5'=$	

平均 $\tau=$

$$n=\frac{\tau}{t_2-t_1}=\qquad;$$

單擺振動一次之時間 $t_c=\frac{\tau t_a}{\tau\pm nt_a}=$　　；

單擺繩長$(l)=$　厘米；單擺球直徑$(d)=$　厘米；

擺長 $L=l+\frac{d}{2}=$　厘米

重力加速度 $g=\frac{\pi^2 L}{t_c^2}=$　　厘米/秒²

公認值＝

誤　差＝　　%

問　題

(1)作本實驗時若 t_a 之值準確至萬分之一，問 τ 之時間須測準至何程度，結果之誤差方在萬分之一以下。

(2)問所用之標準擺之"等值單擺"之長若干？

實驗七　彈性

(A)Young 之彈性係數

原理及定義　加外力於物體，其容積與形狀均略有改變。此種改變簡名爲應變。單純之應變雖可分爲容變及切變兩項，然較常見之應變，如線之伸長，或桿之壓縮等，均係較繁複之情形。當物體受外力之作用而有應變時，體內隣近各部分互生相當之力以對應，此等相等且相反之力名爲應力。所加之外力如過大，則當撤去外力之後，物體常呈永久之形變而不能恢復其原始狀態。不至使物體呈永久形變之應力，常名爲物體之彈性限度。在彈性限度內，各種應力與應變均爲正比，是曰 Hooke 定律。寫作方程式則有

$$應力 = M \times 應變 \tag{1}$$

此中之 M 名爲物體之彈性係數。

視物體之應變之性質如何，其彈性係數亦各不相同。若考察物體之伸長或其縮短時，應力之值係等於外加力(即負擔) F 與垂直於 F 之截面積 A 之商，而其應變則爲單位長伸縮若干(即如以 e 表伸或縮之值，L 表原長，則應變等於 e/L)，故物體伸縮之彈性係數爲

$$Y = \frac{F}{A} \Big/ \frac{e}{L} = \frac{FL}{Ae} \tag{2}$$

此係數常名爲 Young 之彈性係數。

目的　由線之伸長證實 Hooke 定律，並求一金屬線之 Young 彈性係數。

儀器　(1)測伸長儀器；(2)金屬線兩根；(3)二米長之尺 R；(4)測微計 M；(5)重體 W(圖 7.1)。

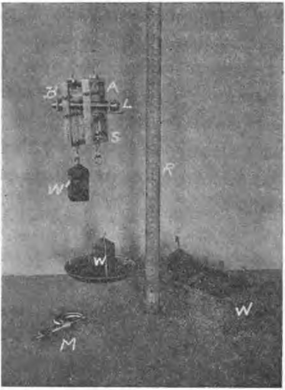

圖 7.1

同質料之線兩根，其上端均懸於固定之架，其下端各懸一金屬架 A，B。此兩架由兩個鏈桿聯接，可以上下相對的運動。一水泡準 L 之一端，止息於 A 架中之測微螺旋 S 上，其他端則倚於 B 架而以之爲支點。兩架之下均可懸重體以使線伸長。

實驗步驟　(1)以測微計量線之直徑十次（每次所量之位置須不同），自附表查得線之抗斷應力 U 之值，所加之最大增負不得使線之應力超過其抗斷應力之半：即如 a 爲線之截面積，則所加之最大重量不得超過 $\frac{aU}{2\times980}$ 克。以尺量線長 L。

(2)先加重量一二於兩線端使兩線均伸直。旋轉測微螺旋使水泡準中之水泡止於中心。誌測微螺旋所指示之標度 r_0。增加 A 架下之重體八次（每次增加之值約爲最大負量之 $\frac{1}{8}$），每次增重後，均旋測微螺旋至水泡復止於中心，而誌螺旋上所示之值 r（用測微螺旋時，須繼續向一方旋轉，特別於將達所求之點時，不得前後進退。如遇旋轉太多，致超過所欲求之位置，須後退四五周，然後再徐徐前進至所欲求之位置）。$r-r_0$ 即爲每次伸長 e 之值。

(3)次第取去所加之重量，於每取去一重量時，即旋轉測微螺旋，使氣泡止於中心而後誌其指示。自增重及減重兩次實驗之平均，計算線之應力及應變，與其 Young 之彈性係數。結果可登記如下：

線之質料　　　　最大負量(約)$=\frac{A\times B}{2\times980}=$　　克

線長(L)＝　　厘米；線直徑(平均)＝　　厘米；線截面積A＝　　(厘米)^2

載重(F)(克)	測微螺旋之指示 r 與伸長				平均伸長 e (厘米)	應力(Fg/A)(達因/方厘米)(y)	應變, $\frac{e}{L}$ (x)
	增重時 r	伸長 ($r-r_0$)	減重時 r'	伸長 ($r'-r_0'$)			
——		0		0	0	0	0

$\Sigma y=$ $\Sigma x=$

Young 彈性係數 $Y=\frac{\Sigma y}{\Sigma x}=$ 達因/方厘米

作圖 試以應變爲橫坐標,應力爲縱坐標,而作曲線於方格紙上以示其關係。

問 題

(1)作本實驗時,線長 L,其直徑 d,與其伸長 e 三項,何項須特別量準?何故?

(2)一鋼線,長 2 米,直徑爲 1 毫米,一端接於銅線,長一米,直徑爲 0.5 毫米。今加力於此 3 米長之線之兩端,使其伸長共爲 1 毫米,若鋼與銅之 Young 彈性係數各爲 13×10^{11} 及 11×10^{11},問線兩部分各伸長若干?又問所加於每端之力若干?兩線端之應力各若干?

附表 各質料之抗斷應力 U

質料	抗斷應力,〔達因/(厘米)²〕
黃銅	3×10^9
銅	4×10^9
鐵	6×10^9
鋼	9×10^9

(B)切變彈性係數

原理 (1)設有一圓柱體如圖(7.2a)。今在體之邊沿加以切力,以扭轉在體之上層 1,2,……各點使扭至如圖(7.2b)所示。自此兩圖觀之,加扭力後,體之厚薄或直徑未曾改變,惟其形狀則改變。故其效果實爲切變。11,22,……各線所扭轉之角度名爲扭角。若有桿,長 l 厘米,半徑爲 r 厘米,今夾住其一端而加一扭力矩 L 以扭轉其他端使其扭角爲 θ(以弧度計),則桿之切變彈性係數(亦名剛性係數) n 爲:

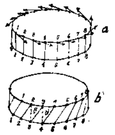

圖 7.2

$$n=\frac{2lL}{\pi\theta r^4} \tag{1}$$

或

$$L=K\theta \tag{1a}$$

自此方程觀之,如用一定之桿而所加之扭力矩不超過桿之彈性限度,則所扭轉之角度 θ 將與 L 成正比。是卽應用 Hooke 定律於扭轉之結果。

(2)方程(1a)中之K等於扭轉桿 1 度所需之力矩,其名爲扭力矩常數或扭轉常數。

目的 求桿之扭力矩常數及其切變彈性係數。

儀器 (1)扭轉輪A;(2)桿R;(3)測微計;(4)尺;(5)夾子;(6)重體W(圖 7.3)。

一垂直輪周A附有鋼條,條之一端固定於輪,其他端下垂而懸有一托盤,以備放置砝碼 W。輪之中心,可插一桿 R,桿之他端則另夾之。今

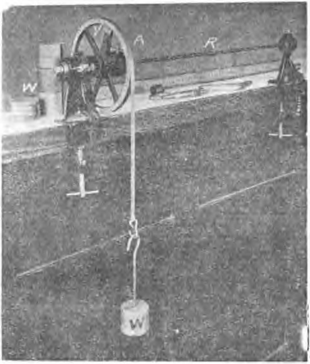

圖 7.3

如在托盤上加置重體，則輪將略轉以扭轉夾於其中心之桿。扭轉角之大小，可自輪周刻度及附屬之游標尺 V 定之。

實驗步驟 (1)將第一桿兩端夾緊。增加盤中重體六次，每次所加之重以能使輪扭動約十度為準。每增重一次後，即將輪周指點所示之角度記下。依次取去各砝碼，復記指點所示之角度。換用一桿，再依法試驗一次。

(2)量桿十個位置之直徑(用測微計量之)。求其平均之半徑 r。量桿之長 l，及輪之半徑 R。自諸結果計算桿之扭力矩常數及所用材料之

切變彈性係數。結果可登記如下：

第一桿 長(l)= 厘米

直徑					

平均半徑 r= 厘米

輪之半徑 R= 厘米

次數	負重W (克)	輪周示數(α) 增重時	減重時	扭角(平均) $\theta=(\alpha-\alpha_0)$
0	......			......
1				
2				
3				
4				
5				
6				
和	$\Sigma W=$	......	......	$\Sigma\theta=$

扭力矩常數 $K=\dfrac{(\Sigma W)R}{(\Sigma\theta)}\times\left(\dfrac{180}{\pi}\right)\times 980$

= C.G.S.單位

切變彈性係數 $n=\dfrac{2lK}{\pi r^4}=$

第二桿 質料= ;長= 厘米

直徑					

平均半徑 r= 厘米

次數	負重W (克)	輪周示數(α) 增重時	減重時	扭角(平均) $\theta=(\alpha-\alpha_0)$
0	......			......
1				
2				
3				
4				
5				
6				
和	$\Sigma W=$	......	......	$\Sigma\theta=$

扭力矩常數 $K=\dfrac{(\Sigma W)R}{(\Sigma\theta)}\times\left(\dfrac{180}{\pi}\right)\times 980$

= C.G.S.單位

切變彈性係數 $n=\dfrac{2lK}{\pi r^4}=$

n 之平均值=

作圖 將負重與扭角之關係表於方格紙上。

問 題

(1)扭力矩常數 K 與切變彈性係數 n 之區別何在?

(2)求 n 之值時, l, W, θ, r, R 五值中,何值最須準確? 何值最易量準?

(C)梁之彎曲

原理 當一簡單梁中部載有重體 W 時,其中部彎下之值 y 可自下列方程計得之:

$$y=\frac{WL^3}{4YBD^3} \tag{1}$$

此中之 L 表梁長(卽兩端支點之距離),B 表梁寬,D 表梁深,Y 表梁之 Young 彈性係數。此公式之理論的推證,須用微分方程原理,但遇此等問題時,y 與 W,L,B,D 各量之關係如何,均可由實驗定之。試驗時,只變更一量之值(例如 D)而維持其他各量不變以覘其對於 y 之影響,然後依下法以計算表二者關係之指數 n。令所欲求之關係爲:

$$y=Ax^n \tag{2}$$

今計其兩邊之對數,卽得

$$\log y=\log A+n\log x \tag{3}$$

方程(3)表示 $\log y$ 與 $\log x$ 之關係爲直線的,故若以觀察得之 $\log y$ 及其相對應之 $\log x$ 之值表於方格紙上,或將相對應之 y 及 x 表於對數格紙上,則將得一直線。由此直線與 $\log x=0$(卽 $x=1$)相交之縱坐標 $\log y$,卽知 $\log A$(或 A)之值;又自此直線之斜度卽可計得 x 之指數 n 爲何。惟利用圖解方法所計得之常數,視作圖之準確情況而異,故尋常整理此等觀察結果時又多採用下述法則。

將所觀察得之 $\log y=Y$ 及 $\log x=X$ 各值分作前後兩半。令前半之平均爲 Y_1,X_1,後半之平均爲 Y_2,X_2。以此兩對平均值代入方程(3)

即有兩個聯立方程:

$$Y_1=\log A+n X_1,\tag{4}$$

及

$$Y_2=\log A+n X_2。\tag{5}$$

聯解之,即得

$$n=\frac{Y_2-Y_1}{X_2-X_1},\tag{6}$$

及

$$\log A=\frac{Y_1X_2-Y_2X_1}{X_2-X_1}。\tag{7}$$

用此法整理得之答案,其準確程度,可與用繁長之"最小二乘法"所計得者相頡頏,故凡遇所量者爲 y 或 x,而其關係又可以方程(2)之形式表之者,均可用此較簡而頗準確之整理方法計算 n 及 A。

儀器　(1)刃口兩個 S,S;(2)同質料之梁 B 四條;(3)重體 W;(4)測微螺旋 M;(5)電池 B 及電流計 G(或電鈴);(6)尺。

圖 7.4

梁之兩端各支於刃口,其中心彎下之多寡,則藉測微螺旋及附屬之電路測之。

實驗步驟　(1)用截面爲正方之梁。令兩刃口之距離爲 80 厘米。置

梁於兩刃口上。將測微螺旋夾緊於棹，按圖接好電池及電流計。旋轉測微螺旋使其下端適與中心之金屬片接觸。此時，電流計中指針當略偏斜。令此偏斜等於最小之刻度。讀測微螺旋之指示，是為梁中心之原始位置。加重量 W 四次(每次所應加之值須使梁中心彎下約增 0.5 毫米)；測定每次加重後，梁中心彎下之值 y。由所量得之 y 及 W，證明二者係成正比。結果登記如下：

梁長$(L)=$ 厘米；寬$(B)=$ 厘米；深$(D)=$ 厘米

次數	擔負 W	中心位置	彎下值 y	$\frac{W}{y}$
0	0		0	
1				
2				
3				
4				

(2)所用之梁同前。令所加之重量 W 為第一次所用之最大值。維持此值不變。變更兩刃口之距離 L(可用 50,60,70,80 厘米)四次。仿前法求各彎下值 y。將 y 及 L 之關係表於對數格紙上(無對數格紙時，可將 $\log y$ 及 $\log L$ 表於方格紙上)。若 $y=KL^n$，試求 n 之值。結果可登記如下：

擔負 $W=$ (不變)

梁寬 $B=$ 厘米； 深$(D)=$ 厘米

次 數	梁長,L (厘米)	中心位置 原始	中心位置 加重後	彎下値(y) (毫米)	log L	log y
1	50					
2	60					
前半和		——		——	$L_1=$	$Y_1=$
3	70					
4	80					
後半和		——		— —	$L_2=$	$Y_2=$

簡單梁公式中 L 之指數 $\lambda=\frac{Y_2-Y_1}{L_2-L_1}=$;誤差$=\pm\frac{\lambda-3}{3}\times 100=$ %

(3)令所加之重爲第一次所用者之一半。維持兩刃口之距離爲80厘米。依次置第一,二,三,四各梁於刃口上,使其深度相同之尺寸豎立。照前法測定梁中心彎下各値。將結果仿前畫於對數格紙上,並登記如下:

擔負(W)= (不變)

梁長(L)= 厘米; 梁深(D)= 厘米

次 數	梁寬(B) 厘米	中心位置 原始	中心位置 加重後	彎下値(y) (毫米)	log B	log y
1						
2						
前半和	—	——	——	——	$B_1=$	$Y_1=$
3						
4						
後半和		——	——	——	$B_2=$	$Y_2=$

簡單梁公式中 B 之指數 $\beta=\frac{Y_2-Y_1}{B_2-B_1}=$; 誤差$=\pm\frac{\beta+1}{1}\times 100=$ %

(4)令所加之重爲第一次所用者之一半。維持兩刃口之距離於 80 厘米。依次置各梁於刃口上,使其寬度均等。照前法測定各彎下值 y,並作圖於對數格紙上以示 y 與梁深度 D 之關係。結果可登記如下:

擔負(W)= (不變)

梁長 (L)= 厘米; 梁寬(B)= 厘米

次數	梁深(D)	中心位置 原始	中心位置 加重後	彎下值 (毫米)	log D	log y
1						
2						
前半和	—	—	—	—	D_1=	Y_1=
3						
4						
後半和	—	—	—	—	D_2=	Y_2=

簡單梁公式中 D 之指數 $\delta=\frac{Y_2-Y_1}{D_2-D_1}=$; 誤差 $=\pm\frac{\delta+2}{2}\times100=$ %

問題

(1)試計算所用梁之 Young 彈性係數

(2)若將所用之正方梁拉長,問應加若干仟克之力方能使其伸長爲 1 毫米?

實驗八　簡諧運動

(A)彈簧振子

原理　(1)凡加速度與位移成正比，而方向適相反之運動，名爲簡諧運動。按 Newton 第二定律，物體之加速度係與其所受之力成正比，故凡物體所受之力與其位移成正比，而其方向適相反時，物體之運動均爲簡諧運動。

(2)當彈性體受外力之作用而有應變時，應變之大小多與外力成正比。今若撤去外力，則因其彈性，物體將恢復其原有狀態。在多種問題中，例如一伸長之彈簧下懸一重體，此恢復力之大小，在彈性限度內，係與物體之位移成正比，而其方向則反之，故此種彈簧振子之運動將遵循簡諧運動各方程。

設有作簡諧運動之物體，其在某時刻之位移爲 x，在同時刻之角加速度爲 a，則其週期（即一來一去所需之時間）爲

$$T=2\pi\sqrt{-\frac{x}{a}} \tag{1}$$

若以 Newton 第二運動定律之

$$F=ma \tag{2}$$

及 Hooke 之彈性定律之

$$-F=cx \tag{3}$$

各關係代入方程(1)中，則有

$$T=2\pi\sqrt{\frac{m}{c}} \qquad (4)$$

此中之 m 表物體之質量，F 表外加力，$-F$ 表彈簧之反作用，c 表彈簧之力常數，即其伸長一厘米所需之力。

目的　求彈簧振子之週期與其所負重量之關係。

儀器　(1)彈簧 S; (2)砝碼 W; (3)有秒針之錶; (4)有刻度之鏡 M (圖 8.1)。

圖 8.1

實驗步驟　(1)先懸一小砝碼於彈簧 S 末使之伸長少許後，各匝間均留有小空隙。自簧後有刻度之鏡讀出簧末小針所指之位置 x_0，依次令簧負重為 100,200,300 及 400 克。每增重一次後，即自有刻度之鏡 M 測定指點之位置 x。$x-x_0$ 即為簧之伸長。讀指針之位置時，觀察者之視向須與鏡垂直以免視差。由結果試計彈簧之力係數為何，登記如下：

加　　重(克)	指　針　之　位　置	彈　簧　伸　長(厘米)
——		0
100		
200		
300		
400		
和 1000=W		和= y =

彈簧之力係數 $c=\frac{980W}{y}=$　　　　達因/厘米

(2)令簧下所懸之總質量 m 為 150 克。略將 m 向下拉，釋放之後，

任其上下振動。自其振動50來回所需之時間(實驗三次)算其週期T_1。改懸 250 克及 350 克之質量,用同法測其週期 T_2 及 T_3 等。試將此等觀察值與由力係數 c 及公式(4)所計得者相較。結果登記如下:

彈簧之力係數 $c=$　　　達因/厘米

質量,m (克)	振動50來回之時間,(秒)				週期,T (秒)	$T'=2\pi\sqrt{\frac{m}{c}}$	%差$=\frac{T-T'}{T'}\times 100$
	試驗次數			平均			
	1	2	3				
150							
250							
350							

問　題

(1)設有一垂直之輪,半徑為 R,其邊沿上釘有一短桿 P。今置輪於正午太陽光之下,而令之以等角速度 ω 旋轉於通過其中心之水平軸線,試求短桿 P 在地面上之影之速度及加速度。

(2)若有一橫懸之線長一米,兩端均釘住,今在其中心點用掛鈎懸一重體 m 而令線上下振動。若中心離開其平衡位置之最大值為 4 毫米,而振動時,掛鈎與線永無脫離接觸之虞;問 m 之振動週期最短不得在何值之下?

(3)在等密之球內,其引力與距中心之距離成正比例。設地球為此種形體,其半徑為 6370 仟米;今若有一孔,自地面一處直穿其中心而出其背面,問一小物體自孔之一端落至彼端所需之時間為何?

(B)扭擺

原理 (1)若物體轉動時所受之力矩 L 與其轉角 θ 成正比，其方向與 θ 相反，則其角加速度 α 亦與 θ 成正比，方向亦與 θ 相反。此種運動亦係簡諧的，茲名之為角諧運動。若 I 表轉動物體之轉動慣量，則按 Newton 之第二定律

$$L=I\alpha \tag{1}$$

又按 Hooke 定律

$$-L=K\theta \tag{2}$$

故角諧運動之週期為

$$T=2\pi\sqrt{\frac{-\theta}{\alpha}}=2\pi\sqrt{\frac{I}{K}} \tag{3}$$

(2)懸物體 M 於線或桿之一端，夾住其他端而扭轉 M，則 M 將繼續左右扭動，是為扭擺。扭擺之週期 T 可自 M 之轉動慣量及所用之線或桿之扭力矩常數K按方程(3)測定之。扭擺之應用有二：(a)由 T 及 I 以測所用之線或桿之K；或(b)用以測定不規則物體之轉動慣量。自所測得 K 之值，利用第七實驗 B 所述之關係，卽可計得所用線或桿之切變彈性係數 n，因

$$n=\frac{2lK}{\pi r^4} \tag{4}$$

l 表線長，r 表其半徑。至於欲測某物之轉動慣量時，可先以此物懸於線末以作扭擺。令此物對於線之轉動慣量為 I，扭擺之週期 T_1；次將轉動慣量已知為 I_0 之物體加懸於線末，令其轉動之軸線與線脗合，而後

再求扭擺之週期 T_2，則應用方程(3)即可推得

$$I=\frac{I_0T_1^2}{T_2^2-T_1^2},\tag{5}$$

及

$$K=\frac{4\,I_0\,\pi^2}{T_2^2-T_1^2}\tag{6}$$

目的　利用扭擺以測桿之切變彈性係數及一環形物體之轉動慣量。

儀器　(1)盤 P; (2)桿 R 及架; (3)環 D; (4)尺; (5)測微計; (6)錶(圖 8.2)。

圖 8.2

實驗步驟　(1)將桿之一端夾好，在其下端懸盤 P(轉動慣量待定)。扭轉 P 約 10 度，以使盤往返的扭轉。自扭轉 25 來回所需之時間(實驗三次)求其週期 T_1。

(2)加環 D(轉動慣量 I_0 定已知)於盤，再仿前法定擺之週期 T_2。

(3)稱盤 P 及環 D 之重；量二者之直徑及桿之直徑與長度。自所量之週期 T_1 與 T_2，及環之大小等，先計其轉動慣量 I_0，再算線之扭力矩常數K及其切變彈性係數。復由 T_2, T_1 及 T_0 計算盤之轉動慣量 I。由盤重及直徑亦計其 I'，以與觀察所得之 I 相較而求實驗之誤差。

(4)改用另一桿，重作實驗一次。結果分別仿下表登記之。

盤(P)之質量＝　克；直徑　　　　　＝　厘米，　I'＝　克-方厘米

環(D)之質量＝　克；內外直徑之平均＝　厘米；　I_0＝　克-方厘米

	質料	週期 無環時 T_1秒	週期 有環時 T_2秒	扭力矩常數 $K=4\frac{I_0\pi^2}{T_2^2-T_1^2}$	桿直徑(厘米) $=2r$	桿長 l (厘米)	切變彈性係數(n) $n=\frac{2lK}{\pi r^4}$	盤之 $T=\frac{T_0T_1^2}{T_2^2-T_1^2}$
第一桿								
第二桿								

平均 $I=$

差 $=\frac{I-I'}{I'}\times 100=$ %

問題

設有一扭擺，其扭轉之振幅爲 10 度(卽盤扭轉最大値，左右各爲10度)。當其扭轉至 5 度時，其扭轉之角速度爲每秒 0.1 弧度，問此擺之週期若干？又問在此時刻，擺端所懸之盤之角加速度若干？

實驗九　碰撞定律

(A)恢復係數

原理　當兩物體碰撞之時，其所受之力爲何，雖不易直接量得，然在其接觸後，尚未分開前，按 Newton 第三定律，其互受之力實係相等且相反。茲令在此時間 t 內物體所互加之平均力爲 F，則在此時間內，兩物間所互加之衝量爲 Ft。按 Newton 第二定律，加於物體之衝量，係等於其動量之增加，故若兩物方起始接觸時，第一物體（質量爲 m_1）之速度爲 u_1，碰撞後將分開時之速度爲 v_1，則其動量之增加爲 $m(v_1-u_1)$，而

$$Ft=m_1(u_1-v_1) \tag{1}$$

同理，第二物體動量之增加將等於

$$-Ft=m_2(u_2-v_2) \tag{2}$$

消去不知之 F 及 t 卽得所號爲動量不滅定律如下：

$$m_1v_1+m_2v_2=m_1u_1+m_2u_2 \tag{3}$$

是卽謂碰撞後之動量等於碰撞前之動量。

不論物體之彈性如何，方程(3)均可應用。惟此方程中含四個速度，故如僅知兩物之質量 m_1 與 m_2，其終末之速度 v_1 及 v_2 之値果爲何，不但視 u_1 與 u_2 而異，且亦由兩物之彈性而定。欲討論彈性如何影響兩物體碰撞後之速度，可分碰撞時間爲壓縮及復形兩時期。當移動較速之物

體 m_1 追及其他物體 m_2 而與之初觸後，二者均略被壓縮。因此等壓縮而引起之一對作用及反作用，其一係加於 m_1，以減少其原始速度 u_1，其他係加於 m_2，以增加其速度 u_2。至二者之速度達等值 S 時，二者之壓縮乃不復增加。是爲碰撞之前半期，卽壓縮時期。若令此時期內兩物所互受之平均衝量爲 R_1 則

$$R_1 = m_1(u_1 - S) = -m_2(u_2 - S) \tag{4}$$

兩物之速度旣達等值 S 之後，其間之彈力仍奮使 m_1 之速度漸減，m_2 之速度漸加，以達到其壓縮爲零時之値，卽 v_1 及 v_2。在此碰撞之後半期中，卽恢復形狀時期，兩物所互受之平均衝量爲

$$R_2 = m_1(S - v_1) = -m_2(S - v_2) \tag{5}$$

若相碰之物體毫無彈性，則碰撞之後，二者將不分開，卽 $v_1 = v_2 = S$，而 $R_2 = 0$；此卽完全無彈性之碰撞之特徵。若在復形時期內，物體所受之平均衝量 R_1 等於其在壓縮時期內之平均衝量 R_2，則得所號爲完全彈性的碰撞。尋常之碰撞均在此兩種之情況之間。爲簡便起見，玆名 $\frac{R_2}{R_1} = e$ 爲恢復係數。故 $e = 0$ 表完全無彈性的碰撞，而 $e = 1$ 則表完全彈性的碰撞。將方程(5)除以方程(4)卽有

$$e = \frac{S - v_1}{u_1 - S} = \frac{S - v_2}{u_2 - S} \tag{6}$$

由此消去 S，乃得

$$(v_2 - v_1) = e(u_1 - u_2) \tag{7}$$

此中之 $(v_2 - v_1)$ 表兩物體碰撞後分開之速度，$u_1 - u_2$ 表物體碰撞前移近之速度，故 e 之定義常爲分開速度與移近速度之比。

若第一物體係與一固定之平面相碰，則 $u_2 = 0$，$v_2 = 0$，v_1 之方向

與 v_1 之方向相反，e 之值卽等於 v_1 與 u_1 兩數值之比。今如有一物體自高度爲 H 之點，落於一水平平面，而跳回至高度爲 h 之點，則

$v_1=\sqrt{2gH}$,　$-u_1=\sqrt{2gh}$　而

$$e=\sqrt{\frac{H}{h}} \qquad (8)$$

目的　求恢復係數之值。

儀器　(1)鋼球，玻璃球；(2)版 P；(3)小環 R；(4)夾子 C；(5)尺。

實驗步驟　(1)夾球於夾子，量球之最低點至版 P 之距離 H；放開夾子令球落下。上下移動環 R 使球跳回之後其最低點適可露出環頂。

圖 9.1

量環至版之距離 h。變更 H 三次，約自 100 厘米至 30 厘米。每次求 h 三次，取其平均而計其 e。

(2)換用另一質料之球，復作實驗。記載結果如下：

球之質料	版之質料	H	h				$e=\sqrt{\frac{H}{h}}$	平均 e
			1	2	3	平均		
鋼								
玻璃								

問題

(1)試證明當兩物正碰時,其所損失之能量為

$$E=\frac{1}{2}(1-e^2)(u_1-u_2)^2\frac{m_1m_2}{m_1+m_2}$$

m 表質量,u 表未碰前之速度,e 表恢復係數,下標1與2分表第一與第二物體。

(2)完全彈性體在碰撞現象中之意義與其在尋常彈性力學中之意義有何區別?

(3)有槍彈重 30 克,對一懸於垂繩端之大木塊射擊。設繩長 2 米,木塊重 10 仟克,而木塊被擊後,挈彈以俱動,至繩與垂直方向作 5 度角而止,問彈之速度如何?

實驗十　密度與比重

(A)　Archimedes 原理

原理與定義　(1)一物體之密度 d 係等於其單位體積內之質量。如 V 表物體之體積，m 表其質量，則

$$d=\frac{m}{V} \tag{1}$$

當物體 S 放在液體中時，液體加於 S 之力，顯然係等於與 S 同體積之液體 D 在液中佔與 S 相同位置時所受之力。惟當靜止之時，D 在液中所受之浮力適與 D 之重量相等且相反，是以當 S 放在液中時，S 亦受一向上之浮力，其值即等於 S 所排去液之重量。此原理，名爲 Archimedes 原理，爲測定固體及液體之密度時所常用。

(2)某物質之比重，係等於該物質之質量與同大體積之水（在其密度最大時之溫度即 4°C.）之質量之比，故比重係一數字；又因一立方厘米之水，其質量約爲 1 克，故若用厘米克秒制單位，則物體之密度之數值係等於其比重。

設有一物體 A，其比重未知待定，在眞空中之重量爲 W_0，全沉在水(溫度=4°C.)中之重量爲 W_w，而全沉在另一液體 B（比重亦未知）中時，其重量則爲 W_x，則按上述原理，A 之比重爲

$$S_A=\frac{W_0}{W_0-W_w} \tag{2}$$

而 B 之比重則爲
$$S_B=\frac{W_0-W_s}{W_0-W_w} \qquad (3)$$

如水之密度爲 d_w，則將方程(2)與(3)乘以 d_w 即爲 A 與 B 之密度。

在實際問題中，A 之重量均在空氣中稱之，故其重量應按 Archimedes 原理加以空氣浮力之改正，方爲方程(2)與(3)中之 W_0。惟此項改正均甚微小，常可忽略不計。

目的 求一金屬圓柱，一立方木塊及酒精之比重。

儀器 (1)靈敏天秤；(2)砝碼；(3)金屬圓柱 C 及立方木塊 S；(4)蒸餾水；(5)酒精；(6)絲線；(7)溫度計；(8)試杯，攪桿，及架；(9)游標測徑器及測微螺旋；(10)液體比重計；(11)高筒；(12)漏斗（圖 **10.1**）。

圖 10.1

實驗步驟 (1)以靈敏天秤稱得 C 及 S 在空中之重，W_{10} 及 W_{20}。

(2)將架跨過天秤之托盤，在架上置試杯。盛水於杯；以細絲懸圓柱 C，再令 C 全沉入杯中水內而後稱其重 W_{1w}，如 C 旁有氣泡，須以攪桿

略動水使氣泡可升散。記錄水之溫度。

(3)將 C 取出，在其上懸以 S，然後再令 C 與 S 同沉入水中而稱之，其重 W_{2w}。C 在液中之重即等於 $(W_{2w}-W_{1w})$。

(4)將杯中水倒出，拭杯令乾後，再盛以酒精。取下 S，求 C 沉入酒精中之重 W_{1a}。記下酒精之溫度。

(5)用游標測徑器及測微螺旋量 C 之高度與直徑，及 S 之各邊。

(6)倒酒精於高筒中，用液體比重計測定酒精之比重。

(7)由水之溫度，從相當之表(見附錄表三)查出其密度 d_w，利用前此所說明之 Archimedes 原理以計 C 與 S 及酒精之密度。

(8)自 C 及 S 之體積與重量，計算其密度，以與由(7)所計得者相較。各結果可按下表登記之。

(A)固體之密度

質料	形狀	平均高或長(厘米)	平均直徑(厘米)	體積(V)(立方厘米)	在空中重 W_0(克)	在水中重 W_w(克)	水溫°C.	水密度(d_w)(克/立方厘米)	質料密度(克/立方厘米) $\frac{W_0}{V}$	質料密度(克/立方厘米) $\frac{W_0 d_w}{W_0-W_w}$

(B)液體之密度

液名	溫度°C.	比重計示值	試驗用重體之重(克) 在空中(W_0)	在水中(W_w)	在液體中(W_x)	水溫°C.	水密度(d_w)(克/立方厘米)	液之密度(克/立方厘米) $\frac{(W_0-W_x)d_w}{W_0-W_w}$

問題

(1)試述比重計之原理。

(2)問量較重於水之比重計上刻度與較輕於水者之異點何在?

(3)設有一空心銅球,其在空中之重量爲1000克,其在水中之重量爲800克。若銅之比重爲8.55,問此球內之空心容積若干?

(4)假定所用之黄銅砝碼之比重爲 8.40,空氣之比重爲 0.00120,物體在空氣中之重量爲 50.0000±0.0013 克,若因空氣浮力之改正值不得超過 0.0005 克,問物體之密度約爲何?

(B)空氣之密度

原理　按定義，欲求在大氣壓力下空氣之密度，只須知一定容量之空氣重量即可。欲求一定容量空氣之重量，似可先稱一容量已知之空瓶之重量，再將其中之空氣全行抽去而復求其重量。實際上，因瓶內空氣不易完全抽盡，故用此法時，常須知瓶內剩餘空氣之壓力，而後利用 Boyle 定律以改正之。

在一定溫度之下，Boyle 定律云，氣體之密度與其壓力成正比。故如令 x 為所欲求空氣在房溫及大氣壓力 P 下之密度，d 及 p 為瓶內剩餘空氣之密度及壓力，則

$$\frac{d}{x}=\frac{p}{P} \tag{1}$$

若瓶中空氣未抽去前之重量為 W，抽去一部分空氣後，氣壓為 p，瓶與剩餘空氣重 w，則

$$W-w=V(x-d) \tag{2}$$

此中 V 表瓶之容量。自方程(1)與(2)消去 d，卽得

$$x=\frac{W-w}{V}\cdot\frac{P}{P-p} \tag{3}$$

目的　求實驗室內空氣之密度。

儀器　(1)靈敏天秤 A；(2)平底燒瓶 D 約容 1000 立方厘米；(3)橡皮塞中穿玻璃管及活門 V；(4)抽氣機 C；(5)開端 U 管壓力計 M (圖 10.2)。

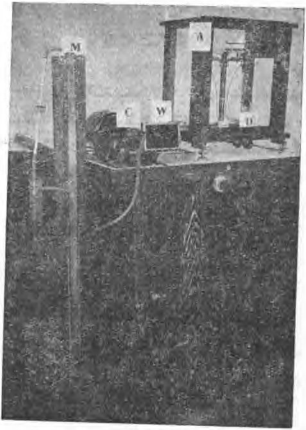

圖 10.2

實驗步驟　(1)測定靈敏天秤之靈敏度,並大約稱得瓶之重量以免抽去空氣後稱瓶重時多費時間。

(2)將燒瓶 D,接於抽氣機 C 及壓力計 M,如圖(10.3)當瓶內之壓力僅餘1厘米水銀高時,關閉抽氣機至 M 與 D 之活門 V_1,以覘瓶是否漏氣。如不漏氣,讀壓力計 M 兩管中之水銀柱後,再關閉 D 口橡皮塞中

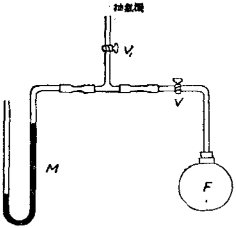

圖 10.3

之活門 V。次啓 V_1 以使空氣仍流入其他部分後，再令 D 與抽氣機及壓力計脫離。

(3)將瓶 D 取下後立即在天秤上稱之(可用複稱法)，令其重爲 w。

(4)開啓 V 令空氣流入瓶 D 中，再稱其重 W。

(5)記下大氣壓及房溫。

(6)誌瓶 D 上橡皮塞插入之深度，拔出之，再將瓶灌滿蒸餾水。次將活門 V 開啓之橡皮塞插入至原始深度後，乃復關閉 V 而倒去活門上之水。稱瓶及水之重 m，並誌水之溫度，由表(附錄表三)查得其密度，以求瓶之容量 V。

(7)試驗三次，用方程(3)以求各次所得之密度，登記結果如下：

次數	U管壓力計		瓶中壓力 P（厘米汞）	大氣壓 P（厘米汞）	瓶重			水溫 °C.	水之密度	瓶容量 V（立方厘米）	房溫 °C.	空氣密度（克/立方厘米）$x=\frac{W-w}{V}\times\frac{P}{P-p}$
	左管（厘米汞）	右管（厘米汞）			抽去氣後 w（克）	復裝滿空氣 W（克）	裝滿水 M（克）					

問題

(1)計算 V 之時，所用之重量可用 $m-w$，何故？

(2)試估計由本實驗所測得密度 x 之誤差約幾何。

(3)問房中空氣含有水分與其不含水分時，其密度孰爲較大？

(4)如瓶中原有少許水，問其影響於結果者如何？

(5)若復插橡皮塞於瓶口時，其位置約有 2 毫米之差異，問其影響於結果者約幾何？

實驗十一　能量與功率

(A)滑車組之機械的利益與效率

原理及定義　(1)加一力 P 於物體，當物體行距離 S，而 S 之方向係與 P 之方向作 θ 角時，則此力所做之功等於

$$W=PS\cos\theta \tag{1}$$

(2)當一無摩擦阻力之理想機器動作之時，所輸入於機器之功卽等於其放出者。今加一力 P_1 於一理想機器之某部分 a，此部 a 沿力 P_1 方向所移動之距離爲 S_1，設已知其另一部分 b 所移動之距離爲 S_2，則在 b 處與 S_2 同向之力 P_2，必爲

$$P_2=\frac{P_1S_1}{S_2} \tag{2}$$

自此方程觀之，所欲得之力 P_2 與所加之力 P_1，常不相等。爲省力起見，多種機器之設計，均以達到 P_2 大於 P_1 爲目的。所欲得之力與所加之力之比，常名爲機器之機械的利益 A，卽

$$A=\frac{P_2}{P_1}=\frac{S_1}{S_2} \tag{3}$$

方程(2)只可應用於理想的機械，卽毫無摩擦阻力之機器。如有摩擦阻力，一機器所輸出之功，將較其所輸入者爲小，其所短小之值，卽等於摩擦阻力所耗去之功。輸出之功與輸入之功之比，名爲機器之效率。若有機器，其部分 a 與其部分 b 之聯結係堅定的，則 a 部移動一定距離後，

b 部所移動之距離亦有一定之值。換言之，方程(2)中之 $\frac{S_1}{S_2}$ 爲一恆定常數，惟此恆定常數因機器有摩擦阻力之故，並不等於機器之機械的利益，如方程(3)所示者。欲求其機械利益時，令摩擦阻力所耗去之功爲 $W=FS_2$，F 表一相當之摩擦力，則方程(2)可寫作

$$P_1S_1=P_2S_2+W=(P_2+F)S_2 \qquad (4)$$

若仍以 $A=\frac{P_2}{P_1}$ 爲機器之機械利益，$\frac{P_2S_2}{P_1S_1}=e$ 爲其效率，則

$$A=\frac{P_2}{P_1}=\frac{S_1}{S_2}e \qquad (5)$$

故實際機器之機械利益可視爲係等於其理想值乘以其效率。

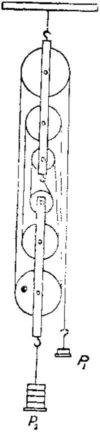

圖 11.1

物體作功之本領名爲其能量。能量之單位與功同，在厘米克秒制中，均名爲爾格，卽1達因之力沿力方向行1厘米所作之功。此單位甚小，通常又多以其十兆(卽一千萬)倍之值，卽 10^7 爾格，爲一實用單位，其名則爲焦耳。在英制中，力以磅爲單位，長度以呎爲單位，功之單位則爲呎磅。

(3)工作之快慢名爲功率。每秒作功1焦耳之功率名爲瓦特。英制中之功率單位名爲馬力，其值係等於每秒作550呎磅之功，或746瓦特。

目的　求一滑車組之機械的利益與其效率。

儀器　(1)滑車組；(2)線；(3)砝碼及托盤(圖 11.1)。

實驗步驟　(1)稱各托盤及在下一組之滑車之重。

(2)在 P_2 中置砝碼，使其總重約為 300 克，並求在 P_1 中應置若干砝碼方能使 P_1 向下拉動後即能無加速的繼續移動(令此總重為 P_1')。

(3)次將 P_1 中砝碼減去若干，以使其可向上無加速的繼續移動(令此總重為 P_1'')。

(4)將 P_2 中砝碼改變，使其總值次第為 600,900,1200,1500 及 1800 克，復按步驟(2)與(3)求相關之 P_1' 及 P_1''。各 P_1' 與 P_1'' 之平均值 P_1 可視為無摩擦阻力時之力，並可利用之以計滑車組之理想的機械利益。根據所已述之原理計算舉起 P_2 之實際的機械利益，理想的機械利益及效率。結果可登記如下：

負重 P_2 (克)	使 P_2 上移之力 P_1'(克)	使 P_2 下移之力 P_1''(克)	平均 P_1 (克)	機械利益 實際值 $A_1=\frac{P_2}{P_1'}$	理想值 $A_2=\frac{P_2}{P_1}$	行程比 $\frac{S_2}{S_1}$	效率 $e=\frac{P_2S_2}{P_1'S_1}$

問　題

(1)試將 A_1 與 P_2 及 e 與 P_2 之關係畫作曲線於方格紙上。

(2)用上述 P_1' 及 P_1'' 之平均以為 P_1，即可免去摩擦阻力之影響，試推證之。

(3)設繩與滑車間之摩擦阻力係與繩兩方之平均張力作正比，問本實驗所用滑車組之效率 e 與所舉之全重 P_2 之關係將若何？

(B)水動機之效率

原理　欲求輸入一水動機之功時，可在進水管處裝置相當儀器以量該處之水頭。此種儀器或為一 Bourdon 式壓力計，或為一開端 U 管壓力計，則視進水壓力之大小而定。用開端 U 管壓力計時，須注意其與水管通接之管中係滿貯水，故如 H 表壓力計兩玻管中水銀柱相差之高度(圖 11.2)，h 表與水管通接之玻管中水柱之高度，則在水管中心 A 點之水壓較大氣壓大，

$$P=\rho gH-\rho' gh \qquad (1)$$

此中之 ρ 表水銀密度，ρ' 表水密度，g 為重力加速度。既知 P 之值及流入機內之水之總容量 V，則此水所供給之功即等

$$U_i=PV \qquad (2)$$

量一馬達（水動機或電動機）所輸出之功 U_o 之直接方法，多用 Prony 輪掣，其較簡之一式（圖11.3）即以一皮帶套於機之滑車上，而自皮帶兩端之張力差（即圖中兩彈簧 T_1 及 T_2 所示之差值）及機所轉動之次數 N，與滑車之半徑 r，按下列方程而計得之：

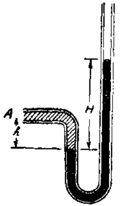

圖 11.2

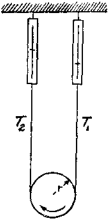

圖 11.3

$$U_0=2\pi r N(T_1-T_2) \tag{3}$$

將 U_i 與 U_0 除以實驗之時間 t，即得輸入於機及機所輸出之功率 W_i 與 W_0。既知 U_i 與 U_0，則機之效率 e 即等於

$$e=\frac{U_0}{U_i}=\frac{W_0}{W_i} \tag{4}$$

目的　求一小型水動機之效率。

儀器　(1)水動機；(2)進水管之壓力計；(3)水櫃；(4)水桶；(5)Prony 輪掣(圖 11.4)。

實驗步驟　(1)將水動機之進水管接於水櫃後，再將水櫃接於水源。水櫃係一不透氣之箱，其功用乃以維持進水管中壓力恆定，不至有劇烈之變化。

(2)先將水櫃至水動機之水門 K_2 關上，再開水源之水門 K_1，令水流入水櫃中，以壓其中之空氣。當其值達每方吋 10 磅之值時，乃開 K_2 以使水流入機中而轉動之。

圖 11.4

(3)維持進水管中壓力 P 於上述 10 磅/方吋之值，調節 Prony 輪掣中之張力，使其呈穩定狀態，並誌其兩彈簧之示數 T_1 與 T_2。

(4)在其某一定時刻 t_1 令水動機所放出之水流入一水桶內，同時

並誌機上所裝記轉器之數碼 n_1。當桶中水約達全桶容量之 $\frac{2}{3}$ 時，取去桶，記錄取去時刻 t_2，及記轉器之示數 n_2。稱桶中水重，以求其容量 V。由上列各方程計算輸入功率及輸出功率與效率。

(5) 維持水壓 P 不變，增加 Prony 輪掣中之張力，再作實驗數次，至機之擔負太大而將不能轉動時為止。各結果可依照下表登記之。

水銀壓力計左管之平均高度* $= H_1$ = 厘米

水銀壓力計右管之平均高度* $= H_2$ = 厘米

壓力計兩管中水銀柱相差之高* $= H$ = 厘米

進水管中心至壓力計中之水柱高* $= h$ = 厘米

水管中之壓力 P = 達因/厘米

空桶重 = 克

桶與水共重(克)	水容量 V(立方厘米)	彈秤示數		時間(秒)			記轉器示數			每秒轉數 N	功率		效率(%) $e=\frac{100W_i}{W_0}$
		T_1	T_2	t_1	t_2	(t_1-t_2)	n_1	n_2	n_1-n_2	$(n_1-n_2)(t_1-t_2)$	輸入 (W_i)	輸出 (W_0)	

作圖 (1) 在各方格紙上以每秒轉數 N 為橫坐標，效率 e 為縱坐標，作曲線以示其關係。在此曲線上，試指示其最大效率約為何？

* 不用水銀壓力計時，此數行可不贈。

(2)在同張方格紙上,示 N 與輸出功率 W_0 之關係。

問題

(1)試推證一馬力=746 瓦特。

(2)試證一定容量 V 之不可壓的流體自壓力為 P_1 之處壓進壓力為 P_2 之空間時,其所需之功為 $(P_1-P_2)V$。

(3)試證本實驗之方程(3)。

(4)設有槍彈以每秒 120 米之速度射於一木塊時,其所穿入之深度為 10 厘米,今若令其穿入18厘米,則其速度應為何?又問其所遇之平均阻力若干?

實驗十二　表面張力

(A)表面張力之直接測定

原理與定義　液體之表面頗似緊張的彈性膜，有縮小至最小面積之傾向。此傾向乃其表面張力所致。今若在一彈性薄膜上，劃一直線，則此直線一方之膜所加於線他方之力，其大小係與此線之長度成正比。討論表面現象時，對於表面張力之大小，常亦採用同樣的說法：即在液面上劃一線，在此線一方之液面所加於線他方之液面而使液之表面縮小之力，係與所劃之線之長度成正比。換言之，某液之表面張力 T，係等於每單位長液面所受之力。例如在單面液面上長 L 部分之力為 F；則

$$T=\frac{F}{L} \tag{1}$$

設將一 U 形細線，浸入液面後而取出之，則線將帶出一薄層液膜。若所加之力為 W，膜寬 l 厘米，則因膜有兩表面之故，其表面張力須自

$$T=\frac{W}{2l} \tag{2}$$

一方程計得之。

目的　直接量水及酒精之表面張力。

儀器　(1)Jolly 簧秤與砝碼，托盤；(2)U 形細線；(3)水，酒精；(4)溫度計；(5)燈火（圖 12.1）。

簧秤上端係掛於一有刻度之管 A，其下端有一指標。用時，須旋轉管架下之螺旋頭 B，以升降管 A，使指標與夾於架旁之玻管上一固定記

號符合。至於簧伸長之多寡則可自 A 上之刻度及 A 外套管頂之游尺讀得之。

實驗步驟 (1)將托盤掛於簧秤下端；調節螺旋頭以使其指標與架旁記號符合；記下 A 管所示刻度之值 S_0。加 1 克重量於托盤中，再調節螺旋頭，使指標仍與架旁記號符合；再記下 A 管所示刻度之值 S_1。

(2)繼續增重數次，每次 1 克。由各次 A 管所示之伸長，求簧之力係數 c。取去托盤及砝碼。

(3)量 U 形細線水平部分之長 l；將之夾好後，置火中燒至呈紅色時爲止。待其冷至房溫後，乃懸之於簧秤下。(注意：不得以手指接觸線！)

圖 12.1

(4)先以清水，次以氫氧化鉀，再以蒸溜水洗淨杯，然後盛以蒸溜水。(注意：用氫氧化鉀液時，勿令液落於衣上或以手指與之接觸。)

(5)置杯於架旁檯上，徐徐舉起之，令線沉入水中。次將杯向下移，令其橫部分適在水面下。

(6)調節簧之伸長，使線之水平部分露在水面外，且在此部分與水面間有一層垂直的水膜。此時，徐徐調變檯之高低並升降 A 管，以使簧下指標復與標號符合，然後自 A 管旁之刻度，求得簧之伸長 e，由 e 及

簧之力係數 c，即可計得所加於水膜之總力 W。記下水之温度。共作試驗三次。

(7)改用酒精，照前所述亦試驗三次。結果可登記如下：

(A)簧秤之力係數

加重(克)	A管位置 S(毫米)	伸長,(毫米) e
0		……
1		
2		
3		
4		
5		

和 15 $\Sigma e=$

$$力係數=\frac{15\times g}{\Sigma e}=c$$

(B)表面張力

液體	試驗次數	A管位置 原始 (S_0)	A管位置 線上有膜後 (S)	簧伸長 $e=S-S_0$ (毫米)	力 $W=ce$ (達因)	膜寬 l (厘米)	表面張力 $T=W/2l$ (達因/厘米)
水	1						
	2						
	3						
酒精	1						
	2						
	3						

問題

(1)有時亦以每單位表面面積所儲之能量爲表面張力之定義。試說明其故。

(2)胰皂水易成泡,水銀則否,問二者表面張力孰爲較大?

(3)水銀在空中自由墜落時係作球形,靜止在棹面上之水銀,則作扁球形,何故?

(4)設有直徑爲 5 厘米之胰皂泡,問其內外壓力差若干?

(B)毛細管作用

原理　當一毛細管浸入水中時，水與玻璃間之附着力係使水沾濕玻璃；玻璃被沾濕，水之表面張力乃牽引其他水分子以使水在管中上升，至管中水重(向下力)適等於表面張力(向上力)而止。若所用之液體(例如汞)，不能沾濕毛細管，則管中液面將反被迫下降。令液與管之接觸角爲 a，表面張力爲 T，管之半徑爲 r，則使管中液體上升之力爲

$$2\pi r T\cos a \tag{1}$$

而被此力所支持之液柱(高爲 h)，其重爲

$$\pi r^2 hdg \tag{2}$$

d 表液之密度；令(1)與(2)相等，卽得

$$T=\frac{rhdg}{2\cos a} \tag{3}$$

此方程中之 h 實爲液柱之平均高度。若在液柱表面處，其分界面係作半球形，球之半徑爲 r，自球底一點至管外液之自由面之垂直距離爲 h'，則

$$h=h'+\frac{1}{3}r \tag{4}$$

尋常 $\frac{r}{3}$ 較諸 h' 均甚微小，常可不計，故多卽以 h' 爲 h。水或酒精對於玻璃之接觸角 a 爲 0，故用於水或玻璃時，上列方程(3)中之 $\cos a$ 可逕以 1 代之。

目的　用毛細管量水及酒精之表面張力，並證實毛細管中液柱之

高度係與管之半徑作反比。

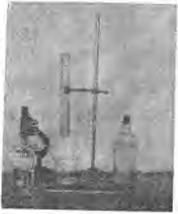

圖 12.2

儀器 (1)毛細管數根；(2)水及酒精；(3)鏡尺；(4)顯微鏡，附有測微目鏡者；(5)溫度計；(6)燈火；(7)三角銼刀；(8)有孔木塞或橡皮塞（圖 12.2）。

實驗步驟 (1)先以蒸溜水，次以鉻酸，最後復以蒸溜水洗淨毛細管內部。待其乾後方用之。

(2)讀鏡尺下端針尖 O 所示之標度S_0，讀時眼之位置須與 O 本身，其在鏡中之像，及眼三者同在一直線上，方免視差（圖12.3）。

圖 12.3

(3)次取一毛細管，用橡皮帶拴於鏡尺而將其下端浸入盛蒸溜水之杯中。夾緊尺，上下移置杯數次，使水可浸濕毛細管內部至其應達到之高度以上。最後乃調節鏡尺浸入水面之深度，以使針端 O 適將破水面爲止。此時管外水面高度卽爲 S_0；當管中水達到穩定位置時，乃自尺之刻度，記下其半月形最低點之位置 S；如 $S-S_0$ 比管之半徑較大遠甚，則液柱高 h 卽等於$S-S_0$，不必改正。

(4)於管旁水柱頂之處，作一記號，取出管，以銼割此處一次，然後折斷之。

(5)將管插於有孔木塞中,置其斷面於顯微鏡下,而量其直徑 $2r$ 多次,每次量時,可轉動管少許,以求其平均值。記下水之溫度。

(6)換用一管,重作試驗。

(7)換用酒精,照上述再作試驗。結果可登記如下:

液名	試驗次數	毛細管平均半徑(r)(厘米)	液面位置(厘米) S_0	液面位置(厘米) S	$h'=(S-S_0)$(厘米)	液高 $h=h'+\frac{1}{3}r$(厘米)	溫度 t	比重 d	表面張力 達因/厘米
水	1								
	2								
酒精	1								
	2								

問　題

(1)試推證方程(4)所示之改正值。

(2)設有如圖(12.4)所示之錐形橫玻管,今在其中盛以少許之水,

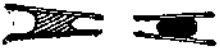

圖 12.4

則水將向管之較小一端移動;若盛以水銀,則其移動係向管之較大一端,試言其故。

(3)作本實驗時,只量在液頂所達到之處管之直徑,而不計其他部分之直徑,試言其故。

實驗十三　氣態定律

(A) Boyle 定律

原理　當一定質量氣體之温度不變時，其壓力 P 與其容積 V 成反比，即

$$PV=\text{常數}$$

是為 Boyle 定律。欲證實此定律，只須量得質量及温度均恆定之氣體，在各不同壓力下之容積，而計各壓力與相關之容積之乘積是否為一恆定不變之常數。

目的　證實 Boyle 定律。

儀器　(1) Boyle 定律試驗管；(2) 温度計；(3) 氣壓計(圖 13.1)。

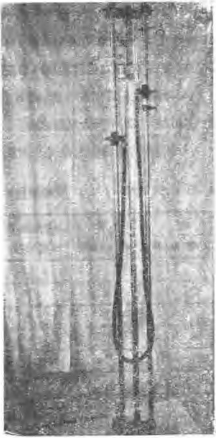

圖 13.1

本實驗所用之試驗管為兩個豎立之玻管 A 與 B。A 係與大氣通聯，B 上有一活門 V 可

以關閉，而管下端係以中貯有水銀之橡皮管聯之。A 管可以上下滑動，其中水銀柱與 B 管中相差之值，可自兩管中間之尺直接求得之。

實驗步驟 (1)B 管上之活門，原係關閉，切勿開之，因此中已先期貯盛以乾空氣。B 管之高度亦已先期調整妥善，不可任意改變。

(2)徐徐滑下 A 管，至其中之水銀柱頂達到距管口約5厘米處爲止。滑動務須慢慢，以免濺出水銀。自兩管中間之尺讀出兩管中水銀頂之位置；觀察時，眼之位置應與水銀頂同高，以免視差。

(3)漸漸滑上 A 管約十次，使 B 管之壓力大於大氣壓之值，約等於第一次試驗時，其小於大氣壓之值。

(4)試驗時，儀器旁之溫度及大氣壓均須記下。各結果可登記如下：

大氣壓＝　　厘米汞柱；　溫度＝　　°C.

水銀柱			A中氣壓，P	A中空氣容積 V	PV
A 管中	B 管中	差(厘米)	(厘米汞)	(立方厘米)	

作圖　試將 P 與 V 之關係畫作曲線於方格紙上，及對數格紙上。

問　題

(1)設一氣泡自池底升至池面時，其容積增大三倍，問池深若干(水表面張力之影響可以不計)？

(2)按分子運動說，氣體之壓力係因何而生，試簡略陳述之。

(B)空氣之壓力係數

原理及定義　當一定質量之氣體受熱時，其膨脹情形視其壓力之變化若何而定。通常所討論之情形有二:其一係維持其容積不變而視其壓力與溫度之關係，其他則係維持其壓力不變而視其容積與溫度之關係。若質量及容積恆定之氣體在 0°C. 時之壓力為 P_0，在溫度為 t°C. 時之壓力為 P，則其壓力係數 b 乃自下列方程求之:

$$b=\frac{P-P_0}{P_0 t} \tag{1}$$

若氣體之壓力不變，V_0 表其在 0°C. 時之容積，V 表其在 t°C.時之容積，則其容積膨脹係數 a 為

$$a=\frac{V-V_0}{V_0 t} \tag{2}$$

尋常各氣體之 b 與 a，其數值均約相等，且均與 $\frac{1}{273}=0.00366$ 相差不多。方程(1)雖為本實驗之基本方程，惟因所用之儀器常有兩項之不可免之誤差須加改正，故此方程尚不得直接引用。茲說明此二種改正項之計算法於下。

(1)因貯器受熱而膨脹之改正　當氣體溫度增加時，例如自冰點(即 0°C.,)增至沸點(即約 100°C.)，其貯器亦略膨脹，是以其中氣體之容積實非恆定不變。此項改正值係將方程(1)加以

$$\frac{\beta P}{P_0} \tag{3}$$

β 表貯器之容積膨脹係數，此改正項之推求法如下:

貯器既膨脹，按膨脹係數之定義，其容量（卽氣體之容積）將爲 $V(1+\beta t)$。今觀察得之壓力(未改正)旣爲 P，則欲使氣體之容積在同溫度不改爲 V，其應加壓力 x，按 Boyle 定律，當滿足下列方程：

$$\frac{x}{P}=\frac{V(1+\beta t)}{V} \quad 或 \quad x=P(1+\beta t) \tag{4}$$

x 卽方程(1)中 P 之改正值。以之代替 P，則方程(1)可化爲

$$b=\frac{P(1+\beta t)-P_0}{P_0 t}=\frac{P-P_0}{P_0 t}+\frac{\beta P}{P_0} \tag{5}$$

(2)因貯器外一部分連通管未曾受熱之改正項 當貯器受熱後，器外常有一部分之連通管未曾受熱，是以此部分內氣體之膨脹與器內氣體實不一致。玆推求此項之改正如下：

令貯器中氣體之溫度爲 0°C.，其壓力及密度各爲 P_0 及 d。若不受熱部分之溫度爲 t_1°C.，則在同壓力 P_0 下，此內之氣體密度將爲 $\frac{d}{1+\alpha t_1}$。當貯器中氣體之溫度升至 t°C.，因其壓力增至 P，故不受熱部分之密度將變爲 $\frac{Pd}{P_0(1+\alpha t_1)}$。由此卽知當貯器溫度爲 0°C. 時，貯器及不受熱部分(容積爲 v)內之氣體總質量將爲

$$Vd+v\frac{d}{1+\alpha t_1} \tag{6a}$$

若溫度爲 t°C.，則其總質量爲

$$V(1+\beta t)\frac{Pd}{P_0(1+\alpha t)}+v\frac{Pd}{P_0(1+\alpha t_1)} \tag{6b}$$

因氣體未曾增減，故方程(6a)與(6b)所示之質量應相等，卽

$$Vd+\frac{vd}{1+\alpha t_1}=\frac{PVd(1+\beta t)}{P_0(1+\alpha t)}+\frac{Pvd}{P_0(1+\alpha t_1)} \tag{7}$$

除以 Vd,乃有

$$1+\frac{v}{V}\left(\frac{1}{1+\alpha t_1}\right)=\frac{P}{P_0}\left(\frac{1+\beta t}{1+\alpha t}\right)+\frac{v}{V}\frac{P}{P_0}\frac{1}{(1+\alpha t_1)} \tag{8}$$

在方程(8)中$\frac{v}{V}$及 αt_1 較諸 1 均爲甚小,故遇其相乘或高次冪時,均可忽略不計。如是則方程(8)可寫作

$$1+\frac{v}{V}=\frac{P}{P_0}\frac{(1+\beta t)}{(1+\alpha t)}+\frac{v}{V}\frac{P}{P_0} \tag{9}$$

從此計算得 α,然後再將含 $\frac{v}{V}$ 二方及二方以上各項忽去,卽可推得

$$\alpha=\frac{P-P_0}{P_0t}\left(1+\frac{vP}{VP_0}\right)+\frac{P\beta}{P_0} \tag{10}$$

因 α 與 b 之值甚相近,故方程 (10) 亦可視爲所欲求之氣體壓力係數 b。

目的 求空氣之壓力係數。

儀器 (1)玻璃泡;(2)開端 U 管壓力計 M*;(3)水杯;(4)蒸汽鍋 B 及燈 G;(5)溫度計 T;(6)氣壓計;(7)石棉板 A (圖 13.2)。

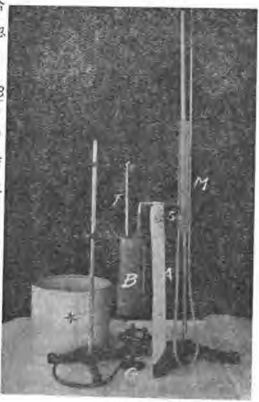

圖 13.2

* 本題所用之壓力計,其較精密者,可照圖(13.1)所示者配合之。

實驗步驟　(1)徐徐滑下壓力計 M 右管至其中之水銀柱約距管口 5 厘米爲止。此時在其左管中之水銀頂須在一紅線點 S 之下 7 厘米或更大距離。如距離太小，須問教員應如何調理，方得進行試驗。

(2)將一杯置於玻泡下之架上，其高度須可使全泡能沒入杯中。在杯中盛以碎冰，後再倒滿冷水以湮沒全泡。此時壓力計左管中之水銀柱將漸次升高。小心觀察左管之水銀柱，如遇其將升過紅線點時，應即將左管滑下。當左管中水銀柱不再移動時，徐徐調變右管之高度，以使左管中水銀柱頂適與紅線點相遇。誌兩管中水銀柱之高度。並以溫度計測冰水之溫度是否爲 0°C.。

(3)取去冰水杯。視查汽鍋中是否已盛水。置汽鍋於冰水杯所原佔之位置，在鍋後與儀器其他各部分之間，放置石棉版 A，以免此等部分受熱。燃燈以熱鍋中之水。當其溫度升高後，壓力計左管中水銀柱將漸降落。此時須徐徐將右管滑上，以免水銀從此中溢出。左管中水銀柱旣不移動後，乃調變右管之高度以使左管中水銀頂復達到前此之紅線點 S。記下兩管中水銀柱之位置。

(4)取去燈火及汽鍋，徐徐滑下右管，以免水銀流入玻泡中。

(5)共作實驗三次。

(6)記下大氣壓力並自附錄中表四查得沸點。

(7) β, v, V 各値應爲何，可詢問教員。各結果可按下表登記之。

大氣壓力(B)＝	厘米汞；	v＝	立方厘米；
沸點溫度(t)＝	°C.；	V＝	立方厘米

β＝

次數	紅線點位置	右管水銀柱位置		泡中壓力(厘米汞)				
	(h_0)	在冰點時 (h_1)	在沸點時 (h_2)	在冰點時 $P_0=(B+h_1-h_0)$	在沸點時 $P=(B+h_2-h_0)$	$\frac{P-P_0}{P_0 t}$	$\frac{vP}{VP_0}$	$\frac{P\beta}{P_0}$	$a=b$ (方程10)
								平均	

問題

(1)當理想氣體之壓力P與溫度t均變時,問其容積V將如何變化?

(2)設溫度爲16°C.,氣壓爲74.5厘米汞,密度爲1.192×10^{-3}克/立方厘米,試求在下列條件下之密度:(a)溫度=0°C.,氣壓=74.5厘米汞;(b)溫度=0°C.,氣壓=76.0厘米汞;(c)溫度=120°C.,氣壓=75.0厘米汞。

實驗十四　飽和蒸汽

(A)沸點與壓力

原理　(1)按分子運動說,在液體表面上分子，其運動速度之甚大者,可以擺脫液中其他分子之吸引而飛出液面。此等飛出液面外之分子如無其他阻礙,將永不返回,而液將漸乾涸,是謂蒸發。如液體係封閉於一瓶內,則飛出液面外之分子,只能增多至一相當數目，因在表面上空間之分子亦係繼續的侵入液內也。當自液內飛出之分子與復侵入液內者爲同數時,其情況可視作一種之動的平衡;此時液外之蒸汽名爲飽和蒸汽,其壓力名爲飽和蒸汽壓。飽和蒸汽與尋常氣體不同之點,在於其壓力與其容積無關,只視其溫度而定,此蓋因自液面上飛出或飛入之分子數目之多寡,純視液與蒸汽之溫度而定也。

當液體之溫度增高至適當之値時，不但液面分子可汽化爲蒸汽分子,在液內部亦可有汽泡發生而由液內上升。此現象名爲沸騰 沸騰時之汽泡,既係產生在液內，故必係飽和的，其中壓力較液面上壓力略大少許,故能上升。在一定壓力下,沸騰之溫度(名爲沸點 均有一定之値,故欲求飽和蒸汽壓與其溫度之關係時，可求在不同壓力下沸點之値爲何。

(2) 用尋常之水銀溫度計時,下列諸誤差常須加以改正:

(a)溫度計之 0° 及 100° 不準　改正之法如下:先將溫度計置於冰

水中，而記其示數 t_1°C.；次將溫度計放於大氣壓下沸騰之汽鍋中，而記其示數 t_2°C.。若與大氣壓(由氣壓計量得)相對應之沸點爲 t°C.，則沸點之改正值應爲 $(t-t_2)$°C.。今若在一方格紙上作一直線通過 $x_1=t_1$ 及 $y_1=-t_1$ 與 $x_2=t_2$ 及 $y_2=t-t_2$ 兩點，則自此直線卽可讀出當溫度計之指示爲任何他值時，其應加或減之值爲何。

(b) 溫度計管莖露出熱體外之改正　因溫度計水銀絲有一部分係露在熱體之外，此部分之溫度未曾達到熱體之溫度，故此部分水銀絲尙未膨脹至其應脹之値，而溫度計之示數乃太低。令 t_c 表熱體之正確溫度，S 表溫度計露在熱體外之溫度(可以另一溫度計量之)，l 表露出水銀絲之長(以度數計)，及 t 表溫度計之示數，則

$$t_c=t+a(t-S)l \tag{1}$$

a 表水銀對於玻璃之像似的膨脹係數，其値通常爲 0.00016。

除上所述兩項較重要之改正外，其他改正，除作極準確之量測外，常可不計。

(3) 用氣壓計時，亦當注意其示數常須改正至溫度爲 0°C. 時之值。此等改正可由本書後附錄表一查得之。如氣壓計之管徑不甚大，則毛細管作用之改正亦須計及。此項改正可由書後附錄表二查得之。

目的　求沸點與壓力之關係。

儀器　(1) 汽鍋 A；(2) 冷凝器 B；(3) 不漏氣之瓶 C；(4) 開端 U 管壓力計；(5) 打氣機及抽氣機；(6) 溫度計；(7) 燈火；(8) 冷水（圖 14.1）。

自蒸汽鍋所產生之蒸汽，爲冷凝器所冷卻後卽行凝結，故其中壓力

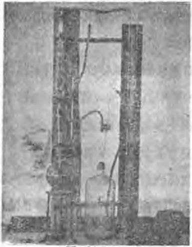

圖 14.1a

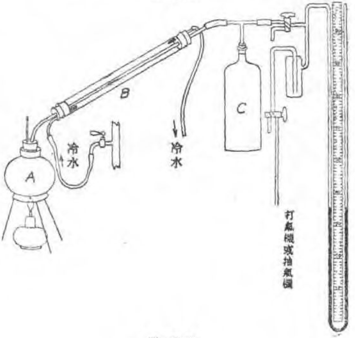

圖 14.1b

大體上係恆定不變。不漏氣之大瓶 C 之功用，乃以免除壓力計受汽鍋中壓力之不規則變化之影響。

實驗步驟 (1)將儀器按圖裝好。開啓水門，使冷水流通於冷凝器中。(注意冷凝器中冷水須由下流入器內，而由器上端流出，何故?)

(2)先令汽鍋與大氣通聯。燃火以熱汽鍋使其中水沸騰，當各情況均呈穩定狀態時，記下大氣壓及汽鍋中之溫度。

(3)次旋轉瓶塞使汽鍋與抽氣機通聯。抽去汽鍋中之氣至壓力計兩管之水銀柱約差 5 至 10 厘米。關閉瓶塞並停止抽氣機。約三分鐘後再量沸點及其相對應之壓力。將壓力減低數次，至沸點約達 75°C. 左右爲止。

(4)將抽氣機更換爲一打氣機。令汽鍋中氣壓漸次增加(每次約 5 至 10 厘米)，而求在較大氣壓更大之壓力下之沸點數次。

(5)所用溫度計之 0° 及 100° 是否應加改正，須預先測定。(測定方法爲何?)

作圖 以溫度爲橫坐標，壓力爲縱坐標，將所觀察各結果圖表於方格紙上。

觀察結果可登記如下:

沸點溫度,°C.		氣壓					
		大氣壓			壓力計中汞柱		全壓力 p
觀察值	改正值 t	氣壓計示數	房溫	改正值 B	左管 h_1	右管 h_2	$p=B+h_2-h_1$ (厘米汞)

問　題

(1)在一 Toricelli 管中,水銀柱高 40 厘米,柱上空氣亦高 40 厘米,今加數滴乙醚於管中。若乙醚之飽和蒸汽壓爲 30 厘米,試求管中水銀柱之高。

(2)假設理想氣態定律亦可用於飽和蒸汽,試自實驗所得之壓力,計算在 100°C. 及 80°C. 時之水蒸汽密度。〔水蒸汽在 0°C., 76 厘米汞時之密度爲(0.624×0.001293)克/立方厘米。〕

(B)濕度

原理與定義 大氣中尋常均含相當水分。每立方厘米空氣所含水分之克數,名爲其絕對濕度。爲便利起見,尋常濕度表多寫出每立方米中水分之克數,或其相對應之水蒸汽壓力;後者卽大氣中水蒸汽單獨存在時所生之壓力也。

當溫度降低時,大氣中之未飽和水蒸汽將漸達飽和狀態;一達飽和狀態,大氣中水蒸汽卽將附着於物面而凝結爲露水,此時之溫度,名爲露點。

除用露點及絕對濕度以表示大氣中水分之多寡外,尋常又多用相對濕度一詞。相對濕度 r 乃指大氣中未飽和(卽實有)水蒸汽密度 d_a,與在同溫度時飽和水蒸汽密度 d_s 之比,卽

$$r=\frac{d_a}{d_s}. \tag{1}$$

惟因水蒸汽遵循 Boyle 定律,故若 p_a 表大氣中未飽和水蒸汽單獨存在時之壓力,p_s 表在同溫度時飽和水蒸汽之壓力,則相對濕度亦可視爲等於

$$r=\frac{p_a}{p_s} \tag{2}$$

欲求相對濕度,可利用方程(1)或(2)。實驗時,可以適當方法求 d_a 之值或先求露點,而後由飽和水蒸汽溫度與其壓力或密度之表,查出與露點相對應之 d_a 或 p_a,然後再自表查得與房溫相對應之 d_s 或 p_s。

目的 求露點與相對濕度。

儀器 (1)露點濕度計 C; (2) 乾濕泡溫度計 A; (3)溫度計; (4)望遠鏡 M_o; (5)乙醚 B; (6)抽氣管 D (圖 14.2)。

圖 14.2

露點濕度計之主要部分爲一光亮之金屬面，其溫度可減低以至於露水凝結於其上。較完善之露點濕度計多備有兩個光亮之鎳面，一面上可凝結露水，他面則否，如是，則何時方結露較易測定。器內盛有乙醚，其上有兩空管，一乃以插溫度計，其他則聯於一吸氣管，以助器內乙醚之蒸發。當乙醚蒸發時，器之溫度卽漸行降落。器內溫度已否達到露點，可用望遠鏡對準器內之光亮金屬面而觀察之。

乾濕泡溫度計爲一對之溫度計，其一之下包有濕布，並浸入水中。因水蒸發生冷之故，濕泡溫度計之指示均較乾泡爲低，其較低之值，視蒸發之快慢而定。至於蒸發之快慢，除與濕度有關外，且視空氣密度及其流通速度有關。尋常情形下，如乾泡指示之溫度爲 T_1°C.，濕泡指示之溫度爲 T_2°C.，大氣壓爲 B，則大氣中實有之水蒸汽壓力爲

$$p_a = p_2 - 0.00075(T_1 - T_2)B, \qquad (3)$$

此中之 p_2 表在 T_2 溫度時飽和水蒸汽之壓力。

實驗步驟 (1)掛一溫度計 T 於欲測濕度之地點。

(2)將濕度計內之光亮金屬面拭乾；倒乙醚於器中，並將另一溫度計插入器內。

(3)將望遠鏡裝好於距器約一二米處,調節之使可看見器內金屬面。次將抽氣管聯於器上。輕壓抽氣管皮球,使器內乙醚蒸發,至金屬面上有水凝結時即記溫度計之示數。

(4)此後停止抽氣，令器中溫度略增至金屬面上水分復全蒸發後，再記下其溫度。

(5)觀察露點呈現及消滅之溫度各五六次,以其平均值爲露點 T_d。

(6)將乾濕泡溫度計懸於濕度計之旁。觀察濕泡下所包圍之布是否潮濕。待兩溫度計之指示均達穩定價值時,乃記下乾泡之溫度 T_1 與濕泡之溫度 T_2。記下大氣壓 B。

(7)自書後附錄表四查得與 T 及 T_d 相對應之飽和水蒸汽密度 d_s 及房中蒸汽實有之密度 d_a 與壓力 p_s 及 p_a,而計算其相對的濕度 r。

(8)復查得與濕泡溫度計所示溫度相對應之壓力 p_2，並利用方程(3)及(2)以計算由乾濕泡溫度計所量得之相對的濕度。各結果可登記如下:

露點濕度計

	房溫 °C. T	露點 °C. T_d
平均		

p_s(在 T°C. 時) =　　　毫米汞

p_a(在 T_d°C. 時) =　　　毫米汞

$r_1 = \frac{p_a}{p_s} \times 100 =$　　　%

氣壓計 $B=$ 　　毫米汞

濕泡溫度計，$(T_2)=$ 　　°C.; $p_2=$ 　　毫米汞

乾泡溫度計，$(T_1)=$ 　　°C.; $p_1=p_s=$ 　　毫米汞

$p_a=p_2-0.00075\ B(T_1-T_2)$ 　　毫米汞

$r_1=\frac{p_a}{p_s}\times100=$ 　　%

平均相對濕度 $=\frac{r_1+r_2}{2}=$ 　　%

問　題

(1) 試計算實驗室中，水分之總質量大約幾何?

(2) 設有容積爲 500 立方米之房間，其溫度爲 22°C.，今欲將其中之相對濕度自 20% 增至 50%，問應蒸發若干克之水?

實驗十五　固體與液體之膨脹

(A)固體之長度膨脹係數

原理與定義　當物體之溫度改變時,其長度均略改變;其所增減之值由三事定之:(1)溫度改變之值;(2)物體之質料及(3)其原長。若以方程表之,則有

$$l=(L-L_0)=\alpha L_0(t-t_0) \tag{1}$$

此方程中之 L_0 表在 $t_0°$C. 時之長度,L 表在 $t°$C. 時之長度(l 卽增加之長度),α 爲一比例係數,名爲長度膨脹係數,其值視物體之質料而定。將方程(1)寫作

$$\alpha=\frac{L-L_0}{L_0(t-t_0)}=\frac{l}{L_0(t-t_0)} \tag{2}$$

則知 α 之意係指當溫度增高一度時,增加之長度與原長之比。嚴格言之,α 之値亦與起始溫度 t_0 有關,故通常多令 $t_0=0°$C.;惟在實際情形下,以 $t_0=0°$C. 之 α,與以他溫度爲 t_0 之 α 相差甚微,均可視作相等

目的　求一金屬桿之長度膨脹係數。

儀器　(1)熱管;(2)金屬桿;(3)光槓桿;(4)溫度計;(5)望遠鏡(圖 15.1)。

欲試驗之桿可置於垂直的熱管中,管之上下端,各有一小口,以備水蒸汽或水之出入。管之中部另有一孔,可橫插一溫度計。

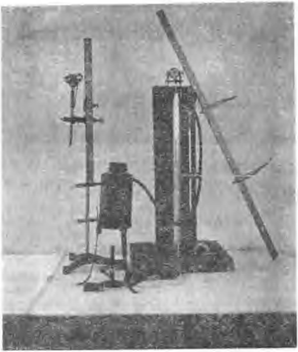

圖 15.1

光槓桿係一三足之架，上置有一小鏡。架之後足止息於金屬桿頂，其他兩足則立於有溝槽之固定架上。今在離鏡約一二米處，置一縱立之標度及望遠鏡，則調節望遠鏡後，可見及由小鏡所反射之標度之像。當金屬桿之溫度增高而伸長時，光槓桿全體將以通過其前兩足之直線爲軸而轉動。若令自後足垂直於通過前兩足之直線之距離爲 k，後足移動之遠度（卽桿之伸長）爲 l，則光槓桿及附鏡所轉之角爲 $\frac{l}{k}$ 弧度。鏡轉動此角後，其反射之光線則轉動二倍之角，故如知鏡至標度之距離 D，及反射光線在標度上所移動之距離 d，則

$$\frac{2l}{k}=\frac{d}{D} \quad 或 \quad l=\frac{kd}{2D} \tag{3}$$

實驗步驟　(1) 量桿長，須準確至 $\frac{1}{10}$ 毫米。

(2) 將儀器裝置畢，調節望遠鏡及標度，令望遠鏡中細線與標度上某一刻度符合，記錄此刻度及溫度。此後須留意勿任光槓桿或鏡移動。

(3) 令溫水流入管中，使桿之溫度增至某一定之值時，再記下望遠鏡所指示之標度。

(4) 繼續試驗四次，每次增加之溫度約為 15°C.，最後乃將蒸汽通入管中，當其達到穩定情況時，乃讀望遠鏡中之示數。(注意：溫水須由管下端流入而由其上端流出；水蒸汽則須由管上端流入而自其下端流出。) 自氣壓計記下大氣壓。

(5) 熄滅燈火，停止供給蒸汽，待桿之溫度復降至原始之值時，再讀望遠鏡中之示數，以視其是否未變。若光槓桿及望遠鏡均未曾移動，此示數應不改變，故如遇改變之值過大時（在 2 毫米以上），則須重作實驗。

(6) 量鏡至垂直縱標度之距離 D。取下光槓桿而置之於一紙上，以印得其三足中心之位置。自其後足中心，畫一垂線於連前二足中心之直線。以游標測徑器量此垂直距離 k。各結果可登記如下：

桿之質料：

桿長 (L_0) =　　厘米；　　原始溫度 (t_0) =　　°C.；

標度原始示數 (d_0) =　　厘米；　光槓桿常數 (k) =　　厘米；

鏡距標度 (D) =　　厘米；　大氣壓 =　　厘米汞；　沸點 =　°C.

實驗次數	溫度 t	標度 d	溫度差 $(t-t_0)$°C.	標度差 $(d-d_0)$（厘米）	桿伸長（厘米） $l=\frac{k(d-d_0)}{2D}$
1					
2					
3					
4					
5					

$\Sigma(t-t_0)=$ $\Sigma l=$

長度膨脹係數 $a=\frac{\Sigma l}{L_0\Sigma(t-t_0)}=$

問　題

(1) 試估計所量得 $l, L_0, (t-t_0)$ 各誤差及其對於 a 之影響。

(2) 若 $a=0.005$，問用 0°C. 爲起始溫度 t_0，與用房温（15°C.）爲起始溫度，而計得之 a，其百分差若何？

(3) 試作圖以證明當鏡轉一角 θ 後，由之所反射之光線將轉動 2θ 角。

(4) 試證固體之體積膨脹係數等於其長度膨脹係數之三倍。

(B) 液體之容積膨脹係數

原理 當一定質量之液體受熱後，其容積常亦改變，其改變之情形可以下列方程表之：

$$V=V_0(1+\beta t) \quad \text{或} \quad \beta=\frac{V-V_0}{V_0 t} \tag{1}$$

此中之 V 表溫度為 t°C. 時之液體容積，V_0 表溫度為 0°C. 時之容積，β 則為一常數，名為液體之容積膨脹係數。

在實際問題中，因貯存液體之器皿常亦膨脹之故，討論液體之膨脹時，多用其對於貯器之像似的膨脹。若 α 表貯器之容積膨脹係數，則當溫度自 0°C. 增至 t°C. 時，貯器內之容積亦將脹大為

$$V'=V_0(1+\alpha t) \tag{2}$$

故如以液體之容積 V 較大於 V' 之值為其像似容積膨脹，則其像似的膨脹係數將為

$$\beta_a=\frac{V-V'}{V_0 t}=\beta-\alpha \tag{3}$$

故如已知貯器之容積膨脹係數 α，及液體對於此貯器之像似的膨脹係數 β_a，則 β 即得按方程 (3) 而計之。

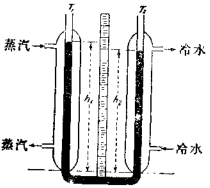

圖 15.2

直接測定液體之 β 之方法，係利用液體靜力學原理。設有貯於 U 形玻璃管中之液如圖 (15.2)，今將左管圍以溫度為 t_1 之水，

或水蒸汽，右管圍以溫度為 t_2 之水，則因其膨脹之不同，兩管中液體之高度 h_1 與 h_2 亦異。無論 h_1 及 h_2 之值若何，在管底之壓力，較右管或左管面上之壓力均大同值。若 d_1 及 d_2 分別表示液之溫度為 t_1°C. 與 t_2°C. 時之密度，則自左管言之，管底壓力較大氣壓大 h_1d_1g，而自右管言之，其值則為 h_2d_2g，是以

$$\frac{h_1}{h_2}=\frac{d_2}{d_1} \tag{4}$$

惟按定義

$$\beta=\frac{V_1-V_2}{V_2(t_1-t_2)} \tag{5}$$

今將此方程右方之分母與分子各除以質量 m，然後再以 $\frac{1}{d_1}=\frac{V_1}{m}$ 與 $\frac{1}{d_2}=\frac{V_2}{m}$ 代入，則有

$$\beta=\frac{1}{t_1-t_2}\left(\frac{d_2}{d_1}-1\right)=\frac{1}{t_1-t_2}\left(\frac{h_1}{h_2}-1\right) \tag{6}$$

若依此法作實驗，則無須先知貯器之膨脹係數矣。

目的 求水銀之容積膨脹係數。

儀器 (1) U 形玻璃；(2) 熱管；(3) 精密測高器 A；(4) 蒸汽鍋 B；(5) 溫度計；(6) 冷水源；圖 (15.3)。

儀器之佈置情形已見圖 (15.2)。測量高度之方法為力求更準確起見，須用一精密測高器。精密測高器為一望遠鏡裝於一有刻度之垂直架上。望遠鏡上下行動之距離若干可由架上刻度及游標測定之。

實驗步驟 (1) 將儀器小心的調節水平，當其左右兩管之溫度為等值時，兩管中水銀柱至底線 L 之高度亦應為同值。

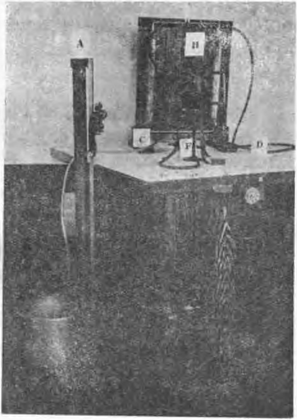

圖 15.3

(2) 將右管下端接於冷水管 D,使水自下流入,自上流出;將左管上端接於蒸汽鍋,以備水蒸汽由上流入,由下流出。

(3) 燃燈火 F 於汽鍋下,以生水蒸汽。待兩管中之温度與水銀柱高度均已恆定不變時,乃記下各温度 t_1 及 t_2 與 h_1 及 h_2。讀大氣壓力以視 t_2 是否無誤。由方程(6)計得 β。結果可登記如下:

$h_1=$ 　　厘米； $h_2=$ 　　厘米； $(h_1-h_2)=$ 　　厘米

$t_1=$ 　　°C.; 　$t_2=$ 　　°C.; 　$t_1-t_2=$ 　　°C.;

$$\beta=\left(\frac{h_1-h_2}{t_1-t_2}\right)\frac{1}{h_2}=$$

問　題

(1)若作本實驗時,僅用一垂直之管而觀察其中液柱在兩溫度 t_1 與 t_2 時之高 h_1 及 h_2,問何以不得用方程(6)以計其 β?

(2)試估計本實驗結果之誤差。

(3)嚴格言之,方程(5)中之 t_2 應爲 0°C.,V_2 應爲在 0°C. 時之容積,今以冷水之溫度爲 t_2,問因此所引起之誤差若干?

(4)有玻璃瓶(容積膨脹係數爲 25×10^{-6}),當其溫度爲 0°C. 時,其容量爲 200 立方厘米,而貯滿水銀。問當其溫度升至 100°C. 時,溢出之水銀有若干克?

實驗十六　量熱學原理

(A)固體之比熱

原理與定義　(1)當物體之溫度增高時，其所吸收熱量之多寡，視所增多之溫度，物質之質量及其性質而定。在尋常溫度範圍內，使 m 克某物質之溫度自 t_1°C. 增至 t_2°C. 所需之熱量 H 卡路里，可寫爲

$$H=mS(t_1-t_2) \tag{1}$$

此中之 S 爲一常數，名爲該物質之比熱。

測定比熱之方法，均根據下述原則：某系統一部分所放出之熱量係等於其他部分所吸收。因此，試驗及計算之時，只須注意何部分係將熱量放出，何部分係吸收熱量，而後分別利用方程(1)(如物態未曾改變)以計算吸收及放出熱量之多寡。例如有一量熱器，其質量爲 m_c，其比熱爲 S_c，其中有水m克(水之比熱在尋常問題中可視爲 1)，其起始溫度爲 t_1°C.。今若投入質量爲 M，比熱爲 x，溫度爲 t_2°C. 之物質，混合之後，其溫度全爲 t，則量熱器及水所吸收之熱量爲

$$H_1=m_cS_c(t-t_1)+m(t-t_1) \tag{2}$$

熱體所放出之熱量爲

$$H_2=Mx(t_2-t) \tag{3}$$

依 H_1 與 H_2 相等之原理，則知熱體之比熱 x 爲

$$x=\frac{(m_cS_c+m)(t-t_1)}{M(t_2-t)} \tag{4}$$

(2)某物體之溫度增一度所吸收之熱量,常名為其熱容量。一物體之熱容量即等於其組成各物質之質量與其比熱 S 之乘積之總和。若量熱器之質料非單純時,方程(4)中之 m_cS_c 須以量熱器之熱容量代之。此值因係與 m 克之水相加之故,其效果常以若干克之水代之而名之為量熱器之水當量。溫度計之水當量約等於其在量熱器內之容積 v (以立方厘米計)乘以 0.5。換言之,量熱器之水當量為 $W=m_cS_c+m_eS+0.5\,v$。若以量熱器之水當量代方程(4)之 m_cS_c,則算式為

$$x=\frac{(W+m)(t-t_1)}{M(t_2-t)} \tag{5}$$

(3)作量熱實驗時,因多種原因,結果常不甚準確。此等原因之較重要者,為量熱器與其四周互換熱量,致實際吸收或放出之熱量不等於方程(2)與(3)所示之值。若量熱器溫度之增加約為均勻的,則可令其起始溫度低於四周溫度之值,約等於其終末溫度較高於其四周之溫度,以謀互相抵償。若量熱器溫度之增加不甚均勻,例如起始時溫度增加頗速及後則較緩,則終末溫度以較房溫略高少許為較妥。

目的 求金屬小球之比熱。

儀器 (1)量熱器 C,攪桿 S 及量熱器外筒 E; (2)特備之燒鍋 B 及三足架;(3)天秤 M 及砝碼 W;(4)溫度計 A;(5)燈火 F;(6)小球丸(貯於 D 罐中)。

通常所用之量熱器由一較小之筒 C 置於另一大筒 E 內組成之。小筒之外面與大筒之內面均甚光亮,以減小輻射作用,兩筒隔以絕熱體以免傳導。因兩筒間之空氣保靜止不動之故,對流之影響亦可減小。用此等裝置即可使量熱器與外界互換熱量之效應減小。器上有不透熱之蓋,

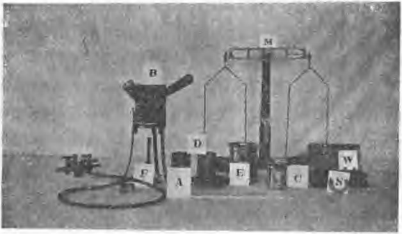

圖 16.1

蓋中有適當之穴，以備插放溫度計，並以任器中攪桿露出器外。

特備之燒鍋之目的，在於可以迅速的將熱體移於量熱器內筒中，故未作實驗之前，須先練習如何動作，方能將熱體倒入內筒中所需之時間最短，且不致將其中之水濺出。

實驗步驟 (1)稱量熱器內筒之重 (m_c)，如攪桿之質料與內筒同，可一併稱之，否則須另稱之，令其重爲 m_s。各質量須稱準至 0.1 克。

(2)稱所用小球之重 M。

(3)將量熱器內筒盛以水，其容量須可遮滿此後倒入之小球，且不至於溢出筒外；盛水後，再稱其重，令其值爲 m_c+m_s+m。並量其溫度 t_1。

(4)熱燒鍋，當小球之溫度達均一之值 t_2 時，乃迅速的將其倒入量熱器內筒中。

(5) 將量熱器蓋好，徐徐動攪桿以使筒內水之溫度達均一之值。同時觀察筒內水之溫度，記下其最高值 t（注意：須時常攪動筒中之水，否則其所達之最高溫度係因筒內溫度不均一所致！）。

(6) 應用前所說明之公式，計算小球之比熱。得其值後，乃將實驗情形略爲改變以期結果之誤差可爲最小，復行實驗三次。例如起始水之溫度太高，可在其中混以冰少許，待其溫度減至所欲得之値後，再將冰塊悉行取去，而後作實驗。

(7) 自溫度計之大小，估計其在量熱器中之容積 v。

所得結果可登記如下：

重量（克）					水當量			溫度，°C.			球之比熱
量熱器內筒	攪桿	量熱器加水	水	小球	溫度計		量熱器	球	水		x
m_c	m_s	m_c+m_s+m	m	M	容量 v	$\frac{v}{2}$	W	t_2	起始 t_1	混合後 t	（方程 5）

問　題

(1) 玻璃之密度爲 2.6，其比熱爲 0.2；水銀之密度爲 13.6，其比熱爲 0.033，試計算將 1 立方厘米玻璃或水銀熱一度時所需之熱量；並推證溫度計之水當量大約爲 $0.5\,v$，v 表其沒於量熱器中之容積（以立方厘米計）。

(2) 設各溫度可量準至0.1°C.，各質量之誤差可以不計，試估計本實驗結果之誤差，

(B)融解熱

原理與定義 加熱於一固體至一適當溫度時,其溫度將不變,而固體將開始液化,至其全變爲液體後,其溫度方升高;固體與液體同存之不變溫度名爲融解點或凝固點。若冷卻一液體,則當其達到凝固點時,其溫度亦不變。而液體乃開始凝固,至液體全部均凝結爲固體後,其溫度方降低。使一定質量之固體(或液體)在一定壓力下全融解(或凝固)爲同溫度之液體(或固體),其所需之熱量,均有一定之值。單位質量固體(或液體)融解(或凝固)時所需之熱量,名爲其融解熱。

量融解熱時,亦多用量熱器。若量熱器之水當量爲 W 克,其中水之質量爲 M 克,器之原始溫度爲 t_1,混合後之溫度爲 t,則量熱器所放出之熱量爲

$$H_1=(W+m)(t_1-t) \tag{1}$$

如固體之起始溫度爲 t_3,其融解點爲 t_2,其質量爲 m 克,在固態時之比熱爲 S_s,在液態時之比熱爲 S,其融解熱爲 H_f,則當其溫度自 t_3 升至 t_2 時,其所吸收之熱爲 $MS_s(t_2-t_3)$;當其融解時,所吸收之熱爲 MH_f,而當其溫度自 t_2 增至量熱器之溫度 t 時,其所吸收之熱量爲 $MS(t-t_2)$,故其所吸收之總熱量爲

$$H_2=MS_s(t_2-t_3)+MH_f+MS(t-t_2) \tag{2}$$

如各溫度與各質量及比熱之值均係已知,則令 $H_1=H_2$,即可求得 H_f。如所用之固體爲冰,其原始溫度爲 $0°C.$,則 $t_3=t_2=0$,而

$$H_f=\frac{(W+m)\ (t_1-t)}{M}-t \qquad (3)$$

目的 求冰之融解熱。

儀器 (1)量熱器內筒 C,外筒 D 及攪桿 S;(2)冰(純淨);(3)熱的蒸溜水;(4)天秤 M 及砝碼 W;(5)溫度計 A;(6)吸水紙 B (圖 16.2)。

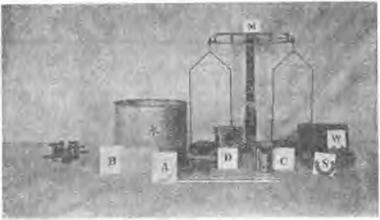

圖 16.2

量熱器構造及用法已見本實驗 A,茲不再述。

實驗步驟 (1)稱量熱器內筒(m_c)及攪桿(m_s)之重,須準至 0.1克。

(2)倒溫度較房溫約高 10°C. 之熱水於內管中,使筒半滿,再稱其重(m_c+m_s+m)。

(3)先將小冰塊包以吸水紙以吸乾其外面之水,次讀量熱器之溫度 t_1;乃投一冰塊於量熱器內筒中,用攪桿攪動器內之水及冰,並阻冰浮至水面。

(4)若冰全融解後之水溫度,尚未降低至房溫下約 10°C.,再投入

一小塊冰，至混合後之量熱器溫度 t，較低於房温之值，約等於未投入冰塊前其溫度高於房温之值。記下冰全融解後之溫度 t。

(5) 稱量熱器之總重，以求所融解之質量。記下房温及大氣壓。估計溫度計插在量熱器中之部分之容量 t。

(6) 共試驗三次。各結果可登記如下:

大氣壓＝　　釐米;　　房温＝　　°C.。

質量(克)				水當量(克)			溫度°C.		融解熱
量熱器內筒 m_c	攪桿 m_s	量熱器,桿及水 m_c+m_s+m	水 m	溫度計 容積 v	溫度計 $\frac{v}{2}$	量熱器 W	水起始 t_1	混合後 t	H_f(卡/克) 方程(3)

問題

(1) 問量熱器旁之空氣之乾濕，對於本實驗結果有何影響?

(2) 若所用之水不夠，致冰不能全融解，問計算之公式應如何改正?

(3) 試估計所得結果之可能誤差。

(C)汽化熱

原理與定義　加熱於一液體，其溫度將增；惟當其溫度達一適當之值時，其值將不變，此時汽泡將由液內升至液面，是謂沸騰。液體沸騰時之溫度名爲其沸點。液體沸騰時所吸收之熱量，係用以改變其物態，其值視其質量與沸點而定。當每單位質量之液體在其沸點全化爲同溫度之蒸汽時，其所需之熱量名其汽化熱，此熱量亦等於單位質量之蒸汽，全凝結爲同溫度之液體時所放出者。

量汽化熱時，亦可用前所述之混合量熱法。令量熱器之水當量爲W克，其中水之質量爲m克，器之原始溫度爲t_1，混合後之溫度爲t，則量熱器所放出之熱量爲

$$H_1=(W+m)(t-t_1) \tag{1}$$

如蒸汽之起始溫度爲t_3，沸點爲t_2，質量爲M克，在汽態時之比熱爲S_v，在液態時之比熱爲S，其汽化熱爲H_v，則當其溫度自t_3減至t_2時所放出之熱量爲$MS_v(t_3-t_2)$，當其凝結時所放出之熱量爲MH_v，而當其溫度自t_2減至t時，其所放出之熱量則爲$MS(t_2-t)$，故其所放出之總熱量爲

$$H_2=MS_v(t_3-t_2)+MH_v+MS(t_2-t) \tag{2}$$

若所用之蒸汽非過熱的，則$t_3=t_2$，而令H_1等於H_2後，卽有

$$(W+m)(t-t_1)=MH_v+MS(t_2-t) \tag{3}$$

或

$$H_v=\frac{(W+m)(t-t_1)}{M}-S(t_2-t) \tag{4}$$

如所求者爲水之汽化熱，則 $S=1$，t_2 可由大氣壓之值查看相當之表以定之。

目的　求水在大氣壓下之汽化熱。

儀器　(1)量熱器內筒 C，外筒 A，蓋 D，及攪桿 S 與盛蒸汽之螺旋管 E；(2)汽鍋 B；(3)蒸溜水；(4)天秤及砝碼；(5)溫度計 T；(6)石棉版；(7)燈 G（圖 16.3）。

圖 16.3

在汽鍋與量熱器之間，須以石棉版隔斷之。試驗時須小心免除輸汽管中已凝結爲水之蒸汽流入量熱器內。如將輸汽管包圍以絕熱質，並傾斜之使與汽鍋通連之端較他端爲低，且於管進入於量熱器之處，另裝一接水坑，則常可免凝結之水流入器中。

實驗步驟　(1)稱量熱器內筒與螺旋管 (m_c) 及攪桿 (m_s) 之重，須

稱準至 0.1 克。

(2) 倒溫度約較房溫低 10°C. 之水(可用冰或雪冷之)於內筒，使筒八分滿，再稱其重(連同螺旋管) (m_c+m_s+m)

(3) 視察汽鍋中水是否夠多，熱之使沸騰。任汽鍋放出蒸汽二三分鐘以熱輸汽管後，再倒去水坑中所凝結之水，然後記下量熱器之溫度 t_1，並即將水坑套於螺旋管上，以輸送水蒸汽於螺旋管中。同時並用攪桿攪動水。

(4) 當器中水之溫度升至較房溫高約 10°C. 時，乃取去套於螺旋管上之水坑，並繼續攪動水而記下器所達到之最高溫度 t。

(5) 稱量熱器之總重，以求所凝結水蒸汽之質量 m。記下實驗時之房溫及大氣壓。並自沸點與壓力關係之表中，查出沸點 t_2。估計溫度計插入量熱器中之部分之容積 v。

(6) 共試驗三次。各結果可登記如下：

大氣壓＝　厘米汞；　沸點 (t_2) ＝　°C.；　房溫＝　°C.

質量(克)				水當量(克)			溫度°C.		汽化熱
量熱器內筒及螺旋管 (m_c)	攪桿 (m_s)	量熱器，桿及水 (m_c+m_s+m)	水 (m)	溫度計 容積 v	溫度計 $\frac{v}{2}$	量熱器 W	水起始 t_1	水終末 t	(卡/克) 方程(4)

問　題

(1) 試述汽化熱與大氣壓變化之關係如何，並言其故。

(2) 汽鍋中之水何以必須純淨?

(3) 試估計所得結果之可能誤差。

實驗十七　能量不滅原理

(A)熱之功當量

原理　(1)一種能量可變化爲他種能量，不能自無中產生之，亦不能消滅之於烏有，是爲能量不滅原理。

將機械的能量全變爲熱，或將熱能全變爲功時，相當於每單位熱量之機械的能量或功(以力學的單位計之値)，定爲熱之功當量。若有W單位功，全化爲熱後，共產生 H 單位熱量，則

$$W=JH \tag{1}$$

此中之 J 卽熱之功當量。

(2)尋常作量熱實驗，如須計算量熱器與四周互換熱量之多寡而謀結果之更爲準確時，可用之計算法多依據 Newton 之冷卻律。此律云：熱體與其四周互換熱量之快慢，與二者之溫度差成正比。在不過大之溫度差範圍下，此律頗爲準確。應用此定律時，須於每一定時間間隔內，連續觀察量熱器與其四周之溫度差，並將此項觀察延長於實驗時間之前後各約五六分鐘。例如量

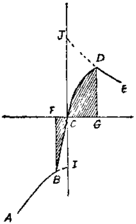

圖　17.1

熱器四周之溫度不變，其値爲圖(17.1)中 C 點所示；圖中AB 線表示實

驗未開始前量熱器溫度增加之情形；BCD 線表示實驗正在進行時，量熱器溫度變化之情形；DE 線則表實驗完畢後量熱器溫度減少之情形。在實驗正在進行之 B 至 C 時間內，因量熱器溫度較低於其四周之故，量熱器所吸收之熱量除其本應得之 H_1 外，尙有自其四周所吸收之部分 h_1。此熱量之值，約與 BCF 面積成正比。在 C 至 D 之實驗期間內，因量熱器溫度較高於其四周之故，量熱器所吸收之熱量較其本應得之 H_2 爲少，此較少之熱量 h_2 係傳於四周，其值約與 CDG 面積成正比。於是在實驗時間內，量熱器本應得 H_1+H_2 熱量，因其與四周互換熱量之故，致其實得者爲 $(H_1+h_1+H_2-h_2)$。

茲將 AB 及 ED 兩線延長之，使與通過 C 點之垂線各相交於 I 及 J 兩點。若在實驗期間 BC 內，未曾以熱量 H_1 加於量熱器，因器尙自四周吸收熱量 h_1 之故，其溫度亦將增至 I 點所示之值，故在此時間內，量熱器溫度應視爲自 I 點所示者增至 C。同理，在實驗時間 CD 內，若未有熱量 h_2 散失於四周，則量熱器之溫度將爲 J 點所示，因 h_2 熱量散失之故，其溫度乃自 J 降低至 D。是以觀察得之溫度差，雖爲 D 與 C 兩點所示之差值，其較準確之值則應爲 J 至 I 兩點所示之差。本處所述之圖解方法，甚爲簡便，尋常應用亦頗準確；至於由 BCF 及 CDG 兩面積以先計算 h_2 與 h_1，然後再由之以求改正之起始與終末溫度之方法，在他處（參閱普通物理學上册）已有陳述，茲不贅。

目的 求熱之功當量。

儀器 (1)功當量儀器；(2)電動機 M；(3)天秤及砝碼 W（圖17.2）。

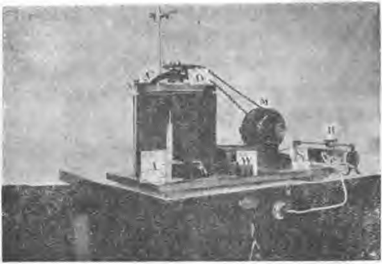

圖 17.2

一黃銅量熱器內部附有多個翼形黃銅板 VV。一黃銅管上亦附有多個之翼形之槳 $V'V'$，可在量熱器內各翼間自由旋轉。管之上端，裝一小滑輪；滑輪繞有皮帶，以備接於電動機之滑輪而轉動之。量熱器下端支於一點，其上面另有一盤 D，盤周繞有細繩，繩跨過滑車 P 後，其下垂之端可掛以重體 W。器外圍有較大之雙牆筒，牆間可灌以水，雙牆筒外另包以氈，以減少量熱器與四周互換熱量。

當電動機旋轉使銅筒及其附槳向一方轉動時，量熱器內之翼板受器內水之衝擊，將隨之向同方轉動。同時重體 W 所加於盤周之力矩，係阻止器之轉動。今若調節 W 之重，或電動機之速度，以使轉動量熱器之力矩與阻止其轉動者相等，則量熱器可不轉；在此平衡狀態下，D 盤旁一小桿將靜止，或徘徊於兩固定點間。得此情況後，由電動機所供給之

機械的功,均將化爲熱,以增加量熱器之溫度。若 D 之半徑爲 R 厘米,W 之質量爲 W 克,則轉動 D 之力矩爲

$$L=RWg \text{ 達因-厘米} \quad (1)$$

令在實驗時間內,D 盤共轉之次數(可由其上所裝之記轉器讀得)爲 N,則電動機所供給之功爲

$$U=2\pi NL=2\pi NRWg \text{ 爾格} \quad (2)$$

若量熱器之水當量爲 m_c, 其中水重爲 m, 其溫度增加値爲 (t_2-t_1)(改正後之値)則

$$H=(m_c+m)(t_2-t_1) \text{ 卡路里} \quad (3)$$

故 $$J=\frac{U}{H}=\frac{2\pi NRWg}{(m_c+m)(t_2-t_1)} \text{ 爾格/卡} \quad (4)$$

實驗步驟 (1)置量熱器及其銅管於木環上而稱之,減去木環重,以求器與銅管之質量(m_c)。

(2)量 D 盤之直徑($2R$)。

(3)盛溫度較房溫低約5°C.之水於器,至器頂約3至4厘米,再稱其重。緊旋其蓋後,並將儀器之其他部分裝好。

(4)關閉電鍵,以開電動機。調節電動機之速度與繩端 W 之重 使量熱器上 D 盤旁之桿徘徊於兩個固定點之間,且量熱器內之溫度每二分鐘約增加半度。調節妥當後,開啓電鍵,並另行支托重體 W。

(5)在此後十分鐘內,每隔二分鐘記下器內溫度計之溫度 t. 及器之雙牆筒中水之溫度 t'。在此時間內,並徐徐轉動銅管,以使器內水之溫度可以均一。

(6) 關閉電鍵 S 放下 W_1，並調節電動機之可變電阻 R 使其速度達到前此之值，以使 D 盤旁之桿得徘徊於兩固定點之間。在一定時刻，記下器中溫度 t，與器四周溫度 t'，並器上計轉器之示數。此後每隔二分鐘均將 t 與 t' 記下（t 須準至 0.01°C.，t' 則只須準至 0.1°C.）。在實驗時間內，須時常調節電動機之速度，以謀 D 盤旁之桿，得以靜止或徘徊於兩固定點之間。

(7) 約二十分鐘後，開啓電鍵，記下計轉器之示數。

(8) 在此後十分鐘內，每隔二分鐘，仍繼續記下 t 與 t'。

(9) 如有充分時間，可復行試驗一次或二次。

作圖　在方格紙上，以時間爲橫坐標，溫度爲縱坐標，畫曲線以表示溫度變化之情形。由此曲線求得量熱器所增加之溫度之改正值 (t_2-t_1)。

其他各結果及計算，可登記如下：

(t_2-t_1)	=	°C.
量熱器及水共重	=	克
量熱器重	=	克
水重 (m)	=	克
量熱器之水當量 (m_o)	=	克
(m_o+m)	=	克
功化成熱量 $H=(m_o+m)(t_2-t_1)$	=	卡路里
W 重	=	克
D 盤直徑 $2R$	=	厘米

計轉器之起始示數 $n_1=$　　　　；　終末示數 $n_2=$　　　　；

計轉器每轉一次，銅管轉動 $(a)=$　　　　次

銅管共轉次數　$N=a(n_2-n_1)=$　　　　次

所作之功　　$U=2\pi RNWg=$　　　　爾格

熱之功當量　　$J=\dfrac{U}{H}$　　$=$　　　　爾格/卡

J 之公認值　$=4.18\times10^7$ 爾格/卡

結果誤差　　$=\dfrac{J-4.18\times10^7}{4.18\times10^7}\times100=$　　　　%

問　題

(1) 試將 J 之公認值化爲若干呎磅/英熱單位，及若干仟克-米/卡。

(2) 作本實驗時所量得 U 與 H 之值，孰爲較準？

(B)電能與熱量

原理　若有電流 I 安培,通過一金屬導體,導體兩端之電位差為 E 伏特,則經歷 T 秒後,所費去之電能量為

$$U=EIT \quad \text{爾格} \qquad (1)$$

此能量均全化為導體中之熱量;此熱量可以量熱器量之。如量熱器及其中水之總熱容量為 M, 其溫度增加 (t_2-t_1), 則所產生之熱量為 $H=M\ (t_2-t_1)$ 卡路里,而熱之功當量 J 為

$$J=\frac{U}{H}=\frac{EIT}{H} \quad \text{爾格/卡} \qquad (2)$$

目的　以電學方法測定熱之功當量。

儀器　(1)量熱器;(2)白金導線;(3)溫度計;(4)天秤及砝碼;(5)錶;(6)安培計;(7)伏特計;(8)溫度計(兩個);(9)水;(10)電源,串聯電阻及電鍵(圖 17.3)。

圖 17.3

一白金線（30 或 34 號線）長約 1 米，繞於膠木塊上，可置於量熱器中。此線之兩端可接於一電池（約 20 伏特）及一可變電阻 R 如圖（17.4）。線兩端之電位差係以一伏特計 V 量之，其中所通過之電流則以安培計 A 量之。

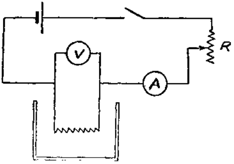

圖 17.4

實驗步驟 (1) 稱量熱器內筒之重準確至 0.1 克；並稱或估計器內其他物件之質量以備計算器之水當量之用。

(2) 蓄水於器內筒中約達器頂 1 厘米

(3) 將電源按圖接好，調變電阻 R，使所通過之電流可令器內水之溫度每分鐘增加約 2 至 3 度，記下所通過電流之值。

(4) 開啓電鍵，將器內之水換用溫度較房溫低約 10°C. 至 15°C. 者，（水溫須較露點約高二三度），再稱器之總重。按圖再接好電路。

(5) 攪動器中之水後，每隔一分鐘，記下器內及四周之溫度 t 與 t'。五分鐘後乃閉電鍵，並調節電流至原先之值。

(6) 此後每隔一分鐘，記下各溫度計，安培計與伏特計之示數。如電流改變太甚，則略調節可變電阻以求其恆定。實驗時須徐徐攪動器內之水，以謀其溫度之均一。

(7) 歷時十分鐘，乃開啓電鍵。

(8) 在此後五分鐘後，每隔一分鐘，讀兩溫度計之示數一次。

(9) 如有充分時間，可重行試驗一次或二次。

作圖　在方格紙上，以時間爲橫坐標，溫度爲縱坐標，作曲線以表明溫度之變更情形。由此曲線之各部分按本實驗 A 所陳述者，計得量熱器溫度增加之值。在另一方格紙上，作二曲線以示伏特計與安培計示數之變化情形，而求其平均值，E 與 I。

各結果及計算可登記如下：

		水當量
量熱器內筒重	克	
攪桿重	克	
繞鉑線之膠木重	克	
溫度計容積 v	立方厘米	
水之質量	克	

量熱器與水之總熱容量 (M) =

起終溫度差 (t_2-t_1) = °C.

電能化成之熱量 = 卡路里

平均電流 (I) = 安培；平均電位差 (E) = 伏特

實驗時間 T = 秒

電能　$U=EIT=$ 爾格

$$J=\frac{U}{H}=\text{ 爾格/卡}$$

J 之公認值 $=4.18\times10^7$ 爾格/卡

$$誤差=\frac{J-4.18\times10^{7}}{4.18}\times 100= \quad \%$$

問　題

(1) 在實驗時間內,若欲保持電流恆定不變,串聯電阻 R 何以須漸減少?若電流不變,鉑線兩端之電位差是否亦不變?

(2) 求量熱器及其中之水之總熱容量時,何部分之重量須稱準,何部分則可以估計,試言之。

實驗十八　聲音之傳播速度

(A)共鳴管

原理與定義　在同一之媒介質中，如有兩列波長相等之波浪向反對之方向進行，則媒介質中即有駐波呈現。在尋常問題中，此兩列波浪之一，多係直接射入者，其他則多係反射波。若有氣柱受一振動體之影響而呈駐波時，則稱氣柱與振動體共鳴。共鳴之意義，亦可視爲當共鳴器之固有頻率適與振動體之頻率相等時所產生之聲音放大現象。

使共鳴器共鳴之最低聲音名爲共鳴器之基音，其較高之音則名爲共鳴器之陪音。如陪音之頻率適爲基音頻率之整數陪數，則名爲諧音。當一氣管中氣柱呈駐波形式時，其開端係一波腹，其閉端係一波節。因此，兩端均開之氣管，其基音之波長等於管長之 2 倍；一端閉塞，他端開啓之氣管，其基音之波長則等於管長之 4 倍。前式管之陪音爲其基音之各次諧音；後式管之陪音，則只有其基音之各奇數諧音，而無其偶數陪音。

按波動原理，波長 λ，波速 V 與振動頻率 f（即每秒通過一點之波數），三者之關係爲

$$f\lambda=V \tag{1}$$

故如有兩端均開之管長 L 與一頻率爲 f 之聲音共鳴，則因 $n\lambda=2L$，聲波在管中之速度 V 爲

$$V=\frac{2fL}{n} \tag{2}$$

此中之 n 爲一整數。若管之一端係閉塞者，則

$$V=\frac{4fL}{m} \tag{3}$$

m 爲奇值整數。

腹

腹 推導方程(2)與(3)時，開管之口，係假定爲一波節，但嚴格言之，波節之位置，實在管口外離口少許；故如欲求較準確之 V 時，最少須知與同一之音共鳴之管長兩值。例如當閉管長爲 L_1 時，其基音之頻率爲 f；當管長爲 L_2 時，其三次諧音之頻率則爲 $3f$。如是

$$V=4f(L_1+a)=\frac{4f(L_3+a)}{3} \tag{4}$$

a 表波腹離管口之遠度。將 a 消去即得

$$V=2f(L_3-L_1) \tag{5}$$

目的　用共鳴閉管以求聲音在空氣中之速度。

儀器　(1)共鳴管及架；(2)音叉；(3)水；(4)尺。

共鳴管可用長約 100 厘米，直徑 5 厘米之玻璃管充任之。管旁鐫刻或貼有標度；管下有一橡皮管連通於一大杯。管與杯均盛有水，故若上下移動杯，管中氣體之長度

圖 18.1

即得以變更之。

實驗步驟　(1)將音叉牢固的夾於管口外距管口約等於管半徑之 $\frac{6}{10}$ 處。叉之振動方向須爲垂直的，其振動平面須含管之軸線。令管中水約達管口。

(2)以橡皮錘擊叉使之振動，徐徐放下杯以增加管中氣柱之長度，至其與音叉共鳴最強時，記下其長度。次令氣柱較 L_1 稍長，再徐徐舉杯至共鳴最強時，再記其長度。如是往返試驗三次，以其平均爲 L_1。

(3)仍舊維持音叉之振動，仿前再往返的求得第二個共振之位置三次。由其平均計得氣柱之長 L_3。

(4)若管長尚夠，則續定第三個共振位置三次，由其平均計得氣柱之長 L_5。

(5)記下溫度 t。

結果及計算可登記如下：

音叉頻率＝　　次/秒；　房溫(t)＝　　°C.

共振位置	氣柱增長時	氣柱減短時	L(平均)(厘米)	V(厘米/秒)
1	a	a		
	b	b	$L_1=$	
	c	c		$2f(L_3-L_1)=$
2	a	a		
	b	b	$L_3=$	
	c	c		
3	a	a		$f(L_5-L_1)=$
	b	b	L_5	
	c	c		

平均 $V=$ 厘米/秒

理論之 $V=(331.3+0.60\,t)\times100=V'=$ 厘米/秒

誤差 $=\dfrac{V-V'}{V'}\times100=$ %

問題

(1) 試推算波腹離管口之遠度約為管之半徑之幾分。

(2) 問聲音在氣體中之速度與氣體之壓力何以無關？

(B)Kundt 聲管

原理 聲音在桿中之傳播速度亦可由桿長 l，與桿沿其長度振動之頻率 f 計得之。設桿之中心，係被夾緊，則其振動情況，實與一兩端均開之管無異，故按本實驗 A 所述原理，當桿產生其基音時，兩端均為波腹，中心為波節，桿長 l 遂等於半波長。又因波長 λ 與頻率 f 及速度 V 有 $f\lambda=V$ 一關係，故桿之基音之頻率遂為

$$f_0=\frac{V}{\lambda}=\frac{V}{2l} \tag{1}$$

目的 求聲音在金屬或玻璃桿中與二氧化碳中之速度。

儀器 (1) Kundt 聲管；(2) 產生二氧化碳之瓶等；(3) 夾子；(4) 溫度計；(5) 尺；(6) 木塞粉；(7) 松香與布 (圖 18.2)。

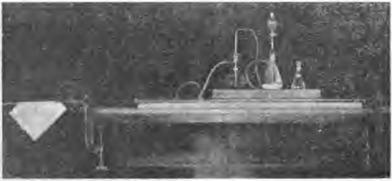

圖 18.2

聲管一端有一固定之活塞，其他端則裝振動之桿，管中散布有木塞粉。今將桿夾緊於其中心而以略敷松香之布沿桿長摩擦之，則桿可振動

以產生其基音。在桿伸入管中之端，釘有小紙盤，因桿之振動，傳於紙盤乃激動管中氣柱。若調變管他端活塞之位置，則可使管中氣柱與桿共鳴而呈駐波形式。此時，管中木塞粉之位在無振動之波節處者將不動，其在振動最甚之波腹處則跳躍而成多個條紋。兩鄰近波腹相隔之距離 d_a 即爲聲波在管中空氣之半波長 λ_a，故若已知聲波在空氣中之速度 V_a，則因

$$f_0=\frac{V_a}{\lambda_a}=\frac{V_a}{2d_a} \tag{2}$$

其在桿中之速度 V 將爲

$$V=\frac{l}{d_a}V_a \tag{3}$$

若管中改貯以他種氣體後，例如 CO_2，而所得兩鄰近波腹之遠度爲 d_g，則聲波在此氣體中之速度爲

$$V_g=\frac{d_g}{l}V=\frac{d_g}{d_a}V_a \tag{4}$$

實驗步驟 (1)將管中散滿木塞粉後，按圖裝好其他部分。將桿夾緊於其中心，然後以布略敷松香(不可太多)沿桿長磨擦桿，同時調節管他端活塞之位置，使管中木塞粉於波腹之處排列成極明晰之條紋。磨擦時不必用力過甚，以致將桿拉歪！

(2)量最遠兩個波腹之距離 D，並記下其間共有若干半波長 N。

(3)減少一個波腹，復量其距離，以至於僅餘兩波腹(即 $N=1$)，然後由各 N 之和與各 D 之和，計得半波長 d_a。記下房温，t。量桿之長，並由適當之表查得桿質料之 Young 彈性係數 Y 與密度 ρ。

(4)擾亂木塞粉，將活塞位置改變，仿前共試驗三次。由各實驗所求

得之平均 d_a，及聲音在空氣中之速度 V_a

$$V_a = 33127 + 60.7\ t \qquad \text{厘米/秒}$$

計算聲音在桿中速度。

(5) 令二氧化碳通過聲管中，約三分鐘後，再依前法重行實驗三次，以求聲波在二氧化碳中之速度。

所得結果與計算可登記如下：

房溫 $t=$　　°C.；桿之質料＝　　；桿長 $l=$　　厘米；

桿之 Young 彈性係數 $Y=$　　達因/方厘米；

桿之密度 $\rho=$　　克/立方厘米；管中氣體＝空氣

半波長數 N	距離 D (厘米)	半波長數 N	距離 D (厘米)	半波長數 N	距離 D (厘米)
1		1		1	
2		2		2	
3		3		3	
4		4		4	
5		5		5	
6		6		6	
7		7		7	
$\Sigma N=$	$\Sigma D=$	$\Sigma N=$	$\Sigma D=$	$\Sigma N=$	$\Sigma D=$
$d_a=\frac{\Sigma D}{\Sigma N}$					

平均 $d_a=$　　　厘米/秒

$V_a = 331.3 + 0.601$　　　米秒

聲音在桿中速度 $= V = \frac{l}{d_a} \cdot V_a =$　　　米/秒

理論值 $=V'=\sqrt{\frac{V}{\rho}}=$ 米/秒

誤　差 $=\frac{V-V'}{V'}\times100=$ %

管中氣體 $=CO_2$

半波長數 N	距離 D (厘米)	半波長數 N	距離 D (厘米)	半波長數 N	距離 D (厘米)
1		1		1	
2		2		2	
3		3		3	
4		4		4	
5		5		5	
6		6		6	
7		7		7	
$\Sigma N=$	$\Sigma D=$	$\Sigma N=$	$\Sigma D=$	$\Sigma N=$	$\Sigma D=$
$d_g=\frac{\Sigma D}{\Sigma N}$					

平均 $d_a=$ 厘米/秒

$V_a=$ 厘米/秒

聲音在 CO_2 中速度 $=V=\frac{d_g}{d_a}\cdot V_a=$ 米/秒

理論值 $=258+0.60\ t=V'=$ 米/秒

誤　差 $=\frac{V-V'}{V'}\times100=$ %

問　題

(1) 問管中活塞所在之處,係一波腹抑爲波節?

(2) 氣體比熱之比值,可由聲音在其中之速度量得之,試解釋其故。

(3) 問聲音在氧氣與其在氫氣中速度之比約若何?

實驗十九　繩之振動

(A)絃音器

原理　當横波通行於一絃線時，其在絃中之速度 V，係與絃之張應力 S 與絃之密度 ρ 而定。其關係爲

$$V=\sqrt{\frac{S}{\rho}} \tag{1}$$

若絃之截面積爲 A，則 $T=SA$ 表絃所受之總張力，$\rho A=\mu$ 表絃單位長之質量，而上列方程又常寫爲

$$V=\sqrt{\frac{T}{\mu}} \tag{1a}$$

當絃線振動而呈駐波時，若其所分成之段數爲 n，絃之長爲 l，則半波長爲 $\frac{\lambda}{2}=\frac{l}{n}$，而絃所產生之頻率 f 遂爲

$$f=\frac{V}{\lambda}=\frac{n}{2l}\sqrt{\frac{S}{\rho}}=\frac{n}{2l}\sqrt{\frac{T}{\mu}} \tag{2}$$

由此卽知絃之基音($n=1$)之頻率由 T,μ,l 三項決定之。

目的　證實絃線振動時，其頻率與絃長及絃中張力之關係。

儀器　(1)絃音器；(2)鋼琴絃或提琴絃；(3)音叉四個(頻率爲 256，320，384 及 512 者)；(4)托盤及砝碼(圖 19.1)。

琴上有二木柱，可置於適當位置，使琴之振動部分，僅限於此兩木橋上尖頂之間，是卽振動絃之長 l。所用之絃，一端拴固於琴，他端跨過

一滑車後，懸有托盤；其中張力，卽等於托盤與其中砝碼之重。

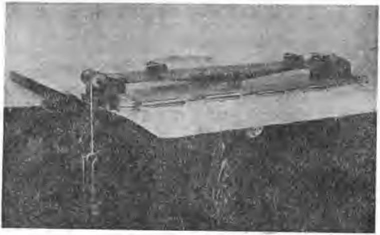

圖 19.1

實驗步驟 (1)將儀器按圖裝好。在托盤中加砝碼，使絃線之長約70厘米，其所生之音可與最低頻率之音叉共振。作最後調節時，可變兩木柱間之長度。測定共振之時，可將音叉柄置於琴身上；若在絃琴中點上置一小紙，則當共振發生之時，此紙將被移開，觀察與調節更易準確。變更兩木柱之位置三次，求其平均距離 l。

(2)換用一音叉，仿同法再求 l。由結果試證明音叉之頻率 f 與 l 成反比。

(3)維持兩柱距離 l 不變(約35厘米)，改變所用之張力 T，仿同法求絃與各叉共振時所需之張力 T，以證明 f^2 與 T 成正比。作本實驗時，在每次變更長度 l 或張力 T 之後，須在滑車與第一木柱之間，彈絃一下，以免除摩擦阻力，否則各次所得結果相差將甚大。

作圖　以頻率 f 為橫坐標，絃長 l 之倒數 $\frac{1}{l}$ 為縱坐標，將結果畫於方格紙上。又以 f^2 為橫坐標，T 為縱坐標，將結果亦畫於方格紙上。

各結果可登記如下：

張力(T)＝　　　克(不變)

頻率 (f)	木柱位置		l(厘米) 平均值
	右	左	

絃長 l＝　　　厘米(不變)

頻率 (f)	張力 (克)	$T_{平均}$ (克)

問　題

(1) 試由所得結果，計得絃之密度。

(2) 試說明提琴上各線粗細之功用。

(B) Melde 之實驗

原理 當一繩橫振而呈駐波形式時，振動頻率 f，繩之段數 n，繩長 l，繩中張力 T 與繩每單位長之質量 μ 之關係如下：

$$f=\frac{n}{2l}\sqrt{\frac{T}{\mu}} \tag{1}$$

欲使繩呈多段之駐波，可將其一端拴於音叉之一端，其他端跨過一滑車後再懸以適當重體。此為 Melde 氏研究線之振動定律之方法。

欲求音叉之頻率時，可令之與一頻率已知之音共振，而求其每秒內升沈之音之頻率（即拍率）。若已知之頻率為 k，拍頻為 b，則音叉頻率為

$$f=k\pm b \tag{2}$$

此中之符號果為正或為負，可另定之。

目的 用 Melde 氏方法證實繩之振動定律。

儀器 (1)音叉及電池；(2)滑車及繩；(3)托盤及砝碼；(4)垂直指

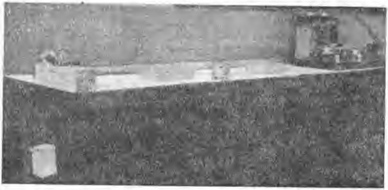

圖 19.2

桿數個；(5)尺；(6)天秤及砝碼(圖 19.2)。

將繩一端懸於音叉端，其他端則懸以重體。若通電流於音叉中間之線圈以激動之，則繩將隨之而振。增減繩他端所懸之重量，即可變更繩振動之段數。

實驗步驟　(1)稱繩之重量及其長度，以求其每厘米長之質量。

(2)裝好音叉及繩，關閉電鍵使叉振動，漸次增加托盤中之重體，使繩分爲二段。注意此時中心及兩端不振動之點之位置，用垂直指桿靠近繩以誌之。記下托盤之重及其中砝碼之重量，是即繩中張力 T。量每段之長而平均之，是爲 $\frac{l}{n}=L$。

(3)照前法，求繩振動時分成 3，4 及 5 段所各需之張力。利用方程(1)以計每次所得之 f。

(4)將所用音叉與一頻率 k 已知之音叉共振。求其拍頻 b 之值。次加蠟少許於叉端，再令之與已知之音共振，以定叉之頻率原係較高或較低，而決定當應用方程(2)時，所當用之符號爲正抑爲負。

結果可登記如下：

繩重＝　　克；　繩長＝　　厘米；　每厘米繩質量 μ＝　　克

段數	每段之平均長 $\frac{l}{n}=L$(厘米)	張力(T)(達因)	f
2			
3			
4			
5			
			平均 f＝

標準音頻率$(k)=$

拍頻$(b)=$

音叉振動較速或緩(速緩二字中塗去一字)

音叉頻率 $f'=$

f 與 f' 之差$=f-f'=$;

百分差$=\frac{f-f'}{f'}\times 100=$ %

問題

(1)粘蠟少許於一振動較速之音叉後，令之與另一音叉同時振動，則所得之拍率係較多抑較少，試申述之。

(2)若作本實驗時，音叉本身係與繩作直角，而不與之平行，問方程(1)應如何改變方得應用?

(3)量每段之平均長時，何以用實驗十九 B 之方法，較為可靠，試言其故。

實驗二十　地球磁場

(A)地球磁場之水平强度

原理　(1)設平懸一磁鐵，則其所取之方向，將與地球磁場方向同。若將磁鐵轉動至與地球磁場方向作 θ 角，則使其回至此方向之力矩爲

$$L = MH\sin\theta \tag{1}$$

M 表磁鐵之磁矩，H 表地球磁場之水平强度。因此力矩之作用，磁鐵遂將往復的擺動。如 θ 之値不大，則擺動可視爲一簡諧運動，其週期 T 爲

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{MH}} \tag{2}$$

I 表磁鐵轉動於通過懸點之垂線之轉動慣量。此爲本實驗所用以求 H 之第一個方程。

(2)設將前段所述之磁鐵 SN 另行放置，使其磁軸與 H 方向正交(圖20.1)。今在距此磁鐵中心爲 d 之處，置一磁針，則在 H 與磁鐵 SN 的磁場 G 之共同影響下，針與 H 所作之角 θ，係滿足下列方程：

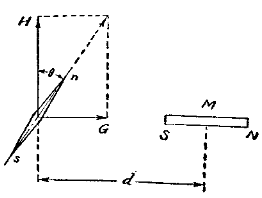

圖 20.1

$$\tan\theta=\frac{G}{H} \tag{3}$$

惟在上述情形下,磁鐵磁場 G 之價值約爲(l 表磁鐵長度)

$$G=\frac{2M}{d^3} \tag{4}$$

故消去 G,乃有

$$\frac{M}{H}=\frac{d^3\tan\theta}{2} \tag{5}$$

方程(4)乃磁強計所根據之公式,玆可應用之以求磁鐵之磁矩 M 與地磁水平強度 H 之商。是爲本實驗所用以求 H 所需之第二方程。將方程(2)與(5)聯解以消去未知之 M,卽有

$$H=\frac{2\pi}{T}\sqrt{\frac{2I}{d^3\tan\theta}} \tag{6}$$

儀器 (1)懸掛振動磁鐵之箱 V;(2)磁鐵 M;(3)磁強計 A 與架 H;(4)望遠鏡 T 與標度;(5)尺;(6)天秤與砝碼;(7)錶;(8)游標測徑器;(9)指南針(圖 20.2)。

磁強計之主要部分爲一磁針,其軸線可放置在地磁子午面上。當另加一與地球磁場 H 正交之磁場 G 時,此磁針卽偏轉相當之角。爲便於觀察而期準確起見,磁針係先膠於一小鏡背面,乃以懸絲掛之;至於針所轉動之角,則藉望遠鏡及標度觀察鏡之轉角而定之。

實驗步驟 (1)以指南針大約測定實驗室內之地磁的南北方向。

(2)將磁鐵 M,懸於箱內架上,使其完全水平。旋轉箱頂之螺旋帽,以使磁鐵軸線適與地磁的南北方向脗合。爲達到此目的起見,可先將磁

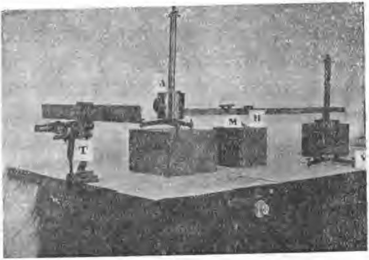

圖 20.2

鐵大約放置妥當，在離箱約 2 至 3 米處，裝好望遠鏡與標度，以觀察由懸線上小鏡所反射之標度。如將箱頂螺旋帽向左右旋轉相等之角度時，鏡所旋轉之角度亦爲相等，則磁鐵軸線已與地磁場方向脗合，否則須將螺旋帽略改，以達到上述情形爲準。

(3) 調節妥當後，引近另一磁鐵 M'，以使懸掛之磁鐵 M 擺動，擺角約 $5°$，不可過大。M 既擺動後，即將 M' 放至遠方以免除其磁場之影響。自望遠鏡觀察磁鐵擺過其平衡位置 50 次所需之時間。試驗三次，由所得結果，計算擺動週期之平均值 T(注意，數擺動次數時，最好於磁鐵擺過其平衡位置時，叫出 0，以後則依次叫 1,2,……以至 49,50)。

(4) 稱磁鐵之重，並量其長寬及深，以求其轉動慣量 I；由 T 及 I 即可計得 MH。

(5) 作磁強計實驗時，先將其上之磁針 nn' 按第二步驟所述之方法，放置於地磁子面上。記下望遠鏡所示標度之值 S_0，並量其距磁針中心之遠度 L(L 之距離約在 2 米至 3 米之間)。

(6) 在磁針 nn' 之東，將前此所用之磁鐵 M 放在有刻度之橫桿上(通常卽以尺充任之)，使其軸線取東西之方向。磁鐵 M 至磁針 nn' 中心之距離 d，須爲磁鐵 M 長度之 10 倍以上。觀察望遠鏡所示之標度 S_1；磁針所轉之角卽等於 $\theta_1=\frac{S_1-S_0}{L}$ 弧度。

(7) 將磁鐵翻過面，或調過頭，依次觀察其偏轉角。

(8) 次將磁鐵改放於磁針之西，其距磁針之遠度 d，則與第(6)步驟所用者相等，再依(6)及(7)兩步驟，求得其偏轉角。由(6)，(7)，(8)計得偏轉角之平均值後，利用方程(5)以求 M/H；由此及 MH 卽可算得 H。結果可登記如下：

磁鐵 M 長(l)=　　厘米；寬(b)=　　厘米；重(M)=　　克

磁鐵 M 之轉角慣量 $I=\frac{m(l^2+b^2)}{12}=$　　　克-方厘米

A. 擺動 50 次之時間及週期

	起　始，t_1(秒)	終　末，t_2(秒)	週　期 $T=2(t_2-t_1)$(秒)
1			
2			
3			

平均 $T=$

$$MH=\frac{4\pi^2 I}{T^2}=$$

B. 磁強計實驗

磁鐵 M 距磁針 nn' 中心之距離(d) =　　厘米

標度至鏡之距離(L) =　　厘米

望遠鏡之原始示數(S_0) =

其他各示數 S 與 $|(S-S_0)|$ 之值各如下:

	磁鐵在東	$\lvert(S-S_0)\rvert$	磁鐵在西	$\lvert(S-S_0)\rvert$
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

$|S-S_0|$ 之平均

θ 之平均值 $=\dfrac{|S-S_0|}{2L}=$　　弧度

$\tan\theta=$

$$\frac{M}{H}=\frac{d^3\tan\theta}{2}=$$

$H=$

問　題

(1) 用方程(5)時,未曾計及磁鐵之長度,問因此所引起之誤差約若干?

(2) 試說明如何可由磁強計實驗測得磁鐵 M 之有效長度?

(3) 問懸絲中扭應力對於磁鐵擺動週期之影響如何,試說明之。

(4) 今懸掛磁鐵於絲線下,使其方向與地磁水平強度方向同。若將絲線頂之螺絲帽轉動 90°,則磁鐵轉動 5°;今轉動螺絲帽 180°,問磁鐵轉動若干度?

實驗二十一　等位面與電力線

原理與定義　導體兩端須有電位差，電流方能通行於其間。電流既通行後，導體中間任何一點對於其端點，亦有電位差，故導體上各點可視爲均各有一相當電位。聯電位相等各點之曲面，名爲等位面。自等位面上任一點移一電荷至其上之另一點，所作之功爲零，故沿等位面之電場強度爲零，而在與面正交方向之電場強度則爲最大。因此，若有可以自由移動之電荷，其在電場中移動之方向將與各等位面正交；換言之，各電力線係與各等位面正交。如遇所討論之電場，係限於一平面上，則聯電位相等各點之曲線，名爲等位線。

目的　描畫等位線及電力線之形式。

儀器　(1)平底玻璃盆及水；(2)電極 A,B,C,D；(3)方格紙；(4)微音器或小感應圈 H 及電池 E；(5)電話耳機 T (圖 21.1)。

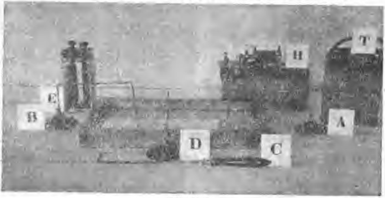

圖 21.1

盆中盛有一薄層之水(通常水管中放出者),在盆中豎立兩個電極 A 及 B,並分別接之於微音器之兩端。因此,盆中水各點之電位遂不同。一電話耳機接於另兩個電極 C 及 D。今若將 D 放在一定點,而將 C 移動至與 D 電位相等之點,則耳機中之聲音即為最小。於是各同位線即可次第求得。

實驗步驟 (1)在盆底粘一方格紙後,乃將兩固定電極端 A 與 B 放在方格紙一直線上,距離約 10 厘米。

(2)將微音機或小感應圈接好(接法可問教員),令其發音。如遇聲音太強,可將微音機移至另一房中,用兩根長線接於 A 及 B 兩極。

(3)將 D 電極置在 A 與 B 之間,移動 C 以求耳機中聲音最小時各點之位置。此等位置最少須求得 10 個。

(4)在另一張方格紙上,用兩小圈記出 A 與 B 之位置,再作小×號以表示 C 與 D 之各位置,然後用曲線版聯之以一曲線。

(5)將 D 電極改放在 AB 直線上另一位置,重作實驗 8 次,以求 9 條同位線之形狀。

(6)在同張方格紙上,描畫出 10 根電力線之形狀,並以虛線聯之。

(7)如有充分時間,可在盆中另置一塊金屬板,再依前法另求其對於等位面及電力線各形狀之影響。

問 題

(1)作本實驗時,何以須用交流電?

(2)作本實驗時,各等位線上各點之電位是否永不改變。如用直流電,則答案如何?

(3)問電位與電場強度之數量的關係如何?

實驗二十二 電阻

(A)以伏特計及安培計量電阻法

原理 一導體中之電流 I,在一定不變溫度下,其值係與導體兩端之電位差 V 成正比。寫作方程則有

$$V=RI \tag{1}$$

此中之比例係數 R 名爲電阻。方程(1)爲 Ohm 氏所發現之定律。過電位差與電流均已有獨立的定義時,此方程亦常視爲電阻 R 之定義。如 V 之單位爲伏特, I 之單位爲安培,則 R 之單位爲歐姆。

按方程(1),欲求 R 之值時,可由 V 及 I 定之。通常 V 與 I 多分用伏特計與安培計量之;惟因安培計與伏特計本身均有電阻之故,若同時量 V 與 I, 則計算時是否可以應用方程(1)須由 R 與伏特計或安培計之電阻之比數及接法而定之。

若所欲量之 R 較諸伏特計之電阻 R_v 小若干倍而與安培計之電阻可以比擬,則接法應如圖(22.1);應用 Ohm 定律卽可證明如安培計

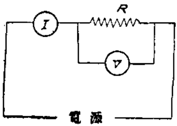

圖 22.1

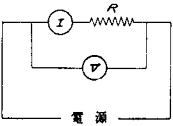

圖 22.2

之指示為 I，伏特計之指示為 V，則 R 之值約等於

$$R=\frac{V}{I}\left(1+\frac{R}{R_v}\right) \tag{2}$$

R/R_v 之值旣係甚小，故如以 $\frac{V}{I}$ 作 R 之值，所犯之百分誤差亦不過 $\frac{(100R)}{R_v}\%$。

若所欲量之 R，較諸安培計之電阻 R_a 大若干倍而與伏特計之電阻可以比擬，則接法應如圖(22.2)；應用 Ohm 定律亦可證明如 I 及 V 分為安培計及伏特計之指示，R 之值約等於

$$R=\frac{V}{I}\left(1-\frac{R_a}{R}\right) \tag{3}$$

目的 以安培計與伏特計量電阻。

儀器 (1)電池 E(約10伏)；(2)電阻箱 R(或已知電阻)自0.1至100歐姆；(3)伏特計 V(範圍0.1—1.0—10伏)一具；(4)安培計(0.1—1.0—10安培)二具 A_1 與 A_2；(5)可變電阻 R_1 最大值約200歐姆；(6)電鍵 K (圖22.3及22.4)。

圖 22.3

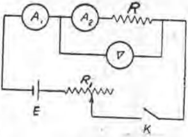

圖 22.4

實驗步驟　(1)將各儀器按圖(22.4)聯接。用伏特計或安培計時，如不知所量之值爲何，均當先用最大範圍。如不知電池之正極或負極爲何，可用伏特計檢查之，惟不得用安培計。聯接畢，須經教員檢查聯接是否無誤，方得進行下述各步驟。

(2)令電阻箱或已知電阻之值爲 100 歐姆。關下電鍵 K，調節 R_1 之值，使伏特計之示數約爲 8 伏特。若安培計 A_1 與 A_2 指針偏轉太小不易觀察，可開啓 K，再將 A_1 與 A_2 改接於較低範圍(例如接於 0.1 安培範圍)。誌下 A_1，A_2 與 V 之示數，及已知電阻 R 之值。

(3)將 R_1 改大，使 V 之指示約爲 6 伏特及 4 伏特，再次第誌下 A_1，A_2 與 V 各值。改變電阻或變更電阻時，均須將電鍵 K 先行開啓。

(4)將 R 之值改爲 10 歐姆，令 R_1 之值爲最大，關下 K，再調節 R_1 使 A_1 與 A_2 之指示與步驟(2)及(3)所用者約相等，次第記下 A_1，A_2，及 V 各值(注意，伏特計所用之範圍或須改換)。

(5)將 R 之值改爲 1 歐姆，先令 R 之值爲最大，關下 K，再調節 R_1 使 A_1 與 A_2 之指示次第約爲 0.8，0.6 及 0.4 安培，再記下每次 A_1，A_2 及 V 之示數(注意，安培計之範圍須改爲 1.0 安培)。

(6)將 R 之值改爲 0.1 歐姆，先令 R_1 之值爲最大，關下 K，再調節 R_1 使 A_1 與 A_2 之指示次第約爲 0.8，0.6 及 0.4 安培，再記下每次 A_1，A_2 及 V 之示數(伏特計之範圍須改爲 0.1 伏特)。

(7)問教員所用伏特計及安培計電阻之值爲何。

各結果及計算可登記如下：

R(已知值) 歐姆	安培計示數		伏特計 V	$\frac{V}{I_1}$	$\frac{V}{I_2}$	R_v	R_a	$\frac{R}{R_v}$	$\frac{R_a}{R}$
	在內者 I_1	在外者 I_2							
100									
10									
1									
0.1									

問題

(1)試由所得結果,推論量高電阻與量低電阻時,所應用之接法。

(2)設有同式之10000歐姆之電阻兩個串聯於100伏特之電源。按理每個電阻兩端之電位差各應為50伏特。今有人以一伏特計接於一電阻之兩端,伏特計之指示僅為40伏,試言其故。

(B)電阻比較法——Wheatstone 橋

原理與定義　(1)粗細一樣之導體,其電阻之值,係由其長度 l, 其截面積 A,與導體之質料而定。令 R 爲此導線之電阻,則

$$R=\rho\frac{l}{A} \tag{1}$$

此中之 ρ 爲一常數,名爲該導線之電阻係數。電阻之倒數常名爲電導 G,即

$$R=\frac{1}{G} \tag{1a}$$

(2)設有兩條導線 ab 與 cd,今將第一條之一端(例如 b),與第二條之一端(例如 c)相聯,而用其他未聯之兩端(例如 a 與 d)以作一電阻之兩端,則稱其接法爲串聯。當數電阻串聯時,其總電阻 R 係等於各電阻個別之值之和,即

$$R=R_1+R_2+R_3+\cdots\cdots\cdots \tag{2}$$

(3)若將一條導線之一端(例如 b)與第二條導線之一端(例如 c)相聯,復將其他一端(例如 a)與第二條之另一端(例如 d)相聯,然後用各條公有之兩端(即 ad 及 bc),以爲一電阻之兩端,則稱其接法爲並聯。數導線並聯時,其總電導爲各線個別電導之和;例如 $G=\frac{1}{R}$; $G_1=\frac{1}{R_1}$; $G_2=\frac{1}{R_2}$,則並聯時

$$G=G_1+G_2+G_3+\cdots\cdots \quad 或 \quad \frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}+\cdots\cdots \tag{3}$$

(4) 比較電阻最便利方法之一，係用 Wheatstone 橋。橋用四個電阻 A,B,C,D，一個電流計 G 及一個電池 E，聯接如圖 (22.5)。當電流計 G 中無電流時（此情況常簡稱為平衡），g_1 與 g_2 兩點之電位相等，故按 Ohm 定律，

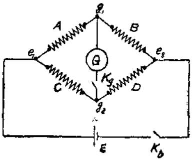

圖 22.5

$$\frac{A}{C}=\frac{B}{D} \tag{4}$$

因此，若 A 與 B 之比數係已知，則 B 與 D 之比數亦可求得。常用之 Wheatstone 橋有二式，一為滑線式，一則為箱式。在滑線式中，A 與 B 係由電阻頗大之均勻導線充任之，至於其比值之多寡，則用一在導線上可滑動之接觸點 g_1 將線分為兩段 l_a 及 l_b 以定之。用滑線橋時，若 D 係已知之電阻，則 C 之值等於

$$C=D\,\frac{l_a}{l_b} \tag{5}$$

l_a 與 l_b 指平衡時，在 C 與 D 邊滑線之長度。因滑線之兩端，尚聯有其他之導體，故嚴格言之，方程(5)之 l_a 與 l_b 尚應加以相當之改正。令滑線兩端導體之電阻，其效果與長 α 及 β 之滑線相等，則改正公式為

$$C=D\,\frac{l_a+\alpha}{l_b+\beta} \tag{6}$$

除 α 與 β 兩未知值所引起之誤差外，g_1 接觸點所示之位置，如未量得準確，則 l_a 與 l_b 之值亦有誤差。為免除及減小此等誤差起見，用滑線橋時，多於求得平衡點後，復將 C 與 D 兩電阻對換位置，而再求其平衡點。

令第一次所求得之 l_a 爲 l_1，l_b 爲 $l-l_1$，l 表線之全長，第二次所得之 l_a 爲 l_2，l_b 爲 $l-l_2$，則由第一次之結果可有下列方程：

$$\frac{C}{D}=\frac{l_1+\alpha}{l-l_1+\beta} \tag{7a}$$

由第二次之結果則得

$$\frac{D}{C}=\frac{l_2+\alpha}{l-l_2+\beta} \tag{7b}$$

故用分數原理卽可算得

$$\frac{C}{D}=\frac{l+(l_1-l_2)+\alpha+\beta}{l-(l_1-l_2)+\alpha+\beta} \tag{7c}$$

由是觀之，吾人勿庸知 l_1 或 l_2 之正確值，只須知接觸所移之距離 (l_1-l_2)，故用此法卽可免除因 l_1 或 l_2 未測準之誤差。又若 $\alpha+\beta$ 之值較諸 $l-(l_1-l_2)$ 之值爲甚小，則其所引起之誤差亦可忽視，而方程(7c)乃可寫爲

$$\frac{C}{D}=\frac{l+(l_1-l_2)}{l-(l_1-l_2)} \tag{8}$$

目的　用滑線橋測定數個導線之單獨，串聯時，以及其並聯時之各值。

儀器　(1)滑線橋；(2)電流計；(3)已知電阻(由電阻匣充任之)；(4)未知電阻；(5)電池與可變電阻 F(價值不必知)；(6)電鑰。

圖 22.6

爲便於調節起見，在電池線路中，多另接一可變電阻 F。當開始尋求平衡點時，可令 F 爲最大，以免所通過之電流太大，迨將達到平衡狀態時，乃將 F 減少，以增加測量之確度。

實驗步驟 (1)按圖(22.5)接好儀器。各接觸點均須乾淨並接牢。電阻匣中之塞子須插緊，插入後，可略轉之，至已密接爲止。

(2)令 F 之電阻爲最大，將接觸器 g_1 移至滑線之中心。先關下電池線路中之電鑰 K_b，然後再按下並卽放開電流計線路中之電鑰 K_g 以視電流計指針偏轉之方向。各式 Wheatstone 橋，均備兩個電鑰 K_b 及 K_g，一在電池線路中，其他則在電流計線路中。求平衡點時，閉電鑰之次序，先爲 K_b，後爲 K_g，開電鑰之次序，則先爲 K_g，後爲 K_b！

(3)次拔去電阻匣上電阻頗大之一塞子(例如 100 歐姆)，再按下並卽放開 K_g 以視電流計之指針是否已改向。如已改向，卽知所求之電阻，係較電阻匣上拔去塞子所示者爲小(例如在 0－100 歐姆之間)。若指針偏轉方向尙未改，則所求之電阻，係較電阻匣上所示者爲大。

(4)此後，視電流計指針偏轉之方向如何，插入或拔去電阻匣上之塞子，至所插入或拔去者爲電阻匣上之最小單位，而電流計指針之偏轉方向，前後仍爲反向時爲止（如未達到此情形之前，電流計指針之偏轉角已嫌太小，則可將 F 之值減小或逕令之爲 0）。

(5)欲求更準確之值時，此後則須將接觸點 (l_1) 略改少許，至開關 K_2 時電流計指針可完全不動。由電阻匣所示之值 D，及接觸之位置，卽可依方程(5)計得未知電阻 C 之值。惟爲更求準確起見，須將 C 與 D 之位置對換，並再求平衡點 l_2，而用方程(8)以計算之。

(6) 更換未知電阻二次(共三個)再依法求其值。

(7) 將三個電阻串聯,再依前法求其總值,以備與按方程(2)所計得者相較。

(8) 將三電阻並聯,依前法求其總值,以備與按方程(3)所計得者相較。

所得各結果可登記如下:

滑線總長 $l=$　　厘米

線　圈	電阻匣示數 D(歐姆)	平衡點 D 在右 l_1	平衡點 D 在左 l_2	C 之電阻(歐姆)
1				
2				
3				

串聯與並聯

	電阻匣示數 D(歐姆)	平衡點 D 在右 l_1	平衡點 D 在左 l_2	總電阻(歐姆) 觀察值	總電阻(歐姆) 計算值	總電阻(歐姆) %差
串　聯						
並　聯						

問　題

(1) 作本實驗時,所用之電池是否須一定不變。

(2) 此實驗方法不能用以量甚大或甚小之電阻,試言其故?

(3) 若 C 在右,D 在左時,平衡時之接觸點為 l_1,今維持 l_1 不變,

將 C 與 D 位置對調後，再改變 D 之值以達到平衡為止。問在何種情況下，C 之值可以兩次所求得之 D 之平均代之?

(4) 由所用導線之粗細及長短，試推算其導電係數。

(C)電阻之溫度係數

原理 在一定溫度下,一導體之電阻係一固定常數,但若溫度改變,則其電阻亦改。在尋常溫度範圍內,導體電阻與溫度之關係可以一直線表之;如 R_0 表導體在 0°C. 時之電阻, R 表其在 t°C. 時之電阻,則

$$R=R_0(1+\alpha t) \tag{1}$$

此中之 α 名爲導體電阻之溫度係數。因溫度增大時,線之長度 l 與其面積增大甚微,故在方程(1)中亦可用其電阻係數 ρ 及 ρ_0 代 R 與 R_0 而寫之爲

$$\rho=\rho_0(1+\alpha t) \tag{1a}$$

目的 求銅質電線之電阻溫度係數。

儀器 (1) 匣式 Wheatstone 橋; (2) 線圈及油池; (3) 溫度計; (4) 電流計; (5) 電池; (6) 燈火(圖 22.7)。

線圈可用 30 號電線長約500呎,繞於適當之絕緣體上,以成值約 50 歐姆之電阻。繞好之線圈可置於一筒中,然後再將筒置於油池內。油池以燈火燒熱,其溫度可以一溫度計量之,筒內溫度則另以一溫度計量之。

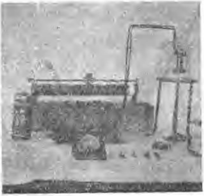

圖 22.7

匣式 Wheatstone 橋上有三組電阻 A,B,R。A 與 B 常名爲比臂，其電阻各有三個或四個價值 1,10,100 及 1000。故 A 與 B 之比可爲 $\frac{1}{1000}$，$\frac{1}{100}$，$\frac{1}{10}$，1,10,100,1000。R 之電阻常可自 1 增至 10000，若將所欲量之電阻接於 X 處而求得平衡點，則

$$X=\frac{A}{B}R \tag{2}$$

實驗步驟　(1)詳細考查所用匣式 Wheatstone 橋之線路接法，並畫一簡圖以示之。

(2)將電池，電流計及線圈按匣面所示者接好。接好後，須經教員檢查是否無誤，方得開始試驗。

(3)視察油池中已否盛滿油。記下筒內溫度之示數。先令 A 與 B 之比值爲 $\frac{1000}{1000}$，調變 R，使其值改變 1 歐姆後，電流計指針偏轉方向係反對的。例如若 R 爲 55，針向右偏，R 爲 56，針向左偏，則 R 之值係在 55 與 56 之間。又用 Wheatstone 橋時，須先按下電池線路中之電鍵 K_b，再開關電流計線路中之電鍵。

(4)次將 A 與 B 之比數改爲 $\frac{10}{1000}$，則 R 之值如照上例當在 5500 與 5600 之間。求得其值準至 1 歐姆後卽可。是爲在房溫下之電阻。練習純熟後，問教員另取一線圈，在其面前試驗，得其認可後，再繼續試驗。

(5)此後試驗時所用 A 與 B 之比，可與步驟(4)所用以量在房溫下之電阻之比值相同，不必更換。以燈火熱油池，令其溫度升高約 10°C.，調變 R 以求其平衡點，並於求得平衡點時，記下筒內溫度計之指示 t。

(6)將溫度繼續增高，每次約 10°C.，約至 75°C. 爲止。每增高一次溫度，卽行求得其平衡點。

結果可登記如下表：

線之質料＝　　；　線之號碼＝　　；

線長 (l) ＝　　；　線截面積 (A) ＝　　；

A 與 B 比數＝

	溫　度　t°C.	R（歐姆）	$X=\frac{A}{B}R$（歐姆）	平均溫度係數 $\alpha=\frac{R-R_1}{R_1(t-t_1)}$
1				
2				
3				
4				
5				
6				

作圖　以 t 爲橫坐標，X 爲縱坐標，將 X 與 t 之關係，表於方格紙上，並聯之以一直線，而記下其斜度。

問　題

(1)若 X 與 t 之關係，實一完善之直線，上表各行所計得之 α 是否應爲等值？何故？

(2)問溫度爲 0°C. 時，本實驗所用導線之電阻若何？

(3)問在房溫時,導線之電阻係數如何?

(4)量溫度時,常利用物質電阻之變更,試言其故。

實驗二十三　電化當量與電流

原理與定義　電流之重要效應有三，熱，磁及化學效應是。尋常言電流之大小時，可以此三效應之一爲定義。實用的電流單位，多以其化學的效應爲根據。

當電流通過一電解液時，電解液將被分解爲其成分，而分別在其陽極與陰極處呈現。Faraday 所發見之電解定律有二：(a)用同一之電解液，通以電流後，在其陰極處所放出或積貯之物質，其質量 m 與電流所通行之時間 t 及電流之大小 i 成正比，卽

$$m=\epsilon it=\epsilon Q \tag{1}$$

此中之比例係數 ϵ 名該物質之電化當量。(b)用不同之電解液，通以相等之電量 Q，則在其陰極處所放出或積貯之物質，其質量係與物質之原子量 W 成正比，而與其原子價 v 成反比。換言之，各原質之電化當量有下述關係：

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}=\frac{W_1 v_2}{v_1 W_2} \tag{2}$$

因電流所產生之化學的作用，有上述之各簡單關係，故實用電流之單位(卽安培)常定爲：

1 安培之電流，通過一規定之銀電解器，在一秒內所積於陰極之銀爲 0.001118 克；換言之，銀之電化當量爲 0.001118 克/庫侖。

若以其磁的效應爲根據，則一安培之電流，通過一圓形（半徑爲 r

厘米)之小導線後,在圓中心之磁場強度,將爲

$$\frac{2\pi}{10r} \quad \text{電磁單位} \qquad (3)$$

利用磁的效應以量電流之儀器,當以正切電流計爲最簡。

目的 用銅與水電解器及正切電流計量電流。

儀器 (1)銅電解器 C; (2)水電解器 W; (3)正切電流計 TG,(4)安培計 A; (5)直流電源 E(約 20 伏); (6)可變電阻 R; (7)電鍵 K; (8)換向器 B; (9)錶; (10)蒸溜水; (11)酒精; (12)硫酸; (13)硫酸銅晶; (14)游標脚規(圖 23.1 及 23.2)。

銅電解器係以銅版置於硫酸銅中以作陰陽兩極。通常之結構,多用兩銅版(已互相聯以導線者)作陽極,在二者之間,另置一銅版以作陰極。如是居中之銅版兩面均積有銅,實驗結果可較佳。

圖 23.1

水電解器之形狀如圖中 W。左右有刻度之玻管之下端,各有一白金片,是卽電極。器中盛以略加少許硫酸之蒸溜水,當電流通行之後,水被分解,氫氣自陰極上升,氧氣自陽極上升,其質量之多寡,可由其容量

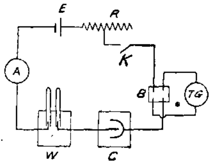

圖 23.2

計算之。

正切電流計之主要部分為一線圈(匝數約 N, 半徑為 r), 中置一小磁針。當線圈平面與地磁子午面脗合時, 磁針所指之方向為地磁的南北方向。今通以電流, 則因線圈所生之磁場, 與地球磁場正交之故, 磁針將偏轉而與地磁的水平強度 H 方向作 θ 角。按公式(3), 若電流為 I, 則線圈磁場 G 之值為

$$G=\frac{2\pi NI}{10r}$$

而磁針偏轉角 θ 與 I 之關係乃為

$$I=\frac{10rH}{2\pi N}\tan\theta \tag{4}$$

此中之 $\frac{10rH}{2\pi N}$, 常名為正切電流計之常數。

實驗步驟　(1) 放置正切電流計, 使其線圈平面與地球磁場方向脗合。放置妥當後, 調節其架下之螺旋, 使磁針上懸線下端適落在圓標度中心之上。次旋轉器頂螺旋帽以使磁針指南北方向。得此位置時, 與磁針固定聯結之細長鋁桿之兩端必均指示標度上之零點。

(2) 將各儀器按圖(23.2)接好, 安培計與正切電流計之距離最小須在3米以上。銅電解器中硫酸銅溶液可用100克水及22克硫酸銅配好; 水電解器中溶液用1000克與50克至60克之濃硫酸。混合水與硫酸時,

須將硫酸倒入水中,切不可將水倒入硫酸中。所用銅版之大小,以每安培最小須有 50 方厘米之面積爲度。

(3) 接好後,經教員檢查,得其允許後,乃關閉電路。調節可變電阻 R,使正切電流計之指示約爲 45°。歷四五分鐘後,陰極當有新質料積於其上。此時,可開啓電鍵,取出陰極;先以水再以酒精冲洗之。洗畢,可放於一旁令乾。此後此新面不得再以手觸之。稱此銅版之重。稱畢,乃夾於器之中部。

(4) 將水電解器上部之玻塞轉開,以放出已收集之氫氣與氧氣。

(5) 在一定時刻,關閉電鍵以通電流。記下此時刻及電流計與安培計之指示。此後須時常調節可變電阻 R,以維持電流之值,令其始終不變。

(6) 當所收集之氫容量約佔管之一半時,可開啓電鍵,將換向器移換,以變更通過電流計之電流方向。方向改變後,再關閉電鍵而記下電流計之示數。開閉電鍵之時間幾何,亦須記下。

(7) 當氫氣管中所收集之氫約爲全管長之 $\frac{4}{5}$ 時,停止電流,並記下其時刻。記下氫氣管與氧氣管中氫氧之容量及居中玻管之液體高度。

(8) 取下銅陰極,照前所述,先以水,再以酒精冲洗之。冲洗之時,須小心勿令鬆積之銅散落。待其乾後乃復稱之。

(9) 旋轉正切電流計頂上螺旋帽,使磁針之偏轉達實驗時之角度;記下螺旋帽轉動之角度,以備計算因懸線扭力而須改正之項。

(10) 記下實驗時之大氣壓與房温。各結果可登記如下:

A. 銅電解器

除極重量	所加砝碼(克)		停點		實重(克)
	W 在右盤	W 在左盤	W 在右時	W 在左時	
起初					
終了					

增重(m)

銅之電化當量(ϵ) = 　　0.001038 克/庫侖

實驗時間 $t=$ 　　秒

電流 (i) $= \frac{m}{\epsilon t} =$ 　　安培

B. 水電解器

氫之容積(V) = 　　立方厘米

房温(T) (= 　　°C.) = 　　°K.

大氣壓 $B=$ 　　厘米汞

中管與氫氣管中之水柱差 $h=$ 　　厘米水

飽和水蒸汽壓(房温下)$p=$ 　　厘米汞

氫氣中之實有壓力 $P=B-\frac{h}{12}-p=$ 　　厘米汞

氫氣在標準情況下之容積 $V_0=\frac{PV\times 273}{T\times 76}=$ 　　厘米汞

氫之電化當量 $\epsilon=0.0001038$ 克/庫侖；氫之密度 d(0°C.;76 厘米汞) $=0.0899\times 10^{-3}$ 克/立方厘米

時間 $t=$ 　　秒；

電流 $=\frac{dV_0}{\epsilon t}=$ 　　安培

C. 正切電流計

正切電流計指針所示之角度 θ,

電流未改向時:(1)東端(向北)　　;(2)西端(向南)　　;

電流改向時:(1)東端(向南)　　;(2)西端(向北)　　。

平均 $\theta=$　　。地磁之水平強度(問教員)$H=$

螺旋帽轉動 θ 時,磁針之轉角 $a=$　　。

實有 θ(改正值)$=\theta+a=$　　。

線圈平均半徑$(r)=$　　厘米

線圈圈數$(N)=$

正切電流計常數$\frac{5rH}{\pi N}=K=$

電流 $I=K\tan(\theta+a)=$

D. 各法所量得電流之比較(單位均爲安培)

A. 由銅電解器所量得者=　　;

B. 由水電解器所量得者=　　;

C. 由正切電流計所量得者=　　;

D. 由安培計所量得者=　　。

問　題

(1)電解器又名庫侖計,其名是確當,試說明之。

(2)今若電解 NaCl 或 AgCl 溶液,問所積於陰極者爲何?

(3)以安培計,正切電流計及電解器量電流,問何者在理論上最爲準確,何者在實用上較易準確,何者在實用上最爲便利?

實驗二十四　電位計

(A)伏特計之校準

原理　用伏特計量兩點之電位差時,伏特計中多少均通有電流。換言之,將伏特計加入電路中時,電路之電阻均略改變。爲補救此弊起見,通常伏特計之電阻均甚大。伏特計電阻增大後,其靈敏度亦須隨之增加,致實際上與教濟上均有一極限而不得超過之。在極準確之測量中,有時須用一儀器毫不取用電流者以資測量電位差或電動勢。此項儀器之較簡便者爲電位計。

最簡單之電位計爲一粗細均勻之導線 ab 一條,以及適當之電源 A,可變電阻 R,一標準電池 S,與一電流計 G(圖 24.1)。設將電源 A 之正極接於 a,其負極經過可變電阻 R 後再接於 b;如是 ab 導線上任何兩點之電位差,均與此兩點之遠度成正比。欲求 ab 線每單位長之電位差爲何,可將標準電池 S 之正極接於導線 a 端(在此接點,S 與 A 之極性須爲相同!),然後再將 S 之負極,接於一電流計 G 後,再藉一滑動接觸 c 以接於 ab 線上。若將 c 點滑動至電流計中無電流之處,則 ab 線上長 ac 段之電位

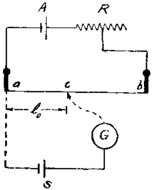

圖 24.1

差，卽等於標準電池之電動勢 E，故 ab 線上每單位長之電位差，卽等於 E 除以 ac 段之長 l_0。今若代標準電池以欲測之電位 x，再滑動接觸點，使其距 a 之遠度爲 l，則 x 之値卽等於 ab 線上長 l 厘米之電位差，卽

$$x=\frac{E}{l_0}l \tag{1}$$

設欲校正一伏特計，只須先將其兩端接於任一電源 B，以視其示數爲何，然後再以電位計量此兩端之正確電位爲何。改變電源 B 所供給之電位差，卽可將伏特計之標度全行校正之。

目的 以電位計校正一伏特計。

儀器 (1)滑線式電位計 M；(2)標準電池 S；(3)電源 A(約 4 伏特)；(4)電源 B(亦約 4 伏特)；(5)待校之伏特計 V(最大指示爲 3 伏)；(6)可變電阻 R_1 及 R_2；(7)電阻 T，上有一滑動接觸者；(8)電流計 G；(9)雙圖單極電鍵 K (圖 24.2 及 24.3)。

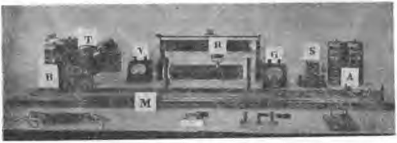

圖 24.2

實驗步驟 (1)按圖(24.3)將 A 之正極接於滑線上之 a 點，其負極經過可變電阻 R_1 後，乃接於滑線上之 b 點。如滑線不只一根，其 a 與 b 兩端何在，須先行檢定。

(2) 以伏特計 V 之正極接於 a，其負極接於滑線中點，調節 R_1 之值使伏特計之指示約爲其最大指示之 $\frac{3}{5}$ 取去伏特計。

(3) 將標準電池 S，電源 B 及伏特計之正極接於 a 點，其他各儀器可按圖(24.3)聯接之。

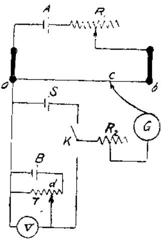

圖 24.3

(4) 將電鍵 K 向上關閉，以與標準電池 S 連接。滑動 c 點，以使 G 中所示之電流爲 0，待 G 中電流將等於 0 時，乃減少 R_2 以增加其靈敏度。記下 ac 遠度 l_0；開啓 K。記下房溫，並問教員標準電池電動勢 E 之值爲何。

(5) 調節 T 上之接觸 d，使 V 之指示約爲其最大值。將 K 向下關以與 d 點連接。再滑動 c 接觸，至 G 中無電流時，乃記下 ac 之遠度 l_1。

(6) 得此後，急將 c 滑至步驟(4)所示之位置，並將 K 向上關，以視其情形有無改變。如未改，乃將 d 點滑動，使 V 所指示之值約爲最大值之 $\frac{9}{10}$，再依步驟(5)求其相對應之 l。

(7) 此後繼續改變接觸點，每次約使 V 所減小之值均約同大（即最大值之 $\frac{1}{10}$），而依次求得 l。結果可登記如下：

房溫＝　　°C.；　標準電池圖　　式；　E＝　　伏特；

l_0＝　　厘米；　電位計每米長之電位差＝$\frac{E}{l_0}$＝　　伏特。

伏特計示數 V	l 厘米	準確值（伏特） $V_c=\frac{E}{l_0}l$	應加之改正值（伏特） V_c-V

作圖 試以 V 爲橫坐標，應加之改正值 (V_c-V) 爲縱坐標，作一改正曲線於方格紙上。

問題

(1)若待校伏特計之最大指示，較電源 B 之值，大若干倍，間應用何法將此伏特計全行校正。

(2)作本實驗時，R_2 之功用何在？若不用 R_2，有何危險？

(3)標準電池不得用以供給電流，其故何在？

(4)設欲校正一安培計，試作圖以示應用之接法。

(B)熱電偶之電動勢

原理　設將兩個不同導體之兩端分別接在一起，則當此兩端之溫度不相等時，導體中將有電流通行。此一對導體名為熱電偶。熱電偶之電動勢視其兩端之溫度與組成熱偶之兩導體之性質而異。欲量熱偶電動勢，以用電位計為最簡便，尋常之伏特計因須相當之電流，實不適用。

量頗大之溫度時，因溫度計有一部分不與熱體接觸，故應加以改正，此項改正之推算公式如下。若 l 表露出水銀絲長度(以度數計)，熱體之實有溫度為 t_c，溫度計之示數為 t，露出部分之溫度為 t_s，a 為水銀對於玻璃之像似的膨脹係數(通常約為 16×10^{-5})，則

$$t_c=t+a(t-t_s)l \qquad (1)$$

目的　求一銅與康銅熱偶之電動勢與溫度之關係。

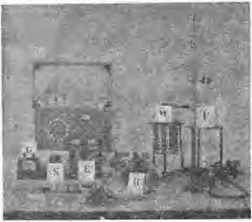

圖 24.4

儀器　(1)匣式電位計及附件；(2)銅-康銅熱偶；(3)油池 F 與冰水 W；(4)溫度計二具(一具可讀至 400°，其他則只須能指示冰水之溫度即可)；(5)燈火(圖 24.4 及 24.5)。

為便於使用及攜帶

起見,電位計之滑線常用適當之線圈裝於一匣內者代之。圖(24.4) A 所示者為此種匣式電位計之一種。其線路與用法均見匣蓋內之說明書中。在未試驗之前,須將說明書細讀一遍,並在教員面前說明各部之用法,得其允許後,方得進行試驗。

所用熱電偶之兩接點係分別置於兩玻璃試管中,一管可放在油池 F 中;他管則置於冰水 W 中。將一導線(例如銅)割斷為 a 及 b 兩點,此兩點之電位差為何卽用電位計測定之。

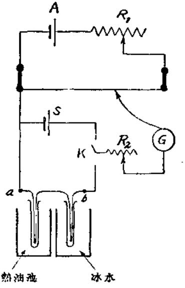

圖 24.5

實驗步驟 (1)將各儀器按電位計匣蓋上所示之線路圖聯接。聯接畢,請教員檢查無誤後,方得開始實驗。作一圖以示電位計之接法。

(2)將含熱偶一接點之試管置於油池中,他管置於冰水中,其 a 與 b 兩點分別接於電鍵 K 及電位計,如簡圖(24.5)。

(3)記下房溫 t,並查得標準電池在此溫度下之電動勢 E。轉動電位計上各轉頭至其所示之數等於標準電池 S 之電動勢。次關閉電鑰 K,將標準電池 S 加入。調變供給電流之線路中之電阻 R_1 使電流計 G 之示數為 0。此電路既經調節妥善後,不得再稍改變。

(4)關閉 K 於欲量電位差之 a 與 b 兩點。讀油池之溫度 t(卽房溫),調節電位計上之轉盤至電流計 G 中之電流為零時,記下電位計上之示

數 e,是即熱電偶兩接點之溫度分爲 0°C. 與 t°C. 時之電動勢。

(5) 次以燈火燒油池,以增加其溫度,每次約增 30°C.,再照前所述,求得各次之電動勢 e,至溫度約爲 300°C.時爲止。讀油池中溫度之示數時,須注意其露出油池外之管莖之溫度 t_s(可用另一溫度計量之),及露出之水銀絲長度 l,以備應用方程(1)而加以改正。

(6) 當熱點溫度自 300°C. 降低時,亦於其每降低約 30°C. 時依照所述,求得各次之電動勢。

作圖 以熱點之溫度(改正後之值)爲橫坐標,電動勢 e 爲縱坐標,作曲線於方格紙上,以示二者之關係。

所得結果可登記如下:

熱偶質料＝銅與康銅

冷點溫度＝0°C.

熱點溫度				電動勢
觀察值 t°C.	露絲溫度 t_s°C.	露絲長 l°C.	改正值 t_c	(毫伏特)

問　題

(1)設以一靈敏電流計代本實驗之電位計,而觀察電流計指針偏轉之角度與熱點溫度之關係,所得之結果是否與本實驗所得者完全相似?

(2)設將熱點之溫度繼續增大,電動勢 e 之值,是否將與之俱增?

(3)試陳述熱電偶之各種應用。

實驗二十五　電流計

(A)圈動電流計之靈敏度

原理與定義　電流計之最普通應用，乃以量電路中之電流。多數電流計指針之偏轉角係與電流之大小成正比，即如 I 表電流，θ 表偏轉角，則

$$I=k\theta \tag{1}$$

此中之 k 爲一常數。不同電流計之 k 多不相等；k 愈小者，則定値電流 I 所生之 θ 愈大，故其靈敏度亦較佳。通常言鏡式電流計之電流靈敏度(簡即稱靈敏度)時，多指標度與電流計中小鏡之距離爲 1 米時，使標度上指示 1 毫米偏轉所需之電流 f。因電流計小鏡所轉動之角 θ 僅爲由鏡面所反射之光線所轉動者之一半(即 $\theta=\frac{1}{2000}$ 弧度)，故按方程(1)

$$f=\frac{k}{2000} \tag{2}$$

言電流計之靈敏度時，常另用兆歐靈敏度 R 一詞；其意係指當所用之電位差爲 1 伏特時，電流計線路中應加若干兆歐姆之電阻方可使其上小鏡所轉之角爲 $\frac{1}{2000}$ 弧度。如 R 之數値係以歐姆爲單位而表之，則因電流計本身之電阻較 R 均甚小之故，R 與 $\frac{1}{f}$ 均可視爲相等。

作本實驗時，須用及電阻並聯，串聯或混聯各值，並須用及Ohm定律以計算各電阻內之電流。此等定律已見實驗二十二，茲不重述。

目的 求一牆式電流計之常數與其靈敏度。

儀器 (1)牆式電流計望遠鏡與標度；(2)電阻匣三具R_1，R_2，及R_3，其最大值各約如下：10000歐姆，100歐姆，及10歐姆；(3)乾電池E；(4)伏特計V；(5)電鑰S；(6)換向器C；(7)尺(圖25.1及25.2)。

實驗步驟 (1)將各儀器按圖(25.2)連接。問教員如何舉起電流計內線圈以任其擺動。

(2)調節望遠鏡與其標度，使自電流計上小鏡至標度中心之直線可與標度正交。調節望遠鏡，並觀察其中細絲所示之標度是否爲零點。若與零點相差不多，可略轉動標度，使之與零點脗合，否則須問教員應如何調節線圈之位置以達到目的。

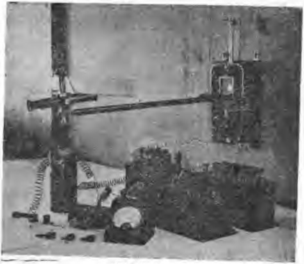

圖 25.1

(3)令並聯電阻 R_3 之值爲1歐姆，而測定其和關之偏轉至 $\frac{1}{10}$ 毫米。如所得之偏轉 d 不在4與5厘米之間，須將 R_3 稍變。記下各電阻値及伏特計之示數。

(4)將換向器 C 移換，使電流方向改變，再照步驟(3)記下各示數。

(5)將 R_3 改變爲2,3,4等值，使偏轉 d 每次約增5厘米。再依次按步驟(3)與(4)試驗，至 d 之最大值約達標度之末爲止。

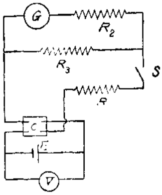

圖 25.2

(6)以尺量標度至鏡之距離。如鏡之位置，非尺所能達到，可量至電流計箱外之玻璃，至於由鏡面至玻璃面遠度，則可詢問教員。

(7)所用電流計之電阻，多已註明於電流計旁之紙上，如無此紙，可問教員。

(8)實驗畢，問教員如何將電流計內線圈放下，以免其中懸絲因振動而損傷。

各結果與計算可登記如下：

電流計之電阻(G)＝　　歐姆

電流計中之鏡面至標度之距離(L)＝　　厘米

電阻 R_1＝　　歐姆；　電阻 R_2＝　　歐姆

伏特計 V＝　　伏特。

電阻 R_3 歐姆	偏轉 d（厘米）			R_1中電流(毫安培)	G 中電流(微安培)	偏轉角	電流計常數	兆歐靈敏度
	左	右	平均	$I_1=\frac{V}{R_1+R_3}\times10^3$	$I=\frac{R_3I_1\times10^3}{G+R_2}$	$\theta=\frac{d}{2L}$	$k=\frac{\theta}{I}$ 弧度／微安培	$R=\frac{2000}{k}$
1								
2								
3								
4								

問　題

(1) 如偏轉 d 太大，d 常不與 I 成正比；自所得結果，試述 d 應在何值之下，所用電流計之常數，方有一個定值？此固定值若何？

(2) 何以計算總電流 I_1 及電流計中電流 I 時可分別用

$$I_1=\frac{V}{R_1+R_3} \qquad 與 \qquad I=\frac{R_3I_1}{G+R_2}$$

兩方程？準確的公式爲何，試推求之。在本實驗情形下，因用近似公式之誤差最大約若干？

(3) 如欲用電流計以量兩點之電位差，應如何配合他電阻並連接之。若用以量較大之電流時，則應如何配接？

(4) 作本實驗時，何以 R_2 之值須頗大，而 R_3 之值須甚小？

(B)衝擊電流計之常數與其應用

原理與定義　(1)設有一容電器,其兩端之電位差爲 V 時,其電版上所儲之電量爲 Q,則此器之電容 C 爲

$$C=\frac{Q}{V} \tag{1}$$

根據此公式以量一容電器之電容時,只須知與一定 V 相對應之 Q。V 之值可以尋常伏特計接於電源而定之;至於 Q 之值則可用一衝擊電流計量之。電容之實用單位,與庫侖及伏特相對應者,名爲法拉。

(2)衝擊電流計之結構與尋常電流計不同之點有二:(a)衝擊電流計內線圈之轉動慣量須頗大,以免當放電之電流尚未完全流畢時,線圈已離開原始之靜止位置而轉動;(b)衝擊電流計內各阻尼的影響須甚小,以免其第一次振幅,因阻尼的影響而不能達到其應有之角度。在此二條件下,若通過一衝擊電流計之電量爲 Q,其第一次之振幅爲 θ_0,電流計之常數爲 k,其線圈振動時之週期爲 T,則

$$Q=\frac{kT}{2\pi}\theta_0 \tag{2}$$

如阻尼的影響係不可免的,則方程(2)須乘以一改正項。令 b 表電流計線圈振動時,各次左右振幅之比,即

$$b=\frac{\theta_0}{\theta_1}=\frac{\theta_1}{\theta_2}=\cdots\cdots=\frac{\theta_{n-1}}{\theta_n}=\sqrt[n]{\frac{\theta_0}{\theta_n}} \tag{3}$$

則方程(2)應改爲:

$$Q=\frac{kT\theta_0\sqrt{b}}{2\pi} \tag{4}$$

此公式中之 $\frac{kT\sqrt{b}}{2\pi}$ 可視爲衝擊電流計之常數 a，即

$$Q=a\theta_0 \tag{5}$$

(3) 當數個電容 $C_1, C_2, \cdots\cdots$ 並聯時，其組合之電容爲

$$C=C_1+C_2+\cdots\cdots \tag{6}$$

若各電容係串聯者，則其組合電容 C 之值，可自下列方程求得之：

$$\frac{1}{C}=\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\cdots\cdots \tag{7}$$

目的 求一衝擊電流計之常數並利用之以證實容電器串聯及並聯各公式。

儀器 (1) 標準容電器 C，及電容未知之容電器 C_1 及 C_2；(2) 衝擊電流計 G 與阻尼電鑰 D；(3) 電池 E(約 2 伏特)；(4) 伏特計 V；(5) 錶；(6) 儲電與放電電鑰 K；(7) 換向器 B (圖 25.3 及 25.4)。

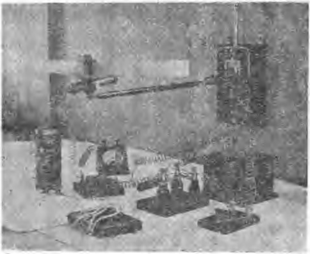

圖 25.3

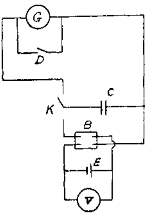

圖 25.4

阻尼電鑰 D 之功用，乃以謀電流計速止其擺動。試驗之時，此電鑰須開啓；如欲電流計線圈速歸回其靜止位置，可於線圈將擺過此位置時，按下阻尼電鑰，則其擺動立卽停止。

實驗步驟 (1)將各儀器按圖(25.4)接好。問教員如何舉起電流計中之線圈以任其擺動。

(2)調節望遠鏡與其附屬標度，使由電流計內小鏡至標度中心之直線與標度正交。

(3)按下阻尼電鑰 D，令線圈停止擺動。擺動旣停，卽放開 D。調節望遠鏡並觀察其中細絲所示之標度是否為零點。若與零點相差不多，可略轉動標度以使之與零點脗合；否則須問教員應如何調節線圈之位置以達到目的。

(4)將電鑰 K 關於電池，以儲電於容電器 C。約半分鐘後，將 K 急改接於電流計，以令所儲於容電器之電悉行放出。記下電流計之第一次最大偏轉 d_0；當線圈將擺過其靜止位置時，按下 D 以速止其擺動。重作實驗數次，至連續三次所得之 d_0 相差不及1毫米時為止。記下伏特計之示數 V。

(5)將換向器換移，以改變容電器兩電板上所積電荷之符號；再依前述步驟，試驗三次。

(6)代標準電容以未知電容 C_1 及 C_2，再依法求電流計之偏轉。將

C_1 與 C_2 串聯或並聯，再依法求電流計之偏轉。

(7) 儲電於容電器，再放電通過電流計，使其線圈擺動。以停錶測定其擺過零點 20 次所需之時間 t，由三次實驗之平均結果定其週期 T。

(8) 欲求 b 時，先儲電於容電器再放電通過電流，以使其線圈擺動。記下其起始偏轉 d_0，並數其擺過中心之次數。當擺動 n 次而其偏轉僅約爲 d_0 之 $\frac{1}{3}$ 時再記下 d_n。試驗三次。

(9) 用本實驗 A 之方法，求電流計之常數 k(或問教員)。量標度至電流計內小鏡之距離 L。

各結果及計算可登記如下：

A. 放電後電流計之第一偏轉，d_0(毫米)。

試驗次數	1	2	3	平均
左				
右				

平均 $d_0=$ 　　毫米

標度至鏡之遠度 $L=$ 　　毫米

線圈偏轉角 $\theta_0=\frac{d_0}{2L}=$ 　　弧度

B. 電流計之週期 T

試驗次數	振動時間 t(秒)	經過中心次數 N	週期 $T=\frac{2t}{N}$
1			
2			
3			

平均 $T=$ 　　秒

C.　b 之測定

試驗次數	d_0	d_n	n	$\frac{d_0}{d_n}$	$b=\sqrt[n]{\frac{d_0}{d_n}}$
1					
2					
3					

平均 $b=$

$\sqrt{b}=$

D.　容電器之電容 C(已知)＝　　法拉

容電器之電位差 $V=$　　伏特

容電器所積之電量 $Q=$　　庫侖

衝擊電流計常數 $a=\frac{Q}{\theta_0}=$　　庫侖/弧度

或　$a'=\frac{Q}{d_0}=$　　庫侖/毫米

電流計之 $k=$　　安培/弧度

由 k, T 等計得之常數 $a_1=\frac{kT\sqrt{b}}{2\pi}=$　　庫侖/弧度

或　$a_1'=\frac{2LkT\sqrt{b}}{2\pi}=$　　庫侖/毫米

差值$=\frac{a-a_1}{a_1}\times 100=$　　%。

E.　容電器之串聯與並聯

衝擊電流計偏轉 1 毫米＝　　庫侖

容電器		偏轉 d 毫米 1	2	3	平均	電位差 V(伏特)	電容	附註
C_1	左							
	右							
C_2	左							
	右							
C_1 與 C_2 串聯	左							$\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}=$
	右							
C_1 與 C_2 並聯	左							$C_1+C_2=$
	右							

問　題

作本實驗時，如儲電於容電器後，令其經過若干分鐘，方任其放電通過電流計，問所得結果是否將有差異，試言其故。

實驗二十六　電池

(A)電池之電動勢與其內阻

原理與定義　(1)當電池不供給電流時，其兩端之電位差，卽等於其電動勢。如將尋常之伏特計接於一電池之兩端，因伏特計須相當電流，其指針方能偏轉，故其所指示者非電池之電動勢，實伏特計電阻兩端之電位差，此蓋因電池之內部亦有相當之電阻也。如內阻爲 r，伏特計電阻爲 R_v，其示數爲 V_0，則按 Ohm 定律卽可推得

$$E=V_0\left(1+\frac{r}{R_v}\right) \qquad (1)$$

今如將一電阻 R 接於電池之兩端，如圖(26.1)，則當伏特計之示數爲 V_c 時，

$$E=V_c\left(1+\frac{R+R_v}{RR_v}r\right) \qquad (2)$$

聯解此兩方程(1)與(2)卽可分別求得電動勢 E 與內阻 r 之值。爲便於計算起見，常先將由方程(1)及(2)所推得之結果寫作

$$r=R\left(\frac{V_0-V_c}{V_c}\right)\left(1+\frac{r}{R_v}\right) \quad (3)$$

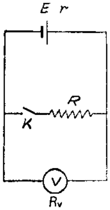

圖 26.1

因 $\frac{r}{R_v}$ 不大，故可先以 $r_1=R\frac{V_0-V_c}{V_c}$ 及 $E_1=V_0$ 分別爲內阻 r 及電動勢 E 之第一次近似值。求得 r_1，卽可計出 $\frac{r_1}{R_v}$ 而以之代替方程(1)

及(3)中之$\frac{r}{R_v}$而計得較準確的之r與E。

(2)遇電池之電阻頗大之時,例如 Daniell 電池,除方程(1)外,又常可用一安培計(電阻爲R_a)直接連於電池之兩端,而記下其指示I;因

$$E=I(R_a+r), \tag{4}$$

故自方程(1)與(4)亦可計得電池之內阻r與電動勢E。如r不夠大,致I太大,則可將安培計與另一已知電阻R串聯後再求其指示;如是試驗,則方程(4)應改爲

$$E=I(R_a+R+r) \tag{4a}$$

上述量電動勢之方法,頗爲簡便,惟只可用於無極化作用之電池。遇有極化作用之電池時,則以用前實驗二十四所述之電位計量之爲最妥善。

目的 利用伏特計,安培計及已知電阻,測一 Daniell 電池之電動勢及其內阻。

儀器 (1) Daniell 電池,內阻約5歐姆;(2)伏特計V一具,最大示數約2伏,其電阻R_v約100－200歐姆;(3)安培計一具,最大指示約0.5安培,卽500毫安培;(4)電阻匣R;(5)電鍵K(圖26.1及26.2)。

圖 26.2

Daniell 電池之一極爲鋅,他極爲銅,電解液爲稀硫酸鋅與濃硫酸銅。前者與鋅版(上敷有水銀以免局部作用)均置於一瓷杯內;後者與銅版則均置於瓷杯外之較大玻璃杯中。電流之

方向,係自銅經過電池外之線路,而回於鋅。瓷杯之功用,乃以分隔兩液使其不混,惟其中之孔隙則可任帶電之游子通行無礙。

實驗步驟　(1)所用伏特計及安培計之電阻 R_v 與 R_a 已註明於儀器底之紙。如無此紙,可問教員。

(2)將安培計直接聯於電池,記下其示數 I,代安培計以伏特計,亦記下其示數 V。由方程(1)與(4)計得 E 與 r。結果可登記如下:

$R_v=$	歐姆;	$R_a=$	歐姆;
$V=$	伏特;	$I=$	安培;
$E=$	伏特;	$r=$	歐姆。

(3)照圖(26.1)將電阻匣 R,電池 E,伏特計 V,及電鍵 K 連接之。接於電阻匣兩端之線須大而短者。各接點均須乾淨並接牢。電阻匣用法已在實驗二十二中述過,可參照之。

(4)依次令電阻匣之電阻 R 為 1,2,5 歐姆。記下電鑰 K 開啓時及關閉時伏特計 V 之示數 V_0 與 V_c,按上述方法計算 E 與 r。結果可登記如下:

伏特計之電阻 $R_v=$　　　歐姆

電阻	伏特計示數		內阻(歐姆)		內阻(歐姆)	電動勢(伏特)
R	V_0	V_c	$r_1=\frac{V_0-V_c}{V_c}R$	$\frac{r}{R_v}$	$r=r_1\left(1+\frac{r_1}{R_v}\right)$	$E=V_0\left(1+\frac{r_1}{R_v}\right)$
1						
2						
5						

問題

(1)試自方程(1)與(2)推出方程(3)。

(2)試列舉各種電池之電動勢與其內阻之大約值。

實驗二十七　電機

(A)線圈在均勻磁場內轉動之電動勢

原理　(1)令一線圈在一均勻磁場內轉動。當線圈之平面與磁場方向正交時，其兩邊 A 與 B 之轉動方向平行，故無被感電動勢，當線圈之平面與磁場方向平行時，A 與 B 割磁力線之速度為最大，而線圈中之被感電動勢亦最大。若考究線圈在其他位置之被感電動勢(例如圖 27.1 中 $A'B'$)，即知此電動勢之值為

$$e = NAH\omega \sin\theta \tag{1}$$

或

$$e = E\sin\theta \tag{1a}$$

此中 N 表線圈中之圈數，A 表線圈所包含之面積，H 表磁場強度，ω 表線圈轉動之角速度。

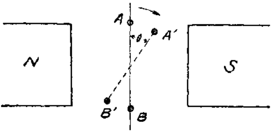

圖 27.1

(2)設在短時 t 內加於一衝擊電流計之電位差為 e，電流計線路中之總電阻為 R，則電流計中所通過之電量為

$$Q=\frac{et}{R} \tag{2}$$

故欲知方程(1)之正弦關係是否準確，只須求得在一定短時間 t 內，線圈放電於衝擊電流計所產生之電量(或電流計首次偏轉 d)與線圈位置之關係。

目的　求一線圈在均勻磁場內轉動時之電動勢與線圈位置之關係。

儀器　(1)發電機模型 D；(2)衝擊電流計 G；(3)電鑰 K 及 D (圖 27.2 及 27.3)。

圖 27.2

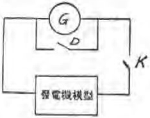

圖 27.3

所用之發電機模型，其磁場係由永久磁鐵產生之。機旁之齒輪係與線圈接牢，齒共 18 個，因有彎桿與齒相抵，故輪雖受有一彈簧之拉力，仍不能轉動。今若撥動輪上彎桿，則桿之右方(或左方)將暫被舉起，而於輪及線圈轉 10° 角後，其左方(或右方)復落下嵌於齒中。線圈兩端各聯於在同軸上之銅環(環與機之他部分均有絕緣體隔離之)後，乃與兩接柱相連之兩銅刷接觸。今接一衝擊電流計 G 於此兩柱，則當線圈每次轉動 10 度角時，其所感應之電動勢，即可送相當之電量於電流計中。

實驗步驟　(1)將儀器按圖(27.3)裝好。電鑰 D 乃用以速止電流計線圈之擺動者，擺動已停後，須開啓此電鑰。

(2)轉動線圈 10°，觀察電流計之首次偏轉 d，記下機內線圈之位置，繼續試驗至線圈轉一周爲止。如所得結果不甚有規則，須重行試驗。

觀察結果可登記如下：

位置	$\theta°$	偏轉 d	位置	$\theta°$	偏轉 d	位置	$\theta°$	偏轉 d	位置	$\theta°$	偏轉 d	平均 $\frac{\|d\|}{\sin\theta}$
1			10			19			28			
2			11			20			29			
3			12			21			30			
4			13			22			31			
5			14			23			32			
6			15			24			33			
7			16			25			34			
8			17			26			35			
9			18			27			36			

作圖　以線圈位置爲橫坐標，電流計所示偏轉 d 爲縱坐標，將上列結果畫曲線於方格紙上。在同紙上以虛線繪 $e=\sin\theta$ 正弦曲線以資比較。

問　題

(1)方程(1)中之 e，其單位爲何？若欲以伏特爲 e 之單位，H 仍用厘米克秒制電磁單位，問應如何改算？

(2)試推證方程(1)。

(B)發電機之外部特性

原理　當發電機供給電流時，其機端電壓 V，均不等於機內之被感電動勢 E。若 I_a 表電樞中之電流，R_a 表機內與電樞串聯之總電阻，則

$$E=V+I_aR_a \tag{1}$$

I_a 之值視機之擔負之大小而定。機所供給於擔負電路之電流 I 愈大，則 I_a 亦愈大，故若 E 之值不因 I 之增大而變更時，V 將較 E 為小。但有時 I 及 I_a 增大之效果，反足以增加 E；因此 V 之值將隨擔負之增大而增加。某種發動機是否適宜於某種設備之應用，多由其 V 與 I 之關係決定之。此關係常名為其外部特性。

目的　求一發電機之外部特性。

儀器　(1)並繞發電機 G；(2)電動機 M 與皮帶 b；(3)計轉器 T；(4)安培計 A；(5)伏特計 V；(6)可變電阻 R 及 r；(7)電鍵 S_m 及 S_g (圖 27.4 及 27.5)。

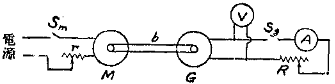

圖 27.4

實驗步驟　(1)將儀器按圖(27.4)接好。接好後，須經教員檢查，認為無誤後，方得開始試驗。

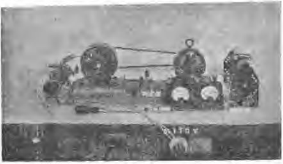

圖 27.5

(2) 令 r 之值約爲其最大值之一半，關下電鍵 S_m 以轉動電動機 M。調節 r 及皮帶之鬆緊使 G 之速度達機上所註明之值。記下伏特計 V 之示數。如 V 無指示，須問教員應如何補救。

(3) 令 R 爲最大，關下 S_g，調節 r 以維持發動機 G 之原有速度；再記下 V 及安培計 A 中所示之擔負電流 I。

(4) 減小 R 約十二次，每次所減之值，須使 I 之增大值約爲發電機滿載擔負電流之 $\frac{1}{10}$。

結果可登記如下：

發電機製造者：

機式：　　　　　　；每分鐘轉動次數：

規定伏特數：　　　；滿載擔負電流＝　　　　安培

擔負電流 I 安培	機端電壓 V 伏特	擔負電流 I 安培	機端電壓 V 伏特

作圖 以 I 爲橫坐標，V 爲縱坐標，作曲線於方格紙上以表示上列結果。

問題

(1)試作簡圖以示串捲，並捲及複捲發電機上磁場線圈與電樞線圈之連接法，並申述其外部特性之異同。

(2)今若以一伏特計及一安培計與一適當之電源，量一發電機各線圈(電樞線圈，串聯磁場及並繞磁場)之電阻，問伏特計與安培計之接法應如何？試作簡圖而分別示之。

(C)電動機之效率

原理 輸入於電機之功率，其耗失而化爲熱者，有機內各銅線電阻之耗失，鐵心中渦流與磁滯之耗失，及摩擦阻力之耗失三項。輸入功率之值 W_i，卽等於加於機兩端之電壓 V 與電源所供給之電流 I 二者之乘積。至於機所輸出功率之多寡，視其擔負而定。通常測驗不過大之機器時，多用前實驗十一 B 所述之 Prony 輪掣以量之。令輪掣上兩簧秤之示數爲 T_1 與 T_2 克，輪之直徑爲 D 厘米，輪轉動之速度每分鐘爲 N 次，則輪掣所吸收之功率(卽電機輸出之功率)爲

$$W_0=\frac{60\ \pi DN(T_1-T_2)g}{10^7}\quad 瓦特 \qquad (1)$$

g 爲重力加速度約等 980 厘米/秒^2。電機所輸入之功率旣爲

$$W_i=VI \quad 瓦特 \qquad (2)$$

故其效率爲

$$e=\frac{W_0}{W_i}\times 100\% \qquad (3)$$

目的 求一電動機之效率。

儀器 (1)電動機 M；(2)Prony 輪掣 B 及簧秤；(3)伏特計 V；(4)安培計 A；(5)可變電阻 R；(6)計轉器；(7)尺及雙脚規；(8)電鍵 S 及電源(圖 27.6 及 27.7)。

Prony 輪掣用法已見實驗十一 B，茲不重述。

實驗步驟 (1)將儀器按圖 (27.6) 接好，經教員認爲無誤後，方得

開始實驗。

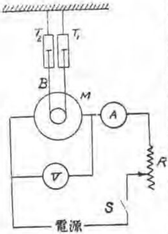

圖 27.6

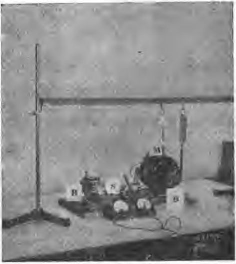

圖 27.7

(2) 取下 Prony 輪擊之皮帶,令可變電阻 R 之值爲最大,關下 S,再減小 R,使機轉動。調節 R,至伏特計 V 指示機上所註明之伏特數。記下 V 與 I 及機之速度 N(每分鐘轉數)。

(3) 將 R 增大,再開啓電鍵 S。次將皮帶鬆鬆的套上輪面,再關下電鍵 S。調節 R 使機端之伏特數達原規定之值。將皮帶略拴緊,至電流 I 之值約增大爲滿載電流之 $\frac{1}{10}$ 時,乃記下簧秤之示數 T_1 與 T_2,安培計 I 及伏特計 V,並量機之速度 N。

(4) 增加機之擔負十二次,至安培計所示之電流約爲滿載擔負 1.2 倍時爲止。

(5) 量機輪之直徑 D。將所得結果及計算登記如下:

電動機製造者：

機式：

機端電壓 $V=$　　　　　；滿載擔負之電流＝　　　安培；

機輪直徑 $D=$　　　　　厘米

電流	簧秤示數(克)			力矩	速度	功率(瓦特)		效率
I	T_1	T_2	T_1-T_2	$L=\frac{(T_1-T_2)D}{2}$ 克-厘米	(次/分鐘) N	輸入 $W_i=VI$	輸出, W_0 (方程1)	$e=\frac{W_0}{W_i}\times 100$

作圖　以輸出功率 W_0 爲橫坐標，下列三量爲縱坐標，繪三曲線於方格紙上：(a)效率 e；(b)速度 N；(c)力矩 L。

問　　題

(1)問開動電動機時，其電流由何決定？本實驗所用以限制開動時電流之方法爲何？此外尚有何法？

(2)今若欲變更電動機之轉動方向,問當如何改接?

(3)問串捲與並捲電動機之速度 N 與其擔負 W_0 之關係，其異點何在?又問二者之力矩 L 與 W_0 之關係,其異點則如何?

實驗二十八　交流 Wheatstone 橋

(A)自感係數與互感係數

原理　設以兩個電阻 A 與 B,及兩個線圈(電阻甚小可以不計,其自感係數各爲 L_x 與 L_s),分別聯接如一 Wheatstone 橋,且用交流電 H 代直流電源,電話耳機 T 代電流計,則當 T 中聲音最小之時(參閱圖 28.1),

$$\frac{A}{B}=\frac{L_x}{L_s} \qquad (1)$$

此爲比較兩個線圈自感係數之最便方法之一。

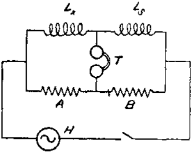

圖 28.1

設有兩線其自感係數各爲 L_1 與 L_2,其互感係數爲 M,則當其串聯如圖 (28.2) 甲時,其組合之自感係數爲

$$L_1+L_2+2M \quad (2)$$

而當二者串聯如圖 (28.2) 乙時,其組合之自感係數則爲

$$L_1+L_2-2M \quad (3)$$

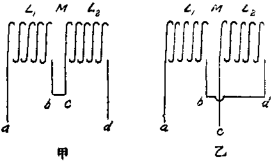

圖 28.2

目的　求兩線

圈之自感係數與二者之互感係數。

圖 28.3

儀器 (1)電阻匣二具，A 與 B；(2)線圈兩個 L_1 與 L_2；(3)標準電感 L_s；(4)電話耳機 T；(5)微音器 H 及電池 E (圖 28.3)。

實驗步驟 (1) 按圖 (28.1) 將各儀器接好，以 L_1 作 L_x。微音器之音如過大，可放之於一四周包有棉花之匣內。

(2)變更 A 與 B 之價值，使耳機中聲音最小。如 A 與 B 相差過大，可將標準電感 L_s 改換一值再行試驗；所用 L_s 之值以與所欲測之自感係數相差不多者爲最妥。記下 A,B 及 L_s 各值。

(3)將 L_1 與 L_s 對調後，再求平衡時之 A 與 B。

(4)以 L_2 代替 L_1，照步驟(2)與(3)求平衡點。

(5)將 L_1 與 L_2 放置妥當，使二者之相對的位置固定。分別名 L_1 線圈之兩端爲 a 與 b，L_2 線圈之兩端爲 c 與 d。將 b 與 c 相接再照步驟(2)與(3)求 a 至 d 之自感係數 X_1。次將 a 與 d 相接，依前法量 b 至 c 之自感係數 X_2。

(6)維持 L_1 與 L_2 之相對的位置如上，將 b 與 d 相接，再依前法量 a 至 c 之自感係數 Y_1，次將 a 與 c 相接，再依法量 b 與 d 之自感係數 Y_2。

各結果及計算可登記如下：

A. L_1 與 L_2 之單獨值。

L_1 之位置	右方電阻	左方電阻	L_s（亨利）	L_1（亨利）
在右				
在左				

平均 $L_1=$　　　　亨利

L_2 之位置	右方電阻	左方電阻	L_s（亨利）	L_2（亨利）
在右				
在左				

平均 $L_2=$　　　　亨利

平均 $L_1+L_2=$　　　　亨利

B. L_1 與 L_2 串聯後之值。

相接之點名稱	線圈位置	右方電阻	左方電阻	L_s（亨利）	L（亨利）
b 至 c	在右				
	在左				
a 至 d	在右				
	在左				
平均 $X=$					
b 至 d	在右				
	在左				
a 至 c	在右				
	在左				

平均 $Y=$　　　　亨利

$$M=\frac{X-Y}{4}=\qquad\text{亨利}$$

$$L_1+L_2=\frac{X+Y}{2}= \qquad \text{亨利}$$

兩法所求得(L_1+L_2)之差＝ %

問 題

(1)若欲得自感係數爲0之線圈，繞法應如何？試用方程(3)以說明之。

(2)自感係數之值均係爲正，試自

$$L_1+L_2-2M>0$$

推證
$$L_1L_2>M^2。$$

(B)介電係數與電容

原理與定義　(1)設有一容電器，當其兩電版間為真空時，其電容為 C_0，而當其間為某媒介質時，其電容為 C，則此媒介質之介電係數 k 為

$$k=\frac{C}{C_0} \tag{1}$$

(2)欲量固體媒介質(例如雲母片或玻璃)之介電係數時，可用一平行板式容電器。若每板之有效面積為 a 厘米，兩板之距離為 t，則其電容為

$$C_0=\frac{a}{4\pi t}\qquad \text{靜電單位} \tag{2}$$

若兩板間夾有媒介質，則其電容將為

$$C=\frac{ka}{4\pi t}\qquad \text{靜電單位} \tag{3}$$

故如先後求得 C 與 C_0 之值，則所用媒介質之 k 卽可求得。

(3)設 C_0 之值已用他法(例如前實驗二十五 B 之方法)測得為 X 法拉，則一法拉應等於若干靜電單位卽可由容電器之面積 A 及兩板之距離求得之。惟 1 法拉等於 10^{-9} 電磁單位之電容，故由此等實驗結果復可推出 1 電磁單位與 1 靜電單位電容之比值。又因在電磁制及靜電制中，能量之單位均為爾格，而容電器所儲之能量等於 $\frac{1}{2}\frac{Q^2}{C}$，故如以下標 s 及 m 分別表示電量 Q 或電容 C 以靜電單位及電磁單位計算之

數值，則

$$\frac{Q_s^2}{C_s}=\frac{Q_m^2}{C_m} \tag{4}$$

或

$$\frac{Q_s}{Q_m}=\sqrt{\frac{C_s}{C_m}} \tag{5}$$

由此觀之，若 1 電磁單位之電量等於 c 靜電單位之電荷(卽方程(5)中 $Q_m=1$, $Q_s=c$)，則 1 電磁單位之電容，將等於 c^2 靜電單位之電容。換言之，若電容之值係以電磁單位計之，則方程(2)須改寫爲

$$C_0=\frac{a}{4\pi t c^2}\qquad 電磁單位 \tag{6}$$

(4)若有 Wheatstone 橋，今將其直流電源改爲交流電 H(例如微音機或感應圈)，檢定平衡之電流計改爲電話耳機 T，則亦可用以比較兩個電容。令橋之比臂電阻爲 A 與 B(通常卽以兩電阻匣充任之)，待定之電容爲 C_x，已知之電容爲 C_k，則當平衡之時，卽耳機 T 中聲響最微時(參較圖 28.4)，

$$C_x=\frac{A}{B}C_k \tag{7}$$

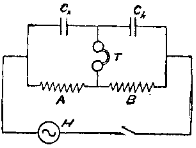

圖 28.4

目的　求雲母片之介電係數，並測定 1 電磁單位電量等於若干靜電單位電量。

儀器　(1)電阻箱兩個 A 與 B；(2)標準電容 C_k；(3)特製之平行版式容電器 C_x；(4)耳機 T；(5)微音機 H，及電池 E；(6)雲母片 G；(7)尺；(8)測微螺旋 M (圖 28.5)。

圖 28.5

特製之容電器 C_x，內部圓板面積係有效面積 A，其外部之環形面積乃以免除板邊電力線彎曲之影響；此環之名爲衞環。

實驗步驟　(1)照圖將各儀器接好。如徵音器所直接產生之聲太大，可置之於一四周包有棉花之匣內。

(2)將雲母片夾於容電器之中，在 C_k 處用一與 C_x 電容相差不多之標準容電器。改變 A 與 B 兩電阻之比值，至耳機中聲音最微時，記下 A 與 B 之值。將 C_x 與 C_k 對調，再記下 A 與 B。用方程(7)計得 C_x 並其平均值。

(3)取去雲母片以測微螺旋量其厚十餘次（每次所量之位置須改變），而求其平均厚度 t。

(4)在雲母片之角處，剪下數小片，置於容電器 C_x 下版之外環上再蓋以上板。用同法量平衡時，A，B 及 C_k 各值。以測微螺旋量各小片之厚，以其平均爲 t_0。

(5)量容電器 C_x 內圓板之直徑 d，並計得其面積 a。

所得結果及計算可登記如下：

容電器圓板直徑 $d=$ 厘米； 面積 $a=$ 方厘米；

雲母片平均厚 $t=$ 厘米

用雲母片時

$C_k=$ 法拉＝ 電磁單位

C_x 位置	右方電阻	左方電阻	$C_x=\frac{A}{B}C_k$
在右			
在左			

平均 $C_x=$ 法拉

不用雲母片時

容電器兩板距離 $t_0=$ 厘米

$C_k=$ 法拉＝ 電磁單位

C_0 位置	右方電阻	左方電阻	$C_0=\frac{A}{B}C_k$
在右			
在左			

平均 $C_0=$ 法拉

雲母片之介電係數 $k=\frac{C_x t}{C_0 t_0}=$

$C_{0s}=\frac{a}{4\pi t_0}=$ 靜電單位

$C_{0m}=$ 電磁單位

故 1 電磁單位電容＝ $\frac{C_{0s}}{C_{0m}}=$ 靜電單位電容

$$1\text{ 電磁單位電量}=\sqrt{\frac{C_{0s}}{C_{0m}}}=c=\qquad\text{靜電單位電量}$$

c 之公認值 $=3.00\times10^{10}$

誤差 = %

問　題

(1) 試將電磁制,靜電制及實用制之電流,電壓,電阻,電感,電容及電量各單位之換算比數列成一表以資比較。

(2) 問媒介質對於電荷間互有之力之影響若何?

實驗二十九　鐵質之磁性

(A)鐵之磁化曲線與導磁係數

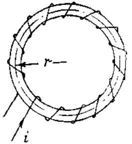
圖 29.1

原理與定義　設有一圓環如圖(29.1)，平均半徑爲 r 厘米，其上均勻的繞有線圈 N 圈。今通以電流 i 安培，則在線圈內之磁場強度 H 等於

$$H=\frac{4\pi Ni}{10\cdot 2\pi r}=\frac{2Ni}{10\,r}\quad 電磁單位\qquad (1)$$

如環非鐵質，則其中所通過之磁力線總數(亦名磁通量)爲 Ha，a 表線圈之截面積。若環係鐵質，則因 H 而產生之磁通量較大；鐵環每單位截面積之磁通量，常名爲其磁感應強度 B(即磁通量密度)。B 與 H 之比，名爲導磁係數 μ；$\dfrac{B-H}{4\pi}=I$ 則名爲磁化強度；I 與 H 之比，名爲磁化係數 k。

表鐵質之 B 與其 H (或 I 與其 H) 關係之曲線名爲 BH (或 IH) 磁化曲線。欲求此等曲線之形式，可將樣本製成環形，而繞以線圈 P 如上段所述。若線圈 P 中電流爲 i，則使環磁化之磁場強度或磁化力 H 之値，即可按方程(1)計得之。至於因 H 所產生之 B，可在環上另繞一試探線圈 S(圈數爲 n)而將其兩端接於一衝擊電流計 G 如圖(29.2)。設鐵環原係毫無磁性，而當其線圈 P 中電流自 0 增至 i 時，穿過線圈

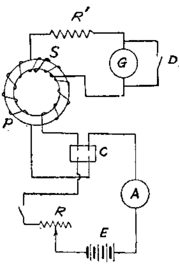

圖 29.2

S 之磁通量鏈數之變更值爲 nBa，故在電流計線路中乃有被感應之電動勢，其平均值爲 $\bar{e}=\frac{nBa}{t}$（t 表電流自 0 增至 i 所需之時間）。如電流計線路中之總電阻爲 R_2，則此平均電動勢所產生之平均電流將爲 $\bar{i}=\frac{\bar{e}}{R_2}=\frac{nBa}{tR_2}$，而在 t 時間內，電流計中所通過之電量爲

$$Q=\bar{i}t=\frac{nBa}{R_2} \qquad (2)$$

若衝擊電流計之常數已用他法求得，則 Q 之值可由電流計之第一次偏轉算得之；n, a, R_2 既均易量得，B 之值遂得應用方程(2)以求之。在方程(2)中，如 Q 與 R_2 均以實用單位計（卽侖庫與歐姆），則 B 之單位亦爲實用單位。1 實用單位之 B 等於 10^8 電磁單位，故若欲將所求得之 B 改用電磁單位計，則方程(2)須改寫作

$$B=\frac{QR_2\times 10^8}{na} \quad \text{電磁單位} \qquad (3)$$

如是，將方程(3)之 B，除以方程(1)之 H，卽得樣本之導磁係數 μ 以電磁單位計得之值。

目的 用衝擊電流計求一鐵環之磁化曲線與導磁係數。

儀器 (1)鐵環上繞有 P 與 S 兩線圈；(2)可變電阻 R（此電阻亦可用本實驗 B 所述之特製電阻）；(3)已知電阻 R'；(4)衝擊電流計 G

(電阻與常數均已知)；(5)電池 B；(6)安培計 A；(7)阻尼電鑰 D；(8)電鍵 K；(9)特製之換向器 C (圖 29.2 及 29.3)。

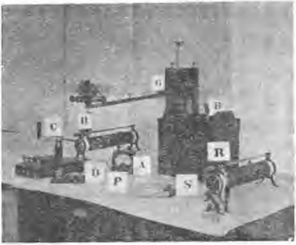

圖 29.3

特製之換向器係用以消除環中之磁性之用。此器上有一轉柄，今若一方減少 P 線圈中之直流電，一方急轉此轉柄，則當電流減為 0 時，環之磁性亦當已完全消滅。

實驗步驟　(1)將各儀器按圖 (29.2) 接好，經教員檢查無誤後，方得開始試驗。

(2)按實驗二十五 B 所述，調節電流計 G 與其附屬之望遠鏡，並用電鑰 D 以速止其擺動。

(3)關下電鍵 K，一方急轉換向器，一方令線圈 P 中電流漸減於 0，以消除鐵環之磁性。次漸增 P 中電流至一值 i，乃謹慎的轉動換向器之曲柄 C，使電流自 i 改為 $-i$，而觀察電流計 G 之第一個偏轉 d。試驗三次。由所得之平均 d 及電流計之常數，計得所通行之電量；取其半作方程(3)中之 Q。關下電鑰 D 以速止電流計中線圈之擺動。

(4)將鐵環之磁性再完全消除後，令 P 線圈中電流自 0 增至另一

值 i，再按上述步驟求電流改爲反方同值後，電流計中偏轉 d。改換所用電流之價值十餘次，至偏轉 d 增大之值不多爲止。所得結果及計算可登記如下：

電流計常數 c = 庫侖/毫米偏轉。

電流計線路中總電阻 $R_2=R'+G=$ 歐姆

線圈 P 之圈數 $N=$ ； 平均半徑 $r=$ 厘米； $\frac{N}{5n}=\alpha=$

線圈 S 之圈數 $n=$ ； 截面積= 方厘米；$\frac{cR_2}{na}\times 10^8=\beta=$

激磁電流 i（安培）	偏轉 d（毫米）	磁化力 $H=\alpha i$	磁感應強度 $B=\frac{\beta d}{2}$	導磁係數 $\mu=\frac{B}{H}$	磁化強度 $I=\frac{B-H}{4\pi}$	磁化係數 $k=\frac{I}{H}$

作圖 (1)以 H 爲橫坐標，B 及 I 爲縱坐標，分別畫曲線於方格紙上以表示所得磁化曲線之形式。

(2)以 H 爲橫坐標，μ 及 k 爲縱坐標，亦分別畫曲線於方格紙上以表示其變化之情況。

問　題

(1)試說明磁化曲線之形式。

(2)磁化強度之定義可爲每單位面積上之磁極強度,或每單位體積中之磁矩,試自此定義推證

$$I=\frac{B-H}{4\pi}。$$

(3)設所用衝擊電流計之常數不知,試述如何利用本實驗之原則以求此常數之方法。

(B)磁滯迴線

原理與定義 設有已磁化之鐵，今漸減其所受之磁化力 H，則其磁感應強度 B 將不依 H 增加時之情況而減小。即使所加之磁化力爲 0，鐵中磁性仍有一部分存在，是爲剩磁。若欲消除鐵之磁性，須加一適當之反向磁化力，此反向磁化力之名爲矯頑力。此後，若繼續增大此反向磁化力，則鐵中之磁感應強度 B 亦向反方增大。如增大至某值時，復將磁化力減小，則 B 之減小亦將不能達到前此各值。此現象名爲磁滯。若令磁化力 H 在兩固定之範圍內變化，所得之 BH 曲線兩端將互相連合而成一迴線。此迴線常名爲磁滯迴線。

目的 求一鐵環之磁滯迴線。

儀器 除用特備之可變電阻（圖29.4）以代實驗 A 之 R 外，餘均同前。

圖 29.4

此實驗所用之 R，爲多個線圈，各有其節制之電鍵，以便次第將各電阻並聯，其接法略如圖(29.5)。

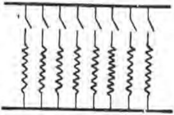
圖 29.5

實驗步驟 (1)按圖(29.2)接好，以特備之電阻代 R。經教員檢查無誤後，方得開始試驗。

(2)按實驗二十五所述，調節電流計 G，與其附屬之望遠鏡，並用電鑰 D

以速止其擺動。

(3)關下阻尼電鑰 D,再關電鍵 K_1 及 R 上各電鍵。一方急轉換向器,一方自左依次開啓 R 上各電鍵,使線圈 P 內電流漸減於 0,以消除鐵環之磁性。

(4)次開啓阻尼電鑰 D,自右依次關閉 R 上各電鍵 S; 每關一電鍵,卽視察安培計之示數 i 與電流計之偏轉 Δd(由所得之各偏轉,卽可計得當電流自前一值增至次一值時,通行於電流計中之電量,故欲得當電流自 0 增至 i 時之總電量,須將自 0 至 i 各次之 Δd 悉行相加方可用以計算,故登記之時,各偏轉可用 Δd 作符號)。

(5)R 上所有電鍵悉關閉後,乃自左復依次開啓之。再觀察安培計之示數 i 與 Δd。

(6)電流 i 旣減爲 0,乃謹愼的將換向器改向,使此後電流之方向適反前,然後再依次自右關閉 R 上各電鍵至電流達反方最大値時,乃復依次自左開啓之。每關一個電鍵,卽記下安培計之示數與電流計之偏轉 Δd。

(7)反方電流 i 亦減爲 0 後,乃復謹愼的將換向器改向,使此後電流之方向復與原始時同,然後再依次自右端始,關閉 R 上各電鍵,至電流復達原始之最大値時爲止。(若試驗畢,照下述所繪之曲線不能迴合,其所示者,乃鐵環之原有磁化情況尙未消失完盡。遇此之時,本實驗須重行作過。)

各觀察結果及計算可登記如下:

電流計常數 $c=$　　庫侖/毫米偏轉

電流計線路中總電阻 $R_2=R'+G=$ 歐姆

線圈 P 之圈數 $N=$ ；平均半徑 $r=$ 厘米；$\frac{N}{2r}=\alpha=$

線圈 S 之圈數 $n=$ ；截面積 $a=$ 方厘米；$\frac{cR_2\times10^8}{na}=\beta=$

激磁電流 i（安培）	偏轉 Δd（毫米）	偏轉總值 $\Sigma(\Delta d)=d$	磁化力 $H=\alpha i$	磁感應係數 $B=\beta d$

作圖 以 H 為橫坐標，B 為縱坐標，作曲線於方格紙上，以表示原始磁化曲線及磁滯迴線之形式。

問題

(1)試在所畫之迴線上，表示剩磁與矯頑力各若干。

(2)問迴線面積之大小，其意義為何？

實驗三十　無線電

(A)電的共振

原理與定義　(1)令電路之自感係數為 L，其電容為 C，則當電流在其中自由振動時，其振動週期為(L 與 C 須用同制度之單位計之)：

$$T=2\pi\sqrt{LC}\quad 秒 \tag{1}$$

其頻率 f 則為

$$f=\frac{1}{T}=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

由此等振動所輻射之波浪，即無線電波。無線電波與光波同，均為電磁波之一，其傳播速度均約等於 3×10^{10} 厘米/秒。若在振動電路旁，置另一電路，而改變第二電路之自感係數或其電容，則當其固有週期與振動電路相等之時，第二電路中之電流將激增。此時，第二電路可視為與第一電路共振。調節一電路使與另一電路共振之手續，常名為調諧。

無線電波之傳播速度既約為 3×10^8 米/秒，故週期與其波長 λ 之關係為：

$$\lambda=3\times10^8T\quad 米 \tag{2}$$

(2)利用共振電路之已知自感係數 L 與電容 C 以量無線電波之波長之儀器，名為波長計。簡單之波長計，可由一自感係數 L 與一可變電容 C 及一檢查共振之儀器組成之。由共振時電容 C 之值，應用方程(1)

與(2)即可計得所求之波長或頻率。

目的　校正一自製之波長計並配合一晶體收音機。

儀器　(1)波長計 W；(2)蜂音器 B 及電池 E 與電容 C_0(約1微法拉)；(3)線圈 L 及可變電容 C；(4)結晶檢波器 D 與電話耳機 T；(5)旁路容電器 C_1 (約0.001微法拉)；(6)天線與地線；(7)電鑰 K (圖30.1)。

圖　30.1

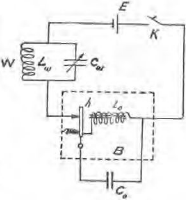

圖　30.2

圖(30.2)示產生頻率已知之電流之簡便方法。W 為波長計，與蜂音器 B，電池 E 及電容 C_0 可聯接如圖。當每次蜂音器 B 內之斷流片 h 被線圈 L_0 內鐵心所吸而斷絕電路時，在波長計之線圈 L_w 及電容 C_w 線路中，即有一列之阻尼波通過。此列阻尼波之波長係由波長計之 L_wC_w 定之，故變更波長計之電容，即可得波長不同之各振動。

無線電波之頻率甚高，不能影響尋常電話耳機中鋼膜使之振動，故如欲檢查阻尼的無線電波或波幅變更之無線電波如圖(30.3)甲或乙時，須先將其矯正為單向的電流如圖(30.3)丙或丁。欲達此目的，可用有單

向導電性的晶體，如"自然銅"之類，以作檢波器。如將經過檢波器後之電流，通過一電話耳機之線圈，則耳機中鋼膜將隨其振幅之大小而變更其位置如圖(30.3)戊與己而成音。

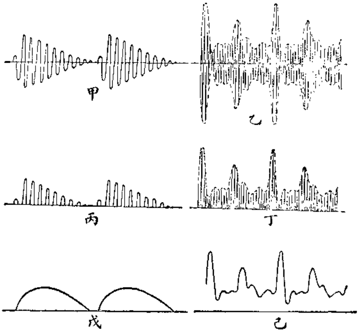

圖 30.3

實驗步驟　(1)將波長計與蜂音器按圖(30.2)接好。如蜂音器所發之音太大，可置之於四面包有棉花之匣中。

(2)將線圈 L(直徑約 $2\frac{1}{2}$ 吋，圈數約 60，此上尚有另一線圈 L'，線較細，圈數較少，暫不用)與可變電容 C 並聯，再接以晶體檢波器 D 及耳機 T 如圖(30.4)，以作待校之波長計(C_1 可不用)。

(3)令 L 與波長計 L_w 稍靠近。關下電鑰 K (圖 30.2)，以激動蜂音器。調變 C_w 使波長計所示之波長爲 300 米。

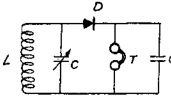

圖 30.4

(4)徐徐變更 C 上之盤至耳機中聲音最大時，記下 C 盤面示數。如波長計與線圈之距離太近，有時聲音最大之 C 值有二。遇此之時，須將 L_w 與 L 稍離遠，至兩 C 值符合爲止。

(5)變更所用之波長約十次(自 300 至 600 米)，記下每次之波長與 C 之示數。

(6)取去蜂音器及波長計 W；將繞於 L 下之線圈 L' (圈數約 30)之兩端分別接於天線與地線，如圖(30.5)。

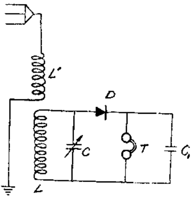

圖 30.5

(7)徐徐調諧 C 至可聽及某電臺所送出之音樂，或語言，或電報信號時，記下 C 之示數。如有充分時間，聽得電臺呼號後，再改聽另一電臺。

所得結果可登記如下：

(a) C 與波長

C（度數）	波長，λ（米）	C（度數）	波長，λ（米）

(b)電臺名稱與波長

電臺呼號	地點	節目性質	C（度數）	波長（米）

作圖 以 C 為橫坐標，λ 為縱坐標，作曲線於方格紙上，以表二者之關係；並在此曲線上註明各電臺之名稱及呼號。

問題

(1)問 L 與 C 在電學之性質與力學中何二量之性質相似？

(2)問南京中央廣播電臺之頻率若干？

(B)兩極真空管之特性與應用

原理與定義 當金屬體之温度升高至適當價值時，其中之電子將有一部分被擠出體外。若在導體旁另置一金屬板而將一電池之正極接於板，其負極接於熱體，則射出之電子將有被版吸引而成為電池中之電流者。如版之電位係負值，則電子不能被吸，而電池中將無電流。通常眞空管中之熱體，多為一細絲 F，另通以電流而熱之。燃燒細絲之電池，常名為 A 電池組；加於版 P 與絲 F 之電池，則名為 B 電池組。如維持絲中電流 I_f 不變(卽其温度亦不變)，則增高加於版極之電動勢 E_b 之效果，將使版絲電路中之電流 I_b 增大。

目的 求兩極眞空管之特性曲線並造一雙極眞空管接收機。

儀器 (1)兩極眞空管(用鎢絲者為佳)與燈座；(2)安培計與毫安培計 mA 各一具；(3) A 電池組(約6伏)；(4) B 電池組(最大值約100伏特)；(5)伏特計 V；(6)線圈 L, L' 與電容 C；(7)電話耳機 T 與旁路電容 C_1；(8)電鍵及可變電阻 R；(9)天線及地線(圖30.6及30.7)。

圖 30.6

實驗步驟 (1)細察燈座與眞空管底之構造；問教員

如何將燈插入座中;在所接之線路未經教員認可之前,真空管不得插於燈座上,以免燒壞。

(2) 將電池,安培計與伏特計按圖 (30.7) 接好,經教員檢查無誤後,方得將真空管插入燈座。注意燈絲所需電流 I_f 較大,須用安培計量之,版絲電路中之電流較小,可用毫安培計 mA 量之。

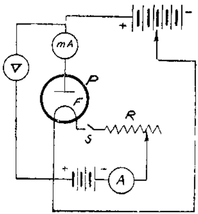

圖 30.7

(3) 關下電鍵 S,調節可變電阻 R 使燈絲中電流為規定之值(可問教員)。維持此值不變,變更 B 電池組所施於版之電壓 V 約十次(自 0 至 100 伏),記下每次之 V_p 與 I_p。

所得結果可登記如下:

真空管式名:　;規定之 I_f=　安培

I_f=　安培		I_f=　安培		I_f=　安培		I_f=　安培	
V_p(伏特)	I_p(毫安培)	V_p(伏特)	I_p(毫安培)	V_p(伏特)	I_p(毫安培)	V_p(伏特)	I_p(毫安培)

(4) 將 R 增大,令 I_f 約僅為規定值之 $\frac{9}{10}$, $\frac{8}{10}$ 及 $\frac{6}{10}$ 各值,再依上述

求 V 與其對應之 I_p。

(5) 將眞空管代本實驗 A 之晶體檢波器 D,聯接如圖(30.8)。調諧 C 以聽各電臺。

作圖 以 I_p 爲橫坐標,V_p 爲縱坐標,作數曲線於方格紙上以示在定値 I_f 下,V_p 與 I_p 之關係,

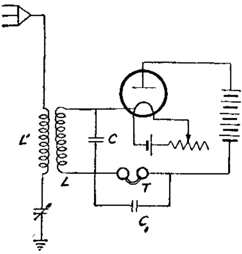

圖 30.8

問　題

(1) 試說明所得各曲線之形式。

(2) 試比較兩極眞空管檢波器與晶體檢波器之優劣。

(3) 除檢波外,兩極眞空管尚有何種應用。

(C)三極真空管之特性與應用

原理與定義　在兩極真空管中,版絲線路電流 I_p 之大小係由燈絲電流 I_f 及版極電位 V_p 節制之。今若在管內版 P 與絲 F 之間,放置一有孔之另一電極 G,則穿過此電極 G 而被 P 所吸引之電子數目亦可由此電極之電位節制之。此電極之形狀頗似柵欄,今名之爲柵極。柵極 G 與絲極 F 所接之電池,常稱爲 C 電池組,以別於絲極所用之 A 電池組及版極間之 B 電池組。

因柵極位在版與絲之間,故其電位變更1單位之效果,較版極電位變更1單位之效果大若干倍。此倍數常名爲真空管之放大係數。因此作用,三極真空管常可用以放大微小之電壓。

目的　求三極真空管之特性曲線並製一三極管接收機。

儀器　(1)三極真空管及燈座;(2)A 電池組(約6伏);(3)B 電池組(約100伏);(4)C 電池組(約20伏);(5)安培計三具(量 I_f 者約1-2安培,量 I_p 者約200毫安培,量 I_g 者約50毫安培);(6)伏特計二具(量 V_p 者約100伏,量 V_c 者約20伏);(7)可變電阻 R 及電鍵;(8)線圈 L, L_1, t 及電容 C;(9)電話耳機 T 及旁路容電器 C_1;(10)漏阻 r 與容電器 C_2;(11)換向器 K(圖30.9)。

線圈 L, L' 之大小與圈數均可與本實驗 A 所用者同,惟在其上須加一小線圈 t 可在 L 中自由移轉者。漏阻 r 與 C_2 約各爲 10^6 歐姆及0.001微法拉。

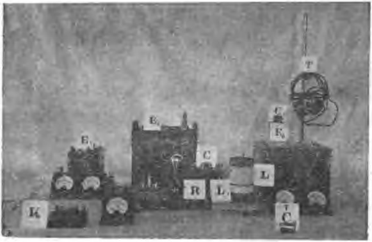

圖 30.9

實驗步驟 (1)細察真空管底與燈座之構造,問教員如何將管插入座中。在所接之線路未經教員認可以前,不得將真空管插於燈座中,以免燒壞。

(2)按圖 (30.10),接好各儀器與電池,經教員檢查認可後,乃將真空管插入燈座中。

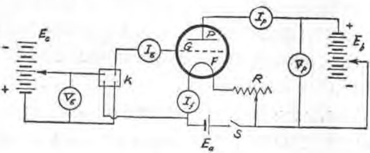

圖 30.10

(3) 用換向器 K 以接柵極 G 於 C 電池組之負極。令 E_c 爲最大；關下 S，再調節 R 至 I_f 達規定之值，此時 I_c 與 I_p 均應爲 0。

(4) 維持 I_f 之值不變，增加 V_p 約達 50 伏特，亦維持其值不變。變更 E_c 約十次，使 I_p 自 0 增至最大值。如必要時，可將換向器 K 改接，使 G 與 C 電池之正極相聯。記下各次之 I_p, I_g, V_p, V_g 與 I_f。

(5) 令 V_p 約爲 75 及 100 伏特，再依法試驗各一次。

所得結果可登記如下：

眞空管式　　　；燈絲電流規定値 (I_f) =　　　安培

$V_p=50$ 伏特			$V_p=75$ 伏特			$V_p=100$ 伏特		
V_g 伏特	I_p 毫安培	I_g 毫安培	V_g 伏特	I_p 毫安培	I_g 毫安培	V_g 伏特	I_p 毫安培	I_g 毫安培

(6) 開啓電鍵 S，取去 C 電池組與其附件並取出眞空管；將線圈 L，L_1，C 及漏阻 r 與 C_2 等接於柵絲電路中，而將電話耳機 T 接於版絲電路中，如圖 (30.11) 實線所示（t 線圈暫不用）。經教員檢查無誤後，始可將眞空管插入燈座中，再將電鍵 S 關下。調節 R 以燃燈絲。

(7) 調諧 C 以聽各電臺。聽畢，將電鑰 S 開啓。

(8) 在圖 (30.11) 中 ab 兩點處，剪斷銅線，而照虛線所示將 t 線圈加入版絲線路中。再關電鑰 S。先調變 C 使復佔前此聽到電臺之位置。

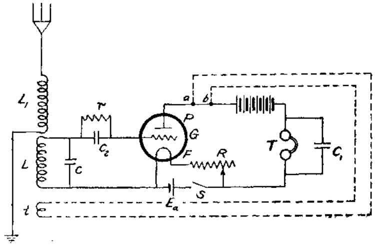

圖 30.11

再旋轉 t 線圈至耳機中幾將發生亂叫之聲爲止。同時,再略動 C 以使所聽者爲明晰。記下各電臺之呼號等,並述調變 t 線圈之效果。

問　題

(1) 試比較三極管與兩極管接收機之優劣。

(2) 加用 t 線圈後,何以所收之音更響?其劣點何在?

實驗三十一　光度計

(A)電燈之發光效率

原理與定義　(1)被一小光源照亮之面積，其每單位被照亮之程度(簡名爲照度)，係與面積距光源遠度 r 之平方成正比。此爲比較兩光源強度各方法所根據之定律。令 P 點距兩光源之遠度爲 r_1 與 r_2，I_1 及 I_2 表兩光源之強度，如 P 點被 I_1 與 I_2 照亮之程度係相等，則

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{r_1^2}{r_2^2} \tag{1}$$

光源強度之單位多用燭光；一單位照度，則等於 1 燭光之光源產生於距光源 1 米之地點之照度。

(2)一盞電燈之強度，視其所通過電流，或其兩端之電位差之大小而定。爲便於測定或比較各式電燈之效率起見，常以耗費 1 瓦特之功率所能產生之燭光數爲其發光效率。

目的　求一盞電燈之發光效率與其兩端之電位差變化之關係。

儀器　(1)光度計 P；(2)光具座；(3)標準電燈 L_s；(4)待驗電燈 L；(5)伏特計 V 二具；(6)安培計 A 二具；(7)可變電阻 R 二具；(8)直流電源(圖 31.1 及 31.2)。

光度計之較簡者有漫射式與油斑式兩種。漫射式光度計之製法如下：(見圖 31.3 A) 將一塊長方形之白蠟切斷爲兩塊同樣大小之形式，

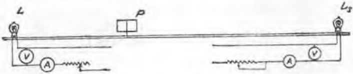

圖 31.1

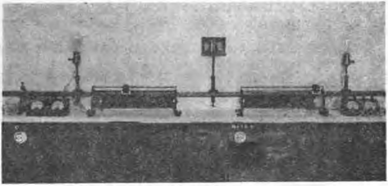

圖 31.2

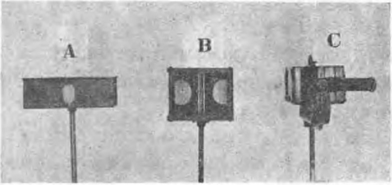

圖 31.3

然後以一片錫箔夾於二者之中，再裝之於一適當之匣，匣左右各有一穴，以收集自左右兩光源所發生之光，其中部亦有一穴，以露出白蠟之兩部而備觀察其是否同亮。

油斑光度計之構造，較漫射光度計稍繁複。一張粗而不發光之紙中心，抹有油斑一小塊。此油斑兩面被照之程度是否相等，可由其在一對斜交之鏡中之像檢查之(圖 31.3 B)。

較精細之光度計則有 Lummer-Brudhum 式。此式光度計之構造大致如圖(31.3 C)。因左右光線所取之路途不同之故，在望遠鏡中，觀者所見之視場，將分為四區域如圖(31.4)。A 與 a 為來自右方光源所照之面積，B 與 b 則為來自左方光源所照之面積。因四者互相襯托，故其亮度是否相同，更易測定。

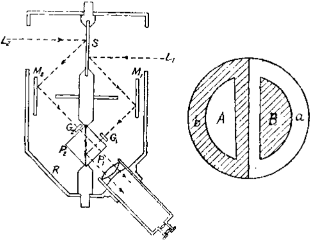

圖　31.4

實驗步驟　(1) 將光具座置於適當之暗室內，在其兩端裝置標準電燈 L_s 及待驗電燈 L，在架之中部裝置光度計。調節燈及光度計，使其中心同高，並令標準燈與待驗燈上有記號之處，各面向光度計。

(2) 將各伏特計 V，安培計 A 及可變電阻 R 分別與兩燈聯接如圖

(31.1)。經教員認可後，乃接於電源。各燈座上均備有電門，不用燈時，均應將電門旋轉以熄燈。

(3)調節標準燈 L_1 線路 S 中之可變電阻，使燈端之電壓達規定之值。維持此值不變。

(4)調變待驗燈 L 線路中之可變電阻，使燈兩端之電壓，自60伏特起增至100伏，每次約增5伏特。每變更電壓一次，即移動光度計 P，至其兩邊之亮度相等時，乃自光具座橫桿上所刻之標度，記下 P 至 L_1 及其至 L 之距離 r_1 與 r_2。記錄各伏特計與安培計之示數。

(5)將光度計反置，使原在觀者右方之燈改處左方，原在左者改在右，依照步驟(4)再行測驗。(注意，不可對調兩燈，以免因其相對的位置改換，而所放之光亦有差別。)

所得結果及計算可按下表登記之：

標準燈燭光數 I_1 = ；規定電壓＝ 伏特；電流＝ 安培；

待驗燈之製造者： ；燈絲質料： ；泡中裝氣否：

電壓 v，(伏特)	電流 i，(安培)	電功率 W，$W=vi$，(瓦特)	光度計與燈之距離						待驗燈之燭光 $I_2=\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 I_1$ 平均	光的效率 $e=\frac{I_2}{W}$ 燭光/瓦特
			標準燈(r_1)			待驗燈(r_2)				
			在左	左右	平均	在左	在右	平均		
60										
65										
70										
75										
80										
85										

90										
95										
100										
105										
110										

作圖　以電壓 v 爲橫坐標,燭光 I_0 及效率 e 爲縱坐標,分別繪兩曲線於方格紙上,以示其變化情形。

問　題

(1) 本實驗所得之 v 與 e,其關係是否一直線,試言其故。

(2) 增加電燈之電壓,其利弊若何,試說明之。

(B)燈光強度之分佈曲線

原理與定義 自一點光源所發出之光，其分佈情況，各方均同。尋常燈光，均非一點，故其所產生之照度，亦隨輻射方向而異。因此，比較光源之強弱時，亦須言明輻射方向爲何。表示強度隨方向變化之情況，最便利之方法，係自同一原點，畫長短不同之直線於各方向以成所謂極坐標圖者。將一燈在其水平平面上各方向之強度平均之，則得其赤道面平均燭光。若將燈在空間各方之強度平均之，則得其球面平均燭光。

目的 求電燈強度在水平面上與垂直面上之分佈情況。

儀器 除以特備之旋轉燈座架(圖31.5)代本實驗 A 所用較簡單之座架外，其他儀器均同前。

燈在特備之旋轉燈座架上，可以通過架中心之一垂線爲軸而旋轉，亦可以通過架中心之一水平線爲軸而在一垂直面上旋轉。所轉角度之大小，則可分別於一水平及一垂直盤面讀得之。

圖 31.5

實驗步驟 (1)將待驗之燈插於特備之燈座中，再將此燈座架夾於光具座之一端；並調節其高度，使燈之中心與垂直圓盤中心同高。其他各儀器均可按本實驗 A，步驟(1)至(3)所述

者裝置並調節之。

(2) 調變待驗燈 L 線路中之可變電阻，以維持燈兩端之電壓使爲規定之値；待一二分鐘，至伏特計及安培計之示數均已不變後，再進行試驗。

(3) 令燈取垂直方向，移動光度計 P 至其兩邊之亮度相等時，乃記 P 至標準燈 L_s 與待驗燈 L 之距離，r_1 與 r_2。

(4) 以通過電燈中心之垂線爲軸，旋轉待驗燈 L 十二次，每次 $30°$，再按上述方法，依次求 P 兩邊亮度相同時，r_1 及 r_2 之値。

(5) 燈旣轉回原位（卽旋轉 $360°$）後，乃將光度計反置，再重行試驗。由步驟(4)與(5)所得之平均結果，計算燈在水平面上各方之強度。

(6) 放置燈使其有記號之處面向光度計；次以通過燈中心之水平線爲軸，旋轉待驗燈 L 十二次，每次 $30°$，再按步驟(3)所述方法，依次求 P 兩邊亮度相等時 r_1 及 r_2 之値。

(7) 燈復轉回原位後，乃將光度計反置，再依前法重行試驗。由步驟(6)與(7)所得之平均結果，計算燈在垂直面上各方之強度。各結果可登記如下：

標準燈之燭光數 I_s＝　　；規定電壓＝　　伏特；電流＝　　安培

待驗燈之製造者：　　燈絲質料：　　燈泡中裝氣否：

燈絲形式簡圖：　　；所用電壓：　　伏特；所通電流＝　　安培

A. 燈光強度在水平方向分佈情況

角度	光度計至燈之距離						待驗燈之燭光
	標準燈 (r_1)			待驗燈 (r_2)			$I=\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 I_s$
ϕ	在左	在右	平均	在左	在右	平均	
0							
30							
60							
90							
120							
150							
180							
210							
240							
270							
300							
330							

赤道面平均燭光＝

B　燈光強度在一垂直面上之分佈情況

角度	光度計至燈之距離						待驗燈之燭光
	標準燈 (r_1)			待驗燈 (r_2)			$I=\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 I_s$
θ	在左	在右	平均	在左	在右	平均	
0							
30							
60							
90							
120							

150							
180							
210							
240							
270							
300							
330							

垂直面上之平均燭光＝

作圖　試作極坐標圖以示所得之結果。

問　題

(1)試述如何計算球面上平均強度之方法。

(2)若在極坐標圖上，以平均強度爲半徑，作一圓周，則其面積與強度分布曲線內之面積相等，試證之。

實驗三十二　射鏡

(A)凹鏡之焦距

原理與定律　今光線來自右方，自鏡頂向右量之距離爲正，其向左量者則爲負。依此規定，若鏡頂至物之遠度爲 p，至其像之遠度爲 q，鏡之曲度半徑爲 r（正號表示凹鏡，負號表示凸鏡），則

$$\frac{1}{q}+\frac{1}{p}=\frac{2}{r}=\frac{1}{f}\tag{1}$$

f 爲鏡之焦距。

自方程(1)觀之，若所用之鏡凹面者，而 p 較 f 爲大，則 q 之值均爲正；換言之，如物位在凹鏡焦點之外，其像與物均在鏡之一邊，反射後之光線實際上可聚集於一幕上以成眞像。

f 既等於 $\frac{r}{2}$，故如已量得 r，則 f 亦可計得之。量 r 之最簡便之方法係用球徑計。球徑計有四足，其外邊之三足係固定的，並分佔一等邊三角形之頂點，居中之足則通過此三角形之中心，並可上下垂直的移動。中足上部有一測微螺旋，其所移動之距離可由其上端盤面之刻度與三足架旁之垂直標度讀得之。若置球徑計於一球面上，當其四足均與球面適接觸之時，中足距其他三足所在平面之垂直距離爲 h，而三角形各邊之長均爲 l，則此球面之曲度半徑爲

$$r=\frac{l^2+3h^2}{6h}\tag{2}$$

目的　求凹鏡之焦距。

儀器　(1) 凹鏡 D; (2) 光具座; (3) 燈 E; (4) 上有記號之磨玻璃 A; (5) 小幕 C; (6) 球徑計 G 與平的玻璃版; (7) 雙脚規及尺 (圖 32.1)。

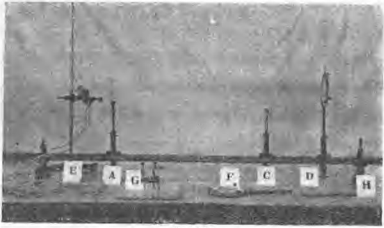

圖 32.1

凹鏡如無現成者，可用凹透鏡之一凹面；為減少其他面之反射起見，可蓋以濕紙；未用球徑計之前，須先置之於一平版上，而求其中足與他三足所在之平面適接觸時，測微螺旋上端標度所示之值，是即器之零點。欲測驗器之四足是否與一平面接觸，其法有二：一法係將螺旋向下轉動，至其轉動較鬆易時，記下其位置，再略將螺旋向上轉動，至其轉動較緊時，再記下其位置；然後以二次所得之平均為四足同與面接觸時之位置。此法所根據之理，乃因當中足初與面接觸時，螺旋與螺母之上下面均略有空隙，故其間之摩擦較小，而螺旋之轉動乃較鬆易。又一法乃利用架是否適可以中足之接觸點為中心而轉動一事，以測驗中足是否與面接觸。後法應用雖較易，惟其準確程度則稍遜於第一法。

實驗步驟　(1)將凹鏡及被照亮之物（即有記號之磨玻璃）裝置於光具座上。另在座上裝置幕，以備反射後之光線得於幕上焦聚成實像。

(2)先令物至鏡頂之遠度 p 最小為 100 厘米；再調節幕至鏡頂之距離 q 使幕上所成之像最為明晰。以三次所得 q 之平均作 q 之值。記下像之性質。

(3)將物移近，約六次，而求每次之 q。在 p 之六次位置中，須有一值適等 r，此時物與像之位置當符合；又有一次，所造之像須射至遠方之牆，此時之 p 可視作即等於 f。

(4)置球徑計於一平版上，求其中足與其他三足所在之平面適接觸時，測微螺旋上端標度所示之值；以是為零點。

(5)置球徑計於凹鏡面上，按前所述之方法，測得四足與鏡面同接觸時，測微螺旋旁之示數，自此減去零點，即得所求之 h。量球徑計兩足之距離 l。所得各結果及計算可登記如下：

A.　凹鏡之焦點

距離（厘米）		焦距（厘米）	像之性質
鏡至物 p	鏡至像 q	$f=\frac{pq}{p+q}$	虛實，正倒，大小

平均 $f=$ 厘米

平均 $r'=2f=$ 厘米

B. 凹鏡之曲度半徑

球徑計二足之距離（l）				平均
零點（S_0）				平均
四足同觸凹面之示數（S）				平均
$h=(S-S_0)=$				
凹面半徑 $r=\frac{l^2+3h^2}{6h}=$ 厘米				

兩法所得之 r 相差 $=r-r'=$ 厘米

$$=\frac{r-r'}{r}\times 100= \quad \%$$

問　題

(1) 問像之性質與 p 及 q 之符號與數值之關係若何？

(2) 試證 $r=\dfrac{l^2+3h^2}{6h}$ 一公式。

(B)凸鏡之焦點

原理 自射鏡公式

$$\frac{1}{q}+\frac{1}{p}=\frac{2}{r}=\frac{1}{f}$$

觀之，因凸鏡之 f 爲負之故，如 p 爲正，q 均爲負；是以實物在凸鏡中所造之像均係虛像，而不能以幕承之。

欲求虛像位置之一法，係利用視差原理。若有兩物，其位置適互相符合，則無論如何改變觀點，二者之位置均係一致。若二者位置不完全符合，則變更觀點即見二者之相對的距離或較近或較遠，殊不一致。故如在虛像之處，置一實物，即可由其是否隨觀者位置而變更其相對的位置一事以決定二者之是否符合。

凸面之曲度半徑，亦可用球徑計量之。

目的 求一凸鏡之焦距。

儀器 (1)凸鏡 F；(2)光具座；(3)燈 E 與一照亮之物 A；(4)另一直桿 H；(5)球徑計；(6)兩腳規及尺(圖 82.1)。

實驗步驟 (1)將凸鏡 F 及物 A 與桿 H 裝於光具座上。

(2)令 A 至 F 頂之遠度 p 爲頗大之値，約 100 厘米。

(3)在鏡後移置桿 H，而自鏡前觀察 H 與 A 之像之位置是否符合。若改變觀點而二者無相對的移動時，乃記下 H 至鏡頂之距離 q。試驗三次，以其平均爲所求之 q。

(4)改變 p 數次，依上述方法尋求其相關之 q。

(5) 求球徑計之零點，並量其三足之距離 l。置之於凹面上以定四足均觸凹面時，其測微螺旋之示數。所得各結果及計算可登記如下：

A. 凸鏡之焦點

距離（厘米）		焦距（厘米）	像之性質
鏡至物	鏡至像	$f=\frac{pq}{p+q}$	實虛，正倒，大小
p	q		

平均 $f=$ 厘米

平均 $r'=2f=$ 厘米

B 凹鏡之曲度半徑

球徑計三足之距離（l）				平均
零點(S_0)				平均
四足同觸凹面之示數（S）				平均
$h=(S-S_0)=$				
凹面半徑 $r=\frac{l^2+3h^2}{6h}=$	厘米			

兩法所得之 r 相差 $=r-r'=$　　　厘米或 $\frac{r-r'}{r}\times 100=$　　　%

問　題

(1)設在凸射鏡 M 之前置一會聚透鏡 L,L 前有一小燈 P。自 P 所射出之光線,透過 L,爲 M 所反射而復透過 L 後,可焦聚於 P 之原處,問 M 之位置應如何放置?

(2)用本實驗 B 之方法,以測定虛像之位置,其準確程度是否較優於用幕以承接實像?

實驗三十三　透鏡

(A)薄透鏡之焦距

原理與定義　(1)透鏡大別可分會聚與發散兩類。會聚透鏡之中心較其邊際為厚;發散透鏡則反此。平行的光線,通過會聚透鏡之後,將會聚於一實焦點,如通過發散透鏡,則將分散宛如此等光線係自透鏡後之一虛焦點出發然者。若所用之透鏡,其厚度甚微,則名之為薄透鏡。令薄透鏡至物之距離為 p,鏡至像之距離為 q,鏡至其焦點距離為 f(符號均按實驗三十二(1)所述之原則而定),則

$$\frac{1}{q}-\frac{1}{p}=\frac{1}{f} \tag{1}$$

(2)會聚透鏡之焦距為負號,故如 p 較 f 為大,q 均為負,而光線實際上將通過像所在之點,故其所造成者乃實像。若令物 P 與幕 Q 之距離 d 固定不變,而 d 之值為透鏡 L 焦距之4倍以上,則在 P 與 Q 之間,可尋得兩個位置以放 L,均可使 Q 上有 P 之明晰之像。若此兩個位置相隔之距離為 x,則透鏡焦距為

$$f=-\frac{d^2-x^2}{4d} \tag{2}$$

(3)上述方程雖不能用以測發散透鏡之焦距;然如將一發散薄透鏡與一焦距已知之會聚薄透鏡接觸,以使其組合之情形與一會聚透鏡同,則會聚透鏡之焦距 f_c,發散透鏡之焦距(待定) f_d 與兩鏡組合之焦距 F

三者有下列關係：

$$\frac{1}{f_c}+\frac{1}{f_d}=\frac{1}{F} \tag{3}$$

(4) 通過尋常透鏡之光線，其近於鏡之中心者，與其通過鏡之外邊者，所會聚之點，常不符合，是爲球差。又因焦距之值隨光色稍異，故如用不同之光色，其焦點之位置亦有差別，是爲色差。

目的 求會聚及發散透鏡之焦距，並考究其球差與色差。

儀器 (1)光具座 B；(2)會聚透鏡 L_2 與發散透鏡 L_1；(3)燈與物 T(可用鐵絲網一小方)；(4)幕 S(可用磨玻璃)；(5)有色玻璃；(6)黑紙，剪刀，漿糊 B (圖 33.1)。

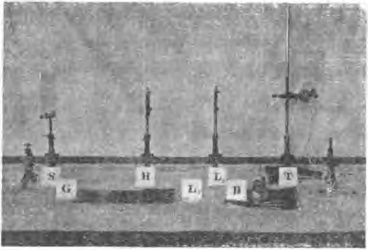

圖 33.1

實驗步驟 (1)先任擇一窗外之物，以會聚透鏡 L_2 焦聚此物於幕上。量二者之距離，是即 L_2 之焦距之大約值。

(2) 將鐵絲網 T 與燈放置於光具座之一端,在其他端距網約 5 至 7 倍 L_2 焦距之處,安置幕 S。量網 T 至幕之距離 d。

(3) 置 L_2 透鏡於幕及網之間。移動之使幕上呈現明晰之網像。試驗 5 次,以其平均爲透鏡之第一位置 x_1。

(4) 維持網 T 與幕 S 之距離,移動透鏡 L_2 以求其在另一位置時幕 S 上復有 T 之明晰之像。亦試驗 5 次,以其平均爲透鏡之第二位置 x_2。透鏡所移之距離 $x=x_1-x_2$。

(5) 變更 T 至 S 之距離二次,復按前述再行試驗。

(6) 夾一黑紙於透鏡前,以遮蓋其邊,只露出中心約佔透鏡 $\frac{1}{3}$ 之部分,再照前法求其焦距。

(7) 改用一黑紙,以遮蓋透鏡之中心,只露出其邊,再照前法求其焦距。

(8) 用透鏡全部,依次置紅色,綠色及藍色玻璃於鏡或物前。照前法求其各焦距。

(9) 令發散透鏡 L_1 與會聚透鏡 L_2 接觸,照步驟(1)至(5)求此組合之焦距。

所得結果與計算可登記如下:

A．會聚透鏡之焦距

透鏡號碼＝

實驗性質	網與幕之距離(厘米) d	透鏡位置 第一	透鏡位置 第二	透鏡位置 差, x(厘米)	焦距(厘米) $f=\frac{d^2-x^2}{4d}$
普通					

普通						
普通						
球差	中部通光					
	外邊通光					
色差	紅					
	綠					
	藍					

B. 發散透鏡之焦距

所用會聚透鏡號碼＝　　　　；焦距 f_c＝　　　　厘米

待驗發散透鏡號碼＝

網與幕之距離 d	透鏡位置 第一	透鏡位置 第二	透鏡位置 差 x（厘米）	組合焦距（厘米）$F=-\frac{d^2-x^2}{4d}$

平均 F＝

待驗發散透鏡之焦距 $f_d=\frac{f_c F}{f_c-F}=$　　　　厘米。

問　題

(1) 試推證方程(2)與(3)。

(2) 用此法以量焦距，較諸直接量鏡至物及鏡至像之距離 p 與 q，有何優點？

(3) 試作圖以示光線通過會聚透鏡及發散透鏡所取之路途。

實驗三十四　折射係數

(A)平行面的固體與液體之折射係數

原理及定義　(1)光線自一媒質斜射於另一媒質時，其方向當有改變。如射入線與正交於分界面之法線所作之角爲 i，而折射線與法線所作之角爲 r，則

$$n=\frac{\sin i}{\sin r}\tag{1}$$

爲一常數，其值係等於光在第一媒質中之傳播速度，與其在第二媒質中速度之比。n 之名爲第二媒質對於第一媒質之折射係數。

(2)設有一物體，其上有一層透明的固體或液體，因折射作用，物體之位置頗似移高。例如令 t 表透明的固體或液體 L 之厚，今自其上垂直的向下觀察在 L 底面之小點，則見其距 L 上面之遠度不等 t 而爲 t'。L 對於其上面之媒質之折射係數 n 即等

$$n=\frac{t}{t'}\tag{2}$$

目的　由玻璃片及液體之像似的厚或深，測定其折射係數。

儀器　(1)顯微鏡及測微螺旋，電池與電流計；(2)玻璃片(兩面平行的)；(3)平底玻璃杯；(4)酒精；(5)水；(6)粉；(7)滴水管(圖34.1)。

實驗步驟　(1)置一硬紙(或平的金屬片)於顯微鏡之架上，在其上作一記號，以便觀察。調節顯微鏡，使焦聚於紙片上記號。藉測微螺旋及

電池以測定顯微鏡筒之位置，令測微螺旋之示數爲 r_1。

圖 34.1

（2）置玻璃片於紙上，轉動顯微鏡之螺旋頭，以徐徐舉起顯微鏡，至其復焦聚於紙上記號時，乃復用測微螺旋以測鏡筒之位置，令測微螺旋之示數爲 r_2。

（3）次再舉起顯微鏡，以焦聚於玻璃片上面之另一記號（例如小墨點）。記下測微螺旋示數，r_3。此玻璃片之實有厚度爲 $t=r_3-r_1$，其像似的厚度，則爲 $t'=r_3-r_2$。

(4) 依上述方法，試驗三次，由其平均結果，計算折射係數 n。

(5) 以蠟少許粘平底玻璃杯於顯微鏡架上。調節顯微鏡，使焦聚於杯底上面之一記號，記下測微螺旋之示數 r_1。

(6) 以滴水管徐加水於杯中，深約 2 至 3 厘米。次轉動顯微鏡之螺旋頭以舉起顯微鏡，至其復焦聚於杯底記號時，乃復記下鏡旁標度之示數 r_2。

(7) 散粉少許於水面，再舉起顯微鏡以焦聚於水面上浮之粉；記下鏡旁標度之示數 r_3。試驗三次。

(8)改用酒精，依照上述方法試驗三次。

所得各結果可登記如下：

物質	顯微鏡筒位置			厚度		折射係數		公認值	% 誤差
	未加樣本 r_1	加樣本後 r_2	焦聚於樣本面上 r_3	實有，t r_3-r_1	像似，t' r_3-r_2	n	平均	n'	$\frac{(n-n')100}{n'}$

問　題

(1)試證方程(2)。

(2)若玻璃片之上面係一球面，其曲度半徑已知為 r，問方程(2)應如何改變方得應用？

(3)作本實驗時，所用之樣本，以愈厚愈佳，何故？

(B)三稜體之折射係數

原理 如樣本之形式爲一稜體，則其折射係數，可由入射光線與射出光線方向相差爲最小時測定之。此最小角常名爲最小偏向角，玆以 d 表之。若 A 表稜鏡之角(見圖 34.2)，當偏向角爲最小時，入射線與射出線對於稜鏡係對稱的，故

$$n=\frac{\sin\frac{d+A}{2}}{\sin\frac{A}{2}} \qquad (1)$$

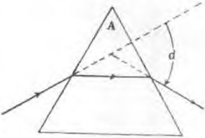

圖 34.2

目的 用分光儀以量一三稜鏡之折射係數。

儀器述要 (1)分光儀;(2)三稜鏡;(3)黃色鈉焰燈及他色光之燈(圖 34.3)。

圖 34.3

分光儀之主要部分爲一望遠鏡 T(圖 34.4)，一平行光管 C 及一小台几 P; 此三部分均可旋轉於同一之垂直軸線。台几 P 上可放三稜鏡或他種儀器。平行光管 C 之一端有一狹縫 S，其他則裝一透鏡。狹縫 S 係位在透鏡之焦點，故由平行光管所透出之光線係平行的。望遠鏡 T 乃用以觀察由平行光管所直接透出(或經反射或折射後)之平行光線。用分光儀之前，須先調節望遠鏡之目鏡使之焦聚於其叉絲，然後再調節目鏡與物鏡之距離，使望遠鏡焦聚於室外遠物。次將望遠鏡對正平行光管，以視察其狹縫。最後則調節狹縫 S 至透鏡之遠度，使其像最爲明晰。

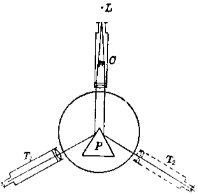

圖 34.4

分光儀之望遠鏡，平行光管及台几既均須旋轉於同一之垂直軸線，且望遠鏡及平行光管復須與此垂直軸線作 90° 角，故在精細之分光儀中，此三部分均各有其適當附件，以供調節之用。惟在尋常之分光儀中，製造者對此諸點，均先已調節妥當，如遇須另行調節時，可先問教員如何進行，萬勿自行工作以免枉費時間。

放置三稜體於台几上時，其一邊須與分光儀之垂直軸線平行。欲達此目的，可先將平行光管之狹縫 S 改爲水平，次將望遠鏡對正平行光管，調節狹縫大小，以使其一邊與望遠鏡中橫叉絲脗合。置三稜體於平台上，使其一面與連接台上兩個螺釘之直線正交(此等螺釘乃用以調節

台面之傾斜者)。次旋轉望遠鏡及平行光管,令狹縫之像自此面上反射於望遠鏡。調節前此之兩螺釘,使狹縫一邊復與望遠鏡中橫叉絲脗合。次旋轉平台使狹縫自稜體之又一面反射入望遠鏡,再調節台上第三個螺旋釘令狹縫一邊亦與橫叉絲脗合。如是此兩面間之邊(此後簡稱之為折射邊)係與儀器之軸線平行;兩面間之角,即稜體之角 A。調節畢,可將狹縫轉向至垂直位置。

實驗步驟 (1)除有特別聲明外,分光儀上之各部分均已先期調節妥當;使用時如有困難時,須先問教員,方可開始調節以免枉費時間。

(2)放稜體於平台上,令其折射邊對正平行光管,並使此邊兩旁面與管軸各約作相等之角如圖(34.4)。燃燈以照亮狹縫。

(3)暫略展開狹縫;旋轉望遠鏡以觀察自稜體上一面所反射之狹縫之像。既察得望遠鏡之大略位置,乃將狹縫關小。次乃轉動望遠鏡之位置,使其叉絲與狹縫一邊脗合。此時望遠鏡之位置為何,可在分光儀本身上有一個標度上之兩個游尺讀得之;記下此兩游尺之示數 θ_1 與 θ_1'。

(4)轉動望遠鏡以觀察自他面所反射之狹縫之像;照步驟(3)再求望遠鏡之位置 θ_2 及 θ_2'。望遠鏡自第一位置轉至第二位置之角,除以 2,即等於稜鏡之角。試驗三次,以其平均作 A 之值。

(5)在燈中燃燒食鹽以使其火光呈純淨之黃色。

(6)旋轉台几 P,使稜體之位置與平行光管及望遠鏡約為對稱的(先令折射邊在觀者之右,見圖 34.2)。暫展開狹縫,而在望遠鏡中尋求狹縫之像。既尋得狹縫之像後,乃將台几向左右旋轉而注意其移動方向當台几繼續向一方旋轉時,像亦向一方旋轉,至一定位置後,若繼續轉

動台几，則狹縫之像，將向反方移動。此回轉點卽偏向角最小時之位置。關小狹縫，並準確的測定偏向角爲最小時望遠鏡之位置；自兩游尺記下此時望遠鏡之 ϕ_1 及 ϕ_1'。

(7) 拴緊平行光管，不任其轉動，旋轉平台與望遠鏡，使折射邊改在觀者之左。照步驟(6)以求在此方之最小偏向角之位置，自兩游尺記下 ϕ_2 與 ϕ_2'。望遠鏡自第一位置轉至第二位置之角度，除以 2，卽爲所求之最小偏向角。

(8) 如有充分時間，可改用他色光再作實驗。所得結果及計算可登記如下：

A. 稜體之角 A

實驗次數	望遠鏡位置				$\|\theta_2-\theta_1\|$	$\|\theta_2'-\theta_1'\|$	稜體之角
	θ_1	θ_1'	θ_2	θ_2'			A°
1							
2							
3							

B. 折射係數

光色	實驗次數	望遠鏡位置				$\|\phi_2-\phi_1\|$	$\|\phi_2'-\phi_1'\|$	最小偏向角
		ϕ_1	ϕ_1'	ϕ_2	ϕ_2'			d
	1							
	2							
	3							

平均 $d^\circ=$

$$折射係數\ n=\frac{\sin\frac{A+d}{2}}{\sin\frac{A}{2}}=$$

問　題

(1) 若 $|\theta_2-\theta_1|$ 之值較 $180°$ 大，則 $A=180-\frac{(\theta_2-\theta_1)}{2}$，否則 $A=\frac{\theta_2-\theta_1}{2}$，試作圖以示之。

(2) 試述折射係數與光色之大略關係。

(3) 短波與長波光之分散，孰爲較大，試略述之。

實驗三十五　光柵

原理及定義　設有一不透光之幕(圖35.1) G,中有多個距離相等之平行狹縫 p,q,r,s 等。發自一光源之平面波 AB 自左行抵此幕時,其穿過各狹縫向右進行之情況，與各狹縫在同時另產生多個副波向右進行之情況無異。此原理常名爲 Huygens 原理。今若作一平面 A_0B_0 與各副波相切,則沿與

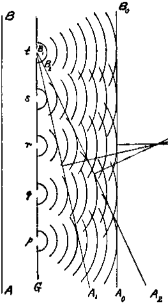

圖 35.1

A_0B_0 正交方向觀察之，可得此光源之像。除 A_0B_0 外,倘有其他 A_1B_1, A_2B_2, …… 等平面亦與各副波相切，故如沿與此等平面正交之方向觀察之,亦可見及光源之像。光柵卽爲中有多個狹縫之片如 G 者，自光柵後觀察遠方之光源，所見之像常不只一個。此等像之方向 θ 與光源波長 λ 之關係,及光柵中各狹縫之距離 d 如下(圖 35.2)：

$$n\lambda = d \sin \theta_n \tag{1}$$

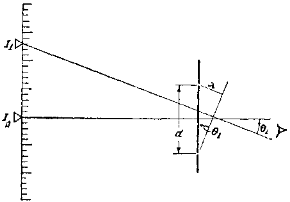

圖 35.2

此中之 n 爲一整數,表在中心左右第幾個像,常名爲像之級次。例如 $n=1$,卽爲居中直接像之左或右之第一像。自此方程觀之,所用之光如係白色,則所得之各級像將分散爲多種色彩,因白光係由各色光組合而成也。此等色彩,名爲光柵光譜。若用單色光,則所得者僅有該色。

目的 用光柵以量波長。

儀器 (1)透視光柵 G 與夾光柵架; (2) Bunsen 燈 F 圍以中有狹縫之鐵片煙筒 C; (3)各種鹽; (4)木尺 S 及銅鈎與三足架; (5)布條尺 R (圖35.3)。

實驗步驟 (1)將燈置在煙筒之後,使在遠處僅見其垂直狹縫。在其前置一橫尺,離縫約 2 至 3 米處,夾置一透明光柵。放置光柵時,須使連光柵於狹縫之直線與木尺成直角。

(2)令光柵中各線垂直,調節其位置,使在其後觀察狹縫時各像可者在橫尺上。如左右移動觀者位置而像與尺上刻度有相對的移動時,須調節 R 之位置以免除此種視差。如左右各像距中像之遠度不等,須將

光柵平面沿一垂線轉動，以達到目的爲止。

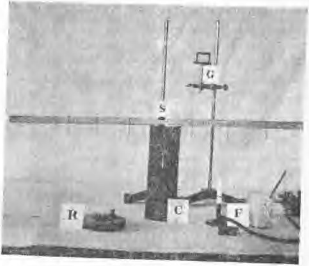

圖 35.3

(3)浸少許石棉於食鹽溶液中後，取出置之火焰中使焰呈純黃色鈉光。

(4)置銅鈎於木尺上以表示在中像左右第一像之位置。觀察時，觀者之眼須靠近光柵。記下尺上所示之值 S_1 及 S_1'，以 $\frac{S_1-S_1'}{2}$ 爲第一級像至中像之遠度 x_1。用布尺量光柵至兩銅鈎之距離，以其平均爲 l。

(5)依步驟(4)之方法量其他各級像距中心之遠度 $x_2, x_3, \cdots\cdots$ 等，方程中之各 $\sin\theta_n$ 即等於 $\frac{x_n}{l_n}$。

(6)以顯微鏡量光柵各線之距離 d（如此值已註在光柵匣上，則可不必另求）。

(7) 改用另一種光色，如鉀之紫光及鋰之紅光，再試驗。

所得結果可登記如下：

光柵上每厘米之線數＝

兩線之距離 $d=$ 厘米

光色	像之級次	銅鉤位置		像至中點距離	像至光柵遠度（厘米）			$\sin\theta$	波長（10^{-8} 厘米）
		S	S'	$x=\dfrac{S-S'}{2}$	l	l'	平均	$=\dfrac{x}{l}$	$\lambda=\dfrac{d}{n}\sin\theta$
	1								
	2								
	3								
									平均 $\lambda=$
	1								
	2								
	3								
									平均 $\lambda=$

問 題

(1) 問鈉光之頻率幾何？

(2) 量 l 與 S 時，其準確程度，孰為較要？

(3) 試作簡圖以示白光通過光柵後之光譜情況。

實驗三十六　光譜

原理及定義　各色之光源均有其一定之波長與折射係數。尋常三稜鏡之折射係數隨波長之增大而減少，故如令含有各色之白光通過三稜鏡，波長較短之紫光被折較大，而波長較長之紅光則被折較小。此現象名為色散，因稜鏡色散作用而得之各色彩有時為連續的，有時則為多條之光線，其情況視光源之性質而定，玆簡稱之為稜鏡光譜。尋常言波長時，多以埃斯通（$=10^{-8}$厘米）為單位，其符號常為 Å。可見之光波，其波長約自 4000 至 7600 Å。

兩種不同之波長，通過一三稜鏡後，其方向所分開之角度，視三稜鏡之質料而定，故如用不同之三稜鏡以觀察同一光源所發出之特具波長，所察見各線之位置亦常不一致。是以若欲用一稜鏡分光儀以分析各種物質之光譜，須先求波長 λ 與分光儀示數 θ 之關係。

目的　校正一具稜鏡分光儀，並求數個光譜中未知明線之波長。

儀器　(1)稜鏡分光儀 A；(2)汞弧燈 C；(3)鈉焰燈 D；(4)感應圈 B，電池 E 及氫氣放電管；(5)放電管數個 S；(6)未知鹽數種(圖36.1)。

稜鏡分光儀之調節法可參考實驗三十四 B。作此實驗時，所用之稜鏡分光儀，係已調節妥善，如有困難，須先得教員允許，方得另行調節。

汞光燈與氫氣放電管之使用法，可先問教員。

實驗步驟　(1)燃鈉焰燈於平行光管前；依實驗三十四 B 之步驟(6)所述，求得鈉光兩條黃線中心之最小偏向角。得此位置後，乃將平行

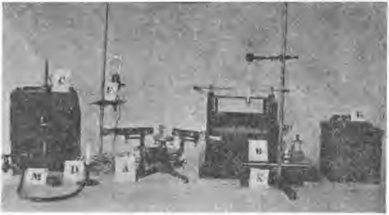

圖 36.1

光管與台几均拴固，不任其稍動，至於望遠鏡則仍可轉動。將望遠鏡中叉絲先後對正兩黃線而記下望遠鏡下附屬一游尺之示數。此兩線之波長各爲 5896 與 5890 Å。若因所用分光儀之鑑別率不夠，此兩線不能被分解，則可以 5893 Å 爲其中心點之波長。

(2) 改用汞光燈。再轉動望遠鏡以觀察其中各主要明線之位置。此等明線之波長各如下（單位均爲 10^{-8} 厘米）：

黃色雙線：$\begin{cases}5790\\5770\end{cases}$（強）　　紫色線：4359（強）

黃綠色線：5461（強）　　4348
4339
4078

藍綠色線：$\begin{matrix}4960\\4916\end{matrix}$（強）　　紫色線：4047（強）

(3) 改用氫氣放電管。再轉動望遠鏡以觀察其上之紅色與藍色兩線之位置。此二者之波長各爲 6563Å 及 4861 Å。

(4) 改用其他放電管，求其光譜中各線之位置，而自前此步驟 (1) 至

(3)所得之結果，求得其波長，並由適當之表格，查得與此等波長相對應之物質爲何。

(5)在火焰中改置他種鹽，依步驟(4)，檢查其性質。

作圖　以望遠鏡位置 θ 爲橫坐標，(1)至(3)步驟所用各波長爲縱坐標，繪一曲線於方格紙上，以作分光儀波長與位置之對照曲線。

所得各數據可登記如下：

A.　分光儀波長 λ 與位置 θ 之對照曲線

θ	λ(Å)	θ	λ
	6563		4916
	5896		4861
	5890		4359
	5790		4348
	5770		4339
	5461		4078
	4960		4047

B.　未知放電管之光譜

θ	λ

管中氣體＝

C.　未知火焰之光譜

θ	λ

焰中物質＝

問 題

(1)試陳述稜鏡光譜與光柵光譜之異點。

(2)太陽光譜中,有多條暗線,其故何在?

附　錄

1. 游尺標度與讀法

游尺乃一副尺可滑動於一主尺之旁，其功用乃以助觀察者估計較主尺上最小刻度更小之值。尋常游尺上每 n 度所佔之距離，適等於主尺上 $(n-1)$ 度，故其最小示數爲主尺上一度之 $\frac{1}{n}$。例如圖 (0.1) 所示，主

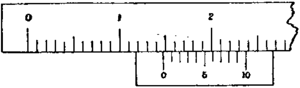

圖 0.1

尺上九度等於游尺上十度，故用此式游尺時所量得之值可準至主尺上每度之 $\frac{1}{10}$。在此圖中，游尺之 0 點，係在主尺上 1.4 及 1.5 之間，其第 7 刻度適與主尺上一刻度脗合，故 0 點之位置係在 1.47。又例如圖 (0.2)

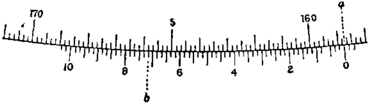

圖 0.2

所示，游尺之 0 點係在主尺上 $158\frac{4^\circ}{6}$ 與 $158\frac{5^\circ}{6}$ 之間 (a 點)，游尺上

之第 $7\frac{1}{6}$ 刻度適與主尺上一刻度脗合，故其示數爲 $158\frac{4^\circ}{6}+7\frac{1'}{6}=158^\circ40'+7'10''=158^\circ47'10''$。

2. 測微計與測微螺旋

圖(0.3)示測微計，其刻度法亦爲測微螺旋所用。用測微計時，須先

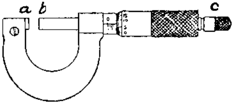

圖 0.3

旋轉之使其 ab 兩點適相接觸；爲免除旋轉之力過大或過小起見，a 與 b 兩點將接觸時，須旋轉其小柄 c。令 a 與 b 兩點接觸時之示數爲其 0 點。將欲量之物體夾於 a 與 b 之間，夾緊之時亦旋轉小柄 c，以免接觸鬆緊不當，再讀其示數。兩次示數相減，卽得所量之長。

尋常螺旋之螺距（卽轉柄或圓盤轉動一周時所進退之距離）多爲半毫米，而標度 S 之最小刻度爲 1 毫米，讀其示數時，須注意圓盤 d 之 0 點係在一毫米之前半或後半。例如圖(0.3)所示之值乃 4.572 毫米而非 4.072 毫米也。

凡用各種有測微螺旋之儀器時，均應將螺旋向一方繼續旋轉，以免螺旋與螺母間空隙不完全接觸所生之誤差。

3. 望遠鏡與標度

用望遠鏡與其標度之方法如下：

(1) 將望遠鏡向光,進退目鏡使其焦聚於叉絲。

(2) 置眼於此後使用望遠鏡時眼所應處之地位,尋求射鏡中所反射之一燈之像。必要時可移動燈與眼以使燈像之位置適在眼下。取去燈而在其處裝置標度。如標度不亮可用燈照之。

(3) 置望遠鏡於眼前,沿其上觀察鏡,並將望遠鏡對準射鏡。調節標度之高度、使沿望遠鏡身上觀察時,得在射鏡中見及標度之像。

(4) 自望遠鏡中觀察,調節望遠鏡之長以焦聚於射鏡,得此之後,再縮短望遠鏡之長以焦聚於標度,至左右改變觀察時,標度之像與叉絲毫無相對的移動爲止。

4. 氣壓計

水銀氣壓計爲量大氣壓之最常用儀器。尋常實驗室中所備者多爲 Fortin 式,其用法如下:

(1) 讀器旁之溫度計。

(2) 調節氣壓計下端之螺旋,至在器下水銀面適與一象牙尖端接觸。

(3) 旋轉在器上部旁螺旋以移動游尺至其下面適與管中水銀頂相切。自主標度及游尺讀器之示數。將所得之示數按下列方程改爲 0°C. 時之值,

$$h_0=h(1-0.000162\,t)=h-\Delta h$$

t 表溫度,h 表所讀得之水銀柱高,h_0 表溫度爲 0°C. 時之水銀柱高。爲便於應用起見,此方程所示之關係亦列於表一中。

表一 水銀氣壓計之示數改爲 0°C. 之值

說明： 因水銀之密度與玻璃管及標度均隨溫度之升降而改變，故讀水銀氣壓計時，均須將其所示之水銀柱高改爲溫度等於 0°C 時所將有之高度。若觀察値爲 h，溫度爲 t，則準確値爲 $h_0=h-\Delta h$； 本表列舉 Δh 之值。

h (毫米) / Δh (毫米) / t°C	黃銅標度							玻璃標度						
	720	730	740	750	760	770	780	720	730	740	750	760	770	780
15°	1.75	1.77	1.81	1.83	1.86	1.88	1.91	1.87	1.89	1.92	1.94	1.97	2.00	2.02
16°	1.87	1.89	1.93	1.96	1.98	2.01	2.03	1.99	2.02	2.05	2.07	2.10	2.13	2.16
17°	1.98	2.01	2.05	2.08	2.10	2.13	2.16	2.12	2.14	2.17	2.20	2.23	2.26	2.29
18°	2.10	2.13	2.17	2.20	2.23	2.26	2.29	2.24	2.27	2.30	2.33	2.36	2.39	2.43
19°	2.22	2.25	2.29	2.32	2.35	2.38	2.41	2.36	2.40	2.43	2.46	2.49	2.53	2.56
20°	2.33	2.37	2.41	2.44	2.47	2.51	2.54	2.49	2.52	2.56	2.59	2.62	2.66	2.69
21°	2.45	2.48	2.53	2.56	2.60	2.63	2.67	2.61	2.65	2.68	2.72	2.76	2.79	2.83
22°	2.57	2.60	2.65	2.69	2.72	2.76	2.79	2.74	2.78	2.81	2.85	2.89	2.92	2.96
23°	2.68	2.72	2.77	2.81	2.84	2.88	2.92	2.86	2.90	2.94	2.98	3.02	3.06	3.10
24°	2.80	2.84	2.89	2.93	2.97	3.01	3.05	2.99	3.03	3.07	3.11	3.15	3.19	3.23
25°	2.92	2.96	3.01	3.05	3.09	3.13	3.17	3.11	3.15	3.19	3.23	3.28	3.32	3.36

表二　水銀在玻璃管中因毛細管作用被壓下之高度

管之直徑(毫米)	彎月形之高度(毫米)							
	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8
4	0.83	1.22	1.54	1.98	2.37			
5	0.47	0.65	0.86	1.19	1.45	1.80		
6	0.27	0.41	0.56	0.78	0.98	1.21	1.43	
7	0.18	0.28	0.40	0.53	0.67	0.82	0.97	1.13
8		0.20	0.29	0.38	0.46	0.56	0.65	0.77
9		0.15	0.21	0.28	0.33	0.40	0.46	0.52
10			0.15	0.20	0.25	0.29	0.33	0.37
11			0.10	0.14	0.18	0.21	0.24	0.27
12			0.07	0.10	0.13	0.15	0.18	0.19

表三　水之密度(單位＝克/立方厘米)

溫　度 t°C.	密　度	溫　度 t°C.	密　度
0	0.999878	18	0.998663
1	933	19	475
2	972	20	272
3	993	21	0.998065
4	1.000000	22	0.997849
5	992	23	0.997623
6	960	24	0.997386
7	933	25	0.997140
8	882	30	0.99577
9	819	35	0.99417
10	739	40	0.99236
11	650	45	0.99035
12	544	50	0.98817
13	430	60	0.98334
14	297	70	0.97789
15	151	80	0.97190
16	0.999004	90	0.96549
17	0.998839	100	0.95856

表四　飽和水蒸汽壓(毫米水銀柱)及密度(克/立方厘米)

溫度°C.	壓力	密度
−10	2.2	2.3×10^{-6}
−8	2.5	2.7×10^{-6}
−6	2.9	3.2×10^{-6}
−4	3.4	3.7×10^{-6}
−2	3.9	4.2×10^{-6}
0	4.6	4.9×10^{-6}
2	5.3	5.6×10^{-6}
4	6.1	6.4×10^{-6}
6	7.0	7.3×10^{-6}
8	8.0	8.2×10^{-6}
10	9.1	9.3×10^{-6}
12	10.4	10.6×10^{-6}
14	11.9	12.0×10^{-3}
16	13.5	13.5×10^{-6}
18	15.3	15.2×10^{-6}
20	17.4	17.2×10^{-6}
22	19.6	19.3×10^{-3}
24	22.2	21.6×10^{-3}
26	23.5	22.9×10^{-6}
28	28.1	27.0×10^{-6}
30	31.5	30.1×10^{-6}
35	41.8	39.3×10^{-6}
40	54.9	50.9×10^{-6}
45	71.4	65.3×10^{-6}
50	92.0	83.0×10^{-6}
55	117.5	104.6×10^{-6}
60	148.8	130.7×10^{-6}
65	187.0	162.1×10^{-6}
70	233.1	199.5×10^{-6}
75	288.8	243.7×10^{-6}
76	301.1	
77	313.8	
78	327.0	
79	340.7	
80	354.9	295.9×10^{-6}

溫度°C.	壓力	密度
81	369.5	
82	384.6	
83	400.3	
84	416.5	
85	433.2	357.1×10^{-6}
86	450.5	
87	468.3	
88	486.8	
89	505.8	
90	525.4	428.4×10^{-6}
91	545.7	
92	566.7	
93	588.3	
94	610.6	
95	633.6	511.1×10^{-6}
96	657.4	
97	681.8	
98	707.1	
98.2	712.3	
98.4	717.4	
98.6	722.6	
98.8	727.9	
99	733.2	
99.2	738.5	
99.4	743.8	
99.6	749.2	
99.8	754.7	
100.0	760.0	606.2×10^{-6}
100.2	765.5	
100.4	771.0	
100.6	776.5	
100.8	782.1	
101	787.7	
102	816.0	
103	845.0	

表五　乾濕泡濕度計

說明：　本表所示者爲大氣中水蒸汽之實有壓力 p (以毫米水銀柱高計)。第一列所登載者爲乾泡溫度計所示之溫度 t°C.; 第一行所登載者爲乾泡與濕泡溫度計相差之溫度 Δt°C.。

Δt°C. / t°C. / p	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0°	4.6	3.7	2.9	2.1	1.3	0.5					
1	4.9	4.1	3.2	2.4	1.6	0.8					
2	5.3	4.4	3.6	2.7	1.9	1.1	0.3				
3	5.7	4.8	3.9	3.1	2.2	1.4	0.6				
4	6.1	5.2	4.3	3.4	2.6	1.8	0.9				
5	6.5	5.6	4.7	3.8	2.9	2.1	1.2				
6	7.0	6.0	5.1	4.2	3.3	2.4	1.6				
7	7.5	6.5	5.5	4.6	3.7	2.8	1.9	1.1	0.2		
8	8.0	7.0	6.0	5.0	4.1	3.2	2.3	1.4	0.6		
9	8.6	7.5	6.5	5.5	4.5	3.6	2.7	1.8	0.9		
10	9.2	8.1	7.0	6.0	5.0	4.0	3.1	2.2	1.3		
11	9.8	8.7	7.6	6.5	5.5	4.5	3.5	2.6	1.7		
12	10.5	9.3	8.2	7.1	6.0	5.0	4.0	3.0	2.1	1.2	0.3
13	11.2	10.0	8.8	7.6	6.6	5.5	4.5	3.5	2.5	1.6	0.6
14	12.0	10.8	9.5	8.4	7.2	6.2	5.0	4.0	3.0	2.0	1.1
15	12.8	11.5	10.2	9.1	7.9	6.7	5.5	4.5	3.5	2.5	1.5
16	13.6	12.3	11.0	9.8	8.5	7.3	6.2	5.1	4.0	3.0	2.0
17	14.5	13.1	11.8	10.5	9.2	8.1	6.8	5.7	4.6	3.6	2.5
18	15.5	14.0	12.6	11.3	10.0	8.7	7.5	6.4	5.2	4.1	3.0
19	16.5	15.0	13.5	12.1	10.8	9.4	8.2	6.9	5.8	4.6	3.5
20	17.6	16.1	14.5	13.0	11.6	10.3	8.9	7.6	6.4	5.2	4.1
21	18.7	17.1	15.5	13.9	12.5	11.1	9.7	8.5	7.2	6.0	4.8
22	19.8	18.1	16.5	14.9	13.4	12.0	10.6	9.2	7.9	6.6	5.4
23	21.1	19.3	17.6	16.0	14.4	12.9	11.5	10.1	8.7	7.4	6.1
24	22.4	20.6	18.8	17.2	15.5	14.0	12.4	11.0	9.5	8.2	6.9
25	23.8	21.9	20.1	18.3	16.6	15.0	13.4	11.9	10.4	9.1	7.7
26	25.2	23.3	21.4	19.6	17.8	16.1	14.5	13.0	11.4	9.9	8.5
27	26.8	24.8	22.8	21.0	19.0	17.3	15.6	14.0	12.4	10.9	9.4
28	28.4	26.3	24.2	22.2	20.3	18.5	16.8	15.1	13.4	11.9	10.4
29	30.1	27.9	25.7	23.7	21.7	19.8	18.0	16.3	14.6	13.0	11.4
30	31.9	29.6	27.8	25.3	23.2	21.2	19.3	17.5	15.7	14.0	12.4

表六　對數表

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	0000	0043	0086	0128	0170	0212	0253	0294	0334	0374
11	0414	0453	0492	0531	0569	0607	0645	0682	0719	0755
12	0792	0828	0864	0899	0934	0969	1004	1038	1072	1106
13	1139	1173	1206	1239	1271	1303	1335	1367	1399	1430
14	1461	1492	1523	1553	1584	1614	1644	1673	1703	1732
15	1761	1790	1818	1847	1875	1903	1931	1959	1987	2014
16	2041	2068	2095	2122	2148	2175	2201	2227	2253	2279
17	2304	2330	2355	2380	2405	2430	2455	2480	2504	2529
18	2553	2577	2601	2625	2648	2672	2695	2718	2742	2765
19	2788	2810	2833	2856	2878	2900	2923	2945	2967	2989
20	3010	3032	3054	3075	3096	3118	3139	3160	3181	3201
21	3222	3243	3263	3284	3304	3324	3345	3365	3385	3404
22	3424	3444	3464	3483	3502	3522	3541	3560	3579	3598
23	3617	3636	3655	3674	3692	3711	3729	3747	3766	3784
24	3802	3820	3838	3856	3874	3892	3909	3927	3945	3962
25	3979	3997	4014	4031	4048	4065	4082	4099	4116	4133
26	4150	4166	4183	4200	4216	4232	4249	4265	4281	4298
27	4314	4330	4346	4362	4378	4393	4409	4425	4440	4456
28	4472	4487	4502	4518	4533	4548	4564	4579	4594	4609
29	4624	4639	4654	4669	4683	4698	4713	4728	4742	4757
30	4771	4786	4800	4814	4829	4843	4857	4871	4886	4900
31	4914	4928	4942	4955	4969	4983	4997	5011	5024	5038
32	5051	5065	5079	5092	5105	5119	5132	5145	5159	5172
33	5185	5198	5211	5224	5237	5250	5263	5276	5289	5302
34	5315	5328	5340	5353	5366	5378	5391	5403	5416	5428
35	5441	5453	5465	5478	5490	5502	5514	5527	5539	5551
36	5563	5575	5587	5599	5611	5623	5635	5647	5658	5670
37	5682	5694	5705	5717	5729	5740	5752	5763	5775	5786
38	5798	5809	5821	5832	5843	5855	5866	5877	5888	5899
39	5911	5922	5933	5944	5955	5966	5977	5988	5999	6010
40	6021	6031	6012	6053	6064	6075	6085	6096	6107	6117
41	6128	6138	6149	6160	6170	6180	6191	6201	6212	6222
42	6232	6243	6253	6263	6274	6284	6294	6304	6314	6325
43	6335	6345	6355	6365	6375	6385	6395	6405	6415	6425
44	6435	6444	6454	6464	6474	6484	6493	6503	6513	6522
45	6532	6542	6551	6561	6571	6580	6590	6599	6609	6618
46	6628	6637	6646	6656	6665	6675	6684	6693	6702	6712
47	6721	6730	6739	6749	6758	6767	6776	6785	6794	6803
48	6812	6821	6830	6839	6848	6857	6866	6875	6884	6893
49	6902	6911	6920	6928	6937	6946	6955	6964	6972	6981
50	6990	6998	7007	7016	7024	7033	7042	7050	7059	7067
51	7076	7084	7093	7101	7110	7118	7126	7135	7143	7152
52	7160	7168	7177	7185	7193	7202	7210	7218	7226	7235
53	7243	7251	7259	7267	7275	7284	7292	7300	7308	7316
54	7324	7332	7340	7348	7356	7364	7372	7380	7388	7396
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

對數表(續)

N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
55	7404	7412	7419	7427	7435	7443	7451	7459	7466	7474
56	7482	7490	7497	7505	7513	7520	7528	7536	7543	7551
57	7559	7566	7574	7582	7589	7597	7604	7612	7619	7627
58	7634	7642	7649	7657	7664	7672	7679	7686	7694	7701
59	7709	7716	7723	7731	7738	7745	7752	7760	7767	7774
60	7782	7789	7796	7803	7810	7818	7825	7832	7839	7846
61	7853	7860	7868	7875	7882	7889	7896	7903	7910	7917
62	7924	7931	7938	7945	7952	7959	7966	7973	7980	7987
63	7993	8000	8007	8014	8021	8028	8035	8041	8048	8055
64	8062	8069	8075	8082	8089	8096	8102	8109	8116	8122
65	8129	8136	8142	8149	8156	8162	8169	8176	8182	8189
66	8195	8202	8209	8215	8222	8228	8235	8241	8248	8254
67	8261	8267	8274	8280	8287	8293	8299	8306	8312	8319
68	8325	8331	8338	8344	8351	8357	8363	8370	8376	8382
69	8388	8395	8401	8407	8414	8420	8426	8432	8439	8445
70	8451	8457	8463	8470	8476	8482	8488	8494	8500	8506
71	8513	8519	8525	8531	8537	8543	8549	8555	8561	8567
72	8573	8579	8585	8591	8597	8603	8609	8615	8621	8627
73	8633	8639	8645	8651	8657	8663	8669	8675	8681	8686
74	8692	8698	8704	8710	8716	8722	8727	8733	8739	8745
75	8751	8756	8762	8768	8774	8779	8785	8791	8797	8802
76	8808	8814	8820	8825	8831	8837	8842	8848	8854	8859
77	8865	8871	8876	8882	8887	8893	8899	8904	8910	8915
78	8921	8927	8932	8938	8943	8949	8954	8960	8965	8971
79	8976	8982	8987	8993	8998	9004	9009	9015	9020	9025
80	9031	9036	9042	9047	9053	9058	9063	9069	9074	9079
81	9085	9090	9096	9101	9106	9112	9117	9122	9128	9133
82	9138	9143	9149	9154	9159	9165	9170	9175	9180	9186
83	9191	9196	9201	9206	9212	9217	9222	9227	9232	9238
84	9243	9248	9253	9258	9263	9269	9274	9279	9284	9289
85	9294	9299	9304	9309	9315	9320	9325	9330	9335	9340
86	9345	9350	9355	9360	9365	9370	9375	9380	9385	9390
87	9395	9400	9405	9410	9415	9420	9425	9430	9435	9440
88	9445	9450	9455	9460	9465	9469	9474	9479	9484	9489
89	9494	9499	9504	9509	9513	9518	9523	9528	9533	9538
90	9542	9547	9552	9557	9562	9566	9571	9576	9581	9586
91	9590	9595	9600	9605	9609	9614	9619	9624	9628	9633
92	9638	9643	9647	9652	9657	9661	9666	9671	9675	9680
93	9685	9689	9694	9699	9703	9708	9713	9717	9722	9727
94	9731	9736	9741	9745	9750	9754	9759	9763	9768	9773
95	9777	9782	9786	9791	9795	9800	9805	9809	9814	9818
96	9823	9827	9832	9836	9841	9845	9850	9854	9859	9863
97	9868	9872	9877	9881	9886	9890	9894	9899	9903	9908
98	9912	9917	9921	9926	9930	9934	9939	9943	9948	9952
99	9956	9961	9965	9969	9974	9978	9983	9987	9991	9996
N	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

表七 三角函數表

°	sin	tan	cot	cos	°
0	0.0000	0.0000	∞	1.0000	90
1	0.0175	0.0175	57.2900	0.9998	89
2	0.0349	0.0349	28.6363	0.9994	88
3	0.0523	0.0524	19.0811	0.9986	87
4	0.0698	0.0699	14.3007	0.9976	86
5	0.0872	0.0875	11.4301	0.9962	85
6	0.1045	0.1051	9.5144	0.9945	84
7	0.1219	0.1228	8.1443	0.9925	83
8	0.1392	0.1405	7.1154	0.9903	82
9	0.1564	0.1584	6.3138	0.9877	81
10	0.1736	0.1763	5.6713	0.9848	80
11	0.1908	0.1944	5.1446	0.9816	79
12	0.2079	0.2126	4.7046	0.9781	78
13	0.2250	0.2309	4.3315	0.9744	77
14	0.2419	0.2493	4.0108	0.9703	76
15	0.2588	0.2679	3.7321	0.9659	75
16	0.2756	0.2867	3.4874	0.9613	74
17	0.2924	0.3057	3.2709	0.9563	73
18	0.3090	0.3249	3.0777	0.9511	72
19	0.3256	0.3443	2.9042	0.9455	71
20	0.3420	0.3640	2.7475	0.9397	70
21	0.3584	0.3839	2.6051	0.9336	69
22	0.3746	0.4040	2.4751	0.9272	68
23	0.3907	0.4245	2.3559	0.9205	67
24	0.4067	0.4452	2.2460	0.9135	66
25	0.4226	0.4663	2.1445	0.9063	65
26	0.4384	0.4877	2.0503	0.8988	64
27	0.4540	0.5095	1.9626	0.8910	63
28	0.4695	0.5317	1.8807	0.8829	62
29	0.4848	0.5543	1.8040	0.8746	61
30	0.5000	0.5774	1.7321	0.8660	60
31	0.5150	0.6009	1.6643	0.8572	59
32	0.5299	0.6249	1.6003	0.8480	58
33	0.5446	0.6494	1.5399	0.8387	57
34	0.5592	0.6745	1.4826	0.8290	56
35	0.5736	0.7002	1.4281	0.8192	55
36	0.5878	0.7265	1.3764	0.8090	54
37	0.6018	0.7536	1.3270	0.7986	53
38	0.6157	0.7813	1.2799	0.7880	52
39	0.6293	0.8098	1.2349	0.7771	51
40	0.6428	0.8391	1.1918	0.7660	50
41	0.6561	0.8693	1.1504	0.7547	49
42	0.6691	0.9004	1.1106	0.7431	48
43	0.6820	0.9325	1.0724	0.7314	47
44	0.6947	0.9657	1.0355	0.7193	46
45	0.7071	1.0000	1.0000	0.7071	45
°	cos	cot	tan	sin	°