Halliday · Resnick

Physics

物理學

第二冊

譯者

王唯農

王明建 蔡正治

東華書局印行

物理學

第 二 册

著 者

雷 士 勒 霍 立 德

譯 者

王唯農

王明建 蔡正治

東華書局印行

中華民國五十五年十二月初版
中華民國六十八年 三月十版

大學用書 物理學

第二冊 定價 新臺幣六十元整
（外埠酌加運費滙費）

原著者 雷士勒 霍立德
譯者 王唯農 王明建 蔡正治

發行人 卓鑫淼
出版者 臺灣東華書局股份有限公司
臺北市博愛路一〇五號
電話：3819470 郵撥：6481
印刷者 中臺印刷廠
臺中市公園路三十七號
封面設計 江泰馨設計有限公司
臺北市合江街 102 巷 1 號 4 樓

行政院新聞局登記證 局版臺業字第零柒貳伍號
（56001）

物理常數

（參閱附錄A之附表，該表較完整）

光速	c	3.00×10^{8} 米/秒 $=1.86\times10^{5}$ 哩/秒
質量能量關係	$c^2(=E/m)$	931 Mev/amu $=8.99\times10^{16}$ 焦耳/仟克
重力常數	G	6.67×10^{-11} 牛頓米^2/仟克^2
普遍氣體常數	R	8.31 焦耳/摩爾 °K $=1.99$ 卡/摩爾 °K $=0.0823$ 升 atm/摩爾 °K
水的三相點	T_{tr}	273.16 °K
導磁常數	μ_0	1.26×10^{-6} 亨利/米
容電常數	ε_0	8.85×10^{-12} 法拉/米
亞佛加德羅常數	N_0	6.02×10^{23} 分子/摩爾
波爾茲曼常數	k	1.38×10^{-23} 焦耳/分子 °K
蒲朗克常數	h	6.63×10^{-34} 焦耳秒
基本電荷	e	1.60×10^{-19} 庫侖
電子靜止質量	m_e	9.11×10^{-31} 仟克
電子荷質比	e/m_e	1.76×10^{11} 庫侖/仟克
質子靜止質量	m_p	1.67×10^{-27} 仟克
電子磁矩	μ_e	9.27×10^{-24} 焦耳/tesla

物理性質

空氣密度(STP)	1.29 仟克/米^3
水密度(20°C)	1.00×10^3 仟克/米^3
水銀密度(20°C)	13.6×10^3 仟克/米^3
乾燥空氣(STP)中之聲速	331 米/秒＝1090 呎/秒
重力加速度(標準)	9.81 米/秒^2＝32.2 呎/秒^2
標準大氣壓力	1.01×10^5 牛頓/米^2＝14.7 磅/吋^2
	＝760 毫米水銀柱
地球平均半徑	6.37×10^6 米 ＝3960 哩
地球-太陽平均距離	1.49×10^8 仟米＝92.9×10^6 哩
地球-月球平均距離	3.80×10^5 仟米＝2.39×10^5 哩
地球質量	5.98×10^{24} 仟克
水的熔解熱(0°C, 1 atm)	79.7 卡/克
水的汽化熱(100°C, 1 atm)	539 卡/克
冰的熔點	0.00°C＝273.15°K
空氣(20°C)之比熱比(γ)	1.40
鈉光黃色雙線的波長	5892 A
水的折射率(@ 5892 A)	1.33
冕牌玻璃的折射率(@ 5892 A)	1.52

原書上册序

本書根據 Physics for Students of Science and Engineering (1960)一書之上册，在過去六年於大學中之教學經驗修訂而成。雖然改變極多，但該書之根本綱要及其基礎哲理仍未改變。對下册將涉及之相對論和量子物理學，增以大量之準備材料，以助其順利處理；同時在古典方面，編排更堅強之基礎。

循此方針之若干主要改變是：全書更强調参考坐標系在物理量度和理論中的重要；改良牛頓定律和力定律的處理，著重現代的見解；更清楚的分析慣性和非慣性系的概念，及有助於確定觀念之特殊應用；極注意巨觀現象的微觀模型，從摩擦和碰撞現象至比熱、熱膨脹和起伏現象；出現於各種物理系統中之位能觀念，有極清晰的提示；在轉動系統中角動量具更重要之地位，並推廣至不對稱物體和運動軸系；稍較普遍之振盪的論述，包含二體振盪和折合質量觀念及非諧振盪；在古典物理學中變質量系統的正確處理方法；包含在“古典”領域中自然發生之量子觀念；及更重視熱動過程的統計說法和近代觀點。

第二章介紹單位向量，且之後卽用以簡化公式之推導，或對物理現象以更清楚，更具幾何形像，或更佳分析的討論。本書用更多附表以摘錄和展示觀念、方程式及物理數據，並便於比照。特殊或高深的論題列入可隨意選授之節內，仍用小字刊印，且在新編之補遺内包括若干更特殊或高深的材料。在適當之處，曾將甚多題材有系統之予以近代化——諸如標準和單位，名稱和符號，參考資料和附錄等。圖形均已仔細重新設計以提高教學之效，使其一致，及說明對當代物理學之大量應用。

在 Physics for Students of Science and Engineering 書中之例題大多數仍予留用，且予適當之變更和改進。並已增添甚多新例題，藉在重要之處提高興趣和了解，均係教學經驗認為需要者。原有習題和問題約保留百分之 85，新增問題和習題約逾一半。此等大量問題和習題，使艱難程度和興趣及應用範圍有廣泛之選擇。本書篇幅之增加

全由於附屬材料所致——問題、習題、例題、表、附錄和圖形——深信有益於教師和讀者。

數年來許多教師和讀者對1960版曾予建設性批評，特別是 Kenneth Brownstein, Benjamin Chi, Ben Josephson, Jr., James C. Kemp, H. E. Rorschach, Jr., 及 Robert Weinstock 諸君，曾多方賜予卓見和協助，謹致謝忱。當在哈佛大學撰編此書時，Gerald Holton 教授多有慨助，雷士勒衷心銘感。深盼我等之努力對讀者和教師更有助益。

1966年元月

雷 士 勒
霍 立 德

譯本序

在 1960 年霍立德與雷士勒合著之 Physics for Students of Science and Engineering 問世，1962 年將下册予以修正，發行以來，已被普遍採用。本年又將上册大量修改，並更名為 Physics；全書對物理學之基本觀念，古典力學的適用範圍，及近代物理學的基本概念，均予深入闡釋及討論。數學方面全部用向量和微積分，程度大為提高。最近二十年來，物理學發展之範圍甚廣，進步亦大，本書取材新穎，立論精闢，頗能適合近年教學之需。國外著名大學如哈佛，麻省理工等校均採用此書。為便利國內學生易於閱讀並能徹底了解起見，故予譯述。

全書譯文，盡量接近原文字義，流暢通順為原則；但在艱澀之處，則以淺近之中文句法表達，而不失物理意義為主。所有名詞翻譯，以教育部公布之物理學名詞為準，其原文字義變更，及新生名詞未及列入者，均按其物理意義，予以訂定，務使文意相符，簡明劃一為原則。書內對甚多高深論題，歷史敘述及哲理解說，均以小字排印，屬於選用教材，可酌情決定取捨。

本書譯校，以時間短促，疏漏之處難免，尚祈教師及讀者諸君隨時指正，俾於再版時修訂，至深感荷。

王唯農　王明建　蔡正治　謹識

五十五年十一月於國立清華大學

物　理　學

第　二　册　目　次

第十四章

剛體平衡

14-1 剛　體

在橋身重量和車輛負荷下，吊橋的支柱必須十分堅固，以免倒塌；當駕駛員作拙劣着陸時，飛機的起落架不致損毀；切堅韌的牛排時，叉尖不應彎曲。於上述諸例中，工程師所關心的是這些假想之剛體結構，在受外力及相關之轉矩作用時，仍能保持堅固。

在這些問題中，工程師要問兩個問題：(1) 作用於此假想剛體之力及轉矩爲何？(2) 在這些力和轉矩的作用下，用此材料如此設計成的物體，是否仍然剛強？本章僅討論前一問題；工科學生將在以後的課程中詳細研究後者。

14-2 剛體的平衡

前節所述的假想剛體(即橋柱、起落架和叉)均處於**力學平衡狀態**。所謂在**力學平衡狀態**之剛體，乃係在一慣性參考系中觀之，若(1)其質心的線加速度 $\mathbf{a}_{cm}$ 爲零，(2)對該參考系中之任何固定軸，其角加速度 α 爲零。

上述定義不需物體對觀察者爲靜止，僅需物體未被加速，例如其質量中心可以等速度 $\mathbf{v}_{cm}$ 運動，並且物體可以等角速度 ω 繞固定軸轉動。若物體確係靜止(故 $\mathbf{v}_{cm}=0$ 和 $\omega=0$)，常稱之爲**靜態平衡**。但無論平衡是否爲靜態，加於力和轉矩之限制相同。非靜態平衡問題，均可由選擇適當之新參考系，而將之變換爲靜態平衡。

質量 M 之剛體的平移運動由式 9–10 決定；

$$\mathbf{F}_{ext}=M\,\mathbf{a}_{cm},$$

$\mathbf{F}_{ext}$ 爲所有作用於物體之外力的向量和。因平衡時 $\mathbf{a}_{cm}$ 應爲零，故平衡(靜態或非靜態)的第一條件是：**作用於平衡物體所有外力之向量和必爲零。**

條件(1)可寫爲

$$\mathbf{F}=\mathbf{F}_1+\mathbf{F}_2+\cdots=0, \qquad (14\text{–}1)$$

爲簡便計，已將 $\mathbf{F}_{ext}$ 之下誌略去。此向量方程式可導致三純量式：

$$F_x=F_{1x}+F_{2x}+\cdots=0,$$
$$F_y=F_{1y}+F_{2y}+\cdots=0, \quad (14\text{-}2)$$
$$F_z=F_{1z}+F_{2z}+\cdots=0,$$

即沿任何三個相互垂直方向中的每一方向，各力之分量的和爲零。

平衡的第二要求是對任何軸之 $\boldsymbol{\alpha}=0$。因剛體的角加速度與轉矩有關——記住對固定軸 $\boldsymbol{\tau}=I\boldsymbol{\alpha}$——平衡（靜態或非靜態）的第二條件可述之爲：**作用於平衡物體之所有外轉矩的向量和必爲零。**

條件(2)可寫爲：

$$\boldsymbol{\tau}=\boldsymbol{\tau}_1+\boldsymbol{\tau}_2+\cdots=0. \quad (14\text{-}3)$$

此向量方程式亦可導致三純量方程式：

$$\tau_x=\tau_{1x}+\tau_{2x}+\cdots=0,$$
$$\tau_y=\tau_{1y}+\tau_{2y}+\cdots=0, \quad (14\text{-}4)$$
$$\tau_z=\tau_{1z}+\tau_{2z}+\cdots=0,$$

即平衡時，作用於物體各轉矩沿任何三個相互垂直方向的任一方向之轉矩分量的和爲零。

式 14-3 中之合轉矩 $\boldsymbol{\tau}$，係對一特定原點 O 而定義，在力學平衡時必爲零。式 14-4 中的 τ_x、τ_y 和 τ_z 等量則爲 $\boldsymbol{\tau}$ 的純量分量，並適用於以 O 爲原點之任意三相互垂直軸；不論諸軸在空間的方位爲何。此結果乃基於：一向量若爲零，則不論如何取參考坐標軸之方向，其純量分量必爲零。讀者也許懷疑是否與原點之選擇有關？答案——將證明於下——是並非如此，因爲（對移動平衡之物體）若對任何原點 O 之 $\boldsymbol{\tau}=0$，其對該參考系中任何其他原點之 $\boldsymbol{\tau}$ 亦爲零。本段之主旨是：對移動平衡的物體，若能證明(*a*)對任一點之 $\boldsymbol{\tau}=0$（式 14-3），或(*b*)沿任何三相互垂直方向之轉矩分量均爲零（式 14-4），則已滿足第二條件。

假定有一平移平衡之剛體，則 $\mathbf{F}=\mathbf{F}_1+\mathbf{F}_2+\cdots=0$(式 14-1)。若對一特定點（如圖 14-1 之 O 點）之轉矩爲零，欲證其對任何點(如圖 14-1 之 P 點)之轉矩亦爲零。圖中繪出 n 個力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2 \cdots \mathbf{F}_n$ 中之三力，加於剛體上之不同點，並在不同方向。施力點對 O 點的位置，以位移向量鑑別之，如 $\mathbf{r}_1$ 即爲一例。任意點 P 由位移向量 $\mathbf{r}_p$ 決定；$\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_p$ 則表 $\mathbf{F}_1$ 之施力點對 P 點的位置。

對 O 點的合轉矩可寫爲（見式 12-1）

$$\boldsymbol{\tau}_0=\mathbf{r}_1\times\mathbf{F}_1+\mathbf{r}_2\times\mathbf{F}_2+\cdots+\mathbf{r}_n\times\mathbf{F}_n,$$

對 P 點的合轉矩爲

$$\boldsymbol{\tau}_p=(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_p)\times\mathbf{F}_1+(\mathbf{r}_2-\mathbf{r}_p)\times\mathbf{F}_2+\cdots+(\mathbf{r}_n-\mathbf{r}_p)\times\mathbf{F}_n.$$

展開後式如

$$\boldsymbol{\tau}_p=[\mathbf{r}_1\times\mathbf{F}_1+\mathbf{r}_2\times\mathbf{F}_2+\cdots+\mathbf{r}_n\times\mathbf{F}_n]-[\mathbf{r}_p\times(\mathbf{F}_1+\mathbf{F}_2+\cdots+\mathbf{F}_n)]。$$

若此物體滿足平衡第一條件，則 $\mathbf{F}_1+\mathbf{F}_2+\cdots+\mathbf{F}_n=0$，故上式在第二中括號內之項爲零。第一中括號內之項就是 $\boldsymbol{\tau}_o$，故在上述條件下：

$$\boldsymbol{\tau}_p=\boldsymbol{\tau}_o.$$

因此一平移平衡之物體，若 $\boldsymbol{\tau}_o=0$，則 $\boldsymbol{\tau}_p=0$，P 是任意點。

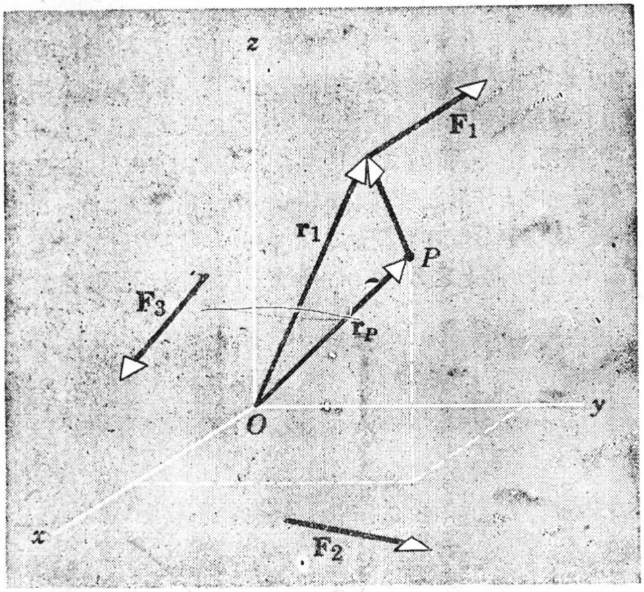

圖 14-1 圖示作用於剛體上 n 個力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_3\cdots\mathbf{F}_n$ 中的三力，剛體未繪出。文中證明若此物體是平移平衡，但對 O 點而言 $\boldsymbol{\tau}=0$，則對任何點 P 之轉矩亦爲零。

因此，作用於一平衡物體的諸力間，有**六個獨立條件**，這些條件即式 14–2 及 14–4 中之六個代數關係式。這六個條件是剛體的六個自由度，即平移和轉動各爲三自由度。

時常處理所有力均在一平面內之問題，則各力間僅有三個條件：在平面內任意二相互垂直方向的任一方向，諸力的分量和應爲零，以及對任一垂直於此平面之軸的諸轉矩的和應爲零。此等條件相當於平面運動之三個自由度，即兩個平移自由度和一個轉動自由度。

爲簡化計算起見，此後的討論將大部分限於平面上的問題。這並未予普遍原理以任何基本限制。又爲方便計，僅考慮靜態平衡，即物體實係靜止的情形。

14-3 重　心

在剛體運動中所討論的力，有一種是重力。事實上，對有體形的物體而言，重力並非只是一力，而是極多力的合力，物體中各質點均受重力作用。若想像將質量爲 M 的物體，分成 n 個質點，質量爲 m_i 的第 i 個質點所受地球的重力爲 $m_i\mathbf{g}$，此力朝下正向地心。若在一區域内各處之重力加速度 $\mathbf{g}$ 相同，則稱均勻重力場存在於該區域；亦即在該區域内，各處 $\mathbf{g}$ 之方向和大小均相同。在均勻重力場中的剛體，體内每一質點的 $\mathbf{g}$ 均相同，質點的重量力必彼此平行。在地球重力場是均勻的假設下，能證明所有作用於物體的各重量力，可由作用於該物體質心向下的單獨力 $M\mathbf{g}$ 代替。這就等於證明，由各個向下之重量力所引起的加速作用，倘若力 $\mathbf{F}$ 加於物體的質量中心，可被一向上作用之單獨力 $\mathbf{F}(=-M\mathbf{g})$ 所抵消。

圖 14-2 陳示剛體被分成 n 個質量基素，選出兩個代表質量或質量基素 m_1 和 m_2，在某一點 O 加一向上之力 $\mathbf{F}(=-M\mathbf{g})$。現在證明該物體爲力學平衡的必

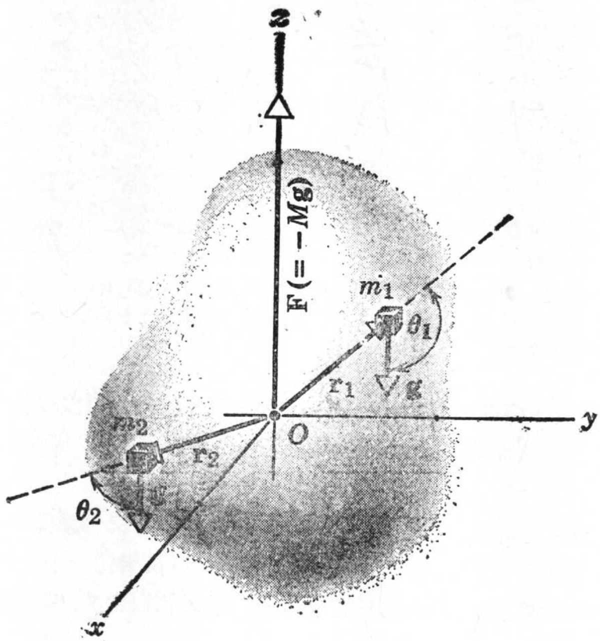

圖 14-2　不規則物體被分爲 n 個質量基素，圖示其中二代表基素 m_1 和 m_2。文中證明由加在質心向上的力 $\mathbf{F}(=-M\mathbf{g})$，能使物體保持平移和轉動平衡。

要(且爲充分)條件是O點爲質心。由所選$\mathbf{F}$的大小和方向,平衡的第一條件(式14-1)已能滿足,即

$$\mathbf{F}+m_1\mathbf{g}+m_2\mathbf{g}+\cdots+m_n\mathbf{g}=0,$$

或
$$\mathbf{F}=-(m_1+m_2+\cdots+m_n)\mathbf{g}=-M\mathbf{g},$$

符合上述之假設。

尙須證明物體對任一O點$\boldsymbol{\tau}=0$,這是平衡之第二條件。由於選擇O爲原點,$\mathbf{F}$對此點的轉矩爲零,因$\mathbf{F}$對此點的力矩臂爲零。加於各質量基素上的重力,對O點之轉矩爲

$$\boldsymbol{\tau}=\mathbf{r}_1\times m_1\mathbf{g}+\mathbf{r}_2\times m_2\mathbf{g}+\cdots+\mathbf{r}_n\times m_n\mathbf{g}.$$

因m_1, m_2等是純量,上式可寫爲

$$\boldsymbol{\tau}=m_1\mathbf{r}_1\times\mathbf{g}+m_2\mathbf{r}_2\times\mathbf{g}+\cdots+m_n\mathbf{r}_n\times\mathbf{g}.$$

將各項之相同因子$\mathbf{g}$提出,得

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\tau}&=(m_1\mathbf{r}_1+m_2\mathbf{r}_2+\cdots+m_n\mathbf{r}_n)\times\mathbf{g}\\&=(\sum_1^n m_i\mathbf{r}_i)\times\mathbf{g},\end{aligned}$$

式中係對所有組成該物體的質量基素取其和。

由質心的定義(見式9-5b及其後之討論)可知;若O點爲物體的質心,上式之和爲零。故得結論爲:若O點爲質心(且僅有在此情形下),則$\boldsymbol{\tau}=0$,而滿足力學平衡的第二條件。

因此,作用於剛體之各質量基素的重力,相當於單獨力Mg所有之平移和轉動作用,Mg爲物體的總重量,作用於質心。若將連續之物體分成無窮多之質點,可得相同之結果。讀者應能用積分學的方法證明之(見9-1節)。諸重力之合力的施力點,常稱爲**重心**。

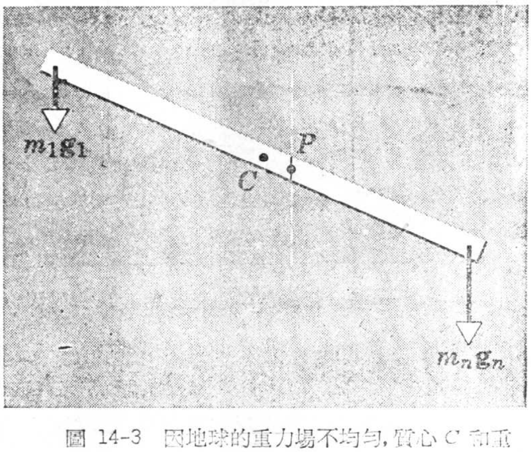

圖 14-3 因地球的重力場不均匀,質心C和重心P實不重合。

重心和質心之能重合,歸因於地球重力場爲均匀的假設。事實上,此假設並非絕對正確,因g的大小隨距地心之距離而改變,且$\mathbf{g}$的方向恆沿徑向地心(第十六章)。爲了解重力的作用,考

究一長達數哩之均勻木棒，斜置於地球重力場中，如圖 14-3，物體的重心，是相當之合成重力作用之點。如加一反方向之單獨力卽使物體平衡，其施力點必爲此點。若爲均勻之場，則在質心上施以大小爲 Mg 向上的單獨力，卽可使棒平衡。但場非均勻時，m_1 處之 g 值小於 m_n 處之 g 值。因此，如欲用單獨之力卽使棒平衡，其施力點必在質心以下之某點 P。再者，當棒的方向改變時，平衡力之施力點 P 的位置亦隨之改變。故在此情形下，重心實少用處。不僅未能與質心重合，且其位置亦隨物體運動而改變。

因幾乎所有力學問題中所涉及之物體的大小，均遠較 g 將發生顯著改變的距離爲小，故可假設作用於物體之 g 爲均勻者，則重心與質心可當作在相同之點。事實上利用二者之重合，可由實驗求得不規則形狀物體之質心。圖 14-4 所示爲定一不規則形狀薄板的質心位置卽爲一例。物體以絃自邊上某點 A 處懸之，俟其靜止時，重心的位置，必在支點下，位於直線 Aa 上某處，因只有在此情形時，由絃的張力和物體重量所生轉矩之和方爲零。再將物體懸於其邊上另一點 B，同理，重心之位置須在 Bb 上某處。Aa 與 Bb 兩線僅有的共同點爲其交點 O，故此點必爲重心。若再將此物體懸於其邊上其他任何點 C，垂線 Cc 將通過 O 點。因曾假設爲均勻重力場，質心與重心相重合，故質心亦位於 O。

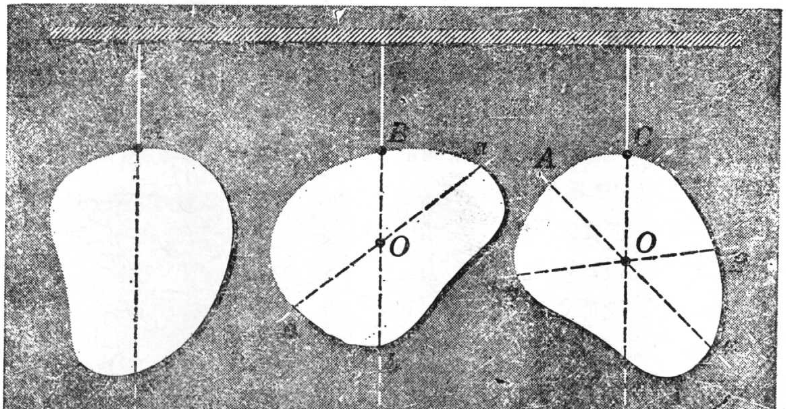

圖 14-4　因質心 O 恆在懸點正下方，懸平板於兩不同之點可決定 O

14-4　平衡的實例

甚多方法可以闡明及簡化應用平衡條件（合力爲零及對任何軸之合轉矩爲零）之步驟。