

科技用書

# 化工熱力學

INTRODUCTION TO  
*Chemical Engineering Thermodynamics*

J.M. SMITH / H.C. VAN NESS

古維煜 編譯

大行出版社印行

科技用書

# 化工熱力學

INTRODUCTION TO

*Chemical Engineering Thermodynamics*

J.M. SMITH / H.C. VAN NESS



大行出版社印行

# 序 言

本書係以 J.M. SMITH 和 H.C. VAN NESS 合著之  
“INTRODUCTION TO Chemical Engineering  
Thermodynamics” 為主，及參考一些其他資料編纂而成。

應用於工程上的熱力學，其原理皆相同，然而這些原理經常是很抽象的，因此在教授這些原理時，除非能將學生引入工程方面的興趣，否則不易收到立竿見影的功效，而原書即具有這種特質。原書的主旨，乃以化學工程的觀點，討論一些熱力學的問題。很實用，尤其是例題的解析極為詳盡，一般學生都很樂於接納。

熱力學的變數很多，關係複雜，但因原書講求實用，難免有無法兼顧之嫌。因此筆者在編纂本書時，亦酌情加入，並將熱力學所常用之基本數學，簡列於附錄 A，讀者不妨隨時參考之。第二章和第六章為熱力學的兩個基本定律，第一定律較易懂，第二定律則較抽象；原書對於熱力學為何有了第一定律，還要建立第二定律，交代不甚清晰，本書在第六章的開場白中，即說明其理由，以引起動機。此外，對於熵（*Entropy*）之來源和性質，也以較廣之篇幅敘述之，在使讀者有明晰的基本觀念，然後方可談論其應用。

爲了區別及強調狀態函數和非狀態函數的觀念，本書自始至終都分別以  $d$  表示正則微分，改用  $D$  表示非正則微分，以便隨時提醒讀者。此外讀者諸君對於  $Q$  和  $W$  之正負值似應特加留意（尤其是在討論熱機時），本書爲了統一起見，除了第十章的冷凍工程外，所規定皆同，此點與原書稍有出入。

本書中所用之符號極為繁多，易於混淆，且可能與其他書籍所使用者不同，例如以  $V$  表示物質之總容積，以  $v$  表示莫耳容積或比容，但所有壓力皆以小寫之  $p$  表示，讀者在閱讀時，請隨時對照目錄後之

符號表。本書內專有名詞之翻譯，大多以新陸書局所印行之“化學化工大辭典”為準，以便於查詢。

本書可作為一般大學化工系，二專，及五專學生之教本或參考書，及工廠技術人員在職進修之用。全書可供作兩學期的課程，亦可省略後半部一些應用的章節，而作為一個學期的教本。

筆者才疏學淺，編譯時雖以縝密認真之態度從事，誤漏之處尚多，敬祈先進學者惠予指正，實所至盼。

**編者謹識**

中華民國六十三年七月

## 符 號 表

## 英文字母

|                  |                             |
|------------------|-----------------------------|
| $A$              | 面積                          |
| $A$              | 功函數或Helmholtz自由能 $= E - TS$ |
| $A$              | 阿瑪加特壓縮因數                    |
| $a$              | 加速度                         |
| $a$              | 活度                          |
| $C$              | 成分數                         |
| $C_p$            | 等壓莫耳熱容量                     |
| $C_v$            | 等容莫耳熱容量                     |
| $c_p$            | 等壓之比熱 (每單位質量之等壓熱容量)         |
| $c_v$            | 等容之比熱 (每單位質量之等容熱容量)         |
| $D$              | 直徑                          |
| $D$              | 非正則微分                       |
| $d$              | 正則微分                        |
| $E$              | 內能                          |
| $F$              | 力                           |
| $F$              | 自由能, 或Gibbs自由能 $= H - TS$   |
| $\bar{F}_i$      | 成分 $i$ 在溶液中之部份自由能           |
| $\Delta F^\circ$ | 化學反應之標準自由能變化量               |
| $f$              | 純物質之逸壓                      |
| $\bar{f}_i$      | 成分 $i$ 在溶液中之逸壓              |
| $G$              | 一般之熱力學狀態函數                  |
| $g$              | 該地區之重力加速度                   |

|                    |                                                        |
|--------------------|--------------------------------------------------------|
| $g_c$              | 因次常數，其值爲 $32.1740 \text{ (lbm/lbf) (ft/sec}^2\text{)}$ |
| $H$                | 焓 $= E + pV$                                           |
| $\bar{h}_i$        | 成分 $i$ 在溶液中之部份焓                                        |
| $\Delta H^\circ$   | 標準化學反應熱                                                |
| $\Delta H_f^\circ$ | 標準生成熱                                                  |
| $\Delta H_c^\circ$ | 標準燃燒熱                                                  |
| $K$                | 相平衡常數                                                  |
| $K_c, K_p$ 等       | 化學反應平衡常數                                               |
| $L$                | 長度                                                     |
| $M$                | 分子量                                                    |
| $m$                | 質量                                                     |
| $n$                | 莫耳數                                                    |
| $P$                | 相數                                                     |
| $p$                | 壓力                                                     |
| $p_c$              | 臨界壓力                                                   |
| $p_r$              | 對比壓力                                                   |
| $p_i$              | 氣體溶液中，成分 $i$ 之純成分壓力                                    |
| $\bar{p}_i$        | 氣體溶液中，成分 $i$ 之分壓力， $\bar{p}_i = y_i p$                 |
| $p'$               | 蒸氣壓                                                    |
| $Q$                | 熱                                                      |
| $Q_p$              | 等壓過程之熱                                                 |
| $Q_v$              | 等容過程之熱                                                 |
| $R$                | 氣體常數                                                   |
| $S$                | 熵                                                      |
| $s$                | 距離                                                     |
| $T$                | 絕對溫度， $^\circ K$ 或 $^\circ R$                          |
| $T_c$              | 絕對臨界溫度                                                 |

|             |                           |
|-------------|---------------------------|
| $T_r$       | 對比溫度                      |
| $T_o$       | 外界之絕對溫度                   |
| $t$         | 溫度, °C 或 °F               |
| $u$         | 速度                        |
| $V$         | 變度或自由度                    |
| $V$         | 總容積                       |
| $V_i$       | 氣體溶液中, 成分 $i$ 之純成分容積      |
| $\bar{v}_i$ | 成分 $i$ 在溶液中之部份容積          |
| $v$         | 莫耳容積或比容                   |
| $v_c$       | 臨界容積                      |
| $W$         | 功                         |
| $W_s$       | 流動過程之軸功                   |
| $x_i$       | 成分 $i$ 在溶液中之莫耳分數, 尤其是指液相  |
| $y_i$       | 成分 $i$ 在氣相之莫耳分數           |
| $z$         | 在基準面上之高度                  |
| $Z$         | 壓縮因數 = $p v / RT$         |
| $Z_c$       | 臨界壓縮因數 = $p_c v_c / RT_c$ |

### 希臘字母

|                         |                                                |
|-------------------------|------------------------------------------------|
| $\alpha$                | 剩餘容積 = $RT/p - v$                              |
| $\alpha, \beta, \gamma$ | 在公式 $C_p = \alpha + \beta T + \gamma T^2$ 中之常數 |
| $\gamma$                | 氣體之莫耳熱容量之比值 = $C_p/C_v$                        |
| $\gamma$                | 活度係數 = $\bar{f}_i/x_i f_i$                     |
| $\delta$                | 在公式 $p v^\delta = \text{常數}$ , 中之常數            |
| $\Delta$                | 表示有限量變化; 即最終之值減去最初之值                           |
| $\eta$                  | 焦耳一湯姆遜係數                                       |
| $\eta_r$                | 需功過程之熱力學效率                                     |
| $\eta_P$                | 產功過程之熱力學效率                                     |

#### 4 符 號 表

---

$\mu$  化勢 =  $\bar{F}_i$

$\mu$  黏度

$\rho$  密度

$\phi$  逸壓係數 =  $f/p$  , 或  $\bar{f}_i/x_i p$

#### 注 意

1. ° 在右上角之符號表示標準狀態
2. \* 在右上角之符號表示零壓狀態或在任何壓力之理想氣體狀態。
3. 若要指明任何廣延性質（除了容積以外）之總值，則在記號下面加一條槓，例如， $\underline{H}$ ， $\underline{S}$ ，等。



## 化工熱力學

## 目 錄

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 第一章 緒 論 .....                                                          | 1  |
| § 1 - 1 熱力學之範圍 ( The Scope of Thermodynamics ) .....                   | 1  |
| § 1 - 2 基本量 ( Fundamental Quantities ) .....                           | 2  |
| § 1 - 3 時 間 ( Time ) .....                                             | 2  |
| § 1 - 4 距 離 ( Distance ) .....                                         | 2  |
| § 1 - 5 質 量 ( Mass ) .....                                             | 2  |
| § 1 - 6 力 ( Force ) .....                                              | 3  |
| § 1 - 7 溫 度 ( Temperature ) .....                                      | 5  |
| § 1 - 8 次級量 ( Secondary Quantities ) .....                             | 9  |
| § 1 - 9 容 積 ( Volume ) .....                                           | 9  |
| § 1 - 10 壓 力 ( Pressure ) .....                                        | 10 |
| § 1 - 11 功 ( Wook ) .....                                              | 13 |
| § 1 - 12 能 量 ( Energy ) .....                                          | 14 |
| § 1 - 13 熱 ( Heat ) .....                                              | 17 |
| § 1 - 14 一些名詞之定義 .....                                                 | 18 |
| 習 題 一 .....                                                            | 20 |
| 第二章 熱力學第一定律及其他基本概念 ( The First Law and<br>Other Basic Concepts ) ..... | 22 |
| § 2 - 1 焦耳熱功實驗 ( Joule's Experiments of Work<br>and Heat ) .....       | 22 |
| § 2 - 2 內 能 ( Internal Energy ) .....                                  | 22 |
| § 2 - 3 熱力學第一定律 ( The First Law of<br>Thermodynamics ) .....           | 23 |

## 2 目 錄

|          |                                                                       |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| § 2 - 4  | 定質量密閉系統 ( The Constant Mass and Close Systems )                       | 24 |
| § 2 - 5  | 熱力學之狀態及狀態函數 ( The Thermodynamic State and State Functions )           | 27 |
| § 2 - 6  | 焓 ( Enthalpy )                                                        | 28 |
| § 2 - 7  | Q與 $\Delta H$ 間之關係                                                    | 30 |
| § 2 - 8  | 熱容量 ( Heat Capacity )                                                 | 31 |
| § 2 - 9  | $C_p$ 與 $C_v$ 間之關係                                                    | 33 |
| § 2 - 10 | 穩定流動過程 ( The Steady-State Flow Process )                              | 35 |
| § 2 - 11 | 相 律 ( Phase rule )                                                    | 39 |
|          | 習 題 二                                                                 | 45 |
| 第三章      | 理想氣體 ( The Ideal Gas )                                                | 47 |
| § 3 - 1  | 理想氣體定律 ( The ideal gas law )                                          | 47 |
| § 3 - 2  | 等容過程 ( The Constant-volume, or Isometric, Process )                   | 51 |
| § 3 - 3  | 等壓過程 ( The Constant-pressure, or Isobaric, Process )                  | 52 |
| § 3 - 4  | 等溫過程 ( The Constant-temperature, or Isothermal, Process )             | 53 |
| § 3 - 5  | 絕熱過程 ( The Adiabatic Process )                                        | 54 |
| § 3 - 6  | 多變過程 ( The Polytropic Process )                                       | 57 |
|          | 習 題 三                                                                 | 63 |
| 第四章      | 流體之壓力 — 容積 — 溫度關係 ( Pressure-volume-temperature Relations of Fluids ) | 66 |
| § 4 - 1  | 純物質之 $p-v-T$ 行爲 ( The $p-v-T$ Behavior of Pure Substances )           | 67 |

|         |                                                                                              |     |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 4 - 2 | 氣體之狀態方程式 ( Equations of State of Gases ) .....                                               | 69  |
| § 4 - 3 | 氣體之壓縮因數及對應狀態原理 ( The Compressibility Factor and The Principle of Corresponding State ) ..... | 74  |
| § 4 - 4 | 壓縮數據之實驗值 ( The Experimental Compressibility data ) .....                                     | 80  |
| § 4 - 5 | 混合氣體 ( Gas Mixtures ) .....                                                                  | 86  |
| § 4 - 6 | 液體之行爲 ( The Behavior of Liquids ) .....                                                      | 98  |
|         | 習 題 四 .....                                                                                  | 100 |
| 第五章     | 熱效應 ( Heat Effects ) .....                                                                   | 103 |
| § 5 - 1 | 氣體之熱容量對溫度之變化 ( Heat Capacities of Gases as a Function of Temperature ) .....                 | 103 |
| § 5 - 2 | 液體及固體之比熱 ( Specific Heats of Liquids and Solids ) .....                                      | 114 |
| § 5 - 3 | 因相變化所伴生之熱效應 ( Heat Effects Accompanying Phase Changes ) .....                                | 117 |
| § 5 - 4 | 標準反應熱 ( The Standard Heat of Reaction ) .....                                                | 122 |
| § 5 - 5 | 標準生成熱 ( The Standard Heat of Formation ) .....                                               | 123 |
| § 5 - 6 | 標準燃燒熱 ( The Standard Heat of Combustion ) .....                                              | 128 |
| § 5 - 7 | 溫度對標準反應熱之影響 .....                                                                            | 130 |
| § 5 - 8 | 工業反應之熱效應 ( Heat Effects of Industrial Reactions ) .....                                      | 134 |
| § 5 - 9 | 混合過程之熱效應 ( Heat Effects of Mixing Processes ) .....                                          | 139 |
|         | 習 題 五 .....                                                                                  | 155 |
| 第六章     | 熱力學第二定律 ( The Second Law of Thermodynamics ) .....                                           | 158 |

#### 4 目 錄

|         |                                                                                      |     |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| § 6 - 1 | 第二定律之敘述 ( Statement of the Second Law )                                              | 158 |
| § 6 - 2 | 熱 機 ( The Heat Engine )                                                              | 159 |
| § 6 - 3 | 卡諾循環 ( Carnot Cycle )                                                                | 161 |
| § 6 - 4 | 理想氣體之卡諾循環 ( Ideal Gas in a Carnot<br>Cycle )                                         | 163 |
| § 6 - 5 | 熵之定義 ( The Definition of Entropy )                                                   | 165 |
| § 6 - 6 | 證明 $S$ 為熱力學性質 ( The Proof That $S$ is a<br>Thermodynamic Property )                  | 167 |
| § 6 - 7 | 可逆過程熵之變化                                                                             | 173 |
| § 6 - 8 | 不可逆過程熵之變化之實例                                                                         | 176 |
| § 6 - 9 | 熵變化及 不可逆性                                                                            | 186 |
|         | 習 題 六                                                                                | 189 |
| 第七章     | 流體之熱力學性質 ( Thermodynamic Properties of<br>Fluids )                                   | 191 |
| § 7 - 1 | 熱力學性質間之關係 ( Relationships among the<br>Thermodynamic Properties )                    | 191 |
| § 7 - 2 | 單相系統之熱力學性質 ( Thermodynamic Properties<br>of a Single-phase System )                  | 193 |
| § 7 - 3 | 兩相區 ( The Two-phase Region )                                                         | 202 |
| § 7 - 4 | 熱力學圖形之種類 ( Types of Thermodynamic<br>Diagrams )                                      | 204 |
| § 7 - 5 | 熱力學性質表 ( Tables of Thermodynamic<br>Properties )                                     | 208 |
| § 7 - 6 | 氣體熱力學性質之推廣關係 ( Generalized<br>Correlation of Thermodynamic Properties for<br>Gases ) | 210 |
| § 7 - 7 | 混合物或溶液之熱力學性質 ( Thermodynamic                                                         |     |

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Properties of Mixtures or Solutions).....                                 | 220 |
| 習 題 七.....                                                                | 225 |
| <b>第八章 流動過程之熱力學性質 ( Thermodynamics of Flow Processes )</b> .....          | 230 |
| § 8 - 1 基本公式 ( Fundamental Equations ) .....                              | 231 |
| § 8 - 2 管內之流動 ( Flow in Pipes ) .....                                     | 236 |
| § 8 - 3 管內流動之最大速度 ( Maximum Velocity in Pipe Flow ) .....                 | 244 |
| § 8 - 4 流速計 ( Flowmeters ) .....                                          | 245 |
| § 8 - 5 焦耳-湯姆遜膨脹 ( Joule-Thomson Expansion ) .....                        | 248 |
| § 8 - 6 噴嘴 ( Nozzles ) .....                                              | 250 |
| § 8 - 7 壓縮機 ( Compressors ) .....                                         | 256 |
| 習 題 八.....                                                                | 267 |
| <b>第九章 由熱產生功 ( Production of Work from Heat )</b> .....                   | 269 |
| § 9 - 1 可冷凝之流體之循環 ( Condensable fluid Cycles ) .....                      | 270 |
| § 9 - 2 水蒸氣動力廠循環之分析 ( Analysis of the Steam power Plant Cycle ) .....     | 272 |
| § 9 - 3 奧圖機 ( The Otto Engine ) .....                                     | 277 |
| § 9 - 4 柴油機 ( The Diesel Engine ) .....                                   | 281 |
| § 9 - 5 氣渦輪動力廠之效率 ( The Efficiency of The Gas turbine Power Plant ) ..... | 283 |
| 習 題 九.....                                                                | 288 |
| <b>第十章 冷凍工程 ( Refrigeration Engineering )</b> .....                       | 290 |
| §10 - 1 卡諾冷凍循環 ( The Carnot Refrigeration Cycle ) .....                   | 290 |
| §10 - 2 空氣冷凍循環 ( The Air refrigeration Cycle ) .....                      | 292 |
| §10 - 3 蒸氣壓縮循環 ( The Vapor-Compression Cycle ) .....                      | 294 |

## 6 目 錄

|         |                                                       |     |
|---------|-------------------------------------------------------|-----|
| §10 - 4 | 冷凍循環之比較 ( Comparison of Refrigeration Cycles )        | 297 |
| §10 - 5 | 冷凍劑之選擇 ( The Choice of Refrigerant )                  | 302 |
| §10 - 6 | 吸收冷凍 ( Absorption Refrigeration )                     | 303 |
|         | 習 題 十                                                 | 309 |
| 第十一章    | 程序之熱力學分析 ( Thermodynamic Analysis of Processes )      | 311 |
| §11 - 1 | 理想功 ( Ideal Work ) 之計算                                | 311 |
| §11 - 2 | 損失功 ( Lost Work )                                     | 314 |
| §11 - 3 | 實際過程之熱力分析                                             | 316 |
| §11 - 4 | 應用於流體流動 ( Application to fluid flow )                 | 319 |
|         | 習 題 十一                                                | 321 |
| 第十二章    | 相平衡 ( Phase Equilibria )                              | 323 |
| §12 - 1 | 平衡之性質 ( The Nature of Equilibrium )                   | 323 |
| §12 - 2 | 平衡之標準 ( Criteria of Equilibrium )                     | 324 |
| §12 - 3 | 逸壓 ( The Fugacity )                                   | 326 |
| §12 - 4 | 平衡時各相之組成 ( The Composition of phases in Equilibrium ) | 331 |
| §12 - 5 | 純成分之逸壓 ( The Fugacity of a pure Component )           | 332 |
| §12 - 6 | 高壓之下相之行爲 ( Phase Behavior at Elevated Pressures )     | 340 |
| §12 - 7 | 低壓之下相之行爲 ( Phase Behavior at Low Pressures )          | 346 |
| §12 - 8 | 高壓 ( Elevated pressures )                             | 349 |
| §12 - 9 | 平衡常數之應用 ( Applications of Equilibrium Constants )     | 356 |

|           |                                                                      |     |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| § 12 - 10 | 低壓 ( Low Pressures )                                                 | 360 |
| § 12 - 11 | Gibbs-Duhem 公式                                                       | 364 |
| § 12 - 12 | 活度係數之計算 ( Evaluation of Activity Coefficients )                      | 371 |
| § 12 - 13 | 部分互溶系統 ( Partially Miscible Systems )                                | 376 |
| § 12 - 14 | 不互溶系統 ( Immiscible Systems )                                         | 382 |
|           | 習 題 十二                                                               | 385 |
| 第十三章      | 化學反應平衡 ( Chemical-Reaction Equilibrium )                             | 387 |
| § 13 - 1  | 平衡之標準 ( Criteria of Equilibrium )                                    | 387 |
| § 13 - 2  | 標準自由能變化及平衡常數 ( The Standard Free-energy Change and the Equilibrium ) | 387 |
| § 13 - 3  | 溫度之影響 ( Effect of Temperature )                                      | 390 |
| § 13 - 4  | 平衡常數之計算                                                              | 392 |
| § 13 - 5  | 壓力對平衡常數之影響 ( Effect of Pressure on the Equilibrium Constant )        | 401 |
| § 13 - 6  | 平衡轉化率之計算 ( Calculation of the Equilibrium Conversion )               | 405 |
|           | 習 題 十三                                                               | 423 |
| 附 錄 A     | 熱力學中所應用到之數學                                                          | 426 |
| A - 1     | 廣延量和強度量 ( Extensive and Intensive Quantities )                       | 426 |
| A - 2     | 偏微分 ( Partial Differentiation )                                      | 426 |
| A - 3     | 正則微分 ( Exact Differentials )                                         | 429 |
| 附 錄 B     | 水蒸氣表                                                                 | 434 |
| 附 錄 C     | 附圖                                                                   | 467 |

# 第一章 緒 論

## § - 1 熱力學之範圍

### ( The Scope of Thermodynamics )

熱力學係處理各種形式之能量間，互相轉變的科學。這些轉變，皆遵循熱力學第一及第二定律；但這兩個定律不能由數學方法證明，而是由無數次之經驗所下之結論。

熱力學之應用極為廣泛，例如：物理，化學，機械工程，化學工程，及冶金等皆不可或缺；但是其基本原理皆相同。對化學工程而言，熱力學最重要的用途，在於決定物理及化學過程（process）中所需的熱和功；由動力循環（power cycles）計算可獲得的功；以及決定相（phase）與相間之化學反應及質量傳送（mass transfer）之平衡條件。

熱力學之應用亦受到許多限制。單獨應用熱力學，無法計算化學或物理過程的速率（rate）。因為速率的大小與推動力（driving force）及阻力（resistance）有關，若由熱力學能求出推動力，即不可能用相同的方法求出阻力。此外，由熱力學亦無法求得物理或化學過程之機構（mechanism）；所幸這種限制並無影響，因為熱力學的分析不需知道一過程的詳細機構，由最初及最終狀態之資料，即可算得物理或化學過程之能量效應（energy effect）。因此，對於複雜的過程的計算，只要固定最初及最終狀態，即可用最簡單的過程考慮之。

另一種限制是數據的缺乏。熱力學分析的結果之精確與否，全賴數據之來源是否精確，化學工程上所遇到的物質，種類繁多，而已知



的數據卻有限。在此情況下，化學工程師則須發揮「估計」的技巧。

雖然有這些限制，然而由熱力學第一及第二定律所達到的成果卻是相當可觀。

## § 1 - 2 基本量 ( Fundamental Quantities )

常用之基本量為時間、距離、質量、力，及溫度等五種。這些量代表基本之概念，只能從吾人之經驗中體會到。然而為了賦予它們定量之意義，必須規定度量之標準單位，茲分述於下。

### § 1 - 3 時間 ( Time )

時間  $\theta$  之基本單位為秒，1 秒相當於平均太陽日之  $\frac{1}{86,400}$ ，所有其他時間單位皆以秒定之。

### § 1 - 4 距離 ( Distance )

距離  $s$  或長度  $L$  之基本單位為米 ( meter )，以保存在法國 Sevres 之鉑銻合金上之兩個記號，在  $0^{\circ}\text{C}$  之距離為 1 米。所有其他長度單位皆以此為準，例如呎 ( foot ) 等於 0.3048006 米。

### § 1 - 5 質量 ( Mass )

質量  $m$  之基本單位為公斤 ( kilogram )，亦以保存在法國 Sevres 之鉑銻合金為標準。所有其他質量之單位皆以此為準，最常用之英制質量為磅質量 (  $\text{lb}_m$  )，1  $\text{lb}_m$  等於 0.4535924 公斤。須了解的是，質量係度量“物質之量”，質量有時亦用來度量物質之性質，如慣性 ( inertia )。質量與重量 ( weight ) 不同，但其間有一定之關係，重量係指重力 ( gravity ) 作用於物質上之力。在某一地區，重量與質量成正比，但比例常數隨地區而不同，雖然物體之重量