

熱力工程問題詳解

THERMAL ENGINEERING

SOLBERG CROMER SPALDING

曉園出版社

HY 424

出版者：曉園出版社

台北市永康街十二巷二號之三

電話：三二一三七六四
三五一四五一三

劃撥：一九四五三

門市部：中華書局

台北市武昌街一段七十七號

定價：每冊新台幣 70 元

新聞局登記證內版台業字第一二四四號

版權所有・翻印必究

前 言

研習理工的同學，都有一種認識，那就是：一本書的習題往往是該書的精華所在，藉着習題的印證，才能對書中的原理原則澈底的吸收與瞭解。

有鑒於此，曉園出版社特地聘請了許多在本科上具有相當研究與成就的人士，精心出版了一系列的題解叢書，為各該科目的研習，作一番介紹與鋪路的工作。

一個問題的解答方法，常因思惟的角度而異。曉園題解叢書，毫無疑問的都是經過一番精微的思考與分析而得。其目的在提供對各該科目研讀時的參考與比較；而對於一般的自修者，則有啓發與提示的作用。希望讀者能藉着這一系列題解叢書的幫助，而在本身的學業上有更上層樓的成就。

熱力工程學詳解

(目 錄)

第一章	物質與能量	1
第二章	能量平衡	13
第三章	流體之熱力性質	24
第四章	化石燃料及燃燒、核子反應	43
第五章	內燃機	73
第六章	化石燃料燃燒設備及核子反應器	94
第七章	熱傳遞	98
第八章	蒸氣之產生	118
第九章	熱交換器	147
第十章	渦輪機	154
第十一章	泵浦	163
第十二章	通風、風扇、吹風機及空氣壓縮機	176
第十三章	動力廠循環系統	185
第十四章	機械式冷凍	194

第一章 物質與能量

1. 使 2 公斤質量之物質產生 30 公分 / 秒² 之加速度, 所需之力爲若干個達因 ?

已知: $m = 2 \text{ kilograms}$, $a = 30 \text{ cm/sec}^2$

求: 使質量 m 達到加速度 a 所須施力

$$\text{解: } F = \frac{1}{g_c} \cdot m \cdot a = \frac{1}{1.0 \frac{\text{gm} \cdot \text{cm}}{\text{dyne} \cdot \text{sec}^2}} \times 2000 \text{ gm} \times \frac{30 \text{ cm}}{\text{sec}^2}$$

$$F = 60000 \text{ dynes}$$

2. 某物體有 300 質量磅, 問相當於若干史拉格 ?

已知: $m = 300 \text{ lb}_m$

求: 質量爲若干 (以 slug 計)

$$\text{解: Mass in slugs} = \frac{300 \text{ lb}_m}{\frac{32.2 \text{ lb}_m}{\text{slug}}} = 9.3 \text{ slugs}$$

3. 使 40 個史拉格之質量產生 5 呎 / 秒² 之加速, 所需之力爲若干磅 ?

已知: $m = 40 \text{ slugs}$ $a = 5 \text{ ft/sec}^2$

求: 達到此加速度所須之外力 (lb_f)

$$\begin{aligned} \text{解: } F &= \frac{1}{1 \frac{\text{slug} \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} \times 40 \text{ slugs} \times 5 \text{ ft/sec}^2 \\ &= 200 \text{ lb}_f \end{aligned}$$

4. 使 500 質量磅之物體產生 7 呎 / 秒² 之加速度, 所需之力爲若干磅 ?

已知： $m = 500 \text{ lb}_m$ $a = 7 \text{ ft/sec}^2$

求：達到此加速度所須之外力（ lb_f ）

$$\begin{aligned}\text{解：} F &= \frac{1}{32.2 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} \times 500 \text{ lb}_m \times 7 \text{ ft/sec}^2 \\ &= 108.7 \text{ lb}_f\end{aligned}$$

5. 某物體在地心引力加速度為 25 呎/秒^2 處之重量為 300 磅 ，問：(a) 此物體之質量磅數，(b) 質量史拉格數，(c) 使此物體產生 6 呎/秒^2 加速度所需之力磅數。

已知：物重 = 300 lb_f ，當地加速度 = 25 ft/sec^2

求：物體質量(a) in lb_m ，(b) in slugs

(c) 使物體達到 6 ft/sec^2 之加速度所須之外力（ lb_f ）

$$\text{解：(a) 質量 (lb}_m) = \frac{W}{g} \cdot g_c = \frac{300 \text{ lb}_f}{25 \frac{\text{ft}}{\text{sec}^2}} \times \frac{32.174 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}$$

$$= 386 \text{ lb}_m$$

$$\text{(b) 質量 (slugs)} = \frac{W}{g} \cdot g_c$$

$$= \frac{300 \text{ lb}_f}{25 \text{ ft/sec}^2} \times \frac{1.0 \text{ slug} \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}$$

$$= 12 \text{ slugs}$$

$$\text{(c) 外力 (F)} = \frac{W}{g} \cdot a = \frac{300 \text{ lb}_f}{25 \text{ ft/sec}^2} \times 6 \text{ ft/sec}^2$$

$$= 72 \text{ lb}_f$$

6. 在某一種單位之系統中，力以磅（ lb_f ）計，質量以公克計，距離以吋計，時間以分鐘計。若以上各單位之值皆為 1，求 g_c 之值。

已知： $F(\text{lb}_f)$, $M(\text{grams})$, $L(\text{inch})$, $T(\text{minute})$

求： g_c 的單位

$$\text{解： } F = \frac{1}{g_c} \cdot M \cdot a$$

$$[\text{lb}_f] = \frac{1}{[g_c]} \cdot [\text{grams}] \cdot \frac{[\text{inch}]}{[\text{minute}^2]}$$

$$[g_c] = \frac{[\text{grams}] \cdot [\text{inch}]}{[\text{lb}_f] \cdot [\text{minutes}^2]}$$

7. 某衛星之質量為 1,000 磅 (lb_m) , 在離海平面 500哩之高度處其重量為若干磅 (lb) 。

已知： 衛星質量為 1000 lb_m

求： 在海平面以上 500miles 處其重量

解： 由表 1.2 $g = 25.369 \text{ ft/sec}^2$

$$W = \frac{mg}{g_c} = \frac{1000 \text{ lb}_m}{32.174 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} \times 25.369 \text{ ft/sec}^2$$
$$= 788.49 \text{ lb}_f$$

8. 某物體之質量為 20 史拉格，問在月球上之重量為若干磅 (lb_f) ?

已知： 物體質量為 20 slugs

求： 月球表面處此物的重量

解： 由表 1-2 $g = 5.47 \text{ ft/sec}^2$

$$W = \frac{mg}{g_c} = 20 \text{ slugs} \times 5.47 \text{ ft/sec}^2$$
$$= 109.4 \text{ lb}_f$$

9. 某物體在月球上之重量為 100磅，問使此物體產生 5呎/秒² 加速度所需之力為若干磅？

已知：物體在月球表面重 100 lb_f

求：使物體達到加速度 5 ft/sec^2 所需之外力

解：物體質量 $m = \frac{W}{g} \cdot g_c$

由表 1-2 月球表面加速度 $g = 5.47 \text{ ft/sec}^2$

$$m = \frac{100 \text{ lb}_f}{5.47 \text{ ft/sec}^2} \times \frac{1.0 \text{ slug-ft}}{1 \text{ lb}_f\text{-sec}^2}$$
$$= 18.28 \text{ slugs}$$

$$\text{所須外力 } F = \frac{1}{g_c} m \cdot a$$
$$= 18.28 \text{ slugs} \times 5 \text{ ft/sec}^2$$
$$= 91.4 \text{ lb}_f$$

10. 在月球上質量 5 磅 (1 lb_m) 之氣體佔據 40 立方呎之體積。求：
(a) 氣體之比容，(b) 氣體之密度，(c) 氣體之比重。

已知：在月球表面， 5 lb_m 的氣體佔體積 40 ft^3

求：(a) 氣體的比容，(b) 氣體的密度

(c) 氣體的比重

解：由表 1-2 $g = 5.47 \text{ ft/sec}^2$

$$(a) \text{ 比容 } \nu = \frac{V}{M} = \frac{40 \text{ ft}^3}{5 \text{ lb}_m} = 8 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

$$(b) \text{ 密度 } \rho = \frac{M}{V} = \frac{5 \text{ lb}_m}{40 \text{ ft}^3} = 0.125 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$(c) \gamma = \frac{g}{g_c} \cdot \rho = \frac{5.47 \text{ ft/sec}^2}{32.174 \frac{\text{lb}_m\text{-ft}}{\text{lb}_f\text{-sec}^2}} (0.125 \text{ lb}_m/\text{ft}^3)$$
$$= 0.0213 \text{ lb}_f/\text{ft}^3$$

11. 某一容器之體積為 $10,000 \text{ ft}^3$ ，內含 $1,500$ 質量磅 (1 lb_m) 之氮氣。求：(a) 氣體之比容，(b) 氣體之密度

已知：某儲存器皿內含 1500 lb_m 的氮氣，器皿容積
10,000 ft³

求：(a) 氮氣比容 ν

(b) 氮氣密度 ρ

$$\text{解：(a) } \nu = \frac{V}{M} = \frac{10,000 \text{ ft}^3}{1500 \text{ lb}_m} = 6.67 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$$

$$(b) \rho = \frac{M}{V} = \frac{1500 \text{ lb}_m}{10,000 \text{ ft}^3} = 0.15 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

12. 蒸汽在 1,000 psia 之壓力及 900 F 之溫度的比容為 0.7604 呎³，所在位置之引力加速度為 30 呎/秒²。求：(a) 蒸汽之比重，(b) 以質量磅 (lb_m) 及史拉格所表示之密度各為若干？

已知：蒸汽於 $P = 1000 \text{ psia}$ ， $T = 900 \text{ F}$ 的比容

$$\nu = 0.7604 \text{ ft}^3/\text{lb}_m \text{。當地動加速度 } g = 30 \text{ ft/sec}^2$$

求：(a) 蒸汽的比重量

(b) 蒸汽的密度，以如下單位表之

(1) lb_m/ft³ (2) slugs/ft³

$$\begin{aligned} \text{解：(a) } \gamma &= \frac{g}{g_c} \rho = \frac{g}{g_c} \times \frac{1}{\nu} = \frac{30 \text{ ft/sec}^2}{32.174 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} \times \frac{1}{0.7604 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}_m}} \\ &= 1.23 \text{ lb}_f/\text{ft}^3 \end{aligned}$$

$$(b) \rho = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{0.7604 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}_m}} = 1.315 \frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3}$$

$$\rho = \frac{1}{\nu \cdot g_c} = \frac{1}{0.7604 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}_m} g_c} = 0.041 \frac{\text{slugs}}{\text{ft}^3}$$

13. 溫度 70 F 水之比容為 0.01606 (呎³/lb_m)。在引力加速度為 25 呎/秒²處，求：(a) 水之比重，(b) 密度 (lb_m/呎³)

及(c)密度，史拉格/呎³。

已知：水溫 70 F 時 $\nu = 0.01606 \text{ ft}^3/\text{lb}_m$

當地重力加速度為 $25 \text{ ft}/\text{sec}^2$

求：(a) 水的比重量

$$(b) \quad \rho \left[\frac{\text{lb}_m}{\text{ft}^3} \right]$$

$$(c) \quad \rho \left[\frac{\text{slug}}{\text{ft}^3} \right]$$

$$\begin{aligned} \text{解：(a)} \quad \gamma &= \frac{g}{g_c} \cdot \frac{1}{\nu} = \frac{25 \text{ ft}/\text{sec}^2}{32.174 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} \cdot \frac{1}{0.01606 \text{ ft}^3/\text{lb}_m} \\ &= 48.38 \text{ lb}_f/\text{ft}^3 \end{aligned}$$

$$(b) \quad \rho = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{0.01606 \text{ ft}^3/\text{lb}_m} = 62.27 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$$

$$(c) \quad \rho = \frac{1}{\nu g_c} = \frac{62.27 \text{ lb}_m/\text{ft}^3}{32.174 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} = 1.935 \text{ slugs}/\text{ft}^3$$

14. 某熱力設備於作試驗時，燃燒 30 磅之煤，產生 4 磅之灰燼，煙鹵排出 417 磅之氣體，問空氣之供給量為若干？

已知：家用熱爐，燃煤 30 lb 後，廢熱氣排量為 417 lb，又灰份佔 4 lb

求：所供應的空氣

解：依物質不變定律

$$\text{空氣 (lb}_m) = 417 + 4 - 30 = 391 \text{ lb}_m$$

15. 某內燃機燃燒 80 磅之汽油及 1,200 磅之乾燥空氣。排氣管排出 1,092 磅之乾燥燃燒氣，問所排出之水汽為若干？

已知：80 lb 汽油及 1200 lb 的乾空氣送至內燃機燃燒，廢氣發生量為 1092 lb（不含水份）

求：廢氣所帶出之水份

解：依物質不變定律

$$\begin{aligned}\text{水份 (lb}_m\text{)} &= 80 \text{ lb} + 1200 \text{ lb} - 1092 \text{ lb} \\ &= 188 \text{ lb}\end{aligned}$$

16. 相當於 400 F 及 -10 F 之郎氏溫度若干？

已知：400 F , -10 F

求：轉換為 Rankine 單位

解：由 (1.12) 式

$$T_R = t_F + 460$$

$$T_{R1} = 400 + 460 = 860 R$$

$$T_{R2} = -10 + 460 = 450 R$$

17. 相當於 300 C 及 -100 C 之凱氏溫度為若干？

已知：300 C , -100 C

求：轉化為 Kelvin 單位

解：由 (1.13) 式

$$T_K = t_C + 273$$

$$T_{K1} = 300 + 273 = 573 K$$

$$T_{K2} = -100 + 273 = 173 K$$

18. 相當於 200 F 及 -30 F 之攝氏溫度為若干？

已知：200 F , -30 F

求：化為 Centigrade

$$\text{解：} t_C = \frac{5}{9} (t_F - 32)$$

$$t_{C1} = \frac{5}{9} (200 - 32) = 93.3 C$$

$$t_{C2} = \frac{5}{9} (-30 - 32) = -34.4 C$$

19. 相當於 -40°C 及 200°C 之華氏溫度爲若干？

已知： -40°C ， 200°C

求：化爲 Fahrenheit

$$\text{解： } t_F = \frac{9}{5} t_C + 32$$

$$t_{F1} = \frac{9}{5} (-40) + 32 = -40^{\circ}\text{F}$$

$$t_{F2} = \frac{9}{5} (200) + 32 = 392^{\circ}\text{F}$$

20. 相當於 30 及 10 吋水銀柱壓力之磅/吋² (psi) 及磅/呎² (psf) 各爲若干？

已知：30 in·Hg，10 in·Hg

求：化爲 psf 單位及 psi

解：由 (1-15) 式

$$1 \text{ in} \cdot \text{Hg} = 0.491 \text{ psi}$$

$$(1) \quad 30 \text{ in} \cdot \text{Hg} \times 0.491 \times 144 = 2121.12 \text{ psf}$$

$$30 \text{ in} \cdot \text{Hg} \times 0.491 = 14.73 \text{ psi}$$

$$(2) \quad 10 \text{ in} \cdot \text{Hg} \times 0.491 = 4.91 \text{ psi}$$

$$10 \text{ in} \cdot \text{Hg} \times 0.491 \times 144 = 707 \text{ psf}$$

21. 相當於 2，14.7，及 20 psi 壓力之水銀柱吋數各爲若干？

已知：2 psi，14.7 psi，20 psi

求：化爲 in·Hg 單位

解：由 (1-15) 式

$$1 \text{ in} \cdot \text{Hg} = 0.491 \text{ psi}$$

$$(1) \quad \frac{2 \text{ psi}}{0.491 \text{ psi/in} \cdot \text{Hg}} = 4.073 \text{ in} \cdot \text{Hg}$$

$$(2) \quad \frac{14.7 \text{ psi}}{0.491 \text{ psi/in} \cdot \text{Hg}} = 29.94 \text{ in} \cdot \text{Hg}$$

$$(3) \frac{20 \text{ psi}}{0.491 \text{ psi/in} \cdot \text{Hg}} = 40.73 \text{ in} \cdot \text{Hg}$$

22. 壓力計之讀數為 200 psi，氣壓計之水銀柱高度為 29.6 吋，求絕對壓力 psia 及 psfa。

已知：壓力計所測得之壓力為 200 psi，barometric pressure 為 29.6 in·Hg

求：絕對壓力 (psi, psf)

$$\begin{aligned} \text{解：} P_{\text{abs}} &= P_{\text{gage}} + P_{\text{atm}} \\ &= 200 + 29.6 \times 0.491 \\ &= 214.5 \text{ psi} \\ &= 30893 \text{ psf} \end{aligned}$$

23. 某壓力計之讀值為 20 吋水銀柱真空，氣壓計之讀值為 29.7 吋水銀柱，求絕對壓力水銀柱之吋數，psia 及 psfa 各為若干？

已知： $P_{\text{gage}} = 20 \text{ in} \cdot \text{Hg V}_{\text{ac}}$ $P_{\text{bar}} = 29.7 \text{ in} \cdot \text{Hg}$

求： P_{abs} (in·Hg, psi, psf)

$$\begin{aligned} \text{解：} P_{\text{abs}} &= P_{\text{gage}} + P_{\text{bar}} \\ &= -20 \text{ in} \cdot \text{Hg} + 29.7 \text{ in} \cdot \text{Hg} \\ &= 9.7 \text{ in} \cdot \text{Hg} \\ &= 4.763 \text{ psi} \\ &= 685.8 \text{ psf} \end{aligned}$$

24. 某物體重 1,000 磅放置在一基準面以上 10 呎處。求此物體對該基準面所存儲之勢能。

已知：物重 1,000 lb_f，位置距基高 10 ft

求：物體對基高所具之位能 (ft·lb_f)

解：P.E. = WZ

$$= 1000 \text{ lb}_f \cdot 10 \text{ ft}$$

$$= 10000 \text{ ft-lb}_f$$

25. 某物體之質量為 1,000 磅 (lb_m) , 放置在某基準面以上 20 呎處 , 而該處之引力加速度為 25 呎 / 秒² , 求該物體對該基準面所存儲之勢能為若干呎-磅。

已知：物體質量為 1,000 lb_m , 位置高於基準面 20 ft,

當地重力加速度為 25 ft/sec^2

求：此物對基準面之位置

$$\text{解：P.E.} = \frac{g}{g_c} m z = \frac{25 \text{ ft/sec}^2}{32.174 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} \times 1000 \text{ lb}_m \times 20 \text{ ft}$$

$$= 15540.5 \text{ ft-lb}_f$$

26. 一物體之質量為 50 史拉格 , 放置在某基準面以上 40 呎處 , 而該處之引力加速度為 20 呎 / 秒² 。求該物體對該基準面所存儲之勢能為若干呎-磅

已知：物體質量為 50 slugs , 其位置距基準面高 40 ft ,

當地重力加速度 20 ft/sec^2

求：此物對基準面所具之位能

$$\text{解：P.E.} = \frac{g}{g_c} \cdot m \cdot z = 20 \text{ ft/sec}^2 \cdot \frac{50 \cdot \text{slugs}}{g_c} \cdot 40 \text{ ft}$$

$$= 40,000 \text{ ft-lb}_f$$

27. 一物體之質量為 100 lb_m , 以每秒 100 呎之速度作等速直線運動。假若所在位置為緯度 45 度 , 求物體之動能呎-磅數。

已知：物體質量為 100 lb_m , 以直線等速運動 ,

$v = 100 \text{ ft/sec}$, 如其位置在緯度 45 度 , 並於海平面高度

求：物體所具之動能 (ft-lb_f)

$$\begin{aligned}\text{解: } KE &= \frac{mv^2}{2g_c} = \frac{100 \text{ lb}_m \times 100 \text{ ft/sec} \times 100 \text{ ft/sec}}{2 \cdot 32.174 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} \\ &= 15540.5 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f\end{aligned}$$

28. 一物體重 1000 磅，以每秒 120 呎之速度作等速直線運動。
假若所在位置之引力加速度為 25 呎/秒²，求所存儲之動能
為若干呎-磅？

已知：物體重 1000 lb_f，當地 $g = 25 \text{ ft/sec}^2$ ，以等速直線
運動 $v = 120 \text{ ft/sec}$

求：此物所具之動能 (ft-lb_f)

$$\begin{aligned}\text{解: } KE &= \frac{mv^2}{2g_c} = \frac{\frac{Wg_c}{g} \cdot (120 \text{ ft/sec})^2}{2 \times 32.174 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} \\ \therefore \frac{Wg_c}{g} &= \frac{1000 \text{ lb}_f \cdot 32.174 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}}{25 \text{ ft/sec}^2} \\ &= 1287 \text{ lb}_m \\ K.E. &= \frac{1287 \text{ lb}_m \cdot (120 \text{ ft/sec})^2}{2 \times 32.174 \frac{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{sec}^2}} \\ &= 288009 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f\end{aligned}$$

29. 某物體之質量為 80 史拉格，在月球上以每秒 200 呎之速度
作等速直線運動。問該物體所存儲之動能為若干呎-磅？

已知：物體質量為 80 slugs，其在月球表面以等速直線運動
 $v = 200 \text{ ft/sec}$

求：此物所具之動能 (ft-lb_f)

$$\begin{aligned}
 \text{解: } KE &= \frac{mV^2}{2g_c} = \frac{80 \text{ slugs} \times (200 \text{ ft/sec})^2}{2} \\
 &= 1,600,000 \text{ ft-lb,}
 \end{aligned}$$

第二章 能量平衡

1. 10呎³ 100 psia 及 80 F 之空氣，以等壓膨脹至 20呎³之體積，問所作之工作為若干？

已知：10 ft³, $p = 100$ psi, $T = 80^\circ\text{F}$ air 等壓膨脹
20 ft³

求：所作之功為若干

解：由 eq (2-2) $W = P(V_2 - V_1)$

$$\begin{aligned} W &= 100 \frac{\text{lb}_f}{\text{in}^2} \times 144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2} \times (20 - 10) \text{ft}^3 \\ &= 100 \times 144 \times 10 \text{lb}_f\text{-ft} \\ &= 144000 \text{lb}_f\text{-ft} \end{aligned}$$

2. 5呎³ 80 psig 及 100 F 之空氣，以等壓壓縮至 2呎³。氣壓計為 29.8 水銀柱，計算所作之工作。

已知： $P = 80$ psig, $T = 100^\circ\text{F}$, $V = 5$ ft³ 之空氣，以等壓壓縮至 2 ft³ 氣壓計為 29.8 之汞柱

求：其壓縮作功

解：29.8 in-Hg $\Rightarrow 29.8 \times 0.491 = 14.632$ psi

由 eq (2-2) $W = P(\text{psia})(V_2 - V_1)$

psia = psig + Barometric

故 $80 + 14.632 = 94.632$ psia

$$\begin{aligned} W &= 94.632 \times 144 \times (2 - 5) \\ &= -40881.02 \text{lb}_f\text{-ft} \end{aligned}$$

3. 設氣體自 p_1 及 V_1 依據 $pV = C$ (常數) 關係膨脹至 p_2 及 V_2 ，證明工作量 $W = p_1 V_1 \ln(V_2/V_1)$ 。

證：由 eq (2-4) $W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$