

內燃機原理

譯 者

甯 梲 董壽莘

樊恭儵 曹傳鈞 陳啓民

龍門聯合書局出版

內 燃 機 原 理

甯 梲 董壽莘 等譯

★ 版權所有 ★

龍 門 聯 合 書 局 出 版

上海南京東路61號101室

中國圖書發行公司總經售

蔚文印刷有限公司印刷

上海長樂路256號

1952年2月初版

印數 2501-3700 冊

1954年4月再版

定價 卩 26,000

上海市書刊出版業營業許可證出 029 號

譯 者 敘

美國麻省理工大學教授泰勒氏兄弟所寫的內燃機出版已有十二年。從 1939 年到現在我國有幾個大學用作航空工程系及機械工程系的參考課本。這本書的系統還算嚴整，從理論上提出問題，解釋現象，逐步分析到實際情況；並盡量引證實驗數據；照顧到“啓發創造的思想，引起鑽研的興趣”。同人等認為尚值得介紹，所以集體分工譯成國語。此書對於飛機，汽車，船艇，拖拉機及柴油發動機怎樣利用熱能做工和應用時的性能都有些原則性結論。現經十二年，內燃機科學技術又有許多新發現，但有關原則性結論在往復式內燃機仍可適用。不過譯者願意提出下列幾點：

(一)混氣循環分析一章所引用“賀，艾，何”(Hershey, Eberhardt, Hottel) 三氏的“混氣熱工圖線”，最近已有修正重繪的圖線出版 (Thermodynamic Charts for Combustion Processes, by H.C. Hottel, G.C. Williams, C.N. Satterfield, John Wiley, 1949)。新圖的混氣比及應用範圍擴大，柴油機，燃氣輪的循環也可以查圖分析。

(二)參考資料都是外國文，既不能全部譯出，那麼只譯出索引也毫無用處，所以原書 293 到 317 頁附錄索引都沒有譯。

(三)譯時盡量照顧全段意義，不呆板遵循原句原字。第三章講到

“化熱平衡”現象，第四章講到“增壓混氣循環”及“排氣平均溫度”，第七章講到“壓燃機的爆震”，這幾處，譯者根據教學經驗，稍加引伸補充。第100圖已失時效，故刪去。

(四)原著者寫此書時燃氣輪機還沒有進展到現在這樣成功的程度，所以原書第二頁尚把“不用往復運動機件，消除振動”算做蒸汽輪機特有的優點。現在燃氣輪機自然也有這個優點。原書最末一章最後一段只大概介紹燃氣輪機的發展前途和製造上所遭遇的困難，現在這些困難大致均已克服；燃氣輪噴射推進的飛機和燃氣輪牽引的機車都已實際應用，並且時刻在改良進步中。

(五)集體分工，翻譯書籍，是我們創造經驗；工作方法是：每人各譯幾章，最後由甯梲，董壽莘修改。希望這本書對於從事內燃機技術工作及學習的同志有些幫助。還希望批評指教。

譯者：甯 梲
董壽莘
曹傳鈞
樊恭休
陳啓民

一九五〇年，紅五月。國立清華大學航空系。

目 錄

第 一 章	發動機的動力產量和工作效率	1
第 二 章	理論空氣循環	5
	定容空氣循環——定容氦氣循環——限壓循環——延脹循環。	
第 三 章	油氣混氣的熱力學原理	16
	未燃混氣——已燃混氣熱工特性。	
第 四 章	混氣循環	36
	空氣循環及混氣循環的比較——混氣循環計算方法：暢流定容混氣循環，節氣定容混氣循環，增壓定容混氣循環，殘餘廢氣的影響，限壓混氣循環，壓縮比及混氣比的影響。	
第 五 章	火花點燃機裏面的正常燃燒情形	73
	燃燒損失——火焰的發展——火焰傳播理論——火焰速率的觀測——運轉情況對火焰速率的影響——壓力與火焰行程的關係——其他燃燒試驗——燃燒期控制法。	
第 六 章	火花點燃機裏面的爆震現象	103
	爆震特徵——爆震理論——光譜檢查爆震法——阿圖循環機爆震受運轉情況的影響——燃燒室設計對爆震的影響。	
第 七 章	噴射壓燃機裏面的燃燒現象	118

三個燃燒期——延遲期與燃燒速率的關係——運轉情況對燃燒的影響——實際壓燃循環與混氣循環的比較——壓燃機的爆震現象——實用的壓縮比——燃燒室設計對於壓燃機性能的影響。

第八章 直接散失的熱量 144

輻射熱——傳導熱——散熱量隨運轉情況改變——氣缸各部散熱量的分配——循環各期散熱量——散熱量對效率的影響。

第九章 火花點燃機混氣的需要條件 157

穩定轉動混氣需要條件——摩擦力的影響——運轉情況變化對混氣需要的影響——瞬時動作的混氣需要條件——汽化原理——噴射油量的節制。

第十章 內燃機的燃料 172

第一部份——概論，燃料對於發動機性能的影響，第二部份——火花點燃機所用液體燃料：揮發性，揮發性對於發動機性能的影響，火花點燃機燃料的抗爆性，火花點燃機中利用重油：第三部份——噴射壓燃機所用燃料。

第十一章 發動機的摩擦力 197

排吸阻力損失——機械摩擦力損失——運轉情況對摩擦阻力的影響——延脹發動機的摩擦阻力。

第十二章 潤滑及滑油 216

潤滑——轉動軸頸軸承的潤滑——活塞及脹圈的潤滑——滑油消耗量——滾動接觸的襯托面——齒輪的潤滑——滑油。

第十三章 火花點火 233

火花點火的理論——混氣分層的影響——點火對時。

第十四章 四程機的吸氣量 238

容積效率——靜止現象——波動現象的影響：速率，氣缸尺寸，及吸氣量的關係——靜，動現象的綜合影響。

第十五章 二衝程循環發動機 259

清掃過程：清掃效率，清掃過程動力學——二程機的冷卻問題——二程機的增壓方法——二程機的應用——二程火花點燃機——二程噴射壓燃機。

第十六章 發動機的性能 271

活塞速率對最大動力的影響——動力排量比率——速率對於耗油率的影響——大氣情況對於性能的影響——增壓——內燃機的控制法——火花點燃及噴射壓燃機性能的比較——排氣葉輪——燃氣輪機。

英中名詞對照表 301

中英名詞對照表 309

第一章 發動機的動力產量和工作效率

熱力機概括的可以分成兩類：（一）外燃機——做工的流體和燃燒的火焰完全隔開（譬如鍋爐裏面的蒸汽）；燃料摻合空氣燃燒所放出來的熱能從爐壁或爐管間接傳進去。（二）內燃機——做工的流體就是燃料摻合空氣燃燒後的混合氣體本身，燃燒和做工都在機內進行。

熱力機應用機內燃燒方法可以得到幾種基本上很重要的優點：發動機各部機件並不必要長時期在循環的最高溫度中工作，所以構造上不受材料耐熱程度的限制。循環中熱源的溫度越高，工作效率越高；因為工作流體和燃燒火焰中間不需要傳熱的金屬面，就可以取消嚴重的傳熱損失，在外燃機，這種損失是不可避免的。內燃方法還有一種優點：每循環用過的工作流體可以排棄出去，不需要冷凝設備把它小心保留（譬如：蒸汽機的冷凝器）再參加循環。

根據現代設計的限度，若是這兩種熱力機都充份發展到可能情況，那麼比較起來，內燃機顯出下列幾項有利條件：

1. 綜合工作效率較高。
2. 燃燒熱能必須由冷卻系統散走的部份較小。
3. 每馬力所佔地位和所分配的機身重量這兩個比例數都較小

(意思是發揮同樣馬力，內燃機比外燃機輕巧緊湊。不過，馬力超過一萬匹的內燃機不一定比蒸汽輪機輕便了多少。)

4. 機械控制比較簡單敏捷。

上面所說這幾項有利條件在比較小型的發動機特別顯著。從另一個觀點看，外燃機也自有它的實用優點：

1. 可以取消往復運動機件，避免發生振動。

2. 外燃機在開動時可以產生很大的始動扭力，內燃機則不能自己起動。

3. 外燃機可以燒比較便宜的燃料，對於燃料的性質成份要求並不嚴苛。(重油，煤等都比汽油便宜)

4. 在大規模的動力中心廠站，動力需要量變化不大的情形下，外燃機所佔空位和重量的分佈都比較合適。

內燃機的輕便緊湊，動作敏捷，在交通運輸事業上特別顯出它的優點。交通工具發動機和所帶燃料的重量及體積對於這種交通工具的性能是有決定性影響的。在美國目前社會發展的情況，交通事業所用動力比其它任何事業都多。若加以調查統計，僅各種車輛內燃機的動力總額就很可能超過所有其他發動機的綜合動力。內燃機可以很快的發展應用到別的工程事業。值此機械化時代，內燃機在世界工業經濟上所佔的重要性可以說是獨一無二。

發動機的：動力產量

選擇一部發動機對於指定任務合適不合適的重要關鍵是考察它的動力產量；也就是應用範圍內在各個轉速時所能發揮的最大馬力。假設動力產量不夠完成任務，別的性能就不值得考慮了。

爲了便利起見，發動機的動力產量可以認爲是供給的能量和綜合效率的乘積。供給內燃機的能量是包含在進入氣缸的混氣裏(揮發了的油料和空氣的混合氣體)，供給能量的多少可以根據每單位重量

混氣的含熱值乘上每單位時間進入氣缸混氣的重量來計算。這樣，若是混氣的成份固定不變，綜合工作效率也固定不變；那麼這內燃機的動力產量是和每單位時間進入可燃混氣的重量成正比例。

實際上每部內燃機的氣缸容積已經固定，利用可燃混氣來產生動力的大小要看吸入混氣密度的高低。所以最好把密度乘上容積來代表吸入混氣的重量；這樣我們可以寫出內燃機動力產量的基本公式：

$$P = V\rho E\eta \quad (1)$$

這公式裏 P = 動力產量，
 V = 每單位時間吸入混氣的容積，
 ρ = 吸入混氣的密度，
 E = 每單位重量混氣的含熱值，
 η = 綜合工作效率。

發動機的：工作效率

任何藉燃燒熱能做工的發動機，它的綜合工作效率的定義是：混氣中所包含的能量究竟有百分之多少變成了機軸上的有用工作。因為燃燒所放出來熱能的數量要看燃燒的方式和過程怎樣，所以對於混氣含熱值還沒有規定出來一個完全滿意的標準定義。這樣，討論內燃機工作效率時就必須說明怎樣測定混氣含熱值的方法。這問題留到後面第四章裏再詳細討論。本章中所說的工作效率可以解釋為有用工作與用公認方法所測定混氣含熱值的比例數。

從這樣的工作效率定義來說，若是混氣密度不變，動力產量也固定，那麼每單位時間所需要的混氣容積是和綜合工作效率成反比例。發動機的尺寸大小和機身輕重是要配合每單位時間吸入混氣的容積多少；若是動力產量已經限定，那麼提高工作效率可以縮小尺寸，減輕重量。

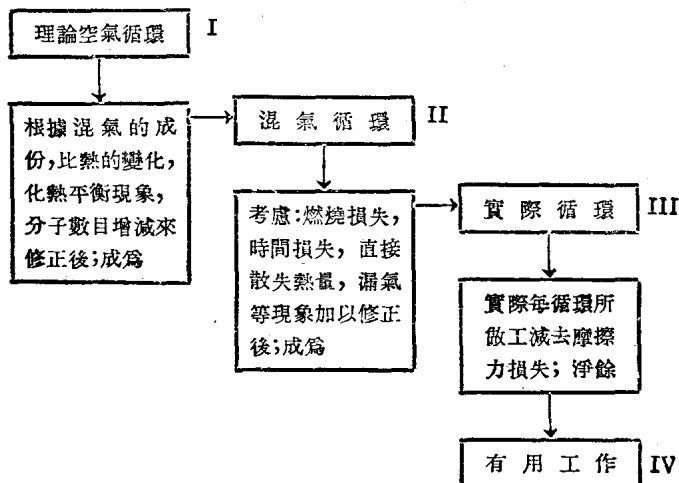
工作效率對於發動機尺寸及重量的影響，與工作效率對製造成本的影响相同。效率決定完成指定工作所需要燃料的數量，所以直接影響燃料消費。

雷卡賓(H. R. Ricardo)曾首先指出工作效率對於發動機的使用壽命和妥靠性有重大影響：內燃機的損壞和許多故障多半是因為排氣溫度過高所引起。改進工作效率是可以降低排氣溫度，自然就延長發動機的壽命，增加妥靠性。

如此說來，動力產量和工作效率是學習內燃機基本理論的主要對象。這兩種對象彼此聯繫，又影響發動機其他的重要性能。本書各章所討論的內容大致都是依據這兩個重點：動力產量和工作效率發展出來的。

第二章 理論空氣循環

內燃機裏面做工的流體是燃料摻合空氣的混合氣體。當混氣被吸入,壓縮,在氣缸裏面燃燒,膨脹做工,最後被排除出去這些過程中,當然要經歷:化學的,熱工的和機械的變化。考察這些過程中混氣情況變化的性質和數量是相當繁複的工作。最好先從簡化的概念開始



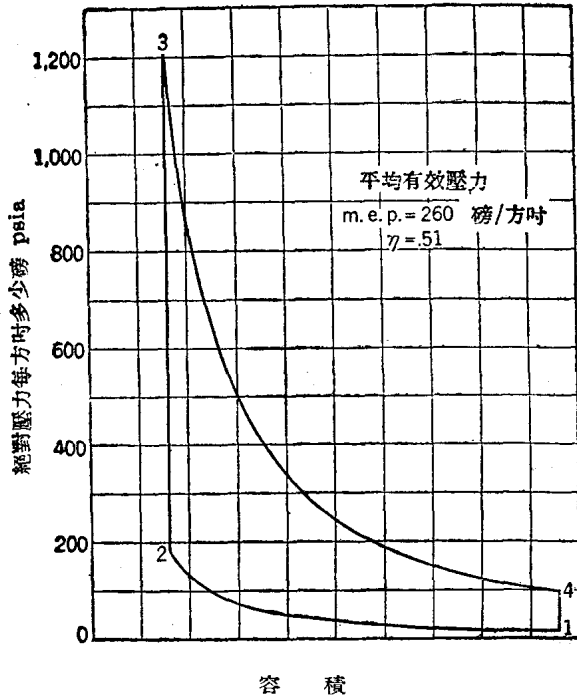
第 1 圖

分析理論空氣循環，隨後按照理論與實際的差別，逐步修正，最後接近實際循環。這裏我們要注意：內燃機的工作流體被排出後不再回到進氣管來；不過只要下一個循環開始時，有同質量的混氣在同樣情況下補充同樣的地位，可以認為這混氣是經歷繼往開來接替性的循環。分析循環的目的是要確定定量流體每循環對外界所做的有效工作和它的工作效率。

第1圖表示從理論空氣循環開始怎樣逐步修正到實際循環。本章先討論理論空氣循環分析。這循環根據混氣的特殊性質，如同：混氣配合成份，比熱值隨溫度的變化，燃燒進行中的化熱平衡現象，分子數目的增加等加以修正後就成為“混氣循環”；這是第四章所要討論的。混氣循環再按照發動機的各项損失和應用上的限制加以修正就很接近“實際循環”的情況。這逐步修正的辦法中有些只能算是性質上的修正；不過，把握住這種逐漸接近實際的辦法，對於本章和以後各章的基本原理就很容易瞭解。

所謂理論空氣循環，因為假定工作流體只是純淨的空氣；並且假定空氣是遵守波易爾(Boyle)和查理斯(Charles)理想氣體定律；比熱值固定不變，把工作流體認為是“理想氣體”有兩種便利：根據理想氣體性質分析循環所得的效率是實際循環的最高限度；分析循環時，理想氣體的情況變化很容易解釋，數學公式也很簡單。既然內燃機所吸入的混氣大部份是空氣，所以假定循環開始時吸入混氣的性質和空氣完全相同：在壓力每方吋 14.7 磅，溫度華氏 60°F 。時密度是每立呎 0.0765 磅。等壓比熱值：每分子量每度華氏是 6.90 英熱單位；等容比熱值：每分子量每度華氏是 4.92 英熱單位。

等容加熱空氣循環 這是四程(或二程)火花點燃機根據假定簡化後開始分析的基準循環；第2圖是這樣循環的示功圖。假定的條件是：密度每立呎 0.0765 磅的純淨空氣等壓絕熱的被吸入氣缸，容積和壓力相當於圖上的1點。這容積 V_1 代表氣缸總容積。從1到2是等熵壓縮， V_2 是氣缸的餘隙容積，活塞正在上定點；假定活塞停在這



第 2 圖 等容加熱空氣循環

壓縮比 $r=6$
 起始壓力 $p_1=14.7$ psia。
 起始溫度 $T_1=540^\circ\text{R}$ 。(或華氏 80°F)
 加入熱能 $Q=1280$ 英熱單位/每磅空氣。

個位置的一瞬間，有 Q_c 單位的熱能加到空氣裏面來，使壓力和溫度在等容情況下 ($V_2=V_3$) 昇高到 P_3, T_3 ；假定在高壓高溫的空氣從 3 等熵膨脹到 4，活塞被推到下定點。此時排氣門開，做完工的熱空氣噴洩出去，缸內壓力立刻降低到起始的壓力 P_1 活塞滑向上定點，等壓的推出一部份廢氣；活塞再回到下定點時，又有新鮮空氣補充進來，此時缸內空氣的溫度恢復起始的溫度 T_1 ，假定排吸工作互相抵消，在等容情況 $V_4=V_1$ 當初那定量空氣共排棄出去熱能 Q_c ；根據熱

工第一定律和空氣的特性公式很容易得到；每循環有效工作 = 加入熱減排棄熱：

$$w = JMC_v[(T_3 - T_2) - (T_4 - T_1)] \quad (2)$$

$$Q_v = MC_v(T_3 - T_2) \quad (3)$$

$$\text{熱工效率: } \eta = \frac{w}{JQ_v} = \frac{T_3 - T_1}{T_2} = \frac{T_3 - T_4}{T_3};$$

根據等熵過程公式: $PV^K = \text{常數}$

$$\text{可以得到: } \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{K-1} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{K-1};$$

$$\therefore \eta = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{K-1} \quad (4)$$

上面各公式中各符號所代表的意義：

w = 每循環空氣對外界所做的有效工作；多少呎磅。

M = 每循環所用空氣的重量；多少磅。

J = 熱工當量，每英熱單位折合 778 呎磅的工作。

Q_v = 等容情況下加進空氣的熱量；多少英熱單位 B. T. U.

η = 熱工效率（空氣加熱後的工作效率）；

r = 壓縮比 $\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$ ，在理論空氣循環也等於膨脹比 $\left(\frac{V_4}{V_3}\right)$ ；

V = 空氣的容積；立呎。

C_p = 等壓比熱值；每磅空氣在等壓情況每升高 1°F 所需要的熱量。

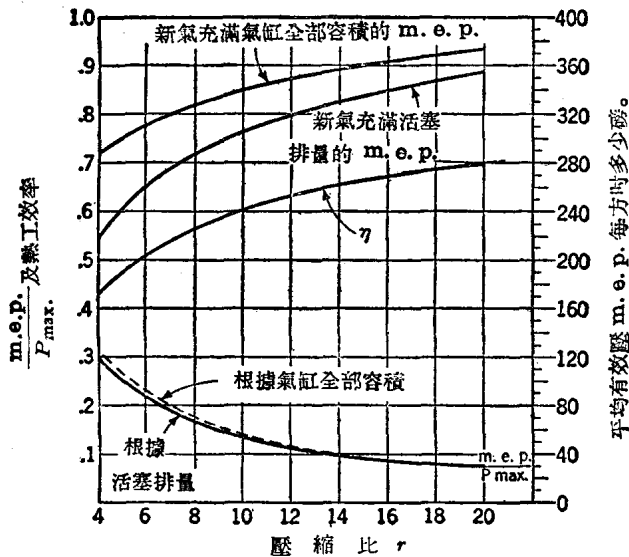
C_v = 等容比熱值；每磅空氣在等容情況每升高 1°F 所需要的熱量。

$K = \frac{C_p}{C_v} = 1.4$ ；這是空氣等熵過程公式中 V 的指數。

T = 絕對溫度 $^\circ\text{R} = ^\circ\text{F} + 460$ 。

在理論空氣循環中的工作效率正是熱工原理上所解釋的熱工效率：即所加進去的熱量究竟有百分之多少變成有效工作。後面談到混氣循環有燃料燃燒時，就需要嚴格規定求熱工效率分母所用的熱量。

從公式(4)看來，理論空氣循環的熱工效率只是隨着膨脹比 r 和等壓等容比熱的比值 K 變化，與所加熱量多少並沒有關係！若認為在溫度差 T_3, T_4 或 T_2, T_1 中間；空氣經過卡諾特(Carnot)循環，則所求出的熱工效率和公式(4)完全相同。所以這是熱工效率理想最高的限度。若認為空氣在平常溫度時 $K=1.4$ 固定不變；熱工效率按不同膨脹比畫出來的曲線就像第3圖所表示的 η 。



第3圖 熱工效率，平均有效壓力，及 m.e.p. 與最高壓力 P_{max} 的比值；等容加熱空氣循環。起始溫度和壓力： $T_1=540^\circ R$ 。 P_1 =每方吋 14.7 磅。每循環每磅空氣所加熱量 $Q=1,230$ B. T. U.

任何流體每循環所做有效工作不僅是熱工效率的函數，同時還要看看每循環所用流體的數量是多少。為計算動力方便起見，常假想氣

缸內流體對於外界發生的作用相當於平均有效壓力 $m. e. p.$; 這個壓力乘上相當於活塞排量的容積, $V_1 - V_2$; 就等於每循環所做的有效工作:

$$m. e. p. = \frac{w}{V_1 - V_2} \quad (5)$$

每循環有效工作 w 可以從每循環空氣等容所加熱量乘上公式(4)的熱工效率來計算。根據實驗數據, 每磅汽油按正常溫度及壓力在定容測熱器中配合化學恰當比例的氧氣完全燒成二氧化碳 CO_2 和水蒸汽 H_2O 後所放出來的“燃燒熱量”, 叫做每磅汽油的含熱值 = 19,270 英熱單位。每磅空氣究竟配合多少磅汽油這個比例數叫做混氣比; 假定汽油的化學分子式是 C_8H_{18} , 那麼根據燃燒的化學方程式, 把一個分子量的 C_8H_{18} 完全燒成 CO_2 和 H_2O 恰好需要 59.5 個分子量的空氣; 或說每磅汽油需要 15 磅空氣; 所謂恰當混氣比就是每磅空氣恰好配合 $\frac{1}{15} = 0.0665$ 磅的汽油。那麼蘊藏在吸入每磅空氣裏面

的熱量應該有 $19,270 \times 0.0665 = 1,280$ 英熱單位。下面空氣循環分析每磅空氣等容所加熱量就認為是 1,280 B. T. U.。每循環所吸入空氣的重量要看內燃機是那一種構造型式。在四衝程發動機, 吸入空氣的重量是相當於活塞排量: $V_1 - V_2$ 乘上密度; 若是二衝程發動機的清掃空氣量與活塞排量成正比例, 那麼吸入空氣重量也是這樣計算。不過二程機或四程增壓的發動機, 因為新氣把前一個循環的殘餘廢氣差不多可以完全清掃出去; 所以吸入空氣重量應該用氣缸全部容積 V_1 乘密度來計算, 以確定每循環所加熱量。

雖然等容加熱空氣循環的熱工效率與所加熱量並沒有關係; ($V_1 - V_2$) 或 V_1 乘密度所得的熱工效率相同, 可是有效工作和平均有效壓力是隨着所加熱量的多少而增減的。若是新氣充滿氣缸全部容積, 應該比新氣只充滿活塞排量的有效工作和平均有效壓力大 $\frac{r}{r-1}$ 倍。