

内 燃 机

胡 乾 善 著

上海科学技术出版社

內 燃 机

胡 乾 善 著

上海科学技术出版社

內 容 提 要

內燃机已成为吾人最常見之原动机，其应用之廣亦已在全世界居首位。內燃机課程在各大學机械、航空、輪机諸系中，居於非常重要的地位。

本書著者本多年執教心得著成是書。主旨在使學者對內燃机獲得初步之全面知識。一方面顧及實用，使能了解內燃机之原理、構造與使用方法；另一方面亦顧及理論，使在求深造時可進修內燃机之設計、飛機發動机、船用柴油机等學程。全書共分十五章并有附錄三及中英文索引等。

本書可適合大學各系科作為教本之用，亦可酌量精簡一部分內容，使適合學時有差別的系科之需。

內 燃 机

胡 乾 善 編 著

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路 2004 号)

上海市书刊出版业营业许可证出 093 号

上海市印刷五厂印刷 新华书店上海发行所总經售

开本 787×1092 耗 1/32 印張 10 3/8 字數 216,000

(原中科院、科技版共印 9,500 冊)

1958 年 11 月新 1 版 1959 年 4 月新 1 版第 2 次印刷

印數 5,001—15,000

統一書号：15119·319

定 价：(十四) 1.45 元

序 言

緣起：內燃機具有構造輕巧及使用方便兩項優點，故已發展為吾人所最常見之原動機。全世界各種原動機之總功率中，內燃機功率約居十分之九，其重要不難想見。因之高等學校中之機械、航空、輪機等系科，無不列內燃機為一重要課程。講述內燃機之外國文書籍雖已甚多，然大都不適於作我國學校教本之用，故編著適當中文教本，實為目下迫切需要之事。著者講授有年，現將所用教材整編出版以利教學，惟以學識淺陋，書中謬誤不妥之處恐所難免，尙祈國內專家學者指正為幸。

目的：目下各大學與專科學校所開設之內燃機課程，多僅講授一年或半年。由於時間短促，故教材必須精選慎編。又以其為基本課程，故理論與實際必須配合兼顧，因之本書之目的，乃在使學者對內燃機能獲得初步之全面知識，以打下實用與深造雙方面之基礎。於修畢本書後，希望學者在實用方面能對一般內燃機之原理，構造與使用可有基本了解；在深造方面能進而修習內燃機設計，發動機動力學，飛機發動機，或船用柴油機等專門課程。

建議：本書共分十五章，可供每週三小時講授一學年，或每週四小時講授一學期之用。如感時間不足，可就內燃機之燃料，增壓進氣與工衝循環，發動機動力學要義，及內燃機之性能與測驗各章，考慮作適當精簡。如時間充裕，則可斟酌補充燃燒線圖及其對循環分析之應用，燃氣輪引論，內燃機設計要義，或其他方面之教

材。

本書採用公制單位，書末附有各種重要單位互換關係表，以便與他種單位折算。每章之首附有簡單章頭，以說明該章之目的，或指出該章之重點。每章之末附有習題若干，其目的主要在訓練學者之思想能力，及增強其對本書內容之了解。其中之問答題目，亦可用作小組討論之提綱。習題中亦偶有涉及書內未講之內容者，目的在培養學者自求新知之能力。如有困難，亦可由教員解答，作為補充教材。

胡乾善序於南京大學機械系

一九五二年二月。

目次

第一章 引論..... 1

- 1-1 內燃機之重要 1-2 內燃機之主要機件 1-3 氣缸之數目與排列 1-4 內燃機之分類

第二章 內燃機之循環.....16

- 2-1 內燃機之熱力循環 2-2 內燃機之機械循環 2-3 理想氣體與多變式 2-4 理想空氣循環 2-5 壓縮壓力與溫度
2-6 燃燒溫度與壓力 2-7 餘氣之溫度 2-8 循環效率與平均有效壓力 2-9 理想循環與實際情況之差別

第三章 內燃機之燃料.....39

- 3-1 內燃機之燃料 3-2 氫炭燃料 3-3 燃料之重要特性
3-4 揮發性液體燃料 3-5 汽油之產造 3-6 汽油之揮發性
3-7 汽油之辛烷度 3-8 重液體燃料

第四章 燃氣之發生與使用.....67

- 4-1 氣體燃料 4-2 燃氣發生之原理 4-3 發生燃氣之燃料
4-4 燃氣發生爐之構造 4-5 燃氣之淨濾冷卻與混合 4-6 燃氣發生爐之設計 4-7 燃氣內燃機

第五章 燃料之汽化與混合.....88

- 5-1 汽油汽化問題 5-2 簡單化汽器 5-3 實用化汽器
5-4 化汽器上之輔助設備 5-5 進氣歧管與混氣分配 5-6 進氣歧管加熱

第六章 混氣之點火與燃燒..... 108

- 6-1 燃料之自然溫度 6-2 電花發火 6-3 混氣之燃燒
6-4 敲震與爆炸 6-5 燃料本身與爆炸 6-6 混氣情況與爆炸
6-7 燃燒時間與發火時刻 6-8 電花發火燃燒室之條件

6-9 燃燒室之設計

第七章 燃料之噴射與設備..... 132

- 7-1 柴油噴射系統 7-2 噴射油泵 7-3 噴射油泵之設計考
慮 7-4 高壓油路問題 7-5 噴射之研究 7-6 噴射器
7-7 柴油機之燃料系統

第八章 柴油機內之燃燒..... 157

- 8-1 噴射柴油之燃燒 8-2 發火延遲與柴油機敲震 8-3 柴
油機燃燒室與空氣擾動 8-4 空氣擾動之計算 8-5 實用柴
油機燃燒室 8-6 柴油機之起動

第九章 進氣與排氣..... 175

- 9-1 進氣與功率 9-2 容積效率之變化 9-3 排氣問題
9-4 菌狀閥門 9-5 閥門規時間問題 9-6 袖筒閥門

第十章 增壓進氣與二衝循環..... 191

- 10-1 增壓進氣與其效果 10-2 進氣增壓器 10-3 增壓器之
功率 10-4 二衝循環機之種類 10-5 二衝循環換氣問題
10-6 二衝循環之優點與困難

第十一章 內燃機之潤滑..... 208

- 11-1 液體潤滑之作用與種類 11-2 完善潤滑之理論 11-3 潤
滑之方法與設備 11-4 內燃機主要機件之潤滑 11-5 滑油
與其重要性質 11-6 滑油之消耗

第十二章 內燃機之冷卻..... 223

- 12-1 冷卻之需要與方法 12-2 導熱問題 12-3 氣缸之失熱
與溫度 12-4 空氣冷卻 12-5 水冷原理 12-6 水冷設備

第十三章 內燃機之構造..... 242

- 13-1 機架與底板 13-2 氣缸與氣缸蓋 13-3 活塞與聯桿
13-4 曲軸與發火順序 13-5 曲軸之構造 13-6 閥門機械
13-7 內燃機構造之實例

第十四章 發動機動力學要義..... 264

- 14-1 活塞之運動 14-2 往復力 14-3 扭矩圖與能量波動
14-4 發動機震動之原因 14-5 發動機之本有平衡 14-6 振
動之抗衡 14-7 扭振與其阻弱

第十五章 內燃機之性能與測驗..... 287

- 15-1 發動機測驗 15-2 轉速之測定 15-3 功率指示器
15-4 動力計 15-5 內燃機之特性曲綫 15-6 功率定額
15-7 內燃機之熱脹

附錄一 重要數量及互換關係表..... 309**附錄二 重要氣體之比熱..... 311****附錄三 比重互換表..... 312****中英文索引..... 315**

第一章

引 論

本書目的在說明內燃機之重要性，以引起學者對本課程之興趣與重視。此外並對內燃機之構造、種型、用途等，亦均作簡明概括之介紹，以便學者於進入局部問題之討論前，能先對全局有一初步之整體概念。如不先將本章詳細閱讀，即進習以後各章，則認識難免片面破碎，觀點不能正確樹立。故對本章不可不加以注意也。

1-1 內燃機之重要 動力(power)來自機械能。各形能量可以互變，自理論上講，各種能源(sources of energy)均可用以產生動力。但在實際上，由於經濟方面之限制，吾人用以產生動力之能源，約不外下列數種：

1. 燃料所含之熱能 燃料所含之熱能，可用燃燒之方式放出。此種熱能經過一熱機(heat engine)後，可以部份變成有用動力。此種能源為產生動力所最常用者。

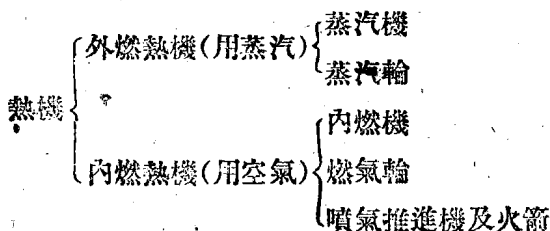
2. 水之位能或動能 凡在有大量水自高處流向低處之地點，吾人均可利用水力以產生動力。水力發電因無燃料消耗，維持費固甚低廉。但為造成可以利用之水位，河上築壩工程常常費用甚鉅。水力發電廠之建造費，往往比同功率之火力發電廠高一倍以上。此外海潮一起一落，所含能量亦頗可觀。利用海潮以供給動力，亦曾有人加以研究。

3. 風力及其他 在多風之地區，如荷蘭、丹麥及蘇聯某些地區，風車常被用以供給小量動力。在赤道附近，日光極強，可以供給不少熱量，利用日光產生動力，亦有相當可能。但此類能源因利用不易，故不甚重要。

4. 原子能 自原子炸彈出世以後，原子能或原子核能 (atomic or nuclear energy) 乃大為吾人所注意，利用原子能推動飛機，可以大大增加運載重量，或航程距離，故為目下一重要工程問題，但在供給普通地面動力方面，由於經濟觀點之考慮，吾人深信短期內，原子能尚無代替煤或石油之可能。此外以原子能產生動力，仍須使用熱機，不過熱機所用之熱能，為由原子能所供給而已。

總上所述，吾人可見熱機為產生動力最重要之工具。過去如此，現在如此，將來仍復如此。

依所用工作介質 (working medium) 之不同，熱機可分為用蒸汽的與用空氣的二十大類。前者以水化汽，需用鍋爐 (boiler)，鍋爐笨重龐大，在熱機外自成一體。故用蒸汽之熱機，亦可名為外燃熱機 (external combustion heat engine)。後者所用之工作介質為永久氣體，無須經過汽化手續，因之燃燒可以在熱機本身內舉行。故用空氣之熱機，亦可名為內燃熱機 (internal combustion heat engine)。外燃熱機及內燃熱機，又均可採往復 (reciprocating) 或旋轉 (rotary) 之型式。旋轉式熱機名為渦輪或輪機 (turbine)。此外為適合於高空飛行，又有噴氣推進 (jet propulsion) 機及火箭 (rocket) 之發明與改進。此類發動機，均可包括在內燃熱機範圍以內，因之熱機之分類，可以下表表示：



一般而論，由於機件之慣性作用，除較小之發動機外，往復式熱機多限於較低之速度（每分鐘數百轉至最高數千轉）。渦輪僅有均勻之旋轉運動，故速度可以甚高（每分鐘一二萬轉或更高）。由於磨擦表面甚小，渦輪之機械效率（mechanical efficiency）甚高。

蒸汽熱機與內燃機相較，彼此互有長短。早年因內燃機發展尚未成熟，故蒸汽機久執動力之牛耳。晚近內燃機進步甚速，在若干方面，蒸汽熱機已無地位，茲將蒸汽熱機與內燃機之優劣點簡述於下，以明內燃機日趨重要之原因：

蒸汽熱機：鍋爐笨重，造價甚高，本身熱量損失頗大（其熱效率視鍋爐之大小而異，普通在 50% 至 90% 之間）。蒸汽熱機本身之熱效率隨其動力而減低，小蒸汽機之熱效率常在 10% 以下。其主要特長為能燃用價值低廉之燃料（煤塊或粗煤粉）。

內燃機：輕便清潔，造價低廉。其熱效率不甚隨發動機之大小而變動。其缺點為僅能採用較貴之燃料（燃氣，汽油，柴油或粗油）。

目下在工業發達之國家內，往復蒸汽機已少使用。5000 馬力以上之原動機多採用蒸汽輪。5000 馬力以下之原動機，則可採用柴油內燃機。在輪船及火車上，柴油機之應用已日趨普遍。在汽車飛機及其他輕便原動機方面，蒸汽機更毫無地位矣。全世界各種

原動機總動力之分配情形，爲

內燃機動力約佔	90%
蒸汽動力約佔	9%
水力動力約佔	1%

其中包括全世界五千餘萬輛汽車所有約四十億馬力之功率。由此吾人可見內燃機在近代社會中之重要矣。

1-2 內燃機之主要機件 內燃機之種型極爲繁多，其構造彼此頗多不同之處。但主要機件(essential parts)則均不外爲：

1. 氣缸(cylinder) 爲兩端開口之圓筒，或個個分立，或數個鑄爲一體，名爲氣缸塊(cylinder block)。材料多採用鑄鐵，但飛機發動機則常用鋼。氣缸內徑可簡稱缸徑(bore)，其大小以毫米(millimeter)或吋表示，爲一重要數據。

2. 氣缸蓋(cylinder head) 爲用以密封氣缸之一端者，其形狀變化甚大，可以十分複雜。進氣排氣閥門，亦可位於其上。氣缸蓋之內部形狀，決定發動機之燃燒室(combustion chamber)，對燃燒之良否，關係至爲密切。氣缸蓋可用螺栓(bolts 或 studs)固繫於氣缸之上。氣缸蓋之材料，多用鑄鐵或鋁合金。

3. 活塞(piston) 爲杯形之圓柱體或圓盤狀物，由於聯桿(connecting rod)之推引，可以往復滑動於氣缸之內。其上部套有具彈性之活塞環(piston ring)數個，以密封氣缸之他端。活塞，氣缸與氣缸蓋三者組成一密閉之可變空間。於燃燒發生以後，高壓熱氣下壓活塞而發生動力。活塞之主要材料，爲鑄鐵及鋁合金。

4. 曲軸(crankshaft) 動力之使用及傳送，以旋轉運動爲最便

故作用於活塞上間歇之直線衝力，乃被吾人以聯桿，曲軸與飛輪之組合，變為均勻之旋轉

動力。曲軸多為用鍛

鋼或鑄鐵所製成者，其

上之主要部分，有主軸

(main journal)，曲臂

(crank 或 crank arm)

及曲臂軸(crankpin)。

主軸支於主軸承(main

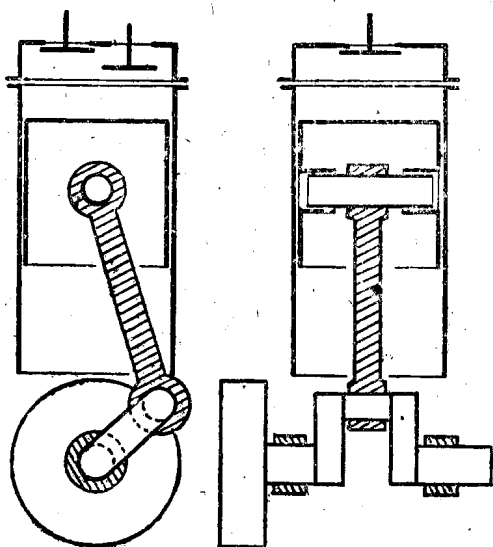
bearing)之上。曲臂

軸則套入聯桿大端軸

承(big end bearing)

之內，如第 1-1 圖所示

者。曲臂軸軸線繞轉



第 1-1 圖 內燃機之基本機件

圓之直徑，即活塞之衝程(stroke)，與氣缸徑同為重要數據，並用同一單位表示。一曲軸之彎(throw)數，可自 1 至 8 個以上。

5. 曲軸箱(crankcase) 曲軸上所承受之力甚大，故主軸承應裝附於強固之曲軸箱隔壁上。曲軸箱同時可包圍曲軸及凸輪軸等機件，以資保護，並支持發動機之全體重量。其下面可附繫油盤以儲滑油。曲軸箱亦可與諸氣缸鑄為一體，材料常為鑄鐵。大型內燃機則不用曲軸箱而代以機架(engine frame)及底板(bed plate)。

6. 閥門及閥門機關(valves and valve mechanism) 一氣缸之進氣及排氣均有定時，其控制由進氣及排氣閥門負擔。除進氣與排氣時間外，各閥門應嚴密關閉。閥門可設於氣缸旁或氣缸蓋

上。最常用之閥門機關，爲凸輪及彈簧組合，如菌狀閥門一般所採用者。袖筒閥門(sleeve valves)則僅用曲桿操縱，因不用彈簧而得絕對控制(positive action)。

7. 進氣系統(induction system) 在奧透循環內燃機(如汽油機等)中，空氣於進入氣缸之前，必須先與燃料比例混合。燃氣機(gas engine)之裝用混氣器(gas mixer)，與汽油機之裝用化汽器(carburetor)卽爲此故。對於多氣缸之內燃機，一個混氣器或化汽器，須於不同之時刻分別供給混氣於各個氣缸，因之於化汽器與各氣缸進氣閥門袋(intake valve pocket)之間，乃須裝用一進氣歧管(induction manifold)。狄色及組合循環內燃機，因空氣事前不須與燃料混合，故無須混氣器或化汽器，但必須另備噴油設備，爲奧透循環內燃機所不需者。

8. 發火系統(ignition system) 對於壓縮發火之內燃機無所謂發火系統。對於電花發火之內燃機，則一套發火設備必不可缺。發火系統中包括電池，高壓圈，分電器，電花塞等項設備。

9. 排氣系統(exhaust system) 由氣缸內高壓高溫廢氣之突然排出，所發爆聲甚爲噪擾。因之普通內燃機均設有減聲器(muffler or silencer)以減低排氣之聲音。此外廢氣之中可含有一氧化碳毒氣成分，故廢氣必須由排氣管排至室外。對於多氣缸內燃機，排氣管與各氣缸排氣閥門袋之間均裝有排氣歧管(exhaust manifold)。

10. 滑潤系統(lubrication system) 內燃機內部相對運動接觸摩擦之處甚多，倘不妥爲潤滑，不但該機之機械效率大爲減低，而且迅速磨損，機件甚易毀壞。對於高速重載之內燃機潤滑尤爲

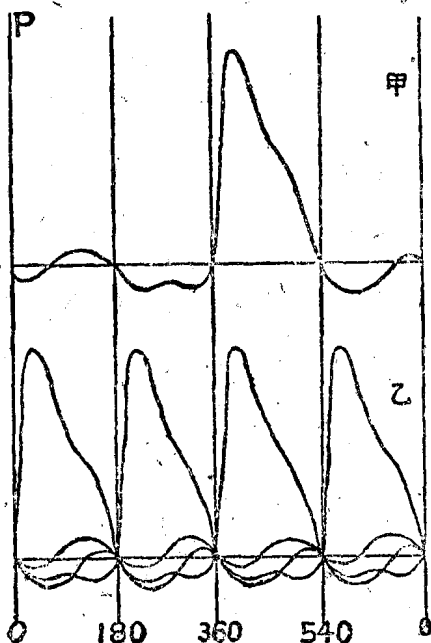
重要。潤滑系統中包括油盤，滑油泵，濾油器，油壓計，等項設備。

11. 冷卻系統(cooling system) 由於氣缸內之燃燒，氣缸壁，氣缸蓋，以及活塞頂等處，極易為高熱所毀。故此等與其他易熱部分，必須妥為冷卻，使其溫度經常保持在某種限度之下。普通用以冷卻內燃機各部之介質為水，空氣或油。冷卻設備包括輻射片或水套，水泵，散熱器，等等。

關於各種內燃機之詳細構造，第十三章內將另有介紹。

1-3 氣缸之數目與排列 為產生一固定之功率，吾人所用之內燃機，可僅具一大氣缸，或為數個小氣缸。現代之內燃機，除甚小或速度甚低者外，無不採用多氣缸(multi-cylinder)構造。多缸構造之優點，為

1. 較均勻之功率 以四衝循環之內燃機而論，每氣缸於每二週轉內僅有一工作衝程。故對於單氣缸內燃機，功率 P 隨曲軸所轉角度 θ 變動之情形，約如第 1-2 圖中甲曲線所示，動力之產生甚不均勻。乙曲線所示，為一四缸內燃機功率



第 1-2 圖 單缸機與四缸機功率變動之比較

變化之情形。吾人見其衝力幾乎前後連接，故動力之產生，遠較單氣缸爲均勻。爲使動力均勻起見，每內燃機均裝有飛輪一個。由衝力之較爲連續均勻，多氣缸機所需要之飛輪，乃較單氣缸機所需要者爲輕小。

2. 較高之轉速 對於往復內燃機，氣缸不能太大或轉速不能太高。否則由於往復部份（即活塞，聯桿等等）之慣性作用，機件有斷破之危險，或需要過高之成本。多氣缸機之採用，使每個氣缸之尺寸縮小，因而旋轉速度可以提高。轉速提高之主要利益，爲可以減小內燃機之體積與重量，及在某種情形下，減低製造之成本。

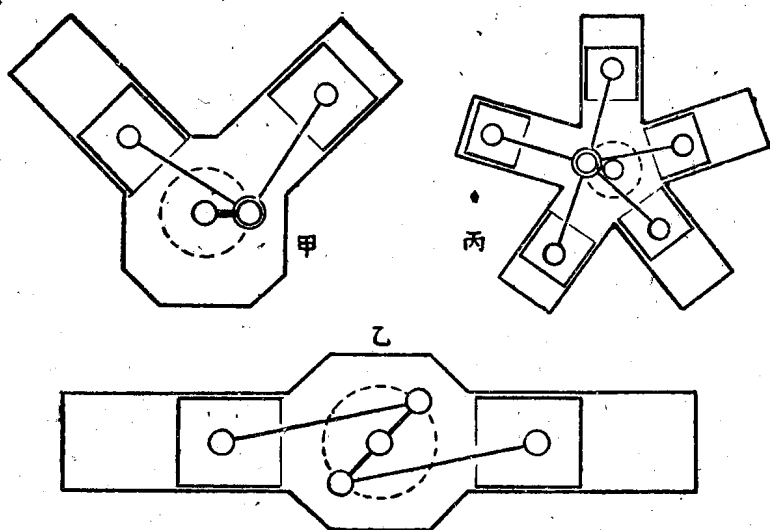
多氣缸機既宜廣爲採用，吾人可進而研究各氣缸之排列方法，常用之氣缸排列方法，大約不外以下四種：

1. 直排 (straight or cylinders-in-line arrangement) 此排法爲各氣缸——平行，直立在一平面之內，爲最常用之氣缸排列方法。然氣缸之數目不能太多，否則曲軸之設計將大感困難。普通以 8 氣缸爲限，6 缸及 4 缸更爲普通。

2. V 排 (V-arrangement) 對於氣缸多於 8 個之內燃機，V 排法最爲通用。將氣缸均分爲二列，每列內各缸均平行樹立，兩列之二平面相交如 V 字形。如此內燃機之長度，可較氣缸直排者約縮短一半。V 字之夾角可爲 90° ， 60° ，等等。第 1-3 圖甲所示，即 V 排機氣缸，活塞，聯桿，及曲軸之排列情形。

3. 對排 (horizontal-opposed or pancake arrangement) 爲適合於扁平空間之需要，吾人可將 V 排之交角放大至 180° ，而得二列氣缸對排於一平面內之情形，如第 1-3 圖乙所示者。

4. 徑排 (radial arrangement) 如第 1-3 圖丙所示，各氣缸可



第 1-3 圖 V 排、對排及徑排氣缸之情形

均在一圓之半徑方向均勻排列。爲使各氣缸之發火間隔(firing interval)均等，徑排氣缸均爲單數。當氣缸數目超過 9 個時，可分排爲二層，每層氣缸數目各爲單數。徑排內燃機之曲軸，僅有一彎或二彎。此種氣缸排列法，僅用於氣冷之飛機發動機。

1-4 內燃機之分類 內燃機之分類方法甚多。就所用之燃料講，可分爲汽油機，燃氣機，柴油機，雙燃料機(dual fuel engine)等。就發火方法講，可分爲電花發火機與壓縮發火機二類。就燃料與空氣之混合方法講，可分爲化汽器式機與噴射式機。就熱力循環講，可分爲奧透循環機，狄色循環機及組合循環或亥色曼機(Hesselman engine)。就機械循環講，可分爲二衝循環機及四衝循環機。就氣缸排列方法分，則有直排，V 排，對排，徑排各式機。