

大專講義

基本內燃機學

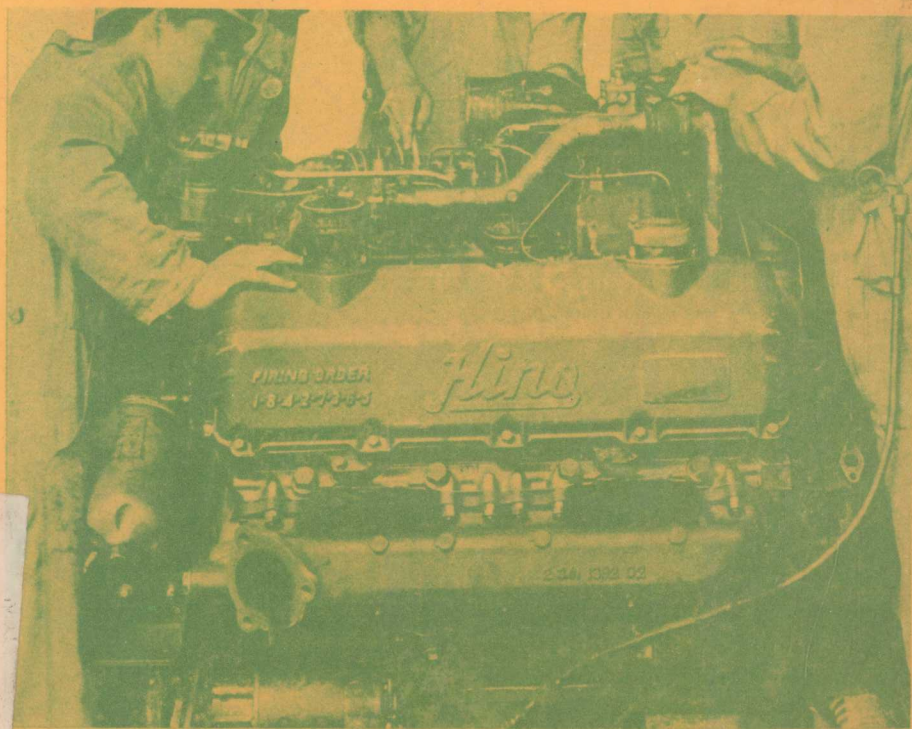
Internal Combustion Engine
"The Basic Theory"

広島大学教授
工学博士

廣安博之

近畿大学教授
工学博士

寶諸幸男 共著



賴 耿 陽譯著

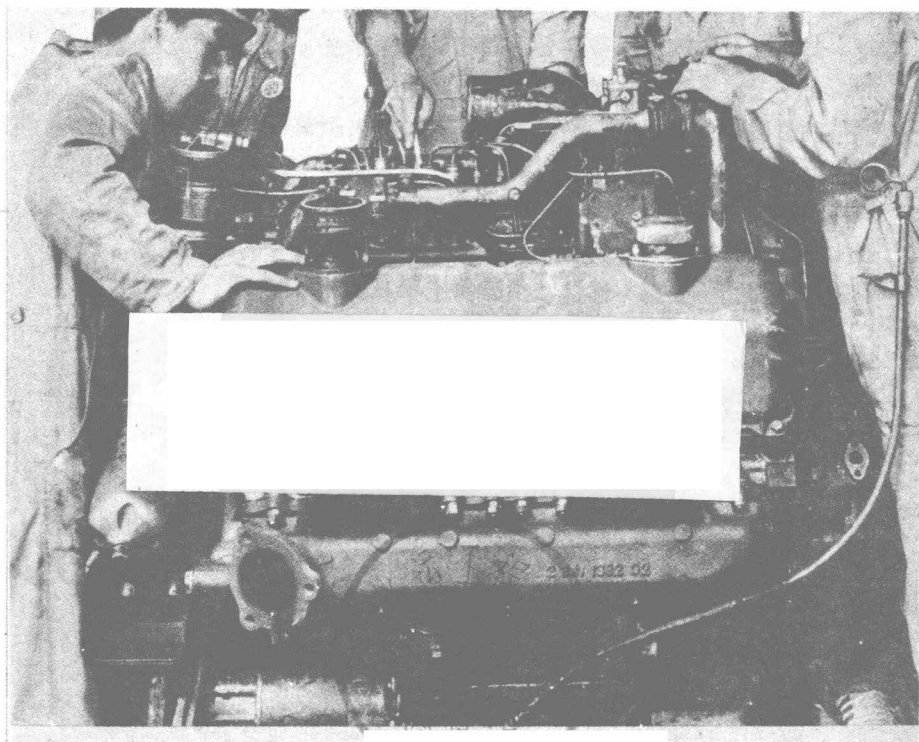
復漢出版社印行

J D N R J

基本内燃機學

Internal Combustion Engine
"The Basic Theory"

広島大学教授 工学博士 廣安博之 近畿大学教授 工学博士 寶諸幸男 共著



賴 耿 陽譯著

復漢出版社印行

中華民國七十六年二月出版

基本內燃機學

原著者：廣寶

安諸

博辛

譯著者：賴耿

出版者：復漢出版社

地址：台南市德光街六五一號

郵政劃撥〇〇三二五九一—三號

發行人：沈岳林

印刷者：國發印刷廠

版權所有
翻印必究

平裝 B 元〇六一
精裝 元〇〇二

本社業經行政院新聞局核准登記局版台業字第〇四〇二號

序

內燃機在 1800 年代末由 Nikolaus A. Otto、Rudolf Diesel 確立其燃燒循環以來，踏實進步，1940 年代以前主要因為飛機、戰車等軍用原動機，1950 年代以後，用為汽車、農耕機、建設機械、船舶、發電機、飛機等民生機器的原動機、技術、數量都飛躍發展。

汽車、摩托車、飛機的發達造成交通運輸革命，增進社會生活的方便，却也導致排汽、噪音等公害問題、交通事故。公害為內燃機本身的問題，安全為搭載內燃機的交通機械問題。

內燃機至今仍以火花點火引擎、壓縮點火引擎等往復形引擎為主，近年迴轉形引擎也實用化，燃氣渦輪、噴射推進引擎等速度形引擎也發展為大出功用引擎。內燃機本身為一個完成的總合機械。為熱力學、流體力學、彈性力學、材料學、機械要素學等機械工學的總合產物。因而為瞭解其構造、作動、性能，須瞭解工學基礎的學問。

最近為改善熱效率，嚐試利用陶瓷材料，導入電子控制技術，以各種最適控制系統改進性能。

1986 年 11 月

編 者

記 號

A	面積	m^2	W	功	kJ
A/F	空燃比		//	寬度	m
F/A	燃空比		X	垂直方向分力	N
B_f	燃料消費量	$kg/h, g/s$	Y	水平方向分力	N
C	係數		Z	斷面係數	m^3
D	直徑	m	Z	馬赫數	
E	能量	kJ	a	面積	m^2
//	絕熱性係數	Pa	a_s	音速	m/s
F	力	N	b	燃料消費率	$g/(W \cdot s)$
G	質量流量	kg/s	c	間隙	m
H	高度	m	c_p	定壓比熱	$kJ/(kg \cdot K)$
H	水蒸氣分壓	Pa	c_v	定容比熱	$kJ/(kg \cdot K)$
H_t	燃料的低發熱量	kJ/kg	c_m	平均活塞速度	m/s
I	慣性矩	$kg \cdot m^2$	d	直徑	m
I_a	噴射期間	s	e	距離	m
I_x	$x-x$ 軸斷面二次矩	m^4	f	線圖係數, 摩擦係數	
K	常數		//	抗力	N
K	熱通過率	$W/(m^2 \cdot K)$	g	重力加速度	m/s^2
L	長度	m	h	焓	kJ
M	質量	kg	i	輻射吸收能	
//	旋轉力矩	$N \cdot m$	j	汽缸數	
M_a	彎矩	$N \cdot m$	k	常數	
N	出功	W	l	長度	m
P	荷重	N	m	質量	kg
Q	熱量	kJ	n	多變指數	
//	容積流量	m^3/s	n_e	引擎轉速	s^{-1}
R	反力	N	n_v	渦流旋轉速度	rad/s
//	氣體常數	$kJ/(kg \cdot K)$	p	壓力	Pa
S	行程長度, 到達距離	m	p_a	大氣壓力	Pa
S_f	安全率		p_0	標準壓力	Pa
T	扭矩	$N \cdot m$	p_e	淨平均有效壓力	Pa
//	絕對溫度	K	p_t	圖示平均有效壓力	Pa
U	內能	kJ/kg	p_m	平均有效壓力	Pa
V	容積	m^3	p_{th}	理論平均有效壓力	Pa
			q	單位質量的熱量	kJ/kg

r	半徑	m
s	距離	m
t	時間	s
$^{\circ}$	攝氏溫度	$^{\circ}\text{C}$
u	速度	m/s
v	容積	m^3
w	流速	m/s
x	座標	
$^{\prime\prime}$	x 軸方向距離	m
y	座標	
$^{\prime\prime}$	y 軸方向距離	m
z	高度	m
α	角度	rad, deg
$^{\prime\prime}$	加速度	m/s^2
$^{\prime\prime}$	傳熱傳達率	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
β	膨脹係數	
γ	熱傳導率	$\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$
δ	速度變動率	
ε	壓縮比	

ζ	面積比	
η	效率	
η_{th}	理論熱效率	
η_{thO}	鄂圖循環的理論熱效率	
η_{thD}	狄賽爾循環理論熱效率	
η_{thS}	沙巴帖循環理論熱效率	
η_{thB}	布雷通循環	
η_e	淨熱效率率	
η_i	圖示熱效率	
η_c	充填效率率	
η_s	驅氣效率	
η_{ir}	供氣效率	
η_v	容積效率	
η_f	燃燒效率	
η_m	機械效率	
θ	角度	rad, deg
$^{\prime\prime}$	絕熱溫度比	
κ	比熱比	
λ	爆發比 (壓力比)	

表1 SI基本單位

量	名 稱	記 號
長 度	公 尺	m
質 量	公 斤	kg
時 間	秒	s
電 流	安 培	A
熱力學溫度	凱 氏	K
物質質量	模 耳	mol
光 度	candela	cd
平面角	弧 度	rad
立體角	球 面 度	sr

表2 SI接頭語

倍 數	接 頭 語	記 號	倍 數	接 頭 語	記 號
10^{18}	exa	E	10^{-1}	deci	d
10^{15}	peta	P	10^{-2}	centi	c
10^{12}	tera	T	10^{-3}	milli	m
10^9	giga	G	10^{-6}	micro	μ
10^6	mega	M	10^{-9}	nano	n
10^3	kilo	k	10^{-12}	pico	p
10^2	hecto	h	10^{-15}	femto	f
10^1	deca	da	10^{-18}	atto	a

表 3 SI 單位與舊單位的比較

量	SI 單位	舊單位	換 算 率	備 考
長度	m	m, μ , Å	$1 \mu = 10^{-6} \text{ m}$, $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$	也可用 t
質量	kg	kg, t	$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$	
時間	s	s, min, h	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$, $1 \text{ h} = 3\,600 \text{ s}$	
溫度	K, °C	K, °C, °F	$1^\circ \text{F} = \left(\frac{9}{5} + 32\right)^\circ \text{C}$	也可用 °, ' , ''
平面角	rad	° , ' , ''	$1^\circ = 180/\pi \text{ rad}$	
立體角	sr			
面積	m ²	m ² , a, ha	$1 \text{ a} = 10^2 \text{ m}^2$, $1 \text{ ha} = 10^4 \text{ m}^2$	也可用 mL, L
體積	m ³	m ³ , l, L	$1 \text{ l または } L = 10^{-3} \text{ m}^3$	
角速度	rad/s			
速度	m/s	m/s, km/h	$1 \text{ km/h} = 0.36 \text{ m/s}$	也可用 m/min, km/h
加速度	m/s ²			
周波數	Hz	c/s		
轉速	s ⁻¹	rpm	$1 \text{ rpm} = 1/60 \text{ s}^{-1}$	也可用 rpm, rev/min
力	N	kgf, dyn	$1 \text{ kgf} = 9.806\,65 \text{ N}$, $1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$	
壓力	Pa	mHg, atm, mmHg	$1 \text{ mHg} = 9806.65 \text{ Pa}$, $1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa}$, $1 \text{ mmHg} = 101\,325/760 \text{ Pa}$	
應力	Pa	kgf/mm ²	$1 \text{ kgf/mm}^2 = 9.806\,65 \times 10^5 \text{ Pa}$ (N/m ²)	計算途中也可用 N/m ²
扭矩	N·m	kgf·m	$1 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 9.806\,65 \text{ N} \cdot \text{m}$	
力矩	N·m			
密度	kg/m ³	kg/m ³		
質量流量	kg/s	kg/h	$1 \text{ kg/h} = 1/3\,600 \text{ kg/s}$	
功	J	kgf·m	$1 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 9.806\,65 \text{ J}$	
能量	J		$1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$	
熱量	J	kW·h		
功率 (動力)	W	PS, kgf·m/s	$1 \text{ PS} = 7.355 \times 10^2 \text{ W}$, $1 \text{ kgf} \cdot \text{m/s} = 9.806\,65 \text{ W}$	
粘 度	Pa·s	kgf·s/m ² , cP	$1 \text{ kgf} \cdot \text{s/m}^2 = 9.806\,65 \text{ Pa} \cdot \text{s}$, $1 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$	
動粘度	m ² /s	St, cSt	$1 \text{ cSt} = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} = 1 \text{ mm}^2/\text{s}$, $1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	
比 熱	kJ/(kg·K)	kcal/(kgf·°C)	$1 \text{ kcal}/(\text{kgf} \cdot ^\circ \text{C}) = 4.186\,8 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	
熱傳導率	W/(m·K)	kcal/(m·h·°C)	$1 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ \text{C}) = 1.163 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	
熱傳導率	W/(m ² ·K)	kcal/(m ² ·h·°C)	$1 \text{ kcal}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ \text{C}) = 1.163 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	
熱通過率	W/(m ² ·K)			
燃費率	kg/J	g/PS·h	$1 \text{ g/PS} \cdot \text{h} = 0.377\,672\,7 \text{ g}/(\text{MW} \cdot \text{s})$	也可用 g/(kW·h)

目 次

第1章 緒論	1
1.1 內燃機的歷史	1
1.2 內燃機的動作原理	2
1.3 內燃機的分類與特色	4
練習題	5
第2章 內燃機的熱力學	7
2.1 溫度、熱量、比熱	7
2.2 波義耳、查理定律與完全氣體的狀態式	7
2.3 熱力學第一定律、第二定律	9
2.4 氣體的狀態變化與功	9
練習題	16
第3章 循環與熱效率	18
3.1 理論空氣循環的定義	18
3.2 鄂圖循環	19
3.3 狄賽爾循環	21
3.4 沙巴帖循環	23
3.5 燃氣輪機循環	24
3.6 各理論空氣循環的熱效率比較	27
3.6.1 壓縮比(壓縮壓力)相等時	27
3.6.2 最高壓力及出功相等時	28
3.6.3 最高壓力及最高溫度相等時	29
3.7 實際的循環	29
3.7.1 考慮多變指數的空氣循環	30

3.7.2	燃料—空氣循環	30
3.7.3	吸排汽損失的影響	31
3.7.4	燃燒過程的影響	31
3.7.5	實際的循環	32
練習題		32

第4章 燃料及燃燒 34

4.1	內燃機的燃料	34
4.2	石油的精製	34
4.3	汽油引擎用燃料	37
4.4	柴油引擎用燃料	41
4.5	燃燒的基礎	42
4.6	火花點火引擎的燃燒	48
4.7	壓縮點火引擎的燃燒	55
練習題		61

第5章 性能與計測 63

5.1	圖示平均有效壓力與圖示出功	63
5.2	淨出功與淨平均有效壓力	64
5.3	機械效率	64
5.4	熱效率	65
5.5	功、出功及扭矩	67
5.6	大氣條件對出功的影響	71
5.6.1	對地上出功性能的補正	71
5.6.2	火花點火引擎的高空性能	72
5.7	指壓計	72
練習題		74

第6章 進汽及排汽裝置 76

6.1	4行程引擎的容積效率	76
6.1.1	容積效率與充填效率	76

6.1.2	進汽門馬赫數	77
6.1.3	進汽管的脈動及慣性效果	78
6.2	混合汽的分配	78
6.3	汽門裝置	78
6.3.1	汽門	79
6.3.2	凸輪與汽門彈簧	80
6.3.3	汽門的開閉時期	80
6.4	二行程引擎的作動	81
6.4.1	驅汽的方法	81
6.4.2	驅汽方式	81
6.5	二行程引擎的驅汽效率、供汽效率及供氣比	83
6.6	標準驅汽過程	85
6.6.1	完全成層驅流	85
6.6.2	完全混合驅汽	85
6.7	增壓	86
6.7.1	增壓式引擎的循環	87
6.7.2	增壓方式	87
	練習題	89

第7章 火花塞火引擎 91

7.1	混合汽的形成	91
7.1.1	引擎的要求混合比	91
7.1.2	單純化油器	92
7.1.3	化油器的混合比調整裝置	95
7.2	各種燃料供給裝置	98
7.2.1	化油器	98
7.2.2	燃料噴射裝置	99
7.3	點火裝置	100
7.3.1	火花間隙的放電特性	100
7.3.2	可燃混合汽的火花點火與燃燒	101
7.3.3	蓄電池式點火裝置	101

7.3.4	電晶體點火裝置	103
7.3.5	磁鐵點火裝置	103
7.3.6	多汽塞	104
7.3.7	多汽缸引擎的點火順序	105
7.4	汽油引擎的燃燒室	105
7.5	迴轉引擎	107
7.6	層狀供汽引擎	108
	練習題	109

第8章 壓縮點火引擎 111

8.1	燃料噴射裝置	111
8.1.1	燃料噴射的功能	111
8.1.2	獨立式噴射泵浦	112
8.1.3	分配形噴射泵浦	114
8.1.4	共通式噴射泵浦	115
8.1.5	噴射嘴	115
8.2	噴射特性	117
8.3	噴霧特性	118
8.3.1	微粒化的過程	119
8.3.2	油粒的大小	119
8.3.3	噴霧的到達距離	122
8.4	燃燒室的形式	123
8.4.1	直接噴射式燃燒室	124
8.4.2	預燃燒室式燃燒室	126
8.4.3	渦室式燃燒室	127
8.4.4	空氣室式燃燒室	128
8.4.5	各燃燒室的比較	130
	練習題	130

第9章 內燃機排汽所致的大氣污染與其對策 131

9.1	汽車內燃機排汽所致的法令規則	131
-----	----------------	-----

9.1.1	汽車與大汽污染	131
9.1.2	大氣污染問題的推移	133
9.2	排出氣體規制	134
9.3	排出氣體測定裝置與測定法	135
9.3.1	資料氣體的抽樣	135
9.3.2	計測器	137
9.4	影響汽油引擎排汽的因子	140
9.4.1	混合比對有害氣體的影響	140
9.4.2	引擎條件的影響	141
9.5	汽油引擎的排汽對策	142
9.5.1	急速燃燒引擎	142
9.5.2	有引擎外排汽對策的裝置	144
9.6	無鉛汽油對策	145
9.7	柴油引擎的排汽規制與其對策	146
9.7.1	柴油引擎的排汽	146
9.7.2	試驗模式與規則	146
9.7.3	排汽對策	148
練習題		149

第10章 內燃機的力學 150

10.1	活 塞	150
10.1.1	活塞的運動與速度、加速度	150
10.1.2	作用於活塞的力	153
10.1.3	作用於活塞銷的力	154
10.2	曲 軸	155
10.2.1	曲柄旋轉力	155
10.2.2	曲軸的強度	156
10.3	飛 輪	158
10.3.1	飛輪的目的	158
10.3.2	飛輪的尺寸	159
10.4	引擎的平衡	161

10.4.1	單汽缸引擎的平衡	161
10.4.2	多汽缸引擎的平衡	163
10.5	曲軸的振動與其防止方法	163
練習題		164
第11章	潤滑油及潤滑法	166
11.1	潤滑的問題	166
11.2	潤滑油	167
11.3	潤滑法	169
11.4	活塞環	170
練習題		172
第12章	內燃機的冷却	173
12.1	內燃機的熱精算	173
12.2	活塞的膨脹與熱應力	175
12.3	冷却系統	177
12.3.1	液體式冷却法與散熱量	177
12.3.2	空冷式冷却法與散熱量	180
練習題		181
練習題略解		185

第1章 緒論

1.1 內燃機的歷史

內燃機是近代文明的主要角色之一，摩托車、汽車、火車、船、飛機等皆屬其例。內燃機是歷經約 100 年的演進，才成今天的形式。

Robert Street (1794 , 英) 最先企圖從蒸氣機 (steam engine) 之類的外燃機 (external combustion engine) 演變成在汽缸內燃燒燃料而作動的內燃機 (internal combustion engine) 。後來，William Barnett (1838 , 英) 發見點火前把混合汽壓縮較有利，也設計火災點火裝置等。1860 年頃發表的 Lenoir 引擎 (法) 為無壓縮電氣點火式瓦斯引擎，運轉圓滑，有數百台實用化。從此，以歐洲為中心，各國有多人開始研究內燃機，Beau De Rochas (1862 , 法) 發表增進內燃機效率必要的回條件，這完全明示現行的 4 行程方式，採用壓縮行程乃一大進步。

Nikolaus A. Otto 與 Eugen Langen (德) 1866 年製作跳躍活塞引擎，熱效率 10 %，却淘汰早先的 Lenoir 引擎，在後來的 Otto 四行程引擎出現前的 10 年間獨占市場，製造約 5000 台引擎。

Nikolaus A. Otto 在 1876 年依據 Beau De Rochas 提倡的原理，製作四行程引擎，在當時大大提升熱效率，運轉安靜，號稱無聲引擎。

Otto 引擎每 4 行程只有 1 次作功行程，旋轉易不規則，Dugald Clerk (莫) 1881 年製作今天二行程引擎之鼻祖的引擎，在巴黎博覽會推出。

1900 年頃 G. Daimler (德)、K. Benz (德) 實現以汽油為燃料、用電氣點火法而與目前汽車用汽油引擎大致同形態的內燃機。

1893 年 Rudolf Diesel (德) 發生“合理熱機的理論與構造”的論文，並製作引擎，只把空氣吸入缸內，壓縮到溫度高於任何燃料着火

溫度的狀態，藉高壓空氣把燃料成霧狀噴入其中而燃燒，熱效率達 38 %。

1.2 內燃機的動作原理

大部份內燃機為往復活塞（reciprocating piston）形，如圖 1.1 所示，活塞（piston）在汽缸（cylinder）中往復運動，出功以連桿（connecting rod）與曲柄（crank）機構傳到軸。在活塞往復運動中，汽缸容積成最小的活塞位置稱為上死點（top dead center），表成 TDC，其容積稱為餘隙容積（clearance volume）

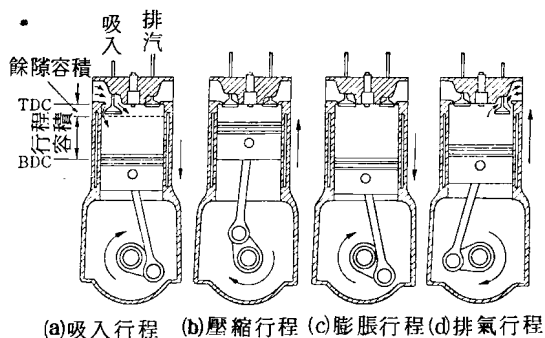


圖 1.1 4 行程循環的動作

。汽缸容積成最大的活塞位置稱為下死點（bottom dead center）（BDC）。在死點，若對活塞施加向下的力，曲柄不知要右轉或左轉才好。

藉活塞的上下運動，在汽缸內部進行稱為循環（cycle）的操作，以 4 行程（曲軸 2 旋轉）完成 1 循環的引擎稱為 4 行程引擎。以 2 行程（曲軸 1 旋轉）完成者為 2 行程引擎。4 行程引擎 1 循環如圖 1.1 所示，包括進汽行程（intake stroke）（吸進新汽）、壓縮行程（compression stroke）（壓縮新汽）、膨脹行程（expansion stroke）（燃燒氣膨脹）、排汽行程（exhaust stroke）（排出燃燒氣）四行程。在壓縮行程與膨脹行程間的上死點附近進行燃燒。只膨

脹行程對曲軸加旋轉方向的扭矩（作正功），其他行程須從外部作功。因而，為貯蓄能量，在曲軸裝飛輪（fly wheel），把膨脹行程時的一部份功當成旋轉能貯蓄於飛輪內，在其他行程取出此旋轉能，求得圓滑運轉。

2 行程引擎如圖 1-2 所示，在汽缸側面設驅汽孔（scavenge port）或排汽孔（exhaust port）取代進汽門、排汽門，隨活塞的上升

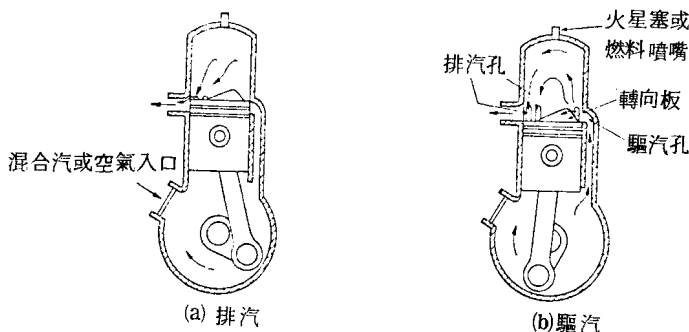


圖 1-2 2 行程循環（橫斷驅汽）

，成為氣密的曲柄室（crank case）成為真空，從進汽孔吸入空氣（汽油引擎是空氣與燃料的混合汽）。活塞欲下降時，進汽孔開關，曲柄室內的空氣壓力增高，等待驅動汽孔因活塞下降而打開，空氣進入汽缸內。同時把汽缸內燃過的氣體從排汽孔趕出外部。

圖 1-2 (a) 是點火、爆炸（ignition and explosion）後，移到排汽（exhaust）的情形，隨活塞的下降，排汽孔打開，藉壓力差排出燃燒氣。活塞進一步下降的話，如 (b) 打開驅汽孔，從曲柄室把新鮮的空氣送入汽缸內，趕出先前的氣體，此稱驅汽（scavenging）。其次，活塞開始上升，關閉驅流孔、排汽孔後進行壓縮及吸汽（compression and suction），亦即，壓縮汽缸內的空氣，同時把新鮮的空氣吸入曲柄室，進行點火、爆炸，如上以曲軸的 1 旋轉完全完成 1 循環。

。

汽油引擎用 2 行程循環時，由以上的構造，新汽的混合連同排汽排