

中等專業學校教學用書

拖拉机的原理、 構造和計算

第二册

卡列里斯基赫、阿帕雪夫、巴尔斯基著



机械工业出版社

中等專業學校教學用書



拖拉机的原理、構造和計算

第二冊

吳起亞、馮中譯

苏联汽車拖拉机工業部教育司批准为机
器制造中等技術学校拖拉机專業教科書

机械工業出版社

1956

出版者的話

原書經蘇聯汽車拖拉機工業部教育司批准為機器製造中等技術學校拖拉機專業的教科書。全書共三冊，第二冊共分十五章：第一章至第八章講述拖拉機發動機原理，第九章講述發動機動力學，第十章至十五章講述發動機主要機件和系統的構造和計算。

關於發動機的一般性問題，已於本課程的第一冊中闡明，本冊中不再討論。

本冊第十一章（第2和3節）和第十四章係技術科學候補博士雷佐（А. П. Лызо）所寫，其餘各章節均為技術科學候補博士阿帕雪夫（М. Д. Апашев）所寫。

參加本書翻譯和校對工作的為南京農學院吳起亞同志和天津大學馮中同志。

本書除了作為中等技術學校拖拉機專業的教科書外，對從事拖拉機設計和製造的工程技術人員也有參考價值。

No. 0674

1956年4月第一版 1956年4月第一版第一次印刷

850×1168¹/₃₂ 字數244千字 印張9³/₄ 0.001—4,000冊

機械工業出版社（北京東交民巷27號）出版

機械工業出版社印刷廠印刷 新華書店發行

北京市書刊出版業營業許可證出字第003號 定價（8）1.64元

目 次

緒言	7
第一章 拖拉機發動機的分類	9
第二章 發動機內燃料的燃燒	11
1 燃料的成分	11
2 燃燒反應。理論的空氣需要量。過量空氣係數	11
3 燃燒生成物的成分	14
4 殘餘氣體係數和燃燒時氣體分子數的變更	17
5 燃燒前後諸氣體的比熱	19
6 燃料的熱值	20
第三章 發動機的實際循環	22
1 理論循環的分類	22
2 發動機實際循環的工作過程和示功圖	23
3 配氣相角	25
4 進氣過程	28
5 壓縮過程	34
6 燃燒過程	36
7 膨脹過程	44
8 排氣過程	45
9 表示發動機性能的諸參數	47
10 二衝程發動機的實際工作過程	59
第四章 拖拉機柴油機的工作過程	65
1 柴油機內燃燒過程的特點	65
2 不同因素對燃料着火和燃燒的影響	66
3 燃料的霧化和混合氣的形成	73
4 油流的射程和錐度	78
5 柴油機的燃燒室	81
6 柴油機的起動	92
第五章 汽化器式發動機的工作過程	94
1 汽化器發動機中燃燒過程的特點	94

4	
2	運轉因素對發動機性能的影響 99
3	構造因素對汽化器發動機性能的影響 107
4	汽化器發動機的起動 110
第六章	煤氣發動機工作過程的特點 112
1	改用發生爐煤氣後發動機功率降低的原因 112
2	增加煤氣發動機功率的方法 115
第七章	拖拉機發動機熱計算的例題 118
1	柴油機的熱計算 118
2	汽化器發動機的熱計算 122
第八章	拖拉機發動機的特性曲線 127
1	速度特性曲線 127
2	載荷特性曲線 130
3	拖拉機發動機的調速特性曲線 132
4	調節特性曲線 133
5	惰轉特性曲線 135
第九章	曲柄連桿機構的運動學及動力學 137
1	曲柄連桿機構的運動學 137
2	曲柄連桿機構的動力學 142
3	發動機的平衡 155
第十章	曲柄連桿機構零件的構造和計算 166
1	發動機零件的強度及磨損計算的基本原則 166
2	汽缸體-曲軸箱的構造及計算 168
3	活塞組合的構造及計算 173
4	連桿的構造及計算 199
5	曲軸的構造及計算 212
6	發動機飛輪的計算 228
第十一章	配氣系統的構造及計算 233
1	主要配氣零件的構造 233
2	配氣系統主要尺寸的選擇 239
3	“基洛夫 Д-35”發動機配氣機構零件的計算 255
第十二章	拖拉機發動機的供給系統的計算 265
1	拖拉機柴油機的供給系統 265

2 拖拉機汽化器發動機的供給系統	273
第十三章 發動機潤滑系統的計算	281
第十四章 冷却系統的計算	290
第十五章 調速器的計算	295
附 錄 1 拖拉機發動機的主要參數	302
2 計算曲柄連桿機構的輔助表格	304
參考文獻	307
中俄名詞對照表	308

緒 言

俄羅斯發明家馬明(Я. В. Мамин)的工作於上世紀 90 年代即已奠定了祖國拖拉機製造業和發動機製造業的基礎。

世界上製造第一台無壓縮機的高壓縮比拖拉機發動機(以石油原油運轉)的優先權是屬於馬明的。

在發動機的原理和計算法的發展方面,以及在發動機構造的研究方面,俄羅斯學者,特別是蘇聯學者的工作具有很大的價值。

格林涅偉茨基(В. И. Гриневецкий)教授於 1907 年首先提出了考慮氣體比熱變化的發動機熱計算方法。他並提出了下列的新概念:分子變更係數,放熱係數,充氣係數,殘餘氣體係數。到現在為止,不論是在設計新型發動機時或是在研究現有發動機的性能時,都廣泛採用格林涅偉茨基教授所提出的熱計算方法。

晚近,馬辛格(Е. К. Мазинг)教授導出了混合循環平均指示壓力及其燃燒方程式,以及許多其他方程式,到現在為止,在發動機的熱計算中都應用這些方程式。煤氣發生爐的發生過程原理也是他首先擬定的,辛紐特斯基(В. В. Синеутский)教授也獨立地(與馬辛格教授無關)導出了混合循環平均指示壓力的方程式。

蘇聯學者布利林格(Н. Р. Брилинг)教授,斯傑赤金(Б. С. Стечкин)教授,索樂克-諾維茨基(В. И. Сорок-Новицкий)教授,彼得羅夫(В. А. Петров)教授,卡里士(Г. Г. Калиш)教授,奧爾林(А. С. Орлин)教授,李布羅維奇(Б. Г. Либрович)教授,麥理庫莫夫(Т. М. Мелькумов)教授等的工作促進了內燃機原理的發展。

連鎖燃燒過程原理的創始者科學院院士西門諾夫(Н. Н. Семенов)在燃料燃燒的一般原理方面的工作和索考力克(А. С. Сокопик)教授在發動機中燃料爆震問題方面的工作在內燃機原理的發展上有很大的價值。

俄羅斯學者——馬爾欽斯(Л. К. Мартенс)教授是小型內燃機動力學原理的奠基者。在奈以曼(И. Т. Нейман)教授、克利門科(Л. В. Клименко)教授、李沃夫(Е. Д. Львов)教授和馬里亞文斯基(А. М. Малявинский)講師等的工作中，小型發動機動力學原理在汽車拖拉機發動機強度計算上得到了應用和發展。

潤滑流體動力學原理的創始者是彼得羅夫(Н. П. Петров)教授。由於奧爾洛夫(П. И. Орлов)的工作，這一原理在汽車拖拉機發動機軸承的計算上得到了應用。

爲了改善現有的和創造新型的發動機，應該在發動機的工作過程原理、動力學、計算和構造方面開展更大規模的工作。

第一章 拖拉機發動機的分類

絕大多數的拖拉機發動機為內燃機，在內燃機中，燃料的燃燒過程和所得的熱能轉變為機械功都在發動機的汽缸內進行。

燃料和燃燒所必需的空氣進入發動機汽缸中。在燃料和空氣的混合氣燃燒時所放出的熱，引起充滿汽缸中的氣體的壓力增加和膨脹。燃燒生成物膨脹時產生機械功，此機械功經過活塞，活塞銷及連桿傳給發動機的曲軸。

拖拉機發動機可根據下列的主要特徵來分類：

1. 依所採用的燃料：

- a) 用液體燃料運轉的發動機(柴油、粗汽油、煤油、汽油)；
- б) 用氣體燃料運轉的發動機。

2. 依形成混合氣的方法：

- a) 在缸內形成混合氣的發動機(柴油機)；
- б) 在缸外形成混合氣的發動機(汽化器發動機、煤氣發動機)。

3. 依充氣的點火方法：

- a) 壓燃式發動機(柴油機)；
- б) 電花點火式發動機(汽化器發動機、煤氣發動機)。

4. 依完成工作過程的衝程數：

- a) 四衝程發動機；
- б) 二衝程發動機。

5. 依汽缸數目——單缸、二缸、四缸和六缸發動機。

6. 依汽缸的排列：

- a) 單列汽缸(直立的和水平的)發動機；
- б) 雙列汽缸(V式和水平的)發動機。

發動機型式的選擇要看它的用途和對它的要求而定。每種型式的發動機有一定的特點。例如，煤油發動機不能用柴油運轉，甚

至改用成分和煤油很相近的粗汽油時，工作效率也會降低。

四衝程柴油機使用起來最經濟和可靠，所以在大功率和中等功率的拖拉機中，得到了廣泛的流行。功率小的拖拉機主要是採用煤油和汽油汽化器式發動機，因為它最簡單而又便宜。爲了利用地方性的燃料（木材、泥煤磚、煤），就應用煤氣發動機。二衝程汽化器發動機被用作某些功率大的或中等功率的拖拉機柴油機的起動發動機。

四缸、直立、單列的發動機在拖拉機上應用得最廣。

第二章 發動機內燃料的燃燒

1 燃料的成分

內燃機採用液體燃料及氣體燃料。

液體燃料主要是由碳(C)及氫(H₂)所組成，在某些情況下，還含有少量的氧(O₂)。碳、氫和氧化合成爲 C_mH_n 和 C_mH_nO_r 的化合物，而燃料則爲一些具有上列形式的碳氫化合物的混合物。

把燃料加以化學分析，可確定一公斤燃料內的碳、氫和氧的重量百分數。假若碳的重量百分數爲 g_c ，氫爲 g_{H_2} ，氧爲 g_{O_2} ，則

$$g_c + g_{H_2} + g_{O_2} = 1 \text{ 公斤。} \quad (1)$$

用於煤氣發動機的氣體燃料，主要地由可燃性煤氣的混合物所組成：如一氧化碳(CO)、氫(H₂)及 C_mH_n 類型的碳氫化合物。發生爐煤氣還含有不能燃燒的混合物：如二氧化碳氣(CO₂)和氮氣(N₂)。氣體燃料的成分以一莫爾(或 1 公尺³)氣體內所佔的容積百分比比如 r_{CO} 、 r_{H_2} 、 r_{O_2} 、 r_{N_2} 和 r_{CO_2} 等來表示，在這種情況下

$$r_{CO} + r_{H_2} + r_{O_2} + r_{N_2} + r_{CO_2} = 1 \text{ 莫爾 (或 1 公尺}^3\text{)。} \quad (2)$$

表 1 和 2 所列是各種液體、固體和氣體燃料的成分。

2 燃燒反應。理論的空氣需要量。過量空氣係數

燃料在發動機汽缸內燃燒時，燃料中的可燃部分被空氣裏的氧氣所氧化。

燃燒的完全與否視進入發動機汽缸內的氧氣量而定。當燃燒完全時，生成二氧化碳氣(CO₂)及水蒸汽(H₂O)。由於氧氣不足而燃燒不完全時，一部分碳燃燒成二氧化碳(CO₂)，而一部分碳則燃燒成一氧化碳(CO)。

燃料的燃燒可用下列反應方程式表示：

表1 各種燃料的成分、熱值和分子量〔2〕^①

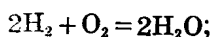
燃 料	燃 料 成 分 (%)						熱 值 (仟卡/公斤)		分 子 量(近 似值)
	碳C	氫H ₂	氧O ₂	氮N ₂	灰分	水分	高	低	
原油	87.4	12.5	0.1	—	—	—	10800	10100	182
黑油	86.0	12.0	1.65	0.05	共計	0.3	10520	9870	—
太陽油	85.7	13.3	1.0	—	—	—	10600	9950	186
煤油	84.9	14.4	0.7	—	—	—	11180	10400	184
粗汽油	85.1	14.3	0.6	—	—	—	11180	10400	—
汽油	85.4	14.2	0.3	—	共計	0.1	11170	10400	114
酒精(無水)	51.85	12.72	35.43	—	—	—	7100	6410	74
天然乾燥木材	50~52	6.0	42.0	0.6	0.4~ 0.2	20.0	—	4850	—
木炭	85.0	3.0	7.0	16.0	—	15~20	—	6800~ 7900	—
無煙煤	86.45	2.0	2.2	—	5.9	3.45	—	7484	—

① 方括弧內的數字是指書末參考文獻所列書籍的編號。

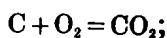
表2 由不同的固體燃料所得到的發生爐煤氣的平均成分

燃 料	煤 氣 成 分 (%)						低熱值 仟卡/公尺 ³
	一氧化碳 CO	氫H ₂	甲烷 CH ₄	氧O ₂	二氧化碳 CO ₂	氮N ₂	
木炭磚	19.3	6.8	2.0	0.1	7.7	64.1	930
木塊	19.5	16.3	2.5	1.7	9.8	50.2	1224
木屑	22	16.5	1.4	—	13.0	47.1	1214
木炭	28.7	4.6	1.8	—	2.6	62.3	1142
無煙煤	27.8	4.5	1.3	—	2.5	63.9	1070

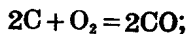
對於氫



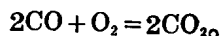
對於碳



和



對於一氧化碳



考慮了燃料中各組成元素的原子量以及其重量百分比，就可以根據反應方程式決定燃料燃燒時所必需的氧氣量。把1公斤氫氣(H₂)燃燒成水(H₂O)需要8公斤氧氣(O₂)。把1公斤碳(C)燃燒成二氧化碳(CO₂)需要 $\frac{8}{3}$ 公斤氧氣(O₂)，燃燒成一氧化碳(CO)需要 $\frac{4}{3}$ 公斤氧氣(O₂)。每公斤一氧化碳(CO)燃燒成二氧化碳

(CO₂) 需要 $\frac{4}{7}$ 公斤氧氣(O₂)。

用莫爾表示燃燒燃料的可燃成分 1 公斤時所需要的氧氣量，則每公斤氫(H₂)需要 $\frac{1}{4}$ 莫爾氧氣(O₂)；每公斤碳(C)完全燃燒時，需要 $\frac{1}{12}$ 莫爾氧氣(O₂)，不完全燃燒時，需要 $\frac{1}{24}$ 莫爾氧氣(O₂)；每莫爾一氧化碳(CO) 需要 $\frac{1}{2}$ 莫爾氧氣(O₂)。

根據上面所述，可以計算燃燒每公斤燃料所需要的氧氣量，這種燃料的重量百分比為

$$g_C + g_{H_2} + g_{O_2} = 1。$$

燃燒 1 公斤這種成分的燃料所需要的氧氣重量為

$$l'_0 = \frac{8}{3}g_C + 8g_{H_2} - g_{O_2} \text{ 公斤。} \quad (3)$$

同樣的氧氣量如用莫爾表示，則

$$L'_0 = \frac{g_C}{12} + \frac{g_{H_2}}{4} - \frac{g_{O_2}}{32} \text{ 莫爾。} \quad (4)$$

在計算時，假定空氣由下列部分組成：以重量計，則氧佔 23%，氮佔 77%；以體積計，則氧佔 21%，氮佔 79%。

因此可以計算每公斤燃料燃燒時所需要的空氣量的公斤數或莫爾數：

$$l_0 = \frac{l'_0}{0.23} = \frac{\frac{8}{3}g_C + 8g_{H_2} - g_{O_2}}{0.23} \text{ 公斤空氣} \quad (5)$$

及

$$L_0 = \frac{L'_0}{0.21} = \frac{\frac{g_C}{12} + \frac{g_{H_2}}{4} - \frac{g_{O_2}}{32}}{0.21} \text{ 莫爾空氣。} \quad (6)$$

已知空氣分子量等於 28.96，所以可以根據它的重量計算所需要空氣量的莫爾數。

$$L_0 = \frac{l_0}{28.96} \text{ 莫爾空氣。} \quad (7)$$

假如燃燒 $C_mH_nO_r$ 類型的燃料，則燃燒這種燃料 1 莫爾所需要的氧氣量可從下式求出，即 1 莫爾 $C_mH_nO_r + \left(m + \frac{n}{4} - \frac{r}{2}\right)$ 莫爾 $O_2 = m$ 莫爾 $CO_2 + \frac{n}{2}$ 莫爾 H_2O ，而每莫爾燃料所需要的空氣莫爾數為：

$$L_0 = \frac{m + \frac{n}{4} - \frac{r}{2}}{0.21} \text{ 莫爾空氣。} \quad (8)$$

燃燒可能在空氣不足時進行，亦可能在空氣過多時進行。因此要根據過量空氣係數 α 來衡量燃料的燃燒，也就是按照進入汽缸的實際空氣量對理論上的空氣需要量之比值來衡量：

$$\alpha = \frac{l}{l_0} = \frac{L}{L_0} \quad (9)$$

各種型式發動機的係數 α 的值如下：

發動機型式	α
汽車拖拉機柴油機	1.1~1.6
煤油發動機	0.8~1.1
汽油發動機	0.9~1.1
煤氣發動機	1.0~1.2

3 燃燒生成物的成分

燃燒生成物的成分視係數 α 而定， α 決定燃燒過程進行的情況。

當 $\alpha \geq 1$ 時，保證有足夠的氧氣供燃料燃燒之用，燃燒生成物含有二氧化碳 (CO_2)、水蒸汽 (H_2O)、氮氣 (N_2) 和過量的氧氣 (O_2)。

根據上列的燃燒反應和液體燃料的重量百分比，可以計算燃燒 1 公斤燃料時的燃燒生成物中所包括的諸氣體的分量：

$$M_{\text{CO}_2} = \frac{\xi_{\text{C}}}{12} \text{ 莫爾；} \quad (10)$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\xi_{\text{H}_2}}{2} \text{ 莫爾；} \quad (11)$$

$$M_{\text{N}_2} = 0.79\alpha L_0 \text{ 莫爾；} \quad (12)$$

$$M_{\text{O}_2} = 0.21(\alpha - 1)L_0 \text{ 莫爾。} \quad (13)$$

燃燒生成物的總量等於各成分的和，

$$M_2 = M_{\text{CO}_2} + M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{N}_2} + M_{\text{O}_2} \text{ 莫爾，} \quad (14)$$

以公式(10)、(11)、(12)及(13)的值分別代入上式，得

$$M_2 = -\frac{\mathcal{G}_C}{12} + \frac{\mathcal{G}_{H_2}}{2} + 0.79\alpha L_0 + 0.21(\alpha - 1)L_0$$

$$= -\frac{\mathcal{G}_C}{12} + \frac{\mathcal{G}_{H_2}}{2} + \alpha L_0 - 0.21L_0 \text{ 莫爾}$$

以公式(6)的 L_0 值代入上式, 得

$$M_2 = -\frac{\mathcal{G}_C}{12} + \frac{\mathcal{G}_{H_2}}{2} + \alpha L_0 - \left(-\frac{\mathcal{G}_C}{12} + \frac{\mathcal{G}_{H_2}}{4} - \frac{\mathcal{G}_{O_2}}{32}\right)$$

$$= \alpha L_0 + \frac{\mathcal{G}_{H_2}}{4} + \frac{\mathcal{G}_{O_2}}{32} \text{ 莫爾。} \quad (15)$$

對於體積百分比為

$$r_{CO} + r_{H_2} + r_{C_m H_n} + r_{O_2} + r_{CO_2} + r_{H_2O} + r_{N_2} = 1 \text{ 莫爾} \quad (16)$$

的氣體燃料, 燃燒 1 莫爾時的燃燒生成物中各氣體成分的分量為

$$M'_{CO_2} = r_{CO} + r_{C_m H_n} m + r_{CO_2} \text{ 莫爾;} \quad (17)$$

$$M'_{H_2O} = r_{H_2} + r_{C_m H_n} \frac{n}{2} + r_{H_2O} \text{ 莫爾;} \quad (18)$$

$$M'_{N_2} = 0.79\alpha L_0 + r_{N_2} \text{ 莫爾;} \quad (19)$$

$$M'_{O_2} = 0.21(\alpha - 1)L_0 \text{ 莫爾。} \quad (20)$$

燃燒生成物的總量為

$$M'_2 = M'_{CO_2} + M'_{H_2O} + M'_{N_2} + M'_{O_2} \text{ 莫爾。} \quad (21)$$

當燃料燃燒於氧氣不足的情況下時, 即 $\alpha \leq 1$ 時, 我們可以認為, 由於燃料中的氫和氧氣的化學親和力比碳和氧氣的化學親和力為大, 故氫將完全燃燒。碳和剩餘的氧氣發生反應, 一部分燃燒成二氧化碳(CO_2), 一部分燃燒成一氧化碳(CO)。

假如用 x 表示形成一氧化碳的碳量, 用 y 表示形成二氧化碳的碳量, 則

$$x + y = \mathcal{G}_C, \quad (22)$$

因為包含在空氣中和燃料中的氧氣莫爾數等於在燃料內的氫和碳燃燒時所消耗的氧氣莫爾數, 於是寫出下列方程式

$$\alpha \left(-\frac{\mathcal{G}_C}{12} + \frac{\mathcal{G}_{H_2}}{4} - \frac{\mathcal{G}_{O_2}}{32} \right) + \frac{\mathcal{G}_{O_2}}{32} = \frac{\mathcal{G}_{H_2}}{4} + \frac{y}{12} + \frac{x}{24}。$$

但

$$\frac{\mathcal{G}_C}{12} + \frac{\mathcal{G}_{H_2}}{4} - \frac{\mathcal{G}_{O_2}}{32} = 0.21L_0。$$

故

$$\alpha \times 0.21 L_0 = \frac{\xi_{H_2}}{4} - \frac{\xi_{O_2}}{32} + \frac{y}{12} + \frac{x}{24} \quad (23)$$

將公式(22)及(23)聯立解之,對於1公斤燃料而言,得

$$x = 5.04(1 - \alpha) L_0 \text{ 公斤碳}; \quad (24)$$

$$y = \xi_c - 5.04(1 - \alpha) L_0 \text{ 公斤碳}。 \quad (25)$$

燃燒生成物的各成分的莫爾數為:

$$M_{CO_2} = \frac{y}{12} = \frac{\xi_c}{12} - 0.42(1 - \alpha) L_0 \text{ 莫爾}; \quad (26)$$

$$M_{CO} = \frac{x}{12} = 0.42(1 - \alpha) L_0 \text{ 莫爾}; \quad (27)$$

$$M_{H_2O} = \frac{\xi_{H_2}}{2} \text{ 莫爾}; \quad (28)$$

$$M_{N_2} = 0.79\alpha L_0 \text{ 莫爾}。 \quad (29)$$

把 M_{CO_2} , M_{CO} , M_{H_2O} 及 M_{N_2} 的值代入方程式(14), 簡化後, 得燃燒生成物的總量為

$$M_2 = \alpha L_0 + \frac{\xi_{H_2}}{4} + \frac{\xi_{O_2}}{32} - 0.21(\alpha - 1) L_0 \text{ 莫爾}。 \quad (30)$$

假若在汽化器發動機內, 燃料和空氣的混合氣中的燃料成分加濃, 也就是燃燒是在 α 值較小的情況下進行時, 則燃燒生成物內的二氧化碳量將減少, 而一氧化碳量增加; 並可能達到這樣一種程度, 致當時的氧氣量甚至不够用來形成一氧化碳。在這種情形下, 燃燒生成物內將發現游離的碳, 這些碳以煤煙形式沉積下來並造成黑煙。

可燃混合氣內的氧氣僅足够生成一氧化碳時的 α 值叫做臨界值 α_{kp} 。當 α 值接近臨界值時, 發動機的工作就不經濟, 不穩定, 其特徵是功率顯著降低。

在 α_{kp} 時, 全部的碳燃燒成一氧化碳, $y = 0$, 即

$$\xi_c - 5.04(1 - \alpha_{kp}) L_0 = 0,$$

故

$$\alpha_{kp} = 1 - \frac{\xi_c}{5.04 L_0} \quad (31)$$

在液體燃料, α_{kp} 的值普通變動在 0.6~0.67 之間。