



内燃机 工作过程与计算

吉林工业大学 梁志勤 编著



内 容 简 介

本书主要叙述了内燃机工作过程及其计算方法。介绍了工作介质的性质，以及气缸中传热的有关计算方法。对于内燃机的换气、燃烧机理等方面的问题均分别较系统地作了论述。

本书主要供从事内燃机工程方面的科技人员使用，亦可供有关大专院校的学生学习参考。

封面设计： 马腾骧

责任编辑： 林先根

内燃机工作过程与计算

吉林工业大学 黎志勤 编著

*

吉林人民出版社出版 吉林省新华书店发行

长春新华印刷厂印刷

*

850×1168毫米32开本 12.875印张 2插页 303,000字

1984年6月第1版 1984年6月第1次印刷

印数：1—3,260册

统一书号：15091·200 定价：1.90元

前 言

在内燃机中,燃料燃烧所放出的热量,是通过气缸中所进行的工作循环而转化为机械能的。众所周知,评价内燃机工作循环的主要指标有:平均指示压力;指示效率;燃烧期间的最高燃烧压力与压力增长率;排气品质;以及标志内燃机热负荷指标之一的膨胀终了时的气体温度等。

因此,要深入研究内燃机整机性能指标,必须首先抓住工作循环热功转换的质和量两个方面来加以分析。内燃机的示功图综合的反映出了工作循环的品质。

内燃机的示功图犹如人体的心电图。由它可获得许多重要的信息,这里仅择其几例并作简要说明。利用不同的示功图,经过适当的整理和计算可求出:

1. 表征整个工作过程的主要热力指标——平均指示压力 p_i 和指标热效率 η_i 等。

由 $P-V$ 示功图上可直接求得指示压力 P_i 。其方法是用求积仪测出 $P-V$ 图的面积 F (毫米²),用示功图的长 L (毫米) 除之,得示功图的平均高度

$$h_i = \frac{F}{L} \text{ (毫米)}$$

而示功图的平均高度乘以示功图的压力标定系数 K (公斤/厘米²/毫米),即得平均指示压力

$$P_i = K h_i \text{ (公斤/厘米}^2\text{)}$$

在此基础上还可求得：指示功率 N_i 、摩擦功率 N_m 、指示热效率 η_i 和机械效率 η_m 等有关性能指标。

2. 研究燃烧过程所必需的主要特征参数。

(1) 最大燃烧压力 P_z 、压力升高率 $\frac{dp}{d\varphi}$ 、诱导期 θ_1 、明显燃烧期 θ_2 以及最大燃烧压力点至上止点的角度 θ_3 ——燃烧及时性等，如图 0—1 所示。

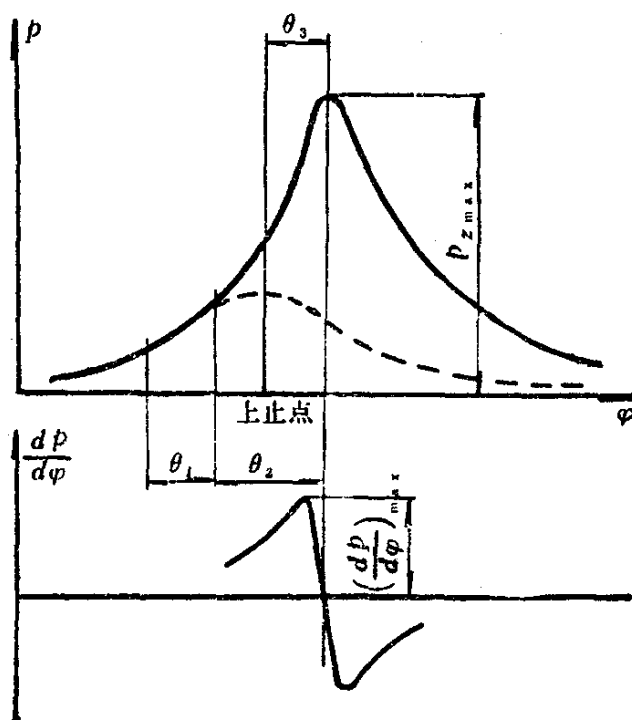


图 0—1

(2) 燃烧(循环)变动率 δ 。图 0—2 是当发动机工况一定时，实际拍摄的燃烧压力变动图。试验证明，不论是汽油机还是柴油机，这种燃烧压力变动总是难免的。循环变动对内燃机的经济性、振动、噪声以及零部件的机械负荷均有影响。近年来人们对此进行了大量的研究工作，逐步统一为用循环变动率来评价燃烧变动情况，其表达式为

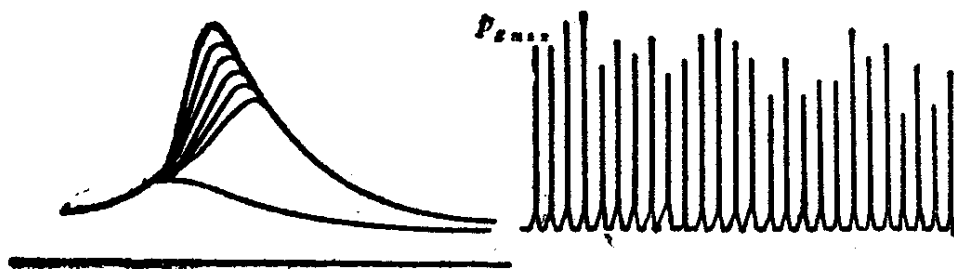


图 0—2 燃烧压力变动图

$$\delta = \frac{\text{标准偏差}}{\text{数学期望}} \times 100\%$$

或

$$\delta = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^n p_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i \right)^2 \right]}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i} \times 100\%$$

式中 n 为采样的循环数，考虑到燃烧变动是个随机过程，为使循环平均值具有代表性，因此采样的循环数应尽可能的多； p_i 为每一循环中最大燃烧压力值；在一般顶置气门汽油机中， δ 值不应大于 10%，一般为 3~5%，最好为 1.0~1.5%。

(3) 根据示功图进行燃烧放热规律 $\frac{dQ_x}{d\varphi}$ 的计算。

(4) 非正常燃烧的分析。对于燃烧过程，在很多情况下，拍摄压力波形图的目的在于研究非正常燃烧。图 0—3 所示，是汽油机的燃烧压力波形的示意图，除正常燃烧波形外，均为非正常燃烧压力波——表面点火、爆燃。

3. 反映工作过程各个阶段的特征参数。

这些特征参数主要有：压缩和膨胀平均多变指数 n_1 和 n_2 ；

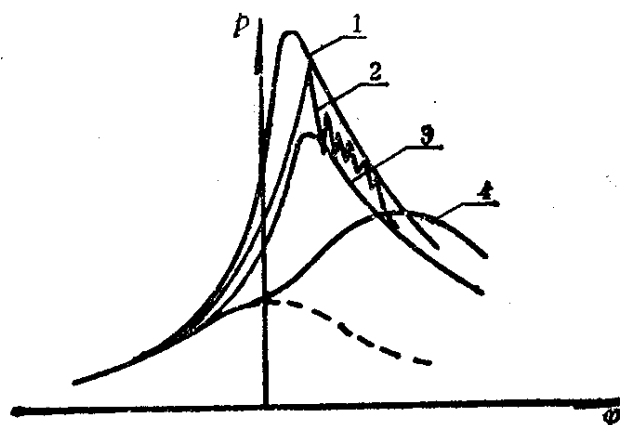


图 0—3

1—表面点火；2—爆燃；3—正常燃烧；4—过后燃烧。

泵气损失以及换气过程的其它有关参数等。

总之，示功图既能定性，也能定量地显示出工作循环的实际情况，获得评价工作循环的有关参数和指标。由此则不难对整个工作过程或各个不同阶段进展的完善程度作出正确的判断。正是由于这些缘故，示功图就成为人们研究内燃机工作过程不可缺少的有效工具。要设计和改进发动机，或评定内燃机产品，也都必须取得示功图并对其进行全面分析，否则也将是不可思议的。

由于内燃机工作循环及其示功图具有如此重大的意义，这就促使从事内燃机研究的科学工作者去探索和创立反映内燃机实际工作循环的理论模型，借以指导实践，促进内燃机制造业的迅速发展。在这方面，不少的内燃机科学工作者曾作出了有益的贡献。

在现今条件下，由于电子计算机的广泛应用，给内燃机理论研究开辟了更加宽广的前景。在热力学、传热学、流体力学、燃烧学、发动机运动学和综合大量试验资料的基础上，拟定精确计算内燃机工作循环的数学模型，就具有特别重要的意义。

本书是在大专院校“内燃机理论”的基础上，吸收了国内外

有关资料编写而成的。它着重反映了内燃机基础理论、基础知识及计算方法。全书共分四篇，第一篇概括地阐述了内燃机工作介质的性质及气缸中传热问题。第二篇比较详细地论述了影响高速内燃机进气过程的基本因素，同时对过后充气过程亦作了较系统的分析与计算，并对内燃机中非定常流动作了简介。第三篇比较完整地阐述了内燃机燃烧过程的机理及其计算方法。第四篇比较系统地介绍了内燃机工作过程的经典热计算和电算，但未涉及二冲程机工作过程的计算。

目前，由于时间和条件所限，本计算方法所提供的某些经验公式和有关系数，还是很局部的，还需要在不断实践的基础上，做更广泛的统计工作。但是，可以肯定，随着这种计算方法的更广泛应用，将会促进实践的深化，积累更多的第一性资料，使这种计算方法进一步完善，更有效地指导内燃机的设计和试验研究工作向前发展。

本书的读者对象是具备一定基础理论知识和实际经验的本专业科技人员，亦可作为有关大专院校学生的专题学习参考资料。

本书承长春汽车研究所研究室主任戴激工程师审阅，并提出了很多宝贵的意见。在本书编写过程中，还得到吉林工业大学内燃机教研室同志们的不少帮助。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者经验不足，书中存在的问题，欢迎读者批评指正。

作 者

1982年9月于吉林工业大学

本书常用符号及单位

使用说明 本表所列符号仅为本书各篇常用者，有些专用符号未予收入（或列在各有关章节之前），但在文中出现时均作了说明。

符 号	名 称	单 位
g_c	一公斤燃料中碳所占的公斤数	
g_H	一公斤燃料中氢所占的公斤数	
g_o	一公斤燃料中氧所占的公斤数	
L_0	燃烧一公斤燃料理论上所需的空气量	公斤莫尔/公斤
L	燃烧一公斤燃料实际所需的空气量	公斤莫尔/公斤
M_s	燃烧产物总量	公斤莫尔/公斤
M_r	残余废气量	公斤莫尔/公斤
γ	残余废气系数	
β_0	化学分子改变系数	
β	实际分子改变系数	
β_x	瞬时分子改变系数	
α	过量空气系数	
α_x	瞬时过量空气系数	
α_g	传热系数	大卡/米 ² 小时℃
T_r	排气温度	K

符 号	名 称	单 位
p_e	排气压力	公斤/厘米 ²
T_a	进气温度	K
p_a	进气压力	公斤/厘米 ²
η_v	充气系数	
p_c	压缩终点压力	公斤/厘米 ²
T_c	压缩终点温度	K
p'_c	燃烧终点压力	公斤/厘米 ²
T'_c	燃烧终点温度	K
p_b	膨胀终点压力	公斤/厘米 ²
T_b	膨胀终点温度	K
p_i	平均指示压力	公斤/厘米 ²
p_e	平均有效压力	公斤/厘米 ²
p_m	平均机械损失压力	公斤/厘米 ²
N_i	指示功率	马力
N_e	有效功率	马力
g_i	指示油耗率	克/马力·小时
g_e	有效油耗率	克/马力·小时
η_i	指示效率	
η_e	有效效率	
η_m	机械效率	

目 录

前言	1
本书常用符号及单位	6
第一篇 内燃机工作介质的性质和气缸中的传热问题	1
第一章 内燃机的工作介质及其性质	1
第一节 气体成分的计算	2
第二节 工质等压比热与等容比热之比值的计算	16
第三节 气体的热分解	35
第二章 内燃机中的传热问题	54
第一节 内燃机中的传热损失	55
第二节 气缸内的传热系数	57
第二篇 内燃机的换气、压缩及膨胀过程	70
第三章 四冲程内燃机的排气过程	71
第一节 排气和扫气时期	71
第二节 排气温度和压力	75
第四章 四冲程内燃机的进气过程	78
第一节 发动机的循环充气量	80
第二节 过后充气量的计算	91
第三节 发动机的充气系数	97
第四节 四冲程内燃机的换气损失	123
第五节 内燃机中非定常流动简介	125
第五章 压缩和膨胀过程	169
第一节 压缩过程	169
第二节 膨胀过程	175

第三节 根据多变指数变化曲线, 分析工作过程	180
第三篇 燃烧过程	184
第六章 燃烧理论概述	184
第一节 化学反应动力学的基本知识	185
第二节 可燃混合物的发火理论	214
第七章 气流中火焰的传播	240
第一节 火焰前锋面和火焰传播速度的概念	241
第二节 层流中的火焰传播速度	242
第三节 紊流中的火焰传播速度	249
第四节 关于扩散燃烧的概念	257
第八章 燃烧过程的计算	259
第一节 概述	259
第二节 内燃机中燃烧放热规律	261
第三节 燃烧过程的计算	283
第四节 应用高速摄影技术研究内燃机的燃烧过程	307
第四篇 内燃机工作过程的计算	314
第九章 实际循环的经典热计算	314
第一节 概述	314
第二节 汽化器式发动机实际工作循环和外特性的计算	315
第十章 实际循环的电算法	349
第一节 概述	349
第二节 内燃机气缸内的微分方程	351
第三节 微分方程组的求解	364
第四节 计算实例	372
附录 汽油机循环模拟源程序	387
主要参考文献	399

第一篇 内燃机工作介质的性质和气缸中的传热问题

在内燃机实际工作循环中，工质的质和量是随时间而变化的。为了研究燃烧前后工质成分的改变，必须进行热化学计算。

为了评价内燃机的工作过程和热负荷情况，必须知道进入气缸的燃料热量是如何转换成三个基本部分的——排气带走的热量、室壁导出的热量和机械功。近年来，随着内燃机不断强化，缸内燃烧气体的压力和温度都急剧上升，使室壁四周的零件接受大量的热量，其散热将成为问题。同时，为了对内燃机工作过程的研究与放热规律的计算等，也都需要知道缸内传热规律。

因此，对内燃机气缸内传热问题的研究是很必要的。但是由于缸内的传热问题比较复杂，有关影响因素也很多，加之对一些基本现象还未研究清楚，故直到目前为止，关于内燃机气缸中传热计算的知识还是很欠缺的。

第一章 内燃机的工作介质及其性质

在分析内燃机理论循环时，曾假定在循环的变化过程中，工质的质和量不变。然而，在实际内燃机中，是使燃料和空气在气

缸内部进行化学反应，利用燃料燃烧所放出的热量，使工质的温度和压力提高而对活塞做功。所以，在实际循环中工质是有变化的，如燃烧前工质是燃料和空气的混合气，燃烧后变为燃烧产物，且在燃烧进行过程中，其成分是随时间而变化的。

由于工质的改变，故其化学性质及物理性质均有所不同，为了比较精确的计算工作过程，必须了解其化学变化过程中工质情况怎样。

第一节 气体成分的计算

燃料的燃烧是燃料中的可燃成分和空气中的氧发生氧化放热反应的过程。根据化学反应原理，可求出一公斤燃料完全燃烧时所需的空气量和燃烧产物各组成成分的公斤·摩尔（或公斤）数。

内燃机所采用的主要是液体燃料，其基本成分为碳C、氢H、氧O以及少量的硫S、氮N、灰分，后者在计算时可略去不计。其中碳的重量约占85.5~87%，氢约占12.5~14.5%。

计算时设一公斤燃料中含有 g_c 公斤的碳、 g_H 公斤的氢和 g_o 公斤的氧，则

$$g_c + g_H + g_o = 1 \text{ (公斤燃料)}$$

有关燃料燃烧时化学反应前后的数量关系见表1—1，随燃料量与空气量配合情况的不同，其化学反应情况也有所不同。

液体燃料的化学反应

表 1—1

燃料成分：一公斤燃料中含有 g_c 公斤C、 g_H 公斤H、 g_o 公斤O

C		+ O ₂ →CO ₂		H ₂		+ $\frac{1}{2}$ O ₂ →H ₂ O	
12公斤	32公斤	44公斤	2公斤	16公斤	18公斤		
1公斤	$\frac{8}{3}$ 公斤	$\frac{11}{3}$ 公斤	1公斤	8公斤	9公斤		
当 g_c 和 g_H 完全燃烧时：							
① g_c 公斤	$\frac{8}{3}g_c$ 公斤	$\frac{11}{3}g_c$ 公斤	g_H 公斤	$9g_H$ 公斤	C	+ $\frac{1}{2}$ O ₂ →CO	
② g_c 公斤	$\frac{g_c}{12}$ 公斤·莫尔	$\frac{g_c}{12}$ 公斤·莫尔	g_H 公斤	$\frac{g_H}{2}$ 公斤·莫尔	12公斤	16公斤	28公斤
					1公斤	$\frac{4}{3}$ 公斤	$\frac{7}{3}$ 公斤
③ xg_c 公斤	$\frac{8}{3}xg_c$ 公斤	$\frac{11}{3}xg_c$ 公斤	$x'g_H$ 公斤	$9x'g_H$ 公斤	$(1-x)g_c$ 公斤	$\frac{4}{3}(1-x)g_c$ 公斤	$\frac{7}{3}(1-x)g_c$ 公斤
④ xg_c 公斤	$\frac{xg_c}{12}$ 公斤·莫尔	$\frac{xg_c}{12}$ 公斤·莫尔	$x'g_H$ 公斤·莫尔	$\frac{x'g_H}{2}$ 公斤·莫尔	$(1-x)g_c$ 公斤	$\frac{1}{24}(1-x)g_c$ 公斤·莫尔	$\frac{1}{12}(1-x)g_c$ 公斤·莫尔

当 g_c 和 g_H 中只有部分氧化成CO₂和H₂O时：

一、压缩和膨胀过程中气体成分的计算

下面分两种情况来讨论:

1. 当新的工作循环开始时, 气缸中没有残余废气存在, 即 $M_v = 0$ 的情况下。

(1) 压缩过程。在压缩线上缸内气体成分是不变的, 对于柴油机可按空气的成分来计算。其空气量为

$$M_1 = \alpha L_0^*$$

式中 α ——过量空系数, $\alpha = \frac{L}{L_0}$;

L_0 ——完全燃烧一公斤柴油理论上所需的空气量。其值可根据表 1—1 中的②行按下式求出:

$$L_0 = \frac{\frac{g_c}{12} + \frac{g_H}{4} - \frac{g_o}{32}}{0.21} \quad (1-1)$$

当柴油中各元素成分所占的重量百分比为 $g_c = 0.86$, $g_H = 0.13$, $g_o = 0.01$, 代入上式, 得

$$L_0 = \frac{\frac{0.86}{12} + \frac{0.13}{4} - \frac{0.01}{32}}{0.21} = 0.4948 \text{ 公斤} \cdot \text{莫尔/公斤燃料}.$$

为计算轻质燃料, 可认为汽油的成分 (按重量百分比) 为:

* 对于汽油机: $M_1 = \alpha L_0 + \frac{1}{m_T}$ 。其中 m_T 为燃料蒸气的分子量, $\frac{1}{m_T}$ 即为 1 公斤燃料气化后的莫尔数。在柴油机中, 燃料在上止点附近才喷入, 燃烧开始时, 大部分燃料还处于液体状态, 所以 $\frac{1}{m_T}$ 值很小可忽略不计。

$g_c = 0.855$, $g_H = 0.145$, $g_O = 0$, 代入式 (1—1), 则

$$L_0 = \frac{\frac{0.855}{12} + \frac{0.145}{4}}{0.21} = 0.5119 \text{ 公斤} \cdot \text{莫尔/公斤燃料}$$

(2) 膨胀过程。在膨胀和排气线上, 缸内燃气的成分也是不变的, 可按燃烧终了的燃烧产物成分来计算。根据表 1—1 中的②行可知, 一公斤燃料完全燃烧 ($\alpha > 1$) 产物中各气体成分的公斤·莫尔数, 可由下列公式确定:

$$\left. \begin{aligned} M_{CO_2} &= \frac{g_c}{12} \\ M_{H_2O} &= \frac{g_H}{2} \\ M_{N_2} &= 0.79\alpha L_0 \\ M_{O_2} &= 0.21(\alpha - 1)L_0 \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

燃烧产物总的公斤·莫尔数 M_2 可按下式求得:

$$M_2 = \alpha L_0 + \frac{g_H}{4} + \frac{g_O}{32} = \beta_0 M_1 \quad (1-3)$$

式中 β_0 —理论分子改变系数。

同理, 根据表 1—1 中的④行可知, 一公斤燃料不完全燃烧 ($\alpha < 1$) 产物中各气体成分的公斤·莫尔数, 可由下列公式确定:

$$\left. \begin{aligned} M_{CO_2} &= \frac{x g_c}{12} \\ M_{H_2O} &= \frac{x' g_H}{2} \\ M_{N_2} &= 0.79\alpha L_0 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} M_{\text{CO}} &= \frac{(1-x)g_{\text{C}}}{12} \\ M_{\text{H}_2} &= \frac{(1-x')g_{\text{H}}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

燃料燃烧产物总的公斤·莫尔数 M_2 ，可按下式计算：

$$M_2 = \frac{xg_{\text{C}}}{12} + \frac{x'g_{\text{H}}}{2} + 0.79\alpha L_0 + \frac{(1-x)g_{\text{C}}}{12} + \frac{(1-x')g_{\text{H}}}{2} \quad (1-5)$$

为解出方程式（1—4）和（1—5），必须先找出 xg_{C} 和 $x'g_{\text{H}}$ 的数值，它们由过量空气系数 α 和燃料的基本化学成分所决定。

由式（1—1）可知，燃烧一公斤燃料的空气中所含的氧量 $O_{\text{空}}$ 为

$$O_{\text{空}} = 0.21\alpha L_0 = \alpha \left(\frac{g_{\text{C}}}{12} + \frac{g_{\text{H}}}{4} \right) \quad (1-6)$$

另一方面，燃料的 g_{C} 公斤C中，有 xg_{C} 公斤氧化成 CO_2 ，而 $(1-x)g_{\text{C}}$ 公斤氧化成CO，以及燃料的 g_{H} 公斤H中，有 $x'g_{\text{H}}$ 公斤氧化成 H_2O 。由表（1—1）中的④行可知，这时一公斤燃料氧化所用的氧气量为：

$$O_{\text{空}} = \frac{xg_{\text{C}}}{12} + \frac{(1-x)g_{\text{C}}}{24} + \frac{x'g_{\text{H}}}{4} \quad (1-7)$$

上述（1—6）、（1—7）两式应当相等，得到