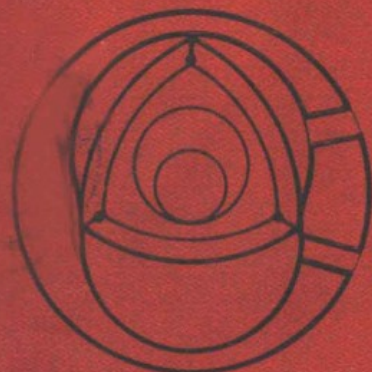
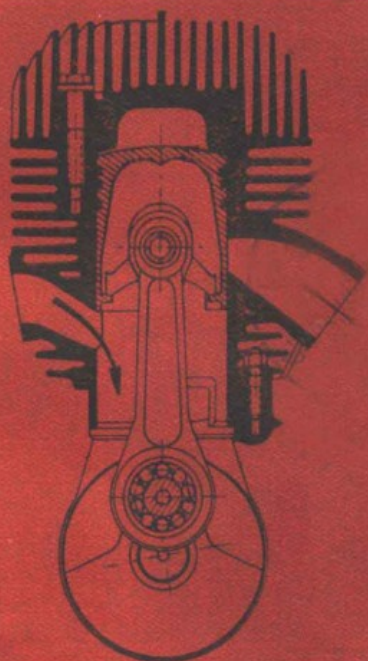


- 894546

往复与旋转活塞式 内燃机

〔联邦德国〕

O·克莱门 G·容柏鲁特 著
高宗英 译



上海科学技术文献出版社

责任编辑：杨燕南

封面设计：石亦义

ISBN 7-80513-155-4/T·91

定 价： 3.95 元

科技新书目： 155-311



往复与旋转活塞式内燃机

[联邦德国] O·克 莱 门 著
G·容伯鲁特
高宗英 译

上海科学技术文献出版社

往复与旋转活塞式内燃机

[联邦德国] O·克 莱 门
G·容伯鲁特 著

高宗英 译

*

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市武康路2号)

新华书店经销 昆山亭林印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 7.75 字数 187,000

1988年5月第1版 1988年5月第1次印刷

印数: 1—1,800

ISBN 7-80513-155-4/T·91

定 价: 3.95 元

《科技新书目》155-311

译 者 的 话

本书系联邦德国卡尔斯鲁厄(Karlsruhe)技术大学奥托·克莱门(Otto Kraemer)教授的名著。原书第一版于1937年问世以来,深受读者欢迎,因而多次修订再版。现在的第五版(1983年版)系由该校的盖奥格·容柏鲁特(Georg Jungbluth)教授在原书的基础上,进一步修订和增补而成。

该书内容简明,概念清晰,着重阐明了内燃机的基本原理与设计准则,不仅是一本适合于大学生的优秀教材,同时对于广大工程技术人员也是一本很有价值的参考书。

20年前,译者作为一名当时的青年讲师,曾应出版社要求,将该书第四版(1963年版)翻译完成并于1966年初交付出版,但遗憾的是,由于众所周知的原因,致使该书未能与广大读者见面。

20年后,当译者有可能再把这本修订与改写得更加精练、完善并充分反映当代内燃机发展水平的名著重新介绍给我国内燃机专业的大学生、研究生和工程界的广大技术人员时,心中自然感到特别快慰。这不仅使译者了却了一项多年的心愿,而且也是译者对我国蓬勃发展内燃机事业的一点微薄贡献。为此,译者衷心感谢西安交通大学蒋德明教授对该书的热情推荐与对译稿的精心校对;也十分感谢上海科技文献出版社的友好合作与支持。最后,也深深感谢多年来在工作中给予我鼓励与支持的亲人与朋友们。

高宗英

一九八六年八月

第五版 序 言

自从本书第四版问世以来，已经 20 多年过去了。这些年来，内燃机取得了即使是当时的专家也难以预见的进展。例如，成批生产的增压柴油机的平均有效压力已从 12~14 bar 达到 30 bar 甚至更高的水平。内燃机的有效效率，在 1962 年最高只达到 40%，如今已达 55%。

60 年代初期，研制内燃机的主要目标是增加比功率指标，而提高效率（即降低燃油耗率）只占次要的地位，这一点，特别是在轿车用的小型内燃机中更是如此。随着内燃机使用的日益广泛，在工业发达的国家内，因汽车交通发展而带来的副作用也日益明显，特别是内燃机排放废气的污染更是环境的严重威胁。首先是加里福尼亚，其次在整个美国与欧洲国家均开始实施对汽车的排放物严格限制的法规。这就对内燃机设计提出全新的要求，从而为内燃机的发展工作带来了一些新的认识与奋斗目标。

70 年代多次产生的石油危机又促使人们在发展内燃机时重新追求提高效率的目标。当时所取得的重要成果正好体现在目前业已投产的新型内燃机和汽车产品上。要不是由于电子计算机技术也正好在同时得到巨大进展的话，发展内燃机时所面临的许多新问题本来是难以得到解决的。由于计算机的普遍采用，使人们不仅可能用计算方法来代替一些花费昂贵的实验，也能对实验结果作出重要补充。今天借助于计算机，已能对内燃机零件强度、换气过程，甚至对整个工作过程得出与实际情况十

分接近的计算结果。

由于上述原因，使得作者有必要对重新出版的这本作为内燃机的入门教材进行彻底的改编。为使本书的篇幅与售价不过分增加，不得不遗憾地将第四版中原有的关于热力涡轮机的章节删去。有关计算公式也按照在这期间已推广的国际单位作了相应改变。此外，也采用了一些无因次的参数方程。至于那些对计算十分方便的数值方程，也注明了必须应用的单位。

当然，在这部无意写得十分庞杂的著作中，不可能对内燃机原理与设计的所有问题与方法均加以讨论。题材选择方面的某些主观与专断，或许是难以避免的，但作者仍力求在阐明必要的基础与理论知识的同时，尽可能多介绍一些内燃机及其零部件结构设计方面的问题。至于内容取舍得是否成功，只能由读者去作出判断，但是，对于任何改进建议，出版社与作者将随时表示欢迎。

盖奥格·容柏鲁特

1983年春于卡尔斯鲁厄

第一版 序 言

我打算写的是一本方便、价廉并让每个年青的技术人员都容易阅读和理解的读本，这本书不仅应当给予初学者以清晰的概念、学习的勇气和阅读的愉快，而且由于叙述力求严格，即使对于成熟的工程技术人员亦能有所助益。书中尽量将为实现理想循环和最佳设计的多种多样问题加以系统化。图表和例题也力求有助于阐明文字叙述的内容。作者当然不打算把本书写成一本专门罗列一些经验公式的“烹调书”，因为这样做只会造成对客观规律的错觉，而掩盖事物的本质、相互关系与应用条件。总而言之，作者希望提供给读者将是一本不去罗列统计公式而是着重阐明问题的内在本质和提供解决问题的基本原则的严肃著作。此外，书中还概略地介绍了内燃机在人类技术发展历史中的地位。

奥托·克莱门

1937 年夏于卡尔斯鲁厄

目 录

译者的话

第五版序言

第一版序言

第一章 任务	1
第一节 燃料中的能量	1
第二节 能量转换	2
第三节 理想循环	6
第二章 内燃机工作过程	21
第一节 内燃机的工作方式	21
第二节 混合气形成	27
第三节 空气需要量、功率、平均压力、燃油消 耗率	31
第四节 基本参数与尺寸的计算	43
第五节 升功率、增加功率的途径、增压	54
第六节 冷却	67
第七节 着火与燃烧	73
第八节 废气排放	84
第九节 余热利用	88
第三章 内燃机动力学	93
第一节 曲柄连杆机构的运动学	93
第二节 气体力和切向力	94
第三节 惯性力	97

第四节	质量平衡	102
第五节	扭矩的不均匀性、飞轮	111
第六节	临界转速	118
第七节	旋转活塞式内燃机	129
第四章	主要零部件的结构设计与计算	139
第一节	结构设计的基本规律和原则	139
第二节	曲柄连杆机构尺寸的确定	151
第三节	密封与润滑	163
第四节	气阀与凸轮	171
第五节	扫气和排气孔	190
第六节	混合器和化油器	196
第七节	点火装置	207
第八节	柴油机的燃油喷射装置	210
第九节	调节	226
第十节	起动和反转	228
第五章	附录	234
第一节	燃料	234
参考文献		237

第一章 任 务

第一节 燃料中的能量

人们生活在“燃烧的时代”中。这也就是说，人们不仅可以
通过燃料的燃烧得到热能，而且也可以得到机械能。

燃料是一种储能体。植物在生长中不断吸收太阳能，以此
来促进其内部发生的化学变化过程并逐渐长大成材。于是，以
后人们就可能随时从中取用所储存的能量。通常是通过燃烧以
热能的形式来取得这种能量的。

人们从地下开采的煤，就是由古代植物变成的，其中含有几
百万年前即储存着的能量。若将煤燃烧，人们则能利用上述植
物在几百万年前生长时所吸收和储存的太阳能。

石油也是一种储能体，这种燃料至少有一部分是由上古时
的动物遗骸变成的，其中所含的能量纵然不是直接吸收自太阳，
也是间接从它们的植物食料中获得的。

如果研究一种熟知的气体——氢气，那么就可以非常清楚
地了解燃料的储能性质。可以用电解的方法将水分解为氢和
氧两种元素成分。为了实现这种过程，需要消耗一定的电能
(kWh)。消耗的能量将储存在所产生的氢气中。当氢气燃烧时，
这部分能量又可放出，而且主要以热能的形式表现出来。

目前，还没有任何一种储能体能象燃料这样便宜、方便、易
于运输、稳定和不受其他因素的影响。水坝、水塔、蒸汽储存器
和蓄电池等，虽然有一部分能够达到较高的效率，但在上述这些

性能方面是不能与燃料相比的。燃料确是一种理想的储能体，因此得到了十分广泛的应用，并给我们时代打上了“燃烧”的印记。

第二节 能量转换

燃烧时，燃料中储存的能量即以热能的形式释放出来，1 kg 燃料燃烧所放出的热量（单位为 J，在工程单位制中则用 kcal）称为燃料的“热值”。以这样少量的燃料所放出的热量是大得惊人的：

燃料的热值表

燃料	10 ⁶ J/kg	kcal/kg	燃料	10 ⁶ J/kg	kcal/kg
汽油	42.7	10200	煤焦油	37.1	8870
苯	40.2	9600	酒精	22~25	5300~6000
柴油	41.9	10000	烟煤	25~32	6000~7500
甲醇	23.0	5500			

注：按照一般的习惯，燃料的热值不包括燃烧气体中水蒸汽的凝结热，因为这部分热量实际上无法应用。因此，表中所列的热值是燃料的“低热值”。

在热力发动机中，燃料燃烧所产生的热能将进一步转变为机械功。

但是，现有的任何热力发动机皆不可能将热能完全转变为机械功。加入的热量中总有一部分仍以热能形式放出，所以在实际工作循环中，只有一部分热能能够转变为机械功。即使在现今所使用的效率最高的热力发动机即柴油机中，所输出的机械功也仅占加入热量的 35~55%，其余的热量则通过废气和冷

气体燃料的热值表

(在 0°C 和一个标准大气压状态下, 每 m³ 燃料所含的热量)

燃 料	10 ³ J/m ³	kcal/m ³
氢 H ₂	10.8	2570
一氧化碳 CO	12.6	3020
甲烷 CH ₄	35.8	8550
乙烷 C ₂ H ₆	64.3	15370
丙烷 C ₃ H ₈	93.6	22350
丁烷 C ₄ H ₁₀	123.6	29510
乙烯 C ₂ H ₄	59.9	14320
乙炔 C ₂ H ₂	56.9	13600
煤气(依成分不同)	17.4~20.4	4150~4860
水煤气	10.9	2600
高炉煤气	4.0	950
炼焦炉煤气	16.8~19.3	4000~4600
烟煤干馏煤气	28.8	6870
褐煤干馏煤气	10.9~13.4	2600~3200
木材干馏煤气	1.7~5.6	1120~1340
沼气	26.8	6400
天然气	29.3~41.9	7000~10000
发生炉煤气	5.2	1250
液化煤气	92.1~117.3	22000~28000

却水等途径逸出。

人们可以通过下列热空气发动机的简单例子, 很快弄清上述这一事实。

在图 1 中, 设活塞处于止点位置, 在气缸内封闭着一定量的空气, 其温度与压力皆与外界大气相同。若在活塞位置保持不

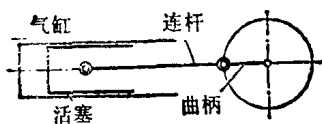


图1 热空气发动机简图
(图示为起始位置)

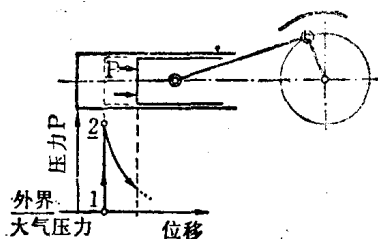


图2 空气受热后膨胀时的
压力变化规律

变的情况下首先加热气缸，也就是对被封闭的空气加入一定的热量 Q_1 ，则空气的温度和压力将会增加。在压力-位移图 ($p-x$ 图) 上，这种容积不变的压力升高过程可用垂直线 1-2 表示(图2)。

在图2中，停止加热，而活塞则在气体压力作用下向右移动。这时，由于气体压力随活塞的移动而不断降低，故其变化过程在 $p-x$ 图上将近似为一条双曲线。

在图3中，若热空气经过膨胀后其压力仍下降到初始压力，则空气的容积将由 x_1 膨胀至 x_2 。空气虽然在膨胀过程中作了机械功(推动活塞前进)，但仍含有多余的热量 Q_2 ，即空气仍受到

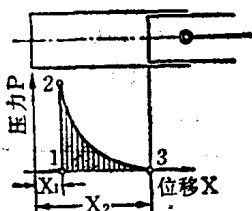


图3 膨胀终了时的情况

加热，为使活塞回复到起始状态，必须设法将这部分热量取出。可以用冷却气缸壁的方法，从封闭在气缸内的空气中取出 Q_2 ，这时空气的容积将收缩到相当于活塞位于 x_1 的位置，亦可以使全部热空气连同热量 Q_2 一起排出

气缸，并以新鲜空气来更换气缸中的充量。无论采用何种办法， Q_2 总是以热能的形式放出，因此在工作过程中，仅有一部分热量 ($Q_1 - Q_2$) 转变为推动活塞的机械功。

众所周知，上述机械功在 $p-v$ 图(图 3)中可用画有阴影线的面积来表示。将此面积乘以活塞面积 $\frac{\pi D^2}{4}$ ，即为所作的机械功 W 。

当然，人们希望在加入的热量 Q_1 中，转变为机械功的部分尽可能多些。在热力发动机中，用“热效率 η_i ”这样一个指标来评价上述希望所能实现的程度。热效率的定义是，所作的机械功与所加入的热量 Q_1 的比值，用分数或用百分数表示(η_i 亦可称为“内效率”)：

$$\eta_i = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

例：假定在上述简单热空气发动机的工作过程中，将空气状态从点 1 加热至点 2 时，温度从 15°C 增加到 1000°C 。所加的热量为 $Q_1 = m Cv(1000 - 15)$ ，其中 m 和 Cv 分别为封闭在气缸内空气的质量和等容比热。加热前后的压力升高比为：

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{1000 + 273}{15 + 273} = 4.4$$

设气体状态从点 2 膨胀到点 3 是按“绝热过程”变化的，即在状态变化过程中没有热量的加入或放出(若也没有节流和摩擦损失的话，则为“等熵过程”)。于是，根据热力学的公式，可得温度 $T_3 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\kappa-1}$ ，若用本例

题的数据代入，则为： $T_3 = 1273 \times \left(\frac{1}{4.4} \right)^{1.4-1} = 833\text{K}$ ，亦即 $t_3 = 833 - 273 = 560^\circ\text{C}$ 。放出的热量 $Q_2 = m Cp(560 - 15)$ ，而热效率则为：

$$\begin{aligned} \eta_i &= \frac{m Cv(1000 - 15) - m Cp(560 - 15)}{m Cv(1000 - 15)} \\ &= \frac{985 - Cp/Cv \times 545}{985} \\ &= \frac{985 - 1.4 \times 545}{985} \\ &= 0.23 \end{aligned}$$

热量 Q_1 、 Q_2 和 $(Q_1 - Q_2) = W$ 同样也可以很清楚地用温熵图 ($T-S$ 图) 上的面积来表示, 对于上例中的 $T-S$ 图可作如下分析 (图 4):

$$Q_1 = \text{I 12 II}$$

$$Q_2 = \text{II 31 I}$$

$$W = \text{123}$$

$$\eta_i = \frac{\text{面积 123}}{\text{面积 I 12 II}}$$

这里, 不必对于“熵” S 的概念作过深的解释, 采用这个参数的目的只是使我们可以用一块图形面积来表示气体状态变化时所加入的热量 Q 。因为引起状态微小变化所需增加的热量 dQ 可以分解为两项因素。如果选用绝对温度 T 作为一个因素的话 (图 5), 则可将由此而生的另一个因素称为熵增 $ds = \frac{dQ}{T}$ 。

采用上述表达方法, 可以最明确和迅速地对理想循环进行分析。

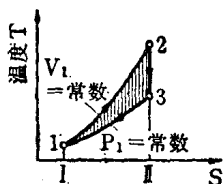


图 4 表示图 1~3 中过程的 $T-S$

图, 十分清楚, 在这张图上, 无热量交换的绝热 (等熵) 膨胀过程是一条垂直线段

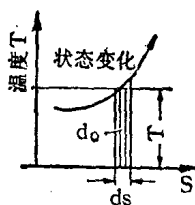


图 5 加入的微小热量 $dQ = Tds$ 在 $T-S$ 图中的表示法

第三节 理想循环

在上述热空气发动机的例子中, 若在加热空气以前先对空气加以压缩, 则其热效率将会提高, 图 6 为其工作过程的示功

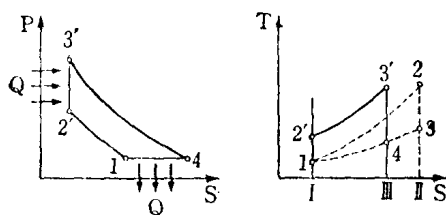


图 6 具有压缩过程的热力发动机的 $p-x$ 图和 $T-S$ 图

图。

由图可见,气缸充量先从点 1 压缩至点 2', 再从点 2' 加热至点 3', 其加入的热量若与无压缩过程时从点 1 至点 2 加入的热量一样, 则面积 $I 2' 3' III = \text{面积 } I 12 II$ 。

若通过膨胀过程, 再使工质的压力恢复至初始压力 p_1 , 则可以看到, 这时只有较少的热量 $Q_2 = I 14 III$ 必须放出。也就是说, 循环的热效率有了提高。

如上所述, 人们可以通过采用压缩过程来达到较高的热效率 η_i 。当然, 除此以外, 还有许多其他改变工作循环的可能方案, 例如, 在活塞开始移动时同时加入热量, 或是当活塞运动尚未达到下止点前就提前放出热量, 等等。

必须从各种可能方案中找出适用于热力发动机的理想循环, 这种循环应在给定的界限下达到最高的热效率。

根据人们打算或必须遵从的不同界限, 可以得到各种不同的理想循环。由下面的几种图形可以清楚地看到, 每种理想循环都是由两条特定的界限线和两条绝热线所构成, 例如:

1. 温度界限——这时的理想循环即卡诺 (Carnot) 循环;
2. 压力界限——这时的理想循环即克劳修斯——朗肯 (Clausius—Rankine) 循环;
3. 容积界限——这时的理想循环即等容循环。