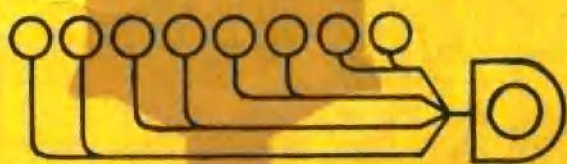


涡轮增压 —— 脉冲转换系统的原理和设计

禹惠生 编著



国防工业出版社



涡轮增压——脉冲转换系统 的原理和设计

禹惠生 编著

国防工业出版社

内 容 简 介

本书从介绍涡轮增压的基本原理着手,说明目前常用的定压系统和脉冲系统在利用排气能量以及解决涡轮同柴油机配合方面的本质差别,通过比较来阐明脉冲转换系统的原理、调整方法和对柴油机性能的影响;给出了设计脉冲转换系统的工程实用方法;比较系统地论述了特征线法用于计算排气压力波的基本原理和运用电子计算机作数值处理的方法等。

为了便于读者自学,本书在进行理论分析之前,先介绍它的物理概念,得出结论后再给出计算实例说明它的应用。本书可供从事柴油机涡轮增压的科技人员和高年级大学生参考。

涡轮增压——脉冲转换系统 的原理和设计

禹惠生 编著

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₃₂印张4¹/₂ 91千字

1980年4月第一版 1980年4月第一次印刷 印数: 0,001— 3,300册

统一书号: 15034·1926 定价: 0.50元

前 言

柴油机由于它的经济性高，功率范围宽广，能适应各种不同用途的要求，因此在国民经济的各个部门中获得了广泛的应用。涡轮增压的成功为柴油机的发展开辟了新的途径。近一二十年来，增压技术突飞猛进，在提高柴油机性能方面取得了卓越的成果。涡轮增压成功的关键在于充分利用排气能量以及解决柴油机同涡轮增压器的配合两个方面。可是，就工质的流动来说，柴油机与涡轮增压器却是两种性质截然不同的动力机械，前者是间断的，后者则是连续的。这就给兼顾上述两个方面带来了困难。目前常用的定压系统或脉冲系统或是多偏重于照顾这一方面或是另一方面，因而各有得失。近年来，涡轮增压柴油机的平均有效压力显著增长，对增压系统提出的要求也就随之更加严格，国外在高性能柴油机上采用脉冲转换器和多脉冲系统的日渐增多（见附表），以提高排气能量利用率和改善柴油机同涡轮增压器的配合性能，在5、7、8、10、14、16、20缸柴油机上取得的效果格外明显，这对扩大柴油机系列亦起到一定作用。除此以外，它还能减小涡轮增压器的尺寸和提高运行可靠性，受到了用户的欢迎。

这种新的增压方式兼顾了脉冲系统和定压系统的优点，引起人们的重视，国内有些单位对此亦开展了研究工作，并取得一定成果。本书从介绍涡轮增压的基本原理着手，说明

目前常用的二种增压方式——定压系统和脉冲系统——在利用排气能量以及解决涡轮和柴油机配合工作方面的本质差别，通过比较来阐明脉冲转换系统的作用原理和工作特性；书中还介绍了脉冲转换系统的调整方法及其对柴油机性能的影响；给出了设计脉冲转换系统的工程实用方法和计算实例；最后，比较详细地论述特征线法用于计算排气压力波和脉冲转换器的基本原理，阐明运用电子计算机对它们进行数值处理的要点。书中叙述问题时，力求通俗易懂，在进行理论分析之前，先介绍它的物理概念，得出结论后，再给出计算实例说明它的具体应用。

由于作者水平低，时间仓促，加上这项技术在国内目前尚未取得广泛的实践经验，书中介绍的内容必定有不少欠妥甚至谬误之处，谨请读者批评指正。

本书编写过程中得到上海机械学院李燕生同志的热情帮助，谨致谢意。

目 录

第一章 涡轮增压的基本知识

§ 1-1	柴油机涡轮增压的原理	1
§ 1-2	平均有效压力与增压压力的关系	6
§ 1-3	空气冷却对增压的作用	11

第二章 排气能量的利用

§ 2-1	对柴油机排气系统的要求	16
§ 2-2	排气的可用能量 E_1	17
§ 2-3	排气能量在定压系统中的利用	20
§ 2-4	排气总管中平均温度的确定	28
§ 2-5	排气能量在脉冲系统中的利用	31

第三章 脉冲系统中影响排气

能量利用的主要因素

§ 3-1	超临界排气阶段气缸内压力变化的规律	33
§ 3-2	排气管和涡轮结构参数对压力波的影响	37
§ 3-3	提高排气能量利用率的途径	42
§ 3-4	排气管分支对能量传递效率的影响	55

第四章 脉冲转换器的工作原理、

调整和计算

§ 4-1	定压系统和脉冲系统的工作特点	57
§ 4-2	脉冲转换器的工作原理	64
§ 4-3	脉冲转换器的调整措施	72
§ 4-4	脉冲转换器的变工况性能	74
§ 4-5	脉冲转换器主要尺寸的确定方法	76

第五章 多脉冲系统的原理和设计方法

§ 5-1	多脉冲系统的原理	82
§ 5-2	压力波在涡轮边界上的反射	85
§ 5-3	确定无反射涡轮喷嘴的方法	90
§ 5-4	多脉冲系统的应用实例	92

第六章 特征线法计算排气压力波的原理

§ 6-1	特征线法的基本方程	107
§ 6-2	特征线法的数值解法	116
§ 6-3	脉冲转换器边界条件的确定	128
附表	采用脉冲转换系统柴油机的一些实例	133
参考文献		134

第一章 涡轮增压的基本知识

§ 1-1 柴油机涡轮增压的原理

柴油机是一种热力发动机，它输出的有效功是从燃油在气缸内燃烧所产生的热能转化而来的。输出功率的大小取决于进入气缸内的燃油和空气的数量以及热能转化的有效程度。因此，要提高发动机的功率就必须向气缸内注入更多的燃油，并且使它充分燃烧。向气缸内注入更多的燃油并不困难，一般说来，只要加大燃油泵的供油量就能办到。可是，要保证燃油完全燃烧，必须相应地增加进入气缸内的空气量，这就需要加大气缸的容积，提高发动机的转速或增大进入气缸内的空气密度。由此可见，柴油机的功率可用三个几何参数（缸径、行程、转速）和一个热力学参数（平均有效压力）标志如下：

$$N_e = \frac{Z p_e \frac{\pi}{4} D^2 S n}{K_1} = \frac{Z p_e V_h n}{K_2} = \frac{Z p_e F_K C_m}{K_3} \quad (1-1)$$

式中 Z —— 发动机的气缸数；
 p_e —— 平均有效压力，公斤/厘米²；
 D —— 气缸直径，厘米；
 S —— 活塞行程，厘米；
 n —— 发动机转速，转/分；

V_h —— 气缸工作容积，升， $V_h = \frac{\pi}{4} D^2 S 10^{-3}$ ；

F_K ——活塞面积, 厘米², $F_K = \frac{\pi}{4} D^2$;

C_m ——活塞平均速度, $C_m = 2Sn / (60 \times 100)$ 米/秒;

K_1, K_2, K_3 ——常数。

从(1-1)式不难看出, 提高发动机的单机功率计有下列途径:

(1) 改变发动机的结构参数 用加大缸径和行程, 增多气缸数等办法来增大气缸的工作容积, 从而提高发动机的单机功率, 这是不言而喻的。可是它们都使发动机的外形尺寸、重量和原材料消耗等项随之增加, 因而不是理想的办法。

(2) 提高发动机的转速 加快转速使发动机在单位时间内的做功次数增多, 从而使发动机的单机功率得到提高。因此, 加快转速是增大发动机升功率、减少单位马力的重量和尺寸的一个有效措施。可是, 它在不同程度上受到发动机燃烧情况恶化, 充气效率和机械效率下降, 工作可靠性不足, 使用寿命缩短以及机器振动和噪音明显增大等因素的限制。例如图 1-1 和图 1-2 分别表示柴油机的充气效率和机械损失(以平均有效压力表示)随活塞平均速度改变的实例。为此, 必须在上述这些方面开展研究改进工作, 才有可能进一步提高转速。除此以外, 发动机的机械负荷和热负荷都随转速加快而增大。分析表明, 热负荷随活塞平均速度成正比地增加, 机械负荷却随活塞平均速度的平方而升高(由于往复运动机构的惯性力取决于活塞平均速度的平方)。因此, 发动机转速提高时, 零件中的机械应力将急剧增大, 这使转速的提高受到了严格的限制。活塞平均速度的上限长期来停滞不前, 徘徊在 12~14 米/秒附近。

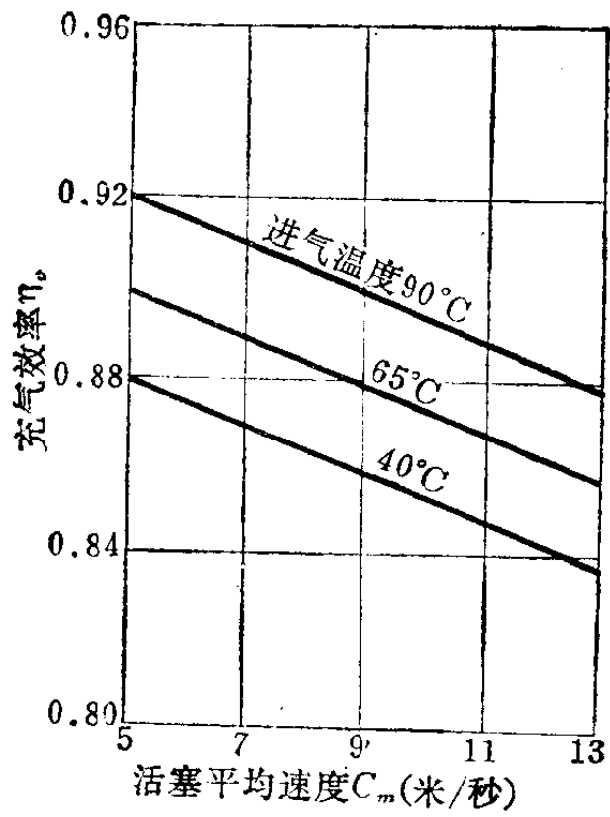


图1-1 非增压柴油机充气效率随活塞平均速度的变化关系

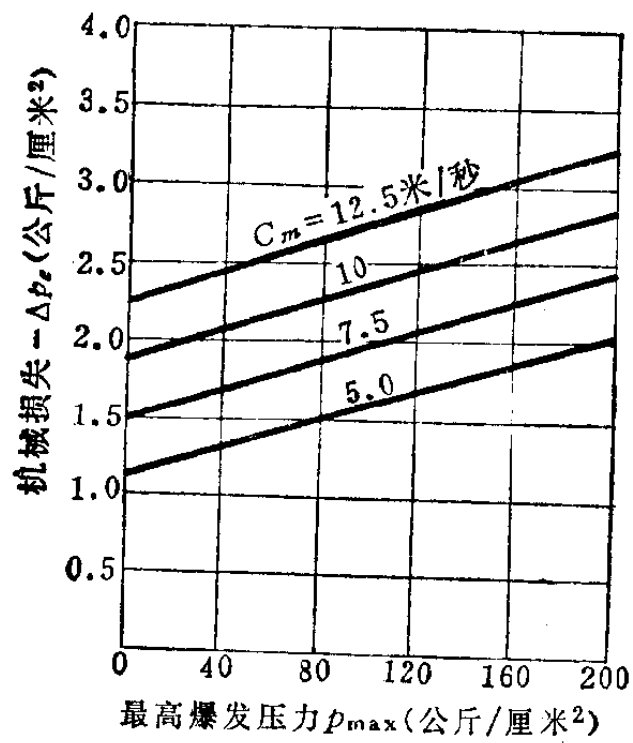


图1-2 机械损失随活塞平均速度及最高爆发压力的变化关系

(3) 增大进气的密度 发动机直接从大气吸气时, 只有改变它的结构参数和加快转速才能增加进入气缸内的空气量(以下简称充量)。如果设法把空气在进入气缸以前预先加以压缩, 增大它的密度, 则在发动机的气缸容积和转速都保持不变的条件下, 同样可以实现增加气缸充量的目的。这就是采用增压来提高发动机功率(亦即平均有效压力)的原理。为此, 应在发动机上加装增压器来预先压缩空气, 驱动增压器所需要的功率可由废气涡轮供给。大家知道, 往复式发动机由于受到活塞行程的限制, 气缸内的气体不能完全膨胀, 它的排气仍然具有足够能量可在涡轮中继续做功, 驱动增压器, 见图 2-1。图 1-3 是涡轮增压发动机的示意图。这样, 涡轮增压柴油机的功率就不再直接受到气缸容积、转速和大气条件的限制(在保证供给足量燃油的条件下), 进气的密度越大(增压压力越高), 发动机输出的功率就越多。因此, 涡轮

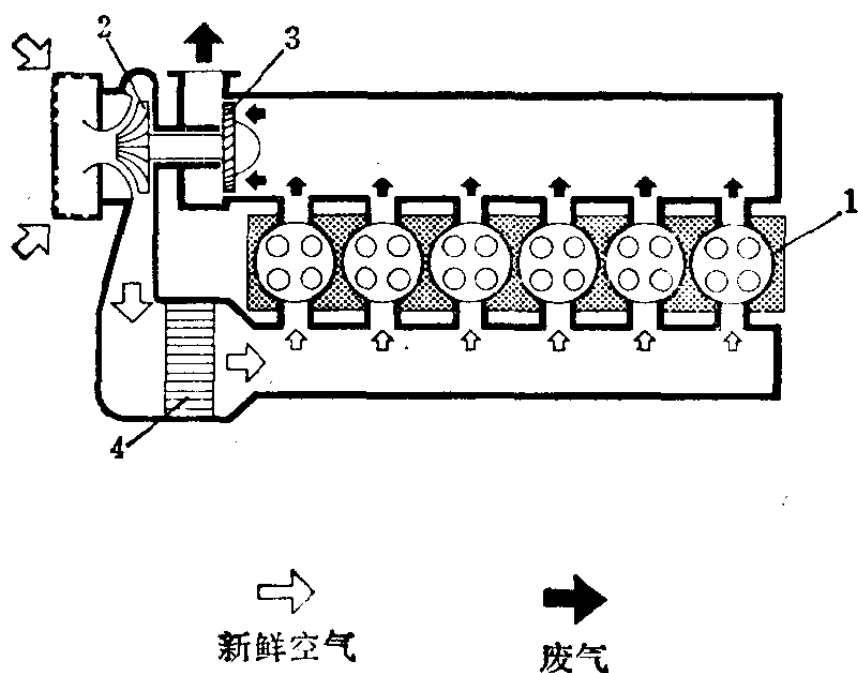


图1-3 涡轮增压柴油机的示意图

1—柴油机气缸; 2—增压器; 3—废气涡轮; 4—空气冷却器。

增压是降低发动机单位马力的重量和尺寸、节约原材料、改善经济性的最有效技术措施，得到了广泛的应用。

值得指出的是柴油机燃烧过程的特点是非挥发性燃料在气缸内的自燃：燃油以 200~300 米/秒左右的速度喷入气缸，碰到压缩空气后油束被粉碎成极细小的微粒，这样使各颗油粒和高温的压缩空气有着大面积的接触，而在几微秒内就能获得自燃所需的能量，从而着火燃烧。由此可见，采用增压是有利于柴油机的燃烧的，因为，气缸内的空气密度增大时，有助于缩短燃油的着火延迟期。实践证明，增压使柴油机燃烧时的压力升高率下降，运转比较平稳。

随着平均有效压力的提高，发动机的机械负荷和热负荷都将增大。分析表明，热负荷随平均有效压力成正比地增加，机械负荷亦随平均有效压力成正比地升高（决定机械负荷的气缸最高爆发压力与平均有效压力大致成正比，见图 1-4）。

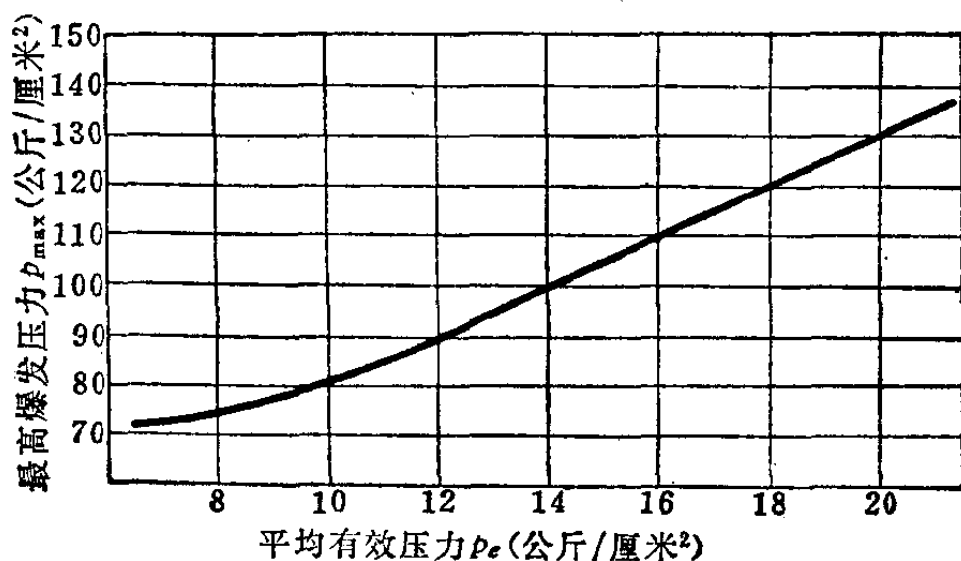


图1-4 四冲程柴油机的最高爆发压力 p_{max} 同平均有效压力 p_e 的关系

综上所述，采用增压来提高柴油机功率有着巨大的发展潜力，不象上述提高转速那样，很快就受到发动机的机械负荷急剧增大的限制。因此，柴油机的强化近年来主要是依靠涡轮增压

压来实现的，它使先进柴油机持续工作时的平均有效压力达到 $p_e=20$ 公斤/厘米²以上，在采用高增压技术的四冲程试验机上，平均有效压力甚至高达 $p_e=45$ 公斤/厘米²（通常，非增压柴油机的 $p_e\approx 5\sim 6$ 公斤/厘米²）。

表 1-1 给出现代各种用途柴油机的活塞平均速度和平均有效压力的指标。

表1-1 现代各种用途柴油机的强化指标

项 目 类 别	四 冲 程							二冲程
	农用柴油机		汽车用柴油机		工程机	干线内	大功	船用
	小功率 通用	拖拉 机用	小型高速 (2吨级)	载重卡车 (3~12 吨级)	械用柴 油机	燃机车 用柴 油机	率中 速柴 油机	低 速 柴油 机
平均有效压力 p_e 公斤/厘米 ²	5.5~ 8.5	6.0~ 10	7.5~8.7	7.5~ 11.5	12~15	14~18	16~22	10~ 13.5
活塞平均速度 C_m 米/秒	5.5~ 12	6.5~ 10	11~13.4	10~12.5	9.0~ 11	9.0~ 12	6.5~ 9.0	5~6.8

§ 1-2 平均有效压力与增压压力的关系

以上介绍了借助增压来提高发动机平均有效压力的原理：在气缸容积和转速都保持不变的条件下，加大发动机进气的密度来增加气缸充量，从而强化工作过程，提高平均有效压力。气体状态方程 $\gamma_2=p_2/RT_2$ 指出：进气的密度 γ_2 取决于它的压力 p_2 和绝对温度 $T_2=t_2+273$ 。进气压力越高，温度越低，进气的密度就越大。由此推知，发动机的平均有效压力 p_e 和进气压力（增压压力） p_2 之间存在着一定的联系，可以从内燃机的基本原理出发，把它推导出来。

在每一工作循环中内燃机气缸完成的指示功 W_i ；可从以

下二个角度进行推算:

(1) 从力学角度 在每一工作循环中气体完成的指示功 W_i ; 根据平均指示压力 p_i 的定义, 应该等于作用在活塞上的力 (平均指示压力乘上活塞面积 F_K) 乘以活塞的行程 S , 即

$$W_i = (p_i F_K) S = p_i V_h 10^4 \text{ 公斤} \cdot \text{米} \quad (1-2)$$

式中 V_h ——气缸容积, 米³, $V_h = F_K S$;

p_i ——平均指示压力, 公斤/厘米²。

(2) 从能量转化角度 在每一工作循环中气体完成的指示功可从这时加入气缸中的燃油热量 Q_Z 和热能利用的有效程度 η_i (指示热效率) 来确定, 即

$$W_i = 427 Q_Z \eta_i \text{ 公斤} \cdot \text{米} \quad (1-3)$$

式中 常数 427 公斤·米/大卡为热功当量;

$Q_Z = B_Z H_u$ 大卡;

式中 B_Z ——每一工作循环中注入气缸的燃油量, 公斤;

H_u ——燃油的低热值, 通常 $H_u = 10000$ 大卡/公斤。

在气缸中燃烧 B_Z 公斤燃油所需要的空气量由下式确定

$$G_Z = B_Z l_0 \alpha$$

式中 l_0 ——一公斤燃油完全燃烧所需要的理论空气量, 一般取 $l_0 = 14.3 \sim 14.5$;

α ——燃烧的过量空气系数, 在柴油机中通常取 $\alpha = 1.7 \sim 2.2$ 。

另一方面, 每一工作循环中进入气缸的空气量可表达为

$$G_Z = \gamma_2 V_h \eta_v$$

式中 γ_2 ——进气的密度, 公斤/米³;

V_h ——气缸容积, 米³;

η_v ——气缸充气效率。

于是借助以上二个计算气缸空气量 G_z 的公式, 就可把每一工作循环中注入气缸的燃油量 B_z 改用进入气缸内的空气量来表达如下:

$$B_z = \frac{G_z}{l_0 \alpha} = \frac{\gamma_2 V_h \eta_v}{l_0 \alpha}$$

由此得出每一工作循环中加入气缸的热量 Q_z 和指示功 W_i 的计算公式分别为

$$Q_z = B_z H_u = \frac{\gamma_2 V_h \eta_v}{l_0 \alpha} H_u$$

$$W_i = 427 Q_z \eta_i = 427 \left(\frac{\gamma_2 V_h \eta_v}{l_0 \alpha} \right) H_u \eta_i \quad (1-3 a)$$

将公式(1-2)和(1-3 a)联立求解, 消去 V_h 后, 即得平均指示压力的计算公式如下:

$$p_i = 427 \frac{H_u}{l_0 \alpha} \eta_i \eta_v \gamma_2 10^{-4} \text{ 公斤/厘米}^2$$

因此, 平均指示压力为

$$p_e = p_i \eta_m = 427 \frac{H_u}{l_0 \alpha} \eta_i \eta_v \eta_m \gamma_2 10^{-4} \text{ 公斤/厘米}^2 \quad (1-4)$$

公式(1-4)是简单的线性关系式, 其中 $\frac{H_u}{l_0}$ 值变动极微, 可看作常数。由此可知, 柴油机的平均有效压力 p_e 直接与发动机的指示热效率 η_i , 气缸充气效率 η_v , 机械效率 η_m 以及进气密度 γ_2 成正比; 与燃烧的过量空气系数 α 成反比。实际上, 发动机的 η_i , η_v , η_m 的变动范围都比较窄, α 的变动范围亦不大。因此, 提高平均有效压力 p_e 的最有力措施是增大进气密度 γ_2 。在一般情况下, 可以认为, γ_2 增大一倍, p_e 大致亦增加一倍, 依此类推。

把气体状态方程 $\gamma_2 = \frac{p_2}{RT_2} \cdot 10^4$ 代入公式(1-4), 即得平均有效压力与增压压力的关系式如下:

$$p_e = 427 \frac{H_u}{l_0 \alpha} \eta_i \eta_v \eta_m \frac{p_2}{RT_2} - \text{公斤/厘米}^2 \quad (1-5)$$

式中 p_2, T_2 ——分别是进气压力(公斤/厘米²)和温度(°K)。

柴油机的指示热效率 η_i 同燃烧过量空气系数 α 有着密切的联系, 在一定范围内, 随着 α 的加大, η_i 将不断升高。因此, 公式(1-5)中的 α 给定后, η_i 跟着就确定了。下面列表给出二者间的经验关系, 供计算时选用。

α	1.2	1.3	1.5	1.7	2.0	2.2	2.4	3.0
η_i	0.288	0.372	0.421	0.436	0.465	0.469	0.472	0.486

当柴油机的平均有效压力 p_e (通过增压来实现) 给定后, 涡轮增压器应该提供的增压压力 p_2 可按照公式(1-5)进行估算, 其中 $\eta_i = f(\alpha)$; η_v 和 η_m 的数值需视具体情况适当选取。

例 新300系列柴油机要求达到的平均有效压力为 $p_e = 15$ 公斤/厘米²。发动机的机械效率为 $\eta_m = 0.85$; 燃烧过量空气系数为 $\alpha = 1.8$; 气缸充气效率由于增压柴油机多采用较大的气阀叠开角进行扫气, 通常按 $\eta_v = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \cdot \frac{273 + t_2}{313 + \frac{5}{6} t_2} \approx 0.97 \sim 1.0$ 计算 (ε 为

柴油机压缩比); 空气经中冷后的温度为 $t_2 = 45^\circ\text{C}$ 。

取理论空气量 $l_0 = 14.3$, 燃油低热值 $H_u = 10000$ 大卡/公斤, 由给定的 $\alpha = 1.8$ 得出对应的指示热效率为 $\eta_i \approx 0.44$, 由公式(1-5)算出所需的增压压力为:

$$p_2 = \frac{p_e l_0 \alpha R T_2}{427 H_u \eta_i \eta_{ms} \eta_p} = \frac{15 \times 14.3 \times 1.8 \times 29.3 \times (273 + 45)}{427 \times 10000 \times 0.44 \times 0.85 \times 0.97}$$

$$= 2.32 \text{ 公斤/厘米}^2$$

以上介绍了用理论分析方法确定柴油机平均有效压力 p_e 与增压压力 p_2 之间的关系。生产实践中在这方面亦积累了丰富的资料，例如西德的曼恩（MAN）柴油机工厂推荐下列经验公式：

四冲程柴油机

$$p_2 = K p_e C_m$$

式中 K ——常数，其值取 $0.019 \sim 0.021$ ；

C_m ——活塞平均速度，米/秒。

低速二冲程柴油机

$$p_2 = 0.22 p_e$$

上述经验公式以曲线形式示于图 1-5 中，用于四冲程柴油机时，取 $C_m = 9$ 米/秒。

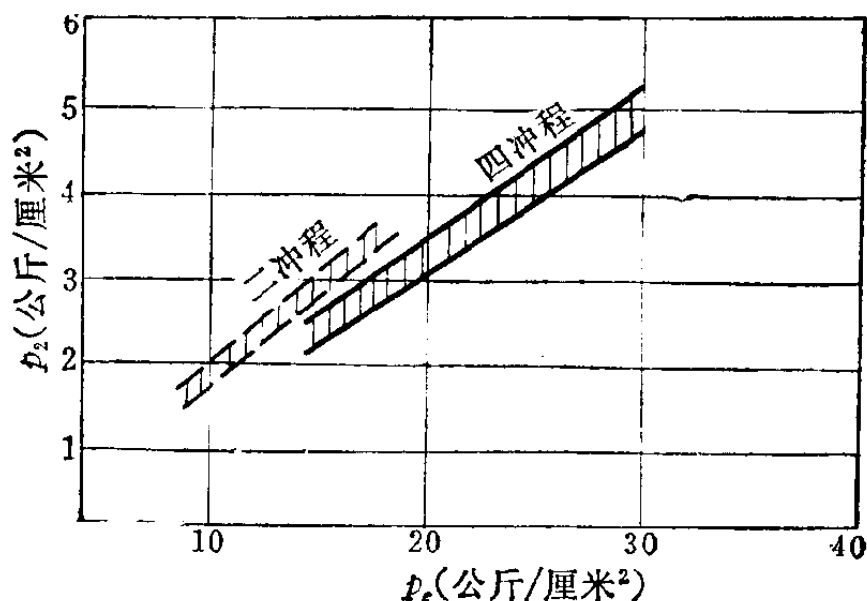


图1-5 大型及中型柴油机的平均有效压力与增压压力的经验关系