

内 燃 机

活塞式及复合式发动机的结构 设计与强度计算

【苏】A.C. 奥林 M.Γ. 克鲁戈诺夫 主编

罗远荣 华道生 张庆新 译
王树基 刘德华

前 言

本书主要讲述活塞式及复合式内燃机结构设计与强度计算的理论基础。

由于现代高强化发动机的结构有了显著的变化，加之电算机的广泛使用，使得设计师在实践中采用了最新的计算方法，因而相应地改变了内燃机专业的工程师培养大纲和教学计划，为了满足教学计划的要求，所以本书的这一版在内容上比上一版有了本质上的差别。本书上一版系指《内燃机—活塞式及复合式发动机的结构与计算》，A.C.奥林主编，苏联机械制造出版社，1972年第三版。

本书第一部分介绍内燃机结构设计的一般问题：用来确定发动机各零件及结合件热状态及应力-变形状态，以及用来评价其强度的基本原理。在这一部分，还简述了在进行课程设计和毕业设计时所必需的内燃机运动学及动力学的有关内容。

本书的主要篇幅用来讲授发动机各主要结合件及零件的结构设计及计算。除讲述不同发动机各个零件结构设计的共同性问题之外，还分析了各种型式和用途的发动机的特点，这些特点是由于不同应用场合对内燃机提出的特殊要求和不同的使用条件造成的。在分论中特别区分了汽车、拖拉机发动机以及机车、船舶和固定式发动机。

本书的最后一部分分析和探讨了各种形式发动机的发展前景。

目 录

译序

前言

第1章 内燃机设计基础	1
§1 设计和计算的一般原则	1
§2 发动机总布置图	2
§3 表征发动机结构的主要参数	9
§4 设计发动机时原始参数的选定	13
§5 发动机设计的诸阶段	15
§6 发动机设计的自动化	18
第2章 内燃机零件的强度计算基础	26
§1 发动机零件的热负荷和机械负荷	26
§2 发动机零件的应力-变形状态及其确定方法	27
§3 发动机零件的热状态及其确定方法	30
§4 零件的热状态及应力-变形状态计算的数值法 ——有限元法	35
§5 零件热状态的计算	42
§6 零件应力-变形状态的计算	49
§7 计算工况的选择	56
§8 对发动机各结合件及零件强度的评定	57
§9 考虑到变负荷影响的零件强度的计算	60
§10 发动机热负荷零件工作能力的评定	64
第3章 活塞式及复合式发动机中的作用力及力矩	67
§1 单缸发动机中的力及力矩	67
§2 单列发动机中的作用力和力矩	87
§3 V型发动机曲柄连杆机构的运动分析	101
§4 侧置气缸曲柄连杆机构中的作用力	106
§5 V型及其它布置型式的发动机的作用力和力矩	108

§ 6 单列发动机的力矢图	116
§ 7 V 型和其它类型发动机的力矢图	126
§ 8 旋转活塞式发动机的运动学和动力学基础	129
§ 9 非稳定工况下的动载荷	136
第 4 章 活塞组	143
§ 1 强化发动机的活塞结构设计基础	143
§ 2 活塞结构分析	151
§ 3 活塞的材料	167
§ 4 活塞热状态的计算	167
§ 5 活塞应力-变形状态的计算	178
§ 6 活塞销	189
§ 7 活塞环	196
§ 8 活塞环的热状态和应力-变形状态的计算	200
第 5 章 连杆、活塞杆和滑块	205
§ 1 概述	205
§ 2 连杆的杆身	206
§ 3 连杆的活塞端和曲柄端、连杆螺栓	207
§ 4 滑块式发动机连杆组的特点	218
§ 5 连杆的材料	222
§ 6 连杆及连杆螺钉的强度计算	224
§ 7 连杆强度的数值计算法	236
第 6 章 曲轴	252
§ 1 曲轴的结构分析	252
§ 2 提高曲轴强度的措施	263
§ 3 曲轴的材料	268
§ 4 曲轴的强度计算	269
§ 5 飞轮	280
第 7 章 轴承	288
§ 1 流体动力学的润滑理论基础	288
§ 2 滑动轴承	301
§ 3 滚动轴承	310
第 8 章 配气系统	315
§ 1 气门机构的布置	315

§ 2	配气机构零件的结构分析	319
§ 3	配气机构零件的材料	335
§ 4	凸轮型线设计	337
§ 5	气门机构中的作用力	356
§ 6	配气零件的强度计算	358
§ 7	二冲程发动机配气器官的结构设计	371
§ 8	滑阀配气	373
第9章	机体零件	378
§ 1	机座	378
§ 2	支柱和上曲轴箱	381
§ 3	曲轴箱和油底壳	383
§ 4	机体零件及其联结件的强度计算	391
§ 5	气缸和气缸体	405
§ 6	气缸套	409
§ 7	气缸盖	423
§ 8	气缸套和气缸盖热状态的计算	443
§ 9	气缸套和气缸盖的应力-变形状态的计算	454
第10章	发动机的结构分析	472
§ 1	汽车和拖拉机发动机	472
§ 2	内燃机车和船用的强化发动机	483
§ 3	低速和中速船用发动机	488

第1章 内燃机设计基础

§ 1 设计和计算的一般原则

现代内燃机的研制是一个需要由各方面的专家参加的复杂过程。结构设计工作居于这个过程的中心地位。

注意：设计师应准备好发动机制造和试验的全部设计文件，并安排好所需数量的生产。

发动机的结构设计就是由工程师拟定它的结构。科学技术进步，要求设计师创造具有基本性能指标高的发动机。基本性能指标主要指的是经济性、可靠性、寿命、材料消耗、制造的方便性和维护的简单性。为使所设计的发动机满足上述要求，必须在结构设计上有新的突破，但这并不否认结构上的继承性和优先采用传统的结构、部件和零件。

注意：新研制的发动机的新颖性取决于其指标的先进性。

发动机制造领域的科学技术进步，取决于材料、配套产品、燃料和润滑油供应部门的发展。设计发动机要根据以发动机的远景型谱为基础编制的总体规划。型谱确保发动机只具有最少的种类和尺寸系列。在一种功率系列之内的发动机，其主要部件、零件的布置和结构都是一样的，应力求使新研制的发动机成为功率系列中的一员，因为这样可缩短掌握新结构的时间和提高发动机制造质量。但是，尽管采用所制订的型谱有许多优点，然而作为基本型，原则上仍可采用新的和从技术经济观点看来是合理的发动机结构。

注意：考虑到使用相应型式发动机的部门的发展远景，编制用于一定时期内的型谱，就会大大节约发动机生产、使用和修理的费用。

在研制新发动机及其系列时，要特别注意标准化和通用化程度。标准化、通用化程度可由整个发动机结构中标准化、通用化零件占有的份额来评价。通用化程度应取决于发动机结构总体布置的最优化程度及其经济上的合理性。

注意：作为以功率系列为基础的基本型，应具有该类型发动机主要参数的最佳组合。

现代发动机在比功率方面的不断强化，伴随着其零件的温度和应力的不断提高。因此，在研制现代发动机时，强度计算具有重要的作用。

注意：提高新设计发动机的通用化程度就允许在计划生产量大的专业化生产厂中生产通用零件，从而能提高劳动生产率和产品质量。

发动机零件的强度计算包括下列基本环节：绘制反映发动机零件最本质性的结构特点和负荷条件的计算简图；利用现代计算方法分析这种计算简图；在进行分析的基础上，作出可用于真实结构的实际结论。原先所采用的（在中低强化水平下）往往是很简单的发动机零件强度计算方法并未招致异议。因为在中等工作过程参数的情况下，发动机本身的强度储备是很大的。目前要求能更精确地考虑零件的几何形状和负荷条件的计算方法。

注意：强度计算的主要目的是使发动机零部件的参数和尺寸有依据，确保发动机在许用寿命内可靠运行。在这种情况下，计算能显著缩短用于与制造和调整发动机相关联的非常大量的试验工作的时间和手段，从而大大降低成本。

现代发动机的设计特点是在提高质量的同时缩短复杂的发动机结构的设计周期，为此，必须采用自动化设计。这时，计算的作用就更大了，计算应立足于系统地采用计算机并在本质上是新的、更高的水平上来完成。

§ 2 发动机总布置图

使用内燃机的部门很多，因此，对其结构提出的要求也是多

种多样的。这就造成根据结构特征编制发动机分类图的复杂性。

找出可在其基础上进行局部分类的某些共同的特征，是在编制发动机分类图时的主要任务。为了找出这些特征，应分析其用途对发动机提出的要求。

注意！ 结构简单、紧凑、质量最小是最一般的要求。

一方面为了便于生产，另一方面为了提高可靠性，发动机结构必须简单。

发动机的尺寸及其质量取决于发动机的总体布置、结构型式和机体尺寸。因此，首先将其几何特征，特别是发动机主要零件几何轴线的空间位置选为发动机分类的基础是合理的。

通常，现代内燃机都具有将活塞的往复运动转变成曲轴回转运动的机构。仅自由活塞燃气发生器、柴油压气机、柴油打桩机和内燃打夯机属于无曲轴发动机。

注意！ 在具有曲柄连杆机构的发动机中，气缸轴线与曲轴轴线相垂直，且大都通过曲轴轴线。

决定发动机外形的主要因素之一是气缸排列和气缸数。在有主轴而无曲柄连杆机构的发动机（有斜的或其它形状的转盘）中，气缸轴线与主轴中心成平行布置。

如果有三个或三个以上的气缸轴线，位于垂直于曲轴轴线的同一个平面内，那么，它们就构成星形结构；各个气缸通常沿着曲轴排列。星形沿曲轴排列的结构称为多列星形。多列星形发动机，尤其风冷式的，相邻星形的气缸轴线可错开半个气缸夹角。

发动机的结构形式与零件、机构和辅助机组的相互排列有关。总体布置可能与例如配气轴的数量和排列（在上面或在下面），空气供给系统的布置等有关。虽然这些因素不是基本的，然而在各个总成、辅助机组和装置系统分类中，应当考虑到它们。

直列发动机具有结构简单、制造工艺性较高的特点。上述优点及气缸垂直布置的发动机积累了大量制造经验和使用经验，这就决定了这样的发动机得以被广泛的采用。

注意！ 气缸垂直布置的单列发动机（图1）构成使用中的发

4
动机的大部分。

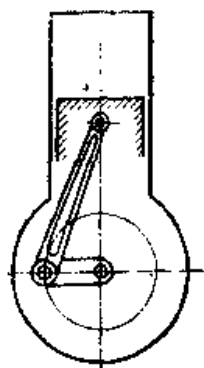


图1 气缸垂直布置的单列发动机示意图

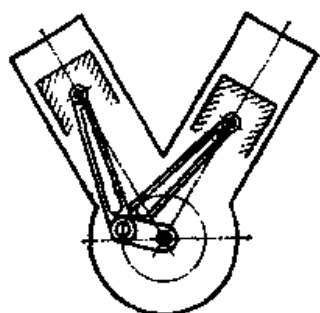


图2 气缸V型配置的发动机的示意图

同样马力的V型发动机与直列发动机相比，主要优点是尺寸较小，首先是长度较小。因此，增大了下列关键件的刚度，诸如曲轴箱（机体）、气缸盖（气缸头）及曲轴。最常用的气缸轴线夹角是 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。它取决于发动机的用途、尺寸要求和每列气缸的工作顺序。当主要要求是减少尺寸，首先是减少高度的场合下，这个角度有可能大于 90° 。

注意！除单列发动机外，气缸V型配置的发动机，在运输装置中也获得了广泛应用（图2）。

气缸W型配置的发动机具有与气缸V型配置类似的优点（图3），但它没有获得广泛推广，主要原因是这种发动机的连杆、轴承和其他零部件结构复杂。然而，最近这种结构型式又重新开始使用。

在某些情况下，可把发动机设计成X型气缸布置（图4）。这种发动机长度尺寸不大。不过在这种情况下，曲柄连杆机构的零件、机体、配气机构都具有很复杂的结构。气缸轴线夹角可能是各不相同的，例如 45° 、 60° 和 120° ，也可能都是一样的（图4）。

在不同用途的动力装置中，也有采用气缸水平对置的发动机（图5）。对于陆路运输工具，这种型式的发动机不大的高度以及便于往运输工具上安装，较之V型布置的发动机，在某些情况下

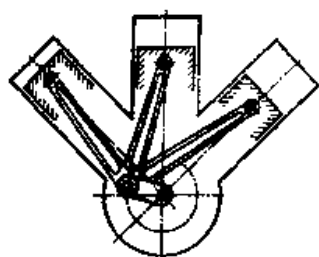


图3 气缸呈W型布置的发动机的示意图

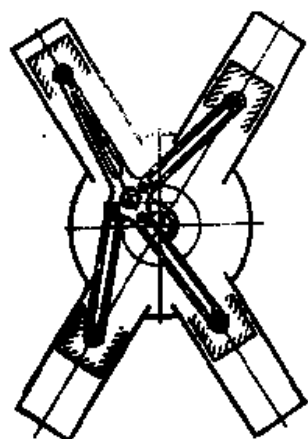


图4 气缸采用X型布置的发动机的示意图

其优点是毋庸置疑的。



图5 气缸采用水平对置的发动机的示意图

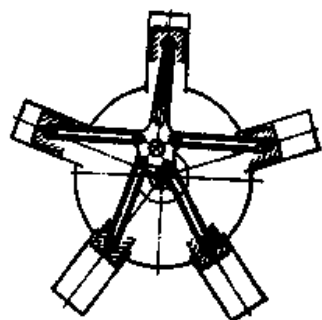


图6 气缸采用星形布置的发动机的示意图

气缸星形布置的发动机（图6）比气缸单列布置的发动机容易实现风冷。但是，通常星形发动机的连杆和曲轴要承受很重的负荷，并且结构复杂。这对于气缸多列星形布置的发动机是特别典型的（图7）。这种发动机与其他单轴发动机相比，在大马力下具有更小的尺寸和质量。

由于需要设计高速大功率发动机，故相当重视双轴或多轴结构。这类发动机的结构方案差异很大。双轴发动机可设计成气缸两列平行布置的形式（图8）。在这种情况下，两轴彼此之间用齿

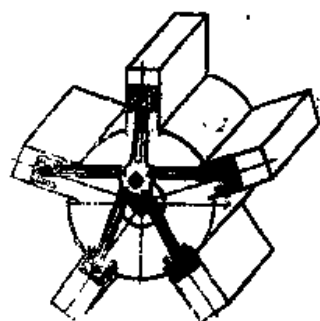


图7 气缸采用多列星型布置的发动机简图

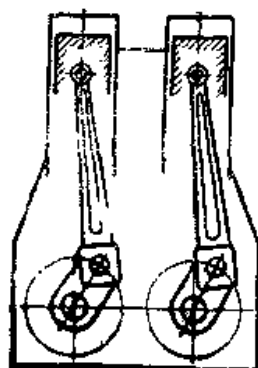


图8 双列气缸平行布置的双轴发动机的示意图

轮传动连接。必须注意气缸还有呈H型（图9）或I型布置的发动机。而且，这种发动机气缸可成角度布置并具有两个气缸共用燃烧室。

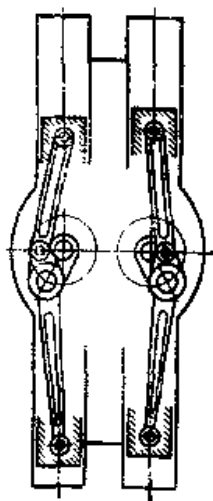


图9 气缸采用H型布置的双轴发动机的示意图

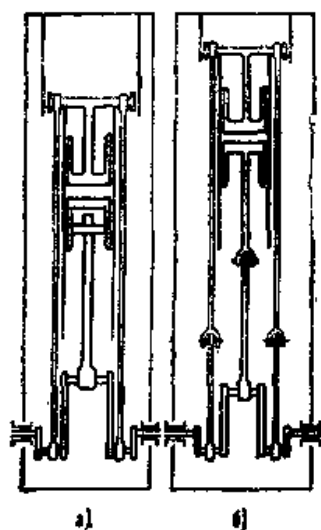


图10 单轴对动活塞发动机的示意图

a) 箱式 b) 楔块式

注意！ 具备几个轴能保证结构紧凑、轻巧，简化好些部件并减少其负荷。可以利用基础单轴发动机的一些零件，例如气缸体

和气缸盖、曲柄连杆机构的零件。

尤其还应提及采用对动活塞的二冲程发动机的结构方案。采用对动活塞的单轴发动机可能有下面几种型式：

单曲轴——箱式（图10a）或滑块式（图10b）；

双曲轴气缸单列布置（气缸可垂直布置，如图11a所示或水平布置）；

二联双曲轴气缸菱形布置（图11b）；

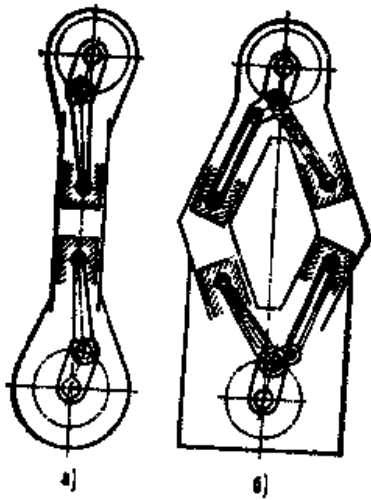


图11 双轴发动机示意图

a) 对动活塞气缸单列布置 b) 气缸菱形布置

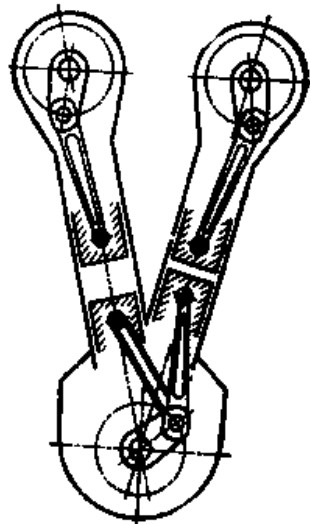


图12 两个工作腔且气缸V型布置的三轴发动机示意图

三个曲轴、两个气缸工作腔和气缸呈V形叉开布置（图12）；

三个曲轴、三个气缸工作腔且三个气缸轴线构成三角形（图13）。

注意！对动活塞二冲程发动机的主要优点是单缸功率大，换气 and 混合过程质量高，没有缸盖和气门。

具有轴线与曲轴轴线相平行的气缸，并采用倾斜转盘或摆盘传动用来带动主轴。

对动活塞的单轴发动机（参见图10），每个气缸上有一个带三个曲拐的主轴。在这种情况下两侧的曲拐布置成与中间的（主要的）曲拐大约相差 180° 角，经横梁和长杆与上活塞连接。

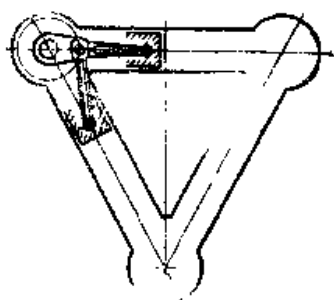


图13 三个工作缸三个气缸轴线构成三角形的三轴发动机示意图

按图13所示方案设计的发动机，尺寸较小，功率较大。它们的特点是某些部件太复杂，包括机体，且无法从内腔拆装零件（如某些泵和喷油器）。在这种发动机中，由气缸的一个活塞控制进气，而由气缸中的另一个活塞控制排气。并且控制排气的活塞受到排气冲刷而处于特别恶劣的条件下。因为每一气缸的各曲柄，一个相对于另一个不是正好成 180° ，而是偏移了 $10^\circ \sim 15^\circ$ ，这就使控制排气的曲轴输出较大的功率，因而这个轴承受较重的负荷。按图12和13所示方案设计的发动机，能使曲轴输出的功率均匀化，因为将控制排气的活塞和控制进气的活塞连接到曲轴的一个曲拐上了。

上述发动机结构方案，并未囊括表征气缸和曲轴各种布置特点和数量的全部可行的合理布局。不管是四冲程机（参见图1-9），还是二冲程机均可按这些方案设计。

几乎所有的内燃机都是单作用发动机。这些发动机可采用筒式结构的活塞，这样可减少外形尺寸（主要是减少气缸轴线方向的尺寸）和直线运动件的质量并简化结构。

注意1 四冲程发动机较二冲程发动机有下列优点：效率较高（对运输式柴油机而言），尤其在部分负荷时有较高的效率；活塞组、气缸、气缸盖和气门等零件的热负荷较小，这就造成采用风冷的较大可能性；活塞强制挤出和抽吸的结果使净气和充气较好；能够采用同活塞部分用气体连接的涡轮增压器；由于喷油泵

凸轮轴的旋转频率低，柴油机燃料供油系统的结构较简单。

二冲程发动机的主要优点是：有比四冲程发动机大的升功率（为1.5~1.7倍），因此在合理选择几何参数和结构参数的情况下，发动机尺寸和质量较小；随曲轴转角而变的扭矩均匀性较好，因此这种发动机有较轻的和较紧凑的飞轮（在气缸数和不平衡度相同的条件下）；连杆和曲轴上的负荷较小，并且它的变化幅度也较小。因此，在其他条件一样的情况下，强度储备较大；起动容易，起动装置和换向装置简单。

低转速大功率单作用发动机，基本上都采用滑块结构，以保证使用的可靠性和活塞组有较好的工作条件。双作用方案在质量相对增大不多的情况下能提高发动机功率1.5~1.8倍。但是现在双作用（一般是二冲程）不再生产了，因为双作用机结构复杂，活塞组、活塞杆和其他零件工作条件恶劣。双作用机很难保证良好的换气过程质量，尤其在气缸内活塞杆穿行的地方，混合气形成的质量很难保证。在结构较简单的单作用发动机中，采用增压也可得到所需要的功率。

§ 3 表征发动机结构的主要参数

设计师在设计发动机时，要解决一整套复杂问题，这些问题既与气缸及与其相邻系统内的过程有关，也与发动机布置有关。设计师要考虑到根据现代发动机制造业的要求，进一步完善结构的途径与可能性。

发动机的主要参数包括： c_m 、 n 、 S/D 、 p_e 、 i 、 D 。在确定气缸尺寸时，要给出其中的一些。其中，可给出 i 、 p_e 和 S/D 或 i 、 p_e 和 c_m 的数值，这些参数的组合在很大程度上表征着发动机的结构。

注意：在设计发动机时，必须在保持零件的强度、刚度、耐磨度、它们的几何形状简单和结构工艺性好，以及发动机工作可靠的情况下，保证发动机的规定尺寸和质量。

活塞速度和曲轴旋转频率 决定发动机高速程度的活塞速度

是与发动机型式及其用途有关的主要参数之一。随着活塞平均速度提高，发动机零件（首先是活塞组的零件）的热应力增大；曲柄连杆机构零件承受的惯性力增大；气缸套和曲轴轴承磨损增加；发动机使用寿命降低；因配气器官中气体流速提高，使该系统中的阻力增大。设计发动机时， c_m 值应根据发动机的用途选定。

注意！ 在结构设计和结构分析中，通常都是采用活塞平均速度 c_m 。

现代发动机曲轴旋转频率 n 为 $100 \sim 10000 \text{ r/min}$ ，个别情况下达 $12000 \sim 15000 \text{ r/min}$ 或更高（小排量赛车、摩托车发动机等）。直接与发电机连接的固定式发动机，当发电机的磁极对数一定时，其曲轴旋转频率取决于交流的标准周波数（每秒50周）。近几年呈现反对大幅度提高发动机曲轴旋转频率的倾向。

注意！ 数值 n 取决于同发动机相连接的机组的特性、它的效率、结构特点。可根据发动机曲轴旋转频率把发动机分为高转速的、中等转速的和低转速的。

活塞行程与气缸直径的比值 该参数直接与活塞速度和发动机功率有关。为了得到适宜的活塞速度并提高其机械效率，减少气缸轴线方向的尺寸（尤其二冲程发动机），提高曲轴刚度，高转速发动机的 S/D 值要适当地降低到一定的限度。随着曲柄半径减小，连杆轴颈和主轴颈的重叠度增大，此外，活塞环的磨损降低。 S/D 较小时，在气缸盖上易于布置配气机构的零件，但是，随着 S/D 减小，发动机长度增大，质量也往往增大。在这种情况下，缸套磨损几乎不减小，原因是缸套磨损与曲轴旋转频率成正比而与活塞行程无关。在二冲程直流换气发动机中，当 S/D 降低时，换气过程的质量变坏。

注意！ S/D 值是决定发动机尺寸和质量的主要参数之一。

注意！ 由于在短活塞行程的柴油机中，燃烧室高度减小，破坏了燃烧和混合气形成的条件，致使发动机经济性降低。

设计V型发动机时， S/D 值太大，气缸轴线间距离就大，且

发动机的总容积中相当大一部分不能利用。在采用小 S/D 值的V型发动机中，从曲轴尺寸计算中确定的发动机最小长度，大约与气缸体计算中得出的气缸体长度相等，因此，减小 S/D 在V型和多列发动机中尤为有利。采用小 S/D 结构特别是在大的夹角下，还会使V型发动机的高度和宽度减小。基于同一原因，水平对置气缸的发动机宜于设计成短冲程的。

注意！柴油机 S/D 最佳数值接近于1，且对发动机尺寸要求严格时也不应小于0.80。

对于混合气形成问题较易解决的强制点火式发动机， S/D 值可选择得比柴油机的小些。同时应指出，构件上的作用力主要取决于气缸直径，活塞行程是次要的。

平均有效压力 平均有效压力 p_e 取决于混合气形成、燃烧和换气的方法和质量、机械效率 η_m 、进气压力和温度及发动机的行程数。

在设计发动机时， p_e 值首先应根据经验数据选取，尔后，通过热计算将其精确化。在这种情况下，还要顾及到借助增压进一步使发动机强化的可能性。由于进气压力 p_e 增大（采用增压）就增加了进入气缸的空气或可燃混合气的质量，从而可大幅度提高平均有效压力。

注意！随着 p_e 的增大，主要件的机械应力和热应力、摩擦副的磨损都增大，同时增加了强制点火发动机爆震的危险性，因此，设计发动机时这个问题必须考虑。

气缸内最大压力 p_z 与实现循环的方法、压缩比、燃料种类、混合气形成方法等因素有关。通常在设计发动机时， p_z 值应首先根据发动机用途和混合气形成方法选定。在这种情况下，所决定的数值应能保证发动机主要零件的强度，首先是曲轴主轴承的工作能力。

气缸数和气缸直径 直接与气缸直径相关联的发动机气缸数 i 取决于所给定的发动机或机舱的尺寸，由工作过程的进行和（行程）数决定的扭矩均匀度，活塞组的热应力，对往复运动质量的平

衡及对这些质量惯性力的数值的要求,发动机生产条件(在气缸直径小、气缸数多的情况下,尤其大批量生产情况下可降低发动机生产成本),增大曲轴扭振的危险性,曲轴在任何位置下发动机起动的可能性等。

注意! 气缸数增加,发动机行程均匀度就提高,并使平衡性改善,起动容易,飞轮质量减小。

现行结构中气缸数在1~24的范围内,个别情况 $i=42\sim 56$ 。通常单列结构 $i=4\sim 10$; V型结构 $i=4\sim 20$;单列或多列星形结构 $i=5\sim 9$ (在一组中)。气缸数改变(在给定功率下)影响发动机的机械效率和指示效率。多缸结构中,缸数 i 增加,整个发动机的气缸尺寸就减小,同时也降低了运动件的质量,这就可提高曲轴旋转频率而不超出零件的许用应力。在决定气缸尺寸时,可利用使用中的发动机的数据和单缸机试验结果。

注意! 当零件数量增加时,发动机结构就变得复杂,在大批量生产条件下,虽说不会显著影响发动机的生产成本,但发动机的维护费用将提高。

注意! 采用V型或更复杂的方案时,因其曲轴箱长度和曲轴长度减小(在曲轴直径增加不大的情况下),可使发动机质量降低。

随着气缸直径增大,由于传往冷却介质的热损失减小,从而提高了有效效率;除活塞和缸盖热应力增加外,曲柄连杆机构和轴承的负荷也加大。这个问题首先反映在风冷发动机中,风冷发动机的气缸直径一般不超过150mm。强制点火发动机气缸直径增大是不适宜的,因为这会增加产生爆震的危险性。

发动机的质量和尺寸,发动机尺寸和质量是表征结构品质的极重要的指标。通常,在比较评价结构时可用比质量参数 g_N ,即发动机每一千瓦功率的质量。数值 g_N 与许多因素有关,其中包括发动机用途、结构方案、布置、零件材料以及上面谈到过的那些指标。数值 g_N 在1kg/kW(车用高转速发动机)到30~40kg/kW(船用低转速发动机)的范围内变动。发动机零件间的质量分布