

# 柴油机工程手册

①

西安内燃机科技情报资料编写组

• 1977 •

## 前 言

柴油机是一切工程的动力基础，无论是农业、交通运输、造船、拖拉机、石油、钻探、森林运输、铁路工程以及建筑、修路、各项工程都是离不开它的。因此柴油机工程在农业、工业和国防上占越来越重要的地位。

党的十一次代表大会在中：要在本世纪内实现工业、农业和国防、科学技术现代化。这是中国人民梦寐以求的理想，是毛主席、周总理和许多革命先烈的遗愿，是历史赋予中国共产党和革命人民的历史使命。

我们在编写这本手册时，曾经参考国内外一些书籍和资料。在柴油机工程的理论基础方面；柴油机的结构和使用维护检修、保养等方面，我们去粗求精，但仍避免不了许多烦琐体系。我们的目的只是想把国内外关于柴油机的发展情况，作一简单介绍以供各单位在选型上、使用上以及在设计柴油机时的参考。

英明领袖华主席在领导全党全军和全国人民取得了粉碎“四人帮”反党集团的伟大胜利以后，先后召开了农业学大

寨、工业学大庆的全国会议。又亲自主持党的十一次代表大会。并制定了抓纲治国的伟大战略决策。中共中央通知将在明年春召开全国科学大会。我国的科学技术必将出现一个空前的新局面。

由于我们认识水平所限，在编写这本手册肯定有不少错误和缺点；诚恳地希望广大读者对我们提出宝贵的意见。

西安内燃机科技情报资料编写组

1977年10月

# 目 录

第一章	柴油发动机简介	1—2
第一节	柴油机发展简史	2—5
第二节	柴油机的运转循环	5—6
第三节	四冲程循环发动机	6—7
第四节	四冲程循环发动机气门开闭时间	7—9
第五节	二冲程循环发动机	9—11
第六节	二冲程循环发动机的气阀开闭时间	11—13
第七节	二冲程循环与四冲程循环 发动机之选择	13—15
第八节	正常吸气与涡轮增压发动机	15—16
第九节	柴油发动机的速度范围	16—17
第十节	柴油发动机的单动和双动 以及气缸的排列形式	17—18
第十一节	柴油机和汽油机的比较	18—20

第二章	柴油机工程热力学基础知识	-----	20
第一节	能量守恒与转换定律	-----	20-21
第二节	柴油机的进气冲程	-----	21-26
第三节	柴油机的压缩冲程	-----	26-27
第四节	柴油机的燃烧过程及燃烧热化学	-----	27-37
第五节	柴油机燃烧室的设计	-----	37-48
第六节	柴油机的燃油喷射系统以及 喷油规律和特性	-----	48-53
第七节	柴油机的膨胀和排气冲程	-----	53-55
第八节	柴油机的效率与热平衡	-----	55-60
第九节	柴油机性能的综合指标	-----	60-64
第十节	柴油机的转速、速度特性、至易、 强化指标与寿命的可靠性	-----	64-69
附页1		-----	69-70
附页2		-----	70-71

# 柴油机工程手册

## 第一章 柴油发动机简介

柴油发动机是内燃机的一种形式，它主要是把燃料的化学能，转变为机械的工作动力。

自然界中燃料的种类很多，有固体的（如煤炭）液体的（如柴油、汽油）和气体的（如天然气、煤气）等。

燃料燃烧所产生的热能转变为机械能的发动机，统称做热机。

根据燃料进行燃烧过程所处的地点不同，热机可分为外燃机和内燃机两大类。

燃料在发动机外部进行燃烧的叫外燃机，如蒸汽机（往复式）汽轮机（回转式）等。

柴油机的应用范围很广，有陆上固定用的柴油机，它可以作为城市的发电厂和工厂的动力装置；船舶和舰艇用的柴油机；车用柴油机，如汽车内燃机等；农用柴油机作为排灌和农付产品加工的动力同时作为农田耕作和收获的拖拉机在内，以及森林开伐、石油、矿业都是以柴油机作为动力的。

柴油机使用的液体燃料范围很广，大马力的低速柴油机，成功地使用了劣质柴油，使柴油机的成本大为降低。最近还出现了用天然气作为燃料的发动机，以及用气体和液体作为燃料的多种燃料发动机。

## 第一节 柴油机发展的简史

1794年斯威雷特 (STREET) 设计成第一台内燃机，定名为斯威雷特机，他在一个倒置的气缸中放进一个可以移动的活塞，气缸的底部和顶部是用炉子来加热的，同时在它的上部用水冷却。在他的第一台发动机里，是把一小滴松节油气化，然后用一个顶杆使活塞抬高，并引入燃烧的空气，并从外部把火焰接触到气缸的小孔里，点燃混合气，使其在气缸内爆炸，而产生了向上的力，使活塞上升，然后用水使气缸冷却，在气缸内产生低的压力，由于重力的缘故将活塞拉至缸底。

塞狄·卡诺 (Sadi Carnot) 是一名年青的法国工程师。他所设计的发动机，是现代许多内燃机中最基本最理想的一种发动机，它是柴油机的雏型，它的原理是：

1. 在高压空气中，燃料发生自燃，空气被压缩到 15:1，产生的高温可达华氏 1572°，这种高温将可以充分点燃干柴。
2. 卡诺建议在点火前被压缩的空气要比气缸内部燃烧时有更高的空气压力，他建议在压缩终了用一个注射器向气缸内部很容易地注入燃料。
3. 卡诺发现发动机气缸的冷却有很重要的意义，气缸壁需要冷却到能继续工作。以后笛塞尔不相信这个发现，认为是一条走不通的路。
4. 排出热量的利用，卡诺设计的发动机，经过 100 年以后，排出的热量在水冰点以下。关于这种余热的利用，在今天已成为工业加热的原理。

1860年雷奴 (LENOIR) 接受了一项生产第一台商业用

内燃机的任务，它是用气体或干空气推拉活塞，这就是以后往复行程的活塞发动机，它是在进气后用火花塞点火，然后将活塞推至行程终端，在返回的行程，燃烧的气体即被排出。

这种发动机的运转是很平稳的，但有一个明显的缺点，它的热效率只有9%被利用，这主要是由于在大气的压力下，内燃的事实所引起的。

1862年比奥·第·罗勃斯为改进内燃机，使其达到最经济的设想：(1)可能获得的最大气缸容量和可能获得的最小气缸冷却表面。(2)可能获得的最大瞬时膨胀。(3)在膨胀终点，可能获得的最大压力。

他建议要获得最好的效果，主要是“比奥第·罗勃斯”的四行程循环的运转原理。

- (1) 活塞开始在全行程前吸气
- (2) 并跟着在行程后开始压缩
- (3) 当第三行程膨胀开始时点火
- (4) 当循环至第四和返回行程并将燃烧气体强制排出气缸外

1867年奥图和莱根合作，奥图建立第一个笨重的自由活塞发动机，它是用一个很长的倒置气缸，当气体发生爆炸时活塞向上移动，直至气体爆炸后产生的动力膨胀，由于气体的冷却，使气缸内产生部份真空，其结果由于活塞本身的重量，和它顶部的大气压力，迫使它向下移动，当活塞下降时，用一个棘轮把活塞和发动机轴连接起来，因此使发动机转变成动力，这种发动机的热效率最好只能达到12%。

1876年奥图又建成了一台“奥图—西伦特”气体发动



机，它是属于比奥·罗勃斯设想的四循环的工作原理。这种发动机与现代单冲的气体或油发动机相似。它使用便宜的火焰点火，它的热效率也只有16%。

1881年克拉克 (CLERK) 建立第一台两冲程循环的发动机，活塞的外向行程是动力行程，活塞的内向行程是压缩行程，燃料与空气在进入气缸中被分开，压缩空气的压力，大约可达每平方吋4磅。燃料与空气同时进入充气室内，而排出的气体通过一个未被复盖住的孔。充入气缸的新鲜气体，压缩活塞迫使其作返回行程，如同奥图发动机一样，火焰是在燃烧室内，通过气缸头部的孔，由滑瓣前后滑动来实现。

阿克罗德—斯图雅特 (ACKROYD STUART) 1890年设计了一种比较完善的发动机模型，它包括以下的要点：主要是为了防止可燃的混合气体过早的爆炸和提前点火，它有一个永久的点火装置，例如使用连续发生火花的火花塞，或预热塞，在通向气缸内部由于第一次属于全部压缩所需要的、一定数量的压缩空气，它与可燃的液体蒸气或燃气混合而形成的气体产生爆炸。

这种模型概括起来，即如众所周知的洪斯贝 (HORNSBY—ACKROUD) 就是利用这种理想设计的，它的燃料气化点火是利用热嘴，它是由气缸内的一个小的通道，连接于辅助燃烧室，起动时由外部的火焰来加热。

这种发动机虽未企图利用压缩空气的高温来进行点火，但它的优点已与现代高速柴油机基本相似，它的主要特点是：a) 压缩空气时必需供给燃料；b) 具有准备好的燃烧室；c) 在压缩行程的终点将燃料注射进高热的预热室。

笛塞尔 DIESEL 的原型机是 1892 年由德国人罗道夫·笛塞尔 RUDOLF·DIESEL 创建的，笛塞尔曾经设想一种发动机，它使空气被压缩后的温度，将远远超过燃料着火温度，因此燃料喷射进气缸内部时，由于无物质的空气的压力和温度的升高，当喷射进气缸的燃料形成雾化，在高温和高压的作用下而产生燃烧，它的温度继续上升，因而使燃烧后的气体发生膨胀，迫使活塞从上死点向下死点移动，由于燃烧后气体质量的膨胀，占据了气缸的全部容积。

笛塞尔的最初设想，是用于煤粉发动机，但是不久他放弃了他的原来设想，并制成燃油发动机。他的第一台发动机试验失败了，他又企图使压缩空气的压力达到每平方吋 1500 磅（105 公斤/公分<sup>2</sup>），由于气缸冷却的准备不足，又遭到了失败，以后笛塞尔又企图用一个很长的膨胀行程，以便得到气缸中内燃热量的利用，非但没有成功，并且还需要解决冷却问题。

他在 1895 年建成了第三台发动机，成功地利用了四行程循环的工作原理，这台发动机的压缩空气的压力，可达到每平方吋 450 磅（3.15 公斤/公分<sup>2</sup>），这台发动机就比较接近于现代的发动机，而且是采用水冷的。它的燃料是利用鼓风机的高压空气将其喷射进气缸内，这台发动机的热效率虽祇达到 24%，但比以前的发动机有很大的进步。

这些简短的历史，只是提到一些早期从事研究和发发展柴油机曾经发表过的部分资料，以后柴油机的大量发展，特别是燃料、喷射系统的改进，这就给制造现代化柴油发动机创造良好的条件并打下基础。

## 第二节 柴油发动机的运转循环

柴油发动机的运转循环，有二冲程的也有四冲程的。在单独的气缸中，通常称为二冲程或四冲程发动机，也就是说，活塞需要有二次或四次行程来吸进并充入一定数量的空气，将它压缩至最高的压力和温度同时注入一定数量的燃料，使其燃烧，当气体经过燃烧后发生膨胀，并传递动力给曲轴，如此为下一循环气缸的吸气行程作好准备，二冲程发动机曲轴转一圈，即可完成一个循环，图一是四冲程循环发动机的工作原理图。

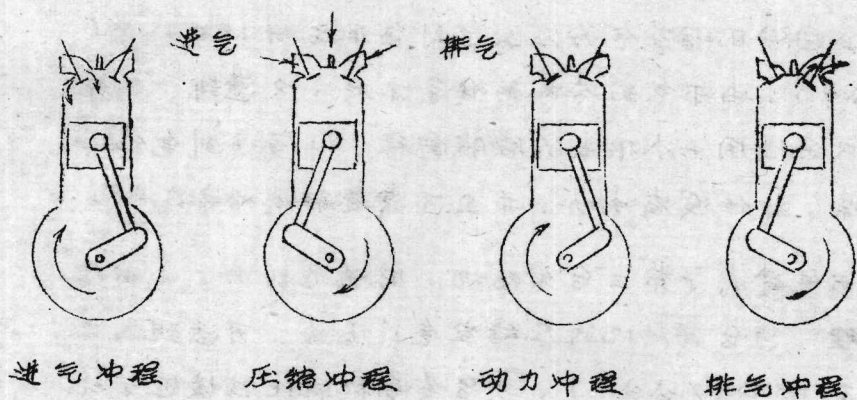


图1 排气冲程

图一 四冲程循环发动机工作原理图

在多气缸四冲程循环发动机中，每一个气缸完成全部循环，曲轴需要转两圈或者旋转720度，其中有两个气缸同时点火，因为曲轴的旋转，是建立在这样的基础上的；气缸内气体燃烧点火，是当曲轴转两圈时有规则的间隔时间内进行的，如果发动机有四只气缸，那么它的动力行程的间隔时间，将为6。

$720^\circ/4 = 180^\circ$ ，这样曲轴每隔半转，就有一个动力行程，假使发动机有八只气缸，其间隔时间为  $720^\circ/8 = 90^\circ$ ，其间隔时间越小，则发动机动力行程数越多，则曲轴发出的动力愈加均匀。

### 第三节 四行程循环发动机

四行程循环发动机，发动机需要四行程完成一个循环的，叫四行程循环发动机。当进气行程时，活塞从上死点移向下死点，此时进气门打开，当空气由进气门进入气缸后，此时进气门关闭，是为吸气行程，活塞又由下死点向上死点移动，将吸入的空气压缩至燃烧室的小空间内，是为压缩行程，当压缩行程接近终点时，被压缩至燃烧室小空间内的空气压力和温度均行升高，当燃料注射进高压和高温的炽热空气内，被汽化与燃烧。燃烧后气体的膨胀产生一定的压力而迫使活塞下行产生动力行程。当活塞接近下死点时排气门即被打开。此时活塞再由下死点向上死点移动将残留在气缸内的废气由排气门通过排气管和消声器流向大气。是为排气行程然后进气门重新被打开如此开始进行下一循环过程。实际上四冲程发动机包含这样的四个循环过程，所以又称为四冲程循环发动机。

### 第四节 四冲程循环发动机气门开闭时间

四冲程循环发动机气门开闭时间。当曲轴销转过两圈。相当于一个循环的四个冲程，当进气门在上死点 (TDC) 前  $20^\circ$  即被打开，其所以如此是因为气门早在活塞开始下行有充分的吸气时间，而进气门的关闭则在下死点以后的  $35^\circ$  是允许高速空气过量的流入气缸，当活塞由下死点继续向上死点移动，并

开始压缩冲程，此时进气门关闭，为了防止空气再进入气缸，与气缸内部的压缩空气流回进气歧头管。当活塞接近压缩冲程的终了时，即在上死点前的一个小角度，开始燃料的注射。至上死点以后的一个小角度，这段时间称为燃料注射过程。这是由于燃料在气缸内燃烧开始前的迟点火，以便燃料释放出更多的能量，在动力冲程时，能推动活塞迅速开始向下移动。(图2见附页)

当活塞行至下死点前  $35^\circ$  时排气门即被打开是为了使气缸内的残余废气有较大气高的压力迫使残余的废气通过排气管流向大气。当活塞向上移动开始排气冲程，这时气缸内残余废气的压力降落至接近大气压，而气缸内残余的废气，由于气体的“下吹”作用继续向气缸外部排出，当排气冲程终了直至活塞由上死点后  $20^\circ$  排气门才关闭，使气缸内残余的废气得以充分排净，以便准备下一循环过程的开始。

必须注意，进气门的再次被打开，它接近于排气冲程的终了，所以当活塞行至上死点时，既是进气门又是排气门的轻度打开，这叫做气门重叠。其目的：新鲜空气的充入气缸并使其流动，它将有助于排除气缸内残余的气体，不致引起两种气体的明显交流。或者混合。

各种不同型号发动机的制造厂，都规定它们制造的发动机有不同的气门开闭角度，事实表明，气门的开闭时间对发动机的速度有很重要的影响，同时气门的开闭时间与燃料注射时间同时并进，它们都是活塞在下死点前排气门提前开放，而进气门关闭，活塞在上死点后进气门开放而排气门关闭。而燃料注射是在上死点前排气门与进气门同时关闭。气门的开闭时间和燃料提前喷射角度的调整恰当可使发动机获得较高的转速。

## 第五节 二冲程循环发动机

二冲程循环发动机；所有二冲程循环发动机，一定要补足气缸内空气的压力每方吋 $2 \sim 7$ 磅（合每平方分 $0.139 \sim 0.492$ 公斤）因为二冲程发动机活塞每上下行一次即需完成压缩，动力，进气，排气四个冲程循环过程，当进气和排气是在一个活塞冲程中完成，即活塞接近下死点活塞头部离开排气孔而开始向外排气时，进气孔即被打开新鲜空气即进入气缸来，帮助扫气，因此气缸内新鲜空气的压力要高于气缸内残余废气的压力，因此在二冲程循环发动机补足气缸内新鲜空气的压力多借助于扫气泵的作用。

简单形式的二冲程循环发动机，它的实际循环顺序，是以供给新鲜空气的方式决定的，因此它被称为曲轴箱扫气活塞在压缩冲程时，当它在气缸中向上移动一半的时候，曲轴箱内的压力，低于外部的大气压力，空气通过调节阀进入曲轴箱内。当活塞在气缸内行至上死点，由油泵分配给喷油咀的燃油注入气缸发生爆炸，而产生动力冲程由于气体膨胀的结果而迫使活塞下行至气缸的一半位置。而曲轴箱内的气体受到压缩，也正是进气和排气开始的位置。（图3见附页）

排气口在气缸中的位置，要比进气转换口高一些。主要是由于活塞在下行时还没有盖住排气口，而气缸中的压力，已经降到接近于大气压，由于气体的“下吹”（blow down）作用，在曲轴箱内形成一定的压力，当活塞还没有遮盖住进气的转换口，使空气很快的进入气缸中，这就帮助扫除气缸内的残余气体，供给下一循环的新鲜空气。

这种由轴油的扫气方式，由于供给气缸的空气准备不足，它就可能来完扫气工作，因为气缸接受空气数量为活塞排量所限制，它将切断气流，使气流损失大，其结果这种方式发动机的输出功率，将比其它形式发动机低得多。另外这种方式的发动机，如果是多气缸的，每个气缸就必须要有个分开的曲轴箱扫气室，它对曲轴轴承和气缸壁润滑的控制，也是比较困难的。

但是无论如何上面这种方式的发动机具有结构简单的优点，主要是因为它的二作部分数量少，相对地它的保养也就比较简单，这就成为大众化的原因，虽然发动机发出的功率较低，因此它不需要高级技工来进行维修。

通常我们希望供给活塞排量较多的空气，至少要有 25~50% 许多二冲程发动机，它们采用各种形式的鼓风机，有往复的，旋转的，离心的，有的直接被发动机驱动，有的则用蜗轮驱动。

司开文扫气二冲程循环发动机，前面讨论过二冲程与四冲程循环发动机，可以假定二冲程循环发动机传递的功率和转速为四冲程循环发动机的两倍。由于废气大量排出，在气缸中仍保留一部分残余废气，新充入空气与残余废气混合而形成一定数量和比例的混合气体。再次充入气缸，这就是所谓高一级的司开文扫气效率。

这种发动机的另一种说法是所谓“吸气效率”，又叫做“容积效率”它就是气缸中新鲜空气所占的容积，和每一循环中气缸的排量亦即活塞在它的全部冲程中其位置（亦即活塞排量）之比。

我们熟悉的司开文扫气，它的进气和排气通常采用的是一个联合孔和滑阀，因此司开文扫气又分为“横向流”“环形流”及“均匀流”三种。（图4见附页）

“横向流”司开文扫气最常用的方法，它的进气孔是在气缸壁的一边，利用活塞冠的外形，使进入的空气直接冲上向气缸顶部一部分空气在活塞冠的反冲作用下将残存的废气，在与气缸壁相反的由于气体的流动特性的排气孔驱除出去，在气缸壁与进气孔相反位置驱除出去。“司开文效率”是利用气体沿着特殊设计的活塞冠直接由进气孔冲上至气缸顶部以达到扫气的目的。

“环形流”司开文扫气方法，它是增加“司开文效率”的一种方法。应该注意到气体流动的特性，以达到废气排出的目的，利用“十字流”司开文扫气的发动机，在排出废气的同时可获得少量的混合空气。

“均匀流”司开文扫气方法，它是把空气引进到气缸的一端，在密闭的气缸内，空气进入气缸后，在环绕气缸壁周围，由于它们的“反冲”特性驱除气缸内残余废气，“均匀流”司开文扫气方法，曾经使用在对置活塞的发动机中，这种发动机的进气和排气孔是位于气缸将与排气相反位置的一端，空气从气缸一端的进气孔进入将废气从气缸相反一端的排气孔驱除出去。“均匀流”司开文扫气方法气流是“切线流”的或者是“涡流”的形式，这种“涡流式”的气流有助于司开文扫气，它的“涡流式”的气流能增进发动机的内燃。（图5见附页美国通用公司所采用的均匀流扫气）

#### 第六节

#### 二冲程循环发动机的气阀开闭时间

在二冲程循环发动机中当活塞向下移动，起初还没有盖住



排气孔，（要比没有盖住进气孔稍微向下有一定的时间重合）是为了允许气缸中的压力有所下降，当压缩冲程活塞开始向上移动，它将最初盖住进气孔，并且在适当时候排气孔也被关闭，然后压缩冲程开始，在气缸中有一些空气，当进气孔关闭时，在排气孔被关闭前被迫从排气孔排出。这种方法叫做对称的司开文的扫气方法。在进气孔和排气孔同时打开，通过同样的曲轴角度，也就是在下死点前后，这个时间是由二冲程发动机内的循环来表示的。（图1见附页）

一些大的二冲程发动机为了防止进入气缸内的空气损失，它们的进气和排气孔是利用配气阀门的机构来执行和调节的，也有是进气通道和排气通道相连的在司开文扫气的进气通道中当空气由一个进气阀进入气缸中，当活塞还没有盖住这个进气孔高于气缸壁的排气阀。这个阀是为了防止混合气通过司开文扫气从排气孔逃逸，当活塞从下死点向上死点移动，它盖住低于排气孔的进气孔，但是空气仍旧能够流过直至较高的排气孔被盖住。

在排气的通道中装置一种旋转的阀门，这个阀门是利用气流的“下吹”而被打开，当活塞盖住进气孔之前阀门即行关闭空气在气缸内而活塞进行下一步压缩冲程。

这种司开文的扫气方法是为了防止进入气缸内的空气从进气孔中逃逸，又叫做不对称司开文扫气。因为这种的不对称的扫气时间，它是属于司开文扫气形式的一种方式。

利用这种扫气形式的发动机，它的气流损耗极小，这种扫气形式的发动机，也可以利用“均匀流”的司开文扫气，就是在同样的时间内，将排气阀关闭或者利用活塞将进气孔盖住。