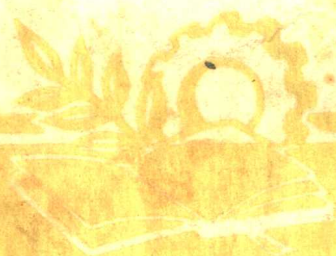


高等学校試用教材

汽車拖拉机发动机原理

程 宏 編 著



中国工业出版社

本教材是根据清华大学汽车拖拉机专业发动机原理课程的教学大纲编写的，讲述汽车拖拉机所用活塞式内燃机的工作原理。全书共分十一章，第一章是概述，第二章讲述理论循环，第三章介绍本课程所需用到的一些有关燃料和燃烧化学的内容，第四章到第九章分别讲述各个过程，第十章及第十一章综合讲述整机性能。

在学习本课程之前，应当已经学习过发动机构造和热力学等课程。按照教学计划，在学习本课程之后，还有发动机设计、燃料供给、燃料与润滑油剂及电气设备等课程。

汽车拖拉机发动机原理
清华大学农业机械学院程宏编

中国工业出版社出版（北京东黄城根路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

机工印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行·各地新华书店经售

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $9 \frac{1}{2}$ · 字数 216,000

1961年8月北京第一版·1961年8月北京第一次印刷

印数 00,001—02,637 · 定价(10-6) 1.15 元

统一书号: 15165 · 496(农机-9)

前 言

本书是中华人民共和国农业机械部教育司組織編写的高等学校汽車拖拉机专业“汽車拖拉机发动机原理”課程的試用教材。

汽車拖拉机发动机已有数十年的发展历史，热力过程的情况复杂，各方面問題很多，尤其是許多实际具体問題还处于依靠經驗解决的阶段。在这样的情况下，安排教材內容时所遵循的原則是：根据目前的发展水平系統地說明重要的基本概念，并且試图根据辯証唯物主义的观点进行安排和敘述。但这是一个大胆的尝试，編者限于水平，其中存在的問題一定是很多的。希望各校教师同学随时提出批評修正意見，尤其希望实践經驗丰富的生产或科学研究部門的同志多多指教，以便早日改正缺点，使教材更符合要求。

編 者

1961年4月

目 录

前 言	(1)
第一章 緒 論	(7)
第二章 发动机的理論循环	(7)
第一节 实际循环和理論循环	(9)
第二节 理論循环的分析和比較	(12)
第三节 理論循环的意义	(18)
第三章 燃料和燃燒	(18)
第一节 汽車拖拉机发动机所用的燃料	(20)
第二节 燃燒化学	(24)
第三节 热值和比热	(27)
第四章 吸 气 过 程	(27)
第一节 吸气过程的情况	(28)
第二节 吸气过程的参数	(33)
第三节 气体惯性的影响	(35)
第四节 单位时间的充气量	(39)
第五章 压 缩 过 程	(40)
第六章 火花点火发动机的燃燒过程	(40)
第一节 燃料的氧化反应	(44)
第二节 气缸内混合气的点火和燃燒	(46)
第三节 火焰传播速率和起火界限	(50)
第四节 发动机燃燒室中的燃燒	(53)
第五节 各种工作情况下的燃燒过程	(60)
第六节 不正常燃燒	(73)
第七节 用气体燃料时燃燒过程的特点	(75)
第八节 火花点火发动机的燃燒室	(80)
第七章 压縮点火发动机的燃燒过程	(80)
第一节 燃燒过程的情况	(81)
第二节 燃料的发火和迅速燃燒	(87)
第三节 緩燃时期及补燃时期	(92)
第四节 一些因素对于燃燒过程的影响	(95)
第五节 柴油机的燃燒室	(101)
第八章 燃燒过程的参数	(105)
第九章 膨脹过程和排气过程	(107)
第十章 发动机的性能指标	(115)
第十一章 发动机的特性	(115)
第一节 引言	(115)
第二节 汽油机的特性	(115)

第三节	发生爐煤气机的特点	(120)
第四节	柴油机的特性	(123)
第五节	发动机工作情况的稳定性和調速特性	(125)
第六节	发动机性能的提高	(131)

第一章 緒 論

一、对于汽車拖拉机所用发动机的要求

汽車是现代短途运输的主要工具，拖拉机是农业机械化的主要动力，对于国民经济的发展有重大意义。而发动机是汽車拖拉机的动力来源，是汽車拖拉机的心脏，其性能是决定汽車拖拉机使用性能的关键。

任何机器的存在条件是，能够加工制造，工作可靠，而且有一定的使用寿命，因为只有这样，才能真正为国民经济服务。同时要求生产及使用的成本低、寿命长、保养修理方便，加工簡便。对于汽車拖拉机这种运输式发动机来说，还希望重量輕。对于我国当前的具体情况来说，尤其希望燃料消耗少，能用各种不同燃料工作，其本身制造消耗材料特别是高級材料少。

二、原动力机的种类

原动力机的种类很多，大多曾經企图在汽車拖拉机上应用，新式动力机一出现，也大多立即考虑在汽車拖拉机上应用的可能。

蒸汽机曾經多次考虑应用于汽車拖拉机。蒸汽机可以应用劣质燃料，其扭矩变化的性能很好。但是由于需要鍋炉，比較笨重，使用时也麻煩，起动所需的准备時間长，热效率也低，因此除去山地林区等特殊情况下，蒸汽机沒有在汽車拖拉机上广泛使用。曾有人特意設計出一种拖拉机用的蒸汽机和鍋炉，虽然其所用材料及加工要求較高，但其总尺寸及重量都与用柴油机的情形相近，而且热效率可达13%，但也未推广使用。汽轮机則除去有上述各种缺点外，轉速还比較高，因此还没有見到在汽車拖拉机上应用汽轮机的具体建議。

在燃气轮机方面，由于近年的进步，已有許多国家在企图将燃气轮机用于汽車，也已經作过不少試制試驗的工作。燃气轮机的重量及尺寸都小，构造简单，沒有往复运动机件，牵引性能好，可以减少变速箱挡数，可以不需要离合器。但是目前由于叶片材料的限制，工作气体的溫度不能很高，这就限制了热效率的提高。而且汽車拖拉机所需的功率小，在功率小的燃气轮机中，不仅气流的摩擦損失大，而且結構上的相对間隙也大，这对于热效率是不利的。因此在汽車拖拉机上应用燃气轮机时，燃料的消耗比用活塞式內燃机时多一倍。但是如果加用热交换器来回收燃气轮机排气的热量时，則可使燃料消耗量大为减少，不过目前热交换器的体积和重量还相当大。火鳥Ⅰ号汽車用燃气轮机所装用的热交换器，据称可以回收废气中热量的80%，这时燃料消耗量已接近于活塞式內燃机的水平。有人在客車上試用过燃气轮机带热交换器，結果每100公里的耗油量为12—16公升。随着耐溫材料的进步以及輕便而效率高的热交换器的发展，小型燃气轮机的性能仍可提高。不过目前在試制实验燃气轮机的工作中，还存在許多困难。所以目前燃气轮机发展的情况，还没有到在汽車拖拉机上实际使用的程度。

自由活塞式发动机的历史已经很久。早期曾生产过自由活塞式发动机作为压气机。自由活塞式机与燃气轮机的组合也曾用于发电厂、轮船及火车。在自由活塞式机与燃气轮机组合中，自由活塞式机作为燃气发生器而工作，燃气轮机则作为牵引发动机。自由活塞式机中的往复部分惯性力自相平衡，所以全部组合机工作非常稳定，振动很小。在自由活塞式机中，燃料燃烧的温度可以很高，但排出到燃气轮机的工作气体，则温度相当低，叶片材料的问题易于解决。组合机对燃料的要求比一般活塞式发动机低，膨胀比大，热效率高，据汽车用组合机的初步试验结果，有效比燃料消耗量小于201克/马力小时，估计稍加改善可到180克/马力小时以下。当然这种组合机在材料及加工要求方面都比较高，成本比较贵，构造上也比较复杂。汽车用的组合机目前尚在初步试制实验的阶段。

从前曾经企图在小客车上应用电力，是用蓄电池向牵引电动机供电。不过由于蓄电池的重量很大，而汽车充电一次所能行驶的里程很小，所以没有得到实际应用。近年来在蓄电池技术方面有了相当的进步，目前的铅蓄电池大约每公斤可蓄电30瓦特小时，而现代实际生产的银锌电池，每公斤可蓄电80—130瓦特小时，而且这种电池的內阻小、机械强度高、寿命长、自己放电很少。有人曾在三座小客车上试用这种新式蓄电池，这时汽车的总重比用汽油机时还轻一些，最高车速可达80公里/小时。用270公斤的电池时，每充电一次可行驶300公里以上。不过这种电池的成本很高，只是在针对特殊目的时，才可考虑使用。

近期开始发展的燃料电池，也曾有人试用于拖拉机，据说效率有达80%以上的可能，不过这还是处在初步试验的阶段。

直到目前为止，虽然曾经企图在汽车拖拉机上应用各种不同的原动力机，但是基本上一向都是广泛使用活塞式内燃机。从性能、重量、使用方便程度、燃料消耗量等方面看来，在最近相当时期内，将仍然是以应用活塞式内燃机为主。

三、活塞式内燃机的早期发展

任何一门科学技术的发展，都是决定于社会生产的需要，而发展的程度则是人类各方面科学技术智识累积的结果。所以追溯一门科学技术的最根本起源，是个很难明确肯定的问题。关于用内燃机来产生动力这样想法是什么年代怎样产生的，是个不清楚的问题。在实际的内燃机出现之前，这类想法已经很多。例如1680年Huyghens曾建议在气缸中利用火药而形成一种内燃机，也有许多人设计过内燃机，甚至请求过专利权，进行过试验，但是一方面由于当时生产上的要求不够迫切，另一方面制造工业水平尚低，因而都没有实际生产。

在十八世纪初，由于煤、铁及其他工业的发展，原来应用最多的动力来源水轮机已不能满足要求，因而实现了蒸汽机，使工业得到很大发展。但是蒸汽机笨重，而且工作准备所需时间长，因而产生对于内燃机的迫切要求，同时机械制造工业水平也有了相当的进步，于是条件俱备，到十九世纪中叶产生了内燃机。

就已有的资料看来，在1823—1826年间，就已经有少量煤气机的商业生产(Samual-Brown)。到1860年，煤气机的制造获得相当的成功(Lenoir)，五年内生产了三四百台，

是一种没有压缩过程的煤气机，功率为3—5馬力，热效率只有4.2%左右。这样的性能不能比蒸汽机占优势，于是很多人进行研究，怎样来提高其热效率。1862年 Beau de Rochas曾訂出一些提高热效率的原则，根据这些原则可推引出有压缩过程的四冲程工作循环。1878年在巴黎世界博览会上，以Otto的名义展出了四冲程机，其热效率达15%以上，这就使得内燃机比起蒸汽机来，占压倒的优势。同时由于专利权的糾紛，使Otto的专利权大受限制，于是内燃机得到迅速的推广。

在以上的发展阶段中，都是用照明煤气作为内燃机的燃料。因为在当时欧洲各城市中，照明煤气的供应比较方便。但是应用于工业煤气时，经济性较差，到十九世纪末又发展为用发生炉煤气，并结合炼铁工业应用高炉煤气。

在内燃机开始发展的当时，俄国有照明煤气供应的城市极少，但是石油资源丰富，而且液体燃料在应用上也比较方便。在1879年，Костович在彼得堡組織液体燃料发动机的設計，1884年試制，1885年开始試驗。大約同时Gottlieb Daimler也开始制造輕油发动机，是四冲程机，轉速为800轉/分，应用表面蒸发型汽化器。在1887年Daimler将发动机用于車輛。1889年Benz展出了輕油机汽車，是用电火花点火。到第一次世界大战期間，汽油机已经有相当的成就，不过当时的压缩比只有4—4.5。在这期間提出了側置气門的渦流室設計方案，并且明确提出发动机的爆震問題，这是限制汽油机性能提高的一个重要問題，后来就有許多人从事于爆震的研究。1922年Midgley发现四乙鉛的抗爆作用，不久即被广泛用于发动机燃料。

为了扩大使用燃料的来源，1885年Priestman制成重油机，是利用废气热量使重油蒸发，与空气混合后送入气缸，在低压压缩比下用电火花点火。約在1890年时，Akroyd Stuart所制的重油机仍是用低压压缩比，但是利用气缸内的热球来点火。1893年Diesel提出利用空气压缩的高温来使燃料发火的办法，并且在許多国家取得专利权。Diesel原来提出的循环方案，实质上是近于卡諾循环，燃烧过程按等温情况进行。在試制发动机时，Diesel起初企图用煤粉作燃料，不用冷却水套。后来在試驗中改正了認識，在用液体燃料和有水套的情况下获得成功。由于这种发动机的热效率较高，迅速得到推广。

早期的柴油机是利用压力約60大气压的空气来喷射燃料。高压空气压缩机很容易出故障，而且在喷油器有漏洩时，可能发生爆炸危险。因此許多人在努力設法，企图不用压气机而仍然得到优良的燃料喷射作用。起初是設法利用一部分燃料燃烧的压力来喷射燃料。1907年有初期的預燃室式柴油机出現。到1912年，由于机械工业的发展，才完成目前所用的液压直接喷射的方式。

四、活塞式内燃机的类别

将事物分类，可以帮助理解事物的通性和特性。事物的分类应当根据本质特性的异同进行。不过事物的本质特性不限于一个方面，于是根据不同的本质特性来分类时，就会得到不同的分类情况。汽車拖拉机发动机可以根据所用燃料的种类分为液体燃料发动机、气体燃料发动机和固体燃料发动机。在从国家的燃料资源与供应消費情况来考虑发动机的問題时，宜于这样分类。而且应用不同燃料的发动机，由于燃料性质的影响，在燃料供給系統和性能方面也各有其密切連系的特点。因此这种方法是最常用的一种分类

法。汽車拖拉机发动机也可以根据点火的方式，分为火花点火发动机和压缩点火发动机。点火方式不同时，不仅对于发动机性能有重大影响的燃烧过程完全不同，所发生的问题和解决的方式有本质上的不同，而且在结构设计方面也有很大区别。因此从研究发动机的热力过程和設計问题的观点看来，宜于按点火方式分类。发动机也可以按换气过程的不同，分为四冲程机和二冲程机，也可以按混合气形成方式分为外部混合机和内部混合机。每种分类方法都有其一定特征的根据。

1. 按所用燃料分类:

(1) 液体燃料发动机 汽車拖拉机发动机所用的蒸发性的液体燃料有汽油、煤油和酒精。一般都是先在气缸外部使燃料雾化蒸发，与空气混合之后送进气缸，用电火花点火。最近发展的汽油喷射方法，也是先形成气态混合气，然后由电火花点火。

汽油机的特点是：单位功率的重量小，工作安静，生产成本较低，但是使用油耗较大。因此汽油机适用于需要轻、舒适而单位时间消耗燃料较少的摩托车、小客车、轻型卡车，也用于中型卡车和轻型拖拉机。

柴油机性能不好，过去由于燃料资源与消费平衡的原因，曾用于拖拉机及小型固定式机。这种发动机寿命短而油耗量大，目前已很少应用。

酒精的生产成本较高，而且是许多其他工业的重要原料，过去一般都是在特殊情况下作为代用燃料。

汽車拖拉机发动机所用的非蒸发性的液体燃料基本上是柴油。柴油机都是将燃料喷入气缸内，在高温空气中自己发火燃烧。这种发动机的特点是单位功率的重量较大，生产成本较高，但是使用油耗量较小。因此柴油机应用于单位时间消耗燃料较多的中型、重型卡车，公共汽车及拖拉机等。在西欧由于燃料价格的关系，小客车应用柴油机的趋势也在增长，有的大城市中的出租汽车，有90%以上用柴油机。

将重油应用于汽車拖拉机高速柴油机的問題，目前还没有解决。

(2) 气体燃料发动机 液化煤气是炼油工业的副产物，在大气温度下于20大气压力即变成液态，携带方便。液化煤气应用时，也是先形成混合气然后火花点火，发动机的性能可以超过汽油机。但是液化煤气的使用限于炼油工厂的附近，而且液化煤气是化学工业上的贵重原料，因此液化煤气的应用，受到一定的限制。

压缩煤气应用时，一般也是先形成混合气然后火花点火，发动机的性能与汽油机相近。这种煤气在大气温度下于200大气压力仍是气态，因此携带不便，而且使用地区限于产地附近。

(3) 固体燃料发动机 固体燃料在应用时，都先经过气化，形成发生炉煤气。在汽車拖拉机发动机上，一般都是使煤气与空气混合后，用火花点火。发动机的功率较小，约为汽油机的50—60%，还需要携带相当重而且体积相当大的煤气发生炉、冷却器、滤清器等装置。不过这种发动机可以利用许多便宜的燃料资源，因此在汽车与拖拉机上应用的相当多。

2. 按点火方式分类:

(1) 火花点火发动机 在这种发动机中，都是在压缩终了以前，先形成气态燃料与空气的比較均匀的混合气，然后以电火花点火，利用火焰的传播将混合气燃烧。由于

这种燃烧过程的特点，发动机有所特有的一系列技术问题，例如爆震现象、火焰传播速度、多缸机的均匀分配、负荷的变量调节等等对发动机性能有重要影响的问题；也有其一些特点，例如机件的机械负荷小、重量小、工作安静、转速高等。

(2) 压缩点火发动机 在这种发动机中，都是用高压压缩比先将空气压缩到很高的温度，然后将液体燃料以很高压力喷入气缸，利用空气的高温使燃料发火。由于这种燃烧过程的特点，发动机也有所特有的一系列技术问题；与火花点火发动机完全不同。其性能上也有一些特点，例如机件所受负荷大、重量大、工作不安静、排气不洁净等。

除去上述两种点火方式之外，还有所谓热管点火、热面点火等方法，不过用这些点火方法的发动机性能较差，汽车拖拉机发动机上一般不应用。

3. 按换气过程分类：

(1) 四冲程机 在这种发动机中，活塞运动四个冲程即形成一个工作循环，废气的排除和新气的吸入利用了两个冲程，于是曲轴每转两转有一个工作冲程。在这种发动机中，换气的效果比较容易掌握，而且对于功率不大的汽车拖拉机发动机来说，比利用二冲程机，在重量和体积方面也相差不多。因此过去在汽车拖拉机上所用的发动机基本上都是四冲程机。

(2) 二冲程机 在这种发动机中，活塞运动两个冲程即形成一个工作循环，在膨胀冲程末期及压缩冲程的初期，同时完成废气的排除和新气的充入，于是曲轴每一转即有一个工作冲程，发动机的功率可以比较大。

在这种发动机中进行换气时，会有一部分新气进入气缸后，又立时随废气排出气缸。在汽油机上，由于新气是含有汽油的混合气，这样会使燃料损失较多，因而油耗量较大。所以二冲程汽油机只用于需要特殊轻便、生产成本低而使用率低、单位时间消耗燃料少的情形，一般是只用于摩托车，也有小型客车用二冲程汽油机的，不过很少，而且效果不好。

在柴油机上，换气时的新气只是空气，因此没有燃料损失的问题。过去在大型柴油机上，由于重量和体积的问题比较严重，二冲程机的优点非常显著，因此应用较多；在汽车拖拉机发动机上则应用很少，而且在小型高速柴油机上，换气过程也比较难于组织好。但是近年来在这方面有很大的进步，汽车拖拉机用的高速廻旋扫气二冲程柴油机，已经可以有相当高的性能，商品型号也日渐增多。

4. 按混合气形成方式分类：

(1) 外部混合机 这种发动机是利用蒸发性好的液体燃料或是气态燃料，在气缸外部与空气混合，形成比较均匀的混合气送进气缸，然后由电火花点火。这种发动机的特点，实际上包括在上述的火花点火发动机的特点之内。当所用燃料是液体燃料时，燃料供应量的调节和燃料的雾化是利用汽化器来完成，这种发动机又称为汽化器式发动机。在汽化器式发动机中，由于燃料的雾化、蒸发和分配对于发动机性能的影响很大，因此有其一系列所特有的技术问题。

(2) 内部混合机 在这种发动机中，是将燃料喷进气缸，使燃料在气缸内与空气混合，以获得氧气而燃烧。在这种发动机中，可以用压缩点火（如一般柴油机），也可以用火花点火（如汽油喷射发动机）；可以用非挥发性液体燃料，也可以用挥发性液体

燃料，甚至也有人用过气体燃料。因此这种发动机的特点是需用燃料喷射设备将燃料喷入气缸，进行混合气形成的时间较短。

以上介绍了一些活塞式内燃机的分类，每一种分类方法都是根据某一方面的特性进行的，特别是根据重要的本质特性进行的。因此如果综合各种分类来描述一个发动机时，就可以比较全面地从各方面特性来说明该发动机。例如说某一个发动机是二冲程内部混合火花点火汽油机，就可以使人比较全面而且明确地了解该发动机的性能和特点。

五、本课程的任务

在我国的社会主义建设中，机械化是提高劳动生产率、发展国民经济的一个重要方面，而活塞式内燃机是机械化所需动力的一个重要来源。但是在社会主义建设的飞跃发展中，对于生产所需的材料燃料消耗也必然急剧增长，因此如果能设法使发动机的材料消耗减少而功率增大，使油耗降低，使能应用各种燃料资源，则可以在一定的材料和燃料供应的基础上，生产并使用更多的发动机，使生产率更加迅速地提高，使社会主义建设更加迅速发展。

要使发动机小而功率大，同时燃料消耗少，就需要使发动机的热力循环进行得更有利；要使发动机能应用各种不同的燃料资源，就需要使发动机的热力循环适合所用燃料的固有特性。本课程的任务就在于研究发动机的热力过程、热力循环和整机性能。如果说发动机的机件结构和布置相当于发动机的骨肉，则发动机原理相当于发动机的生活机理，而燃料供给设备相当于发动机的心脏，燃料与润滑剂相当于发动机的营养。因此学好发动机原理是从事有关发动机的设计、制造和科学研究等工作的重要基础。

第二章 发动机的理论循环

第一节 实际循环和理论循环

一、发动机的实际循环

在四冲程火花点火发动机中，于排气冲程終了时，气缸间隙容积内存留有燃烧生成的废气，其压力高于大气压力。当活塞由上死点回行后，气缸内的残余废气膨胀而压力降低，随后即将空气及燃料所组成的新混合气吸入气缸，由于气体流动时受有阻力，气缸内压力低于大气压力。将新混合气吸入气缸的这个工作过程称为吸气过程，如图2-1中的 ra 曲线所示。在吸气过程中，气缸内的压力低于大气压力，工作物质是废气及新混合气的混合物，工作物质的量和质都是在变化的，而且工作物质与缸壁之间有复杂的热交换。

然后活塞由下死点向上死点运动，进行压缩过程，如 ac 曲线所示。在压缩过程中，工作物质的质及量基本上没有什么变化，可是工作物质与缸壁之间有复杂的热交换关系，而且工作物质的比热随温度而有所变化。压缩到 c 点时，由于火花点火的作用而开始燃烧过程，如 cz 曲线所示。由于燃烧需要时间，压力不是瞬时上升的。在燃烧过程中，新混合气燃烧成废气，所以工作物质在质的方面有变化，同时由于燃烧不完全以及高温分解作用，燃烧生成物的组成成份很复杂，燃料的热量并没有完全放出。在这个过程中，也发生有热量的交换和比热的变化。

当活塞由 c 点向 e 点运动时，进行膨胀过程。在膨胀过程中，仍有燃料放热的现象，也发生有热量的交换和比热的变化。

到 e 点时，排气门打开而开始排气过程。起初是利用工作物质的压力排气，然后是由活塞的运动（排气冲程）排气，由于气体流动的阻力，排气压力高于大气压力。在排气过程中，工作物质的量有变化。

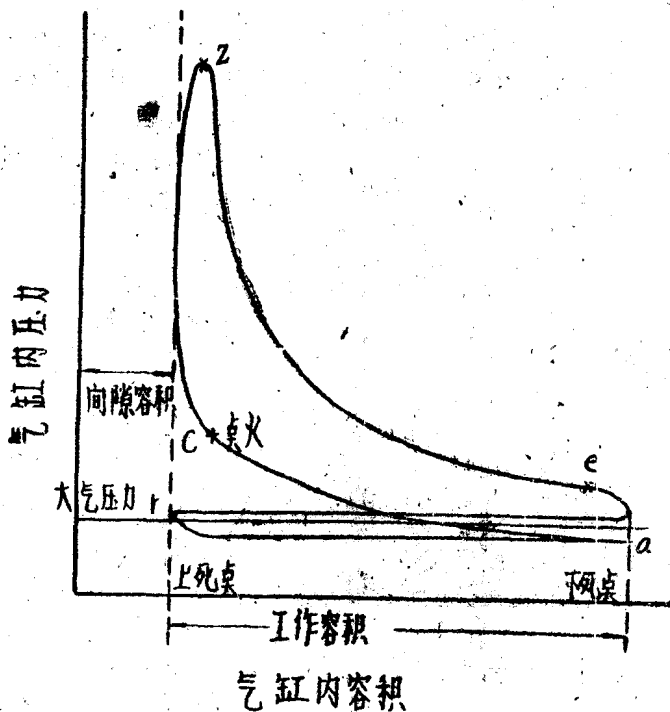


图2-1 火花点火发动机的实际示功图（吸排气部分放大）

在发动机稳定工作时，上述的过程是周而复始的，气缸内压力变化的情况也是周而复始的，因而形成所谓的实际工作循环。这种循环只是表示气缸内情况的循环，并不是热力学中的工质状态的循环。

气缸内压力随气缸容积而变化的图称为示功图（如图 2—1），图中的面积代表工作物质对活塞所作的功，因此实际循环的进行情况就决定发动机的功率和经济性。仔细研究实际循环以及各个过程的情况，研究怎样能使过程进行得有利，就可以指导我们有效地来改善发动机的性能，指导我们正确有利地发挥发动机的功用。

二、理论循环

由以上所述可知，发动机的实际循环和过程的情况是非常复杂的，为了便于明确了解循环的某些性质，了解影响循环的功和经济性的因素，宜于将实际循环及过程的情况简单化后进行研究，这样简单化后的循环称为理论循环。将实际循环简单化的程度可以不同，所以理论循环的形成基础也可以不同，最简单的一种理论循环是根据下列的简化条件所形成的：

1. 假设在循环的变化过程中，工质的质和量都没有变化。根据这样的假设条件，就不再考虑吸气及排气过程，避免了气体流动阻力的影响，也不再考虑燃烧时工质的变化，不考虑燃烧的完全程度以及热分解的问题，燃烧的加热和排气的热能损失由理想的加热过程和放热过程代替。这样考虑的循环成为一个工质状态变化的封闭循环。

2. 假设加热过程和放热过程是在等容的情况下进行，这样的情况与实际循环的情况相近。

3. 假设工作物质的比热是一定的，不随温度而变。

4. 假设在压缩和膨胀过程中，工质与外界没有热量交换，而且假设压缩和膨胀是等熵过程。

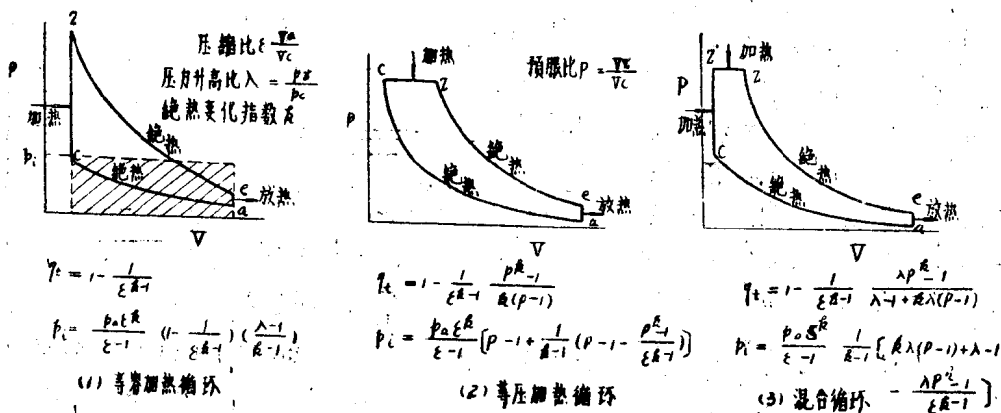


图 2—2 活塞式内燃机的理论循环

根据这样的假设所形成的循环如图 2—2 (1) 所示，由于加热过程是在等容情况下进行，所以称为等容加热循环。等容加热循环这个名词有时也用来指火花点火发动机的实际循环，因此火花点火发动机有时称为等容燃烧发动机，当然这里所谓的等容并不是绝对地容积一定，只是用来表示其相对于其他循环的特征而已。这种等容加热四冲程循

环最早在1862年就已经初步提出, 1876年才成功地生产出四冲程机, 在世界性博览会上以鄂图 (Otto) 的名义展出, 随后得到迅速的推广, 因而这种循环过去常称为鄂图循环, 而火花点火发动机也常称为鄂图发动机。

上述的等容加热循环是符合于火花点火发动机的特点的, 在火花点火发动机中, 燃烧速率很高, 放热近于等容情况; 此外还有所谓等压加热循环, 如图 2-2(2) 所示, 符合于用高压空气喷射燃料的大型低速柴油机的工作特点; 还有所谓混合循环, 如图 2-2(3) 所示, 符合于藉高油压喷射燃料的高速柴油机的工作特点。这种区分是历史上留传下来的, 在当前的发展状况下, 高速柴油机中的放热速率以及压力上升速率, 往往还超过了汽油机中的速率。

由于历史上的原因, 等压加热循环又称为笛色耳 (Diesel) 循环, 同时“笛色耳”这个名称习惯上又用来泛指一切柴油机。

第二节 理论循环的分析和比较

一、理论循环的参数和指标

循环的指标中最重要的是热效率 η_i 及平均指示压力 p_i , 相当于经济性及循环所作功的多少。 p_i 是循环所作功 W 除以工作容积 V_h , 相当于示功图的面积除以冲程长, 是一个假想的平均压力, 这个平均压力作用于活塞一个冲程所作功正等于循环的功 (见图 2-2)。应用 p_i 作为循环的指标而不用 W , 可以避免工作容积 V_h 大小的影响, 因而便于表示和比较循环进行情况的好坏。循环参数的名称和意义见图 2-2 中的说明。

根据热力学的计算, 可以得出循环指标与循环参数之间的关系式, 这些关系式也列于图 2-2 中。

二、影响循环指标的参数

1. 压缩比 ϵ 由图 2-2 中所示的关系式看来, 压缩比提高时, 三种循环的热效率 η_i 都提高, 就同样的加热量而言, p_i 自然也提高。

压缩比提高时使循环的热效率提高这种种关系, 也可以利用压力—容积 $p-V$ 图解或温—熵 $T-\Phi$ 图看出来, 而且这样可以得到比较明确的物理概念。图 2-3 所示是压缩比对于等容加热循环的影响, $aczc$ 是原有的循环, 在压缩比提高后成为 $ac'z'e'$ 循环。由 $T-\Phi$ 图可以看出, 当加热量相同时, $c'z'$ 曲线下的面积应当与 $c-z$ 曲线下的面积相等, 因而 z' 点必在 z 点的左方。所以在压缩比提高后, 放热量将减少, 减少的量相当于面积 $enme'$, 于是压缩比提高后循环所作功较多, p_i 及 η_i 都较高。由 $p-V$ 图可以看出, 当压缩比提高后, 在 n 点状态的工质所含内能必然低于 z 点状态的内能, 因为在两种压缩比下的加热量相同, 而在压缩比较高时, 在 n 点以前多作了 $cc'z'n$ 面积所相当的功。由是可知 n 点必然在 z 点的下方, 因而 e' 在 e 点的下方, 就是压缩比提高后, 循环的放热量较少, 于是循环所作功较多, p_i 及 η_i 都比较高。压缩比对于其他循环的影响, 也可以用同样的方法来分析。

压缩比提高则 p_i 及 η_i 都提高, 但是由图 2-2 中的关系式可知, η_i 与 p_i 并不是成直线关

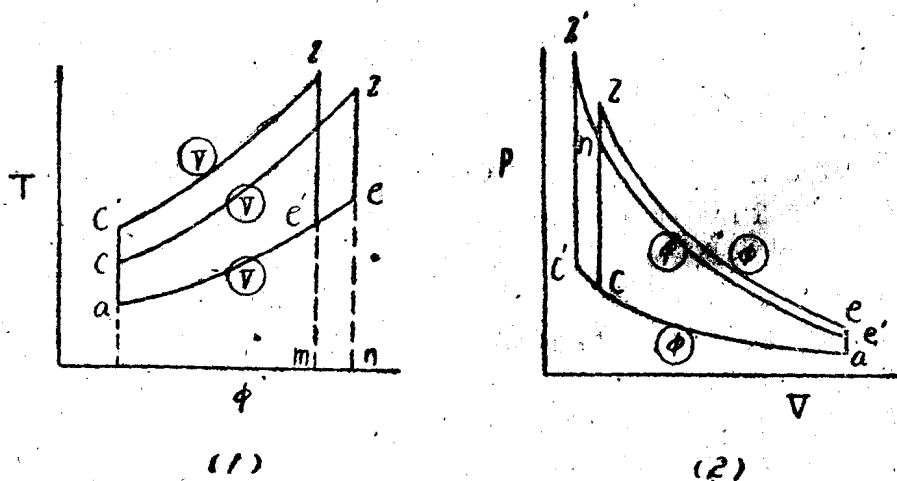


图2-3 压缩比对于等容加热循环的影响

系，图2-4表示 η_t 随 ϵ 而变化的情况，由图可知，在压缩比低时，提高 ϵ 的有利影响很大，但在压缩比高时，提高 ϵ 的效果就很小了。另一方面，由图2-3可以看出，压缩比提高时，循环的最高压力也增大，从机械负荷的观点看来，这是不利的。

2. 绝热变化指数 k 由图2-2中的关系式可以看出，工质的绝热变化指数对于热效率有相当大的影响，图2-5所示是 k 值对于等容加热循环热效率的影响， k 值对于其他循环也有相似的影响。

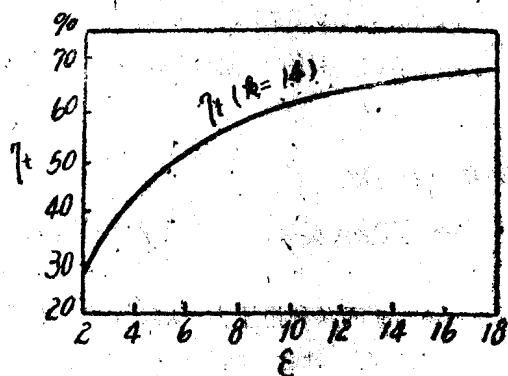
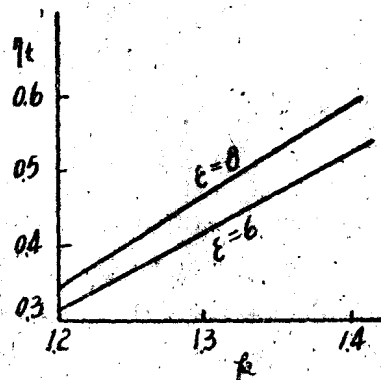


图2-4 压缩比与等容加热循环热效率的关系

图2-5 k 值对于等容加热循环热效率的影响

3. 加热量如果循环的压缩比和工质量相同而改变加热量时，上述三种理论循环的指标有不同的变化。

就等容加热循环来说，当加热量改变时，参数 λ 将改变。由图2-2中所示的关系式可知，当 λ 改变时， p_1 将随之改变，但是 η_t 不变。这种结论的物理概念可以简单地作如下的理解：在等容加热循环中，热量都是在等容情况下（就是当活塞在上死点时）加入的，每部分所加热量都同样地使工质的温度升高，使压力升高，都同样地有从上死点膨胀到下死点的做功机会，而且由于工质的比热假设是不因温度而变，所以每部分热量使工质的温度有同样升高。因此在等容加热循环中，加热量的多少只影响 p_1 而不影响

η_t 。

在等压加热循环中,当加热量改变时,参数 ρ 将改变。由图2—2中所示的关系式可知,当 ρ 改变时,不仅 p_i 改变, η_t 也改变。加热量愈多,则 ρ 愈大,于是 p_i 增加而 η_t 减小,这种现象可以这样理解:加热量愈多时,整个循环所作功是加多了,但是最后所加部分热量的加热时期距上死点愈远,该部分热量做功的机会愈少,因而其热效率愈低,结果整个循环的 η_t 随之减小。图2—6表示 ρ 值对于热效率的影响。

由此还可以理解:事实上热效率的高低决定于加热后工质膨胀比的大小,压缩比高只不过是造成膨胀比可以高的一个条件。

对于混合循环来说,加热量改变对于热效率的影响比较复杂,由以上对于等容加热循环及等压加热循环的理解,可以了解到,如果等容部分加热量增加,则热效率提高,如果等压加热部分的热量增加,则热效率降低。事实在混合循环中,当总加热量一定而在等容及等压情况的分配不同时,热效率也不同,分配于等容加热的部分愈大,则热效率愈高。图2—7就是表示这些特性的图解,是根据理论循环的计算式计算所得。图中虚线表示一定的 ρ 值,实线表示一定的总加热量。

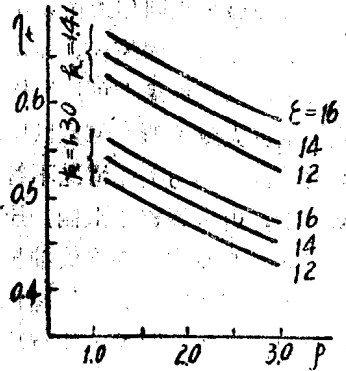


图2—6 ρ 值对于等容加热循环热效率的影响

三、理论循环的比较

将理论循环进行比较,可以了解哪种循环比较优良,因而可以指导我们在实践中去实现高效率的循环。不过在实现不同的循环时要受到不同的客观条件的限制,因而在进行理论循环的比较时,很难决定比较的共同基础,而比较的基础不同时,所得出的结论也不相同。

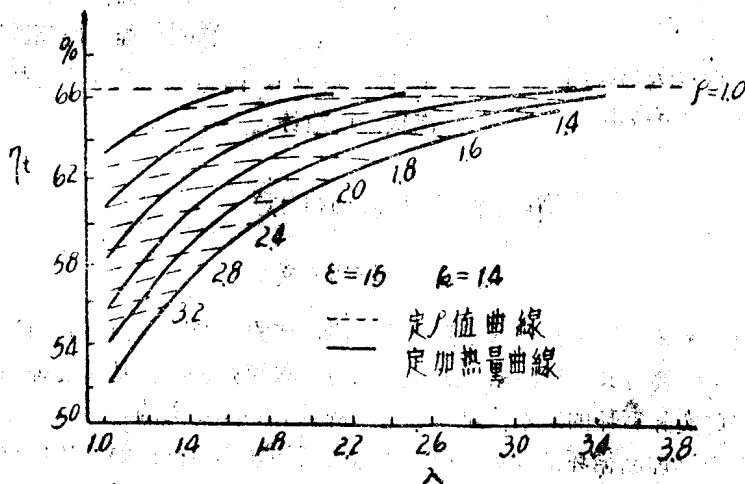


图2—7 加热量对于混合循环热效率的影响

1. 压缩比及加热量相同 在这种基础上来比较各种循环时,可以根据图2—2中

所示的关系式看出, 等容加热循环的热效率最高, 等压加热循环的热效率最低, 而混合循环的热效率在中間。这些性质可以更簡便地由 $T-\phi$ 图看出来。在图2—8中, 曲线 c 、 c' 及 c'' 下的面积都相同, 而等容加热循环的放热量最小, 等压加热循环的放热量最大。

以加热量相同作为循环比較的基础, 还是比较符合于实际的, 因为在实际发动机中, 同样的空气量(工质量)理論上可以燃烧同样的燃料量, 发出的热量也大致不变。但是以压缩比相同作为循环比較的基础, 則与实际情况不符, 因为在火花点火发动机中, 由于爆震的限制, 压缩比较低, 目前一般只有6—8左右, 而在柴油机中, 由于需要利用压缩温度来使燃料发火, 压缩比必須高得多, 一般都在14以上。因此虽然就压缩比相同的条件說来, 等容加热循环的热效率最高, 但是实际上柴油机的热效率却比汽油机的热效率高。

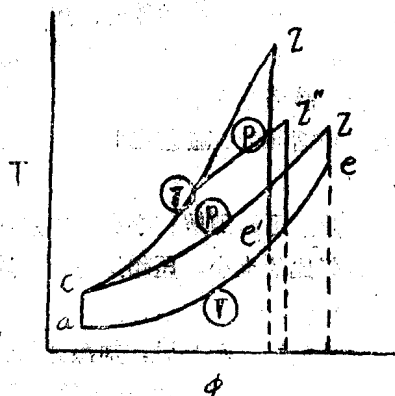


图2—8 压缩比及加热量相同时的理論循环比較

2. 循环最高压力及加热量相同 由图2—9可

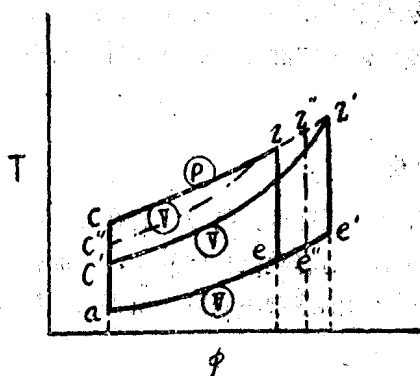


图2—9 最高压力及加热量相同时的理論循环比較

以看出, 在这样的比較基础上, 等压加热循环的热效率最高。这样的比較基础是比较合理的, 因为循环最高压力决定所需要的机件强度, 不过事实上由于压缩比的差别, 最高压力也不可能相同。目前一般汽油机的燃烧最高压力約 35—45公斤/厘米², 而一般柴油机的燃烧压力約 50—75公斤/厘米²。可是随着发动机技术的发展, 一方面为了提高汽油机的热效率, 压缩比在逐渐提高, 而另一方面为了减低柴油机机件所受负荷和使之工作得比較安静, 燃烧过程在逐渐改善, 使压力上升逐渐减小, 因而两类发动机的燃烧压力有逐渐接近的趋势。

第三节 理論循环的意义

一、上述分析的意义

上述的理論循环虽然是根据一些假設条件而形成的, 与实际循环有相当差别, 在考虑实际问题时, 需要对其分析的結論加以实践的考驗和修正, 但是从这种简单的分析, 可以了解到一些实际循环的基本性质, 这些了解是有实际意义的。

例如根据上述理論循环的分析, 压缩比愈高則热效率愈高, 而且压缩比愈高, 則热效率随压缩比而增大的程度愈小。实际上虽然热效率与压缩比的关系在具体数值上与理論循环分析的结果不同, 但是变化的趋势是相符的。早期汽油机的压缩比不过是4, 再高就要发生爆震。在这样低的压缩比下, 热效率随压缩比而改变的程度很大, 因此多年