

全国高等水产院校试用教材

# 渔船柴油机

大连水产学院主编

船机制造专业用

农业出版社

全国高等水产院校试用教材

# 渔 船 柴 油 机

大连水产学院主编

船机制造专业用

农 业 出 版 社

主 编 周尚忠 大连水产学院  
协 编 戚远和 大连水产学院  
吴忠晃 大连水产学院  
郑国本 大连水产学院  
于 践 大连水产学院  
高建中 湛江水产学院  
徐云庆 上海海洋渔业公司七·二一大学  
张传诗 上海海洋渔业公司七·二一大学

200/28

全国高等水产院校试用教材

渔 船 柴 油 机

大连水产学院主编

农业出版社出版 (北京朝内大街130号)

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 29.5印张 642千字  
1981年5月第1版 1983年5月北京第2次印刷  
印数 2,301—3,600册

统一书号 15144·626 定价 3.00元

## 前 言

本书以渔船柴油机为主，对柴油机的工作原理，以及各主要零部件及附件的结构作了较系统的分析。全书分两篇。第一篇讲述柴油机工作过程的基本理论；第二篇讲述柴油机动力学，以及各主要零部件、附件及其系统的结构分析。

本书主要是为培养柴油机管理与修理方面的技术人员而编写的，理论上有一定的深度，对影响柴油机工作过程的各种因素分析力求全面、透彻；在设计、计算方面则力求简捷、清晰，重点在于帮助读者掌握分析问题和解决问题的能力。此外，在选材中还注意到渔船柴油机的特点，以及尽可能吸取一些国外较先进的资料。

本书除了供作教材以外，还可供广大船用内燃机专业人员进修、提高用。

编 者

1980年2月

# 目 录

## 第一篇 柴油机原理

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 柴油机的工作循环 .....           | 1  |
| § 1—1 柴油机的理论循环 .....         | 2  |
| 一、柴油机的实际工作过程 .....           | 2  |
| 二、内燃机的理论循环 .....             | 3  |
| 三、理论循环的分析 .....              | 5  |
| 四、理论循环与实际循环 .....            | 7  |
| § 1—2 柴油机的性能指标 .....         | 9  |
| 一、指示指标 .....                 | 9  |
| 二、有效指标 .....                 | 11 |
| 三、机械损失及其测定 .....             | 12 |
| 第二章 柴油机的换气 .....             | 14 |
| § 2—1 换气过程的特点 .....          | 14 |
| 一、换气过程的概况 .....              | 15 |
| 二、气体的动力效应 .....              | 17 |
| 三、热交换与能量损失 .....             | 22 |
| § 2—2 换气过程的参数与指标 .....       | 23 |
| 一、排气终点的状态参数 .....            | 23 |
| 二、进气终点的状态参数 .....            | 24 |
| 三、残余废气系数 $v_r$ .....         | 26 |
| 四、充气系数 $\eta_v$ .....        | 26 |
| § 2—3 研究换气过程的方法 .....        | 31 |
| 一、 $\eta_v$ 的测定 .....        | 31 |
| 二、各缸充气均匀性的测定 .....           | 32 |
| 三、气门试验 .....                 | 32 |
| 四、气道试验 .....                 | 34 |
| 五、配气正时的选定 .....              | 36 |
| § 2—4 二冲程柴油机的换气过程 .....      | 36 |
| 一、换气过程的情况 .....              | 37 |
| 二、换气过程的状态参数 .....            | 39 |
| 三、换气方式 .....                 | 40 |
| § 2—5 二冲程柴油机换气质量的分析和研究 ..... | 42 |
| 一、评定换气质量的参数 .....            | 42 |
| 二、标准扫气效率 .....               | 44 |

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| 三、影响扫气效率的因素及主要参数的选择 .....       | 45        |
| 四、时面值与气口设计 .....                | 47        |
| 五、换气质量的试验与测定 .....              | 49        |
| <b>第三章 柴油机的压缩与膨胀过程 .....</b>    | <b>50</b> |
| § 3—1 压缩过程 .....                | 50        |
| 一、压缩过程的特点 .....                 | 50        |
| 二、压缩过程的参数 .....                 | 51        |
| 三、压缩比 $\varepsilon$ 的选择 .....   | 52        |
| § 3—2 膨胀过程 .....                | 53        |
| 一、膨胀过程的特点 .....                 | 53        |
| 二、膨胀过程的参数 .....                 | 54        |
| <b>第四章 燃料空气混合气的形成 .....</b>     | <b>55</b> |
| § 4—1 燃料的喷射 .....               | 56        |
| 一、燃料喷射的液力过程 .....               | 56        |
| 二、喷射过程 .....                    | 60        |
| 三、喷油特性 .....                    | 64        |
| 四、供油特性 .....                    | 66        |
| § 4—2 燃料的雾化 .....               | 69        |
| 一、燃料喷注的分散 .....                 | 69        |
| 二、影响喷注形状及质量的因素 .....            | 72        |
| § 4—3 燃料空气混合气的形成 .....          | 74        |
| 一、混合气形成的基本过程 .....              | 74        |
| 二、柴油机燃烧室内的气流运动 .....            | 76        |
| 三、空间混合气形成 .....                 | 79        |
| 四、表面蒸发混合气形成 .....               | 79        |
| § 4—4 柴油机的燃烧室 .....             | 81        |
| 一、燃烧室的任务 .....                  | 81        |
| 二、统一燃烧室（又称直接喷射式燃烧室或开式燃烧室） ..... | 82        |
| 三、涡流室燃烧室 .....                  | 84        |
| 四、预燃室燃烧室 .....                  | 85        |
| 五、各种燃烧室的性能特点 .....              | 86        |
| <b>第五章 燃料与燃烧 .....</b>          | <b>87</b> |
| § 5—1 燃料与燃烧化学 .....             | 87        |
| 一、内燃机燃料的一般知识 .....              | 87        |
| 二、燃烧热化学 .....                   | 93        |
| § 5—2 柴油机的燃烧过程 .....            | 100       |
| 一、燃烧过程的四个时期 .....               | 100       |
| 二、滞燃期内发生的过程 .....               | 101       |
| 三、速燃期内发生的过程 .....               | 104       |
| § 5—3 影响滞燃期的一些因素 .....          | 106       |
| 一、物理因素 .....                    | 106       |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 二、化学因素 .....                      | 108 |
| 三、构造因素 .....                      | 111 |
| § 5—4 影响速燃期的主要因素 .....            | 114 |
| 一、局部地区的反应速度与总的燃料空气混合比 (燃空比) ..... | 114 |
| 二、燃料发火时的最低与最高燃空比 .....            | 115 |
| 三、柴油机的“敲击” .....                  | 116 |
| § 5—5 柴油机燃料的最后燃烧及燃烧不完全产物 .....    | 118 |
| 一、缓燃期与补燃期 .....                   | 118 |
| 二、柴油机排气“冒烟” .....                 | 118 |
| 三、燃烧不完全产物 .....                   | 119 |
| 第六章 柴油机的特性与试验 .....               | 123 |
| § 6—1 柴油机的工作特性 .....              | 123 |
| 一、柴油机的工况 .....                    | 123 |
| 二、柴油机的速度特性 .....                  | 124 |
| 三、柴油机的负荷特性 .....                  | 137 |
| 四、柴油机的万有特性 .....                  | 139 |
| § 6—2 影响柴油机工作特性的各种因素 .....        | 141 |
| 一、影响指示指标的因素 .....                 | 141 |
| 二、影响机械损失的因素 .....                 | 143 |
| 三、提高柴油机动力性与经济性的途径 .....           | 144 |
| 第七章 柴油机废气涡轮增压 .....               | 147 |
| § 7—1 废气涡轮增压的基本工作原理 .....         | 147 |
| 一、增压是提高柴油机功率的有效措施 .....           | 147 |
| 二、增压方式 .....                      | 148 |
| 三、增压器的基本结构与工作原理 .....             | 149 |
| 四、增压器的主要性能参数及型号编制规则 .....         | 153 |
| § 7—2 废气能量的利用 .....               | 155 |
| 一、废气能量 .....                      | 155 |
| 二、废气能量利用的两种基本形式 .....             | 156 |
| 三、废气涡轮增压柴油机的扫气 .....              | 157 |
| 四、排气脉冲转换器 .....                   | 159 |
| 五、气波增压 .....                      | 160 |
| § 7—3 废气涡轮 .....                  | 163 |
| 一、废气涡轮利用燃气流动而作功 .....             | 163 |
| 二、废气涡轮中的热力过程 .....                | 164 |
| § 7—4 离心式压气机 .....                | 168 |
| 一、空气在离心式压气机中所进行的热力过程 .....        | 168 |
| 二、空气在离心式压气机中的流动 .....             | 170 |
| § 7—5 废气涡轮增压器特性 .....             | 174 |
| 一、离心式压气机特性 .....                  | 174 |
| 二、废气涡轮特性 .....                    | 177 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| § 7—6 废气涡轮增压器与柴油机的匹配 .....  | 178 |
| 一、废气涡轮增压器的选用 .....          | 178 |
| 二、废气涡轮增压器与柴油机联合运行特性 .....   | 181 |
| 三、废气涡轮增压器与柴油机联合运行线的调整 ..... | 182 |
| § 7—7 涡轮增压对柴油机性能的影响 .....   | 185 |
| 一、柴油机功率 $N_e$ .....         | 185 |
| 二、机械效率 $\eta_m$ .....       | 186 |
| 三、最高爆发压力 $P_z$ .....        | 186 |
| 四、热负荷 .....                 | 186 |
| 五、过量空气系数 $\alpha$ .....     | 186 |
| 六、中间冷却器 .....               | 187 |
| 七、配气机构 .....                | 188 |
| 八、燃油系统 .....                | 188 |
| 九、扭矩外特性 .....               | 188 |

## 第二篇 动力学及结构分析

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 第八章 柴油机动力学 .....      | 190 |
| § 8—1 柴油机的受力情况 .....  | 190 |
| 一、柴油机的气体作用力 .....     | 190 |
| 二、柴油机的惯性作用力 .....     | 192 |
| § 8—2 曲柄连杆机构运动学 ..... | 193 |
| 一、基本概念 .....          | 193 |
| 二、活塞的位移 .....         | 193 |
| 三、活塞的速度 .....         | 194 |
| 四、活塞的加速度 .....        | 195 |
| 五、例题 .....            | 196 |
| 六、习题 .....            | 198 |
| § 8—3 曲柄连杆机构动力学 ..... | 199 |
| 一、曲柄连杆机构运动部件的质量 ..... | 199 |
| 二、曲柄连杆机构运动的惯性力 .....  | 200 |
| 三、惯性力的简单分析 .....      | 201 |
| 四、轴颈与轴承的受力简述 .....    | 203 |
| 五、例题 .....            | 205 |
| 六、习题 .....            | 206 |
| § 8—4 柴油机的平衡 .....    | 206 |
| 一、基本概念 .....          | 206 |
| 二、单缸发动机的平衡 .....      | 207 |
| 三、直列式多缸发动机的平衡 .....   | 211 |
| 四、习题 .....            | 235 |
| § 8—5 柴油机的扭转振动 .....  | 235 |
| 一、柴油机扭转振动的基本理论 .....  | 235 |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 二、扭振的回避与消减 .....          | 253        |
| <b>第九章 柴油机的运动机件 .....</b> | <b>260</b> |
| § 9—1 活塞组 .....           | 260        |
| 一、活塞的工况 .....             | 260        |
| 二、活塞的材料 .....             | 263        |
| 三、活塞头部 .....              | 264        |
| 四、活塞裙部 .....              | 268        |
| 五、活塞销座与活塞销 .....          | 272        |
| § 9—2 活塞环 .....           | 275        |
| 一、活塞环的工作原理 .....          | 275        |
| 二、活塞环的检验 .....            | 278        |
| 三、活塞环的断面形状 .....          | 280        |
| 四、活塞环的材料和表面镀覆 .....       | 282        |
| 五、油环 .....                | 285        |
| § 9—3 连杆曲轴组件 .....        | 287        |
| 一、连杆组的结构分析 .....          | 287        |
| 二、曲轴 .....                | 294        |
| 三、飞轮 .....                | 295        |
| <b>第十章 柴油机的固定机件 .....</b> | <b>297</b> |
| § 10—1 机体与气缸盖 .....       | 297        |
| 一、机体 .....                | 297        |
| 二、气缸盖 .....               | 302        |
| 三、燃烧室的密封 .....            | 304        |
| § 10—2 气缸与气缸套 .....       | 307        |
| 一、气缸和气缸套的结构与材料 .....      | 307        |
| 二、气缸的耐磨性 .....            | 309        |
| § 10—3 气缸的穴蚀 .....        | 311        |
| 一、产生穴蚀的原因 .....           | 311        |
| 二、影响穴蚀的各种因素及其预防 .....     | 313        |
| 三、总结 .....                | 316        |
| <b>第十一章 柴油机的轴承 .....</b>  | <b>317</b> |
| § 11—1 润滑理论概述 .....       | 317        |
| § 11—2 轴承工况 .....         | 320        |
| 一、作用在轴承上的负荷 .....         | 320        |
| 二、轴承的润滑 .....             | 322        |
| § 11—3 轴承的材料 .....        | 324        |
| 一、轴承材料的要求 .....           | 324        |
| 二、轴承材料的简介 .....           | 325        |
| 三、渔船柴油机滑动轴承的常用材料 .....    | 329        |
| § 11—4 轴承的结构分析 .....      | 329        |
| 一、轴瓦工作表面的几何形状 .....       | 330        |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 二、轴承宽度和油槽 .....         | 332 |
| 三、轴承间隙 .....            | 334 |
| 四、轴承的定位与安装 .....        | 336 |
| 五、止推轴瓦 .....            | 337 |
| 六、300 系列柴油机轴瓦简介 .....   | 338 |
| § 11—5 轴承的损坏及其分析 .....  | 338 |
| 一、疲劳 .....              | 338 |
| 二、早期磨损 .....            | 347 |
| 三、腐蚀 .....              | 348 |
| 四、穴蚀 .....              | 348 |
| 五、轴瓦和轴承座之间产生相对运动 .....  | 349 |
| 第十二章 配气系统 .....         | 351 |
| § 12—1 气门的通过能力 .....    | 351 |
| § 12—2 气门及其布置 .....     | 353 |
| 一、气门的工作条件及材料 .....      | 353 |
| 二、气门的布置 .....           | 354 |
| 三、气门的结构分析 .....         | 356 |
| 四、气门座的结构与材料 .....       | 357 |
| 五、气门弹簧的分析 .....         | 358 |
| 六、壳式气门及可转式气门机构 .....    | 360 |
| § 12—3 凸轮的外形分析 .....    | 362 |
| 一、凸轮的基本参数 .....         | 362 |
| 二、气门间隙对凸轮外形的要求 .....    | 363 |
| 三、气门机构对柴油机运转的影响 .....   | 365 |
| § 12—4 凸轮轴的结构 .....     | 366 |
| 一、凸轮轴的结构尺寸 .....        | 366 |
| 二、凸轮在轴上的相对角位置 .....     | 367 |
| 三、凸轮轴轴承 .....           | 369 |
| 四、几种渔船柴油机的凸轮轴结构 .....   | 370 |
| § 12—5 配气机构的传动机件 .....  | 371 |
| 一、凸轮与顶头的材料及其相互影响 .....  | 371 |
| 二、顶头的结构分析 .....         | 372 |
| 三、推杆与摇臂的结构情况 .....      | 373 |
| 第十三章 燃油系统 .....         | 375 |
| § 13—1 喷油泵及其材料 .....    | 375 |
| 一、柱塞式喷油泵三种供油方式的分析 ..... | 375 |
| 二、喷油泵偶件的结构及其材料 .....    | 377 |
| § 13—2 喷油泵的结构分析 .....   | 377 |
| 一、主要参数的选择 .....         | 377 |
| 二、喷油凸轮外形的选取 .....       | 378 |
| 三、出油阀的结构与材料 .....       | 380 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 四、喷油泵偶件的磨损 .....               | 381        |
| 五、柱塞式喷油泵的速度特性 .....            | 382        |
| 六、国产高速柴油机的喷油泵系列 .....          | 383        |
| § 13—3 喷油器的结构、材料及其分析 .....     | 387        |
| 一、喷油器的作用与要求 .....              | 387        |
| 二、喷油器的结构与材料 .....              | 387        |
| 三、喷油器的基本参数 .....               | 389        |
| 四、喷油器的磨损 .....                 | 389        |
| <b>第十四章 柴油机的调速系统 .....</b>     | <b>390</b> |
| § 14—1 柴油机调速器的调速作用 .....       | 390        |
| § 14—2 直接作用式调速器 .....          | 397        |
| 一、全制式调速器的基本构造、原理及特性 .....      | 397        |
| 二、调速器的工作指标 .....               | 402        |
| 三、直接作用式调速器的缺陷和改善途径 .....       | 407        |
| § 14—3 间接作用式调速器 .....          | 408        |
| 一、间接作用式调速器的基本概念(“反馈”的应用) ..... | 408        |
| 二、反馈的其他结构型式 .....              | 414        |
| 三、间接式调速器的应用实例 .....            | 418        |
| 四、电气调速器 .....                  | 432        |
| § 14—4 调速器在并联运行的柴油机上的应用 .....  | 433        |
| 一、同步发电机的并车运行 .....             | 433        |
| 二、对并车运行的柴油机调速器的要求 .....        | 434        |
| <b>第十五章 起动系统 .....</b>         | <b>436</b> |
| § 15—1 保证柴油机起动的条件 .....        | 436        |
| § 15—2 影响柴油机起动性能的因素 .....      | 437        |
| § 15—3 改善柴油机低温起动性的途径 .....     | 438        |
| <b>第十六章 废气涡轮增压器 .....</b>      | <b>441</b> |
| § 16—1 离心式压气机的结构 .....         | 441        |
| 一、吸气装置 .....                   | 441        |
| 二、压气机叶轮 .....                  | 441        |
| 三、扩压器 .....                    | 445        |
| 四、压气机排气蜗壳 .....                | 446        |
| § 16—2 涡轮机结构 .....             | 447        |
| 一、废气进气壳 .....                  | 447        |
| 二、喷嘴环 .....                    | 448        |
| 三、涡轮叶轮 .....                   | 449        |
| 四、涡轮轴 .....                    | 450        |
| § 16—3 废气涡轮增压器的轴承、润滑及密封 .....  | 450        |
| 一、轴承 .....                     | 450        |
| 二、轴承的冷却与润滑 .....               | 452        |

# 第一篇 柴油机原理

## 第一章 柴油机的工作循环

柴油机是以柴油为燃料的一种动力机械（或称原动机），广泛地应用在交通运输、工程机械等各方面。在海洋渔业方面又几乎成为唯一的动力装置。作为原动机由于采用了不同的能源而得名：诸如：热机、原子能发动机等等。其中热机广义地分为内燃机和外燃机。内燃机通常是以燃料直接在热机的工作气缸内燃烧，放出热能并通过一定形式的工作机构转变为机械功的；外燃机热能的获得则需要一些辅助装置。换言之，内燃机的工质直接在工作气缸的内部产生；外燃机的工质则间接地产生在工作气缸的外部。柴油机是热力发动机，柴油机是内燃机的一种。

迄今为止，人类对于内燃机的应用还不足百年的历史。在不到一个世纪的时间里，内燃机工业从无到有，由小到大，在质量和数量方面确实有着突飞猛进的发展，其面貌是日新月异的。如今，内燃机科学也和其它科学一样，在理论研究和生产实践上应用了现代化的科技手段，是一门需要借助于多学科的应用科学，这主要表现在研制和测试等方面。相比之下，关于内燃机的基本理论的研究进展则是缓慢的。总之，内燃机——这种动力机械工程无论在理论研究、设计制造，还是在使用、维护诸方面，都是以试验为基础的试验科学。关于深入的理论研究、完整的计算方法尚有待于发展。

在工程上，人们常常以四大指标来评定内燃机的发展水平：动力性——单位尺寸或重量的内燃机的功率；经济性——单位时间发出单位功率的燃料消耗；可靠性——零部件及整机无故障连续工作的能力；耐久性——主要易损件的使用寿命。内燃机的质量高低取决于多种因素：既取决于整体布置方案、零部件结构选择、工作参数的确定等设计因素，也取决于材料选择、加工、装配工艺水平等制造因素；即在某种意义上说来主要依赖于有关工业的技术水平。

本书旨在于介绍柴油机工作原理及其零部件结构分析的基本知识，了解柴油机工作过程进行的情况及其规律性，了解柴油机机件的结构特点及其改进方向，以便从设计、修造，特别是科学管理方面寻求改善上述动力和经济指标的措施与途径。

本章将通过学习柴油机基本工作过程，分析工作过程中的主要参数及其因果关系，以便认清改善柴油机工作过程的基本规律性。须知，这些基本规律对柴油机功率的提高、油耗的降低并使其经久耐用是有着重要影响的。

## § 1—1 柴油机的理论循环

### 一、柴油机的实际工作过程

柴油机的种类很多，有人可以就其气缸数目、气缸排列方式、整体结构形式、功率、转速、进气方式、冷却方式、起动方式、燃烧室型式、用途等等作出分类。但是，最基本的分类还是按完成一个工作循环所需的活塞冲程数来把所有型式的柴油机分作四冲程和二冲程两种。本章以四冲程柴油机为例说明它的基本工作过程。剖析柴油机的工作过程可以用这样的结论概括：从机构学上看柴油机，它是由活塞、连杆、曲轴这三大运动组件构成的曲柄连杆机构；从热力学上看柴油机，它是由气缸盖、气缸这两大固定组件及活塞运动组件构成的燃烧室中所进行的与大气相通的热力循环。《柴油机原理》的任务就是研究这个热力循环的。所以，这里先来简单介绍这个热力过程。

关于柴油机的实际工作过程，不妨先从冷起动开始描述。如图 1—1 所示，柴油机起动时或者用外力始动曲轴（如电起动，或人力起动），或者用外力始动活塞（如压缩空气起动）使活塞在气缸中作往复直线运动。活塞运动的区间叫行程，又称气缸工作行程，行程的端点叫止点（又称死点）；距曲轴回转中心的远点叫上止点，近点叫下止点。四冲程柴油机工作的第一个冲程叫吸气冲程：活塞自上止点向下止点运行。进气门在配气机构的控制

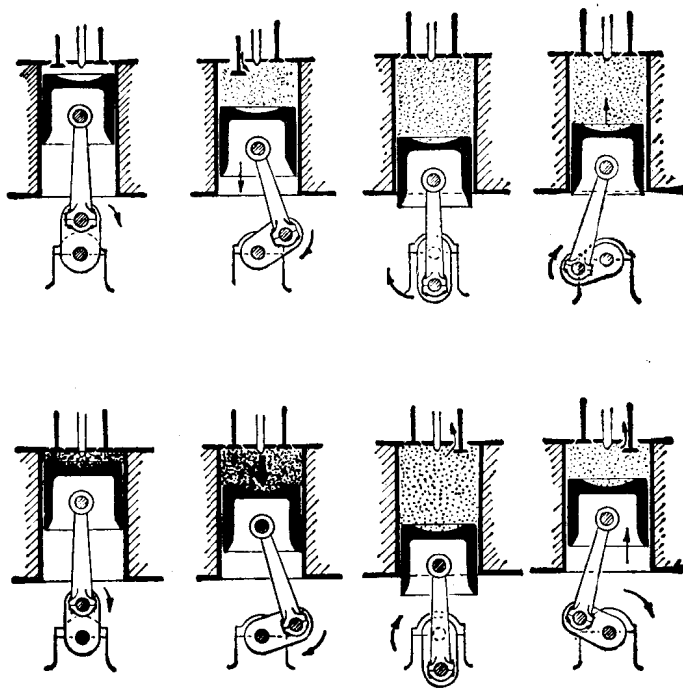


图 1—1 四冲程柴油机的工作过程

下分别于上止点前，下止点后启闭。由于活塞在气缸中移动形成了低压区，机外的新鲜空气在大气压力下充入气缸。此时曲轴相应回转了半周。第二个冲程叫压缩冲程：活塞自下止点向上止点运行。进气门在下止点后关闭。由于活塞在封闭的气缸中移动，缸内充入的空气得到压缩；又由于压缩速度很快，遂使缸内压力与温度急剧上升。当活塞运行至上止点前时，喷油装置向燃烧室内喷入适量的雾状柴油；约在上止点附近，柴油自行发火，遂使柴油机的工作进入第三冲程。第三冲程叫工作冲程（又称膨胀冲程，或爆发冲程）。在该冲程中，由于柴油的爆炸性燃烧使缸内实现高温高压，燃气膨胀推动活塞做功；活塞自上止点向下止点运行；曲轴相应地转过了第三个半周。第四冲程叫排气冲程：当活塞尚未运行至下止点时，排气门已提前开启，排气已在进行；当活塞自下止点向上止点运行的全过程中，活塞将废气推出气缸，而排气门的关闭则在上止点后。综上所述，曲轴回转两周，活塞运行了四个行程，柴油机完成了四个冲程，即一个完整的工作循环。实际柴油机可能在若干个循环之后完成起动过程。

柴油机稳定工作时，上述循环是周而复始的，气缸内压力的变化情况也是周而复始的。气缸内压力随气缸容积而变化的图叫做示功图，它可由称为示功器的专门仪器来测录（见图1—2）。

在示功图上，上面的环形面积代表从压缩冲程到膨胀冲程期间工质所作的正功，下面的环形面积表示进排气过程中的能量损失，为负功。对于气缸尺寸相同的发动机，工作循环进行得越好，上面的环形面积越大，作功越多。

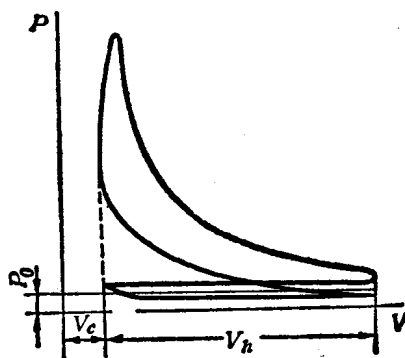


图1—2 四冲程柴油机的实际示功图

## 二、内燃机的理论循环

鉴于实际柴油机的工作过程十分复杂，给人们从事理论研究设下了重重障碍。而理论的探讨、科学的抽象又常常能够概括事物的本质方面，因此内燃机的理论工作往往须从研究理论循环做起。柴油机的理论循环与内燃机的理论循环在方法上是一致的，都是建立在如下的假定条件之上：

1. 假定循环中工质的质和量不变。这样就可以忽略实际工作过程中的进排气损失和气缸漏气损失，从而把它看做闭式的空气循环。

2. 假定有外界的热源和冷源存在，以对工质进行加热和放热。这样就可以忽略在实际工作过程中由于燃料燃烧不完全等原因造成的热损失。从而，把加热过程看作等容或等压过程；放热过程看作等容过程。

3. 假定工质的比热是一定的，不随温度而变。

4. 假定压缩和膨胀过程都是绝热过程。这样就可以忽略在这两个实际过程中工质与外界的热交换，从而使计算得到简化。

有了上述假定之后，便可以借助于已经学过的热工学知识，简捷地画出内燃机各种理论循环的示功图（即  $P-V$  图）写出每种理论循环中的理论公式；分析这些图形和公式，就可以对下列一些重要问题一目了然：

（1）掌握各种循环中各基本热力学参数间的关系，明确提高理论循环热效率  $\eta_t$  和平均压力  $p_t$  的基本途径；

（2）确定每种循环的极限热效率，以判断实际内燃机的经济性及其工作的完善程度；

（3）比较各种循环的动力性和经济性，以估计各种实际内燃机的性能（有参考价值）。

事实上，各种内燃机简化为哪种理论循环是根据其燃料燃烧放热特点而确定的，即燃烧的瞬时性。一般高、中速柴油机（即大多数渔船柴油机）柴油于上止点前喷入气缸，柴油靠压燃自行发火。在发火前喷入的燃料量可能在上止点前后迅速燃烧，使缸内温度、压力急剧升高；而在发火后陆续喷入的燃料因随喷随燃致使缸内温度、压力处于均势。因此，可以认为：一般高、中速柴油燃料的燃烧分两期进行；前期是在等容下进行；后期是在等压下进行。所以，它的理论循环可简化为由等容和等压加热组合而成的混合循环。同理，一般汽油机因有点燃发火的条件，燃料的燃烧迅速而及时，可简化为由等容加热而组成的等容循环；而高增压以及低速柴油机则可简化为由等压加热而组成的等压循环。

上述三种理论循环的图形与公式示于图 1—3 中。

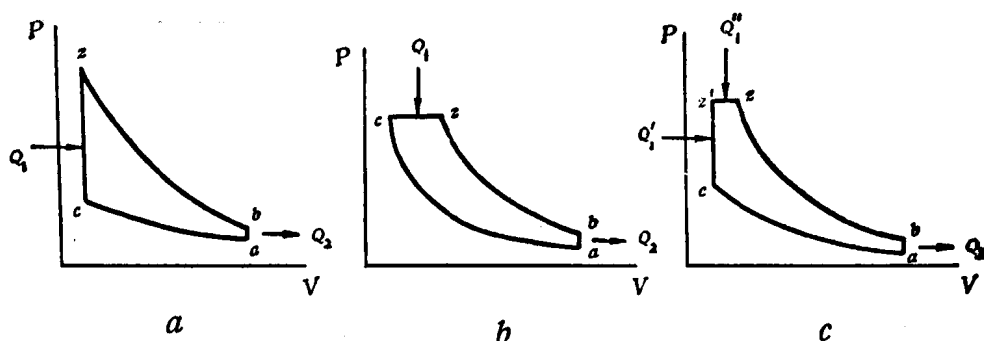


图 1—3 三种理论循环

$$\begin{aligned} \eta_t &= 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}; & \eta_t &= 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^{k-1}}{k(\rho-1)}; & \eta_t &= 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^{k-1}}{\lambda - 1 + k\lambda(\rho-1)}; \\ p_t &= \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon-1} \cdot \frac{p_a}{k-1} (\lambda-1) \eta_t; & p_t &= \frac{\varepsilon^{k-1}}{\varepsilon-1} \cdot \frac{p_a}{k-1} k(\rho-1) \eta_t; & p_t &= \frac{\varepsilon^k}{\varepsilon-1} \cdot \frac{p_a}{k-1} [\lambda-1 + k\lambda(\rho-1)] \eta_t; \\ \varepsilon &= \frac{V_1}{V_c}; & \lambda &= \frac{p_z}{p_c}; & \rho &= \frac{V_z}{V_c} \end{aligned}$$

式中： $\eta_t$ ——循环热效率；

$p_t$ ——循环平均压力（公斤/厘米<sup>2</sup>）；

$\varepsilon$ ——压缩比；

$k$ ——绝热指数;  
 $\lambda$ ——压力升高比;  
 $\rho$ ——预胀比。

### 三、理论循环的分析

根据上面三种循环的热效率  $\eta_i$  和平均压力  $p_i$  与循环参数之间的关系式, 可以分析各参数对这两个指标的影响。

(一) 压缩比  $\epsilon$  由热效率公式可以看出: 压缩比  $\epsilon$  提高时, 三种循环的热效率  $\eta_i$  都提高。等容加热循环的压缩比改善后的压容图 ( $P-V$ ) 和温熵图 ( $T-S$ ) 示于图 1—4。

若  $aczb$  是原有的循环, 压缩比  $\epsilon$  提高后成为  $ac'z'b'$ , 假定加热量  $Q_1$  相同, 则  $T-S$  图上面  $c'z'$  曲线下的面积  $ec'z'm$  应与  $cz$  曲线下的面积  $eczn$  相等, 这就使  $ab'$  线下的面积比  $ab$  线下面积小  $b'bnm$ , 即在压缩比  $\epsilon$  提高后传给冷源的热量  $Q_2$  减少了。所以说等容加热循环压缩比提高时, 循环做功较多, 热效率  $\eta_i$  和平均压力  $p_i$  都提高。同样, 不难证明其它两种循环在压缩比提高后, 热效率和平均压力也将提高。

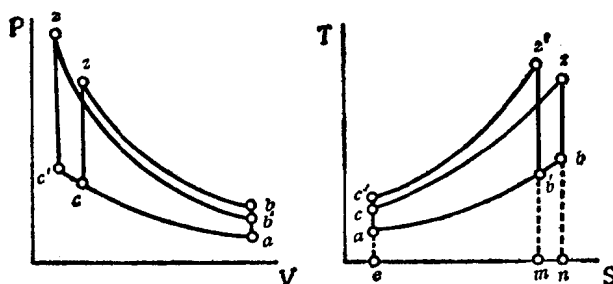


图 1—4 压缩比对于等容加热循环的影响

由以上分析可知, 要想提高内燃机的热效率和平均压力, 增大压缩比是一个重要的且有效的途径。

但是, 有两点必须予以说明。仍以等容加热循环为例, 在图 1—5 给出等容加热循环的热效率  $\eta_i$  和燃烧压力  $P_z$  随压缩比  $\epsilon$  的变化规律, 由图可见:  $\epsilon$  和  $\eta_i$  并不成直线关系, 只在压缩比  $\epsilon$  较低时, 随  $\epsilon$  的提高,  $\eta_i$  提高很快, 当  $\epsilon$  提高到一定值, 即 10—12 后, 再提高  $\epsilon$  时, 则  $\eta_i$  提高甚微。这一点从图 1—4 及图 1—5 看出: 随  $\epsilon$  提高的同时, 循环最高压力急剧增长, 因此使机械损失增大之故。

另一方面, 不能无限地提高压缩比  $\epsilon$  的原因, 是被正常燃烧所限制。当过分提高压缩比  $\epsilon$  时, 由于燃料的性质, 在压缩终点所产生的过高温度和压力下, 会产生爆燃等不正常的燃烧现象。所以在近代的汽油机中, 压缩比  $\epsilon$  一般为 6.5—9; 而柴油机为 13—21, 这是从燃料自燃所需要的条件考虑的。

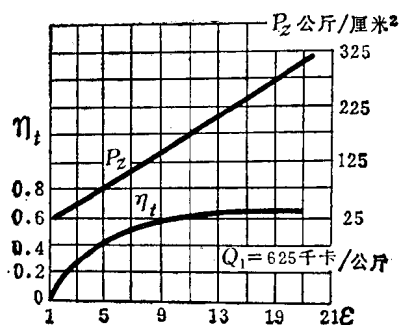


图 1—5 等容加热循环热效率及燃烧压力与压缩比的关系

(二) 绝热指数  $k$  从热效率公式, 同样可以看出: 若加热量  $Q_1$  相同, 而绝热指数  $k$  变化, 则循环的热效率  $\eta_t$  也将随之变化。如图 1—6 所示。

大家知道, 各种气体绝热指数的差别是比较小的, 例如在  $0^\circ\text{C}$  时双原子气体和空气的绝热指数  $k_{\text{气}} \approx 1.4$ , 二氧化碳的  $k_{\text{CO}_2} \approx 1.31$ , 水蒸汽的  $k_{\text{H}_2\text{O}} \approx 1.322$ 。此外, 在内燃机中选择工质事实上是不可能的, 因此, 实际上就不可能用选择工质来影响内燃机的经济性。

但是必须说明, 当混合气浓度和温度不同时, 具有不同的  $k$  值。当燃料与混合气加浓, 温度提高时, 都使  $k$  值降低, 因而热效率  $\eta_t$  减低。

(三) 加热量  $Q_1$  加热量对理论循环的影响, 实际上相当于内燃机负荷对其性能指标的影响。为了便于比较, 假定压缩比  $\epsilon$  不变, 改变加热量  $Q_1$ , 则对上述三个理论循环的指标有不同的影响。

1. 对等容加热循环来说, 加热量  $Q_1$  与压力升高比  $\lambda$  有顺变关系。当加热量增多时,  $\lambda$  值就增大, 由公式可知  $p_t$  将随之增大, 但是  $\eta_t$  不变。这是因为在定容加热循环中, 热量是在定容下 (当活塞位于上止点时) 加入的, 因而所加的每部分热量都同样地使工质的温度升高, 都同样地有从上止点膨胀到下止点的做功机会, 而且由于工质的比热假定是不随温度变化的, 所以每部分热量使工质的温度都有同样的升高, 即工质对加给它的每部分热量具有同样的膨胀比, 所以在等容加热中, 加热量的多少, 只影响  $p_t$  而不影响  $\eta_t$ 。

2. 对等压加热循环来说, 加热量  $Q_1$  与预胀比  $\rho$  有顺变关系。当加热量增加时,  $\rho$  值增大, 由公式可知,  $p_t$  值将随之增大而  $\eta_t$  减小。这是因为在等压加热循环中, 加热量越多, 循环所做功也越多。但是后来多加的部分热量是在距上止点较远时加入的, 这部分热量做功的机会就少, 即膨胀比小, 因而循环热效率  $\eta_t$  减小, 如图 1—7 示。

由前面的分析可以认为: 循环热效率的高低决定于加热后工质膨胀比的大小。膨胀比越大, 工质膨胀就越充分, 则热效率越高, 而压缩比只不过是提高膨胀比的一个条件。

3. 对混合加热循环来说, 加热量的改变, 对于热效率的影响比较复杂。由以上对等容加热循环和等压加热循环的分析可知: 如工

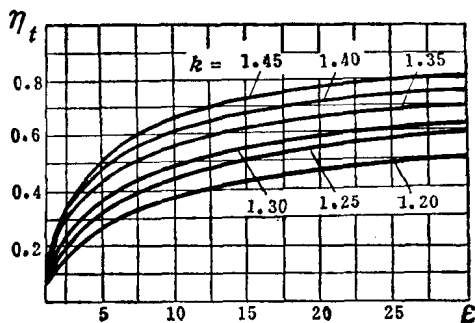


图 1—6 等容加热循环的热效率  $\eta_t$  与压缩比  $\epsilon$  和绝热指数  $k$  的关系

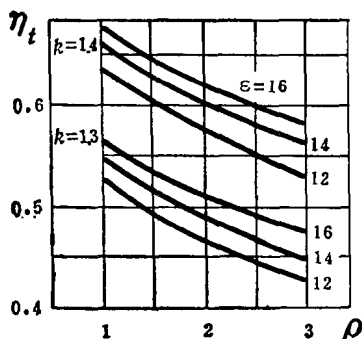


图 1—7 定压加热循环热效率  $\eta_t$  与预胀比  $\rho$  和绝热指数  $k$  的关系