

普通高等教育“十一五”规划教材

汽车发动机原理 与汽车理论

闫大建 主编

辛海升 岳海军 副主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十一五”规划教材

汽车发动机原理与 汽车理论

闫大建 主 编
辛海升 岳海军 副主编

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统介绍了发动机的工作原理和汽车的基本理论。全书分两篇,共13章。第一篇为汽车发动机原理,内容主要包括:发动机的性能指标、发动机的换气过程、柴油机混合气的形成与燃烧、汽油机混合气的形成与燃烧、发动机的排放与噪声、发动机的特性和发动机试验。第二篇为汽车理论,内容主要包括:汽车动力性、汽车的燃油经济性、汽车动力装置参数的确定、汽车制动性、汽车的操纵稳定性、汽车的平顺性和通过性。书中通过对发动机性能指标和汽车性能指标的详细分析,提出了改善发动机性能和汽车性能的合理措施。

本书既可作为高等院校车辆工程、汽车维修与检测、汽车运用工程等本科专业的教材,也可作为高职高专汽车类专业的教材,还可供工厂、研究单位从事汽车设计、使用、试验的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽车发动机原理与汽车理论/闫大建主编. —北京:国防工业出版社,2008.3

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-118-05515-3

I. 汽... II. 闫... III. ①汽车-发动机-理论-高等学校-教材②汽车-理论-高等学校-教材 IV. U46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 010792 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15¼ 字数 340 千字

2008年3月第1版第1次印刷 印数 1—5000册 定价 25.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

《汽车发动机原理与汽车理论》

编委会名单

主 编 闫大建
副主编 辛海升 岳海军
编 委 胡玉龙 东雪青

前 言

“汽车发动机原理与汽车理论”是车辆工程、汽车维修与检测和汽车运用工程等专业的专业课程。通过本课程的学习,使学生全面掌握汽车发动机基本原理和汽车行驶理论,从而胜任发动机设计、制造、运用和修理的工作;在分析汽车运动规律的基础上研究汽车主要使用性能与其结构之间的内在联系、主要使用性能的各种影响因素,从而使学生能掌握正确设计汽车和合理使用汽车的基本途径,为从事相关的工作奠定良好的理论基础和实践基础。

本书分两篇,共13章,主要内容是汽车发动机工作原理和汽车理论。通过对发动机工作过程和汽车性能指标的详细分析,提出了改善发动机性能和汽车性能的合理措施。

本书既有较强的理论性、实践性,又有较强的综合性,内容注重理论与实践相结合,并适当引入实用性较强且较新的汽车新技术知识。建议在教学过程中,重点应使学生掌握汽车发动机原理与汽车理论的基本知识,掌握发动机性能和汽车性能变化的原因及分析问题的能力,了解利用新结构、新技术改善汽车性能的原理,达到更深刻地理解电子控制和液压传动等技术在汽车上应用的目的。

本书中名词术语和计量单位符合国家相关标准和规范的要求,力求做到文字准确、简练、流畅,插图清楚、正确,文稿、图稿配合合理,内容阐述条理清晰,富有启发性,便于读者自学。

本书第1章、3.4节和第5章由胡玉龙编写;第2章、3.1节~3.3节和第4章由东雪青编写;第6章、第7章和第13章由闫大建编写;第8章、第10章和第12章由岳海军编写;第9章和第11章由辛海升编写。全书最后由闫大建统稿。在编写过程中,曾得到相关同仁的帮助,并提出了许多宝贵的修改意见和建议,在此对他们表示衷心感谢。另外在教材编写中,参考了大量资料,对资料原作者在此表示衷心感谢。

由于水平有限,书中难免有错漏之处,恳请使用本书的师生和广大读者批评指正。

编者

目 录

第一篇 汽车发动机原理

| | |
|--------------------|----|
| 第 1 章 发动机的性能指标 | 2 |
| 1.1 发动机的理论循环 | 2 |
| 1.1.1 基本理论循环 | 3 |
| 1.1.2 理论循环的影响因素 | 4 |
| 1.2 发动机的实际循环 | 5 |
| 1.2.1 实际循环的工作过程 | 6 |
| 1.2.2 实际循环与理论循环的比较 | 8 |
| 1.3 发动机的性能指标 | 9 |
| 1.3.1 指示性能指标 | 10 |
| 1.3.2 有效性能指标 | 11 |
| 1.3.3 运转性能指标 | 12 |
| 1.3.4 机械效率 | 13 |
| 1.4 发动机的热平衡 | 16 |
| 1.4.1 发动机消耗的总热量 | 16 |
| 1.4.2 转化为有效功的热量 | 16 |
| 1.4.3 传递给冷却介质的热量 | 16 |
| 1.4.4 废气带走的热量 | 16 |
| 1.4.5 余项损失的热量 | 17 |
| 思考题 | 17 |
| 第 2 章 发动机的换气过程 | 18 |
| 2.1 四冲程发动机的换气过程 | 18 |
| 2.1.1 换气过程 | 18 |
| 2.1.2 换气损失 | 20 |
| 2.2 四冲程发动机换气过程的评价 | 21 |
| 2.2.1 残余废气系数 | 21 |
| 2.2.2 充气效率 | 22 |
| 2.3 影响发动机换气过程的因素 | 23 |
| 2.3.1 影响充气效率的因素 | 23 |
| 2.3.2 影响残余废气系数的因素 | 25 |
| 2.4 改善发动机换气过程的措施 | 25 |
| 2.4.1 减小进气系统阻力 | 25 |

| | | |
|------------|---------------------------|-----------|
| 2.4.2 | 合理选择配气相位 | 26 |
| 2.4.3 | 减小排气系统阻力 | 28 |
| 2.4.4 | 降低进气终了温度 | 28 |
| 2.5 | 发动机的进气增压 | 28 |
| 2.5.1 | 进气增压的意义及评定 | 28 |
| 2.5.2 | 进气增压系统的类型 | 30 |
| 2.5.3 | 废气涡轮增压系统工作原理 | 32 |
| 2.5.4 | 谐波进气增压系统工作原理 | 33 |
| 2.5.5 | 进气增压对发动机的影响 | 34 |
| | 思考题 | 35 |
| 第3章 | 柴油机混合气的形成与燃烧 | 36 |
| 3.1 | 燃料的喷射与雾化 | 36 |
| 3.1.1 | 喷油泵速度特性及其校正 | 36 |
| 3.1.2 | 燃料喷射过程 | 38 |
| 3.1.3 | 供油规律和喷油规律 | 40 |
| 3.1.4 | 喷油的雾化及油束特性 | 40 |
| 3.2 | 柴油机混合气的形成与燃烧过程 | 42 |
| 3.2.1 | 柴油机混合气的形成 | 42 |
| 3.2.2 | 柴油机的燃烧过程 | 43 |
| 3.3 | 柴油机的燃烧室 | 45 |
| 3.3.1 | 直接喷射式燃烧室 | 45 |
| 3.3.2 | 分隔式燃烧室 | 46 |
| 3.4 | 影响柴油机燃烧过程的因素 | 47 |
| 3.4.1 | 影响燃烧过程的使用因素 | 48 |
| 3.4.2 | 影响燃烧过程的结构因素 | 50 |
| | 思考题 | 51 |
| 第4章 | 汽油机混合气的形成与燃烧 | 52 |
| 4.1 | 化油器的工作原理 | 52 |
| 4.1.1 | 可燃混合气的成分 | 52 |
| 4.1.2 | 简单化油器特性与理想化油器特性 | 53 |
| 4.2 | 汽油机混合气的形成与燃烧过程 | 57 |
| 4.2.1 | 汽油机混合气的形成 | 57 |
| 4.2.2 | 汽油机正常燃烧过程 | 58 |
| 4.2.3 | 汽油机的不正常燃烧 | 59 |
| 4.3 | 汽油机的燃烧室 | 61 |
| 4.3.1 | 对燃烧室的要求 | 61 |
| 4.3.2 | 常用典型燃烧室 | 62 |
| 4.4 | 影响汽油机燃烧过程的因素 | 63 |
| 4.4.1 | 影响燃烧过程的使用因素 | 64 |

| | | |
|------------|------------------|-----------|
| 4.4.2 | 影响燃烧过程的结构因素 | 67 |
| 4.4.3 | 排气污染控制措施 | 68 |
| | 思考题 | 70 |
| 第5章 | 发动机的排放与噪声 | 72 |
| 5.1 | 发动机的排放污染物 | 72 |
| 5.1.1 | 排放物分类 | 72 |
| 5.1.2 | 排放物危害 | 74 |
| 5.1.3 | 排放物评定指标 | 74 |
| 5.2 | 发动机排放污染物的净化技术 | 75 |
| 5.2.1 | 排放污染物的机内净化技术 | 75 |
| 5.2.2 | 排放污染物的机外净化技术 | 77 |
| 5.2.3 | 非排气污染物控制技术 | 80 |
| 5.3 | 发动机的排放法规及测试方法 | 81 |
| 5.3.1 | 概述 | 81 |
| 5.3.2 | 排放法规 | 82 |
| 5.3.3 | 排放检测的取样系统 | 83 |
| 5.3.4 | 有害气体成分分析 | 84 |
| 5.3.5 | 微粒及烟度的测量 | 84 |
| 5.4 | 发动机的噪声 | 86 |
| 5.4.1 | 噪声概述 | 86 |
| 5.4.2 | 影响噪声的主要因素 | 87 |
| 5.4.3 | 降低噪声措施 | 88 |
| | 思考题 | 89 |
| 第6章 | 发动机的特性 | 90 |
| 6.1 | 发动机的工况 | 90 |
| 6.1.1 | 固定式工况 | 90 |
| 6.1.2 | 螺旋桨工况 | 90 |
| 6.1.3 | 车用工况 | 91 |
| 6.2 | 发动机的速度特性 | 91 |
| 6.2.1 | 汽油机速度特性 | 91 |
| 6.2.2 | 柴油机速度特性 | 94 |
| 6.3 | 发动机的负荷特性 | 96 |
| 6.3.1 | 汽油机负荷特性 | 96 |
| 6.3.2 | 柴油机负荷特性 | 97 |
| 6.4 | 发动机的调整特性 | 99 |
| 6.4.1 | 汽油机点火提前角调整特性 | 99 |
| 6.4.2 | 柴油机喷油提前角调整特性 | 100 |
| 6.4.3 | 柴油机的调速特性 | 100 |
| 6.5 | 发动机的万有特性 | 101 |

| | | |
|------------|----------------|------------|
| 6.5.1 | 万有特性 | 101 |
| 6.5.2 | 汽油机、柴油机万有特性的特点 | 102 |
| 6.5.3 | 万有特性的实用意义 | 102 |
| | 思考题 | 103 |
| 第7章 | 发动机试验 | 104 |
| 7.1 | 发动机的试验种类 | 104 |
| 7.1.1 | 发动机试验的种类 | 104 |
| 7.1.2 | 发动机试验的有关标准 | 104 |
| 7.2 | 发动机功率与燃油消耗率的测量 | 105 |
| 7.2.1 | 试验台简介 | 105 |
| 7.2.2 | 功率的测量 | 106 |
| 7.2.3 | 燃油消耗率的测量 | 112 |
| 7.2.4 | 转速的测量 | 114 |
| 7.2.5 | 流量的测量 | 114 |
| 7.3 | 发动机其他参数的测量 | 115 |
| 7.3.1 | 机械损失功率的测定 | 115 |
| 7.3.2 | 各缸工作均匀性试验 | 116 |
| 7.3.3 | 空燃比的测定 | 116 |
| 7.4 | 发动机台架试验 | 118 |
| 7.4.1 | 试验前的准备 | 119 |
| 7.4.2 | 发动机台架试验方法 | 119 |
| 7.4.3 | 试验结果的整理 | 120 |
| | 思考题 | 121 |

第二篇 汽车理论

| | | |
|------------|--------------|------------|
| 第8章 | 汽车动力性 | 123 |
| 8.1 | 汽车动力性的评价指标 | 123 |
| 8.1.1 | 汽车的最高车速 | 123 |
| 8.1.2 | 汽车的加速能力 | 123 |
| 8.1.3 | 汽车的爬坡能力 | 124 |
| 8.2 | 汽车的驱动力 | 124 |
| 8.2.1 | 汽车的驱动力 | 124 |
| 8.2.2 | 汽车驱动力的影响因素 | 125 |
| 8.2.3 | 汽车的驱动力图 | 128 |
| 8.3 | 汽车的行驶阻力 | 128 |
| 8.3.1 | 滚动阻力 | 128 |
| 8.3.2 | 空气阻力 | 131 |
| 8.3.3 | 坡度阻力 | 132 |
| 8.3.4 | 加速阻力 | 133 |

| | | |
|-------------|------------------------|------------|
| 8.4 | 汽车行驶的驱动与附着条件 | 133 |
| 8.4.1 | 汽车的驱动力平衡方程 | 133 |
| 8.4.2 | 汽车行驶的驱动条件 | 134 |
| 8.4.3 | 汽车行驶的附着条件 | 134 |
| 8.4.4 | 汽车行驶的驱动与附着条件 | 135 |
| 8.4.5 | 附着系数 | 135 |
| 8.5 | 汽车驱动力—行驶阻力平衡图与动力特性图 | 136 |
| 8.5.1 | 驱动力—行驶阻力平衡图 | 136 |
| 8.5.2 | 动力特性图 | 139 |
| 8.6 | 汽车的功率平衡 | 140 |
| 8.7 | 影响汽车动力性的主要因素 | 142 |
| 8.7.1 | 发动机特性 | 142 |
| 8.7.2 | 传动系统参数 | 144 |
| 8.7.3 | 汽车总质量 | 145 |
| 8.7.4 | 空气阻力 | 145 |
| 8.7.5 | 轮胎尺寸与形式 | 146 |
| 8.7.6 | 使用因素 | 146 |
| | 思考题 | 146 |
| 第9章 | 汽车的燃油经济性 | 147 |
| 9.1 | 汽车燃油经济性的评价指标 | 147 |
| 9.1.1 | 等速行驶百公里燃油消耗量 | 147 |
| 9.1.2 | 循环工况行驶百公里燃油消耗量 | 148 |
| 9.2 | 汽车燃油经济性的计算 | 149 |
| 9.2.1 | 等速行驶工况燃油消耗量的计算 | 149 |
| 9.2.2 | 等加速行驶工况燃油消耗量的计算 | 151 |
| 9.2.3 | 等减速行驶工况燃油消耗量的计算 | 152 |
| 9.2.4 | 怠速停车时的燃油消耗量 | 153 |
| 9.2.5 | 整个循环工况的百公里燃油消耗量 | 153 |
| 9.3 | 影响汽车燃油经济性的因素 | 153 |
| 9.3.1 | 汽车结构方面 | 154 |
| 9.3.2 | 汽车使用方面 | 157 |
| 9.3.3 | 合理组织运输 | 160 |
| | 思考题 | 160 |
| 第10章 | 汽车动力装置参数的确定 | 161 |
| 10.1 | 发动机功率的选择 | 161 |
| 10.2 | 最小传动比的选择 | 162 |
| 10.3 | 最大传动比的选择 | 164 |
| 10.4 | 传动系统挡数与各挡传动比的选择 | 165 |
| 10.5 | 利用燃油经济性—加速时间曲线确定动力装置参数 | 168 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| 10.5.1 | 主减速器传动比的确定 | 168 |
| 10.5.2 | 变速器与主减速器传动比的确定 | 169 |
| 10.5.3 | 发动机排量、变速器与主减速器传动比的确定 | 169 |
| | 思考题 | 170 |
| 第 11 章 | 汽车制动性 | 171 |
| 11.1 | 概述 | 171 |
| 11.2 | 制动性的评价指标 | 172 |
| 11.2.1 | 制动效能 | 172 |
| 11.2.2 | 制动效能的恒定性 | 172 |
| 11.2.3 | 制动时的方向稳定性 | 173 |
| 11.3 | 制动时车轮的受力分析 | 174 |
| 11.3.1 | 制动器制动力 | 174 |
| 11.3.2 | 地面制动力 | 174 |
| 11.3.3 | 制动器制动力、地面制动力与地面附着力关系 | 175 |
| 11.3.4 | 制动过程中车轮的运动状态与附着系数 | 175 |
| 11.4 | 汽车的制动效能 | 177 |
| 11.4.1 | 用制动距离法检验制动效能 | 178 |
| 11.4.2 | 用制动力法检验制动效能 | 182 |
| 11.4.3 | 用制动减速度法检验制动效能 | 182 |
| 11.4.4 | 改善制动效能的措施 | 183 |
| 11.5 | 制动效能的恒定性 | 184 |
| 11.5.1 | 制动器摩擦副材料 | 184 |
| 11.5.2 | 制动器的结构形式 | 185 |
| 11.6 | 制动时的方向稳定性 | 186 |
| 11.6.1 | 制动跑偏 | 186 |
| 11.6.2 | 制动侧滑 | 187 |
| 11.6.3 | 转向能力的丧失 | 188 |
| 11.7 | 前、后制动器制动力的比例关系 | 189 |
| 11.7.1 | 前、后车轮抱死次序 | 189 |
| 11.7.2 | 制动时地面对前、后车轮的法向反作用力 | 190 |
| 11.7.3 | 理想的前、后轮制动器制动力分配曲线 | 191 |
| 11.7.4 | 具有固定比值的前、后制动器制动力与同步附着系数 | 192 |
| 11.7.5 | 前、后制动器制动力具有固定比值的汽车在不同路面上制动 过程分析 | 193 |
| 11.7.6 | 同步附着系数的选择 | 194 |
| 11.7.7 | 发动机制动 | 195 |
| 11.8 | 汽车制动防抱死系统和制动辅助系统 | 196 |
| 11.8.1 | 制动防抱死系统 | 196 |
| 11.8.2 | 制动辅助系统 | 200 |

| | |
|--------------------------|------------|
| 11.9 汽车驻车制动性 | 201 |
| 思考题 | 202 |
| 第 12 章 汽车的操纵稳定性 | 203 |
| 12.1 汽车的极限稳定性 | 203 |
| 12.1.1 纵向极限稳定性 | 203 |
| 12.1.2 侧向极限稳定性 | 205 |
| 12.1.3 提高极限稳定性的措施 | 207 |
| 12.2 汽车转向时的操纵稳定性 | 208 |
| 12.2.1 轮胎的侧偏现象与特性 | 208 |
| 12.2.2 轮胎侧偏对转向操纵稳定性的影响 | 209 |
| 12.2.3 提高转向操纵稳定性的措施 | 211 |
| 12.3 汽车直线行驶时的操纵稳定性 | 211 |
| 12.3.1 转向轮振动的影响 | 211 |
| 12.3.2 转向轮定位的影响 | 212 |
| 12.3.3 轮胎侧偏的影响 | 213 |
| 12.3.4 提高直线行驶操纵稳定性的措施 | 215 |
| 12.4 汽车的操纵轻便性 | 215 |
| 12.4.1 操纵轻便性的评价指标 | 215 |
| 12.4.2 提高操纵轻便性的措施 | 216 |
| 思考题 | 216 |
| 第 13 章 汽车的平顺性和通过性 | 217 |
| 13.1 汽车行驶的平顺性 | 217 |
| 13.1.1 平顺性的评价指标 | 217 |
| 13.1.2 平顺性的评价方法 | 219 |
| 13.1.3 影响汽车行驶平顺性的结构参数 | 221 |
| 13.2 汽车的通过性 | 223 |
| 13.2.1 通过性的评价指标 | 224 |
| 13.2.2 影响汽车通过性的主要因素 | 226 |
| 思考题 | 229 |
| 参考文献 | 230 |

第一篇 汽车发动机原理

发动机是汽车的动力来源,发动机的性能直接影响着汽车的性能、可靠程度和寿命。汽油机由于其工作柔和、噪声低、运转平稳和比质量轻,在轿车和轻型车上广泛应用。近年来由于新技术的不断发展及其在汽车上的应用,汽油机在燃油经济性方面有了较大的改善。柴油机是载货汽车的主要动力,其最大优点是功率大、热效率高和经济性好,一般柴油机的燃油消耗率比汽油机低 30%~40%。所以,近年来柴油机汽车发展迅速,尤其在载货汽车和客车及工程汽车领域,甚至在轿车领域,柴油机的发展也是不可估量的,在汽车工业发达国家轿车柴油机化的比例很高。

现代高性能柴油机的循环热效率高达 40%以上,汽油机的循环热效率也可达到 30%左右。功率覆盖面大、转速范围宽、应用范围广是车用发动机的主要优点,而汽车发动机对大气的污染和对能源的消耗是当今所面临的长期问题。进入 21 世纪,发动机电子控制技术的发展使得发动机动力性、经济性和排放性能指标有了很大的改善。

汽车发动机原理是以提高发动机性能为主要研究目标,通过对发动机工作过程的各个阶段进行研究,分析影响发动机性能的诸多因素,研究提高发动机性能的具体措施,不断改善发动机的动力性、经济性和排放性能。

第 1 章 发动机的性能指标

发动机的性能指标很多,主要有动力性能指标(功率、转矩和转速)、经济性能指标(燃料与润滑油消耗率)、运转性能指标(冷启动性能、噪声和排气品质)及耐久可靠性指标等。发动机的质量主要通过以上性能指标进行评定,但在评定时要把各种性能指标有机地结合起来。本章主要阐述发动机的理论循环和实际循环、发动机的动力性、经济性及运转性能指标,并通过对它们的分析,从中找出影响发动机性能的主要因素。

1.1 发动机的理论循环

发动机的实际工作过程是由一系列非常复杂的物理化学变化过程组成的,在工程热力学中通常将发动机实际工作循环加以抽象和简化,忽略一些次要影响因素,形成由几个基本热力过程所组成的理论循环,以便作定量分析。用理论循环代替复杂的实际循环,进行理论分析和计算,可以用较简单的公式说明影响发动机性能的某些重要因素,从而指明提高发动机动力性和经济性的方向。最简单的理论循环为空气标准循环,其简化的假设条件如下。

- (1) 假设工质为理想气体,循环过程中物理和化学性质不变,其比热容为定值。
- (2) 假设工质的质量不变,不考虑进排气过程,并忽略漏气影响。
- (3) 假设工质的压缩和膨胀均是绝热过程,工质与外界不存在热量交换。
- (4) 假设工质燃烧为定压或定容加热过程,排气为定容放热过程。
- (5) 假设循环过程为可逆循环,且不考虑实际循环中存在的各种能量损失。

理论循环与实际循环虽然存在一定的差别,但这种抽象、概括和简化是合理的,并接近实际,对理论循环的分析和计算在实际循环中具有一定的指导意义,而且也具有一定的精确性。根据对燃烧过程即加热方式的不同假设,可以得到发动机 3 种基本理论循环,分别是混合加热循环、定容加热循环和定压加热循环,图 1-1 为发动机的理论循环示功图。理论循环是用循环热效率和循环平均压力来衡量的。

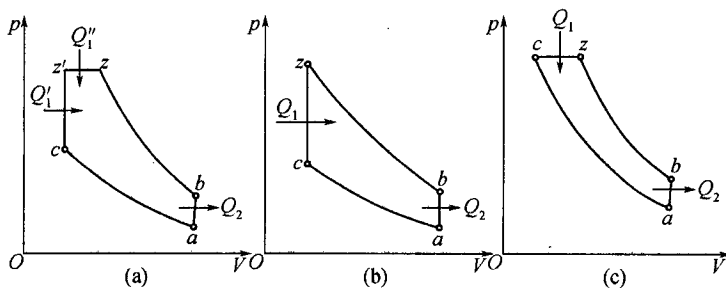


图 1-1 发动机理论循环示功图

(a) 混合加热循环; (b) 定容加热循环; (c) 定压加热循环。

1.1.1 基本理论循环

1. 混合加热循环

汽车用柴油机均为高速柴油机,按燃烧过程的特点将其分成两部分:定容和定压。活塞由下止点向上止点运动速度较快,简化为绝热压缩过程;开始阶段燃烧速度较快,汽缸容积变化不大,可简化为定容加热过程,后期燃烧较慢,压力变化不大,可简化为定压加热过程;然后活塞由上止点向下止点运动,燃烧气体膨胀做功,这一过程可简化为绝热膨胀过程,排气过程简化为定压排气。所以车用柴油机的理论循环称为混合加热循环。柴油机的混合加热循环由5个基本热力过程组成: $a-c$ 为绝热压缩过程; $c-z'$ 为定容加热过程,加热量为 Q'_1 ; $z'-z$ 为定压加热过程,加热量为 Q''_1 ; $z-b$ 为绝热膨胀过程; $b-a$ 为定容放热过程,放热量为 Q_2 。

根据热力学中热量和循环热效率的计算公式,可求出混合加热循环的热效率为

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \cdot \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)}$$

式中 ϵ ——压缩比, $\epsilon = v_a/v_c$;

λ ——压力升高比, $\lambda = p_z/p_c$;

ρ ——预膨胀比, $\rho = v_z/v_c$;

k ——绝热指数,理想气体绝热指数是定值,其值取决于气体的原子数,单原子气体为1.67,双原子气体为1.4,三原子气体为1.3。

循环平均压力为单位汽缸工作容积所作的循环净功,根据热力学公式和循环平均压力的定义式,可求出混合加热循环的平均压力为

$$p_t = \frac{\epsilon^k}{\epsilon - 1} \cdot \frac{p_a}{k - 1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)] \eta_t$$

式中 p_a ——压缩初始点的压力,即进气终了的压力。

2. 定容加热循环

汽油机在实际工作中,由于燃烧前混合气形成的质量比较好,其燃烧过程时间短、速度快,燃烧过程接近于对缸内气体进行定容加热过程,其余过程和混合加热循环类似,所以汽油机的理论循环又称为定容加热循环。定容加热循环实际可看作预膨胀比 $\rho = 1$ 时的混合加热循环。定容加热循环由4个基本热力过程组成: $a-c$ 为绝热压缩过程; $c-z$ 为定容加热过程,加热量为 Q_1 ; $z-b$ 为绝热膨胀过程; $b-a$ 为定容放热过程,放热量为 Q_2 。

将 $\rho = 1$ 代入混合加热循环热效率和平均压力计算式,分别得出定容加热循环的热效率和平均压力为

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}}$$

$$p_t = \frac{\epsilon^k}{\epsilon - 1} \cdot \frac{p_a}{k - 1} (\lambda - 1) \eta_t$$

3. 定压加热循环

高增压低速柴油机和燃气轮机的工作过程接近定压加热循环,由于受燃烧最高压力

的限制,加热过程在定压条件下缓慢完成,负荷的增加使得热效率下降。定压加热循环实际可看作压力升高比 $\lambda = 1$ 时的混合加热循环。定压加热循环由 4 个基本热力过程组成: $a - c$ 为绝热压缩过程; $c - z$ 为定压加热过程,加热量为 Q_1 ; $z - b$ 为绝热膨胀过程; $b - a$ 为定压放热过程,放热量为 Q_2 。

将 $\lambda = 1$ 代入混合加热循环热效率和平均压力计算式,分别得出定压加热循环的热效率和平均压力为

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\epsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^k - 1}{k(\rho - 1)}$$

$$p_t = \frac{\epsilon^k}{\epsilon - 1} \cdot \frac{p_a}{k-1} k(\rho - 1) \eta_t$$

根据上述 3 种理论循环的热效率表达式不难得出:当初始状态一致且加热量及压缩比相同时,定容加热循环的热效率最高,定压加热循环的热效率最低,混合加热循环介于两者之间;当最高燃烧压力和加热量相同但压缩比不相同,定压加热循环的热效率最高,定容加热循环的热效率最低,混合加热循环仍介于两者之间。

1.1.2 理论循环的影响因素

根据上述公式分析得出,影响理论循环热效率和平均压力的因素有:压缩比 ϵ 、压力升高比 λ 、预膨胀比 ρ 、绝热指数 k 和进气终了的压力 p_a 。

1. 压缩比

随着压缩比 ϵ 的提高,3 种循环的热效率 η_t 和平均压力 p_t 均提高。这是因为提高压缩比,可以提高压缩终了的温度和压力,在定容加热量一定时,缸内最高压力提高,从而使膨胀过程的平均压力提高,膨胀过程活塞的有效行程增大,膨胀过程做功增加;提高压缩比,也意味着有利于高温高压气体的充分膨胀,不仅可获得更多的膨胀功,也可降低膨胀终了的温度,从而减少废气带走的热量损失。综上所述,在循环加热量和汽缸工作容积一定时,提高压缩比,可增加循环功和减少热量损失,从而使循环热效率和平均压力提高。在定压加热循环和混合加热循环中也一样。图 1-2 所示为定容加热循环热效率与压缩比的关系。压缩比较小时,随压缩比提高,热效率增加很快;但压缩比较大时,再提高压缩比则效果就不明显了。但在实际循环中,提高汽油机压缩比受爆震燃烧的限制,而柴油机在压缩比为 22 以上后对热效率的提高就不太明显了,相反压力的提高却对机体和零件的强度带来考验。

2. 压力升高比

在定容加热循环中,压力升高比随着循环加热量 Q_1 的增加而加大,且 λ 值成正比加大。若 ϵ 保持不变, λ 增大则平均压力增加,循环放热量 Q_2 亦相应增加,即 η_t 不变, p_t 提高。

在混合加热循环中,当压缩比和总加热量一定时,提高压力升高比 λ ,预膨胀比 ρ 相应减小,相应 Q_2 减小,使循环热效率和平均压力提高。

3. 预膨胀比

在等压加热循环中,若 ϵ 保持不变,随着加热量 Q_1 增加, ρ 值加大, η_t 下降。

在混合加热循环中,当循环总加热量 Q_1 和 ϵ 保持不变时,若 ρ 值增大,意味着等压加热部分增大,同样 η_t 下降。

4. 绝热指数

绝热指数 k 对循环热效率的影响如图 1-3 所示。在压缩比一定时,随着绝热指数的增加,循环热效率提高。绝热指数的大小取决于工质的种类,发动机工作时混合气的浓度是变化的,混合气绝热指数也随混合气浓度而变化。混合气蒸气浓度增加时,绝热指数减小,循环热效率也随之降低;但随混合气加浓,循环加热量增加,所以循环平均压力增大,反之混合气变稀,绝热指数增加,热效率也增加。实际上发动机的工质是无法选择的。

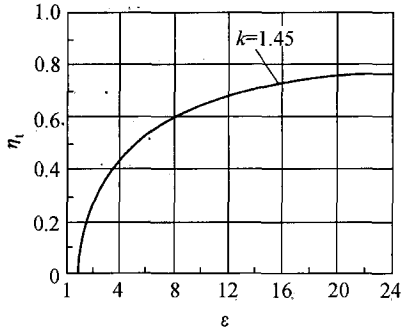


图 1-2 定容加热循环热效率与压缩比的关系

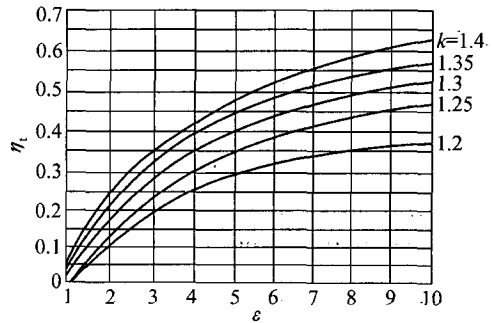


图 1-3 绝热指数对循环热效率的影响

5. 进气终了的压力

进气终了的压力 p_a 仅对循环平均压力产生影响,在其他参数一定时,随着进气终了压力提高,汽缸内最高温度和压力都会有所提高,循环平均压力也提高。

从理论循环中所得到的结论用于指导实践时,必须考虑到发动机实际工作条件的约束和限制。

(1) 结构条件的限制。从理论循环的分析得知,提高压缩比和压力升高比对提高循环热效率起着有利的作用,但使循环最高压力急剧升高,从而对零件的承载强度要求更高,降低发动机的使用寿命和使用可靠性,为此必然增加发动机的质量,造成发动机体积与制造成本的增加。因此,用提高压缩比和压力升高比的方法来提高循环热效率时应权衡考虑。

(2) 机械效率的限制。不加限制地提高压缩比和压力升高比反而会使机械效率下降,提高压缩比和压力升高比带来的动力性增加量会由于摩擦损失的增加而减少甚至消失。

(3) 燃烧方面的限制。压缩比过高时汽油机容易产生爆燃和表面点火等不正常燃烧现象。对于柴油机,过高的压缩比将使压缩终了的汽缸容积很小,制造工艺极为困难,燃烧室的设计难度增加,不利于燃烧的高效进行。

目前,柴油机的压缩比 ϵ 一般在 14~22 之间,最高循环压力 $p_z = 7\text{MPa} \sim 14\text{MPa}$;汽油机的压缩比 ϵ 一般在 6~12 之间,最高循环压力 $p_z = 3\text{MPa} \sim 9\text{MPa}$ 。

1.2 发动机的实际循环

四冲程发动机实际循环由进气、压缩、做功和排气 4 个冲程所组成,其中压缩与做功冲程之间有燃烧过程交叉连接,相当于有 5 个热力过程。如图 1-4 所示,这 4 个冲程的