

# 柴油机设计手册

(上册)

柴油机设计手册编辑委员会

中国农业机械出版社

《柴油机设计手册》共27章，分上、中、下三册出版。

上册主要内容有：第一章绪论，第二章设计总论，第三章柴油机工作过程计算，第四章柴油机的动力计算及平衡，第五章轴系扭转振动，第六章燃烧系统，第七章活塞组，第八章连杆组，第九章曲轴组，第十章轴承，第十一章气缸盖、气缸盖垫片和进排气管，第十二章机体与气缸套。

本手册主要供广大柴油机工作者查阅使用，也可供其他科技人员参考。

## 柴油机设计手册

上册

柴油机设计手册编辑委员会

\*

中国农业机械出版社出版  
北京市海淀区阜成路东钓鱼台乙七号  
北京市大白楼印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行  
新华书店经售

\*

787×1092 16开 57<sup>2</sup>/<sub>8</sub>印张 4插 1410千字  
1984年1月北京第一版 · 1984年1月北京第一次印刷  
印数：00,001—8200 定价：8.80元  
统一书号：15216·139

## 柴油机设计手册编辑委员会

主任委员	史绍熙			
副主任委员	孙永平	张德庆	田广文	茅继庆
	陆孝宽			
委员	何学良	董金华	钱耀义	朱吉桥
编辑组	苗瀛	武善谋	宋初煜	朱敏学
	范荣礼	钱耀义	郭耀泉	王懿铭
	朱仙鼎	朱英杰	吴关昌	

## 编 辑 说 明

柴油机是国民经济和国防建设中获得广泛应用的一种主要动力机械。解放以来，我国的柴油机工业得到了蓬勃发展，取得了很大成就。柴油机工业的发展对我国实现四个现代化有着重要的意义。

为了进一步提高柴油机的技术水平和产品质量，适应柴油机工业发展的需要，我们总结了我国柴油机生产和研究中的经验，汲取国外的先进技术，编辑出版这部《柴油机设计手册》。

本手册着重概括中、高速柴油机设计的主要技术内容，包括有关专业理论、设计资料、计算方法以及有关技术的发展方向。内容力求简明实用，重点突出。本手册主要供中等以上文化水平的柴油机工作者查阅使用，也可供其他有关人员参考。

天津大学、上海内燃机研究所、上海柴油机厂、长春汽车研究所、吉林工业大学、天津动力机厂和洛阳拖拉机研究所组成编辑委员会，负责组织与领导手册的编辑工作。参加编写的单位还有（按章次排列）：铁道部科学研究院机车车辆研究所、山东工学院、天津内燃机研究所、西安交通大学、北京内燃机总厂、上海交通大学、无锡油泵油嘴厂、铁道部四方机车车辆厂、北京农业机械化学院、无锡柴油机厂、五机部七〇研究所、复旦大学等。

在手册的编写过程中，得到许多工厂、科研单位和高等院校的大力支持，积极提供技术资料，参加审稿。其中参加主审工作的有五十余单位，在此一并表示衷心感谢。

鉴于水平有限，缺乏经验，手册中的缺点和错误在所难免，衷心希望读者在使用中继续审查验证，热忱欢迎批评指正，以臻完善。为我国柴油机工业的进一步发展，为赶超世界先进水平、实现四个现代化发挥应有的作用。

柴油机设计手册编辑委员会

## 手册通用符号

$A$ ——热功当量	$N_i$ ——指示功率
$a$ ——声速	$N_K$ ——增压器压气机功率
活塞加速度	$N_l$ ——升功率
$B$ ——柴油机宽度	$N_m$ ——机械损失功率
$C_m$ ——活塞平均速度	$N_s$ ——扫气泵功率
$c_p$ ——定压比热	$N_T$ ——增压器涡轮功率
$c_{pa}$ ——空气定压比热	$N_v$ ——单位体积功率
$c_v$ ——定容比热	$n$ ——柴油机转速
$c_{va}$ ——空气定容比热	$n_1$ ——压缩多变指数
$D$ ——气缸直径	$n_2$ ——膨胀多变指数
$F_p$ ——活塞面积	$n_p$ ——喷油泵转速
$G$ ——流量(重量)	$n_{TK}$ ——增压器转速
柴油机净重	$p$ ——气缸压力
$G_f$ ——燃油消耗量	$p_0$ ——环境压力
$G_l$ ——机油消耗量	$p'_0$ ——涡轮出口压力
$G_s$ ——进气流量	$p_a$ ——压缩始点气缸压力
$g$ ——重力加速度	$p_b$ ——膨胀终点气缸压力
$g_e$ ——有效燃油消耗率	$p_c$ ——压缩终点气缸压力
$g_i$ ——指示燃油消耗率	$p_e$ ——平均有效压力
$g_l$ ——机油消耗率	$p_i$ ——平均指示压力
$g_N$ ——比重量	$P_j$ ——往复惯性力
$H$ ——柴油机高度	$p_K$ ——增压压力
$H_u$ ——燃料低热值	$p'_K$ ——中冷器后压力
$I$ ——转动惯量	$P_N$ ——气缸侧压力
$i$ ——焓	$P_r$ ——离心惯性力
$J$ ——惯性矩	$p_s$ ——进气系统压力
$k$ ——绝热指数	$P_t$ ——作用在曲柄销上的切向力
$K$ ——作用于曲柄销的径向力	$p_T$ ——涡轮进口压力(增压)
$L$ ——柴油机长度	排气管压力(非增压)
$L_0$ ——缸心矩	$p_z$ ——最高爆发压力
燃烧 1 公斤燃料理论所需空气量	$R$ ——曲柄半径
$l$ ——连杆长度	气体常数
$M_1$ ——进气充量公斤摩尔数	$Re$ ——雷诺数
$M_2$ ——燃烧产物公斤摩尔数	$S$ ——活塞行程
$M_e$ ——柴油机扭矩	$T_0(t_0)$ ——环境温度
$M_{e\max}$ ——柴油机最大扭矩	$T_a(t_a)$ ——压缩始点温度
$M_r$ ——残余废气公斤摩尔数	$T_b(t_b)$ ——膨胀终点温度
$N_e$ ——有效功率	$T_c(t_c)$ ——压缩终点温度
$N_F$ ——单位活塞面积功率	$T_K(t_K)$ ——增压空气温度

# VI

$T'_k(t'_k)$ —— 中冷器后空气温度	$\eta_k$ —— 增压器压气机效率
$T_r$ —— 残余废气温度	$\eta_m$ —— 机械效率
$T_s(t_s)$ —— 进气系统温度	$\eta_s$ —— 扫气效率
$T_T(t_T)$ —— 涡轮前温度(增压) 排气温度(非增压)	$\eta_T$ —— 增压器涡轮效率
$T_z(t_z)$ —— 最高燃烧温度	$\eta_{TK}$ —— 增压器总效率
$U$ —— 气体内能	$\eta_v$ —— 充量系数
$v$ —— 活塞速度(瞬时)	$\theta$ —— 供油提前角
$V_a$ —— 压缩始点容积	$\theta_p$ —— 供油持续角
$V_c$ —— 压缩终点容积	$\lambda$ —— 压力升高比
$V_h$ —— 气缸工作容积	曲柄半径与连杆长度之比
$V_s$ —— 气缸总容积	$\mu$ —— 流量系数
$x$ —— 活塞位移	实际分子变更系数
相对湿度	$\mu_0$ —— 理论分子变更系数
$Z$ —— 气缸数	$\mu_{cp}$ —— 气体定压摩尔比热
$\alpha$ —— 过量空气系数	$\mu_{cv}$ —— 气体定容摩尔比热
$\alpha_z$ —— 曲轴转角	$\mu_m$ —— 扭矩储备系数
总过量空气系数	$\xi$ —— 热量利用系数
$\beta$ —— 连杆摆角	$\pi_k$ —— 增压压力比
$\gamma$ —— 空气重度	$\pi_T$ —— 涡轮膨胀比
$\gamma_k$ —— 增压空气重度	$\tau$ —— 冲程数
$\gamma_r$ —— 残余废气系数	$\tau_i$ —— 滞燃期(s)
$\delta$ —— 后期膨胀比	$\varphi$ —— 进排气重叠角
$\delta_1$ —— 瞬时调速率	$\varphi_f$ —— 示功图丰满系数
$\delta_2$ —— 稳定调速率	$\varphi_i$ —— 滞燃期( $^{\circ}\text{CA}$ )
$\varepsilon$ —— 压缩比	$\varphi_s$ —— 扫气系数
$\eta_{adh}$ —— 绝热压缩效率	$\psi$ —— 转速波动率
$\eta_e$ —— 有效热效率	$\omega$ —— 角速度
$\eta_i$ —— 指示热效率	$\dot{\omega}$ —— 角加速度

# 目 录

编辑说明

手册通用符号

## 第一章 绪论 ..... 1

第一节 柴油机在国民经济中的作用 ..... 1

第二节 柴油机发展趋势 ..... 2

1. 概述 ..... 2

2. 低速大功率二冲程柴油机 ..... 3

3. 中速大功率柴油机 ..... 4

4. 高速大功率柴油机 ..... 4

5. 高速中、小功率柴油机 ..... 5

第三节 我国柴油机发展概况 ..... 9

## 第二章 设计总论 ..... 13

第一节 柴油机的分类和特点 ..... 13

1. 柴油机的分类 ..... 13

2. 各种柴油机的特点 ..... 14

第二节 柴油机主要设计指标 ..... 16

1. 动力性能指标 ..... 16

2. 经济性指标 ..... 28

3. 可靠性和使用寿命 ..... 30

4. 重量和外形尺寸 ..... 31

5. 其他性能指标 ..... 33

第三节 各种用途柴油机的设计要求 ..... 35

1. 农用柴油机 ..... 36

2. 拖拉机用柴油机 ..... 36

3. 载重汽车用柴油机 ..... 37

4. 工程机械用柴油机 ..... 37

5. 机车用柴油机 ..... 38

6. 船用柴油机 ..... 39

7. 电站用柴油机 ..... 40

第四节 柴油机总体设计 ..... 40

1. 柴油机主要结构参数的确定 ..... 41

2. 总体布置 ..... 65

第五节 柴油机强化程度的评定 ..... 82

1. 用升功率来评定 ..... 82

2. 用  $p_e$  和  $C_m$  及  $p_e C_m$  乘积来评定 ..... 82

3. 用速度系数  $\alpha$  和单位活面积功率  $N_F$  来评定 ..... 84

第六节 柴油机设计的系列化、通用化和标准化 ..... 85

1. 产品系列化 ..... 86

2. 零部件通用化 ..... 87

3. 零件标准化 ..... 88

第七节 柴油机设计试制过程 ..... 88

1. 下达设计任务 ..... 89

2. 调查研究和拟定技术任务书 ..... 89

3. 样机设计和先期试验研究 ..... 90

4. 多缸柴油机零部件施工图设计 ..... 91

5. 样机的试制和试验 ..... 92

6. 样机鉴定 ..... 95

7. 小批试制和批量生产 ..... 96

## 第三章 柴油机工作过程计算 ..... 97

第一节 简单算法 ..... 97

1. 燃烧热化学基础 ..... 97

2. 压缩始点气体状态  $T_a$ 、 $p_a$  ..... 102

3. 压缩终点气体状态  $T_c$ 、 $p_c$  ..... 103

4. 燃烧过程及燃烧终点气体状态 ..... 103

5. 膨胀终点气体状态  $T_b$ 、 $p_b$  ..... 104

6. 排气温度 ..... 105

7. 示功图的绘制 ..... 105

8. 发动机性能参数的计算 ..... 106

9. 计算实例 ..... 108

第二节 电子计算机算法 ..... 113

1. 基本原理与公式 ..... 113

2. 微分方程组的求解 ..... 118

3. 进、排气管内计算的方程式 ..... 120

4. 废气涡轮增压器性能参数的计算 ..... 120

5. 计算实例 ..... 122

6. 电子计算机算法在其他方面的应用 ..... 123

符号表 ..... 132

## 第四章 柴油机的动力计算及平衡 ..... 135

第一节 曲柄连杆机构的运动分析 ..... 135

1. 中心式曲柄连杆机构的运动分析 ..... 135

2. 偏心式曲柄连杆机构的运动分析	154	3. 多质量系统的自由振动计算	301
3. 主副连杆机构的运动分析	156	4. 第一次频率试算值的选取方法	303
<b>第二节 曲柄连杆机构的动力分析</b>	<b>162</b>	5. 自由振动计算实例	304
1. 中心式曲柄连杆机构中的惯性力和惯性力矩	162	6. 分支系统的自由振动计算	306
2. 中心式曲柄连杆机构的动力分析	169	<b>第四节 强迫振动计算</b>	<b>309</b>
3. 偏心式曲柄连杆机构的动力分析	178	1. 干扰力矩功	309
4. 主副连杆机构的动力分析	178	2. 阻尼功	322
5. 柴油机曲轴的输出扭矩	182	3. 临界转速计算	324
6. 柴油机曲轴的旋转不均匀度 $\delta$	187	4. 共振振幅及扭振应力计算	325
7. 柴油机动力计算用表	190	5. 非共振振幅及扭振应力计算	326
<b>第三节 柴油机的平衡分析</b>		6. 强迫振动合成振幅与合成扭振应力及共振曲线的绘制	326
和平衡方法	194	7. 扭振许可应力及许可振幅	327
1. 综述	194	<b>第五节 改善扭转振动的方法</b>	<b>328</b>
2. 单缸柴油机的平衡分析和平衡方法	195	1. 调整轴系自振频率	328
3. 单列式柴油机的平衡分析和平衡方法	203	2. 减小干扰力矩功	328
4. V型柴油机的平衡分析和平衡方法	219	3. 加装减振器	329
5. 柴油机的内部平衡性能分析和平衡方法	242	<b>第六节 扭转振动测试与分析</b>	<b>346</b>
6. 柴油机不平衡性能的粗略估计	251	1. 测试方法与测试仪器	346
<b>第四节 计算例题</b>	<b>252</b>	2. 测试记录分析	349
1. S195型柴油机的动力、平衡计算	252	附录	355
2. 平面8V190型柴油机的二级往复惯性力及其平衡	258	<b>第六章 燃烧系统</b>	<b>361</b>
3. 采用主副连杆机构的6V240型柴油机的往复惯性力和往复惯性力矩	261	<b>第一节 概述</b>	<b>361</b>
4. $\gamma = 65^\circ$ 、 $\theta_0 = 25^\circ$ 的错拐V2型柴油机的往复惯性力	265	1. 混合气形成和燃烧过程	361
5. 6130型柴油机内力矩的计算	266	2. 对燃烧系统的要求及其分析	364
符号表	269	<b>第二节 燃烧室的比较和选型</b>	<b>368</b>
<b>第五章 轴系扭转振动</b>	<b>275</b>	1. 燃烧室的分类	368
<b>第一节 概述</b>	<b>275</b>	2. 燃烧室的比较	368
<b>第二节 当量系统计算</b>	<b>275</b>	3. 燃烧室的选型	372
1. 轴段扭转弹性值计算	276	<b>第三节 进气涡流</b>	<b>373</b>
2. 转动惯量计算	292	1. 进气涡流的产生方法	373
3. 增速或减速系统的转动惯量及柔度换算	297	2. 进气道的稳定流动试验及评价参数	374
<b>第三节 自由振动计算</b>	<b>298</b>	3. 螺旋气道的设计	377
1. 计算原理	298	<b>第四节 直接喷射式燃烧室</b>	<b>380</b>
2. 单质量、双质量及三质量系统的自由振动计算	300	1. 开式燃烧室(浅坑形)	380
		2. 半开式燃烧室(深坑形)	383
		<b>第五节 涡流室</b>	<b>393</b>
		1. 概述	393
		2. 设计要点	393
		<b>第六节 预燃室</b>	<b>402</b>
		1. 概述	402



2. 预燃室中的压力变化和流速计算.....	404	第十节 活塞环的设计 .....	467
3. 设计调试要点.....	406	1. 概述.....	467
<b>第七章 活塞组 .....</b>	<b>415</b>	2. 活塞环的结构.....	469
<b>第一节 概述 .....</b>	<b>415</b>	3. 活塞环的基本计算公式.....	474
1. 活塞组的工作条件.....	415	4. 主要参数选择.....	476
2. 活塞组的设计要求.....	416	5. 径向压力分布与自由形状设计.....	479
<b>第二节 活塞的结构和选型 .....</b>	<b>416</b>	6. 活塞环的间隙.....	484
1. 活塞结构的分类.....	416	7. 活塞环的组合.....	485
2. 活塞的选型.....	417	8. 减少漏气和窜油的措施.....	486
<b>第三节 活塞的基本设计 .....</b>	<b>418</b>	9. 活塞环的材料及成型方法.....	488
1. 活塞的主要尺寸.....	418	10. 活塞环的表面处理 .....	490
2. 活塞头部设计.....	427	<b>第十一节 活塞组的损坏型式及</b>	
3. 活塞销座设计.....	430	<b>改进措施 .....</b>	<b>493</b>
4. 活塞裙部及其侧表面形状的设计.....	433	<b>第十二节 活塞试验研究 .....</b>	<b>495</b>
5. 活塞与缸套的配合间隙.....	436	1. 活塞温度测量.....	495
6. 活塞重量.....	437	2. 应力和变形测量.....	498
7. 活塞强度计算.....	438	3. 专题试验.....	499
8. 活塞技术要求及结构实例.....	443	<b>第八章 连杆组 .....</b>	<b>501</b>
<b>第四节 活塞的冷却 .....</b>	<b>445</b>	<b>第一节 概述 .....</b>	<b>501</b>
1. 冷却方式及其效果.....	445	1. 连杆组工作情况.....	501
2. 冷却油腔的制造方法.....	446	2. 对连杆组的要求.....	501
3. 冷却机油的输送方式.....	447	3. 连杆结构类型.....	502
4. 冷却油量.....	450	<b>第二节 连杆的基本设计 .....</b>	<b>503</b>
5. 振荡油冷活塞的设计要点.....	450	1. 主要尺寸比例.....	503
<b>第五节 整体铸铁活塞 .....</b>	<b>452</b>	2. 连杆长度.....	504
1. 典型结构.....	452	3. 连杆小头.....	505
2. 新型球铁活塞的设计特点.....	452	4. 连杆杆身.....	512
<b>第六节 组合活塞 .....</b>	<b>453</b>	5. 连杆大头.....	513
1. 典型结构.....	453	6. 连杆组重量.....	517
2. 设计要点.....	454	7. 技术要求及结构实例.....	517
<b>第七节 活塞材料及工艺 .....</b>	<b>457</b>	<b>第三节 V型柴油机的连杆 .....</b>	<b>523</b>
1. 对材料的要求.....	457	1. 结构及选型.....	523
2. 材料的种类及其比较.....	458	2. 主副连杆设计要点.....	527
3. 铝活塞的成形方法.....	462	<b>第四节 连杆的强度计算 .....</b>	<b>531</b>
<b>第八节 活塞的表面处理 .....</b>	<b>463</b>	1. 普通算法.....	531
<b>第九节 活塞销的设计 .....</b>	<b>464</b>	2. 有限元算法.....	538
1. 结构及尺寸.....	464	<b>第五节 连杆材料及工艺 .....</b>	<b>543</b>
2. 轴向定位.....	464	1. 连杆材料.....	543
3. 活塞销与销座的配合.....	465	2. 连杆毛坯成型方法.....	544
4. 强度校核.....	466	3. 连杆的强化工艺.....	545
5. 材料及强化工艺.....	466	<b>第六节 连杆螺栓的设计 .....</b>	<b>545</b>

1. 概述	545	3. 柴油机滑动轴承的设计内容与步骤	634
2. 螺栓预紧力的决定	547	<b>第二节 材料</b>	634
3. 螺栓的疲劳计算	549	1. 轴承合金材料	634
4. 提高连杆螺栓疲劳强度的措施	550	2. 轴承合金的性能	642
<b>第七节 连杆组的损坏形式及改进措施</b>	551	3. 表面涂层材料	645
<b>附录</b>	552	4. 衬背材料	646
<b>第九章 曲轴组</b>	555	<b>第三节 结构设计</b>	647
<b>第一节 曲轴概述</b>	555	1. 直径、宽度与轴承间隙	647
1. 曲轴的功用	555	2. 结构要素的确定	650
2. 设计要求	555	3. 配合与过盈量的确定	662
3. 设计步骤	556	4. 轴瓦与衬套的工作图和有关技术条件	669
<b>第二节 曲轴设计</b>	556	<b>第四节 负荷与润滑计算</b>	672
1. 曲轴的结构型式及其选择	556	1. 坐标与图形	673
2. 曲柄的基本尺寸	560	2. 负荷计算	682
3. 提高曲轴疲劳强度的方法	565	3. 轴心轨迹计算	690
4. 润滑油通道	571	4. 最大油膜压力计算	696
5. 曲轴平衡块	573	5. 流量、摩擦与发热计算	699
6. 曲轴的轴向定位	574	6. 负荷与润滑计算在柴油机设计中的应用	701
7. 曲轴端部结构	574	7. 典型的轴承负荷与轨迹图形	707
8. 密封装置	575	<b>第五节 轴承的损坏及其分析</b>	719
9. 曲轴材料、毛坯制造及热处理	577	<b>第六节 滚动主轴承设计</b>	724
10. 曲轴技术条件	580	1. 滚动主轴承的组合型式	725
11. 曲轴损坏型式	582	2. 径向游隙与配合	728
<b>第三节 曲轴疲劳强度计算</b>	583	3. 轴向紧固与润滑	730
1. 作用于曲轴上的力和力矩	583	4. 寿命计算	731
2. 曲轴圆角疲劳强度计算	592	5. 带挡边的短圆柱滚子轴承轴向负荷能力的计算	736
3. 曲轴油孔疲劳强度计算	613	6. 滚动主轴承寿命计算实例	737
<b>第四节 曲轴工作应力及疲劳强度的测定</b>	622	<b>第十一章 气缸盖、气缸盖垫片和进排气管</b>	741
1. 柴油机运转状态下曲轴工作应力测量	622	<b>第一节 气缸盖</b>	741
2. 曲轴疲劳极限测定	625	1. 概述	741
3. 确定曲轴安全程度	626	2. 气缸盖分类及其特点	742
<b>第五节 飞轮</b>	627	3. 气缸盖结构设计	746
1. 飞轮的功用	627	4. 气缸盖强度计算	774
2. 飞轮的设计	627	5. 气缸盖材料	780
3. 飞轮尺寸确定	628	6. 气缸盖试验与检查	781
<b>第十章 轴承</b>	631	7. 气缸盖常见损坏形式及其改进措施	784
<b>第一节 轴承的结构型式与设计内容</b>	631	<b>第二节 进排气管设计</b>	786
1. 轴承衬的结构型式	631	1. 概述	786
2. 轴承副的结构型式	632		

2. 进、排气管结构型式.....	787	6. 机体计算.....	849
3. 进、排气管的核算.....	788	7. 机体材料.....	853
<b>第三节 气缸盖垫片设计</b> .....	789	8. 机体结构试验.....	854
1. 气缸盖垫片(简称缸垫)设计要点.....	789	9. 机体常见损坏形式和改进措施.....	860
2. 缸垫结构型式.....	791	<b>第二节 气缸套</b> .....	863
3. 缸垫有关尺寸的选择与确定.....	795	1. 概述.....	863
4. 缸垫的厚度测量.....	797	2. 气缸套分类和结构特点.....	864
<b>第十二章 机体与气缸套</b> .....	801	3. 气缸套结构设计.....	866
<b>第一节 机体</b> .....	801	4. 气缸套材料.....	879
1. 概述.....	801	5. 气缸套计算.....	883
2. 机体分类和结构特点.....	802	6. 气缸套的磨损及其改进.....	886
3. 机体设计.....	810	7. 气缸套允许磨损极限.....	893
4. 主轴承盖设计.....	831	8. 气缸套的穴蚀.....	893
5. 油底壳设计.....	846	9. 气缸套常见损坏形式和改进措施.....	899

# 第一章 绪 论

天津大学 史绍熙

## 第一节 柴油机在国民经济中的作用

柴油机的发展，已有八十多年的历史。通过这一长时期的不断改进和提高，已经发展到了比较完善的程度。由于它的热效率高、适应性好、功率范围广，已广泛应用于农业、工业、交通运输业和国防建设事业。因此，柴油机工业的发展，对国民经济和国防建设都具有十分重要的意义。

就当前各国动力机械的发展情况来看，在现有各种原动机中，包括蒸汽轮机、燃气轮机、水轮机、柴油机、汽油机、煤气机以及核动力装置等，其中蒸汽轮机和核动力装置主要用于大型固定式电站、大型远洋航轮和军用舰艇上。水轮机多限于水力发电。而汽油机则由于具有升功率高、噪声低、振动小，以及对负荷变化的反应迅速等优点，在小客车上的应用占压倒优势。目前世界上的小客车数量很大，所以汽油机的产量也很高。此外，汽油机也用于中、小型载重汽车，小型农业、林业机械等。但是，由于汽油机所用燃料的价格和燃料的消耗率均较柴油机为高，因此，在其它经济领域，就不能与柴油机相竞争。

至于煤气机，虽然它的出现很早，但由于汽油机和柴油机的迅速发展，除美国等少数国家外，在其他国家，这种机器的发展工作，没有得到重视。但是，第二次世界大战以后，特别是近二十年来，天然气的大量发现，石油炼制和石油化学工业的发展，以及污水煤气的有效利用，煤气机又重新得到重视和发展。不过，其使用范围和产量，仍远较柴油机为小。

在航空动力方面，燃气轮-喷气式发动机几乎是唯一的动力装置。但是，燃气轮机在水、陆方面的应用则尚未获得大量推广。虽然，燃气轮机具有重量轻、尺寸小、结构简单、扭矩特性好、振动小、以及排气中有害气体少等一系列优点，但是，它的热效率低，燃料消耗率高，特别在部分负荷时更明显。虽然，在大功率时已有明显改善，在中小功率时尚不能与柴油机相匹敌。此外，燃气轮机的噪声大、寿命短、加速性能差。同时，它还需用高合金耐热钢，生产成本低。因此，这种动力装置的应用，目前还只是在大功率领域，如电站、船舶、机车和输气输油管线等方面，取得了一定进展。在较小功率领域，如载重汽车、工程机械及拖拉机等方面的应用，则至今仍停留在研究试验阶段。

除了上述一些动力装置的使用领域之外，其余广大经济部门所使用的原动机基本上就是柴油机了。目前，各国在农业机械方面，功率在10PS以上时，柴油机获得了广泛应用。在拖拉机方面，除美国还使用一部分汽油机外，其它各国几乎均已采用柴油机。重型载重汽车也基本上都用柴油机作为动力，甚至轻型载重汽车也有大量使用柴油机的倾向。此外，西德、英国、法国、日本等国还生产应用于小客车上的高速小型柴油机，但数量尚不大。在工程机械和内河船舶方面，则柴油机几乎是唯一的原动机。在铁路机车方面，蒸汽机车已逐步被柴油机车和电力机车所代替，而且机车用柴油机的功率不断增长，目前，单机功率一般已达

4000 PS 左右，最高的达 6300 PS。

在远洋海轮方面，柴油机也是主要动力。据 1972 年统计，全世界商船队的 50000 艘海轮中，有 80% 是用柴油机驱动的。在 25000 吨以下的船舶中，柴油机是目前最经济的动力装置，其数量更是占压倒多数。在 1966 年以前，30000 吨以上的海轮主要采用蒸汽轮机，而以后，则采用柴油机的已逐渐增多。由于柴油机功率的不断提高，目前 100000 吨以上的海轮，甚至 200000 吨以上的巨型油船中，也已有柴油机作为主机的。

柴油机还广泛应用于移动式电站和备用电站。随着大功率中速柴油机的发展，柴油机在固定式电站的应用也已逐渐得到推广。现代大功率中速柴油机已能经济地使用于发电量为 100000 kW 的电站，而且不久，柴油机电站的发电量将要达到 200000 kW。

在军用车辆方面，第二次世界大战期间，世界各国的坦克大约有 65% 是汽油机，只有 35% 是柴油机。但是，经过战后三十多年来对高强度柴油机的研究发展，目前，除一些轻型坦克仍使用汽油机外，主战斗坦克基本上已全部采用柴油机了。

在军用舰艇方面，近年来，各国均在大力发展核能动力及燃气轮机动力装置，但在轻型舰艇上，柴油机仍占优势。在水面舰艇中的猎潜艇、反空舰艇、巡逻艇、快艇、扫雷艇、登陆艇，和大部分常规潜艇仍以柴油机为主机，有的水面舰艇则采用柴油机-燃气轮机联合装置。

由于柴油机的使用范围如此广泛，世界各国柴油机的产量十分巨大。根据 1974 年的统计，资本主义国家柴油机的总年产量约为 380 万台，若每台平均以 100 PS 计，则总功率约达三亿八千万 PS。据 1972 年统计，从 1967 年至 1971 年的五年中，世界上对工业用及船用柴油机的需要量大约增加了 25%，预计至 1980 年，将进一步增加至 50~60%。由此可知，世界各国柴油机的年产量，仍有不断增长的趋势。

由上可知，世界各国柴油机的产量不断增长，应用范围日益扩大，在各经济部门和国防工业中，柴油机都占有极其重要的地位。它对实现我国四个现代化将起十分重要的作用。

## 第二节 柴油机发展趋势

### 1. 概 述

近二十多年来，柴油机朝着提高单机功率，降低油耗、污染和噪声以及提高工作可靠性和延长使用寿命的方向发展。发展的速度很快。由于增压技术的进步和工作过程的改善，单位活塞面积功率不断提高。目前，每年平均提高 10%。在 1954 年，最大单机功率是 2000 PS，而现在则已提高至 48000 PS，并不久将进一步提高至 50000 PS 以上。单缸功率已由二十多年前的 1500 PS 提高至 4000~5000 PS。四冲程柴油机的平均有效压力已达  $25 \text{ kgf/cm}^2$ ，二冲程柴油机的达  $15 \text{ kgf/cm}^2$ 。柴油机的转速最高已达 6000 rpm。气缸直径最大的达 1060 mm。热效率最高已达 46% 以上。柴油机的大修期，在中等功率的高速柴油机中，有的已达 20000 h 以上，在中速大功率柴油机中，有的达 30000 h 以上。

在过去二十多年中，各类柴油机都获得了很大的发展，单缸功率获得了成倍的增长。在这方面，涡轮增压起了决定性的作用。目前还正在为进一步提高平均有效压力而进行大量的研究工作，如两级增压系统的研究、两级喷射高增压系统的研究、排气门两次开启高增压系

统的研究，以及低压缩比超高增压系统的研究等。

兹将低速、中速和高速柴油机的发展概况，分别简述如下。

## 2. 低速大功率二冲程柴油机

燃用重油的、大型、低速、十字头、涡轮增压、二冲程柴油机的功率范围一般为  $N = 9000 \sim 48000 \text{ PS}$ 。平均有效压力  $p_e = 8.5 \sim 15 \text{ kgf/cm}^2$ 。活塞平均速度  $C_m = 6.3 \sim 6.9 \text{ m/s}$ 。转速  $n = 83 \sim 225 \text{ rpm}$ 。最大单缸功率为  $4000 \sim 5000 \text{ PS}$ 。目前增压比已达  $2.5 \sim 3.0$ 。

从 1950 年至 1970 年，这种大型柴油机的比重量约下降了 50%，达到  $25 \sim 40 \text{ kgf/PS}$ 。主要是由于平均有效压力的提高，其次是由于活塞平均速度的增加。考虑到对螺旋桨转速、发动机高度和轴承负荷等的影响，活塞平均速度的进一步提高将受到限制。而平均有效压力则在最近 20 多年中，提高了 100% 以上。

现在来看一下单位活塞面积功率  $N_f$  的变化情况。

$$N_f = \frac{\frac{N_e}{Z}}{\frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{S}{D}}} \quad (\text{PS/m}^2)$$

式中  $N_e$ ——有效功率 (PS)；

$Z$ ——气缸数目；

$D$ ——气缸直径 (m)；

$S$ ——活塞行程 (m)。

$N_f$  是衡量围绕燃烧室各零件热负荷的尺度，表征发动机的热负荷特性。这个参数每年平均提高约  $100 \text{ PS/m}^2$ ，近年来提高得更多。现代低速大型二冲程十字头柴油机的  $N_f$  值已达  $3540 \text{ PS/m}^2$  左右。要继续提高单位活塞面积功率，必须对发动机的散热问题采取进一步的措施，要解决随结构尺寸加大而引起的壁厚增加和散热路线增长的问题，以及由此而引起的热应力问题等。

低速二冲程柴油机的强化系数  $p_e C_m$  已达到  $100 \text{ kgf} \cdot \text{m/cm}^2 \cdot \text{s}$ ，并不久可望达到  $120 \text{ kgf} \cdot \text{m/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

就目前趋势看，虽有少数工厂尚在研制缸径为  $1200 \sim 1300 \text{ mm}$  的发动机，但总的来说，通过进一步加大气缸直径来提高低速大型十字头柴油机的单缸功率的方法已受到较大的限制。这一方面是由于大型柴油机零件的加工、装配及运输，已成为巨大的耗费，另一方面是由于发动机的重量将失之过大。例如，缸径为  $1050 \text{ mm}$  的苏尔寿 RND 105 型 12 缸柴油机的重量达 1720 吨，在船尾集中更大的重量，无疑是不希望的。此外，零件尺寸进一步加大后，零件材料的均匀性和热处理淬透性也难以保证。

但是，单缸功率仍有可能通过进一步提高平均有效压力再提高  $15 \sim 35\%$ 。这样，单缸功率可以提高至  $5000 \text{ PS}$  或更高，单机功率可达  $50000 \text{ PS}$  以上。这一发展工作已在进行中。在研究发展过程中，重点是放在发动机的运动件和增压装置方面。要解决进一步提高增压度后所引起的热负荷和机械负荷问题。此外，还要解决温度增高后的润滑问题。

近年来，在低速大型船用柴油机发展中的另一个值得注意的问题是：大型船舶为了提高其推进效率，要求进一步降低发动机转速（降至  $80 \sim 90 \text{ rpm}$ ，甚至  $50 \text{ rpm}$ ），降低转速后，

为使发动机保持原有性能，就采取了加大活塞行程的办法，从而出现了长行程低速柴油机。

此外，今后人们将较过去更多地致力于提高工作可靠性、延长使用寿命、降低噪声和污染以及实现自动控制和远距离操纵等工作。当一台柴油机在大海航行时，发动机制造厂或使用部门能够利用电子计算机监督发动机的工作情况，必要时采取措施排除故障的时期，看来已经不远了。

### 3. 中速大功率柴油机

近二十年来，中速大功率柴油机发展速度很快，先后研制了三代机型。它们大部分是四冲程发动机。第三代中速柴油机的缸径已达 620~650 mm，活塞行程为 660~1300 mm，转速  $n = 300 \sim 340$  rpm，活塞平均速度  $C_m = 6.5 \sim 9.4$  m/s，平均有效压力  $p_e = 20 \sim 25$  kgf/cm<sup>2</sup>。单缸功率则四冲程发动机已达 1700 PS，二冲程发动机达到 2500 PS。中速柴油机的单机功率，十年前最大为 4500 PS，而现在已达 27000 PS，比重量  $G/N_e = 8.5 \sim 15$  kg/PS。

中速大功率柴油机在过去只是用于要求高度较低的船舶上，而现在则已进入以往一直为低速大功率柴油机，甚至为蒸汽轮机所占的领域。这种柴油机近年来之所以获得如此大的发展，主要是由于它具有如下优点：

1) 因为中速机总是要用减速齿轮箱的，所以螺旋桨转速可选取最佳值，从而可提高推进效率。

2) 体积小，高度低，重量轻。包括齿轮箱在内，其尺寸仅为低速机的 30~40%，重量为低速机的 60~70%。

3) 零件小，易于生产和维修。所需厂房设备小，生产投资少，研制周期短。

4) 燃油消耗率已接近低速机，而且也可燃用重油。

5) 易于系列化，并与固定电站用柴油机通用。

6) 可采用双机或多机并车，以增大功率。

就目前发展情况来看，使中速高增压四冲程柴油机的单缸功率进一步提高到 2000 PS 是完全可能的。因此，单机功率将能达到 36000 PS。如采用双机装置，则可达到 72000 PS。提高中速柴油机单缸功率的主要措施是提高平均有效压力、增大缸径和提高转速。根据目前情况看，活塞平均速度  $C_m$  的进一步提高已比较困难。而平均有效压力  $p_e$  的增高尚有潜力，预计至 1980 年  $p_e$  有可能达到 28 kgf/cm<sup>2</sup>。

现代比较先进的中速大功率柴油机的强化系数为  $p_e C_m = 150 \sim 198$  kgf·m/cm<sup>2</sup>·s。

### 4. 高速大功率柴油机

高速大功率柴油机的发展，已有四十多年的历史。早在 1934 年，西德苯茨 (Benz) 公司就曾设计制造过一台功率为 1200 PS、转速为 1650 rpm 的 16 缸 V 型柴油机，作为当时“兴登堡”号 (Hindenburg) 飞船的推进动力。比重量只有 1.6 kg/PS。

第二次世界大战期间，由于战争的需要，陆用和船用高速大功率柴油机得到了一定的发展，但这些柴油机一般都是自然充气式发动机，只有极少数机型采用机械增压，因此，性能一般较差。它们主要用于小型舰艇、铁路机车和其它移动式动力。

第二次世界大战以后，特别是废气涡轮增压技术发展得比较成熟以后，高速大功率柴油机才获得迅速的发展。50 年代末，西欧各国研究和开发了缸径为 175~180 mm、转速为

1500 rpm 的四冲程 V 型 12 缸和 16 缸柴油机, 其平均有效压力  $p_e = 10 \sim 18.5 \text{ kgf/cm}^2$ , 如西德 Benz 公司的 MB 820 系列、MAN 公司的 18/21 型和法国 SACM 公司的 V 16 BZSHR 型柴油机等。60 年代初, 西德的 Maybach 公司制造的 MD 系列柴油机 ( $D = 185 \text{ mm}$ ,  $S = 200 \text{ mm}$ ) 达到了更高的性能指标。在最大功率时的平均有效压力  $p_e$  达  $19.8 \text{ kgf/cm}^2$ , 在额定转速 1790 rpm 时的活塞平均速度  $C_m$  为  $11.9 \text{ m/s}$ , 在最高转速 1900 rpm 时,  $C_m = 12.66 \text{ m/s}$ 。强化系数  $p_e C_m = 236 \text{ kgf} \cdot \text{m/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。该系列中的 V 型 20 缸 MD1082 型柴油机 (即 MD20 V 538TB 型) 的最大功率为 4500PS, 比重量低达  $1.93 \text{ kg/PS}$ 。增压压力  $p_s = 2.7 \text{ kgf/cm}^2$ 。

由于高速大功率柴油机在机车、快艇和小型舰艇动力方面占有重要地位, 各国均在积极进行研究发展工作。目前, 这类柴油机的机型已多达几十种。单机功率一般在  $2000 \sim 4000 \text{ PS}$  的范围内, 最高的已达  $6000 \text{ PS}$ 。比重量一般在  $1.5 \sim 2.0 \text{ kg/PS}$ , 个别的低达  $1.17 \text{ kg/PS}$ , 甚至  $1.06 \text{ kg/PS}$ 。目前, 在使用的机型中, 四冲程机的平均有效压力  $p_e$  已达  $19.8 \text{ kgf/cm}^2$ , 二冲程机达  $11.3 \text{ kgf/cm}^2$ , 个别的高达  $13.5 \text{ kgf/cm}^2$ 。活塞平均速度  $C_m$  一般在  $10.5 \sim 12.9 \text{ m/s}$  的范围内, 个别的、供特殊用途的柴油机达到  $14.16 \text{ m/s}$ 。

就目下发展趋势看, 四冲程发动机的  $p_e$  不久可望达到  $25 \text{ kgf/cm}^2$  左右, 而  $C_m$  则看来已不会提高多少。

提高单机功率的另一途径是增加发动机的排量。因此高速大功率柴油机的气缸数曾不断增加, 16V、18V、20V、24V 和 32X 型发动机相继出现, 近年来, 西德 MTU 公司研制的 40H672“I”型柴油机的气缸数达 40, 苏联 M504 星型柴油机的气缸数多达 56。缸数增多, 则缸径可减小, 热负荷较低, 零件易于加工, 同时发动机体积功率增大, 比重量减少。但是, 气缸数的继续增多必将导致发动机结构过于复杂, 这不仅要影响发动机工作的可靠性, 而且将给维修工作带来困难。因此, 进一步增加气缸数的可能性已不大。

增大发动机排量的另一方法是加大气缸直径。就现在发展情况看, 高速大功率柴油机仍有通过加大缸径来增大排量, 从而提高单机功率的趋势。但是, 究竟用增加缸数 (缸径较小) 的方法, 还是通过加大缸径 (缸数较少) 的途径来实现单机功率的提高, 要根据具体情况, 仔细分析后决定。

目前, 先进的高速大功率柴油机的强化系数  $p_e C_m$  约达  $200 \text{ kgf} \cdot \text{m/cm}^2 \cdot \text{s}$ , 个别机型已超过  $200 \text{ kgf} \cdot \text{m/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。从近年来各国的研究发展工作来看,  $p_e C_m$  还将超过  $250 \text{ kgf} \cdot \text{m/cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

现代高速大功率柴油机的速度系数  $\alpha = \frac{S}{D} n^2 D^2 \times 10^{-8}$  已高达  $120 \text{ m}^2/\text{min}^2$  左右。个别的供特殊用途的机型的  $\alpha$  值还超过此数而达到 133 左右。单位活塞面积功率  $N_p$  已超过  $6000 \text{ PS/m}^2$ 。

## 5. 高速中、小功率柴油机

这里是指  $1000 \text{ PS}$  以下, 特别是指  $500 \text{ PS}$  以下的高速柴油机, 其中包括汽车、拖拉机用柴油机, 矿山、建筑和工程机械用柴油机, 以及工业、农业用柴油机等。

以上不同用途的柴油机随各地区的要求不同而有不同的发展方向, 但也有其共同点。由于载重汽车用柴油机在上述各种柴油机中具有代表性, 其发展中的有些问题, 也同样适用于其它用途的柴油机。因此, 在本节中, 除对小型工农业通用柴油机、农业拖拉机用柴油机及工程机械用柴油机的发展概况作简要介绍外, 将着重谈谈载重汽车用柴油机的发展趋势。



### 一、小型工农业通用柴油机

在欧洲大陆 50PS 以下的这类柴油机采用风冷的较多。一般用于驱动水泵、发电机、农业机械，以及各种工业机械。这种柴油机的转速逐年提高，目前已达 3000rpm，个别的已达 3600rpm。

功率在 50~100PS 的范围内，风冷的趋势不如 50PS 以下的那么明显，水冷风冷基本并重。这类发动机的转速在 2000~3000rpm 的范围内。

功率在 100~200PS 之间，则水冷柴油机占显著优势。

关于在发展风冷和水冷柴油机的问题上，国际上意见并不一致。一般来说，由于小功率发动机的热负荷较低，同时风冷结构比水冷简单，单缸功率在 12PS 以下的柴油机采用风冷为宜。单缸功率大于 20PS 的各种用途柴油机通常都应采用水冷。实践表明，在技术水平相同的情况下，风冷发动机的单位活塞面积功率较水冷发动机为低。

### 二、农业拖拉机用柴油机

由于各国自然条件和耕作方式不同，这类柴油机的功率差别很大。例如在美国，由于农场规模大，100PS 以上的拖拉机很多。1973 年功率在 100PS 以上的拖拉机占 39.5%，最大功率达 240PS。1975 年美国新拖拉机的平均功率达 100PS。目前大型拖拉机的数量和功率仍有继续增长的趋势。

在西欧，农场一般较小，主要使用中小型拖拉机，但功率也不断增加。英国生产的拖拉机，在六十年代，功率大多在 50PS 以下，而至 1974 年，50PS 以上的轮式拖拉机已占一半以上。1974 年后平均功率还在逐年增加。在西德，拖拉机的平均功率 1955 年为 20PS，1975 年为 55PS，1976 年 60PS 以上的几乎占一半，其中主要为 60~80PS。在法国，1965 年以前主要生产 50PS 以下的拖拉机。至 1972 年，50PS 以上机型的产量已占 61%，其中 65PS 的拖拉机达 25.7%。

苏联农用拖拉机系列型谱中新型号的功率一般为 100~150PS，最大为 250PS。

日本农业以个体经济为主，规模较小。六十年代以手扶拖拉机为主，功率大多在 10PS 左右。七十年代开始向中小型轮式拖拉机过渡，功率大于 30PS 的拖拉机也在逐步增多。近年来，已生产有 60~70PS 的水旱田两用轮式拖拉机。

我国幅员广大，各地自然条件不同，农业拖拉机的功率既需要小至 6PS 的，也需要大至 250PS 左右的。

国外农业拖拉机用柴油机的转速  $n$  在 2000~2600rpm 的范围内，个别的达 2800rpm，活塞平均速度  $C_m = 9 \sim 12 \text{m/s}$ 。

六十年代初，在农业拖拉机用柴油机上开始采用废气涡轮增压技术。目前已有不少工厂生产这种涡轮增压柴油机，有的还采用中冷。这种增压柴油机的排量大多在 5~7.5 l 之间，缸径  $D = 98 \sim 115 \text{mm}$ ，功率在 90PS 以上，平均有效压力  $p_e = 8 \sim 12.6 \text{kgf/cm}^2$ 。

在西欧（尤其在西德）风冷柴油机在农用拖拉机上获得广泛应用。但在美国，农用拖拉机上采用风冷柴油机的却很少。

农业拖拉机用柴油机仍以四冲程为主。在过去，生产小型农用二冲程柴油机的主要是西德和日本。但自 1972 年以来，这种产品数量已急剧下降。目前，二冲程柴油机在拖拉机用柴油机中所占比重已很小。这主要是由于二冲程柴油机的扫气时间短，扫气效率低，从而平均有效压力及热效率均较低。此外，这种发动机的热负荷较高，从而工作可靠性较差，使用