

柴油机增压 及其性能优化

顾宏中 邬静川 编著



上海交通大学出版社

柴油机增压及其性能优化

邬静川

TK423.5

柴油机增压及其性能优化

顾宏中 郭静川 编著

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍当代柴油机增压技术的几个主要方面:各种柴油机增压系统的特性;热力过程的计算;工作过程的优化设计与优化控制;涡轮增压柴油机低工况性能的改善和瞬态特性;涡轮增压柴油机的总能利用。

本书可作为内燃机专业及热能动力机械与装置专业相应课程的教材,也可作为有关专业硕士研究生的教材,同时可供工厂、研究所的工程技术人员参考。

柴油机增压及其性能优化

出 版:上海交通大学出版社

(淮海中路1984弄19号)

发 行:新华书店上海发行所

印 刷:江苏常熟文化印刷厂

开 本:787×1092(毫米)1/16

印 张:16.25

字 数:400000

版 次:1989年11月第1版

印 次:1989年12月第1次

印 数:1—1600

科 目:211—312

ISBN7—313—00616—0/TK·42

定价:3.20元





顾宏中同志简介

顾宏中同志,上海交通大学动力机械工程系主任,兼内燃机性能学科组主任、教授、内燃机学科博士生导师,兼任上海铁道学院教授,上海交通大学动力机械研究所所长,船舶动力教材委员会主任委员,中国造船学会常务理事,兼轮机学术委员会主任委员,中国内燃机学会常务理事,上海市内燃机学会理事长,《中国造船》杂志编委会副主任。

三十多年来,一直从事内燃机的原理、工作过程和增压技术的教学和科学研究工作,特别是在增压技术和工作过程等研究方面有较深造诣。曾创造性地提出“二次进气超高增压系统”的构思(获国家专利),以及“MPC 系统计算的修正容积法模型”、“广义一维不定常流的数学模型及其解法”、“二冲程扫气的浓排气模型”、“缸内膨胀功率回收系统”等创见性的研究成果,都得到国内外同行的关注和好评。

专著有:《船舶柴油机原理》,1960年后全国统编教材;《涡轮增压柴油机热力过程模拟计算》,获中船总公司优秀教材一等奖;《内燃机中的气体流动及其数值分析》,获上海交大1986年优秀教材一等奖。主编的有:《柴油机工作过程》;《船用柴油机设计手册》第三篇“船用柴油机工作过程计算”。合编的有:《柴油机原理》及即将出版的《内燃机设计手册》第十三篇“内燃机的增压系统”。多年来先后在国际国内杂志及学术会议上发表了“二次进气超高增压系统采用 MPC 方式的模拟计算与研究”、“谐振系统模拟与结构参数分析”、“涡轮增压柴油机排气系统的优化”及“排气管系中广义一维不定常流动的数值解”等学术论文50多篇。

由于在教学和科研上的成就,多次受到国家教委、中船总公司及有关部门的嘉奖,并于1978年获“上海市先进科技工作者”及1985年“上海市优秀教育工作者”的称号。

出版说明

根据国务院国发[1978]23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”，中国船舶工业总公司承担了全国高等学校船舶类专业教材的编审、出版的组织工作。自1978年以来，完成了两轮教材的编审、出版任务，共出版船舶类专业教材116种，对解决教学急需，稳定教学秩序，提高教学质量起到了积极作用。

为了进一步做好这一工作，中国船舶工业总公司成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”，“液压”四个教材小组。船舶类教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的业务指导机构，其任务是为作好高校船舶类教材的编审工作，并为提高教材质量而努力。

中国船舶工业总公司在总结前两轮教材编审出版工作的基础上，于1986年制订了《1986年—1990年全国高等学校船舶类专业教材选题规划》。列入规划的教材、教学参考书等共166种。本规划在教材的种类和数量上有了很大增长，以适应多层次多规格办学形式的需要。在教材内容方面力求做到两个相适应：一是与教学改革相适应；二是与现代科学技术发展相适应。为此，教材编审除贯彻“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则以外，还注意了加强实践性教学环节，拓宽知识面，注重能力的培养，以适应社会主义现代化建设的需要。

这批教材由各有关院校推荐，同行专家评阅，教材委员会(小组)评议，完稿后又经主审人审阅，教材委员会(小组)复审。本规划所属教材分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及各有关高等学校的出版社出版。

限于水平和经验，这批教材的编审出版工作还会有许多缺点和不足，希望使用教材的单位和广大师生积极提出宝贵意见，以便改进工作。

中国船舶工业总公司教材编审室

1988年3月

前 言

本书是根据1986年船舶总公司船舶动力教材委员会制订的“教学基本要求”编写的,经船舶动力教材委员会评选后推荐出版。本书可作为内燃机专业及热动力机械与装置专业相应课程的教材,也可作为有关专业硕士研究生的教材及有关工厂研究所的工程技术人员参考书。

本书的主要内容是讲述当前柴油机增压技术的几个主要方面,如各种柴油机增压系统的特性、热力过程的计算、工作过程的优化设计与优化控制、涡轮增压柴油机低工况性能的改善和瞬态特性,以及涡轮增压柴油机的总能利用。

在编写中引用了国内外许多工厂、研究所和大专院校近期内所发表的研究成果,也反映了上海交通大学在柴油机增压技术方面近十多年来的研究工作。

全书共分9章,第1、2、3、6、7、9章由顾宏中执笔,第4、5、8章由邬静川执笔。在编写过程中,陈安琪同志曾参加过第3章的编写,郭中朝同志也给予不少帮助。全书由上海铁道学院戚文星教授仔细审阅,并提出不少宝贵意见,在此表示深切的感谢。

由于本书涉及面较广,作者水平有限,书中缺点错误在所难免,谨请阅读本书的师生及同行们批评指正。

编 著 者

1988年6月1日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 增压柴油机近期发展概况	2
1.2 近期涡轮增压系统方面的发展	7
第 2 章 柴油机热力过程与配合的模拟计算	21
2.1 工质成分、比热、绝热指数、分子量及气体常数	21
2.2 缸内热力过程计算	22
2.3 进排气系统热力过程计算	34
2.4 中冷器及涡轮增压器的计算	43
2.5 数值解法	49
第 3 章 内燃机中气体非定常流动及其计算	51
3.1 内燃机中气体非定常流动及其利用	51
3.2 一维非定常流动方程及其数值解	59
3.3 一维非定常流的计算实例	77
第 4 章 内燃机工作过程优化基础	85
4.1 优化设计和内燃机工作过程优化概说	85
4.2 最优化方法基础	90
第 5 章 缸内和进排气系统优化设计	104
5.1 缸内工作过程的优化组织	104
5.2 进排气系统工作过程的优化	123
5.3 工作过程的多目标优化	134
第 6 章 增压柴油机部分负荷性能及其改进	148
6.1 概说	148
6.2 高增压四冲程柴油机部分负荷性能分析	149
6.3 改善部分负荷运行性能的措施	154
第 7 章 增压柴油机的瞬态特性	176
7.1 柴油机瞬态特性及其要求	176
7.2 瞬态特性模拟计算	180
7.3 影响瞬态特性的因素及其改进措施	189
第 8 章 涡轮增压柴油机的优化控制	202
8.1 优化控制概说	202
8.2 缸内工作过程的优化控制	203
8.3 增压系统的优化控制	213
第 9 章 涡轮增压柴油机总能利用及其分析	221
9.1 引言	221

9.2	高压循环.....	222
9.3	放热规律.....	225
9.4	进排气过程.....	231
9.5	冷却损失.....	237
9.6	机械损失.....	240
9.7	热能回收.....	240

第1章 绪 论

由于在 70 年代经历了两次石油危机, 油价上涨了十多倍。在那一时期, 使用柴油机的各种动力装置的营运成本中, 燃油所占的费用比例愈来愈大。因此, 在过去的十多年中, 各个柴油机制造厂及研究机关, 都大力从事提高柴油机的热效率及开展各种余热利用的研究; 在柴油机的设计思想上也发生了某些变化, 如把燃油消耗率的因素列为最重要的考虑因素之一。与此同时, 柴油机的增压程度愈来愈高, 增压系统也愈来愈完善, 并为适应低工况运转的要求, 采取了各式各样的措施, 开始进行优化设计和优化控制。

柴油机工作者过去十多年来的努力, 使柴油机的燃油消耗率大幅度地下降。图 1.1 为苏尔寿低速柴油机逐年来燃油消耗率下降的情况。大缸径低速二冲程柴油机的最低有效油耗率 g_{emin} 已降至 $154\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 相当于有效热效率为 $53\sim 54\%$ 。中速四冲程柴油机的 g_{emin} 已达到 $160\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 左右, 接近低速柴油机的水平。上述数据是指缸径大于 420mm 的中速柴油机而言。缸径在 $250\sim 300\text{mm}$ 的四冲程中速柴油机的 g_{emin} 达到 $170\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 左右。高速柴油机的 g_{emin} 也已达 $180\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 左右的水平。

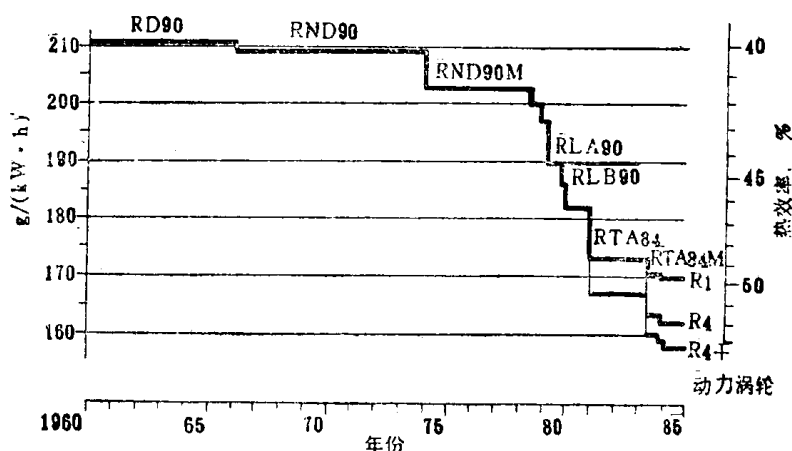


图 1.1 苏尔寿 R 型柴油机在油耗方面的改进

上述这些数据尚未计及排气与冷却水的余热利用。从这些数据看出, 有效油耗率比十多年前降低了 20% 左右。由于柴油机的热效率不断提高, 因此, 其使用范围正不断扩大。船舶动力装置中, 使用柴油机作为动力的占 95% 以上, 占绝对优势; 在车用范围内, 大的装载车辆几乎都采用柴油机作为动力, 而且, 已逐步进入小客车的使用领域。

柴油机是现代各种动力机械中热效率最高的一种, 预计在今后十年内仍将保持这种优势。在当今世界上, 柴油机工作者除积极开展降低排放、噪声及振动等工作, 以满足环境保护的要求外, 还将致力于进一步降低柴油机的有效油耗率和开展各种余热利用的工作; 在标定工况和各种部分工况下, 进行优化设计和优化控制; 以及改进增压系统, 使柴油机的运转性能更加趋于完善。

1.1 增压柴油机近期发展概况

下面首先对低速柴油机、中速柴油机及高速柴油机有关提高经济性能的情况,分别简要地作一介绍。

1.1.1 低速柴油机

低速柴油机,一般指的是转速在 250r/min 以下的十字头式二冲程柴油机。在世界上,它从 50 年代的 10 个左右机型发展到现在,已逐步统一。目前,世界上主要是两大型号的低速柴油机系列,即 MAN-B&W 和 Sulzer,从基本机型来说,两者很相近,

二冲程气阀单流换气、定压涡轮增压系统;

超长行程, $S/D = 3.0 \sim 3.8$;

平均有效压力 $p_e = 1.5 \sim 1.7 \text{ MPa}$;

扫气压力 $p_s = 0.32 \sim 0.34 \text{ MPa}$ 。

MAN-B&W LMC 系列;

D , mm	260	350	420	500	600	700	800	900
n , r/min	250	200	159	133	111	95	83	74
g_{emin} , g/(kW·h)	167	172	163	162	160	159	159	158

Sulzer RTA 系列;

D , mm	380	480	520	580	620	680	760	840
n , r/min	190	150	88	123	97	105	95	87
g_{emin} , g/(kW·h)	171	169	165	166	163	165	163	160

日本的 UEO 系列低速二冲程柴油机,也是气阀单流扫气、十字头式、定压涡轮增压系统,超长行程, $S/D \approx 3.7$ 。热力参数与上述两个系列基本相近。

从提高低速机热效率的角度来说,主要是采取了以下几方面的措施来达到的。

1. 合理选择工作过程参数,提高循环热效率,采用较高的压缩比(有效压缩比达 14 以上),提高气缸爆发压力,使 $p_{\text{max}} = 13.0 \text{ MPa}$ 左右。还采用了大的燃烧过量空气系数 α , $\alpha = 2.4 \sim 2.5$ 左右。这样高的压缩比和较大的燃烧过量空气系数,加上高的喷油压力(其最大喷油压力可达 90 MPa 以上),因此燃烧很完善,燃烧持续期只有 40° 曲轴转角左右。为了限制爆发压力,使燃烧在上止点前 1° 左右开始,燃烧放热规律曲线的形态如一等腰三角形。采用这些措施所组织的燃烧过程,接近等压燃烧。在压缩终点,压力 $p_c \approx 12.0 \text{ MPa}$ 时,最大爆发压力 $p_{\text{max}} \approx 13.0 \text{ MPa}$ 左右,燃烧比较平稳,且循环热效率较高。因为它不仅采用了高的有效压缩比,而且,排气阀开的角度(如下止点前 68° 曲轴转角)比排气阀关(即压缩始点)的角度(如下止点后 78° 曲轴转角)迟,即缸内膨胀比较压缩比大,故有利于提高热效率。在大的燃烧过量空气系数的情况下,使燃烧、膨胀及排气阶段的缸内气体温度较低,缸内气体最高温度 $T_{\text{max}} \approx 1600 \text{ K}$ 。因此,缸壁散热的冷却损失大为减少,即使在较小缸径的低速柴油机(如 $D = 350 \text{ mm}$)中,气缸冷却损失亦只占燃油热量的 6% 左右。前面提到,在用大的 α 及排气阀迟后关,使排气阀处扫气混合气体更多一些往外流出,能提高扫气效率,但使涡轮前的废气温度 T_T 较低,在标定工况时, $T_T = 380^\circ \text{C}$ 左右。为了满足涡轮增压器本身的功率平

衡及进气量的要求, 只有采用较高涡轮增压器总效率 η_{TK} 的涡轮增压器, 故一般采用如 VTR 4A 或 VTR 4E 系列等的涡轮增压器, η_{TK} 最高可达 75% 左右。

2. 提高机械效率 η_m 。由于 S/D 较大, 可采用较低的转速, 同时在柴油机本身也不带附件, 因此 η_m 可达 93~94% 以上。

3. 提高低工况时的热效率。在 MAN-B&W 系列柴油机中, 采用可变喷油正时(VIT)的油泵柱塞, 使各负荷下燃烧始点几乎不变, 以提高其循环热效率。并且, 当以经济功率作为标定功率时, 使 p_{max} 保持与最大功率时一样, 以使循环热效率更高。

4. 当更高的 η_{TK} 的涡轮增压器, 如 VTR 4A 系列涡轮增压器, 使用在大缸径柴油机时, 如 MAN-B&W LMC 系列中缸径大于 500mm 及 Sulzer RTA 系列中缸径大于 480mm, 这些柴油机都可以配有动力涡轮, 即在排气管中引出 10% 左右的废气量带动一个动力涡轮, 通过行星减速齿轮及液力偶合器, 再与柴油机上用于轴带发电机的功率输出装置(PTO)联接。动力涡轮的功率输入给柴油机, 在 100% 至 55% 标定功率时, 可使柴油机有效油耗率减少 5.5~2.5g/(kW·h)。在 55% 标定功率以下时, 关掉废气进入动力涡轮的旁通路, 即不使用动力涡轮。但由于排气管总的出流通流截面积减小, 使涡轮前废气压力 p_T 增大, 扫气压力 p_s 增加, 改进了燃烧, 使 g_e 也可降低 4~2.5g/(kW·h)。因此, 低工况性能也得到了改善。

5. 涡轮后废气热量的利用。对于目前的低速船用柴油机来说, 均装有废热锅炉, 虽然涡轮出口的废气温度较低, 在全负荷时, 约为 270~280°C 左右。但废热锅炉的出口废气温度, 目前可做到低达 160~170°C。锅炉蒸汽若用于发电, 进行能量回收, 可提高装置热效率 10% 左右。若不计锅炉排出的废气能量的利用, 则整个柴油机加上废热锅炉蒸气系统的总的有效热效率可达 60% 左右, 也就是说, 有效油耗率达 140g/(kW·h) 左右。

我国对低速船用柴油机的发展, 是在引进 MAN-B&W 和 Sulzer 两个系列产品的基础上进行的。目前只自行设计了一种小缸径的低速柴油机 $D=340\text{mm}$, $S=820\text{mm}$, $S/D=2.41$, $p_e=1.445\text{MPa}$, $n=205\text{r/min}$, $p_{max}=12.5\text{MPa}$, $g_e=183\text{g/(kW·h)}$, 单缸功率为 365kW。这一机型主要是为我国沿海货轮设计的。经济性等指标与国外目前发展的机型相比稍差一些, 但已很接近引进的机型。

1.1.2 中速柴油机

中速柴油机主要用于船舶推进及各种电站。在当今世界上, 中速柴油机的机型绝大多数是四冲程高增压柴油机, 平均有效压力都在 2.0~2.3MPa 左右或更高。对于这种机型, 经济性是一个很重要的指标, 不仅要求标定工况时热效率高, 而在其他低工况时, 也要求改善热效率。对高增压柴油机来说, 从理论上及实际使用中都已证明了, 即使按螺旋桨推进特性运行时, 在 30~50% 负荷时, 增压系统所供应的空气量将不足以使燃烧完善。因此, 近年来广泛开展高增压柴油机低工况性能的研究, 并已取得了丰硕的成果。不少研究成果已应用于产品柴油机。这将在第 6 章中深入讨论。

缸径为 400mm 左右的中速柴油机, 目前最低有效油耗率 $g_{e_{min}}$ 已达 165~170g/(kW·h), 在标定工况时, g_e 是在 170~175g/(kW·h); 缸径为 300mm 左右的中速柴油机, $g_{e_{min}}$ 为 185g/(kW·h) 左右。

提高各工况下经济性的措施, 世界各国的研究机构和制造厂的想法已逐步趋于一致, 这

也反映了柴油机本身的特性, 其主要的措施如下所述。

1. 提高最大爆发压力、改进燃烧及提高循环热效率: 在中速柴油机中, 一般采用缸内无涡流或小涡流以减少缸内流动损失及传热损失。为了改进燃烧, 采用高的喷油压力, 以保证油气混合好, 并及时燃烧, 如下列中速柴油机:

机型	最大喷油压力(MPa)
MAN58/64($D = 580\text{mm}$)	130
PC30($D = 425\text{mm}$)	180
VASA46($D = 460\text{mm}$)	200
MAK6M35($D = 350\text{mm}$)	100
PA5($D = 255\text{mm}$)	120
MTU1163-03($D = 230\text{mm}$)	150

此外, 用大一些的 S/D , 一方面可降低转速, 加长循环周期, 并可缩短燃烧持续角, 另一方面使燃烧室相对高度增大, 故在采用高一些的压缩比时, 可避免燃油束碰壁而影响燃烧。此外压缩比提高以后, 可使燃烧后期发出的热量的热利用率提高。如 Sulzer 的 ZA40S 四冲程高增压柴油机, 缸径为 400mm, 活塞行程由原来的 480mm 提高到 560mm, 以增大压缩比。又如 Pielstick 的 PC2-5 行程从原来的 460mm 加长到 550mm(机型为 PC20), 缸径仍保持 400mm, 而压缩比由原来的 11.5 提高到 13.4, PC20E(经济型)的压缩比为 14.4。在压缩比提高后, 再使燃烧始点靠近上止点。采用这样一些措施后, 使燃烧过程与低速机中相近, 燃烧放热率曲线的形态也近于等腰三角形, 燃烧持续期也只有 40° 曲轴转角左右, 这样使 $p_{\max}$ 不致太大, 但热效率可以提高。

上面讲的 $p_{\max}$ 不致太大是相对而言的, 实际上, 在最近开发的新一代中速机中, 是在保证可靠性及寿命的前提下, 尽可能提高 $p_{\max}$, 如

ZA 40S	$p_e = 2.21\text{MPa}, p_{\max} = 15.5\text{MPa};$
PA 5	$p_e = 1.92\text{MPa}, p_{\max} = 14.5\text{MPa};$
PC 20	$p_e = 2.387\text{MPa}, p_{\max} = 15.3\text{MPa};$
PC 30	$p_e = 2.30\text{MPa}, p_{\max} = 18.0\text{MPa};$
PC 40	$p_e = 2.217\text{MPa}, p_{\max} = 15.8\text{MPa};$
VASA 46	$p_e = 2.50\text{MPa}, p_{\max} = 18.0\text{MPa};$
MAK M453	$p_e = 1.78\text{MPa}, p_{\max} = 14.5\text{MPa};$
MTU1163-03	$p_e = 2.94\text{MPa}, p_{\max} = 15.0\text{MPa}.$

可见现代中速柴油机的 $p_{\max}$ 在 14.5~18.0MPa 范围。在单缸试验机中, $p_{\max}$ 已达 20MPa 以上。目前国产柴油机与之相比, 尚有一定差距。

2. 提高低工况经济性的措施: 以往在高速车用柴油机上所采用的一些改进低工况性能的措施, 现已用到中速柴油机上来了, 如燃烧始角自动调整措施。在中速柴油机中, 有些是用油泵柱塞斜槽形态来控制, 如 ZA 40S 柴油机; 有些是用油泵凸轮上的滚轮移位来控制, 如 MAN58/64 柴油机等。

此外, 在增压系统上采取了一些措施。以往在车用增压高速机上为了改进低速大扭矩性能而采用的一些措施, 现已用到高增压中速柴油机上, 而且已较普遍。如进排气旁通系统, 即把进气管中一部分增压空气通过旁通阀进入涡轮前的排气管。如 PC20 中速柴油机,

按螺旋桨推进特性运行,在15~60%负荷时,旁通阀打开,使涡轮增压器的气流量增大20%左右,这样不仅可防止增压器喘振,而且使 η_K 和 η_T 提高,使增压压力提高0.02 MPa左右,使燃烧过量空气系数 α 增大,改善燃烧。前面已经说到,高增压四冲程柴油机即使按螺旋桨特性运行时,在30~50%负荷时, α 将要降低,甚至低于1.6~1.7以下(指在中速机中),超过了保证燃烧完善的 α 的最低限。故在ZA40S中速柴油机中,在60%负荷以下打开旁通阀,以提高低工况经济性,已作为一种标准机型的措施。在PA6-280BTO二级涡轮超高增压柴油机中, $p_c=2.64\text{MPa}$,当要求该机在 $n<0.85n_N$ 时(n_N 为标定转速)具有大的扭矩的情况下,可以选用进排气旁通系统,该旁通接在高压级进排气管中。

另外一种改进车用涡轮增压柴油机低速扭矩的措施,是把涡轮前废气在高工况时旁通入大气的方法,也已用到中速机上。这样,涡轮增压器的匹配点选在低工况区。在高工况时,为了不致使增压压力太高,以致 $p_{\max}$ 太高,而采用放气。在中速机中,通常是放增压空气,这样,放气阀较干净,温度较低,不易引起故障。在PC20和ZA40S中速柴油机中,当负荷在85%以上时,打开增压空气放气阀放气,这一措施使低工况时,增压压力可提高0.03~0.04 MPa。在ZA40S中速柴油机中是作为一个任意选用的措施,视用途选用。在PC30及PC40中速柴油机中,上述旁通和放气的两个措施是同时采取的。但在VASA 46中速柴油机中,则用陶瓷放气阀在高负荷时放排气,以改进低负荷性能。该机 $p_c=2.5\text{MPa}$, $\varepsilon=14$, $p_{\max}=18\text{MPa}$, $p_s=0.38\text{MPa}$, $g_c=163\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

为了改善低工况性能,如PC20, PC30, PC40中速柴油机中,在小于50%负荷以后,使气缸冷却水出口温度由80~85°C提高到90~95°C,并在小于35%负荷以后,使进入中冷器后出来的空气温度从40~50°C提高到70~80°C,以提高低工况燃烧重油性能。图1.2为PC30中速柴油机同时采用几种措施的情况。

3. 采用动力涡轮。与低速二冲程柴油机中一样,因所用的涡轮增压器的总效率较高,而且涡轮前的废气温度比二冲程低速机中要高,这部分多余的废气能量可以更好地利用。这一措施在PC30L, PC40L, ZA40S, MAK601 ($D=580\text{mm}$)及M552 ($D=450\text{mm}$)等中速柴油机中都采用,使 g_c 降低4.5~5.5g/(kW·h),即 g_c 降低3%左右,效果与低速机中相近。如PC30L中速机($D=425\text{mm}$, $S=600\text{mm}$, $n=450\text{r/min}$, $N_{ei}=736\text{kW}$, $p_c=2.35\text{MPa}$)在采用上述全部措施后, $g_{c\min}=158\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$; PC40L柴油机的 $g_{c\min}=160\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。ZA40S中速机的 $g_{c\min}=171\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$,该机在不带动力涡轮时, $g_{c\min}=175.5\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

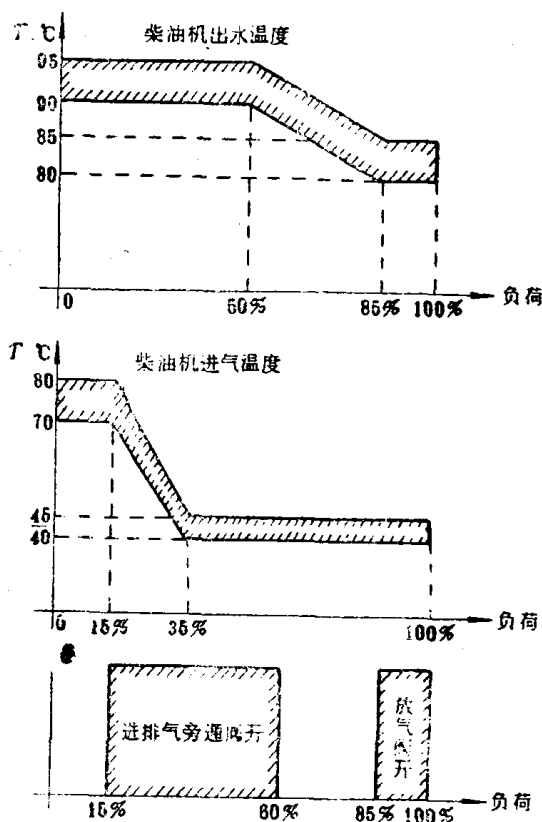


图1.2 PC30中速机改进低工况性能采用的措施

当采用动力涡轮时,在 50% 负荷以上时,启用动力涡轮,能降低 g_e ; 当 50% 负荷以下时,关闭动力涡轮,与在二冲程低速机中相似,也同样能降低 g_e 。

从上面介绍的一些近代中速柴油机,在采用提高 $p_{\max}$ 、改善工作过程、空气旁通、放气和动力涡轮等措施,使经济性提高。从所达到的指标看,我国已引进生产的或自行研制的中速柴油机与之比较还有一定差距。目前在国际上已在进行工作过程优化设计,使全工况的经济性均有所提高,如随着工况的变化,进排气正时也随着变化,以提高全工况的性能。同时,也早已使用废气余热利用的措施,如朗肯后循环等,并用微机优化控制,使柴油机工作更加完善。

1.1.3 高速柴油机

高速柴油机基本上分为两大类。一类是为导弹艇、高速艇、坦克及机车等用途而发展的,是大功率高压或超高增压柴油机,具有代表性的是 MTU 高速柴油机,如 20V956 柴油机, $D=230\text{mm}$, $S=230\text{mm}$, $n=1500\text{r/min}$, $N_e=6870\text{kW}$, $p_e=2.88\text{MPa}$, $\varepsilon=9.5$, 二级涡轮增压, $g_{e\min}=205\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。16V396 柴油机, $D=165\text{mm}$, $S=185\text{mm}$, $n=2100\text{r/min}$, $p_e=2.31\text{MPa}$, $\varepsilon=10$, $p_{\max}=15.5\text{MPa}$, $g_{e\min}=210\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。这些柴油机主要是要求强载。为了提高低工况性能,采用了相继涡轮增压系统及二级涡轮增压。为了在如此低的 ε 下保证起动,采用了充量转换系统。为了降低 g_e 也做了不少优化工作过程及燃烧的工作,如对 6V396 TC33 柴油机, $\varepsilon=12.5$, $n=1500\text{r/min}$, $p_{\max}=13.5\text{MPa}$, $p_e=1.7\text{MPa}$, $g_{e\min}=197\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

另一类高速柴油机是 p_e 的水平不太高的车用涡轮增压柴油机,因 p_e 太高了,要满足外特性运行特性,尚需采取其他措施。但这种柴油机对经济性要求高,目前正在改用直喷式燃烧系统,不仅 $D>100\text{mm}$ 的高速机,甚至 $D=85\text{mm}$ 、 75mm 及 65mm 的也用直喷式以提高经济性。在该类型高速柴油机中也采用高喷油压力及高爆发压力,如 Cummins、小松等厂生产的产品均是如此。以小松 SA6D125-1 涡轮增压中冷直喷式四冲程柴油机为例, $D=125\text{mm}$, $S=150\text{mm}$, $n=2200\text{r/min}$, $\varepsilon=14.5$, $p_e=1.38\text{MPa}$, $N_e=276\text{kW}$, $p_{\max}=14.5\text{MPa}$, 标定工况时的 $g_e=204\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 而 $g_{e\min}=197\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。该机采用高喷射压力的 P 型泵,及高效率的中冷器和后弯叶轮增压器;又如上海内燃机研究所和华丰机器厂联合研制的 4100ZT 涡轮增压直喷式柴油机, $D=100\text{mm}$, $S=125\text{mm}$, $n=2300\text{r/min}$, $\varepsilon=16.2$, $p_e=0.8\text{MPa}$, $p_{\max}=11.0\text{MPa}$, 标定工况时的 $g_e=217\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, $g_{e\min}=205\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。该机采用了较大的燃烧过量空气系数,使燃烧持续角在 40° 曲轴转角左右。

近年来,车用柴油机的发展工作主要是直喷化、增压化、电子控制及优化工作过程等,这些都与降低 g_e 有关。根据世界性的预测,今后十多年中,在喷油系统中将发展电子控制及高压喷射等;在增压系统中将进一步提高涡轮增压器效率、中冷器效率及采用可变涡轮增压嘴、陶瓷涡轮及两级涡轮增压等;以及降低标定转速及减轻运动件质量、以减少吸排气及摩擦损失等;在排气能量回收方面采用隔热、复合涡轮增压,及朗肯后循环等。希望在 1990 年时达到 $g_e=177\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

总的来说,不论是低、中及高速柴油机,为了提高其全工况的经济性等性能参数,必须 1) 进一步增压化,以提高 p_e ; 2) 高压喷射及提高 $p_{\max}$; 3) 改进低工况性能,根据不同的机型采用不同的相适应的措施,如变进排气正时及喷油正时、空气旁通、放气或变涡轮喷嘴

截面等措施；4) 采用动力涡轮以回收涡轮的剩余功及余热利用，特别是废气余热利用；5) 工作过程的优化及电子控制等。

1.2 近期涡轮增压系统方面的发展

1.2.1 带动力涡轮的增压系统

所谓“动力涡轮”，指的是利用一部分柴油机废气能量在一个单独的涡轮中膨胀得到的机械功，通过减速齿轮及液力偶合器等传动装置传给曲轴或带动其他机械。这种设想，在陶瓷绝热复合发动机中已试验研究一段时间，而在一般增压柴油机中利用动力涡轮还是近期的成果。因为，只有在涡轮增压器总效率达到一定高度以后，譬如说， $\eta_{TK}=0.68$ ，涡轮的功除了满足增压器的要求以外尚有剩余，而且在使用动力涡轮时，对总体经济性来说是有利时才能实现。换句话说，只有当像 VTR4A 系列涡轮增压器等开发出来以后，应用动力涡轮才有了可能。图 1.3 为勃朗·鲍弗利公司几代涡轮增压器总效率变化的比较。可以看出，轴流式涡轮增压器，其总效率已达到 68~72%。这样，就有可能在排气总能中，取出 8~15% 在动力涡轮中利用。这样可以降低整机的有效油耗率。 η_{TK} 愈高，能降低的有效油耗率 Δg_e 愈多，而径流涡轮增压器的 η_{TK} 尚达不到采用动力涡轮的程度，只有在绝热机情况下才有可能。

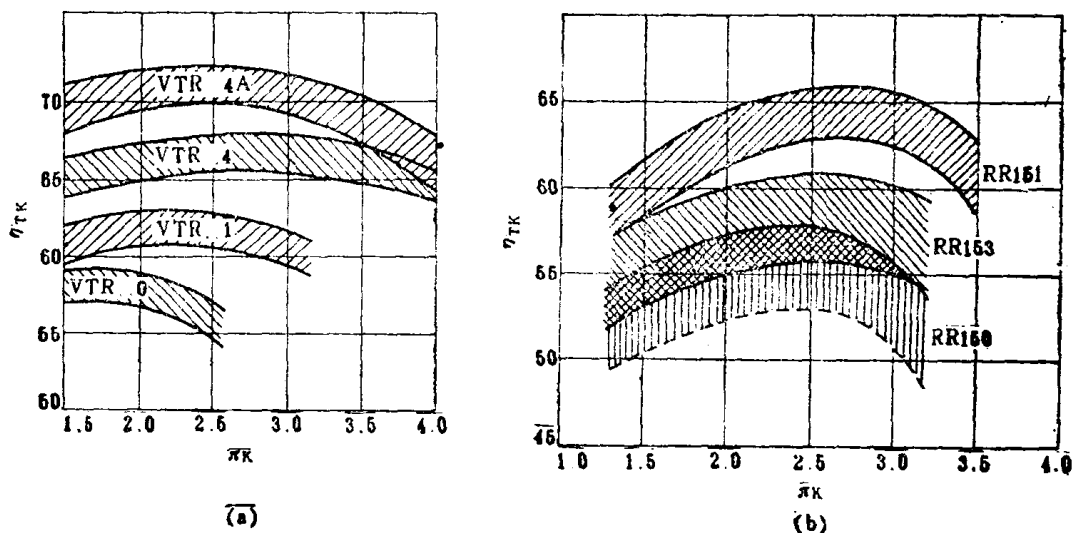


图 1.3 涡轮增压器效率的比较

(a) 轴流式; (b) 径流式

图 1.4 表示出涡轮增压器总效率 η_{TK} 对柴油机一些主要性能参数的影响。同时也表示出在利用动力涡轮时， η_{TK} 及动力涡轮效率 η_{NT} 对 Δg_e 的影响。在改变 η_{TK} 时，气阀正时等发动机结构参数保持不变。在比较中，假定增压压力 p_s 保持不变，从理论上可知， η_{TK} 从某一定值 $\eta_{TK(EI)}$ 降低时，排气管压力 p_T 增大，因此，发动机进排气压差 $(p_s - p_T)$ 降低，导致通过发动机的气耗量 g_s 减少，排气阀座温度 T_{vs} 及排气温度 T_T 增加，有效油耗率 g_e 也要增加，最后到达一个取决于发动机运转可靠性的某一参数极限值，对四冲程柴油机来说，如排气阀座温度 T_{vs} 对二冲程柴油机来说，如气耗率 g_s 。这是不能超越的。达到这一极限值时的 η_{TK} ，称为最小必须的涡轮增压器总效率 $\eta_{TK,M}$ 见图 1.4。现在再从 $\eta_{TK,M}$ 点出发，

η_{TK} 增加,而得到的剩余能量用在动力涡轮中,就会使 g_e 降低。 η_{NT} 愈高, Δg_e 愈多。图中还画出了当 η_{TK} 达到 $\eta_{TK,E}$ 时的 Δg_e 值。

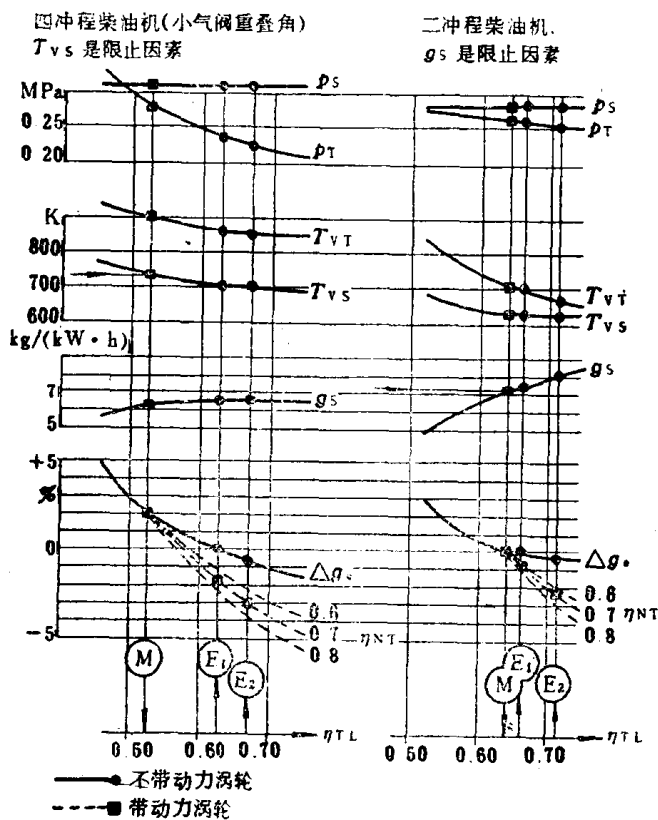


图 1.4 η_{TK} 及 η_{NT} 对柴油机性能参数的影响

涡轮 NTC214、NTC254 及 NTC304 等,在采用动力涡轮后,可以使二冲程柴油机的 g_e 降低 1~3%, 四冲程柴油机的 g_e 降低 2~5%。

上面提到,配有现代涡轮增压器的增压柴油机,可以拿出 8~15% 的排气总能在动力涡轮中利用,这是指二冲程及具有大气阀重叠角的四冲程柴油机来说的,对于小气阀重叠角的四冲程柴油机,要求的 $\eta_{TK,M}$ 较小,有可能拿出排气总能的 20~30% 用于动力涡轮。

利用动力涡轮的增压系统可分为两种,见图 1.5, 并联动力涡轮和串联动力涡轮。并联动力涡轮方案是使用小流量高压比的涡轮,与所用的涡轮增压器相比,它是一个小的高速涡轮,为了减速到实际用途,需要一个高减速比的齿轮箱。显然,小功率的柴油机就很难选用到一个可靠的并联动力涡轮,因为动力涡轮太小而且高速。但对较大功率(大于 4000kW)的柴油机,用并联动力涡轮就很有利,因为此时的动力涡轮并不太小,且一定尺度的动力涡轮可覆盖较大的柴

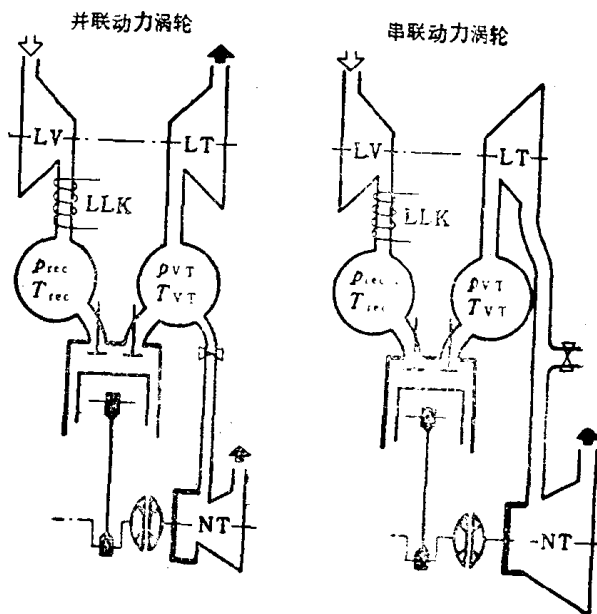


图 1.5 动力涡轮的两种设置方案

油机功率范围。

串联动力涡轮是大流量小膨胀比的涡轮，是一个大的低速涡轮，因此，串联动力涡轮只能用于功率较小和气阀重叠角较小的四冲程柴油机中，因为大功率时，动力涡轮太大。从图 1.6^[50] 可清楚看出，在大功率时并联较合适，而在小功率时串联较合适，这也说明了为什么在小功率陶瓷绝热复合发动机中均采用串联的方案，而在大功率低、中速柴油机中均采用并联动力涡轮的方案。

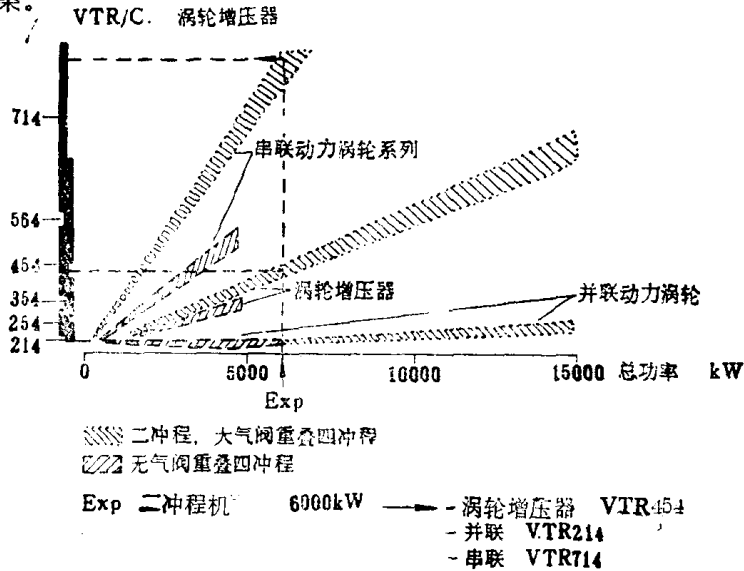


图 1.6 动力涡轮尺寸与柴油机功率的关系

此外，动力涡轮方案是否选用还有一个总体经济性问题。图 1.7^[50] 表示配备动力涡轮后增加的费用及该费用回收的时间与柴油机功率的关系。可以看出，并联动力涡轮增压系统所附加的费用，在柴油机很广的功率范围内基本上保持不变。因此对大功率柴油机所附加的费用较小，且柴油机功率愈大，运行寿命愈长，则经济效益愈高，而费用回收年限愈短。对串联动力涡轮来说，其经济效益就不是这种情况，而且当功率很大时，动力涡轮太大了。

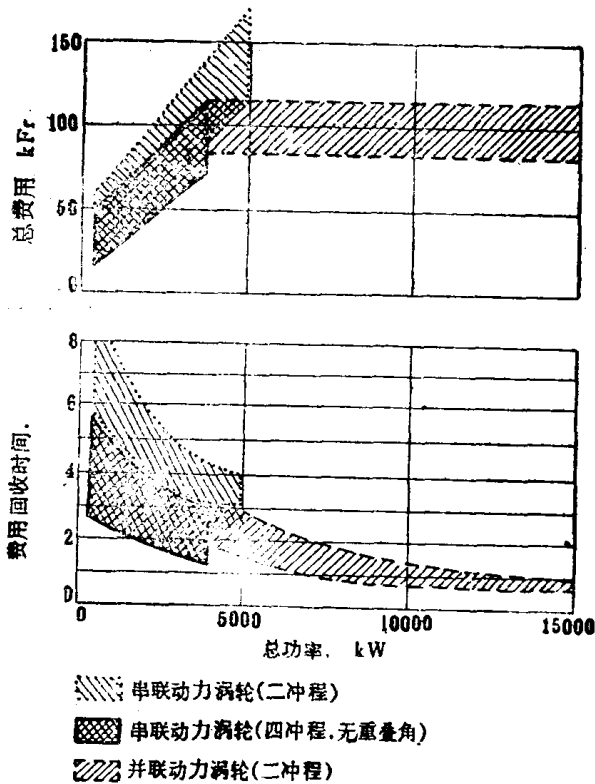


图 1.7 柴油机功率与费用回收时间的关系