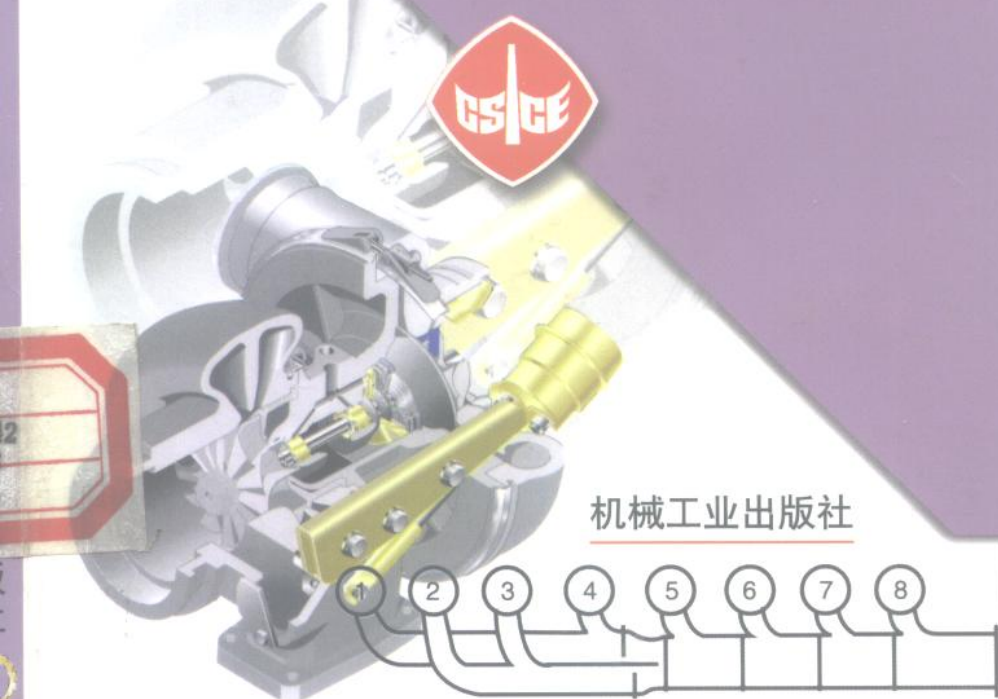


内燃机科技丛书

柴油机涡轮增压技术

陆家祥 主编



机械工业出版社

内 燃 机 科 技 丛 书

柴油机涡轮增压技术

主 编 陆家祥
参 编 刘云岗 李国祥
主 审 顾宏中



工 业 出 版 社

本书分为7章。第1章较为系统地阐述了内燃机涡轮增压技术的由来、发展和现状、增压的基本概念;第2章叙述了涡轮增压器和中冷器的结构、工作原理及其特性;第3章从排气能量利用的角度出发,讨论了不同的增压方式及其影响因素;第4章从增压系统热力参数的内在联系入手,分析了主要热力参数的确定方法;第5章通过对柴油机、涡轮增压器特性的分析,深入讨论了降低热负荷、机械负荷的渠道及联合运行线的调整方法;第6章综合论述了当今国内外提高柴油机平均有效压力及改善低工况的各种增压系统;第7章对增压柴油机热力过程模拟计算的方法、步骤作了详细的介绍。

本书可供从事内燃机、涡轮增压器设计和研究工作的工程技术人员及内燃机、动力机械专业的本科生、研究生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

柴油机涡轮增压技术/陆家祥主编.-北京:机械工业出版社,1999.9

(内燃机科技丛书)

ISBN 7-111-07427-0

I. 柴… II. 陆… III. 柴油机-涡轮增压器 IV. TK42

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第34244号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码:100037)

责任编辑:赵爱宁 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999年9月第1版·第1次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·7.875印张·200千字

0 001—3 500册

定价:15.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话:(010) 68993821、68326677-2527

序

“内燃机科技丛书”经作者、编审人员、编辑部及编委会成员两年来的共同努力与广大读者见面了。这套“丛书”从今年开始陆续出版并计划于 2000 年内完成。“丛书”的出版是我国内燃机科技界的一件好事，将对内燃机行业的科技进步起重要的推动作用。

党的十五大提出了我国 21 世纪经济和社会发展的宏伟蓝图，提出了在新世纪实施科教兴国战略、加快科技发展的重大目标和任务。我国科技界肩负着重大的历史使命，要求广大科技工作者把握当代世界科技发展的趋势，走在科技兴国的前列，担当起推动科技进步、解放和发展生产力的重任。随着科学技术的发展及许多高新技术在内燃机上的推广应用，内燃机的新技术、新结构、新原理、新材料、新工艺层出不穷，技术水平有了飞速发展和提高。为了担负起历史赋予的重任，迎接新世纪的挑战，中国内燃机学会决定组织编撰一套“内燃机科技丛书”，以推动我国内燃机工业发展和技术进步，并适应培养内燃机界高层次技术人材的需要。

“内燃机科技丛书”共 14 本，选题涉及内燃机工业发展技术进步的一些重要领域，是以单行本出版发行的专题性内燃机工程读物。“丛书”面向 21 世纪，内容新、起点高，不但有最新的专业理论研究，而且有比较成熟的应用技术成果，体现了科学性、先进性和实用性；反映了内燃机设计制造、开发研究诸方面国内外最新科技成就、动向及经验，是我国内燃机行业的一部重要图书。

“丛书”读者对象主要是我国内燃机行业大专以上文化水平的工程技术人员，同时也可作为高等学校、相关专业方向的选修课教材或教学参考书。这既能帮助读者拓宽视野、掌握动向、提高

理论水平，又能在工程实际中应用，有助于读者提高分析和解决问题的能力。

为保证“丛书”的编写质量，中国内燃机学会组建了“丛书”编委会和编辑部，领导和具体组织“丛书”的编写工作，研究确定了“丛书”书目，组织审定了编撰大纲。编委会根据我国机械工业方针任务及广大用户读者的要求，择优遴选国内内燃机界有相当工作基础的单位和专家、教授、学者，请他们承担编写任务，聘为“丛书”的主编和主审。

由于“丛书”编辑出版时间仓促，疏漏和不足之处在所难免，欢迎广大读者指正。

中国内燃机学会理事长
“内燃机科技丛书”编委会主任 李守仁
1999年6月

“内燃机科技丛书”编委会

(以姓氏笔划排序)

名 誉 主 任:	史绍熙	何光远	邵奇惠	
主 任:	李守仁			
副 主 任:	王之麒	刘洪林	朱华璋	许维达
	徐兴尧	蓝祖佑	蒋德明	
委 员:	王 涛	王建明	刘永长	吴培基
	李本度	李国瑞	李德宽	陆鸣人
	沈铁平	罗廷赞	林 松	赵奎翰
	饶如麟	顾宏中	唐开元	贾玉申
编辑部主任:	王之麒	(兼)		
副 主 任:	王士杰	李维镜	周龙保	
成 员:	唐一民	卢慧娟		

前 言

增压技术使内燃机的动力性、经济性和排放特性上了一个大台阶，增压是内燃机发展的重要标志。近期来，世界石油资源不足和环境污染更加要求内燃机进一步改善经济性、净化排气，因而增压机型已成为内燃机的基本型。为了提高平均有效压力，改善低工况性能，确保可靠性，各种形式的增压系统不断涌现，涡轮增压器设计、加工、匹配技术日臻完善。

几十年来，我国内燃机增压技术得到了长足发展，但新时期下，还需加快步伐，努力普及。本书旨在用有限的篇幅，阐述内燃机增压的基本理论、基本结构和基本方法，力求反映国内外最新增压技术。

全书内容共分7章。第1章绪论，较系统地叙述了内燃机涡轮增压技术的由来、发展和现状，增压的基本概念；第2章涡轮增压器和中冷器，阐述了涡轮增压器和中冷器的结构、工作原理及其特性；第3章排气能量的利用，从排气能量利用的角度出发，讨论了不同的增压方式及其影响因素；第4章增压系统基本热力参数的确定，从增压系统热力参数的内在联系入手，分析了主要热力参数的确定方法；第5章柴油机与涡轮增压器匹配，通过柴油机、涡轮增压器特性的分析，深入讨论了降低热负荷、机械负荷的渠道及联合运行线的调节方法；第6章涡轮增压系统，综合了国内外当今提高柴油机平均有效压力及改善低工况性能的各种增压系统；第7章增压柴油机热力过程模拟计算，详细介绍了增压柴油机模拟计算的方法、步骤。

本书有五个特点：一是“需要”。内燃机对人类做出了巨大贡献，同时也污染了大气环境，而增压是减少内燃机排放污染的基本手段之一。在大力推广增压技术的今天，本书的出版尤显重要。

二是“新”。本书反映了 90 年代国内外的增压现状、最新匹配和计算技术以及新的增压系统。三是“精”。本书对增压技术的基本概念、基本理论和基本方法的阐述力求简明扼要，使读者一目了然。四是“实用”。本书从实用角度出发，重在增压匹配技术和模拟计算，既可使读者拓宽视野，又便于操作。五是“全”。本书内容涉及二冲程、四冲程低、中、高速柴油机，对汽油机、气体燃料发动机的增压也作了简要介绍。

本书可供从事内燃机、涡轮增压器设计和研究工作的工程技术人员及内燃机、动力机械专业本科生、研究生参考使用。

本书由刘云岗编写第 2、7 章，李国祥编写第 3、4、5 章，王桂华制作了全书图表和文字处理，陆家祥编写了第 1、6 章。本书由陆家祥主编。上海交通大学顾宏中教授详细审阅了全书并提出了许多宝贵的意见。

本书编写过程中引用了不少国内外文献资料和研究成果，并得到了同行的大力支持，在此一并致以诚挚的感谢。

本书涉及知识面广，作者才疏学浅，错误和不妥之处在所难免，谨请读者批评指正。

编者

主 要 符 号 表

物理量代号及名称	单 位
A ——涡轮蜗壳流道截面积	m^2
BDC——下止点	
c_T ——声速	m/s
b_e ——有效燃油消耗率	$g/(kW \cdot h)$
BSU——滤纸烟度	
c_1 ——喷嘴出口速度	m/s
压气机进口速度	m/s
c_2 ——涡轮出口速度	m/s
压气机出口速度	m/s
c_p ——比定压热容	$kJ/(kg \cdot K)$
c_v ——比定容热容	$kJ/(kg \cdot K)$
D ——气缸直径	m
$dx/d\phi$ ——燃烧率	
$dQ/d\phi$ ——放热率	
E_c ——排气门前气体的可用能量	kJ
E_T ——涡轮进口气体的可用能量	kJ
f_c ——喷嘴环出口面积	m^2
f_p ——排气管通流面积	m^2
f_T ——涡轮通流面积	m^2
f_{v_c} ——排气门开启瞬时面积	m^2
Hu——燃料低热值	kJ/kg
i ——气缸数	
l_0 ——化学计量比	kg/kg
L_0 ——化学计量比	$kmol/kg$
n ——发动机转速	r/min
n_b ——增压器转速	r/min
n_1 ——压缩多变指数	
n_2 ——膨胀多变指数	
p_a ——大气压力	kPa
p_b ——增压压力	kPa, MPa

(续)

物理量代号及名称	单 位
p_c ——压缩终点压力	kPa, MPa
p_{me} ——平均有效压力	kPa
p_{max} ——最高燃烧压力	MPa
p_{mi} ——平均指示压力	MPa
p_{inj} ——喷油压力	MPa
q_{mb} , q_{vb} ——进气流量	kg/s, m ³ /s
q_{mT} , q_{vT} ——涡轮流量	kg/s, m ³ /s
R ——气体常数	kJ/(kg·K)
T_a , t_a ——大气温度	K, °C
T_b , t_b ——压气机出口温度	K, °C
TDC——上止点	
T_r , t_r ——气缸出口排气温度	K, °C
T_T , t_T ——涡轮进口排气温度	K, °C
T_{iq} ——转矩	N·m
v_m ——活塞平均速度	m/s
V_s ——气缸工作容积	m ³
W_{adb} ——定熵压缩功	kJ/kg
W_{adH} ——高压级压气机定熵压缩功	kJ/kg
W_{adL} ——低压级压气机定熵压缩功	kJ/kg
W_H ——高压级压气机实际压缩功	kJ/kg
W_L ——低压级压气机实际压缩功	kJ/kg
x ——燃烧百分率	
α ——空燃比	
ϵ ——压缩比	
κ ——空气等熵指数	
κ_T ——燃气等熵指数	
η_{adb} ——压气机定熵效率	
η_{adT} ——涡轮定熵效率	
η_{et} ——有效热效率	
η_E ——排气能量传递效率	
η_{it} ——指示热效率	

(续)

物理量代号及名称	单 位
η_{tb} ——涡轮增压器总效率	
θ_{ij} ——喷油提前角	(°) CA
θ_j ——进气门有效开启角	(°) CA
λ_b ——增压度	
π_b ——增压比	
π_T ——膨胀比	
π_{0*} ——滞止压比	
ρ_a ——大气密度	kg/m ³
ρ_b ——增压空气密度, 发动机进气管的空气密度	kg/m ³
δ_b ——中冷度	
τ ——冲程数	
τ_i ——滞燃期	ms
φ ——曲轴转角	(°) CA
凸轮转角	(°) CaA
ϕ_a ——过量空气系数	
ϕ_{as} ——总过量空气系数	
ϕ_c ——充量系数	
ϕ_r ——残余排气系数	
ϕ_s ——扫气系数	
ϕ_z ——喷油持续角	(°) CA
Ω ——反动度	

目 录

序

前言

主要符号表

第 1 章	绪论	1
1.1	涡轮增压基本概念	1
1.2	涡轮增压技术的发展与现状	10
第 2 章	涡轮增压器和中冷器	34
2.1	离心式压气机	34
2.2	涡轮	50
2.3	涡轮增压器	67
2.4	中冷器	81
第 3 章	排气能量的利用	92
3.1	排气可用能量及其利用方式	92
3.2	影响脉冲能量利用的因素	98
3.3	脉冲增压排气管方案设计	101
3.4	脉冲转换器和 MSEM 系统	104
第 4 章	增压系统基本热力参数的确定	109
4.1	增压系统主要热力参数的内在联系	109
4.2	增压对柴油机工作过程主要参数的影响	110
4.3	增压系统主要热力参数的确定	114
第 5 章	柴油机与涡轮增压器的匹配	122
5.1	增压特性匹配及联合运行线的调节	122
5.2	增压柴油机的热负荷及解决途径	127
5.3	增压柴油机的机械负荷及解决途径	133
5.4	改善增压柴油机低工况及瞬态特性的途径	137
第 6 章	涡轮增压系统	162

6.1	增压系统的发展	162
6.2	实现高增压的增压系统	164
6.3	改善低工况性能的增压系统	174
6.4	汽油机增压系统	188
6.5	气体燃料发动机增压系统	198
第7章	增压柴油机热力过程模拟计算	201
7.1	概述	201
7.2	工质成分、比热容、等熵指数、相对分子质量 及气体常数	206
7.3	缸内热力过程计算	208
7.4	排气管内的热力过程计算	220
7.5	涡轮增压器与中冷器的计算	224
7.6	常微分方程的数值解法	231
7.7	增压柴油机综合参数计算	232
	参考文献	236

第 1 章 绪 论

1.1 涡轮增压基本概念

1.1.1 涡轮增压是内燃机发展的一个飞跃

一台性能优良的内燃机，其主要表现为比功率大，比质量小，燃油消耗率低，排放污染小，工作可靠，使用寿命长，操作方便。由内燃机工作过程研究可知，影响内燃机功率大小的因素很多，可表达为

$$P_e \propto i V_s H_u \frac{1}{l_0} \frac{1}{\tau} \phi_c \eta_{it} \frac{1}{\alpha} \eta_m n \rho_b \quad (1-1)$$

式中， P_e 为有效功率； i 为气缸数； V_s 为气缸工作容积； H_u 为燃料低热值； l_0 为化学计量比，即燃烧 1kg 燃料所需的理论空气量； τ 为冲程数，四冲程 $\tau=4$ ，二冲程 $\tau=2$ ； ϕ_c 为充量系数； η_{it} 为指示热效率； α 为空燃比； η_m 为机械效率； n 为发动机转速； ρ_b 为发动机进气管的空气密度。

由式 (1-1) 可知，提高内燃机功率主要有下列途径。

(1) 在结构方面 适当增大气缸直径和活塞行程，增加气缸数。

(2) 在工作过程方面 采用二冲程工作过程，提高充量系数，改善燃烧过程，提高指示热效率，优化空燃比。

(3) 在提高机械效率方面 减少摩擦副的摩擦损失，合理设计风扇、水泵、机油泵、电动机等辅助系统。

(4) 在运行方面 适当提高发动机转速，等等。

自从内燃机问世 100 多年以来，内燃机工作者进行了大量卓有成效的研究工作，密集了高科技的成果，取得了令人满意的进展。然而，上述诸因素中，有的互相促进，有的却互相制约。例

如, 过分增大缸径、行程, 增加气缸数, 会使内燃机结构变得庞大、复杂、笨重, 给加工、安装、使用及维修都带来不便; 采用二冲程, 则因降低换气质量而影响热效率的提高; 过高的转速, 不仅给改善工作过程带来困难, 增加摩擦损失, 而且运动件由此产生较大的惯性力, 使发动机的工作可靠性、使用寿命受到影响。唯独用涡轮增压来提高进气充量密度, 不仅可以几成, 甚至几倍增加功率, 同时还可以改善热效率, 提高经济性, 减少排气中的有害成分, 降低噪声。由此可见, 涡轮增压是内燃机发展的一个飞跃。工业先进国家已经把涡轮增压机型作为柴油机的基本型。

1.1.2 增压术语

1.1.2.1 增压压力

压气机出口压力称为增压压力, 用 p_b 表示。它与压气机结构、尺寸、转速及效率等因素有关。通常 $p_b \leq 0.17\text{MPa}$ 的增压称为低增压, $0.17\text{MPa} < p_b \leq 0.25\text{MPa}$ 的增压称为中增压, $0.25\text{MPa} < p_b \leq 0.35\text{MPa}$ 的增压称为高增压, $p_b > 0.35\text{MPa}$ 的增压称为超高增压。

1.1.2.2 增压比

压气机出口压力 p_b 与进口压力 p_a 之比称为增压比, 用 π_b 表示, 即

$$\pi_b = p_b / p_a \quad (1-2)$$

用滞止压力表示的压比称为滞止压比, 即

$$\pi_b^* = p_b^* / p_a^* \quad (1-3)$$

式中, p_a^* 、 p_b^* 为增压前后的滞止压力。

用静压力表示的称为静压比。

1.1.2.3 增压度

内燃机增压后的标定功率与增压前的标定功率之差值与增压前标定功率的比值称为增压度, 用 λ_b 表示, 即

$$\lambda_b = (P_{eb} - P_e) / P_e \quad (1-4)$$

式中, P_e 、 P_{eb} 为增压前、后内燃机的标定功率。

当增压前后发动机工作容积不变时, 亦可用升功率提高程度

来表示, 即

$$\lambda_b = (P_{Lb} - P_L) / P_L \quad (1-5)$$

式中, P_L 、 P_{Lb} 为增压前、后内燃机的升功率。

因为内燃机平均有效压力是单位气缸工作容积所发出的有效功, 所以当增压前后内燃机转速及工作容积不变时, 亦可用平均有效压力的提高程度来表示, 即

$$\lambda_b = (p_{meb} - p_{me}) / p_{me} \quad (1-6)$$

式中, p_{me} 、 p_{meb} 分别为增压前后的平均有效压力。

1.1.2.4 增压中冷

在增压柴油机中, 为降低进入气缸的空气温度, 增加空气密度, 减少排放, 使增压后的空气先在中间冷却器中冷却后, 再进入气缸, 这就称为增压中冷。为了反映中间冷却程度, 通常用中冷度来表示。定义中冷器前后空气温度差与中冷器前空气温度的比值为中冷度, 用 δ_b 表示, 即

$$\delta_b = (t_b - t'_b) / t_b \quad (1-7)$$

式中, t_b 、 t'_b 为中冷器前、后的空气温度。

1.1.3 增压方式

增加发动机进气密度的方法较多, 主要有以下几种。

1.1.3.1 机械增压

所谓机械增压, 是指压气机由内燃机曲轴通过传动装置直接驱动的增压方式。机械增压装置如图 1-1 所示。压气机可用离心式、罗茨式及刮片式等结构, 目前较多采用的是螺杆式、罗茨式和汪克尔式等型式。机械增压的特点是: 不增加发动机背压, 但消耗其有效功率, 总体布置有一定局限性。增压压力一般不超过 0.15~0.17MPa。过多地提

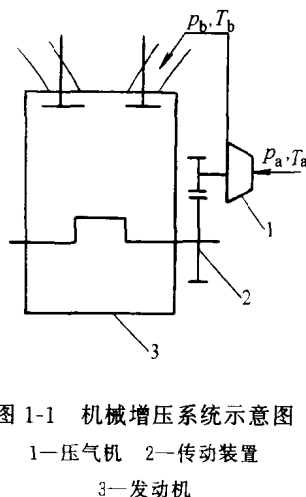


图 1-1 机械增压系统示意图

1—压气机 2—传动装置

3—发动机

高增压压力，会使驱动压气机耗功过大，机械效率明显下降，经济性恶化。

1.1.3.2 排气涡轮增压

所谓排气涡轮增压，是指利用排气能量使排气在涡轮中进一步膨胀做功，用于驱动压气机的增压方式。排气涡轮增压系统如图 1-2 所示。排气涡轮增压的特点是：不消耗发动机有效功，增压器可以自由布置在所需的位置，涡轮有一定的消声作用，并进一步减少排气中的有害成分。

排气涡轮增压分单级涡轮增压和二级涡轮增压两类。

1. 单级涡轮增压

由一台涡轮机和一台压气机组成的或几台涡轮增压器并联的涡轮增压叫单级涡轮增压，多用于中、小型柴油机。小型柴油机、汽油机一般用径流式涡轮、离心式压气机；大、中型柴油机一般用轴流式或径流式涡轮和离心式压气机。根据排气压力的能量利用程度，又有定压增压和脉冲增压等增压方式。

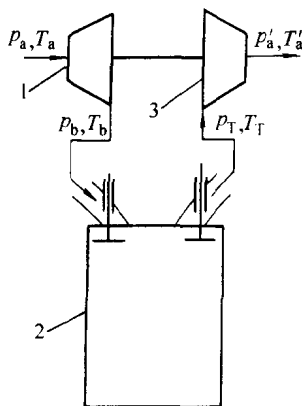


图 1-2 排气涡轮增压系统示意图

1—压气机 2—发动机 3—涡轮

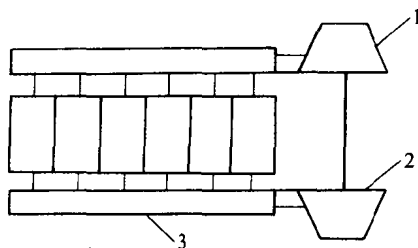


图 1-3 定压增压系统示意图

1—压气机 2—涡轮 3—排气管

(1) 定压增压 所谓定压增压，是指各缸排气汇入一根较粗的排气管，再进入涡轮的增压方式。如图 1-3 所示，定压增压系统