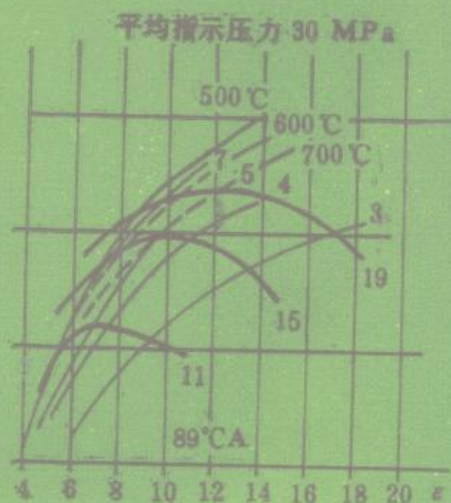


TONGJIDAXUE
CHUBANSHE

内燃机 增压技术

● 宋守信 编著

同济大学出版社



875265

875265

内燃机增压技术

宋守信 编著



同济大学出版社

(沪)新登字 204 号

DU70/05
内 容 提 要

本书以阐述内燃机增压技术的基本知识为主,循序渐进,从内燃机增压技术的一般问题、各类高增压柴油机的增压系统到车用柴油机增压的特点和措施,以及二冲程柴油机纯废气涡轮增压的问题和汽油机增压的特点等,全面地介绍了内燃机的增压技术。

本书主要适用于内燃机专业本科生教材,对内燃机专业研究生和广大从事于内燃机工业的工程技术人员也是一本有用的参考书。

责任编辑 莫惠林 方 芳

封面设计 王肖生

内燃机增压技术

宋守信 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1232 号)

新华书店上海发行所发行

常熟文化印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 9 字数: 210 千字

1993 年 9 月第 1 版 1993 年 9 月第 1 次印刷

印数: 1—1500 定价: 4.45 元

ISBN7-5608-1228-7/T·5

前 言

在内燃机发展的早期,对内燃机的进气充量增压已经有了实际应用,当时主要是针对航空用汽油机高空空气稀薄的问题。自内燃机退出航空动力机领域之后,虽然在陆用、船用的二冲程内燃机中一般都有罗茨式或离心式扫气泵,并仍在广泛应用,但由于其增压压力很低,又是由内燃机曲轴传动的机械增压,因此并未得到进一步的发展。

1915年,瑞士工程师波许(Alfred Büchi)博士首先提出利用内燃机废气(排气)能量进行废气涡轮增压柴油机的新概念,这是一项对内燃机发展具有深远意义的大事。特别是二次世界大战以来,由于要求体积小、单机功率大的机车用和船用柴油机日益需要,以及重型货车和工程机械动力所需要的功率在不断地增大,使内燃机的废气涡轮增压技术有了突飞猛进的发展。由于废气涡轮增压内燃机在单位功率的重量、燃油消耗率、噪声、排放及高原性能诸方面均优于非增压内燃机,因此现代高性能柴油机凡功率超过75 kW的均已采用涡轮增压技术。国内也从50年代开始发展增压技术,并有了长足的进步。所以内燃机增压技术的基本知识已成为内燃机专业本科生所必须掌握的知识。

作者长期从事内燃机专业教学工作,1983年,为了开设《内燃机增压技术》课程而收集了大量资料编写了《内燃机增压技术》讲义在校内试用,1987年又修订重印了该讲义,现再补充和修订后由同济大学出版社出版。

本书主要是用于内燃机专业方面的基础教材,故以阐述内燃机增压技术的基本知识为主,给该专业方面的学生有较广的

知识面,而进一步深化可由这方面的专著去完成。

本书的第一、二、三章是叙述内燃机增压技术的一般问题,废气涡轮增压内燃机的理论循环和增压的两种基本形式、废气能量的利用、增压对内燃机参数的影响、柴油机和涡轮增压器的匹配。由于增压技术的发展,内燃机的平均有效压力 p_e 在不断提高,尤其是船用中速柴油机 p_e 已超过 3.0 MPa,为了解决高增压所带来的机械负荷和热负荷高的困难,目前在高增压柴油机中已发展了各式各样的增压系统,在第四、五章对此作了简明的介绍。车用增压柴油机有其独特的优点,而且也是柴油机进入轿车领域的重要手段,第六章专门介绍了车用柴油机增压的特点和措施。第七章说明了二冲程柴油机纯废气涡轮增压的问题及计算方法。汽油机增压由于爆震和过高的排气温度的困扰长期得不到应用。随着电子技术的发展,尤其是带有爆震传感器的电子控制点火定时技术的发展,使增压有可能进入汽油机领域,为此在第八章中介绍了汽油机增压的特点。

本书主要适用于内燃机专业本科生教材,对内燃机专业研究生和广大从事于内燃机工业的工程技术人员也是一本有用的参考书。

本书在编写过程中较多地引用了由蒋德明教授主编的《内燃机原理》(农机版)第十三章的资料,也引用了国内外不少文献资料,作者在此谨向蒋德明教授和国内外其他学者们表示感谢。

由于作者长期在学校工作,才疏学浅,孤陋寡闻,本书的疏漏和错误当不在少数。诚恳地谨请读者和同行专家多多赐教,以便日后修订时改正错误,逐渐完善起来。

作 者

1992.12.

主要符号的意义和单位

符 号	意 义	单 位
A	排气门流通面积	m^2
A	气体无因次音速	
A_0	无因次等熵膨胀至参考压力 p_0 时的音速	
C	气流流速	m/s
C_m	活塞平均速度	m/s
C_p	定压比热	$J/kg \cdot K$
C_v	定容比热	$J/kg \cdot K$
D	内燃机气缸直径	mm
E	气体的能量	kJ
G_f	燃油流量	kg/s
G_n	增压空气流量	kg/s
G_s	空气流量	kg/s
G_T	排气流量	kg/s
H	焓降	kJ
H_u	燃料的低热值	kJ/kg_f
L	参考长度	m
M_0	内燃机的扭矩	$N \cdot m$
N_0	内燃机的有效功率	kW
N_i	内燃机的指示功率	kW
N_n	增压器功率	kW
N_l	内燃机的升功率	kW/l
N_T	涡轮机功率	kW

Q_w	传热量	kJ
R	空气的气体常数	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
R'	燃气的气体常数	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
S	内燃机的冲程	mm
S	气体的熵	kJ/K
T	气体的绝对温度	K
U	气体的内能	kJ
U	气体的无因次流速	m/s
V	容积	l, m^3
V_o	余隙容积	l
V_h	内燃机气缸排量	l
X	无因次长度	
Z	无因次时间	
a	音速	m/s
α_o	等熵膨胀至参考压力 p_o 时的 音速	m/s
@	参考音速	m/s
d	水力直径	m
g_o	内燃机的比油耗	$\text{g/kW} \cdot \text{h}$
i	比焓	kJ/kg
i	内燃机的气缸数	
k	空气的比热比	
k'	燃气的比热比	
l	管子的长度	m
l_o	1 kg 燃料完全燃烧所需的理 论空气量	kg_o/kg_f
n	内燃机的转速	r/min

n_h	增压器转速	r/min
n_T	涡轮转速	r/min
p	气体压力	MPa
q	单位面积的传热量	kJ/m ²
s	比熵	kJ/kg·K
t	时间	s
t	温度	°C
u	比内能	kJ/kg
u	气体的流速	m/s
v	比容	m ³ /kg
Γ	空气消耗率	kg/kW·h
α	内燃机的过量空气系数	
α_z	内燃机总的过量空气系数	
β	黎曼变量	
ε	内燃机的压缩比	
η	效率	
η_m	机械效率	
η_{Tm}	涡轮增压器的机械效率	
η_v	充量效率	
θ	喷油(点火)提前角	°CA
λ	黎曼变量	
μ	流量系数	
ρ	气体的密度	kg/m ³
τ	内燃机的冲程数	
φ	内燃机曲轴转角	°CA
φ_h	过量扫气系数或给气比	
φ_s	扫气系数	

下角标

P	排气管的
T	涡轮机或涡轮前的
a	气缸压缩开始点
ad	等熵的
b	气缸排气开始点
c	气缸压缩终点
e	内燃机的有效指标
f	燃料的
i	内燃机的指示指标
k	增压空气的或增压器的
m	平均值
max	最大值
min	最小值
o	滞止状态或标准大气状态
r	排气状态
red	当量的或折合的
s	进气管状态或扫气的
th	理论的
z	气缸的或燃烧的

目 录

前言	
第一章 内燃机增压的热力过程	1
§ 1-1 概述	1
§ 1-2 四冲程增压内燃机的理论循环及排气可用能	5
§ 1-3 废气涡轮增压的两种基本形式	8
§ 1-4 变压系统中影响废气能量利用的主要因素	14
§ 1-5 恒压系统中涡轮增压器主要参数的决定	26
§ 1-6 决定变压系统中涡轮设计参数的方法	33
§ 1-7 废气涡轮增压柴油机的特点	43
第二章 增压对内燃机参数的影响	52
§ 2-1 对内燃机的功率和经济性的影响	52
§ 2-2 内燃机的耗气量 Γ 和增压压力 p_n	58
§ 2-3 排气管废气平均温度的计算	61
§ 2-4 涡轮增压柴油机的加速性能和扭矩特性	64
§ 2-5 涡轮增压对柴油机废气污染的影响	69
§ 2-6 涡轮增压对机械负荷和热负荷的影响	70
§ 2-7 增压空气的冷却效果	77
§ 2-8 大气状态的影响	84
第三章 柴油机与涡轮增压器的匹配计算	87
§ 3-1 废气涡轮增压器和四冲程柴油机的特性 配合	87

§ 3-2 变压系统中废气涡轮增压器平衡运行点的图解法	94
§ 3-3 柴油机与涡轮增压器的匹配计算	102
第四章 脉冲转换器	120
§ 4-1 脉冲转换器的工作原理	120
§ 4-2 脉冲转换器的构形	128
§ 4-3 脉冲转换器的变工况性能	130
§ 4-4 脉冲转换器主要尺寸的确定	132
§ 4-5 多脉冲系统原理	133
§ 4-6 MPC增压系统	135
§ 4-7 涡轮增压系统的选择和比较	138
第五章 高增压柴油机的增压系统	141
§ 5-1 二级增压	143
§ 5-2 低压压缩比高增压柴油机	148
§ 5-3 采用辅助喷射降低爆发压力的高增压柴油机	155
§ 5-4 补燃超压比增压系统	161
§ 5-5 可变压缩比高增压柴油机	172
§ 5-6 米勒高增压系统	186
§ 5-7 气缸充量转换系统和相继涡轮增压系统	195
第六章 车用柴油机废气涡轮增压	205
§ 6-1 车用柴油机对增压系统的要求	207
§ 6-2 涡轮增压柴油机的扭矩特性及其改善措施	210
§ 6-3 采用复合增压来提高扭矩特性	215
§ 6-4 气波增压器	220
第七章 二冲程柴油机废气涡轮增压	229
§ 7-1 二冲程柴油机采用纯废气涡轮增压的困难	229

§7-2 纯废气涡轮增压直流换气二冲程柴油机的换气计算	235
§7-3 在标定工况下纯废气涡轮增压系统的计算	242
第八章 汽油机废气涡轮增压	248
§8-1 汽油机涡轮增压的特点	248
§8-2 化油器式汽油机的废气涡轮增压方案	251
§8-3 车用涡轮增压汽油机参数匹配特点	255
§8-4 增压汽油机的改装问题	262
§8-5 汽油机增压的发展前景	269
参考文献	274

第一章 内燃机增压的 热力过程

§ 1-1 概 述

在内燃机原理中已经叙述, 内燃机的升功率为

$$N_i = \frac{1}{9 \times 10^4} \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \cdot \frac{H_u}{l_0} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \eta_r \cdot \eta_m \cdot \rho_s \cdot n \quad (1-1)$$

式中 N_i ——内燃机升功率, kW/l;

η_i ——内燃机指示效率;

α ——过量空气系数;

H_u ——燃料的低热值, kJ/kg 燃料

l_0 ——1kg 燃料完全燃烧所需的理论空气量, kg/kg f

τ ——内燃机冲程数;

η_r ——内燃机充量效率;

η_m ——内燃机机械效率;

ρ_s ——内燃机进气管中充量密度, kg/m³;

n ——内燃机转速, r/min。

可以得出结论: 提高内燃机升功率的最有效措施是提高 ρ_s 值, 即采用增压技术。

增压按其定义是在增压器中压缩进入内燃机进气管前的充量, 增加进气管中充量的密度 ρ_s , 使得进入气缸的实际进气量比

自然吸气内燃机的进气量多，来达到增加内燃机功率的目的。装有增压器的内燃机称增压内燃机。在增压内燃机中充量将受两次压缩，一次在进入气缸前的增压器中，一次在气缸中。由于增压器要对充量做功，因此必需有外能源提供给增压器。

按照增压器所需能量来源的不同，一般可分为机械驱动式增压（即机械增压）和废气涡轮增压两类。

一、机械增压

机械增压中，增压器是由内燃机曲轴直接驱动（图 1-1 所示），充量在增压器中第一次压缩所需能量直接由内燃机的指示功中提供，因此将使内燃机的机械效率 η_m 降低。驱动方式可以用齿轮、链轮或其他方式与内燃机曲轴相连接。增压器可采用叶片式的离心式（图 1-1）和轴流式，或采用容积式的滑片泵（图 1-2）、罗茨泵（图 1-3）和螺杆泵。目前采用得较多的是离

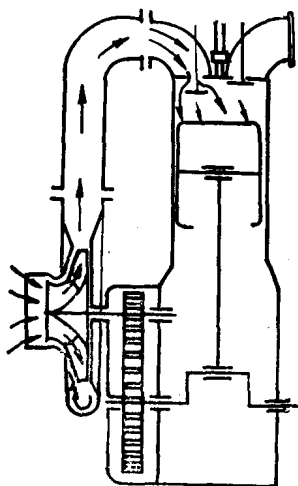


图 1-1 机械驱动式增压系统简图

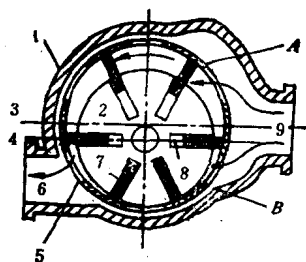


图 1-2 滑片转子式增压器

1—外壳；2—转子；3—外壳中心线；
4—转子中心线；5—转筒；6—出口；
7—叶片；8—转子上的径向槽；9—进口

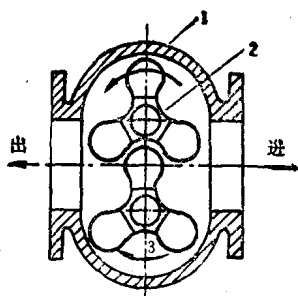


图 1-3 罗茨增压器结构简图
1—壳体；2—转子；3—室

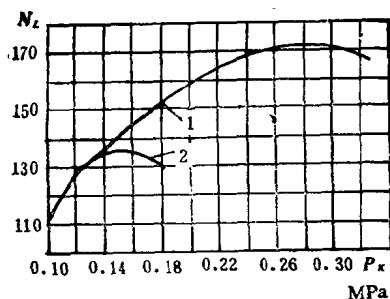


图 1-4 增压压力 p_k 对柴油机升功率 N_i 的影响

心泵和罗茨泵两种。

这两种增压器各有特点。

图 1-4 表示机械增压柴油机的升功率 N_i 与增压压力 p_k 之间的关系。曲线 2 为罗茨泵，当 p_k 达到 0.15~0.155 MPa 之后升功率 N_i 就开始下降。这是由于 p_k 达到此值后内燃机的机械效率 η_m 已显著下降，以及这时罗茨泵后的充量温度增加过于迅速，而使温度对充量密度的影响超过 p_k 的影响，反而使密度下降所致；而且不能仅考虑 N_i ，尚需考虑内燃机的经济性。许多研究工作指出：对于罗茨泵选择 p_k 在 0.114~0.135 MPa 范围内具有最大的经济性。曲线 1 是离心式增压器，在 p_k 达到 0.28 MPa 前内燃机的升功率 N_i 一直在增加。这反映离心泵可以实现较大流量，适宜用于大型内燃机。

再从采用这两种增压器内燃机的工作特点来分析。

图 1-5 表示内燃机相对扭矩与相对转速的关系，其中 M_0 为内燃机最低稳定转速时全

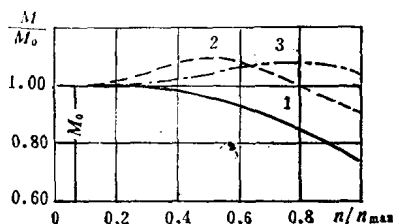


图 1-5 发动机相对扭矩与相对转速的关系

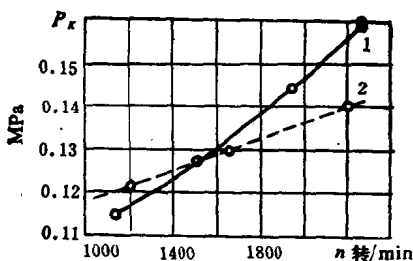


图 1-6 增压压力 p_k 与发动机转速的关系

负荷下的扭矩, $n_{\max}$ 为最高转速。曲线 1 为非增压内燃机的扭矩变化, 曲线 2 为罗茨泵, 曲线 3 为离心泵。高速时离心泵有较大的扭矩, 而在中、低速时罗茨泵的扭矩要大于离心泵。这是由增压压力 p_k 随转速 n 的变化

特性(图 1-6)所决定的, 在图 1-6 中曲线 1 是离心泵, 曲线 2 为罗茨泵。从图中可看到在低速时罗茨泵的 p_k 值较大, 这也保证了罗茨泵的起动性能优于离心泵。

因此, 机械式增压器作为二冲程内燃机的扫气泵, 对于小型车用内燃机考虑到适应性系数及起动性能一般都选用罗茨泵。而中、大型二冲程柴油机, 从所需较大流量及 p_k 考虑, 一般选用离心泵。

二、废气涡轮增压

废气涡轮增压是最有效的增压方式。从内燃机排出的废气具有一定的压

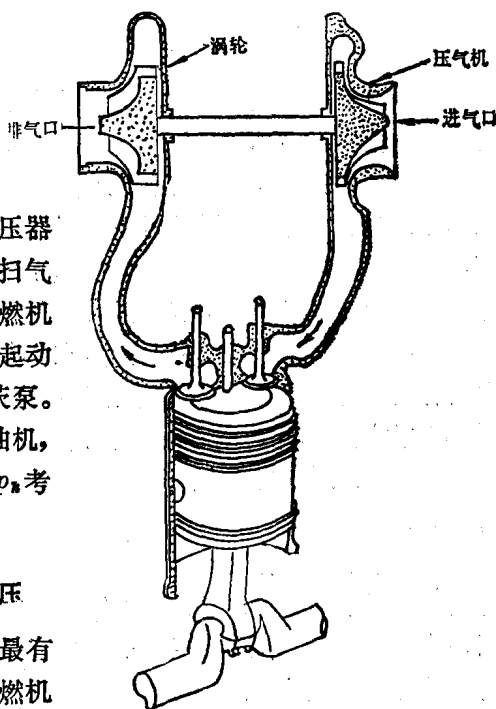


图 1-7 涡轮增压器的工作原理

力和较高的温度,即具有较大的热焓,可在涡轮中膨胀作功。将涡轮的输出功用来驱动增压器,然后增压器将以大气中吸入的充量压缩到压力 p_n , 输入内燃机。增压器与内燃机本身无任何机械连接,增压器所需能量来自排气,对内燃机指示功影响甚小。这种情况涡轮与增压器往往装在一个壳体中,称之为“涡轮增压器”,如图 1-7 所示。

目前内燃机增压都是指采用废气涡轮增压器而言。在涡轮增压器中,无论涡轮还是压气机均采用叶片机。

§ 1-2 四冲程增压内燃机的理论循环及排气可用能

内燃机理论循环的所有假设均有效, 并认为: 涡轮机效率 $\eta_T=1$ 、压气机效率 $\eta_k=1$, 涡轮增压器的机械效率 $\eta_{Tkm}=1$, 排气在恒定压力 p_T 的情况下流入涡轮。考虑到增压内燃机具有

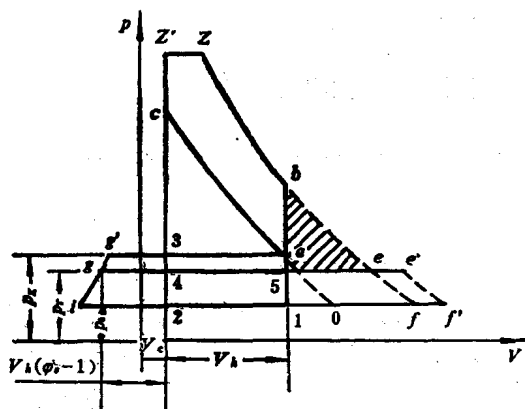


图 1-8 恒压涡轮增压四冲程柴油机的理论示功图