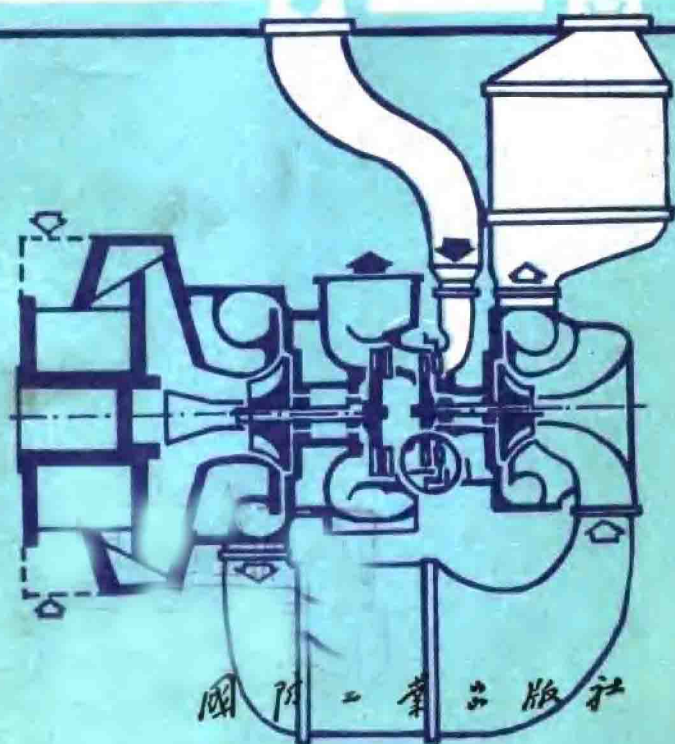


内燃机增压与匹配

—理论、计算及实例—

〔西德〕K. 齐纳 著

侯玉堂 禹惠生 译



内 容 简 介

本书原著(德文版)是论述内燃机增压与匹配、全面介绍增压技术的第一部综合性著作。德文版发行后,在国际上深获好评,并有英、日、俄等文本出版,中译本系根据1978年英译本参照德文原著译出。

书中对增压简史、内燃机流通特性、涡轮增压器工作性能、涡轮增压器与内燃机的匹配、各种增压系统的工作原理等作了深入浅出的阐述;提供了系统的基础知识;列举了先进实例,说明了增压技术的当前水平。

本书内容新颖,取材精练,着重阐明基本概念,可作为高等学校有关专业的教学参考书,也是有关科技人员的工作指南。

Supercharging of Internal Combustion Engines
—Fundamentals, Calculations, Examples—

Karl Zinner

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1978

*

内燃机增压与匹配

——理论、计算及实例——

〔西德〕K. 齐纳 著

侯玉堂 禹惠生 译

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张9³/₁₆ 231千字

1982年7月第一版 1982年7月第一次印刷 印数: 0,001—3,600册

统一书号: 15034·2153 定价: 1.15元

中译本译者的话

《内燃机增压与匹配》原著作者是西德的卡尔·齐纳(Karl Zinner)教授,他毕生从事内燃机研究发展的实际工作,造诣精湛,久负盛名。该书从1975年出版以来,深受读者欢迎,公认它是系统地论述增压技术的第一部著作,其后被译成英、日、俄等文字,在国外颇有影响,现根据1978年版英译本参照德文原著译成中文。

涡轮增压开创了内燃机发展的新路,近一、二十年来,增压技术突飞猛进,在提高内燃机性能方面取得了卓越的成果。涡轮增压的要领在于充分利用内燃机的排气能量以及合理协调内燃机与涡轮增压器的配合。就工质的流动模式来说,内燃机与涡轮增压器截然不同,前者是间断脉动的,后者则是连续稳定的,长期以来,两者分属不同的学科,各自独立发展。由此可见,增压技术是往复机械与涡轮机械互相渗透而形成的边缘科学的一个分支。本书从介绍内燃机增压的基本概念着手,依次阐明各种常用压气机的工作特性,内燃机的流通性能,内燃机与涡轮增压器的协调配合,增压的热力学基础和某些专门问题以及其它各种增压方法等。这些章节,内容新颖,阐述精辟,颇有独到见解,尤其是第六章内燃机与涡轮增压器的配合,其中有关涡轮在脉动气流作用下的性能部分,更能引起有关专业人员的兴趣。最后两章,涡轮增压器的设计特征和增压内燃机的实例,择要介绍了国际上有代表性的先进机型,从中可以看出增压技术的目前概况和今后动向,使本书更具有参考价值。在探讨气缸的换气过程时,本书采用了基于准稳定假设的容积法,忽略了波的传播和反射现象。这种方法的优点是比较简单省事,便于进行多方案的对比计算。缺点是

不能如实反映内燃机中存在的波动过程。近年来,随着电子计算技术的迅速发展而获得推广应用的特征线法,克服了上述缺点。可是本书对这方面的基础知识未予介绍,对此有兴趣的读者可参阅其它书籍,如《涡轮增压-脉冲转换系统的原理和设计》一书。

本书的叙述方式是在进行理论分析之前,先扼要阐明物理概念,得出结论后,再用计算实例说明它的具体应用。书中语言文字,简明易懂,并且配有形象生动的图表,很能启发思路。原书中阐述比较简略的一些问题,在译注中已作了补充说明,对个别错漏之处,也作了补正。由于原著题材广泛,内容丰富,译者深感自己学识浅陋,力不能及,译文中有欠通顺以至错误疏漏之处,恳请读者批评指正。

1976年出版的《内燃机增压》(德文原版)一书曾由蔡杰等同志选译其中六章,并连续刊登在1976~1977年《国外内燃机》杂志上。上述各章的译校者是:第三、五章蔡杰译吴吉湘校,第六、七、八章周继健译蒋德明、倪忠诚、蔡杰校,第十章禹惠生译吴吉湘、蔡杰校,前言蔡杰译吴吉湘校。本书在翻译过程中,曾引用并参考了上述德文译文。

在翻译本书过程中,承上海船用柴油机研究所四室和《国外内燃机》编辑部给予大力支持,译者在此谨表深切谢意。此外,承赵佩芬同志誊写全部译稿,译者也深表谢意。

译 者

英译本序

本书是西德施普林格出版社于1975年出版的“Aufladung von Verbrennungsmotoren (内燃机增压与匹配)”一书的英译本。鉴于德文版受到读者的热烈欢迎，而且在英美书籍中尚无详细论述涡轮增压器与内燃机匹配问题的类似著作，出版社和作者决定出版这册英译本。在英译本中新增加了两节：第六章6.2.6.4节介绍容积法和特征线法计算气缸换气过程的要点，并把计算结果与实测结果进行比较；第八章8.7节说明涡轮增压对柴油机机械负荷和热负荷的影响。

本书的主要对象是应用涡轮增压提高内燃机功率的设计人员和研究人员，以及准备钻研涡轮增压问题的学生。因此，本书在内容上有所偏重，不讨论各种型式涡轮增压器的设计和计算问题，因为已有一些优秀著作对此作了详细的论述，而只讨论涡轮增压器与内燃机的匹配问题以及涡轮增压对内燃机工作性能的影响。

在论述这种复杂的配合问题时，本书力求简明易懂。对于许多问题，不使用电子计算机，是无法进行数值计算的。但是，为了便于阐明一些问题的内在联系，作者认为以暂不涉及电子计算机的计算方法为佳。关于参考文献，只列出与书中内容直接有关或引证书中论点的文献；有关涡轮增压和涡轮增压柴油机的文献，不胜枚举，本书的参考文献目录显然不能包罗无遗。

本书全部采用国际单位制(SI)单位，不附注英制单位。读者一旦熟悉国际单位制单位，就会发现使用这种单位制，可以大大简化计算工作。

本书的译者是英国巴思大学工程系讲师G. 温克勒(G. Winkler)博士。他审稿严谨，用词确切，译文忠实，对他谨致深切

谢意。再者，承D. K. 朗莫尔 (Longmore) 博士等人代校译文，也顺此机会一并致谢。

书中未注明来源的试验结果、计算结果和实物照片，都是承曼恩公司热情提供的。

K. 齐纳

1977 年 10 月于西德奥格斯堡

目 录

符号表	1
引言	4
第一章 定义和各种增压方法概述	9
第二章 增压简史	13
2.1 煤气机和汽油机	13
2.2 柴油机	16
2.3 航空发动机	19
2.4 涡轮增压的开端	20
第三章 压气机与内燃机匹配的基本原理	27
3.1 压气机的功率计算	27
3.2 内燃机的空气消耗量与功率之间的关系	30
3.3 气缸充气量与平均有效压力之间的关系	34
3.4 增压四冲程内燃机的充气效率	37
3.5 扫气空气量的简易算法	42
3.6 换气过程的逐步算法	45
第四章 压气机的型式和特性	52
4.1 引言	52
4.2 容积式压气机	52
4.3 叶轮式压气机	55
第五章 内燃机的流通特性图	63
5.1 二冲程内燃机	63
5.2 四冲程内燃机	65
第六章 涡轮增压器与内燃机的匹配	68
6.1 机械增压	68

6.2	涡轮增压	72
6.2.1	涡轮增压内燃机与机械增压内燃机的运行特性的差别	72
6.2.1.1	四冲程内燃机	72
6.2.1.2	二冲程内燃机	73
6.2.2	涡轮增压器运行点的求法	74
6.2.3	涡轮等效流通面积的计算	79
6.2.4	脉冲增压系统的定量分析法	85
6.2.5	求解单级涡轮运行点的曲线图	93
6.2.6	涡轮增压器与柴油机的匹配计算	95
6.2.6.1	气缸内的工作过程	97
6.2.6.2	排气支管中的流动过程	98
6.2.6.3	容积法的计算结果	101
6.2.6.4	应用容积法和特征线法计算气缸换气过程的结果以及与 试验结果的比较	105
第七章	增压的一些热力学问题	111
7.1	气缸排气温度和排气平均温度	111
7.2	回收从排气始点到环境压力的完全膨胀 功的理论探讨	114
7.2.1	在环境压力下完全膨胀功全部转化为动能	114
7.2.2	将气缸背压提高到排气始点压力	117
7.3	压气机消耗的功率	118
7.3.1	以柴油机平均有效压力的形式表达压气机消耗的功率	118
7.3.2	机械增压与涡轮增压柴油机在燃油消耗率方面的差别	120
7.4	增压空气的冷却效果	122
7.5	涡轮增压作为提高柴油机效率的措施	127
第八章	涡轮增压的一些专门问题	137
8.1	排气管的影响	137
8.1.1	对于不同气缸数和不同发火间隔的排气管布置	137
8.1.2	定压增压系统和脉冲增压系统的优缺点	142
8.1.3	脉冲增压系统的改进型式	145
8.2	柴油机的加速性能	148
8.3	涡轮增压柴油机的扭矩特性	158
8.4	改善涡轮增压柴油机的加速性和扭矩特	

性的各种措施	161
8.5 大气状态的影响	173
8.6 增压对内燃机废气污染的影响	180
8.6.1 柴油机	180
8.6.2 汽油机	182
8.7 增压对柴油机机械负荷和热负荷的影响	184
8.7.1 引言	184
8.7.2 机械负荷	184
8.7.3 热负荷	190
第九章 其它各种增压方法	195
9.1 补给增压	195
9.2 提前排气	197
9.3 涡轮致冷	198
9.3.1 四冲程柴油机的涡轮致冷	198
9.3.2 煤气机的涡轮致冷	203
9.4 低温增压 (米勒增压方式)	206
9.4.1 四冲程柴油机的米勒增压方式	208
9.4.2 煤气机的米勒增压方式	210
9.5 两级涡轮增压	213
9.6 气波增压	214
9.7 补燃增压	219
第十章 涡轮增压器的设计特征	222
10.1 转子设计	222
10.1.1 级数	222
10.1.2 转子的型式	223
10.1.3 压气叶轮的材料和制造	224
10.1.4 涡轮转子的材料和制造	225
10.2 轴承的布置	227
10.3 轴承的型式和润滑	230
10.4 轴向推力的平衡	232
第十一章 增压内燃机的实例	235

X

11.1 车用内燃机	235
11.1.1 汽油机	235
11.1.2 柴油机	239
11.2 机车柴油机和船用柴油机	246
11.3 船用和发电用的中速柴油机	251
11.4 二冲程大型柴油机	256
11.4.1 二冲程柴油机增压的一些特殊问题	256
11.4.2 典型的增压二冲程柴油机	258
11.5 复合式发动机和燃气发生器	264
(原书第11.6节删去未译)	
参考文献	270
附录	281

符 号 表

拉丁字母

$a, \dot{a}$	公斤(千克); 公斤/秒	空气质量; 空气流量
A	米 ²	活塞面积; 面积
A_E, A_I 等	米; 厘米 ²	排气阀(口)或进气阀(口)气道的几何面积。 A 有其它下角注时, 依“下角注”
c	米/秒	绝对速度
c_p	焦耳/(公斤·K)	等压比热
c_m	米/秒	活塞平均速度
D	米	叶轮直径
EO		排气阀开启
EC		排气阀关闭
f	克/(千瓦·时)	燃油消耗率
H, h	焦耳; 焦耳/公斤	焓
i		一个循环的转数
IO		进气阀开启
IC		进气阀关闭
$m, \dot{m}$	公斤(千克); 公斤/秒	质量; 质量流量
n		多变指数
N	转/秒; 转/分	转速
p	牛顿/米 ² ; 帕; 巴	压力
P	瓦; 千瓦	功率
Q	焦耳; 千焦耳	热能

Q_c	焦耳/公斤	低热值
r		压缩比
r/l		曲柄连杆比
R	焦耳/(公斤·K)	气体常数
s	米	活塞行程
t	秒	时间
t	°C	温度
T	K	绝对温度
u	米/秒	切向速度
$V, \dot{V}$	米 ³ ; 米 ³ /秒	容积; 容积流量
V_s	米 ³	行程容积 (气缸)
V_o	米 ³	间隙容积
w	米/秒	相对速度
W	焦耳	功
z		气缸数
z		叶片数
希腊字母		
α	°(度)	气流角度
α		脉冲流量系数
β	°(度)	叶片角
β		脉冲能量系数
γ		绝热指数
ε		充气效率
η		效率
λ		过量空气系数
μ		截面收缩系数
π		压比
ρ	公斤/米 ³	密度
τ	牛顿·米	扭矩

ϕ	$^{\circ}$ (度)	曲轴转角
ω	弧度/秒; $^{\circ}$ (度)/秒	角速度

下角字

0	大气状态
1	压气机前
2	压气机后
3	涡轮前
4	涡轮后
<i>ad</i>	绝热的
<i>A</i>	空气
<i>c</i>	气缸; 循环
<i>C</i>	压气机
<i>e</i>	有效的
<i>eq</i>	等效的
<i>E</i>	排气; 排气管
<i>f</i>	燃料
<i>G</i>	气体
<i>i</i>	指示的
<i>id</i>	理想的
<i>I</i>	进气; 进气管
<i>N</i>	喷嘴
<i>R</i>	转子
<i>sc</i>	扫气
<i>st</i>	理想燃烧
<i>T</i>	涡轮
<i>th</i>	理论的
<i>tot</i>	总的
<i>tr</i>	留在气缸内的
<i>tr</i>	三角形

引 言

出版一本关于内燃机的新书,例如本书“内燃机增压与匹配”,理应首先扼要说明一下内燃机在所有发动机中所占的地位,以澄清读者心中的疑问:这本新书所论述的内容,在最近一段时期内,是否是值得关注的重要问题。

1973年10月阿拉伯石油输出国提高石油价格后,人们比以往更清楚地认识到石油不是用之不竭的燃料了。而且,为了保护环境,各国订立了一系列防止公害的法令,致使内燃机的竞争能力受到严峻考验。如果因此而预言内燃机不久将被淘汰,则未免为时过早,因为内燃机毕竟售价低廉,营运经济,而且用途广泛,适应性强。

目前受人重视的内燃机研究课题,已在学术讲演和科技书刊中陆续有所介绍^[0-1]。因此,本篇只限于简略介绍内燃机的重要性,尤其是增压的重要性,以及内燃机在所有发动机中所占的地位。

内燃机的竞争对手是将化学能转换为机械功的其它发动机,即

1. 汽轮机;
2. 往复式蒸汽机——由于蒸汽机车已被电力机车和内燃机车大量取代,蒸汽机正处于没落地位。可是目前,为了保护环境,人们又在考虑使用蒸汽机作为车辆的动力;
3. 燃气轮机;
4. 斯特林发动机(也称热气机)——这是一种往复式或旋转活塞式外燃机;
5. 将化学能直接转换为电能的换能器,特别是燃料电池。可

是，这种换能器的研制还未进展到可以在工业中实际应用的阶段。

各种发动机的合理比较方法，是根据不同用途分别进行讨论。要预测 50 年以后的情况是困难的，但是展望 20~25 年的前景，多少还是有些把握。

1. 飞机

在第二次世界大战结束以前，飞机上一直使用往复式内燃机。目前，只有私人飞机、教练飞机或其它轻型飞机还使用往复式内燃机。至于民航飞机，几乎都改用了喷气式发动机，而军用飞机，则已全部改用喷气式发动机。

在飞机方面，尚未出现新型的特种发动机。

2. 机车

往复式蒸汽机是机车的传统动力，使用了很长时间。现在，绝大多数蒸汽机车已被电力机车或内燃机车所取代。

电力机车所需的电力网，建造费用昂贵，所以只有在交通繁忙的铁路线上使用电力机车才合算，例如在铁路网密集的欧洲，电力机车明显地多于内燃机车。如果铁路线很长，而且人口又稀少，例如北美、南美、苏联和许多发展中国家，以及欧洲运输稀疏的地区，则以使用内燃机车较为经济。

早在四十年代，燃气轮机已经装在机车上进行试验^[0-2, 0-3]，但是至今从未大量使用。近来，有人把燃气轮机和柴油机组成联合动力装置，其中燃气轮机只起加速作用^[0-4]。现在，只有少量高速列车和轻型列车使用燃气轮机^[0-5, 0-6]。

3. 船舶

25 年前，人们认为在商船上燃气轮机可望取代汽轮机，因为燃气轮机的燃烧室比较简单，而汽轮机的锅炉既庞大又在高温高压下工作，容易产生故障。当时，还认为燃气轮机使用的燃油，就是汽轮机锅炉所使用的燃油。这种想法一直未能实现，因为要提高燃气轮机的热效率，必须尽量提高燃气温度，但是燃用重油

时所引起的种种高温技术问题，至今未能圆满解决。在国际市场上，重油的价格只是蒸馏油的 60% 左右，这种差价对商船营运的经济性具有重大影响。有些航运公司曾几次试用过燃气轮机，例如几年前美国的西特雷恩公司 (Seatrain Co.) 在四艘集装箱船上安装了燃气轮机并进行大规模的试验，每艘船的推进功率为 44 兆瓦 (6 万马力)^[0-7]。对商船来说，到目前为止，燃气轮机装置的综合经济性还不能赶上或超过其它推进装置。

军舰的情况就不同了。燃气轮机由于体积小、功率大，很适合作为军舰的推进装置，尤其是用在高速舰艇上。军舰可用蒸馏油，因为军舰不象商船那样计较燃油的费用。

对商船来说，在单机功率小于 20 兆瓦 (2.7 万马力) 的范围内，柴油机占优势。这主要是由于柴油机能够燃烧重油，尤其是低速柴油机和中速柴油机。在单机功率更大的范围内，目前还是汽轮机领先。但是，最近也有一些高速集装箱船安装了柴油机，例如安装 2 台功率为 29.4 兆瓦 (4 万马力) 的柴油机^[0-8]。可以这么说，由于柴油机的燃油消耗率比较低，燃油价格越上涨，柴油机就越受人欢迎。

目前，原子能在商船中还处于试验阶段。

4. 固定电站

对功率超过 100 兆瓦的大型固定电站来说，汽轮机占领先地位。原子能电站也利用汽轮机来发电。

燃气轮机也已占据重要地位，往往用于承担高峰负荷；也有和汽轮机一起使用，组成联合动力装置。

就固定电站来说，只在燃料比较便宜的情况下，例如在输送天然气或石油的泵站中，才考虑选用内燃机。当然，这种说法不适用于附近没有输电网而且发电量仅为几千瓦的小电站。在没有大型输电网的发展中国家，建立地区性的柴油机电站是十分经济的。炼铝厂常常建立自己的柴油机电站^[0-9]。如果政府当局对发电用燃油肯减税，那末即使在欧洲，建立柴油机电站也是合算的，

因它不但可以用于承担高峰负荷，也可以用于承担基本负荷，比利时的根特（Ghent）电站就是一个实例^[0-10,0-11,0-12]。

5. 车辆

在汽车和运货卡车方面，往复式内燃机独占鳌头。尽管燃气轮机已取得了巨大进展，可是把它作为车辆动力，目前还处于试验阶段。燃气轮机和斯特林发动机虽然由于排气污染较少而受人注意，但是它们还未发展到可以正式生产；尤其是斯特林发动机，其运转可靠性尚未达到一般使用要求。一个产品是否受人欢迎，主要取决于它的综合经济性，即它的售价和运行费用（其中包括维修费用）。目前，燃气轮机和斯特林发动机的售价和运行费用远远超过内燃机。就保护环境来说，热电换能器比燃气轮机和斯特林发动机更加优越，预计较远的将来它在车辆动力方面将起重大作用。

综上所述，内燃机非但不会立即淘汰，而且还会长期使用。有待解决的重要问题，是如何减少排气中的有害物质。有效措施之一，就是增压。众所周知，不论是汽油机还是柴油机，用过量空气来降低混合气的浓度或延迟着火时间，都能减少排气中的有害物质，可是这两种方法都带来降低一些功率的后果。采用增压方法，不但能补偿功率损失，甚至还能提高功率。

在结束这篇引言之前，应该指出，柴油机能在宽广的功率范围内以最高效率把燃油的化学能转换为机械功。人们越想节约石油能源，这个优点的重要性就越显著。对于内燃机，目前还有许多发展工作要做。只要有发展工作可做，内燃机就有旺盛的生命力。

本书的论题是涡轮增压，即利用内燃机的排气推动涡轮来进行增压，这是最重要的增压方式。涡轮增压器和往复式内燃机正好相辅相成，因为涡轮增压器最适合于大容积气体在低压下工作，而往复式柴油机又适合于小容积气体在高压下工作。增压这个概念，由来已久，而且早已实现，但是还在不断发展。25年前，二