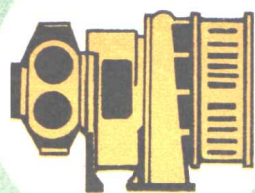
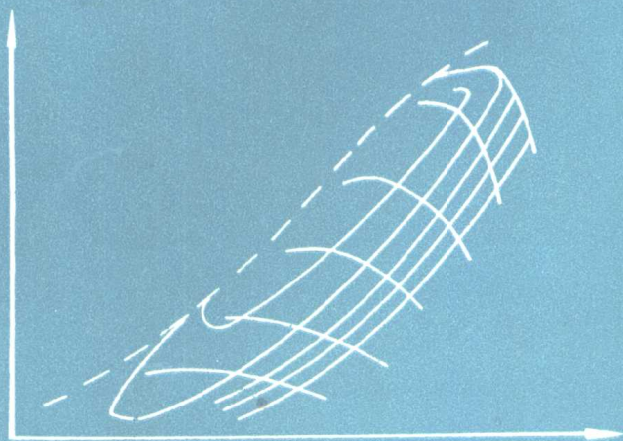


涡轮增压器原理、 结构和使用

于世元 编译

王义在 周湘寅 校



国防工业出版社

内 容 简 介

“涡轮增压器原理、结构和使用”是一本有实用价值、带有科普性质的读物。书中比较系统、全面而具体的介绍了柴油机废气涡轮增压器的有关知识。

书中介绍的内容，在原理方面，物理概念比较完整，说理透彻；在结构方面，书中收集的各种增压器结构，形式繁多，并详细地介绍了各种结构的原理、特点和使用性能。此外还介绍了各种新技术和新工艺。

在增压器的使用方面，本书详尽地介绍了使用和保养维修的方法，各种故障产生的原因、现象及排除方法。

本书文字叙述紧凑，深入浅出，图文并茂。本书的最大特色是着重于基本概念和物理现象的叙述和理解，避免了大量公式的推导和繁琐的计算。因此特别适合广大工农兵读者阅读。

书中关于设计、制造和使用的内容是有关人员必须掌握而又不易学到的知识，所以本书又是教科书、设计手册和使用说明书的一个补充。

本书既可供广大工农兵系统学习增压技术使用，亦是从事柴油机和增压器设计、制造和研究的技术人员以及有关院校师生的理想参考书。

涡轮增压器原理、结构和使用

于世元 编译

王义在 周湘寅 校

责任编辑 方 商

国防工业出版社

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

850×1168 $1/32$ 印张 8 209 千字

1985年4月第一版 1985年4月第一次印刷 印数：0,001—3,370册

统一书号：15034·2718 定价：1.60元

前 言

柴油机作为一种动力机械已广泛地应用在工业、农业、交通运输和国防工程等各个部门，而柴油机的废气涡轮增压则是提高柴油机功率、降低单位马力重量和提高经济性的最有效措施。因此，近十几年来我国在柴油机的增压技术和废气涡轮增压器的研制方面都取得了很大进展。目前，一般大型柴油机都采用了废气涡轮增压；中、小型柴油机也在逐步实现废气涡轮增压。就国产增压器本身来讲，不但其类型日渐增多，在性能方面有些已达到了较高的水平，特别是近年来，在我国增压器系列化研制工作取得肯定成绩后，国产增压器生产技术已进入一个新纪元。但是，由于增压柴油机的使用和发展很快，人们在柴油机上安装增压器只是简单地强调了增加柴油机功率这一经济效果的一面，而对广大生产和使用人员在正确了解和掌握增压柴油机和增压器的结构、性能和使用保养方法等方面的关心却比较欠缺，致使增压器得不到正确的使用而造成某些不应有的故障。

鉴于目前比较系统地介绍柴油机增压和涡轮增压器的书籍较少，为此我们以日本稻葉興作所著《過給機の知識》一书为主要参考书，并进行了适当的补充，编译成《涡轮增压器原理、结构和使用》。

本书打算比较系统和全面地介绍柴油机的增压技术及废气涡轮增压器。为了加深对问题的理解，书中着重从热力学和流体力学方面，简述其基本工作原理和性能，避免采用大量的公式推导。对增压器本身，则比较详尽地介绍它的总体结构和基本零部件的作用及结构型式，并对当前国外比较典型的增压器进行了结构分析，相应地介绍了一些新工艺和新结构。对目前柴油机增压的新课题“两级增压”和“补燃超高增压”也做了概括的介绍。

对增压器的使用，拆装和维修都进行了适当的叙述，并着重介绍了增压器运转中的喷水清洗技术。

本书由于世元同志编译，由王义在和周湘寅两同志进行技术和译文校对，最后由王有槐同志审稿。在编译过程中，魏振荣、李同福、薛丽生、吴柏祥等同志对文稿也作过不少建议，在此谨致衷心的感谢。

由于编译者水平有限，编译中错误和不妥之处在所难免，希读者批评指正。

编译者

目 录

第一章 增压技术的发展	1
第二章 增压原理	10
第2.1节 增压的基本概念和增压系统的分类	10
第2.2节 排气能量的利用	14
第2.3节 压力-比容示功图上的排气能量	15
第三章 增压柴油机的性能	18
第3.1节 增压柴油机的热力循环	18
第3.2节 增压时所需要的空气压力和空气量	19
第3.3节 过量空气系数和排气温度	23
第3.4节 增压压力 P_b 和涡轮前压力 P_t 的关系	27
第3.5节 燃油消耗率	29
第3.6节 压缩压力和最高爆发压力	30
第3.7节 增压柴油机的性能曲线图	32
第3.8节 增压柴油机的特点	37
第四章 柴油机的进、排气系统	38
第4.1节 排气管的布置	38
第4.2节 排气管和涡轮喷嘴环面积	42
第4.3节 增压空气的冷却	46
第4.4节 进、排气阀的设计	52
第4.5节 涡轮出口排气管	53
第五章 涡轮的性能	55
第5.1节 基本概念	55
第5.2节 涡轮喷嘴和动叶中的流动	56
第5.3节 涡轮效率	57
第5.4节 涡轮的反动度	59
第5.5节 涡轮中的损失	60
第5.6节 涡轮的轮周效率	67

第 5.7 节	气流的外部损失	70
第 5.8 节	涡轮的总效率	74
第 5.9 节	涡轮的特性图	75
第六章	压气机的性能	79
第 6.1 节	基本概念	79
第 6.2 节	空气在压气机叶轮中的流动	80
第 6.3 节	压气机的效率	82
第 6.4 节	压气机中的各种损失	84
第 6.5 节	压气机的总效率	86
第 6.6 节	压气机的特性	87
第 6.7 节	压气机的喘振	91
第七章	增压器的综合效率	97
第 7.1 节	效率的定义	97
第 7.2 节	增压器的表观综合效率	98
第八章	增压器的结构	104
第 8.1 节	增压器的分类	104
第 8.2 节	增压器的结构	124
第 8.3 节	主要部件的结构和作用	129
第九章	转子运转时的稳定性	176
第 9.1 节	转子的动平衡	176
第 9.2 节	轴承部分的振动	181
第十章	柴油机的废气涡轮增压系统	189
第 10.1 节	基本增压方式	189
第 10.2 节	两级增压系统	199
第 10.3 节	补燃超高增压系统	212
第十一章	增压器的使用	222
第 11.1 节	增压器的安装	222
第 11.2 节	增压器的运转	224
第 11.3 节	异常现象和处理方法	227
第 11.4 节	涡轮增压器在运转中的清洗	234
第 11.5 节	增压器的拆装	244
第 11.6 节	轴承部分的保养	245
第 11.7 节	涡轮进排气壳的腐蚀	245

第一章 增压技术的发展

柴油机和它的热机（如蒸汽机、汽轮机、汽油机及燃气轮机）一样，向外输出的机械功是由燃料燃烧后的热能转化而来。因此，柴油机的功率就决定于单位时间内喷进柴油机的燃油量及其转化效果（热效率）。然而，为了确保燃油能完全燃烧而转变成有效的机械功，必须向气缸送进同燃油相适应的一定量的空气。如果把送入气缸的空气预先进行压缩，增加空气密度，那么在相同气缸容积下，就可送入较多的空气，与此相应就能燃烧更多的燃油，从而就可增加柴油机的功率。这就是所谓“增压”。

人们很早就有这种“增压”的想法。1886年奥托（Otto）发明了四冲程发动机以后，就进行过多次尝试。

1901年库拉克（Dugald Clark）在二冲程柴油机上最早进行了增压试验。之后，在欧洲的容克（Junkers）、苏尔寿（Sulzer）等公司都开展了有计划的研究工作。

到1911年，瑞士的布希（Alfred Büchi）着眼于利用柴油机排气中的能量，把柴油机的排气引进燃气涡轮，使涡轮旋转，并以此为动力带动压气机叶轮旋转而压缩空气，再把压缩后的空气送入气缸，第一次进行了废气涡轮方式的增压试验。最初，布希把各缸的排气汇集到一根排气总管之后再引向涡轮进行试验（见图1.1）。试验结果与预期相反，效果不好。其原因是由于排气压力波的干扰，使各缸扫气受到了阻碍。为了改进起见，布希提出了如图1.2所示的方式，即把各个气缸接向涡轮的排气管改为按照气缸的发火顺序分支，以避免排气压力波的互相干扰，使扫气能顺利进行。用这种方式，在1926年成功地进行了增压试验，使柴油机功率增加了30~40%。这种增压方式就称做布希方式或脉冲方式。对现代柴油机增压的发展，布希博士是作出了

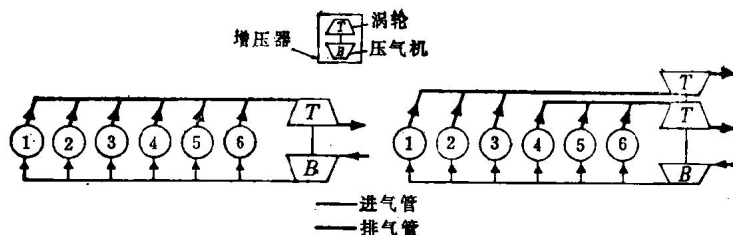


图1.1 改进前的布管

图1.2 改进后的布管

重大贡献的。

之后，瑞士勃朗·保弗利公司（Brown Boveri）生产了用布希增压方式工作的增压器。图 1.3 是 1928 年该公司生产的增压器，它安装在德意志潜艇主机上，用以代替电动增压压气机。这是世界上最早的废气涡轮增压器。

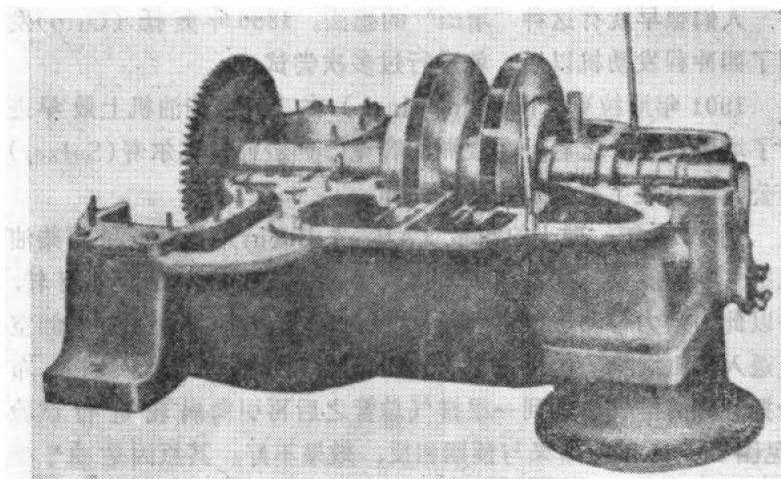


图1.3 BBC公司早期生产的增压器

另外，为了增加汽车及航空发动机的功率，于 1907 年由汽油机曲轴经齿轮增速后，驱动压气机叶轮，实现了所谓机械驱动方式增压。以后又进一步向废气涡轮增压方式发展。

直到本世纪三十年代，由于还不具备增压器中所必需的优良

耐热材料及性能良好的轴承等技术条件，所以当时增压器只是用在实验机上。第二次世界大战后，这些问题都随着航空燃气轮机的发展而得到解决，因此也生产出了工作可靠、效率良好的增压器。随着柴油机和增压器性能的不不断提高，增压技术也很快得到普及。

对于二冲程柴油机来说，在进行机械增压的同时，早在1940年就开始研究采用废气涡轮增压。其后由于增压柴油机和增压方式的改进，废气涡轮增压取得了显著进展。B & W公司于1951年首次实现了在直流扫气的二冲程柴油机上单独用废气涡轮增压器进行增压，也就是所谓的纯涡轮增压。

对于非增压的、200 马力以下的柴油机，由于小型、高 转速径流涡轮增压器的研制成功，也很快实现了增压。1937 年德国努尔（Null）博士首先试制了径流涡轮增压器。之后，美国的许维策（Schwitzer）、寇明斯（Cummins）、埃-里萨基（Ai-Research）、德-拉伐尔（De-Laval）等公司相继制造，并大量生产车辆和建筑机械用的小型径流涡轮增压器。

近二、三十年，随着柴油机的发展，增压技术有了突飞猛进的进展。目前实际使用的大型低速二冲程柴油机的平均有效压力已达到 $11 \sim 14.5$ 公斤/厘米²，与其匹配的增压器的增压压力相应为 $3 \sim 3.5$ 公斤/厘米²。而四冲程柴油机的平均有效压力约为 $18 \sim 21$ 公斤/厘米²，相应的增压压力为 $3 \sim 3.2$ 公斤/厘米²。目前不少增压器的增压压力能达到 3.5 公斤/厘米²，个别已达到 4.5 公斤/厘米² 以上，估计今后的增压压力还将有所提高。关于增压器的匹配范围也正逐年扩大，从小到 7 马力，大到 40000 马力的柴油机都普遍采用增压器。至于增压器的外形尺寸，最小的增压器其压气机叶轮直径只有 $1\frac{7}{8}$ 英寸（47.5 毫米），最大的如瑞士 BBC 公司的 VTR900 型增压器，其压气机叶轮直径竟达 1 米（见图 1.4）。与此同时，在柴油机上实际使用的增压器，在结构和气动性能上都有了显著改进。随着增压压力的提高，在增压器上采用了一系列新技术、新结构和新材料。尽管如此，现代的增压器在结构上仍



图1.4 BBC VTR900 型增压器的外貌

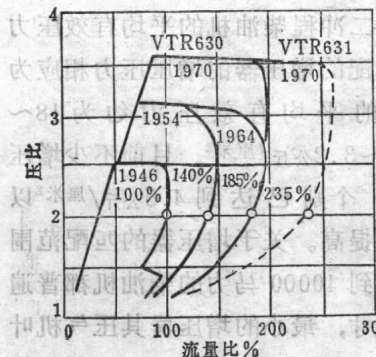


图1.5 VTR型增压器

性能的提高

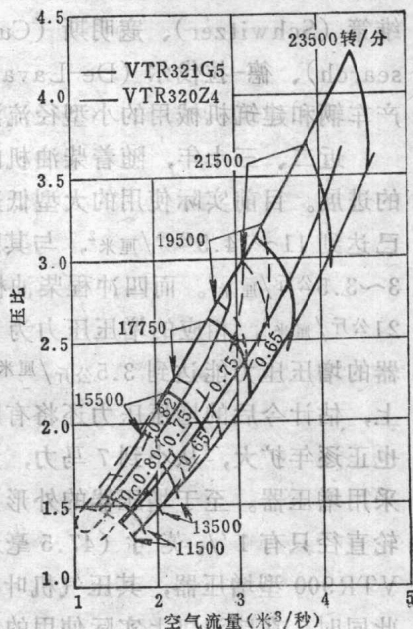


图1.6 VTR型增压器压气机

性能的改进

A877AE

原 书 缺 页

器约 5000 台。目前国外生产和使用的典型增压器如图 1.8~1.14 所示。

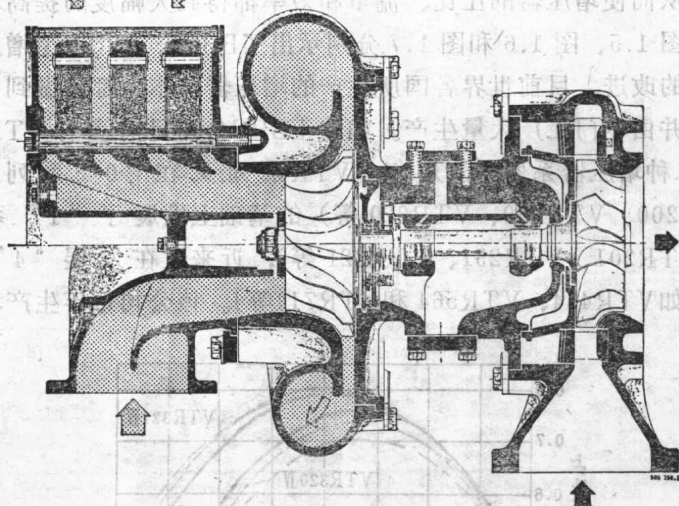


图1.9 BBC RR型增压器
(径流涡轮)

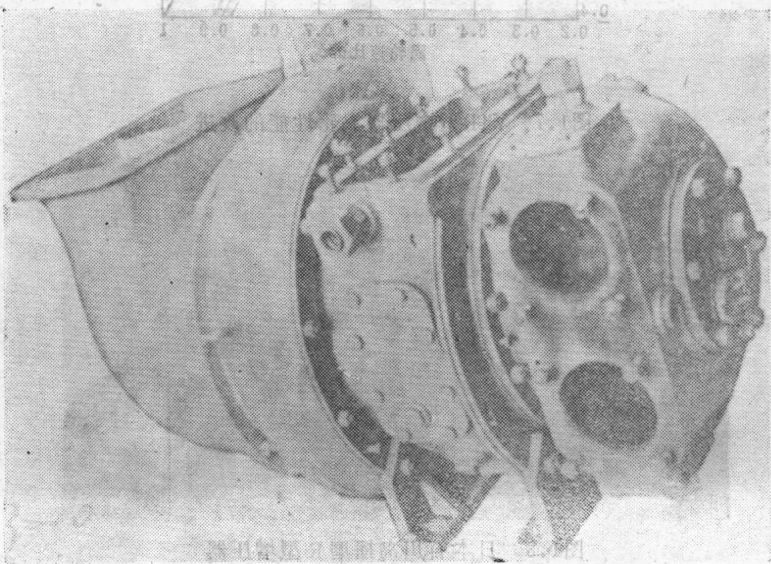


图1.10 BBC VTR200 型增压器

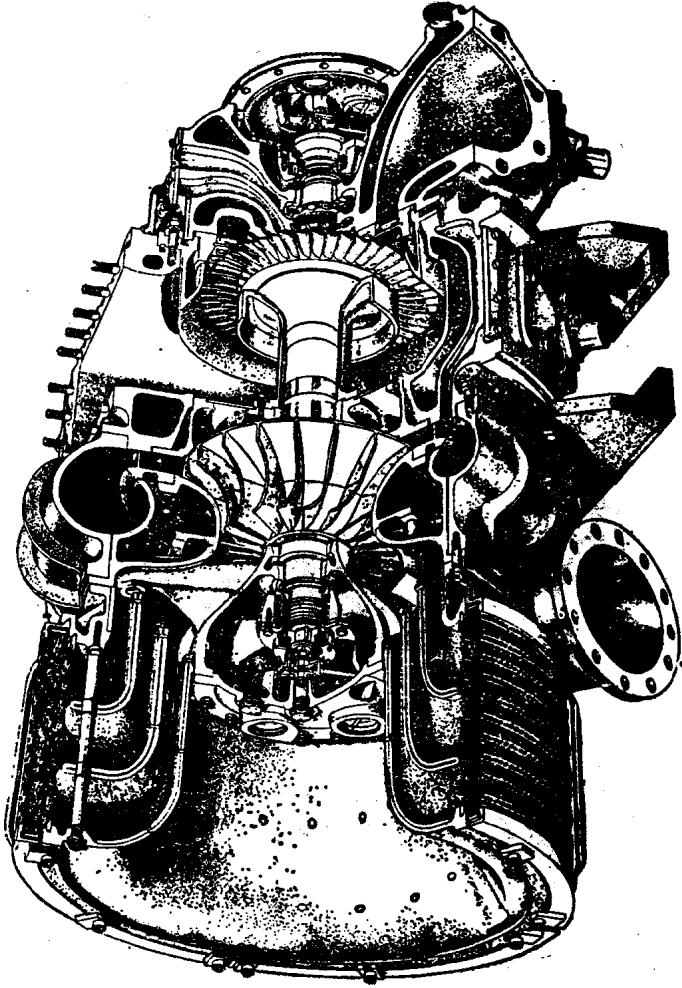


图1.11 BBC VTR501 型增压器

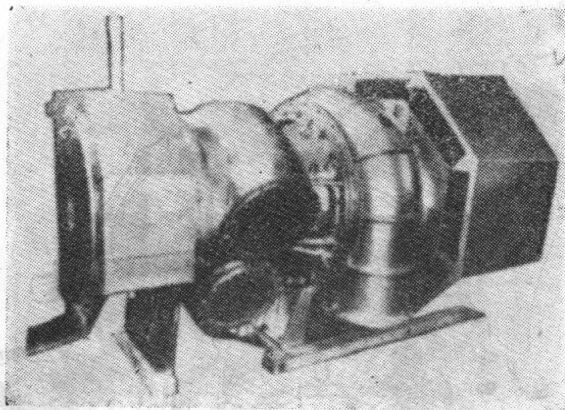


图1.12 日本三菱重工的MET型增压器

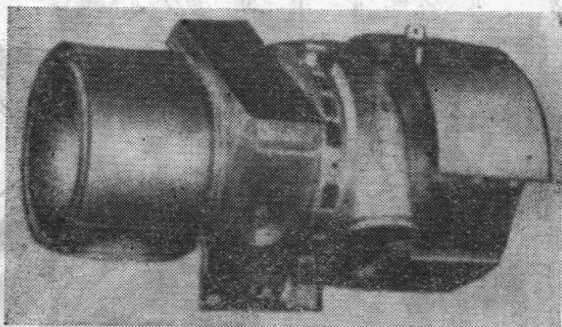


图1.13 日本三菱重工的Super MET71S-B型增压器

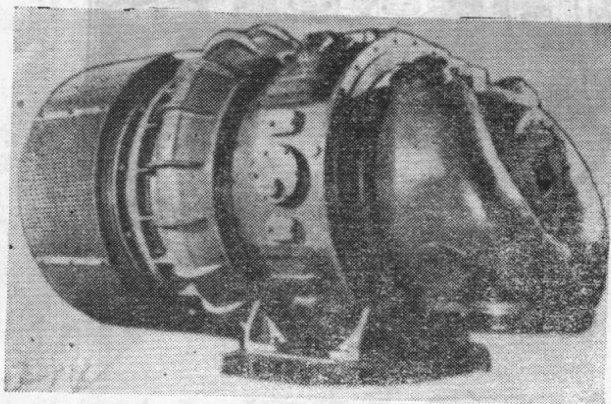


图1.14 英国纳皮尔公司的NA650型增压器

此外，在柴油机增压系统方面也有很大发展。就废气涡轮增压而言，除了脉冲和等压两种基本增压方式外，又出现了脉冲能量转换器和多脉冲转换器等增压方式。特别是两级废气涡轮增压的成功，使柴油机增压技术向前迈出了一大步。由于将两只普通增压器相串联，可使增压压力显著提高，因而可大幅度地提高柴油机的功率。最近几年出现的补燃超高增压系统，又给柴油机增压的发展开劈了新天地。这种新颖的增压系统由于在柴油机排气管中设置了旁通管和补燃燃烧室，使涡轮增压器可不受柴油机的影响而始终运转在高效率区。这种系统的另一个特点是柴油机的压缩比大幅度降低，这样就保证了最高爆发压力不超过允许范围，由此实现了在不增加机械负荷和热负荷的条件下，大幅度提高柴油机功率的目的。当然，大幅度降低柴油机的压缩比，会使起动和低负荷工况都遇到不易压燃的困难，于是各工厂提出了各种解决办法，例如采用进气加热、排气节流、可变压缩比等等，不同程度地解决了这些问题，使柴油机向着更高增压度发展。

第二章 增压原理

第2.1节 增压的基本概念和增压系统的分类

在柴油机中，燃烧燃油所必需的最小空气量一般为燃油喷射量的14~17倍，相当于过量空气系数为1.1~1.3。如果供应的空气达不到这个数值，燃油就不能完全燃烧，结果使柴油机的排烟变黑，同时还要增大柴油机的热负荷。

对于自然吸气的非增压柴油机，它的吸气容积取决于活塞的行程容积和单位时间的吸气次数（二冲程柴油机的吸气次数等于转数，四冲程柴油机的吸气次数为转数的一半）。对某一柴油机而言，其活塞行程容积是一定的，因此，当转速一定时（吸气次数一定），则柴油机的吸气容积不管其负荷大小可以认为大体上是一定的。但另一方面，柴油机的燃油喷射量则随着柴油机负荷的增大而成比例增加。所以，如果燃油量和供气量的比例达到上述极限值时，这时的功率就是该柴油机的极限功率。

如前所述，如果增大进气密度，就可增加进入气缸的空气量，相应燃油喷射量就可增加，这样就能增大柴油机的功率。增大进气密度可采用降低进气温度或增加进气压力等方法。但降低进气温度也就是吸入温度较低的空气，这将受外界大气环境的限制，而唯一有效的方法就是增加进气压力，即所谓“增压”。提高进气压力一般是用压气机来压缩空气，但压缩后的空气温度必然升高，进气温度升高又使空气密度减小，这对增加进气量不利。如果将压缩后的空气再经过空气冷却器，使它冷却到略高于大气温度，这样就能增大进气密度，从而进一步提高柴油机的功率。

通常把柴油机实现增压所设置的成套附件统称为增压系统，而把提高空气压力的部件称做增压器。柴油机实现增压的系统种

种类繁多，一般是根据增压所需能量的来源而把增压系统分为机械增压、废气涡轮增压和复合式增压三大类。此外，还有一些特殊的增压系统，如气波增压、惯性增压等。

(1) 机械驱动式增压系统

在机械驱动式增压系统中，增压所需的功率是由柴油机本身提供的。一般是由柴油机曲轴经齿轮增速后驱动增压器。增压器可以用离心式压气机或罗茨鼓风机，也可以用螺杆泵或其他型式的压气机。

在这种增压系统中，增压器要消耗柴油机的有效功率。采用这种增压系统的目的是为了增加柴油机的功率。但随着增压压力的提高，增压器的耗功相应增加；另一方面，由于增压压力提高，使进气温度升高，结果进气密度又趋向变小，相应又使进气量下降，因此，这种增压系统只在一定压力范围内可使柴油机功率增加，超过一定范围，柴油机功率不仅不能增加，反而减小。另外，采用这种增压系统，通常要使柴油机的经济性变坏。基于上述原因，这种增压系统的增压压力一般都不太高，采用离心式压气机时，增压压力一般不超过 1.8 公斤/厘米^2 ，而用罗茨鼓风机时，则不超过 1.4 公斤/厘米^2 。在废气涡轮增压比较发展的今天，从有效利用排气能量的角度看，上述增压系统已没有存在的必要，所以，新设计的柴油机除特殊用途外，一般都不采用罗茨鼓风机这种增压系统。

(2) 废气涡轮增压系统

这是目前使用最广泛的一种增压系统，其工作原理如图2.1.1所示。增压器由涡轮和压气机组成，称为涡轮增压器。增压所需的功率由柴油机排气能量提供。即柴油机的排气驱动增压器的涡轮，由涡轮带动同轴的压气机来压缩空气，把压缩后的空气经空气冷却器冷却后再送入气缸。由于增压器与柴油机本体无任何机械连接，所以，有时也将其称为自由涡轮增压。本书将主要介绍这种增压系统。

这种增压系统又可分为脉冲增压和等压增压两种基本的增压