

国外柴油机的超高压方式和装置

荣现志 编译

北京理工大学出版社

内 容 提 要

本书综合了国内外有关柴油机（也涉及其它类型的内燃机）的超高增压旁通补燃方式和装置的文献、资料和专利，简要叙述了超高增压旁通补燃技术的发展过程、主要特点、国外研制现状、发展和使用前景；比较详细地介绍了超高增压旁通补燃的基本理论、该系统的设置方式、各装置的结构特点和工作过程；有选择地介绍了一些典型原理方案（哈泼巴系统）。

本书对从事内燃机（尤其增压内燃机）教学、研究和生产的教师、学生、工程技术人员和工人均有使用和参考价值。

国外柴油机的超高增压方式和装置

· 孙现良 · 编译

北京理工大学出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京理工大学出版社印刷厂印刷

787×1092 毫米 32 开本 13.375 印张 299 千字

1989 年 12 月第一版 1989 年 12 月第一次印刷

ISBN 7-81013-283-0/TH·28

印数：1—1300 册 定价：5.65 元

前 言

哈泼巴系统的中心内容是改变增压器传统的串联设置方式为并联关系、采用高增压比、并设置旁通节流装置和补燃室。这一先进技术是由法国柴油机和燃气轮机专家琼·梅尔基粤尔(Jean Melchior)先生发明的。由于这项技术的推广价值和经济效益很高,它几乎可用于包括军事车辆、舰船等军用动力在内的各种机型的内燃机上,在不改变热负荷和机械负荷的情况下可使原机功率增大二至四倍,因而受到法国政府和世界各国内燃机研究机构和制造厂家的重视。这项技术专利(包括数十项具体专利)分别在法国、美国、日本、英国等专利局申请并发表。由琼·梅尔基粤尔先生任总经理的哈泼巴公司(Hyperbar Diesel Co)全面负责专利出售事宜。时至今日,全世界数十个国家向他们购置了专利、样机和附属设备。目前,法国政府已把这项技术应用到坦克、战舰、火车牵引和其它民用车辆动力上、并继续在其它领域推广和使用。

我国虽然没有引进这项专利,但这项技术的优越性和良好使用前景早已在内燃机行业引起反响,全国主要内燃机刊物几乎都不同程度地报道和刊登过这一科技动态、论文和综述文章。我国地大物博,“四化”建设速度很快,内燃机,尤其高功率内燃机需求量很大,应用这项技术的前景十分广阔。从学术上讲,研究和总结这一课题也十分必要。因此,尽快地把这项技术的主要内容介绍给我国同行是大有益处的,这正是编者编译此书的主要出发点。

在编译本书过程中,张化敏副教授参加了资料的搜集

和整理工作。宁克明、李益昆高级工程师和林励生副教授对本书进行了技术审校。在编写本书期间，编者还曾就某些技术问题得到郭兆熊高级工程师的指教。编者对上述同志给予的慷慨帮助和热情指导表示衷心的感谢。

由于本人水平所限，编译时间仓促，书中错误或不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

目 录

一、概述.....	(1)
二、基本概念	(9)
(一) 降低压缩比的考虑.....	(10)
(二) 进气温度的选择.....	(16)
(三) 旁通是解决匹配问题的关键措施.....	(17)
(四) 补燃的理由.....	(30)
三、增压装置和附属机构的设置方式和工作过程.....	(33)
(一) 法国哈泼巴 (Hyperbar) 系统	(33)
(二) 瑞典 BGC 系统.....	(51)
(三) 联邦德国 MTU BKS 系统	(55)
四、起动和低负荷下运转问题	(63)
(一) 柴油机的起动和低负荷下的运转问题.....	(63)
(二) 涡轮增压器的起动问题.....	(126)
五、补燃室.....	(135)
(一) “移动式” (指混合区)	(139)
(二) “固定式” (指混合区的位置)	(145)
(三) “可调式” (指混合区气体的比例 和利用风嘴进行喷射雾化)	(150)
(四) “往返式” (指火焰筒本身)	(164)
(五) “旋转式” (指火焰筒本身)	(174)
(六) “补燃箱” (或旁通箱)	(176)
(七) 问题讨论.....	(178)

(八) 改进方案	(181)
----------------	-------

六、旁通控制..... (200)

(一) 旁通在超高增压柴油机中的地位和用途.....	(200)
(二) 设置旁通节流装置的必要性.....	(203)
(三) 感受参数.....	(204)
(四) 旁通节流装置的种类及其结构形式.....	(207)
(五) 其它类型和用途的旁通节流装置.....	(216)

七、补燃室燃油调节..... (249)

(一) 设置补燃室燃油调节装置的必要性.....	(249)
(二) 对补燃室燃油调节装置的一般要求.....	(251)
(三) 补燃室燃油调节方案.....	(252)
(四) 补燃室燃油调节装置中的附属部件.....	(257)
(五) 补燃室燃油调节特性和内燃机使用工况.....	(258)

八、冷却和润滑问题..... (268)

(一) 冷却问题.....	(268)
(二) 润滑问题.....	(336)

九、涡轮增压器..... (348)

(一) 压比不超过 5:1 的借用型增压器.....	(348)
(二) 压比超过 7:1 的专用型增压器.....	(349)

十、提高经济和性能指标的新措施..... (358)

(一) 用发动机转速敏感装置控制气缸充量和旁通空气量的比值.....	(358)
(二) 推荐给二冲程超高增压柴油机使用的扫气方式和装置.....	(373)
(三) 利用排气冲击波能量提高柴油机效率和充量.....	(388)

十一、附记..... (407)

(一) 哈泼巴柴油机公司简介..... (407)

(二) 贸易和使用情况..... (410)

(三) 绝热复合超高增压发动机的发展与展望..... (412)

十二、附录..... (414)

(一) 主要符号定义..... (414)

(二) 参考文献..... (419)

一、概 述

柴油机是一种能把燃油的化学能直接转换成热能使之做功并发出功率的机器。从世界上第一台初具模式的内燃机诞生至今已有近百年的历史，这期间，经过千百万次摸索、研究、使用、总结、再改进和反复实践，使柴油机做功的理论进一步完善。今天，柴油机由于在各种动力机械中热效率较高、功率范围宽广、起动迅速、维修方便、运行安全、使用寿命长而得到广泛应用。

柴油机的热循环是由四个（或两个）冲程组成的，即进气冲程、压缩冲程、燃烧/膨胀冲程和排气冲程。柴油机经过多次改革和演变，不仅在外形上花样翻新，设计更为合理，布置更为紧凑；而且各种新技术、新工艺、新材料逐步在柴油机上得到使用，专业化、系列化生产更能保证加工精度。因而柴油机的热效率和体积功率越来越高，性能也越来越好。但是，从原理上讲，柴油机热循环的四个过程并未改变，做为容积式机械，它的做功过程发生在气缸内，加热循环介于定容和定压之间，因而它所能吸进气缸的空气量是有限的（决定了喷进气缸的燃油量）。所以，要想大幅度地提高功率、改善扭矩性能，只在总体布置和结构设计上修修改改是不行的，必须寻求新的措施，开辟新的途径，从更好地组织燃烧、膨胀做功入手，获得大幅度提高功率的办法。

由公式

$$N_e = \frac{P_e V_h i N}{225\tau}$$

可知 $\dot{N}_e \propto i D^2 H N P_e / \tau \propto i \bar{D}^2 \bar{C}_m \bar{P}_e / \bar{\tau}$

而 $\bar{P}_e \propto \eta_i \eta_m \eta_v \gamma_k / \alpha$

式中 $\dot{N}_e$ ——发动机有效功率;

P_e ——平均有效压力;

V_k ——气缸工作容积;

i ——气缸数目;

N ——发动机转数;

τ ——冲程数;

D ——气缸直径;

H ——活塞行程;

C_m ——活塞平均速度;

η_i ——指示效率;

η_m ——机械效率;

η_v ——充气效率;

γ_k ——充气密度;

α ——过量空气系数。

由上式可知,用下述方法均可提高发动机功率:

1. 改变内燃机的结构参数(i, D, H, τ);
2. 提高发动机转数和活塞平均速度;
3. 提高发动机的平均有效压力 P_e 。主要方法是通过减小过量空气系数 α 、提高充气效率 η_v 和增加进入气缸的充气密度 γ_k 。

方法1和方法2均受柴油机结构布局和尺寸要求的限制,要想实现需付出较大的代价,并要牺牲一些其它对使用有好处性能指标。实践证明,方法3最有效。因此应用也较广泛。提高进入气缸的空气密度 γ_k 是靠增压实现的。废

气涡轮增压是动力机械中的一项新技术，在本世纪 50 年代还处于探索阶段，而 70 年代已得到广泛的实际应用。以燃气轮机技术为基础，废气涡轮增压技术日趋完善，并继续迅速发展。

涡轮增压器是一种旋转式机械，和柴油机配合，能使原机功率大幅度地增加，但由于二者的流量变化范围不一样，匹配的问题不易解决，这一方面影响了压气机效率的发挥，另一方面使发动机受增压器影响产生不能稳定工作的因素，使普通增压发动机的扭矩特性和加速性能不很理想。

70 年代初期出现了设置有旁通管路、旁通节流装置和补助燃烧室的超高增压（又称超压比）柴油机（即法国哈泼巴柴油机），该机打破了常规增压柴油机的布置方法，使增压器与柴油机成并联关系，因而成功地解决了柴油机与压气机匹配的问题，使原机功率成倍地提高，并且扭矩特性和加速性能都较普通增压柴油机有很大改善。超高增压柴油机把车用柴油机涡轮增压技术提高到一个新阶段，并为增压柴油机在其它领域使用提供了条件。作为一种新的动力机型，超高增压柴油机显而易见的优点已得到广泛的承认，超高增压技术已受到人们越来越多的重视，它的进一步完善和发展也时刻都受到人们关注。

和普通增压柴油机相比，超高增压柴油机在工作状态、总体布置、结构和受结构影响的性能参数上有以下不同：

1. 三个特征

（1）高增压比 普通增压柴油机的增压比一般不超过 3.5，超高增压柴油机的压比高至 4~8；

（2）低压缩比 普通增压柴油机的压缩比一般不低于

12, 而超高增压柴油机的压缩比可低至 $7 \sim 10$;

(3) **低温循环** 由于采用了低压缩比, 超高增压柴油机的热交换过程是在低于普通增压(进行同样过程时)温度下进行的。

2. 三个特点

(1) **旁通** 超高增压柴油机的进、排气管之间设置了一个旁通管, 使压气机、柴油机和涡轮成并联关系。而普通增压中增压器与柴油机是串联布置的。设置旁通管路, 解决了压气机和柴油机匹配的困难, 当压气机供给的气量过多, 柴油机不能完全吸进气缸时, 可经旁通管路直接流进涡轮, 从而可以避免增压器发生喘振;

(2) **旁通节流** 在旁通管内设置了节流阀, 目的是建立扫气压差, 合理地完成进入发动机气缸和进入补燃室以及经旁通管流进补燃室主燃区和混合区各股气量的比例分配, 并和补燃室一起协调和保证压气机始终在不偏离已确定好的最佳运行线上工作;

(3) **补燃** 在旁通管或在排气管一侧通往涡轮的管道上设置了补助燃烧室, 当柴油机在起动、空转、低负荷、低速大扭矩情况下工作时, 光靠柴油机自身的废气能量不足以产生足够的增压压力, 涡轮缺乏的能量由补燃室补燃供给。

3. 三个基本不变

(1) **主要零部件和结构尺寸基本不变** 除为降低压缩比而对原机气缸的工作容积或活塞尺寸作些小变动以及为增大喷油量对高压泵和配气机构作适当调整外, 一般讲, 把普

通柴油机或普通增压柴油机改装成超高增压柴油机，不需要变换原机的主要零部件和变更其内部结构尺寸，这既提高了部件的通用性，又降低了制造成本。

(2) 热负荷基本不变 由于超高增压柴油机采用低压压缩比，因而降低了压缩终点气缸内工质的温度及循环温度，从而降低了柴油机的热负荷。从理论计算和实际试验中都已证明，虽然超高增压柴油机的功率比原机增长很多，但本体零部件的热负荷随着增压比的提高和功率的增长并未有明显的增加；

(3) 机械负荷基本不变 由于采用低压压缩比，超高增压柴油机限制了最高爆发压力随增压比增长而加大的趋势。从国外报道的有关数据上看，超高增压柴油机的最大爆发压力和普通增压柴油机的大致相同，因此也可以认为机械负荷大致相等，而平均有效压力增加了很多，提高了柴油机的机械效率，这就减少了因压缩比降低而对柴油机热效率造成的不良影响。

4. 四个优点

(1) 功率增长幅度大 超高增压柴油机的功率一般为原机功率的 2~5 倍，为普通增压柴油机的 3~4 倍，因而它的功率/升较高，而公斤/功率又较小。已经证明，当平均有效压力增加到两倍时，采用超高增压，重量和体积减少

$$\frac{100}{2\sqrt{2}} / 100;$$

(2) 扭矩特性宽广 虽然超高增压柴油机的最高爆发压力没有增高，但平均有效压力却增加很大，现已超过 $30 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，这个指标在普通（或增压）柴油机上是难以达

到的，因而它的扭矩特性比较宽广，在需要低速大扭矩牵引时，超高增压柴油机可以提供超扭矩，这些特性不仅使其在普通场合有了用武之地，而且还为在坦克、装甲车等军用车辆和重型、越野车辆上使用开辟了广阔的前景；

(3) **加速性能好** 假如超高增压柴油机的补燃室设置合理，其燃油控制或调节得当，就能随时储备一定数量的过量空气，从而能够大大地改善柴油机的加速性能。同样缸径的发动机，平均有效压力越高，加速性能越好，其原因也就在于这种发动机在惰转时已准备了足够的过量空气。超高增压柴油机的平均有效压力大大地高于普通增压柴油机，因而它的加速性能也优于普通增压发动机。依据法国阿尔萨斯机械制造协会(SACM)提供的数据，超高增压柴油机从惰转到满负荷只需要10秒，有的机器只需要1秒；

(4) **降低了污染排放** 由于超高增压柴油机设置有补燃室，并且使发动机排气和部分新鲜空气从补燃室通过，使发动机排气中的未燃油滴获得了再燃的机会，这一方面回收了排气中未能膨胀做功的部分能量，另一方面也净化了发动机废气，降低了污染排放。在当今世界越来越重视防止和消除污染的形势下，具有这种性能的发动机无疑会受到普遍欢迎。

在论及超高增压柴油机的工作过程时，超高增压技术发明者——法国超高增压柴油机公司(Hyperbar Diesel Co)总经理琼·梅尔基粤尔先生曾这样说：超高增压即是使发动机以潜水员在他的潜水服里呼吸那样的方式在人工大气压中吸气…。

超高增压技术是建立在涡轮机械、热交换器以及各方面比较成熟的柴油机传统技术迅速发展的基础上。与广泛传播

的看法相反，燃气轮不是柴油机的劲敌而是它的良好补充。在航空领域取得巨大进展之后，现在燃气轮的性能与柴油机相当接近了。

法国一刊物在论及超高增压的工业前景时曾这样评论：除了能使柴油机的优良性能与旋转回热式燃气涡轮并驾齐驱之外，超高增压还可降低额定功率价格，因而它的主要经济价值几乎可用于现存的所有发动机上。

在目前的工艺状况下，采用超高增压，只需进行微量的改装，就可使非增压发动机大幅度地提高功率，而且发动机的寿命不减。

使用超高增压，需要有高压比的涡轮增压器，需要在发动机外壳和装置上做一些改进，要重新确定增压空气冷却器的尺寸，以适应压气机出口处的新条件。在冷却方面仍可根据超高增压柴油机的使用情况保留水冷或风冷技术。排气歧管构成超高增压发动机的热动力中心。排气歧管包括补燃室及其附属机构。

上述发动机结构和装置上的改装和调整，运用当前的科学技术是完全可以实现的。

但是，事物总有两面性，在论及超高增压柴油机许多优点的时候，并不是说它已经成了完美无瑕的技术。超高增压柴油机在获得许多优良性能的同时，将遇到和产生许多新的问题和困难。例如，由于降低压缩比而导致柴油机起动、空转和低负荷下工作时发生困难；在此期间工作油耗偏高；结构变得复杂。这样，薄弱环节和出问题的因素就会增多。为解决低温起动和低负荷下能正常工作的问题，需要一套复杂的补燃室和柴油机起动装置，并要有一套准确、简便的操纵程序和方法；补燃室是超高增压柴油机上的一个独立部件，

它的功用是至关重要的，因而它的设计、安装、工作条件都有严格的要求，这也是一项有别于其它燃烧室的新技术；为解决压气机和发动机匹配的困难，就要设置旁通管路；为了扫气，还要设置节流装置；补燃室如果能适时适宜地补充涡轮缺乏的能量，必须按时向它供气供油，这就需要一套复杂的气动控制和燃油调节装置，其调节参数和对象既保证本部件的使用性能，又严格受发动机参数的控制；还要有一套完整的润滑系统和冷却系统以及一些其它必须的附属系统。这些新装置、新系统、以及操纵这些部件的方法就构成了超高增压的新技术。伴随着超高增压的诞生，这些新技术也以各式各样的形式提出。本书综合国内外有关论文、专著、专利和有关资料中提供的各种问题和方案，对其阐述的观点、设计思想、作用原理、结构特点等进行介绍。

二、基本概念

作为一次近似，可以认为柴油机的功率正比于通过它的空气流量。由于进气容积受活塞速度的限制，因而必须增加进气密度，即在燃烧动力学和发动机构造的限制范围内增加进气压力或降低进气温度。为此，必须给柴油机配备压气机和中冷器。早期的增压系统，压气机是由发动机曲轴驱动的，这种方案不适宜在高增压发动机上采用，因为驱动压气机所需要的功率可能等于或超过增压发动机由于增压所提高的功率。因此，另一种废气涡轮增压系统受到人们的普遍注意，超高增压技术就是在这种系统上改进和发展起来的。

涡轮增压器第一次出现是在第二次世界大战之前，但大规模地采用则是在1950年之后。当时的“增压器”（透平鼓风机）的压比太低以至不能明显改进发动机的热力循环特性。在相当长的时间内，增压发动机实际上是配备有扫气泵的吸气发动机，扫气泵只不过是一个选择的附件。压比的逐渐增加导致发动机产生某些缺陷，这些缺陷曾引起人们对增压作用的怀疑。不成熟的增压发动机在一定范围内是容易损坏的。因而，在设计发动机时需要考虑能够承受增压的问题。近年来，发动机技术和增压器技术是同时发展的。今天，在离心式和轴流式压气机方面所取得的进展很大，可以承受一般发动机都不能承受的气体压力。因而，要想取得新成就，就应重新综合考虑由发动机、涡轮增压器和冷却器等系统构成的复合总成。怎样把迅速发展起来的涡轮增压技术和已经相当成熟的发动机技术结合起来，圆满地解决两种不

同机械的匹配，使其充分发挥效能而又不显露各自的缺陷，这一新课题的研究和探讨已超越了柴油机传统理论的范围。可以说，超高增压方法是集多种学科为一体的发动机增压技术。

(一) 降低压缩比的考虑

要想采用压比很高的涡轮增压器，必须考虑发动机增压引起的问题和产生的结果。增压对机械应力产生直接影响，因而应首先注意到一台柴油机尺寸的大小都是根据在燃烧冲程上止点附近，即在它的循环的很小部分中承受的最大应力来确定的。

设 $P_0(\varphi)$ 为非增压发动机气缸的压力，它是曲轴转角的函数；设 π 为增压比，等于增压发动机气缸的进气压力与非增压发动机气缸的进气压力之比。增压发动机的压缩冲程的情况可用下式表示： $P_c(\varphi) = \pi P_0(\varphi)$ 。显然，给定发动机的压比受到如下限制：

$$\pi_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{0\text{comp}}} = \frac{\text{气缸能承受的最大压力}}{\text{非增压气缸的压缩压力}}$$

大缸径 $\pi_{\max}$ 约为 4。如果我们希望保持 $P_{\max}$ 不变而增大 $\pi_{\max}$ ，则 $P_{0\text{comp}}$ 应该降低。因而可以得出一个结论：即在降低压缩比的情况下，不增加机械应力就可以增加压比。图 2-1 示出了相应的曲线。

至于增压对热负荷的影响，首先应注意到它是根据活塞壁、缸套底部和气缸盖顶部的温度来度量的。可以证明，这些温度随着通过金属某一给定点的热通量成线性增加。