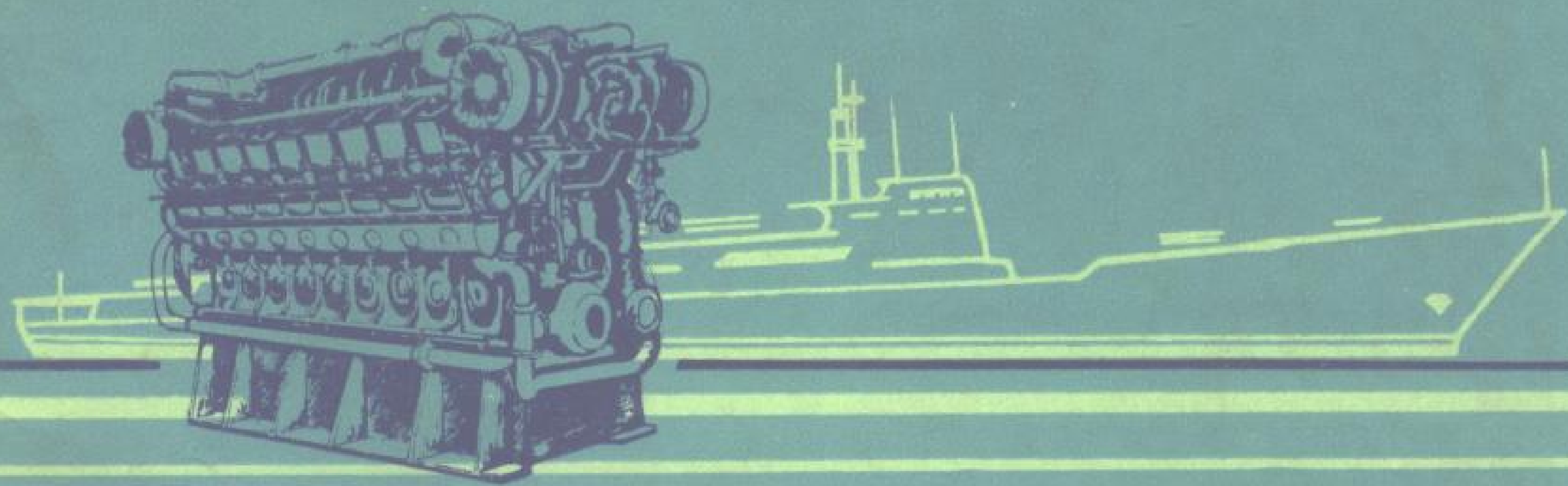


# 船用柴油机设计手册

(二)

总体设计



国防工业出版社

# 船用柴油机设计手册

(二)

## 总体设计

《船用柴油机设计手册》编辑委员会编

本篇主编：周经纬

执笔人员：第一章：胡国栋、周经纬、周海、邱东

第二章：张志华、贾锡印 第三章：周经纬

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本分册是《船用柴油机设计手册》的第二篇。本篇共分三章：第一章总体选型，论述柴油机基本型式的选择，较详细地说明了增压系统、二冲程柴油机换气方式及燃烧室型式的选择。第二章主要参数，书中对柴油机的主要性能参数和主要结构参数进行了分析比较，说明了选用方法，并列出了一些机型的实用数据，可供选择时参考。第三章总体布置，论述总体布置的任务和方法，介绍了柴油机主要运动件和固定件及主要系统元件的布置原则和实例。

《船用柴油机设计手册》共有八篇及附录一章，现按篇分册出版，共九个分册。第一篇设计总论，第二篇总体设计，第三篇船用柴油机工作过程计算，第四篇动力计算，第五篇船用柴油机主要零部件，第六篇系统和附件，第七篇试验与测量，第八篇材料，最后一册为附录。

本书主要供船用柴油机设计研究人员使用，也可供柴油机制造和使用部门工程技术人员及高等院校有关专业的师生参考。

2085/30

## 船用柴油机设计手册

(二)

总体设计

《船用柴油机设计手册》编辑委员会 编

\*

国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第 074 号

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

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 9<sup>1</sup>/<sub>8</sub> 202千字

1979年6月第一版 1979年6月第一次印刷 印数：00,001—10,000册

统一书号：15034·1785 定价：0.98元

《船用柴油机设计手册》编辑委员会

领 导 成 员

张有萱	夏 桐	沈岳瑞	李渤仲
陈时雄	余运生	孙全柱	李忠仁
刘 仁	熊 琳	刘 颖	胡国栋
于康庄	赖灵淮	谭汉雄	朱国信

《船用柴油机设计手册》编辑工作组

刘 锦	张连方	方 商	商云祥
邱耀先	华裕达	潘荫琪	殷志成
程华峰	徐景福	茅建国	

## 前 言

柴油机已经有将近一个世纪的发展历史，但迄今技术上仍处于不断改进和发展阶段。柴油机在各种类型军民船舶中应用极为广泛。根据国外不完全的统计资料，1976年新建的2000吨以上民用船舶中，柴油机动力已超过一千万马力，占船舶主机总马力的72%，并且有继续上升的趋势。中小型运输船，工程船及渔轮中柴油机的应用更为普遍。在舰艇中，虽然近年来燃气轮机的发展在一定范围内取代了柴油机，但在中、小型战斗舰艇中，柴油机因其经济性较好以及其它原因，仍被广泛采用。大量军用辅助舰船中，柴油机更是主要动力。因此，大力发展柴油机制造业和不断提高船用柴油机性能和技术水平是发展我国内河和海洋运输事业，建设强大海军和开发海洋资源的一项重要措施。

我国在解放前几乎没有船用柴油机制造业。解放后随着国民经济和国防建设的发展，船用柴油机工业也获得迅速的发展。在“独立自主、自力更生”社会主义建设方针的指引下，1958年我国年青的船机科研设计队伍开始自行研制了多种型号舰船用柴油机，其中包括远洋运输船舶所用的低速重型柴油机，以及大功率中、高速柴油机，有多种型号通过了国家鉴定，已进行正式生产，装备了许多舰船，累积了一定的研究、设计新型船用柴油机的经验。

现在我国社会主义革命和社会主义建设进入了一个新的时期，以华国锋同志为首的党中央领导全国各族人民开始了新的长征。为了实现新时期的总任务，全国科学大会制定了科学技术发展的近期和远景规划，号召科学技术要走在国民经济和国防建设的前面。船用柴油机工业及其科学技术也进入了以高速度向现代化进军的阶段。

在这一新的阶段中，船用柴油机科研和设计工作应认真总结建国以来正、反两方面的经验，并在“独立自主、自力更生”的基础上，有分析、有选择地学习国外的先进技术。在统一领导、全面规划的前提下，研究发展更多的、符合我国国情的各种类型舰船用柴油机及其附属设备，尽快地把我国舰船用柴油机的技术提高到世界先进水平，为实现国民经济和国防建设现代化作出应有的贡献。《船用柴油机设计手册》就是为了适应这一新形势的要求，总结我国多年来的研究设计经验，及本着“洋为中用”的原则适当地选用了一些国外可靠的设计方法和资料编写的，为我国从事船用柴油机的广大科研、设计、教学、生产和使用人员提供必要的船用柴油机研究、设计的技术知识和资料。

本手册的读者对象是具备一定基础理论知识和实际经验的本专业从业人员，其中有些篇章也可供与船用柴油机有关的其它专业人员参考，以及作为大专院校有关专业学生的辅助学习资料。

本书共分八篇。第一篇是设计总论，其内容是介绍船用柴油机发展简史和当前发展趋向，阐明有关设计指导思想和设计程序中的有关问题，其中特别强调船用柴油机的三化问题；介绍各种类型舰船对柴油机设计的技术要求。第二篇是总体设计，介绍船用柴油机在总体设计阶段所要考虑的各种技术问题，提供各种设计方案比较用的资料和计算方法。第

三、四两篇是有关工作过程和动力学方面的计算方法。第五篇是船用柴油机主要零部件设计、计算和专用试验方法的介绍。第六篇是船用柴油机各种系统及其有关附件的设计。第七篇是船用柴油机在研制过程中各种试验研究方法的详细介绍。第八篇是有关船用柴油机使用材料和油料的介绍。最后附录一章是国内外有代表性的各种类型船用柴油机参数总表、剖面图、有关标准资料、国际单位与公制单位的换算以及电算程序。每篇暂以分册形式出版，以便读者选用。全手册出齐后，再发行一部分合订本。

我们准备在第一版出版以后，通过科学研究和广泛的学术交流，逐步形成我国自己的、比较完善的船用柴油机研究设计方法，积累丰富的设计资料和数据，在以后的版本中修订和补充，使有助于尽快的提高我国船用柴油机技术，赶超国外先进水平。

由于本手册系第一次编写，内容不完善的地方一定很多，希望读者在使用中发现需要补充和修订的地方随时取得联系，以便在今后再版时加以修订和充实。

本手册的编写是在国内有关船用柴油机科研、设计的领导机关、院校、科研设计单位和生产单位的大力协同下进行的，共有 100 余人参加了各篇、章、节的编写，为了对编写的内容负责，篇、章的主要编写人员都有署名。编辑委员会借此出版机会，特向各有关单位领导的大力支持和有关同志的热情帮助表示深切的感谢。

《船用柴油机设计手册》编辑委员会

# 目 录

## 第二篇 总体设计

概论	2-1
第一章 总体选型	2-3
第一节 基本型式的选择	2-3
(一) 四冲程与二冲程	2-3
(二) 筒形活塞式与十字头式	2-4
(三) 可反转与不可反转	2-5
第二节 增压系统的选择	2-5
(一) 增压方式	2-6
(二) 废气涡轮增压系统主要元件的选用	2-23
第三节 二冲程换气方式和气口方案	2-28
(一) 概述	2-28
(二) 常用换气方式的选择	2-31
(三) 气口形状和气口方案的确定	2-35
第四节 燃烧室的选择	2-47
(一) 燃烧过程概述	2-47
(二) 燃烧室的选择	2-52
第二章 主要参数	2-66
第一节 主要性能参数	2-66
(一) 功率	2-66
(二) 平均有效压力	2-68
(三) 转速和活塞平均速度	2-70
(四) 最大爆发压力	2-72
(五) 强化指标	2-76
第二节 主要结构参数	2-78
(一) 气缸数与排列形式	2-79
(二) 气缸直径 $D$ 与活塞行程 $S$	2-79
(三) 气缸中心距 $L_1$	2-82
(四) 曲柄半径与连杆长度比( $\lambda = R/L$ )	2-85
(五) 气缸夹角	2-88
(六) 重量与外形尺寸	2-91
第三章 总体布置	2-96
第一节 总体布置的任务和内容	2-96
第二节 主要运动件和固定件的布置	2-97
第三节 系统及其元件的布置	2-99
(一) 凸轮轴的布置	2-99
(二) 传动轮系的布置	2-109
(三) 燃油系统及其元件的布置	2-110
(四) 调速器的布置	2-113
(五) 进排气管(总管)的布置	2-115
(六) 增压与扫气系统及其元件的布置	2-116
(七) 润滑系统及冷却系统元件的布置	2-122

# 第二篇 总体设计

## 概 论

总体设计是指各个设计阶段（见第一篇第四章设计程序）中有关柴油机总体方面的设计工作。本篇主要阐述柴油机的总体选型、主要参数、总体布置等方面的内容。热力计算与动力计算分别见第三与第四篇；主要零部件和系统的选型及其尺寸、参数的初步选定见第五与第六篇的相应章节，但增压系统仍在本篇第一章中介绍。

总体设计是船用柴油机设计的一个重要部分，它的工作内容贯穿在各个设计阶段之中。

在设计之初，总体设计的任务是：选择柴油机的结构型式，初步选定主要结构参数和那些为确定主要结构所必需的性能参数，对各主要零部件和系统元件的轮廓尺寸进行粗略的估算，然后进行初步的总体布置。

在技术设计阶段中，总体设计的任务是：提出对各主要零部件和系统在结构方面的主要设计要求。根据性能计算结果以及各主要零部件和系统的技术设计，修正初步选定的参数，协调和解决各主要零部件和系统在空间位置上的矛盾，使柴油机能正常地动作，并充分注意到装拆的可能性和维修保养的方便性。根据各零部件和系统技术设计的结果，调整总体布置，绘制较详细的总体布置图。

在施工设计中，总体设计的任务是：进一步协调和解决各零部件和系统在空间位置上的矛盾，保证柴油机在安装和运转时不致发生相互干扰的情况；仔细检查柴油机的装拆和维修保养的可能性和方便性，并设计装拆所必需的专用工具；绘制柴油机的正式总体布置图，以确定整机的外形尺寸；最后制定有关结构方面的技术文件。

总之，船用柴油机设计是从总体设计开始，并由总体设计来结束施工图纸的绘制工作。进行总体设计时必须注意的事项有：

1) 在设计新的柴油机系列产品时，要与已有产品系列互相衔接，使国产船用柴油机产品的型谱日益简化和完善。如果没有经济上和技术上的充分理由，没有社会需要的调查研究，不应该轻率地研制新产品。因为研制一种新产品是要动用大批人力物力的。一旦投入成批生产，还将长期影响生产技术的发展<sup>(1)</sup>。

2) 在柴油机设计过程中，必须努力做好产品系列化和通用化工作，以及零、部件和系统元件的通用化和标准化工作。要以最少的机型满足最广泛的需要，做到军民通用、水陆通用和一机多用；要使零、部件和附件能在多种机型中通用。柴油机的结构、工艺和材料、油料应适合我国一般船用柴油机厂的生产技术水平和国家资源情况，使有较多的工厂能生产所设计的新机型，以利于“大干快上”和备战的要求。在使用、维修和保养方面应与广大工农兵的实际情况相适应。

简化机型品种，统一生产图纸，组织与扩大定型柴油机的生产，并不断地提高定型柴



油机零部件和系统元件的“三化”程度，借以组织好专业化生产，是使当前柴油机生产尽快地满足社会主义革命和建设需要的重要措施。

3) 在新设计的机型中，对于零部件和系统元件应尽可能地采用较成熟的结构，不要集中过多的新结构在一个新设计上。因此，通常在分析研究国内、外较先进的同类型柴油机的基础上，吸取国内、外的较成熟的结构，结合我国生产条件和工艺水平，充分利用研究成果，并发挥设计人员的智慧，设计出既实用又先进的产品。当然，我们要有所创造和发明，凡属新结构的零部件和系统元件，必须预先进行单独的试验或模拟试验，以掌握其特性，做到心中有数。否则，将可能增大样机试验的复杂性和延长新产品的研制周期。

4) 当所设计柴油机的性能指标和要求较高或把握不大，而又无成熟的经验和研究成果可以采用时，必须首先进行单缸和多缸试验机的设计和制造，用它来进行各个单项和专题性试验研究，为多缸机的设计提供可靠的依据（关于试验机方面的内容详见第七篇）。

# 第一章 总体选型

## 第一节 基本型式的选择

柴油机的应用极为广泛，型式繁多。在新设计船用柴油机时，首先必须根据舰船动力装置对柴油机的主要要求（见第一篇），合理地选择柴油机的型式。

本节仅介绍四冲程与二冲程、筒形活塞式与十字头式、机器本身可反转与不可反转三种柴油机基本型式的选择原则。

### （一）四冲程与二冲程<sup>(5)</sup>

一般来说，四冲程的优点是：

1) 在比功率相同的条件下，四冲程机燃烧室周围零部件，如活塞、缸套、缸盖等的热负荷较低，故在防止热疲劳方面比二冲程机有利。

2) 换气过程比二冲程完善，废气排得干净，耗气量较小，充气效率较高。

3) 容易实现废气涡轮增压。由于热负荷较低，故高增压的困难较少。燃油和滑油的消耗率均比二冲程低。

4) 燃油系统的工作条件较好，曲轴每两转它才工作一次，故喷油泵柱塞的平均速度较低，喷油嘴的热负荷也较低，不易因积炭而引起喷油孔堵塞。低负荷时的工作稳定性也较好。

二冲程的优点是：

1) 比功率<sup>●</sup>大，在柴油机的结构参数和运转参数基本相同的情况下，非增压的二冲程机比四冲程机输出功率约大50~70%。由于增压后四冲程机的平均有效压力要比二冲程机大得多，因此二冲程机的输出功率仅略大于四冲程机。一般来说，二冲程机的单位马力重量比四冲程机小。

2) 二冲程机的结构比较简单，零部件数量较少，尤其是回流换气二冲程机，完全省去了进排气阀及其传动装置，不但结构简单，零件数少，而且维修保养方便。

在选用冲程数时，应对具体情况作具体的分析，应尽量发挥和利用各自的优点和长处，来满足不同用途的柴油机的需要。如在要求空气消耗率小的场合下，采用四冲程为宜；在要求比功率大，重量轻，结构简单的情况下用二冲程比较有利。

一般船用大型低速柴油机为了得到较大的单缸功率，皆采用二冲程。由于它的转速很低，故换气质量和燃油系统的工作条件均较易得到保证。至于船用发电柴油机大多数采用转速较高和经济性好的四冲程机。目前生产的高速和中速大功率柴油机大多数为四冲程机，这是因为在长期的生产和使用实践中，已积累了较成熟的经验。更主要的是四冲程机的热负荷低，空气消耗率小，实现高增压来获得高的平均有效压力比较容易，并且燃油和滑油

● 比功率系指 $N_p$ 或 $N_l$ 或 $N_v$ ，详见本篇第二章。

的消耗率也较低。因此,在高、中速柴油机方面,很多工厂都优先发展四冲程高增压机。但是,应当看到,二冲程机采用高增压的潜力是很大的。随着二冲程柴油机研究工作的进展,正在逐步解决受热零部件的热负荷问题;进一步改善着二冲程换气过程和增压系统,创造出高压比、高效率的废气涡轮增压器;克服燃油系统在低负荷时的不稳定性 and 喷油泵柱塞及其凸轮机构在高速运动时的巨大加速度;解决润滑油消耗量较大等问题。上述问题解决后,高、中速大功率二冲程机有可能得到较快的发展。

## (二) 筒形活塞式与十字头式

用沿着导板滑动的十字头联接活塞杆和连杆的十字头式柴油机,它的结构要比筒形活塞柴油机复杂得多。因此,它的高度和重量大大地增加。据统计,在同样功率的条件下,中速筒形活塞柴油机的高度约为低速十字头式柴油机的40%左右,如图2.1.1.1所示。

目前大功率筒形活塞中速机每马力的重量一般不超过14公斤,而大型十字头式低速机每马力的重量约为30~40公斤。当两者功率相等时,机器本身的重量,则筒形活塞中速机的约为十字头式低速机的30~40%。虽然中速机要配上减速齿轮箱等传动装置,但相同功率的、整个动力装置的总重量仍只有十字头式低速机的60~70%。以西德MAN公司的产品为例,一艘载重27,000吨的散装货轮的主机功率大约要12,000马力,若采用一台该公司生产的K7Z78/155E型低速大型十字头式柴油机作主机,则装置的总重量为900吨。如果采用该公司生产的两台筒形活塞四冲程V6V40/54型中速柴油机作主机,功率基本相等,而装置的总重量只有580吨(详见表2-1-1-1)。

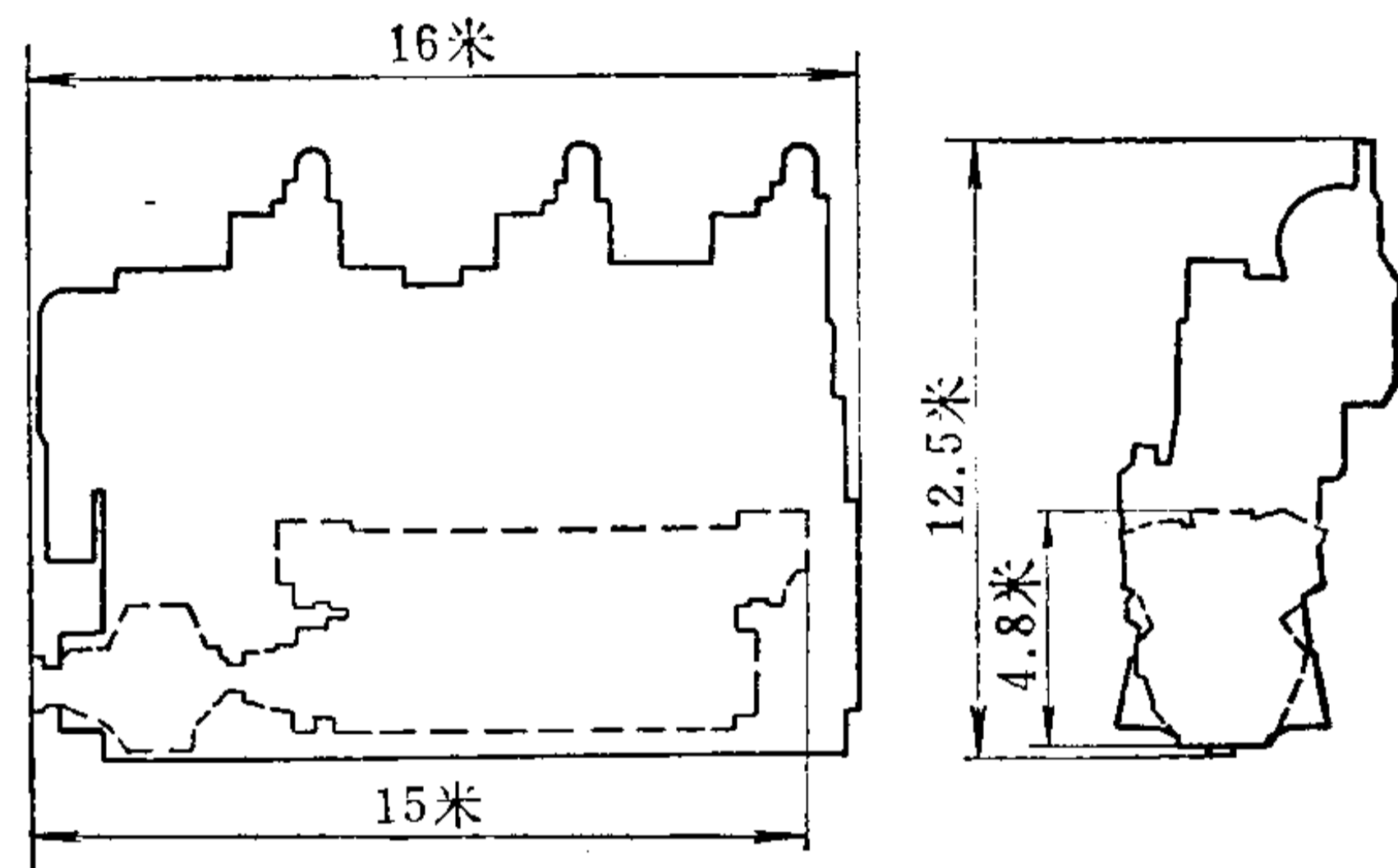


图2.1.1.1 筒形活塞中速机与十字头式低速机外形尺寸的比较

实线—K9Z78/155F型柴油机,17100马力;  
虚线—V9V52/55型柴油机,18000马力。

表2-1-1-1 筒形活塞中速机与十字头式低速机的重量比较(吨)

项 目	两台中速机 2×V6V40/54 (2×12缸)	一台低速大型机 1×K7Z78/155E (1×7缸)
1.主机	152	465
2.减速装置(包括推力轴承及联轴节)	74	—
3.三台柴油发电机	—	44
4.一台备用柴油发电机,两台齿轮传动发电机	20	—
5.轴系	33	45
6.螺旋桨	26	22
7.润滑油、冷却水和燃油系统(泵、热交换器、管系等)	71	81
8.排气管(包括消音器)	17	20
9.起动空气系统	6	17
10.其它(包括蒸汽系统、泊港发电机、平台、备件、电气设备、油舱加热管等)	181	206
合 计	580	900

此外，筒形活塞中速机的底座较十字头式低速大型机的底座轻 35 吨，所以上述中速机双机装置总重量比低速大型机单机装置的总重量共计少 355 吨。因此，如果采用中速机来驱动螺旋桨，不但能够增加船舶载重量，而且可以节约不少金属材料<sup>(2)</sup>。

如有可能采用筒形活塞高速机作主机，则在体积和重量方面的优越性更为显著。

总之，筒形活塞式柴油机的优点是结构简单、紧凑和轻便，广泛用作中小型舰船及各种渔轮、拖轮、工作船等的主机和发电用柴油机，特别适用于渡轮、集装箱船、客船等需要尽可能大的甲板面积的船舶。十字头式低速大型机的突出优点是：运转经济、工作可靠、维护方便，使用寿命长。由于转速低、缸数少，工作时噪音较小。从长期生产和使用的实践经验来看，大吨位的海运船舶用它作主机是合适的<sup>(3)</sup>。各种舰船上的辅柴油机几乎全都采用高速或中速筒形活塞式的。

我国造船工业的发展正迫切需要各种功率的主机和辅机。今后不但要继续生产和发展在海船上已使用多年、积累了丰富经验的低速大型二冲程十字头式柴油机，并使其工作可靠性和运转经济性得到进一步的巩固和提高，而且应该大力研制和加速发展高、中速大功率筒形活塞柴油机<sup>(5)</sup>。高、中速大功率机比低速大型机具有重量轻、尺寸小、功率范围广、通用性强、所需金属材料少、加工设备小、可以整机安装和运输等优点。如果选择得当，只要研制一、二种中、高速机型，便可通过增减气缸数目、采用不同的增压压力和转速等来获得宽广的功率范围。还可通过配用减速箱和并机装置，使推进装置的总功率成倍地增大。这样就可同时解决远洋、近海和江河等各种主要船舶的主机问题。此外还可以军民通用、水陆通用、主辅机通用，大大地简化机型，加速船用柴油机生产的发展，更有利于维护使用、培训轮机人员和备战的需要<sup>(4)</sup>。

### (三) 可反转与不可反转

由于舰船动力装置对于柴油机的要求不同，驱动螺旋桨的船用主机，可分为机器本身可反转与不可反转的两种。通常，低速大型二冲程柴油机直接驱动螺旋桨，都设计成可反转的；而高速大、中功率船用柴油机，机器本身一般都是不可反转的，必须通过后传动装置（见第六篇）来驱动螺旋桨。后传动装置可设计成与柴油机组成一体的，也可以设计成一个独立部件，通过联轴节与柴油机联接。前者结构紧凑、专用性强，而后者的通用性大，能适应多种用途的需要。至于中速柴油机，通常一种机型其机器本身皆有可反转和不可反转的两种，它们的零、部件和附件完全相同，仅在不可反转的机器上不装反转机构和与反转有关的零件。可反转的用作船用主机，不可反转的可用作辅机和其它用途。

## 第二节 增压系统的选择

柴油机采用了增压以后，它的平均有效压力  $p_e$  大幅度地增长。根据 GB722-65 的规定，按增压压力  $p_k$  的大小，把增压分为低、中、高三级。

$p_k < 1.5$  公斤/厘米<sup>2</sup> 为低增压；

$p_k = 1.5 \sim 2.0$  公斤/厘米<sup>2</sup> 为中增压；

$p_k > 2.0$  公斤/厘米<sup>2</sup> 为高增压。

由于增压技术日益发展，GB722-65 的规定已不适应需要，有关部门曾建议把低、中、

高增压的  $p_K$  值分别规定为 1.7 公斤/厘米<sup>2</sup>以下, 1.7~2.5 公斤/厘米<sup>2</sup>和 2.5 公斤/厘米<sup>2</sup>以上。近年来又出现了所谓“超高增压”。一般认为, 增压压力超过 4 公斤/厘米<sup>2</sup>时称为“超高增压”。

随着  $p_e$  和  $p_K$  的不断增大, 柴油机的最大爆发压力、循环温度以及排气温度也随之不断增大, 使柴油机的机械负荷和热负荷增大。因此, 在设计增压柴油机(尤其是高增压柴油机)时, 要特别注意机械负荷和热负荷问题, 必须采取适当的措施, 保证柴油机的机械负荷和热负荷控制在允许范围之内。

此外, 增压系统选择得是否合理, 对增压柴油机能否正常工作具有极大的影响。不同类型的船舶和柴油机, 对增压系统的要求不尽相同, 这在选择增压系统时必须充分注意。一般说, 增压系统必须满足以下要求:

1) 保证柴油机在各种工况(启动、低负荷、全负荷、短时间超负荷以及突然加减速, 对于潜艇柴油机还有脉动高背压等工况)下都能正常工作, 即使柴油机获得正常工作所需的进气压力  $p_s$ 、空气量  $G_s$  和进气温度  $T_s$ 。

2) 增压器、进排气管道、中冷器等增压系统元件之间能良好配合, 具有较高的系统效率。

3) 工作可靠, 造价低, 元件尽可能简单紧凑, 便于使用维修。

4) 噪音小, 特别是舰艇用柴油机, 要求有较小的噪音。

5) 尽可能考虑系列化、标准化和通用化。

### (一) 增压方式

1. 机械增压 增压器(废气涡轮增压器除外)由柴油机曲轴传动的称为机械增压, 通常用离心式压气机、罗茨泵或螺杆泵。

机械增压的优点是: 系统比较简单, 对脉动高背压不敏感, 增压器与柴油机比较容易配合, 低转速扭矩较大, 加速性能较好, 增压器的造价低。缺点是: 柴油机要消耗部分功率来带动增压器, 因而经济性较差, 而且随着  $p_K$  的增高, 消耗功率的比例急剧地增加, 所以  $p_K$  不能太高。

由于机械增压的经济性较差, 增压比提不了太高, 因此在船用柴油机上较少采用(对新设计的水面船舶基本上已不采用)。但是, 由于它的加速性好, 对高背压不敏感, 所以它至今仍然是潜艇柴油机采用的主要增压方式。

在机械增压中, 当所采用的增压器种类不同时, 对柴油机性能的影响也将不同。

图 2.1.2.1 是离心式压气机和罗茨泵的压比  $\pi_K$  随转速  $n$  变化的情况。很明显, 离心式压气机的  $\pi_K$  对转速的反应比较敏感, 它随着转速的降低而急剧地下降。而罗茨泵则比较平缓。这反应到柴油机输出扭矩(或  $p_e$ )上, 则表现为: 当柴油机低速运行时, 带罗茨泵的扭矩(或  $p_e$ )比

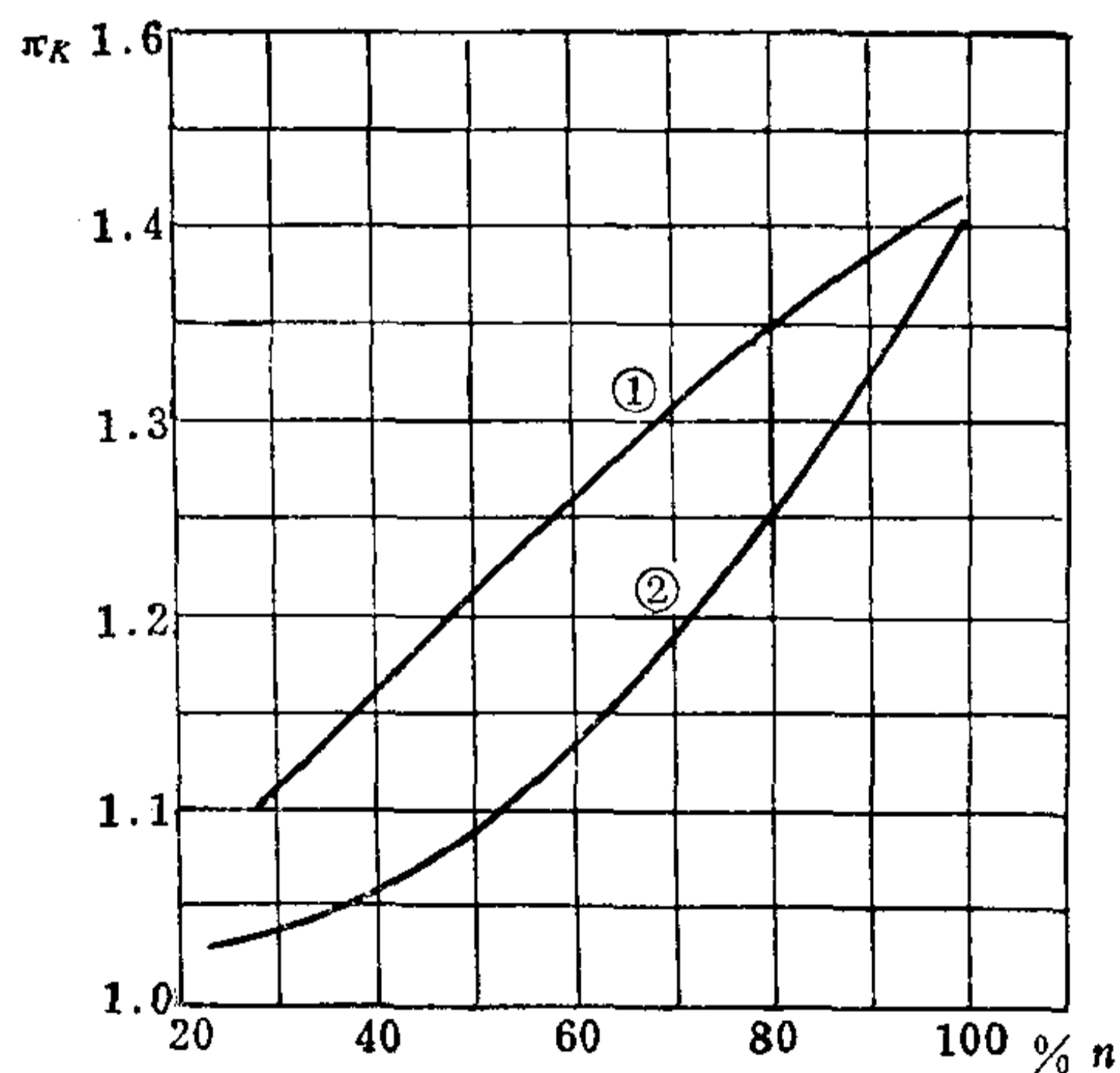


图 2.1.2.1 离心式压气机和罗茨泵的压比随转速变化的特性曲线  
①—罗茨泵; ②—离心式压气机。

带离心式压气机的大。但是，在高转速时离心式压气机能够得到比较高的压比，所以高负荷时的经济性比罗茨泵好。

至于螺杆泵，它和罗茨泵一样同属于容积式压气机，它的特性和罗茨泵相近，但是它的效率比罗茨泵高，在高转速时能够得到比罗茨泵高得多的压比。因此，目前已有些柴油机采用螺杆泵作增压器，如国产 6E390ZC 型柴油机（图 2.1.2.2）。

**2. 自由废气涡轮增压** 自由废气涡轮增压的最突出的优点是它能够最有效地提高柴油机的功率，同时还能改善柴油机的经济性， $p_k$  和  $p_i$  都可达到相当高的水平。因此，自由废气涡轮增压在船用柴油机中得到最广泛的应用。但是，在某些特殊船舶（如快艇、水翼艇、渔轮等）上采用自由废气涡轮高增压，往往有启动和低负荷性能不好的问题，即在低负荷时出现换气欠佳，扭矩不足等缺点（在定压系统中，情况更严重）。同时，自由废气涡轮增压对脉动高背压不太适应，加速性能较差，废气涡轮增压器的制造成本也较高。

自由废气涡轮增压主要有两种形式——定压增压和脉冲增压。

在自由废气涡轮增压中，增压器是依靠柴油机排气所提供的能量来工作的。

柴油机排气的可用能量，是由柴油机废气的能量（约占燃料燃烧所发出热量的 23~40%）、扫气空气的能量和活塞对废气的推动能（二冲程柴油机没有活塞推动能）等部分组成。废气涡轮增压柴油机的理论示功图见第三篇第一章图 3.1.1.2。

柴油机排气是以脉冲能量 ( $E_1$ ) 和等压能量 ( $E_2$ ) 两种形式向废气涡轮提供能量的。

废气（包含一部分扫气空气）从开始排气的压力  $p_b$  膨胀到涡轮前压力  $p_T$ ，主要是以脉冲能量  $E_1$  的形式表现出来，即图 3.1.1.2 中的面积 5-b-e-5。

另一部分能量是从  $p_T$  膨胀到涡轮后的压力  $p_{T_0}$ （比大气压  $p_0$  略高），以等压能量  $E_2$  的形式表现出来，即图 3.1.1.2 中的 2-4-e'-f'-2 面积。

由于废气涡轮增压器对这两部分能量利用情况不同，就产生了两种不同的增压形式，即定压增压和脉冲增压。

**(1) 定压废气涡轮增压** 定压增压的主要特点是只利用排气的等压能量，而很少利用脉冲能量。它的结构特点是所有各缸的排气管都接在一根排气总管上，排气总管容积较大，如图 2.1.2.3 所示。

由于排气总管容积较大，废气在其中膨胀和扩散，并很快地稳定下来，故排气压力波动较小。废气以比较稳定的速度和压力进入涡轮，涡轮工作较稳定，效率较高。

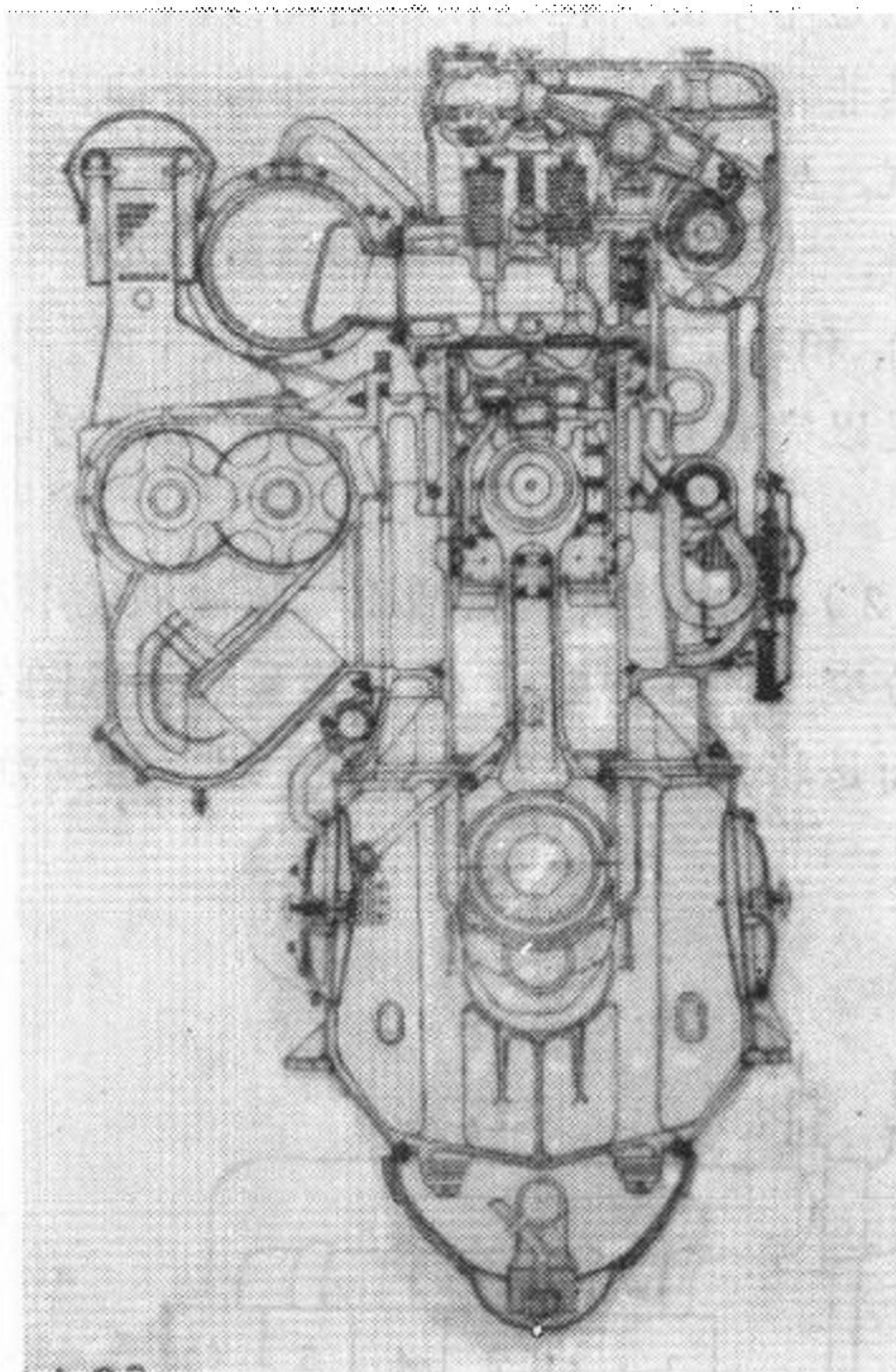


图 2.1.2.2 6E390ZC 型柴油机的增压系统

这种增压只利用了排气中的等压能量，而脉冲能量则由于排气时气口（阀）的严重节流，以及在排气管中膨胀及形成涡流而大部分损失了。损失的部分脉冲能变成热能，使排气管中的温度略有增加，使等压能  $E_2$  也略有增加。

为了在定压增压柴油机中得到良好的扫气，必须使扫气压力  $p_s$  高于排气管中的压力  $p_r$  ( $p_T$ )，所以一般定压增压的  $p_K/p_e$  值比较大。在柴油机全负荷或较高负荷下，要做到这一点是不难的。但是在刚启动或低负荷时，要使  $p_s > p_T$  却较困难。特别在二冲程柴油机中是非常困难的，因为在二冲程柴油机中，一方面是靠压力差  $\Delta p = p_s - p_T$  来扫气及强制排气，要求增压器产生较高的  $p_K$  和较多的空气量；另一方面由于定压增压没有利用脉冲能量，本来涡轮所得到的能量就较少，在低负荷时，涡轮在偏离设计工况下工作，涡轮效率  $\eta_T$  和增压器总效率  $\eta_{TK}$  都大大下降。因此，涡轮和压气机的功率难于平衡，使  $p_K$  达不到足以完善扫气的数值。为此，必须另设辅助鼓风机以满足启动和低负荷时扫气的需要。

(2) 脉冲废气涡轮增压 脉冲涡轮增压的特点是既利用排气的等压能量  $E_2$ ，也利用一部分废气的脉冲能量  $E_1$ ，其系统示意图如图 2.1.2.4 所示。它没有容积很大的排气总管，而是将各缸排气管分成若干组，组成排气管分支系统。

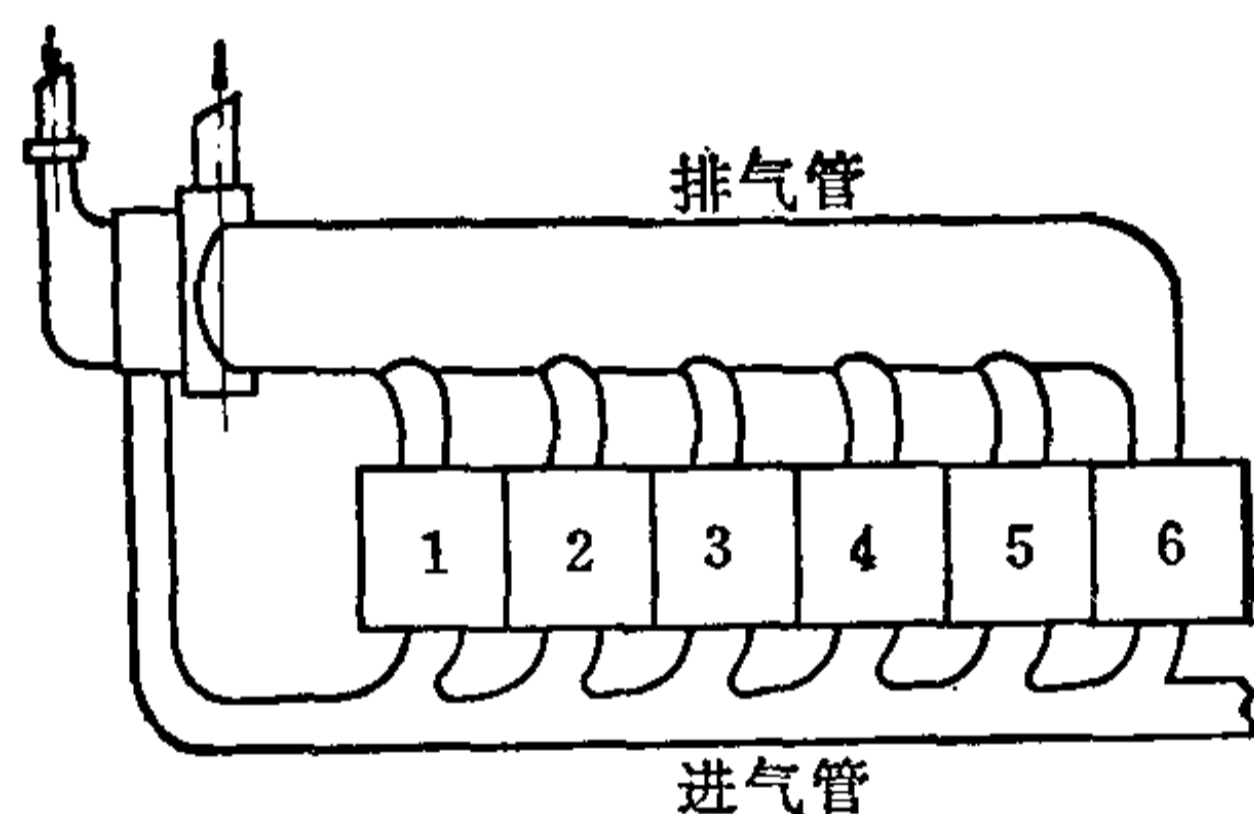


图2.1.2.3 定压增压系统示意图

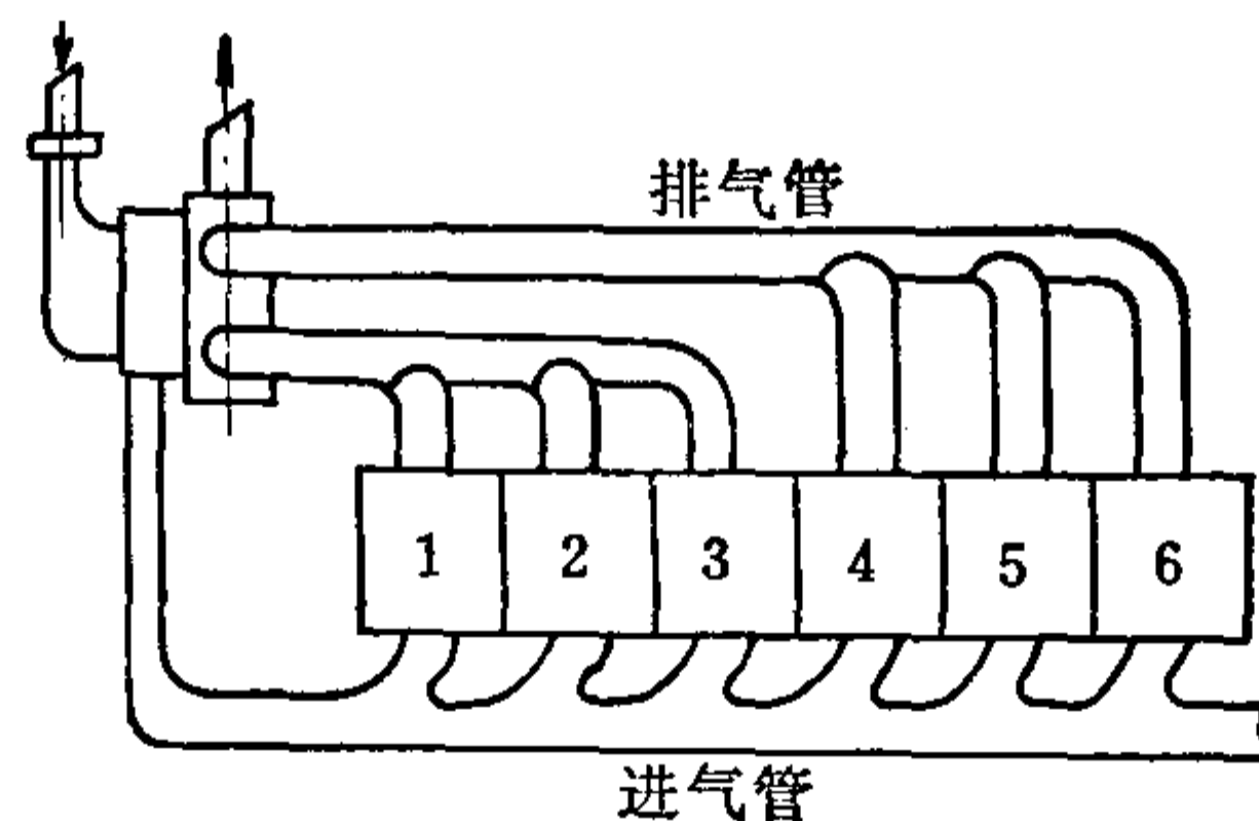


图2.1.2.4 脉冲增压系统示意图

实现脉冲增压的关键在于如何有效地利用废气的脉冲能量。在初排气阶段，排气阀（口）开启面积不大，而气缸和排气管之间的压力差很大，所以废气以极高的速度冲入排气管并产生强烈的扰动，造成严重的节流损失。为了减少节流损失，必须使气阀（口）通流面积尽可能大，开启尽可能快。显然，排气管中的压力愈迅速的接近气缸中的压力，即脉冲压力波形成得愈快愈高，则脉冲能量的利用愈有效。

排气管容积对脉冲压力波的影响也很大。如果排气管的容积大，则脉冲能量就损失了。如果排气管容积小，则排气管内瞬时压力将接近气缸内的压力，迅速形成压力波。因此，排气管应短而细，且拐弯要少，内表面尽可能光滑，以减少损失。

由于有上述的种种损失，即使采用了脉冲增压，也不可能利用全部脉冲能量  $E_1$ ，而只能利用其中的一部分，估计约可以利用 50%，即脉冲增压所能利用的总能量为  $(E_2 + 0.5E_1)$ 。为了衡量脉冲能量的利用程度现引用“脉冲能量利用系数”  $K_E$

$$K_E \approx \frac{E_2 + 0.5E_1}{E_2} = 1 + \frac{0.5E_1}{E_2}$$

$K_E$  愈大, 表示可利用的脉冲能量的百分数愈高。只有在  $K_E$  大于一定数值时, 采用脉冲增压系统才有意义。

由于脉冲增压能够利用一部分废气脉冲能量, 故涡轮虽然在不稳定工况下工作 (因为  $p_T$ 、 $T_T$  有强烈的波动), 但仍能保持较高的涡轮功率  $N_T$ , 因而有利于涡轮与压气机之间的功率平衡。此外, 当柴油机在换气时, 正好处于排气管中压力最低的阶段 (脉冲波谷), 扫气压力差较大, 故有利于换气, 即使柴油机在低负荷时也是如此。因此, 在利用脉冲能量比较充分的直流换气二冲程柴油机中, 就不必另设辅助鼓风机。

(3) 定压增压和脉冲增压的比较及应用范围 定压增压和脉冲增压, 究竟采用哪一种好, 现从以下几个方面进行比较:

a. 废气能量的利用 脉冲增压不但能利用等压能量, 而且能够有效的利用脉冲能量, 在涡轮增压器和排气系统设计正确的情况下, 脉冲能量中有 40~50% 可以得到利用, 所以增压器工作能力较大, 这在低增压中尤为突出。

定压增压只利用了废气中的等压能, 大部分脉冲能损失在节流中。但是, 随着增压压力  $p_K$  的提高, 排气管中的平均压力增高, 等压能的百分比也增加, 而脉冲能量的百分比则下降, 即脉冲能量利用系数  $K_E$  下降。有人曾作过粗略计算,  $K_E$  随  $p_K$  的变化规律如图 2.1.2.5 所示。图中的具体数值不一定适用于所有机型的柴油机, 但实践证明, 曲线的趋势是正确的。当  $p_K$  介于 1.3~2.5 公斤/厘米<sup>2</sup> 之间, 特别是低于 2.0 公斤/厘米<sup>2</sup> 时,  $K_E$  值比较高, 此时采用脉冲增压要比定压增压优越很多。

b. 增压系统的布置 对于脉冲增压系统, 为了有效利用脉冲能量, 必须对排气管进行严格的分组, 并要求排气管尽可能短, 各支管的长度尽可能一样或相差不要太大, 否则将会影响脉冲能量的利用和涡轮增压器的性能。这就给多列多缸 (如 V 型、W 型、X 型、△ 型等) 和缸数不是三的倍数的机型在增压系统布置上带来一定困难, 而且使用维修也很不方便。此外, 脉冲增压要求每支排气管所接气缸数不能超过三缸, 所以就使得涡轮增压器数目增多。

对于定压增压系统, 排气管只起集气和稳压作用, 只需设置足够大的排气总管就可以了, 而涡轮增压器的布置也不受什么限制, 增压器数目可以减少, 如脉冲增压的 6RD76 型柴油机用两只废气涡轮增压器 (每三缸接一只增压器), 而定压增压的 6RND76 机只用一台增压器。

c. 涡轮的工作性能 在脉冲增压中, 废气是在不稳定的情况下进入涡轮的, 涡轮效率  $\eta_r$  较低。假使采用多进口废气涡轮 (即几根排气管共用一只增压器), 使涡轮喷嘴环成为部分进气, 这又会使  $\eta_r$  进一步降低。

在定压增压中, 由于废气是在等压下进入涡轮, 气流压力和速度变化很小。此外, 涡

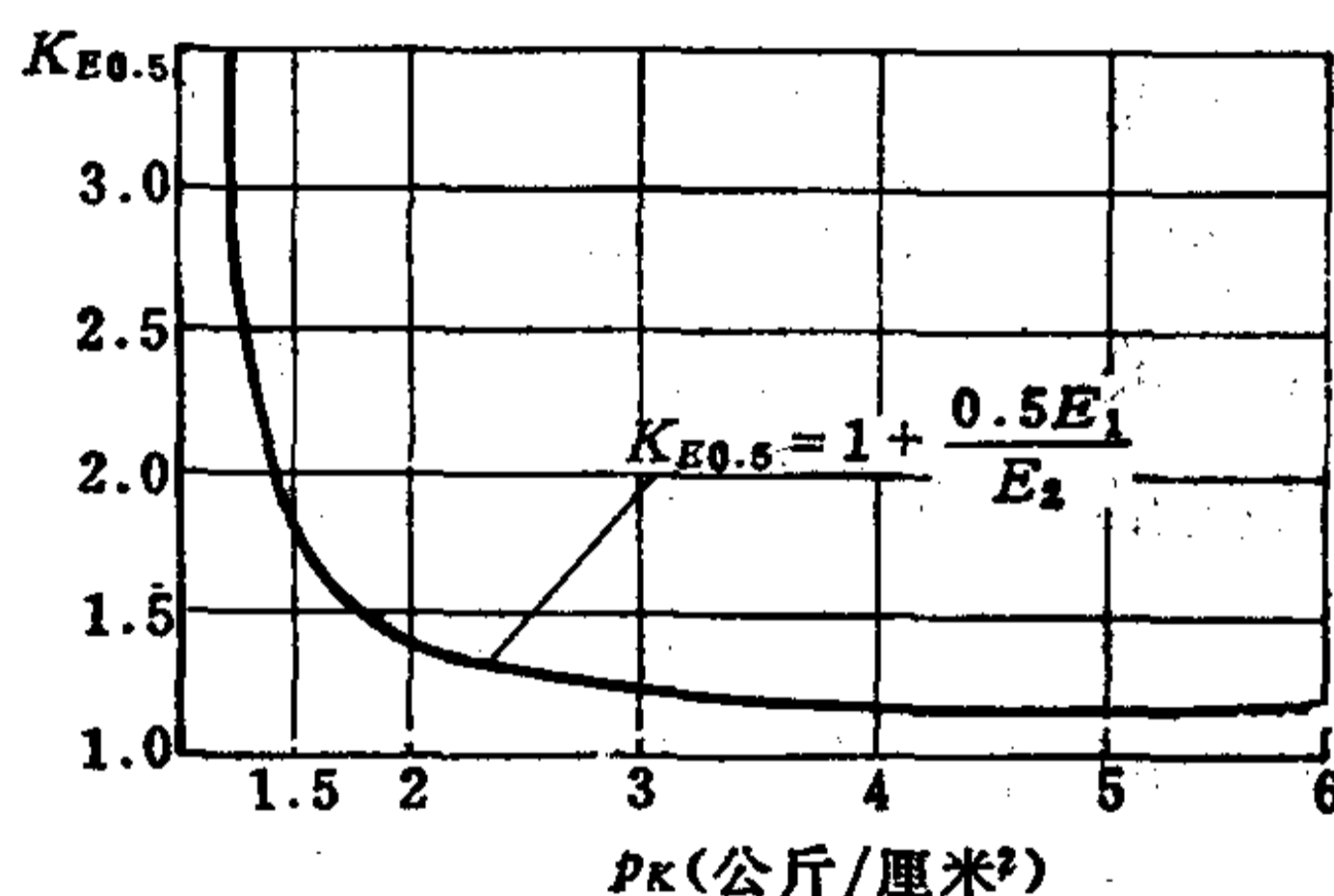


图2.1.2.5  $K_E$  与  $p_K$  的关系  
( $E_1 = 50\%$ ,  $t_T = 350^\circ\text{C}$ )



轮喷嘴环总是全进气，所以  $\eta_T$  较高。显然，在这一方面定压增压比脉冲增压有利。

d. 其它方面 除上述各点外，由于布置上的要求，脉冲增压器离排气口较近，涡轮叶片容易污损。另外，脉冲增压对气口（阀）的正时和堵塞反应较为敏感，而定压增压则不大敏感。

根据上述分析，随着  $p_K$ 、机型及用途的不同，所采用的增压方式也有所不同。当  $p_K$  介于  $1.3 \sim 2.0$  公斤/厘米<sup>2</sup> 之间时，脉冲增压的利大于弊。所以在中低增压机型中，绝大多数采用脉冲增压，如国产 9ESDZ43/82 B、7ESDZ75/160 A、12V180ZC、6135GZ 和 9ESDZ58/100 等机型均采用脉冲增压。

当  $p_K > 2.0$  公斤/厘米<sup>2</sup> 时，特别当  $p_K$  超过  $2.5$  公斤/厘米<sup>2</sup> 以后，究竟采用何种增压系统好，就得根据不同类型的柴油机、结合实际情况来决定。如回流换气二冲程低速柴油机，由于它的利用废气能量和换气条件较差，在高增压时，采用脉冲增压的优点就不那么显著，反而使增压系统复杂化。因而，高增压的回流换气二冲程低速柴油机多采用定压增压系统，用辅助泵来补偿启动和低负荷时的能量不足，如国产 6ESDZ78/155、6E350，Sulzer 的 RND 和 RNDM 系列，MAN 的 KSZ 系列及 Fiat 等型柴油机用定压增压系统。

对于直流换气二冲程低速机，由于它对废气能量的利用和换气条件均较好，在采用脉冲增压以后可望实现单纯的自由废气涡轮增压（即不用辅助泵），而且还可改善启动和低负荷性能。所以，即使在高增压时，也依然比较多地采用脉冲增压，如国产的 6ESDZ75/160 B、丹麦的 B&W 和日本的 UEC 等都是采用脉冲增压。但也有个别的此类机型的柴油机改用定压增压，如瑞典 Götaverken 的高增压低速机采用定压增压系统。

对于中高速柴油机来说，它们多用于舰艇、机车和电站上，所以对启动、低负荷和加速性能都有较高的要求，因而这类机型在高增压时，依然比较多地采用脉冲增压。如国产 12V180G、12V240ZL、18VE390 等机型，虽然  $p_K$  都很高，但都依然采用脉冲增压。但某些缸数特别多的高速高增压柴油机，由于布置上的困难而采用了定压增压系统，同时采取某些措施来解决启动、低负荷和加速性能不好的问题。如 48E150（48缸，二冲程）和 42160（42缸，四冲程）型柴油机均采用定压增压系统。为了解决启动、低负荷和加速性能不好的问题，它们的废气涡轮增压器和曲轴都有机械联系。

总之，究竟在什么情况下，采用何种增压方式，要针对各种柴油机的具体情况作具体分析，不能一概而论。表 2-1-2-1 列出一些柴油机的增压方式。

**3. 脉冲转换增压和多脉冲增压** 从对废气涡轮增压的两种基本方式——定压增压和脉冲增压的分析比较可以看出，定压增压的主要特点是：废气从排气口至废气涡轮的这段能量传递过程中能量损失大，但在增压器内的损失小。而脉冲增压则相反，废气从气缸出口至增压器的能量传递损失小，但在增压器内的损失大。特别在缸数不是三的倍数的柴油机上，由于排气管分组难以合理化，致使增压器效率大大降低，这就限制了脉冲增压方式在增压度较高、缸数不是三的倍数的柴油机上的应用。随着科学技术的发展，近十多年来，出现了一些兼顾定压和脉冲增压优点的新型增压方式，脉冲转换增压和多脉冲增压就是其中的两种。

(1) 脉冲转换增压 脉冲转换器的结构与工作原理图如图 2.1.2.6 所示。A 及 B 是从一个气缸或排气不相干扰的两个气缸引出来的排气管 ( $F_R$ )。这两根排气管通过两根收缩