

高等学校教材

现代柴油发电机组 的应用与管理

▶ 苏石川 元广杰 杨宗明 主编



化学工业出版社

教材出版中心

高等学校教材

现代柴油发电机组 的应用与管理

苏石川 元广杰 杨宗明 主编



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

现代柴油发电机组的应用与管理/苏石川,元广杰,杨宗明
主编. —北京:化学工业出版社,2005.6

高等学校教材

ISBN 7-5025-7400-X

I. 现… II. ①苏…②元…③杨… III. 内燃发电机-机
组-高等学校-教材 IV. TM314.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 070866 号

高等学校教材

现代柴油发电机组的应用与管理

苏石川 元广杰 杨宗明 主编

责任编辑:程树珍 陈丽

文字编辑:李玉峰

责任校对:蒋宇

封面设计:潘峰

*

化学工业出版社
教材出版中心 出版发行

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010) 64982530

(010) 64918013

购书传真:(010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 20½ 字数 561 千字

2005年8月第1版 2005年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-7400-X

定价:35.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

前 言

作为交流供电的常用、备用和应急发电用的柴油发电机组以其灵活、方便、稳定的特点被广泛地应用于船舶、通信等国民经济众多领域。特别是近年来，由于经济快速发展和资源分布不均衡而造成的中国电力紧缺现象，使柴油发电机组在国民经济发展中的作用更为显现。随着“节能和环保”理念的增强和现代化设计、制造和控制技术的飞速发展，使现代柴油发电机组具备了更高的可靠性、稳定性、强化程度和自动操控性能，实现了机组的低油耗、低排放、低噪声。

全书共分九章，其主要内容如下：第1章，概述；第2章，柴油发电机组的结构、原理；第3章，柴油发电机组电气及控制系统；第4章，自动化柴油发电机组分级及控制；第5章，现代柴油发电机组排放与噪声控制；第6章，柴油发电机组的安装与调试；第7章，几种典型现代化柴油发电机组；第8章，柴油发电机组的维护和管理；第9章，柴油发电机组并联运行。本书以现代柴油发电机组为对象，着重介绍柴油发电机组的机、电、控制的基本原理及其应用，同时介绍了应用于先进柴油发电机组的电子管理系统及其远程控制等。

本书由江苏科技大学和中高动力科技股份有限公司合作编写。由苏石川、元广杰、杨宗明主编，苏石川统稿。第1、3、5、9章由苏石川编写，第4、7、8章由元广杰编写，第2、6章，第4.1节等由杨宗明编写。其他参编人员有：施庆哲、熊善文、谭海枫、宾建军等。浙江大学严兆大教授为本书的编写提出了许多宝贵意见，在此深表谢意。同时还得到了MTU亚洲（中国）有限公司、大宇综合机械株式会社、利莱森玛（福州）发电机有限公司、上海马拉松革新电气有限公司的大力支持并为本书提供了大量的技术资料，在此对他们表示衷心感谢。

本书可供各级相关设计、工程技术和管理人员使用，是各类通信、舰船、自备、移动和应急电站等技术人员的重要参考，也适用于作内燃机发供电、轮机管理及自动化、电力工程及自动化、通信电源等专业的大中专院校及相关人员的培训教材。

由于编者水平有限，书中难免出现错误，恳请广大读者多提宝贵意见。

编 者

2005年3月

目 录

第一章 概述	1
第一节 柴油发电机组的组成和特点	1
一、机组的组成与分类	1
二、机组的特点	2
第二节 柴油发电机组的主要性能指标	3
一、机组的主要性能指标	3
二、机组的功率标定与环境修正	4
三、柴油机和发电机的功率匹配	6
第二章 柴油发电机组的结构、原理	7
第一节 柴油机	7
一、柴油机的基本工作原理与技术参数	7
二、主要运动部件	12
三、固定机件	18
四、柴油机的换气与换气机构	21
五、增压系统	29
六、燃油的喷射与燃烧	39
七、润滑与冷却系统	62
八、柴油机调速	68
第二节 无刷同步发电机	74
一、无刷同步发电机的结构	74
二、同步发电机的运行原理	81
第三章 柴油发电机组电气及控制系统	90
第一节 电启动各部件的作用与结构	90
一、直流电动启动	90
二、压缩空气启动	96
三、同步发电机的继电保护	99
第二节 柴油发电机组常用传感器的结构和功能	108
一、传感器的组成	108
二、传感器的分类	109
三、传感器的名词术语	109
四、自动化柴油发电机组常用传感器	110
第三节 柴油机的电子管理系统	112
一、电子管理系统的特征	112
二、MDEC 控制系统的结构	113
三、控制功能	115
四、电控单元 ECU 信号输入电路	121
第四节 同步发电机恒压励磁系统	122
一、电抗器移相式相复励励磁装置	122
二、电容器移相式相复励励磁装置	124
三、磁耦合电抗移相式相复励自励恒压装置	124
四、可控相复励自励恒压装置	125

五、可控硅自励恒压装置	127
六、三次谐波励磁恒压装置	133
七、DVR2000E 型自动电压调节器	139
第四章 自动化柴油发电机组的分级与控制	146
第一节 自动化柴油发电机组的分级	146
一、机组的分级	146
二、自动化机组的特点	146
第二节 柴油发电机组自动控制理论概述	148
一、PLC 的组成与中央处理器	148
二、存储器	150
三、输入/输出接口	151
四、其他部件	153
五、PLC 的主要技术指标	154
第三节 柴油发电机组自动控制的应用	155
一、柴油发电机组的启动/停车的自动控制	155
二、典型调速系统的速度控制器 (DWC-2000 系列)	158
三、柴油发电机组的自动控制	165
四、基于多串口通信的柴油发电机组远程监控应用	168
第五章 现代柴油发电机组排放与噪声控制	172
第一节 柴油机的排放与控制概述	172
一、有害排放物的生成及影响因素	173
二、柴油机及其机组的排放标准概述	179
三、现代柴油机排放控制及其发展趋势	181
第二节 柴油发电机组的噪声及控制	184
一、柴油发电机组的主要噪声源	184
二、噪声及其评价	188
三、隔声与吸声	192
四、柴油发电机组的噪声控制方法	205
第三节 柴油发电机组的机房设计	209
一、柴油发电机组机房的设计指导原则	209
二、柴油发电机组机房降噪工程设计与应用	210
第六章 柴油发电机组的安装与调试	215
第一节 发电机组的安装	215
一、总体布置	215
二、基础	215
三、机组的安装	216
第二节 机房设备的安装	217
一、机房的布置	217
二、柴油机管路的安装	217
三、控制屏的安装	220
第三节 柴油发电机组的调试	221
一、柴油机的启封	221
二、机组试机前的检查	221
三、新装柴油发电机组的磨合与调试	222
第七章 几种典型现代化柴油发电机组简介	227
第一节 柴油发电机组的设计	227

一、先进的机械设计	227
二、先进的电子电气控制系统优化设计	229
第二节 机组的主要性能特点	229
一、典型机组的特点	229
二、部分机组的主要性能数据	232
第八章 柴油发电机组的维护与管理	239
第一节 柴油发电机组的开机及运行操作规程	239
第二节 柴油机及增压系统的维护与管理	239
一、柴油机及增压系统的维护规程	239
二、柴油机及增压系统常见的故障诊断与排除	240
第三节 同步发电机的维护与管理	247
一、发电机及其绕组的维护与管理	247
二、发电机常见故障的诊断与排除	251
第四节 发电机组的维护与管理	253
一、机组的维护	253
二、机组常见故障与排除方法	254
第五节 并联运行机组运行不稳定的综合检查分析方法和调整	255
一、振荡原因检查	255
二、并联运行柴油发电机组不稳定性的主要改善措施	256
第九章 柴油机发电机组并联运行	258
第一节 柴油机发电机组并联运行的特点及主要问题	258
一、发电机组并联运行的特点	258
二、发电机组并联运行的主要问题	261
第二节 并联运行机组的有功功率和无功负载的分配	266
一、并联运行发电机组有功功率分配及其差度计算	266
二、并联运行发电机组的无功负载均衡分配	271
三、无功电流的自动分配	279
四、不可控自励恒压发电机的无功负载分配	283
第三节 柴油发电机组并联运行的振荡及其改善	295
一、柴油发电机组并联运行振荡的物理概念	295
二、并联运行的柴油发电机组稳定性的矢量分析方法	297
三、柴油机对于并联运行柴油发电机组稳定性的影响及其调整	304
四、发电机的阻尼和调压系统对功率振荡的影响	309
第四节 柴油发电机组并联运行的自动控制	312
一、柴油发电机组的并车原理	312
二、自动准同步并车装置基本功能	313
三、基本环节介绍	313
参考文献	318

第一章 概 述

作为交流供电常用、备用和应急发电用的柴油发电机组被广泛地应用于船舶、通信等国民经济的众多领域。近年来，由于经济发展和资源分布不均衡而造成的电力紧缺，特别是南方沿海地区电力紧缺现象的突出，使柴油发电机组在国民经济发展中的作用更为显现。从20世纪60年代使用手启动、有人值守的普通机组，70年代研制成功自启动机组、无人值守机组，80年代研制成功无人值守机组、微型计算机控制的自动化机组，到90年代开始低排放、低噪声机组的应用研究，柴油发电机组的技术装备水平在不断地提高。现代柴油发电机组具有灵活、方便、自动化程度高、噪声小和排放低等特点。随着科学技术的不断发展，一些新技术、新成果的应用使得现代柴油发电机组具有更高的强化性、可靠性、稳定性及良好的排放特性等，不断满足现代社会对其更高的要求。

第一节 柴油发电机组的组成和特点

一、机组的组成与分类

(一) 组成

柴油发电机组是内燃发电机组的一种，由柴油机、三相交流同步发电机和控制系统（包括自动检测、控制及保护装置）等三部分组成。

移动式柴油发电机组的柴油机、发电机和控制系统（箱）全部组装在一个公共底座上；而功率较大的固定式机组的柴油机和发电机装在由钢铁焊接而成的公共底座上，并固定在专门设计的钢筋混凝土基地上，这种机组的控制系统和燃油箱等设备通常与机组分开安装。

柴油机的飞轮壳与发电机前端盖轴向采用凸肩定位方式直接连接构成一体，并采用圆柱形的弹性联轴器由飞轮直接驱动发电机旋转。这种连接方式由螺钉固定在一起，使两者连接成一体，保证了柴油机的曲轴与发电机转子的同心度在规定范围内。

为了减小噪声，机组一般需安装专用消声器，特殊情况下需要对机组进行全屏蔽。为了减小机组的振动，在柴油机、发电机、水箱和电气控制箱等主要组件与公共底架的连接处，通常装有减振器或橡皮减振垫。

(二) 分类与功能

柴油机发电机组类型很多，按其结构形式、控制方式和保护功能等不同，可分为下述几种类型。

1. 基本型机组

这类机组最为常见，由柴油机、封闭式水箱、油箱、消声器、同步交流发电机、励磁电压调节装置、控制箱（屏）、联轴器和底盘等组成。机组具有电压和转速自动调节功能。通常能作为主电源或备用电源。

2. 自启动机组

该机组是在基本型机组基础上增加自动控制系统。它具有自动化的功能。当外部电源（市电）突然停电时，机组能自动启动、自动进行开关切换、自动运行、自动送电和自动停车等功能；当机油压力过低、机油温度或冷却水温过高时，能自动发出声光告警信号；当机组超速时，能自动紧急停机进行保护。

3. 微机控制自动化机组

机组由性能完善的柴油机、三相无刷同步发电机、燃油自动补给装置、机油自动补给装置、冷却水自动补给装置及自动控制屏组成。自动控制屏采用可编程自动控制器 PLC 控制，除了具有自启动、自切换、自运行、自投入和自停机等功能外，还配有各种故障报警和自动保护装置。此外，它通过 RS232 通信接口，与主计算机连接，进行集中监控，实现遥控、遥信和遥测，做到无人值守。

二、机组的特点

(一) 柴油发电机组的特点

柴油发电机组是集柴油机、发电机和自动控制等多个学科领域交叉的技术。柴油发电机组是以柴油机为动力的发电设备，它与常用的蒸汽发电机组、水轮发电机组、燃气涡轮发电机组、原子能发电机组等发电设备相比较，具有结构紧凑、占地面积小、热效率高、启动迅速、控制灵活及燃料储存方便等特点。

1. 单机容量等级多

柴油发电机组的单机容量从几千瓦至几万千瓦，目前国产机组最大单机容量为几千千瓦。用作船舶、邮电、高层建筑、工矿企业、军事设施的常用、应急和备用发电机组的单机容量，可选的容量范围大，具有适用于多种容量用电负荷的优势。

采用柴油发电机组作为应急和备用电源时，可采用一台或多台机组，装机容量根据实际需要灵活配置。

2. 配套设备结构紧凑、安装地点灵活

柴油发电机组的配套设备比较简单、辅助设备少、体积小、重量轻。与水轮机组需建水坝、蒸汽机组需配置锅炉、燃料储备和水处理系统等比较，柴油发电机组的占地面积小、建设速度快、投资费用低。

常用发电机组通常采用独立配置方式，而备用发电机组或应急发电机组一般与变配电设备配合使用。由于机组一般不与外（市）电网并联运行，同时机组不需要充足的水源 [柴油机的冷却水消耗量为 $34\sim 52\text{L}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，仅为汽轮发电机组的 $1/10$]，且占地面积小，所以机组的安装地点灵活。

3. 热效率高，燃油消耗低

柴油机是目前热效率最高的热力发动机，其有效热效率为 $30\%\sim 46\%$ ，高压蒸汽轮机约 $20\%\sim 40\%$ ，燃气轮机约 $20\%\sim 30\%$ 。因此柴油发电机组的燃油消耗较低。

4. 启动迅速、并能很快达到全功率

柴油机的启动一般只需几秒钟，在应急状态下可在 1min 内达到全负荷运行；在正常工作状态下约在 $5\sim 30\text{min}$ 内达到全负荷，而蒸汽动力装置从启动到全负荷一般需要 $3\sim 4\text{h}$ 。柴油机的停机过程也很短，可以频繁启停。所以柴油发电机组很适合作为应急发电机组或备用发电机组。

5. 维护操作简单

所需操作人员少，在备用期间的保养容易。

6. 柴油发电机组的建设与发电的综合成本最低

柴油发电机组中的柴油机一般为四冲程、水冷、中高速内燃机。燃用不可再生的柴油或在柴油中掺加可再生能源如乙醇、生物柴油、压缩天然气 (CNG) 和液化石油气 (LPG) 等以节省能源和保护环境。柴油机燃烧后的排放物主要为 NO_x 、CO、HC、PM (颗粒)，污染环境，而且排气噪声较大。尽管如此，柴油发电机组与水力、风力、太阳能等可再生能源发电以及核能、火力发电相比较，具有非常明显的优势：柴油发电机组的建设与发电的综合成本是最低的。

(二) 柴油机的技术特点

用于发电的柴油机大多数为通用或其他用途柴油机的变型产品，它具有以下特点。

i. 由于交流电频率固定为 50Hz, 因此机组的转速只能是 3000r/min、1500r/min、1000r/min、750r/min、500r/min、375r/min 和 300r/min, 以 1500r/min 居多。

ii. 柴油发电机的输出电压为 400/230V (大型机组为 6.3kV), 频率为 50Hz, 功率因数 $\cos\phi=0.8$ 。

iii. 功率变化范围宽广。发电用柴油机功率可以从 0.5kW 变化到数万千瓦。通常, 移动电站、备用电源、应急电源或农村常用电源的发电用柴油机功率在 12~1500kW 范围内。固定或船用电站作为常用电源使用, 其功率可达数万千瓦。

iv. 具有一定的功率储备。发电用柴油机一般在稳定工况下运行, 负荷率较高。应急和备用电源一般标定为 12h 功率, 常用电源标定为持续功率。机组配套功率应扣除电动机的传动损失和励磁功率, 并留有一定功率储备, 所以机组的配套功率应将柴油机功率除以匹配比 (见表 1.4 各类柴油发电机组的配套特点)。

v. 装有调速装置。为保证发电机输出电压频率的稳定性, 一般都装有高性能的调速装置。对于并联运行和并入电网的机组则装有转速微调装置。对发电用柴油机的调速要求见表 1.4。

vi. 具有较高的供电可靠性和自动化功能。功能较完备的应急电站具有自启动、自动加载、故障自动报警和自动保护功能, 发电机组可以全自动运行, 不需要操作人员, 能实现无人值守。

第二节 柴油发电机组的主要性能指标

一、机组的主要性能指标

柴油发电机组的技术性能指标, 是衡量机组供电质量和经济指标的主要依据。其主要技术性能通常指机组的功率因数从 0.8~1.0、三相对称负载在 0~100% 或 100%~0 额定值的范围内渐变或突变时, 应达到的性能。

(一) 稳定电压调整率 δ_u

$$\delta_u = \frac{U_1 - U}{U} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 U_1 ——负载变化后的稳定电压的最大值 (或最小值);

U ——空载整定电压值。

I~III 类机组 δ_u 为 $\pm(1\sim3)\%$; IV 类机组 δ_u 不超过 $\pm 5\%$ 。

(二) 稳态频率调整率 δ_f

$$\delta_f = \frac{f_1 - f_2}{f} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 f_1 ——负载渐变后的稳态频率的最大值 (或最小值);

f_2 ——额定负载时的频率;

f ——额定频率。

I~III 类机组 δ_f 为 0.5%~3%; IV 类机组 δ_f 不超过 5%。

(三) 电压稳定时间

从负载突变时算起到电压开始稳定所需的时间, 通常用示波器来测量。

I~III 类机组电压稳定时间为 0.5~1s; IV 类机组电压稳定时间为 3s。

(四) 频率稳定时间

从负载突变时起算到频率开始稳定所需的时间, 通常也是用示波器来测量。

I~III 类机组频率稳定时间为 2~5s; IV 类机组频率稳定时间为 7s。

(五) 空载电压整定范围

机组整定电压应能在额定值的 95%~105% 范围内调节和稳定工作。例如额定电压为 400V

的机组，其空载电压可在 380~420V 之间调整。

(六) 在三相不对称负载下运行电压的稳定度

机组供电在三相不对称负载下运行时，如果每相电流都不超过额定值，而且各相电流之差不超过额定值的 25%，则各线电压与三相电压平均值之差应不超过三相线电压平均值的 5%。

(七) 机组的并机性能

两台规格型号完全相同的三相机组，在额定功率因数下，应能在 20%~100% 额定功率范围内稳定并联运行。为了提高有功功率和无功功率，合理分配精度和运行的稳定性，要求机组中柴油机调速器具有在稳态调速率 2%~5% 范围内调节的装置。在控制箱（屏）内的调压装置可使稳态电压调整率在 5% 范围内调整。

此外，还有电压、频率波动率、超载运行时限、瞬态电压、频率调整率及直接启动空载异步电动机等性能。随着技术的发展，国产和引进的各类机组还具有其他特殊的性能，这里不多介绍。

二、机组的功率标定与环境修正

柴油发电机组是柴油机和同步发电机的组合体。柴油机允许使用的最大功率受零部件的机械负荷和热负荷的限制，因此，需规定允许连续运转的最大功率，称为标定功率，也可以理解为柴油机可以发出最大功率的下限。柴油机的标定功率按国家标准分为 15min、1h、12h 和持续功率四类。

柴油机不能超过标定功率使用，否则会缩短其使用寿命，甚至可能造成事故。

(一) 柴油机的标定功率

① 15min 功率 即内燃机允许连续运转 15min 的最大有效功率。是短时间内可能超负荷运转和要求具有加速性能的标定功率，如汽车、摩托车等内燃机的标定功率。

② 1h 功率 即内燃机允许连续运转 1h 的最大有效功率。如轮式拖拉机、机车、船舶等内燃机的标定功率。

③ 12h 功率 即内燃机允许连续运转 12h 的最大有效功率。如电站机组、工程机械用的内燃机标定功率。

④ 持续功率 即内燃机允许长时间连续运转的最大有效功率。

对于一台机组，柴油机输出的功率是指它的曲轴输出的机械功率。根据 GB 1105—74 规定，电站用柴油机的功率标定为 12h 功率。即柴油机在大气压力为 101.325kPa、环境气温为 20℃、相对湿度为 50% 的标准工况下，柴油机以额定转速连续 12h 正常运转时，达到的有效功率，用 P_e 表示。

(二) 柴油发电机组的工作条件

发电机组的工作条件是指在规定的使用环境条件下保证所能输出的额定功率，并且能可靠地进行连续工作。国家标准所规定的电站（机组）的工作条件，主要是按海拔高度、环境温度、相对湿度、有无霉菌、盐雾以及放置的倾斜度等情况来确定的。根据 GB 2819—81 国家标准规定，电站在下列条件下应能输出额定功率，并能可靠地进行工作。

A 类电站：海拔高度 1000m，环境温度 40℃，相对湿度 60%。

B 类电站：海拔高度 0m，环境温度 20℃，相对湿度 60%。

电站在下列条件下应能可靠地工作，即海拔高度不超过 4000m，环境温度上、下限值分别为：上限值为 40℃、45℃；

下限值为 5℃、-25℃、-40℃。

相对湿度分别为 60%、90%、95%。

(三) 机组的额定功率和功率修正

交流同步发电机的额定功率是指在额定转速下长期连续运行时，输出的额定电功率，用 P_H 表示。根据机组的运行环境和技术要求，机组输出的额定功率，由式 (1-3) 进行计算

$$P_H = \eta(K_1 K_2 P_e - N_P) \quad (\text{kW}) \quad (1-3)$$

式中 P_H ——同步交流发电机输出的额定功率, kW;
 P_e ——柴油机输出的额定功率, kW;
 K_1 ——柴油机功率修正系数, 见表 1.1;
 K_2 ——环境条件修正系数, 见表 1.2 和表 1.3;
 η ——同步交流发电机的效率;
 N_P ——柴油机风扇及其他辅助件消耗的机械功率, hp。

表 1.1 功率修正系数 K_1

连续工作时间/h	K_1
<12	1.0
长期运行	0.9

表 1.2 环境条件修正系数 K_2 (相对湿度 $\varphi=50\%$)

海拔高度 /m	大气压力 /kPa	环境空气温度/°C									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0	101.35	—	—	—	—	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.89
200	98.66	—	—	—	0.99	0.97	0.95	0.93	0.92	0.89	0.86
400	96.66	—	1.00	0.98	0.96	0.94	0.92	0.90	0.89	0.87	0.84
600	94.39	1.00	0.87	0.95	0.94	0.92	0.90	0.88	0.86	0.84	0.82
800	92.13	0.97	0.94	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.84	0.82	0.79
1000	89.86	0.94	0.92	0.90	0.89	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79	0.77
1500	84.53	0.87	0.85	0.83	0.82	0.80	0.79	0.77	0.75	0.73	0.71
2000	79.46	0.81	0.79	0.77	0.76	0.74	0.73	0.71	0.70	0.68	0.65
2500	74.66	0.75	0.74	0.72	0.71	0.69	0.67	0.65	0.64	0.62	0.60
3000	70.13	0.69	0.68	0.66	0.65	0.63	0.62	0.61	0.59	0.57	0.55
3500	65.73	0.64	0.63	0.61	0.60	0.58	0.57	0.55	0.54	0.52	0.50
4000	61.59	0.59	0.58	0.56	0.55	0.53	0.52	0.50	0.49	0.47	0.46

表 1.3 环境条件修正系数 K_2 (相对湿度 $\varphi=100\%$)

海拔高度 /m	大气压力 /kPa	环境空气温度/°C									
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0	101.35	—	—	—	—	0.99	0.96	0.94	0.91	0.88	0.84
200	98.66	—	—	1.00	0.98	0.96	0.93	0.91	0.88	0.85	0.82
400	96.66	—	0.99	0.97	0.95	0.93	0.90	0.88	0.85	0.82	0.79
600	94.39	0.99	0.97	0.95	0.93	0.91	0.88	0.86	0.85	0.80	0.77
800	92.13	0.96	0.94	0.92	0.90	0.88	0.85	0.83	0.80	0.77	0.74
1000	89.86	0.93	0.91	0.89	0.87	0.85	0.83	0.81	0.78	0.75	0.72
1500	84.53	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79	0.77	0.75	0.72	0.69	0.66
2000	79.46	0.80	0.79	0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.66	0.63	0.60
2500	74.66	0.74	0.73	0.71	0.70	0.68	0.65	0.63	0.61	0.58	0.55
3000	70.13	0.69	0.67	0.65	0.64	0.62	0.60	0.58	0.56	0.53	0.50
3500	65.73	0.63	0.62	0.61	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51	0.48	0.45
4000	61.59	0.58	0.57	0.56	0.54	0.52	0.50	0.48	0.46	0.44	0.41

通常把柴油机输出额定功率 P_e (kW) 与同步交流发电机输出的额定功率 P_H (kW) 之比, 称为匹配比, 用 K 表示, 即

$$K = \frac{P_e}{P_H} \quad (1-4)$$

K 值的大小受当地大气压力、环境温度和相对湿度等多种因素的影响, 对于在平原上使用一般要求的机组, 通常 K 值取 1.6; 对使用要求较高的机组 K 值应取 2。

三、柴油机和发电机的功率匹配

通常, 与发电机进行配套的柴油机选用 12h 或持续功率作为标定功率。在柴油机与发电机进行配套时, 柴油机应有足够的功率以保证发电机在额定运行条件下输出标定功率。当发电机输出额定功率时, 实际所需要的柴油机最小输出功率可按式 (1-5) 计算

$$N_f = \frac{\left(\frac{P_H}{\eta} + P_e\right)}{K_1} \text{ (kW)} \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 计算的柴油机功率应该调整到标准规定的值或出厂技术说明书规定的功率等级。表 1.4 为各类柴油发电机组的配套特点。

表 1.4 各类柴油发电机组的配套特点

类别	移动机组		固定机组	船用机组
配套容量/kW	≤200	200~1500	120~30×10 ³	60~1000
转速/(r/min)	1000,1500	1000,1500	430,500,750,1000,1500	500,750
成套形式	发电机组(包括柴油机、发电机控制箱等), 汽车式、拖车式及列车式		固定式安装	固定式安装
应用场合	移动通信及流动式备用电源		边远地区及市电紧张地区的基础电源, 重要部门的备用电源	船用辅机, 控制和照明电源
持续工作时间/h	12~72		24~100	≥72
瞬时速调率/%	<7	<10	<10	<10
稳定调速率/%	<3	<5	<5	<5
转速波动率/%	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
温度/℃	-40~40		5~40	5~45
湿度/%	95		60	95
海拔/m	0~2000		0~1000	0
安装地点	车厢内、露天、坑道		室内	船舱
匹配功率	12h	12h	12h 或持续功率	持续功率
匹配比	1.32~1.50	1.18~1.32	1.03~1.10	1.10~1.18
负荷特点	① 恒定转速、变负荷连续运行, 短时间超负荷 ② 迅速启动并投入负载运行 10~18s ③ 有冲击负荷, 如突加减 100%、短期过电流 50%~100%、短路、启动异步发电机			

第二章 柴油发电机组的结构、原理

第一节 柴油 机

柴油机由于其效率高，机动性好，操作简单方便，在各个领域得到了广泛的应用。作为发电机组的原动机，它的性能决定了发电机组的效率、功率的大小等，而柴油机的性能又与其机构有关。不同结构形式的柴油机有不同的用途。

一、柴油机的基本工作原理与技术参数

柴油机是以柴油作燃料的压燃式内燃机。工作时，空气在气缸内被压缩而温度升高，定时喷入气缸的柴油自行着火燃烧，产生高温、高压的燃气，燃气膨胀推动活塞做功，将热能转变为机械功。柴油机的工作循环由进气、压缩、喷油着火燃烧、膨胀做功和排气等过程组成。这些过程可以由四冲程柴油机来实现，也可由二冲程柴油机来实现。

(一) 四冲程柴油机（非增压）的基本工作原理

用四个行程，曲轴回转两周完成一个工作循环的柴油机称四冲程柴油机。四冲程柴油机的基本结构如图 2.1 所示。工作时活塞作往复直线运动，曲轴作旋转运动。活塞改变运动方向的瞬时位置称止点（死点），止点处的活塞瞬时运动速度为零。离曲轴中心最远的止点称上止点，最近的止点称下止点。

曲柄销中心与主轴颈中心之间的距离称曲柄半径 R 。连杆大、小端中心间的距离称连杆长度 L 。

上、下止点间的距离称活塞行程（冲程） S 。活塞行程等于曲柄半径的两倍，即 $S=2R$ 。

活塞在上、下止点间移动所扫过的容积称气缸工作容积 V_s ，即

$$V_s = \frac{\pi}{4} D^2 S \quad (2-1)$$

式中 D ——气缸直径（缸径）。

活塞位于上止点时活塞顶与气缸盖之间的气缸容积，称燃烧室容积（压缩室容积） V_c 。

气缸总容积与燃烧室容积之比称压缩比 ϵ ，即

$$\epsilon = \frac{V_a}{V_c} = \frac{V_s + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c} \quad (2-2)$$

图 2.2 是四冲程柴油机的工作原理简图。图的上部表示四个行程中活塞、连杆、曲轴及气阀的相对位置。图的下部表示相对应的气缸内气体压力随气缸容积的变化情况，称 $p-V$ 示功图。

1. 进气行程

活塞从上止点下行，进气阀打开。由于活塞下行的抽吸作用，新鲜空气充入气缸。为了能充入更多的空气，进气阀一般在上止点前提前开启（曲柄位于点 1），在下止点后延迟关闭（曲柄

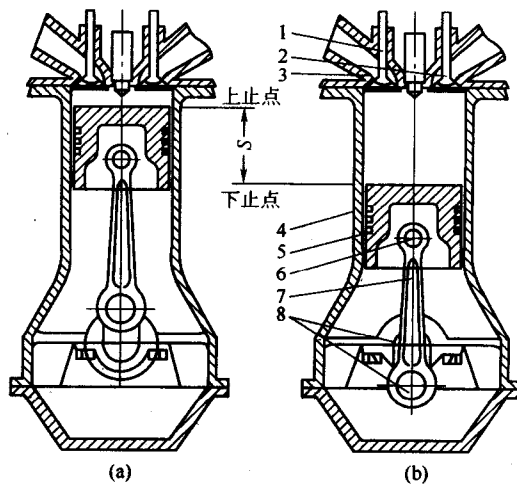


图 2.1 四冲程柴油机的基本结构

1—排气门；2—进气门；3—气缸盖；4—气缸；
5—活塞；6—活塞销；7—连杆；8—曲轴

位于点 2)，进气阀开启的延续角度（图 2.2 中阴影线部分）约为 $220^{\circ}\sim 250^{\circ}$ 。

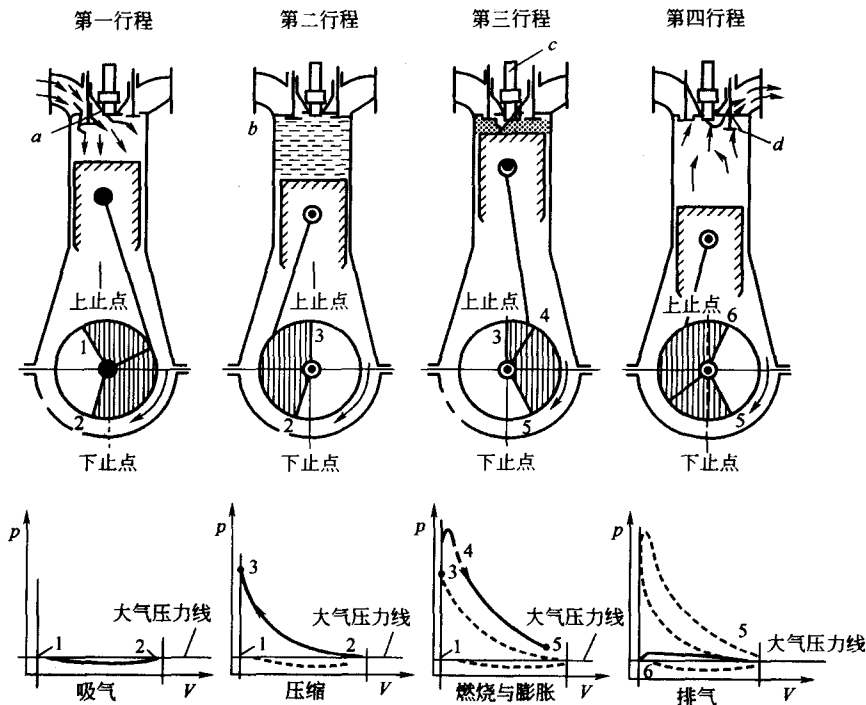


图 2.2 四冲程柴油机的工作原理简图

2. 压缩行程

活塞从下止点上行，进、排气阀均关闭。上行的活塞对缸内的空气进行压缩，使其温度和压力均不断升高（曲线 2—3）。压缩终点的压力 p_c 约为 $(3\sim 6)\text{MPa}$ ；温度 t_c 约为 $500\sim 700^{\circ}\text{C}$ 。在上止点（压缩终点）附近，燃油经喷油器以雾化的状态喷入燃烧室，并在高温高压空气的作用下，开始自行发火燃烧。

3. 膨胀行程

活塞由上止点向下运动，进、排气阀均关闭。在此行程的初期，燃烧仍在继续猛烈地进行，使缸内的压力和温度都急剧升高，其最大值分别可达 $(6\sim 9)\text{MPa}$ 和 $1500\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 左右。高温高压燃气膨胀推动活塞下行做功，在上止点后某一时刻（图 2.2 中点 4），燃烧基本结束，燃气继续膨胀做功。当活塞到达下止点前某一时刻（图 2.2 中点 5），排气阀开启，排气过程开始。此时，气缸内的压力 p_b 约为 $(0.2\sim 0.5)\text{MPa}$ ，温度 t_b 约为 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 。活塞则继续下行到下止点。

4. 排气行程

活塞在曲轴带动下由下止点向上运动，排气阀继续开启着，上行的活塞将气缸内的废气强行推挤出去。为了实现充分排气和减少排气过程中所消耗的功，排气阀不但在下止点前提前开启，而且要在排气行程结束的上止点后关闭（图 2.2 中点 6）。排气阀开启的延续角度（5—6）约为 $230^{\circ}\sim 260^{\circ}$ 。

在四冲程柴油机中，要经历进气、压缩、膨胀、排气等四个行程才完成一个工作循环；与此相应的是曲轴回转两转，即 720° 曲轴转角。而且，在四个行程中，只有膨胀行程才做功，其余三个行程都要消耗功。因此，在单缸柴油机中，必须有一个足够大的飞轮来供给这三个行程所需的能量；而在多缸柴油机中，则借助于其他气缸膨胀做功过程来供给。

此外，柴油机由停车状态进入工作状态，必须借助外部能量的驱动使其启动运转，直至喷入

气缸的燃油自发火燃烧，柴油机才能自行运转。

(二) 二冲程柴油机的基本工作原理

用两个行程，曲轴回转一周完成一个工作循环的柴油机称二冲程柴油机。

二冲程柴油机与四冲程柴油机不同，其气缸上设有气口，图 2.3 中气缸右侧为排气口，左侧为进气口。排气口比进气口略高，气口的开与关均由活塞控制。此外，二冲程柴油机设有扫气泵。扫气泵预先将空气压缩并送入扫气箱中，扫气箱中的空气压力（扫气压力）要比大气压力稍高。

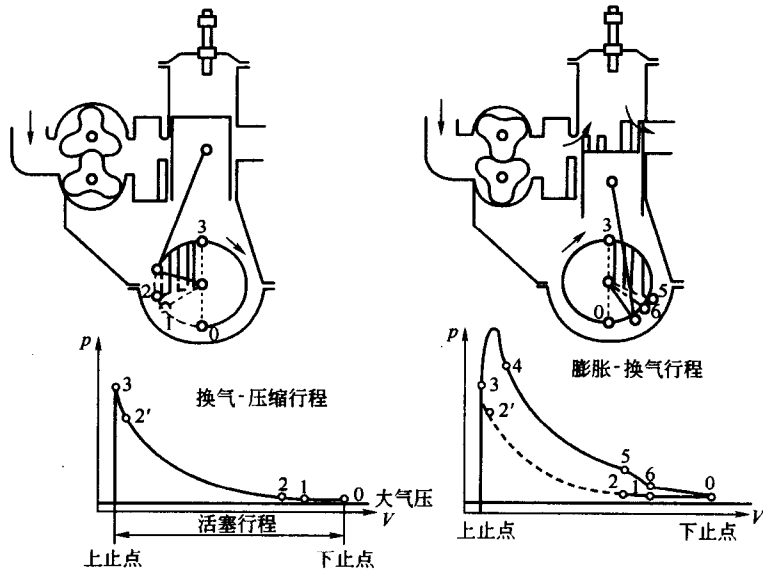


图 2.3 二冲程柴油机工作原理

1. 换气-压缩行程

活塞由下止点向上运动。在活塞遮住进气口之前，新鲜空气通过进气口继续充入气缸并将气缸内的废气经排气口驱除出去。当活塞上行到将进气口全部遮闭时（点 1），新鲜空气就停止进入气缸。当排气口被活塞遮闭后（点 2），气缸内的空气就被上行的活塞压缩，压力和温度亦随之升高。在活塞到达上止点前的某一时刻（点 2'），柴油经喷油器喷入气缸，并与高温高压空气混合后着火燃烧。

在这一行程中，进行了换气（曲线 0—1—2）、压缩（曲线 2—3）和喷油着火燃烧诸过程。

2. 膨胀-换气行程

活塞由上止点向下运动。在此行程的初期，燃烧仍在继续猛烈地进行，到点 4 才基本结束。高温高压的燃气膨胀推动活塞下行做功。当活塞下行将排气口打开时（点 5），由于此时缸内燃气的压力和温度仍较高，分别为 $(0.25 \sim 0.6) \text{MPa}$ 和 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ ，因而气缸内燃气借助于气缸内外的压差经排气口高速排出，缸内的压力也随之下降。当缸内压力下降到接近扫气压力时，下行的活塞将进气口打开，新鲜空气便通过进气口充入气缸，并对气缸内进行扫气，将气缸内的废气经排气口驱除出去。这个过程一直要延续到下一个循环活塞再次上行将进气口关闭时为止，称为扫气过程。

在这一行程中，进行了燃烧与膨胀（曲线 3—4—5）、排气（曲线 5—6）和部分扫气（曲线 6—0）过程。

由此可见，与四冲程柴油机相比，二冲程柴油机是将进气和排气过程合并到压缩与膨胀行程中进行，从而省略两个行程。因此，二冲程柴油机的曲轴回转一周就可以完成一个工作循环。在

气缸直径、活塞行程与转速相同的条件下，二冲程柴油机的功率似乎应为四冲程柴油机的 2 倍；但实际上，由于二冲程柴油机的气口使其有效行程减少等原因，其功率约为四冲程柴油机的 1.6~1.8 倍。

(三) 增压柴油机的基本工作原理

提高柴油机的进气压力，可使进气密度增加，从而达到在同样的气缸容积中充进更多的空气量，以便喷入更多的燃油，做出更多的有用功。这种以提高进气压力来提高柴油机功率的方法称为“增压”。

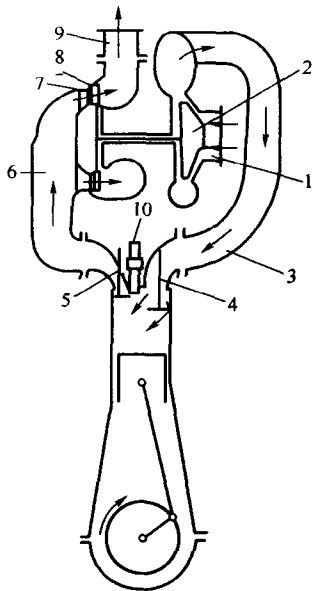


图 2.4 废气涡轮增压四冲程柴油机的工作简图

1,3—进气管；2—压气机；4—进气门；5—排气门；6,9—排气管；7,8—涡轮机

对新鲜空气进行压缩的压气机，其能量利用主要有直接由柴油机的曲轴通过齿轮等机械驱动的方式，这种增压方式称机械增压；也有用柴油机气缸排出的废气的能量在涡轮机中膨胀做功，由涡轮机来驱动的方式，称废气涡轮增压。

图 2.4 是废气涡轮增压四冲程柴油机的工作简图。废气涡轮增压器由废气涡轮机 8 和与其同轴的离心式压气机 2 等组成。柴油机气缸排出的废气经排气管 6 进入涡轮机 8，在其中膨胀做功推动涡轮机转动，并带动压气机 2 工作。被压缩后的新鲜空气经进气管 3 送往柴油机的各个气缸。

二冲程废气涡轮增压柴油机的工作原理和四冲程基本相同，所不同的是在二冲程柴油机中，增压空气是先供入扫气箱中，然后经扫气口进入气缸；此外，由于废气涡轮和压气机需能量平衡的原因，二冲程柴油机的废气涡轮增压系统中往往设有辅助压气机。

目前，船舶柴油机几乎全部都采用了废气涡轮增压。

(四) 柴油机主要技术指标

柴油机的性能，常常利用柴油机的一些主要技术指标来判断和衡量。这些技术指标包括：动力性指标、经济性指标、重量和外形尺寸指标、排气污染指标等。

1. 动力性指标

动力性指标是指柴油机对外做功能力，一般指功率、平均有效功率、平均有效压力、转速和活塞平均速度等。

(1) 有效功率

柴油机在单位时间内所做的功称功率，功率的单位为 kW， $1\text{kW}=1000\text{N}\cdot\text{m}/\text{s}$ 。

柴油机在气缸中单位时间内所做的功称为指示功率。指示功率减去消耗于内部零件的摩擦损失、泵气损失和驱动附件损失等机械损失功率之后，从发动机曲轴输出的功率称为有效功率 P_e 。

如果柴油机曲轴每分钟的转速为 n ，曲轴每秒输出的有效功为 W_e ，由于

$$W_e = \frac{2\pi n}{60} M_e \quad (\text{N}\cdot\text{m}) \quad (2-3)$$

则柴油机的有效功率为

$$P_e = \frac{\pi n M_e}{30000} \quad (\text{kW}) \quad (2-4)$$

式中 M_e ——有效转矩。

(2) 平均有效压力

通常用平均有效压力 p_e 来比较和评定各种发动机的动力性能。它是一个作用在活塞顶上的