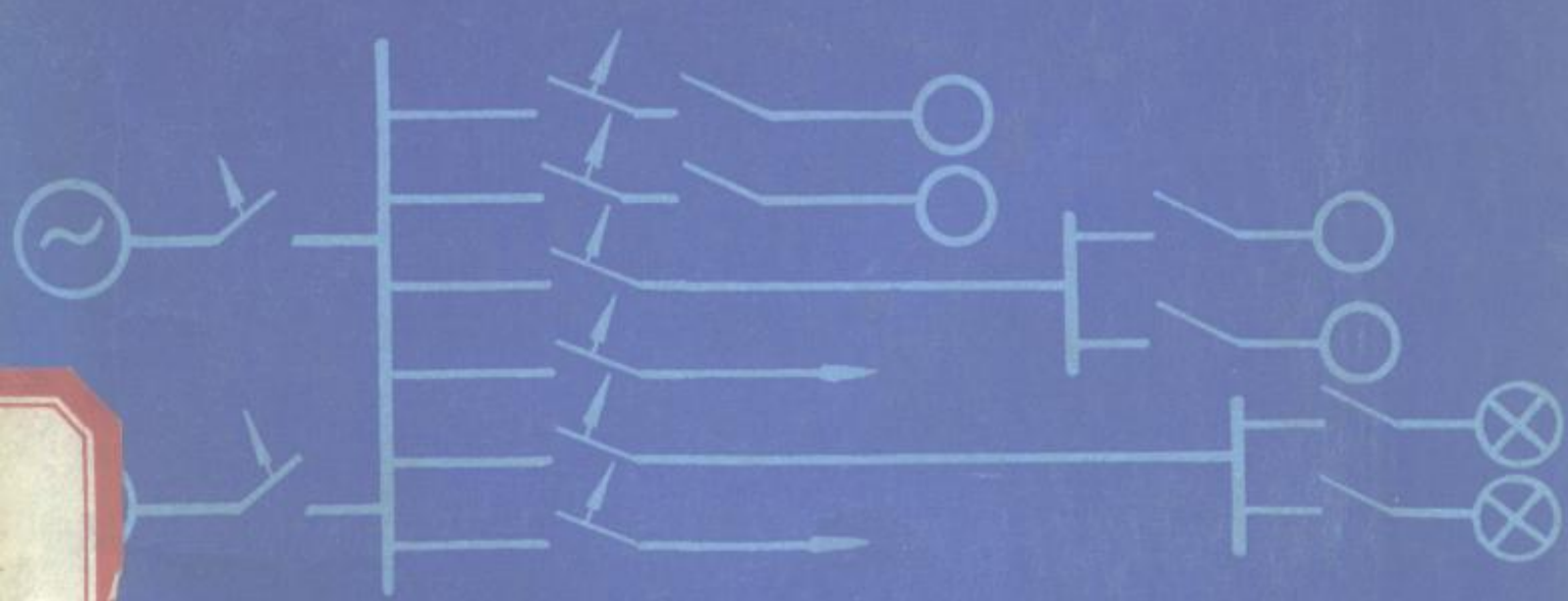


船舶电力系统

华南工学院

船舶船厂电气自动化教研组 编



国防工业出版社

内 容 简 介

本书内容共分九章。首先介绍了船舶电源、船舶配电装置、船舶电网、船舶电力系统保护等部分的基本原理及简要的设计方法；而后对发电机电压及无功功率自动调整、发电机频率及有功功率自动调整、船舶同步发电机的同步装置及船舶电站自动化等部分的基本原理作了简要的分析介绍，并对目前常用的船舶电站自动装置作了一些分析比较；最后扼要地介绍了船舶电站综合自动化的基本内容及自动化流程图。

本书可供船舶电气工人、船员、管理干部和技术人员参阅。

船 舶 电 力 系 统

华 南 工 学 院

船 舶 船 厂 电 气 自 动 化 教 研 组 编

*

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8⁵/₈ 219千字

1982年6月第一版 1982年6月第一次印刷 印数：0,001—3,300册

统一书号：15034·2233 定价：1.10元

前 言

为满足造船工业战线广大工人、管理干部和技术人员提高业务水平的需要，我们编写了这本书。

本书共分九章。前五章的内容包括：船舶电力系统概述，船舶电源，船舶配电装置，船舶电网，船舶电力系统保护，并着重介绍船舶电力系统各部分的基本作用原理及简要的设计方法；后四章的内容包括：发电机电压及无功功率自动调整，发电机频率及有功功率自动调整，发电机同步装置，船舶电站自动化等，是以介绍船舶电站自动装置的基本作用原理为主，并对目前常用的船舶电站自动装置作一定的分析比较；最后简单介绍船舶电站综合自动化的基本内容及自动化流程图。

本书由本教研组简国雄、毛宗源、毕英满等同志编写，陈炳新教授审校。

本书在编写过程中，得到各船厂、科研设计单位、航运部门以及兄弟院校的大力支持，特别是上海交通大学船舶船厂电气自动化教研组施亿生等同志对初稿提出不少宝贵意见，在此我们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限，书中如有缺点和错误，希望读者批评指正。

华南工学院
船舶船厂电气自动化教研组

目 录

第一章	船舶电力系统概述	1
第一节	船舶电力系统的组成	1
第二节	船舶电力系统的工作环境和基本要求	3
第三节	船舶电力系统的电气参数	4
第二章	船舶电源	7
第一节	船舶主电源	7
第二节	船舶应急电源	35
第三章	船舶配电装置	39
第一节	配电装置概述	39
第二节	配电装置上的常用配电电器和电气测量仪表	41
第三节	总配电板	53
第四节	应急配电板	61
第五节	其他配电装置	64
第四章	船舶电网	67
第一节	船舶电网的分类及其供电范围	67
第二节	船舶电网的结线方式	68
第三节	船舶电缆	73
第五章	船舶电力系统的保护	85
第一节	船舶电力系统的常见故障	85
第二节	对保护装置提出的要求	86
第三节	发电机的保护	88
第四节	船舶电网的保护	96
第六章	发电机电压及无功功率自动调整	102
第一节	概述	102
第二节	不可控相复励自励恒压装置	105
第三节	可控相复励自励恒压装置	120

第四节	可控硅励磁自动调整装置	129
第五节	无刷同步发电机励磁调整装置	139
第六节	发电机间无功功率分配	147
第七章	发电机频率及有功功率自动调整	157
第一节	概述	157
第二节	原动机调速器及其调速特性	159
第三节	并联运行发电机间有功功率的分配	162
第四节	频率及有功功率自动调整装置	167
第八章	船舶同步发电机的同步装置	177
第一节	同步条件	177
第二节	半自动粗同步装置	181
第三节	自动准同步装置	182
第九章	船舶电站自动化	202
第一节	船舶电站自动化的基本内容	202
第二节	自动分级卸载	203
第三节	自动解列装置	211
第四节	船舶柴油发电机组自动起动装置	214
第五节	船舶电站自动化结构图和程序流程图	218
附录	237
附录一	船用直流发电机	237
附录二	船用交流同步发电机	237
附录三	Q系列酸性蓄电池规格数据	238
附录四	TN系列碱性蓄电池规格数据	239
附录五	GN系列碱性蓄电池规格数据	239
附录六	万能式自动空气开关	240
附录七	装置式自动空气开关	240

第一章 船舶电力系统概述

现代船舶上都装备有一个供给电能的独立系统，这就是船舶电力系统。随着船舶日趋大型化和自动化，船舶电力系统的容量也日益增大。

船舶电力系统与陆上的电力系统有着许多不同的地方。陆上电力系统往往是把若干个独立的发电厂以一定的方式互相联结起来，构成一个庞大的电力网络进行供电，这样可以大大提高供电的可靠性和经济性；而船舶电力系统则不然，它仅是一个独立工作的电力系统，所以其供电可靠性和经济性都比不上陆上的系统。又如，陆上电力系统供电范围方圆达数千公里，输电线路很长，为了输电的经济性，有采用高压甚至超高压输电的必要，因此陆上电力系统就需要有相当庞大的变电（压）设备；而船舶电力系统则由于输电距离短得多，除某些特殊要求需要采用中电压等级的船舶之外，一般均采用 500 伏以下的低压系统，因此除了照明有时需要配备容量不大的降压变压器外，并无其他变压设备。

本章的任务是简明扼要地介绍一下船舶电力系统的基本组成、特点和要求，并对近期船舶电力系统的发展亦略作叙述，以帮助读者对船舶电力系统有一概貌的了解。

第一节 船舶电力系统的组成

船舶电力系统包括以下四个组成部分：

(1) 发电部分，又称为电源。它是将其它形式的能量（如机械能、化学能、核能等）转换成电能的装置。船上常用的电源装置是发电机组和蓄电池。

(2) 配电部分，又称为配电装置。它的作用是对电源进行保

护、监视、分配、转换、控制。船舶配电装置可以分为总配电板、应急配电板、动力分配电箱、照明分配电箱和蓄电池充放电配电板等几种。

(3) 输电部分,又称为电网。它是全船输电电缆和电线的总称。其作用是将电能传送给全船所有的用电设备(负载)。船舶电网通常由动力电网、照明电网、应急电网、低压电网、弱电电网等几部分构成。

(4) 用电部分,又称为负载。船舶负载可分成下面几类:

a. 各种船舶机械的电力拖动

甲板机械——如舵机、锚机、绞缆机、起货机等;

舱室机械——各类油泵、水泵、空压机、冷冻机、通风机、空调设备等;

电力推进和工程船舶的生产机械。

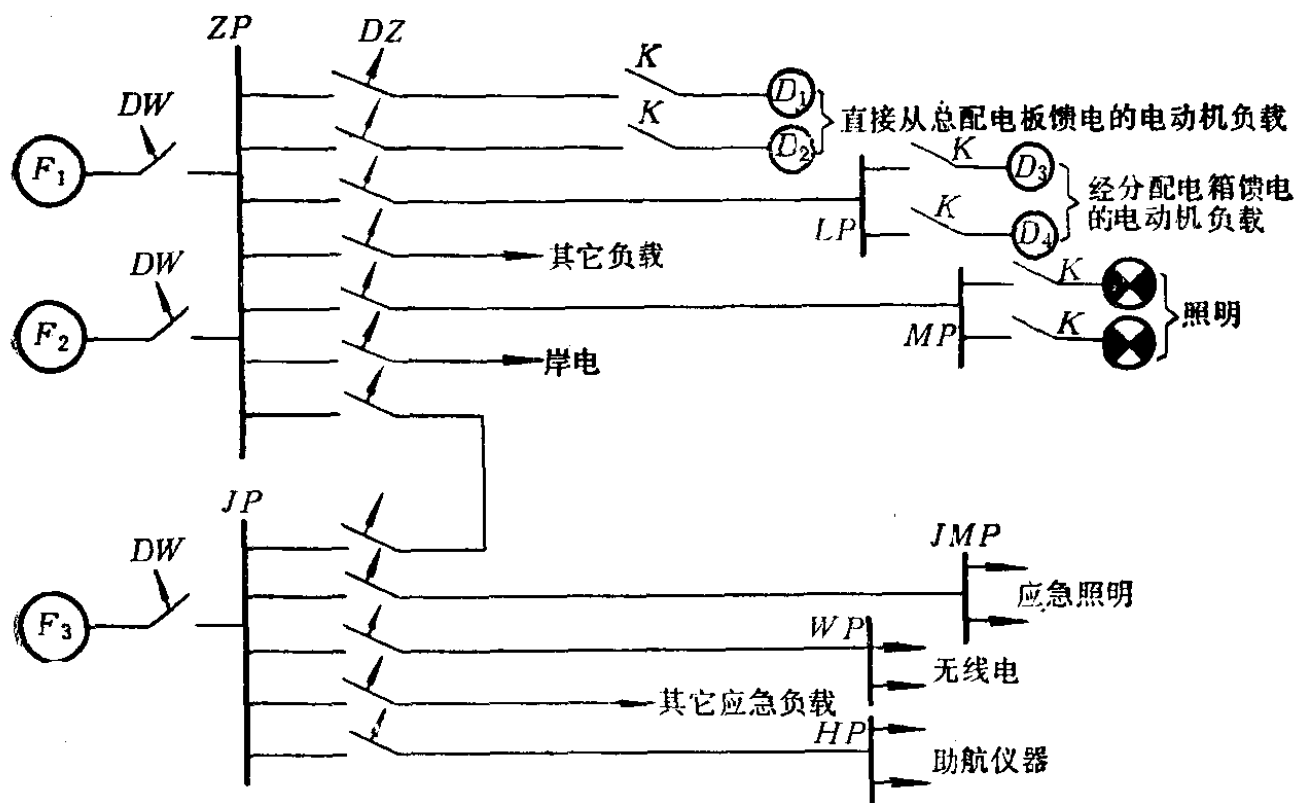


图1-1 船舶电力系统原理图

F_1 、 F_2 —主发电机; F_3 —应急发电机; ZP —总配电板; JP —应急配电板; DW —发电机主开关; DZ —分路开关; LP —动力分配电箱; MP —照明分配电箱; JMP —应急照明分配电箱; WPI —无线电分配电箱; HP —助航仪器分配电箱; K —负载开关; $D_1 \sim D_4$ —电动机。

b. 船舶电气照明

工作场所和生活舱室的各种照明灯具和航行信号灯具等。

c. 船舶通信和电航设备

船舶通信——无线电收发报机、电话、广播、声光警报器、电钟、舵角指示器等；

电航设备——电罗经、雷达、无线电测向仪、电测深仪、电计程仪等。

d. 其他用电设备

如电热器、电风扇、电视机等。

上述电力系统各组成部分可用图 1-1 来表示相互间的关系。它是一个典型的船舶电力系统原理图。

第二节 船舶电力系统的工作环境和基本要求

船舶的环境条件往往要比陆上差，所以对船舶电气设备的要求也往往比陆用电气设备来得高些。

船舶电气设备的工作环境可归纳成下列几个主要特点：

(1) 船舶航行区域广（特别是远洋船舶），气温变化大，湿度高，空气中常常有盐雾、油雾及霉菌等腐蚀物，甚至还混合有爆炸性气体。此外，还因受风浪的作用而产生倾斜和摇摆。

(2) 主机及推进系统运行时会产生振动；舰艇在战斗过程中更会受到各种强烈的机械冲击和振动。

(3) 船舶舱室容积小，空间狭窄，周围的隔壁、管路都是导电体。

(4) 电气设备之间有较强的电磁干扰。

根据以上的船舶环境条件，对船舶电力系统提出下列几点基本要求：

(1) 工作可靠。主要是指电气设备在运行过程中不发生结构和性能上的故障，最大限度地保证不间断供电。

(2) 生命力强。主要是指船舶因故发生破舱进水或失火时，

电力系统仍能保持不间断工作的能力。

(3) 应具有防盐雾、防油雾、防霉菌 (即常称的“三防”)、防水、防燃、防爆等性能和耐冲击、振动、摇摆的能力 (长期横倾不超过 15° , 长期纵倾不超过 10° , 周期横摇不超过 22.5°)。

(4) 要求能在 $+45\sim-25^\circ\text{C}$ 的环境空气温度和空气相对湿度为 95% 的条件下正常工作。

(5) 保证工作人员的人身安全, 防止发生触电事故。

(6) 电气设备的外壳结构要便于装拆和维修。

(7) 要有防止无线电干扰和磁干扰的措施。

(8) 尽可能提高系统工作效率, 减少燃料消耗和确保船舶应有的续航能力。

不同类型的船舶对上述各点要求是不尽相同的, 应根据具体情况而有侧重, 对某些特殊用途的船舶更有其特殊的要求。

第三节 船舶电力系统的电气参数

船舶电力系统的电气参数主要是指电流种类、额定电压和额定频率。

(一) 电流种类

船舶电气化已有近百年的历史。在五十年代以前建造的船舶, 基本上是以直流电力系统为主。这是因为直流电力系统在许多方面具有其独特的优点, 如直流发电机的调压和并车方便; 直流电动机容易实现大范围平滑调速以及直流电可以直接对蓄电池充电等。但是由于直流电力系统在工作可靠性、维护保养、经济性、重量尺寸等方面都远不如交流电力系统好。所以随着船舶电气化程度的不断提高, 船舶电力系统的容量日益增长的情况下, 直流电力系统的上述缺点就显得更为突出了, 甚至会限制船舶电气化程度的进一步提高。在五十年代以后, 交流电在船上越来越广泛地被采用。特别是电子工业的迅速发展, 大功率半导体器件的应用, 以及六十年代以来逐渐成功地解决了曾经阻碍船电交流化的一系

列难题（调速、调压、调频、并联运行等）之后，交流电力系统在船舶上就占了主要地位。近年来，除了某些特种工程船尚考虑采用直流电力系统或交直流混合电力系统外，几乎所有大、中型船舶都采用了交流电力系统。实践证明，采用交流电后，船舶的造价和维修费用也有明显的降低。

（二）额定电压

船舶电力系统额定电压的高低直接影响到电力系统中所有电气设备的重量和尺寸。从这个观点来看，提高额定电压等级是有利的。但是，随着电压的提高，也带来了绝缘和安全方面的问题，故电压等级的提高受到一定限制。此外，船舶电力系统的电压等级在很大程度上取决于陆上的电压标准。这主要是考虑到电气设备产品标准化问题。目前世界各国船舶电力系统大多采用500伏以下的额定电压。我国“钢质海船建造规范”[●]（下称“海规”）规定的船用额定电压等级如下：

电 压 类 别	电源设备额定电压（伏）			受电设备额定电压（伏）			
	直流电气设备	28	115	230	24	110	220
交流电气设备	115*	230	400	24*	110*	220*	380

注：1. 特殊用途的电气设备的电压不受上述规定的限制；

2. 表中有*号者仅适用于单相交流电气设备。

随着船舶吨位的不断增大，特别是某些巨型油轮和高速集装箱船的建造，主机功率和电动辅机功率的大型化，发电机单机容量已超过2500千瓦，采用500伏以下的低压电力系统已经不能适应这种新状况的要求了。因为随着容量的大幅度增加，电流也迅速增加，不但开关电器设备的载流、断流能力要求很大，同时过粗的输电电缆也会对敷设带来困难。因此，现代巨型船舶已逐渐趋向于采用1000伏至12000伏的中电压等级。目前，国内船舶

● 指1973年版本。

已在电力推进或少数工程船上采用中电压。

(三) 额定频率

交流船舶电力系统的额定频率是沿用陆上的标准等级，我国采用 50 赫。对个别要求非标准频率电源的弱电设备则通常是由单独的变流设备供电。

由于近年来军用舰艇无线电自动控制、火炮控制和高速电动辅机的特殊需要，以及为了进一步减小电气设备的重量和尺寸，各国都正在研制采用中频的船舶电力系统或局部设备由中频发电机供电，其额定频率范围从 400 赫至 2400 赫。但是，提高频率也带来了另一些问题：要求制造特殊的电机、电器、仪表和高速机械；由于交流阻抗的增大而造成电网损耗的增加（特别是对大型电网更为明显）。所以提高交流电力系统的额定频率能否成为一种趋向，目前尚有待探讨。

第二章 船舶电源

船舶电源是船舶电力系统的核心。它发出电能供全船用电设备（负载）使用。由于各种用电设备对供电的要求不完全相同，因此船舶上往往需要设置多个不同用途的独立电源。根据它们各自的供电范围和供电时间的不同，船舶电源有主电源和应急电源之分。

第一节 船舶主电源

用以保证船舶在各种工况——正常航行、进出港靠离码头、正常作业、停泊以及应急●（指海损或失火）情况下正常用电的电源称为船舶主电源。它通常由若干台发电机组所组成。这些机组根据其用途的不同，分别称为主发电机组、备用发电机组和停泊发电机组。

主发电机组是指经常投入工作的发电机组，一般设有二至三台，大型船舶上也有设置四台的，而四台以上就极少见了。主发电机组通常都是可以并联运行的。

随着船舶用电量的日益增长，主发电机组的单机容量已由初期的数十千瓦逐渐增大到数百千瓦以至数千千瓦。

主发电机组是船舶最基本的供电电源。为了确保船舶的安全，必须要求它能非常可靠地连续工作；同时它又是一个长期工作的电源，因此还必须具有较高的运行经济性。

为了确保船舶主电源能够连续可靠地供电，船上一般都需要配置一台具有足够容量的备用发电机组，其用途是当主发电机组

● 此应急工况是指船舶主电源尚能正常运行情况下的一种船舶工况，与船舶主电源已不能正常运行时的应急情况有别。

中的某一台一旦因故不能正常工作（例如发电机组发生故障或作定期检修）作为替代机组而投入工作。由此可见，备用发电机组的容量必须与主发电机组中最大一台机组的容量相同。实际上，绝大部分船舶上的主发电机组和备用发电机组都是选用相同型号和相同规格的，所以一般都无须指定哪台机组作为备用机组用，而是互为备用、轮流工作的。这样既便于维修、减少备品，同时也延长了机组的寿命。

对于某些船舶（尤其是大型船舶），如果它在停泊无作业工况下（例如货船停泊时不需装卸货物；挖泥船停泊时不挖泥；起重船停泊时起重机不工作）的用电量小到这样的程度，即使开动一台主发电机组也感到极不经济时，就往往需要另设一台专门供停泊时用电的所谓停泊发电机组。这种停泊发电机组的容量较小，一般只需数十千瓦就够了。如果所设计的船舶在停泊时均可以接用岸电满足船上用电要求的话，就不必专设这种停泊发电机组了。

（一）主电源发电机组的类型与性能

主电源的发电机组是由发电机和带动它的原动机所组成。根据需要，发电机可以是交流的也可以是直流的。原动机可以用往复蒸汽机、柴油机、蒸汽轮机或燃气轮机。

船舶直流发电机一般都采用积复励式发电机，也有采用分励式或稳定分励式（具有少量串励绕组的分励式）发电机。图 2-1 是复励式发电机及分励式发电机的原理线路和外特性曲线（发电机输出端电压与负载电流的关系曲线）。图中 S_1S_2 代表电枢， F_1F_2 代表分励绕组， C_1C_2 代表串励绕组， H_1H_2 代表换向极绕组。

由图 2-1 (c) 可见，复励式发电机由于串励绕组的作用而获得较为平坦的外特性。也就是说，当发电机负载在额定工作范围内变化时，其端电压比较稳定。而分励发电机的外特性却比较陡斜，即电压波动较大。所以在采用分励或稳定分励式发电机作为主电源时必须装有自动电压调整器，否则就不能满足正常供电的要求。

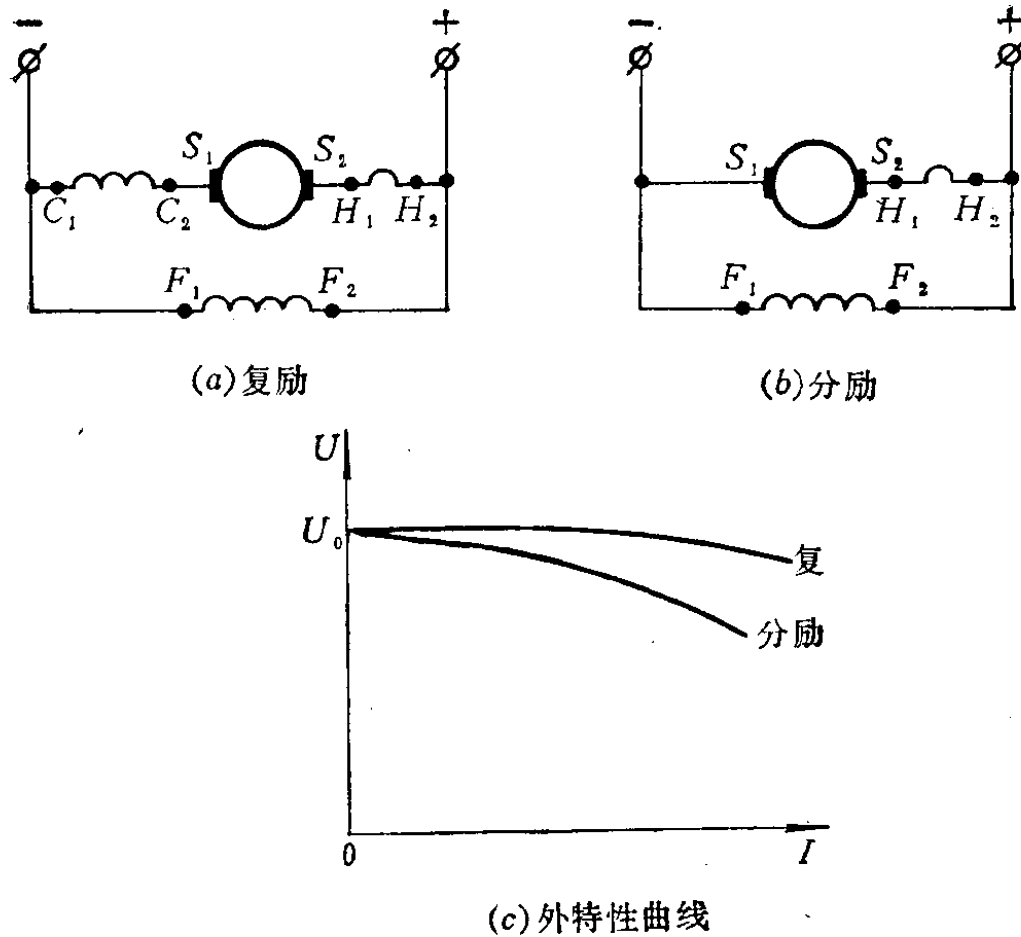


图2-1 船舶直流发电机的原理线路和外特性曲线

为了说明负载电流对发电机端电压的影响程度，可用稳态电压变化率来表示[●]，即：

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_{\max(\min)} - U_e}{U_e} \cdot 100\%$$

式中 U_{\max} ——负载从空载至额定电流范围内变化时发电机端电压出现的最大值；

U_{\min} ——负载从空载至额定电流范围内变化时发电机端电压出现的最小值；

U_e ——发电机的额定电压；

$\Delta U_{\%}$ ——发电机的稳态电压变化率。

● 此处所指的是直流发电机组的稳态电压变化率，其测试方法如下：先将机组整定在额定电流、额定电压、额定转速，然后使发电机的负载自满载至空载、再自空载至满载范围内均匀或急剧地变化，当原动机的转速达到稳定时，测量端电压变化的最大值和最小值。

稳态电压变化率的数值越小，表明由电流引起的电压波动越小。也就是说，电压的稳定性越好，或静态指标越高。

根据我国“海规”规定，复励式发电机的稳态电压变化率应满足如下要求：

$$\text{发电机功率} < 30 \text{ 千瓦者} \quad \Delta U_{\text{稳}} \% < \pm 10 \%$$

$$\text{发电机功率} \geq 30 \text{ 千瓦者} \quad \Delta U_{\text{稳}} \% < \pm 7 \%$$

我国目前系列生产的船用直流发电机有 Z2C 和 ZFH 两个系列，它们的型号规格参见附录一。

船舶交流发电机几乎都采用三相同步发电机，根据其励磁系统的不同可以分为：带励磁机的同步发电机、自励恒压同步发电机和无刷同步发电机。

六十年代以前建造的交流船舶几乎无例外地都采用带励磁机的同步发电机。由于它带有直流励磁机，在一定程度上降低了交流电力系统应有的优越性。例如，它不但增大了整个机组的体积、重量，而且还因为它的电刷和换向器需要经常进行清洗、检修而增加了对电机的维护工作量；同时，也由于励磁机的存在而大大影响了发电机电压调整的速度。随着半导体整流元件的迅速发展，五十年代末期研制出一种不需要励磁机而直接由发电机的输出通过静止变流元件取得直流励磁的所谓自励恒压同步发电机。它目前已经广泛而成功地用在各类船舶上，并逐渐取代带励磁机的同步发电机。由于自励恒压励磁装置取消了传统的励磁机，并代之以完全由静止元件组成的励磁系统，因此除了具有体积小、重量轻，有利于安装布置等优点外，还具有结构简单、工作可靠、维护保养方便以及良好的稳态与瞬态性能等不可忽视的优越性。近年来，由于可控硅元件逐渐被应用于船舶上，自励恒压励磁装置更得到进一步的发展与改进。

无刷同步发电机目前也开始被采用于船舶上。这种型式的发电机是利用与转子（磁极）同轴的转枢式交流励磁机并通过旋转整流器向发电机提供直流励磁。由于这种同步发电机转子和定子

之间没有电的联系,也没有滑环和电刷之类的滑动接触元件存在,所以它有“无刷”之称。这种发电机的这一独特优点将使它今后能广泛地应用于船上。

为了说明负载电流对交流发电机端电压的影响程度,可用稳态电压调整率和瞬态电压调整率来表示。其技术要求及试验方法将在第六章叙述。

目前,我国系列生产的船用交流同步发电机有:T2H系列,FFH系列,TH和TZ系列。它们的型号、规格参见附录二。

船用发电机的外壳保护型式一般均采用防滴式结构。但安装在有易燃易爆气体处的发电机则需采用防爆式结构。

主电源发电机组的原动机类型几乎都是采用与主机相同的类型,因为这样运行经济、维护方便。由于柴油机与其他类型的原动机相比较具有耗油少、对燃油质量要求不高、投入工作的准备时间短、效率高以及无需一套庞大的辅助设备等一系列优点,已使它成为现代船舶主机和发电机组原动机的主要型式。尤其是近几年来随着船用中速柴油机的发展,柴油机动力装置在船上的应用更为广泛。而往复式蒸汽机由于存在装置体积大、效率低等的弱点,目前除了尚在留用的四十年代的蒸汽直流船舶上还可以见到外,新建造船舶均不予采用。至于汽轮机则由于它具有转速高、运转平稳、调速性能好、过载能力大、寿命长等许多优点,在大型船舶上亦得到广泛应用。

发电机的原动机要求在恒定转速下工作。转速的稳定性直接影响发电机电压、频率和功率的稳定。为此,原动机都必须装有可靠的调速器以维持转速的稳定。原动机的转速稳定性是用稳态调速率来表示的。根据图2-2绘出的原动机外特性同样可以写出它的稳态调速率;

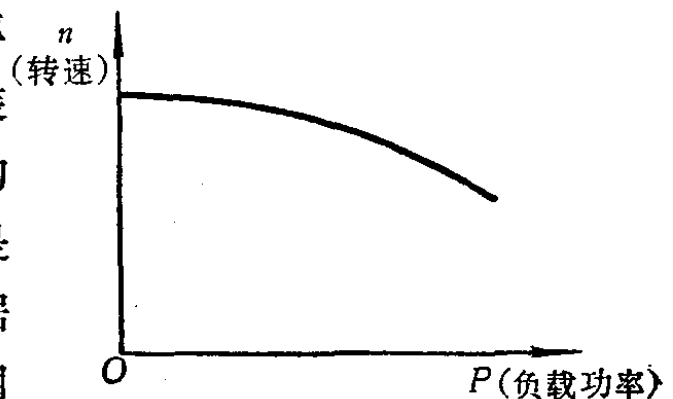


图2-2 原动机的外特性

$$\Delta n_{\text{稳}} \% = \frac{n_{\text{max}(\text{min})} - n_e}{n_e} \cdot 100 \%$$

式中 n_{max} ——负载在空载至额定范围内变化时原动机转速出现的最大值；

n_{min} ——负载在空载至额定值范围内变化时原动机转速出现的最小值；

n_e ——原动机额定转速；

$\Delta n_{\text{稳}} \%$ ——稳态调速率。

根据“海规”规定，原动机的稳态调速率不应超过 $\pm 5\%$ 。

(二) 主发电机组的并联运行

我们知道，船舶在不同工况下所需用电量的变化幅度是很大的。以散装货船为例，正常航行时的主要用电设备是为主、辅机服务和为全船服务的电动泵、电动舵机、照明设备、电航仪器以及其他生活用电等。而在进出港靠离码头时，舵机工作更为频繁，同时还要开动电动锚机或绞缆机，用电量一般要比正常航行时为大。当船舶停泊装卸货物时，由于功率相当大的起货机投入工作而出现高峰负载状态。而当货物装卸完毕但船舶又未开航前，船上只有生活、照明等少量设备需要用电，这时用电量却是很小的。根据船舶用电的这一特点，如果主电源只装备一台发电机组的话，就必然会导致单机容量很大、轻负载时效率极低以及备用机组容量随之增大的弊病。因此，为了使船舶主电源在各主要工况下都能经济合理地运行、备用机组容量不致过大、以及提高主电源供电的可靠性，一般都需要装置二台或二台以上的发电机组，并接于同一汇流排上并联运行。

将发电机投入并联运行(又称为并车或同步)必须满足一定的条件，否则将会造成不允许的电流冲击。这种冲击电流可能导致发电机损坏(例如使电枢绕组烧毁或松散，转轴弯曲等)，或者引起发电机过载、短路等保护装置动作而使发电机不能投入并联工作。

根据电机原理可知，两台直流发电机投入并联运行时应满足