

绪 论

船舶电站研究的对象是发电机发出电能与分配电能给船舶用电设备的问题。

我们知道，船舶上有许多工作机械和生活设备需要用电，如电动舵机、锚机、电灯、电热器等等，所以船上需要有电源。通常它是由发电机和原动机组成的。从发电机到用电设备之间有一段距离，因而要用电缆来输送电能。为了经济而可靠地供电还需要配电设备。

从发电、配电、输电到各用电设备所构成的统一整体，称为船舶电力系统。其示意图如图1所示。

船舶发电站是由原动机、发电机和主配电装置组成的。联系发电机、主配电板、分配电板和用电设备供输送和分配电能用的中间环节称电力网。

由上可知，船舶电站是船舶电气设备的核心。船舶电站在船舶整体设计中，占有很重要的位置。尤其在现代自动化船舶上，各种设备都要用电控制，这一点就更突出了。

船舶电站与陆上电站相比有以下特点：

1. 船舶电站容量较小（目前世界上最大的船舶电站容量达到了数万千瓦，一般万吨船为一千千瓦左右），而某些大电动机容量与电站容量可相比拟，因此相互影响大（电动机启动电流引起的电网电压降落大，发电机组的转速和频率波动较大）；
2. 船舶电气设备的工作条件比较恶劣，如环境温度较高（在赤道附近，机舱温度高达 50°C 以上）；相对湿度较大（有时高达 $95\sim 100\%$ ）；存在盐雾、霉菌、油雾，使导电金属受到腐蚀，并使绝缘材料性能降低；船舶的摇摆（横摇 $22\frac{1}{2}^{\circ}$ ）、倾斜（长期横倾 $15^{\circ}\sim 22^{\circ}$ ，纵倾 10° ）、振动（波浪冲击、往复式机器运转、螺旋桨运转、火炮射击等引起的）影响电气设备动作的可靠性和正确性；
3. 船舶电站的发电设备与用电设备之间的距离很短，因此在计算电网压降时，往往可以忽略电缆的电抗。

船舶电站按照原动机的类型可分为：蒸汽机、柴油机、汽轮机和燃汽轮机等四种。

根据电流的种类，船舶电站可分为直流和交流两种。

按电站的用途，船舶电站可分为主电站（正常工况供电用）和应急电站（主电站发生故障时投入应急供电用）。

由于主机拖动螺旋桨的功率有 $10\sim 15\%$ （甚至更大）的储备，而航行时需要电站供给的电能不超过主机功率的 10% ，因此为了充分利用主机功率，提高经济性，近年来某些船（尤其是小船、渔船）采用主机轴带发电机（称主轴发电机或悬挂式发电机）供电的电站，

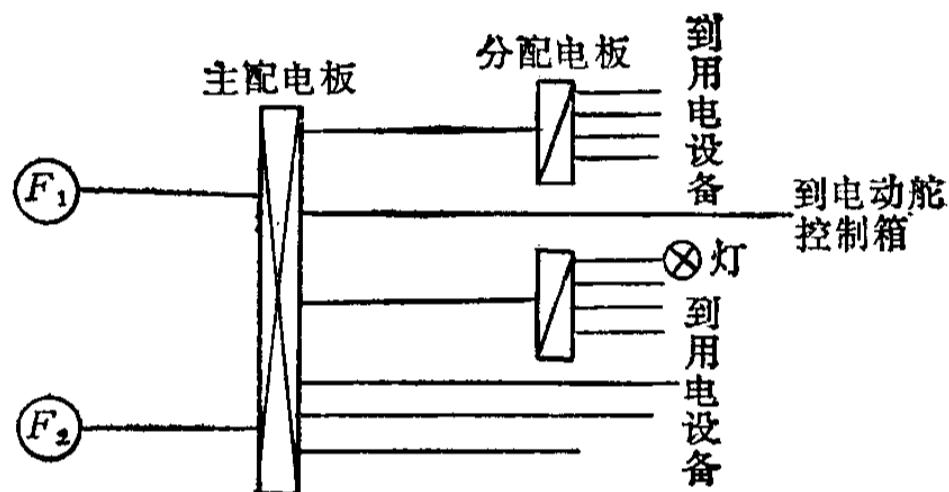


图1 电力系统示意图

当主轴转速较低或船停泊时由备用电源供电。

电站在船舶上的布置应考虑到使用维修方便和安全可靠，后者直接影响到舰船的生命力。

蒸汽机发电机和汽轮机发电机组为了缩短蒸汽管路而布置在机舱内。柴油发电机和燃汽轮机发电机组布置在主机舱或它旁边的副机舱内。这些舱室通常在船舶中部，即用电设备的中心，以节约电缆。

为了提高可靠性和生命力，在舰船上可设两个电站。一个布置在船艏，而另一个布置在船艉舱室或主机舱旁边的舱室里。它们之间用电缆相连接，以便互为备用。对于同一舱室里布置两台以上发电机组时，应考虑两舷布置以提高生命力。发电机的轴应与艏艉线平行，以防止轴承受到较大的推力（船舶横倾和横摇较严重）。主配电板应垂直于艏艉线布置，以防止横摇引起电器触点误动作。

电力推进船上的副电站布置在主机舱或船艉的单独舱室内。电力推进用发电机布置在主机舱。

应急发电机组和配电板应布置在主甲板以上的单独舱室里，并有出口可通救生艇甲板。

上面提到船舶电力系统的工作的可靠性和生命力，它们是系统实现规定任务的有效性的两个标志。电力系统工作的可靠性——指在各种不利的工作条件下（如空气温度变化大，空气湿度很大，海水腐蚀作用强，船舶的横倾和纵倾大，航行振动和冲击振动等），电力系统的各项电气设备在整个运行期间不间断工作的能力。既不应发生结构上的损坏事故，也不应发生各种装置的调整失常，使整个电力系统能不间断的供电，并保证一定的电能质量。船舶电力系统的生命力——指船舶受到战斗破损或事故破损时，电力系统仍能不间断保证供电的能力。

电力系统工作的可靠性●取决于其组成元件的可靠性及其相互连接方法和使用方法。因此对于舰船电站工作的可靠性，要求在设计舰船电站线路、选用元件、确定使用方法时都必须加以考虑。

随着电站容量的增大和自动化程度的提高，电站中各元件，如开关、接触器、继电器、带整流子电机、自动装置中的脉冲发生器、高频振荡器等产生的电压或电流急变（脉冲），对无线电干扰和相互干扰也增加，需要采取抗干扰措施如下：1. 屏蔽；2. 装电容器或滤波器●；3. 防止电气设备的接触不良。

本书以介绍交流电站为主，从熟悉船舶电站的主要参数着手，重点讲述船舶电站自动化装置的工作原理。目前船舶电站自动化的内容，已有电压和无功功率的自动调整；频率和有功功率的自动调整；主发电机和应急发电机的原动机的自动起动；发电机的投入顺序选择；自动同期；自动转移负载；重负载的起动控制；电站的综合保护；与轮机部分自动化共同使用的自动巡回检测和自动打印、记录装置；以及电子计算机在全船自动化中的应用等。希望通过本书的学习，读者能掌握船舶电站自动化的主要内容的基本原理，同时对船舶交流电站的设计与计算也有所了解。

-
- 可靠性的数量标志为无故障概率，即无故障次数与总试验次数之比。
 - 滤波器的选用和安装参看附录1-10。

下面简单介绍船舶电站的发展概况：

现代舰船为了提高性能，加强生命力和战斗力，促使电气化和自动化程度不断提高，船舶发电站的功率也大大增加，一般万吨以上舰船的电站功率为1000~10000千瓦，个别的还超过10000千瓦。例如1969年英国造的客船“伊丽莎白二世”号（58000吨）电源总功率为17500千瓦。

随着电站容量的增大，为了提高可靠性和缩小船舶电气设备的尺寸及减轻重量，在五十年代普遍开展了船电交流化工作，在六十年代开始进行电站局部自动化并提出提高船舶电站的电压和频率，进行了试制。七十年代在船舶电站方面的主要工作是巩固和提高。一方面，设计标准的发电和配电系统，包括电站、主配电板和分配电板的标准化；另一方面，设计、试制新的短路保护系统、无功功率自动补偿系统、大功率半导体换流装置和电站成套自动化装置。

船舶电站的自动化，除了可以得到高质量的电能之外，还可以保证船舶电站供电的连续性、可靠性和经济性。例如船舶电站自动进行电站设备的调整控制和工况检测监视，以便及时发现和排除故障，避免工作人员的误操作，减少维修工作量，改善劳动条件，保证船舶电站供电的连续性、可靠性和电能质量。此外船舶电站自动化是实现机舱自动化，进而实现全船自动化的必要条件。

从1961年起自动化船舶数量显著增加，电站也从五十年代交流化的基础上逐步向自动化发展。在1964年以前各国已采用船舶电站的单个自动控制装置。如自动并车装置、自动负载分配装置和无刷交流发电机。1964年世界上出现无人机舱船以后，不少国家已研制并生产用固体电路的船舶电站自动化成套装置，包括自动同步并车装置、自动负载分配装置、并联运行时的故障检测装置（自动解列装置）、无刷交流发电机整流器故障检测装置和速度继电器等，可控制的发电机组数多达4台（其中一台可以是汽轮发电机组）。1966年电子计算机应用于船舶，为全船自动化，包括电站自动化创造了条件。1970年以后，已有用计算机控制机舱数据的巡回检测、机舱故障的应急处理以及电站自动化等。

随着我国造船工业的发展，船舶电站也得到了很大的发展，从开始时用电设备只有照明装置，到现在已经具有甲板机械、机舱辅机、观通导航和生活设施等各种用电设备。随着电气化程度的提高，电站的功率也增大到数千千瓦。电流的种类从直流电站发展到交流电站。

在六十年代船电交流化的同时，我国就着手船舶电站自动控制装置的研制工作，并在客船、货船、挖泥船、采石船、浮吊船等各种类型船舶上安装使用。近年来通过实践，不断改进，这些装置的性能和质量均有所提高。在七十年代末，我国也已试制了电站自动化成套装置，并在7500吨客货轮“长生”号与长江水质监测船“长清”号等船舶上安装使用。但是我国在船舶电站自动化方面与世界先进水平相比还有一段差距。我们一定要在较短的时间内，在船舶电站自动化方面赶上和超过世界先进水平。

第一章 船舶电站主要参数的选择

§ 1-1 电流种类、电压和频率的选择

船舶电站的基本参数是电流、电压和频率等。它们决定了电站工作的可靠性和电气设备的重量、尺寸、价格等。

一、电流种类的选择

电源有直流电源和交流电源。具体选择电流种类时应考虑下列因素：

1. 电动机和电器工作的可靠性；
2. 电气设备重量、尺寸、价格的比较；
3. 船舶机械电力拖动需要的特性的保证。

通常交流电站与直流电站相比，在维护、保养电气设备方面，前者工作量少得多。因为船舶电气设备大部分是电机和电器，而交流电机没有整流子，具有一系列的优点。如：结构简单，体积小，重量轻，运行可靠，鼠笼式电动机可直接起动及其控制设备少等。另外交流电力网络与照明网络之间的联系可通过变压器，只有磁的联系。绝缘电阻低的照明电网基本上不影响电力网络。而直流电力网络则直接受到照明网络的影响，使绝缘电阻降低。

当然事物总是一分为二的。交流电站的并联运行较直流电站为复杂，电站的动态稳定性也需要考虑。交流电力拖动对调速范围要求广而平滑的装置（如起货机）较难满足，或即使满足，但其装置复杂。这些有待进一步改进。

总的说来，由于交流电制具有显著的优越性，因此国内外各种船舶都优先采用交流电制。

二、电压标准的选择

我国船舶电源设备的额定电压为直流 28 伏、115 伏和 230 伏三种；交流 115 伏[●]、230 伏[●] 和 400 伏三种（不包括特殊用途电源）。

我国自行设计制造的大型船舶都采用（个别例外）交流三相 400 伏和交流单相 230 伏，或直流 230 伏的电制。国外有些船舶是采用交流 450 伏电制。

在选择电压标准时应考虑电气设备的重量、尺寸、价格等技术经济指标和人身安全问题。

导电元件的截面积由传送的电流种类来确定。当传送直流电时， $I_e = P_e / U_e$ ；而传送三相交流电时，则 $I_e = \frac{P_e}{\sqrt{3} U_e \cos \varphi_e}$ 。式中 I_e 、 P_e 、 U_e 、 $\cos \varphi_e$ 分别为通过的额定电流、功率、电压和它的功率因数额定值。

当电压提高时，减少了传送同一功率的额定电流的数值，可以减小电器元件的导电截

● 仅适用于单相交流电力设备。

面，这对于开关、起动电器影响很大。如以电器在电压为 127 伏时的重量为 1，则当电压为 220 伏、380 伏和 500 伏时，电器的重量分别近似地等于 0.58、0.33 和 0.25。

但另一方面，电压的提高却增加了电器灭弧的困难。为此需要放大灭弧间隙，从而使电器的重量、尺寸增大。在电压高于 600 伏时，采用这种方法，其重量、尺寸减小很少。

电压的增加，主要是使电缆及其线路的重量和尺寸减小。

直流电机，当电压由 110 伏变到 440 伏时，其重量减轻约 9%。交流电机的重量、尺寸，在船用电压范围内实际上影响很小。重量和尺寸将随电压的升高而稍许增加一些，因为要放大绝缘槽，并增加绝缘匝数。

在中型和大型船上，鼠笼式电动机的容量约 40~70% 是 10 千瓦以下的；转速约 70% 是 1500 转/分的。当电压提高时，由于采用直角槽，使重量和尺寸增加， $\cos\varphi$ 恶化，附加损耗增加，电动机和控制电器重量也增加。

当电压提高时，配电装置由于导电部分重量、尺寸的减小，被导电部分间距的增加和采用附加元件造成重量、尺寸的增加所抵消，故近似认为它不受电压提高而影响。

当电压从 380 伏增至 660 伏时，变压器的重量、尺寸不变，因为导线与绝缘不变。当电压再提高时，因绝缘厚度和高低压绕组间间距增加，使变压器的重量和尺寸也增加。

由于国外船舶电站的总功率达到 15000~20000 千瓦，单台发电机的功率达 2000~3000 千瓦。当三相 380 伏和 $\cos\varphi=0.8$ 时，发电机的额定相电流为 5700 安，这样就需要截面为 $3 \times 240 \text{ mm}^2$ 的电缆 18 根并联供电，这是不合理的。另外，这样大的电流使开关保护电器复杂化。

因此随着船舶电站容量的不断增加，其电压有向中压发展的趋势。国际电工委员会已建议采用中压（3.3 千伏）。在“伊丽莎白皇后二世”号和我国的 500 吨浮吊船上已采用了 3.3 千伏的电源。

三、频率标准的选择

我国船舶与陆用电源一致采用 50 赫为标准频率（通讯导航设备和其他特殊设备的频率除外）。

在一定范围内提高频率，可提高自动化系统动作的快速性，并降低许多自动化元件的重量和尺寸。

把同步发电机的频率 f 提高到 400 赫有下列优点：

1. 因转速 $n = 60 f / a$ （式中 a 为磁极对数），使发电机、电动机和拖动的机械的转速提高，如 $a = 2$ 时， $n = 12000$ 转/分。而电机的电磁转矩 $M = P / 975 n$ （式中 P 为电磁功率），当功率恒定时，随着转速的升高， M 将减小。当 M 减小时，电机绕组的导线因电流减小而其截面可以缩小，这样电机的重量和体积可以减小。对于高速机械，因其转矩小，相应其重量、体积也小。

发电机自激系统中的变压器、电抗器和电容器，由于频率提高而其重量和尺寸也可减小。因为变压器电势 $E = 4.44 f WBS$ （式中 W 为绕组匝数， B 为铁芯的磁通密度， S 为铁芯截面积），当电势不变时，取同样匝数和磁通密度，则 S 随 f 的提高而减小。电抗器电抗 $X_k = 2\pi f L$ ，当 X_k 恒定时，电感 L 随 f 的提高而减小。电容器的容抗 $X_c = 1 / 2\pi f C$ ，当

X_c 恒定时，电容 C 随 f 的提高而减小。

但频率提高至 400 赫时，由于集肤效应的影响，使电缆、配电装置和电器元件的重量和尺寸指标有些增加。

总的说来，频率提高至 400 赫时，电机、整流装置和电动机拖动的机械的重量减小到 60% 是主要的；

2. 用静止整流器代替变流机对直流用电设备供电时，滤波要求低；

3. 因短路电流近似与短路电路的电抗成反比，当频率高时电抗大，因此可限制短路电流，并改善装置安全工作的条件；

4. 动态性能好。由于负载控制线路的时间常数 $T = X_k / 2\pi f r$ ，当 X_k 不变时， f 提高则 T 减小，使系统的快速性增加。起动与发电机功率可比拟的异步电动机也快。电机的惯性常数 $W = CGD^2 n^2$ （其中 C 为常数； GD^2 为转子的飞轮惯量； n 为转速），当功率不变时，由 50 赫的 1500 转/分提高到 400 赫的 12000 转/分，将使发电机的惯性常数增大至 9 倍多；

5. 电动机频率的提高，一个重要优点是轻载时有很高的 $\cos \varphi$ （损耗较大）。

提高频率也存在一些问题，即：

1. 要制造高速机械装置和高速轴承与电动机配套；

2. 要有中频的电器、电机和仪表进行配套；

3. 高速机械噪声较大。

所以针对频率提高问题，目前国内外均在舰船上进行有关的试验研究。

§ 1-2 船舶电站发电机组的功率和数量的选择

为了确定船舶电站的总功率和发电机组的功率和数量，首先要知道全船电力负荷所需的总功率。这个总功率是通过船舶在各种运行工作情况下的电力负荷计算来确定的。根据计算所得的总功率再考虑到其他因素，如电网损耗、同时系数等，最后才能确定发电机组的功率和数量。

根据实船负荷情况记录和统计数据，也可用昼夜航线图表法或概率统计法确定发电机组的功率和数量。但是最简单而又能得出较准确的结果，并且便于检查和使用的方法是负荷表格法。

负荷表格法常用的又有两种：一是需要系数法；二是三类负荷表格法。它们的基本原理相同，只是后者把负荷分成偶然短时使用、重复短时使用和长期使用三类，考虑得更细致、更合理。下面就只介绍三类负荷表格法。

我们把全船用电设备的数量、负荷及使用情况分别进行计算并汇总成一个表，叫做电力负荷计算书。电力负荷的计算在船舶电气部分的设计中是一项较重要的工作，如果计算不正确，选择发电机组不恰当，将直接影响全船用电设备的正常运行和电站运行的经济性、可靠性。

一、船舶运行状态及用电设备的分类

1. 船舶运行状态的分类

对于不同类型、不同用途的船舶，运行状态可能是不同的。在负荷表中应包括哪几个

运行状态，应根据实际情况来确定。但是一定要把可能出现的最大负荷状态和最小负荷状态包括进去。这是确定电站总功率和最小一台发电机功率所必需的。下面举例列出舰船的典型运行状态工况。

民用船舶的运行状态如下：

- (1) 航行状态——满载全速的航行状态；
- (2) 进出港状态——港内低速航行或机动状态；
- (3) 离靠码头状态——包括起锚到主机起动为止的整个备航阶段；
- (4) 停泊状态——无装卸货的停泊状态；
- (5) 装卸货状态——货轮的装卸货或油轮的装卸油状态；
- (6) 应急状态——一般考虑船舶发生火灾或船壳穿漏时的状态；
- (7) 应急发电机工作状态——在海损情况下，主电站失效，为保证必要的救生、通讯、照明用电的应急发电机工作状态（选应急发电机用）。

水面舰艇的运行状态如下：

- (1) 停泊状态——指舰艇停泊或靠岸时。但包括停泊日常训练所需用电；
- (2) 起锚防空状态——起锚完毕到主机起动的整个备航阶段，同时要进行防空，使用对空武器；
- (3) 经济航行状态——以经济航速在海区正常航行；
- (4) 备战经济航行状态——指在编队航行中作经济航行而处于备战状态；
- (5) 战斗状态——保证战斗活动的所有电气设备投入工作。

2. 用电设备的分类

在小型船舶上用电设备较少，可以少分类或不分类。但对于大型舰船，其用电设备数以百计或千计，分布在全船的各个部位，为了使编制负荷表清楚，必须把全船用电设备按不同的用途和系统进行分类。一般可以分成下列几类：

- (1) 机舱辅机——包括为主机、锅炉服务的辅机和全船性服务的辅机。如滑油泵、海水泵、淡水泵、冷却泵、燃油输送泵、鼓风机、空气压缩机、消防泵、压载泵、舱底泵等；
- (2) 甲板机械——包括舵机、起货机、锚机、绞盘机和舷梯起吊机等；
- (3) 冷藏通风——包括冷藏货船、伙食冷库和空调装置等用的泵和通风机；
- (4) 机修机械——包括机舱起重行车、车床、钻床、刨床和电焊机等；
- (5) 照明及弱电设备——包括舱室照明、航行灯、强光灯、观察通讯设备及导航设备；
- (6) 武器装备——包括舰上的各种武器，如火炮、鱼雷、火箭、水雷、导弹等的操纵机械、发射机械和计算指挥仪以及消磁装置等。

用电设备作为电站的负荷，根据使用的特点，可以分为下列三类（参见附录 1-9）：

- (1) 第一类负荷——在船舶的某一运行状态下连续使用的负荷。例如：航行状态时的主机冷却水泵、主机燃油供给泵，离靠码头状态下的锚机，装卸货状态下的起货机等；
- (2) 第二类负荷——在某一运行状态下短时或重复短时使用的负荷。例如：航行状态时的燃油输送泵、滑油输送泵、卫生水泵和空调压缩机等；
- (3) 第三类负荷——在某一运行状态下偶然短时使用的负荷。例如：离靠码头状态下

的电动舷梯起吊机，航行状态下的机修机械等。

二、负荷表的编制与计算

编制负荷表是一个调查和确定每一个负荷具使用情况（如实际负荷程度、同组负荷的同时使用情况和全船同类负荷的同时使用情况），并由此计算出每一运行状态下电站的总负荷的过程。一个正确的判断，来自周密的调查研究和细致的分析。为此必须对具体使用情况作周密的调查研究。首先必须知道各项负荷的已知条件和数据，它们是：

1. 负荷的名称、用途、负荷类别（连续使用、短时重复使用等）；
2. 同种类负荷的数量；
3. 负荷的额定数据。即机械轴上所需要的最大功率 P_{J_e} （即作为机械轴上的额定功率）；
4. 机械轴上所配电动机的额定功率 P_{D_e} 、额定转速 n_e 、额定功率因数 $\cos\varphi_e$ 和额定效率 η_e 。此项由电力拖动设计或定型配套产品目录中给出，或按给出的最大机械轴功率 P_{J_e} 、额定电压和额定转速，从产品目录中选取相应的电动机。

由于系列产品中电动机的输出额定功率不一定恰好和机械轴上所需的额定功率相符，有时为了保证起动力矩和短时发出最大力矩，电动机的额定功率往往选得较大，因此电动机未能充分利用。而它长期需要电网供给的最大功率也小于额定需要功率。这一点在负荷表中用电动机利用系数来反映。电动机利用系数

$$K_1 = \frac{\text{机械轴上额定功率}}{\text{电动机额定功率}} = \frac{P_{J_e}}{P_{D_e}} \quad (1-1)$$

式中 P_{J_e} ——机械轴上额定功率；

P_{D_e} ——电动机额定功率。

在确定一台电动机需要电网供给的功率时，需要考虑到效率 η 和 $\cos\varphi$ （计算无功功率时需要）。当异步电动机负载在60~100%范围内变化时，其效率变化不大，故可按额定效率计算。而 $\cos\varphi$ 则应按具体负载程度来确定，计算时可参考附录1-1。

一台用电设备需要电网供给的功率为

$$P_{s_h} = \frac{K_1 P_{D_e}}{\eta} \text{ 千瓦（或千伏安）} \quad (1-2)$$

式中 P_{s_h} ——用电设备在机械满负荷时需要电网供给的有功功率。

一组同类用电设备在机械满负荷与同时使用时，需要电网供给的有功功率为

$$P_{s_{hs}} = P_{s_h} \cdot m \text{ 千瓦} \quad (1-3)$$

式中 m ——该组同类用电设备数目。

由于在某一运行状态时，机械并不一定满负荷，可用机械负荷系数 K_2 来反映它的影响。

$$K_2 = P_J / P_{J_e} \quad (1-4)$$

式中 P_J ——某状态下机械轴上实际需要功率；

P_{J_e} ——机械轴上额定需要功率。

在某一运行状态时，同类机械不一定都同时使用。因此我们用一组同功率的用电设备的同时使用系数 K_0 来计及它的影响。

$$K_0 = n / m$$

式中 n —— 该组同时工作的用电设备数目；

m —— 该组用电设备的总数。

以舵机电动机为例，一般舵机安装两台电动机。在航行状态时，只用一台电动机拖动，另一台作备用，这时 $K_0 = 1/2 = 0.5$ 。又因此时舵叶只作小角度偏转（定向航行），机械轴上实际需要功率很小，由实际调查得知机械负荷系数 $K_2 = 0.3$ 。

K_2 和 K_0 可由实际调查得出，也可适当参考附录 1-2 和 1-3 提供的数据。

K_1 和 K_2 的乘积反映电动机的负荷情况。故用电动机负荷系数 K_3 来表示。

$$K_3 = K_1 \cdot K_2 = \frac{P_{je}}{P_{De}} \times \frac{P_J}{P_{je}} = \frac{P_J}{P_{De}} = \frac{\text{机械轴上实际需要功率}}{\text{电动机额定功率}} \quad (1-6)$$

这样，同组用电设备所需有功功率 P_0 可确定为：

$$P_0 = m K_3 K_0 P_{De} / \eta = m K_3 K_0 P_{De} / \eta \text{ 千瓦} \quad (1-7)$$

对于交流用电设备，尚需计算其所需无功功率 Q_0 。

$$Q_0 = P_0 \operatorname{tg} \varphi \text{ 千乏} \quad (1-8)$$

式中 φ —— 用电设备的实际功率因数角。由实际负荷的 $\cos \varphi$ 求得。 $\cos \varphi$ 可根据电机的 P_{De} 、 n_e 和负荷程度由附录 1-1 中查得。

在计算完各组用电设备所需有功功率和无功功率之后，便可确定各运行状态下发电机应供给用电设备的总功率。此时应考虑到各组用电设备之间的总同时使用系数 K_{0I} （第一类负荷的）和 K_{0II} （第二类负荷的）。因为不可能所有用电设备在该状态下自始至终地工作着。例如：滑油分离机随着润滑油的脏污程度每隔 5~6 小时工作一次，工作时间为 0.5~2 小时；舰艇上的火炮也不是不间断地发射的。

某状态总同时使用系数为该类负荷同时使用的总功率与该类负荷总功率之比。

通常，系数 K_{0I} 在 0.8~1.0 范围内；系数 K_{0II} 在 0.3~1.0 范围内。具体选定可参考下述原则：

1. 在大的舰船上，由于负荷的数量较多，同时工作的可能性小些，因此同时工作系数比负荷少的舰船可取小些；

2. 舰船的活动愈紧张，同时工作系数就取得愈大，因为设备的同时工作可能性愈大。

例如：舰艇在战斗状态时 K_{0I} 取 0.8，而在停泊时，可取 0.65。

在发电机供给的总功率中，尚需计入 5% 的电网损耗。

因此某状态需要发电机供给的总功率为：

$$\text{总有功功率 } P_{\Sigma} = (K_{0I} P_I + K_{0II} P_{II}) \times 1.05 \quad (1-9)$$

$$\text{总无功功率 } Q_{\Sigma} = (K_{0I} Q_I + K_{0II} Q_{II}) \times 1.05 \quad (1-10)$$

式中 P_I 、 P_{II} —— 该状态下第 I 和第 II 类负荷的总有功功率；

Q_I 、 Q_{II} —— 该状态下第 I 和第 II 类负荷的总无功功率。

在该状态下负荷的平均功率因数 $\cos \varphi_B$ 可用下法求得，即

$$\operatorname{tg} \varphi_B = \frac{Q_\Sigma}{P_\Sigma}, \quad \varphi_B = \operatorname{tg}^{-1} \frac{Q_\Sigma}{P_\Sigma} \quad (1-11)$$

在该状态下可能短时需要的最大负荷为:

$$P_{\max} = P_\Sigma + P_I \quad (1-12)$$

式中 P_I —— 该状态第Ⅱ类负荷的总有功功率。

由此可得负荷表的编制过程如下:

1. 向轮机部门收集全船用电设备的原始数据, 包括 P_J 、 P_{Jr} 、 P_{Dr} 、 m 和额定转速。并且根据原始数据从产品目录中找出缺少的 P_{De} 和 η 、 $\cos \varphi$ 等数据;
2. 根据舰船类型选定所需计算的运行状态, 并将全部用电设备分类连同已知数据填入表 1-1 所示的表中 (其中只以航行状态为例, 其余状态同样填写 8 列数字);

表1-1 负荷计算表

序号	用电设备名称	数量	电动机数据					所需总功率	电动机利用系数 K_1	航行状态								
			最大机械轴功率 千瓦	功率 千瓦	转速 转/分	效 率 %	功率 $\cos \varphi_e$			机械 负荷系 数 K_2	电动机 负荷系 数 K_3	功 率 $\cos \varphi$	同 时 使 用 系 数 K_0	所 需 有 功 功 率 千瓦	所 需 无 功 功 率 千乏	负 荷 类 别	实 际 效 率 %	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
一、甲板机械																		
1																		
2																		
3																		
4																		
I类负荷总功率 P 、 Q 千瓦、千乏																		
I类负荷总功率 P 、 Q 千瓦、千乏																		
II类负荷总功率 P 、 Q 千瓦、千乏																		
I类负荷总功率考虑同时工作系数 0.8 时总功率 千瓦、千乏																		
II类负荷总功率考虑同时工作系数 0.3 时总功率 千瓦、千乏																		
考虑同时工作系数后 I、II类负荷总功率之和 千瓦、千乏																		
再考虑网络损失 5% 以后所需总功率 千瓦、千乏																		
加权平均值功率因数 $\cos \varphi_B$																		
发电机选择 台数 × 千瓦																		

3. 确定系数 K_1 、 K_2 和 K_0 , 并计算各组负荷所需的功率;
4. 计算每一状态下各类负荷所需的总功率;
5. 根据总同时使用系数 K_{0I} 和 K_{0II} 并计及电网损耗 5% 确定各状态所需的电站功率;

6. 根据上述计算结果选择发电机的功率和台数，并核算各状态下发电机负荷的百分率。一般要求发电机有10~20%的储备功率供今后进一步电气化时使用。最后用可能短时需要的最大负荷 P_{max} 校验发电机的过载能力是否满足。

具体选择发电机的功率和数量时应考虑下列要求：

1. 民用船舶电站应保证各运行状态中最大的用电量，并装有备用机组，其容量应等于最大一台机组的容量，当主发电机之一发生故障时，能立即投入供电；

2. 舰用电站应满足战斗状态的用电量，并保证其备用容量为战斗状态下容量的50~100%；

3. 每台机组的最高负荷率为80%左右；

4. 发电机的类型和功率大小尽可能一致，以减少备品和增强发电机组之间的互换性，并联运行也较方便；

5. 舰船在停泊状态时，当其用电量小于最小一台发电机功率的50%时，可安装停泊发电机；

6. 对于民用船舶，要求使用的发电机台数要少些，使维修简单管理方便。但是也不能太少而使发电机长期轻载运行，不经济。一般选用三台发电机；

7. 对于舰艇，为了提高其生命力起见，应增加发电机台数和电站数。大型舰艇为3~4个电站，中小型舰艇（如护卫舰、驱逐舰）的电站不少于2个，小艇可只装一个电站。当一艘舰艇上有两个电站时，每一电站要安装二台发电机，在战斗时，实施分区供电以提高供电的生命力。

发电机的原动机可为柴油机、汽轮机或燃气轮机。在用蒸汽动力装置的舰艇上，除了安装汽轮发电机之外，为了快速备航和提高生命力，也安装柴油发电机组。同一电站用两种原动机，维护管理工作较为复杂。在知道发电机的单机容量后，可按配套产品目录选出原动机，其容量应计及发电机的效率和过载能力。常用的柴油发电机组系列和汽轮发电机组系列见附录1-4和1-5。直流发电机和交流发电机系列的主要规格见附录1-6和附录1-7。

负荷计算举例见附录1-8（直流电站）和附录1-11（交流电站）。

练习

按附录1-12参数计算并选择交流发电机之功率和数量。

第二章 船舶电网

§ 2-1 概述

由船舶电缆、导线和配电装置以一定的联接方式组成的整体称为船舶电力网络，简称船舶电网。犹如人体中血管输送血液到各器官去那样，发电机所产生的电能就是通过船舶电网而配送到布于船舶各部分的用电设备。

对船舶电网的基本要求是生命力强，即要求电网在发生故障或局部破损时仍能保证负载的连续供电，并限制故障的发展和将故障的影响局限于最小的范围之内。此外，尚要求经济性好、安装及使用维护方便、灵活等。

下面先简单介绍一下船舶电网的线制、供电网络和配电网。

一、船舶电网的线制

对直流电的船舶，常用配电方式主要有三种（见图2-1）：

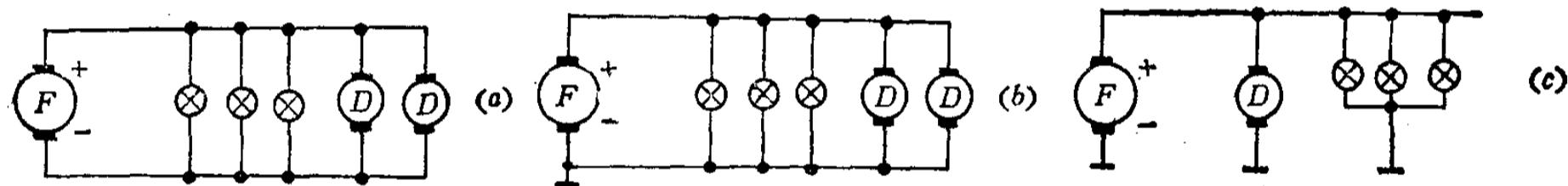


图2-1 直流配电系统

(a) 直流双线绝缘系统；(b) 负极接地的双线系统；(c) 以船体作负极回路的单线系统。

1. 双线绝缘系统；
2. 负极接地双线系统；
3. 以船体作为负极回路的单线系统。

对交流单相的船舶，可采用双线绝缘系统或一线接地的双线系统。

在单线制中，由于利用了船体的铁壳作为回路的回线，这样可节省大量的电缆、简化配电装置、减少配电板与开关的尺寸与重量，从而降低了建造费用。但当导线绝缘损坏时，可造成较大的漏电而引起短路。因此要求随时检查电网的绝缘情况和接地的良好程度，否则当接地松脱或接触不良时就会产生电弧或局部发热，甚至引起火灾。同时对人身的危险性来讲也相对的变大。但是对此亦有不同的看法，认为单线制因有较大的漏电流就能使保护装置动作，从而能及时切除故障。总之，使用单线制时须特别小心。目前仅用于少数小船、漁船上。

对三相交流电的船舶，常用配电方式也有三种（见图2-2）：

1. 三线绝缘系统（三相三线系统）；
2. 中点接地的四线系统（三相四线系统）；
3. 利用船体作为中性线回路的三线系统（中点接地的三线系统）。

三相绝缘系统的特点是照明系统与动力系统是经过变压器相联系的，所以在两系统间只有磁通的联系而没有电气的直接联系，因而相互间影响小。当船舶电网的绝缘电阻符合“规范”的要求，且船舶电力系统的对地电容又较小时，即使其中有一相对船体发生短路故障，仍不会产生单相短路电流。这样，电力系统既具有较好的电气防火安全性，亦保证人体触及一相时的电气安全性。但是亦带来了两个主要问题：一是随着船舶向大型化、自动化发展，电气设备大量增多，电缆线数、长度及其截面的增加，以及防无线电干扰电容的广泛应用，使船舶电力系统的对地电容大为增加，从而就使电网相线和船体之间产生了电气联系，并有可能危及人体安全和引起电火灾的电压存在。这就使防火及电气安全性大大降低。特别是对采用高电压和中频电源的船舶，更应重视。二是在中点绝缘系统中，在故障状态或合闸瞬间可产生 $2 \sim 5$ 倍过电压的冲击，这是现代船舶上广泛使用半导体元件的计算机、集中控制台和测量仪表必需注意的问题。

对中点接地的三相四线系统，其特点是电力和照明可由同一电源供给以不同的电压。过电压倍数小。且维护方便，不需要经常检查电网的绝缘电阻。当单相接地时便形成短路，且比三线绝缘系统的短路电流为大。但也有人认为合理的选择分段保护后，在故障点附近就能切除分段开关，并根据切断点可方便地检查出故障点，这反而成了这种系统的特点了。在中点接地的四线系统中，具有较大的中线电流和三次谐波环流。但这与三相负载的不对称度及两台并联机组的有功和无功负载分配的不均匀有关。因此要加接直流均压线并把不均匀度限制在10%以内。三相三线系统与中点接地的三相四线系统的比较见表2-1。

表2-1 中点接地的三相四线系统与三相三线系统的比较

序号	系统方式 比较项目	中点接地的三相四线系统		三相三线系统	
		状 态	措 施	状 态	措 施
1	接地电流	均为三相短路电流或更大	要求合理选择分段保护 保证及时切除	有少量对地分布电容，并随系统容量和线路的增减而增减	
2	暂时性接地故障的后果	转为短路	同上	可能形成断续电弧	
3	一相接地时，其它相的电压升高	为相电压		等于或略大于线电压	
4	电弧接地过电压	可不考虑		可能很高	提高设备耐压
5	操作过电压	最低		很高	同上
6	单相接地延续时间	最短		长	要求迅速查出，排除故障

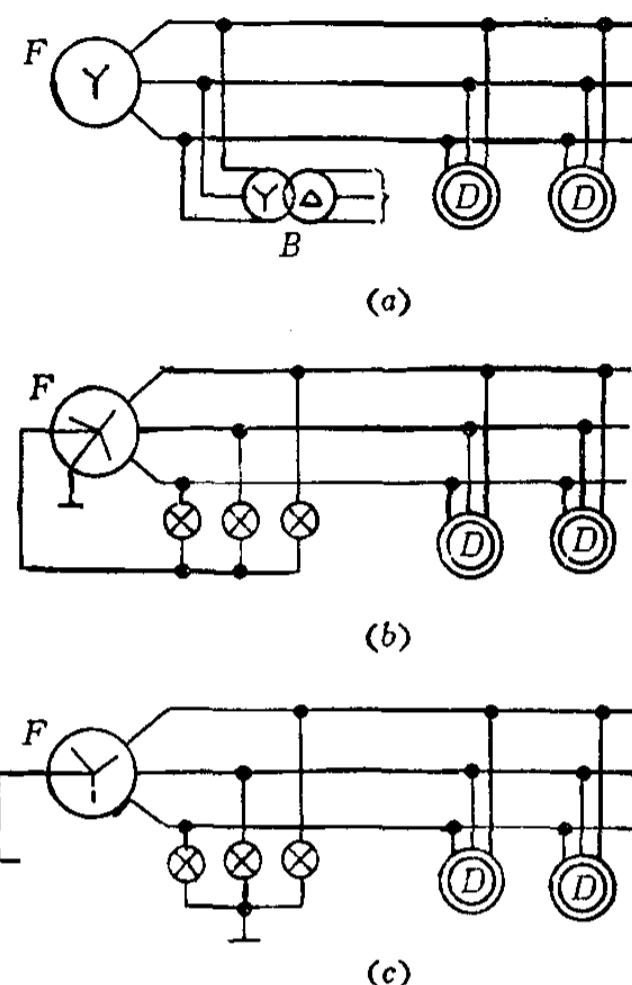


图2-2 交流电的配电系统
(a)三线绝缘系统；(b)中点接地的四线系统；(c)中点接地的三线系统。

(续)

序号	系统方式 比较项目	中点接地的三相四线系统		三相三线系统	
		状态	措 施	状 态	措 施
7	单相接地发展到多相短路的可能性	最小		最大	要求迅速查出，排除故障
8	接地故障的排除	方便		困难	
9	绝缘电阻的检测	困难	要使设备接地回路开断	方便	
10	负载不平衡时中点位移及负载电压的不对称度	最小		最大	
11	中线电流	有(无危险)		无	
12	发电机并联时的三次谐波环流	有		无	
13	三次谐波对通讯的干扰	有	报房电源需加装滤波器	无	

目前大多数船舶是使用三线绝缘系统，但也有些船舶是使用中点接地的四线系统。

二、船舶电网的供电网络

供电网络是指主发电机与主配电板之间、应急发电机与应急配电板之间、主配电板之间以及主配电板与应急配电板之间的电气联接网络。

根据船舶种类的不同、负载的多寡以及对船舶电站的不同供电要求，供电网络可分为单主电站供电网络及多主电站供电网络。前者大多用于民用船舶，后者大多用于军用舰艇及大型客船。

1. 单主电站供电网络

图 2-3 所示为万吨级货轮单主电站的典型供电网络。船舶电站的总容量为 1000~1200 千瓦，发电机的台数可为 3~4 台。每台机组通过电缆、自动空气开关和主配电板汇流排(即母线)相连接。当两台机组同时供电时，发电机并联运行在共同的汇流排上。这种运行方式不但简化了供电网络，提高了电站备用容量的备用程度，并且可以减小由于大的用电负荷的急剧变化(例如起动大电动机时)所引起的电网电压波动。

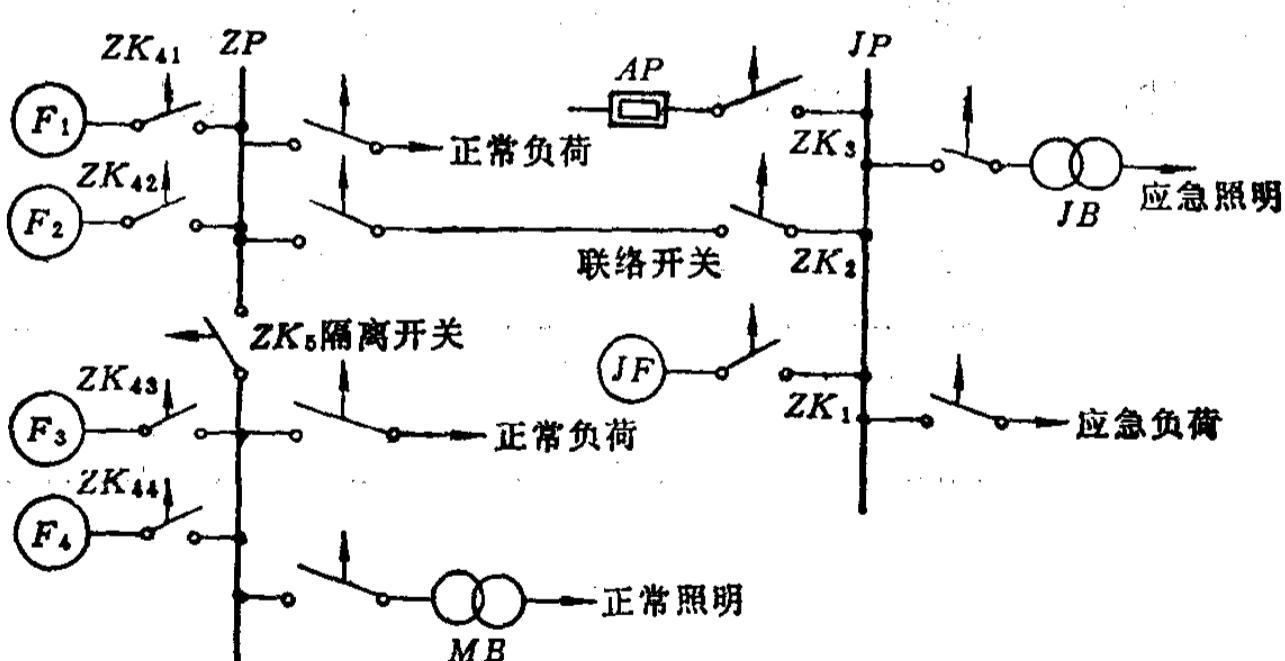


图 2-3 单主电站供电网络

ZP—主配电板；JP—应急配电板；F₁~F₄—主发电机；JF—应急发电机；MB—照明变压器；JB—应急照明变压器；AP—岸电箱；ZK—自动空气开关。

图 2-3 中主配电板汇流排是采用分段汇流排式的联接方式，即通过隔离开关把汇流排分为两段或几段。它比单汇流排式的联接方式仅多了一只或几只自动开关，但却具有一系

列的优点。例如：同时工作的发电机可以单独运行，也可以并联运行；当汇流排的一段发生故障时，断开汇流排的分段隔离开关，就可通过另一台机组使未发生故障的一段汇流排仍可正常供电；当某段馈线发生短路故障时，由于分段隔离开关的迅速跳开，切断了另一段汇流排上供给的短路电流，因而馈线上的短路电流就相应减少。

在单主电站供电网络中，正常情况下是由主发电机供电给主配电板汇流排和应急配电板汇流排。在主发电机发生故障停止供电时，应急发电机可手动或自动起动投入工作，并通过联锁装置将联接主配电板和应急配电板的联络开关断开，既可防止应急发电机向主配电板供电而造成过载，也可避免当主发电机组恢复供电时出现两者同时向应急配电板供电而发生事故。

当船舶停靠码头时，还可利用陆上的电网供电。岸电一般均接到应急配电板上，然后通过联络开关再送至主配电板。这里必须注意图 2-3 中的自动开关 ZK_1 、 ZK_2 、 ZK_3 和 $ZK_{41} \sim ZK_{44}$ 之间必须有电气联锁（详见 § 7-5）。例如：当 ZK_1 合闸时，其它自动开关都必须断开，以防止两种独立的电源发生不允许的并联运行而造成故障。

2. 多主电站供电网络

图 2-4 所示为某种类型舰艇的多主电站供电网络。舰上有两个发电站：一组为汽轮机电站（艉电站）；另一组为柴油机电站（艏电站）。每个电站各装有两个发电机组，同一电站发电机可长期并联运行。为了提高供电的可靠性，采用跨接线将艏艉两电站的主配电板连接起来。在非战斗时，全舰负载轻，跨接线的自动开关（联络开关）接通，这时可只由一个电站向全舰供电。在战斗时，跨接线上的开关断开，二电站独立工作，分区供电。对重要负载可以由两个电站供电。当一条供电线路断电时，可以在负载处由转换开关转接到另一电站的供电线路上去，以提高供电的可靠性。

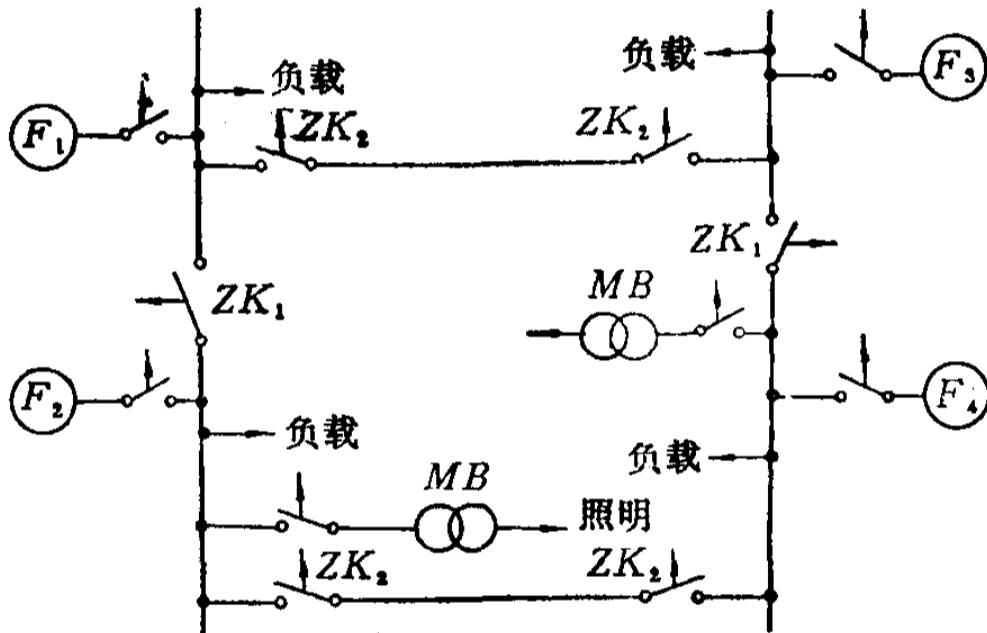


图 2-4 多主电站供电网络
 F_1, F_2 —汽轮发电机； F_3, F_4 —柴油发电机； MB —照明变压器； ZK_1 —隔离开关； ZK_2 —联络开关。

三、船舶配电网络

是指主配电板及应急配电板到用电设备的网络。当船上用电负荷较多时，不可能全部负载均由主配电板直接供电，而是将电能从主配电板经由分配电板或分配电箱再分到负载。为了分析的方便，通常称主配电板与分配电板之间的网络为一次配电网络，而分配电板到各用电负荷之间的网络为二次配电网络。

1. 根据用电设备的不同，船舶配电网可分为下列几种

(1) 动力电网：指供电给电动机负载和 600 瓦以上的电热装置及功率大于 1 千瓦的探照灯。其用电量占总负载的 70% 左右，它可由主配电板直接供电；亦允许安装在附近的各种相同性质的辅机合并成组，由主配电板单独供电的分配电箱或分配电板供电。

(2) 正常照明电网：通常联接到主配电板汇流排上的变压器副边，供电给各照明分配

电箱，再由各照明分配电箱供电给照明灯具。对机舱中的照明须交叉分布，并至少有两个独立供电线路，以保证在一路线路有故障时仍可保持有50%的照明。外部照明线路应在驾驶室能集中控制其开断和接通。

(3) 应急电网：当正常电网失电时能自动接通应急电源，供电给特别重要的辅机(如：舵机、消防泵等)、应急照明、各种信号灯以及通讯助航设备。在正常工作情况下，应急电网可通过联络开关由主配电板供电。

(4) 小应急电网：一般为由24伏蓄电池供电的直流电源，供电给公共场所的小应急照明、主机操纵台、主配电板前后、锅炉仪表、应急出入口处、艇甲板等处的最低照明及助航仪设备的用电。蓄电池组的容量应足够两小时供电给全部小应急电网用户。

(5) 弱电网：是向全船无线电通讯设备(如收发报机等)、各种助航设备(如雷达、测向仪、测深仪等)、船内通讯设备(如电话、广播等)以及信号报警系统供电的网络。这类用电设备的特点是耗电量不大，但对供电电源的电压、频率、稳压稳频的性能有特殊的要求，而与主电源不尽相同。因此，船上有时需要配置专门的发电机组或逆变装置向全船弱电设备供电。

2. 一次配电电网结线方式

(1) 喂线式：各分配电板及用电设备由主配电板的单独馈线引出。如图2-5(a)所示。为了提高电站供电的可靠性，在具有二个电站时常采用以棋盘式的顺序给各分配电板供电。如图2-5(b)所示。

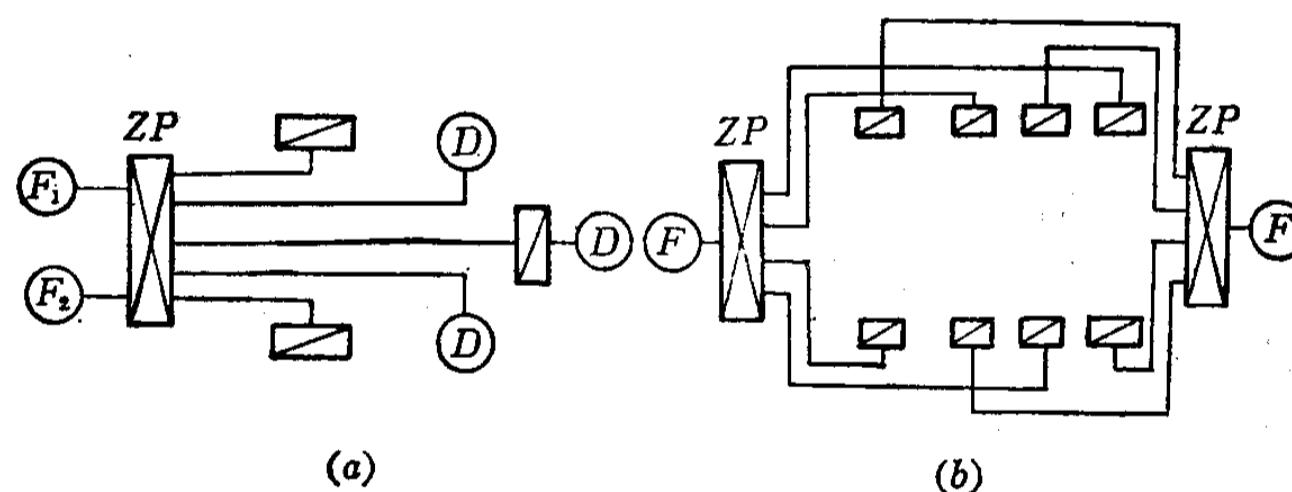


图2-5 喂线式配电网

(a) 一般馈线式；(b) 棋盘馈线式。

(2) 干线式：由主配电板引出几根叫做干线的供电电缆，用电设备就从干线上的接线盒引出的分支电缆取得电源。如图2-6(a)所示。

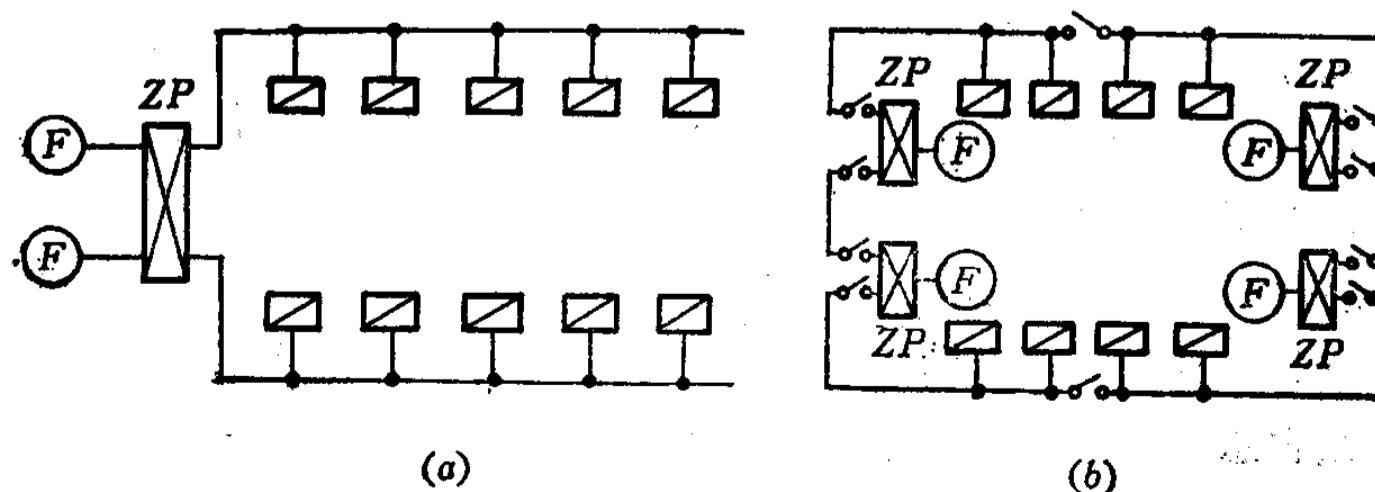


图2-6 干线式配电网

(a) 一般干线式；(b) 环路干线式。

在有两个电站时，常采用环路干线式供电。如图2-6(b)所示，两边供电能保证用户得到较为可靠的供电，但对电气装置不易进行集中控制。

(3) 混合式：一部分分配电板或负载采用馈线式，另一部分则采用干线式。通常，前者是功率较大较重要的负载，后者是较次要或功率较小的负载。

上述一次配电网的三种配电型式，各有不同的特点和适用范围，如表2-2所示。

表2-2 几种配电型式的比较

	馈 线 式	干 线 式	混 合 式
1. 供电生命力	强。本馈线受到破损不影响其它馈线的工作	弱。干线中有一处破损，造成短路使主配电板上的干线自动开关跳闸，整个干线失去电源	较强。介于馈线式和干线式之间
2. 使用维护	可在主配电板上控制供电、检测各负载	与馈线式相反	与馈线式相似
3. 对水密隔舱的影响	电缆多，穿过水密舱壁和甲板而降低了舱室的水密性	与馈线式相反	与馈线式相似
4. 安装工作	敷设复杂，工作量大	方便，工作量小	与馈线式相似
5. 适用范围	1. 近代舰船 2. 重要负荷，大功率负荷	1. 电气设备较少的轻型舰船 2. 照明网络 3. 非重要负荷，小功率负荷	1. 轻型及辅助舰艇 2. 民用船舶

3. 重要设备的供电方式

为了保证对船舶航行最重要设备的供电，往往在配电方面采取以下措施来获得较高的可靠性和生命力。

(1) 由主配电板直接供电而不经分配电箱供电。例如：舵机、锚机、消防泵、消防自动喷水系统、航行灯控制箱、电罗经、苏伊士运河探照灯、无线电台及助航仪电源等均须由主配电板直接供电。

(2) 对于某些特别重要设备，如：舵机电动机和航行灯控制箱等应由两路供电，并尽量远离。通常可分别由主配电板在左、右舷馈线供电或由主配电板及应急配电板分别供电。这样在有一条馈线发生故障的情况下，仍能保证负载的供电。

(3) 当高峰负荷引起发电机过载时，将次要用电设备从电网上自动切除，即自动卸载(详见§6-2)，以使发电机恢复到正常运行。

(4) 采用分段母线方式供电。

4. 分配电箱设置原则

为了减少主配电板上的开关设备和节省主馈电缆，同时为了对用电设备能进行分区控制，除了必须由主配电板直接供电的一部分比较重要的用电设备及大容量设备外，其余大量用电设备均通过分配电箱进行供电。分配电箱设置原则如下：

(1) 为便于控制管理，可将船上同一系统或同时投入工作的多个用电设备设置一个分配电箱。例如：同为主机燃油系统的燃油输送泵、驳运泵、油水分离器等可由同一个分配电箱供电。类似的尚有滑油系统、冷却系统、冷藏系统、锅炉设备、空调系统、起货设备、防摇装置、航行灯及助航设备等。

(2) 安装位置相近的各个用电设备往往可单独设置一个分配电箱，尤其对于远离主配