

要求具有良好的定位性能,为此决定采用联合电力推进(图 4.2.7.2 为其单线原理简图)。就电流种类而言,该船为交直流电力推进系统。

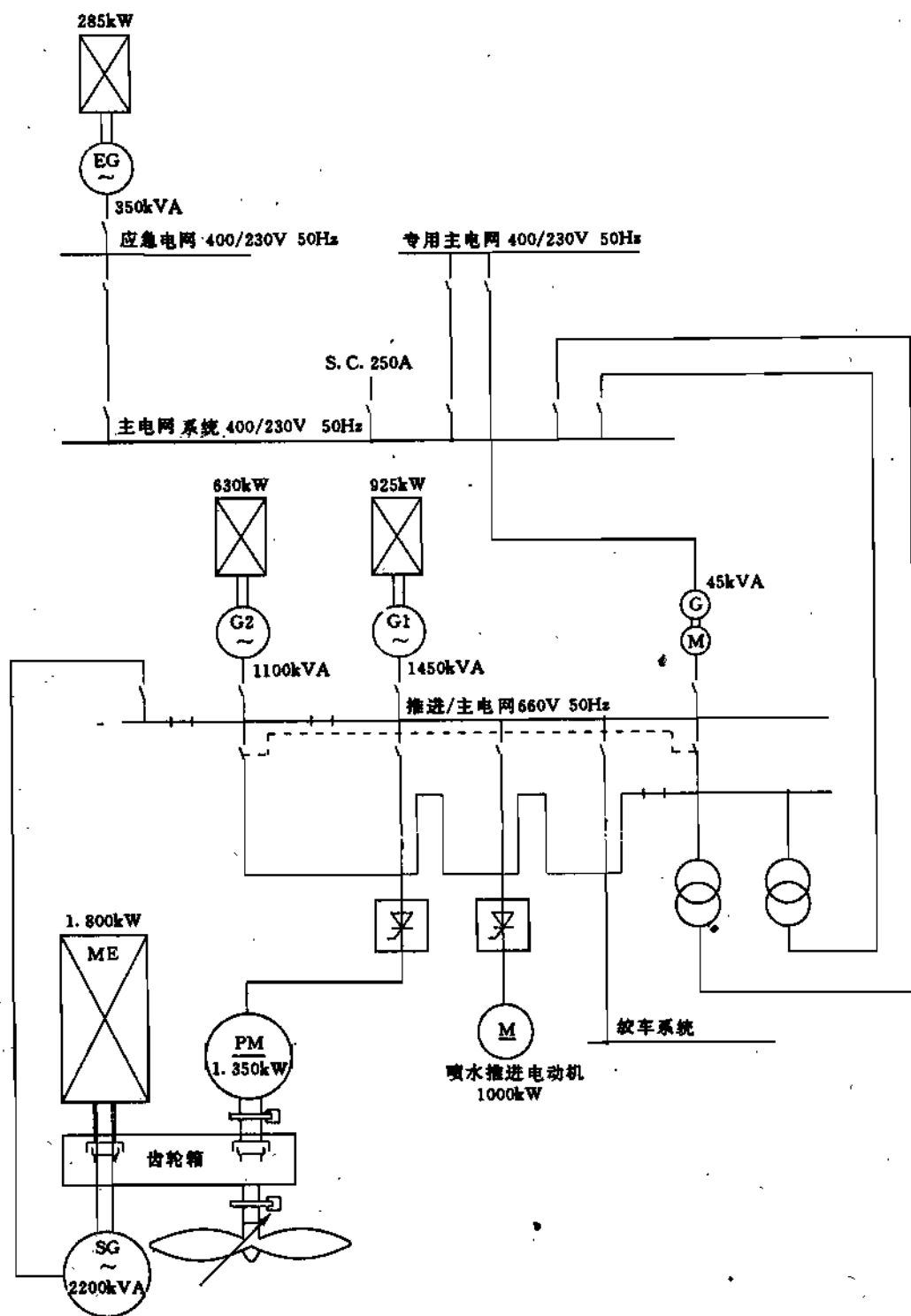


图 4.2.7.2 渔业调查船推进原理简图

该船的主供电系统可由两台具有相同类型但功率输出不同($1 \times 1450\text{kVA}$ 和 $1 \times 1100\text{kVA}$) 的柴油发电机组 G_1 和 G_2 供电,此外还可由一台常规的主机 ME 驱动的交流发电机(2200kVA) SG(轴带发电机)供电,所有这些发电机均可并联运行,且向同一汇流排系统供电。图中 EG 为应急发电机。

推进装置可具有 3 种不同运行方式:

1) “变螺距控制”方式

推进器由主机带动作恒速运行(通过变螺距改变推进器推力大小和方向),同时由轴带发电机 SG 发出电功率,如柴油发电机组与此轴带发电机并联运行,则应首先由柴油发电机组承担电负载,以使此轴带发电机尽量少分担电负载,这意味着主推进可获得较大功率。

2) “推进电动机”方式

推进器以对于低噪声运行最佳的固定螺距,由推进电动机 PM 驱动作变速运行,其可无级调速至最低转速,且可改变转向以实现船舶后退。推进电动机 PM 所需之电功率可由分别运行或并联运行的柴油发电机组或轴带发电机提供,其负载的控制应使得按这些交流发电机各自的输出进行分摊。

3) “加速航行”方式

推进器由主机和推进电动机共同驱动作恒速运行,其推力大小和方向可通过改变螺距来调节。电功率由分别运行或并联运行的柴油发电机组提供。

装设在该船首部的喷水推进泵可从 660V 的主推进供电系统获得供电,它的运行可大大改善船舶机动性能。

5. 太阳能电池电力推进小艇

近年来随着环境保护要求的提高,国内外出现了大批的电力推进小艇,如我国西湖的电动游艇采用蓄电池电力推进,以 20 只蓄电池串联($2 \times 20\text{V}$)后供电给直流电动机(2.5kW)。又如国外电动艇公司(Electric Boat Company)的电力推进艇采用功率为 $2.2\text{kW} \sim 3.7\text{kW}$ 的电动机,其所用的标准电池为 $6\text{V}^{[7]}$ 。

特别值得注意的是太阳能电池推进艇,如由德国 Schottel subsidiary 开发的原型太阳能艇“索利斯特”号(SOLIST)^[1],其艇长为 7.32m ,艇宽为 2.3m ,提供了 4 人用的充裕空间。在阳光充足,太阳能装置充分发挥作用时,航速可达 9km/h ,推进系统基于 SCHOTTEL 方向舵推进器原理,采用把推进电动机水平地安装在装置的顶部,且通过一齿状带与推进轴相连接的简单设计,该轴被支承在低摩擦无润滑的轴承中。

这一系统采用把光直接转变成电能的光电原理,所采用的太阳能电池全部组装在顶上,可在其上行走,且可如任何其他艇甲板一样经受冲水。

“索利斯特”号设有一合计额定容量为 1kW ,由 720 个太阳能电池组成的 9m^2 的太阳能发电器,由微机控制的高效率的 DC/DC 转换器确保此太阳能发电器可在最佳工作点(MPP)或最大功率点运行。此 MPP 跟踪系统保证了太阳能发电器总是产生所可能的最大合计功率,而不管天气条件和蓄电池的充电情况如何。这是任何太阳能艇设计取得成功的重要的先决条件。

第3章 交流电力推进

4.3.1 概述

1. 交流电力推进的特点

由于交流电力推进装置具有极限功率大、重量轻、体积小、成本低、维修简便等优点,故常被应用在大型船舶上,以提高装置的技术经济指标。图 4.3.1.1 和图 4.3.1.2 为我国生产的交、直流电机重量和效率的比较曲线,图中各曲线分别表示:

“1”——额定电压为 220V ~ 660V 的 ZD 系列直流电动机;

“2”——额定电压为 6000V 的 TD 系列三相同步电动机;

“3”——额定电压为 3000V 的 JS, JSQ 系列鼠笼转子异步电动机;

“4”——额定电压为 3000V 的 JR, JRQ 系列绕线转子异步电动机。

实线对应于额定转速(对异步电机为同步转速)为 500r/min 的情况;虚线对应于 1000r/min 的情况。

随着电子技术的发展,交流电力推进的机动性正在不断提高,例如电磁调速异步电动机可进行 1:10 的无级调速,此外如交流晶闸管变频调速和串级调速也已应用在电力推进上,这就为采用恒速交流主发电机,且改善交流推进电动机的调速性能开辟了前景。

2. 交流电力推进的分类

交流电力推进,按其推进电动机类别,可分成异步电动机和同步电动机两大类。

1) 异步电动机

a. 绕线型异步电动机

这种电动机不需要直流励磁(与同步电动机比较),可应用在

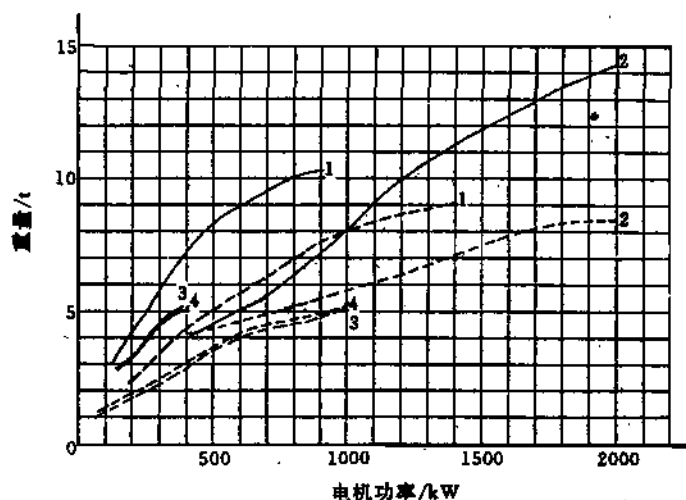


图 4.3.1.1 交、直流电机重量比较

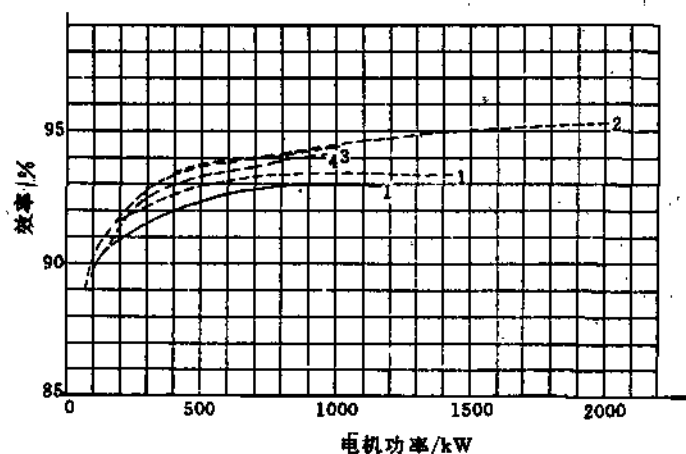


图 4.3.1.2 交、直流电机效率比较

转子上串加电阻的方法来起动电动机,操纵较方便。但串加的起动电阻较大,电动机体积和重量较大。这种电动机虽可用转子串加电阻来调速,但由于推进电动机功率大,调速时消耗在电阻上的能量很大,不经济,所以还是要采用调节主发电机组转速来改变主发电机频率,从而改变推进电动机转速的方法。此外这种电动机功率因数低、效率低(与同步电动机比较),经济性差。

随着电子技术发展,可采用晶闸管串级调速系统,将转子内的电流整流成直流,再逆变成交流,以把转子内原要消耗在电阻上的电能反馈至电网,从而提高经济性(见图 4.3.1.3)。

b. 电磁调速异步电动机

电磁调速异步电动机(滑差电机)为一种交流无级变速电机,其由普通鼠笼型异步电动机和电磁转差离合器组成,可在规定的转矩和调速范围内作平滑的无级调速,调速范围广;由于具有转速负反馈的自动调节系统,故调速精度高;此外其起动转矩大、结构简单、使用可靠,维修方便。一般认为其缺点是低速运行时效率低、发热

大,这是针对恒转矩负载而言的。但对螺旋桨负载而言,其类似于通风机负载,低速时其转矩也急剧下降,使输入电流相应减小,即输入功率随输出功率减小而下降,发热并不大,这一点已在实践中得到验证。这种电动机常用在工作船上,组成联合电力推进或辅助电力推进,以获得船舶的低速航行(见 4.3.6)。由于低速推进的功率小,故电动机功率也小(如采用 55kW),可由船舶电网直接供电。

c. 鼠笼型异步电动机

这种电动机最简单。除通过调节原动机转速,即改变发电机频率来实现推进电动机调速外,尚可采用晶闸管变频来实现调节。

为减小起动电流,可选用高滑差异步电动机,但其与普通鼠笼异步电动机相比,效率要低得多,故在起动电流允许时,应尽可能选用普通鼠笼异步电动机,见 4.3.6 中所述。

在主动舵中,一般也采用此种电机,但其应为潜水电机(见 4.3.6)。

2) 同步电动机

应用这种电动机的优点是,重量轻、体积小、效率高,功率因数可调到 1,所以建造成本低、营运经济性好。由于晶闸管变频调速技术的实际应用,采用这种电动机原有的缺点,如同步电动机需要直流励磁,原动机需要在 100%~35% 额定转速范围内调速,操纵性能差,而且操纵复杂等一系列问题都已得到解决,因此同步电动机在交流电力推进中,特别是在大功率推进中被广泛采用。

使用三相同步推进系统时,应考虑足够的剩余转矩,以确保在恶劣天气或在转弯机动时推进电动机不会失去同步^[8]。

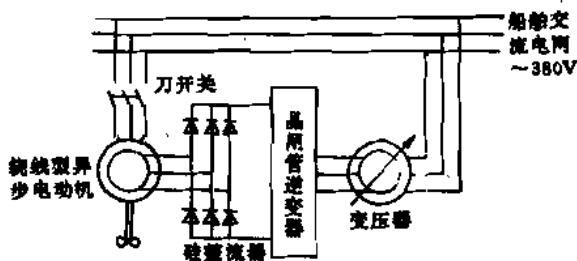


图 4.3.1.3 绕线型异步电动机晶闸管串级调速

4.3.2 主 电 路

1. 电压和频率的选择

主发电机和推进电动机的线电压主要与这些电机的功率有关,其最高电压一般规定为 6300V,但美国规定为 7500V,此外也有采用 10000V 的(如大型远洋客轮“伊丽莎白二世女王”

号电力推进系统中所采用的电压)^[3]。

通常选用以下几种电压:三相 400V, 440V, 660V, 3150V, 6300V。当推进功率较大时,应选用高压,以减小主电路电流。

在采用联合电力推进和辅助电力推进时,一般应选用船舶电网电压(通常为 400V),但当推进功率较大时,应选用较高的推进主电路电压,并在推进主电路与船舶电网之间设置变压器。在采用较高电压时,应优先考虑下列电网标准电压:3000V, 3300V, 6000V, 6600V, 10000, 11000^[11],以符合国际电工委员会 IEC92-503 出版物的要求。

由于推进装置的独立性,故一般对频率不予规定,可与标准频率 50Hz 或 60Hz 不同,而根据推进电动机可能的极对数及螺旋桨最有利的转速来选取。但如有可能,最好选择主发电机(在额定转速下)的频率为 50Hz 或 60Hz。

2. 主发电机台数选择

交流发电机不能串联,只能并联。某些交流电力推进的调速要靠原动机调速来得到,且由于原动机调速器特性很难做成一样,要使并联的发电机稳定地运转和负载按比例分配,就须设自动调频调载装置,为此不希望主发电机台数多。此外,为提高经济性,总希望其台数少,功率大(大功率机组效率比小功率机组效率高,单位重量也小)。因此交流电力推进的主发电机台数一般是较少的。

采用汽轮机电力推进的优点是,汽轮机功率大,使用可靠,可不设备用机组,通常是一台汽轮发电机供电给一台推进电动机,甚至是一台汽轮发电机供电给两台推进电动机。采用柴油机电力推进,由于柴油机功率有限,所以在一台功率不够时,就要用两台柴油发电机并联供电给一台推进电动机。

对于交流电力推进,不存在双电枢问题。对推进电动机,一般也是一台电动机拖动一个螺旋桨。除非尾推进机舱不够大或推进轴系高度不够,才考虑用两台直径较小的电动机机械串联。此时这两台电动机的定子电路是并联的。

3. 主电路接法

主电路型式决定于发电机功率和推进轴数,一般船舶推进轴为一个或两个。图 4.3.2.1 为一台主发电机供电给一台推进电动机的单轴推进装置主电路;图 4.3.2.2 为一台主发电机供电给两台推进电动机的双轴推进装置主电路;图 4.3.2.3 为两台主发电机供电给两台推进电动机的双轴推进装置主电路,低速航行时可用任一台主发电机供电给两台推进电动机;图 4.3.2.4 为两台主发电机供电给一台推进电动机的单轴推进装置主电路。在低速航行时也可用任一台主发电机供电给一台推进电动机。

因为在交流电力推进中,保护装置的动作不是直接断开主电路,而是断开励磁电路,因此主电路中可用刀开关。有时为加快主电路换接动作,可在励磁未完全消失前就断开主电路,此时须用空气断路器代替刀开关。

在图 4.3.2.1~图 4.3.2.4 中,KS 为推进电动机换向刀开关。

4. 中心电站-电力推进

过去的交流电力推进船舶上,常设有两个电站,一是推进电站,其频率和电压可变,用于向交流推进电动机供电,从而达到调节推进电动机转速的目的(见图 4.3.6.5, 180m³/h 挖蛎壳船的电力推进的实例);二是船舶日用电站,其频率和电压恒定,用于供给船舶日常用电、如泵、空调、照明、卫生设备等。

现在的交流电力推进船舶上,往往设中心电站,其电压和频率恒定,供给全船用电,包括交



图 4.3.2.1 主电路
接法 1G-1M

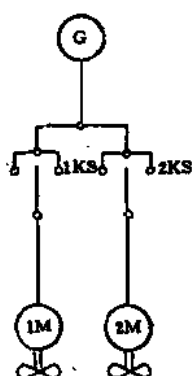


图 4.3.2.2 主电路
接法 1G-2M

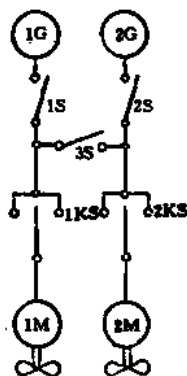


图 4.3.2.3 主电路
接法 2G-2M

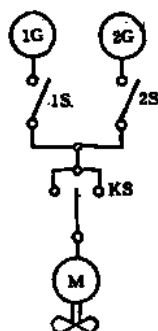


图 4.3.2.4 主电路
接法 2G-1M

流推进电动机的用电。由静态变频器控制推进电动机转速(见图 4.3.6.7)。这种系统具有更好的可靠性和灵活性。中心电站还常设有功率管理装置,从而提高了船舶动力装置运行的经济性。

4.3.3 励磁系统

交流同步发电机和推进同步电动机都需要直流励磁。当主发电机需变速运行时,其励磁机不能由主发电机同轴带动,须由其他拖动电动机带动。在推进电动机起动时,为减少起动电流对发电机祛磁作用而引起电压崩溃的影响,增大电动机起动力矩,加速起动过程,应对主发电机进行强迫励磁(为额定值的 2.5 倍左右),为此要求主发电机励磁在 0~2.5 倍额定励磁的范围内调节变化,而推进电动机励磁不需要调节变化,只是当船舶处在恶劣气候时,需要少量的强迫励磁,使同步推进电动机不失步运行。故发电机与电动机需分别励磁。

在采用电磁调速异步电动机时,其电磁转差离合器需要直流励磁,通过改变此直流励磁以调节转差,从而平滑调速。

励磁系统可分下列几种:

1. 推进电动机励磁由船舶直流电网直接供电

推进电动机励磁 TQ_m 由船舶电网直接供电,而主发电机励磁 TQ_g 由励磁机 EX 供电,励磁机的励磁绕组 TQ_{EX} 由船舶电网供电,MI 为励磁机的拖动电动机,如图 4.3.3.1(a)所示。

2. 推进电动机由励磁机供励磁

如图 4.3.3.1(b)所示的系统也适用于具有直流船舶电网的情况。励磁机 EX_g 具有 2 倍~3 倍的强迫励磁,供给主发电机;而励磁机 EX_m 无强迫励磁,供给推进电动机。在该系统中,励磁机 EX_g 和 EX_m 的励磁绕组均由船舶电网供电。

3. 全部由励磁机组供电

主发电机和推进电动机的励磁均由励磁机供电,而这两个励磁机的励磁再由另一个励磁机供电,这 3 个励磁机均由一拖动电动机(可由直流或交流电网供电)驱动,组成四联励磁机组。这一励磁系统的优点是整个励磁系统与船舶电网分开,可不受电网电压波动的影响。

4. 发电机由升压机供励磁

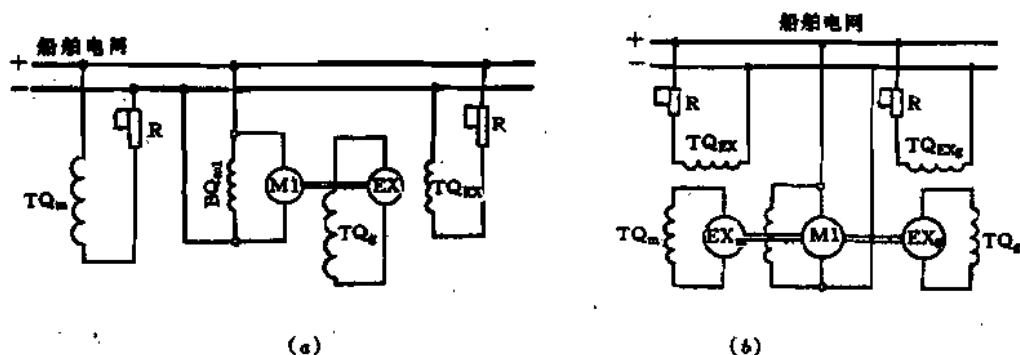


图 4.3.3.1 直流电网励磁系统

(a) 推进电动机由直流电网供励磁；(b) 推进电动机由励磁机供励磁。

主发电机励磁绕组 TQ_g 通过升压机 SM 电枢接至船舶电网，见图 4.3.3.2(a)，升降机的励磁可正反向调节。当升压机电压为负值，其值与电网电压相等时，则作用于发电机励磁绕组的电压为零；当升压机电压为正值时，则其电压与电网电压相加，作用于发电机励磁绕组上。调节升压机励磁的方向和大小，可改变发电机励磁的大小，达到 0~250% 额定励磁的调节范围。

推进电动机励磁绕组 TQ_m 由船舶电网直接供电。采用升降机的优点是，升压机功率可比励磁机功率小，主发电机励磁回路中无需串加变阻器，故结构简单、调节灵活，而又经济。

如船舶电网为交流，可采用三联机组，见图 4.3.3.2(b)，由交流拖动电动机 M1 驱动主励磁机 EX 和升压机 SM，调节原理如上所述。

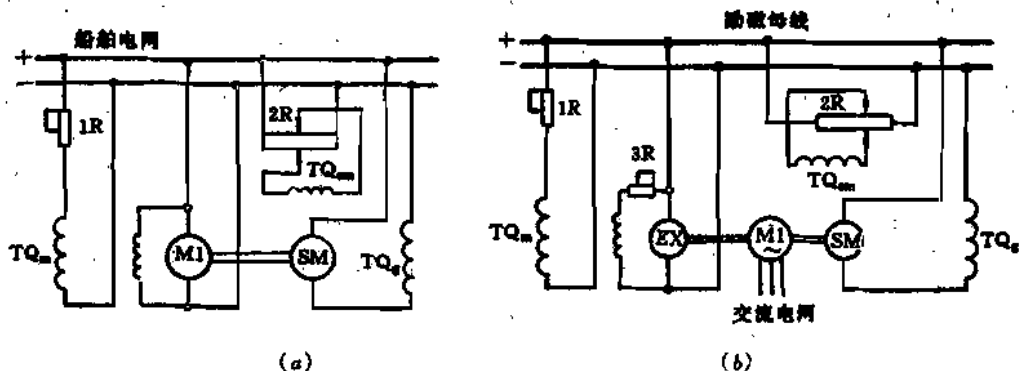


图 4.3.3.2 升压机励磁系统

(a) 推进发电机由带升降机的船舶电网励磁；(b) 推进发电机由带升降机的励磁机组励磁。

5. 交流电网整流励磁

推进电动机励磁可由交流电网经变压器 T 和整流器 U 后供电；主发电机励磁需要变化。故采用自耦变压器 AT，经整流后供电。这样比用励磁机经济、方便、可靠，见图 4.3.3.3(a)。

图 4.3.3.3(b) 所示整流励磁环节已应用在 ZLK-8 型电磁转差离合器控制装置中，交流船舶电网的电压经单相桥式全波半控整流后，供给转差离合器的励磁绕组 TQ_m ，该整流电路由硅二极管 D_1, D_2 及晶闸管 SCR_1, SCR_2 组成。晶闸管的触发脉冲由触发电路供给，改变触发脉冲的相位，即改变了晶闸管的开放角，使 TQ_m 上的电压受到控制。电阻 R 和电容 C 组成阻容保护，以防电源端的过电压击穿晶闸管。硅二极管 D_3 的作用是使负载电流经常保持连续，以维持其平均值，并可使瞬时脉动分量减少。

当推进励磁功率较大时，为改善励磁电压波形，一般采用三相桥式整流。

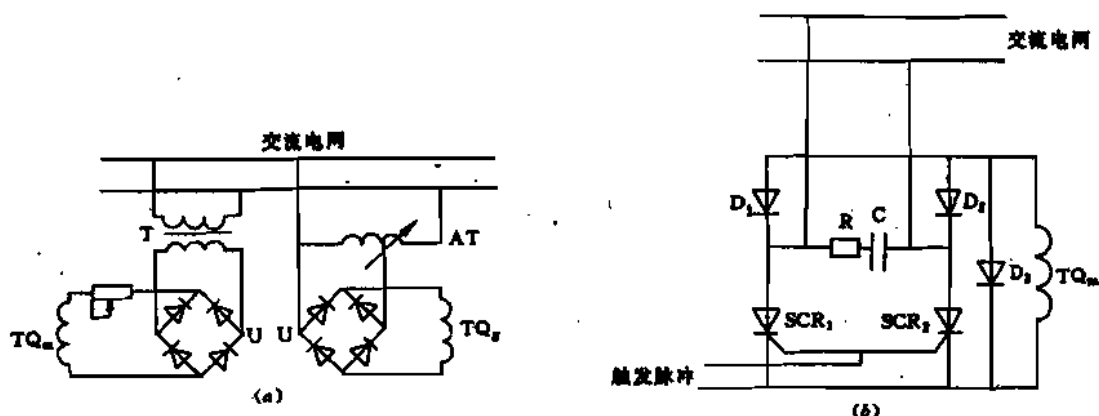


图 4.3.3.3 交流电网整流励磁
(a)交流电网经变压、整流后供推进电机励磁; (b)晶闸管整流励磁。

4.3.4 操纵及控制

1. 概述

交流电力推进的操纵是其设计的主要部分,除推进电动机由船舶电网直接供电的联合电力推进外,可把操纵分为两部分:

1) 倒顺车操纵(在原动机为 35% 额定转速下进行),包括:

a. 主电路倒顺开关的闭合(推进电动机接入主电路),在有制动时,随着倒顺开关的操作,应同时进行:

- 动力制动电阻的接入或切出;
- 向推进电动机提供动力制动所需的一定励磁。

b. 在倒顺开关闭合后:

- 供同步发电机励磁,先供发电机过励磁,再回复至额定励磁,在过励磁过程中,推进电动机起动完毕(以 35% 额定转速运行);
- 对推进电动机进行控制,即对同步推进电动机励磁,使之拉入同步;对绕线型推进电动机进行切除转子外部电阻的控制。

2) 原动机转速操纵

加大柴油机油门或汽轮机汽门,使原动机由 35% 额定转速上升到额定转速运行,推进电动机也随之上升到额定转速运行。

以上各步骤的操纵可以是简单的手动操纵,也可采用自动控制系统。在操纵台上一般用两个操纵手柄,一个管倒顺车操纵,另一个管原动机转速操纵,两个手柄之间应加机械或电气联锁,使之只有在原动机转速操纵手柄置于最低速位置时,才能扳动倒顺车操纵手柄。

2. 交流电力推进的简单手动操纵

图 4.3.4.1 为简单手动操纵的励磁控制原理图,图中 EX_g 为交流同步发电机的励磁机,供电给 1 号和 2 号发电机励磁绕组 TQ_{1g} 和 TQ_{2g} ,这两台发电机并联供电给一台推进电动机。恒压励磁机 EX_m 供电给 EX_g 的励磁 TQ_{Eg} 和同步推进电动机的励磁绕组 TQ_m 。表 4.3.4.1 和表 4.3.4.2 分别为图 4.3.4.1 中与操纵手柄联动的凸轮控制器 TK 与鼓形控制器 GK 的触点闭合

表(前进与后退触点闭合相同)。

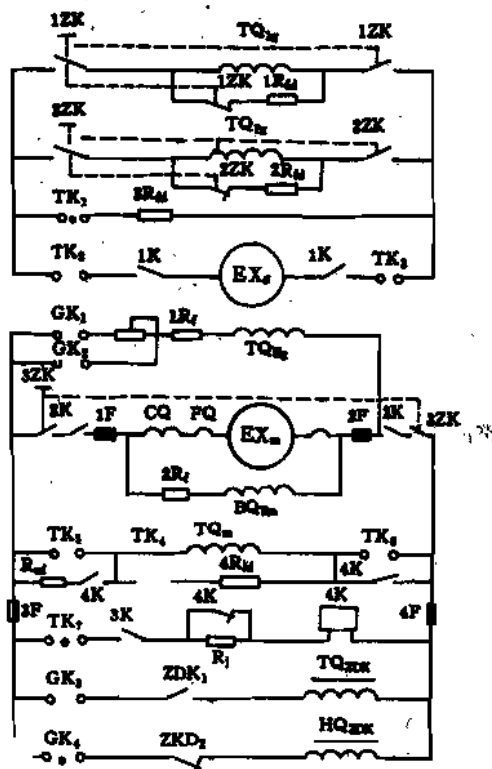


表 4.3.4.1 TK 触点闭合表

触 点	位 置			
	0	暂 停	I	II
TK ₁	×	×		
TK ₂			×	×
TK ₃			×	×
TK ₄	×	×	×	
TK ₅			×	×
TK ₆			×	×
TK ₇	×			

注：×表示触点闭合

表 4.3.4.2 GK 触点闭合表

触 点	位 置			
	0	暂 停	I	II
CK ₁			×	×
CK ₂			×	
CK ₃		×		
CK ₄	×			

注：×表示触点闭合

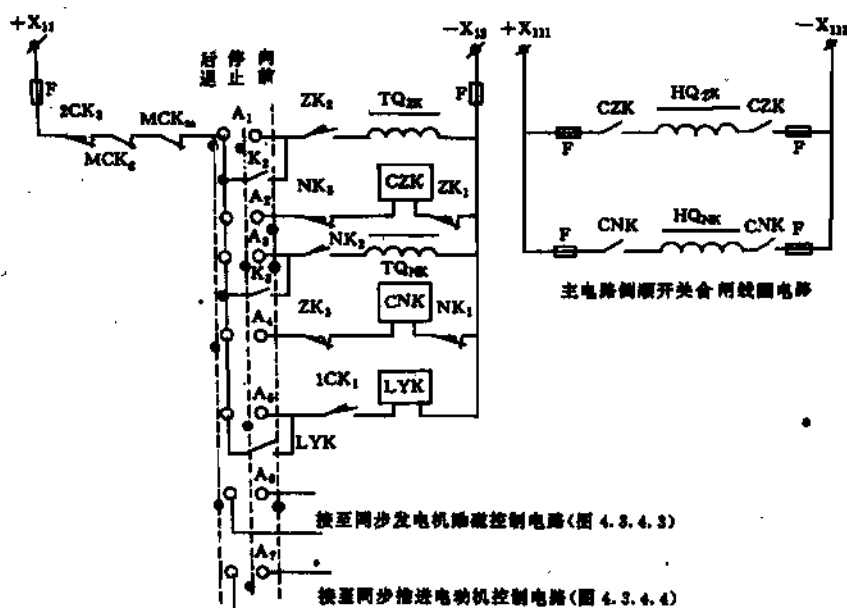


图 4.3.4.2 主电路倒顺开关的控制电路

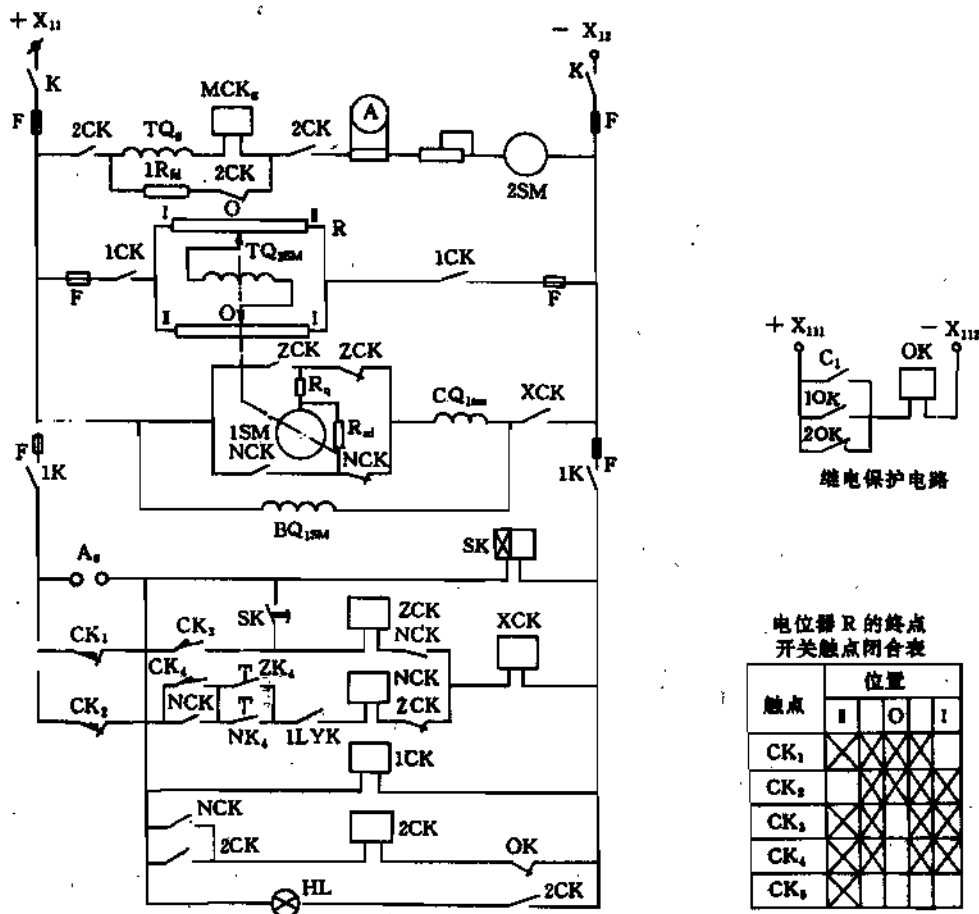


图 4.3.4.3 用升压机的发电机励磁控制

当上述倒顺开关扳到“向前”位置时(“后退”位置时作用相同),使主电路倒顺开关 ZK(正转)闭合,辅触点 $ZK_1 \sim ZK_4$ 动作(见图 4.3.4.2)。电位器 R 由伺服电动机 ISM 拖动,在 0-0 位置时,升压机励磁绕组 TQ_{2SM} 上的电压为零,升压机 2SM 不发出电压,作用在同步发电机励磁绕组 TQ_g 上的是额定电压;在 I-I 位置时,升压机发出与额定电压大小相等方向相反的电压,作用在 TQ_g 上的电压为零;在 II-II 位置时,升压机发出与额定电压方向相同的电压,就有一个规定的过电压作用在 TQ_g 上,使同步发电机发出一个推进电动机起动时所需的过电压。

整个动作由时间继电器 SK,正反向接触器 ZCK,NCK,线路接触器 XCK 和终点开关 $CK_1 \sim CK_4$ 来顺序完成。

1LYK 是零压继电器,只有在同步推进电动机励磁电源有电时,主发电机才能开始励磁,以免同步电动机长期以异步方式运行而烧坏起动绕组。

所有主发电机和推进电动机继电保护的動作,都作用到继电器 OK 上。

3) 同步推进电动机的自动控制

自动控制电路的要求是:

a. 电动机在主发电机零励磁及 35% 左右的转速下,主电路倒顺开关合闸后,逐渐跟着发电机电压的升高,按鼠笼型电动机方式起动;

b. 电动机起动后,到达接近同步转速时,供给励磁,拉入同步,此后以同步电动机方式运转;

c. 电动机应有防止励磁电路断路及防止起动延迟的保护,作用于主发电机的励磁继电器上(见图 4.3.4.3 中 OK)。

4. 电力推进控制部位和方式^[11]

通常,电力推进的控制可由操作人员在驾驶室、发动机控制室、机舱和螺旋桨/推力器舱等部位进行,在这些部位应设置下述控制方式的设施。

1) 驾驶室

——手动手柄遥控和任选的操纵杆遥控;

——后备控制,其可为对各螺旋桨的非随动控制的简单方式。

2) 发动机控制室

——任选的遥控或任选的后备控制。

3) 螺旋桨/推力器舱

——每只螺旋桨的备用控制。

此控制可以是对用于螺距(和方位)控制之液压阀的直接手动操作。

对具有半导体变换器的速度控制,此备用控制可以是在变换器上的就地速度控制,即使此变换器不安装在螺旋桨/推力器舱内。

应设有驾驶室至就地控制站的通信设施。

4) 控制优先权

——驾驶室是主控制区,该处的控制享有控制站选择的第一优先权;

——任何时候都应在驾驶室控制站上指示出哪个控制站正处于控制状态;

——在其他控制站上,当该控制站处于控制状态时,应给出适当的指示。

5. 推进功率管理^[11]

1) 对由并联运行发电机组成的电源系统应具有一自动功率管理用的装置/计算机程序,以确保满足安全推进要求的足够的发电功率。

2) 功率管理系统可具有过渡/机动方式的选择开关,使在这两种运行方式下能以不同的储备功率水平运行。

3) 功率管理系统应控制各并联发电机之间的负载分配,且在电站过载时实现卸载。

4) 功率管理系统应控制推进电动机的最大输出。

4.3.5 保护及信号

1. 电力推进电路的保护

1) 主电路过电流及短路保护(见图 4.3.5.1)

当主电路过载或短路时,接在主发电机线路内的电流互感器 TA 感应出过电流,使过电流继电器 K 动作,接通了时间继电器 SK 的电路,SK 经延时动作,使中间继电器 1OK 闭合。1OK 有两个触头:一个闭合继电器 OK,它使主发电机的励磁线圈断路(见图 4.3.4.3),失去励磁;另一个触头闭合,接通信号灯 HL 和警铃 HA。

三相交流电机必须能承受额定工作条件下,当电机接线端子处和系统中短路时保护装置动作之前的短路电流不损坏^[8]。

2) 主发电机和推进电动机内部相间短路保护(见图 4.3.5.2)

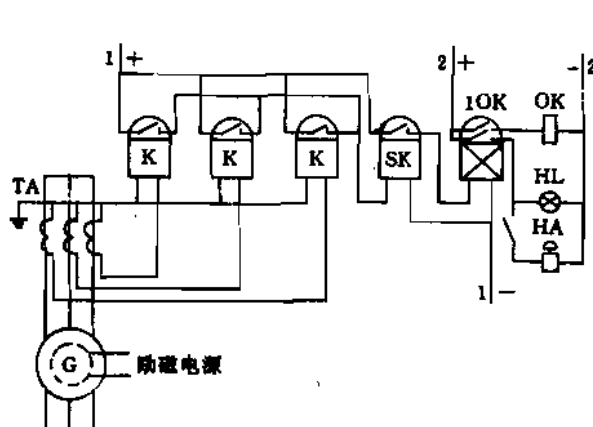


图 4.3.5.1 主电路过电流及短路保护

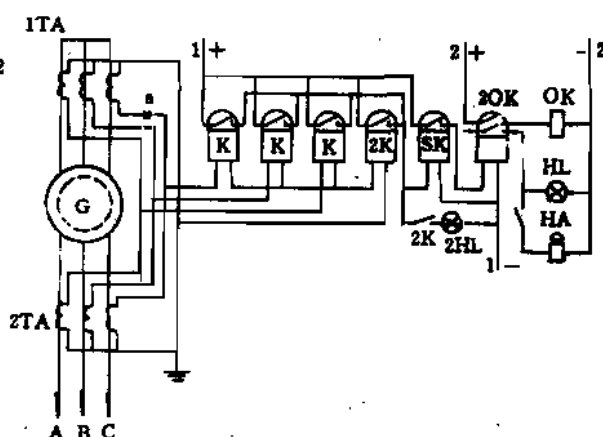


图 4.3.5.2 电机内部相间短路保护

主发电机(或推进电动机)的每相定子绕组的前后接入电流互感器 1TA 及 2TA,构成纵向差动保护。当主发电机内部绕组相间发生短路时,流过前后电流互感器的电流就不相同,因此电流互感器副边感应出电流之差,并流过电流继电器 K,使 K 动作,经时间继电器 SK 延时后,中间继电器 2OK 动作,一方面使继电器 OK 动作,断开主发电机励磁(见图 4.3.4.3),同时发出声光信号。

在电流互感器副边接线发生断线时,例如图中 a 点断开时,C 相下面的一个电流互感器的副边电流就流过电流继电器 K,它会使继电保护误动作。为了能区别这种断线而引起的误动作,在线路中加装了一个电流继电器 2K。当主发电机的相间短路时,没有电流通过 2K,但当电流互感器副边断线时,就有电流通过 2K,使 2K 动作并使 2HL 信号灯亮,以示区别。

3) 主电路一相接地保护(见图 4.3.5.3)

利用三相电压互感器 1TV 作一相接地保护。1TV 有两个副边线圈 abc 和 a'b'c'。abc 副边

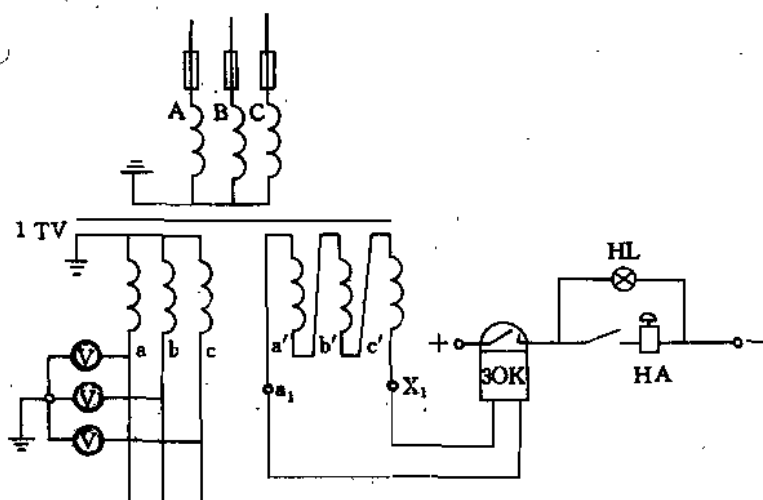


图 4.3.5.3 主电路/相接地保护

线圈接成 Y 形,接电压表以指示每相对地的绝缘情况; $a'b'c'$ 接成开口三角形,开口处接中间继电器 3OK。在正常状态时,三相电压之和为零, a_1X_1 间无电压,3OK 不动作;但在主电路中任一相(如 A 相)发生接地故障时,相应的一相副边线圈(如 a' 相)就没有感应电压,三相电压之和不为零, a_1X_1 有电压,使 3OK 动作,发出声光信号。

4) 主发电机和推进电动机绕组的超温保护(见图 4.3.5.4)

电阻温度计 R_{te} 放在电机绕组间和线槽底部,作为电桥的一臂。检流计接在电桥的中性臂上,它除了直接指示电机绕组的温度外,还可在绕组到达极限许可温度时用表指针来接通中间继电器 3OK,发出声光信号。

2. 电力推进电路的监测^[11]

1) 应设置下列带报警的监测:

- 具有强制通风的电机和半导体变换器的冷却空气温度;
- 具有热交换器的封闭冷却方式的电机和半导体变换器的一次和二次冷却剂的流量;
- 具有强制油润滑之电机的滑油压力;
- 所有推进发电机和电动机的绕组温度;
- 电机和半导体变换器冷却用水-空气热交换器的漏泄;

——主推进电路的接地漏电;

——励磁电路的接地漏电,但无刷励磁系统的电路和电机定额小于 500kW 者可免除;

——通过半导体变换器供电的三相交流系统的电压不平衡;

——滤波装置的熔断器,或如熔断器故障不明显时,则应对其他组件进行监测;

2) 上述的监测功能所发出的报警,应接至发动机通用报警系统。

3) 推进装置的临界报警应接至驾驶室(桥楼),其报警显示应与其他组别报警相区别。

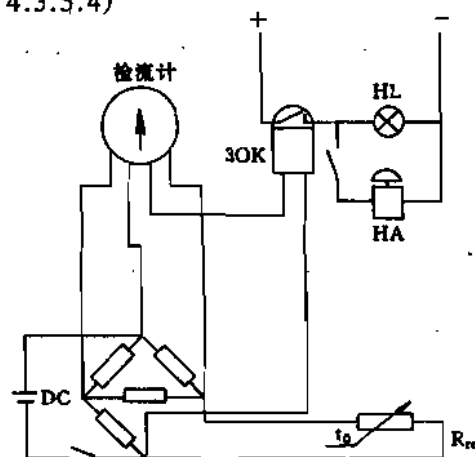


图 4.3.5.4 主发电机和推进电动机绕组的超温保护

3. 电力推进电路的信号

电力推进电路较复杂,为便于监视运行情况和维修,电路中主要部分的动作用声光信号指示是很有必要的,其灯光信号至少应包括:

- 主发电机励磁;
- 主电路倒顺开关的闭合和断开;
- 同步电动机的励磁电源有电;
- 同步电动机的励磁;
- 同步电动机起动整步完毕;
- 保护装置起作用。

音响信号则有:

- 保护装置起作用时;
- 正常运行破坏时;
- 必须转换至其他运行方式时。

以上这些声光信号要装设在驾驶室内,同时也要装设在机舱内主机控制板上或附近。使驾驶人员能了解电力推进的主要工况,并使机舱人员随时监视控制电路运行的情况,及时发现故障,便于检修。

4.3.6 实船举例

1. 采用联合电力推进的工作船

我国某海洋调查船,要求有稳定的低速航行,采用联合电力推进。该船主要参数如下:

满载排水量	1180t	型深	4.7m
总长	74m	设计吃水	3.4m
型宽	10m		

该船为双螺旋桨,推进装置有两种工况:

——每一螺旋桨由 6390D 型主柴油机带动,总推进功率为 $2 \times 1360\text{kW}$,螺旋桨转速为 500r/min ,此时船舶航速为 17.5kn ;

——每一螺旋桨由 JZTM82-4 型电磁调速异步电动机带动,总推进功率为 $2 \times 55\text{kW}$,电动机通过减速箱(减速比为 4.27)及无声链(减速比为 1.81)与螺旋桨联接,其转速及相应的船舶航速如表 4.3.6.1 所示。

表 4.3.6.1 低速推进航速表

电动机转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	经减速箱后转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	螺旋桨转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	船舶航速/ kn
1320	309	171	6
440	103	57	2

推进电动机由船舶电站供电,由 ZLK-8 型船用转差离合器控制箱进行控制,其控制原理如图 4.3.6.1 所示,图中仅画出一台,另一台与其相同。

由原理图可见,该系统由主电路、晶闸管整流励磁回路、主回路控制部分、给定反馈比较环

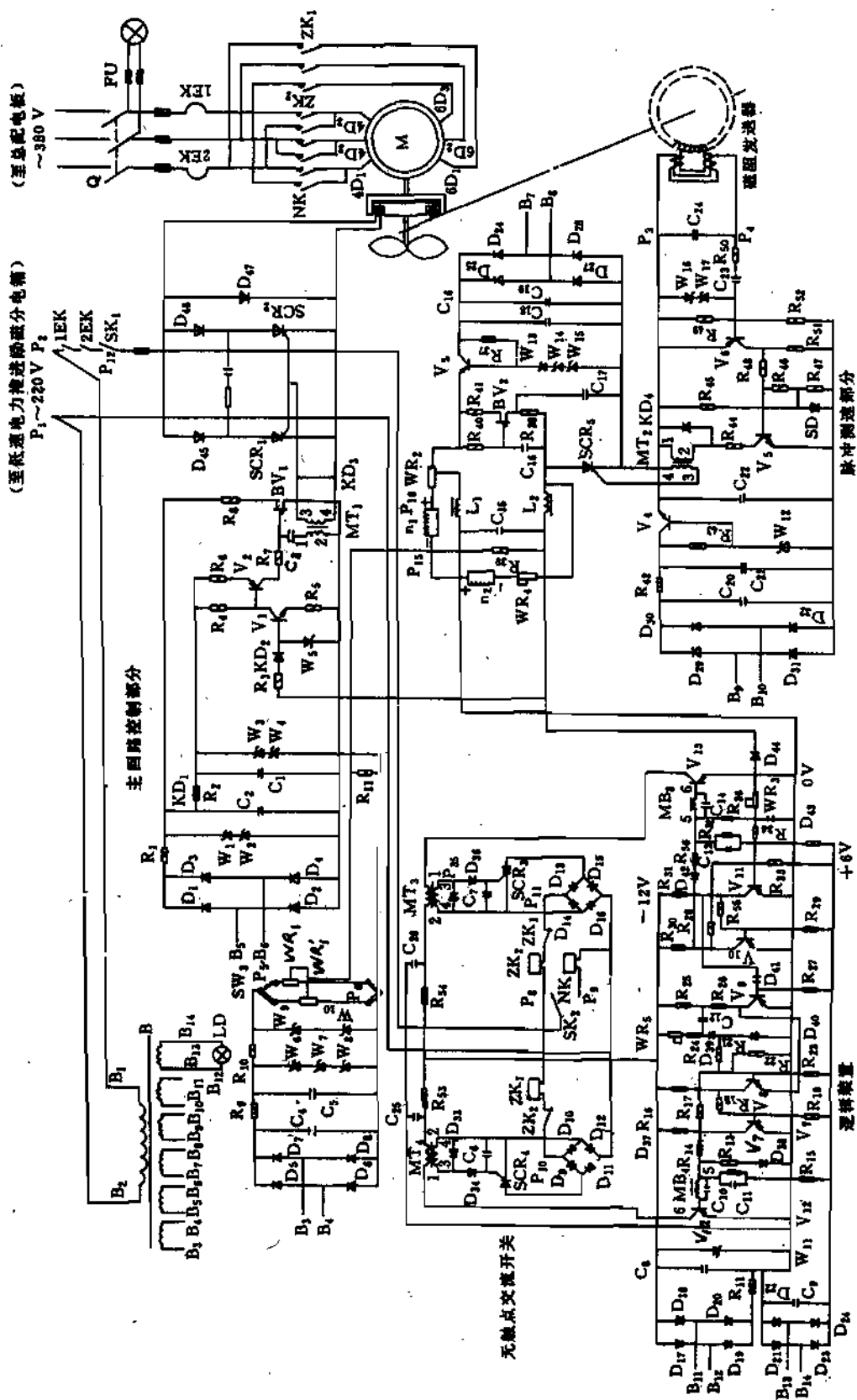


图 4.3.6.1 交流低速电力推进控制原理

节、脉冲测速部分、自动换极晶体管逻辑装置、无触点交流开关及电源装置等部分组成。

给定信号(由 WR_1 或 WR'_1 给出)与速度反馈信号(由磁阻变送器给出)相比较后,输入主回路控制部分进行放大,并控制由单结晶体管 BV_1 组成的脉冲移相电路,产生一极陡的脉冲,该脉冲经脉冲变压器 MT_1 耦合送至晶闸管控制极。改变给定信号,即改变了晶闸管的开放角,从而改变离合器的励磁绕组电流,进而控制了推进电动机 M 的转速。

当离合器转速为 $850r/min$ 左右时,异步电动机自动由六极变换至四极运行;当离合器转速减至 $800r/min$ 以下时,略经延时由四极自动变换至六极运行。异步机按六极起动,且能跟踪离合器的转速自动完成起动过程。

现将其主要部分的工作原理简述如下:

1) 主电路及晶闸管整流励磁回路

主电路系变极变速线路,四极绕组可正反向运行。

晶闸管整流励磁回路为单相桥式全波半控线路。本装置中晶闸管的开放角为 $0^\circ \sim 130^\circ$, 输出电压为 $0 \sim 160V$ 。输出电压波形见图 4.3.6.2 的(f)。

2) 主回路控制部分

主回路控制部分示于图 4.3.6.1,主要由小信号直流放大器与单结晶体管的脉冲移相电路组成。

放大器由一个 NPN 型三极管 V_1 和一个 PNP 型三极管 V_2 直接耦合而成。其输入信号为给定信号电压与转速反馈电压之差,即偏差电压。将偏差电压加给 V_1 的基极,从而控制了 V_2 的集电极电流,进而改变定时电容 C_3 的充电电压上升速度。当电容器 C_3 上的电压到达单结晶体管 BV_1 的峰点电压时,单结管导通,发射极电流突然增加,电容器经脉冲变压器 MT_1 的初级线圈迅速放电,在 MT_1 的次级即输出前沿极陡的触发脉冲。当放大器的输入信号增大时,其输出电流也随之增加,使 C_3 的充电电流加大,触发脉冲相位前移,晶闸管 SCR_1 及 SCR_2 的导通时间增加,即提高了 M 的转速。

放大器部分由 $16V$ 稳压电源供电,单结晶体管采用经稳压管 W_1, W_2 削波后的梯形波电压(见图 4.3.6.2 中 U_w),它兼有直流稳压电源和同步信号的作用,在电源电压半周始末, U_w 降为零,使 BV_1 的峰点电压也速降至零,从而保证在每一半波开始时, C_3 的电压为零,使电容器充电形成一固定的起始点,即保证了输出脉冲与电源电压同步。

利用稳压管 W_3 的正向特性,作放大器的上限限幅,以防输入信号过大而导致放大器损坏或 BV_1 饱和(即不能产生振荡)。

电阻 R_7 用来调节放大器的输出,使 BV_1 组成的弛张振荡器正常工作。

在放大器的输入端串有高阻值的电阻 R_3 ,用以吸收强冲击信号,保证整个系统调速的稳定性。

主控部分各点波形见图 4.3.6.2。图中(a)为电源电压;(b)为全波整流电压;(c)为经稳压管限幅的电压;(d)为定时电容 C_3 上的电压;(e)为加于 SCR 控制极的输出脉冲电压;(f)为 SCR 阳极输出电压。

3) 脉冲测速部分

采用频率测量制,把 M 的转速变为频率信号,再转换成电压信号,作为反馈电压。

由磁阻发送器发出的脉冲频率(其等于电机转速)信号经稳压管 W_{16}, W_{17} 及 R_{30} 等的双向限幅(见图 4.3.6.1)后,输入晶体管 V_6 的基极进行放大。经整形、放大后的信号触发隧道二极管的开关电路,产生与信号频率相同的触发脉冲给 SCR_5 (其各点波形见图 4.3.6.3)。 SCR_5 导

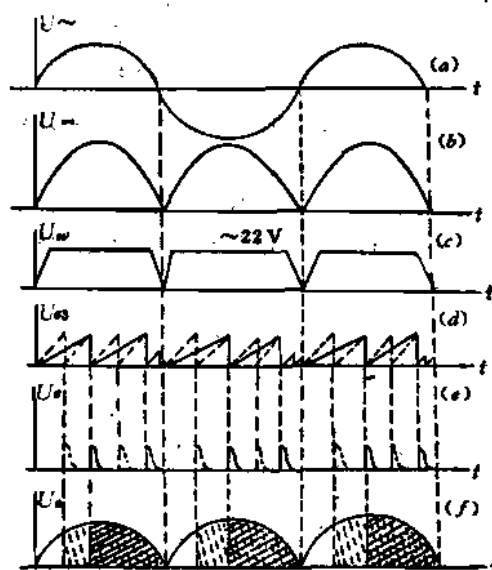


图 4.3.6.2 主控部分各点波形
(虚线部分示移相过程)

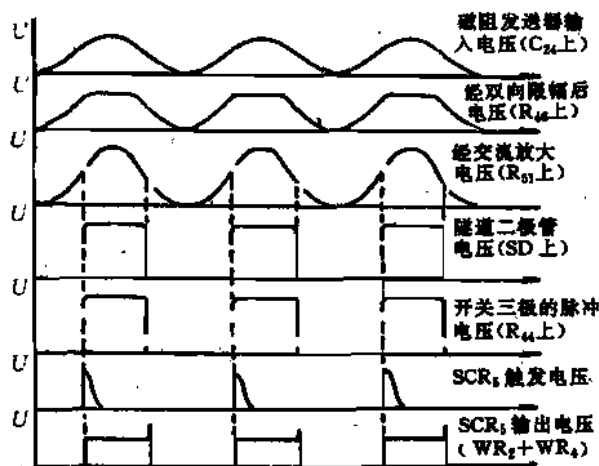


图 4.3.6.3 脉冲测速部分各点波形

通后,产生两个作用:一是在 WR_2, WR_4 上产生电压;一是经 R_{40} 对 C_{16} 进行充电,经一定时间间隔,单结晶体管 BV_2 导通,电容 C_{16} 经 R_{38} 放电,在 R_{38} 产生的脉冲经 C_{17} 耦合到 SCR_5 上,使 SCR_5 关断,于是在负载电阻 WR_2, WR_4 上的电压消失,故在 WR_2, WR_4 上的电压为相同于信号频率的方波,该波形之高度取决于稳压电源电压的大小,其宽度取决于 R_{40}, C_{16} 的充电时间常数。方波的高度、宽度可事先调整,故方波的电流平均值(或电压平均值)将线性地对应于信号的频率数(频率数愈高,单位时间内的方波数愈多,故平均值愈大)。 WR_2, WR_4 的电流即可指示转速,转速表 n_1, n_2 可分别装在机舱和驾驶室。方波电压经 C_{15} 及 L_1, L_2 滤波后,作为转速反馈电压。

4) 给定反馈比较环节

给定信号电压由给定电位器 WR_1 或 WR'_1 (分别置于机舱和驾驶室,由遥控转换开关 SW_3 转换)给出,该信号与脉冲测速部分给出的转速反馈信号比较后,送至主回路控制部分(见图 4.3.6.1)。

5) 自动换极晶体管逻辑装置

自动换极由逻辑装置及无触点交流开关组成,逻辑装置的原理如图 4.3.6.4 所示(其为图 4.3.6.1 中的一部分)。

当转速反馈输入端无信号或信号较小(相应于转速小于 $850r/min$)时,晶体管 V_{11} 截止(此时 V_{10} 导通, A' 点无“负”信号输出), B 点电位为负,经 D_{41}, R_{27} 使 V_9, V_8 导通,故 V_7 截止, A 点输出“负”信号,经无触点交流开关使接触器 ZK_1 动作,电动机便按六极运行。

当转速反馈输入端信号较大(相应于转速大于 $850r/min$)时, V_{11} 导通, V_{10} 截止, A' 点输出“负”信号,经无触点交流开关使接触器 ZK_2 动作,电动机便按四极运行。此时因 V_{11} 导通,故 B 点电位为零, V_9, V_8 截止, V_7 导通, A 点无“负”信号输出。为了在四极返回六极时,获得一定延时, C_{12} 经 D_{40}, D_{39} 及 R_{25} 获得充电。

如电动机原在四极运行,当转速降至 $800r/min$ 时, V_{11} 截止(V_{10} 导通, A' 点无“负”信号输

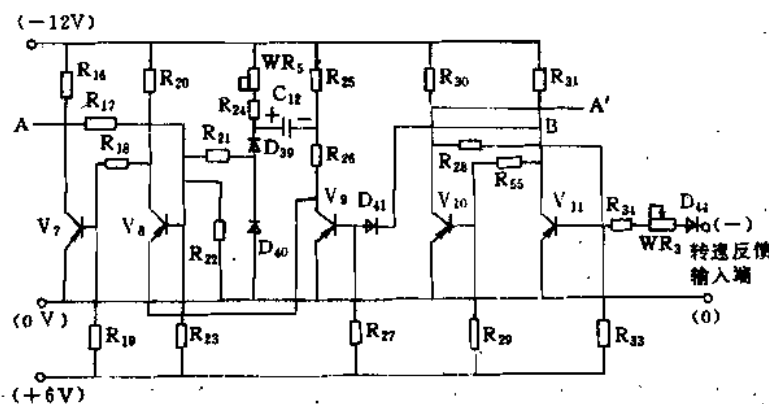


图 4.3.6.4 逻辑装置原理

(A, A'接无触点交流开关, 分别控制 ZK₁, ZK₂)

出, ZK₂ 释放), B 点电位为负, 经 D₄₁, R₂₇ 使 V₉ 导通, 此时因 C₁₂ 上已充电, 故 V₈ 暂不导通, 待 C₁₂ 经 R₂₄, WR₅ 放电完毕(约 0.5s ~ 20s)后, V₈ 导通, V₇ 截止, A 点输出“负”信号使 ZK₁ 动作, 电动机由四极至六极运行。WR₅ 用于调节延时时间, 由四极至六极的延时能减缓强烈制动现象。

6) 无触点交流开关

本装置采用 KJW-1 型无触点交流开关。当逻辑装置由 A 点输入“负”信号时, V₁₂ 导通, 经脉冲变压器 MT₄ 触发 SCR₄, 使 ZK₁ 动作, 电动机按六极方式运行。

2. 采用独立电力推进的挖泥船

我国 180m³/h 挖泥船, 采用交流变频控制电力推进系统, 其主要参数如下:

满载排水量	770t	吃水	2.3m
总长	47m	挖泥量	180m ³ /h
型宽	10m	最大挖泥深度	15m
型深	3.6m		

该船为链斗式挖泥船, 在盛产蛎壳的海面进行挖泥, 将链斗挖取的含蛎壳的海泥置于圆筒筛中, 经冲洗泵冲洗后, 取蛎壳置于驳船上, 运至附近港口进行加工。

该船原为非自航, 由于使用中常需移船, 遇大风浪还得回港避风, 为此改成自航。

船上原有两台 200kW 三相交流同步发电机组, 供电给挖泥机械及冲洗设备等, 移船时, 挖泥及冲洗设备不工作, 可供电给两台推进电动机, 组成两套独立系统(主电路接法见图 4.3.2.3)。

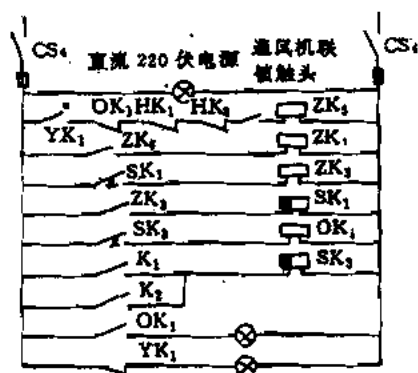
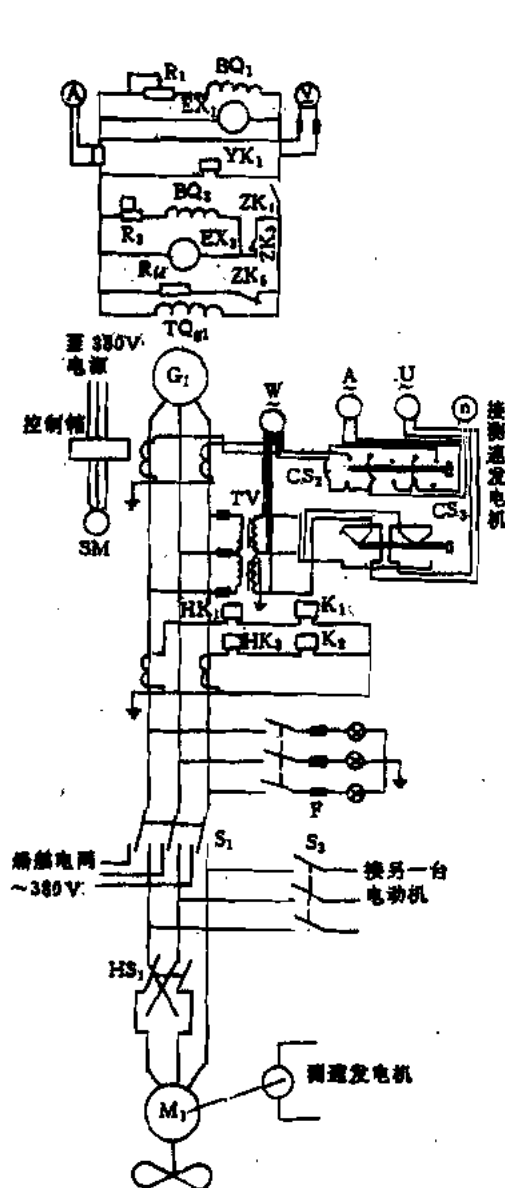
电力推进的控制原理示于图 4.3.6.5。由图中可见, 只要通过伺服电动机 SM 调节柴油机油门大小以控制进油量, 即可改变柴油机转速, 进而改变发电机频率, 达到变频调速的目的。

1) 调速范围

本船推进电动机选用 50Hz、320r/min, 16 极的 JH-170-16 型高滑差鼠笼电动机, 向下调速。调速上限为 50Hz, 320r/min; 这时柴油机为额定转速 600r/min; 调速下限由柴油机最低稳定转速决定, 本船的柴油机为 250r/min, 即相当于发电机为 21Hz, 电动机为 133 r/min, 而对本船而言, 1:2 的调速范围(即电动机调速下限为 160 r/min)已足够了。

2) 推进电动机的起动电流

推进电动机采用低频直接起动, 在起动时对发电机进行强迫励磁, 以加速起动过程(见 4.3.3)。在不同的发电机励磁电流、频率下, 直接起动推进电动机的起动电流和起动时间(由



注：本船有二套 G-M 系统，
本图只画一套，另一套完
全一样，只要将元件号换
成双号（除 S₂ 公用外）

图 4.3.6.5 交流变频电力推进控制原理

示波器拍摄)示于表 4.3.6.2。

由表 4.3.6.2 可见，强励电流(发电机额定空载励磁电流约为 50A)愈大，起动时间就愈短；而频率愈高，起动时间就愈长，起动电流也愈大。

为减小起动电流，缓和直接起动和反接的影响，本船选用了效率较低的高滑差鼠笼电动机(比同容量普通鼠笼电动机效率低 8.4%，见表 4.3.6.3)，但由于实际上低频时的起动电流并不大(见表 4.3.6.2)，因此本船可选用普通鼠笼电动机。

推进电动机的倒车是通过降低发电机频率，用双投开关 HS₁ 或 HS₂ 进行两相反接来

实现的。它的反接与直流电机的反接不同，直流电动机反接时，电源电势与电动机反电势相加，通过电枢回路，产生异常大的电枢电流，因此反接过程不能太快；而异步电动机在低频时的反接并不是两矢量的叠加，它的反接电流仅比该频率的起动电流稍大一些，故可加快反接过程

表 4.3.6.2 推进电动机起动电流和起动时间

序号	励磁电流 / A	发电机频率 / Hz	起动电流 / A	起动时间 / s
1	105	18	305	0.94
2	105	22	350	1.04
3	150	21	385	0.62
4	105	26	350	1.4
5	105	35	360	2.2

表 4.3.6.3 两种电机主要参数的比较

项目	高滑差鼠笼异步电动机	普通鼠笼异步电动机
型号	JH-170-16	JS-138-10
额定功率/kW	170	180
额定电压/V	380	380
效率/%	84.2	92.6
起动电流/额定电流	3.89	5.1
额定电流/A	381	339
转差率/%	14	

程,实现频繁的正倒车。

励磁机 $EX_1(EX_2)$ (12kW, 75V) 由独立柴油机驱动, 其功率选得较原励磁机 $EX_3(EX_4)$ (用于电网, 5kW, 40V) 大, 以获得所需的强励倍数 (约 2.5 倍)。

3) 操作程序

a. 起动

——起动主柴油机至 250r/min;

——合上主刀开关 S_1 或 S_2 , 使主电路接通;

——发电机逐渐加大励磁电流, 进行强励, 电动机开始起动运转;

——主柴油机增速至 600r/min, 同时将发电机励磁减至额定值, 此时电动机转速随频率的升高而加快, 直至额定转速。

b. 调速

——控制伺服电动机 SM, 调节主柴油机油门进油量, 使柴油机升速或降速;

——调节发电机励磁, 使发电机电压随频率作相应变化。

4) 操作联锁及保护

由图 4.3.6.5 可见, 通过主刀开关 S_3 , 一台发电机可供电给两台推进电动机, 为避免误操作, 装有联锁装置, 使 3 只主刀开关 S_1, S_2, S_3 中只允许同时合闸 2 只 (见图 4.3.2.3)。

为保证推进电动机起动或倒车前, 先断开发电机励磁, 故设有联锁, 使只有在磁场变阻器 R_1 (或 R_2) 断开时, 才能操作 S_1, HS_1, S_3 (或 S_2, HS_2, S_3)。

当发电机供电给推进电动机时, 励磁机 EX_1 工作, 在发电机供电给挖泥机械等时, EX_3 工作, 为避免 EX_1 与 EX_3 同时对 TQ_1 供电, 除接触器 ZK_1 及 ZK_3 设有机电联锁, 保证两者不能同时闭合外, 尚有时间继电器 $SK_1 \sim SK_2$, 其延时使 ZK_1 先打开, ZK_3 后闭合。

3. 采用主动舵推进的调查船

我国某海洋综合调查船采用主动舵电力推进装置。该船的主要参数如下:

满载排水量	3160t	设计吃水	4.75m
总长	94m	主机功率	2 × 1470kW
型宽	13.8m	满载试航速度	16kn

1) 主动舵的特点

主动舵是一种船舶操纵装置, 在普通的舵叶上, 顺舵叶中心面的后部, 附装一个小型推进器。转舵时, 此推进器随舵叶一起偏转, 在转舵方向产生推力。这个推力所造成的使船回转的转矩要比一般舵叶造成的转矩大得多。它的作用再加上舵叶的作用, 大大加速了船舶的回转。

一般舵装置的转舵力矩与航速有关, 航速越低其作用越小, 主动舵则不仅在低航速时可保证船舶有良好的回转性能, 而且在船舶主机完全停车时仍可发生作用, 它还可使船舶横向移动或原地转向。同时, 在主机停车后, 主动舵的小螺旋桨还可使船舶作低速推进。

因此, 主动舵可提高船舶机动性和航向稳定性, 故常用在调查船、测量船和布缆船等工程技术船舶上。

2) 主动舵电力推进的设计要求

主动舵设计分两部分: 一是舵叶的电力拖动, 它与第三篇舵机电力拖动设计相同, 只是偏舵角不是限于左右 35° , 而是增大到 $75^\circ \sim 90^\circ$, 以充分发挥主动舵的作用; 二是舵叶内小螺旋桨的电力推进。

通常, 主动舵小螺旋桨的电动机 (主动舵电动机) 装在舵叶内, 所以应为潜水电动机。为了

便于制造和维护,满足潜水要求和减少故障,都采用鼠笼型异步电动机。电动机功率一般从几十至几百千瓦。

主动舵电动机不考虑逆转,从偏舵作用而言,它不需要调速,但从低速推进要求来说,就要求调速。对要求调速者可采用晶闸管变频调速系统。

对不调速的主动舵鼠笼型电动机,如船舶交流电网允许直接起动,就可用一般磁力起动器直接起动,否则就采用降压起动方式。对直流电网的船,需通过变流机组将直流变为交流,再拖动主动舵电动机,这时,由于变流机组的交流发电机容量与主动舵电动机的功率几乎相等,常采用在低频下起动,然后提高发电机频率,将电动机加速到额定转速的控制方式。

4. 采用独立电力推进的豪华旅游客船

在豪华旅游客船上,主要采用两种交流变频调速的电力推进系统,即“交流-直流-交流变频器”和“同步电动机”的同步变频器(Synchroconverter)系统;以及“交流-交流变频器和同步电动机”的直接变频器(Cycloconverter)系统^[2]。

同步变频器调速系统有6相、12相之分,12相系统又分为独立双回路和串联单回路两种。

1) “星星公主”号(Star Princess)

该旅游客船的主要参数如下^[12]:

满载排水量	62600t	最大航速	23kn
总长	245.6m	客房	735间
型宽	32.2m	旅客	1700人
额定吃水	7.7m	船员	600人
最大吃水	8.1m		

该船中心电站有4台MAN 8L 58/64-ALS-THOM交流同步发电机组,其参数为:

额定容量	12MVA	额定频率	60Hz
额定功率因数	0.8	额定电压	6600V

变流装置的变压器为环氧树脂浇铸,自然空气冷却,其主要参数为:

容量(额定/最大)	7100/8200kVA	额定电压(原边/副边)	6600/2930V
-----------	--------------	-------------	------------

该船采用12相、独立双回路同步变频系统,向推进电动机的两套绕组供电,双回路可分别工作,提高了可靠性。12相系统可减少谐波量和电动机的脉动转矩。

同步变频器有两个桥,电网桥(NB)和电机桥(MB),其中间设有直流滤波电抗器L,NB起整流作用,MB为逆变器,如图4.3.6.6所示。

同步变频器的规格为:

额定功率	7000kVA	MB电压	0~3000V
NB电压	2930V	MB频率	0~29Hz
NB频率	60Hz	冷却系统	水冷式空气冷却

每一个桥支路由3个晶闸管串联。

同步推进电动机的规格为:

功率(在145r/min时)	12MW	转速	-145r/min ~ +145r/min
电压(每套绕组)	3000V	冷却系统	水冷式空气冷却
频率	0~29Hz		

励磁——带旋转式变压器和二极管的无刷励磁系统。

2) “伊丽莎白二世女王”号^[3]

该船采用 6 相同步变频系统,其同步变频器额定功率为 11MW。该船推进电网的电压为 10kV,由 9 台主发电机(10.5MW, 400r/min, 60Hz)馈电,由同步变频器变频后,供电给 2 台推进电动机(44MW, 额定转速 144r/min),除可通过变频调节电动机转速外,尚可由可调螺距螺旋桨调节航速。

该船具有 3.3kV 的日用配电系统,因此在推进汇流排与日用汇流排之间设有变压器。

5. 采用中心电站-电力推进的油轮^[20]

此 125000 总吨的原油穿梭油轮设有动力定位,单桨、双壳双底,航速为 14kn,总长为 260.2m,型宽为 46m,满载吃水为 15m。该船的电力推进系统单线图如图 4.3.6.7 所示。

该船的中心电站由 4 台 5430kVA 的柴油发电机组 DG 供电,其主推进电动机 PM 为 4000kW 的异步电动机,由脉宽调制(PWM)控制的变频器供电,主推进电动机经减速齿轮箱驱动螺旋桨。螺旋桨可由 4 台主推进电动机一起驱动,或由这些电动机的任一组合方式驱动。

主推进电动机由变频器供电,可在 0~100% 额定转速范围内连续调节转速,在整个转速调节范围内使电动机发出额定转矩,可达到快速启动。

从图 4.3.6.7 中可见,向主推进电动机供电的变频器也可向侧推电动机、货油泵供电。这是由于主推进电动机与侧推电动机和货油泵不是同时工作,或不是同时满载工作,故可共用变频器。图 4.3.6.7 中 BT 为首侧推电动机,ST 为尾侧推电动机,CP 为货油泵。

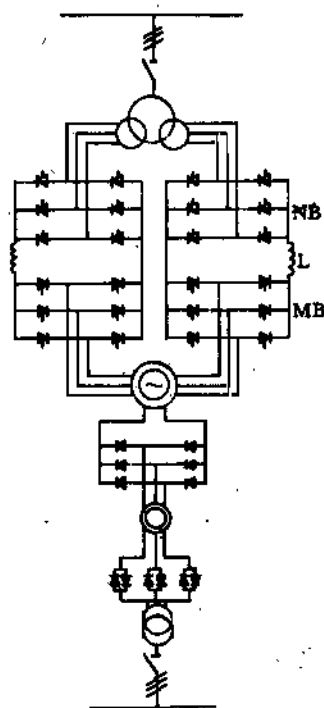


图 4.3.6.6 同步变频器的
主电路

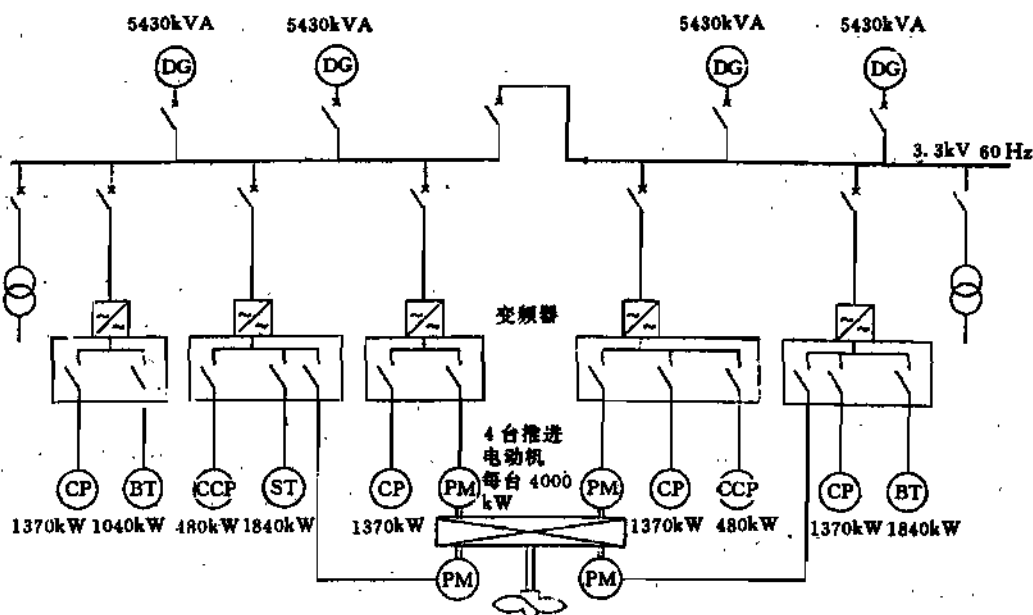


图 4.3.6.7 电力推进系统单线图

第4章 超导电力推进和磁流体推进

4.4.1 超导电力推进

1911年翁纳斯发现了电阻为零的超导现象[铅(Pb, 7.2K), 铌(Nb, 9.2K)], 1933年迈斯纳发现了超导体的完全抗磁性, 1962年发现了被称为第3特性的约瑟夫逊效应, 特别是近年来高温超导体的发现, 以及超导磁垫列车的研制成功, 都预示了超导技术在船舶电力推进中应用的广阔前景。

所谓超导电性就是某些金属、合金或化合物在深低温下电阻消失的现象。具有超导电性的材料称为超导材料或超导体^[16]。其主要特性有:

——完全导电性: 在某一温度以下, 其电阻为零, 而在此温度以上才具有电阻。此温度值称为临界温度。电阻为零的状态称为超导态, 具有电阻的状态称为正常态。

——完全抗磁性: 超导体处在磁场中时, 将磁力线排斥在外, 即超导体内部 $B=0$ 。完全抗磁性又称迈斯纳效应。

除临界温度外, 超导体还有两个临界参数, 即临界磁场强度和临界电流密度。在临界温度以下, 当超导体所处磁场强度超过某一值时, 超导体就从超导态变为正常态, 此磁场强度值称为临界磁场强度; 在临界温度和临界磁场强度以下, 当超导体内通过的电流密度超过某一值时, 超导体也就从超导态变为正常态(此现象称为失超), 此电流密度值称为临界电流密度。

只有当超导体处于其临界温度、临界磁场强度和临界电流密度以下时, 才呈现超导态。

对于将超导技术应用于船舶推进有两条途径, 一是通过使推进电机及电缆等超导化而建成超导电力推进船; 二是将由超导线圈形成的磁场与电场相互作用, 而产生的电磁力直接作为船舶推进力加以利用的超导磁流体推进船(电磁推进船^[17]、磁力推进船、电磁流推进船或电磁泵推进船)。

超导电力推进船因其仍采用螺旋桨推进方式, 故其推进特性与现有船舶无本质区别。但由于组成电力推进系统的设备(如电机、电缆和绕组等)的超导化, 使系统性能有很大提高。

1. 超导线圈

超导线圈在直流情况下损失为零, 但在实际的机器中, 超导电路中还含有正常的导体部分, 于是产生了损失, 如该损失为1W, 在液态氮的温度状态下(4.2K), 冷冻机为了得到这1W的致冷量, 必须消耗1kW的电功率。

超导线圈在交流时损失增加, 交流超导线圈的截面越细, 进入单位体积的磁通量就越少, 损耗也就小。1983年已制成极细多芯线(直径为20 μ m), 现在使用最多的芯线材料是铌钛合金和Nb₃Sn。把这些超导材料放在铜的套筒里加热, 在热态下从轧线机里拉出线来, 如此反复几次成为细线。多芯线也是用轧线机制成的。

超导线圈的质量决定了超导机器的性能。

2. 超导电缆

1989年已制成110kV,1000MW,110m的超导电缆,其中间有氮沟道,筒形的铌钛超导体的四周用聚丙烯绝缘,外面用液态氮冷却。正在开发用高温超导材料制作的电缆。

3. 超导电机

绕组由超导体(超导线)制成的电机称为超导电机。目前所用的超导材料都是非理想的Ⅱ类超导体,主要是铌钛合金超导线,由于此类超导体存在磁滞回线^[16],交流损耗大,故目前研制的超导电机几乎都是直流励磁绕组用超导线绕组,而交流电枢绕组仍用普通导线绕组。

可用于电力推进的超导电机主要有直流半超导单极电机和交流半超导电机(旋转超导磁场型)。

1) 直流半超导单极电机^[18]

半超导单极电机是利用法拉第圆盘原理加上超导励磁绕组制成的,其示意图如图4.4.1.1所示^[16]。其特点是电压低、电流大。由于电压低,通过集电装置的电压降就显得十分关键。因普通炭刷压降大及有大量的维修保养工作,不能用于单极电机。这就需发展特殊电刷,如固态的高导电率碳纤维电刷和利用液态金属(如钠-钾、水银、镓等)的滑环电刷来解决大电流引流问题。固态电刷可用于低速电机。

钠-钾低共熔合金可用于发展高速集流装置。这种碱金属液态合金的导电率比石墨电刷大100倍,而密度低于水(约为 0.85g/cm^3 ,是水银的 $1/16$),它是一种银白色金属,粘度约为水的一半。由于这种金属极易附着于其他金属,因此与集电环表面形成的接触电阻很低。同时由于粘度低和重量轻,因此可在不产生过量损耗或压力的情况下与圆周线速度很高(达 150m/s)的集电环保持良好接触。

钠-钾比较活泼,在室温空气中会缓慢氧化,所以要选择合适的接触偶,研制最佳的集电装置结构,解决钠-钾输送、回收及惰性气体保护系统(纯氮可保护其不受氧化)等问题。

半超导单极电机的极限功率大(可达 $2 \times 10^5\text{kW}$,而普通换向器式直流电机仅 10^4kW),且其转速范围广,既可制成高速达 60000r/min 以上的发电机,又可制成低速至 150r/min 的推进电动机。此外其推进性能好,具有堵转特性,能平滑调速至零,且能反转。但它存在低电压、大电流问题,需要液态金属电刷及其氮气保护系统,此外需对强磁场进行屏蔽。

半超导单极电机还包括超导磁体和低温制冷系统等主要部分。

超导磁体主要由超导线圈(励磁绕组)和低温容器两部分组成。超导线圈目前多用铜基稳定的多股铌钛超导线绕制而成,以增加磁体的稳定性。线圈支架要选用合适的材料和结构形式,以适应4.2K的低温环境和减少漏热的要求。线圈绕制中要留有一定的排热通道,以与液氮充分接触,带走热量。

超导线圈放在低温容器内,其为高真空容器,结构形式有高真空多层绝缘结构和高真空液氮辐射屏

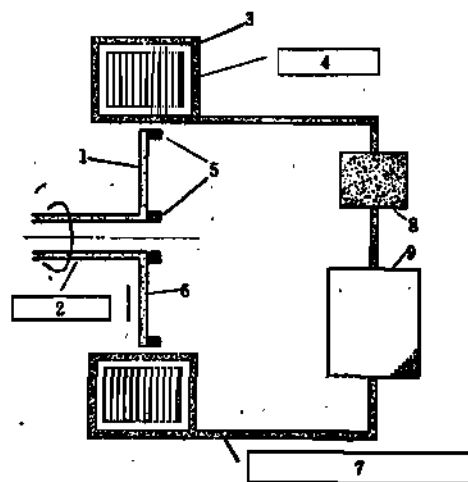


图 4.4.1.1 直流半超导单极电机示意图

- 1—法拉第圆盘； 2—电机旋转轴及速度控制；
3—低温容器； 4—超导励磁绕组； 5—集电装置；
6—电机电动势； 7—液氮输送管路,包括低温
设备故障处理装置； 8—氮压缩机；
9—氮制冷机。

结构两种。一般分内胆和外胆,内外胆之间的连接和支撑应尽可能少,以减少热传导,内外胆之间要加辐射屏,以减少热辐射。液氮输入内胆中,冷却超导线圈,液氮进入低温容器后的循环路线要仔细设计,以确保冷却效果。

作为船舶推进电机的超导磁体,要考虑船上环境条件,特别是振动和冲击的影响。

低温制冷系统主要由氮液化器和液氮输送系统组成。对船用氮液化装置,要求其效率高、体积小、工作可靠、工作周期长等。目前都致力于闭式循环氮制冷系统的研究^[16]。

2) 交流半超导电机^[18]

交流超导电机有全超导和半超导两种,因超导在交流条件下运行时损耗大,故现在研制的大多是磁场绕组超导的半超导电机。交流半超导电机又分为旋转电枢和旋转超导磁场绕组两种,前者具有大电流集电问题,故后者较有前途,且研制得较多。

旋转超导磁场式同步电动机的主要优点是电刷和滑环只传导磁场电流,因此可使用普通的电刷和滑环,没有直流半超导单极电机的大电流引流、传输等问题(这种半超导同步电动机的室温电枢绕组是静止的,置于超导磁场绕组的外侧)。其设计最接近于普通同步电机的设计,且磁路可采用无铁磁材料结构,故电机尺寸小、重量轻、损耗小、效率高,且有较好的电压调整率和系统稳定性。其主要需解决旋转液氮密封技术问题。

作为推进电动机,如采用上述旋转超导磁场式同步电动机,则旋转的低温转子要传递推进转矩;此外,交流电枢绕组中由瞬变过程产生的磁场会使磁场绕组承受反作用力矩。这些都使旋转低温容器要有较强的机械支撑,即使低温容器的漏热大大增加。

为解决此问题,可采用具有中间转子的三绕组超导感应电动机^[16]作为推进电动机。

4. 超导电力推进

超导电力推进系统一般由超导发电机组、超导推进电动机、低温设备及有关控制设备等组成。与常规电力推进一样,也可分成超导直流电力推进、超导交流电力推进和超导交-直流电力推进系统。

常规电力推进与一般机械传动推进相比具有许多优点,但对某些船舶而言,其重量与尺寸大、效率低是致命弱点。而超导电力推进系统中,由于超导体的零电阻特性,使其功率损耗低,效率可高达 98%,等于机械传动系统的效率。美国对一艘排水量 7550t、船长 144m、航速 30kn 的双轴驱逐舰,进行了超导直流电力推进(超导单极发电机-电动机系统)与燃气轮机齿轮传动系统的比较,结果表明,采用超导电力推进,其推进装置重量可减少 30%(由机械传动的 820t 减至超导推进的 576t),排水量可减少 14%,造船费用可减少 9%,持续航速时的燃料消耗率可减少 25%。

日本对一艘 12500m³ 的三轴系破冰液化天然气船采用常规电力推进与超导电力推进进行了比较。不考虑两种系统的共有设备,常规电力推进系统重量合计约 3195t,而超导者约 945t,只相当于前者的 30%;常规电力推进系统占舱面积合计约 1480m²,而超导者约 520m²,也只相当于前者的 35%。

此外,超导单极电机组成的电力推进系统噪声低,更适于豪华旅游客船和一些新型船舶,如小水线面船、水翼船和气垫船等^[16,18]。

自 20 世纪 60 年代以来,超导电力推进系统的研制工作经历了超导电机试验样机研制、超导电力推进系统论证、设计和超导电力推进系统研制试验这三个阶段,同时对低温设备、超导磁体、低温容器、电机的集电装置等关键技术开展了研究。现已开始超导电力推进系统的实用研究工作。

4.4.2 磁流体推进

超导磁流体推进船因其不用螺旋桨,而采用由磁场与电场相互作用的电磁力直接使船舶推进,因此作为一种很有魅力的未来型船舶,人们对它的开发研究寄予很大希望。

1. 超导磁流体推进船的原理和特点

用电磁流体力来推进船舶的构想是由泵送液态金属的电磁泵的逆向联想得出的。其原理是弗莱明左手定律,如图 4.4.2.1 所示。在船体上固定一磁铁和电极,其在海水中形成磁场和电场,两者相互作用产生电磁力(洛伦兹力),即对海水的推力,其反作用力使船舶运动。

图 4.4.2.1 中,洛伦兹力

$$F = B \times J$$

当 B 和 J 垂直时, F 为最大。

对于应用电磁力推进船舶的方法,根据磁场的种类,磁场的作用区域不同,可分为交流磁场式的外部磁场型和内部磁场型,以及直流磁场式的外部磁场型和内部磁场型。

由于交流用的超导电磁线圈尚未实用(超导体的交流损耗大),因此现开发研究的超导磁流体推进船采用直流磁场式。

图 4.4.2.2 表示了直流磁场式外部磁场型和内部磁场型推进方式的设想。

外部磁场型系沿船体外形成磁场和电场,内部磁场型系在导管内产生电磁力,使导管内的海水喷射而获得推进力,所以磁场和电场的作用区域限定在导管内。

表 4.4.2.1 列出了外部磁场型与内部磁场型的比较。目前正在进行的超导磁流体推进船

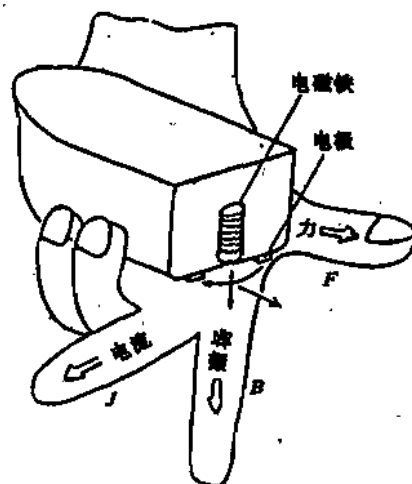


图 4.4.2.1 磁流体推进船的原理

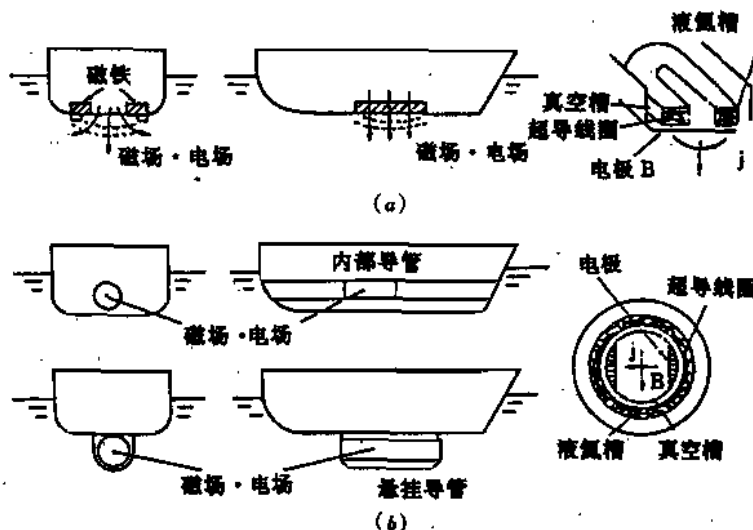


图 4.4.2.2 外部和内部磁场型

(a) 外部磁场方式; (b) 内部磁场方式。

的开发研究系采用直流磁场式内部磁场型者。

表 4.4.2.1 内部磁场型与外部磁场型的比较

项 目	内部磁场型	外部磁场型
推进方法	对导管内海水加压向外喷射而获得推力	使船底或船侧的海水加速而获得推力
电磁场分布	导管内大体相同	随离船底或船侧的距离变化很大
磁场漏磁	很少向导管外漏磁	向船外漏磁大
磁屏蔽	在导管内屏蔽的可能性大	船内保护用磁屏蔽的可能性较大,对船外则可能性不大
推进性能	较易确定	较难确定
对外部环境影响	少	对其他船、海洋构造物、港湾设施、海底电缆、海洋下沉物、海洋生物影响大

一般船舶均采用螺旋桨推进,而磁流体推进船由电磁流体力直接推进,其具有如下优点:

——推进装置本体无机械旋转机构,因而没有由此引起的振动和噪声,十分安静,易于维护。对深海调查船、潜艇等非常合适。

——当磁场强度一定时,推进力与电流强度成正比,因而便于速度控制,也能产生瞬间爆发力。

——推力的产生方法不是利用螺旋桨在水中旋转时的反作用力,而是利用磁场与电场相互作用所产生的电磁力,因此在理论上,这是一种适于高速船的推进方法。

——在船尾部不需贯通船体的回转轴及尾轴轴承和螺旋桨等部件,因而对船型能带来其船尾形状设计的很大自由度。

磁流体推进船的缺点是:

——这种船只能在海水中航行,不能在淡水中航行(无法通过电流)。

——推进装置的能量转换效率低,必须由超导电磁线圈(其本身一般不消耗能量)建立强磁场,以获取大功率的推进能源。

——当电流通过海水时,产生离子导电,这样在阳极和阴极附近将分别产生氯气和氢气,所产生的气体的量与电流成正比。如不驱除这些气体,任其散布在导管电场内,会成为脉动气泡,阻碍电流通过,同时也是一噪声源,为此需采用排气装置^[18]。

超导磁流体推进系统的方框图,如图 4.4.2.3 所示,其总体构成如下:

——船体;

——推进装置本体,超导电磁线圈、低温恒温器(超导电磁线圈冷冻容器)、电极等;

——超导电磁线圈冷冻冷却装置;

——用于超导电磁线圈冷冻、冷却的液氮、液氮的船内储存设备;

——电极通电用的直流电源装置;

——陆上设备,此系超导磁流体推进船特有的设备,用于超导电磁线圈初期冷冻、冷却,以及用作超导电磁线圈的励磁电源装置等。如超导电磁线圈的励磁和初期冷却能在船舶靠岸时进行,则可将其设在陆上,以减轻船舶自重。

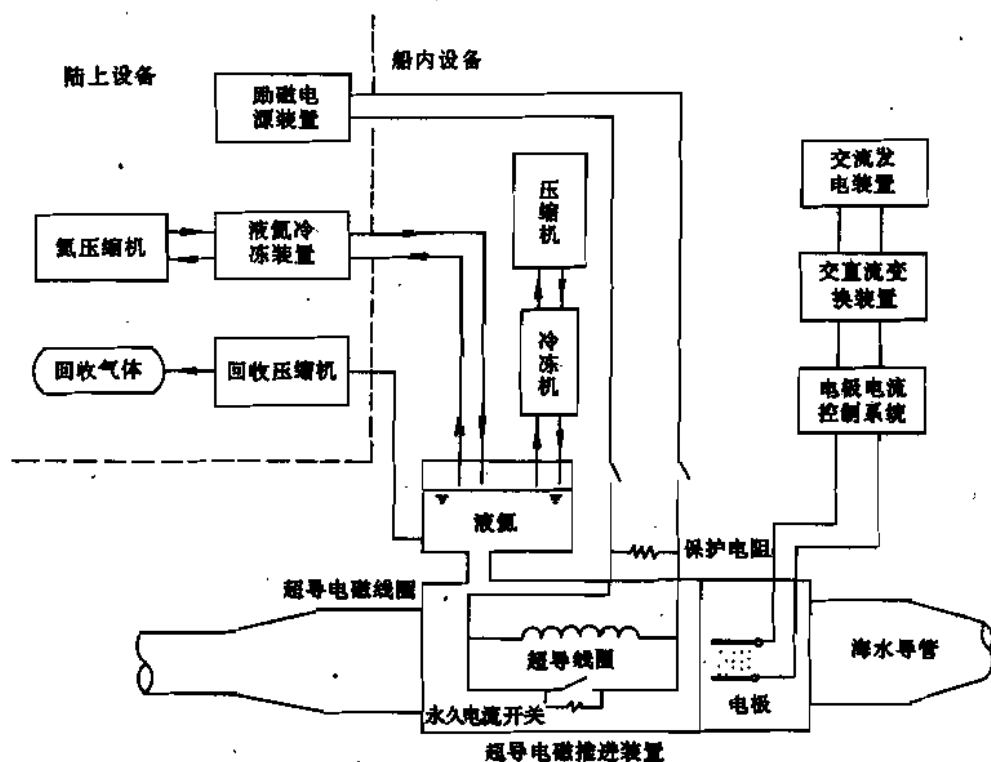


图 4.4.2.3 超导磁流体推进系统方框图

2. 超导磁流体推进船的开发现状

1976 年在日本制作了装有超导线圈的全长 1m 的磁流体推进船模型(外磁型),并在水槽中进行了试验;1979 年制作了长为 3.6m 的磁流体推进船(ST-500),并在 60m 长的海水槽中做了推进实验。超导线圈置于船底,是电极放在船外的外磁型,船重 700kg,超导线圈是全长 1.2m 的环形线圈(神户制钢所制造),据称最大磁场为 4.5T,在海水中通电 65A 时得到 15N 的推力和 0.6m/s 的航速^[19]。

1985 年日本船和海洋财团(原名“造船振兴”财团)设立“超导磁流体推进船开发研究委员会”,下设“船体分科会”和“装置分科会”,分别开发最佳超导磁流体推进船的船型以及超导线圈应用于船舶推进装置的适应性,提高推进性能的方法等,从船型和推进装置两方面开展研究。

图 4.4.2.4 为直流式内部磁场型磁流体推进装置的模型。对导管内的海水外加一上下方向的匀强磁场,在该磁场的垂直方向流过均衡电流时,磁场与电场相互作用产生电磁力。

按此模型制造了小型超导磁流体推进装置,进行了各种实验^[17]。此外还把该装置安装于模型船(见图 4.4.2.5),并在水槽内使该模型处于系船状态时,测定其有效推力等数据。

在小型实验装置制作和试验的基础上,还制作了大型超导磁流体推进装置,并进行了各种特性试验^[17]。通过这些试验,获得了实验船制造和海上航行试验所需的各种资料。1989 年开始建造超导磁流体推进实验船“大和 1”号(YAMATO 1),1992 年完工,1992 年 6 月 16 日,该船进行海上试航,航速约 5.5km,完成了各项测试,并进行各种试验。

3. 实验船“大和 1”号

“大和 1”号的主要参数如表 4.4.2.2 所示。其外观图,如图 4.4.2.6 所示^[17]。

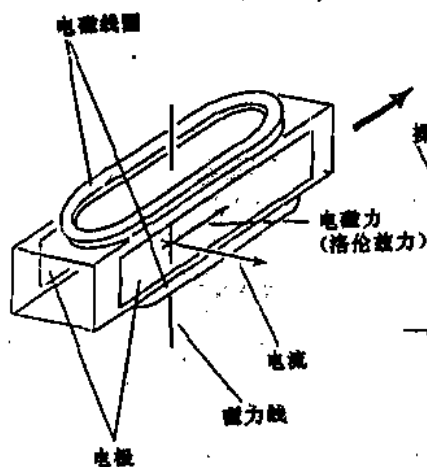


图 4.4.2.4 内部磁场型推进装置模型

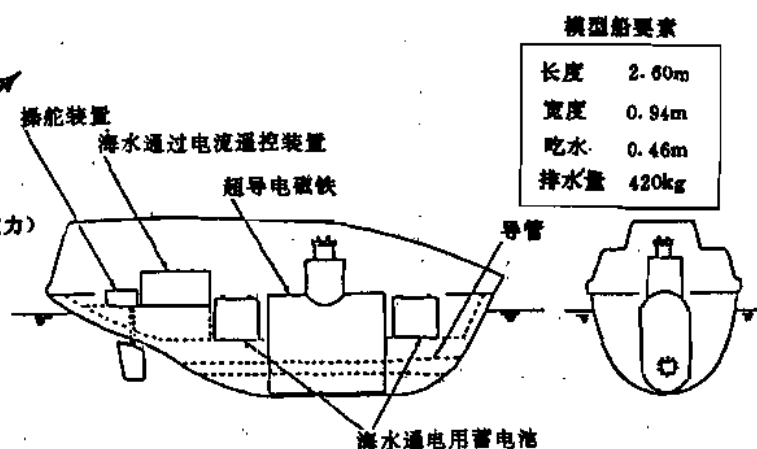


图 4.4.2.5 超导磁流体推进自航模型船

表 4.4.2.2 实验船的主要参数

长度	约 30m	设计航速	8kn
宽	约 10m	船体材料	铝合金
吃水	2.5m	乘员	10 名
排水量	约 150t	推进形式	内部磁场 6 连装超导磁流体推进方式
有效推力	8000N	推进装置数量	2 座

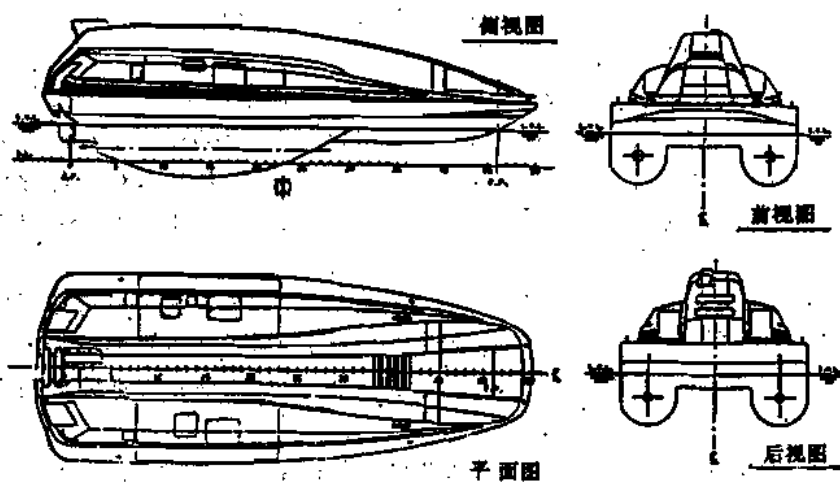


图 4.4.2.6 实验船的外观图

1) 总体布置

在实验船的后下方的两侧装有推进器,在前面有操舵室(驾驶及测定室,包括操纵席在内有 10 个座位),各推进器后面装有舵。船体与双体船结构相似,在航行中装有推进器的两侧底部不露出海面。利用推进器后面的反向机构(反射板)可实现后退。在推进器的上部装有小型的氮冷冻机,进行汽化氮的回收及液化工作。推进装置正上方的机械室内装有两台 2000kW 的柴油交流发电机(无电刷型),在机械室与操舵室之间还有整流装置、配电板等。

操纵台位于操舵室的右前方,用两台推进器的手柄能控制航速。推进线圈用约 3500A 的

恒电流励磁,控制电极电流(即控制交流发电机电压)就能控制航速。

2) 推进装置(推进器)

推进装置的主要参数为:

磁场的发生空间	内部磁场型
线圈材料	铌、钛/铜
线圈形状	鞍形偶极线圈
有效磁场强度	4T
海水电极电流密度	$4000\text{A}/\text{m}^2$
有效推力	4000N

各推进器由6个偶极线圈分别安装在6个海水导管内,并装配成圆筒形(见图4.4.2.7),它们的超导线圈由同一氦冷冻机冷却。从海水入口引进海水分配至6个海水导管内。海水入口处,设计了一个锥形物体,其前部有一组各相隔 60° 的凸片,中部开了6条槽,使海水各自流入各偶极线圈导管中。

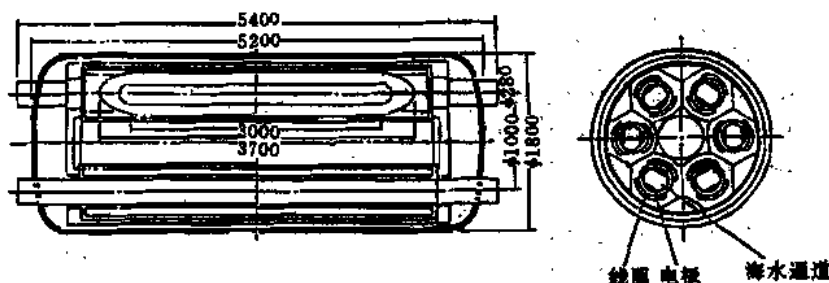


图 4.4.2.7 实验船推进装置基本构造

3) 磁屏蔽

为了尽量减少因防止超导线圈漏磁而设置磁屏蔽所增加的重量,故采用在同心圆上装设6个偶极线圈而不设磁屏蔽。通过这种结构易于实现磁场屏蔽,并大体上解决了磁泄漏问题。但这种磁场产生了向内侧的很大的收缩力,所以应注意在结构上须有一定强度。

实验表明,上述推进器结构具有很好的磁屏蔽效果,操舵室的磁场很低($3 \times 10^{-3}\text{T}$),对人体的影响基本上得以解决。

4) 超导线圈

在超导线圈上连接着永恒电流开关和保护电阻。此开关在向超导线圈提供励磁电流时会发热,会上升至临界温度(约10K)以上,故当超导线圈中电流上升至额定值,使开关停止供电(停止发热),由于超导线圈的电阻为零,故其中的电流就成了永恒电流。

由于超导线圈有一种“失超”(又称猝熄)现象,即当线圈电流超过某值后,破坏了超导态回到正常态的现象,所以在设计中必须考虑此情况,可以说超导线圈的设计和制作是超导磁流体推进的核心。

超导线圈不仅应承受各种应力,还应考虑从常温到4.2K之间约270K温差的冷缩问题,常温部分和极低温部分的收缩间隙的处理是设计推进器最难的问题。线圈用树脂固定,各线圈端点与整体的结合处用铝合金铸件固定,把这些全都浸在液态氮中。

5) 电极

“大和1”号使用的电极为不溶性电极,在钛Ti的基片上覆盖一层氧化铌。

除日本外,其他各国,特别是美国,以麻省理工学院(MIT)为首与许多大学协作,正在进行