

第一章 绪 论

第一节 船用雷达

“雷达”一词来源于英文缩写“RADAR”的音译，它的全名是“Radio Detection and Ranging”，译成中文是“无线电探测和测距”。大家知道，在平面坐标系里，可以用直角坐标 X, Y 来表示一个点的位置，也可以用极坐标的方位角 θ 和距离 r 来表示一个点的位置。雷达采用后一种方法，即用无线电的方法来测定某一目标的方位和距离，因此雷达也叫做无线电定位。但是雷达与一般无线电导航中所称的无线电定位又有区别；雷达不需要地面或空中的发射系统，它是一种自发，自收的系统，叫自备系统；而无线电定位系统一般都需要有一个以陆地或空中为基地的发射系统，用户利用定位接收机接收发射台发来的信号，计算信号到达的时间差或相位差来定位。

雷达是第二次世界大战期间发展起来的，当时它是纯粹为战争服务的，二次大战结束后，逐渐在民用船舶上用作导航和定位。因为它直观，使用方便，不论是雾天还是黑夜，都可以把附近海面的情况或港口、水道的情况直接显示在显示器上，而且可以立即读出所需目标的方位和距离。这样一种装置，很快得到用户欢迎，并逐渐形成了一个独特的系统叫做船用雷达(Marine Radar)。它不仅研究船用雷达本身而且还同时研究雷达在航海上的各种应用。自从雷达引入到商船以后，对船舶安全航行起了很大作用，因此在现代的各类船舶上(从渔船到超级油轮)，都广泛地装备了各种船用导航雷达。同时，在这三、四十年的时间里，由于电子技术的发展，船用雷达也得到了迅速的发展，今天，船用雷达已经不是单纯的用来帮助驾驶人员作了望或定位，自从电子计算机引入到雷达以后，它还可以立即告诉驾驶员哪些船舶在什么时候和什么地点有发生碰撞的可能，同时还能计算出一种最佳的避让方案。

大多数雷达是为军事目的服务的，而只有其中一小部分是为民用的。因此船用雷达中有很多新的技术是从军用雷达上移植过来的。

一、雷达的分类

雷达可以按很多方式来分类。例如按用途来分，有导航雷达，警戒雷达，跟踪雷达，火炮瞄准雷达，气象雷达，制导雷达，天文雷达等等，它们是按各种不同用途而设计的，船用雷达属于导航雷达中的一种。

按工作原理来分有脉冲雷达，多卜勒雷达，连续波雷达，相控阵雷达，调频雷达，噪声雷达等等，船用雷达属于脉冲雷达。

按工作环境来分，可分为机载雷达，舰载雷达，航天雷达等等，船用雷达属舰载雷达的一种，它必须适应雨、雾、冰、雪、盐、潮湿、海浪等等环境条件。

按工作波长来分，可分为米波雷达，厘米波雷达，毫米波雷达，激光雷达(工作波长在红

外光谱, 可见光谱和紫外光谱), 船用雷达大多工作在厘米波段。国际电话电报咨询委员会分配给船用导航雷达的频段有两个, 一个是三公分波段(中心频率为 9375 兆赫到 9405 兆赫), 也叫 X 波段。另一个是十公分波段(中心频率为 3050 兆赫到 3100 兆赫), 叫 S 波段。有些国家和海区对进港船舶的雷达装置有所规定, 如英国规定, 通过英吉利海峡的万吨以上船舶, 从 1980 年起必须装备两台雷达, 最好是带有互换装置的 X 波段和 S 波段雷达各一台, 也可以是两台同一波段雷达。美国政府规定进入美国西海岸的油船, 从 1982 年起必须装备避碰雷达或自动标绘雷达。

应用广泛的船用雷达是一种工作在厘米波段、舰载脉冲导航雷达。本课程中所讨论的雷达, 也仅指这一种雷达。

第二节 船用雷达的组成及其基本原理

船用雷达是一种脉冲雷达, 它定时向空间发射一个很短促的高频脉冲, 其脉冲宽度在 0.05 微秒到 1 微秒之间, 当发射脉冲迁到物标后, 就会有一部分能量被反射回来, 反射回来的高频脉冲通过天线进入雷达接收机, 接收机将这一很微弱的脉冲信号(也叫回波信号)经放大和检波后变成视频脉冲, 并加到显示器的阴极射线管上去调制荧光屏的亮度, 从而在荧光屏的某一点上出现一个亮点, 这一亮点的位置就表示该物标的位置。由于雷达天线是一种定向天线, 它只向天线所指的方向发射一束能量非常集中的电磁波(窄波束的电磁波), 而且也只能“接收”在天线所指的方位上所反射回来的电磁波, 这样, 要是我们能够保证天线与显示器中的偏转线圈同步同相旋转的话, 那末在该瞬间从物标反射回来的信号就必然出现在荧光屏上的相同方位上, 这就是雷达测向的基本原理。

由于雷达天线的连续旋转, (一般雷达天线每 3 秒钟旋转一圈), 定时地向四周发射电磁波, 在天线所指的方向上迁到物标就在显示器上出现一个亮点, 因此在荧光屏上所“看”到的雷达图象如岛屿、岸线、航道、浮筒、灯标、船舶等等实际上都是由许多回波亮点所构成的; 另外, 由于雷达显示器的荧光屏有较长的余辉时间, 它的亮点在天线旋转一周时间内不会消失, 这样, 我们就可以在雷达荧光屏上看到一幅连续、稳定和清晰的图象。如同一幅地图一样, 它反映了当时的海面 and 港口的情况。

船用雷达只需要显示海区和港口的平面情况, 而不需要高度参数, 因此它是一种二座标雷达, 它的显示器就是一种平面位置显示器, 也叫 P.P.I 显示器。

图 1-1 所示的框图表示了船用雷达的基本组成。不论是最简单的还是最先进的船用雷达都必须包含这些基本部分, 这就是天线、收发开关、发射机、接收机、显示器、雷达电源和定时电路。

一、天线

船用雷达天线是一种定向天线, 它把发射机送来的射频功率会聚成很细的波束后, 向天线所指的方向辐射出去, 这是雷达天线的第一个特点, 即定向发射。

电磁波辐射出去后, 如果在中途迁到物标就会有部分能量被物标反射回来, 反射回来的电磁波也叫回波信号。仍由这个天线接收下来; 回波脉冲通过波导管、收发开关而进入接收机, 所以雷达天线是收发公用的, 这是它的第二个特点。

此外雷达天线还必须要有方位同步系统把天线当时所指向的方位信号送给显示器, 使显示器

管上的偏转线圈与天线作同步旋转。

常用的船用雷达天线有两种。一种叫抛物面反射天线。因为它的风阻较大，体积、重量也较大，目前已很少采用。另一种叫隙缝波导天线。它不仅风阻小、体积小、重量轻，而且在电气性能上也较抛物面天线为好，所以现代的船用雷达天线已毫无例外地采用隙缝波导天线。

衡量天线性能的好坏，首先是它的电气性能，如天线增益、波束宽度、旁瓣电平等，第二是机械性能，如水密、抗风强度、旋转稳定性、体积、重量等等，第三是经济性和可靠性。

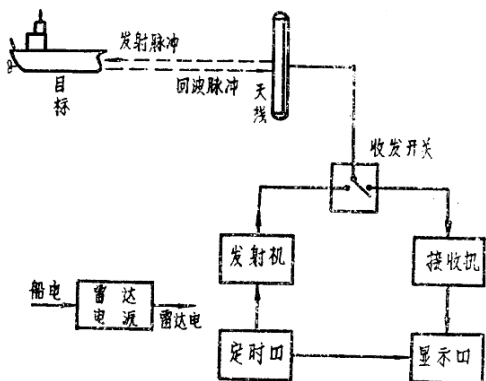


图1-1 船用雷达方框图

二、收发开关

因为雷达是收发公用一个天线，就是说它既是发射天线又是接收天线，因此必须有一种装置在雷达发射期间能保证全部能量送往天线，同时关闭接收机通路，以免大功率的射频脉冲损坏接收机输入端的低压器件。当发射脉冲一结束，它就应该立即使接收机与天线相接通，而同时把发射机通路关闭，这时当有回波信号进入天线它就应该保证将全部信号送往接收机，这种装置就叫做收发开关。

收发开关一般是由一段特定尺寸的波导管和收发开关管所组成，特定尺寸的波导管用来形成电气短路，而收发开关管则是一种理想的电子开关。常用的收发开关管是一种充气放电管；在雷达发射期间，强大的高频脉冲使管内气体游离，发生辉光放电而形成短路，从而关闭接收机通路，使大功率射频脉冲全部送往天线。当发射脉冲一结束，收发开关管两端的高压脉冲也随之消失，放电管立即回复到原来的开路状态，在这期间如果有回波信号进入天线，信号就可以通过收发开关全部送往接收机。

从上面的叙述中也可看出对收发开关的要求，这就是它的脉冲响应要快，开关可靠，开关损耗要小。

三、发射机

雷达发射机的主要任务是产生大功率的射频脉冲，其瞬时脉冲功率可达3~70千瓦，

(随要求的雷达作用距离而异)。在雷达发射机里,大功率的微波振荡都是由磁控管振荡器来完成的,这是因为磁控管具有结构简单、功率转换效率高、使用可靠、方便等等优点。

雷达发射机工作在脉冲状态,工作比(休止期/发射脉冲宽度)在1000以上,因此它的脉冲功率虽然很大,但平均功率却很小。

船用雷达发射机常用微波作为载频,这是因为微波有似光性,即它的传播特性与光的传播很相似,它也按直线传播,而且基本上不受天气的影响,自然界的干扰影响也较小。对同样面积的物标来说,载波波长愈短其反射性能愈好;对同样尺寸的天线来说,载波波长愈短则波束宽度愈窄,从而可以提高雷达的方位分辨能力。此外,波长愈短,微波元器件的尺寸也愈小,但是波长愈短,其抗雨雪干扰的能力也愈差,因此目前大多数船用雷达都用波长为3公分的微波作载频,因为3公分雷达不论从物标的反射性能、方位分辨率、元器件尺寸等方面来说都是一种折衷的处理。为了改善雷达的抗雨雪干扰的性能,还采用一种10公分雷达来弥补3公分雷达的不足。目前在很多大型船舶上,同时装备了3公分雷达和10公分雷达,并加上互换装置,这样不仅可以发挥它们各自优点,取长补短,互相补充,而且还可以提高雷达使用的灵活性。

四、接收机

雷达接收机都是一种超外差式接收机。回波信号进入天线后经过收发开关加到接收机,变频器首先将回波信号的载频变换成中频,中频信号经多级中频放大后加到检波器进行检波,回波信号经检波后变成视频脉冲,最后经视频放大器放大后加到显象管上,这种信号回复过程也叫信号处理。尽管船用雷达的型号和品种很多,但是接收机处理信号的方式大都采用上述超外差方式。

雷达接收机中的核心问题是灵敏度问题,接收机灵敏度愈高则雷达的作用距离就愈远。在雷达技术里有一个著名的方程叫雷达方程,它描述了雷达收与发之间的普遍规律,关于这一点我们将在第十章第二节中详细讨论。

要提高接收机灵敏度,必须抑制噪声,这是接收机中最严重的问题;接收机噪声主要来源有两个,一是机外(外界)噪声,一是机内噪声;机外噪声源有无线电干扰、工业干扰和海浪干扰,前两种噪声因为频率较低,进入接收机的可能性不大,严重的是海浪干扰,它不仅有很宽的频谱,能量也很大,它是由发射脉冲通过附近的海浪反射所激起的,因此它是随机的,接收机对抑制这种随机干扰几乎是无能为力,这是船用雷达里最感困难的问题,三十几年来,人们对如何抑制和消除海浪干扰,作了极大的努力,但是至今仍未得到很好的解决。

至于机内噪声,这里主要是本振噪声、变频噪声和前置中频放大器第一级所产生的噪声,本振噪声通过采用双二极管平衡混频器几乎可以消除,变频噪声随着变频二极管性能的不断改进也逐渐减小,中放第一级噪声由于器件和电路的改进也已经大大降低,从而使雷达作用距离已有明显提高。

五、显示器

船用雷达显示器是一种平面位置显示器,即PPI显示器。它的主要任务是把物标回波真实地显示在荧光屏上,所谓真实显示回波,就是真实地反映当时海区的情况以及物标与本船的相对距离和方位。

雷达测距是一种距离——时间系统,即通过测定电波传播的时间来测定距离,因此在显示器里必须有一个比较准确的时间基准,叫做时间基线,也叫扫描线,不同量程的扫描线

代表不同的时间，而且要求扫描线有良好的线性，这样可以减少测距误差；因此显示器里必须有一套扫描系统和偏转系统，扫描系统提供锯齿电流使得在偏转系统里产生等速偏转磁场使电子束产生偏转。常用的偏转系统有两种，一种是旋转式偏转系统，即偏转线圈由一个马达带动与天线作同步旋转，另一种叫固定式偏转系统，它的线圈是不转的，它是由两组垂直安置的X、Y偏转线圈来产生一条旋转的扫描线；旋转式偏转系统必须在显示器内装有一套精确的方位同步系统，借以保证天线与偏转线圈作同步旋转；固定式偏转系统需要一种方位分解器，它把角度(方位)分解为X和Y两个分量；方位分解器的精度将直接影响雷达的方位精度。目前大多数显示器采用旋转式偏转系统，而在先进的避碰雷达和数据雷达里都采用固定式偏转系统。

此外显示器内还必须装有各种测距器，(如固定距标和可移距标，以及距离读出装置)；方位标志线和方位读出装置(如电子方位线、电子游标等)，视频放大器和混合放大器等。

显示器中的一个关键部件是显象管，船用雷达中常用的是一种磁偏转、电聚焦、长余辉电子束管。雷达显象管的质量将直接影响雷达图象的质量。

六、雷达电源

通常船用雷达都有独立的电源设备，而不是直接用船电。其原因是船电波动较大，对雷达稳定工作不利，其次是可以防止雷达高频电对船电的干扰和船上其它高频用电设备(如船舶电台等)对雷达的干扰。

一般雷达电源都采用中频(400~2000赫芝)供电，这样可缩小雷达用电部分的电源滤波，而且可与雷达定时电路相同步，以减少电源干扰。

早期雷达电源都采用马达——中频发电机组，也叫变流机。即由船电带动马达，再由马达带动一台中频发电机来提供雷达所需要的电源。这种变流机容量大，工作可靠，使用方便，经得起船电变动及负载变动。同时，也有它固有的缺陷，(1)马达和发电机都有转动部件，因此需要经常维修保养，以致更换部件，而且工作时总是伴有较大的噪声和振动；(2)电能转换效率低，因为它是先将(船)电变成机械能(电动机转动)，然后再由机械能(马达的轴输出功率)转换成(中频)电能，这两个转换过程都要消耗能量，而且效率都很低。(3)体积大，造价高。鉴于上述这些理由，近十年来，已被一种叫做逆变器的雷达电源所替代。

随着大功率半导体器件可靠性的不断提高，便出现了一种直流——交流变换器和交流——交流变换器，通称逆变器；它是一种直接通过电的方法将船电变成雷达所需要的中频电。它不需要转动部件，是一种固体电源变换装置，从而完全克服了马达——发电机组的固有缺点。现在，这种雷达电源已得到广泛应用。

七、定时电路

定时电路又称触发电路、触发脉冲产生器或同步电路；它通常仅仅作为发射机或显示器的一个部件，它的电路和结构都很简单，就是用来产生一个重复频率与雷达电源相同步的窄脉冲。但是它的作用却很重要，它是雷达的心脏，它不仅控制发射机开始发射的时间和每秒钟发射次数，(叫做脉冲重复频率，如每秒1000次，2000次等等)。见图1—2。同时它还控制显示器扫描电路，使天线开始发射的时刻与显示器开始扫描的时刻保持严格的同步关系。

近年来，愈来愈多的雷达采用一种高频晶体振荡器作为整个雷达的时间基准，来提高雷达测距精度。定时脉冲也由它来提供。

在三、四十年的使用过程中，尽管船用雷达有了很大变化和改革，但是上述七个基本组

成部分仍然是现代船用雷达的基础，因此我们要学习和掌握雷达的使用与维护，必须先从这个七个基本组成单元着手。

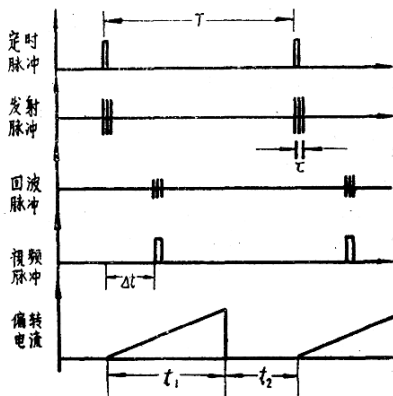


图1-2 雷达各部分波形图

第三节 雷达测距、测向原理

在任意平面上要确定一个点的位置，通常可以有两种表示方法，一种叫直角坐标表示法，如图1-3所示，只要知道 x_1 、 y_1 就可以确定 P 点的坐标，另一种方法叫极坐标表示法，P 点的位置可以用方位角 θ 和线段长度 r 来表示，这两种坐标可以通过下列关系进行转换。

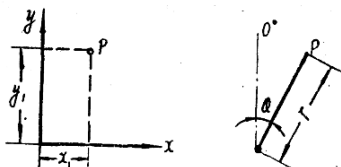


图1-3 直角坐标与极坐标

即

$$x_1 = r \sin \theta$$

$$y_1 = r \cos \theta$$

在船用雷达里，通常都采用极坐标表示法。

一、雷达测距

大家知道，无线电波在自由空间中的传播速度 C 等于常数。

即

$$C = 3 \times 10^8 \text{ 米/秒}$$

从雷达发射电波到显示器上出现回波亮点，就是说电波一去一回总共经过的距离是 $2S$ ，这里 S 是发射机到物标的单程距离，而总共化费的时间为 Δt ，所以有

$$2S = C \times \Delta t = 3 \times 10^8 \times \Delta t$$

即

$$S = \frac{C \times \Delta t}{2}$$

从上式可以看出，距离 S 与时间 Δt 之间有着线性关系，它们之间只差一个系数 $\frac{C}{2}$

所谓雷达测距，实际上是测量发射机到物标这段距离上电波传播所化费的时间，所以它是通过测量时间来得到距离值的。事实上在雷达显示器电路里已经把测量的时间换算成距离值，因此我们可以直接在显示器的读数窗上读出物标的距离值。这就是雷达测距的原理。

二、雷达测向

因为雷达天线是一种定向天线，它在某一瞬间只向一个方向发射电磁波，而且也只能接收同一方向上反射回来的电磁波，所以只要能保证天线与显示器的扫描线同步同相旋转的话，则显示器上所显示的物标方位就等于天线所对的物标方位，这就是雷达测向的基本原理。

如图 1-4 所示，在雷达上发现物标 A，测出它与船首线的夹角（舷角） θ 等于 30° ，这就是物标与我船的相对方位，如当时我船真航向为 20° ，那末物标 A 的真方位应等于

$$\begin{aligned} \text{真方位} &= \text{舷角} + \text{航向角} \\ &= 30^\circ + 20^\circ = 50^\circ \end{aligned}$$

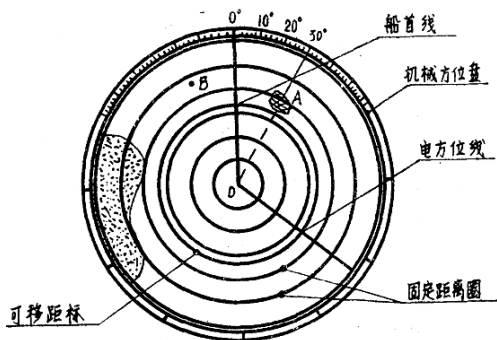


图1-4 雷达定位原理

第四节 雷达在航海上的应用

船用雷达在船舶导航中的主要用途有两个：一是定位，二是避让。

一、定位

船舶在沿海或港口航行时，可以借助于显示器上所观察到的陆标、岛屿、灯标来进行定

位。因为现代船用雷达的工作基本上不受天气影响，所以在视线不良的情况下(例如黑夜、雾天、雨雪天)雷达都能发现物标，从而可以确定船位，另外，现代船用雷达的作用距离可达100海里，因此利用雷达进行定位的可能性就愈来愈大，虽然雷达定位的精度不如某些无线电定位系统，但是雷达是一种自备系统，使用方便、直观，所以在沿海航行、进出港口和窄水道航行时，雷达是一种非常有效的定位工具。

当雷达工作时在荧光屏上可以看到园心上有一个亮点，这一点代表本船(见图1-5)，有一条指向 0° 的亮线代表本船的船首方向，如果周围有物标(来往船舶，小岛等)，荧光屏上就会出现亮点，(如图中A、B)，如果靠近陆地就会出现一片亮的回波。

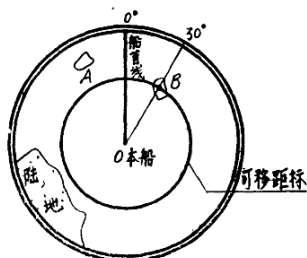


图1-5 单物标定位

1. 单物标定位

如图1-5所示，在雷达上发现物标B，测出它与船首线的夹角(即舷角)为 30° ，如当时我船航向为 20° ，那末物标B的真方位是 50° ，同时在雷达上测出我船离物标的距离(即OB长度)是10海里，在海图上通过B点画一条 50° 的方位线，再以B点为圆心，10海里长为半径(按海图比例，在海图上量)画一段圆弧，其交点即为我船船位。

2. 两物标定位

如果有两个物标，则可测两个物标的距离、或两个物标的方位，或一个物标的距离和另一物标的方位来进行定位，其定位方法与上述相似。

二、避让

船舶在进出港或窄水道航行时，往往会遇到很多船舶同时在该水域通过或作业的情况，因此必须仔细观察他船的航向和航速是否与我船有发生碰撞的危险，及早采取必要的措施来避免碰撞，这就叫做避让。

利用雷达显示器上观察到他船(物标船)在荧光屏上移动的速度和方向，通过雷达作图可以标绘出物标船的航向和航速，从而就可以确定两船在什么时间(TCPA)和什么距离(DCPA)上将会有碰撞危险，以便及时采取措施(或转向，或减速)；关于这一点将在第八章中详述。

这里应该指出，虽然目前各类船舶都装备有雷达，但是由于现代船舶的吨位愈来愈大，航速又高，因此在历年海损事故中也曾发生两船虽然都装备先进的导航雷达，而仍发生碰撞的事例，其原因在于：一、盲目相信雷达，二、雷达使用不当，三、其它航海上的错误。

因此本课程的任务是：

1. 掌握雷达的基本工作原理，了解雷达的优点和它的短处，不要盲目相信雷达。
2. 学会雷达的正确使用、维护和管理，使雷达经常处于良好工作状态。
3. 学习判断和处理一些简单故障的技能。

有关雷达所需要的一些微波技术方面的基本知识以及船用雷达的发展概况，将在有关章节中介绍。

第二章 雷 达 电 源

第一节 雷达电源的功用、要求和分类

一、功用

雷达电源的功用是为雷达设备提供全部所需要的用电，所以它是雷达的原动力，不论什么型号的船用雷达一般都有自己专用的电源，这就叫雷达电源。雷达电源最主要的要求是稳定性和可靠性，其次才是它的电气性能，因为它直接影响整个雷达的工作。

那么雷达为什么不直接用船电供电而要单独装置一套专用的雷达电源呢？这一点需要从船电的性质说起。

在现代各类大型船舶上，都由船用发电机来供给船上各种用电需要。船用发电机分直流发电机和交流发电机两类，直流发电机有低压和高压，交流发电机有单相和三相，其电压和频率也不相同，电压从110伏到440伏，频率有50赫和60赫。

船舶上的各种用电大都由船电直接供电，唯有少数特殊的仪器设备要求单独装备专用电源，雷达就是其中之一。所谓专用电源是指由船电向专用电源供电，然后由后者向专用设备供电，雷达用电就是采用上述方法，究其原因有下列几个：

1. 船用雷达使用的电源是一种中频交流电，一般所用中频频率在400赫到2000赫之间，船用雷达采用中频电源的理由有：

(1) 要求雷达定时电路中触发脉冲的重复频率与中频电源相同步，这样可避免低频电源的干扰。

(2) 可以减小雷达本机中的变压器体积和滤波电路的参数(因为变压器的尺寸以及滤波电路的参数都与电源频率有关)，从而可以缩小雷达的体积和重量。

2. 船用雷达工作在微波波段，因此大功率的射频电流可能通过电网对船上其它用电设备造成干扰；同时雷达也不希望船上其它用电设备，如大功率的收发讯机对雷达构成干扰。因此希望通过专用的电源设备把雷达和船电“隔离”开来。

3. 一般要求雷达电源输出一种稳定可靠的电流，因此在雷达电源里都装有自动稳压电路和各种保护电路，而船电本身不能满足这一要求，首先是它的容量有限，迂到重的负载启动或停机时，船电的变动都较大，这一点将直接影响雷达的性能。

4. 船电的种类很多，为此单独设置一个专用电源，可以适应各种船电。

二、对雷达电源的基本要求

1. 在船电变化 $\pm 20\%$ 或负载变化 $\pm 20\%$ 的情况下，要求输出电压变化小于 $\pm 5\%$ 。
2. 保持中频频率稳定。
3. 电源应设置各种保护措施，例如短路保护，过压、过流保护等。
4. 操作简单，维护方便，使用寿命长。

- 能 24 小时连续工作。
- 能适应海上工作环境。例如温差大，湿度高，盐雾严重等特点。
- 噪声和振动要小。
- 电能转换效率高。
- 体积小、重量轻、造价低。

以上这些要求是对雷达电源的基本要求；至于对具体的某一个设备来说，都有详细的技术指标。

三、分类

船用雷达所用的电源有两类：

1. 中频变流机组；也叫马达——发电机组，是早期雷达设备中最常用的一种电源。它是由一台电动机，一台中频发电机，加上必要的启动装置和调压、调频、保护装置等所组成。这种变流机的特点是容量比较大，工作可靠，使用方便，经得住电流电压的变动；但是它也有很多缺点，例如电能转换效率比较低，工作时伴有振动和噪声，电机中的转动部件如炭刷、轴承、滑环等需要经常维护和更换，体积大，重量大等等。因此自从大功率半导体器件出现后，(例如可控硅和大功率开关晶体管)，上述中频变流机就逐渐被一种固体逆变器所替代。

2. 中频逆变器；简称逆变器，是一种直流——交流变换器和交流——交流变换器，它是利用半导体器件直接把直流船电或交流船电变换成中频交流电，而不需要转动部件；因为它是采用直接变换的方法，所以电能转换效率高，不像变流机要经过电能——机械能——电能的转换过程，因此也就没有噪声和振动；重量轻，体积小，制作方便，维护简单等都是这种逆变器的固有优点。

中频逆变器从 60 年代末开始在一些船舶上试用，发现比早先的变流机有很多优点，目前已有越来越多的雷达电源采用逆变器供电。

第二节 中频变流机组

一、工作原理

中频变流机组由马达——发电机、启动电路和控制系统三部分组成，其联接方式如图 2-1 所示。

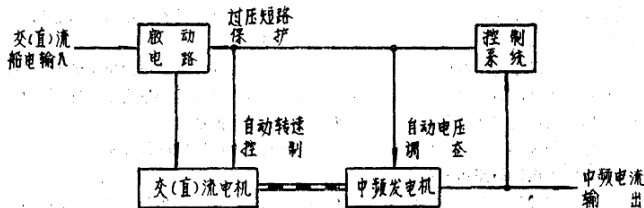


图 2-1 中频变流机组方框图

1. 电动机——发电机组，这是中频变流机的主体，它们是同轴联接的，当船电通过启动电路加到电动机以后，电机转动，输出轴功率(用机械功率表示，按瓦特或马力计算)，然

后利用这一轴功率来带动中频发电机的转子而产生中频电，因此它的基本工作原理是用船电来产生机械能，然后利用机械能来发电的：即电能——机械能——电能的转换装置。

因为船电有直流、交流、单相和三相之分，因此不仅电动机，而且还包括启动电路和控制电路都与所使用的船电有关。

当船电为直流电时，电动机一般多用直流复激电机，它由定子和电枢组成，定子装在底座内，在定子上绕有产生磁场的绕组；直流复激电机通常有二到三个激磁绕组，叫做串联绕组、并联绕组和积复联绕组，其中串联绕组用来改善电机的启动特性，并联绕组和积复联绕组可使电机保持恒速特性。

当船电为单相或三相交流电时，电动机都采用感应电动机，也叫异步电机，它也是由转子和定子组成；转子是一种鼠笼状的短路线圈，（所以异步电机也叫做鼠笼式感应电动机），而定子上则绕有线圈以产生旋转磁场，对于三相交流电机来说，因为三相电本身就有时间上的差异，因此只要在定子绕组结构上作些变化就可以得到旋转磁场、但是对单相交流电动机来说，则必须外加分相电路才能产生旋转磁场，这也就是单相和三相电动机的差别之一。

中频发电机是一种感应子发电机，因为它与所用船电无关，因此不论是直流船电还是交流船电都采用感应子发电机，它是由齿轮状的转子和定子所组成，转子上只有齿和槽而没有线圈，在定子上则绕有激磁线圈和输出线圈。通常在定子上绕有二到三组线圈，它们是主激磁绕组、付激磁绕组和输出绕组。主激磁绕组和付激磁绕组可用来控制输出电压的高低，而输出绕组则用来输出中频电流。

中频发电机输出电压的频率由下式决定

$$\text{即 } f = \frac{N \times P}{120} \quad (2-1)$$

这里 N ——转子每分钟转数。

P ——磁极对数。

假定电机转速 $N = 3530$ 转/分，磁极对数 $P = 34$

$$\text{则 } f = \frac{3530 \times 34}{120} = 1000 \text{ 赫芝}$$

从上式可以看出，中频发电机输出电压的频率只与磁极对数和电机轴的转速有关，对于一台已制作好的发电机来说磁极对数 P 是不变的，因此影响中频频率的只有转速 N ，而 N 又与所用的船电、激磁电流以及电枢的压降有关。对直流电机来说有，

$$N = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} \quad (2-2)$$

这里 U ——电源电压。

I_a ——电枢绕组中流过的电流。

R_a ——电枢绕组的等效电阻。

C_e ——电机常数，对一台电机来说它是常数。

Φ ——通过电机磁极的磁通量

从上式可以看出，转速 N 受很多因素影响；但是我们发现，要使转速稳定也可以通过

控制上述参数中的一个来实现，如改变激磁电流或电枢电压来控制转速，这就是常用的所谓自动频率控制或自动转速控制。

这种感应子发电机的工作原理是这样的：电动机转动后输出一定的机械轴功率，由于电动机与发电机是同轴的，因此也就带动了发电机转子旋转；我们曾经提到，发电机的转子和定子都开了槽和齿，两者不同的是转子上没有线圈，而定子上绕有激磁线圈，因此当线圈通电后就形成磁极，如图 2-2 所示，当转子的齿与定子的齿相对时，这时磁阻最小，磁通最大；而当转子转过一个角度后，它的槽与定子的齿相对时，这时磁阻最大，磁通最小；当转子不断旋转，磁通也就随着从最小变到最大，从而在定子的输出绕组中感应出交变电动势；因为这种发电机是靠感应而产生电的，所以就叫做感应子发电机。



图 2-2 感应子发电机工作原理图

二、结构

中频交流机的主体是电动机和发电机，对于不同型号的中频交流机来说，其结构随生产厂商的设计有所不同，但是它们的基本构造是相似的，它们都装在一个由铸铁浇铸的铁壳内，底部和顶部开有通风孔，有些机器在一端装有排风扇，另一端开孔，以利散热。

对于直流供电和交流供电的交流机来说，其结构是不同的。

(1) 直流供电的交流机结构：常用的直流电机是一种复激马达，它的转子和定子铁芯都是由硅钢片迭成，定子上绕有二~三组激磁线圈，线圈先用高强度漆包线绕制成型，然后嵌入定子槽内。

直流马达结构中的另一个主要部件是换向机构，它由换向电极和炭刷组成。

中频发电机装在机组的另一端，它的定子和转子都开有齿和槽，在定子上绕有二~三组线圈，叫主激磁绕组、付激磁绕组和输出绕组（有些发电机只有一个激磁绕组和输出绕组），转子上没有线圈，只有齿和槽。

因为中频发电机工作频率较高——最高的可达 2000 赫，为提高电能转换效率，减少铁芯损耗，所以定子和转子都必须用优质硅钢片迭成。

在有些直流供电的交流机中，为产生一个低频电压，而装设了另一个发电机，这种交流机称为双电压发电机，它可以同时输出两种电压，其中一个为中频电压，另一个为低频电压，图 2-3 所示的就是这种双电压交流机的结构，图的左边是直流电动机，中间是中频发电机，右边是同步发电机，它的两端都装有换向电极和炭刷。

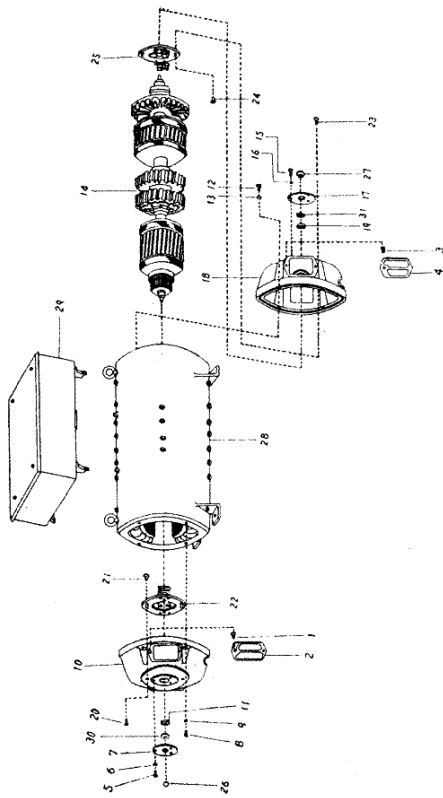
(2) 交流供电的交流机结构：对于船电为单相或三相交流供电的交流机来说，电动机一般都采用鼠笼式异步电机，但对于单相交流供电的电动机必须装有分相电路来产生旋转磁场。由于交流电动机的转速比较稳定，因此对这种机器就不必加装转速自动调整装置。

至于中频发电机的结构，不论是直流供电还是交流供电都是相同的，因为它与船电的性质无关。

图 2-4 是一种三相交流供电的交流机结构图。

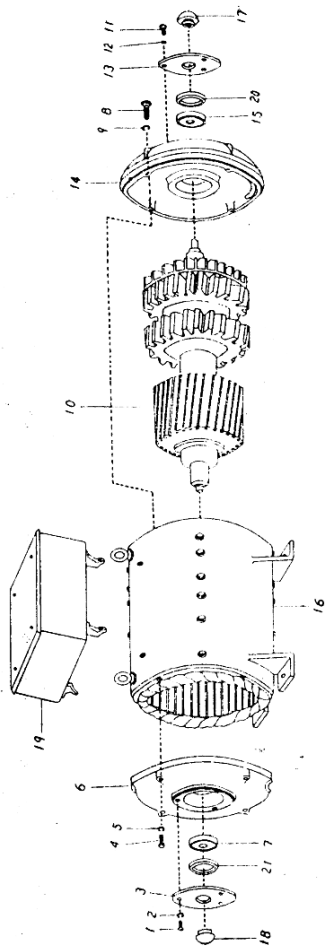
三、启动电路

它由保险丝、继电器和电磁铁以及降压电阻等组成，其功用是保证船电可靠地接入与切断。其中继电器作为控制元件，电磁铁（或接触器）则为执行元件。启动电路也与船电有关，因此通常分直流启动与交流启动两种。



- 1, 3, 5, 15 五毫米平头螺钉
- 6, 16 五毫米平头螺钉弹簧垫圈
- 2, 4 输入、输出端固定盖
- 7, 17 输入、输出端轴承
- 8, 12 8毫米六角螺钉
- 9, 13, 8毫米六角螺钉弹簧垫圈
- 10, 18, 左右端盖
- 11, 19, 液珠轴承
- 14 转子
- 20, 23, 5毫米平头螺钉
- 21, 24, 5毫米平头螺钉座
- 22, 25, 输入输出端电压调节孔
- 26, 27 橡胶盖
- 28 铁芯和外壳
- 29 控制箱
- 30, 31 轴支座

图2-3 直流供电的变压器结构



- | | |
|--------------------|--------------|
| 1, 11. 5毫米平头螺钉 | 7, 15. 滚珠轴承 |
| 2, 12. 5毫米平头螺钉弹簧垫圈 | 10. 转子 |
| 3, 13. 轴承盖 | 16. 定子和外壳 |
| 4, 8. 8毫米六角螺钉 | 17, 18. 橡皮盖 |
| 5, 6. 8毫米六角螺钉弹簧垫圈 | 19. 控制箱 |
| 6, 14. 端盖 | 20, 21. 轴承支脚 |

图2-4 三相交流供电的变流机结构

(1) 直流启动:

图 2-5 是一种典型的直流启动电路。

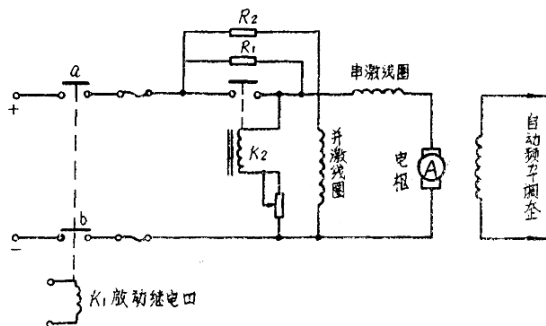


图 2-5 直流启动电路

当显示器上的电源开关接通后，继电器 K_1 吸动，船电加到电动机，电机转动。

启动电流经启动电阻 R_1 和串激线圈加到电机的电枢上，同时船电还通过降压电阻 R_2 加到并激绕组；从图中可以看出，这里采用降压启动以减少启动电流，（通常将启动电流控制在额定电流的 2 倍左右），大约经过 1.5 秒到 2 秒钟以后，这时延时继电器 K_2 吸动，将串激绕组回路中的启动电阻 R_1 短路，电机正常运转。

启动继电器一旦接通后，它的供电电源就由本身的接点来保证，这叫做“自锁”。一般启动电路都有自锁电路来保证启动继电器的动作，而不需要电源开关一直保持接通。

当需要切断船电时，可按“断”开关，它也控制一个继电器，将自锁电路切断，继电器 K_1 释放。将触点 a、b 断开，电机就停转。

图中所示的另一个激磁线圈叫积复联绕组（用作自动频率调整），它可用来提高直流马达的转速稳定性。此外自动转速调整就是利用通过该绕组的电流大小来改变电机的转速。这里应该指出，在很多直流电机中，并没有这种积复联绕组，也没有附加的自动调速电路。

(2) 交流启动:

图 2-6 所示的电路是一种三相交流启动电路。

当马达间的船电闸刀接通后，三相船电就进入启动器 1、2、3 三点，按下绿色启动按钮 1QA 或 2QA，（这两个按钮是并联的，1QA 装在变流机附件上，2QA 装在调压箱上，靠近显示器，可以作遥控启动）。电流自“1”——线圈 1RJ——“4”——1RJ 触点——1QA——指示灯——1R——“14”——2RJ 触点——“5”——线圈 2RJ——“3”，电路接通，指示灯亮。同时，电流还经 2TA——1TA——交流接触器线圈 QC——“14”，使交流接触器 QC 动作，QC 的三个触点 QC_1 、 QC_2 、 QC_3 吸合，三相交流电接入变流机，变流机启动完毕。

交流接触器吸合后，它的第四个触点 QC_4 也吸合， QC_4 将启动按钮 1QA 短路，这时即使放掉 1QA，电路仍保持接通，我们把 QC_4 的这种作用叫做自锁作用。

要使变流机断电，可按红色按钮 1TA（或 2TA，它们是串接的），这时交流接触器线圈 QC 断

电,由它控制的四组触点 QC_1 、 QC_2 、 QC_3 和 QC_4 都断开,切断马达电源, QC_4 断开后指示灯熄灭。

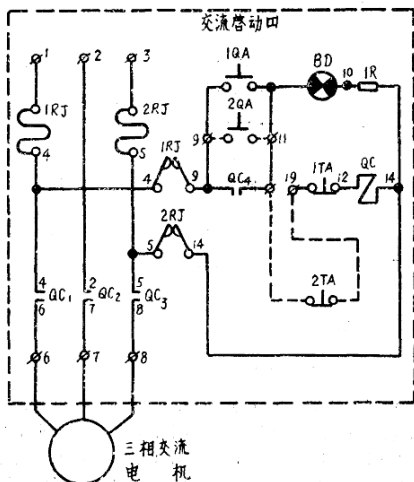


图 2-6 交流启动电路

这里1RJ和2RJ是过荷继电器,当线圈中流过的电流大于额定值时,继电器动作,将触点1RJ(或2RJ)脱开,线包QC断电,QC触点全部脱开,变流机打机。

四、控制电路

变流机的控制电路通常包括自动调压电路、过压或短路保护电路以及自动转速——频率控制电路等。由于各生产厂商设计不同,因此控制系统不仅名目繁多,而且控制方式也不相同,其中有电的、磁的甚至机械的。但是不论何种变流机,自动调压电路是必须有的。下面我们介绍几种典型控制电路实例,以了解控制原理。

(1)自动调压电路:由于船电不稳、马达转速不稳以及负载性质变化等原因都会引起中频输出电压变化;自动调压电路的功用就是使发电机的输出电压保持恒定。

A.电控自动电压调整电路;

图 2—7 所示的电路是一种利用“电”的方法来实现自动调压的,所以也叫“电控”自动调压电路。

如图所示,中频发电机的定子上共有三组线圈。即输出绕组、主激磁绕组和付激磁绕组,其中输出绕组为整个雷达提供中频电压,而两组激磁绕组则用来产生激励磁通,这里,自动调压就是通过改变流过主激磁线圈中的电流大小来改变磁通 Φ 而达到调压目的。

因为该电路的整个控制过程是利用电压、电流的变化来实现的,所以叫做“电控调压”,这是目前最常用的调压方法之一。

从图中可以看到,变压器 T_1 跨接在中频发电机的输出绕组上,它有两个次级绕组I和II,

绕组 I 提供误差电压，绕组 II 为激磁绕组提供电流。

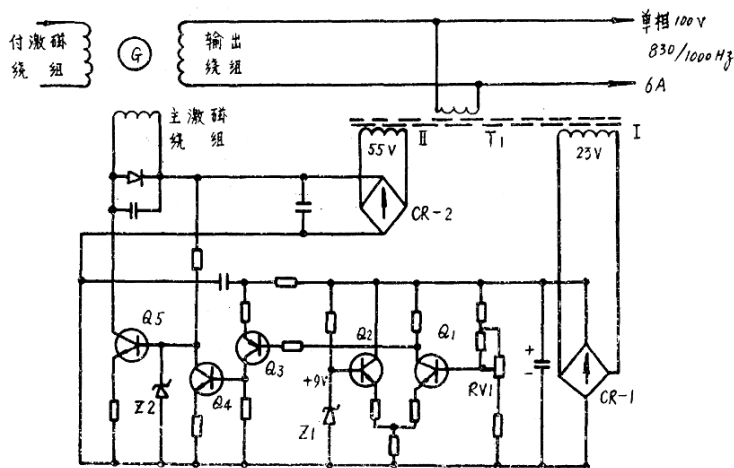


图2-7 “电控”自动调压电路

电路由两组桥式整流器和五个晶体管组成，其中 Q_1 、 Q_2 组成差分放大器用作误差信号放大；晶体管 Q_3 、 Q_4 为电压放大器， Q_5 为功率放大器， Q_5 的负载就是主激磁线圈。

当发电机的输出电压因某种原因而升高时，变压器 T_1 次级绕组 I 上的电压也跟着升高，经全波整流器 CR-1 整流后的直流电压也就跟着上升，这样 Q_1 基极输入电压上升；由于 Q_1 、 Q_2 是一个差分放大器， Q_2 的基极电压由齐纳二极管 Z_1 保持恒定，因此 Q_1 基极电压的变化将全部反映到它的集电极上。当 Q_1 基极电压升高，则 Q_1 集电极电流增大，从而使 Q_1 集电极电压降低，这一电压变化经 Q_3 、 Q_4 放大，其结果使 Q_4 集电极电位下降，这样 Q_5 基极注入电流减小；因为 Q_5 是电流放大器，因此流过 Q_5 集电极电流——亦即流过主激磁绕组中的电流——减小，造成磁通 Φ 减小，使发电机输出电压下降；反之，若输出电压下降，则通过同一途径可以使激磁电流增加，使输出电压回升。

电路中的可调电阻 RV-1 可用来调节输出电压的大小，齐纳二极管 Z_1 为差分放大器 Q_2 提供参考电压，另一个齐纳二极管 Z_2 起保护作用。正常情况下 Z_2 不工作，一旦自动稳压电路或过压切断电路发生故障时，输出电压将异常升高，系统处于失控状态，当 Z_2 两端电压超过某一定值时， Z_2 反向击穿，将 Q_5 基——发射极之间的电压限制在某一定值，从而使激磁电流，亦即最终的输出电压，控制在某一数值；当然此值要超过正常值。（本例正常输出电压为 100 伏，失控时的输出电压为 150 伏），同时告警指示灯亮，告诉值班人员应迅速排除故障。

从以上的讨论中可以看出，上述电路结构与大家熟知的串联稳压电路十分相似，它也是由取样电路 (RV1)、误差检测电路 (Q_1 、 Q_2)、误差信号放大 (Q_3 、 Q_4)、以及控制元件 (Q_5) 所组成，不同的是稳压器是改变串联调整管的内阻，而这里是借改变激磁电流来控制输出电压。