

122-06A0014-B01003_雷达-使用说明 书

目录

1. 概述.....	5
1.1. 主要使用用途及适用范围.....	5
1.2. 主要功能.....	7
1.3. 工作条件.....	8
1.3.1 正常运行条件.....	8
1.3.2 非正常运行条件.....	10
1.4. 安全要求.....	12
2. 组成和技术特征.....	13
2.1. 组成简介.....	13
2.2. 技术参数.....	25
2.3. 结构特点.....	25
2.4. 布置情况.....	26
2.5. 工作原理.....	28
2.6. 主要附件、仪表的规格、型号及性能参数.....	30
2.7. 操作员与设备之间、操作员与其他设备或系统设备员之间关系.....	31
2.7.1. 操作员与雷达设备之间的关系（人 - 机关系）.....	31
2.7.2. 操作员与其他舰载设备/系统之间的关系（人 - 系统关系）.....	32
2.7.3. 操作员与其他人员之间的关系（人 - 人协同）.....	32
3. 使用操作.....	33
3.1. 使用前启动操作程序.....	33
3.1.1. 启动前准备.....	33
3.1.2. 通电与自检.....	33
3.1.3. 初始参数设置.....	33

3.1.4. 系统联动检查.....	34
3.2. 起动及运行过程中的操作程序、注意事项及容易出现的误操作和防范措施	34
3.2.1 起动操作程序.....	34
3.2.3 运行过程中的操作程序与注意事项.....	36
3.2.3 容易出现的误操作和防范措施.....	37
3.3. 设备停止运动操作程序及注意事项.....	38
3.3.1. 正常停车操作程序及注意事项.....	38
3.3.2. 紧急停车操作程序及注意事项.....	39
3.4. 应急操作.....	37
3.5. 运行中的监测和记录要求以及标准记录表格.....	38
3.5.1. 运行中的监测要求.....	38
3.5.2. 记录要求.....	40
3.5.3. 标准记录表格示例.....	41
4. 维护保养.....	43
4.1. 运行时的维护保养.....	44
4.1.1. 运行期间的维护保养.....	44
4.1.2. 运行中的主动保养措施.....	45
4.1.3. 环境适应性维护.....	46
4.1.4. 电子系统运行维护要点.....	46
4.2. 日常维护保养工作和计划.....	46
4.3. 注意事项.....	47
4.3.1. 通用安全注意事项.....	47
4.3.2. 收发机与电子单元保养注意事项.....	48
5. 常见故障及排除方法.....	48
5.1. 雷达无响应.....	48
5.2. 显示屏花屏/显示异常.....	48
5.3. 图像模糊或失真.....	49
5.4. 信号丢失.....	49
5.5. 误报/虚警.....	49

5.6. 探测距离不准确.....	49
5.7. PM 测试失败.....	49
5.8. 预防性维护建议.....	50
6. 安装与调试.....	50
6.1. 安装方法及程序.....	50
6.2. 调试方法与步骤.....	51
6.2.1. 初步调试.....	51
6.2.2. 精细调试.....	51
6.2.3. 测试验证.....	52
6.3. 安装调式注意事项.....	52
6.3.1. 信号不稳定或消失.....	52
6.3.2. 图像模糊.....	52
6.3.3. 杂波或干扰.....	52
7. 安全保护措施及故障处理.....	52
7.1. 保护措施及注意事项.....	52
7.1.1. 电磁防护措施（战时）.....	52
7.1.2. 物理防护设计.....	53
7.1.3. 日常预防性保护.....	53
7.2. 故障及处理程序和方法.....	53
7.2.1. 故障诊断方法.....	53
7.2.2. 常见故障处理案例.....	54
7.2.3. 故障处理流程.....	54

1. 概述

舰船雷达是装备在舰艇上的各种雷达的统称，是现代舰艇的核心感知系统，对保障航行安全、执行作战任务具有不可替代的作用。

舰船雷达是用于探测和跟踪海面及空中目标，为武器系统提供目标坐标数据，引导舰载机飞行和着舰，保障舰艇安全航行和战术机动的电子设备。它既是“舰艇之眼”，也是现代海军作战体系的核心传感器。

现代舰船雷达已从单纯的探测设备，发展为集感知、决策、指挥于一体的“信息中枢”，在海战中发挥着“信息制胜”的关键作用。正如美国海军上尉 Seiko Okano 所评价的，AN/SPY-6(V) 雷达是“改变游戏规则卓越雷达”，代表着舰载雷达技术发展的新高度。

在未来的海战中，雷达技术的先进程度将直接决定舰队的生存能力和作战效能，正如知识库中所述：“当你的‘视力’比别人远上一大截，处理信息的速度又快上好几倍时，战场对你而言就成了单向透明的。”

1.1. 主要使用用途及适用范围

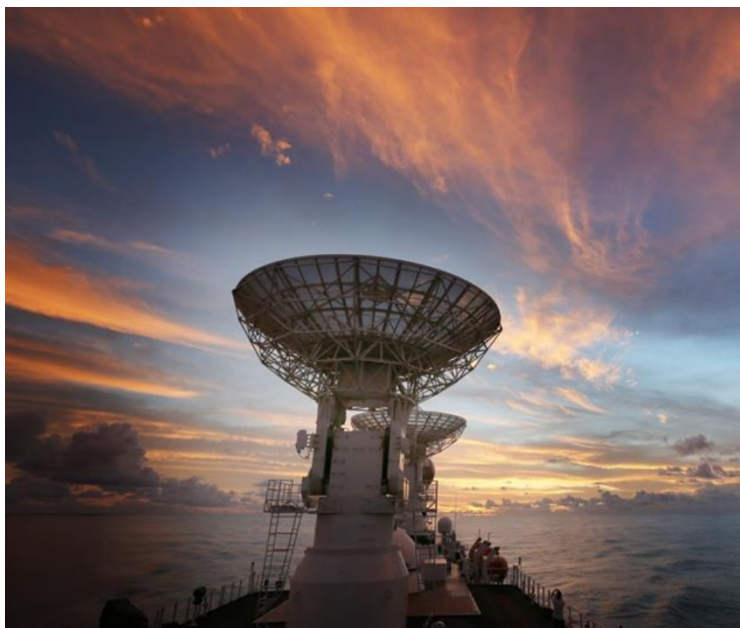


图 1.1 舰船雷达

表 1.1主要使用用途及使用范围

分类 维度	主要类别	核心用途	典型技术/雷达类型	说明与适用范围
按主要功能与用途	搜索/监视雷达	远程预警、广域态势感知。探测、识别空中与海面目标。	对空搜索雷（2D/3D）、对海搜索雷达、多功能相控阵雷达。	舰队之“眼”。提供大范围目标信息，是作战系统信息源。远程相控阵雷达（如 SPY-1，346 型）是现代防空驱逐舰/巡洋舰的核心。
	火控/跟踪雷达	为武器系统提供高精度、连续的目标数据，引导武器攻击。	目标照射雷达、跟踪雷达、光电火控系统。	武器之“指”。精度高、数据更新快，通常与导弹、舰炮、近防系统联动。如用于防空导弹末制导的照射雷达。
	导航雷达	保障航行安全，用于水面避碰、观测航道、识别助航标志。	民用/军用导航雷达、ARPA（自动雷达标绘仪）。	航行之“保”。所有舰船必备，强调对近距离小型目标的探测和避碰功能。
	识别雷达	识别目标的敌我属性。	敌我识别器（IFF）的询问机/应答机。	身份之“辨”。通常与搜索雷达天线协同工作，通过密码问答确认目标身份。
按搭载平台与任务	大型主战舰艇（航母、驱逐舰）	承担区域防空、反导、舰队指挥核心任务。	大型多功能相控阵雷达（S/C 波段）+ 专用搜索/火控/导航雷达。	体系核心。构成“神盾”类防空系统，能同时搜索跟踪数百目标，引导多枚导弹拦截，抗饱和攻击能力强。
	中型多功能舰艇（护卫舰）	承担点防空、反舰、反潜等多种任务。	旋转式 3D/4D 搜索雷达 + 中程火控雷达 + 导航雷达。	多面能手。雷达配置均衡，兼顾对空、对海探测与火力引导，成本与性能平衡。
	小型舰艇/快艇	以反舰和对海作战为主，注重近程防御。	对海搜索雷达 + 光电/小型火控雷达 + 简易导航雷达。	近海突击。雷达系统相对简化，强调对海面目标的快速发现和攻击。
	潜艇	潜望镜状态下的快速目标探测与电子侦察。	潜望镜雷达（攻击潜望镜集成）。	隐蔽之眼。升出水面时间极短，要求雷达开机快、数据获取快、隐蔽性强。
	辅助/民用船只	保障航行与作业安全。	高性能导航雷达。	安全至上。核心功能是避碰和导航，部分可能集成简单的对海监视功能。
按作战任务场景	区域防空/反导	大范围、多批次、高空/弹道导弹目标探测与跟踪。	大型固定阵面相控阵雷达（S 波段为主）。	高空盾牌。探测距离远、数据率高，是海上反导和舰队防空的第一道关口。

	低空/超低空防御	探测掠海飞行的反舰导弹、低空飞机等低可观测目标。	旋转式相控阵雷达、具备良好低空补盲能力的雷达（C/X波段）。	补盲与反突防。专门应对地球曲率和海杂波影响下的低空威胁，常作为主雷达的补充。
	对海作战与监视	探测、跟踪海面舰船目标，为反舰导弹提供目标指示。	对海搜索雷达、高频表面波雷达（超视距）。	海面猎手。通常具有良好的海杂波抑制能力和中等探测距离，部分具备超视距探测潜力。
	协同交战	作为网络化作战节点，共享高质量目标数据。	具备高精度、高数据率跟踪能力的多功能雷达（如 SPY-6，双波段雷达）。	网络节点。雷达不仅是本舰传感器，更是整个作战网络的“信息贡献者”，实现 A 射 B 导。

1.2. 主要功能

一、对空搜索（Air Search）

远程预警：探测和识别高空、中低空的飞机、导弹等空中目标，提供早期预警。

目标指示：为防空系统（如导弹、近防炮）提供目标方位、距离、高度和速度信息。

典型雷达：大型旋转相控阵雷达（如美国的 AN/SPY-1 宙斯盾系统）。

二、对海搜索（Surface Search）

海面目标探测：发现和跟踪舰船、潜艇潜望镜、浮标等海面目标。

导航避障：在能见度低时辅助避开障碍物或其他船舶。

海况监测：分析海面波浪状况，辅助舰船航行安全。

三、火控雷达（Fire Control Radar）

精确跟踪：锁定单个目标（如导弹、飞机、舰船），提供高精度数据以引导武器攻击。

武器制导：直接控制舰炮、导弹或近防系统（如“密集阵”）瞄准目标。

特点：通常波束窄、频率高、更新速率快。

四、导航雷达（Navigation Radar）

近程航行安全：探测海岸线、航道浮标、附近船舶，防止碰撞。

气象监测：识别雨区、风暴等天气现象。

常用频段：X 波段（精度高，适用于短距离）。

五、目标指示雷达（Target Acquisition Radar）

中继引导：作为搜索雷达与火控雷达之间的桥梁，快速分配目标。

多目标处理：同时对多个潜在威胁进行初步跟踪。

六、敌我识别（IFF）

身份判别：通过询问/应答信号区分敌我目标，避免误伤。

协同作战：与友军单位共享目标身份信息。

七、扩展功能与趋势

低可观测目标探测：针对隐身飞机、小型无人机、潜望镜等目标，采用高频雷达或协同探测技术。

电子战支援：部分雷达具备电子侦察（ESM）能力，分析敌方雷达信号。

多功能一体化：现代相控阵雷达（如有源相控阵 AESA）可同时执行搜索、跟踪、通信、电子对抗等任务。

协同作战：通过数据链将雷达信息与其他平台（如预警机、卫星）融合，形成战场统一态势图。

1.3. 工作条件

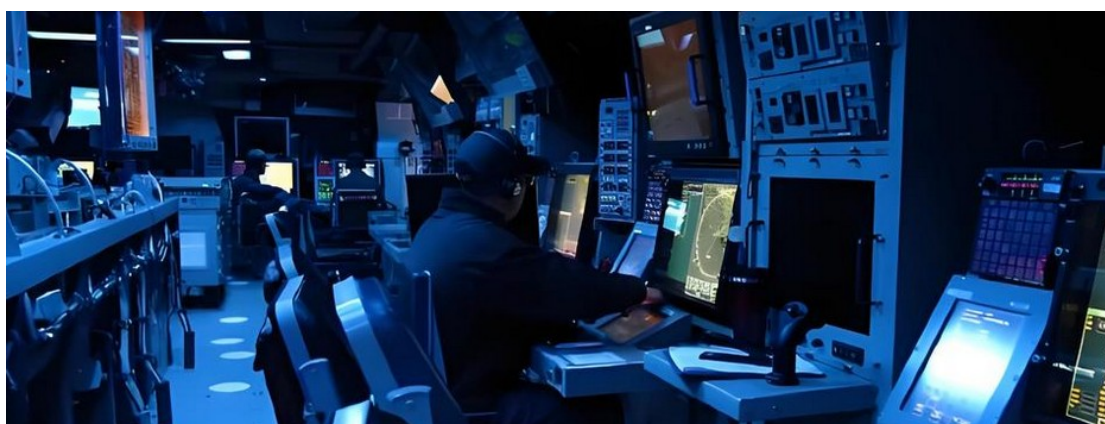


图 1.2 雷达操作工作条件

1.3.1 正常运行条件

1) 环境条件

表 1.2 环境条件

条件类别	具体说明	关键挑战与要求
物理环境	气候与腐蚀：长期暴露于高盐、高湿、霉菌环境 机械应力：承受船舶摇摆、震动、冲击等	要求材料与结构具备高强度防腐、密封防潮能力
电磁环境	复杂干扰：面临海面杂波、敌方电子干扰、以及舰上其他设备的电磁兼容（EMC）问题	需具备优异的抗干扰能力和严格的电磁兼容设计，避免相互干扰。
系统集成	多系统协同：需与火控系统、指挥控制系统、数据链等深度集成，协同工作	要求标准化的数据接口和高速信息处理能力，以融入舰船作战体系
人员操作	专业操控：需由专业操作员在作战信息中心内，进行配置、监控、故障诊断和信息分发	操作员需经受严格训练，同时系统应具备高可靠性和故障弱化能力（如部分单元损坏不影响整体）
技术性能	探测能力：需在严重海杂波中识别小型、低空、高速目标（如掠海反舰导弹） 多任务性：现代雷达需能同时执行对空搜索、对海搜索、目标跟踪、导弹制导等多种任务	采用脉冲多普勒、相控阵（特别是数字有源相控阵）等先进技术，以实现多功能、高数据率和多目标跟踪能力

2) 能源条件

表 1.3 能源条件

条件类别	具体要求与描述	对雷达系统的影响与用途
电	1. 电源规格： • 电压与频率：通常为 440V/60Hz 或 380V/50Hz 三相交流电，允许偏差一般不超过±10%。 • 功率容量：必须满足雷达峰值功耗要求，特别是发射机开机瞬间的冲击功率。 2. 电源质量： • 稳定性：电压和频率波动需在设备允许范围内。 • 纯净度：需抑制电网谐波、浪涌和尖峰脉冲干扰。 3. 备用与应急： • 应能无缝或短时切换至舰船应急电源。	核心能源 • 为所有电子设备（发射机、接收机、处理机等）和电机设备（伺服系统）提供动力。 • 电源不稳或中断将直接导致雷达关机或性能下降、部件损坏。
冷却 (水/气)	1. 液冷（水或其他冷却液）： • 流量与压力：需满足冷却系统设计要求。 • 水质：通常要求去离子水或专用冷却液，以防止管路	散热保障 • 液冷：主要用于冷却大功率部件（如发射机的行波

条件类别	具体要求与描述	对雷达系统的影响与用途
	腐蚀和结垢。 • 温度： 进口水温需低于规定值（如 30℃）。 2. 风冷（气）： • 通风量： 机柜风扇和舱室通风系统需提供足够的气流。 • 空气品质： 空气应过滤，减少盐雾、灰尘，保持机柜内环境洁净、干燥。	管/速调管、调制器等）。 • 风冷： 用于机柜内各类板卡、电源等设备的常规散热。 • 冷却失效将导致设备过热、性能降级或永久性损坏。
油	1. 液压油： • 型号与等级： 必须使用设备规定的液压油（如特定的粘度等级、抗磨型）。 • 清洁度： 油路需保持极高清洁度，定期过滤或更换。 2. 润滑油： • 型号： 用于天线伺服系统的齿轮箱、轴承等（如 GL-5 齿轮油、锂基润滑脂）。 • 定期更换： 需按维护周期更换，防止油脂老化、失效。	机械传动与润滑 • 液压油： 为大型雷达可能采用的液压驱动系统提供动力介质。 • 润滑油/脂： 保证伺服机构（方位/俯仰转动部件）平稳、低磨损运行，防止卡滞和过度磨损。
压缩空气	1. 压力与干燥度： • 提供稳定、干燥（常需露点低于-40℃）、洁净的压缩空气。 • 压力需符合设备要求（如 0.6~0.8 MPa）。 2. 用途分类： • 清洁用气： 用于吹扫天线反射面、波导口等。 • 气动用气： 部分雷达的波导开关、制动器可能采用气动操作。 • 加压用气： 用于维持天线罩或某些充气波导的正压，防止湿气、盐雾侵入。	清洁、驱动与密封 • 保持关键部件（如天线面、高压器件）表面清洁，维持绝缘性能。 • 驱动气动机构。 • 为正压密封系统供气，创造干燥内部环境，提升可靠性。
蒸汽	1. 可用性： • 在现代舰船雷达中直接需求较少，主要存在于某些特定老式系统或舰船通用保障中。 2. 潜在用途： • 环境控制： 在寒冷海域，或可用于雷达舱室的辅助供暖，防止设备冷凝。 • 除冰： 极少数情况下，可能用于天线面的除冰系统（现多采用电加热方式）。	环境维持（次要或备用） • 主要用于舰船整体的环境控制系统，间接为雷达提供适宜的工作温度环境，防止低温启动困难或冷凝水危害。

1.3.2 非正常运行条件

本节对雷达非正常运行条件进行说明。明确外部输入条件的变化可能对螺旋桨造成的故障。同时描述雷达因故障会导致非正常输出条件可能会导致其他设备故障。

表 1.4 非正常输入条件及产生后果

序号	项目	非正常输入条件	可能产生后果
1	电能输入	电压过高（超过+10%）、电压过低（低于-15%）、频率不稳、瞬时断电、谐波污染严重。	1. 过压：烧毁电源模块、滤波电容等敏感元器件。 2. 欠压：设备无法启动或运行不稳定，发射机功率不足。 3. 断电/闪断：系统非正常关机，数据丢失，硬件可能因断电时序错误受损。 4. 谐波：干扰控制系统，造成误报警或逻辑错误。
2	冷却水	流量不足、压力过低、水温过高、水质不洁（含杂质或导电离子）。	1. 流量/压力不足：大功率器件（如发射管）散热不良，导致过热保护关机或永久性热损伤。 2. 水温过高：冷却效率下降，同样引起设备超温。 3. 水质不洁：管路腐蚀、堵塞，降低冷却效率，可能引起绝缘下降和短路。
3	压缩空气	压力不足、湿度过高（含液态水）、含油分或杂质。	1. 压力不足：气动部件（如波导开关）无法正常动作，正压系统失效。 2. 湿度/杂质高：导致内部器件（尤其是高压部件）结露、积污，引发放电打火、绝缘性能劣化，严重时致短路。
4	润滑油/液压油	油位过低、油质劣化（乳化、杂质多、粘度不符）、型号错误。	1. 油位低/油质差：伺服系统齿轮箱、轴承润滑不良，导致磨损加剧、噪音增大、传动精度下降，严重时卡死。 2. 型号错误：无法形成有效润滑膜，加速设备磨损，密封件可能损坏。
5	环境	舱室温度过高/过低、湿度	1. 温湿度超标：电子器件性能漂移、可

序号	项目	非正常输入条件	可能产生后果
	条件	过高、盐雾浓度超标、剧烈振动。	靠性下降，冷凝水导致短路。 2. 盐雾腐蚀：电路板、接插件、结构件腐蚀，接触不良，绝缘性能下降。 3. 剧烈振动：连接件松动，光学或精密机械部件失准，焊点开裂。

表 1.5 设备故障非正常输出条件及可能产生后果

序号	故障	非正常输出条件	可能产生的后果（对其他设备/系统的影响）
1	发射机频谱泄露	产生超出许可范围的杂散辐射或谐波。	1. 电磁干扰（EMI）：严重干扰舰船其他无线电设备（如通信电台、导航接收机、电子战系统）的正常工作，使其灵敏度下降或接收通道饱和。
2	电源故障	产生大的负载冲击（如短路）、向电网反馈谐波或电压尖峰。	1. 电网污染：影响同一母线上其他敏感电子设备的供电质量，可能导致其复位或损坏。 2. 保护跳闸：可能引起配电开关跳闸，导致局部或全船断电。
3	冷却系统泄漏	冷却水（液）泄漏至舱室或设备内部。	1. 电气短路：泄漏的导电液体导致其他相邻电气设备短路、损坏。 2. 舱室危害：引发舱室电气安全隐患，可能导致人员滑倒，腐蚀甲板和其他设备。
4	伺服系统失控	天线非指令性高速旋转或俯仰（“飞车”）、产生异常机械振动和噪音。	1. 机械碰撞：可能撞击周围的舰体结构、天线罩或其他设备，造成物理损坏。 2. 平台干扰：巨大的不平衡力矩和振动可能干扰舰船其他精密设备（如光学瞄准具、卫星通信天线）的稳定平台。
5	信号处理机故障	输出错误的目标数据（假目标、错误坐标/速度）、数据流中断或持续发送无效数据。	1. 作战系统误导：向火控系统、指挥系统（CIC）提供错误情报，导致误判、武器无效发射或丢失战机。 2. 数据链污染：通过数据链共享错误信息，误导编队内其他舰艇或飞机。

序号	故障	非正常输出条件	可能产生的后果（对其他设备/系统的影响）
6	波导/馈线系统损坏	高压射频能量泄漏至舱内。	1. 人员安全： 高强度微波辐射对舱内人员造成健康危害（灼伤）。 2. 设备安全： 泄漏的微波能量可能点燃附近的易燃物，或干扰未做屏蔽的电子设备。

1.4. 安全要求

根据相关的国际公约、技术标准与安全规范，舰船雷达的安全要求涉及设备性能、配备安装、操作维护以及船舶作为雷达目标的可探测性等多个方面。为了方便你快速了解，主要要求整理为下表：

表 1.6 安全要求

安全支柱	具体要求分类	具体安全要求与措施	依据/标准
设备性能与认证	雷达设备性能需满足国际标准，并获得认证。	性能标准通常涵盖探测距离、显示精度、目标分辨能力、方位稳定性和抗干扰能力等	•IEC 62388 •IMO MSC. 192 (79) 等决议 •船舶设备规则（地区性）
配备与安装	不同吨位/海区船舶需按规定配备雷达及辅助设备。	1 总吨位 ≥ 500 的货船和客船，通常需在两侧配备雷达 SART 或 AIS-SART。 2 总吨位 $\geq 10,000$ 或特定船舶，需配备两部能独立工作的雷达系统，其中一台显示器直径不小于 340 毫米。 3 两部雷达应由应急电源供电。	•SOLAS 公约（第 IV、V 章）
操作与维护	1. 需确保维护人员辐射安全 2 设备需保持在有效状态	1 辐射安全：在雷达天线附近工作前，必须关闭系统并上锁，防止意外发射。 2 工作时，人员与天线需保持制造商规定的安全最小距离。	•职业安全健康法规（如美国华盛顿州、加州规定）
作为雷达目标的要求	<150 总吨的船舶，如可行应配备雷达反射器或其他装置	1 雷达反射器的雷达截面积在 X 波段应 ≥ 7.5 平方米，S 波段应 ≥ 0.5 平方米。 2 建议安装高度不低于海平面 4 米。	•SOLAS 第 V 章 •IMO MSC. 164 (78) 性能标准

2. 组成和技术特征

2.1. 组成简介

舰载雷达通常由以下主要子系统构成：

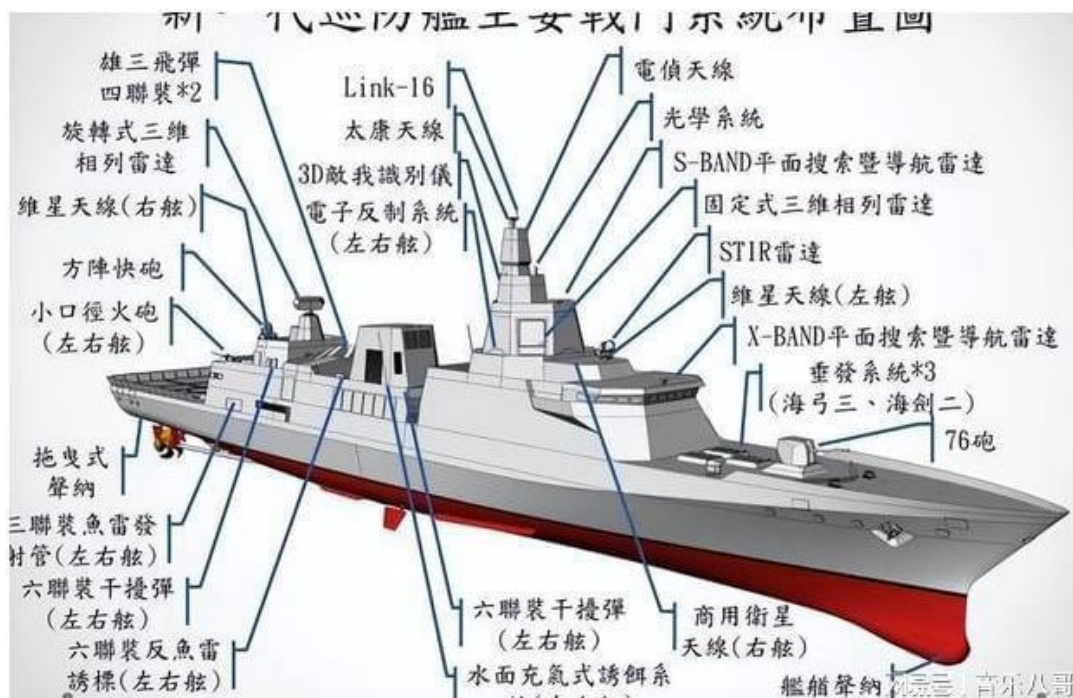


图2. 2船舰雷达组成

表 2. 1 设备组成表

序号	名称	图号或规格	数量	备注
1	天线系统	例如：S波段抛物面天线 / 4面阵有源相控阵	1套	雷达的“眼睛”和“耳朵”，负责发射和接收电磁波。其形式（旋转/固定）、波段和尺寸决定了雷达的基本性能。
2	发射机系统	例如：集中式速调管发射机 / 分布式T/R模块	1套	系统的“心脏”，产生高功率射频脉冲。相控阵雷达的发射机常分散于每个辐射单元后方。
3	接收机系统	例如：多通道超外差接收机	1套	系统的“灵敏耳蜗”，将微弱回波信号放大并转换为中频信号。现代雷达常与处理机高度集成。
4	信号处理机	例如：基于FPGA/GPU的并行处理机柜	1套	系统的“初级大脑”，负责从原始信号中检测、提取目标点迹，并抑制杂波和干扰。
5	数据处理与显控终端	例如：双冗余工控机与多功能显示器	1-2套	系统的“高级大脑”和“人机界面”。数据处理机负责目标跟踪、识别；显控终端供操作员监视和控制。
6	配电与电源系统	例如：440V/60Hz输入，多路直流/交流输出配电柜	1套	系统的“能量中心”，将舰船电力转换为各分系统所需的不同规格电源，并包含滤波和保护功能。
7	冷却系统	例如：强制液冷循环机组（用于发射机等大功率设备）	1套	系统的“散热系统”，通过液体或空气循环为发射机等大功率部件散热，确保其稳定工作。
8	伺服控制系统	例如：全数字化交流伺服驱动单元（仅用于机械扫描雷达）	1套	雷达的“肌肉与骨骼”，驱动机械扫描天线旋转，实现空域覆盖和对目标的精确跟踪。

一、天线系统

舰载雷达天线系统是现代海军舰艇上用于探测、跟踪、识别空中与海面目标，并为武器系统提供火控支持的关键电子设备组成部分。其核心功能包括目标搜索、跟踪、敌我识别、导弹制导、导航以及气象监测等。用于发射和接收电磁波。

（1）基本组成

舰载雷达天线系统通常由以下主要部分构成：

天线单元：负责电磁波的发射与接收，形式多样（如抛物面反射器、相控阵平面阵列等）。

伺服驱动机构：控制天线的方位角和俯仰角运动，实现对空域或海域的扫描。

射频收发组件（T/R 模块）：在有源相控阵雷达中，每个天线单元可能配备独立的 T/R 模块。

波导或馈线系统：连接天线与雷达主机，传输高频信号。

冷却与防护系统：保障高功率运行下的热管理和抗盐雾、抗腐蚀能力。

稳定平台（Stabilization Platform）：补偿舰艇横摇、纵摇和偏航带来的指向误差，确保波束稳定。

（2）天线类型

根据技术体制不同，常见舰载雷达天线包括：

机械扫描天线：通过物理旋转实现空域覆盖，结构简单但扫描速度受限。

无源相控阵天线（PESA）：使用单一发射源，通过移相器控制波束方向，扫描速度快于机械式。

有源相控阵天线（AESA）：每个辐射单元集成独立 T/R 模块，具备多目标跟踪、抗干扰强、可靠性高等优势，是现代主力舰（如美国“阿利·伯克”级、中国 055 型驱逐舰）的核心配置。

（3）环境适应性要求

舰载雷达天线需满足严苛的海洋环境要求：抗高湿、高盐雾腐蚀；耐受强风、冲击与振动；在舰体摇摆条件下保持指向精度；具备电磁兼容性（EMC），避免与其他舰载电子系统相互干扰。

二、发射机

舰载雷达发射机是舰载雷达系统的核心组成部分之一，其主要功能是产生高功率、高稳定性的射频（RF）信号，通过天线辐射出去以探测目标。由于舰载环境的特殊性（如空间受限、高湿高盐、强振动等），舰载雷达发射机在设计上需兼顾高可靠性、高效率、抗干扰能力和多任务适应性。产生高功率射频信号。

（1）基本功能

产生高功率射频脉冲或连续波信号：用于照射目标区域。

支持多种工作模式：如搜索、跟踪、火控、导弹制导、电子对抗等。

与接收机协同工作：实现收发隔离（通常采用环行器、开关或频率/时间分隔）。

提供稳定的频率和相位参考：尤其对相控阵雷达和脉冲多普勒雷达至关重要。

（2）主要类型

① 磁控管发射机

特点：结构简单、成本低、峰值功率高。

缺点：频率稳定性差、寿命较短、难以实现复杂波形调制。

应用：多用于老式或低成本舰载导航/对海搜索雷达（如 X 波段导航雷达）。

② 速调管（Klystron）发射机

特点：高功率（可达兆瓦级）、高增益、频率稳定性好。

缺点：体积大、需高压电源、带宽较窄。

应用：适用于远程对空警戒雷达（如早期 AN/SPS-49）。

③ 行波管（TWT, TravelingWaveTube）发射机

特点：宽带宽、中高功率、适合频率捷变。

缺点：效率较低、寿命有限、需精密冷却。

应用：广泛用于现代多功能舰载雷达（如 AN/SPQ-9B）。

④ 固态发射机（Solid-StateTransmitter）

特点：采用 GaN（氮化镓）或 GaAs（砷化镓）功率放大器；模块化设计，冗余度高；高可靠性、长寿命、低维护；支持复杂调制（如线性调频、相位编码）；可实现分布式发射（尤其适用于 AESA 雷达）。

缺点：单模块功率较低，需大量合成才能达到高功率。

应用：现代先进舰载有源相控阵雷达（如美国 AN/SPY-6、中国 346B 型）普遍采用全固态发射技术。

三、接收机

舰载雷达接收机是舰载雷达系统中负责接收、放大和处理从目标反射回来

的微弱射频（RF）回波信号的关键子系统。其性能直接决定了雷达的探测灵敏度、分辨率、抗干扰能力和多目标处理能力。在复杂的海洋作战环境中，舰载雷达接收机需具备高动态范围、强抗干扰性、高稳定性以及与发射机、信号处理器的紧密协同能力。放大并处理回波信号。

（1）基本功能

接收微弱回波信号：从天线接收经目标散射返回的极微弱电磁波（可能低至微伏甚至纳伏级）。

低噪声放大：在信号链前端进行低噪声放大（LNA），以最大限度保留信噪比（SNR）。

频率下变频：将射频信号通过混频器转换为中频（IF）或直接数字化为基带信号（零中频/低中频架构）。

滤波与选择性：抑制带外干扰、杂波和邻道信号，提高频率选择性。

动态范围控制：应对强杂波（如海面、雨雪）与弱目标信号共存的场景，防止接收机饱和。

数字化输出：将模拟信号转换为数字信号，供后续信号处理单元（如脉冲压缩、MTD、CFAR 等）使用。

（2）典型结构组成

表 2.2 接收机典型结构组成

模块	功能说明
低噪声放大器（LNA）	首级放大，决定整机噪声系数（NF），常采用 GaAs 或 GaN 工艺。
混频器（Mixer）	将射频信号与本振（LO）混频，下变频至中频或基带。
本振（LO）源	提供高稳定、低相噪的本地振荡信号，常由频率合成器产生。
中频放大与滤波器	放大中频信号并滤除镜像频率和带外干扰。
自动增益控制（AGC）	动态调整增益，防止强信号导致 ADC 饱和。
模数转换器（ADC）	高速、高分辨率 ADC（如 12 - 16 位，采样率≥1GSPS）实现信号数字化。
数字下变频（DDC）（可选）	在 FPGA 或专用 ASIC 中完成进一步降采样和滤波。

四、信号处理器

舰载雷达信号处理器是现代海军舰艇雷达系统中的核心组成部分，主要负责对雷达天线接收到的原始回波信号进行采集、滤波、处理和分析，以提取目标信息（如距离、方位、速度、高度等），并为后续的目标跟踪、识别、威胁

评估及武器引导提供高精度、高可靠性的数据支持。对原始回波进行滤波、检测、跟踪等处理。

（1）基本功能

➤ 信号预处理

对接收机输出的中频或基带信号进行数字化（ADC 采样）；
实施杂波抑制、噪声滤除、增益控制等前端处理。

➤ 脉冲压缩与匹配滤波

对采用线性调频（LFM）、相位编码等调制方式的雷达信号进行脉冲压缩，
提高距离分辨率和信噪比。

➤ 多普勒处理（MTI/MTD）

利用动目标显示（MTI）或多普勒滤波组（MTD）技术，从强杂波背景中提取运动目标；

支持恒虚警率（CFAR）检测算法，自动调整检测门限。

➤ 目标检测与参数估计

在距离-多普勒域进行目标点迹提取；
精确估计目标的距离、径向速度、方位角等参数。

➤ 抗干扰能力

具备电子对抗（ECCM）功能，如频率捷变、旁瓣对消、自适应波束置零等，提升在复杂电磁环境下的生存能力。

➤ 多目标跟踪支持

输出标准化点迹数据，供雷达数据处理机（RDP）或作战系统进行航迹起始、关联与滤波（如 $\alpha-\beta$ 滤波、卡尔曼滤波等）。

（2）典型应用场景

舰载对空搜索雷达（如 AN/SPY-6、346 型相控阵雷达）；

舰载火控雷达（如 AN/SPG-62）；

舰载多功能相控阵雷达（兼具搜索、跟踪、导弹制导等功能）。

五、显示控制单元（显控台）

舰载雷达显示控制单元（通常称为显控台，Display and Control Console）是舰载雷达系统中面向操作员的人机交互核心设备，负责将雷达信号处理器输出的目标信息、原始视频、航迹数据等以图形化、数字化方式呈现，并提供操作

界面供舰员进行模式选择、目标管理、威胁评估及武器交战决策。人机交互界面，供操作员监视与操控。

（1）主要功能

① 雷达信息显示

1. PPI（平面位置指示器）显示：以极坐标形式展示目标的距离与方位；
2. B-Scope 或 RHI 显示：用于高度搜索或垂直剖面分析（部分对空/三坐标雷达支持）；
3. 原始视频叠加：可选显示未经处理的回波视频，辅助判断杂波或低可观测目标；
4. 航迹符号显示：以符号、标签形式标注已跟踪目标的位置、速度、航向、敌我识别（IFF）状态等；
5. 威胁等级着色：根据目标类型、速度、航向等自动标红高威胁目标。

② 人机交互与控制

1. 模式切换（如搜索、跟踪、锁定、静默等）；
2. 手动目标截获（MTO）与删除；
3. 跟踪波门调整、多目标优先级排序；
4. 与舰载作战管理系统（C4I/CMS）联动，发起武器交战流程；
5. 设置雷达工作参数（如扫描速率、频率、脉宽、PRF 等）。

③ 多源信息融合显示

1. 集成来自 IFF、ESM（电子支援措施）、光电系统、友邻平台（Link-16/Link-22 等数据链）的信息；
2. 支持综合态势图（CommonTacticalPicture, CTP）生成与共享。

④ 告警与辅助决策

1. 自动弹道导弹预警、低空突防告警、电子干扰告警等；
2. 提供交战建议、拦截窗口预测、武器匹配提示等战术辅助功能。

⑤ 记录与回放

支持任务过程录像、关键事件快照、操作日志存储，用于战后分析与训练。

（2）硬件与软件特点

高可靠性加固显示器：采用军用级 LCD/OLED 屏，具备抗眩光、宽温域（-

40℃~+70℃）、防盐雾、抗震设计；

多功能输入设备：包括轨迹球、多功能键盘、触摸屏、语音指令接口等；

模块化架构：便于维护升级，支持热插拔；

实时操作系统（RTOS）：如 VxWorks、LinuxRT 等，保障毫秒级响应；

图形加速能力：支持 OpenGL/Vulkan 等，实现流畅的 2D/3D 战场可视化；

多显控台协同：在大型舰艇上，多个显控台可分工协作（如对空、对海、电子战席位），并通过网络同步数据。

（3）典型部署场景

作战情报中心（CIC）：主雷达显控台通常部署于此，由雷达操作员或战术协调员值守；

舰桥备用显控终端：提供基本雷达态势，供舰长应急指挥使用；

武器控制室：火控雷达专用显控台，直接引导导弹或舰炮。

六、电源系统

舰载雷达电源系统是保障舰载雷达全天候、高可靠运行的关键支撑子系统，其主要任务是为雷达的发射机、接收机、信号处理器、显控台、冷却装置等各功能模块提供稳定、纯净、高效且具备冗余能力的电能。由于舰艇平台空间受限、电磁环境复杂、工作条件严苛（高湿、盐雾、振动、冲击），舰载雷达电源系统在设计上具有高度专业化和军用化特征。为各模块提供稳定电力。

（1）基本组成

① 主电源输入接口

1. 接入舰船中压或低压配电系统（如 440V/60Hz 三相交流、或 230V/50Hz，部分现代舰艇采用中压直流 MVDC）；

2. 配备 EMI 滤波器、浪涌保护器（SPD）及隔离变压器，抑制电网干扰并提升安全性。

② 交直流变换模块（AC/DC）

1. 将舰船交流电转换为雷达系统所需的多路直流电压（如 +28V、+48V、±15V、+5V、+3.3V 等）；

2. 采用高频开关电源技术（如 LLC 谐振、移相全桥拓扑），提高效率与功率密度。

③ 高压调制电源（用于发射机）

1. 为磁控管、行波管（TWT）或固态功率放大器（SSPA）提供脉冲高压（可达数万伏）；
2. 具备快速上升/下降沿、精确时序控制、过流/过压保护功能；
3. 在有源相控阵雷达中，可能集成数千个 T/R 模块的分布式低压偏置电源。

④ 不间断电源（UPS）与储能单元

1. 配置超级电容或锂电池组，在舰船主电源瞬时中断时维持关键模块（如信号处理器、数据存储）短时运行；
2. 支持“无缝切换”，确保雷达任务不中断。

⑤ 电源管理与监控单元（PMU）

1. 实时监测各路输出电压/电流、温度、故障状态；
2. 通过 CAN、RS-422 或以太网与雷达主控系统通信，支持远程启停、故障诊断与健康管理（PHM）。

⑥ 冷却与热管理子系统

1. 电源模块通常集成风冷（舰用防爆风机）或液冷（与雷达冷却系统共用循环液）；
2. 热设计需满足 MIL-STD-167 或 GJB150A 等舰载环境标准。

（2）发展趋势

■ 综合电力系统（IPS）集成

新一代舰艇（如美国 DDG-1000、中国 055 型后续舰）采用中压直流综合电力系统，雷达电源直接从直流母线取电，提升能效与动态响应。

■ 智能电源管理

引入 AI 算法预测负载变化，动态调节电源输出，实现“按需供电”与节能运行。

■ 固态化与小型化

采用 SiC/GaN 宽禁带半导体器件，提升开关频率、减小体积重量，适应高密度集成需求。

■ 能量回收技术

在脉冲雷达关断期间，回收 T/R 模块或高压电源中的残余能量，提高能源利用率。

七、冷却系统

舰载雷达冷却系统是保障现代高性能舰载雷达（尤其是大功率相控阵雷达）稳定、可靠、长时间运行的关键支撑子系统。由于雷达在工作过程中，特别是发射机和 T/R（收发）模块会产生大量热量，若不能及时散热，将导致器件性能下降、寿命缩短甚至热失效。因此，舰载雷达冷却系统必须具备高散热效率、高可靠性、抗恶劣海洋环境及与舰船平台高度集成的能力。保障高功率器件散热。

（1）冷却需求来源

● 有源相控阵雷达（AESA）

1. 数千个 T/R 模块密集排布于天线阵面上，每个模块功耗可达数瓦至数十瓦，总热负荷可达数十至数百千瓦；
2. T/R 芯片结温通常需控制在 $85^{\circ}\text{C}\sim 125^{\circ}\text{C}$ 以内。

● 高功率发射机

1. 行波管（TWT）、磁控管或固态功率放大器（SSPA）在发射脉冲时产生集中热源；
2. 高压电源、调制器等也伴随显著热耗。

● 信号处理与电源模块

高密度 FPGA、GPU、电源变换器等电子设备持续发热，需独立或共用冷却回路。

（2）主要冷却方式

① 风冷（AirCooling）

适用场景：低功率雷达、早期舰载雷达、辅助设备；

特点：

- ◇ 结构简单、成本低；
- ◇ 采用舰用防盐雾、防腐蚀风机；
- ◇ 散热能力有限（一般 $<5\text{kW}/\text{m}^2$ ）；
- ◇ 易受舱室环境温度影响，且可能引入灰尘/湿气。
- ◇ 多用于小型舰艇或雷达的非核心部件（如显控台、部分接收机）。

② 液冷（LiquidCooling）——主流方案

闭式循环液冷系统（Closed-LoopLiquidCooling）为现代高性能舰载雷达

的标准配置。

典型结构：

一次侧（内循环）：去离子水或乙二醇水溶液在雷达内部流经冷板（ColdPlate），吸收T/R模块、电源等热量；

二次侧（外循环）：通过热交换器（如板式换热器）将热量传递给舰船中央冷却系统（海水或淡水环路）；

泵组、膨胀箱、过滤器、温度/流量传感器构成完整闭环。

八、伺服控制系统

舰载雷达伺服控制系统是用于驱动和精确控制雷达天线（或天线阵面）指向的机电一体化子系统，其核心任务是根据作战需求或搜索策略，实时、稳定、高精度地将雷达波束对准指定空域或目标方向。对于机械扫描雷达（如传统旋转抛物面天线）或部分混合体制雷达（如“旋转+俯仰”三坐标雷达），伺服系统尤为关键；即使在有源相控阵雷达（AESA）中，若采用固定阵面以外的旋转/俯仰安装方式（如X波段火控雷达），仍需伺服控制。驱动天线旋转或俯仰。

（1）基本功能

❖ 天线指向控制

控制天线在方位（Azimuth）和俯仰（Elevation）两个自由度上的运动；

支持多种工作模式：连续旋转搜索、扇区扫描、凝视跟踪、多目标跳跃指向等。

❖ 高精度角度定位

定位精度通常达 $0.1^{\circ} \sim 0.01^{\circ}$ （取决于雷达用途，火控雷达要求更高）；

具备快速响应能力（角加速度可达数 $^{\circ}/s^2$ ）。

❖ 动态跟踪能力

能够平滑、无超调地跟踪高速机动目标（如反舰导弹）；

与雷达信号处理及跟踪滤波器闭环协同，实现“随动跟踪”（Track-While-Scan或DedicatedTrack）。

❖ 抗扰动稳定

抵消舰艇摇摆（横摇、纵摇、艏摇）引起的天线指向偏差；

集成舰船姿态传感器（如惯导/平台罗经）数据，进行稳定补偿

(Stabilization)。

❖ 安全保护与限位

设置机械/电气限位，防止天线碰撞桅杆或上层建筑；

具备过载、堵转、断电、通信中断等故障保护机制。

(2) 系统组成

表 2.3 伺服控制系统组成表

子系统	功能说明
伺服驱动电机	多采用高扭矩密度的交流永磁同步电机（PMSM）或直流无刷电机（BLDC），具备低速平稳、高速响应特性
减速传动机构	行星齿轮、谐波减速器或蜗轮蜗杆，提供大减速比与高刚性
角度反馈装置	高精度光电编码器（绝对式/增量式）、旋转变压器（Resolver），分辨率可达 19 - 23 位
稳定平台（可选）	对于高精度火控雷达，天线安装于陀螺稳定平台上，独立于舰体运动
伺服控制器	基于 DSP/FPGA 的嵌入式控制单元，运行 PID、前馈、自适应或鲁棒控制算法
舰姿补偿接口	接收舰船惯导系统（INS）输出的横摇（Roll）、纵摇（Pitch）、艏摇（Yaw）数据，实时修正指向指令
人机接口	接收来自显控台或作战系统的指向命令（如“锁定目标 XX”、“扫描 030° ~120° ”）

2.2. 技术参数

表 2.4 组成和技术特征技术参数的主要技术特征表

指标名称	参数值
工作频段	常用 L、S、C、X、Ku、Ka 等波段。例如：S 波段用于远程对空搜索，X 波段用于火控和导航。
体制类型	脉冲雷达、连续波雷达、脉冲多普勒雷达、频率捷变雷达、合成孔径雷达（SAR）等。
扫描方式	机械扫描、电子扫描（相控阵）、混合扫描。
极化方式	线极化（水平/垂直）、圆极化，用于抗干扰和改善海杂波抑制。
抗干扰能力	具备频率捷变、旁瓣对消、自适应波束置零、低截获概率（LPI）等技术。
多目标跟踪能力	现代雷达可同时跟踪数百个空中/海上目标。
集成化与模块化	采用开放式架构，便于升级维护，支持软件定义雷达（SDR）理念。

2.3. 结构特点

表 2.5 结构特点

结构特点	核心目的	带来的直接好处
高安装位置与宽广视界	实现最大化的探测距离与范围，减少盲区。	1. 提前预警：能更早发现海平面目标和低空目标。 2. 全向覆盖：360 度旋转或四面阵布局确保无死角监视。
极高的结构强度与稳定性	抵抗舰船摇摆、振动、冲击，并支撑重型设备。	1. 保持精度：天线指向稳定，确保测量数据准确。 2. 保证安全：防止在恶劣海况下结构损坏或设备脱落。
全面的“三防”与密闭设计（防盐雾、防湿热、防霉菌）	抵御海洋高盐、高湿、高温的严酷腐蚀环境。	1. 超长寿命：大幅降低腐蚀和老化速度，延长设备寿命。 2. 高可靠性：保护内部精密电子器件，减少环境导致的故障。
紧凑化与轻量化设计	适应舰船空间紧张、重心控制严格的要求。	1. 节省空间：在有限的甲板和上层建筑内实现部署。 2. 保证稳性：控制设备重量和高层甲板的载荷，不影响船舶稳性。
模块化与快速拆装设计	便于在舰上狭窄空间内进行维护、维修和升级。	1. 高可维修性：可快速更换故障模块，缩短维修时间。 2. 易于升级：通过更换模块实现性能提升，延长系统生命周期。
电磁兼容与热管理设计	确保自身工作稳定，且不干扰/不被干扰舰上其他设备。	1. 自兼容：内部高、低频电路互不干扰。 2. 舰兼容：与通信、电子战等设备共存互不干扰。 3. 可靠散热：确保大功率器件在密闭环境下正常工作。
低可观测性（隐身）集成	降低雷达自身的雷达散射截面积，提升舰船整体隐身性。	1. 增强生存力：减小被敌方雷达探测的距离。 2. 天线罩应用：兼具隐身、防护和

结构特点	核心目的	带来的直接好处
		整流功能。

2.4. 布置情况

以下是螺旋桨及其关键关联设备在舰船上的具体位置说明：

表 2.6 布置情况

序号	设备名称	位置信息
1	天线系统	露天甲板或上层建筑顶部（如桅杆平台、舰桥顶部）。需保证 360 度无遮挡视野，是雷达位置最高的部件。
2	发射机系统	舱室内（发射机舱），通常靠近天线基座下方或邻近舱室，以缩短大功率波导传输距离，减少损耗。
3	接收机系统	舱室内（接收机/电子设备舱），常与信号处理机等布置在同一环境受控的舱室，可能靠近发射机舱。
4	信号处理机	舱室内（电子设备舱/作战信息中心附近），位于环境条件较好的舱室，便于数据快速传输至指挥系统。
5	伺服控制系统	舱室内，通常位于天线基座正下方的伺服驱动舱，或与发射机舱相邻，以缩短大功率电机驱动电缆。
6	雷达数据处理机	作战信息中心（CIC）或电子设备舱，与舰船作战系统其他数据处理设备集中布置，确保高速数据交换。
7	显控台	作战信息中心（CIC），布置在雷达操作员战位，与其它传感器显控台并列，便于指挥决策。
8	定时与同步系统	电子设备舱或专用时统机柜，通常与其它传感器的时统设备集中布置，接收统一的舰船时频基准。
9	监控与故障诊断系统	电子设备舱或 CIC，其状态显示终端可能集成在显控台上，或作为独立监控台布置在技术维护战位。
10	电源及配电	配电舱或电子设备舱，主配电箱靠近舰船电源入口；各分系统的

序号	设备名称	位置信息
	系统	二次电源模块通常集成在对应机柜内。
11	冷却系统	专用冷却设备间或邻近发射机舱。水泵、换热器、水箱等大型部件需布置在通风良好、便于维护和检漏的位置。
12	波导/馈线系统	传输路径沿线，贯穿于天线基座、甲板、舱壁之间，通过波导导管或电缆桥架从天线连接至发射机/接收机。
13	结构及安装平台	全船多位置。天线基座位于甲板；设备机柜安装底座位于相应舱室甲板；天线罩（若配备）位于露天平台。

2.5.工作原理

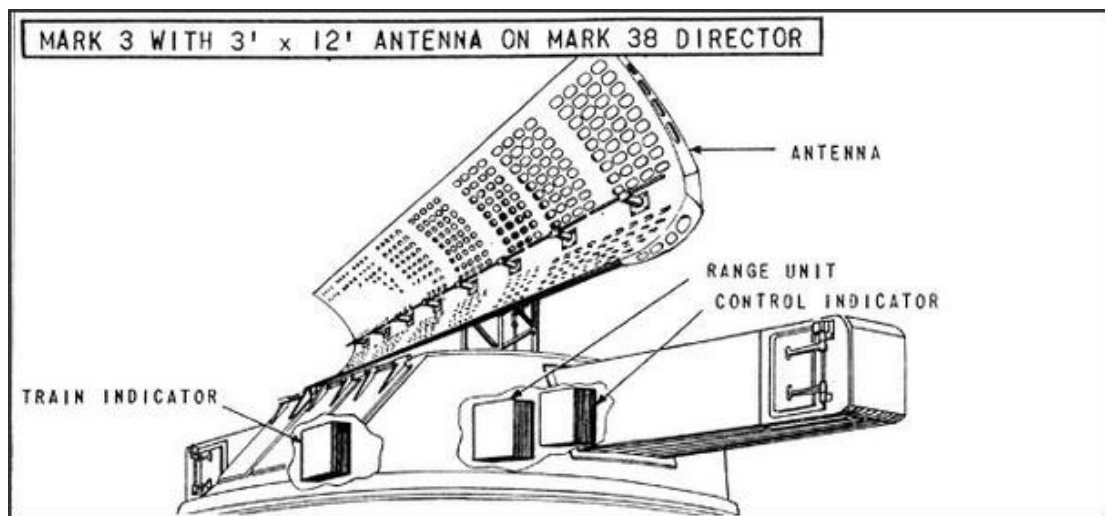


图 2.2 工作原理

基本工作流程（四步循环）

一、发射电磁波

雷达发射机产生高功率、短时宽（微秒级）的射频脉冲信号。信号通过天线定向辐射到空间特定方向（机械扫描或电子波束指向）。

二、电磁波传播与目标反射

电磁波以光速 $c \approx 3 \times 10^8 \text{m/s}$ 向外传播。

当遇到目标（如飞机、导弹、舰船、岛屿）时，部分能量被反射（散射）回雷达方向。

反射强度取决于目标的雷达散射截面（RCS）、材料、形状、入射角等。

三、接收回波信号

天线在发射间隙（或同时，对连续波雷达）接收微弱的回波信号。接收机对信号进行低噪声放大、下变频、滤波和模数转换（ADC）。

四、信号与数据处理

信号处理器提取目标参数（距离、速度、角度）；数据处理器完成点迹凝聚、航迹起始、跟踪滤波、威胁评估等；最终结果送至显控台或武器系统。

五、关键参数测量原理

1. 测距原理（Range Measurement）

利用电磁波往返时间 t 计算距离： $R=2c \cdot t$

例如：若 $t=200 \mu s$ ，则 $R=3 \times 10^8 \times 200 \times 10^{-6}=30km$

距离分辨率由脉冲宽度或带宽决定： $\Delta R=2Bc$ ，其中 B 为信号带宽（脉冲压缩可提升分辨率）。

2. 测角原理（Angle Measurement）

机械扫描雷达：天线波束最窄方向即为目标方位（精度受限于波束宽度，通常 $1^\circ \sim 3^\circ$ ）。

相控阵雷达：采用单脉冲技术（Monopulse）：同时形成和波束（ Σ ）与差波束（ Δ ），通过比幅或比相计算偏差角；角度精度可达 $0.05^\circ \sim 0.1^\circ$ ，满足火控需求。

方位角（Azimuth）和俯仰角（Elevation）共同确定目标空间方向。

3. 测速原理（Velocity Measurement）——多普勒效应

当目标与雷达存在相对径向运动时，回波频率发生偏移（多普勒频移）：

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda}$$

其中：

f_d ：多普勒频率（Hz）

v_r ：目标径向速度（m/s，朝向雷达为正）

λ ：雷达波长（m）

通过FFT（快速傅里叶变换）分析回波信号频谱，提取 f_d ，进而解算 v_r 。

脉冲多普勒雷达（PDR）可区分高速目标与静止杂波（如海浪、岛屿）。

六、典型信号处理流程

1. 脉冲压缩（Pulse Compression）

发射线性调频（LFM）或相位编码信号，提升距离分辨率而不牺牲平均功率。

动目标显示/检测（MTI / MTD）

MTI：利用延迟线对消器抑制静止杂波；

MTD：采用多脉冲多普勒滤波组，提升慢速目标检测能力。

2. 恒虚警率处理（CFAR）

自适应调整检测门限，使虚警概率恒定，适应不同海况/干扰环境。点迹形成与凝聚。将同一目标在多个脉冲中的回波合并为一个“点迹”（Plot），包含 R, θ, vr 等信息。

3. 航迹起始与跟踪

使用卡尔曼滤波、 $\alpha - \beta$ 滤波或多假设跟踪（MHT）算法，将点迹关联成稳定航迹（Track）。

2.6. 主要附件、仪表的规格、型号及性能参数

表 2.7 舰船雷达主要附件参数表

名称	型号	数量/ 台	主要性能参数与规格说明
雷达综合测试仪	例如：IFR 6000 / R&S PSL	1-2	核心参数：频率覆盖雷达工作频段（如 S/X 波段），内置脉冲、连续波等多种信号模式，支持信号生成与分析。 用途说明：用于在码头或基地对雷达接收机灵敏度、发射机频谱、系统动态范围等关键指标进行综合测试与故障诊断，是高级维护的核心仪表。
便携式频谱分析仪	例如：Keysight N9040B / R&S FSW	1-2	核心参数：频率上限高于雷达工作频率（如 26.5GHz 以上），分析带宽宽，动态范围大。 用途说明：用于现场监测雷达发射频谱纯度、杂散、谐波，以及排查外部电磁干扰，

名称	型号	数量/ 台	主要性能参数与规格说明
			保障雷达自身合规且不受干扰。
高精度功率计与传感器	例如：Keysight U2000 系列 / Bird 43	1 套	核心参数：功率测量范围覆盖雷达峰值与平均功率（如 100dBm 至+20dBm），传感器能承受高脉冲功率。 用途说明：直接测量雷达发射机输出端口或馈线系统的射频功率，是校准发射机、监测功率变化和判断故障的基础工具。
绝缘电阻测试仪（兆欧表）	例如：Megger MIT515	1	核心参数：测试电压可达 5000V DC，绝缘电阻测量范围高达数 TΩ。 用途说明：定期检测雷达高压部件（如发射机调制器、电源）、天线馈线系统及全系统的绝缘性能，预防高压击穿和短路故障。
力矩扳手组（多种量程）	例如：精密机械式或数显式	1 套	核心参数：覆盖小、中、大量程（如 5–25N·m，20–100N·m，100–500N·m），精度优于±3%。 用途说明：用于天线反射面、波导法兰、结构件等关键部位螺栓的标准化紧固，确保连接可靠、受力均匀，防止松动或过度应力。
工业内窥镜	例如：奥林巴斯 IPLEX NX / 国产工业级	1	核心参数：探头直径灵活（如 φ4mm–φ8mm），长度可定制（1m–5m），带高亮 LED 照明和拍照录像功能。 用途说明：在不拆卸的情况下，直观检查天线馈源内部、波导腔内、齿轮箱内部等密闭空间的物理状态，如腐蚀、磨损、异物或装配问题。
防爆型真空吸尘器	例如：Nilfisk / 其他 ATEX 认证型号	1	核心参数：防爆等级达标（如 Ex IIB T4），配备 HEPA 高效过滤器，吸力强劲。 用途说明：专门用于清洁雷达机柜内部、电子设备间的导电性粉尘和金属屑，防止因灰尘积聚导致电路短路或散热不良，是重要的预防性维护工具。
校准噪声源	例如：Keysight NC346 系列	1	核心参数：超额噪声比（ENR）已知且稳定，频率覆盖雷达接收频段。

名称	型号	数量/ 台	主要性能参数与规格说明
			用途说明：与噪声系数分析仪配套使用，用于精确校准和测量雷达接收机系统的噪声系数，是评估接收灵敏度的基准设备。
光纤测试仪（若适用）	例如：EXFO FTB-700 / VIAVI SmartClass	1	核心参数：支持雷达系统内常用的多模/单模光纤，具备 OTDR（光时域反射）功能。 用途说明：用于测试和诊断现代雷达中大量使用的光纤数据链路的连通性、损耗和断点位置，确保高速数据传输的可靠性。

2.7. 操作员与设备之间、操作员与其他设备或系统设备员之间关系

2.7.1. 操作员与雷达设备之间的关系（人 - 机关系）

表 2.8 操作员与雷达设备之间的关系（人 - 机关系）表

关系类型	具体内容
控制与操作	操作员通过显控台（Console）设置雷达工作模式（搜索/跟踪/火控）、量程、滤波参数（如海杂波抑制等级）、极化方式等； 可手动锁定目标、启动自动跟踪（TWS/STT）、分配火控通道。
监视与判读	实时观察原始雷达视频（PPI）和航迹符号，识别真假目标、干扰或异常回波； 判断目标属性（飞机/导弹/舰船）、威胁等级、运动趋势。
故障响应与维护协同	接收设备自检告警（如驻波比超限、T/R 模块失效）； 执行重启、切换备份通道等应急操作，并通知电子战技师（ET）进行维修。
人因工程依赖	雷达界面设计（色彩、符号、刷新率）直接影响操作效率与误判率； 长时间值守需考虑视觉疲劳、认知负荷与自动化辅助（如 AI 目标推荐）。

2.7.2. 操作员与其他舰载设备/系统之间的关系（人 - 系统关系）

表 2.9 操作员与其他舰载设备/系统之间的关系（人 - 系统关系）表

关联系统	交互内容	信息流向
1. 作战管理系统 （CIC/CMS） （如宙斯盾、ZKJ-5/7）	雷达目标航迹自动上传至战术数据链； 接收 CMS 下达的任务指令（如“重点监视扇区 030° - 090°”）； 协同分配武器通道（如引导 HHQ-9 拦截）。	双向：雷达 →CMS（目标数据） CMS→雷达（任务指令）
2. 电子支援措施 （ESM） 与 光电系统 （EO/IR）	ESM 发现辐射源后，提示雷达转向该方位进行验证； 光电系统对低空/隐身目标补盲，操作员可融合多源图像判别。	多源融合：ESM/EO 提示→雷达聚焦
3. 导航系统 （GPS/INS/ECDIS）	雷达叠加电子海图（ECDIS），辅助避碰与定位； 舰艇精确位置/姿态数据用于雷达波束稳定补偿。	单向输入：导航→ 雷达（用于坐标校正）
4. 武器控制系统 （WCS）	火控雷达操作员直接为舰空/舰舰导弹提供照射或中制指令； 与火控军官协同确认发射授权与目标优先级。	雷达→WCS（实时 目标参数）
5. 数据链系统 （Link-16、JTIDS、北斗短报文）	将本舰雷达探测结果共享给编队其他平台（协同交战 CEC）； 接收友邻舰/预警机提供的远程目标指示。	网络化：雷达↔编 队节点

2.7.3. 操作员与其他人员之间的关系（人 - 人协同）

表 2.10 操作员与其他人员之间的关系（人 - 人协同）表

协同对象	协作内容	典型场景
1. 战术指挥官 (TAO/舰长)	报告关键目标（如反舰导弹来袭）； 执行“搜索优先级”“静默模式”等战术指令。	防空反导作战中，操作员实时通报“Track#213，高速俯冲，疑似 YJ-12”
2. 火控军官 (FCO)	配合完成导弹制导链路建立； 确认目标锁定状态与脱靶量评估。	发射 HHQ-9 后，操作员维持 STT 跟踪直至命中
3. 电子战操作员 (EWO)	联合对抗敌方干扰：EWO 施放诱饵，雷达操作员切换抗干扰模式； 共享电磁环境态势。	遭遇 DRFM 欺骗干扰时，EWO 建议启用 LPI 模式，操作员执行
4. 通信兵/数据链操作员	协调目标信息上报格式与时序； 确保雷达数据正确注入战术数据链。	编队防空时，将目标批号同步至 Link-16 网络
5. 航海/瞭望人员	核对近程小目标（如渔船、浮标）是否为真实威胁； 避免误击民用船只。	雷达发现不明回波，呼叫瞭望兵目视确认

3. 使用操作

3.1. 使用前启动操作程序

3.1.1. 启动前准备

确认人员资质、环境安全、设备外观完好、电源正常。

清除天线旋转障碍，清洁天线罩。

3.1.2. 通电与自检

按顺序开启电源：通常先开显示器→收发机→天线电机（部分集成式设备一键启动）。

等待预热：磁控管或固态发射机需数秒至数十秒预热。

观察自检结果：确认无“TXFault”、“AntennaError”等告警。

3.1.3. 初始参数设置

表 3.1 舰船使用操作初试参数设置表

参数	推荐初始设置	说明
量程 (Range)	3 - 6 海里	近距离便于观察周围船舶
增益 (Gain)	自动或中等	避免过高 (噪声多) 或过低 (目标丢失)
海杂波抑制 (STC/ SeaClutter)	适度开启	根据海况调整, 避免抑制真实小目标
雨杂波抑制 (RainClutter)	按天气启用	降雨时开启, 晴天关闭
调谐 (Tuning)	自动优先	手动调谐仅在自动失效时使用
显示模式	Head-Up 或 North-Up	根据航行习惯选择, 建议 North-Up 更稳定

3.1.4. 系统联动检查

确认陀螺罗经输入正常: 雷达图像方位基准准确。

确认 GPS 位置叠加正确: 本船位置与电子海图一致。

AIS 目标是否融合显示: 验证识别功能。

3.2. 起动及运行过程中的操作程序、注意事项及容易出现的
误操作和防范措施

3.2.1 起动操作程序

第一阶段: 起动前准备与检查

此阶段是安全操作的基础, 目的是确认雷达及其支持系统处于可正常工作
状态。

1. 环境与安全确认:

检查气象与海况，确认符合雷达开机条件（通常要求风速、摇摆角度在设备允许范围内）。

确保天线转动区域无障碍物、无人员，并已按规定设置安全警示标识。

确认雷达舱室通风、冷却系统（空调/液冷）已就绪，环境温度、湿度在规定的范围内。

2. 能源与保障条件检查：

电力：检查舰船主电源供应是否正常，电压、频率是否稳定在雷达要求的范围内（如 $440V \pm 10\%$ ， $60Hz$ ）。确认应急电源备用状态良好。

冷却：检查液冷系统液位、压力、管路阀门状态；确认风冷系统滤网清洁、风扇运转正常。

其他：检查压缩空气压力、液压油位等（如设备有相关要求）。

3. 设备状态直观检查：

外观检查：检查天线面、波导、馈线有无物理损伤、松动、异物或积水。

连接检查：确认所有电缆、波导连接紧固，穿舱密封完好。

仪表与开关：确认各分机开关处于“关机”或“准备”位置，仪表指示归零。

第二阶段：系统起动与初始化

遵循“先总后分、先低压后高压、先控制后射频”的原则，顺序加电。

1. 总电源上电：合上雷达主配电开关，观察电源系统仪表指示是否正常，无异常报警。

2. 控制系统与辅助系统上电：

开启伺服控制系统，启动天线伺服电机供电。通常先让天线以最低速“手动”转动一小角度，确认转动顺畅、无异响，再置于“自动”或“程控”模式。

开启冷却系统（先开泵后开风机），确认流量、压力、温度指示正常。

开启监控与显控台计算机系统。

3. 发射机预热与低压上电：

将发射机开关置于“准备”或“预热”档，对关键器件（如磁控管、行波管）进行规定时间的预热（通常 5-15 分钟），以延长寿命。

低压上电后，观察发射机状态指示灯及仪表，确认无故障报警。

系统自检与参数设置：

在显控台上执行系统上电自检（BIT），确认各分系统（信号处理、数据处理、定时等）自检通过。

根据当前战术任务，设置或选择相应的工作模式（如对空搜索、对海监视、跟踪）、量程、脉冲重复频率等。

第三阶段：正常运行与监控

雷达进入工作状态后，操作重点转为状态监控与任务执行。

1. 高压加电与发射：

在自检通过、参数设置完成后，方可将发射机开关置于“高压”或“发射”档。

密切观察发射机的功率、电流、反射功率等关键参数指示，应在正常范围内且稳定。监听声音，应无异常放电或打火声。

2. 性能监控与任务操作：

在显控屏上观察雷达画面，检查背景噪声、目标探测和跟踪是否正常。

根据命令或预案，操作雷达执行指定空/海域的扫描、对特定目标的跟踪等任务。

3. 持续性状态监控：

定时巡检发射机（功率、温度）、接收机（噪声电平）、伺服系统（电流、跟随误差）、冷却系统（进/出口温度、压力）等关键参数。

注意监听设备运行声音，及时发现异常振动或噪音。

3.2.3 运行过程中的操作程序与注意事项

1. 安全第一：

高压危险：发射机高压可达数万伏，维护或检查前必须断电并可靠放电。运行时严禁打开高压机柜。

辐射安全：天线前方主波束内为强微波辐射危险区，开机时必须确保人员远离。严禁在波导或天线前方直视或作业。

机械安全：天线转动时，严禁任何人员进入其旋转区域。停机检修时，必须对天线进行机械锁定或电气锁定。

2. 严格遵循程序：
- 必须严格按照技术手册规定的顺序开机、关机和操作，禁止跳步或逆向操作，特别是涉及高压和伺服的部分。
- 参数设置不得超过设备允许的安全工作范围。
3. 异常情况处置：
- 运行中如出现参数超标、报警、异响、冒烟或异味等任何异常，应立即按照应急预案操作，通常首先采取的是切断发射机高压，必要时切断主电源。
- 严禁在原因未明的情况下强行复位或反复试开机。
4. 记录与交接：
- 详细记录开机时间、工作模式、关键参数及任何异常情况。
- 交接班时，必须将设备状态、当前任务及注意事项清晰交接。

3.2.3 容易出现的误操作和防范措施

表 3.2 舰船雷达常见误操作及防范措施

误操作	潜在后果	防范措施
未校准方位基准 (HeadingInput 错误)	雷达图像整体偏转，导致 避碰决策错误	每次开机后核对陀螺航向；与磁 罗经比对
增益设置过低	小目标（如渔船、浮标） 丢失	初始设为自动，或手动调至背景 噪声刚可见
海杂波抑制过度	近距离小船被滤除，造成 碰撞风险	抑制强度以保留近处小目标为限
长期使用 Head-Up 模式且 未更新航向	图像随船转向剧烈晃动， 易误判	在复杂水域建议使用 North-Up 或 Course-Up
忽略 ARPA 跟踪容量限制	自动捕获目标超出上限， 漏跟危险目标	手动优先跟踪高风险目标，定期 清理无效跟踪
在港内长时间高功率运行	干扰他船雷达，加速设备 老化	使用“HarborMode”或降低发射 功率
未切换量程导致远距目标 遗漏	大洋航行时未能提前发现 来船	定期切换大/小量程交替扫描（如 6NM+24NM 轮换）

3.3. 应急操作

- (1) 安全第一：首要目标是确保人员安全和防止灾难性损坏（如爆炸、火

灾）。

(2) 快速判断：迅速识别故障的根源和严重性，决定采取何种应急措施。

(3) 按章操作：严格遵循《船舶应急程序》、《主机操作手册》中规定的应急预案。

(4) 及时沟通：立即向驾驶台和轮机长报告情况，确保全船协同。

3.4. 运行中的监测和记录要求以及标准记录表格

3.5. 设备停止运动操作程序及注意事项

3.5.1. 正常停车操作程序及注意事项

正常停车是日常操作或任务转换时的标准流程，旨在安全、平稳地关闭系统，最大限度保护设备寿命。

1. 操作程序：

(1) 任务终止与模式切换：首先在显控台上终止所有跟踪任务，并将雷达工作模式切换至待机或最低功率状态，停止主动发射。

(2) 关闭发射机高压：将发射机控制开关从“发射”或“高压”档位，切换至“准备”或“低压”档位。必须确保高压指示仪表归零。

(3) 系统泄能与冷却：

保持发射机在“准备”档位，让机内高压电容等元件通过内部放电回路自动泄放残余电能（通常需要 1-2 分钟）。

至关重要：保持冷却系统（液冷泵/风机）持续运行至少 10-15 分钟，对发射管等大功率器件进行散热，防止余热积聚损坏器件。

(4) 关闭低压与控制电源：确认发射机已充分冷却后，依次关闭发射机“低压”电源、伺服系统电源、信号/数据处理机电源。

(5) 关闭辅助系统与总电源：关闭冷却系统，最后断开雷达主配电开关。

(6) 状态记录与检查：记录停车时间、操作员及设备最终状态。可视情进行停车后的外观巡视。

2. 核心注意事项：

冷却优先原则：绝对禁止在关闭发射机高压后，立即关闭冷却系统和总电源。这是保护昂贵发射管（如行波管、磁控管）的最关键措施。

顺序不可颠倒：必须严格遵守“先停高压射频，再停低压控制，最后停保障系统”的逆开机顺序。

确认泄能：在接触任何高压部件前，即使已正常关机，也必须使用接地放电棒进行手动验证放电，以防残余高压电击。

3.5.2. 紧急停车操作程序及注意事项

紧急停车是在发生或即将发生人身伤害、设备严重损坏或火灾等紧急情况时的应急处置，一切以人员安全和阻止事态扩大为最高准则。

1. 操作程序：

（1）触发紧急停车：立即按下设置在显控台旁或雷达主配电板上的红色蘑菇头紧急停车按钮。该按钮设计为直接切断雷达主供电。

（2）同步高声警示：在按下按钮的同时，必须大声呼喊示警（如“紧急停车！”），通知舱室内所有人员。

（3）现场初步处置：

若涉及火情：立即使用合适的灭火器（通常是二氧化碳或七氟丙烷）扑救初期火灾，并触发火警警报。

若涉及机械伤害：立即隔离危险区域，对伤员进行急救。

（4）报告与隔离：立即向舰桥或作战指挥中心报告情况，并在设备上悬挂“故障禁用”标识，防止误操作。

2. 核心注意事项：

优先人身安全：情况紧急时，操作员无需、也不应该再去执行复杂的软件关机流程，唯一正确动作就是拍下急停按钮。

接受设备损伤风险：紧急断电会导致所有正在进行的任务数据丢失，并可能因电源骤停、冷却中断对发射管等部件造成不可逆的物理损伤。这是在紧急情况下必须承受的代价。

严禁擅自恢复：紧急停车后，严禁在未查明并排除故障原因的情况下尝试

重新开机。必须由专业技术人员进行全面检查评估后，方可恢复系统。

3.5.3. 运行中的监测要求

运行监测的核心是“四维监控”，即对性能、状态、环境和安全进行持续、多角度的感知。

1.性能指标实时监控

探测效能：在显控台上密切观察探测距离、目标跟踪稳定性、虚警率的实时变化。任何持续的、无法解释的性能下降（如丢失本该发现的目标）都是首要报警信号。

信号质量：通过内置测试（BITE）画面或专用仪表，监测发射机输出功率、频谱形状以及接收机噪声电平。功率异常波动或噪声突增都指向潜在故障。

2.设备状态参数巡检

关键物理参数：定时（如每小时）记录或检查各分系统仪表：

发射机：高压电流、反射功率、关键点温度（如发射管壳体）。

冷却系统：液冷进出口温度与压力差、风机状态。温差急剧增大或压力下降可能意味着管路堵塞或泄漏。

伺服系统：驱动电机电流、跟踪误差。电流异常增大可能预示机械卡滞。

电源：输入电压、电流及各路输出电压的稳定性。

异常感官监测：始终保持“眼观、耳听、鼻闻”。注意是否有异常噪音（如放电嘶嘶声、机械摩擦声）、异常气味（如绝缘材料过热焦糊味）、异常振动或烟雾。

3.外部环境条件监视

电磁环境：注意雷达显示屏上是否出现规律的、大面积的条带状干扰，这可能表明遭遇外部电子干扰，需及时报告并启动抗干扰预案。

平台环境：关注舰船机动（大角度转向、高速航行）或恶劣海况（大幅横摇、纵摇）对雷达性能的瞬时影响，并观察天线伺服系统能否有效稳定跟踪。

4.安全态势持续警戒

物理安全区：确保雷达天线扫描区域始终保持清空，无人员、设备或漂浮物侵入。

辐射安全：确认雷达舱室门禁与警告标志有效，防止人员误入高危区域。

3.5.4. 记录要求

记录是监测的固化，其价值在于提供追溯、分析和决策的依据。必须做到“及时、准确、完整”。

1. 周期性常规记录

运行日志：在每班次（通常每 4-6 小时）或任务阶段转换时，必须规范填写运行日志。内容包括：起止时间、操作员、工作模式、主要设定参数、设备状态读数（取巡检中的典型值），以及任何换能或异常情况。

关键点强调：所有读数必须记录数值与单位，而非“正常”等定性描述。交接班时，双方必须共同确认日志并签字。

2. 事件驱动专项记录

异常与故障记录：任何偏离正常的状态（如报警、参数超标、性能下降）都必须立即专项记录。内容应包括：发生时间、现象描述、关联参数、操作员采取的处置动作、警报的自动/手动复位情况。必要时，应保存故障发生前后的屏幕截图或数据快照。

特殊任务记录：在执行高强度、特殊模式（如极限探测、抗干扰模式）任务后，需记录任务的特殊要求、设备的表现及任务后的状态检查结果。

3. 数据记录的管理与利用

归档与可追溯：所有日志、专项记录单都应按照时间顺序归档，保存期限符合规定（通常不少于一个维修周期或舰艇部署周期）。

用于趋势分析：定期（如每月）对关键参数（发射机功率、噪声系数）的历史数据进行趋势分析。缓慢的劣化趋势往往是预测性维修的最佳依据，能在故障发生前提前预警。

作为法定依据：完整的运行记录是评估作战效能、分析事故原因、划分责任及进行装备寿命评估的法定技术依据。

3.5.5. 标准记录表格示例

表示例一：雷达系统运行日志（班次/每日）

此表用于记录雷达在运行期间的整体状态和任务概况，是最高频使用的记录。

表 3.3 运行日志记录

记录时间	操作人员	工作模式	发射机状态	天线状态	主控台状态	备注/特殊事件
YYYY-MM-DD HH:MM	张三	对空警戒（120nm）	高压 ON 功率： 125 kW 反射：< 0.5%	自动旋转 转速：6 rpm 伺服电 流：正常	BITE： 正常 跟踪目 标：12 批 虚警 率：低	接班检 查正常
YYYY-MM-DD HH:MM	张三	扇区跟踪（方位 045-090）	高压 ON 功率： 95 kW	扇区扫描 跟踪误 差：< 0.02°	跟踪稳 定	受命重 点监视 东北方 向
YYYY-MM-DD HH:MM	李四	系统待机	高压 OFF （冷却 运行 中）	停止（锁 定）	BITE： 通过	交班， 设备正 常

表示例二：雷达关键分系统状态参数记录表（巡检/故障时使用）

此表用于更详细地记录雷达各子系统的物理和电气参数，通常在定期巡检、性能测试或排除故障时使用。

表 3.4 故障记录

记录时间	记录点位/ 分系统	参数名称	标准 值/范 围	实测 值	单 位	记 录 人	备 注
YYYY-MM-DD HH:MM	发射 机	输出峰值 功率	120 ±5 kW	118.5	kW	王 五	仪表读 数
YYYY-MM-DD HH:MM	发射 机	发射管壳 体温度	≤ 65 ℃	58	℃	王 五	红外测 温仪测 量
YYYY-MM-DD HH:MM	接收 机	系统噪声 系数	≤ 3.0 dB	2.7	dB	王 五	使用噪 声源测 试
YYYY-MM-DD HH:MM	冷却 系统	液冷进口 温度	20 - 30 ℃	25	℃	王 五	
YYYY-MM-DD HH:MM	冷却 系统	液冷出口 温度	≤ 50 ℃	42	℃	王 五	温差正 常
YYYY-MM-DD HH:MM	伺服 系统	方位驱动 电机电流 (空载)	5 - 8 A	7.2	A	王 五	

4. 维护保养



图4. 3船舰雷达的维修保养

4.1. 运行时的维护保养



图4. 4舰船雷达运行时维修保养

舰船雷达作为关键的导航、监视与作战传感器，其运行期间的维护保养（OperationalMaintenance）对保障设备可靠性、延长使用寿命、确保战备/航行安全至关重要。以下从日常巡检、运行中保养、环境管理、记录要求及注意事项等方面系统阐述舰船雷达在运行状态下的维护保养措施。

4.1.1. 运行期间的维护保养

表 4. 1 维护保养

检查项目	检查内容	标准/异常判断
天线旋转状态	是否匀速、无卡顿、异响	转速稳定（如 24/48rpm），无抖动或停转
天线罩外观	是否清洁、无裂纹、无冰雪/盐垢堆积	表面透明无遮挡，密封良好

检查项目	检查内容	标准/异常判断
显示器图像	回波清晰度、噪声水平、目标显示完整性	无大面积雪花、条纹、闪烁或丢失目标
控制面板	按键、旋钮、触摸响应是否正常	无失灵、卡滞
散热系统	收发机/电源模块风扇是否运转	无过热告警，出风口无堵塞
告警信息	是否有 “TXFault”、“AntennaError”、“LowPower”等提示	无红色/黄色故障指示

4.1.2. 运行中的主动保养措施

4.1.2.1. 参数优化与负荷管理

- 避免长时间高功率满量程运行（尤其在港内或锚地）。
- 在能见度良好、交通稀疏水域，可切换至低功率模式（HarborMode 或 EcoMode）。
- 定期切换量程（如 3NM↔12NM），防止磁控管长期工作于单一频率导致老化不均。

4.1.2.2. 清洁与防污

天线罩清洁：

使用软布+淡水擦拭，**严禁使用汽油、丙酮等有机溶剂。**

盐雾严重区域，建议每周冲洗一次（断电状态下）。

显示器屏幕：用防静电布清洁，避免划伤。

通风口滤网：每月检查并清除灰尘、虫网（防止过热）。

4.1.2.3. 机械部件润滑（按周期）

天线旋转轴承、齿轮箱需按厂家手册定期加注**耐高低温润滑脂**（如 MobilSHC 或 ShellGadus）。

润滑周期通常为**6个月至1年**，恶劣海况下缩短周期。

操作：停机状态下进行，避免油脂污染电机或编码器。

4.1.3. 环境适应性维护

表 4.2 环境适应性维护

环境因素	影响	应对措施
高湿/盐雾	电路腐蚀、接插件氧化	保持舱内除湿（相对湿度<70%），定期检查接头密封胶
高温	元器件加速老化、散热不良	确保空调/通风有效，避免阳光直射控制台
低温/结冰	天线冻结、润滑油凝固	启动前预热（部分雷达具自动加热功能），人工除冰（断电后）
强振动	接线松动、结构疲劳	定期紧固底座螺栓、电缆夹，检查减震垫

4.1.4. 电子系统运行维护要点

4.1.4.1. 磁控管寿命管理（适用于传统雷达）

记录累计发射时间（多数雷达内置计时器）。

典型寿命：5,000-8,000 小时，接近寿命末期时回波减弱、调谐困难。

防范措施：避免频繁开关机（每次启动冲击大），非必要不长期待机发射。

4.1.4.2. 软件与校准

定期执行方位校准（AzimuthAlignment）：利用已知岸标比对真实方位。

更新雷达软件/固件（需岸基支持，通常每 1-2 年一次）。

验证 ARPA/AIS 融合精度，防止目标错配。

4.2. 日常维护保养工作和计划

由值班轮机员和机工在每班次执行，是维护的基础。

表 4.3 舰船雷达日常维修计划表

类别	具体工作内容	检查标准/目的
1 运行监控	•持续监控集控室所有运行参数（排温、压力、温度、转速）。 •记录《轮机日志》，分析各缸参数平衡性。	及时发现异常趋势，避免小问题扩大。
2 巡回检查	•视觉：检查主机及系统有无跑、冒、滴、漏；排烟颜色；仪表指示。 •触觉/听觉：触摸管路/轴承温度与振动；监听运转有无异响。 •嗅觉：检查有无绝缘烧焦、油过热等异味。	通过感官发现自动化系统无法监测的早期故障。
3 液位与排放	•检查并补充燃油日用柜、滑油循环柜、气缸油箱、缸套水膨胀水箱液位。 •手动排放燃油、滑油滤器及空气系统的残水。	保证系统持续供给，防止水或杂质进入。
4 滤器维护	•根据压差指示，手动清洁或切换燃油、滑油自清滤器。	保证油品清洁度，保护精密部件。

4.3. 注意事项

舰船雷达作为高精密、高可靠性的关键电子装备，其维护保养直接关系到航行安全、避碰能力乃至作战效能。为确保设备长期稳定运行，延长使用寿命，必须严格遵守一系列**维护保养注意事项**。以下是系统性归纳的要点，适用于各类舰载或船用导航/监视雷达（如 X/S 波段、磁控管或固态体制）。

4.3.1. 通用安全注意事项

断电操作原则

所有涉及打开机箱、清洁天线内部、插拔电缆等操作，必须先切断主电源和备用电源，并执行“挂牌上锁”（LOTO）程序。

即使设备显示“关机”，内部高压电容仍可能带电，需等待 5 - 10 分钟放电后再作业。

微波辐射防护

雷达发射时，严禁人员靠近天线辐射区域（尤其正前方扇区）。

天线基座应设置醒目的高压微波警告标识。

维修前务必确认发射机处于“TX OFF”状态，并使用辐射检测仪验证。

防静电措施

接触电路板、模块前佩戴防静电手环，工作台铺设防静电台垫。

禁止在干燥环境下用化纤布擦拭电子部件。

4.3.2. 收发机与电子单元保养注意事项

散热管理

确保通风口、风扇、散热片无灰尘堵塞，环境温度不超过 40℃。

舱内应配备温湿度监控，相对湿度建议控制在 30% - 70%。

磁控管特别注意（传统雷达）

避免频繁开关机：每次启动产生高压冲击，加速老化。

累计工作时间接近寿命（通常 5000 - 8000 小时）时，应提前备件。

若出现“调谐困难”“回波变弱”，可能是磁控管衰减，需专业检测。

固态雷达优势与注意

虽无磁控管，但 GaN 功放模块对过压、过热敏感，仍需良好散热。

软件升级需由授权人员操作，防止版本不兼容导致死机。

5. 常见故障及排除方法

5.1. 雷达无响应

可能原因：电源问题、电缆松动或损坏

排除方法：先检查电源连接是否正常，查看是否存在断路或短路；用万用表检测雷达电源电路；确保所有连接牢固。

5.2. 显示屏花屏/显示异常

可能原因：显示部件故障、连接线问题

排除方法：参考文档[2]提到的"船舶雷达主机显示屏花屏故障维修方法"，检查显示部件是否正常工作，可能需要更换显示模块。

5.3. 图像模糊或失真

可能原因：天线、发射机或接收机问题

排除方法：这种情况通常需要专业维修，检查雷达各部件是否正常工作，必要时请专业技术人员处理。

5.4. 信号丢失

可能原因：线路连接不良

排除方法：检查插头与线路连接是否牢固；用万用表检测雷达信号波形是否正常。

5.5. 误报/虚警

可能原因：传感器表面被污垢、水渍等遮挡

排除方法：清洁传感器表面，去除污垢和异物；检查传感器是否有划痕或损坏，必要时更换。

5.6. 探测距离不准确

可能原因：雷达传感器校准出现偏差

排除方法：使用专业诊断设备重新校准；参考文档[7]中的 PM 测试，检查雷达性能是否正常。

5.7. PM 测试失败

可能原因：

内心弧衰减过大

发射单元衰减超过标准范围（如 JRC-JMA-9110 型号雷达要求-6.9dB 到 +2.0dB 之间）

接收单元衰减超过标准范围（如 JRC-JMA-9110 型号雷达要求-2.9dB 到 +3.5dB 之间）

磁控管工作时间过长（如 JRC-JMA-9110 型号雷达磁控管最大工作时间为 4000 小时）

排除方法：检查磁控管使用时间；进行雷达 PM 测试，通过测试结果判断具体故障；必要时更换磁控管或相关部件。

5.8. 预防性维护建议

日常维护：

使用柔软的湿布定期擦拭雷达表面
检查所有电缆和连接是否紧固，没有破损或松动
每次使用后检查雷达运行状态

定期检查：

检查天线、发射机、接收机等关键部件
保持雷达软件和固件更新
确保电源和接地良好

专业检测：

定期进行雷达 PM 测试
通过雷达性能监视器直观了解整体性能下降情况

6. 安装与调试

6.1. 安装方法及程序

一、设备检查与适配

检查设备完整性：确保雷达各部件完好无损，配件齐全；
船舶适配性确认：选择与船舶类型、大小相适配的雷达型号；
电磁兼容性检查：避免与其他船舶设备产生电磁干扰；
电源准备：确保使用专用电源，避免使用普通插座。

二、安装位置选择

最佳位置：雷达天线应安装在船舶的最高点，远离其他金属障碍物；
避免干扰：确保雷达波发射和接收不受干扰；
维护便利：考虑天线的维护和更换方便性。

三、安装步骤详解

(1) 天线固定

使用专用支架将雷达固定在安装平台上；
保证天线牢固固定在船体上，确保在船舶摇晃时仍能保持稳定；

使用螺丝钉或抱箍将雷达安装到合适位置，并拧紧支架上的螺钉。

（2）电源与信号连接

电源连接：按照电路图正确连接电源线，注意极性不可反接；

信号连接：连接雷达控制信号线，如[8]中提到的“通过控制信号线连接雷达与摄像机 RS485 接口 A、B 端”。

（3）接地处理

使用接地线将雷达外壳与船体连接，防止静电干扰；

确保接地良好，避免触电风险。

6.2. 调试方法与步骤

6.2.1. 初步调试

通电检查：接通电源后，先进行初步调试，检查雷达的启动和运行状态；

参数调整：根据船舶航行环境 and 需求，调整雷达的扫描范围、扫描速度、灵敏度等参数；

干扰抑制：注意抑制海浪、雨雪等自然干扰，以及船舶自身干扰。

6.2.2. 精细调试

安装高度与角度设置：如[8]中所示，根据安装高度和抓拍方向确定雷达俯仰角度

方向对准：左右轻微旋转底部支架调整雷达方向，使顶部瞄准器对准检测车道中心

参数配置：通过上位机软件设置雷达主要参数，包括安装高度、安装角度、抓拍方向、抓拍距离等

6.2.3. 测试验证

空载测试：在无目标环境下，检查雷达是否正常工作；

负载测试：模拟实际航行场景，测试雷达在复杂环境下的性能；

记录数据：将调试参数及测试结果记录存档，便于后续维护。

6.3. 安装调式注意事项

6.3.1. 信号不稳定或消失

可能原因：天线连接松动、电源不稳定、受到干扰；

排除方法：检查天线连接是否正常，雷达电源是否稳定，雷达是否受到干扰。

6.3.2. 图像模糊

可能原因：雷达波束宽度过大或过小、显示器故障；

排除方法：调整波束宽度，或检查显示器是否出现故障。

6.3.3. 杂波或干扰

可能原因：周围有干扰源，如其他雷达、无线电；

排除方法：检查雷达周围是否有干扰源，采取相应的干扰抑制措施。

7. 安全保护措施及故障处理

7.1. 保护措施及注意事项

7.1.1. 电磁防护措施（战时）

隐蔽使用：平时把主要雷达隐蔽起来，只在战时使用，尽量缩短开机时间；

信号伪装：采用不易被敌方侦察接收机识别的伪噪声信号，包括脉冲调频信号、脉内伪随机编码信号等；

低截获概率技术：降低敌方侦察接收机的作用距离与我方雷达作用距离的比值，使敌方在雷达探测范围内无法截获信号（如荷兰 PILOT 导航雷达）；

频率捷变：采用随机快速跳频，干扰机难以实施侦察和跟踪干扰；

双基地工作：雷达发射和接收基地分设两处，使敌方侦察接收机只能截获发射信号，无法干扰接收站。

7.1.2. 物理防护设计

材料选择：合理选择材料，增强雷达在恶劣环境中的适应性；

结构设计：采用合理的结构形式，提高设备抗冲击能力；

表面处理：正确使用表面处理工艺，防潮、防霉、防盐雾；

密封与遮蔽：巧妙利用密封、遮蔽技术，保护内部电路；

电路防护：强化对电路和电接触点的防护，减少故障率。

7.1.3. 日常预防性保护

定期维护：用柔软湿布定期擦拭雷达表面，保持清洁；

检查连接：确保所有电缆和连接紧固，没有破损或松动；

电源检查：确保雷达电源和接地良好，避免安全隐患；

软件更新：保持雷达软件和固件最新，获得最佳性能和安全性；

电磁兼容：合理分配频率、统筹天线布局，减少雷达间和雷达与其他电子设备的相互干扰。

7.2.故障及处理程序和方法

7.2.1. 故障诊断方法

观察法：检查显示屏是否有异常图像、杂波、亮点等；

故障代码分析：读取雷达自诊断系统故障代码，定位故障部位；

仪器检测：使用万用表检测雷达电源电路、信号电路等；

专家系统：借助专业诊断软件或专家系统进行故障定位。

7.2.2. 常见故障处理案例

7.2.2.1. 案例一：显示器图像抖动

现象：开机正常，长时间工作后图像开始抖动；

原因：显示器高压包老化导致工作电压不稳定；

处理：更换同型号高压包（如 H7EPRD0018B），清洁高压触点；

预防：定期检查高压部件，超过使用年限及时更换。

7.2.2.2. 案例二：磁控管故障

现象：雷达只能使用宽脉冲档，短脉冲档时图像乱跳；

原因：磁控管内部打火，磁控管电流及调谐指示不稳定；

处理：更换同型号磁控管；

预防：磁控管寿命通常 2~3 万小时，使用超过期限时需提前更换备件。

7.2.2.3. 案例三：GPS 信号不稳定

现象：GPS 信号经常在雷达上突然消失；

原因：GPS 输出到雷达的信号线接线松动；

处理：检查并紧固信号线接头，必要时更换扩流器；

预防：定期检查 GPS 信号分配器连接情况。

7.2.3. 故障处理流程

故障定位：通过观察、检测、代码分析等方法确定故障点；

备件准备：根据故障类型准备相应备件；

故障修复：进行针对性维修，如更换部件、调整参数等；

系统测试：修复后进行系统联调与测试；

记录存档：详细记录故障原因、处理方法和结果。