

引用格式: 梁泽勇, 邝建荣, 党彤, 等. 海上换流站无线通信系统设计 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 88-101. LIANG Zeyong, KUANG Jianrong, DANG Tong, et al. Design of wireless communication system for offshore converter station [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 88-101. DOI: 10.16516/j.cec.2024.4.09.

海上换流站无线通信系统设计

梁泽勇^{1,✉}, 邝建荣², 党彤¹, 陈艺¹

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;
2. 中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 针对海上换流站的特点, 提出海上换流站无线通信系统设计方案。[方法] 通过分析海上无线通信技术的特点以及目前的应用情况, 结合海上换流站在设备运行、厂站警戒、人员活动等方面的需求, 提出海上换流站无线通信系统的配置方案。[结果] 通过 NAVTEX 系统, 实现了接收天气和安全信息的需求。通过雷达光电系统和 VHF 对船通信系统, 实现了船舶入侵驱离的需求。通过 UHF 集群对讲系统、WiFi 和移动通信系统, 实现了人员日常通信的需求。通过救生艇应急通信系统、微波通信系统和卫星通信系统, 实现了人员紧急避险的需求。[结论] 研究的系统实现了海上换流站日常运维过程中基本的通信需求, 确保设备和人员的安全, 为海上换流站无线通信系统设计提供指导。

关键词: 海上换流站; 通信技术特点; 通信需求; 无线通信系统; 配置方案

中图分类号: TK89; TN914; TM732 文献标志码: A 文章编号: 2095-8676(2024)04-0088-14

DOI: 10.16516/j.cec.2024.4.09

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Design of Wireless Communication System for Offshore Converter Station

LIANG Zeyong^{1,✉}, KUANG Jianrong², DANG Tong¹, CHEN Yi¹

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;
2. Guangzhou Bureau, CSG EHV Transmission Company, Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] Aiming at the characteristics of offshore converter stations, the design scheme for wireless communication system of offshore converter station is proposed. [Method] By analyzing the characteristics and current application of offshore wireless communication technology and considering the requirements of equipment operation, station warning and personnel activities of offshore converter stations, the configuration scheme for the wireless communication system of offshore converter stations was proposed. [Result] Through the NAVTEX system, the requirement to receive weather and safety information is realized. Through the radar optoelectronic system and VHF ship to ship communication system, the requirement for vessel caution and expulsion is realized. Through UHF cluster intercom system, WiFi and mobile communication system, the daily communication requirement of personnel is realized. Through the lifeboat emergency communication system, microwave transmission system and satellite communication system, the requirement of personnel emergency avoidance is realized. [Conclusion] Therefore, the system can realize the basic communication requirements during the daily operation and maintenance of offshore converter stations, ensure the safety of equipment and personnel, and provide guidance for the design of wireless communication systems for offshore converter stations.

Key words: offshore converter station; characteristics of communication technology; communication requirements; wireless communication system; configuration scheme

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-07-24 修回日期: 2023-09-22

基金项目: 中国能建广东院科技项目“分布式海上风电场柔性直流输电关键设备的研制”(ER10451W)

0 引言

随着风机制造水平的不断提升, 机组更新换代的速度加快^[1], 大容量的海上风电机型陆续实现商业化运行^[2]。近期, 我国已下线 16 MW 和 18 MW 功率的海上风电机组, 单个风电场的装机容量随之提高。漂浮式风机采用漂浮式基础^[3], 为风电场从近海向深远海发展提供了可靠的技术手段。2021 年, 我国成功下线全球首台抗台风型漂浮式海上风电机组, 意味着我国在深远海风电技术引领全球^[4]。风电场规模的扩大和离岸距离的增加, 使得海上风电直流送出比交流送出具有更高的经济性^[5]。

海上风电通信存在以下特点: (1) 工作环境恶劣, 盐雾腐蚀严重, 对可靠性要求高^[6-7]; (2) 涉及海事、无线电、民航、航道、渔政等多专业规范; (3) 通信、自动化、指挥、调度、定位、导航、救援、安防等内容丰富^[8]; (4) 海陆空三维一体化大范围通信; (5) 贯穿施工、运行、维护等整个建设运维过程^[9]。

因此, 需要结合海上换流站不同场景下对通信的需求, 设计适用于海上换流站的无线通信系统, 最大化满足系统安全可靠运行和日常运维巡检需要。

1 海上无线通信技术现状及应用

1.1 常用海上无线通信技术

随着科技手段的革新, 海上通信从最早期的灯光通信、手旗通信, 发展到采用摩尔斯编码的模拟信号通信^[10], 直至 19 世纪末电磁波的发现, 海上无线通信技术完成了数字化革新^[11], 结合无线电波“波长

越长, 传输距离越远”的特点, 适用于不同场景的多种现代化海上无线通信方式应运而生, 如图 1 所示。

本节对目前常用的海上无线通信技术进行简单的整理、对比以及性能评估。根据不同的业务类型将海上无线通信技术分为: (1) 适用于海上导航和信息广播业务的自动识别系统和奈伏泰斯(NAVTEX)系统; (2) 适用于海上呼叫和应急救援业务的 VHF 船用通信系统、UHF 集群对讲系统和船舶搜救应答系统; (3) 适用于海上音视频流业务的 WiFi、移动通信系统、卫星通信系统和微波系统。上述常用海上无线通信技术及参数如表 1 所示。

1.1.1 适用于海上导航和信息广播业务的技术

自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)可以实时获取船舶的静态信息和动态信息, 并能在电子海图上进行可视化展示, 采用自控时分多址联接(SOTDMA)技术在规定的 VHF 频道上实现通信, 使其区域内任何船舶可自行互不干扰地发送和接收信息。将 AIS 技术应用在船舶避碰^[12]、船舶位置报告^[13]、港口船舶调度^[14]等方面可有效提高船舶通航效率和通航安全。

NAVTEX 系统是为船舶提供气象信息、航行警告和其他告警信息的海上安全信息发布专用广播系统, 采用窄带打印字电报(NBDP)方式实现通信, 终端设备可在 300~400 nmile 范围内自动接收陆上发射台发出的各类海上安全信息^[15]。利用智能化手段优化 NAVTEX 系统应用功能^[16], 可增强海上安全信息的实效性和针对性。

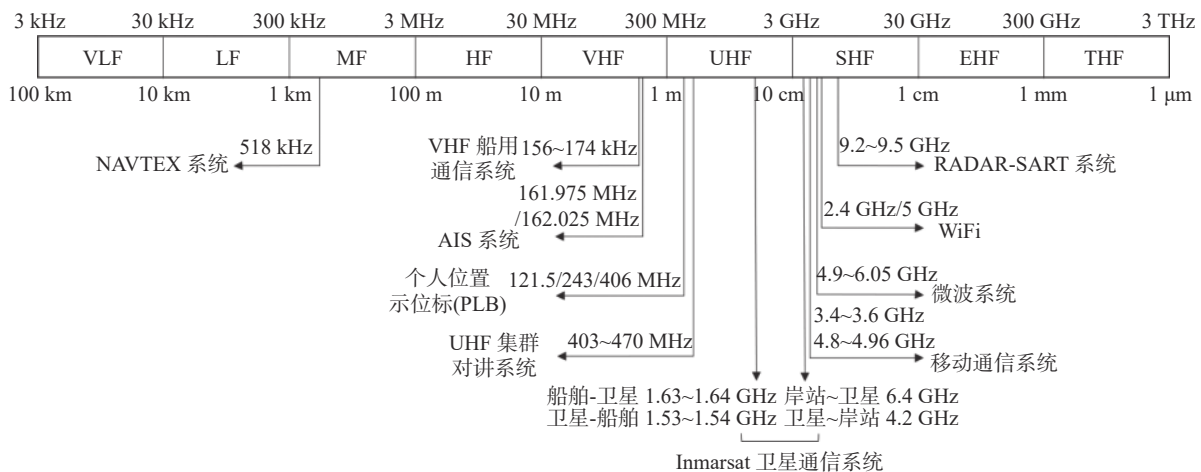


图 1 海上无线通信频谱划分

Fig. 1 Division of maritime wireless communication spectrum

表 1 常用海上无线通信技术及参数
Tab. 1 Common maritime wireless communication technologies and parameters

通信技术	频段	速率	距离
AIS	VHF	9.6 kbit/s	18.5~37 km
NAVTEX	MF/HF	100 bit/s	370 km
VHF	VHF	1.2~19.2 kbit/s	50~100 km
UHF	UHF	1.2~19.2 kbit/s	50~100 km (室外) 1.5 km (室内)
SART	VHF/SHF	9.6 kbit/s (AIS)	15~20 km (AIS) 10~15 km (RADAR)
WiFi	UHF/SHF	300 Mbit/s (2.4G) 433 M~1 Gbit (5G)	100~200 m
移动通信	SHF	100 Mbit/s (4G) 10 Gbit/s (5G)	10~30 km (4G) 1~3 km (5G)
卫星通信	UHF/SHF	8 Mbit/s	全球
微波通信	SHF	5~300 Mbit/s	20~50 km

1.1.2 适用于海上呼叫和应急救援业务的技术

VHF 船用通信系统是船舶与岸站之间(A1 海区, 30 nmile)、船舶与船舶之间及海上现场搜救常用的通信系统,目前在 156~174 MHz 频段上划分出 57 个频道,其中如 CH16 频道用于 VHF-TEL 通信、CH70 频道用于 VHF-DSC 呼叫等。该系统具有天线设备尺寸小、抗干扰能力强的优点,但也存在通信范围受限、频带利用率低、传输速率低等的缺点^[17]。虽然目前大部分渔业船舶未有效值守 CH16 频道^[18],但随着提高设备质量、完善相关法律法规、切实落实监管机制等一系列措施的实施,VHF 船用通信系统仍是一种有效的与船舶建立通信的技术手段。

相较于 VHF 频段,UHF 频段频率更高,虽然通信距离较短,但其穿透能力更强。因此,在城市或相对狭窄的空间,集群对讲系统一般采用 UHF 频段,已广泛应用于工业制造^[19-21]、安保巡逻、消防救援^[22]、旅游观光、娱乐活动等需要实时交流和协调的各类场景,也普遍应用于大型船舶和海上平台中。

搜救雷达应答器(Search And Rescue Radar Transponder, SART)是引导搜救队伍定位遇险者的设备,是一种被动触发式的信号发生器,目前分为 RADAR-SART 和 AIS-SART 两类。其中,RADAR-SART 在 9 GHz 搜救雷达脉冲下产生应答信号,可在雷达显示屏上显示相对方位和距离,工作频率为 9.2~9.5 GHz^[23]。随着 AIS 技术的发展和普及,AIS-SART 也得到有效推广^[24],与 RADAR-SART 相比,

具有自动激活、定位准确、作用距离远等特点^[25]。随着更多基于 AIS 技术的搜救系统的研究和开发^[26-28],相信 AIS-SART 会得到更广泛的应用。

1.1.3 适用于海上音视频流业务的技术

卫星通信是利用近地卫星实现远距离通信的手段之一,具有通信容量大、海陆空全覆盖、组网方式灵活高效、通信质量高等优点,但也存在传输延时大、高纬度地区难以覆盖的缺点。随着卫星通信技术的研究改进和北斗系统的不断完善,卫星通信在面向娱乐消费、环境探测及系统监视、环境监测及系统监控等方面能够得到全方位的应用^[29-31]。国际海事卫星通信系统(Inmarsat)是由地球站、卫星站和终端设备组成,可提供语音、传真、数据、视频、手机短信等多种通信服务,满足海陆间日常和安全通信需求,但费用较为昂贵。

微波通信是一种可以传递电话、数据、电视等大容量信息的通信手段,具有高精度高速率、低延迟抗干扰、直线传播遇阻反射、超出视距需中继转发的特点。结合动态组网^[32]、搭建网桥^[33]、优化网络拓扑^[34]、阵列天线^[35]等技术手段,能将海陆之间实现高质量、高效率通信变为现实。

WiFi 和移动通信由于采用的频率较高,有效传输距离较短,依赖于访问接入点(Access Point, AP)和基站进行传输,因此不适合直接用于海陆通信。得益于 WiFi 和移动通信技术广泛应用于人们的日常生活之中,将这两种通信技术结合实际需要利用混合组网^[36]、智能组网^[37]、系统整合^[38]等手段应用到海上不同的业务场景,使得海上生活更加便捷、工作更加高效。

1.2 无线通信技术在船舶的应用

由国际海事组织(IMO)提出的全球海上遇险与安全系统(GMDSS)主要由卫星通信系统、海陆通信系统、定位搜救系统、安全信息广播系统等 4 大分系统组成,要求 300 t 以上客货船通信设备最低配额如表 2 所示。

国内沿海航行船舶可参照《国内航行海船法定检验技术规则》配置通信设备,如表 3 所示。另外,随着北斗系统的不断完善,配合用于相关服务的通信设备也提出了配置的要求,如《海洋渔政船通信设备配备规范(试行)》,要求渔政船配置船载北斗终端、北斗服务通信系统、北斗移动监控指挥系统等。

表2 GMDSS对通信设备配置的最低要求

Tab. 2 Minimum requirements for communication equipment configuration in GMDSS

通信系统	配置设备名称	船舶航行海区			
		A1	A2	A3	A4
卫星通信	Inmarsat设备	—	—	2	—
	VHF-DSC设备	1	1	1	1
海陆通信	MF无线电装置	—	1	1	—
	MF/HF无线电装置	—	—	1	1
定位搜救	双向VHF无线对讲机	3	3	3	3
	EPIRB	1	1	1	1
	SART	2	2	2	2
安全信息广播	NAVTEX接收机	1	1	1	1

注: A1海区是指至少有1个VHF岸台覆盖,可实现连续VHF-DSC报警、从VHF岸台向海上延伸30 nmile的区域; A2海区是指至少有1个MF岸台覆盖,可实现连续MF-DSC报警、离岸150 nmile但不含A1海区的区域; A3海区是指纬度70°以内不含A1、A2海区的区域; A4海区是指除A1、A2、A3海区外的区域。

表3 国内航行船舶通信设备配置的最低要求

Tab. 3 Minimum requirements for communication equipment configuration on domestic navigation vessels

配置设备名称	船舶航行海区	
	A1	A1以外海区
VHF-DSC设备	1	1
MF/HF无线电装置	1	1
双向VHF无线对讲机	2	2
EPIRB	1	1
SART	2	2
NAVTEX接收机	1	1

由此可见,用于搜救和接收安全信息的通信设备必须配置;海陆间的通信设备应根据航行区域的离岸距离进行配置。

MF/HF/VHF无线电通信主要用于呼救和救援,且受限于速率,只能满足有限的音频业务;对于数据流的业务,虽然微波通信可采用自动跟踪技术^[39]消除直线传播的缺点,但由于海上无法大规模建设微波中继站,无法实现超远距离传输,故数据流业务主要采用卫星通信,但卫星通信资费较高,无法满足日常生活使用。

因此,无线通信技术在船舶的应用仍停留在满足海上导航和广播、海上呼叫和应急等海上航行的基本需求,无法满足数据流业务的应用。

2 海上换流站通信需求

海上直流输电系统主要由海上风电场、海上升压站、陆上换流站(集控中心)和海缆组成,如图2所示。结合换流站运行特点、海上环境的特殊性以及人员生活的考虑,对海上换流站通信系统提出相应的需求,如图3所示。

2.1 设备运行需求

直流系统的正常可靠运行依赖于直流控制保护系统,对站间通信的要求很高^[40],虽然站间通信故障情况下直流系统仍能继续运行,但由于站间无法实现协调控制,系统发生故障时可能无法及时切除故障^[41]。对于海上风电工程更为重要,由于风机侧属于弱系统,且风机无法实现瞬时快速调节功率,若直流系统因站间通信故障而延迟闭锁,可能会对换流阀、换流变等重要电气设备造成损坏,因此,直流控制保护系统要求站间(即海陆之间)建立高可靠性的通信通道。

随着智能运维技术的不断革新,海上油气工程和海上风电工程正逐步实现无人化^[42-44]。海上换流站可借鉴海上升压站和陆上换流站的经验,采用各种先进的信息化、可视化、智能化手段对海上换流站和风电场实现全方位、多维度、深层次的实时监控,这就需要将大量数据信息从海上换流站传输至陆上,如直流SCADA系统、视频监控系統、智能巡检系统等业务。这些业务即使海陆间通信故障,也不会对电气设备造成损坏^[45]。因此,海上换流站辅助系统要求海陆间需建立大容量、高速率的通信通道。

2.2 厂站警戒需求

海上环境复杂多变,海上换流站和风电场的选址也逐步走向深远海,虽然海上恶劣天气出现的概率较低,但造成的影响可能会非常严重^[46]。因此,有效获取准确的气象信息和其他海上安全信息,提前做好应对恶劣环境的应急预案和防范措施,对设备和人员的安全起到至关重要的作用。

虽然海上换流站、风电场和海缆在选址时已对航道进行避让,并且将它们及时反映到海图上,但始终无法在四周建立有形的围蔽隔离设施。因此,需对它们建立无形的电子围栏,加强对风电场附近海域的监视,清晰准确地识别闯入的船舶,并能及时对其进行提醒和制止,从而有效保障风电场和船舶的安全。

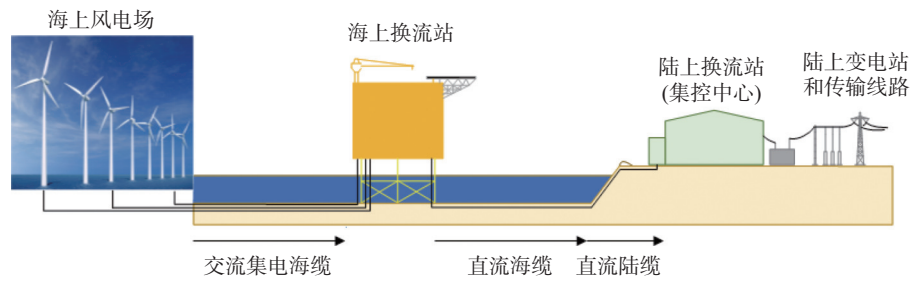


图 2 海上直流输电系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of offshore DC electric power transmission

业务类别	设备运行		厂站警戒		人员活动		
业务需求	直流控保	辅助系统	天气监控	入侵距离	工作	生活	紧急避险
需求特点	高可靠性	大容量/高速率	可靠	大范围	全覆盖	高速率	可靠
通信技术	光纤		NAVTEX	雷达光电/VHF	UHF/WiFi/移动通信	光纤	SART/卫星通信

图 3 海上换流站通信需求和技术概览

Fig. 3 Overview of communication requirements and technologies for offshore converter stations

2.3 人员活动需求

在海上风电场建设阶段和维护检修期间,大量人员在海上换流站上工作;此外,海上换流站投运初期一般采用少人值守的运行管理方式,因此海上换流站平台内需实现多种通信方式,以满足设备调试检修的需要。同时还应能满足海上休闲娱乐的需要,以改善人员在海上的生活质量。

救生设施作为海上人员生命安全保障的最后一道防线,应严格按照 SOLAS 公约及国际航行海船法定检验技术规则的要求进行配置。与之匹配,海上换流站应配置适用于人员海上紧急避险的通信设备。

3 海上换流站无线通信系统

3.1 无线通信系统设计思路

油气钻井平台的供电方式多种多样,平台的离岸距离对供电成本影响较大,因此部分近海油气钻井平台采用从陆地供电的模式,在钻井平台旁建设变电站平台,陆上电网经海缆向平台供电^[47],而用电负荷大、离岸较远的钻井平台采用陆上直流供电有较优的经济性^[48]。交直流海缆选用内置光缆的型式,变电站平台、油气钻井平台可通过光缆实现与陆上的信息交互,光纤通信具有可靠性高、传输距离远、

传输速率高、抗干扰能力强等优点。

海上直流输电工程可参考油气钻井平台的做法,联络海上换流站和陆上换流站的直流海缆选用内置光缆的型式,将光纤通信作为海陆间通信的主用方式。如上文所述,微波通信和卫星通信可实现大容量、较远距离的传输,因此将微波通信作为海陆间近距离通信的备用方式,将卫星通信作为海陆间远距离通信的备用方式。海上换流站内的 WiFi 网络、移动通信及其他无线通信系统通过光纤实现海陆间通信,实现外网访问和内部网络通信。

以某海上直流工程为例,海上换流站离岸约 70 km,无线通信业务需求如表 4 所示。其中,雷达光电系统和 UHF 集群对讲系统在海上换流站可单独成系统,当光纤通信失效时,海上换流站内这些业务的功能不受影响;而 WiFi 和移动通信系统属于外网访问,当光纤通信失效时海上换流站内这些业务的功能将无法使用。

下面,根据海上换流站的无线通信需求以及各种无线通信技术的特点,开展对海上换流站无线通信系统的设计。

3.2 海上换流站无线通信系统配置方案

海上换流站无线通信设备均应满足 SOLAS 公

表 4 海上换流站无线通信业务需求

Tab. 4 Wireless communication service requirements for offshore converter stations

无线通信业务	业务类型	光纤通信承载
NVATEX系统	常规业务	不需要
雷达光电系统	常规业务	需要
VHF对船通信系统	常规业务	不需要
UHF集群对讲系统	常规业务	需要
WiFi通信系统	常规业务	需要
移动通信系统	常规业务	需要
救生艇应急通信系统	应急业务	不需要
微波通信系统	应急业务	不需要
卫星通信系统	应急业务	不需要
直升机导航系统	常规业务	不需要
MF/HF无线通信系统	应急业务	不需要

约的要求,除具备抗盐雾、耐高温高湿、耐腐蚀等特点外,还应具备抗台风能力。

3.2.1 NAVTEX 系统

NAVTEX 系统接收天气和安全信息,主要由 NAVTEX 接收机和天线组成。由于国际 NAVTEX 系统以 518 kHz 为全球提供英文海上安全信息播报服务,而国家 NAVTEX 系统以 490 kHz 或 4.209 5 MHz 以当地语言提供海上安全信息,1986 年,我国正式应用 486 kHz 频段为我国东南部沿海提供中文安全信息服务^[1]。因此,选用可同时接收双通道的 NAVTEX 接收机,一个通道固定在 518 kHz 频段,另一个通道在 486 kHz、490 kHz、4.209 5 MHz 频段之间切换,NAVTEX 接收机安装在海上换流站控制室内。由于 NAVTEX 系统通信速率低,灵敏度要求为有用信号电平为-107 dBm 时,误码率<4%。因此,对增益的要求较低,故天线长度可选用 0.3~0.4 m,天线安装在海上换流站平台顶层。

3.2.2 雷达光电系统

针对船舶入侵驱离的需求,可通过 AIS 对船舶信息进行识别,但无法实现预警和取证等功能。为弥补 AIS 的不足,雷达光电系统主要由雷达、AIS 接收机和摄像机组成,如图 4 所示,系统划定禁入警戒区域,识别、跟踪并记录入侵船舶的行为和状态。其中,雷达可主动扫描和跟踪附近的船舶和渔船等目标,可见光和红外摄像机可日夜不间断地实时视频确认和取证。



图 4 雷达光电系统安装示意图

Fig. 4 Installation diagram of radar optoelectronic system

雷达的频率可选用 X 波段,具有天线波束窄、分辨率高、频带宽、抗干扰能力强的特点,信号采用脉冲调制方式,最高输出功率 20~25 kW,平均输出功率约为 300 W,天线长度约为 2.5 m,覆盖海域范围可超过 30 nmile。AIS 接收机采用 136~174 MHz 频段,灵敏度约为-110 dBm,功率约为 1.5 W,天线长度约为 1.2 m。配置 1 台可见光摄像机,200 万像素,具备连续变焦、高清透雾功能;一台红外摄像机,640×480 像素,具备调焦功能。

由于海上换流站一般设置在风电场中部,是风电场的制高点,因此可将雷达、AIS 接收机和摄像机等设备安装在海上换流站平台顶层,实现对风电场的入侵监视;同时可考虑在陆上换流站附近的山上或铁塔上设置雷达光电系统,实现对风电场附近海域的覆盖,降低风电场和海缆被人为破坏的风险。

3.2.3 VHF 对船通信系统

针对船舶入侵驱离的需求,除了能识别入侵行为,还应能实现与船舶的通信,对其进行警告或阻止。如图 5 所示,由于航行于所有海区的船舶均须配置 VHF-DSC 设备,中大型船舶的 VHF-DSC 和 VHF-TEL 还需分别设置独立的天线,因此海上换流站对

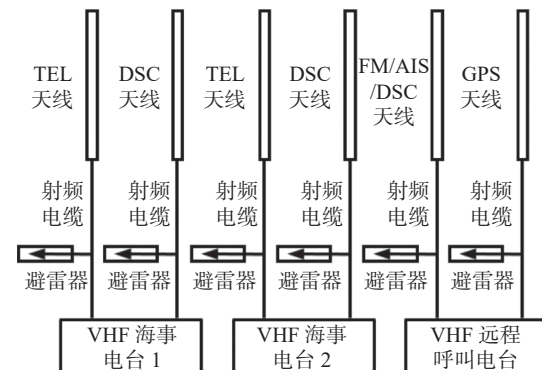


图 5 VHF 对船通信系统结构图

Fig. 5 Structure diagram of VHF ship to ship communication system

船通信系统选用 VHF 频段。

VHF 对船通信系统主要由 VHF 海事电台、控制单元、交换机、避雷器等组成。VHF 海事电台设置在海上换流站控制室内；为了实现以海上换流站平台为中心 360°全方位覆盖，在平台顶层的两个对角方向设置两组 VHF 天线。另外，考虑到海上换流站无人值班的需要，在陆上设置 VHF 远程呼叫电台，通过海缆将语音或数据信息传输到海上，实现陆上向船舶呼叫的功能。VHF 远程呼叫电台主要针对海缆所在海域航道上的船舶，因此这组天线向陆地方向安装。

VHF 对船通信系统频段为 156~174 MHz，参考《国内航行海船法定检验技术规则》对船台发射机额定功率不大于 25 W 的要求，选定额定功率为 25 W，天线长度约为 2 m。

3.2.4 UHF 集群对讲系统

UHF 集群对讲系统主要由中继台、双工器、耦合器、室内天线、避雷器、室外天线、对讲机及充电器等组成，如图 6 所示。其中，考虑到运维人员主要在控制室内指挥调度，在控制室内安装室内天线，以提高通话质量。对讲机按一个运行班组的人数配置，即每个换流站平台设置 6 台。中继台功率可选用 50 W，室外天线长度约为 2 m，以提供更稳定的通讯效果。



图 6 UHF 集群对讲系统组成示意图

Fig. 6 Schematic diagram of UHF cluster intercom system composition

考虑到海陆间的运维需要，以及多个风电场之间协作的需要，可以利用海缆/光缆将几个站点的 UHF 集群对讲系统连接起来，形成一个整体，实现跨区域的指挥调度，充分发挥陆上集控中心的调度作

用，如图 7 所示。

3.2.5 WiFi 和移动通信系统

WiFi 和移动通信均可用于海上换流站平台连接外网，但考虑到海上移动通信并非所有通信运营商都能实现区域覆盖，因此，海上换流站所有室内房间以及户外较为空旷区域实现 WiFi 通信，户外区域和人员经常活动的区域（如休息室、内走廊、电梯、控制室、继电器室等）实现移动通信，这样的方案更为合适。

WiFi 网络拓扑结构如图 8 所示。海上换流站 WiFi 系统通过海缆接入陆上的核心交换机，陆上换流站或陆上集控中心也接入到核心交换机，经防火墙和调制解调器后接入以太网。相邻的陆上集控中心可通过光缆连接起来实现数据交换，还可互相作为备用通道，提高以太网接入的可靠性。

此外，WiFi 网络可考虑采用 Mesh 组网方式，实现无线网络网格化，所有 AP 都可以互相通信，每个接点都可以动态充当其他节点的中继站，可有效提高信号覆盖率，降低丢包率^[49]。

换流站平台顶层设置 4G/5G 基站，主要由 AC/DC 模块、4G/5G BBU (Building Baseband Unit, 室内基带处理单元)、4G/5G RRU (Remote Radio Unit, 远端射频模块) 和 GPS 天线组成，天线长度约为 2 m。

3.2.6 救生艇应急通信系统

为满足应急逃生的需要，海上换流站应配置一定数量的救生艇。每艘救生艇上应配置 SART，如前文所述，AIS-SART 更优于 RADAR-SART，因此选择 AIS-SART。根据 GMDSS 和《国内航行海船法定检验技术规则》的要求，每艘救生艇需配置双向 VHF 无线对讲机。此外，全球卫星搜救系统 (COSPAS/SARSAT 系统) 具有反应迅速、准确可靠、使用方便等优点，广泛应用在遇险救助行动中^[50]，因此考虑在救生艇上配航海用紧急无线电示位标 (EPIRB) 和个人位置示位标 (PLB)。建议海上换流站救生艇应急通信系统按表 5 配置。此外，海上换流站还应配置人员落水定位信号接收设备。其中，EPIRB 输出功率应大于 0.1 W，PLB 输出功率为 5 W，AIS-SART 输出功率为 2 W，双向 VHF 无线对讲机输出功率为 5 W。

3.2.7 微波通信系统

微波通信系统主要由微波设备、天线、路由器

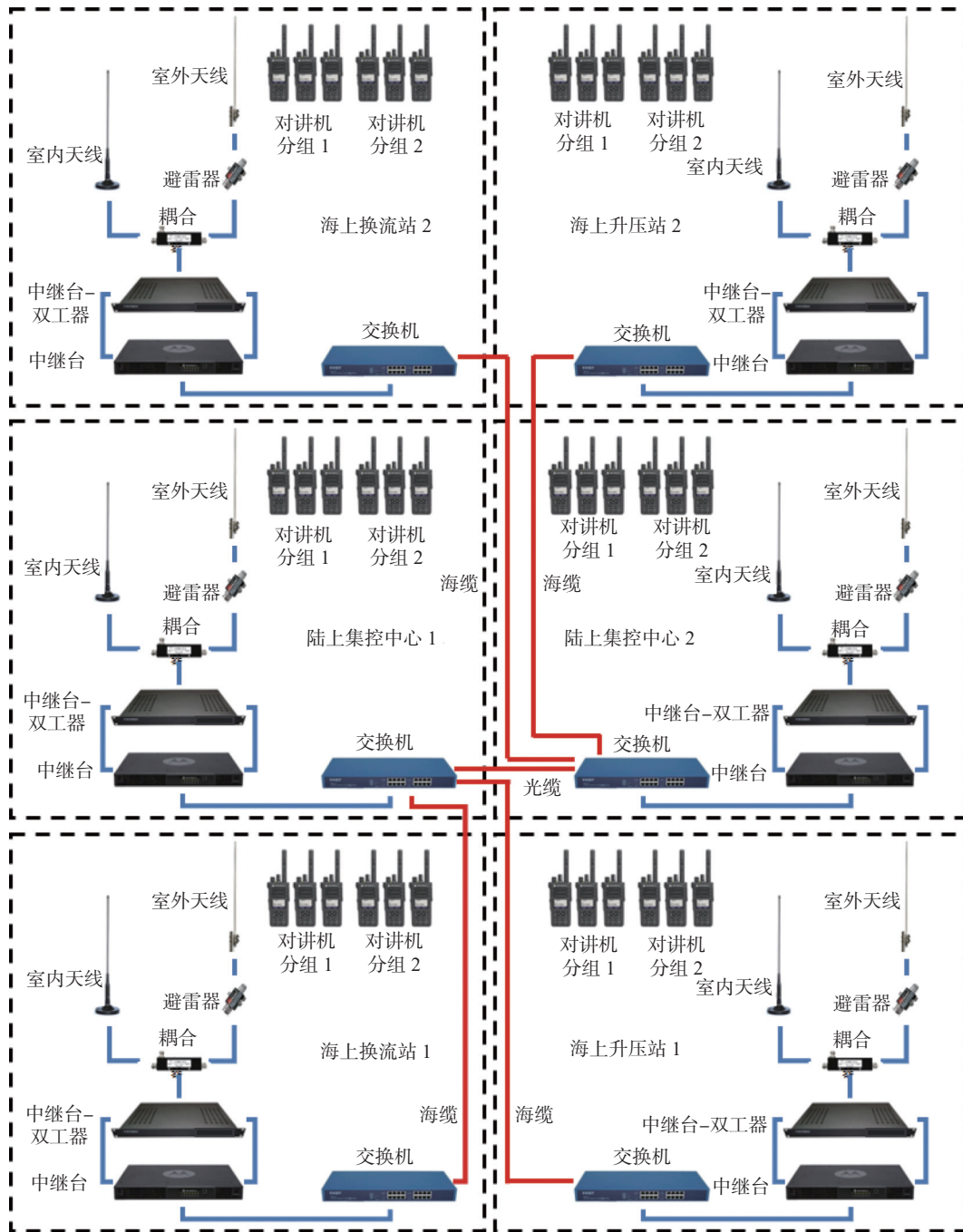


图 7 UHF 集群对讲系统组网示意图

Fig. 7 Schematic diagram of UHF cluster intercom system networking

和交换机组成。在海缆未敷设完成的情况下,微波通信可以作为前期的通信手段,可极大程度提前入场时间;并且在海缆出现问题时,作为备用的通信手段,保证海陆间通信的畅通。微波通信受气象影响的因素较大,考虑到风电场在沿海地区连片建设的情况,海上换流站除了应实现与陆地之间的微波通信外,可考虑建立与附近海上换流站或海上升压站

的微波通信,站间互为备用,可有效提高微波通信的可靠性。海上微波通信组网示意图如图 9 所示。

微波通信的增益控制在-60 dBm 左右,天线长度约为 0.9 m。微波天线可考虑采用微波天线阵列,由两个或多个天线组成 1 组天线,可提高整体增益,提高方向性,降低损耗,减少干扰。

当直流系统发生故障时,需及时切除故障以保

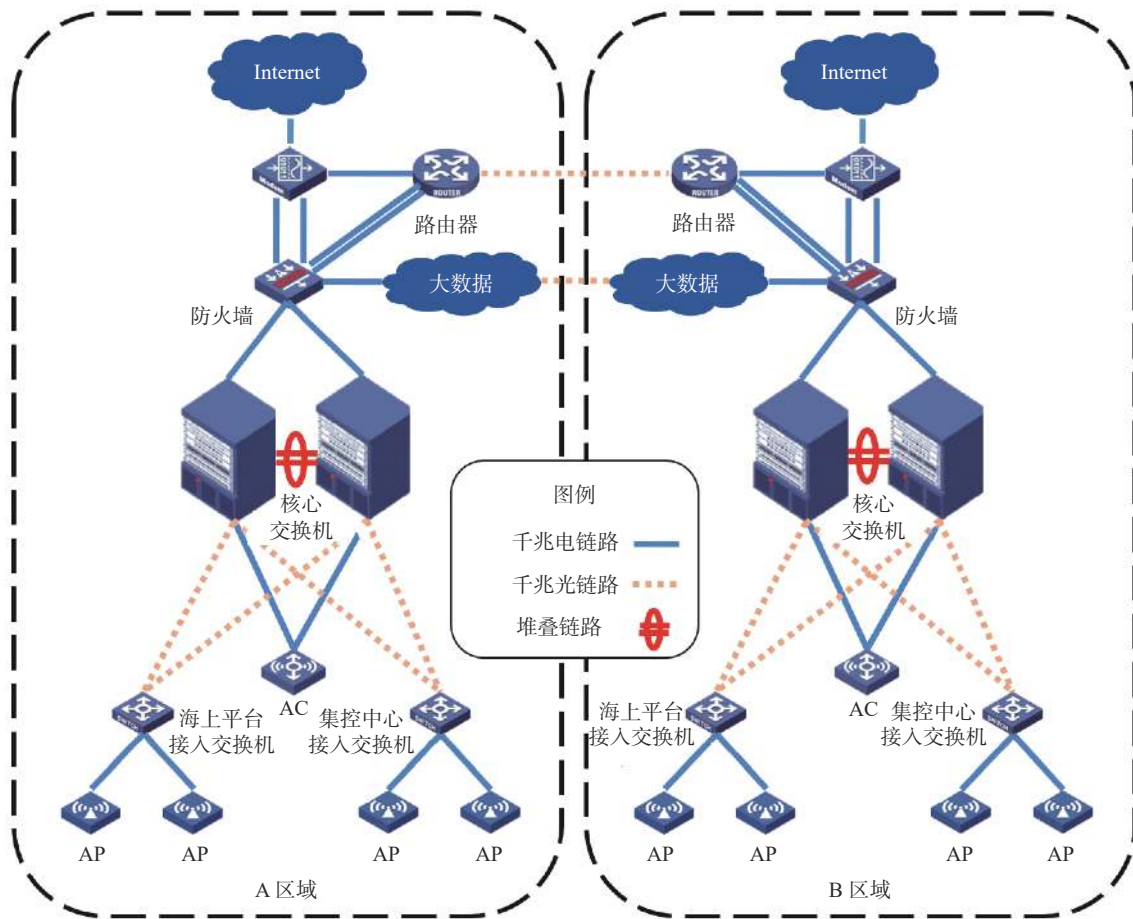


图 8 海上风电工程 WiFi 网络拓扑结构图

Fig. 8 Topological structure diagram of WiFi network in offshore wind power project

表 5 救生艇应急通信系统配置表

Tab. 5 Configuration table of emergency communication system for lifeboats

设备名称	单位	数量/艘
紧急无线电示位标(EPIRB)	套	2
个人位置示位标(PLB)	套	4
搜救雷达应答器(AIS-SART)	套	4
双向VHF无线对讲机	套	4

护换流变、换流阀等重要设备,因此直流保护对直流工程的安全运行起到至关重要的作用,可考虑当海陆间光纤通信失效时通过微波通信承载直流控制保护业务。直流控制保护系统接入光纤 SDH 传输设备的同时,通过网线接入到微波通信系统的交换机,建议采用三层交换机,可实现光纤通信和微波通信通道间的无缝切换,但需要统一规划网络配置。另外,考虑到信息安全的问题,可在海陆两端配置纵向

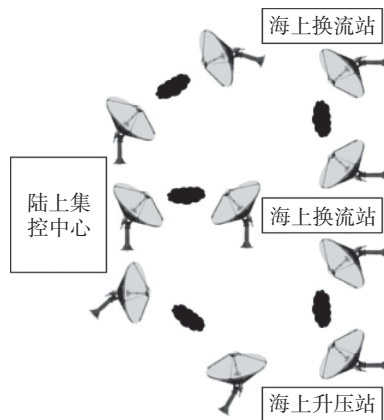


图 9 海上微波通信组网示意图

Fig. 9 Schematic diagram of offshore microwave transmission networking

加密装置。

3.2.8 卫星通信系统

卫星通信系统作为海上换流站海陆间通信的备

用方式,实现应急时海陆间语音通信即可,主要由海事卫星电话和天线组成。海事卫星电话有固定式和移动式两种,考虑到海上换流站平台为固定建筑物,选用固定式更为合适,即在平台顶层设置天线并引至室内固定卫星电话,安装时注意调整天线的方向和角度,以获得高质量的通信效果。海事卫星电话采用L波段,发射频率为1.63~1.66 GHz,接收频率为1.53~1.55 GHz,输出功率为3 W,天线长度为0.3~0.4 m。

3.2.9 其他

若海上换流站有直升机升降要求,应配置直升机导航系统,包括导航机主机、导航系统天线、天线调谐单元、对空高频电话和对空对讲电台等。其中直升机导航天线围绕直升机甲板安装,天线长度应不小于40 m;对空对讲电台工作频率为190~650 kHz,发射功率为500 W,有效作用距离不少于150 km;对空高频电话功率约为5 W,导航对讲天线长度约为2.4 m。

海上换流站无线通信系统中如NAVTEX系统、VHF对船通信系统、微波通信系统、卫星通信系统等关系到人员生命安全,但站内UPS系统无法长时间为这些系统供电,因此可考虑在海上换流站平台顶层设置1套太阳能供电系统。太阳能供电系统主要由光伏组件、蓄电池、控制器等组成,光伏组件安装在平台顶层夹板上,蓄电池和控制器可布置在下层房间中。无线通信系统需太阳能供电系统提供电源的负荷约为1 kW,控制器可按3 kW配置,考虑到光伏发电的同时率,光伏组件的容量可按3.5 kW配置,蓄电池按两组48 V 250 Ah配置,可满足不良天气情况下连续供电3 d的需要。

此外,随着海上风电工程逐渐向深远海发展,由于微波通信属于视距通信,离岸超过100 km且无法通过近岸平台进行微波中继的情况下,建议采用MF/HF无线通信系统,在控制室内设置MF/HF无线组合台,发射频率范围为1.6~30 MHz,接收频率范围为0.5~30 MHz,发射机功率可选用150 W,天线长度为0.3~0.4 m。

4 结论

本文通过分析海上无线通信技术现状及应用情况,结合海上换流站设备运行、厂站警戒和人员活动等3个方面对通信的需求,提出海上直流输电工程

海陆间通信以光纤通信作为主用方式、以微波通信作为近距离备用方式、以卫星通信作为远距离备用方式的设计思路。以此为依据,提出了适用于海上换流站的无线通信系统配置方案,为海上换流站无线通信系统设计提供指导。

本文的方案,实现了海上换流站日常运维过程中基本的通信需求,确保设备和人员的安全。随着智能化的需求不断提高,无线通信技术的革新,未来海上换流站的无线通信系统将会更加健全完善。

参考文献:

- [1] 姚钢,杨浩猛,周荔丹,等.大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J].*电力系统自动化*,2021,45(21):33-47. DOI: 10.7500/AEPS20210416003.
YAO G, YANG H M, ZHOU L D, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines [J]. *Automation of electric power systems*, 2021, 45(21): 33-47. DOI: 10.7500/AEPS20210416003.
- [2] 房方,梁栋炀,刘亚娟,等.海上风电智能控制与运维关键技术[J].*发电技术*,2022,43(2):175-185. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22042.
FANG F, LIANG D Y, LIU Y J, et al. Key technologies for intelligent control and operation and maintenance of offshore wind power [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(2): 175-185. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22042.
- [3] 宋兆波.大型漂浮式海上风机平台结构设计和动力特性研究[D].大连:大连理工大学,2022. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.001074.
SONG Z B. Structural design and dynamic characteristics of large floating platform for offshore wind turbine [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2022.001074.
- [4] 杜剑强,仲俊成,李斌,等.中国海上风电发展现状及展望[J].*油气与新能源*,2023,35(3):1-7. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.03.001.
DU J Q, ZHONG J C, LI B, et al. Current situation and outlook of China's offshore wind power [J]. *Petroleum and new energy*, 2023, 35(3): 1-7. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.03.001.
- [5] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].*中国电力*,2020,53(7):55-71. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202002108.
LIU W D, LI Q N, WANG X, et al. Application status and prospect of VSC-HVDC technology for large-scale offshore wind

- farms [J]. *Electric power*, 2020, 53(7): 55-71. DOI: [10.11930/j.issn.1004-9649.202002108](https://doi.org/10.11930/j.issn.1004-9649.202002108).
- [6] YAU K L A, SYED A R, HASHIM W, et al. Maritime networking: bringing internet to the sea [J]. *IEEE access*, 2019, 7: 48236-48255. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2909921](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909921).
- [7] 黄玲玲, 曹家麟, 张开华, 等. 海上风电机组运行维护现状研究与展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(3): 729-738. DOI: [10.13334/j.0258-8013.psee.2016.03.017](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.2016.03.017).
- HUANG L L, CAO J L, ZHANG K H, et al. Status and prospects on operation and maintenance of offshore wind turbines [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 729-738. DOI: [10.13334/j.0258-8013.psee.2016.03.017](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.2016.03.017).
- [8] 吴木荣. 应对海上风电通信安全隐患探讨 [J]. *珠江水运*, 2022(11): 73-75. DOI: [10.14125/j.cnki.zjsy.2022.11.014](https://doi.org/10.14125/j.cnki.zjsy.2022.11.014).
- WU M R. Discussion on dealing with safety hazards in offshore wind power communication [J]. *Pearl river water transport*, 2022(11): 73-75. DOI: [10.14125/j.cnki.zjsy.2022.11.014](https://doi.org/10.14125/j.cnki.zjsy.2022.11.014).
- [9] 崔金鹏, 张波, 田志磊, 等. 无线通信技术在海上风电工程中的应用 [J]. *信息技术与信息化*, 2022, 39(1): 141-144. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9528.2022.01.039](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9528.2022.01.039).
- CUI J P, ZHANG B, TIAN Z L, et al. Application of wireless communication technology in offshore wind power engineering [J]. *Information technology and informatization*, 2022, 39(1): 141-144. DOI: [10.3969/j.issn.1672-9528.2022.01.039](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-9528.2022.01.039).
- [10] 张晓明. 浅议海上通信的需求及技术手段 [J]. *电脑知识与技术*, 2020, 16(26): 46-47, 49. DOI: [10.14004/j.cnki.ckt.2020.2766](https://doi.org/10.14004/j.cnki.ckt.2020.2766).
- ZHANG X M. Discussion on the requirements and technical means of maritime communication [J]. *Computer knowledge and technology*, 2020, 16(26): 46-47, 49. DOI: [10.14004/j.cnki.ckt.2020.2766](https://doi.org/10.14004/j.cnki.ckt.2020.2766).
- [11] 张洪铭, 闫实, 唐斌, 等. 海上无线通信技术: 现状与挑战 [J]. *无线电通信技术*, 2021, 47(4): 392-401. DOI: [10.3969/j.issn.1003-3114.2021.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2021.04.003).
- ZHANG H M, YAN S, TANG B, et al. Maritime communications technologies: current progress and challenges [J]. *Radio communications technology*, 2021, 47(4): 392-401. DOI: [10.3969/j.issn.1003-3114.2021.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-3114.2021.04.003).
- [12] 蒋文盼. AIS 与现代航海技术的关系及对未来航海的影响研究 [J]. *珠江水运*, 2022(19): 31-33. DOI: [10.14125/j.cnki.zjsy.2022.19.037](https://doi.org/10.14125/j.cnki.zjsy.2022.19.037).
- JIANG W P. Research on the relationship between AIS and modern navigation technology and its impact on future navigation [J]. *Pearl River water transport*, 2022(19): 31-33. DOI: [10.14125/j.cnki.zjsy.2022.19.037](https://doi.org/10.14125/j.cnki.zjsy.2022.19.037).
- [13] 邓超禹. 基于雷达&AIS 信息的舰船目标关联融合技术 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022. DOI: [10.27075/d.cnki.ghzdc.2022.000524](https://doi.org/10.27075/d.cnki.ghzdc.2022.000524).
- DENG C Y. Ship-target association and fusion technology based on radar & AIS information [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2022. DOI: [10.27075/d.cnki.ghzdc.2022.000524](https://doi.org/10.27075/d.cnki.ghzdc.2022.000524).
- [14] 赵宇迪. 考虑 AIS 信息的船舶到港时间预测模型研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- ZHAO Y D. Forecasting model of ship arrival time considering AIS information [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [15] 张杰, 袁冰清. 奈伏泰斯 (NAVTEX) 系统及其信号分析综述 [J]. *数字通信世界*, 2021(9): 59-61. DOI: [10.3969/j.issn.1672-7274.2021.09.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7274.2021.09.026).
- ZHANG J, YUAN B Q. Survey of signal analysis and system feature in NAVTEX receiver [J]. *Digital communication world*, 2021(9): 59-61. DOI: [10.3969/j.issn.1672-7274.2021.09.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-7274.2021.09.026).
- [16] 蒋龙. NAVTEX 海上安全信息自动分类及决策支持系统研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2020. DOI: [10.26989/d.cnki.gdlhu.2020.000223](https://doi.org/10.26989/d.cnki.gdlhu.2020.000223).
- JIANG L. Research on NAVTEX maritime safety information automatic classification and decision support system [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020. DOI: [10.26989/d.cnki.gdlhu.2020.000223](https://doi.org/10.26989/d.cnki.gdlhu.2020.000223).
- [17] 柴连洪. 浅谈宽带无线网在海上通信中的应用 [J]. *中国高新技术企业*, 2016(23): 43-44. DOI: [10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.23.020](https://doi.org/10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.23.020).
- CHAI L H. Discussion on the application of broadband wireless network in maritime communication [J]. *China high-tech enterprises*, 2016(23): 43-44. DOI: [10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.23.020](https://doi.org/10.13535/j.cnki.11-4406/n.2016.23.020).
- [18] 李永攀, 蒋轩, 郑刚. 我国渔业船舶甚高频通信设备使用现状与管理对策 [J]. *世界海运*, 2022, 45(3): 28-32. DOI: [10.16176/j.cnki.21-1284.2022.03.005](https://doi.org/10.16176/j.cnki.21-1284.2022.03.005).
- LI Y P, JIANG X, ZHENG G. Current situation and management countermeasures of very-high-frequency communication equipment for fishing vessels in China [J]. *World shipping*, 2022, 45(3): 28-32. DOI: [10.16176/j.cnki.21-1284.2022.03.005](https://doi.org/10.16176/j.cnki.21-1284.2022.03.005).
- [19] 柳美平, 张线媚, 杨燕. 铁路无线集群通信网络信号增强方法研究 [J]. *自动化技术与应用*, 2022, 41(10): 133-136. DOI: [10.20033/j.1003-7241.\(2022\)10-0133-04](https://doi.org/10.20033/j.1003-7241.(2022)10-0133-04).
- LIU M P, ZHANG X M, YANG Y. Research on signal enhancement method of railroad wireless trunking communication network [J]. *Techniques of automation and*

- applications, 2022, 41(10): 133-136. DOI: [10.20033/j.1003-7241.\(2022\)10-0133-04](https://doi.org/10.20033/j.1003-7241.(2022)10-0133-04).
- [20] 唐龙. 城市轨道交通专用无线集群系统设备安装设计 [J]. 大连大学学报, 2018, 39(6): 11-14. DOI: [10.3969/j.issn.1008-2395.2018.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-2395.2018.06.005).
- TANG L. Equipment installation design for urban rail transit dedicated wireless clustered system [J]. *Journal of Dalian University*, 2018, 39(6): 11-14. DOI: [10.3969/j.issn.1008-2395.2018.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-2395.2018.06.005).
- [21] 郭丽, 王斌, 李文波, 等. 基于电网安全管控的无线集群可视化系统研究与应用 [J]. 电工技术, 2020(24): 139-140, 142. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2020.24.054](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2020.24.054).
- GUO L, WANG B, LI W B, et al. Research and application of wireless cluster visualization system based on power grid security control [J]. *Electric engineering*, 2020(24): 139-140, 142. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2020.24.054](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2020.24.054).
- [22] 王志学. 无线对讲技术在超高层建筑消防设计中的应用 [J]. 智能城市, 2020, 6(8): 85-86. DOI: [10.19301/j.cnki.zncs.2020.08.048](https://doi.org/10.19301/j.cnki.zncs.2020.08.048).
- WANG Z X. Application of wireless intercom technology in fire protection design of super high rise buildings [J]. *Intelligent city*, 2020, 6(8): 85-86. DOI: [10.19301/j.cnki.zncs.2020.08.048](https://doi.org/10.19301/j.cnki.zncs.2020.08.048).
- [23] 陶旭辉. 搜救雷达应答器的设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015. DOI: [10.7666/d.D751258](https://doi.org/10.7666/d.D751258).
- TAO X H. Search and rescue radar transponders design and implementation [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015. DOI: [10.7666/d.D751258](https://doi.org/10.7666/d.D751258).
- [24] 顾林. SART标准修改对海上搜救的影响 [J]. 天津航海, 2009(4): 46-47. DOI: [10.3969/j.issn.1005-9660.2009.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9660.2009.04.019).
- GU L. The effect of SART criterion amendment on search and rescue at sea [J]. *Tianjin of navigation*, 2009(4): 46-47. DOI: [10.3969/j.issn.1005-9660.2009.04.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-9660.2009.04.019).
- [25] 韩欢欢. AIS应急示位标的设计与实现 [D]. 大连: 大连海事大学, 2012. DOI: [10.7666/d.Y2088716](https://doi.org/10.7666/d.Y2088716).
- HAN H H. Study emergency position indicating radio beacon on AIS [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2012. DOI: [10.7666/d.Y2088716](https://doi.org/10.7666/d.Y2088716).
- [26] 方崇沁. 基于北斗AIS通信系统的海上搜救终端方案 [J]. 数字技术与应用, 2017(1): 28-31. DOI: [10.19695/j.cnki.cn12-1369.2017.01.019](https://doi.org/10.19695/j.cnki.cn12-1369.2017.01.019).
- FANG C Q. Maritime search and rescue terminal scheme based on Beidou AIS communication system [J]. *Digital technology & application*, 2017(1): 28-31. DOI: [10.19695/j.cnki.cn12-1369.2017.01.019](https://doi.org/10.19695/j.cnki.cn12-1369.2017.01.019).
- [27] 孙静雯. 基于AIS技术的个人海上搜救系统的研究与设计 [D]. 大连: 大连工业大学, 2020. DOI: [10.26992/d.cnki.gdlqc.2020.000340](https://doi.org/10.26992/d.cnki.gdlqc.2020.000340).
- SUN J W. Research and design of personal maritime search and rescue system based on AIS [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2020. DOI: [10.26992/d.cnki.gdlqc.2020.000340](https://doi.org/10.26992/d.cnki.gdlqc.2020.000340).
- [28] 陈强, 孙大铭. AIS个人救生设备在海上搜救中的应用 [J]. 中国水运, 2022, 22(12): 3-4.
- CHEN Q, SUN D M. Application of AIS personal lifesaving equipment in maritime search and rescue [J]. *China water transport*, 2022, 22(12): 3-4.
- [29] 关田静. 多体制融合的海上卫星通信网络建设研究 [J]. 无线互联科技, 2017(18): 5-6. DOI: [10.3969/j.issn.1672-6944.2017.08.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6944.2017.08.003).
- GUAN T J. Study on the construction of a multi-system integrated maritime satellite communication network [J]. *Wireless internet technology*, 2017(18): 5-6. DOI: [10.3969/j.issn.1672-6944.2017.08.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6944.2017.08.003).
- [30] 饶浩. 应用于海上浮标的卫星通信终端关键技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020. DOI: [10.27562/d.cnki.gkyyz.2020.000003](https://doi.org/10.27562/d.cnki.gkyyz.2020.000003).
- RAO H. Research on key technologies of satellite communication terminals for maritime buoys [D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2020. DOI: [10.27562/d.cnki.gkyyz.2020.000003](https://doi.org/10.27562/d.cnki.gkyyz.2020.000003).
- [31] 袁基伟, 朱兴鸿, 徐平, 等. 我国海洋业务对卫星通信服务的需求分析 [J]. 卫星应用, 2023(4): 62-68. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9030.2023.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9030.2023.04.014).
- YUAN J W, ZHU X H, XU P, et al. Analysis of the demand for satellite communication services in China's ocean business [J]. *Satellite application*, 2023(4): 62-68. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9030.2023.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9030.2023.04.014).
- [32] 李春华. 海上微波无线传输组网方式及关键技术 [J]. 无线互联科技, 2021, 18(1): 8-9. DOI: [10.3969/j.issn.1672-6944.2021.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6944.2021.01.004).
- LI C H. Network mode and key technology of maritime microwave wireless transmission [J]. *Wireless internet technology*, 2021, 18(1): 8-9. DOI: [10.3969/j.issn.1672-6944.2021.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-6944.2021.01.004).
- [33] 涂毅, 韩川定, 梅月红, 等. 无线微波网桥在海洋石油平台远程计量中的实践与应用 [J]. 石化技术, 2019, 26(10): 48-49, 183. DOI: [10.3969/j.issn.1006-0235.2019.10.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-0235.2019.10.027).
- TU Y, HAN C D, MEI Y H, et al. Practice and application of wireless microwave network bridge in remote measurement of

- offshore oil platform [J]. *Petrochemical industry technology*, 2019, 26(10): 48-49, 183. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0235.2019.10.027.
- [34] 乔文长, 刘漩. 关于微波传输系统在海上通信保障中的应用 [J]. *数字技术与应用*, 2018, 36(7): 80-81. DOI: 10.19695/j.cnki.12-1369.2018.07.43.
- QIAO W C, LIU X. The application of microwave transmission system in maritime communication support [J]. *Digital technology & application*, 2018, 36(7): 80-81. DOI: 10.19695/j.cnki.12-1369.2018.07.43.
- [35] 王书言. 微波无线传能收发天线阵列的传输效率分析及优化设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022. DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2022.001878.
- WANG S Y. Transmission efficiency analysis and optimal design of microwave wireless energy transmission transceiver array antenna [D]. Xi'an: Xidian University, 2022. DOI: 10.27389/d.cnki.gxadu.2022.001878.
- [36] 敖立争, 纪云松, 刘海南, 等. 4G 与卫星通信混合组网在海上风电场中的应用 [J]. *船舶工程*, 2022, 44(增刊 1): 43-46. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.S1.011.
- AO L Z, JI Y S, LIU H N, et al. Application of 4G and satellite communication hybrid network in offshore wind farm [J]. *Shipping engineering*, 2022, 44(Suppl.1): 43-46. DOI: 10.13788/j.cnki.cbge.2022.S1.011.
- [37] 陈振龙. 基于 5G 的无人机智能组网的应急通信技术开发及应用 [J]. *数字技术与应用*, 2023, 41(1): 34-36. DOI: 10.19695/j.cnki.12-1369.2023.01.10.
- CHEN Z L. Development and application of emergency communication technology for intelligent networking of UAVs based on 5G [J]. *Digital technology & application*, 2023, 41(1): 34-36. DOI: 10.19695/j.cnki.12-1369.2023.01.10.
- [38] 吕志斌, 赵锋, 唐骏. 海上风电场基于 WiF 无线网络的人员运维定位管理系统设计 [J]. *无线通信技术*, 2020, 29(1): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8329.2020.01.007.
- LÜ Z B, ZHAO F, TANG J. Design of personnel operation, maintenance, positioning and management system for offshore wind farm based on WiF wireless network [J]. *Wireless communication technology*, 2020, 29(1): 32-37. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8329.2020.01.007.
- [39] 官平, 夏兴海, 丁伟, 等. 基于 ARM 的微波天线自动对准及跟踪控制系统的研究 [J]. *机械与电子*, 2012(11): 50-53. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2257.2012.11.014.
- GUAN P, XIA X H, DING W, et al. Research on microwave antenna automatic aligning and tracking control system based on ARM [J]. *Machinery & electronics*, 2012(11): 50-53. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2257.2012.11.014.
- [40] 张浩然, 贾帅锋, 饶国辉, 等. 云-贵互联互通工程三端站间通信方案 [J]. *电气技术*, 2020, 21(9): 118-121, 126. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2020.09.026.
- ZHANG H R, JIA S F, RAO G H, et al. Inter-station communication scheme between three terminal in Yunnan-Guizhou interconnection channel project [J]. *Electrical engineering*, 2020, 21(9): 118-121, 126. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3800.2020.09.026.
- [41] 王旭峰. 南方电网直流输电系统站间通信应用研究 [J]. *河南科技*, 2011(22): 35-36.
- WANG X F. Research on application of interstation communication in DC electric power transmission of CSG [J]. *Henan science and technology*, 2011(22): 35-36.
- [42] 郑成明, 刘向阳, 石咏衡, 等. 某海上气田智能化建设探索 [J]. *油气田地面工程*, 2022, 41(4): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2022.04.012.
- ZHENG C M, LIU X Y, SHI Y H, et al. Exploration on intelligent construction of an offshore gas field [J]. *Oil-gas field surface engineering*, 2022, 41(4): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2022.04.012.
- [43] 卿子龙, 柏嵩, 刘剑欣. 海上升压站智慧化建设研究 [J]. *电工电气*, 2021(12): 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2021.12.019.
- QING Z L, BAI S, LIU J X. Research on intelligent construction of offshore booster stations [J]. *Electrotechnics electric*, 2021(12): 73-76. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3175.2021.12.019.
- [44] 李铜林, 曾甫龙. 基于 5G 技术的海上风电通信系统研究 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 51-58. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.05.
- LI T L, ZENG F L. Research on offshore wind power communication system based on 5G technology [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 51-58. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.05.
- [45] 杨源, 汪少勇, 谭江平, 等. 海上风电场智慧运维管理系统 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(1): 74-79. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011.
- YANG Y, WANG S Y, TAN J P, et al. The intelligent operation and maintenance management system for offshore wind farms [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(1): 74-79. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011.
- [46] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述 [J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3691-3702. DOI: 10.

- 13335/j.1000-3673.pst.2022.1496.
- LUO K, GUO J B, MA S C, et al. Review of key technologies of reliability analysis and improvement for offshore wind power grid integration [J]. *Power system technology*, 2022, 46(10): 3691-3702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496).
- [47] 董明远, 刘瑞, 高静坤, 等. 浅谈海上油田群 230 kV 供电方案 [J]. *机电信息*, 2021(2): 9-10. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0797.2021.02.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0797.2021.02.004).
- DONG M Y, LIU R, GAO J K, et al. Discussion on 230 kV power supply scheme for offshore oil field clusters [J]. *Mechanical and electrical information*, 2021(2): 9-10. DOI: [10.3969/j.issn.1671-0797.2021.02.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-0797.2021.02.004).
- [48] 李雪, 高璇, 魏澈. 海上石油平台引入岸电的应用探讨 [J]. *自动化应用*, 2018(2): 125-126. DOI: [10.3969/j.issn.1674-778X.2018.02.056](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-778X.2018.02.056).
- LI X, GAO X, WEI C. Discussion on the application of introducing shore power to offshore oil platform [J]. *Automation application*, 2018(2): 125-126. DOI: [10.3969/j.issn.1674-778X.2018.02.056](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-778X.2018.02.056).
- [49] 冉桂东, 张觉文, 孙正鼎. 一种基于 Mesh 组网的油气井场无线通信方案 [J]. *中国科技信息*, 2023(14): 115-116, 119.
- RAN G D, ZHANG J W, SUN Z D. A wireless communication scheme for oil and gas well sites based on Mesh network [J]. *China science and technology information*, 2023(14): 115-116, 119.
- [50] 徐京渝, 赵辉, 康为, 等. 全球卫星搜救系统 406MHz 遇险示位标在中国的应用 [J]. *交通世界*, 2016(17): 122-125. DOI: [10.3969/j.issn.1006-8872.2016.06.060](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8872.2016.06.060).
- XU J Y, ZHAO H, KANG W, et al. Application of 406 MHz distress marker of the global satellite search and rescue system in China [J]. *Transpo world*, 2016(17): 122-125. DOI: [10.3969/j.issn.1006-8872.2016.06.060](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-8872.2016.06.060).

作者简介:



梁泽勇

梁泽勇(第一作者, 通信作者)

1990-, 男, 工程师, 硕士, 从事换流站电气二次设计工作(e-mail)liangzeyong@ge-di.com.cn。

邝建荣

1981-, 男, 工程师, 硕士, 从事高压直流输电管理工作(e-mail)kuangjr@126.com。

党彤

1994-, 女, 硕士, 从事换流站电气二次设计工作。(e-mail)dangtong@gedi.com.cn。

陈艺

1992-, 女, 硕士, 从事换流站电气二次设计工作。(e-mail)chenyi02@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)