

风电设备运输甲板驳船的靠泊方案设计分析

诸浩君¹, 张智伟¹, 苏冠瑜², 张 竹³

(1. 上海海湾新能风力发电有限公司, 上海 200433; 2. 浙江金风科技有限公司, 浙江 温州 325799;
3. 北京金风科创风电设备有限公司, 北京 100023)

摘要:总结在海上风场建设过程中运输甲板驳船在安装机位点进行风电机组设备过驳吊装过程中 3 种锚泊方案, 并通过数值分析方法仿真模拟运输甲板驳船的运动响应和锚泊系统系泊力情况, 对比分析 3 种锚泊方式的优劣和适用范围, 为海上风机吊装制定合理的运输驳船的靠泊方案提供参考依据。

关键词:运输驳船; 系泊方案; 单船锚泊; 双船靠泊; 桩靠停泊; 数值分析

中图分类号:U674.18⁺3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)17-0279-05

在海上风电场的建设中, 甲板驳船将风电机组设备从发运码头运输到海上机位安装地点, 停靠在安装船侧面等待着机组设备的过驳吊装, 等待期内以及过驳过程中运输驳船的系泊安全, 对现场安装进度和海上安全操作具有至关重要的影响。特别是甲板驳船在风机设备过驳吊装的过程中, 其合理的锚泊方案, 能够保持船舶处于稳定状态, 有利于风电设备的安全起吊作业和现场设备及人员的安全, 确保现场安装顺利进行^[1-2]。

国外的海上风电机组设备的运输一般采用具有运输和安装一体化能力的风电安装船来进行, 因为其风场所处的海域水深较大, 风浪环境条件恶劣, 不适宜甲板驳船的运输和停泊作业。相对而言, 国内的海上风场大多数布置在沿海地带, 水深较浅, 从浅滩到 40 m 左右, 风浪条件较为温和, 且甲板驳船资源充沛, 应用广泛, 经常出入从北到南的国内各个港口码头, 深受风场业主和风机厂商的欢迎。因此, 研究以甲板驳船为对象的海上锚泊方案设计, 对提高海上驳船过驳吊装风电机组的作业效率和保障海上风场建造的安全进行起着至关重要的作用。

成海亮等^[3]对典型的系泊方案进行了水动力数值模拟分析, 为运输甲板船舶的系泊方案的选择提供了一定的理论依据。路宽等^[4]针对不同锚系形成对平台的动力响应进行了分析比较, 对张紧式和带

浮筒的倒 S 松弛式两种锚泊系统在极端风浪联合作用下的水动力性能进行了试验研究, 结果表明倒 S 松弛式锚系抵抗极端环境的能力更强, 为海上平台的设计提供了参考依据。黄山田等^[5]以“蓝疆号”在 KJO(Khafji Joint Operations)油田中进行 IWJ-6 平台的安装为例, 介绍了安装锚泊的方案设计, 为类似工程提供了参考。金良安等^[6]利用模拟实验装置研究了锚链质量对锚泊时锚链振动频率的影响, 结果表明锚链越重, 其振动频率越大。

以风电航运市场上应用频率最高的排水量 5 000 t 运输驳船为对象, 介绍当前海上风电项目普遍采用的 3 种停靠锚泊方式^[7], 并通过数值分析方法模拟船舶的运动响应以及锚泊系统的张紧力大小, 详细对比 3 种锚泊方式的优缺点和适用范围。

1 系泊方案

在海洋环境中, 船舶容易受到外部环境力(包括海风、波浪、海流)的作用而发生随机晃荡和振动运动^[8]。但海上安装作业需要船舶保持一定的稳定性, 并约束船舶的位移范围和摇动幅度, 故广泛用于工程船舶和海洋工程结构物定位作业的锚泊定位系统便应用在运输甲板驳船的停泊作业中。

1.1 单船四锚定位

运输甲板驳船承运风电机组设备到达海上风场指定机位点后, 通常采用悬链线锚泊布置的形式^[9], 在船头和船尾呈八字形各抛出两个锚和两根

收稿日期: 2023-04-06

作者简介:诸浩君(1984—), 男, 上海人, 上海海湾新能风力发电有限公司, 物资部主任, 高级工程师, 研究方向为风电场物资管理; 张智伟(1978—), 男, 上海人, 上海海湾新能风力发电有限公司, 工程技术部主任, 高级工程师, 研究方向为新能源发电; 苏冠瑜(1983—), 男, 广东化州人, 浙江金风科技有限公司, 工程师, 研究方向为风电海上工程及运维技术; 张竹(1980—), 女, 四川仁寿人, 北京金风科创风电设备有限公司, 硕士, 海上风机工程及运维技术室主任, 工程师, 研究方向为风电海上工程及运维技术。

锚索来固定船舶,如图 1 所示。在扰动力作用下,悬链线锚泊系统中的若干锚索被拉伸,产生的水平回复力与外力相平衡,从而保持船舶的稳定。这种四锚配置的船舶具有投资少、使用和维修方便的特点,能够适应较恶劣的海洋环境,深受业主和船东的认可。

在江苏盐城大丰和广东阳江沙扒的海上风场里,驳船运输叶片和主机设备经常使用这种四锚定位的方式停泊在机位点的安装船旁边,尤其在 4.5 MW 和 6.0 MW 的大功率机组吊装项目里。

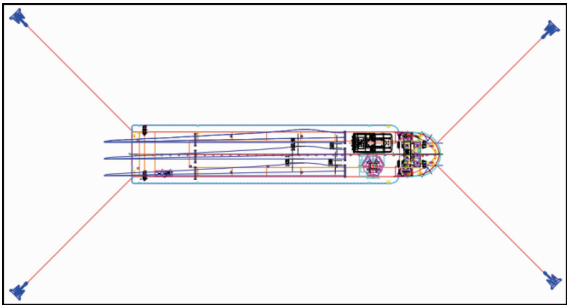


图 1 甲板驳船的四锚定位方案

1.2 双船靠泊定位

在海上风电建设抢装潮期间,一些运输甲板驳船没有配置四锚定位的锚系设备仍然承担着海上风电机组的运输任务,待赶往海上风场指定机位点后,需要借助老锚船来停驻移位,才能完成机组设备的交付任务,如图 2 所示。此时,老锚船仍然采用四锚定位的方式来稳住船体,而运输船则紧挨在其一侧,并在船间放置防撞碰球和带上交叉缆绳来约束彼此之间的相互运动,形成一个整体来共同抗衡外部风浪流环境力的作用。

在福建福州平潭外海的 2021 年海上风电抢装潮里,海上风电业主为加快风场建设的进度,租用排水量为 10 万 t 的新光华半潜船作为中转靠泊船只,方便那些锚泊定位能力差的运输驳船靠泊过来转移风电机组设备,便使用了这种双船靠泊的定位方式,用于 6 MW 和 8 MW 的较大功率机组的安装项目。

1.3 桩靠停泊定位

在水深较浅(<10 m)的海上风电场,海况相对温和,一些施工方因地制宜地在机位安装点附近布设两根以上的钢管桩,以供运输甲板驳船靠泊定位,完成机组设备的过驳吊装,如图 3 所示。

在江苏南通如东的海上风场建设过程中,当地风场所处海域的水深较浅,抛锚定位的方式对运输

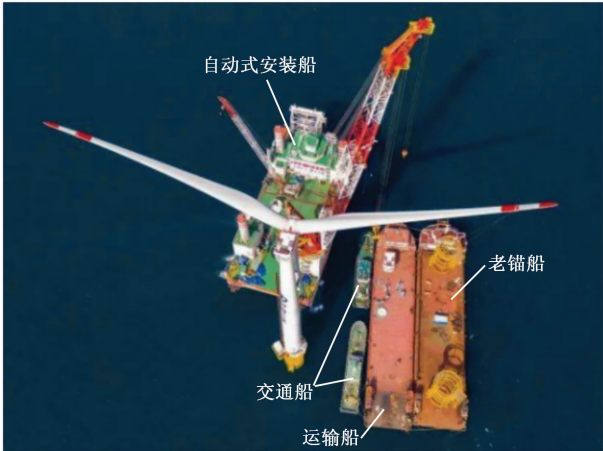


图 2 甲板驳船的双船靠泊方案

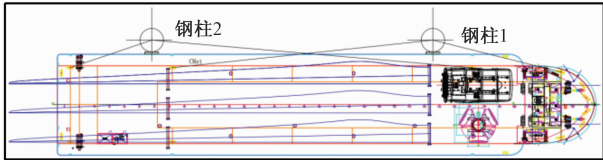


图 3 甲板驳船的桩靠停泊方案

驳船的稳定停泊作用不大,当时的施工方便因地制宜地利用多余的管桩材料执行这种靠桩停泊方案,效果明显,为当时业主安装 4.5 MW 的风电机组提供了极大的方便,保障了现场施工进度的顺利推进。

2 系泊分析计算模型

以载重吨(dead weight tonnage,DWT)5 000 t 运输甲板驳船为研究对象,表 1 为该船的主要参数,使用 ANSYS 建立三维数值模型,而系泊分析主要是计算在风、浪、流载荷共同作用下船舶锚泊系统的锚链张紧力及船舶运动的响应,因此只需建立船舶的湿表面模型进行相应的水动力分析。由于船体左右对称,故只需建立半船模型,再用对称的方法完成整船建模^[1]。图 4 所示为运输驳船的面元网格划分,其网格形状通常设计为四边形。

根据船舶的主尺度和相关规定,选用链径为 42 mm 的锚链和 60 mm 的带缆绳。表 2 为锚链和缆绳的主要参数。

表 1 DWT5000 t 驳船主要参数

参数	参数值
总长/m	104.2
型长/m	97.8
型宽/m	21
型深/m	5.2
空船重量/Mt	1 550
设计吃水/m	4.2

表 2 锚链、缆绳的主要参数

参数	参数值	
	锚链	缆绳
长度/m	400	30~90
直径/mm	42	60
干重/(kg·m ⁻¹)	7.37	2.09
破断力/kN	1 230	550

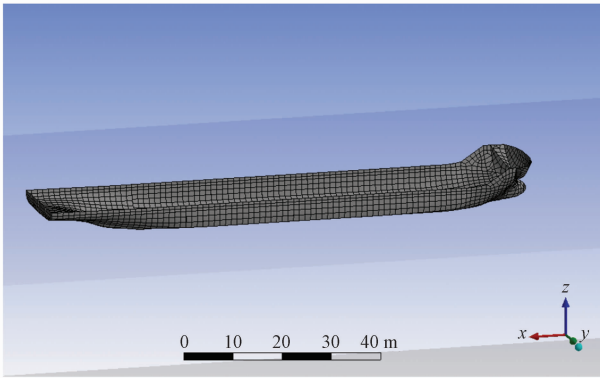


图 4 驳船的网格划分

该驳船的外部环境力体现为风浪流 3 种外力，其中的风力和流力在 AQWA Workbench 里会根据船舶外表面的面积来计算 0°~360°的风力系数和流力系数，而波浪力则使用波浪定义添加。

该驳船系泊系统的缆绳需要通过驳船上导缆孔的位置和海底锚点的位置来设计，即根据船舶的型宽和原点位置，和设置的锚链长度来估算。在 AQWA Workbench 模块里设置好导缆孔和锚点的位置，定义好锚线的属性，将导缆孔和海底锚点用锚线连接起来。至此，整个系泊有限元模型建立完毕。图 5 所示为驳船四锚定位的有限元模型，其他两种系泊方案的模型类似。

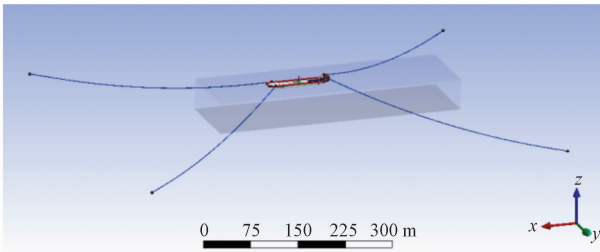


图 5 驳船的四锚定位系泊模型

3 系泊计算分析结果

3.1 单船四锚定位

为了分析船舶锚泊系统随风、浪、流载荷的响应情况^[12-13]，针对单船四锚定位的系泊条件，选取了 4 种有义波高分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 m，定常

风速为 13.8 m/s 和定常流速为 0.9 m/s 作为外部影响的设计环境条件。

海上风浪流的来向通常为不同方向，出于保守分析，假定风、浪的作用方向相同，而海流沿船长方向。因此，通过时域分析的计算方法，得到 4 种波高情况下的风电机组设备过驳吊装时船舶的最大运动幅度和最大系泊力，见表 3 和表 4。

表 3 四锚定位的最大运动幅度

有义波高/m	纵向位移/m	横向位移/m	垂向位移/m	横摇/(°)
2.0	2.09	2.63	0.49	1.33
1.5	1.54	1.87	0.37	0.98
1.0	0.75	1.09	0.24	0.64
0.5	0.21	0.36	0.12	0.31

表 4 四锚定位的最大锚链力

有义波高/m	系泊缆张力/kN				安全系数
	锚链 1	锚链 2	锚链 3	锚链 4	
2.0	506	817	521	1 193	1.03
1.5	257	448	215	491	2.51
1.0	170	246	153	252	4.88
0.5	117	140	121	135	8.79

由以上结果得到，单船四锚定位的方案可使运输驳船的锚链力的安全系数在 1.5 m 有义波高的情况下能够满足设计要求，且船体的运动位移控制在 2 m 以内，横摇幅度在 1°以内。

3.2 双船靠泊定位

运输船和老锚船通过船间的交叉缆绳捆绑在一起，并通过老锚船的四锚定位系统成为一个整体来抵抗外部环境力的作用。但在数值模拟的初平衡状态求解中，仍需要在运输船的艏艉位置各抛一根缆绳，运输船才能抵抗各个方向的环境载荷的作用，而使船体保持稳定。运输船靠泊老锚船在有无艏艉锚的情况下的初平衡状态结果见表 5。图 6 所示为 270°风浪(即从老锚船没有靠泊的那一侧吹过来)作用下运输船没抛艏艉锚的初平衡状态。

表 5 运输船靠泊老锚船的初平衡艏摇姿态

风浪方向角度/(°)	有抛锚艏摇/(°)	无抛锚艏摇/(°)	备注
0	0.17	0.07	靠向老锚船
45	1.66	0.11	
90	1.97	-0.11	
135	0.14	-0.26	
180	-0.17	-0.30	
225	0.23	25.99	远离老锚船
270	-0.13	38.83	
315	-0.34	44.62	

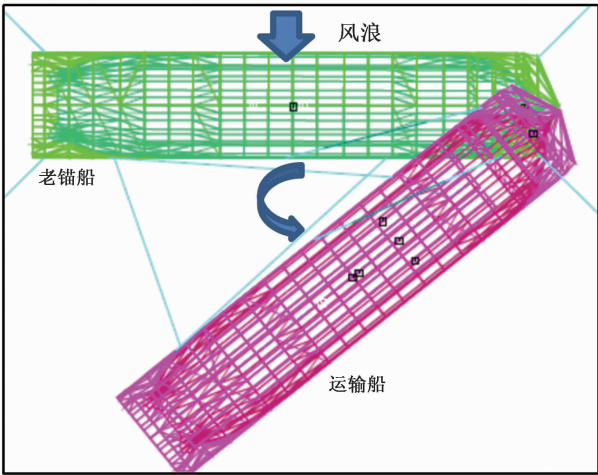


图 6 运输船的大角度艏摇的初平衡姿态

针对双船靠泊的作业环境限制^[10],只选取了 3 种有义波高分别为 0.5、1.0、1.5 m 进行外部环境载荷的设计分析,得到运输船舶的最大运动幅度和缆绳张紧力大小,见表 6、表 7。

表 6 运输船在 0.5、1.0、1.5 m 波高的最大运动幅度

运动分项	波高 0.5 m		波高 1.0 m		波高 1.5 m	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
纵荡/m	0.306	-0.25	0.92	-0.84	1.77	-1.78
横荡/m	0.10	-0.46	0.54	-1.00	1.14	-1.94
垂荡/m	0.09	-0.10	0.47	-0.43	0.89	-0.81
横摇/(°)	0.64	-0.69	3.07	-2.84	4.90	-4.54
纵摇/(°)	0.06	-0.06	0.31	-0.31	0.85	-0.82
艏摇/(°)	0.62	-0.76	0.731	-0.91	1.48	-1.82

表 7 双船靠泊时的运输船在 0.5、1.0、1.5 m 波高的最大缆绳力

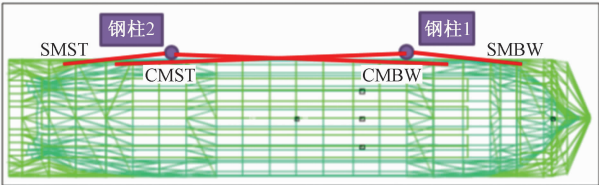
分项		波高 0.5 m	波高 1.0 m	波高 1.5 m
老锚船的 锚链	M2/t	41.09	58.53	93.47
	M3/t	41.31	61.11	91.89
	M6/t	40.96	54.40	73.34
	M7/t	37.73	48.95	65.90
船间交叉 缆绳	CM5BW/t	29.99	38.43	53.82
	CM6BW/t	29.71	43.13	69.91
	CM7ST/t	27.88	36.55	48.27
	CM8ST/t	25.08	33.57	47.25
运输船的 锚链	Mbow/t	10.69	16.04	27.99
	Mstn/t	13.02	19.98	35.67

由以上结果可知,双船靠泊定位方案里在 1.0 m 有义波高的情况下,锚链的张紧力能够满足设计要求(小于许可的最大破断力 75 t),船间交叉缆绳的拉力也小于最大破断力 56 t;而船体的运动位移控制在 1.0 m 以内,但横摇幅度大于 3°了。

3.3 桩靠停泊定位

图 7 所示为运输船的桩靠布置模型,可见运输

船挨在两根预先固定好的钢桩上,并在同侧引出 4 根缆绳绕桩固定,从而稳定船舶,限制运动;其在有义波高分别为 0.5 m 和 1.5 m 的情况下时域模拟计算的最大运动幅度和缆绳张紧力大小统计在表 8、表 9 中。



SMST 为尾平行缆;CMST 为尾交叉缆;
CMBW 为首交叉缆;SMBW 为首平行缆

图 7 运输船的桩靠布置模型

表 8 运输船在 0.5 m 和 1.5 m 波高的运动幅度

运动分项	波高 0.5 m		波高 1.5 m	
	最大值	最小值	最大值	最小值
纵荡/m	0.1	-0.3	0.9	-1.3
横荡/m	0.3	-0.2	1.6	-0.8
垂荡/m	0.1	-0.2	1.1	-1.0
横摇/(°)	1.5	-1.6	4.9	-3.9
纵摇/(°)	0.1	-0.1	1.2	-1.3
艏摇/(°)	0.5	-0.4	1.6	-2.0

表 9 桩靠工况下 0.5 m 和 1.5 m 波高的最大缆绳力

分项		波高 0.5 m	波高 1.5 m
运输船的缆绳	首交叉缆/t	16	32
	尾交叉缆/t	13	20
	首平行缆/t	57	140
	尾平行缆/t	127	490

由以上结果可知,桩靠停泊定位方案里在 0.5 m 有义波高的情况下,系桩缆绳的拉力达到 127 t,远超过允许的破断力 56 t;而船体的运动位移能控制在 0.5 m 以内,横摇幅度也能小于 2°。

4 结论

介绍了海上风场建设中对运输驳船普遍采用的 3 种锚泊方案,并对这 3 种系泊方式进行了相应的数值模拟计算,分析了船舶的运动幅度和缆绳力的变化。从限制船舶运动的幅度和海上现场施工的难度来看,单船四点锚泊的系泊方案较优,广泛出现在海上风场项目里,而双船靠泊方案次之,桩靠停泊方案则视现场施工作业的环境条件决定,一般在极个别风场采用,且要求风浪条件相对温和一些。

因此,在海上风场对于运输甲板驳船进行靠泊定位,建议采用单船四点锚泊方案。为了约束船舶

的运动幅度和保持稳定,提高运输驳船的作业波高限制,并同时满足规范对于系泊力安全系数的要求,单船四点锚泊方案需要针对具体的项目进行定制化的优化设计。

双船靠泊和辅助桩靠泊的系泊方案需要设置较多的系泊缆绳,如在船间系上交叉和平行缆绳,还在运输驳船的艏艉各抛出一根缆绳,未及四点锚泊方案的简易便捷,且仅适用于海上风浪流环境条件比较温和的情况(1.0 m 波高以下);况且随着波高的增大,船舶发生艏摇偏移的风险也在增大。

参考文献

[1] 柳辉,崔杰,邓小康,等. 船舶锚泊系统分析[J]. 船舶标准化工程师,2019,52(2):31-36.

[2] 李发中. 超大型船舶的锚泊作业[J]. 天津航海,2019(2):8-10.

[3] 成海亮,李卓,苏冠瑜,等. 海上风电场运输甲板驳船系泊方案研究[J]. 中国水运,2023(2):46-48.

[4] 路宽,王花梅,宋雨泽,等. 极端海况下不同锚系形式对漂浮式海上平台的动力响应影响研究[J]. 振动与冲击,2022,41(10):140-146,195.

[5] 黄山田,江锦,刘祺凤,等. 复杂海况下工程船的锚泊方案设计[J]. 中国造船,2012,53(S1):179-183.

[6] 金良安,张聪,王涌. 锚泊时锚链的振动频率与质量关系实验研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(24):294-298.

[7] 冯宝明,刘风光,尹鑫. 船舶单锚泊状态下的规律分析[J]. 中国海事,2020(11):59-62.

[8] 王志斌,朱东华,沈佳辉,等. 30000DWT 散货船泊位系泊模型试验[J]. 船舶工程,2020,42(8):55-58,121.

[9] 陈以春. 船舶锚泊安全与风险分析[J]. 中国水运,2021(4):41-43.

[10] 卞恒东. 双浮体并靠系泊系统水动力及运动干扰特性研究[D]. 天津:天津大学,2020.

[11] 蒋效彬. 船舶系泊系统的建模仿真与应用研究[D]. 大连:大连海事大学,2020.

[12] 黄华. 浅水域风载荷作用下船舶运动预测系统的设计与开发[D]. 天津:天津理工大学,2020.

[13] 沈嘉伟. 波浪作用下双船干涉的数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

Design and Analysis of Berthing Scheme for Wind Turbine Equipment Deck Transport Barge

ZHU Haojun¹, ZHANG Zhiwei¹, SU Guanyu², ZHANG Zhu³

(1. Shanghai Haiwan New Energy Wind Power Generation Co., Ltd., Shanghai 200433, China;
2. Zhejiang Goldwind Technology Co., Ltd., Wenzhou 325799, Zhejiang, China; 3. Beijing Goldwind
Science and Technology Innovation Wind Power Equipment Co., Ltd., Beijing 100023, China)

Abstract: In the process of offshore wind farm construction, three berthing modes of deck transport barge for lightering and hoisting of wind turbine equipment at the installation position are summarized. The three anchoring modes are simulated. Then, the motion amplitude and cable tension of deck transport barge are analyzed and compared. The advantages and disadvantages of the three anchoring modes are judged, which provides a suitable berthing scheme of deck transportation barge for offshore wind turbine hoisting.

Keywords: transportation barge; anchoring scheme; single ship anchoring; double ship berthing; pile berthing; numerical analysis