

浮式风机干拖运输技术研究

刘扬¹, 闵烨¹, 李亚杰¹, 王文娟²

(1. 中船风电工程技术(天津)有限公司, 天津 300000; 2. 能威(天津)海洋工程技术有限公司, 天津 300000)

摘要: 本文以某工程实例为基础, 对浮式风机的海上运输方式进行了介绍, 并着重针对浮式风机的干拖运输方式进行了运输船的稳性校核与运动数值分析, 通过稳性校核分析, 验证了运输船具有足够的稳性运输浮式风机。通过对不同海况的运动响应分析, 可以为浮式风机与运输船之间的绑扎固定设计提供有效依据。

关键词: 浮式风机; 干拖运输; 稳性校核; 运动分析

中图分类号: U693 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 04—0122—03

改革开放以来, 随着我国经济社会的高速发展, 能源消费需求越来越大, 但由于传统的能源布局、结构不科学、不合理, 制约了经济社会的进一步发展。目前风电已成为我国除火电和水电外的第三大能源, 研究认为, 未来能源结构调整主要应靠风电, 在陆上风电开发进入成熟期之后, 未来海上风电发展空间十分广阔。

现阶段, 海上风电机组主要是通过单桩或者导管架式等结构固定在海床上, 基础固定式机组的最大缺陷在于只能应用于水深不超过 60m 的近岸浅海海域, 而水深大于 60m 时, 固定式支撑结构的成本急剧增加, 而漂浮式海上风电机组将比固定式海上风机更具有工程经济性^[1-2], 漂浮式风机受海床地质条件限制小, 选址灵活, 且深远海风能资源丰富, 风况稳定, 可岸上组装, 减少施工时间和成本等优势, 使得深远海域的风能资源开发成为了可能。因此, 浮式风电机组已成为深远海海上风场建设的必然选择, 从而使得漂浮式风电机组的海上运输方式备受关注, 本文以某工程实例为基础, 介绍了漂浮式风电机组的海上运输方式, 并针对浮式风机的干拖运输进行了数值模拟研究。

1 拖航方式

针对漂浮式风电机组的整体拖航, 一般有干拖和湿拖两种方式。干拖航行速度较快, 但需要考虑因素较多, 如运输船的选择, 运输货物的海上环境承受力以及结构强度和结构疲劳等。针对较远距离的运输, 一般采用干拖方式。湿拖相对速度较慢, 如果安装海域距离建造场地较近时则考虑湿拖。湿拖需要考虑风浪流环境力的影响。

1.1 湿拖运输

当海洋工程结构物的建造地点与海上安装地点距

离较近时, 一般采用湿拖。湿拖时一般需要几艘拖轮进行掩护和拖拉, 湿拖速度较慢, 所以, 在深远海项目里, 应尽量避免较长距离的湿拖。



图 1 湿拖运输示意图

1.2 干拖运输

在进行浮式风机干拖运输时, 首先要进行运输船舶的选择, 根据以往项目案例, 大件干拖运输多采用半潜船作为运输船, 一般半潜船都自带动力。如果没有半潜船也可以选择无动力的驳船, 通过拖轮牵引前行。半潜船需具有承载大型结构物的能力以及自潜装卸的能力, 并可以自主控制航行方向, 因此干拖运输一般采用半潜船作为运输船舶。



图 2 干拖运输示意图

2 干拖运输稳性及运动分析

本节以某工程实例为基础, 针对某一浮式风机基础干拖运输进行了稳性校核及运动性能研究。

浮式风机基础运输布置图如图 3 所示。

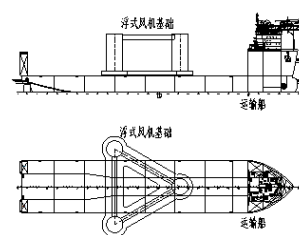


图 3 浮式风机基础运输布置图

浮式风机基础干拖运输主要参数如表 1 所示。

表 1 浮式风机基础干拖运输主要参数

参数		数值
浮式 风机 基础	立柱直径 (m)	13.00
	立柱高度 (m)	29.50
	立柱间距 (m)	60.00
	垂荡板直径 (m)	20.00
	垂荡板高度 (m)	3.50
	垂荡板间距 (m)	60.00
	下浮体宽度 (m)	14.00
	下浮体高度 (m)	3.50
运输 船	上部撑杆宽度/高	3.50
	船长 (m)	220.00
	船宽 (m)	42.00
型深 (m)		13.30

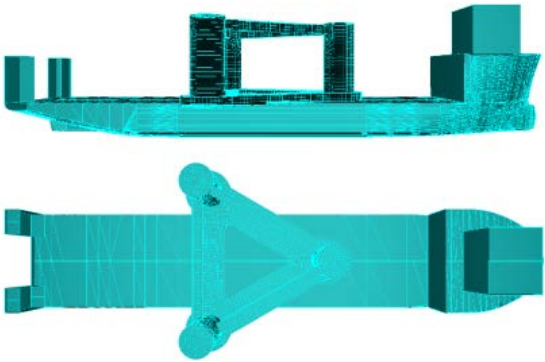


图 4 浮式风机基础干拖运输数值模型

在浮式风机干拖运输过程中，运输船状态如下：

船首吃水：7.59 m
船中平均吃水：8.01 m
纵倾：0.22°

2.1 稳性校核

浮式风机采用干拖方式进行运输时，根据 DNVGL-ST-N001 规范的 11.10.2 节，11.10.3 节以及 11.10.4 节中对完整和破舱稳性校核的规定，对本次分析中的运输船舶进行了完整和破舱稳性校核。

根据现有规范要求，浮体摇摆角度和力矩关系如图 5 所示。稳性范围消失角大于 36 度，回复力臂与风倾力臂的比值大于 1.40。

表 2 完整稳性要求

运输船参数	稳性范围
大中型船舶，总长>76 m，且船宽>23 m	36°
大型驳船，总长>76 m，且船宽>23 m	36°
小型驳船，总长<76m，或船宽<23 m	40°
小型船舶，总长<76 m，或船宽<23 m	44°

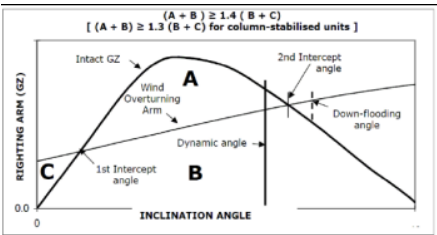


图 5 稳性校核曲线

完整稳性

- 运输船舶吃水 7.59m
- 纵倾角 0.22degrees
- 稳性消失角 73.07deg>36.00deg
- 回复力臂与风倾力臂比值 7.74>1.40

完整稳性满足稳性要求。

破舱稳性

为了保证拖航安全，除了校核完整稳性，还需要对运输船进行破舱稳性校核，数值模拟了所有舱的破舱稳性校核，这里只列出了最危险工况的破舱情况。

WB0406 破舱稳性结果如下：

- 运输船舶吃水 7.66m
- 纵倾角 0.27degrees
- 横摇角 -1.97degree
- 稳性消失角 69.68deg>36.00deg
- 回复力臂与风倾力臂比值 27.00>1.40

破舱稳性满足稳性要求。

2.2 运动响应

浮式风机在拖航运输时，不仅要考虑运输船稳性，还需考虑运输船的运动。在浮式风机的拖航路径中十年一遇的极限波高为 6.2m，根据 DNVGL-ST-N001 规范^[3]的 11.8.5 节中对波高选取的定义，本次运输船运动分析中考虑的海况如下：

- 0&180deg: Hs=6.2m, Tp=8.98s~13.64s
- 45 & 135 & 225 & 315 deg: Hs=5.58m, Tp=8.52s~12.94s
- 90&270deg: Hs=3.72m, Tp=7.86s~10.56s
- Wave Spectrum: ISSC
- Wind Speed: 25m/s

表 3 不同方向波高的选取

方向	波高
$0^{\circ} \sim \pm 30^{\circ}$	$100\%H_s$
$\pm (30^{\circ} \sim 60^{\circ})$	$100\%H_s \sim 80\%H_s$
$\pm 60^{\circ}$	$80\%H_s$
$\pm (60^{\circ} \sim 90^{\circ})$	$80\%H_s \sim 60\%H_s$
$\pm 90^{\circ}$	$60\%H_s$
$\pm (90^{\circ} \sim 120^{\circ})$	$60\%H_s \sim 80\%H_s$
$\pm 120^{\circ}$	$80\%H_s$
$\pm (120^{\circ} \sim 150^{\circ})$	$80\%H_s \sim 100\%H_s$
$\pm (150^{\circ} \sim 180^{\circ})$	$100\%H_s$

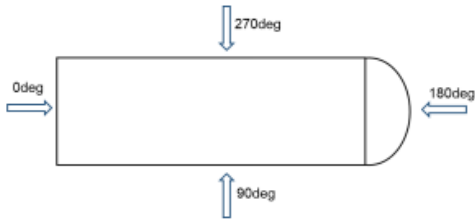


图 6 环境方向定义

利用三维势流理论进行了运输船的水动力分析，运输船在设计条件下的最大横摇是 11.31 度，如表 4 所示。

表 4 浮体平台重心处运动

方向 ($^{\circ}$)	横荡 m	纵荡 m	垂荡 m	横摇 ($^{\circ}$)	纵摇 ($^{\circ}$)	首摇 ($^{\circ}$)
0	1.21	0.11	2.17	0.37	3.70	0.00
45	0.88	3.42	2.48	10.61	3.42	1.91
90	0.06	4.23	3.08	10.25	0.19	0.16
135	0.92	3.48	2.44	11.31	3.71	2.06
180	1.24	0.12	2.25	0.40	4.01	0.00
225	0.92	3.32	2.44	10.78	3.71	2.06
270	0.06	4.24	3.08	10.25	0.19	0.16
315	0.88	3.58	2.48	11.10	3.42	1.90

由于运输船运动，将在浮式风机上产生惯性力，惯性力将转换为加速度，用于绑扎固定设计。

表 5 浮体平台重心处加速度

方向 ($^{\circ}$)	横荡 (g/s)	纵荡 (g/s)	垂荡 (g/s)	横摇 ($^{\circ}/s^2$)	纵摇 ($^{\circ}/s^2$)	首摇 ($^{\circ}/s^2$)
0	0.082	0.015	0.079	0.085	0.962	0.001
45	0.084	0.289	0.071	2.348	1.133	0.612
90	0.008	0.311	0.135	2.458	0.143	0.112
135	0.084	0.289	0.071	2.348	1.133	0.612
180	0.082	0.015	0.079	0.085	0.962	0.001
225	0.084	0.289	0.071	2.348	1.133	0.612
270	0.008	0.311	0.135	2.458	0.143	0.112
315	0.084	0.289	0.071	2.348	1.133	0.612

3 结论

本文针对某一工程实例，对浮式风机的干拖运输进行了完整和破舱稳性校核，校核结果显示该运输船有足够的稳性对浮式风机进行干拖运输。同时针对拖航路径的不同海况对其进行了运动分析，运动分析的结果可以用于运输绑扎固定的设计，从而保证干拖运输的安全性。

参考文献：

[1] HENDERSON A R, WITCHER D. Floating offshore wind energy—a review of the current status and an assessment of the prospects [J]. Wind Engineering, 2010, 34 (1) : 1–16.

[2] 陈嘉豪, 斐爱国, 马兆荣, 庞程燕, 海上漂浮式风机关键技术研究进展, 南方能源建设, 2020, 7 (1) .

[3] DNVGL-ST-N001, Noble Denton Marine Services, Edition 2020.

