起重船近海风电场坐底施工作业分析

杜宇 [1]，王菁 [1]，谢锦波 [1]，王晨旭 [2]
（1. 中交第三航务工程局有限公司，上海　200032；2. 天津大学，天津　300072）

摘　要：以起重船“三航工 5”为例，结合某海上风场环境条件，对不具有坐底相关入级符号的起重船坐底施工作业及坐底全过程所涉及的技术问题进行分析，并对锚固定位和坐底稳性进行计算，采用经验公式计算波流荷载、频域边界元方法计算波浪力。计算结果表明，“三航工 5”在淤泥底质条件下，需要在流速小于 1.3 m/s 的条件下进行下潜或上浮作业，以避免走锚；为满足坐底稳性要求，需要初始超加压载水达到 4 500 t，后降至 2 500 t。

关键词：坐底船；起重船；坐底稳性；半潜稳性；锚固定位
中图分类号：U674.3　　**文献标志码**：B　　**文章编号**：2095-7874(2021)01-0048-04
doi:10.7640/zggwjs202101011

Operation analysis on the on-bottom construction by a crane vessel in a nearshore wind farm

DU Yu[1], WANG Jing[1], XIE Jin-bo[1], WANG Chen-xu[2]
(1. CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Taking the crane vessel *Sanhang Gong 5* as an example, combined with the environmental conditions of a certain nearshore wind farm, the technical problems involved in the construction and the whole process of the on-bottom setting of the crane vessel without relevant classification symbols were analyzed. The anchoring positioning and on-bottom stability were calculated. The wave current load was calculated by empirical formula and the wave force was calculated by using the frequency domain boundary element method. The calculation results show that under the condition of silt bottom material, the *Sanhang Gong 5* needs to dive or float under the condition of velocity of flow less than 1.3 m/s to avoid anchor moving, in order to satisfy the on-bottom stability requirements, the initial amount of ballast water extra should be 4 500 t, and then reduced to 2 500 t.

Key words: on-bottom vessel; crane vessel; on-bottom stability; semi-submersible stability; anchoring positioning

1　研究背景

船舶坐底作业通常只适用于近海浅水海域。理论上坐底作业时，由于坐落于海床，在环境荷载作用和采取必要措施的条件下依然可以保持稳定，因此适合于海上风电安装这类对安装条件要求较为苛刻的船舶海上施工。练学标[1]总结了将半潜驳改造成坐底船在潮间带进行风机坐底安装的技术要点和安全措施。本文以不具有坐底平台入级符号的“三航工 5”半潜驳(照片见图 1、参数见表 1)在某海上风电场施工项目中采用坐底施工方式作业进行了分析，梳理了坐底作业的全过程，提出可供参考的相关规范和技术指标，并对作业可行性进行评价，提出应对策略。

图 1　“三航工 5”半潜驳
Fig. 1　The semi-submersible barge *Sanhang Gong 5*

收稿日期：2020-03-05　　修回日期：2020-12-12
作者简介：杜宇（1983— ），男，黑龙江齐齐哈尔人，硕士，高级工程师，海洋工程专业。E-mail：duyutony@aliyun.com

表 1 "三航工 5"参数表

Table 1 Parameters of *Sanhang Gong* 5

船长/m	型宽/m	型深/m	航行吃水/m	总吨/t	起重量/t
100	40	7	5	10 013	320

2 海上风场环境条件及坐底作业过程分析

2.1 海上风场环境条件

该风场位于我国浙江沿海海域，最大风机机位水深约为 13 m。场区 100 m、95 m、90 m、50 m 高度年平均风速分别为 7.5 m/s、7.5 m/s、7.4 m/s、6.9 m/s。海域潮差较大，最高潮位与最低潮位之差可达 6.62 m。风场海域波浪以小浪级和轻浪级波浪出现最多，全年波浪海况的有义波高取值在 0.1~1.25 m 区间的频次最高。风场海域的潮流为正规半日潮、呈往复流运动形式，涨、落潮流主轴走向十分接近，其夹角约为 150°，最大流速约 2.3 m/s。海床表层为淤泥质粉质黏土，厚度达 23~31 m。

2.2 坐底作业过程分析

"三航工 5"拖航吃水状态下迁移至作业海域后锚泊定位，通过调整压载水进行下潜坐落于海床，再增加一定量的压载水使船舶能够稳定于海床上。因此，对船舶操作过程涉及 4 个技术问题：1）半潜稳性；2）下潜/上浮过程中的锚固定位；3）坐底稳性；4）船舶强度。

对于 1）半潜稳性，"三航工 5"在设计阶段进行了半潜工况下的强度和稳性计算，连同半潜操作手册获得了中国船级社认可，因此严格按照半潜操作流程进行操作即可满足半潜稳性和强度要求。对于 4）船舶强度方面，可采用船舶行业通用的分析方法和手段进行，与船舶普通浮况相比，船舶下潜和坐底阶段的强度分析仅为结构模型边界条件的区别，由于本文篇幅限制不做讨论。本文仅对 2）下潜/上浮过程中的锚固定位和 3）坐底稳性结合海上风场条件进行个案化分析。

3 "三航工 5"坐底作业分析

3.1 锚固定位

在"三航工 5"下潜/上浮过程中，采用八字锚系泊的方式进行锚固定位，抵御环境荷载。由于不同形状的半潜驳有所区别，"三航工 5"的锚泊系统如果按照常规的舾装数配置，可能无法满足下潜/上浮过程中的锚固定位要求，存在走锚风险。所以根据舾装数(3 138.5)实船配置艏锚 2 口，为海军锚，每口重量 10 t。另外船尾配置艉锚 2 口，与艏锚规格相同。船首又另配斯贝克锚 1 口，重 8.7 t，如图 2 所示。

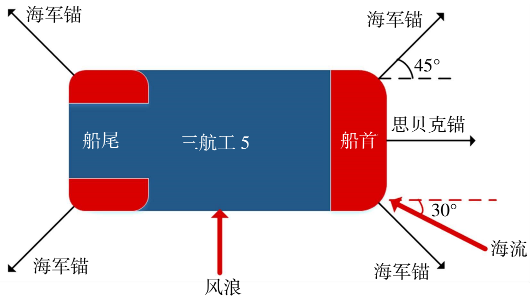

图 2 "三航工 5"锚泊示意图

Fig. 2 Anchoring of *Sanhang Gong* 5

"三航工 5"下潜操作过程中为避免漂移，选择在适宜的风浪环境条件下进行，并始终保持八字系泊形态(图 2)。"三航工 5"下潜过程中，随着吃水的逐渐增加受海流作用的船体浸没表面积也不断增加。由于船舶所受的海流力与海流的流速平方成正比(式(1)，拖曳力系数参考 Munson 的相关教材[2])，当海流较大时"三航工 5"在不同吃水条件下所受到的海流力差异较大(表 2)。

$$F = \frac{1}{2}\rho C_d A V^2 \qquad (1)$$

式中：ρ 为海水密度；A 为迎流面积；V 为海流流速。

表 2 "三航工 5"顺流海流力

Table 2 Current load of *Sanhang Gong* 5 under head sea condition

t

流速/(m·s⁻¹)	吃水/m 4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
1.0	8.37	12.55	19.28	28.56	37.84
1.2	12.05	18.07	27.77	41.13	54.50
1.4	16.40	24.60	37.80	55.99	74.18
1.6	21.42	32.13	49.36	73.12	96.88
1.8	27.11	40.67	62.48	92.55	122.62
2.0	33.47	50.20	77.13	114.26	151.38
2.2	40.50	60.75	93.33	138.25	183.17
2.3	44.26	66.39	102.01	151.10	200.20

由于作业风场为淤泥底质条件，"三航工 5"所采用的海军无杆锚的抓地力与锚重比值大概为 3∶1[3]。当流速达到 2.3 m/s、吃水接近 12 m 时，海流力将达到 200 t。顺流条件下，船首方向 2 口无杆海军锚和 1 口斯贝克锚同时起作用可提供沿海流方向的抓地力不足 70 t，远小于海流力，此时"三航工 5"将出现走锚，影响施工安全。

为应对走锚风险，可行的办法是严格限制作业时的海水流速，寻找合适的作业窗口。经计算，当“三航工 5”严格顺流下潜作业时，流速限制应在1.3 m/s 以下。由于下潜作业持续时间较短（约1.5 h），寻找流速较低的作业窗口是可行的（如平潮期和停潮期）。

3.2　坐底稳性

当船舶坐落海床之后，环境荷载作用于船体将迫使船舶出现倾斜与平移的趋势，形成倾覆力矩和滑移力。船舶依靠海床的支撑抵消倾覆力矩、依靠船底与海床之间的摩擦力来抵消滑移力，使得船舶稳定于海床的能力就是坐底稳性。中国船级社《海上移动平台入级规范》[4]规定了在坐底稳性中需要考虑的 3 个技术指标：抗倾覆稳性、抗滑移稳性和地基承载力，并考虑海底冲刷的影响，可作为“三航工 5”坐底的相关计算参考。

在计算坐底稳性时需要考虑风、浪、流的共同作用。从抗倾覆和抗滑移 2 项坐底稳性指标来说，最为不利的风浪流组合是当三者沿同一方向横向对“三航工 5”入射。“三航工 5”在下潜过程中，由于锚固定位船舶时需要严格顺流作业，考虑该风场的海流方向较为一致，最大的涨落潮流流向夹角的余角为 30°，因此实际坐底时海流方向不会横向入射。在计算时，可认为严格按照顺流下潜作业的“三航工 5”，最不利的海流方向为沿船长偏 30°方向（图 2）。

计算环境荷载时，风和流荷载可认为是定常荷载，海水流速 2.3 m/s、风速（采用 6 级风的数据）13.8 m/s。波浪力的计算采用基于边界元法的水动力计算：首先通过边界元法计算波浪力传递函数 $TransF$（图 3），通过式（2）计算得到波浪力谱 $S_R(\omega)$（图 4）。

$$S_R(\omega)=TransF^2\cdot S(\omega) \tag{2}$$

其中：$S(\omega)$为波浪谱（图 5）。对于浅水波条件的随机涌浪，可选取 PM 谱。

3 h 随机海况的最大波浪力可采用计算对应某一超越概率 α 的波浪力的方法（式（3））得到。根据风场实测环境数据，选取有义波高 1 m 的随机波计算波浪力。经计算，对应 12 m 吃水、横浪条件下（图 2）的最大波浪力为 353 t。

$$F_\alpha=\left[\sqrt{2\ln\frac{1}{\alpha}}+\frac{1}{\sqrt{2\ln\frac{1}{\alpha}}}\right]\sqrt{m_0} \tag{3}$$

其中：m_0 为 $S_R(\omega)$的零阶矩。

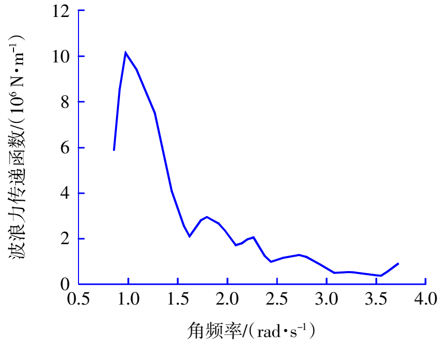

图 3　波浪力传递函数

Fig. 3　Wave force transfer function

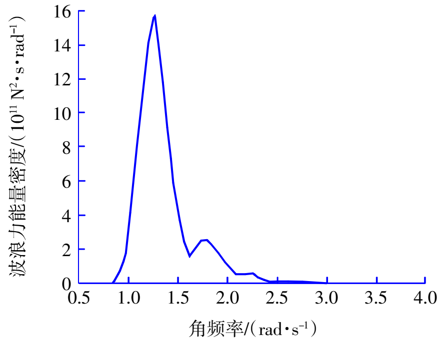

图 4　波浪力谱

Fig. 4　Wave force spectrum

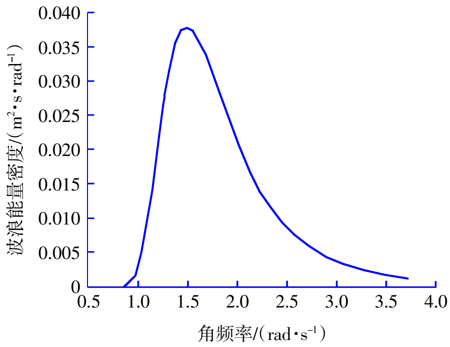

图 5　波浪谱

Fig. 5　Wave spectrum

坐底稳性的抗力计算需要考虑船底海床接触面积的掏空。对于桩式结构物的冲刷研究表明，冲刷深度会随着雷诺数的增大而增大[5]。但大尺度结构基础的冲刷相对较为复杂，并且同时需要关注冲刷导致的底部掏空。王仲捷[6]针对坐底式钻井平台的冲刷进行了试验研究，研究结果表明不同的波流入射角度所引起的流线区别会导致冲刷掏空出现较大差别，其试验测出最大掏空面积比例为 15%。由此认为中国船级社《海上移动平台入级规范》中规定的 20%掏空面积是足够保守的，可适用于“三航工 5”坐底稳性的抗力计算。

在抗倾覆稳性计算中，不考虑任何海床的有利作用(如吸附力)[2]，抗倾覆弯矩完全由船舶自身重力来平衡。计算结果表明，6 级风况、流速 2.3 m/s、有义波高 1 m 的随机波浪海况下倾覆力矩为 29 837 t·m。考虑船底 20%面积掏空、超加压载水为 3 000 t 时，抗倾覆力矩约为 51 637 t·m，可以满足抗倾覆稳性衡准要求。

在抗滑移稳性计算中，抗滑移力的计算需要考虑结构-土相互作用，是目前业界计算方法差异较大的部分。针对淤泥底质条件，目前业界使用较多的是 API 方法[7](式(4))和 DNV 方法[8](式(5))。DNV 方法与 API 方法的主要区别在于 DNV 方法考虑了一定的被动土压力。

$$F_k = c \cdot A \tag{4}$$

$$F_k = c \cdot A + 4 \cdot c \cdot A_S \tag{5}$$

式中：c 为土的不排水抗剪强度；A 为平台坐底面积；A_S 为船体埋深部分所形成的侧向投影面积。由于“三航工 5”的船底具有一定倾角(0.9°)，因此当其垂直坐底时，入泥深度随着超加压载水量发生变化，进而船底的坐底面积会发生变化，最终影响抗滑移力(图 6)。采用抗倾覆稳性计算相同的环境条件，得到滑移力为 574 t，按照规范要求的安全系数 1.4 进行复核，若采用 API 方法计算抗滑移力，超加压载水量需达到 4 500 t。

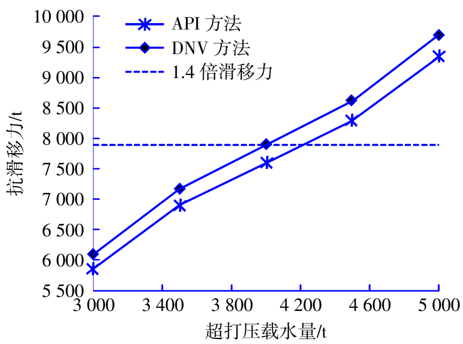

图 6　“三航工 5”不同超打压载水量抗滑移力

Fig. 6　Sliding resistance for *Sanhang Gong* 5 under different extra amount of ballast water

当“三航工 5”坐底吊装作业时，吊机吊重力矩使得基底最大压力有所增加，当超加压载水为4 500 t 时，将无法满足地基承载力的要求。为保证坐底船不产生非均匀沉降，可通过减少压载水的手段来保持地基承载能力。经验算，考虑最不利吊重力矩为 8 000 kN·m 时，对于初始压载量为 4 500 t 的工况，压载水需卸载至 2 500 t 以保证满足地基承载力的要求。此时，由于超加压载水 4 500 t 所形成的入泥深度不会随着压载水的卸载而发生变化(即海床变形不会回弹)，抗滑移力保持不变。同时，压载水卸载至 2 500 t 时，抗倾覆力矩约为 43 030 t·m，安全系数为 1.44。

4　结语

1）“三航工 5”在设计阶段已进行半潜工况的计算，在实船作业过程中，严格按照半潜操作手册进行操作可满足稳性和强度指标，无需进行个案分析。

2）从风场淤泥底质条件以及所配锚的抓力系数角度分析，证明了“三航工 5”在下潜、上浮过程中存在走锚风险。基于作业安全考虑，必须采用限制作业流速条件的方式进行操作，即流速限制在 1.3 m/s 以内，选择平潮或停潮期间进行下潜、上浮，可避免走锚发生。

3）当“三航工 5”坐底后，其抗倾覆稳性完全由其自身重量提供，3 000 t 超压载水即可以满足抗倾覆稳性衡准要求。然而，计算表明船舶超加压载水量需提高至 4 500 t 才能满足抗滑移稳性的要求。但超压载水量增加至 4 500 t 之后，无法满足地基承载力的要求，因此需采用预压载 4 500 t 后将超加压载水减小至 2 500 t 的方法来满足地基承载力的要求。

参考文献：

[1]　练学标. 潮间带风机坐底安装专用船施工技术[J]. 中国港湾建设, 2019, 39(12): 60-63.
LIAN Xue-biao. Construction technology of special vessel for intertidal wind turbine bottom installation[J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(12): 60-63.

[2]　MUNSON B R, OKIISHI T H, HUEBSCH W W. Fundamentals of fluid mechanics[M]. 7th ed. 2013.

[3]　GERWICK JR B C. Construction of marine and offshore structures [M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.

[4]　CCS. 海上移动平台入级规范[S].
CCS. Mobile offshore platform rule[S].

[5]　SHEN H W, SCHNEIDER V R, KARAKI S. Local scour around bridge piers[J]. Journal of Hydraulics Engineering, 1969, 95(6): 1 919-1 940.

[6]　王仲捷. 海上座底式平台冲刷实验研究[J]. 天津大学学报, 1998, 31(5): 644-649.
WANG Zhong-jie. The experiment on scour prevention of offshore submersible platform[J]. Journal of Tianjin University, 1998, 31(5): 644-649.

[7]　API RP 2A-WSD-2014, Planning, designing, and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S].

[8]　Dnv Classification Note No.30.4, Foundations[S].