



利用极限质心高度的半潜船装载能力分析

赵娟, 应宗权, 林美鸿, 王雪刚
(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 结合某半潜船空载静水力数据和液舱的相关数据提出一种半潜船质心高度计算方法, 然后根据半潜船的稳性变化曲线得到其稳性随吃水变化的控制点, 通过对比半潜船的质心高度与极限质心高度来确定其装载大型沉箱及异形型沉箱的施工可行性, 可进一步形成具有查询、计算功能的数据库为施工人员决策提供参考。

关键词: 半潜船; 沉箱; 装载能力; 极限重心高度; 稳性

中图分类号: U 674. 18

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)03-0192-04

Analytical method for loading capacity of semi-submerged ship by extreme height of gravity center

ZHAO Juan, YING Zong-quan, LIN Mei-hong, WANG Xue-gang
(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: A method is presented for calculating the gravity center of semi-submerged ship based on the hydrostatic data and tank data. The control points of stability changed over ship draft is obtained from stability curve. Then, the construction feasibility of loading the large caisson and special shaped caisson is determined by comparing the height and extreme height of the gravity center of semi-submerged ship, and a database with query function and calculation function is formed, which can be used to provide references for construction.

Keywords: semi-submerged ship; caisson; loading capacity; extreme height of center of gravity center; stability

半潜船是一种专门用来承运重大件货物的特种船舶, 国内港口领域关于半潜船载运沉箱的历史始于 20 世纪 90 年代, 1993 年深圳妈湾电厂一期工程循环水泵房下部结构施工中就成功采用了半潜驳浮箱法的施工工艺^[1], 1995 年一航局利用半潜驳“重任 1501”成功完成了香港南丫岛电厂的沉箱浮运任务, 从山东日照到香港运距约 1 200 n mile^[2]。半潜船运载大型构件与传统的“湿拖”运输方式(由拖轮拖带漂浮在水面上的物体)相比具有更安全、更快捷的优点, 且在工程进程上具有明显的速度优势, 目前已被广泛应用于码头、防波堤、船坞等重力式结构建设。

半潜船在主尺度比、性能标准、结构形式、

设备布置等方面与普通货船相比有明显差异^[3-4]。通常型深较小、有宽敞平坦的甲板, 因而有较大的宽深比 B/D , 导致其最大复原力臂对应角比其他船型要小; 同时, 由于货物超重、质心超高, 货物形状不确定, 以及半潜船特殊的装卸方式和甲板运输等因素, 使得半潜驳的海上运输更具风险性, 稍有不慎就会造成巨大的损失。因此, 鉴于半潜船的特殊性和高风险性, 有必要对半潜船完整稳性和装载能力开展深入、细致的研究。本文结合一艘半潜船, 通过静水力计算探究其稳性特点, 并针对不同几何尺寸沉箱的运载可行性进行计算, 有利于更好地发挥半潜船的最大经济效益和指导施工操作。

收稿日期: 2014-12-18

作者简介: 赵娟 (1982—), 女, 硕士, 工程师, 从事结构检测评估及水动力计算分析。

1 半潜船稳性分析

1.1 半潜船特性参数

非自航半潜甲板驳适用于沿海航区的下潜、起浮作业, 近海航区满载拖航调遣。其结构为: 箱形船体、四角塔楼、艏艉船底斜切、举升甲板无脊弧

无梁拱、圆弧艏部、单底单甲板钢质焊接。本文研究的半潜船主要参数为: 船长 L 为 68.4 m, 型宽 B 为 36.8 m, 型深 D 为 5.8 m, 最大沉深 d 为 24.8 m, 最大举力为 8 000 吨级, 拖航运载力为 5 500 吨级。全船共设 18 个压载水舱, 总布置见图 1。

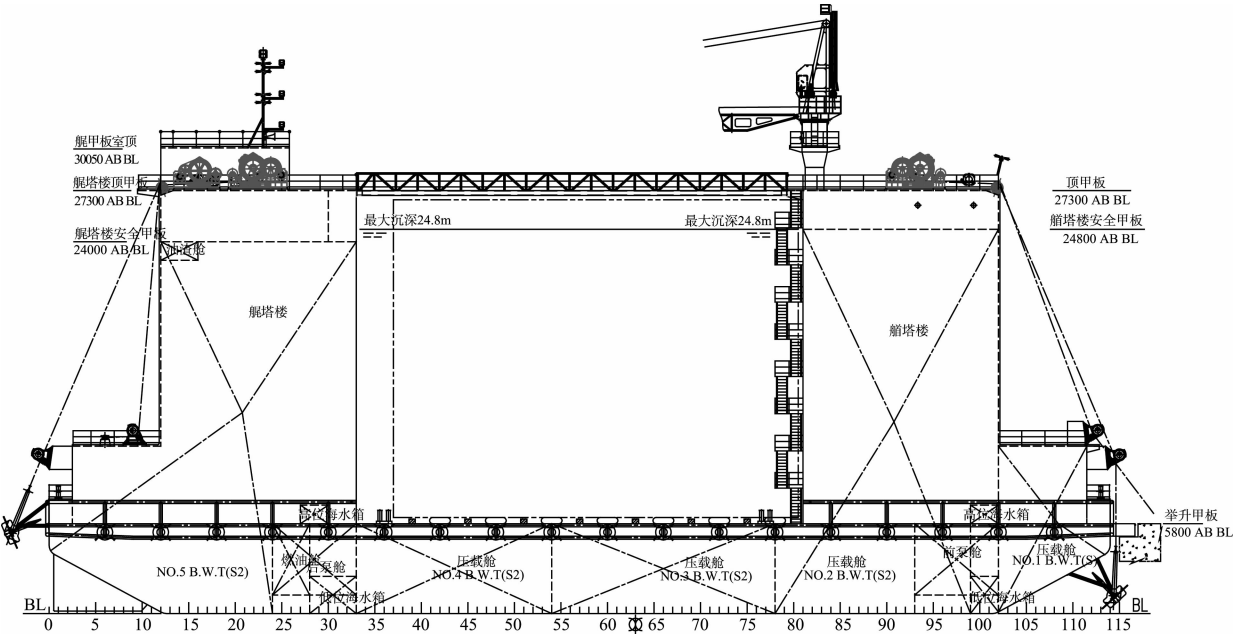


图 1 半潜船总布置

1.2 半潜船稳性分析

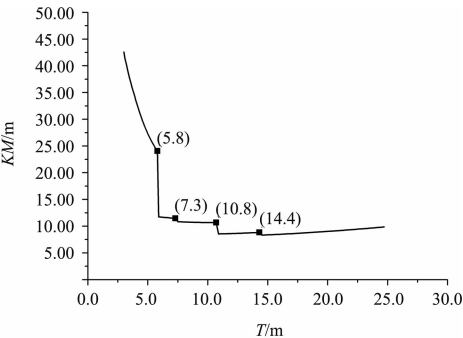
半潜驳船的稳性主要包括航行状态稳性和半潜作业状态稳性两方面。其中, 半潜船航行阶段的稳性问题主要是大倾角稳性, 下潜作业过程的稳性则是初稳性 (或称小倾角稳性)^[5]。初稳性是衡量船舶稳性的重要指标, 当初稳性高度过低时, 船舶极有可能处于不稳定平衡状态, 一旦受到风浪扰动就可能发生倾覆。初稳性高 GM 可表示为:

$$GM = KM - KG = KB + BM - KG \quad (1)$$

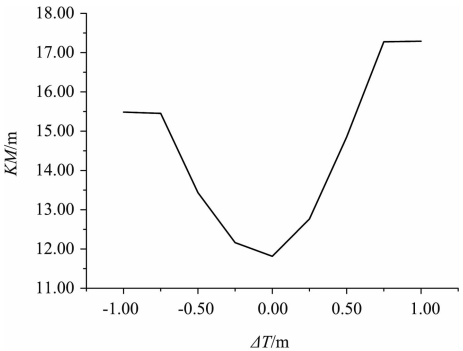
$$BM = \frac{I_T}{\nabla} \quad (2)$$

式中: KM 为初稳心高度; KG 为质心高度; KB 为浮心高度; BM 为初稳心半径; I_T 为水线面面积惯性矩; ∇ 为总排水量。 KM 取决于船舶本身的结构特点及实际吃水的大小, 对于特定船舶其随吃水变化的 KM 值无法人为改变; 而 KG 则可以通过人为改变货物的质心高度加以调整, 保证其处于适当的范围。因此, 通过分析半潜船 KM 值随吃水的变化规律, 可初步确定 KM 和 GM 达到最小时的吃水状态, 以此为船舶操作人员提供指导。

半潜船的静水力曲线见图 2。



a) 横稳心高度KM



b) KM随纵倾变化曲线(T=5.9 m)

图 2 半潜船静水力曲线

从图 2a) 可以看到: 1) 半潜船 KM 曲线存在着非常明显的间断, 突变出现在载货甲板入水处 ($T=5.8$ m), 由于甲板入水后水线面积急剧减少导致 KM 值发生骤降; 2) 甲板入水后 KM 值在 7.3、10.8、14.4 m 平台陆续入水前后出现台阶式下降, 在 10.8 m 平台入水后 KM 值降至 8.55 m, 10.8 m 后 KM 值略有回升并在 14.4 m 平台入水后降至最小值 8.32 m; 3) 在 10.8 ~ 14.4 m 吃水范围内船舶稳性较差, 此过程中可采取相应措施加以改进。

图 2b) 是半潜船吃水 5.9 m 时 KM 随纵倾的变化曲线, 纵倾以尾倾为正值。当纵倾为零时 KM 值最小为 11.81 m, 随着艏倾和艉倾的增加船舶初稳心高度不断上升, 艉倾 0.75 m 时 KM 值为 17.28 m, 船舶稳性得到明显改善。因此, 半潜船在主甲板没入水中或露出水面的过程中, 通常会要求使船舶保持合理的纵倾, 即通过增大水线面积的方法来确保船舶获得足够的稳性。

2 半潜船装载能力分析

上述半潜船主要用于装运和沉浮港口水工的大型混凝土沉箱, 可装载 5 500 吨级沉箱在沿海或遮蔽海域作业, 在遮蔽航区作业时具有 8 000 吨级举力。面对沉箱的大型化发展, 在船体本身及船型特点已经确定的前提下结合不同几何尺寸 (尤其是高宽比小) 的沉箱构件进行船舶下潜施工可行性分析, 可为施工决策提供有效参考。

2.1 下潜施工装载能力分析

极限质心高度是指船舶恰能满足稳性要求的质心高度。半潜船的极限质心高度曲线见图 3, 它是船舶满足规范稳性要求的各极限质心高度曲线的下限包络线。因此, 以下潜施工分析为例, 通过对比下潜过程中半潜船的质心高度是否在极限质心高度曲线以下来确定装载大型沉箱及异形沉箱的施工可行性。

根据静水力曲线可知, 在 10.8 m 和 14.4 m 平台入水后, 半潜船的稳性在进一步恶化后逐步回升, 故计算中将以吃水 10.8 m 和 14.4 m 两个控制

节点来检验沉箱下潜过程中的稳性是否满足要求。半潜船质心高度计算, 以 10.8 m 为例, 设定该工况下纵倾 t 为 0.50 m (艉倾为正), 船舶吃水 10.8 m, 平均吃水 T 为 11.05 m, 计算步骤如下:

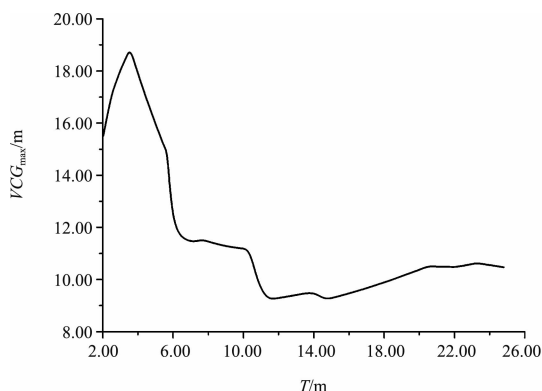


图 3 半潜船极限质心高度曲线

1) 由静水力结果和沉箱尺寸求得该工况下的浮心纵向坐标 X_B :

$$X_B = \frac{\Delta_1 X_{B1} + \Delta_2 X_{B2}}{\Delta_1 + \Delta_2} \quad (3)$$

式中: Δ_1 和 X_{B1} 分别为半潜船无压载时的排水量和浮心纵坐标; Δ_2 和 X_{B2} 分别为沉箱的排水量和浮心纵坐标。

2) 设定纵倾 t 可得到纵倾力矩, 再由浮心纵向坐标可求出该工况的质心纵向坐标 X_G 和压载水质心纵向坐标 X_{G3} 。

$$t = \frac{M_T}{MTC} \quad (4)$$

$$M_{RL} = \Delta GM_L \cdot \frac{t}{L} = \Delta (X_G - X_B) \quad (5)$$

$$X_G = \frac{W_1 X_{G1} + W_2 X_{G2} + W_3 X_{G3}}{W_1 + W_2 + W_3} \quad (6)$$

式中: M_T 为纵倾力矩; MTC 为单位长度纵倾力矩; M_{RL} 为纵倾时的复原力矩; GM_L 为纵稳性高; L 为船长; W_1 和 X_{G1} 为空船质量和质心纵向坐标; W_2 和 X_{G2} 为沉箱质量和质心纵向坐标; W_3 和 X_{G3} 为压载水质量和质心纵向坐标。

3) 由压载水质量和纵向坐标通过配载得到压载水垂向坐标 Z_{G3} , 最后求得该工况的质心垂向坐标 Z_G 。

$$Z_G = \frac{W_1 Z_{G1} + W_2 Z_{G2} + W_3 Z_{G3}}{W_1 + W_2 + W_3} \quad (7)$$

4) 对比该吃水工况下半潜船的质心高度 Z_G 与极限质心高度, 若前者小于后者则说明该工况下半潜船稳性满足规范要求。

2.2 半潜船下潜施工装载能力分析实例

结合操作手册中目标搬运物 (5 554、5 604 t 沉箱) 的规格, 将运载沉箱尺寸及相关参数设置如下, 沉箱混凝土密度为 2.5 t/m^3 , 底板厚度 0.7 m , 平面布置见图 4。沉箱上驳时需由船艏拖入, 沉箱与塔楼应预留 0.6 m 的间距, 故本半潜船所能装载沉箱的最大尺寸为长 27.6 m 、宽 26.6 m 。装载手册下潜工况计算中垫木高度为 1.2 m , 本次计算中垫木高度取 0.3 m 。随着垫木高度的降低, 沉箱的质心高度将会降低、半潜船的稳性和运载潜能将会增加。下面将以装载 $5\,700\text{ t}$ 沉箱为例, 对可装载沉箱的尺寸进行计算。

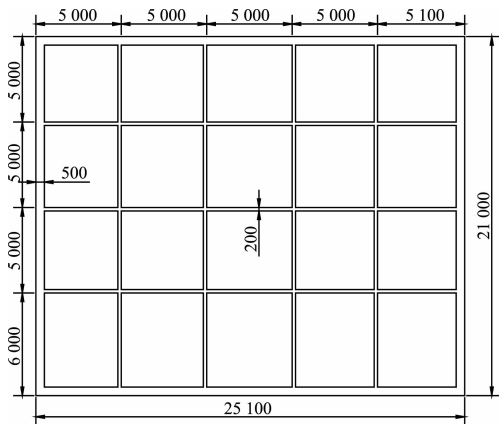


图 4 沉箱平面布置 (单位: mm)

1) 考虑到半潜船的最大沉深 24.8 m , 首先剔除自浮后吃水不能满足要求的沉箱尺寸, 满足要求的沉箱尺寸见表 1。

表 1 沉箱尺寸及参数		
长度/m	宽度/m	高度/m
22.0	20.4	30.82
23.0	19.8	30.45
24.0	18.4	29.41
25.0	17.7	29.26
26.0	17.1	29.03
27.0	16.5	28.81
27.6	16.2	28.62

注: 表中仅列出 $5\,700\text{ t}$ 沉箱对应长度的下限宽度。

2) 吃水 11.05 m 极限质心高度 9.12 m , 吃水 14.55 m 极限质心高度 9.16 m 。根据 2.1 节中的计算步骤进行计算, 计算结果见表 2。

表 2 5 700 t 沉箱下潜施工控制工况质心高度						
长度/m	宽度/m	高度/m	质心/m	$Z_G(10.8)/\text{m}$	$Z_G(14.4)/\text{m}$	宽高比
22.0	21.2	30.05	13.224	9.097	8.665	0.705
23.0	20.2	30.07	13.240	9.104	8.670	0.672
24.0	18.4	29.41	13.061	9.079	8.636	0.626
25.0	17.7	29.26	12.992	9.057	8.618	0.605
26.0	17.1	29.03	12.884	9.022	8.589	0.589
27.0	16.5	28.81	12.784	8.990	8.562	0.573
27.6	16.2	28.62	12.695	8.962	8.538	0.566

可以看出, 基于半潜船的极限质心高度曲线能够对各种规格尺寸沉箱的施工可行性进行分析判断。以 $5\,700\text{ t}$ 沉箱下潜施工为例, 满足下潜施工沉箱的质心高度均小于 13.25 m , 宽高比大于 0.56 , 且表 3 中沉箱各长度对应的下限宽度的连线近似为一条直线, 该线及其上区域的沉箱规格满足下潜施工稳性要求。

3 结论

1) 半潜船 KM 曲线存在着非常明显的间断, 突变出现在载货甲板入水处 ($T=5.8\text{ m}$), 及 7.3 、 10.8 、 14.4 m 平台入水处, 在 $10.8\sim14.4\text{ m}$ 吃水范围内船舶稳性较差, 应采取相应措施加以改进。

2) 在 KM 曲线突变位置可通过适当的纵倾来增大水线面积, 确保船舶获得足够的稳性。以半潜船吃水 5.9 m 为例, 纵倾为零时 KM 值最小为 11.81 m , 艏倾 0.75 m 时 KM 值为 17.28 m , 船舶稳性得到明显改善。

3) 通过对比下潜过程中半潜船的质心高度是否在极限质心高度曲线以下来确定装载大型沉箱及异型沉箱的施工可行性, 可进一步形成具有查询、计算功能的数据库为施工人员决策提供参考。

4) 以装载 $5\,700\text{ t}$ 沉箱下潜施工为例, 计算结果表明满足下潜施工沉箱的质心高度均小于 13.25 m , 宽高比大于 0.56 ; 且沉箱各长度对应的下限宽度的连线近似为一条直线, 可通过插值计算其余长度的对应值。

(下转第 200 页)