

考虑自由液面影响的多凸体结构浮态计算方法

刘虢 周全 樊天慧 陈超核

(华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对液舱内自由液面对浮态和稳性的影响, 文中提出了一种新的多凸体组合结构浮态算法。该方法将浮体和液舱分解成多个四面体单元, 通过分析每个四面体与水面/液面的相对位置关系来确定浮体的浮力和浮心以及液舱液体的重心。该方法还提出了一种改进的双重迭代法用来确定多凸体组合结构的浮态: 内层迭代法模拟浮体的升沉运动, 得到浮体外的水面方程和液舱内的液面方程; 通过外层迭代法模拟浮体的旋转运动。两种迭代方法交替进行, 直至浮体的重力作用线和浮力作用线之间的距离满足精度要求, 同时重力等于浮力。自编程序对某半潜船和某半潜式海洋平台的多种典型工况进行了浮态计算, 同时也考虑了自由液面影响。此外利用 Maxsurf 建模进行了对比分析, 还利用 AUTOCAD 进行了精度验证。对照结果表明: 该研究提出的算法可以考虑自由液面对浮态的影响, 原理清晰, 收敛性好; 算法无论对传统的单凸体结构(例如单体船), 还是多凸体结构(例如多体船、漂浮式海洋平台等)均更容易取得准确解, 且计算效率更高; 算法可以实现“搭积木”式的建模方式, 多工况建模时可以极大地减小工作量; 算法无需依赖国外第三方图形平台(比如 AUTOCAD、CATIA), 可为我国相关工业软件的国产化打下良好的基础。

关键词: 自由液面; 浮态; 四面体; 双重迭代

中图分类号: U662

文章编号: 1000-565X(2024)05-0062-09

近年来, 随着陆地资源的日渐匮乏, 海洋资源的开采和利用成为了焦点所在, 为了满足复杂的任务需求, 以浮式海洋平台为代表的“多凸体^[1-2]”组合结构相继涌现。由于浮式海洋平台结构的复杂多变, 它的构造方法往往以任意方式组合多个单凸体结构, 这样的构造方式通常不按固定的顺序沿某一方向进行排列。因此, 传统浮态算法沿“单轴”布置积分剖面, 较难得到这类多凸体结构的准确浮态。但随着计算方法的多元化, 浮态分析方法也推陈出新。类有限元法^[3]作为近年来比较经典的浮态

计算方法, 受到广大学者的关注: Calabrese 等^[4-5]以有限元分析法为基础, 提出了一种类有限元法计算船舶的浮态。Zhang 等^[6]也通过结合有限元程序, 提出了一种面向力的方法来计算复杂船型的浮态曲线。也有学者另辟蹊径, Sequeira 等^[7]利用非线性模型, 通过浮体垂直/倾斜平衡位置与质心垂直位置的函数关系得到分叉图, 说明了平衡位置对浮体浮态的影响。黄晨^[8]提出一种基于表面压力法的静水力计算方法, 该方法主要通过计算离散浮体浸入水下部分表面单元受到的压力, 得到浮体的静水力

收稿日期: 2023-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51709118); 广东省促进经济高质量发展专项(海洋经济发展)重点项目(GDNRC[2021]39)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51709118) and the Special Fund for Promoting High-Quality Economic Development (Marine Economic Development) Key Project of Guangdong Province (GDNRC[2021]39)

作者简介: 刘虢(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要从事船舶与海洋结构物设计制造研究。E-mail: liuxiao@scut.edu.cn

性能。刘梅梅等^[9]基于非均匀有理B样条(NURBS曲面)的湿表面压力积分算法开发了半潜驳稳性评估程序OSTAB。基于CATIA的二次开发,左仔滨等^[10]提出了一种适用性强的漂浮特性计算方法和分析程序,张明霞等^[11]实现了模型的浮态和稳性的自动计算。尽管利用CATIA二次开发来进行浮态求解精度可靠并具有很高的工程价值,但该方法对国外软件的依赖性较高。

为了解决自由液面对浮体浮态的影响。以往学者在解决自由液面对浮态和稳性的影响上做了许多研究。马坤等^[12]通过对不同形状的规则液舱进行自由液面修正,证实了按最大自由液面力矩对自由液面进行修正的计算方法的合理性。付田等^[13]以一艘包含液舱的趸船为例,验证了船体湿表面上静水压力合矢量对船体重心位置偏移进行直接计算的准确性。贾清振^[14]基于CATIA所绘制的三维模型,通过CSharp编程实现了自由液面修正。李洛东等^[15]以有限元网格为基础,通过对网格进行几何拓扑分析、向量运算等手段,计算液舱在不同液位的重心位置,以完成浮体静水力参数的相关计算。

本研究基于四面体方法,提出了一种考虑自由液面影响的多凸体组合结构浮态计算方法。该方法采用了文献[16]的双重迭代法,将浮体和液舱离散为多个四面体,浮体姿态发生变化时会同时更新舱内液体的重心坐标。

1 原理

1.1 水平面方程

假定浮体固定,水平面的法向量为 $\langle a, b, c \rangle$,平面某点坐标为 (x_o, y_o, z_o) ,则水平面方程为

$$a(x - x_o) + b(y - y_o) + c(z - z_o) = 0 \quad (1)$$

1.2 四面体网格

四面体是最基本的三维体(如图1所示),任何复杂的结构都可分解为多个四面体。如图2所示,圆柱体在划分为四面体的过程中,首先将圆柱体划分为多个三棱柱,然后再对三棱柱进行四面体划分。对于三棱柱 $ABCDEF$,可将其分解为四面体 $ABCD$ 、 $BDEF$ 和 $BCDF$ 。如图3所示,对于六面体 $ABCDEFGH$,可将其分解为四面体 $ABCE$ 、 $CEGH$ 、 $BCEH$ 、 $BFGH$ 和 $BCDH$ 。

四面体体积和形心坐标的计算方法分别为式(2)和式(3):

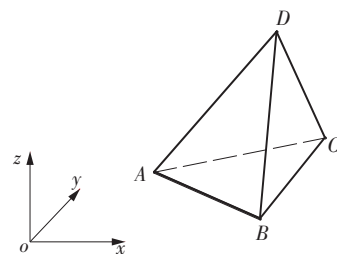


图1 四面体

Fig. 1 Tetrahedron

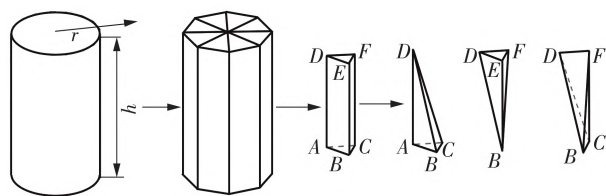


图2 圆柱体与三棱柱分解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the decomposition of a cylinder and a triangular prism

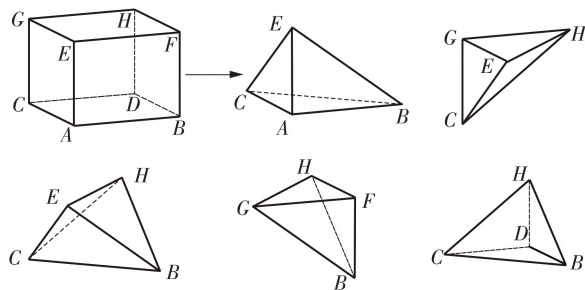


图3 长方体分解示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cuboid decomposition

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_A - x_D & y_A - y_D & z_A - z_D \\ x_B - x_D & y_B - y_D & z_B - z_D \\ x_C - x_D & y_C - y_D & z_C - z_D \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x = \frac{x_A + x_B + x_C + x_D}{4} \\ y = \frac{y_A + y_B + y_C + y_D}{4} \\ z = \frac{z_A + z_B + z_C + z_D}{4} \end{cases} \quad (3)$$

其中: V 为四面体体积; x_i 、 y_i 、 z_i 为四面体顶点坐标, $i = A, B, C, D$ 。利用水面以上顶点的数量 n ($n=0, 1, 2, 3, 4$), 可将四面体与水面的相对位置关系分为5种(图4列出其中3种, 其他两种为完全浸没水面和完全浮出水面)。

当水面与四面体相交时, 利用水面将四面体分割为水上、水下两个部分, 如果水下多面体不是四面体(如图4(a)、4(b)所示), 则需对其进行进一步分割(如图5(a)、5(b)所示)。

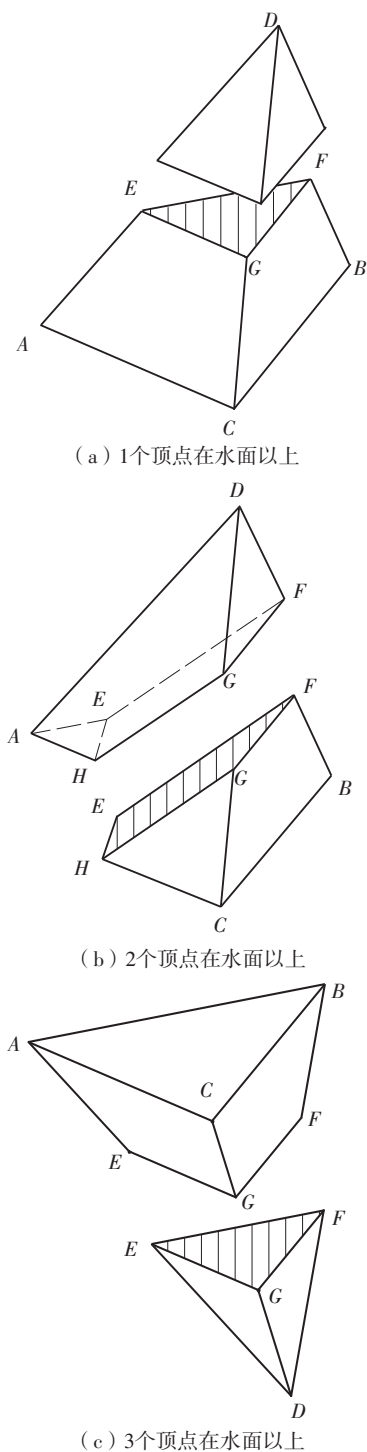


图4 四面体与水面的相交关系(仅列3种)

Fig. 4 Diagram of the intersection of a tetrahedron and a water-line surface (only three relationships listed)

2 考虑自由液面影响的改进双重迭代法

根据浮体的运动特性和浮体的平衡原理^[17], 采用两种迭代方式联合进行浮态计算, 这两种迭代方式分别模拟了浮体的升沉运动和旋转运动。

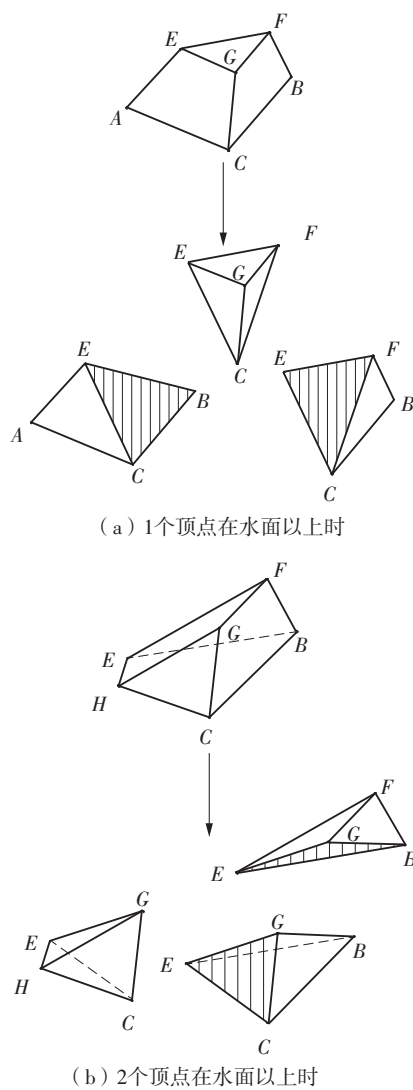


图5 水下三棱台分解图

Fig. 5 Exploded view of the underwater triangular table

2.1 模拟浮体升沉运动的迭代

该迭代方式约束了浮体5个方向上的自由度(横摇、纵摇、回转、横移、纵移), 浮体只能进行升沉运动。图6为浮体包围盒与水平面切割示意图, 从图中可见当水平面处于包围盒最高点 n 与最

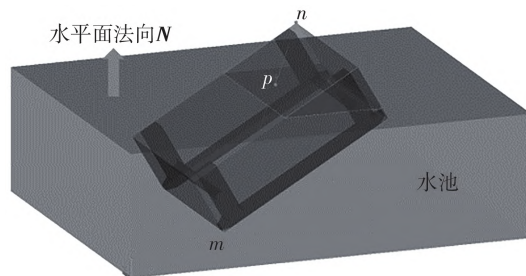


图6 水平面与浮体切割示意图

Fig. 6 Schematic diagram of horizontal plane and floating body cutting

低点 m 之间时,水平面与直线 mn 会有交点 p ,点 p 的求解方法见式(4)。

$$\begin{cases} x_p = x_m + t(x_n - x_m) \\ y_p = y_m + t(y_n - y_m) \\ z_p = z_m + t(z_n - z_m) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $0 \leq t \leq 1$, (x_m, y_m, z_m) 为点 m 坐标(包围盒最低点), (x_n, y_n, z_n) 为点 n 坐标(包围盒最高点), (x_p, y_p, z_p) 为点 p 坐标。

设 t 为设计变量,采用二分法对 t 进行迭代赋值,根据式(4)得到交点坐标,进而通过式(1)得到水平面参数,求得水平面方程;通过四面体单元与水平面的位置关系,计算出每个四面体单元的排水量,然后进行汇总得到整个浮体的排水量;当重力与浮力相等的时候(满足预设的精度即可)停止迭代,得到最终的水平面方程。相关的流程图如图7所示。图中, t_m 是为了求解水面方程给定的一个变量, t_0 和 t_1 是变量的端值。 V 为排水量, V_m 、 V_0 和 V_1 表示浮体在不同吃水状态下的排水量,与 t_m 、 t_0 和 t_1 对应。

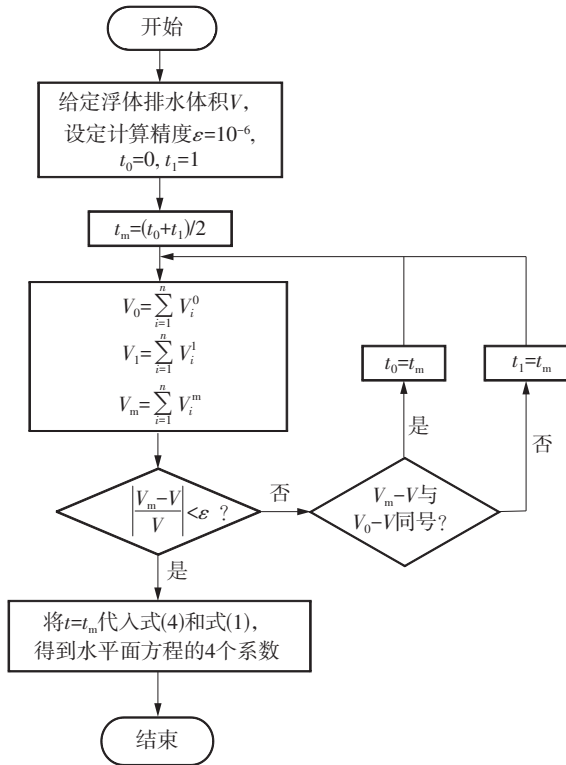


Fig. 7 Iterative diagram simulating the upheaving motion of a float

2.2 舱内液面方程计算

舱内液体平面方程计算与模拟浮体升沉运动的迭代法中水平面方程的计算方法相似。首先,对液

舱进行四面体网格划分,将其分解为多个四面体单元;然后,根据浮体的姿态参数确定舱内液体的液面法向 N (舱内液面方程待定);最后,当 N 一定,不同的液面方程对应不同的舱内液体体积 V ,当 V 确定为常量时,可以通过迭代法唯一确定舱内液体的平面方程。

2.3 模拟浮体旋转运动的迭代

模拟浮体升沉运动的迭代完成了浮体重力等于浮力的目标条件,但想要浮体处于平衡状态,还需要满足重力与浮力作用线相互重合。图8模拟了浮体的旋转运动。图中 l 为静稳性力臂。

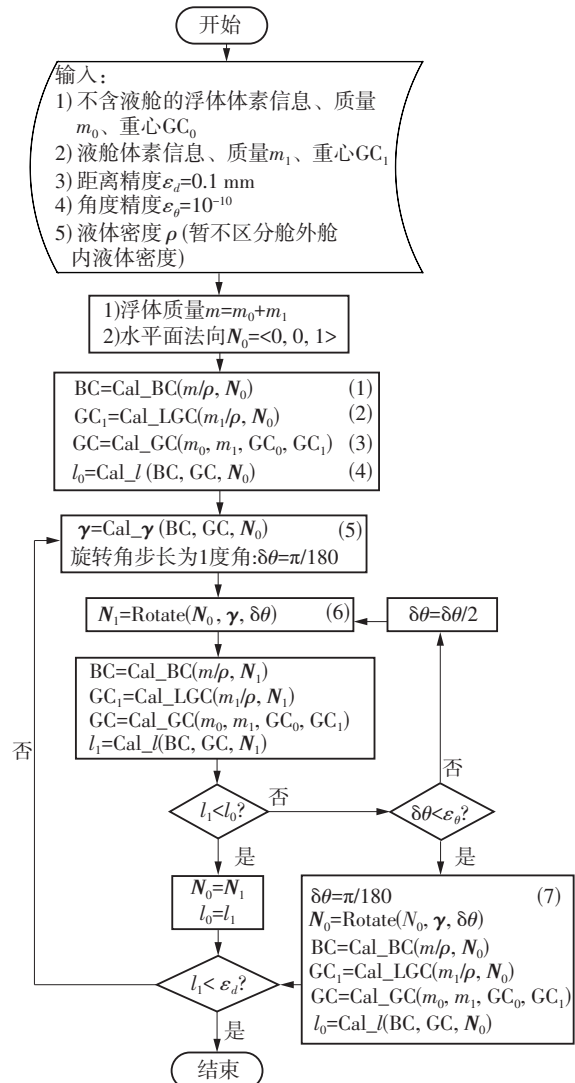


Fig. 8 Iterative diagram simulating the rotational motion of a float

(1)指定浮体排水体积 $V = m/\rho$ 和水平面法向 N_0 ,利用模拟浮体深沉运动的迭代法求水平面方程;然后分析每个四面体和水平面方程的关系;最

图 9(b) 中半潜船结构建模的体素信息如表 2 所示(假设坐标原点在船尾基线上)。半潜船模型中其他结构的体素建模与表格中的 3 种结构相似,更多的建模和计算情况请参考文献[18]。

表 3 示出了空载和加载情况下半潜船纵倾工况利用 3 种方法(四面体程序、Maxsurf、AutoCAD)得到的结果,通过该表可以知:本文解更加接近于 AutoCAD 精确解。针对半潜船空载纵倾实验,Maxsurf(200 剖面模型)计算时长需要 0.41 s,本文程序只需要 0.04 s。

表 2 半潜船体素数据

Table 2 Semi-submersible vessel element information

三棱柱 1	圆柱体 2	六面体 3
0,-16,7.5//三棱柱 顶点 1 的坐标	35,0,7.5//圆柱体 中心 1 的坐标	95,-16,0//六面体顶点 1 的坐标
20,-16,0//三棱柱顶 点 2 的坐标	14//圆柱体半径	102.5,-16,1.446//六 面体顶点 2 的坐标
20,-16,7.5//三棱柱 顶点 3 的坐标	35,0,20//圆柱体 中心 2 的坐标	110,-16,7.5//六面体 顶点 3 的坐标
0,16,7.5//三棱柱顶 点 4 的坐标	14//圆柱体半径	95,-16,7.5//六面体顶 点 4 的坐标
20,16,0//三棱柱顶 点 5 的坐标		95,16,0//六面体顶点 5 的坐标
20,16,7.5//三棱柱 顶点 6 的坐标		102.5,16,1.446//六面 体顶点 6 的坐标
		110,16,7.5//六面体顶 点 7 的坐标
		95,16,7.5//六面体顶 点 8 的坐标

表 3 半潜船 3 种方法的纵倾计算结果¹⁾

Table 3 Trim calculation results of three methods for semi-submersible vessels

立柱	AutoCAD 精确解/m	本文章 序解/m	Maxsurf 解 (200 剖面)/m	偏差/% (本文)	偏差/% (Maxsurf)
未加					
沉箱 2	5.0009	5.0011	4.9910	0.003	0.198
3	4.5528	4.5526	4.5650	0.004	0.268
4	4.5528	4.5526	4.5650	0.004	0.268
两个					
沉箱 1	9.0224	9.0290	8.9740	0.073	0.536
2	9.0224	9.0290	8.9740	0.073	0.536
3	7.5184	7.5206	7.5860	0.029	0.899
4	7.5184	7.5206	7.5860	0.029	0.899

1) 偏差 = |(程序值(Maxsurf 值) - AutoCAD 值) ÷ AutoCAD 值 × 100%|。

3.2 海洋平台

为了更进一步验证文中程序,针对某海洋平台的浮态实验(如图 11 所示),其长(L_2)926 mm,宽(B_2)800 mm,高(D_2)296 mm,空载质量(M_2)12.05 kg,

吃水(d_2)196.7 mm。在利用 Maxsurf 进行对比分析的同时,还利用 AutoCAD 得到的精确解来验证本文算法的精度。

将该海洋平台拆分可以得到:2 个浮体(如图 12 所示,每个浮体含 2 个三棱台和 1 个长方体)、2 个圆柱形横撑(如图 13 所示)和 4 个长方体立柱(如图 14 所示)。

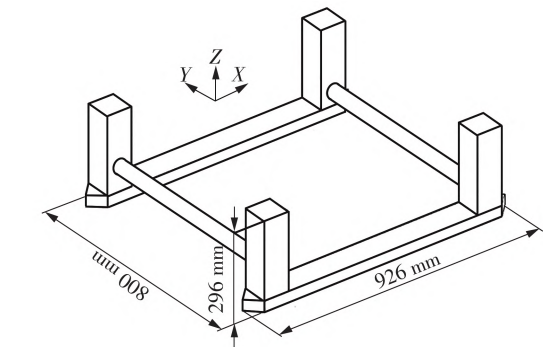


图 11 海洋平台模型示意图
Fig. 11 Schematic diagram of the offshore platform model

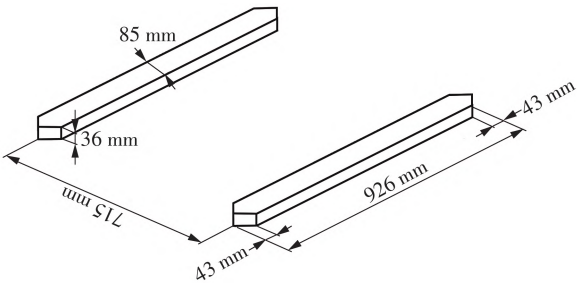


图 12 浮体
Fig. 12 Floats

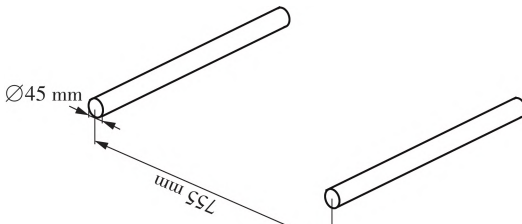


图 13 横撑
Fig. 13 Horizontal braces

3.3 精度对比

利用四面体程序和 Maxsurf 对带有液舱(如图 14 所示,每个立柱含 200 g 的淡水)的海洋平台进行了横倾、纵倾和任意倾斜的实验模拟(工况如表 4 所示),程序解和 Maxsurf 解如表 5 所示。

通过表 5 可知:程序解与 Maxsurf 解非常接近(偏差介于 0.091%~1.704% 之间),平均偏差为 0.823%。

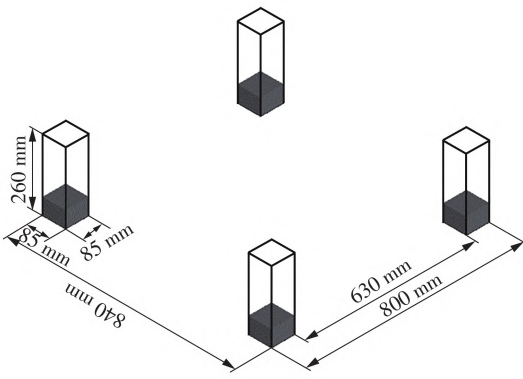


图 14 立柱(含液舱)
Fig. 14 Column(Liquid-containing chamber)

表 4 各工况下重心

Table 4 Center of gravity in each working condition

工况	0.4 kg 压载重心/mm			浮体和压载的合成重心/mm		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1	463.0	290.5	319.5	463.0	9.3	185.9
2	152.5	0.0	319.5	453.0	0.0	185.9
3	783.0	300.0	319.5	473.3	9.6	185.9

利用程序进行 3 种工况的浮态计算时, 将程序每次迭代的结果列于表 6 中, 对应折线图如图 15 所示。其中, 横倾工况的重力和浮力作用线距离经过 10 次迭代就结束, 其余两种工况也有相似的收敛规律。这说明本研究提出的算法的收敛性较好。

表 5 程序与 Maxsurf 的立柱刻度值¹⁾

Table 5 Program with Maxsurf's column scale values

立柱	工况 1(横倾)			工况 2(纵倾)			工况 3(任意倾)		
	程序值/mm	Maxsurf 值/mm	偏差/%	程序值/mm	Maxsurf 值/mm	偏差/%	程序值/mm	Maxsurf 值/mm	偏差/%
1	219.6	218.2	0.620	220.3	216.7	1.661	237.9	238.3	0.187
2	257.7	256.0	0.682	220.3	216.7	1.661	277.2	277.5	0.091
3	257.7	256.0	0.682	257.0	257.6	0.233	239.5	236.0	1.503
4	219.6	218.2	0.620	257.0	257.6	0.233	200.2	196.8	1.704

1) 偏差=|(程序值 - Maxsurf 值) ÷ Maxsurf 值 × 100%|。

表 6 重力和浮力作用线距离

Table 6 Gravity and buoyancy line distance

迭代次数	<i>l</i> /mm			迭代次数	<i>l</i> /mm		
	工况 1(横倾)	工况 2(纵倾)	工况 3(任意倾)		工况 1(横倾)	工况 2(纵倾)	工况 3(任意倾)
1	8.7385	9.3962	13.2300	7	0.0364	0.0000	0.0083
2	5.5447	5.6427	9.7404	8	0.0138	0.0000	0.0047
3	2.3433	1.8809	6.2596	9	0.0113	0.0000	0.0020
4	0.8679	0.0037	2.8002	10	0.0012	0.0000	0.0015
5	0.7391	0.0000	0.6888	11	0.0000	0.0000	0.0003
6	0.0640	0.0000	0.2332				

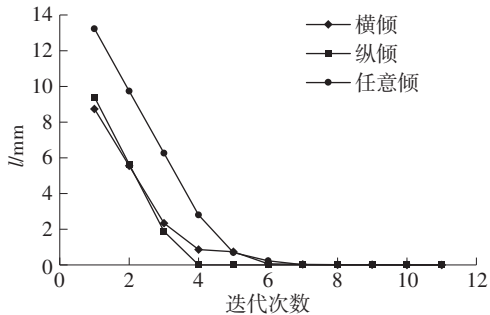


图 15 *l* 收敛趋势图
Fig. 15 Convergence trend chart of *l*

为了进一步验证算法的精确性, 本研究还利用 AutoCAD 建模得到了“精确解”(表 7 第 2 列)。由表 3 和表 7 可知: 当对多凸体组合结构进行浮态计算时, 相比于 Maxsurf 解, 程序解更接近于精确解,

其接近程度优于单凸体结构。其原因在于平台为多凸体组合结构(包含长方体、圆柱体等), 其中圆柱体轴线沿 *y* 轴方向, 而 Maxsurf 在进行切面划分时, 其切面只能沿着 *x* 方向进行布置。如图 16 所示, 这种积分剖面布置方式不利于得到圆柱体的精确体积和浮心坐标。如图 2 所示, 本研究提出的算法在建模的时候就避免了此类问题, 更加容易得到精确解。在同样配置的计算机中(CPU 主频 1.8 GHZ)进行横倾工况计算时, Maxsurf(200 剖面模型)需 0.76 s, 而文中程序只需 0.06 s, 且精度更高。综上, 本研究提出的算法在考虑自由液面影响时, 比传统方法更加适合多凸体组合结构的浮态计算, 更容易取得相对准确的解。

表 7 海洋平台 3 种方法的横倾计算结果¹⁾

Table 7 Heel calculation results of three methods for offshore platform

立柱	AutoCAD 精确解/mm	文中 程序解/mm	Maxsurf 解/mm	偏差/% (本文)	偏差/% (Maxsurf)
1	219.1	219.6	218.2	0.228	0.411
2	257.2	257.7	256.0	0.194	0.467
3	257.2	257.7	256.0	0.194	0.467
4	219.1	219.6	218.2	0.228	0.411

1)偏差=|(程序值(Maxsurf值)-AutoCAD值)÷AutoCAD值×100%|。

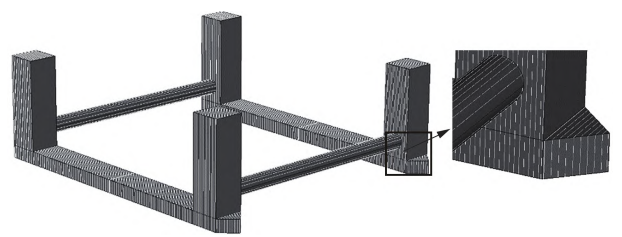


图 16 Maxsurf 海洋平台示意图

Fig. 16 Schematic diagram of the Maxsurf offshore platform

4 结论

本研究提出了一种考虑自由液面影响的多凸体组合结构的浮态计算方法，主要结论如下：

(1)改进了双重迭代法，使之可以考虑自由液面对浮态的影响。该算法简单可靠，原理清晰，收敛性好。

(2)基于改进的双重迭代法，编写了对应的浮态计算程序，并针对某半潜船和某平台进行了浮态计算，同时考虑了自由液面影响；通过 Maxsurf 开展相应的数值实验，比较了文中程序解和 Maxsurf 解的异同。对照分析证明：无论是单凸体结构，亦或是多凸体结构，在计算精度和计算效率两方面，本文算法相较于 Maxusrf 都更有优势。

(3)本研究提出的算法“搭积木”式的建模方式相对于“三维面元压力法”，多工况下的建模工作量大幅度减少。

该算法无需依赖国外第三方图形平台(比如 AUTOCAD、CATIA)，为我国相关工业软件的国产化打下良好的基础。

参考文献：

[1] 陈彦章. 海洋工程结构物静稳性特性计算方法研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2017.

[2] PARK K P, HAM S H, LEE J B, et al. Virtual offshore rig experience based on modeling and simulation technology [C]// Proceeding of International Conference

on Computer Applications in Shipbuilding 2013. [S.l.]：Royal Institution of Naval Architects, 2013：77-82.

[3] 王智洲，李军翼，张伟，等. 散货船完整稳性计算综述 [J]. 中国水运，2016，16(11)：15-17.

WANG Zhizhou, LI Junyi, ZHANG Wei. A review of the calculation of bulk carrier integrity stability [J]. China Water Transport, 2016，16(11)：15-17.

[4] CALABRESE F, MANCARELLA L, ZIZZARI A A, et al. A FEA-like method for evaluating the ship equilibrium point [J]. IFAC Proceedings Volumes (IFAC-Papers Online), 2012，9(1)：115-120.

[5] CALABRESE F, CATALDO M, DE PASCALIS A, et al. A method for evaluating the ship equilibrium point using 3D meshes developed for embedded device [C]//Proceedings of MTS/IEEE OCEANS 2015-Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World. Genova: IEEE, 2015：1-6.

[6] ZHANG Z, XIE D. A mesh insensitive finite element method to compute statical stability curve of floating bodies with arbitrary configurations based on a force-oriented approach [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2023，124(7)：1672-1695.

[7] SEQUEIRA D, MANN B P. Static stability analysis of a floating rectangular prism [C]//Proceedings of the ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences Computers and Information in Engineering Conference. Charlotte: American Society of Mechanical Engineers, 2016：1-6.

[8] 黄晨. 模块化浮式海洋结构物静水力性能直接计算方法研究 [D]. 武汉：华中科技大学，2020.

[9] 刘梅梅，包胜利，于立伟，等. 半潜驳稳性现场快速评估方法研究 [J]. 水道港口，2021，42(2)：243-251.

LIU Mei-mei, BAO Sheng-li, YU Li-wei, et al. Research on rapid on-site assessment method of stability of semi-submersible barge [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2021，42(2)：243-251.

[10] 左仔滨，江婷，王明振，等. 基于 CATIA 平台的飞机水上迫降漂浮特性计算方法 [J]. 航空计算技术，2019，49(4)：95-99.

ZUO Zai-bin, JIANG Ting, WANG Ming-zhen, et al. Calculation method of floating characteristics for fixed-wing aircraft base on CATIA secondary development technology [J]. Aeronautical Computing Technique, 2019，49(4)：95-99.

[11] 张明霞，秦帅帅，赵正彬，等. 基于 CATIA 的船体参数化建模和稳性计算 [J]. 船舶工程，2019，41(1)：48-52.

- ZHANG Mingxia, QING Shuaishuai, ZHAO Zhengbin, et al. Parametric modeling of hull and calculation of stability based on CATIA [J]. *Ship Engineering*, 2019, 41(1): 48-52.
- [12] 马坤, 陈德志. 自由液面对大倾角稳性的修正计算方法 [J]. *中国造船*, 2005, 46(1): 3-9.
- MA Kun, CHEN Dezhi. A correction method on the influence of free surface on great inclining angle stability [J]. *Ship Building of China*, 2005, 46(1): 3-9.
- [13] 付田, 舒晨晨, 汪伟斌, 等. 一种考虑自由液面的船舶静稳性曲线修正方法 [J]. *中国水运*, 2022, 22(6): 6-7, 78.
- FU Tian, SHU Chenchen, WANG Weibin, et al. A correction method of ship static stability curve considering free surface [J]. *China Water Transport*, 2022, 22(6): 6-7, 78.
- [14] 贾清振. 基于 CATIA 的三维船舶建模及破舱稳性计算 [D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [15] 李洛东, 刘成名. 基于有限元网格的液货体积计算方法 [J]. *船海工程*, 2022, 51(4): 6-10.
- LI Luo-dong, LIU Cheng-ming. Method for calculating liquid cargo volume based on finite element mesh [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2022, 51(4): 6-10.
- [16] 刘虢, 徐磊, 樊天慧, 等. 针对凸多面体组合结构的二重迭代浮态计算方法 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(11): 1-9.
- LIU Xiao, XU Lei, FAN Tianhui, et al. Double iterative afloat condition calculation method for convex polyhedron composite structure [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(11): 1-9.
- [17] 张宝吉. 船舶静力学 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2016.
- [18] 刘虢. 基于四面体网格的浮态计算方法_宣传资料 [EB/OL]. (2020-12-10) [2022-02-15]. <http://www.huagongchuanhai.cn/tetrahedron/>.

Floating State Calculation Method of Multi-Convex Structure Considering the Influence of Free Liquid Level

LIU Xiao ZHOU Quan FAN Tianhui CHEN Chaohe

(School of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: In view of the influence of free surface in tank on floating state and stability, this paper proposed a new floating state algorithm of multi-convex composite structure. The floating body and the liquid tank were decomposed into multiple tetrahedral elements, and then the buoyancy and center of buoyancy of the floating body and the center of gravity of the liquid tank were determined by analyzing the relative position of each tetrahedron and the water surface/liquid surface. An improved double iteration method was also proposed to determine the floating state of multi-convex composite structures: the inner iteration method was used to simulate the heaving motion of the floating body to obtain the water/liquid surface equations outside the floating body and inside the tank; the rotation motion of floating body was simulated by outer iteration. The two iterative methods were carried out alternately until the distance between the gravity action line and the buoyancy action line of the floating body meets the accuracy requirement, and the gravity is equal to the buoyancy force. The study calculated the floating state of a semi-submersible vessel and a semi-submersible offshore platform under various typical working conditions using self-compiled program, and the influence of free surface was also considered. In addition, MAXSURF modeling was used for comparative analysis, and AUTOCAD was used to verify the accuracy. The results show that: (1) the algorithm can take into account the influence of free surface on floating state with clear principle and good convergence; (2) the algorithm is easier to obtain accurate solutions for both traditional single-convex structures (such as single hull vessel) and multi-convex structures (such as multi-hull vessel, floating offshore platform, etc.), and its computational efficiency is higher; (3) the algorithm can realize the “building-block” modeling mode, which can greatly reduce the workload in multi-condition modeling; (4) the algorithm does not need to rely on foreign third-party graphics platform (such as AUTOCAD, CATIA), which lays a good foundation for the localization of related industrial software in our country.

Key words: free surface; floating state; tetrahedron; double iteration