

悬链式单点系泊浮筒主尺度可行域研究

孙 强, 彭东升, 张义明, 董庆辉, 岳前进, 吴 峰, 阎 军, 钟万勰

Feasible Region Study on Main Dimensions of CALM Buoy

SUN Qiang, PENG Dongsheng, ZHANG Yiming, DONG Qinghui, YUE Qianjin, WU Feng, YAN Jun, and ZHONG Wanxie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.21656/1000-0887.420115>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

新冠病毒蛋白酶与抗病毒药物分子相互作用的分子模拟研究

Molecular Simulation Study on the Interaction Between SARS-CoV-2 Main Protease and the Antiviral Inhibitors
应用数学和力学. 2021, 42(10): 1081-1090

Hilbert空间中分裂可行性问题的改进Halpern迭代和黏性逼近算法

Modified Halpern Iteration and Viscosity Approximation Methods for Split Feasibility Problems in Hilbert Spaces
应用数学和力学. 2017, 38(9): 1072-1080

不同索力斜拉索的主共振瞬时相频特性

Transient Primary Resonance Phase-Frequency Characteristics of Stay Cables With Different Tensions
应用数学和力学. 2021, 42(11): 1126-1135

Hilbert空间中求解分裂可行问题CQ算法的强收敛性

Strong Convergence of CQ Algorithms for Split Feasibility Problems in the Hilbert Spaces
应用数学和力学. 2019, 40(1): 108-114

圆筒流体域内管束振动与碰撞接触的流固耦合动力学方法研究

A Method of Fluid-Solid Coupling Dynamics for Tube Bundle Vibration and Collision in a Cylinder Fluid Domain
应用数学和力学. 2018, 39(5): 568-583

微尺度悬臂管颤振的有限维研究

Research on the Flutter of Micro-Scale Cantilever Pipes—A Finite-Dimensional Analysis
应用数学和力学. 2018, 39(2): 199-214



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

悬链式单点系泊浮筒主尺度可行域研究*

孙 强^{1,2}, 彭东升², 张义明², 董庆辉²,
岳前进¹, 吴 峰¹, 阎 军¹, 钟万勰¹

(1. 大连理工大学 运载工程与力学学部, 辽宁 大连 116023;
2. 大连船舶重工集团设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116005)

(本刊编委钟万勰来稿)

摘要: 为了能够设计合理的单点浮筒主尺度, 归纳提出了悬链式单点浮筒 5 条主要设计原则, 基于实际工程经验给出了浮筒重量的母型预估方法, 探讨储备浮力, 提出等干舷方案集, 基于静力学原理和水动力分析探讨了浮筒的自由漂浮稳性及浮筒的运动响应, 梳理了垂荡及摇摆随浮筒直径的变化规律, 以 25 m 和 100 m 水深的浮筒直径上限和下限为边界建立可行域, 分别以三个实际项目采纳的浮筒直径和 45 m 水深下单点浮筒直径的可行范围为参考, 开展浮筒直径可行域的验证. 研究表明: 环境条件等不同因素也会引起相同水深下浮筒直径可行域的变化, 因此在可行域的实际应用中应进一步考虑一定的偏差裕量. 该文的可行域研究对于悬链式单点浮筒的主尺度确定具有积极的指导意义.

关键词: 悬链式单点系泊浮筒; 主尺度; 可行域

中图分类号: TE53 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.420115

Feasible Region Study on Main Dimensions of CALM Buoys

SUN Qiang^{1,2}, PENG Dongsheng², ZHANG Yiming², DONG Qinghui²,
YUE Qianjin¹, WU Feng¹, YAN Jun¹, ZHONG Wanxie¹

(1. Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology,
Dalian, Liaoning 116023, P.R.China;

2. Dalian Shipbuilding Industry Engineering and Research Institute Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116005, P.R.China)

(Contributed by ZHONG Wanxie, M. AMM Editorial Board)

Abstract: To design reasonable main dimensions of catenary anchor leg mooring (CALM) buoys, 5 main design requirements were summarized. Based on practical engineering experiences, the mother model estimation method was established against the buoy weight. The reserve buoyancy was discussed, and the equal freeboard scheme set was proposed. The free floating stability of buoys was discussed based on the statics principle. Dynamic responses of buoys were discussed base on hydrodynamics, with the heave and roll characteristic vs. CALM buoy diameters presented. With the upper and lower limits on buoy diameters under 25 m and 100 m water depths as the boundary, a feasible region was

* 收稿日期: 2021-04-28; 修订日期: 2022-01-07

基金项目: 国家重点研发计划深海关键技术与装备重点专项(2017YFC0307800-02); 国家海洋工程装备研发及产业化专项(船重科 [2014]735 号)

作者简介: 孙强(1986—), 男, 高级工程师, 博士生(E-mail: sunqiang_0217@163.com);
阎军(1978—), 男, 教授, 博士生导师(通讯作者. E-mail: yanjun@dlut.edu.cn).

引用格式: 孙强, 彭东升, 张义明, 董庆辉, 岳前进, 吴峰, 阎军, 钟万勰. 悬链式单点系泊浮筒主尺度可行域研究[J]. 应用数学和力学, 2022, 43(3): 281-289.

built up. Its accuracy was verified in the actual engineer case under the 3 environmental conditions and by reference to the theoretical CALM buoy diameter feasible region under the 45 m water depth. The results show that, different factors, such as the environmental conditions, the mooring chain weight and others can influence the feasible region of buoy diameters, even under the same water depth. A deviation margin of the feasible region should be further considered in practical application. The study of the feasible region has a positive guiding significance to the determination of the main dimensions of CALM buoys.

Key words: CALM buoy; main dimension; feasible region

引 言

CALM(catenary anchor leg mooring, CALM)浮筒,在国际上应用广泛,在全球范围内已安装 600 套左右,但国内仅有 2 套.近年来国内外订单需求都很旺盛,中国作为最大的原油进口国,具有极大的应用潜力,CALM 系统的示意图见图 1.

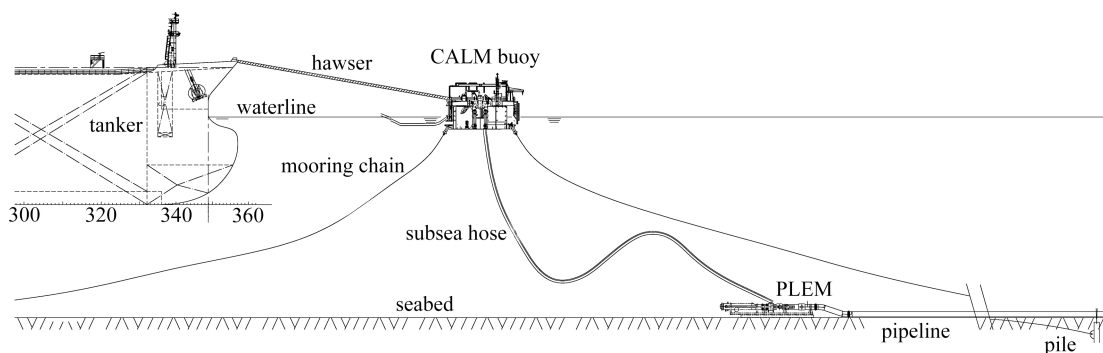


图 1 悬链式单点系泊系统

Fig. 1 Catenary anchor leg mooring system

国际上针对 CALM 的研究开始于 20 世纪 60 年代, Haring 等针对海上油气输送用的 CALM 系统进行了试验研究,应用超越概率理论评估锚链、系泊缆等关键部件对系统设计的影响^[1]; Bernitsas 等讨论了缆绳刚度、推进器效应、海流、船舵等各参数对 CALM 油轮平面运动稳定性的影响^[2]; Hwang 阐述了 CALM 系统在浅水和深水设计中的动力分析方法,其考虑了波频和低频运动,以及浮筒、锚链和系泊油轮的相互作用,而锚链动力特性会显著影响锚链张力和浮筒运动,用模型试验数据印证了其结果^[3]; Schellin 针对两座稳流中的 CALM 油轮,邀请 7 位来自工业界、试验室和大学的志愿者开展系泊力和系统水平运动的时域分析,但得到的结果差异很大,说明还需要进一步深入开展该领域的研究^[4]; Akyuz 等采用专家打分法探讨了 CALM 系统的人员操作可靠性^[5]; Brown 等结合之前的工业方法,提出暴风状况下 CALM 油轮的设计方法,讨论了风速、季节和拖轮力等因素影响^[6]; Gu 等研究了应用 CFD 方法进行 CALM 系统耦合系泊分析的方法^[7].

国内该领域的研发起步较晚,黄国樑等通过模型试验和静平衡状态的特征值分析调查了单点系泊的船体在风和潮流作用下的鱼尾状摆动的特性,并通过鱼尾状摆动的数值模拟和稳定性分析调查了浅水效应^[8]; 季春群等探讨了系泊缆长度对 CALM 系统稳定性的影响^[9]; 杜度等应用计算机仿真方法,研究了潮流作用下系泊系统的运动响应,给出运动响应的时间历程,讨论了系缆刚性对系泊运动的影响,利用 Lyapunov 理论分析了静止系泊位置的稳定性,指出了定性方法对于系泊系统设计的意义^[10]; 孙强等以某具体工程为例,阐述了 CALM 系统自主研发的水动力分析技术^[11]; 周楠等介绍了 CALM 系统设计中需要考虑因素,如船型和货运量核算、单点选址、工况设定、设计衡准、鱼尾运动解决方案等,并讨论了 CALM 系统的设计安全性^[12].

在以往 CALM 的研究中,国内外学者多关注浮筒的水平偏移和锚链、缆绳的受力情况,未涉及到浮筒的主尺度设计.然而,浮筒的主尺度设计意义重大,直接影响其稳性和水动力性能,本文基于三种典型设计海况,讨论了 CALM 系统的浮筒主尺度可行域,作为悬链式单点浮筒主尺度确定的依据.

1 浮筒设计原则

CALM 浮筒处在复杂海洋环境中,需要承受的环境载荷可能来自各个方向,浮筒主体采用圆柱体,这种均匀对称结构使得浮筒对于任一方向的载荷作用都不过敏。单点系泊浮筒的作用主要是为系泊船只提供海上系泊点、为水下软管和锚链提供漂浮力,为通讯控制设备和介质输送管路等装置提供载体,必要时需要为操作人员提供工作平台。

CALM 系统的主尺度设计原则有以下几点:

- ① 具有足够的储备浮力,保证浮筒 2 个舱室破损时不会沉没^[13];
- ② 干舷不致于过小,使上部设备尽量远离水面,保证操作人员安全;
- ③ 具有足够稳性,保证拖航和在位时不致于倾覆^[13];
- ④ 具有良好的平面外水动力特性,避免大幅的摇摆或垂荡,从而提升单点系泊浮筒安全性和舒适性;
- ⑤ 具有良好的平面内水动力特性,不致于引起过大的纵荡、横荡或艏摇响应,保证系泊定位的有效和安全。

其中,第①、③条是浮体必须满足的重要参数要求,均有明确的衡量标准;第②条是浮筒的重要特性,通过与单点浮筒运营单位的交流,一般要求干舷大于 2 m;第④、⑤条面向单点系泊浮筒的水动力特性,只能定性表达避免过大的大幅响应,而第⑤条面向的平面内水动力特性更多地依赖系泊系统的定位效果,考虑到悬链式单点作业时连接的油轮从质量和体积上都显著大于浮筒,而自存工况下 CALM 系统的锚链受力一般都会小于作业工况,因此,本文不针对浮筒的平面内水动力响应开展讨论,重点探讨第①~④条。

2 浮筒设计原理和方法

2.1 破舱储备浮力与等干舷方案

第①条要求的储备浮力和第②条要求的最小干舷 $L_{FB,min}$,在本质上都是浮力与重力的关系。储备浮力,关注的是浮筒舱室破损后,剩余浮力是否能够保证浮筒漂浮,这对于浮筒在位的安全性保障是非常有意义的。最小干舷要求是面向舱室完整状态下浮筒的浮力水平,浮力与重力的差值至少要求满足 2 m 的干舷,以保证浮筒上部设备和操作人员的安全。

浮筒重量估算对于储备浮力和等干舷方案的准确性有着直接影响,本文以工程实际项目重量统计数据作为基础,将浮筒重量 G_0 区分为两部分:一是与结构相关的重量 A_0 ,包含含筋的上下表面平板重量 A_1 、含筋的舱壁平板重量 A_2 、外曲面重量 A_3 、内曲面重量 A_4 以及转臂重量 A_5 ;二是与尺度基本无关的重量 B_0 ,主要是通讯控制设备以及旋转接头等,其中

$$G_0 = A_0 + B_0, A_0 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5. \quad (1)$$

将实际项目的重量统计方案作为母型,通过以下公式可以变换得到其他方案下的预估重量:

$$G_i = \alpha_i A_1 + \beta_i A_2 + \gamma_i A_3 + \delta_i A_4 + \theta_i A_5 + \mu_i B_0, \quad (2)$$

式中, $\alpha_i = \frac{D_i^2 - d_0^2}{D_0^2 - d_0^2}$, $\beta_i = \frac{(D_i - d_i)H_i}{(D_0 - d_0)H_0}$, $\gamma_i = \frac{D_i H_i}{D_0 H_0}$, $\delta_i = \frac{d_i H_i}{d_0 H_0}$, $\theta_i = \frac{D_i}{D_0}$, $\mu_i = 1$,其中 D_0 , d_0 和 H_0 为作为母型原始型的原始设计浮筒的外径、内径和型深,下标 i 为由母型变换得到的待设计浮筒编号, D_i , d_i 和 H_i 为第 i 个待设计浮筒方案的外径、内径和型深。

浮筒的浮力可以用如下公式估算:

$$F_{Bi} = \frac{\rho\pi}{4}(D_i^2 - d_i^2)(H_i - L_{FBi}), \quad (3)$$

其中, L_{FBi} 为浮筒的干舷,具体如图 2 所示。

浮筒共分 N_i 个舱,在获得预估重量 G_i 和浮力 F_{Bi} 后,结合环境条件确定锚链设计方案,从而确定锚链垂向力 G_{Mi} ,可初步判断其破两舱后的储备浮力:

$$\Delta F_{Bi} = \left(\frac{N_i - 2}{N_i}\right)F_{Bi} - G_i - G_{Mi}, \quad (4)$$

如果 $\Delta F_{Bi} > 0$, 则认为浮筒具备足够的破舱储备浮力, 反之则不具备。

干舷 L_{FB_i} 是单点浮筒的重要参数:

$$L_{FB_i} = H_i - \frac{G_i - G_{Mi}}{S_i}. \quad (5)$$

采用最小干舷 $L_{FB, \min} = 2 \text{ m}$ 作为设计标准. 本文以优化设计方案为目标, 选取相同的干舷 2 m 作为设计参数, 浮筒内径基本由旋转接头等内部构件确定, 每个浮筒方案基本不会有太大差异, 通过变换浮筒外径 D_i , 可以得到一系列对应的 H_i , 从而确定悬链式单点浮筒的等干舷方案集。

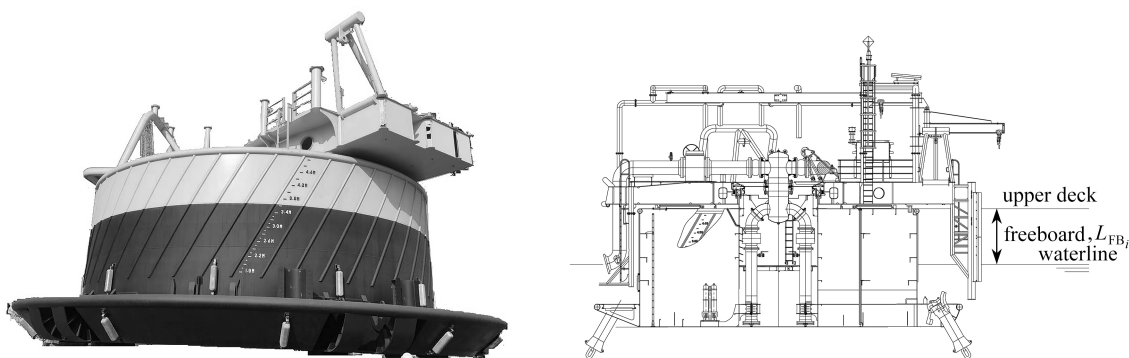


图2 浮筒干舷
Fig. 2 The CALM buoy freeboard

2.2 浮筒漂浮稳性^[13]

单点浮筒漂浮在水面上, 需要具备足够的稳定性, 避免倾覆风险. 浮筒主要包括自由漂浮和在位系泊两个状态, 在位状态下的稳定性主要体现在船舶系泊后浮筒的倾角, 该倾角大小可以认为是单点浮筒姿态回复能力的体现, 与自由漂浮状态下的稳性很相似, 因此本文仅针对自由漂浮状态的浮筒稳性进行探讨。

浮体的稳性直接反映了外力作用消失时保持原有位置的能力, 初稳心高 H_{GM} 是衡量浮体稳性的重要指标, 该数值为正值时浮体才不会倾覆, 如图3. 图中, M 为浮筒稳心; G 为浮筒重心; B 为浮筒浮心。

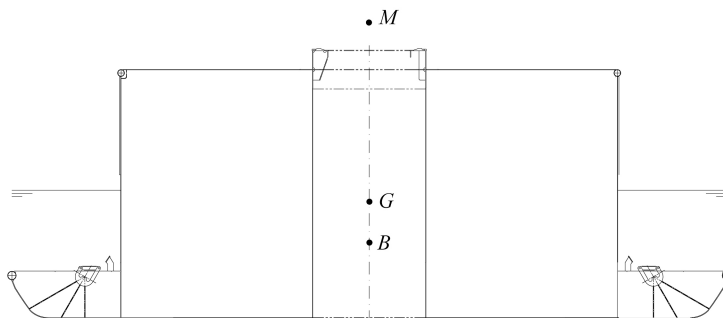


图3 单点浮筒稳性
Fig. 3 The CALM buoy stability

初稳心高:

$$H_{GM} = H_{BM} - H_{BG}, \quad (6)$$

其中, H_{BM} 为初稳心半径, $H_{BM} = I_T / \nabla$, I_T 为横向惯性矩, ∇ 为排水体积, H_{BG} 为浮心与重心距离。

2.3 浮筒摇摆与垂荡

浮筒的水动力特性是其主尺度选型的重要影响因素. 利用水动力边界元分析方法, 确定装置浮筒的运动响应幅值算子RAO, 进而确定各直径浮筒对应的摇摆与垂荡响应. 运动方程如下^[14]:

$$(-\omega_e^2 (\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_a) - i\omega_e \mathbf{C} + \mathbf{K}_{hys}) \mathbf{x}_{jm} = \mathbf{F}_{jm}, \quad (7)$$

其中, \mathbf{M}_s 为结构质量矩阵, \mathbf{M}_a 为附加质量矩阵, \mathbf{C} 为附加阻尼矩阵, \mathbf{K}_{hys} 为静水刚度矩阵, ω_e 为频率, \mathbf{x}_{jm} 为运动

响应矩阵, F_{jm} 为波浪载荷矩阵, i 为虚数单位.

确定单位载荷作用下的运动响应传递函数 H 如下:

$$H = (-\omega_e^2(M_s + M_a) - i\omega_e C + K_{hys})^{-1}. \tag{8}$$

平面内的运动响应, 主要依靠系泊系统限制在系泊定位状态下能够得到较好的控制. 平面外的运动响应, 受系泊系统的影响较小, 主要包括浮筒的摇摆与垂荡.

分别针对浮筒的垂荡运动幅值和摇摆运动幅值进行不同直径等干舷方案的比较. 垂荡的幅值如图 4 所示, 幅值随着浮筒直径的增大而减小, 但整体的响应幅度都非常大, 即使将浮筒直径增大至 30 m, 在 1 m 的波高下仍对应产生 1 m 的垂荡响应, 这对于浮筒总体性能是不可接受的, 同时也将极大影响与浮筒相连的水下立管的安全. 必须采用带孔止荡板等方式抑制浮筒垂荡, 在浮筒选型中不再对垂荡特性进行讨论. 浮筒摇摆的幅值如图 5 所示, 幅值随着浮筒直径的增大而呈现先增后减的趋势.

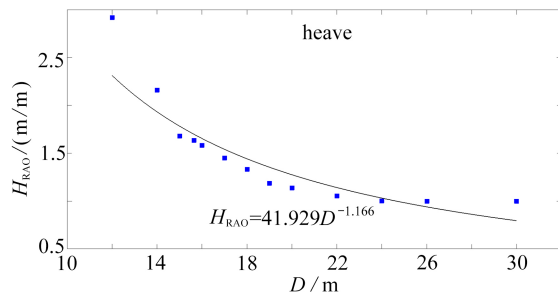


图 4 单点浮筒垂荡
Fig. 4 The CALM buoy heave

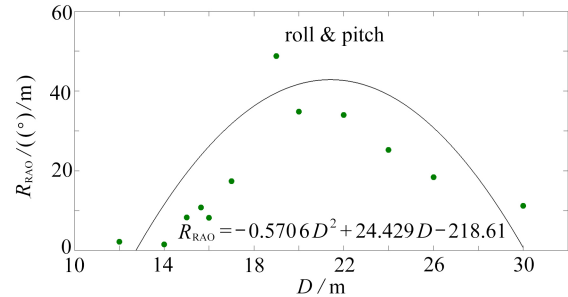


图 5 单点浮筒摇摆
Fig. 5 The CALM buoy roll & pitch

3 浮筒主尺度设计

3.1 环境条件与油轮参数

基于 3 组典型的海洋环境条件作为研究基础, 选择典型 25 m, 45 m 和 100 m 三个水深, 论证浮筒主尺度设计, 环境条件见表 1. 表中, H_s 为有义波高, T_p 为谱峰周期, V_w 为风速, V_c 为流速.

表 1 环境条件
Table 1 Environmental conditions

parameter	unit	project 1		project 2		project 3	
		operating condition	standalone condition	operating condition	standalone condition	operating condition	standalone condition
H_s	m	2.5	6	2.6	3.9	3	13
T_p	s	7.1	10.3	7.5	8.5	9.2	14.7
V_w	m/s	17.1	28.3	22	26	23.6	41.6
V_c	m/s	1.2	1.73	0.7	0.8	1.22	2.1

表 2 油轮参数
Table 2 Tanker parameters

parameter	unit	full loading	ballast
T	m	22.6	9.937
Δ	kg	3.671 2E+8	1.438 3E+8
X_{cog}	m	170.18	171.04
Y_{cog}	m	0	0
Z_{cog}	m	17.3	11.62
I_{xx}	kg·m ²	8.26E+10	6.564E+10
I_{yy}	kg·m ²	2.35E+12	9.53E+11
I_{zz}	kg·m ²	2.35E+12	9.53E+11

选取 30 万吨级超大型油轮 (VLCC) 作为系泊对象, 船长、型宽和型深分别为 330 m, 60 m 和 30.5 m. 不同环境条件均面向该油轮进行设计, 其参数如表 2. 表中, T 为油轮吃水, Δ 为油船排水量, X_{cog} 为油船重心纵向相对于船尾的坐标位置, Y_{cog} 为油船重心横向相对于船中的坐标位置, Z_{cog} 为油船重心垂向相对于船底的坐标位置, I_{xx} 为油船纵轴质量惯性矩, I_{yy} 为油船横轴质量惯性矩, I_{zz} 为油船垂直轴质量惯性矩.

3.2 等干舷方案确定

针对环境条件和油轮信息, 开展系泊系统的初步论证, 以确定其对浮筒产生的垂向力 G_{M_i} . 浮筒主尺度对于平面内运动的影响有限, 以 12 m 直径成品浮筒作为假定系泊对象, 开展系泊分析以确定系泊系统初步方案, 进而确定系泊系统对于浮筒的垂向力 G_{M_i} .

依据式 (2) 开展浮筒的重量预估, 确定浮筒重量 G_i . 通过式 (5) 确定浮筒的干舷 L_{FB_i} , 能够确定浮筒的直径和型深之间的关系. 直径在 10~18 m 范围内选择, 以 1 m 为间隔列出各直径在不同水深及其环境条件下的推荐型深, 如表 3 所示. 表中, D 为浮筒外径, W_D 为环境水深.

表 3 等干舷方案浮筒型深
Table 3 Buoy depths with equal freeboards

D/m	buoy depth with equal freeboard W_{FB}/m		
	$W_D=25 \text{ m}$	$W_D=45 \text{ m}$	$W_D=100 \text{ m}$
10	6.44	7.16	13.62
11	5.77	6.29	11.85
12	5.30	5.67	10.54
13	4.95	5.21	9.55
14	4.69	4.85	8.76
15	4.48	4.57	8.14
16	4.31	4.34	7.63
17	4.17	4.15	7.20
18	4.05	3.99	6.85

3.3 浮筒初稳心高

针对表 3 确定的等干舷浮筒主尺度方案, 明确各自的重心和浮心. 其中, 重心依据式 (2) 的重量各组成部分统计可以确定, 浮心为水下部分的形心. 初稳心高 H_{GM} 可通过式 (6) 确定, 如表 4 所示. 表中初稳心高为负数的, 意味着该浮体方案不具备足够的漂浮稳性, 将从备选方案中剔除; 初稳心高为正值的, 浮体方案具有足够的漂浮稳性, 将作为进一步研究的方案范围.

表 4 浮筒初稳心高 H_{GM}
Table 4 Buoy initial metacentric heights

D/m	buoy initial metacentric height H_{GM}/m		
	$W_D=25 \text{ m}$	$W_D=45 \text{ m}$	$W_D=100 \text{ m}$
10	-0.51	-1.66	-5.17
11	0.38	-0.70	-3.89
12	1.37	0.36	-2.70
13	2.48	1.57	-1.55
14	3.72	2.93	-0.38
15	5.07	4.47	0.83
16	5.65	6.21	2.10
17	8.18	8.14	3.43
18	9.93	10.29	4.85

3.4 浮筒横摇响应

平面内运动纵荡、横荡和艏摇主要取决于系泊系统, 不在考虑范围内; 平面外运动的垂荡需通过止荡板等措施改善运动响应, 不再考虑其对浮筒主尺度的影响.

通过 AQWA 建立边界元模型, 如图 6 所示. 开展水动力分析, 得到浮筒的水动力特性. 针对平面外运动中的横摇响应, 可以获得不同直径浮筒方案对应的摇摆固有周期, 如表 5 所示.

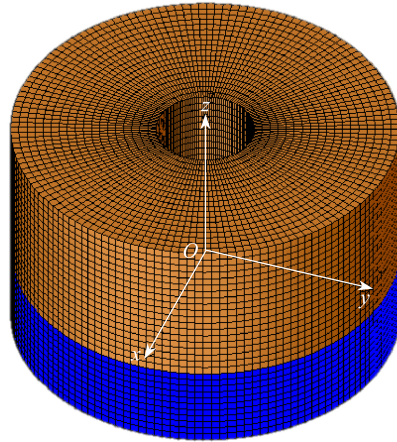


图 6 装置浮筒水动力模型
Fig. 6 The CALM buoy hydrodynamic model

表 5 浮筒横摇固有周期
Table 5 Buoy roll natural periods

D/m	buoy roll natural period T_n/s		
	$W_D=25\text{ m}$	$W_D=45\text{ m}$	$W_D=100\text{ m}$
10	—	—	—
11	14.97	—	—
12	8.42	17.10	—
13	6.85	8.70	—
14	6.13	6.95	—
15	5.76	6.17	15.26
16	5.50	5.71	9.48
17	5.38	5.45	7.85
18	5.29	5.27	6.82

考虑到波浪周期主要集中在 4~10 s, 为了避免浮筒摇摆周期与波浪主要周期相近, 应将横摇周期尽量控制在该范围之外. 从表 5 方案中可以看出, 浮筒横摇周期小于 4 s 几乎是不可能的, 但大于 10 s 还是比较可行的.

3.5 浮筒直径可行域

以初稳心高确定每个水深下的浮筒直径下限, 以浮筒摇摆固有周期确定浮筒直径上限, 获得 25 m, 45 m 和 100 m 水深共 3 个环境条件下的浮筒直径可行域^[15], 如图 7 所示.

可行域表达式如下:

$$\begin{cases} 0.052\ 1W_D + 10.787 \geq D \geq 0.045\ 2W_D + 9.7, \\ 100 \geq W_D \geq 25. \end{cases} \quad (9)$$

在 25 m 水深下, 浮筒的直径范围为 10.83~12.09 m; 在 45 m 水深下, 浮筒的直径范围为 11.66~12.85 m; 在 100 m 水深下, 浮筒的直径范围为 14.22~16 m.

以 25 m 水深和 100 m 水深下浮筒直径范围的上下边界, 构建 25~100 m 水深范围内的浮筒直径可行域. 可行域呈带状, 许用范围随水深增大而略有增大. 以 45 m 水深对应的浮筒直径上下限作为可行域检验参考, 可以获得上限偏差 2.14%, 下限偏差 0.63%, 具体见表 6.

以目前现有的 3 个实际工程项目为基础, 开展可行域的验证. 在 25 m 水深下, 采用的最终方案为直径 12 m; 在 45 m 水深下, 采用的最终方案为直径 12.5 m; 在 100 m 水深下, 采用的最终方案为直径 15.64 m, 均处于可行域区间内.

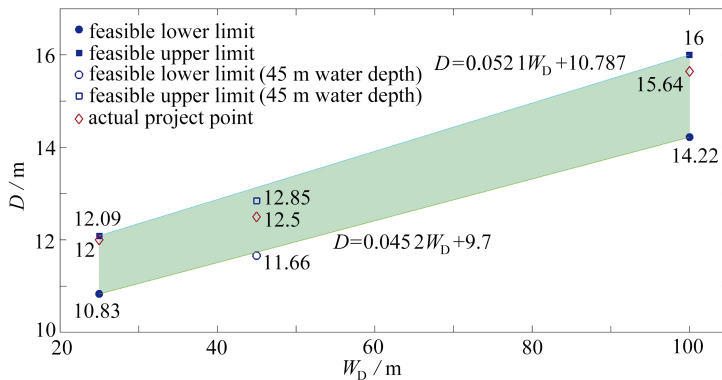


图7 浮筒直径的可行域

Fig. 7 The CALM buoy diameter feasible field

表6 可行域偏差验证 (45 m 水深)

Table 6 Feasible area difference verification (water depth 45 m)

item	feasible region $R_{feasible} / m$	verified feasible region $R_{verified-feasible} / m$	difference $\delta / \%$
diameter upper limit	13.13	12.85	2.14
diameter lower limit	11.73	11.66	0.63

浮筒直径可行域的拟合, 基于三个典型水深和环境条件开展, 通过初稳心高和横摇周期来确定. 在直径确定后, 可以在等干舷备选方案中获得相应的型深. 但是, 浮筒直径可行域的适用性还需要进一步讨论: 目前仅有三个典型的实际工程案例, 拟合形成的带状可行域有待进一步验证; 在相同水深条件下, 风、浪、流环境条件也不尽相同, 会导致锚泊系统作用于浮筒的垂向力发生变化, 其对于横摇周期的影响会引起可行域的调整, 因此, 可行域应用中需额外考虑一定的偏差裕量.

综上, CALM 系统浮筒直径的可行域具有一定的参考价值.

4 结 论

本文通过悬链式单点浮筒静力学及水动力学分析, 结合工程实例, 得到了以下结论:

1) 以 25 m, 45 m 和 100 m 三个典型水深为例, 结合各自的环境条件, 面向 30 万吨级 VLCC, 制定了 CALM 系统等干舷设计方案. 从浮筒自由漂浮稳定性和浮筒横摇特性出发, 保证初稳心高为正值, 同时使横摇固有周期避开波浪主要周期, 确定浮筒直径的可行范围. 可从等干舷方案中确定该直径对应的型深, 最终确定 CALM 系统浮筒主尺度的可行范围.

2) 给出了 25~100 m 水深范围内 CALM 系统浮筒直径的可行域, 基本覆盖了 CALM 系统的主流应用场景. 以 45 m 水深作为可行域验证范例, 浮筒直径上下限偏差均小于 2%, 该可行域经验证是相对可靠的, 对于该范围内的悬链式单点浮筒主尺度设计有着重要的参考意义.

3) 目前的实际工程案例有限, 拟合形成的可行域还有待进一步验证, 不同的环境条件会引起同水深下单点浮筒系泊垂向力的变化, 可行域的范围将受到一定程度的影响, 在实际应用中应针对该可行域额外考虑一定的偏差裕量.

参考文献 (References):

[1] HARING R E, ADAMS R B, BEAZLEY R A, et al. Application of probability to design of single-point moorings[J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1969, **10**(3): 219-228.

[2] BERNITSAS M M, PAPOULIAS F A. Stability of single point mooring systems[J]. *Applied Ocean Research*, 1986, **8**(1): 49-58.

[3] HWANG Y L. Dynamic analysis for the design of CALM system in shallow and deep waters[J]. *Journal of Off-shore Mechanics and Arctic Engineering-Transactions of the ASME*, 1997, **119**(3): 151-157.

[4] SCHELLIN T E. Mooring load of a ship single-point moored in a steady current[J]. *Marine Structures*, 2003,

- 16(2): 135-148.
- [5] AKYUZ E, CELIK E, A modified human reliability analysis for cargo operation in single point mooring (SPM) off-shore units[J]. *Applied Ocean Research*, 2016, **58**: 11-20.
- [6] BROWN A, GORTER W, PAALVAST M, et al. Design approach for CALM buoy moored vessel in squall conditions[C]//*35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
- [7] GU H Y, CHEN H C, ZHAO L Y. Coupled mooring analysis of a CALM buoy by a CFD approach[C]//*The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference*. OnePetro, 2017.
- [8] 黄国樑, 藤野正隆. 关于风和潮流作用下单点系泊船体的鱼尾状摆动的研究[J]. 海洋工程, 1987, **5**(3): 1-13. (HUANG Guoliang, FUJINO M. Fishtailing oscillation of a ship moored to single point mooring systems in wind and current[J]. *The Ocean Engineering*, 1987, **5**(3): 1-13.(in Chinese))
- [9] 季春群, 王磊, 彭涛. 单点系泊的系泊稳定性分析[J]. 中国海洋平台, 1998, **13**(5/6): 12-14. (JI Chunqun, WANG Lei, PENG Tao. The moored stability of single point mooring system[J]. *China Offshore Platform*, 1998, **13**(5/6): 12-14.(in Chinese))
- [10] 杜度, 张纬康, 单点系泊船舶运动的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2003, **20**(6): 96-99, 103. (DU Du, ZHANG Weikang, Simulation study on motion of sigle point mooring vessel[J]. *Computer Simulation*, 2003, **20**(6): 96-99, 103. (in Chinese))
- [11] 孙强, 彭贵胜, 董庆辉. 悬链式单点系泊系统设计与分析方法研究[C]//第十六届中国科协年会(分8): 绿色造船与安全航运论坛论文集. 2014: 126-131. (SUN Qiang, PENG Guisheng, DONG Qinghui. Design and analysis method research on CALM type single point mooring system[C]//*16th Annual Meeting of China Association for Science and Technology (Part Eight): Forum on Green Shipbuilding and Safe Shipping*. 2014: 126-131. (in Chinese))
- [12] 周楠, 刘旭平, 李俊汲. CALM单点系泊系统设计综述[J]. 海洋工程装备与技术, 2017, **4**(2): 102-104. (ZHOU Nan, LIU Xuping, LI Junji. Design method summary of CALM single point mooring[J]. *Ocean Engineering Equipment and Technology*, 2017, **4**(2): 102-104.(in Chinese))
- [13] American Bureau of Shipping. Single point moorings[S]. Act of Legislature of the State of New York, 2019.
- [14] BERNARD M. 海洋工程水动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 151-154. (BERNARD M. *Hydrodynamique des Structures Offshore*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 151-154. (in Chinese))
- [15] 芦苇, 赵冬, 李东波, 等. 基于期望函数的土遗址锚固参数组合优化方法[J]. 应用数学和力学, 2019, **40**(6): 650-662. (LU Wei, ZHAO Dong, LI Dongbo, et al. A composite optimization method for anchorage parameters of rammed earth sites based on desirability functions[J] *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, **40**(6): 650-662. (in Chinese))