

网衣对自升式桁架网箱结构响应的影响

陈元帅^{1,2}, 庞国良^{2,3}, 黄小华^{1,2}, 李根^{2,3}, 袁太平^{2,3}, 胡昱^{2,3}, 陶启友^{2,3}

1. 浙江海洋大学/国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江舟山 316000

2. 中国水产科学研究院南海水产研究所/广东省网箱工程技术研究中心, 广东广州 510300

3. 三亚热带水产研究院/海南省深远海渔业资源高效利用与加工重点实验室, 海南三亚 572000

摘要: 自升式桁架网箱凭借便于将养殖箱体下潜入水的结构特性, 为更好地适应深远海养殖极端环境提供了一种选择。网衣作为桁架网箱关键部件, 通过纲绳系缚于桁架管上, 在外部环境载荷作用下可能会对网箱主体结构强度产生影响。针对一种自升式桁架网箱, 基于 SESAM/GeniE 建立其有限元分析模型, 分析了在有网衣及不同网衣参数条件下的网箱主体结构响应。结果表明: 网衣对网箱主体结构响应评估存在较大影响, 尤其在流速较高时, 网衣阻力大幅增加, 直接影响网箱桩腿受力和桁架利用系数 (Utilization factor, UF) 值, 证明在校核网箱主体结构强度时不可忽略网衣的作用; 不同网目群化比下, 网衣对自升式深海网箱整体结构响应评估结果影响不大, 在网箱主体结构响应仿真计算中可以考虑使用较大的网目群化比来提升计算效率; 网衣系缚纲绳数量变化对网箱主体结构的响应评估基本无影响, 但增加系缚纲绳可以有效减少纲绳受力。

关键词: 网衣; 自升式网箱; 强度分析; 网目群化

中图分类号: S 967.3

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Influence of net on structural response of jack-up truss net cage

CHEN Yuanshuai^{1,2}, PANG Guoliang^{2,3}, HUANG Xiaohua^{1,2}, LI Gen^{2,3}, YUAN Taiping^{2,3}, HU Yu^{2,3}, TAO Qiyu^{2,3}

1. Zhejiang Ocean University/National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhoushan 316000, China

2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences/Guangdong Cage Engineering Research Center, Guangzhou 510300, China

3. Sanya Tropical Fisheries Research Institute/Key Laboratory of Efficient Utilization and Processing of Marine Fishery Resources of Hainan Province, Sanya 572000, China

Abstract: Jack-up truss net cage provides a choice for better responding to the extreme environment of deep-sea aquaculture due to its structural characteristics of easily submerging the breeding net cage into the water. As a key component of the breeding net cage, net has an impact on the strength of the main structure of the net cage under environmental loads. This paper focuses on a jack-up truss net cage and establishes its finite element analysis model by using SESAM/GeniE to analyze the main structural response of net cage under the conditions of presence or absence of net and different net parameters. The results indicate that net has a significant impact on the evaluation of main structure response of net cage, especially under high current velocity conditions. Presence of net will increase the stress on the legs of net cage and utilization factor (UF) value of truss significantly, proving that the effect of net cannot be ignored when checking the strength of net cage's main structure. With different

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2023-12-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (32173024); 海南省自然科学基金项目 (322QN438); 广州市科技计划基础与应用基础研究项目 (2023A04J0258); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (2023TD97)

作者简介: 陈元帅 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大型桁架网箱安全评估。E-mail: 2783737327@qq.com

通信作者: 庞国良 (1992—), 男, 高级工程师, 博士, 研究方向为深远海养殖设施工程技术。E-mail: guoliangpang@126.com

mesh grouping ratios, net has little effect on the evaluation result of jack-up truss net cage. In the simulation calculation of the main structure response of net cage, a larger mesh grouping ratio can be considered to improve the calculation efficiency. The change in the number of tie ropes for net has little effect on the evaluation of the main structure response of net cage, but adding more tie ropes can reduce the stress on tie points effectively.

Keywords: Cage net; Jack-up net cage; Strength analysis; Mesh grouping

为拓展海水养殖空间、应对近岸水质污染加剧问题及寻求更高的海域利用率,近年来我国大力支持依托桁架网箱发展深远海养殖并取得一定成效^[1]。桁架网箱型式多样,有半潜式、全潜式、坐底式、自升式等。其中,自升式桁架网箱作为一种新型网箱,目前建成下水的仅有“湾区横洲号”和“联塑 L001”两座,凭借养殖主箱体可沿桩腿下潜入水的结构特性,在极端海况条件下网箱可以有效减小波浪载荷冲击,保护设施及养殖生物安全,为更好地适应深远海养殖极端环境、降低养殖风险、提升养殖收益提供了一种选择。

凭借着高性价比优势,高密度聚乙烯重力式(HDPE)深水网箱是目前发展深远海养殖的主要设施,相关技术较为成熟,关于其研究也开展得比较全面,涉及网箱及网衣水动力^[2-5]、浮架结构强度^[6-7]、锚泊技术^[8-9]等。目前大型桁架网箱研究也主要集中在水动力分析、系泊分析、桁架主体结构安全等方面。水动力方面,不少学者采用物理模型实验的方式进行验证^[10-11],此类验证方法虽有较好的模拟效果,但实验周期较长,模拟实验所需材料循环利用率较低。随着海工分析软件的不断发展,也有利用计算机技术开展数值模拟研究的,例如崔勇等^[12]分析比较了双层网底网箱与单层网底网箱的受力运动模型,为多层网底网箱设计优化提供了理论依据;张婧等^[13]、Lei等^[14]利用海洋工程软件 OrcaFlex对深海网箱模型进行水动力分析;陈炫光等^[15]分析了串联浮筒的大小、位置对船型网箱水动力特性的影响。此类方法极大地促进了海工软件与深海网箱的结合,为深海网箱水动力评估提供了高效的参考方法。系泊方面,张新昊^[16]、张松等^[17]针对系泊方案进行了对比优选;黄小华等^[18]比较分析了一种半潜式桁架结构渔场平台在3种系泊方式、3种压载状态和6种波况条件下的动力响应情况,该研究结果为今后我国半潜式渔场平台发展提供了一定的理论参考。此外,不少学者在新的领域不断尝试,开展网箱养殖与海上风电领域融合发展、平台系泊张力评估新方法等方面的探索研

究^[19-22]。而针对桁架主体结构安全方面,李贺^[23]评估了某大型网架式深海网箱的结构安全性,对设计不合理之处提出了改进措施;孙树政等^[24]在不考虑网衣的作用下,对单个网箱模块浮架结构屈服强度进行校核;此外,类似的研究还有柴佳瑜等^[25]、李昊瑾^[26]、汤建锋^[27]对不同环境载荷作用下网箱的强度进行了校核分析。综上所述,大部分学者在对网箱整体结构强度进行探讨时针对网衣部分的处理均考虑未系缚或采用简化模拟的形式,极少学者将研究方向聚焦于桁架网箱结构响应评估时网衣及网衣不同参数对其影响的程度。

由于自升式桁架网箱是一种新型网箱,关于其研究还比较有限,庞国良等^[28]针对一种8桩腿自升式桁架网箱,基于ANSYS/Mechanical通过求解不同工况下网箱各部件结构变形情况及应力分布评估网箱结构安全性,并验证了这种型式网箱对极端环境条件的适用性,同样的方法也被用于对一种单桩腿八边形可组合式单元升降网箱的安全性分析^[29],但网箱模型也仅考虑了网箱主体结构,忽略了网衣系统对网箱结构响应评估结果的影响。因此,本研究以自升式桁架网箱为研究对象,通过构建包含网衣系统的自升式桁架网箱模型,旨在探明网衣系统对桁架网箱结构响应的影响。

本研究基于SESAM软件开展相关仿真计算。首先建立了有无网衣的自升式桁架网箱数值模型,开展了不同工况下网箱结构响应仿真计算,从桩腿支反力及网箱桁架结构强度校核结果方面,对比分析了有无网衣对网箱结构响应的影响;然后基于附带网衣的网箱数值模型,进一步探讨了网衣不同群化比及不同数量系缚纲绳对桁架网箱结构响应评估的影响,研究可为大型桁架网箱结构响应评估提供技术参考。

1 网箱计算模型

1.1 网箱结构参数

本研究对象为一种8桩腿自升式桁架网箱(图1-a),网箱总长为133 m,总宽为70 m,主体

高为 10.3 m, 分为 6 个养殖区, 养殖水体总计约 $9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。网箱包括网箱主体框架、桩腿以及网衣系统 3 个部分, 其中网衣通过钢绳系缚于网箱主体框架相邻桁架管上来构造养殖水体空间, 网箱每个养殖区网衣形状类似于椭圆柱体 (图 1-b), 其中横轴长度为 34 m, 纵轴长度为 24 m, 高度为 9.6 m, 采用方形网目网衣作为网衣材料, 网目目脚长度为 60 mm, 网线直径为 3.5 mm, 网箱主体可沿桩

腿进行上下移动以满足不同工况需要, 网箱桩腿及主体框架所使用的材料为 Q345 钢, 网衣材料为尼龙, 详细的网箱结构参数见表 1。需要说明的是, 本研究主要探讨网衣结构及部分网衣参数对网箱整体结构响应评估的影响, 因此仅考虑了网箱主体框架上部处于水面以上的正常作业状态, 吃水深度为 9.3 m。

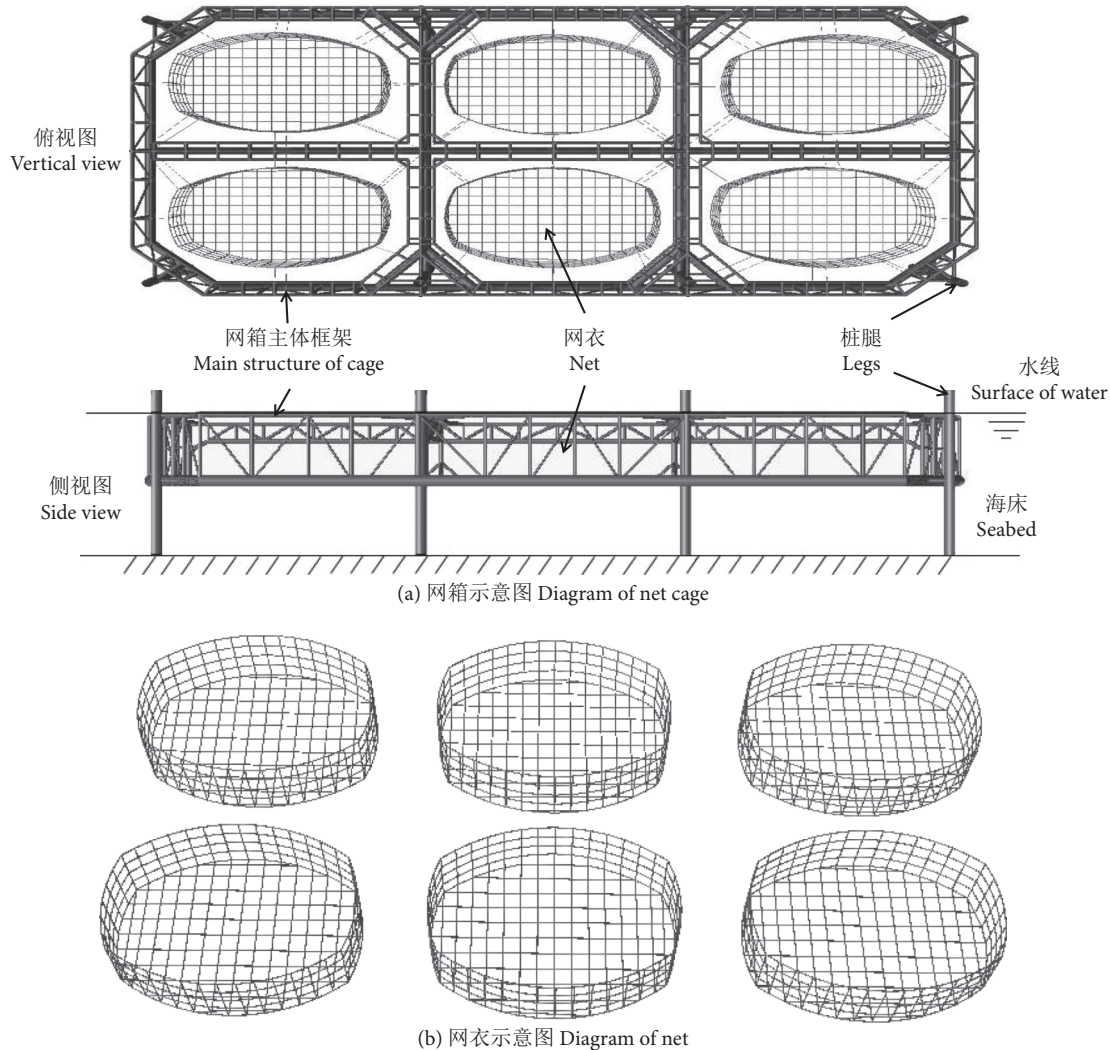


图1 自升式桁架网箱示意图

Fig. 1 Diagram of jack-up truss net cage

1.2 网衣模拟方法

网衣在宏观尺度上是由数万计的细小网目组成, 就本研究而言, 网目目脚长度为 60 mm, 而网衣为长 34 m×宽 24 m×高 9.6 m, 如果对网衣采用考虑实际网目尺寸的精细建模方式, 建模及计算成本将十分巨大。网目群化技术是将网衣中相邻多个实际网目合并成一个“大网目” (图 2-a), 进而在仿真中极大地减少了计算成本。本研究根据一种

改进的网目群化方法对自升式网箱网衣进行等效简化^[30], 该方法重点考虑了网衣等效前后的水动力影响, 根据 Morison 方程调整水动力系数, 保持网衣等效前后所受水动力相同。为探讨网衣在不同群化比条件下对网箱结构响应的影响, 本研究考虑了 30×30 (即将 30×30 个网目等效为 1 个网目)、40×40 和 50×50 3 种网衣群化比。不同网衣群化比下的网衣群化后示意图见图 2-b。

表1 自升式桁架网箱尺寸及参数
Table 1 Principal dimensions and material parameters of jack-up truss net cage

参数 Parameter	数值 Value
网箱总长 Cage length/m	133
网箱总宽 Cage width/m	70
主体框架高度 Cage height/m	10.3
作业水深 Operation water depth/m	22
网箱吃水 Cage draught/m	9.3
桩腿高度 Leg height/m	26
网衣长度 Net length/m	34
网衣宽度 Net width/m	24
网衣高度 Net height/m	9.6
网衣网目尺寸 Mesh size of net/mm	60

1.3 网箱模型建立

考虑到本研究中的自升式桁架网箱主体部分均为桁架管结构, 桩腿和网衣均为细长杆件, 因此在 SESAM/GeniE 建模中, 将模型全部模拟成梁单元。此外, 由于该网箱在长度和宽度方向均为轴对称结构, 因此建模中仅需构建四分之一网箱模型, 然后通过镜像操作便可实现网箱全部模型的建立。

坐标系及网箱载荷方向见图 3。其中, 坐标原点位于网箱艉部中心处, x 轴指向网箱艏部为正, y 轴指向网箱左侧为正, z 轴向上为正, 将沿 x 轴正向定义为 0° 环境载荷方向, 沿 y 轴正向定义为 90° 环境载荷方向。

由于本研究主要关注网箱主体结构响应, 因此

在建模中忽略了网箱桩靴和桩土的相互作用, 在模型边界条件处理上, 直接约束了 8 个桩腿底部节点所有方向自由度。网衣部分则是以网箱主体框架为基础, 连接网衣至相邻桁架管上。最终建立的无网衣和有网衣的自升式桁架网箱数值模型见图 4, 随后通过上述模型研究网衣及不同网衣系缚方式对自升式桁架结构的影响, 并以桩腿支反力和桁架利用系数 (Utilization factor, UF) 值的形式输出对比分析。

2 计算理论与工况

2.1 环境载荷计算

网箱在实际作业中主要受到风、浪、流载荷作用。本研究的自升式网箱水线以上受风部件主要是 8 根桩腿, 对网箱整体结构而言其受风载影响较小, 因此分析中主要考虑波浪和海流两种载荷。另外, 考虑到自升式网箱为轴对称结构 (图 3), 波浪载荷方向上只考虑 0° 、 45° 、 90° 3 个方向。

自升式桁架网箱主要构件均为细长桁架管, 相对于波浪波长而言为典型的小尺度细长构件, 因此网箱结构所受波浪力可以利用 Morison 公式进行计算, 对于细长圆杆结构, 所受到波浪力为:

$$F_{\text{wave}} = \frac{1}{2} C_d \rho D u |U| + C_m \rho \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

式中: C_d 为拖曳力系数; C_m 为惯性力系数; ρ 为海水密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); D 为桩柱直径 (m); U 为桩柱轴线处水质点的水平方向速度 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$); 本研究取拖曳力系数 $C_d=0.7$ 和惯性力系数 $C_m=1.2$ 。

对于海流载荷, 根据稳定流动条件下的杆件

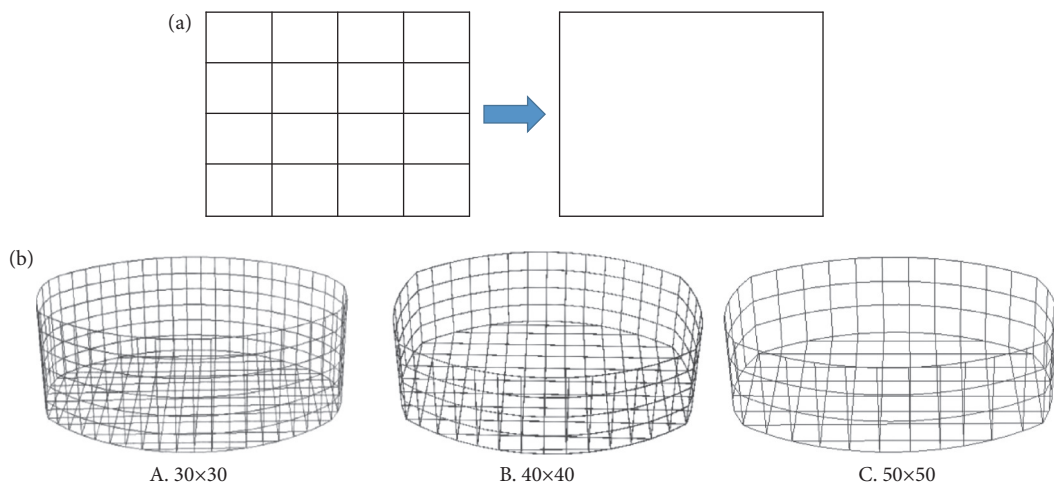


图2 网目群化示意图 (a) 及不同群化比网衣群化后的网衣模型 (b)

Fig. 2 Diagram of mesh grouping (a) and net models with different mesh grouping ratios (b)

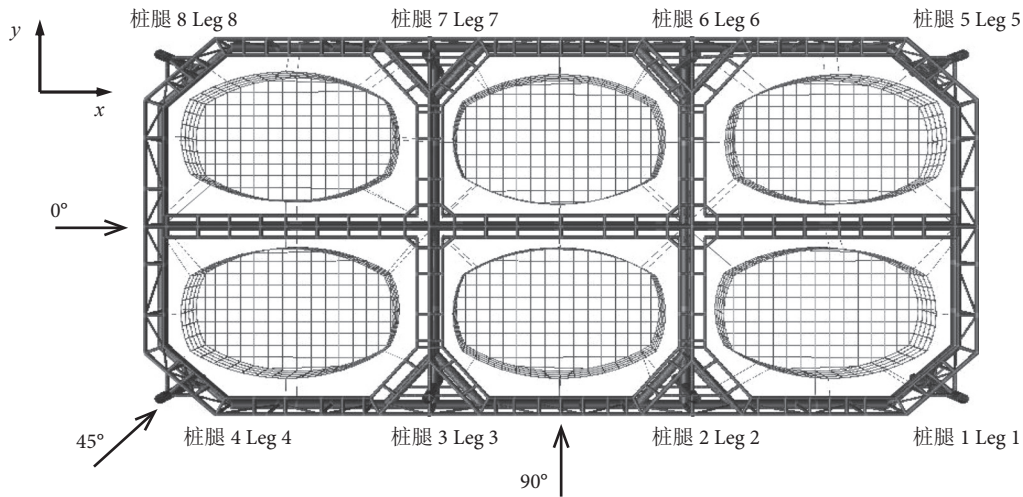


图3 坐标系及环境载荷方向定义

Fig. 3 Coordinate definition and environmental loading direction

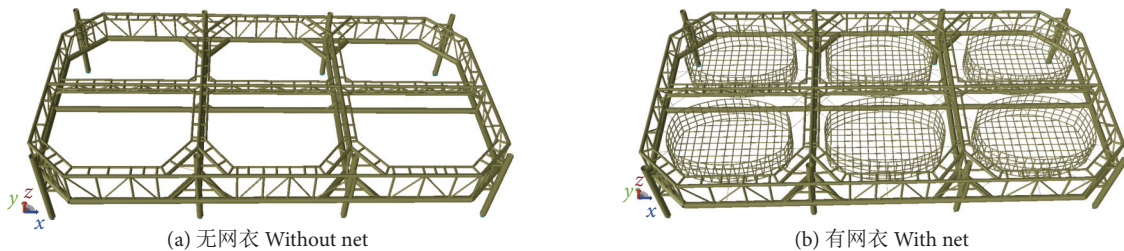


图4 自升式桁架网箱数值模型

Fig. 4 Numerical model of jack-up truss net cage

阻力数学表达, 可以得出桁架杆结构所受到海流阻力为:

$$F_c = \frac{1}{2} \rho C_d A V_c^2 \quad (2)$$

式中: ρ 为海水密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); C_d 为阻力系数, A 为迎流面积 (m^2); V_c 为海流流速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

2.2 计算工况确定

波浪载荷方面, 本研究考虑使用自升式网箱正常作业条件下的极端波浪载荷^[21]来探讨网衣及不同网衣参数对自升式桁架网箱结构响应的影响, 此时波高为 6 m, 波浪周期为 10.8 s, 波浪方向考虑 0°、45°、90° 3 个方向。海流载荷方面, 以 0.25 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 为间隔, 从 0~1.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 不等的流速条件, 海流方向与波浪同向。波浪相位角选取对网箱结构安全校核十分重要, 由于本研究重点探究网衣对网箱结构响应计算结果的影响, 因此波浪相位角方面, 直接采用庞国良等^[28]中的结果, 具体计算工况见表 2。

3 网箱结构响应计算与分析

3.1 有无网衣对网箱结构响应评估的影响

根据表 2 所列计算工况, 开展自升式桁架网箱

有无网衣状态下的结构响应计算。对于自升式网箱来说, 在外部载荷作用下桩腿是支撑网箱的最关键部件, 因此以桩腿支反力作为网箱结构响应评估结果的一个指标。此外, 网箱主体桁架管的强度校核作为评估网箱结构安全的关键, 其作为网箱结构响应评估结果的另一个指标。在 SESAM/GeniE 中, 梁单元的校核结果可以直接以 UF 值的形式自动输出, 本研究中网箱桁架管被模拟为梁单元, 选择通过 UF 值来反映桁架管的强度校核结果。

0°、45° 和 90° 波流方向条件, 网箱有无网衣状态下各个桩腿支反力计算结果见图 5—图 7。由于网箱结构对称性, 0° 波浪方向下, 桩腿 2&6、1&5、3&7、4&8 的支反力基本相同, 90° 波浪方向下, 桩腿 1&4、2&3、5&8、6&7 的支反力基本相同。从图中可以看出, 除个别工况条件可能受到波浪相位选择的影响, 不同波流方向下有网衣网箱的桩腿支反力基本均大于无网衣网箱的, 并且随着流速的增加网箱在有无网衣状态下的桩腿支反力差值增大。

表 3 为不同工况条件网箱有无网衣状态下的主体桁架结构最大 UF 值。可以看出, 考虑网衣后,

表2 网箱结构响应计算工况
Table 2 Loading conditions of structural response of cage

工况 Loading condition	载荷方向 Loading direction/(°)	流速 Current velocity/(m·s ⁻¹)	相位角 Phase angle/(°)	工况 Loading condition	载荷方向 Loading direction/(°)	流速 Current velocity/(m·s ⁻¹)	相位角 Phase angle/(°)
LC1	0	0	75	LC12	45	1.00	90
LC2	0	0.25	75	LC13	45	1.25	90
LC3	0	0.50	75	LC14	45	1.50	90
LC4	0	0.75	75	LC15	90	0	102
LC5	0	1.00	75	LC16	90	0.25	102
LC6	0	1.25	75	LC17	90	0.50	102
LC7	0	1.50	75	LC18	90	0.75	102
LC8	45	0	90	LC19	90	1.00	102
LC9	45	0.25	90	LC20	90	1.25	102
LC10	45	0.50	90	LC21	90	1.50	102
LC11	45	0.75	90				

网箱主体桁架 UF 值明显增大, 比如在工况 LC7 中, 两者相差近 26%, 并且随着流速的增加 UF 值不断增大。

从网箱桩腿支反力和桁架结构强度的校核结果可以看出, 网衣对网箱主体结构的响应评估有较大影响, 尤其是在高流速条件下, 网衣的存在会大幅

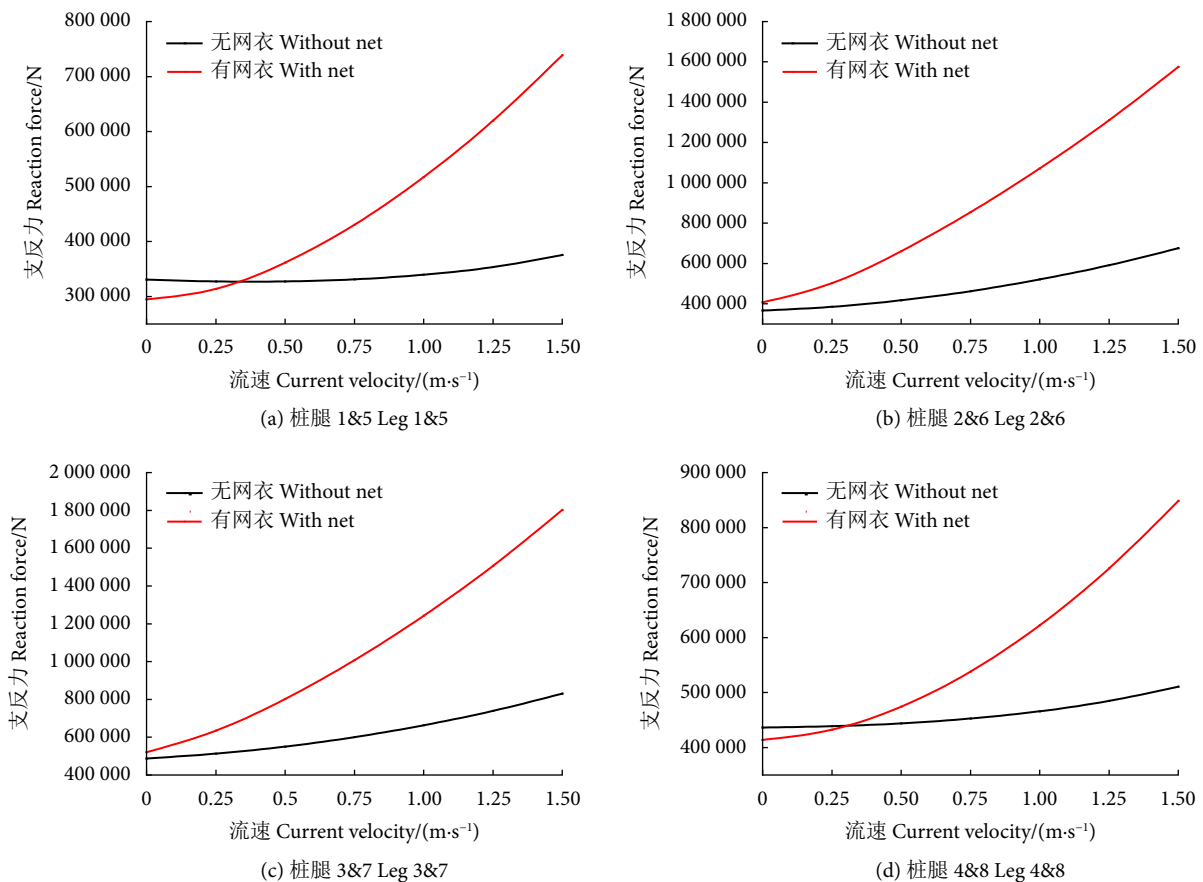


图5 0° 波浪反向下网箱桩腿支反力

Fig. 5 Leg reaction force in 0° wave direction

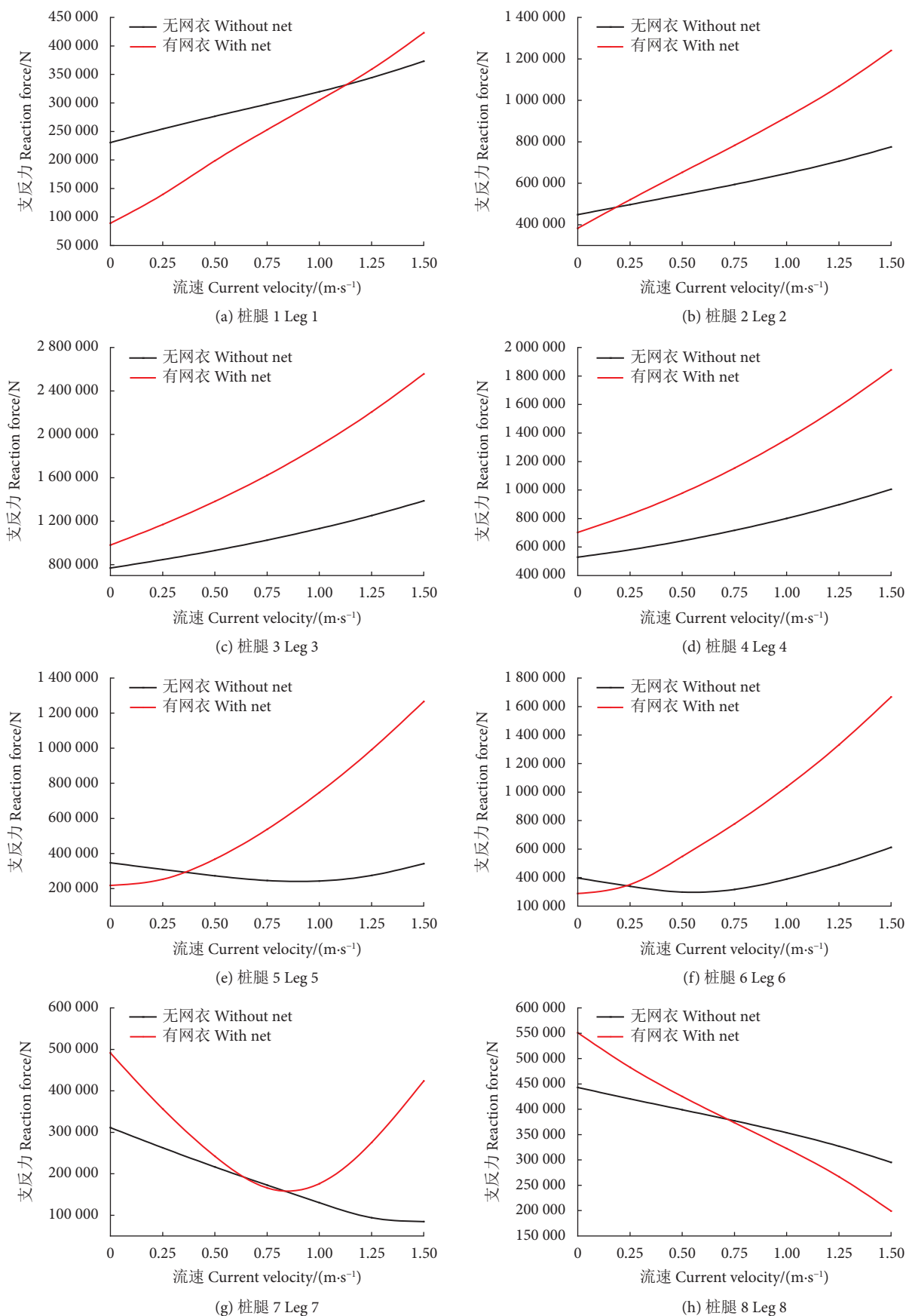


图6 45° 波浪反向下网箱桩腿支反力

Fig. 6 Leg reaction force in 45° wave direction

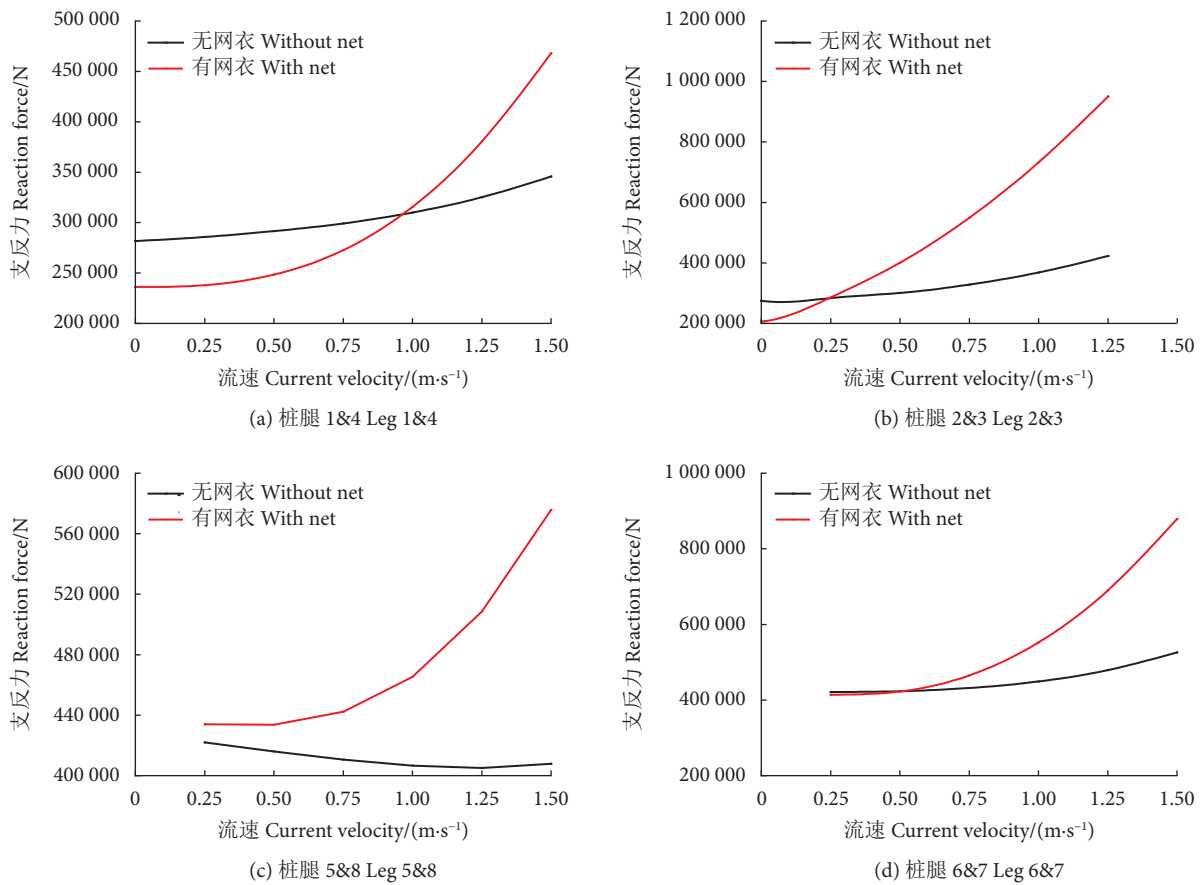


图7 90°波浪方向下网箱桩腿支反力

Fig. 7 Leg reaction force in 90° wave direction

增加网箱桩腿受力和桁架 UF 值，说明在进行桁架网箱结构响应评估时不可忽略网衣的作用。

3.2 不同网衣参数对网箱结构响应评估的影响

3.2.1 不同群化比

在自升式桁架网箱结构响应仿真评估中，上文论证了网衣部件作用不可忽略，但在实际建模过程中，由于网目尺寸较小，网衣建模均需要进行群化处理。为了评估不同网衣群化比对网箱结构响应评

估的影响，根据 2.2 所述，在不改变网线直径的情况下，分别建立了 30×30、40×40 和 50×50 网衣群化比下自升式网箱模型。计算工况方面，根据 3.1 的结果，在 0°、45° 和 90° 方向分别选取工况 LC5、LC12 和 LC19 进行计算，同样通过桩腿支反力和桁架结构强度校核结果开展相关评估。

从图 8 中可以看出，在不同工况、不同网衣群化比条件下，桩腿支反力相差不大，最大差值出现

表3 有无网衣的利用系数值
Table 3 Utilization factor value with net and without net

工况 Loading condition	有网衣 With net	无网衣 Without net	工况 Loading condition	有网衣 With net	无网衣 Without net	工况 Loading condition	有网衣 With net	无网衣 Without net
LC1	0.66	0.59	LC8	0.74	0.67	LC15	0.30	0.26
LC2	0.67	0.59	LC9	0.76	0.67	LC16	0.30	0.28
LC3	0.69	0.60	LC10	0.77	0.68	LC17	0.31	0.30
LC4	0.71	0.61	LC11	0.79	0.69	LC18	0.35	0.30
LC5	0.74	0.61	LC12	0.80	0.70	LC19	0.36	0.31
LC6	0.77	0.62	LC13	0.82	0.71	LC20	0.45	0.35
LC7	0.81	0.64	LC14	0.84	0.72	LC21	0.50	0.43

在 45° 波浪方向工况 LC12, 桩腿 3 支反力在网衣群化比为 50×50 时为 1 990 566.486 N, 网衣群化比为 30×30 时为 1 836 066 N, 两者相差 8.4%。从表 4 中可以看出, 在不同工况、不同网衣群化比条件下, 网箱桁架 UF 值相差也不大, 最大差值出现在工况 LC5, 50×50 和 40×40 群化比间, 相差

0.07, 可见不同群化比的网衣对自升式深海网箱整体结构强度计算的影响不大。此外, 在数值仿真中, 若重点关注的是桁架结构响应情况, 且为获得更高的仿真计算效率, 可以选择较大的网目群化比对网箱网衣部分进行群化处理。

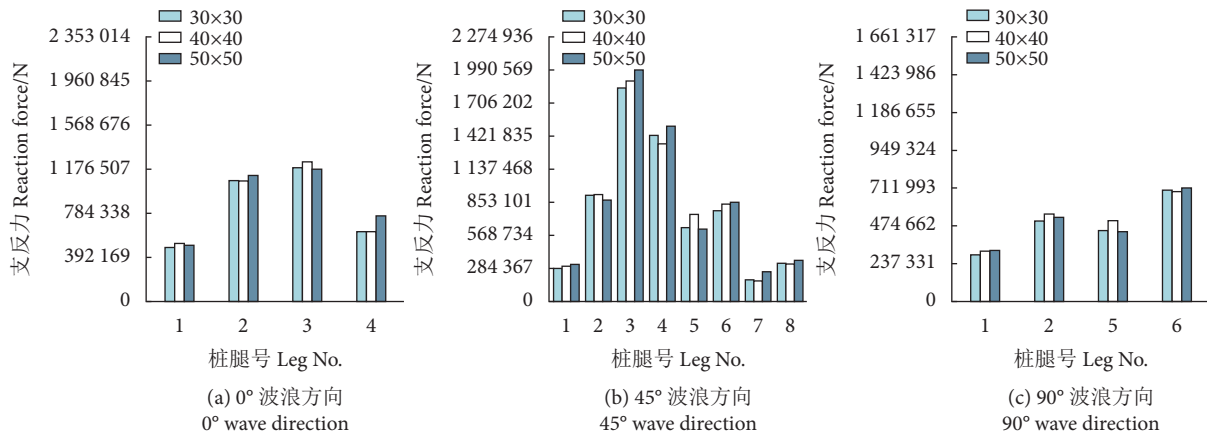


图8 不同群化比下不同波浪方向桩腿支反力

Fig. 8 Leg reaction force in different wave directions with different mesh grouping ratios

表4 不同群化比下的的利用系数值

Table 4 Utilization factor values with different mesh grouping ratios

群化比 Grouping ratio	LC5	LC12	LC19
30×30	0.75	0.77	0.30
40×40	0.74	0.80	0.36
50×50	0.81	0.83	0.35

3.2.2 网衣系缚方式

作为网衣与网箱主体框架的连接部分, 网衣在布设时不同数量的系缚纲绳可能会对网箱整体结构响应有影响, 通过设置 8、16、24 和 32 根系缚纲绳, 同样在 0°、45° 和 90° 方向分别选取工况 LC5、LC12 和 LC19 开展相关计算, 系缚纲绳及系缚点位置如图 9 所示。

不同波浪方向下不同数量系缚纲绳的网箱对应的桩腿支反力如图 10 所示。可以看出, 在 45° 波浪方向下, 8 根与 32 根系缚纲绳网箱的 5 号桩腿支反力差值最大 (9.8%), 其余桩腿支反力的变化不大。对比表 5 中不同系缚纲绳数量下的 UF 值, 不难看出最大差值出现在 LC12 的 8 根系缚纲绳的网箱与 24、32 根系缚纲绳的网箱上, 但仅相差 0.05, 因此, 网衣系缚纲绳数量对桩腿支反力和网

箱桁架结构强度校核结果影响不大。

图 11 为不同数量系缚纲绳下网箱系缚纲绳在 3 个波浪方向下的平均张力, 可以看出 3 个波浪方向下, 随着系缚纲绳的增加, 系缚的平均张力明显减少。因此, 为保证网衣系缚安全, 在网衣制作中增加系缚纲绳是易于操作的有效手段。

4 结论

本研究针对自升式桁架网箱, 着重探究了网衣对网箱结构响应评估的影响, 通过构建网箱仿真计算模型, 分析了在有无网衣及不同网衣参数条件下的网箱主体结构响应。结果表明: 1) 网衣对网箱主体结构强度存在较大影响, 尤其在高流速条件下, 网衣的存在会大幅增加网箱桩腿及主体结构的受力, 证明在校核网箱结构强度时不可忽略网衣的作用; 2) 通过对比 30×30、40×40、50×50 这 3 组不同网目群化比下的桩腿支反力和 UF 值, 发现不同群化比下的网衣对自升式桁架网箱整体结构强度和网箱桩腿受力的影响变化不大, 在数值仿真中可以考虑使用较大的群化比来提升计算效率; 3) 通过对 8、16、24 和 32 根系缚纲绳下的网箱桩腿支反力、网箱主体 UF 值以及系缚纲绳的平均张力对比分析, 可以看出网衣系缚纲绳数量对网箱整体结

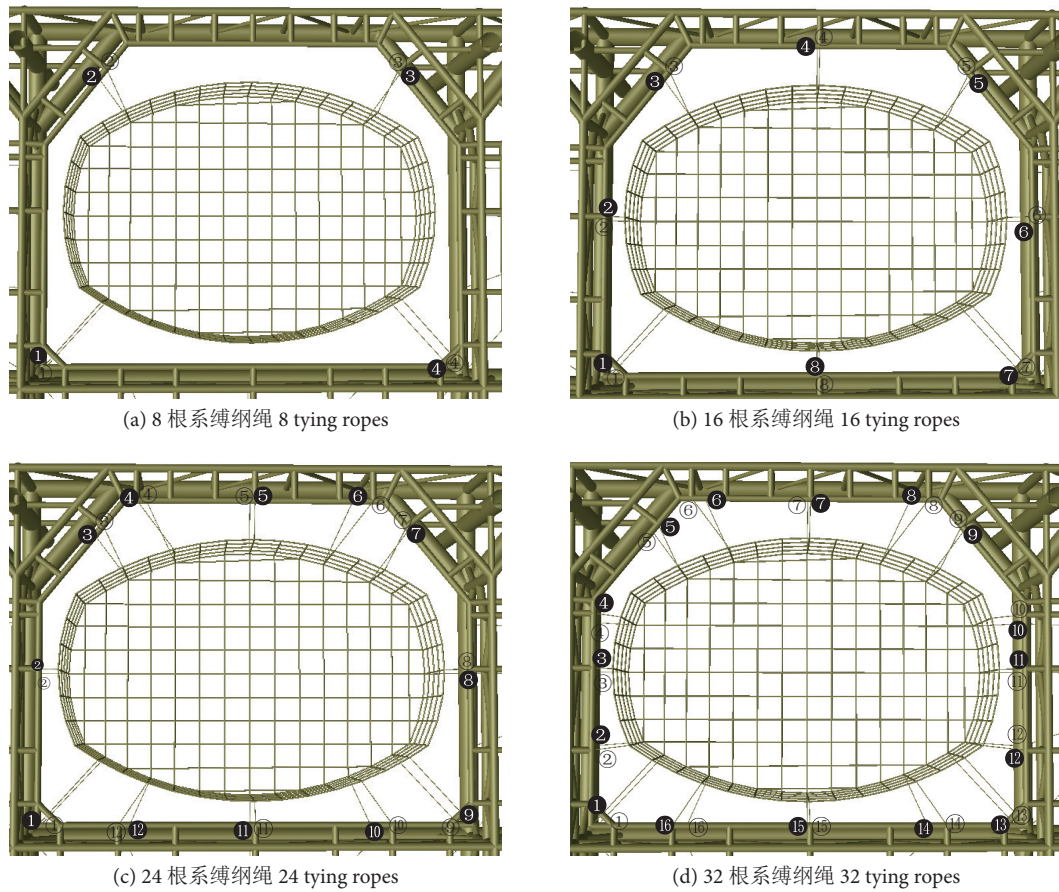


图9 系缚纲绳及系缚点位置
注：空心圆代表上系缚点的编号，实心圆代表下系缚点的编号。

Fig. 9 Position of tying rope and tying point

Note: The hollow circles represent upper tie points No. and the solid circles represents lower tie points No..

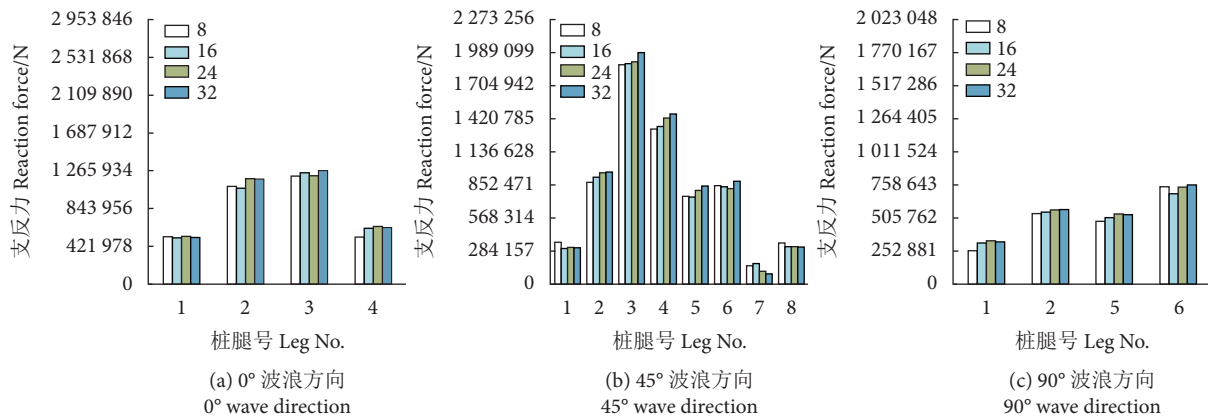


图10 不同波浪方向下不同系缚纲绳数量的框架所对应的桩腿支反力
Fig. 10 Leg reaction force with different number of tying ropes in different wave directions

表5 不同系缚绳数量下的利用系数值

Table 5 Utilization factor values with different number of tying ropes

系缚纲绳数量 Number of tying rope	LC5	LC12	LC19
8	0.75	0.77	0.32
16	0.74	0.80	0.36
24	0.75	0.82	0.34
32	0.75	0.82	0.33

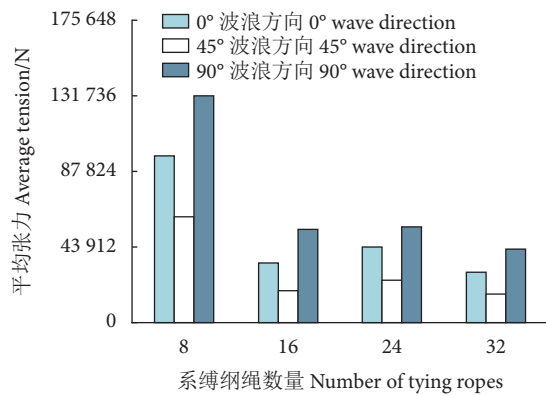


图11 不同数量系缚纲绳的平均张力

Fig. 11 Average tension with different number of tying ropes

构强度评估和网箱桩腿受力基本无影响,但增加系缚绳可以有效减少系缚点受力。由于本研究是基于 SESAM/Genie 梁单元模拟网衣网线,未考虑网衣柔性变形特性以及网衣系缚后的缩结效应等,后续将进一步考虑实际情况,深化相关研究。

参考文献:

- [1] 黄小华, 庞国良, 袁太平, 等. 我国深远海网箱养殖工程与装备技术研究综述[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 121-131.
- [2] 范亚丽, 匡晓峰, 辜坚, 等. 多环境因素下网衣水动力特性试验研究[C]//《水动力学研究与进展》编委会, 中国力学学会, 中国造船工程学会, 等. 第三十三届全国水动力学研讨会论文集, 2022: 8.
- [3] 吴皓, 刘强, 范为. 养殖网箱网纲和网衣水动力载荷研究[J]. 渔业现代化, 2023, 50(5): 43-51.
- [4] 刘鹤, 吕宇澄, 黄硕, 等. 网衣生物附着对半潜式波浪能养殖平台水动力特性的影响[J]. 船舶工程, 2022, 44(3): 7-13.
- [5] 曹学睿. 重力式网箱水动力响应数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022: 28-39.
- [6] 白晓东. 深海网箱浮架结构弹性响应及安全疲劳分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2019: 17-24.
- [7] 黄小华, 刘海阳, 胡昱, 等. 深水养殖网箱浮架变形模拟及结构改进设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 44-49.
- [8] 胡金鹏, 张旋. 极端海况下重力式网箱系泊系统数值模拟[J]. 大连理工大学学报, 2021, 61(6): 615-622.
- [9] 程晖, 黄六一, 倪益, 等. 水流条件下单点系泊不同结构“钻石型”重力式网箱的水动力特性数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 161-170.
- [10] 王银涛, 王千, 郭晓宇. 规则波作用下网箱水动力的实验研究[C]//中国力学学会. 中国力学大会论文集(第五册), 2022: 1.
- [11] 刘航飞. 一种深远海半潜式养殖平台水动力特性研究[D]. 大连理工大学, 2023: 27-34.
- [12] 崔勇, 关长涛, 黄滨, 等. 波浪作用下双层网底网箱水动力特性的数值模拟[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(6): 18-24.
- [13] 张婧, 孙立文, 周游, 等. 组合钢架式网箱水动力性能分析[J]. 渔业现代化, 2022, 49(6): 27-34.
- [14] LEI Y, LI W, ZHENG X Y, et al. A floating system integrating a wind turbine with a steel fish farming cage: experimental validation of the hydrodynamic model[J]. Mar Struct, 2024, 93: 103525.
- [15] 陈炫光, 陈俊华, 董新龙, 等. 波浪作用下串联浮筒对船型网箱锚泊系统的受力影响分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2020, 33(3): 99-104.
- [16] 张新昊. 大型深海养殖网箱平台设计及单点系泊系统设计研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020: 48-53.
- [17] 张松, 庞国良, 黄小华, 等. 船型桁架结构网箱系泊方式优选及影响参数分析[J]. 渔业现代化, 2022, 49(5): 97-105.
- [18] 黄小华, 王芳芳, 刘海阳, 等. 系泊和压载方式对半潜式渔场平台动力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(15): 48-53.
- [19] XU H, RUI S J, SHEN K M, et al. Investigations on the mooring safety considering the coupling effect of the mooring line snap tension and anchor out-of-plane loading[J]. Appl Ocean Res, 2023, 141: 103753.
- [20] YUAN L H, CHEN Y, ZAN Y F, et al. A novel hybrid approach to mooring tension prediction for semi-submersible offshore platforms[J]. Ocean Eng, 2023, 287: 115776.
- [21] 李亚杰, 闫中杰, 刘扬, 等. 海上风电与海洋养殖融合发展现状与展望[J]. 船舶工程, 2023, 45(S1): 166-170.
- [22] 王朋超. 船舶与深水网箱系泊系统水动力分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2023: 21-25.
- [23] 李贺. 大型网架式深海网箱结构强度分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022: 22-26.
- [24] 孙树政, 李辉, MUK C O, 等. 网架式网箱浮架结构设计载荷与屈服强度分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(3): 340-347.
- [25] 柴佳瑜, 顾赛文, 张兆德. 浪、流作用下大型网箱结构强度的数值模拟[J]. 船舶工程, 2021, 43(4): 24-31.
- [26] 李昊瑾. 网架式养殖网箱结构强度分析方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022: 15-21.
- [27] 汤建锋. 深海网箱平台结构屈服强度与疲劳强度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2022: 11-18.
- [28] 庞国良, 黄小华, 陈超核, 等. 自升式深海网箱不同工况下结构安全性评估研究[J]. 渔业科学进展, 2022, 43(6): 56-68.
- [29] 罗俊, 陈胜, 段家辉, 等. 单元升降式网箱强度校核[J]. 海洋技术学报, 2023, 42(1): 98-106.
- [30] 施兴华, 周游, 钱信麒, 等. 基于水动力性能的网箱网衣网目群化数值模拟方法研究[J]. 渔业现代化, 2021, 48(3): 74-79.