

海洋生物柔性拦截网波浪力特性

张正楼¹, 张继玉², 邢晓峰¹, 郭天翔¹, 张禹³

(1. 上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海 200233; 2. 山东核电有限公司, 山东 烟台 264670;

3. 中国水产科学研究院东海水产科学研究所, 上海 200090)

摘要: 取水明渠柔性拦截网受波浪作用上下运动, 有限振幅波理论中的水质点位置难以确定, 导致波浪力计算存在困难。基于水池试验方法对波浪力形成的速度理论计算方法进行修正。结果表明, 波浪力水质点位置与波高以及波周期相关, 修正公式计算值与试验结果误差小于 20%, 符合性较好。研究成果对于拦截网的承载力设计和运行监测具有一定的指导作用。

关键词: 拦截网; 波浪试验; 水动力特性

中图分类号: TU992 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)21-0336-05

国内外发生多起海洋生物大规模聚集迁移堵塞取水系统继而导致核电机组停堆运行事件^[1], 国内已累计发生 22 起, 在火力发电厂等取用海水的设施也发生百余起海洋生物导致取水堵塞事件。在取水明渠内设置海洋生物拦截网成为当前防控的主要手段。拦截网受水流及波浪作用, 作用力特征较为复杂, 特别是柔性拦截网受波浪作用上下运动, 有限振幅波理论中的水质点位置难以确定, 导致波浪力计算存在困难。

拦截网的水动力特性有海上实测、模型试验和数值仿真 3 种方法。海上实测能够获得平面拦截网在真实工况下的性能指标, 能够反映实际作业的网具数据, 但是海上实测海况条件难以控制, 需耗费大量的人力、物力和财力, 研究成本较高。此外由于拦截网的构件比较复杂, 海上实测由于受波浪和潮流等海况环境条件的影响, 要对拦截网系统的受力和变形进行现场直接测量和分析极为困难。核电厂海工设计规范^[2]给出看平面网片的经验计算公式。詹杰民等^[3]利用水槽实验, 研究网片阻力系数的变化规律, 并提出了计算网衣阻力系数的经验公式, 分析认为同样的面积下圆形网阻力要比平面网小得多。桂福坤等^[4]探讨了物理模型实验中网衣模拟的相关技术, 对模型实验相似理论的合理性进行了研究, 并提出了网衣整体尺寸与单个网目采用两

种不同的比尺, 该方法近年来得到了广泛应用。李玉成和桂福坤^[5]通过物理模型试验, 得到了平面无结节网衣的阻力系数随雷诺数、布置状态和倾角变化的规律和相应的计算经验公式。Moe 等^[6]通过模型实验分析了水流作用下网衣密度对变形及其所受荷载的影响, 研究表明当网衣密度较大时, 需要开发新的计算模型。沐雨等^[7]、Xie 等^[8]开展了波流联合作用下平面拦污网衣系泊动力响应特性研究, 得到了总拉力与雷诺数的关系。杨沪等^[9]通过某核电厂取水拦污设施波浪模型网衣试验与有限元数值模拟方法共同研究拦污网水动力特性, 得到锚绳及桩台在不同拦污网堵塞率条件下的受力变化, 研究结果表拖曳力系数 C_d 与密度 S_n 之间的关系成二次线性关系。车淑平等^[10]采用多孔介质模型和集中质量法构建了取水明渠拦截设施周围流场及其张力响应分析的数值模型, 取水明渠拦截设施所在横截面的海生物堵塞存在显著的不均匀性, 拦污网的最大张力随着网衣宽度的增加而线性增加。李杰等^[11]运用 ANSYS 建立桥梁水耦合数值分析模型, 分析水流、波高以及联合作用动力响应, 表明波浪在动力响应中占主导作用。

综上所述, 学者们采用试验方法和数值仿真技术围绕网衣水动力及受力特性等方面开展了研究, 但研究对象主要聚焦在渔业拖网和平面拦截网的

收稿日期: 2024-05-12

基金项目: 国家电投集团统筹研发项目(KYTC2021HN05)

作者简介: 张正楼(1984—), 男, 江苏响水人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为核电厂冷源取水安全; 张继玉(1990—), 男, 甘肃白银人, 工程师, 研究方向为核电厂冷源取水安全; 邢晓峰(1975—), 男, 上海人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为核电厂冷源取水安全; 郭天翔(1985—), 男, 山东菏泽人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为核电厂冷源取水安全; 张禹(1981—), 男, 山东龙口人, 硕士, 副研究员, 研究方向为渔具鱼法与渔业工程。

波流特性,鲜见对于核电厂应用场景的波浪特性相关研究,且研究中未考虑拦截网的波浪力质点位置特征。本文采用模型水池试验方法研究柔性拦截网波浪水动力特性,研究成果可应用于核电厂的柔性平面拦截网的设计及运行监测。

1 计算方法

拦截网受力与受力面积(包括堵塞作用)、流速、波浪水质点水平方向速度相关,计算公式为

$$R = KS K_S U_x^n + KS K_S V^n \quad (1)$$

式中: R 为拦截网阻力,kN; K 为阻力系数; S 为受力面积(网衣、上纲、力纲等), m^2 ; K_S 为与堵塞率 B_f 相关的系数; U_x 为波浪水质点水平方向速度(其方向与流速一致时为正,与流速相反时为负), m/s ; V 为流速, m/s ; n 为系数。

$$S = S_n + S_l + S_s \quad (2)$$

式中: S 为实际受力面积, m^2 ; S_n 为网衣面积, m^2 ; S_s 为上纲和侧纲线面积, m^2 ; S_l 为力纲线面积, m^2 。

$$S_n = N[4(a - d_k)d + \frac{\pi d_k^2}{2}] \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中: N 为网目数; a 为目脚长度,mm; d 为网线直径,mm; d_k 为结节直径,mm。

根据有限振幅波(非线性波)理论^[2,12-14],波浪质点水平方向速度 U_x 计算公式为

$$U_x = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z + d')}{\sinh k d'} \quad (4)$$

式中: H 为波高,m; T 为波周期,s; k 为波数, $k = 2\pi/L$, L 为波长; d' 为水深; z 为水质点在水深方向的位置,取值范围为 $-H/2 \sim H/2$; x 为水质点在水平方向的位置。

2 试验方法

2.1 模型设计

模型试验在多功能综合实验水池进行(图1)。多功能试验水池长50 m,宽26 m,深1.2 m,配有多项不规则造波系统、造流系统和造风系统。可模拟多个方向正弦波和椭圆余弦波等规则波,国内外常用的频谱(包括J谱、B谱、P-M谱、MPM谱、港口水文规范谱)以及自定义频谱所描述的不规则波、斜向波和多向不规则波。造流系统选用2台双向泵(总流量为2 000 L/s),配备双向变频电源,用计算机自动控制产生双向流场。池首及侧边加直立式消能网,池尾安装斜坡式消能网,可以减少波浪反射。

依据相似理论,考虑模型尺度、波浪要素及试验室设备条件,拦截网模型几何比尺取为1:20。各

物理量比尺如下:几何比尺 $L_r = 20$;时间比尺 $T_r = \sqrt{L_r} = 4.472$;速度比尺 $U_r = \sqrt{L_r} = 4.472$;力比尺 $F_r = L_r^3 = 8\ 000$ 。水池背景流速0.257 m/s,则对应原型流速1.15 m/s。

在模型安装之前,在预设模型断面中心点设置波高仪,根据给定的设计波要素,计算不规则波造波信号,驱动造波机。经数次迭代修正后得到模型设计确定的波浪要素。不规则波谱型采用JONSWAP谱,谱峰升高因子 $\gamma = 3.3$ 。试验波浪模拟谱示例如图2所示。可以看出波浪模拟结果良好。



图1 波浪试验

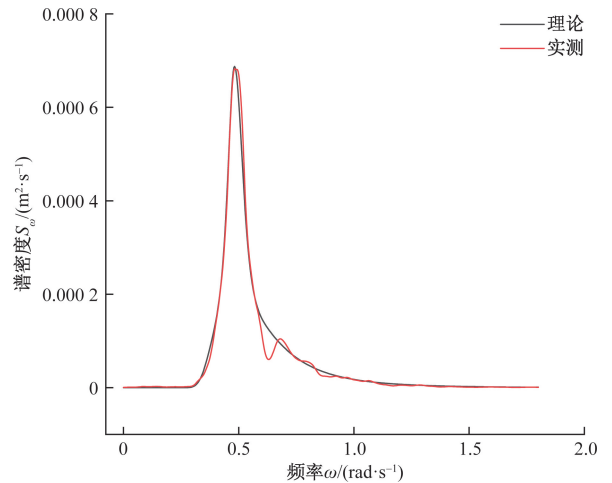


图2 波浪谱模拟结果

2.2 模型网制作

模型网大尺度比 $\lambda = 20$,小尺度比 $\lambda' = 1$,装配成长7.0 m×宽0.75 m的模型。试验时上纲装38个 $\phi = 60$ mm塑料泡沫浮子,单个浮子的静浮力为195 gf(1gf=0.009 8 N),下纲装1条 $\phi = 6.5$ mm铁链,单条铁链的空气中重量为1 983 g。

平面拦截网模型在港池中安装后的长度为6 m,采用1#测力计和2#测力计分别测量拦截网模型左侧和右侧的受力情况,其中1#测力计为图3中拦截网模型的左侧,2#测力计摆放为图3中拦截网的右侧,如图3所示。平面拦截网水平扩张系数为0.85,垂直扩张系数为0.67。

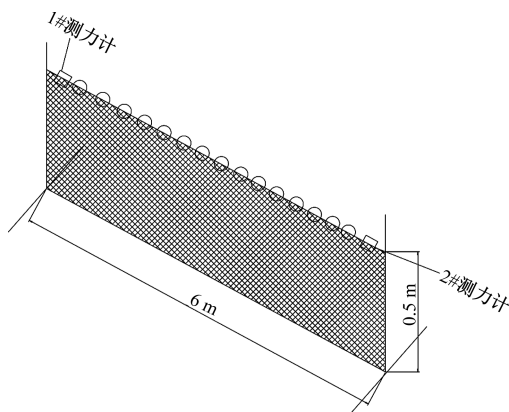


图3 模型网及测力计

2.3 量测设备

试验的仪器设备主要有浪高仪、流速仪、测力系统以及其他实验辅助设备。水下拉力传感器工作量为20 kg,精度优于1%。流速仪采用声学多普勒点式流速仪,波浪测量采用LYL-III型浪高仪,试验前对仪器进行标定校准。该系统可同步测量多点波面过程并进行数据分析。每次试验前后对所有量测仪器都进行标定和校准,以满足测试要求。波高仪量测绝对误差为 ± 1 mm。

3 结果分析

理论计算公式中,阻力系数 K 、系数 n 、水质点在水深方向的位置 z 3个参数无确定的数值。采用试验方法获取阻力系数 K 与系数 n 的关系。拦截网的模型试验是按照有关相似准则,将拦截网制成按比例缩小的模型,在模拟真实的作业条件下,分析模型的受力状况和形状变化。

采用试验方法与理论计算方法进行对比。图4给出了不同波浪周期下,拦截网的波浪试验阻力、理论估算阻力(假设 $z=0$ 的质点速度为波浪最大群速度)、核电厂水工设计规范计算公式(假设 $z=0$ 的质点速度为波浪最大群速度)上限与下限计算值之间的关系,可见理论估算阻力与实际模型试验阻力存在较大偏差。图5给出了不同波浪周期下,拦截网的波浪试验阻力最大值和假定理论计算阻力之间的阻力相对误差。可见,假定理论计算结果与试验结果存在一定的偏差,最大偏差达到51%。

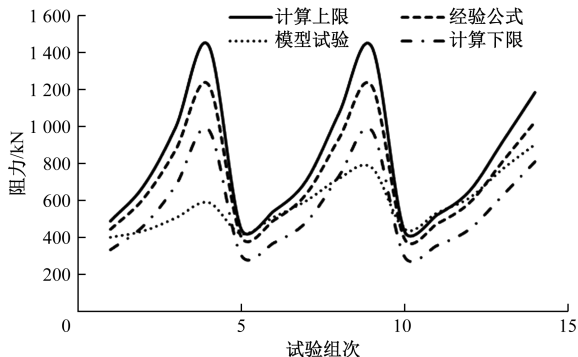


图4 各试验组次下拦截网的波浪试验阻力和理论估算阻力
(假设 $z=0$ 的质点速度为波浪最大群速度)

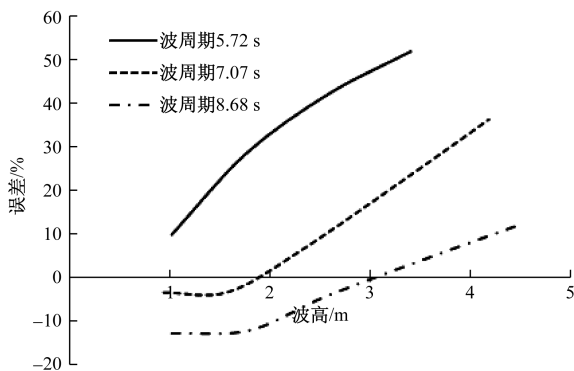


图5 不同波浪周期下,拦截网的波浪试验阻力
最大值和理论估算阻力相对误差
(假设 $z=0$ 的质点速度为波浪最大群速度)

分析其存在偏差的原因,试验实际工况时:在波高低、周期长时,网衣随波浪上下波动, $z=0$ 点的质点速度可以近似代表波浪群速度。而随着波高的增加、波周期减少,波浪力作用于网衣的有效面积减少,可以代表波浪群速度的水质点水深方向位置 z_n 下降。因此,实际计算时需要根据波周期和波高进行修正波浪群速度。根据波浪试验中获取的最大波浪力 $F_{\max}$,调整波浪群速度对应的水质点水深方向的位置,使得 $F_{\max}$ 与理论计算值之间的平方和差异最小,从而得到波浪作用于拦截网波浪群速度对应的质点速度(即波浪群速度为 z_n 位置的质点速度)的修正公式:

$$z_n = (k_1 H + k_2 T - k_3) - H/2 \quad (5)$$

式中: z_n 为修正后波浪群速度对应的水质点在水深方向的位置,m,取值范围为 $-H/2 \sim H/2$; k_1 、 k_2 、 k_3 为系数。

图6给出了不同波浪周期下,拦截网的波浪试验阻力和修正后的理论估算阻力(修正后 z_n 的质点速度为波浪最大群速)与波高关系。图7给出了不

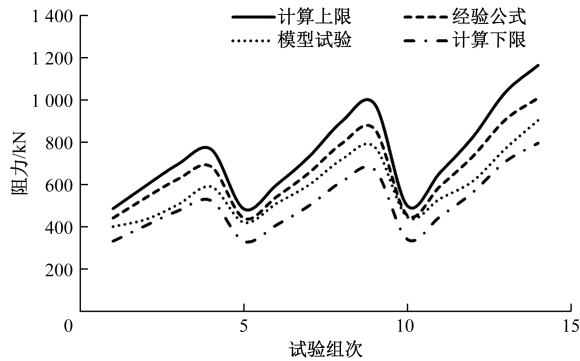


图6 各试验组次下拦截网的波浪试验阻力和理论估算阻力
(修正后 z_n 的质点速度为波浪最大群速)

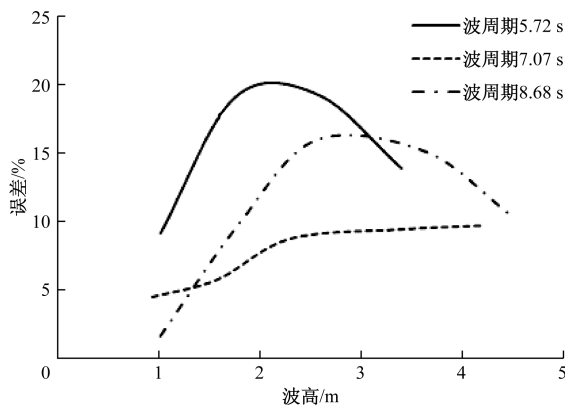


图7 不同波浪周期下,拦截网的波浪试验阻力
最大值和理论估算阻力相对误差
(修正后 z_n 的质点速度为波浪最大群速度)

同波浪周期下,拦截网的波浪试验阻力最大值和修正后的理论估算阻力(修正后 z_n 的质点速度为波浪最大群速度)之间的阻力差相对误差。可见,修正后计算值与试验值的在 20% 以内,且均为正偏差,两者符合性较好。

图8为不同波浪周期下,拦截网波浪力与波高关系,可见各波浪周期下,阻力随着波高增加而增加,波周期 8.68 s 时,波高 4.48 m 时上纲合计阻力 1 009 kN,其中水流流速 1.15 m/s 作用形成的阻力为 353 kN,波浪力占比 65%。同时可以看出各波高条件下,阻力随着波周期增加而增加,在波高 3.4 m 时,波周期 5.72、7.07、8.68 s 时,波浪力分别为 332.5、443.6、518.6 kN,即相对 5.72 s 时波浪力分别增加 33.4%、56%。

4 工程应用案例

试验研究成果应用于某核电站的拦截网承载力计算。该核电厂采用网兜型拦截网,单个网兜开口宽度 6 m、高度 9 m,总长度 30 m,其中引导网部分长度 22 m,孔径 10 mm,网囊部分长度 8 m,孔径

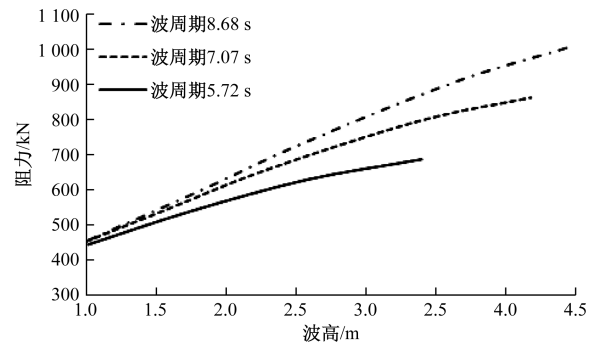


图8 不同波浪周期下,拦截网波浪力与波高关系

5 mm。设计高潮位时,最大波高 2.25 m,波周期 10.4 s,流速 0.29 m/s;设计低潮位时,最大波高 0.45 m,波周期 10.3 s,流速 0.89 m/s。

采用本文的计算方法,计算结果表明整道漂浮式拦截网(22 个网兜、两侧平面网组成)在堵塞率 70% 时的设计最大作用力为 415 kN。

5 结论

取水明渠柔性拦截网受波浪作用上下运动,有限振幅波理论中的水质点位置难以确定,导致波浪力计算存在困难。假设 $z=0$ 的质点速度为波浪最大群速度时,假定理论计算结果与试验结果存在一定的偏差,最大偏差达到 51%。分析认为在波高低、周期长时,网衣随波浪上下波动, $z=0$ 点的质点速度可以近似代表波浪群速度。而随着波高的增加、波周期减少,波浪力作用于网衣的有效面积减少,可以代表波浪群速度的水质点水深方向位置 z_n 下降。因此,实际计算时需要根据波周期和波高修正波浪群速度。

基于物理模型试验方法对理论计算方法进行了修正,结果表明,水质点在水深方向的位置与波高、波周期有关,修正后计算值与模型试验值误差在 20% 以内,符合性较好。

各波浪周期下,阻力随着波高增加而增加,波周期 8.68 s、波高 4.48 m 时上纲合计阻力 1 009 kN,其中水流流速 1.15 m/s 作用形成的阻力为 353 kN,波浪力占比 65%。同时可以看出各波高条件下,阻力随着波周期增加而增加,在波高 3.4 m、波周期 5.72、7.07、8.68 s 时,波浪力分别为 332.5、443.6、518.6 kN,即相对 5.72 s 时波浪力分别增加 33.4%、56%。

采用本文的计算方法对某工程漂浮式拦截网开展计算,得到最大作用力,研究结果为主缆计算和运行期间的监测预警提供了设计依据。

参考文献

- [1] 邢晓峰, 张正楼, 汤建明, 等. 核电厂冷源取水海洋生物堵塞问题探析[J]. 核安全, 2021, 20(6): 103-109.
- [2] 核电厂海工构筑物设计规范: NB/T 25002—2011[S]. 北京: 国家能源局, 2011.
- [3] 詹杰民, 胡由展, 赵陶, 等. 渔网水动力试验研究及分析[J]. 海洋工程, 2002, 20(2): 49-53.
- [4] 桂福坤, 李玉成, 张怀慧, 等. 网衣受力试验的模型相似条件[J]. 中国海洋平台, 2002, 17(5): 22-25.
- [5] 李玉成, 桂福坤. 平面无结节网衣水阻力系数的试验研究[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 145-152.
- [6] MOE H, LADER P F, LIEN E, et al. Structural response of high solidity net cage models in uniform flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 2016, 65: 180-195.
- [7] 沐雨, 解鸣晓, 王辉, 等. 波流联合作用下平面拦污网衣系泊动力响应特性研究[J]. 水道港口, 2022, 43(4): 421-429.
- [8] XIE M X, LI S, MU Y, et al. Experimental investigation on the mooring dynamics of the flexible trash intercept net under wave-current combined actions[J]. Ocean Engineering, 2023, 268: 113544-113544.
- [9] 杨沪, 盛文强, 李强, 等. 波流作用下核电拦污网水动力特性分析[J]. 水电与新能源, 2023, 37(8): 30-33, 57.
- [10] 车淑平, 王辉, 陈思远, 等. 滨海核电站取水明渠拦污网水动力响应数值模拟研究[J]. 海洋技术学报, 2022, 41(4): 96-105.
- [11] 李杰, 李梦闯, 张军锋, 等. 水流、波浪作用下复杂桥墩动力响应[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(14): 6022-6033.
- [12] DEAN R G, DALRYMPLE R A. Water wave mechanics for engineers and scientists[M]. Singapore: Scientific Publishing, 1991.
- [13] 宋伟华. 网衣波浪水动力学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [14] 竺艳蓉. 海洋工程波浪力学[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.

Wave Hydrodynamic Characteristics of the Interception Net

ZHANG Zhenglou¹, ZHANG Jiyu², XING Xiaofeng¹, GUO Tianxiang¹, ZHANG Yu³

(1. Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China;

2. Shandong Nuclear Power Co., Ltd., Yantai 264670, Shandong, China;

3. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

Abstract: Interception nets in intake channel are currently the key means to respond to the intake blockage causing by marine organisms. However, in actual operation, there have been multiple incidents of failure caused by the blockage of interception net. In order to study the hydrodynamic characteristics of waves in planar interception net, theoretical calculation methods were analyzed. Based on physical model testing methods, the theoretical calculation method for the formation of wave forces was explored. The position of water quality points in the water depth direction was discussed. The research results show that the error between the calculated values and the model test results is less than 20%, indicating good consistency. The results have a certain guiding role in the design of the capacity of the interception net.

Keywords: interception net; waves test; hydrodynamic characteristics