冷源拦网在不同堵塞情景下的海流载荷致险分析

王永新，姚兴瑞，林旭东，牛茂昌

（辽宁红沿河核电有限公司 大连 116319）

摘要：文章对核电站取水口区域拦网绳索在海生物堵塞情境下的海流载荷进行了深入分析，据此识别出拦网断裂的高风险区域。（1）基于船载 ADCP 对布置拦网海域进行大潮期海流流速观测，依据卡门 - 普朗特模型与多项式方法对海流分层数据进行剖面流速插值；（2）使用插值最优解对拦网 ANSYS 有限元模型进行不同堵塞工况下的有限元计算。结果显示：在涨急、落急时段三次多项式拟合较卡门 - 普朗特模型更适合观测海域；拦网堵塞发生在高程 7 m 以下时，拦网极值受力水平较低，为绳索安全区；堵塞高程大于 7 m 时，随着高程增大，拦网绳索极值受力表现出明显的线性增大趋势。高程 7 m 以上区域为绳索崩断事故发生的高风险区域，且随着高程增加，断裂风险概率逐渐增大。

关键词：海流流速观测；剖面流速拟合；核电冷源安全；拦网响应规律

中图分类号：P731.21 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-9857（2025）09-0058-11

Experimental Study on the Biological Blockage Response of the Network Which Protects the Cold Source of Nuclear Power Plant

WANG Yongxin，YAO Xingrui，LIN Xudong，NIU Maochang

（Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co.，Ltd.，Dalian 116319，China）

Abstract：This study analyzes the structural stress characteristics of a debris filter net under various marine biological blockage conditions. Firstly，the velocity of currents near water intake is measured based on shipborne ADCP，using the Karman-Prandtl model and polynomial interpolation methods were employed to reconstruct the vertical velocity profiles from stratified observation data. Subsequently，t a finite element（FE）model of the filter net was developed，and its mechanical response was calculated under different blockage scenarios. The results indicate that the three-order polynomial fitting is more suitable for the observation sea area than the Karman-Prandtl model. When the blocking height is less than 7 m，the minimum of the force is small，which is the safety zone of the rope; when the height of blockage is greater than 7 m，the maximum of the force shows a significant linear increase with the elevation increasing. Consequently，the section of the net above 7 m is identified as a high-risk area，where the structural risk escalates gradually with increasing blockage height.

Keywords：Current velocity observation，Velocity profile fitting of，Nuclear power cold source safety of，Law of network response

收稿日期：2025-01-06；**修订日期：**2025-08-12

基金项目：国家自然科学基金（42206221）.

作者简介：王永新，高级工程师，研究方向为核电仪控维修冷源设备

0　引言

某核电站为最大限度地节约能源，采用海水直冷系统。自首次并网发电至今，核电冷源取水口在每年夏季均会出现海生物堵塞而影响取水效率的问题，致使核电站冷源安全面临未知风险[1-2]。因此，核电运营方每年夏季在导流堤外安装尼龙绳海生物拦网，运用物理隔离方法保障核电站冷源取水安全。然而，该方式致使海生物在海流作用下堵塞拦网网格，并在海流载荷作用下极易发生绳索崩断事故。基于上述背景，对海生物拦网绳索在海流载荷作用下的极值受力及危险区域开展评估势在必行[3-5]。

长期以来，工程界一直将海流的大小、方向以及剖面流速分布作为关注的核心。鉴于海流成因的复杂性，加之近岸地区海岸线与地形的多变特性，对近岸海流沿高程方向剖面流速的数值计算，难以建立通用的表达式[6-9]。这一现状直接导致了在不进行现场流速观测的情况下，不同水层中海流速度的差异难以准确评估。此时，若直接将海流速度简化为均匀流场进行计算，会忽视流速在垂直方向上的变化，进而使拦网实际承受的海流载荷与设计预期产生偏差。在此情况下，拦网在某些特定水层可能会承受过大的压力，进而增加其损坏的风险。可见，准确评估冷源取水拦网的海流载荷，其首要难题在于如何准确把握海流的剖面特性。针对这一问题，科研人员依托其他海区的流速垂向观测数据，开展了深入的流速分布研究工作。现有成果认为，垂向流速分布有两种主要形式[10-14]，一是“常规型”断面分布，即在海床的摩擦作用下，近岸浅海潮流越接近海底潮流速度越小，常用的分布模式有指数公式、对数公式及其改进的公式，例如理想状态模式下的卡门 - 普朗特模型，Lavelle 等[12]、Kuo 等[15]考虑水流加减速影响的卡门 - 普朗特修正模型，Dyer[16]、Lawless 等[17]研究了地形变化对海流影响的卡门 - 普朗特修正模型；二是“反常型”断面分布，即海流断面流速从上到下变化较为紊乱[18-19]。由于现有的指数、对数等公式只能拟合单调的流速剖面[20-22]，因此“常规型”断面分布公式无法适用于“反常型”断面流速的拟合[23]。

冷源拦网海流载荷风险分析的另一关键点在于拦网绳索受力的数值计算技术。当探讨网状结构在复杂环境下的受力状况时，数值模拟计算成为模型试验与现场实测之外的重要辅助手段[24-25]。鉴于流固耦合作用的建模过程较为复杂，通常可采用莫里森公式来计算流体对固体的作用力。该理论公式简化了烦琐的流体动力学计算，通过将不同流速下的水阻力公式应用于所构建的数值模型，可求解出各集中质量点的位移和张量，从而揭示不同工况下拦网的变形与载荷分布特征[26]。在实际科研工作中，研究者们常对网绳模型进行合理的简化，并取得了较为准确的研究成果。例如，Li 等[27]运用集中质量法来模拟网绳的基本单元，构建出数值模型以预测网状结构在外部力作用下的形变状况。Bessonneau 等[28]提出了一种迭代计算方法，旨在确定如拖网等水下软网的水动力性能，并通过与水槽实验观测结果的对比，证实了其方法的有效性。另外，Bi 等[29]融合多孔介质模型与集中质量模型，提出了一种新的数值模拟方法，用于探究水流与柔性网之间的相互作用，数值模拟与实验结果均表明，该方法能准确模拟网状结构在水流环境下的受力情形。在固体力学的计算范畴内，有限元法已成为计算固体与拦截网相互作用的主流技术[30]。同时，拦网的布置策略以及海生物堵塞情况下拦网的受力数值模拟也备受关注[31]。温洪涌等[32]通过核电厂取水拦截设施的物理模型实验，深入分析了网兜式拦网在不同水深、波高和流速条件下的受力变化规律，以及各因素对受力的影响程度。基于实验结果，相关研究提出了将网兜布置在波高较低、水流速度较慢的区域，并在网兜固定点安装拉力监测设备，以便及时清除网兜内的堵塞物[33]。

基于此，本文运用声学多普勒流速剖面仪（ADCP）对取水口海域进行大潮日海流断面流速观测，获取拦网安装位置不同时段的海流剖面流速数据。基于上述数据，对比不同剖面流速的拟合方式，进而对海流剖面流速进行插值，并运用有限元法进行不同堵塞情景下的拦网数值模拟，对海流载荷影响下的拦网绳索危险区域进行讨论。

1 海流观测

海流剖面流速数据的获取是识别拦网海流载荷的基础。本文基于实测各水层流速数据，运用不同插值方法进行高程插值，以期得到拦网位置垂直剖面流速的最优解。

1.1 数据采集

载荷导致拦网拉断的情况多以静力拉断为主，因此，选择风险最高的时段进行分析，是有效减少计算工作量的关键策略。鉴于此，本文的首要任务是确定海流流速最大的时刻。海流具有周期性变化的特性。该核电站所在区域属于典型的半日潮区域，海面在 24 小时内会经历两次涨潮和落潮的过程，这一过程包括潮位最低的低潮期、潮位最高的高潮期，以及连接两者的涨落过程。在涨落过程中，涨急和落急时刻分别对应着流速的最大值，而高潮和低潮的停潮时刻则对应着流速的最小值。因此，为有效减少计算工作量，本文对核电站取水口处的水位与流速进行了测量，并明确了涨急和落急所对应的具体时段。

核电站导流堤入口宽度约为200 m，水深约12 m。本文采用 ADCP 进行流速测量，通过船载走航的方式，对取水口附近海域的流速进行了全面测量，并获取了取水口海域的海流剖面分层数据。走航的实时位置则由差分全球定位系统（DGPS）准确记录。测量工作正式开展前按规范进行仪器的测试与校正。测量参数设置为：宽带模式（BB Mode），换能器入水深度 0.5 m，层厚 2 m，采样频率 1 Hz，数据短平均 10 s，数据长平均 60 s。DGPS 采样频率设置为 1 Hz。作业期间，船只保持匀速直线航行，航速控制在 3 m/s 以内。工作过程中 ADCP 固定于船侧，探头朝下发射，沿观测位置连续走航，获得不同时刻各水层（2 m 间隔）的剖面流速数据。

水位由安装在取水口的雷达水位计进行测量。该设备发射的雷达波在遇到水面时会产生反射，通过处理这些反射信号，雷达水位计能够计算出水面与设备之间的实际距离，从而实时获得水位数据。雷达水位计凭借其测量范围广、精度高以及受环境因素影响小等诸多优势，在水位监测中表现出色。此外，它还具备自动记录和数据传输的便捷功能，能够即时将测量到的潮位数据上传至监测系统，为水位监测和管理提供实时、准确的信息支持。

鉴于观测资源有限，需要确定合适的观测时间段。为此，现场测量工作被安排在流速最大的大潮日进行，具体日期选定为 2016 年 4 月 22 日。测量期间的海况和气象条件详细信息参见表 1。分析当日潮位数据，结果显示：低潮时刻出现在 9:45；涨急时段则为 12:30 至 13:30；高潮时刻发生在 16:10；而落急时段则是 18:20。测量当日的潮位数据如图 1 所示。为了全面获取高潮、低潮、涨落急等不同时段的海流数据，监测工作需要连续进行大约 12 个小时。因此，本文设定走航流速测量的时间为 8:00 至 18:00。

表 1 测量期间海况、气象条件记录

Table 1 Record of sea and meteorological conditions during the measurement period

序号	时间	潮时	海况	风速	风向	气温 /℃
1	09:00	低潮	2 级	2 级	SW	13
2	11:00	涨	2 级	1 级	NW	15
3	13:00	涨急	2 级	2 级	SW	16
4	13:30	涨急	2 级	2 级	SE	17
5	14:00	涨	2 级	2 级	SE	17
6	16:00	高潮	2 级	2 级	W	14
7	18:00	落急	2 级	2 级	W	12

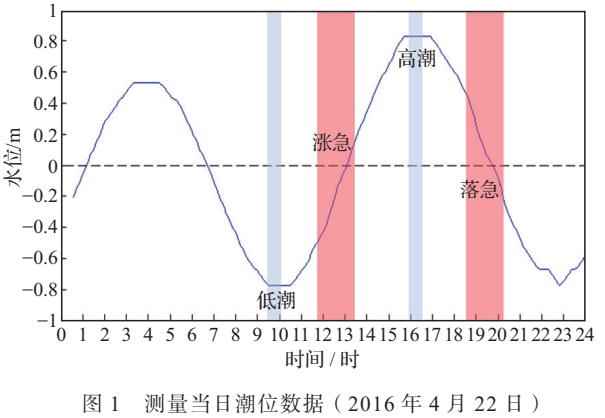

图 1 测量当日潮位数据（2016 年 4 月 22 日）

Fig.1 Tidal level data on the measurement day

1.2　试验结果

为准确掌握取水口附近海域的流速状况，本文采用走航观测的方法。通过将拦网坐标与 DGPS 数据进行对应筛选，获取了区域拦网位置在典型时刻的海流数据。基于这些流速观测结果，本文发现图 2 所示位置的流速较为显著。因此，仅选取该特定拦网目标位置的海流数据进行深入分析。本次实验成功获取了 12 组有效数据，时间节点分别为 9:25、9:47、10:08、10:34、11:02、11:33、12:47、13:13、13:38、15:10、15:40 和 17:50。每组数据均详细测量流速高程剖面，包含 6 个不同分层的流速信息。具体的流速数据如图 3 所示。

图 2　研究位置

Fig.2　Study location

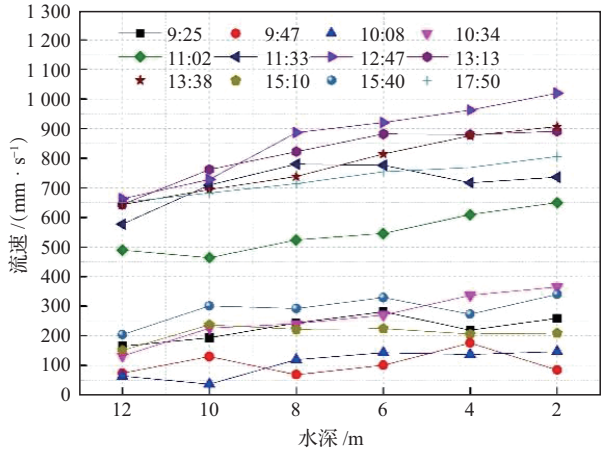

图 3　研究位置不同时间段流速数据

Fig.3　Flow velocity data at different time periods in the study location

根据上文对涨急与落急时间段的分析，筛选出 12 组观测数据中的关键时段。其中，落入涨急时段的有 2 组，时间分别为 12:47、13:13，13:38 则接近涨急时段；接近落急时段的有 1 组，即 17:50 时刻。鉴于本文的核心目标是考察拦网在海流作用下的极值受力与风险分析，因此，在后续的分析中，将忽略憩流时段的数据，仅针对涨急和落急时刻的数据进行深入探讨。在涨潮的测量结果中，海流流速的最大值出现在 12:47 的表层，流速高达 1 020 mm/s，此时底层流速为 663 mm/s，平均流速为 863 mm/s。而在落潮的测量结果中，17:50 时表层流速为 806 mm/s，底层流速为 683 mm/s，平均流速为 745 mm/s。此外，由于涨急和落急时段海流各层的流向矢量相差不大，同时遵循工程计算中的保守性原则，在载荷计算中假设涨急和落急中各层的流向矢量均相同，且均垂直于拦网平面。

1.3　流速剖面分析与插值

实验所测得的数据为高程方向上的离散数据，共包含 6 个分层，而垂向流速的数据点数量远不能满足海流载荷评估的精确需求。因此，在后续的分析中，对高程剖面流速数据进行插值计算尤为重要。本文拟采用卡门 - 普朗特模型与多项式插值模型[34]进行对比分析，通过综合评价，给出高程剖面流速插值的最优解决方案。

一般地，恒定流、平坦底床等条件下的流速计算中，认为底部边界层内流速垂线剖面符合湍流边界层理论，呈卡门 - 普朗特模型分布[35]：

$$\frac{u_z}{u_*}=\frac{1}{k}\ln\frac{z}{z_0}\left[z\in(z_0,\delta)\right] \tag{1}$$

式中：u_z 为高程 z 上的流速；u_* 为摩阻流速；k 为卡门常数；z 为高程（距海底深度）；z_0 为粗糙深度；δ 为对数层的上界。上式变形可得：

$$u_z=a_1\ln z+b_1 \tag{2}$$

式中：$a_1=u_*/k$，$b_1=-u_*\ln z_0/k$。显然，如若实测六点流速数据满足上述线性关系，则取水口该测点流速可用卡门 - 普朗特模型拟合。

图 4（涨急）和图 5（落急）分别为实测离散数据的卡门 - 普朗特模型拟合结果。显然，在涨急与落急过程中，剖面流速具有对数分布的趋势，此时海流垂线流速分布接近“常规型”。根据表 2 中各拟合结果的校正决定系数，可知海流高程方向流速分布的卡门 - 普朗特模型插值效果并不理想。

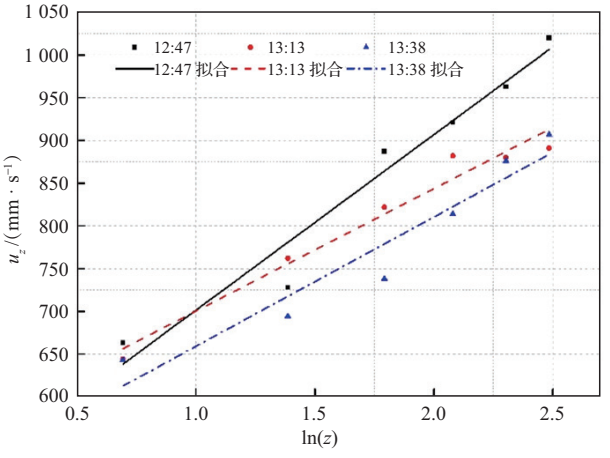

图 4 涨急时刻卡门 - 普朗特模型拟合结果

Fig.4 Kármán-Prandtl model fitting results during maximum flood current

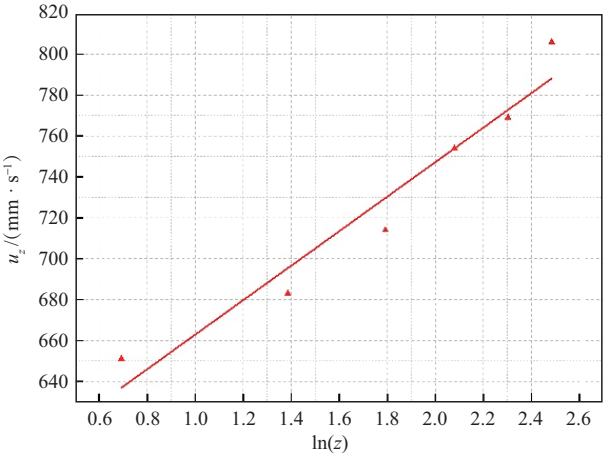

图 5 落急时刻卡门 - 普朗特模型拟合结果

Fig.5 Kármán-Prandtl model fitting results during maximum Ebb current

表 2 对数拟合校正决定系数

Table 2 Logarithmic fitting corrects the coefficient of determination

时间	12:47	13:13	13:38	17:50
校正决定系数	0.95	0.95	0.90	0.92

近岸海流大小受众多自然条件影响。倪志辉等[36]针对江苏近岸辐射状沙脊群海区的海洋水文测验数据，进行了多种形式的数值拟合，认为三次函数式对测量海域垂线流速的模拟相对准确。基于此项研究，本文对该核电站海域海流进行同样方式的数值拟合。发现在涨急、落急时段，三次函数式具有较好的拟合效果。这是因为六点实测数据的最高多项式拟合次数为 5 次，拟合次数越高，方程拟合精度越高，而海流剖面流速变化趋势拟合越差；拟合次数越低，方程精度越低，而海流剖面流速变化趋势拟合越好。拟合精度与拟合趋势之间的矛盾在三次函数式中得以平衡。图 6 和图 7 展示了垂线分布三次拟合图，拟合方程见表 3，校正决定系数分别为 0.92、0.98、0.99、0.99。显然，在涨急、落急时段高程方向流速拟合结果中，三次函数方式比卡门 - 普朗特模型的精度更高。

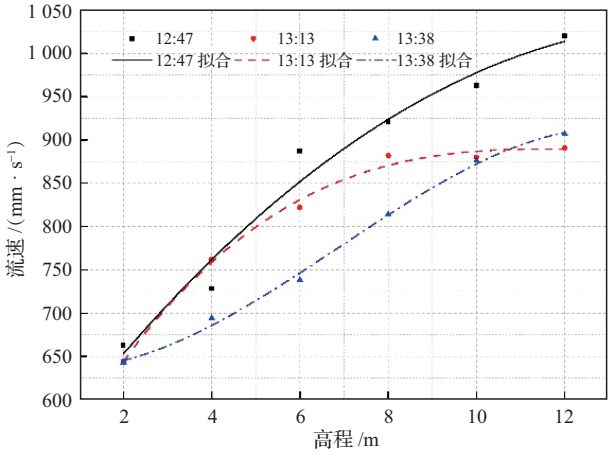

图 6 涨急时刻剖面流速多项式拟合结果

Fig.6 Polynomial model fitting results during maximum flood current

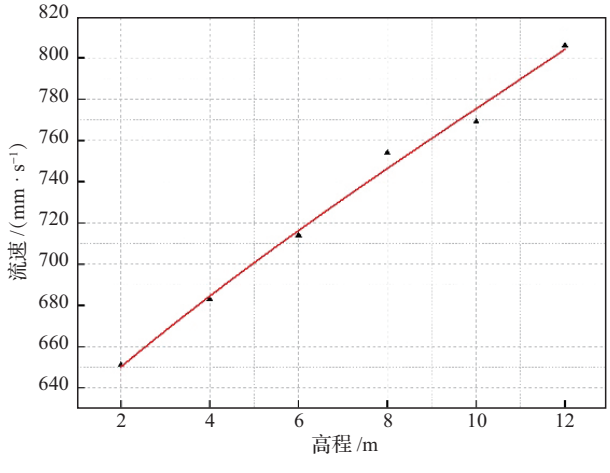

图 7 落急时刻剖面流速多项式拟合结果

Fig.7 polynomial model fitting results during maximum Ebb current

表 3　涨急、落急时段剖面流速三次拟合结果

Table 3　The results of three fitting of the flow velocity of the profile during the maximum flood current and maximum Ebb current

时间	拟合结果	校正决定系数
12:47	y=525.67+68.39x−2.37x^2+0.007x^3	0.92
13:13	y=478.67+97.29x−7.60x^2+0.19x^3	0.98
13:38	y=640−8.37x+6.15x^2−0.29x^3	0.99
17:50	y=612.67+19.67x−0.49x^2+0.015x^3	0.99

2　拦网安全性评估

拦网绳索在堵塞海流力作用下的安全性能评估分为两部分，即拦网在不同堵塞情况下海流载荷的计算与该载荷作用下绳索响应数值的评估。在拦网所受海流载荷的计算中，本文依据《港口工程荷载规范》（JTS 144—1—2010）推荐的海流载荷公式（莫里森公式）进行计算；运用大型有限元软件 ANSYS 建立拦网数值模型，加载不同工况下的海流载荷，计算得到不同堵塞情形下的拦网绳索极值受力规律。

2.1　工况设置及载荷计算

每年夏季，国家海洋环境监测中心的海生物团队便会进驻核电站取水口，对该海域的海蜇展开全面监测工作。监测结果显示，7—8 月，海蜇的大小与数量均达到一年中的峰值，其直径通常介于 0.2 ～ 1 m。海蜇在水深方向上呈随机分布状态，其运动轨迹主要受海流的影响。此外，海蜇堵塞拦网的现象可能发生在任意水位高程处。

（1）需要进行工况设定。在拦网的受力分析中，应力集中相较于载荷分散，往往会使拦网承受更大的拉力。基于这一认识，研究发现，当海生物在多处发生堵塞时，拦网所受的总体载荷实际上会小于集中堵塞的情况。因此，本文将研究的重心放在集中堵塞情景下的拦网受力分析上，多处堵塞的情景将不纳入工况考虑范围。为了更准确地再现不同海蜇堵塞情境下的响应特性，结合对海洋生物堵塞现象的观测经验，选取了两种典型情景进行计算和分析。第一种情景聚焦于特定堵塞面积下不同堵塞高程对拦网所受拉力的影响规律；第二种情景则探讨特定位置堵塞面积增大时，拦网拉力的变化规律。鉴于海蜇的最大直径可接近 1 m，为确保计算结果具有更广泛的指导意义，便于将研究成果推广至其他类似工况，本文首先针对堵塞面积为 1 m² 的情况，详细分析了不同堵塞高程下拦网绳索的载荷变化规律。在此分析中，堵塞宽度被设定为 1 m，而堵塞高度则以 1 m 为步长，细分为 0 ～ 1 m、1 ～ 2 m 直至 11 ～ 12 m 等 12 种不同情况。为进一步全面考量极端危险状况下的影响，基于上述绳索载荷分析中的最大流速时段，本文进一步评估了堵塞面积在 0.8 ～ 3 m² 范围时绳索的载荷情况（考虑到高峰期海蜇主要聚集于上层水域，因此 3 m 的高程设置已足以满足研究需求）。在此评估过程中，堵塞宽度依然保持为 1 m，而堵塞高程则以 0.2 m 为精细步长，划分为 9.0 ～ 12.0 m、9.2 ～ 12.0 m 直至 11.2 ～ 12.0 m 等 12 种具体情况，以确保对极端堵塞条件下的绳索载荷有更为详尽和准确的了解。

（2）在本文的拦网载荷计算过程中，由于海流速度随时间变化速率缓慢，因此在海流载荷的评估过程中，将海流视为稳定流动状态。在计算时，忽略了惯性力对工程构件的影响，假定工程结构物主要承受来自流体的水平拖曳力作用。同时，假定海生物堵塞对局部流场的影响较小，因此在计算海流载荷的过程中，忽略了这一因素的影响。当前，对于大多数工程结构的海流载荷处理，普遍遵循《港口工程荷载规范》（JTS 144—1—2010）中推荐的海流载荷计算公式，即莫里森方程。具体而言，对于距海底高度为 z 的微元构件，其所受的水平拖曳力大小可通过该方程进行计算：

$$\mathrm{d}F_D=0.5C_D\cdot\rho\cdot D\cdot u_z^2\cdot\mathrm{d}h \tag{3}$$

式中：u_z 为距海底 z 高度的海流速度（m/s），该流速依据三次拟合方程给出；D 为构件迎流投影宽度，即海蜇堵塞宽度，单位为 m；ρ 为流体密度，单位为 t/m³；C_D 为阻力系数，规范推荐取值为 2.3。据此，作用在堵塞拦网上的流体拖曳力 F_D 为 $\mathrm{d}F_D$ 在堵塞高度上的积分，即：

$$F_D=\int_{H1}^{H2}\mathrm{d}F_D\mathrm{d}h \tag{4}$$

式中：$H1$ 为堵塞下边界高程，单位为 m；$H2$ 为堵塞上边界高程，单位为 m；dh 为高程微分元；F_D 为海流载荷，单位为 kN。基于式（3）和式（4）对各工况进行载荷计算。

2.2 计算模型

海生物拦网采用尼龙绳材质制成。尼龙绳具有不承受拉力、不传递弯矩与扭矩的特性。为了精确模拟拦网在海生物堵塞时的力学行为，建模过程中须对这些特性进行模拟，确保与原型结构一致。计算模型主要分为两大部分：拦网绳索的模拟以及边界自由度的控制。

本文采用大型有限元软件 ANSYS 对结构进行分析。在绳索模拟方面，选用了 LINK180 单元，该单元每个节点均具备沿节点坐标系 X、Y、Z 方向平动的 3 个自由度，并且可设定为不承受弯矩，因此广泛应用于桁架、绳索等工程结构的模拟中。拦网网格设定为 0.1 m × 0.1 m，拦网高度覆盖整个水深范围，即 12 m；模型中的拦网总宽度依据实际情况设定为 4 m；绳索直径则为 0.01 m。在模型自由度控制方面，严格按照结构的实际情况进行设定。固支位置锁定了 X、Y、Z 3 个自由度，以确保其稳定性；而其他边界位置则锁定了 X、Y 两个自由度，以模拟实际的约束条件。结构模型的具体形态如图 8 所示。

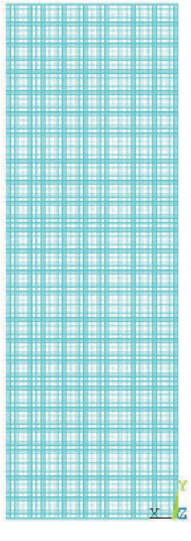

图 8 结构 ANSYS 模型

Fig.8 Structural ANSYS model

2.3 海流载荷特征分析

2.3.1 不同堵塞高程的拦网载荷特征

通过单位堵塞面积所引起的海流载荷，可以清晰地揭示拦网在不同位置加载时的力学特性。为研究拦网在不同堵塞位置下的极限载荷规律，本文针对流速为 0.65 m/s（涨急时刻底层观测流速平均值）、堵塞面积为 1 m²（长 1 m、宽 1 m）、堵塞位置高程范围为 1 ～ 12 m（每隔 1 m 设一组）的工况（共计 12 组）进行了计算分析。在计算过程中，为获取最大受力情况，本文均假设海流方向矢量垂直于拦网，计算结果如图 9 所示。通过观察可以发现，在相同载荷水平下，堵塞位置越接近拦网边界，绳索的极值受力越大；而当堵塞位置位于拦网中部时，该载荷水平下拦网的受力极值达到最小。这表明拦网的安全性随高程的增加呈现先增大后减小的趋势，拦网风险最小的位置位于其中部区域。

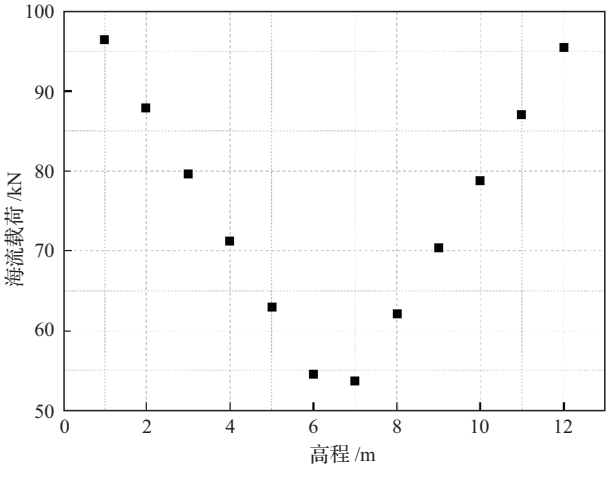

图 9 流速 0.65 m/s、堵塞面积 1 m² 绳索最大受力

Fig.9 Maximum force on the rope under a flow velocity of 0.65 m/s and blockage area of 1 m²

图 10 展示了实测流速、堵塞面积为 1 m² 工况下拦网绳索的最大受力结果。从图中可知，绳索的极限受力变化规律为先保持较低水平，随后明显增大。当堵塞发生在高程 7 m 以下时，拦网的极值受力相对较小，最大受力为 96.75 kN，出现在 12:47，堵塞高程为 6 ～ 7 m 的位置。这一规律是由该高程区域流速较小以及拦网中部受力小于边界受力的特性共同决定的。当高程大于 7 m 时，拦网绳索的

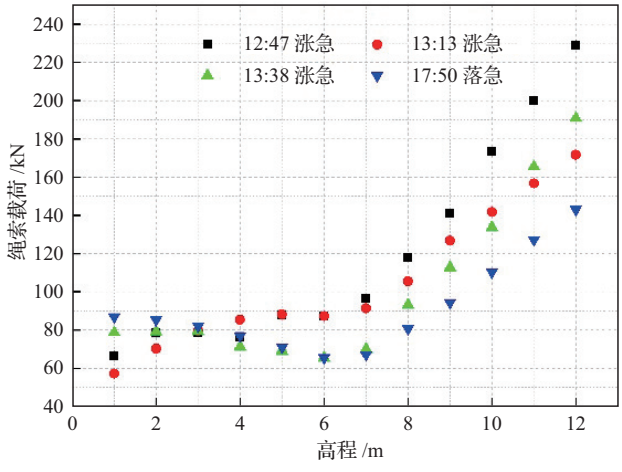

图 10　不同高程堵塞面积 1 m² 绳索最大受力

Fig.10　Maximum force on the rope at different elevations with a blockage area of 1 m²

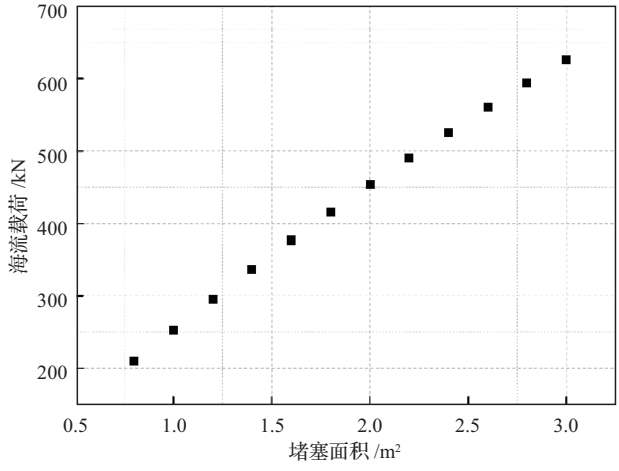

图 11　时刻 12:47 下不同堵塞面积绳索最大受力

Fig.11　Maximum force on the rope under different blockage areas at 12:47

极值受力表现出明显的线性增大趋势，其中最大受力为 229.23 kN，发生在 12:47，堵塞高程为 11 ～ 12 m 的位置。

2.3.2　不同堵塞面积的拦网载荷特征

在冷源拦网运行安全预警期间，拦网的力学特性是现场工作人员极为关注的重点问题。除了不同加载位置所引起的力学特征差异外，加载面积对力学极值的变化规律也是不可忽视的一环。为了更深入地了解这一规律，本文针对流速最大的表层海域，开展了一系列工况计算，重点探讨了堵塞面积逐渐增加时拦网绳索的受力情况。详细方案如下：选取涨急时刻 12:47 的流速作为计算基础，这一时刻的流速代表该海域流速的峰值，具有代表性。然后，设定不同的堵塞面积，并分别计算在这些面积下绳索的受力规律。

计算结果如图 11 所示，从图中可以清晰地看到，随着堵塞面积的增大，绳索的最大受力也随之增大。然而，这种增大的速率并不是恒定的，而是随着堵塞面积的增大而逐渐减小。这是因为在工况设置中，堵塞高程的减小导致了海流流速减小，进而使绳索的最大受力随堵塞面积呈现一种特有的增长规律。这一发现对于现场工作人员来说具有重要的指导意义，可以帮助他们更好地预测和控制拦网在不同堵塞面积下的受力情况。

2.3.3　海流载荷致险区域分析

综合分析海流断面流速特性与拦网强度特征，针对该核电站的特定条件，研究发现高程超过 7 m 的区域是绳索断裂的高风险区，且随着高程的增加，断裂风险呈现逐渐增大的趋势；相反，高程低于 7 m 的区域则被视为绳索断裂的安全区。因此，在核电站夏季冷源安全保障工作中，应将这些高风险区域作为监测工作的重点对象，加强关注。为了增强本文研究成果的普适性和可推广性，对拦网的高程进行了归一化处理，设定海底为 0，海表面为 1，拦网高程则位于 0 ～ 1。具体而言，高程在 0 ～ 0.58 为拦网的低风险区，而高程在 0.58 ～ 1 则为拦网的高风险区。

本文虽然仅聚焦于拦网的海流载荷分析，未将风速与海浪的影响纳入考虑范畴，但所取得的研究成果对于评估多种载荷叠加作用下的拦网受力情况具有重要的支撑作用，同时也能够为拦网的安全性预警提供有力的数据支持。

3　结语

本文针对核电站取水口海域的海生物拦网结构，开展了海流载荷作用下的断裂区域风险分析。第一，对取水口附近海域进行了详尽的流速观测，并基于实测的分层海流数据，对多种插值拟合方式

进行了对比分析，确定了高程流速剖面的最优解。第二，建立了拦网的有限元模型，并依据所得剖面流速最优解，对拦网在不同堵塞面积下的极值受力进行了精确计算。通过对拦网受力情况的深入分析，本文揭示了拦网断裂的高风险区域，并得出以下结论。

（1）在取水口海域的涨急、落急时段，对剖面流速进行插值计算时，三次函数插值方式相较于卡门 - 普朗特模型，展现出了更高的拟合精度。

（2）在相同的堵塞面积与不同高程堵塞情景下，拦网的受力情况随高程的变化呈现先增大后减小的趋势，而拦网海流载荷的最小值则出现在拦网的中部区域。

（3）当拦网的堵塞发生在高程 7 m 以下时，拦网的极值受力水平相对较低；而当高程超过 7 m 后，拦网绳索的极值受力随高程的增加呈现明显的线性增大趋势。由此可见，高程小于 7 m 的区域为绳索的安全区；而高程大于 7 m 的区域则是绳索崩断的高风险区域，且随着高程的增大，断裂风险也逐渐增加。

本文所开展的工作是对核电冷源安全保障问题的一次有益探索，评估所得的数据为核电站夏季拦网的设计与安全运行提供了重要的参考依据。然而，本文仅集中分析了拦网在海流载荷作用下的受力情况，尚未考虑风速与海浪等其他因素的影响。尽管如此，所取得的研究成果对于评估多种载荷叠加作用下的拦网受力状况具有重要的支撑意义，同时也为拦网的安全性预警提供了有力的数据支撑。随着核电冷源安全问题日益受到关注，对多载荷叠加极端情景下的拦网载荷受力分析的需求也日益增长。未来研究将致力于进一步完善拦网的安全评估体系，以更好地保障核电冷源的安全运行。

参考文献（References）：

[1] KITAGAKI T，KRASNOV V A，IKEDA-OHNO A. Aging of fuel-containing materials (fuel debris) in the Chornobyl (Chernobyl) nuclear power plant and its implication for the decommissioning of the Fukushima Daiichi nuclear power station[J]. Journal of Nuclear Materials，2023，576：154224.

[2] SHARMA A K，LIANG H，XU R，et al. Radioactive aerosol control and decontamination in the decommissioning of the Fukushima Daiichi nuclear power station[J]. Nuclear Technology，2023，209(12)：2030-2043.

[3] SATO I，YOSHIKAWA S，YAMASHITA T，et al. MAAP code analysis focusing on the fuel debris condition in the lower head of the pressure vessel in Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Unit 2[J]. Nuclear Engineering and Design，2023，404：112205.

[4] MORIMOTO K，OHNO T，KAKUTANI S，et al. Japan Atomic Energy agency：contribution to the decommissioning of the Fukushima Daiichi nuclear power station and the reconstruction of Fukushima Prefecture at the Naraha Center for remote control technology development[J]. Journal of Robotics and Mechatronics，2024，36(1)：125-133.

[5] AKAR A U，UYAN M，YALPIR S. Spatial evaluation of the nuclear power plant installation based on energy demand for sustainable energy policy[J]. Environment，Development and Sustainability，2024，26(4)：8607-8642.

[6] NI Zhihui，SONG Zhiyao，WU Lichun. An approach to separating the current velocity in estuarine and coastal waters[J]. Journal of Hydrodynamics，Ser. B，2009，21(4)：512-519.

[7] CHU Zhenzhong，WANG Fulun，LEI Tingjun，et al. Path planning based on deep reinforcement learning for autonomous underwater vehicles under ocean current disturbance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles，2022，8(1)：108-120.

[8] RAHMAN A，FARROK O，HAQUE M M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants：solar，wind，hydroelectric，biomass，geothermal，tidal，ocean，and osmotic[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2022，161：112279.

[9] ARBIC B K. Incorporating tides and internal gravity waves within global ocean general circulation models：areview[J]. Progress in Oceanography，2022，206：102824.

[10] COLLINS M B，KE X，GAO S. Tidally-induced flow structure over intertidal flats[J]. Estuarine，Coastal and Shelf Science，1998，46(2)：233-250.

[11] SOULSBY R L，DYER K R. The form of the near-bed velocity profile in a tidally accelerating flow[J]. Journal of Geophysical

Research：Oceans，1981，86(C9)：8067-8074.

[12] LAVELLE J W，MOFJELD H O. Effects of time-varying viscosity on oscillatory turbulent channel flow[J]. Journal of Geophysical Research：Oceans，1983，88(C12)：7607-7616.

[13] NI Zhihui，SONG Zhiyao，WU Lichun. A new model for velocity profiles in estuarine waters[J]. China Ocean Engineering，2010，24(2)：255-264.

[14] 王元叶，何青. 声学多普勒流速剖面仪近底有效流速数据处理初步研究[J]. 水科学进展，2008(3)：394-399.
WANG Yuanye，HE Qing. Near bed velocity treatment of acoustic Doppler current profiler[J]. Advances in Water Science，2008(3)：394-399.

[15] KUO A Y，SHEN J，HAMRICK J M. Effect of acceleration on bottom shear stress in tidal estuaries[J]. Journal of Waterway，Port，Coastal，and Ocean Engineering，1996，122(2)：75-83.

[16] THORN M. Coastal and estuarine sediment dynamics[EB/OL]. [2024-12-01]. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/gj.3350220210.

[17] LAWLESS M，ROBERT A. Scales of boundary resistance in coarse-grained channels：turbulent velocity profiles and implications[J]. Geomorphology，2001，39(3)：221-238.

[18] ROVIRA-NAVARRO M，MATSUYAMA I，HAY H C F C. Thin-shell tidal dynamics of ocean worlds[J]. The Planetary Science Journal，2023，4(2)：23.

[19] SOLANO M S，BUIJSMAN M C，SHRIVER J F，et al. Nonlinear internal tides in a realistically forced global ocean simulation[J]. Journal of Geophysical Research：Oceans，2023，128(12)：e2023JC019913.

[20] ARNOSO J，BOS M S，BENAVENT M，et al. Anelastic response of the Earth's crust underneath the Canary Islands revealed from ocean tide loading observations[J]. Geophysical Journal International，2023，235(1)：273-286.

[21] YANG Hong，WU Qingsong，LI Guohui. A multi-stage forecasting system for daily ocean tidal energy based on secondary decomposition，optimized gate recurrent unit and error correction[J]. Journal of Cleaner Production，2024，449：141303.

[22] MORROW R，FU L L，RIO M H，et al. Ocean circulation from space[J]. Surveys in Geophysics，2023，44(5)：1243-1286.

[23] 倪志辉，宋志尧. 河口海岸潮流速分布研究进展[J]. 水利水电科技进展，2009，29(4)：78-83.
NI Zhihui，SONG Zhiyao. Developments of research of tidal velocity profiles in estuary and along coast[J]. Advances in Science and Technology of Water resources，2009，29(4)：78-83.

[24] 高伟，熊碧露，蔡春梅，等. 基于核电厂冷源安全改进的防海生物拦网选用及布置[J]. 给水排水，2017，53(S2)：1-3.
GAO Wei，XIONG Bilu，CAI Chunmei，et al. Selection and arrangement of marine biological arrester based on safety improvement of nuclear power plant cold source[J]. Water & Wastewater Engineering，2017，53(S2)：1-3.

[25] 郭小刚，王刚，宋晓东，等. 悬链线竖向集中力作用下的构型分析和张力计算[J]. 计算力学学报，2020，37(4)：431-438.
GUO Xiaogang，WANG Gang，SONG Xiaodong，et al. Configuration analysis and tension calculation of catenary under vertical concentrated force[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics，2020，37(4)：431-438.

[26] 黄温赟，王庆伟，赵新颖. 外荷载作用下拦阻网的受力分析[J]. 船舶工程，2020，42(6)：114-118.
HUANG Wenyun，WANG Qingwei，ZHAO Xinying. Force analysis of arresting net under external load[J]. Ship Engineering，2020，42(6)：114-118.

[27] LI Yucheng，ZHAO Yunpeng，GUI Fukun，et al. Numerical simulation of the hydrodynamic behaviour of submerged plane nets in current[J]. Ocean Engineering，2006，33(17/18)：2352-2368.

[28] BESSONNEAU J S，MARICHAL D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls)[J]. Ocean Engineering，1998，25(7)：563-583.

[29] BI Chunwei，ZHAO Yunpeng，DONG Guohai，et al. Numerical simulation of the interaction between flow and flexible nets[J]. Journal of Fluids and Structures，2014，45：180-201.

[30] 金栋平，文浩，胡海岩. 绳索系统的建模、动力学和控制[J]. 力学进展，2004，34(3)：304-313.
JIN Dongping，WEN Hao，HU Haiyan. Modeling dunamics and control of cable systems[J]. Advances in Mechanics，2004，34(3)：304-313.

[31] 康君峰，范敦敦. 核电站拦污网主绳拉力监测与分析[J]. 低温建筑技术，2017，39(5)：57-59.
KANG Junfeng，FAN Dundun. Monito ring and analysis of tension force on main rope of trash interception net in nuclear power

plant[J]. Low Tempe Rature Architecture Technology, 2017, 39(5): 57-59.

[32] 温洪涌，解鸣晓，熊碧露，等. 核电厂冷源拦截设施受力试验研究[J]. 中国港湾建设，2022(8): 42.
WEN Hongyong, XIE Mingxiao, XIONG Bilu, et al. Experimental study on stress of cooling water source interception facility in nuclear power plant[J]. China Harbour Engineering, 2022(8): 42.

[33] 桂福坤，李玉成，张怀慧. 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.
GUI Fukun, LI Yucheng, ZHANG Huaihui. The proportional criteria for model testing of force acting on fishing cage net[J]. China Offshore Platform, 2002, 17(5): 22-25.

[34] CELATA G P, LORENZINI M, MORINI G L, et al. Friction factor in micropipe gas flow under laminar, transition and turbulent flow regime[J]. International Journal of heat and fluid flow, 2009, 30(5): 814-822.

[35] ZDRAVKOVICH M M. Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 33(1/2): 53-62.

[36] 倪志辉，吴立春，张绪进，等. 潮流流速垂线分布的分类及其分形规律[J]. 人民黄河，2012，34(3): 13-16.
NI Zhihui, WU Lichun, ZHANG Xujin, et al. Patterns of vertical velocity profile of tidal current and their fractal law[J]. Yellow River, 2012, 34(3): 13-16.