我国滨海核电冷源取水安全辅助决策系统的研究

康君峰[1]，王涛[1]，袁帅[2]，史文奇[2]，黄晓波[1]，刘玉涛[1]，周存露[1]，陆宏亮[1]

（1. 辽宁红沿河核电有限公司　大连　116319；2. 国家海洋环境监测中心　大连　116023）

摘要：目前，针对滨海核电冷源取水安全辅助决策系统的研究仍处于初步探索阶段，而数据是辅助决策系统构建的基石。文章重点介绍了我国滨海核电冷源取水安全预警中采用的主要监测数据，分析了不同监测手段的特点，给出了部分核电厂使用的预警指标，并提出了一种可行的系统设计和开发案例。开发的辅助决策系统实现了监测数据录入和展示、风险提醒和行动建议、预警发布和指挥响应等主要功能，可提供有效的辅助决策信息。

关键词：辅助决策系统；核电冷源；监测预警

中图分类号：TP311；P731.1　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1005-9857（2026）07-0015-11

Research on the Auxiliary Decision-Making System for the Safety of Cold Source Water Intake in China's Coastal Nuclear Power Plants

KANG Junfeng[1]，WANG Tao[1]，YUAN Shuai[2]，SHI Wenqi[2]，HUANG Xiaobo[1]，LIU Yutao[1]，ZHOU Cunlu[1]，LU Hongliang[1]

（1. Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co.，Ltd.，Dalian 116319，China；
2. National Marine Environmental Monitoring Center，Dalian 116023，China）

Abstract：Research on auxiliary decision-making systems for ensuring the safety of cold source water intake in coastal nuclear power plants remains at an early exploratory stage，with data serving as the fundamental basis for developing such systems．This paper examines the key monitoring data used in cold source early warning systems at coastal nuclear power plants in China，analyzes the strengths and limitations of different monitoring methods，and outlines early warning indicators adopted by some operating plants．It also proposes a practical design and development framework for such a system．The developed auxiliary decision-making system provides essential functions，including input and visualization of major monitoring data，risk alerts and actionable recommendations，early warning dissemination，and coordinated command response，thereby providing effective informational support for operational decision-making.

Keywords：Auxiliary decision-making system；Nuclear power cold source；Monitoring and early warning

收稿日期：2026-01-16；**修订日期：**2026-06-16

基金项目：2021 年大连市中央引导地方科技发展基金自由探索类基础研究项目（2021-17）.

作者简介：康君峰，高级工程师，研究方向为核电冷源取水安全

0 引言

随着数据与信息量呈指数级增长、决策环境日趋复杂的背景下，决策的时效性及科学性尤为关键。辅助决策系统通过汇集、整合与深度分析海量数据，为决策者提供了多元信息支撑，辅助其开展风险评估与决策。目前，该类系统已在防灾减灾领域得到广泛应用[1-3]，在电力能源行业同样开展了相关实践[4-5]。近年来，我国滨海核电厂冷源取水系统堵塞事件依然时有发生，对机组安全稳定运行造成了严重的威胁[6]。由海洋生物入侵导致堵塞的事件占比高达 72%，涵盖海藻、水母和海虾等多类生物[7]。

为应对这一风险，我国滨海核电厂逐步建立起较为成熟的监测体系，实现了“监测—预警—决策—处置”的闭环，并持续引入新的监测技术。然而，随着监测手段的多样化和监测探头数量的增加，监测数据量日益庞大，如何从海量监测数据（尤其是在线监测数据）中快速、科学地提取关键信息以支持决策，成为当前冷源安全领域面临的一大挑战。目前，冷源监测预警体系存在海量数据难以有效转化为决策支撑的短板，具体表现在以下 3 个方面。

一是监测数据资源化利用困难。多源异构数据（水文、生物、气象、设备状态）分散存储，数据标准不一，缺乏统一的特征提取与融合机制。历史案例与实时监测数据未形成有效的关联，“数据孤岛”导致缺少可供模型训练的高质量标注样本。

二是海量信息转化效率低。原始监测数据难以直接表征“风险等级”与“演变态势”，缺少面向冷源安全的自动风险识别与预警模型。生物聚集、拦污网破断和生物入侵的过程是非线性的，突发性强、发展迅速。经计算，某滨海核电厂外海出现生物群到泵站压差升高仅需约 1 h，传统阈值报警方式误报率高，无法提前预报指征性变化。

三是应急决策响应滞后。目前，从预警到处置依然依赖人工经验判断，缺少可视化的风险态势图与辅助决策方案。不同风险场景下缺乏快速响应的智能化科学处置预案，导致响应措施启动缓慢或过度防抗。

目前，我国滨海核电冷源取水安全的多源海量数据分析及辅助决策系统的研究仍处于初步探索阶段，行业内尚无成熟的推广应用案例。本文旨在梳理核电冷源生物监测系统的主要监测数据，提出一种冷源辅助决策系统的设计思路，并结合实际案例进行分析，以期为相关从业人员和研究者提供借鉴。

1 研究基础和现状

1.1 冷源取水安全影响因子

结合我国滨海核电冷源取水安全监测预警相关研究成果和防抗实践，与冷源取水安全直接相关的主要影响因子如下。

（1）海洋生物因子，主要包括外海生物情况和取水通道生物状态。关于外海生物情况，通过专项调查，梳理掌握电厂所在海域主要堵塞生物的生物种类、生物量和生活史等；开展日常监测，每日获取电厂取水口附近海域主要危险生物的生物量和分布情况，为监测预警服务。此外，还有生物体或碎屑在拦污网、拦污栅和鼓形旋转滤网（以下简称“鼓网”）等海水过滤设施上附着、堵塞，导致流道阻塞、压差升高，引发拦污网拉力上升，鼓网压差升高，甚至跳闸、机组降功率或停机。

（2）水文动力因子，主要包括潮汐、波浪、海流等。我国滨海核电厂面临的主要堵塞生物，如水母、毛虾、海藻等，均为游泳能力较弱或无游泳能力的海洋生物，还有海洋垃圾等非生物堵塞物。这些堵塞物的漂移聚集基本都是由海洋动力造成的。潮汐与流场决定生物聚集、迁移路径及入侵速度；波浪和海流可共同影响网具拦截打捞效率与外海拦污网的自清洁能力。此外，较大的波浪还可导致海底沉积物再次悬浮进入水体，进而卷入取水通道。

（3）海洋环境因子，如水温、盐度、浊度、叶绿素 a 浓度、溶解氧、pH 等均可影响海洋生物生长和群落结构。这些因素一般用于海洋生物暴发的中长期预测，不是直接影响因子。

（4）气象与陆源因子，主要包括风向、风速、降雨量、径流输入等。降雨与径流携带营养盐入海，可诱发赤潮或绿潮；风可直接拖曳驱动表层堵塞物，如浒苔、溢油、海冰、海洋垃圾等，聚集至

取水口区域。此外，陆地上的竹竿、麦秆、生活垃圾、柳絮等可以进入海洋，成为潜在的堵塞物。

在上述因子中，海洋生物因子发挥直接作用，是最重要的前提，需重点监测；水文动力是重要驱动因子，直接服务于短期预测预警；其余因子起辅助作用，服务于中长期预测。海洋生物入侵影响冷源取水过程，也呈现出多因子共同耦合、机理过程复杂的特点。目前，我国滨海核电厂都在着手构建较为完善的海洋生物因子监测技术体系，并根据需要补充水文动力、海洋环境和气象与陆源等监测要素。

1.2　研究现状

围绕核电冷源安全，学术界与工程界已从不同角度开展了相关研究。

（1）在监测技术层面，部分研究聚焦于单一或组合感知手段的精度提升。例如，徐波波等[8]开发了“海底—剖面—表层”立体观测系统；梁桂琰[9]专注于水下图像识别算法；陈鸿毅等[10]设计了覆盖多要素的数据采集方案。这些研究为获取海量原始数据奠定了技术基础，其优势在于丰富了数据来源，局限则在于多停留在“数据获取”层面，缺乏多源数据融合与决策服务的顶层设计。

（2）在数据分析与预警层面，部分研究已开展数据融合与评估模型的探索。孟亚辉等[11]提出了基于多源异构本体的海洋生物入侵趋势的量化评估算法；杜红彪等[12]设计了取水口致灾物监测预警及防控一体化方案。这些研究向“决策支持”迈出了重要的一步，其贡献在于构建了初步的分析模型，局限则在于模型多针对特定场景或单一物种，泛化能力不足，并且预警结果与具体处置行动之间仍有距离。

（3）在辅助决策系统层面，针对核电冷源场景的辅助决策系统研究仍缺乏成熟案例。对于如何从多源监测数据中筛选有效预警要素、整合这些要素服务于应急决策、最终形成辅助决策系统的研究仍然较少。这也是本文研究的切入点。

2　系统总体设计

2.1　系统设计原则

一般的辅助决策系统主要包含数据采集、数据处理与决策支持三大功能模块。数据采集模块负责从各类数据源获取信息，并确保数据的准确性、可靠性与时效性；数据处理模块则对采集到的原始数据进行清洗、整合与转换，涵盖数据预处理、探索性分析及数据挖掘等环节，为后续分析与建模奠定基础；决策支持模块作为系统的核心，依托数据分析与建模结果，向决策者提供与风险相关的关键信息，辅助用户决策。

冷源取水安全辅助决策系统也需要实现三大核心功能目标。一是态势感知，实时汇聚、处理并可视化展示冷源取水安全状态；二是风险预警，基于多源数据与预警模型，自动识别并分级预警风险；三是决策支持，提供风险演变趋势、潜在后果分析及响应行动建议。

设计上遵循 5 项原则，即数据驱动（多源数据接入）、人机协同（系统辅助决策而非完全替代人）、可扩展性（支持新数据源与模型接入）、高可用性（界面直观、操作便捷、响应迅速）及安全性（数据保密和信息安全）。

2.2　系统架构设计

万维网地理信息系统（Web Geographic Information System，Web GIS）是地理信息系统（GIS）技术与互联网相结合的产物，具有跨平台、可分布式协作的优点，能为辅助决策系统提供直观的可视化空间数据与高效的远程分析能力。建议以 Web GIS 技术为基础，将系统设计为 5 层架构（图 1），实现地理信息与风险数据的深度融合。

（1）数据层：负责多源异构数据的汇聚、清洗与存储，包括在线监测数据（实时）、人工录入数据（准实时）、历史案例数据及环境背景数据。

（2）数据建模层：特征提取（如生物密度趋势计算）、数据融合计算与风险建模（预警规则与预测算法）。这是区别于传统监测系统的核心所在。

（3）应用支撑层：提供通用技术服务，如 GIS 服务（地图可视化、空间分析）、信息服务（短信 / 电话自动报警）、工作流引擎（指挥响应流程管理）及用户权限管理。

（4）业务逻辑层：封装特定业务流程，实现风险研判、预警级别判定、行动方案匹配、指挥指令生成等具体业务。

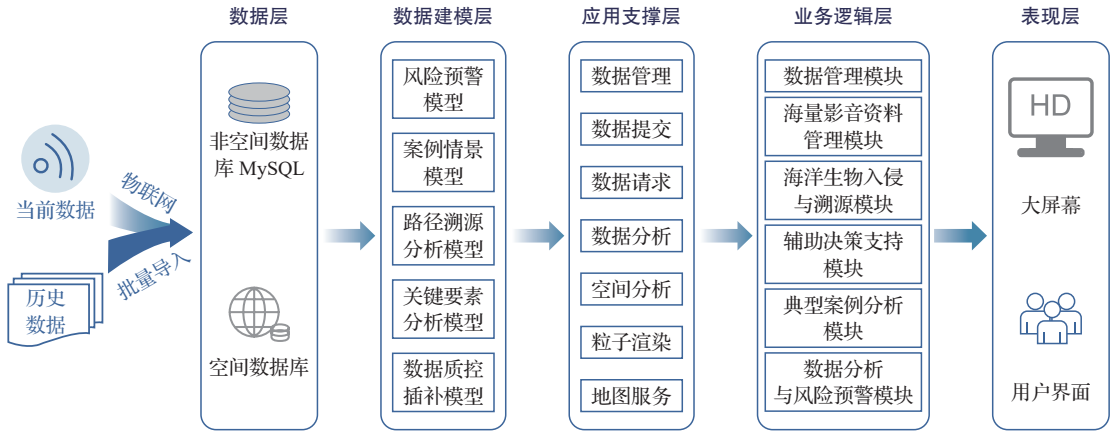

图 1 辅助决策系统的建议架构

Fig.1 Proposed architecture of the auxiliary decision-making system

（5）表现层：用户交互界面，包括前端可视化大屏（首页“一张图”加详细子界面）、后台管理端及移动应用（Mobile App）端，支撑系统完整运行与维护。

3 系统构建关键要素

3.1 监测数据

数据是辅助决策系统的核心和基础，包括当前数据、历史数据和预报数据，其中最重要的就是当前的监测数据。目前，我国滨海核电厂皆采用综合监测。从空间上划分监测区域，由外向内主要为外海、取水明渠、联合泵站（图 2）。主要拦截设施为外海的打捞和拦污网、明渠内的拦污网、联合泵站的细格栅和鼓网、热交换器的贝类捕捉器。以某核电厂为例，介绍针对水母堵塞风险而采用的主要监测手段。对于海藻、浒苔、海冰、溢油等漂浮在海面的堵塞物，卫星监测、雷达监测等遥测技术是较为合适的监测手段[13]。但水母主要分布在水层中，尚无法进行卫星监测和雷达监测。因此，下面介绍中不包括这两种监测手段。

按监测对象划分，监测手段可以分为两大类：一类用于监测拦截设施状态，包括拦污网拉力监测，鼓网压差、细格栅压差和贝类捕获器压差监测等；另一类用于监测水体中生物丰度，包括外海监测、外海拖网打捞、兜网抽吸、声呐监测、原位视频、泵站反冲洗监测等。这两类监测分别反映了当前拦截设施的状态和生物入侵的压力，共同表征当前冷源取水安全态势。此外，气象、海流、水质等环境要素监测通常作为辅助监测信息[14]。需要指出的是，同一监测手段可用于不同的监测区域。

图 2 某核电厂取水工程及拦截过滤装置

Fig.2 Water intake structures and interception-filtration facilities at a nuclear power plant

注：SEC 为重要厂用水系统，负责整个核岛安全系统的终级热交换，把设备热量传给海水；CRF 为循环水系统，负责抽取海水供给凝汽器冷却蒸汽。

各监测手段的测量方法和获取数据情况如表 1　　所示，具体说明如下。

表 1　某核电厂冷源取水安全的主要监测预警手段

Table 1　Primary monitoring and early-warning methods for cold source water intake safety at a nuclear power plant

监测手段	监测区域	数据获取	监测内容	数据传输	监测频次
外海监测	外海	人工	种类和重量	人工填报	每日 2 ～ 6 次
外海拖网打捞	外海	人工	种类和重量	人工填报	每日数次
声呐监测	外海 / 明渠	自动	生物量	无线传输	实时在线，分钟级
原位视频	明渠 / 泵站	自动	种类和重量	有线传输	实时在线，分钟级
兜网抽吸	明渠	人工	种类和重量	人工填报	每日数次
兜网清理	明渠	人工	种类和重量	人工填报	每日数次
拦污网拉力监测	明渠	自动	拦污网应力	有线传输	实时在线，分钟级
鼓网压差监测	泵站	自动	水压差	有线传输	实时在线，秒级
细格栅压差监测	泵站	自动	水压差	有线传输	实时在线，秒级
贝类捕获器压差监测	泵站	自动	水压差	有线传输	实时在线，秒级
泵站反冲洗监测	泵站	人工	种类和重量	人工填报	每日数次

注：数次为 1 ～ 30 次；数据获取中，“人工”为人员操作器具直接读取数据的方式，“自动”为传感器通过采集模块自动读取数据的方式。

（1）外海监测，多借鉴海洋生物调查法，主要按照《海洋调查规范 第 6 部分：海洋生物调查》（GB/T 12763.6—2007）、《海洋渔业资源调查规范》（SC/T 9403—2025）、《建设项目对海洋生物资源影响评价技术规程》（SC/T 9110—2007）等开展，常采用拖网或张网进行监测。监测人员通过对网采生物进行分类称重，得到生物种类和生物量。部分核电厂成体水母监测采用定置锚泊流网作为主要监测工具。该网具的网片规格为高度 8.00 m、宽度 60.00 m，网目尺寸为 10 cm。监测时，网口沿与潮流垂直方向布置，利用海流采集海洋生物。所得结果以相对生物量表示，计量单位为 ind./（net・h）或 kg/（net・h）。依据该数据可对水母聚集风险进行分级评估。以海月水母为例，监测生物量大于 100 ind./（net・h）且不超过 300 ind./（net・h）视为低风险；大于 300 ind./（net・h）且不超过 500 ind./（net・h）为中风险；大于等于 500 ind./（net・h）属于高风险[15]。

（2）外海拖网打捞，即采用渔业捕捞的方式，由单船或双船拖曳网具在外海作业，主要用于外海生物清理。对打捞的海洋生物进行称重，也可作为监测数据。部分核电厂外海拖网的目的并非监测，而是消减外海生物量。拖网时船速一般保持在 2 kn 左右，网口张开得比较大，采集效果较好。外海拖网打捞量因打捞区域较大，可以有效地反映一段时间内的外海生物丰度。

（3）声呐监测，即将声学回波数据转化为对应的生物学信息，常搭载在浮标上。海洋生物的回波强度受多种因素的影响，如入射波频率、目标的大小、有无鱼鳔、目标与入射波的夹角等。基于声呐进行的生物量评估计算的空间分辨率有限，并且受其他杂波反射的影响较大。水母身体组织与海水的声阻抗高度匹配，是典型的“弱散射体”，其主动声呐回波信号信噪比低，对依赖声呐进行冷源生物监测的系统构成了挑战。目前，水母声呐探测研究主要集中在声学特征和通量评估方面，生物量的定量方法研究相对较少。已有研究利用动态声呐法对水母进行定量监测，但是尚未实现自动监测。因为声呐监测存在误报情况，需要人工复核[16-18]。

（4）原位视频，也称水下摄像系统，基于图像识别算法实现生物种类与生物量的判定。在目标检测的过程中，图像质量直接影响检测结果的准确性。然而，水下图像在采集时容易受光照条件、水体环境及摄像设备性能等因素影响，常出现质量下降的问题，进而为后续识别与分析带来阻碍。原位

视频会受水体浊度的影响，监测范围较有限，一般小于 20 cm（视场宽度）。水体中生物并非完全均匀分布的，获取的生物量随时间波动较大。因此，需采用长时间连续监测方式，以弥补监测范围较小的缺点。原位视频更加适合泵站反冲洗的狭窄流道，在实践中效果较好[9]。

（5）兜网抽吸，将抽吸装置安装在明渠拦截网兜的位置，分离提取网兜底部拦截的海洋生物，将拦截入网兜的海洋生物和漂浮物提升至海面并运送至指定地点，实现无间断、高效率网兜清理作业，并通过称重计量得到每次的抽吸量[19]。

（6）兜网清理，指传统人工兜网清理。明渠内会布设数道拦污网，包括平面网和兜网，来拦截和打捞海洋生物等堵塞物，收集起来便于清理。可使用渔船人工海上驳运，清理冷源取水口拦截网兜中的海洋生物，并通过称重得到清理量[20]。

（7）拦污网拉力监测，在流速和潮位一定时，拦污网应力随网体堵塞生物量的增加而增大。通过在明渠内拦污网主绳的固定处安装拉力监测装置，来监测拦污网是否达到破断极限应力，并以此推断生物的入侵量。在预警实践中，除关注拦污网拉力的绝对值外，还要关注拦污网拉力的突变。尤其是拉力的突然下降，往往表明拦污网可能因长期堵塞物的积累而发生破损，导致拦截功能失效，此时，堵塞物可直接进入下游水域，威胁鼓网的安全[21-22]。

（8）鼓网压差监测、细格栅压差监测和贝类捕获器压差监测，三者分别为泵站鼓网、细格栅和贝类捕获器前后的水位差。鼓网通常采用冲孔，网孔尺寸一般为 3 mm 以满足梯级过滤系统的要求。部分核电厂鼓网前后水位差可到达 0.8 m 的跳闸线，0.2 m 为鼓网高速运行线，0.3 m 为报警线。细格栅压差和贝类捕获器压差也有类似的报警线。这些压差是核电厂机组控制的重要参数，直接接入核岛主控，可引发自动停堆跳堆[23-24]。

（9）泵站反冲洗监测，即冲洗清理鼓网迎水侧的小型堵塞物。过滤的杂物在冲洗水的作用下进入鼓网两侧的排水暗管。每台机组的反冲洗污物经排水暗管，分别排至泵站两侧，最终排入大海[25-26]。而反冲洗监测就是在排水暗管内利用采集网具，收集冲洗堵塞物并称重，单位为 kg/min。

3.2 预警指标

上述仅给出了某核电厂的主要监测数据，而各核电厂主要致灾生物不同，拦截重点不同。因此，其监测体系也各有侧重和区别。核电冷源的堵塞物根据尺寸可大体分为 3 种：中大型（直径大于 50 mm，包括大型藻类、大型水母、海洋垃圾等）、小型（直径 3 ～ 50 mm，包括小鱼小虾、毛虾、小型水母等）和细小型（直径小于 3 mm 的赤潮藻类等）。目前，我国滨海核电厂的监测系统都采用了多种技术手段集合的综合监测的方式。受技术发展和监测技术本身的限制，不同监测技术对不同致险物种的预警能力不同。有些监测技术手段受准确性限制，无法直接作为预警指标，仅作为风险预判的辅助要素。因而，在构建预警指标时，需充分考虑监测技术的成熟度和对致险物种的适应性。此外，不同监测技术的预警可靠性还会受到滨海核电厂周边海洋环境和气候特点的影响。因此，构建预警指标需要“一厂一策”，尚无普适的监测预警方案。

我国部分滨海核电厂在多年的冷源防抗实践中，构建了下面的预警指标体系。不同尺寸的堵塞物有 3 个不同的预警级别，由低到高依次排列为：三级预警、二级预警、一级预警。不同尺寸生物的预警阈值是不同的，并且其相应行动也有所差异。不同尺寸堵塞物的打捞拦截难度也不同，通常来说，尺寸越小的生物，其打捞拦截难度越大。在预警阈值设定中，外海监测、明渠清理量及泵站反冲洗监测对不同尺寸生物具有差异化阈值：生物体形越大，触发预警所需的生物量阈值越高；生物体形越小，触发预警所需的生物量阈值越低。以某核电厂冷源一级预警中的泵站反冲洗监测阈值为例，中大型生物为 2 kg/min，小型生物为 1.2 kg/min，细小型生物为 0.5 kg/min。与之不同，拉力、拦污网状态及鼓网压差等指标反映的是拦截过滤设施的运行状态，其阈值不随生物尺寸变化而变化。例如，该核电厂在一级预警中，鼓网压差的阈值统一设定为 0.06 mWC（米水柱）。细格栅孔径约为 50 mm，仅能有效拦截中大型生物。因此，该指标仅作为中大型生物的预警依据，对小型生物及细小型生物不

适用。贝类捕获器位于鼓网之后，只有尺寸小于鼓网孔径的生物才能通过并影响该处压差，故贝类捕获器压差仅作为细小型生物的预警指标。

该指标体系的精髓在于多维印证，单一指标触发仅为“关注”，多指标同时触发则可升级预警级别，从而有效降低误报率。同时，指标阈值多为历史经验的总结，指标体系需具备动态调整能力，应随着核电厂防抗能力的提升、研究成果的积累以及环境要素的变化而调整，避免决策保守。表 2 所示为不同尺寸堵塞物的预警指标。

表 2　不同尺寸堵塞物的预警指标

Table 2　Early-warning indicators for clogging materials of different sizes

致灾生物	预警级别	预警指标									
		外海监测	明渠声呐	明渠清理量	拉力绝对值	拉力突降	泵站反冲洗	拦污网状态	鼓网压差	细格栅压差	贝类捕获器压差
中大型	三级	√	√	√	√	—	√	—	—	—	—
	二级	√	√	√	√	—	√	—	—	—	—
	一级	—	√	√	√	√	√	√	√	√	—
小型	三级	√	√	√	√	—	√	—	—	—	—
	二级	√	√	√	√	—	√	—	—	—	—
	一级	—	√	√	√	√	√	√	√	—	—
细小型	三级	√	√	√	√	—	√	—	—	—	—
	二级	√	√	√	√	—	√	—	—	—	√
	一级	—	√	√	√	√	√	√	√	—	√

注：√为相应阈值条件；—代表没有相应阈值条件。

4　系统实现与案例应用

某核电厂因厂址海域环境恶劣及取水设计先天不足，已发生多起取水冷源安全风险事件。这些冷源风险事件的发生机理复杂，呈现出多种因素耦合作用的特点，相应的应急处置决策难度较大。为提高取水冷源风险应急处置决策能力，某核电厂在上述研究的基础上开发了一套基于 GIS 的取水口冷源风险辅助决策系统，实现监测数据录入展示、风险分析提醒和决策信息展示等主要功能，并进行了现场应用。

4.1　功能介绍

该系统由前端展示子系统和后台发布子系统组成。前端展示子系统主要功能为展示监测信息和预警状态；后台发布子系统主要功能为录入数据、修改预警状态、通过电话或短信发布预警信息等。各子系统皆由 Web 端通过网址访问，用户输入正确的账号和密码即可登录。系统具备密码保护功能，若多次输入错误密码，该账号将被锁定，需要联系管理员处理。该系统可获取、存储和处理多源监测数据，尤其是预警指标数据，包括拉力、外海监测、外海拖网打捞、泵站反冲洗、拦污网清理等冷源前后端相关数据。此外，还开发了数据录入手机 App，便于监测人员现场录入监测数据。

前端展示子系统主要包含外海监测、拦污网清理、入侵路径判定、响应行动等功能模块，并实时可视化展示鼓网压差、拉力绝对值、要素变化趋势等关键状态参数。整个系统采用模块化、松耦合设计，部分模块出现宕机时，其他功能不受影响。

前端展示子系统主页面（图 3）为一般情况下在大屏幕上展示的主要画面。该主页面采用“一张图”设计理念，可以让用户直观快速获得预警信息，掌握当前冷源取水的风险状态。主页面提供了进入其他各个模块的链接，打开各个模块页面可以查看具体信息。用户可通过单击链接和返回按钮在主页面与各个模块页面之间进行切换。在有预警状态下，页面会将超过阈值的要素以红色、橙

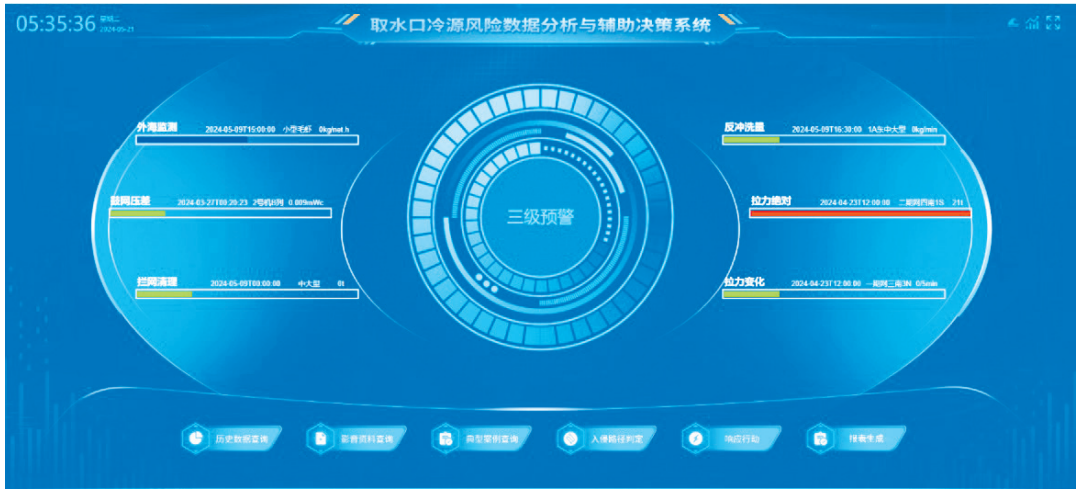

图 3 前端展示子系统主页面

Fig.3 Main interface of the front-end display subsystem

色、蓝色显示，同时伴有声音报警。该子系统各页面简洁美观，操作流程直观易懂，力求降低使用门槛。

后台发布子系统的部分页面如图 4 所示。数据库接入数据包括在线监测数据、人工监测数据及历史数据。其中，在线监测数据由服务器自动抓取，人工采样数据和历史数据通过后台发布子系统录入。该子系统支持 Excel 表格批量录入，可提高数据录入的效率。此外，系统还具备短信群发和电话群拨功能，可实现预警信息的快速传递。

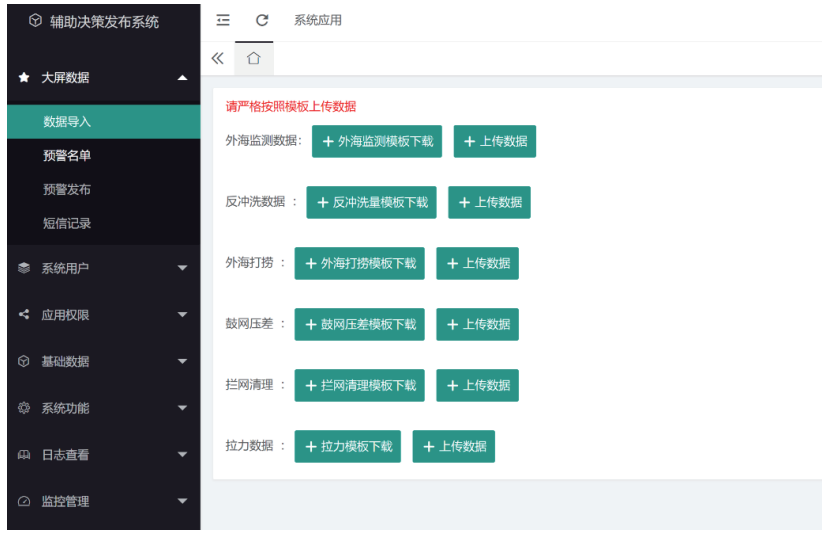

图 4 后台发布子系统的部分页面

Fig.4 Selected pages of the back-end publishing subsystem

4.2 现场应用

该系统在实际应用中调整和优化了部分页面和功能，但整体软件架构不变。系统使用流程遵循从数据录入开始，依次经过数据条件提示风险、查看风险详情、风险预判预测，直至预警发布、响应与退出的完整闭环。系统支持移动端 App 与后台管理系统的双端协同数据录入，形成一套集成数据驱动与风险预警的综合管理架构（图 5）。

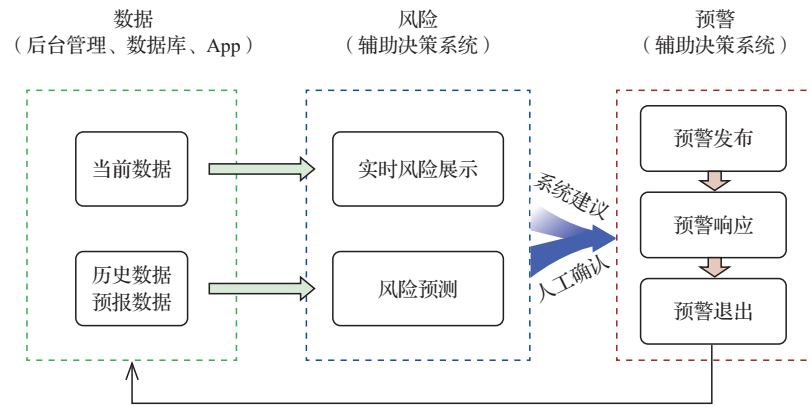

图 5　辅助决策系统使用流程

Fig.5　Workflow of the auxiliary decision-making system

该系统将原先分散在 4 个独立系统中的数据整合至一张图上，关键状态参数（拉力、压差、生物量等）同步获取时间从平均 10 min 缩短至准实时（＜ 1 min），并且系统具有自动声光报警的功能，可以进行 24 h 不间断预警，有效地规避了人工漏看、漏报的风险。此外，预警信息发布时间由人工逐个电话通知（近百人）的约 30 min，缩短至系统自动群打电话的 5 min 以内，显著提高了预警信息发布时效。该系统的成功应用，初步解决了该核电厂冷源应急决策中的“信息延迟”与“决策依赖经验”的问题，验证了系统架构与核心功能的有效性。

5　结论与展望

本文针对我国滨海核电冷源取水安全辅助决策系统开展了初步研究，并提出了一种可行的系统设计与实践案例。重点研究梳理了核电冷源安全监测的核心数据体系，对比分析了各类监测技术的适用场景与优劣特性，梳理并初步构建了核电厂冷源监测预警核心指标体系。本文介绍的辅助决策系统可以实现主要监测数据录入和展示、风险提醒和行动建议、预警发布和指挥响应等主要功能，初步解决了该核电厂冷源应急决策中的“信息延迟”与“决策依赖经验”问题，显著提高了预警信息发布时效，应用效果良好。

事实上，辅助决策系统的发展可归纳为以下 4 个递进阶段。

（1）实时监测动态。通过对多源数据的采集与集成分析，实现对冷源风险的全方位实时感知与动态监控，为决策者提供最新的、准确的风险态势信息，辅助管理者及时调整应对方案。

（2）深度数据分析。运用数据挖掘、统计分析等技术，对海量历史与实时数据进行深度处理与关联分析，揭示风险变化的内在规律与潜在模式，为决策提供科学依据。

（3）预测未来趋势。基于机器学习、时间序列分析等模型，对冷源风险的演变趋势进行定量预测与情景模拟，实现风险早期预警，支持制定更具前瞻性的防御策略。

（4）智能决策支持。依托人工智能技术，为决策者提供智能化的策略建议与优化方案，减少对人工研判的依赖，显著提升决策的效率与准确性。

目前，我国滨海核电的冷源辅助决策系统主要处于前两个发展阶段。实现人工智能与专业人员深度协同，是辅助决策系统发展的最终目标。达成这一目标，需要引入相关人工智能大模型技术。然而在当前阶段，制约大模型在核电冷源领域应用的主要因素包括高价值风险事件样本稀缺、真实实验成本高昂且风险大等。未来可尝试引入基于物理仿真的合成数据生成与数字孪生技术，构建高保真的虚拟冷源灾害模拟环境，批量生成涵盖从正常工况到极端堵塞的全场景多模态数据，从而有效扩充训练数据集，提升模型对复杂、罕见堵塞事件的感知能力与预警能力，切实提高辅助决策系统的智能决策水平。

参考文献（References）：

[1] 廖琪，江文胜．基于 ArcGIS Engine 的风暴潮淹没适应气候变化策略辅助决策系统开发[J]．中国海洋大学学报（自然科学版），2024，54(2)：142-153.
Liao Qi，Jiang Wensheng．Development of decision support system of climate change adaptation strategies for storm surge inundation based on ArcGIS Engine[J]．Periodical of Ocean University of China，2024，54(2)：142-153.

[2] 马成忠．基于 GIS 的地震应急预评估辅助决策系统设计与实现[J]．地理信息世界，2022，29(2)：62-66.
Ma Chengzhong．Design and implementation of earthquake emergency pre-assessment decision-making system based on GIS[J]．Geomatics World，2022，29(2)：62-66.

[3] 梁晓红，潘锡山，黄接华．江苏海洋辅助决策系统的设计与实现[J]．海洋信息技术与应用，2024，39(1)：50-59.
Liang Xiaohong，Pan Xishan，Huang Jiehua．Design and implementation of Jiangsu marine auxiliary decision system[J]．Journal of Marine Information Technology and Application，2024，39(1)：50-59.

[4] 郭猛，杨萌，王硕．“华龙一号”应急辅助决策系统优化设计[J]．仪器仪表用户，2021，28(9)：89-93.
Guo Meng，Yang Meng，Wang Shuo．Optimal design of HPR1000 emergency aid decision system[J]．Instrumentation，2021，28(9)：89-93.

[5] 王超，赵生传，刘远龙，等．基于电网事故处理辅助决策的城市电网应急系统建设和应用[J]．电力系统保护与控制，2011，39(8)：135-138.
Wang Chao，Zhao Shengchuan，Liu Yuanlong，et al．Development and application of urban power network emergency processing system based on assistant-decision for accident treatment[J]．Power System Protection and Control，2011，39(8)：135-138.

[6] 李兴桦，崔亚中，杨刚．海水直流循环冷却核电厂取水方式比选研究[J]．电工技术，2023(18)：54-56.
Li Xinghua，Cui Yazhong，Yang Gang．Comparative selection of seawater intake methods for nuclear power plant with direct seawater cooling system[J]．Electric Engineering，2023(18)：54-56.

[7] 贺敏，田婧，韩雪峰，等．中国滨海核电站冷源安全技术研究进展、问题及对策综述[J/OL]．哈尔滨工程大学学报，[2025-12-23]．https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wFrtWXqGzUjlf7q0sPvHPSA-Y3w6GGu8tKIoNfb2ou4P23qrGpcy-04ApqOnvvITmZRMUwoFmqwE5xs0YPvUUGggjQbWASsPN_CCeQ5FUqu2p1KRLkRjtrFnkxw8fNxktAr4ShH6L6Q=&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG.
He Min，Tian Jing，Han Xuefeng，et al．A review of the research progress，challenges，and response strategies for cold source safety technology in coastal nuclear power plants in China[J/OL]．Journal of Harbin Engineering University，[2025-12-23]．https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wFrtWXqGzUjlf7q0sPvHPSA-Y3w6GGu8tKIoNfb2ou4P23qrGpcy-04ApqOnvvITmZRMUwoFmqwE5xs0YPvUUGggjQbWASsPN_CCeQ5FUqu2p1KRLkRjtrFnkxw8fNxktAr4ShH6L6Q=&uniplatform=NZKPT&language=CHS&version=LYDG.

[8] 徐波波，张锋，张志峰，等．核电冷源运行安全生物灾害综合监测预警技术研究[J]．给水排水，2018(S1)：84-87.
Xu Bobo，Zhang Feng，Zhang Zhifeng，et al．Research on comprehensive monitoring and early warning technology for biological hazards in nuclear power plant cold source operation safety[J]．Water & Wastewater Engineering，2018(S1)：84-87.

[9] 梁桂琰．基于核电厂冷源监测预警的水下图像处理与目标识别算法的研究[D]．广州：中山大学，2022.
Liang Guiyan．Research on underwater image processing and object detection algorithm based on nuclear power plant cold source monitoring and warning[D]．Guangzhou: Sun Yat-sen University，2022.

[10] 陈鸿毅，代丽，张文杰，等．核电厂取水口冷源监测预警数据采集系统研究[J]．给水排水，2024，60(S1)：655-659.
Chen Hongyi，Dai Li，Zhang Wenjie，et al．Research on cold source monitoring and warning data acquisition system of nuclear power plants’ water intake[J]．Water & Wastewater Engineering，2024，60(S1)：655-659.

[11] 孟亚辉，刘磊，郭显久，等．核电厂冷源海生物探测预警及决策支撑系统研究[J]．大连海洋大学学报，2018，33(1)：108-112.
Meng Yahui，Liu Lei，Guo Xianjiu，et al．An early-warning and decision-support system of marine organisms in a water cooling system in a nuclear power plant[J]．Journal of Dalian Ocean University，2018，33(1)：108-112.

[12] 杜红彪，张高明，林莉，等．核电厂取水口致灾物监测预警及防控一体化技术研究[C]// 国际清洁能源论坛（澳门），粤港澳大湾区国家技术创新中心，国家电力投资集团有限公司．全球核能产业发展报告 (2021—2022). 北京：中国言实出版社，2022：211-222.
Du Hongbiao，Zhang Gaoming，Lin Li，et al．Research on integrated technology of monitoring，early warning，prevention and control of disaster materials at water intake of nuclear power plant[C]//International Clean Energy Forum(Macao)，

Guangdong-Hong-Kong-Macao Greater Bay Area National Technology Innovation Center，State Power Investment Corporation Limited. Global Nuclear Energy Industry Development Report (2021–2022). Beijing：China Yanshi Press，2022：211-222.

[13] 沈萍萍，于先波，孟不凡，等. 滨海核电冷源取水区风险生物的分类及特征分析[J]. 海洋科学，2023，47(9)：131-140.
Shen Pingping，Yu Xianbo，Meng Bufan，et al. Classification and characteristics of the risk organisms in cold source water intake area of coastal nuclear power plants[J]. Marine Sciences，2023，47(9)：131-140.

[14] 孟亚辉. 基于多源异构的核电站取水口海生物监测技术研究[D]. 上海：上海交通大学，2018.
Meng Yahui. Technical study for marine biomonitoring based on multi-source heterogeneous data at nuclear power plant intake channels[D]. Shanghai：Shanghai Jiao Tong University，2018.

[15] 张朝文，关春江，徐鹏，等. 辽东湾东部海域核电冷源取水区的风险生物分析[J]. 海洋环境科学，2019，38(1)：41-45.
Zhang Chaowen，Guan Chunjiang，Xu Peng，et al. Analysis on risk organisms for the cold source water of nuclear power plant in the eastern waters of Liaodong bay[J]. Marine Environmental Science，2019，38(1)：41-45.

[16] 孟亚辉，胡立生，李建文，等. 提升核电冷源安全性的海生物监测技术研究[J]. 电力安全技术，2019，21(3)：33-39.
Meng Yahui，Hu Lisheng，Li Jianwen，et al. Research on marine biological monitoring technology to improve the cold source safety of nuclear power plant[J]. Electric Safety Technology，2019，21(3)：33-39.

[17] 王梓，付媛媛. 基于声学方法的核电厂取水口冷源生物量监测[J]. 科学技术创新，2021(36)：169-172.
Wang Zi，Fu Yuanyuan. Monitoring of cold source biomass at water intake of hongyanhe nuclear power plant by using acoustic methods[J]. Scientific and Technological Innovation，2021(36)：169-172.

[18] 张剑飞. 基于高分辨率多波束声成像的核电站冷源海域水母探测研究[J]. 数字海洋与水下攻防，2020，3(2)：146-151.
Zhang Jianfei. Research on jellyfish detection in cold source sea area of nuclear power plant based on high resolution multi-beam acoustic imaging[J]. Digital Ocean & Underwater Warfare，2020，3(2)：146-151.

[19] 李汉光，徐万平，付建明，等. 滨海核电冷源取水口拦污网网兜海生物高效处理的新型抽吸装置设计[J]. 产业与科技论坛，2023，22(4)：38-41.
Li Hanguang，Xu Wanping，Fu Jianming，et al. Design of a new type of suction device for high-efficient treatment of marine organisms in the trash-intercepting net at coastal nuclear power cooling water intake[J]. Industrial & Science Tribune，2023，22(4)：38-41.

[20] 李汉光，徐万平，付建明，等. 滨海核电冷源取水口海生物拦截体系的改进设计[J]. 科技与创新，2022(19)：164-168.
Li Hanguang，Xu Wanping，Fu Jianming，et al. Improved design of marine biological interception system for cold source intake of coastal nuclear power plant[J]. Science and Technology & Innovation，2022(19)：164-168.

[21] 闫留浩. 核电取水口流场分析及拦截设施动力响应研究[D]. 大连：大连理工大学，2023.
Yan Liuhao. Flow field analysis of nuclear power intake and dynamic response study of interception facilities[D]. Dalian：Dalian University of Technology，2023.

[22] 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，2022，42(8)：32-35.
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，2022，42(8)：32-35.

[23] 熊碧露，许波涛，郑早华，等. 基于冷源安全的滨海核电厂取水拦污网设计[J]. 中国港湾建设，2022，42(9)：45-48.
Xiong Bilu，Xu Botao，Zheng Zaohua，et al. Design of trash-intercepting nets based on cooling water intake safety of coastal nuclear power plants[J]. China Harbour Engineering，2022，42(9)：45-48.

[24] 毛雨佳，姜佳音，陆程，等. 核电厂鼓形滤网过滤效果试验分析[J]. 给水排水，2024，60(S1)：623-627.
Mao Yujia，Jiang Jiayin，Lu Cheng，et al. Experimental study and analysis on the filtering effect of drum filter in nuclear power plants[J]. Water & Wastewater Engineering，2024，60(S1)：623-627.

[25] 吴彦农，王娅琦，候秦脉，等. 海洋异物堵塞核电厂取水系统事件的经验反馈[J]. 核安全，2017，16(1)：26-32.
Wu Yannong，Wang Yaqi，Hou Qinmai，et al. Experience feedbacks on events of nuclear power plants cold source systems blocked by oceanic foreign matter[J]. Nuclear Safety，2017，16(1)：26-32.

[26] 汪建军，李俊峰，张守杰，等. 板框式旋转滤网清污性能分析及提升研究[J]. 中国电力，2019，52(2)：165-171.
Wang Jianjun，Li Junfeng，Zhang Shoujie，et al. Analysis and enhancement study on the cleaning capacity of plate-frame rotary filter[J]. Electric Power，2019，52(2)：165-171.