

基于蓝海信息网络的海洋环境平行监测体系建模研究

苏振东¹ 刘凡² 杨瑞平³ 王飞跃⁴

摘 要 针对目前海洋环境监测体系顶层设计不足、各监测手段间统一调度与管理缺乏、监视数据关联分析缺失等问题,提出了基于蓝海信息网络的海洋环境平行监测系统架构;详细描述了海洋环境监测人工系统的构建方法,以及计算实验方案;最后,构建完备的海洋环境监测平行系统,通过平行执行为海洋环境监测的高效、智能管理与运营提供保障,对减少海洋环境监测基础设施冗余建设、降低人力与物理成本、提高运营能力,实现海洋环境监测的可持续发展必将产生深远的影响。

关键词 蓝海信息网络, 海洋环境监测系统, 平行系统, 建模

引用格式 苏振东, 刘凡, 杨瑞平, 王飞跃. 基于蓝海信息网络的海洋环境平行监测体系建模研究. 自动化学报, 2020, 46(8): 1582–1591

DOI 10.16383/j.aas.c180361

Architecture of Marine Environmental Parallel Monitoring System Based on the Lanhai Information Network

SU Zhen-Dong¹ LIU Fan² YANG Rui-Ping³ WANG Fei-Yue⁴

Abstract The architecture of marine environmental parallel system based on the Lanhai information network is proposed by using the artificial environmental systems, computational experiments, and parallel execution (ACP) method, in view of the problems of insufficient top-level design of the marine environmental monitoring system, the lack of unified scheduling and management among various monitoring means and the inefficiency of the correlation analysis of monitoring data. The system modeling method and computational experiments system are described in detail. A complete marine monitoring and control system is constructed to ensure the efficient and intelligent management and operation of the marine environmental monitoring, which will have a far-reaching impact on reducing the redundant construction of the marine environmental monitoring infrastructure, reducing the human and physical costs, improving the operational power and achieving the sustainable development of the marine environment monitoring.

Key words Lanhai information network, marine environmental monitoring system, parallel system, modeling method

Citation Su Zhen-Dong, Liu Fan, Yang Rui-Ping, Wang Fei-Yue. Architecture of marine environmental parallel monitoring system based on the Lanhai information network. *Acta Automatica Sinica*, 2020, 46(8): 1582–1591

海洋蕴藏着丰富的矿物资源、油气资源、生物资源、化学资源、动力资源、海水资源、空间资源和旅游资源,是社会经济发展的重要物质基础。建设

海洋强国,开发、利用和保护海洋,必须首先从认识并掌握海洋自身具有的环境特点和变化规律开始。经过长期的建设与发展,大量的海洋环境监测系统得到了应用,由此带来的问题是:各监测系统缺乏统一调度与管理,各监测系统获得的数据没有进行关联分析,导致重复投资、监测能力低下等问题^[1–3]。这就需要开展海洋环境监测能力的顶层设计,优化组合各个监测系统的设备,形成结构优化、能力更优的海洋环境监测系统。解决该问题的一般思路是:建立各个监测设备的仿真模型,构建多个海洋环境监测仿真系统。通过对这些仿真系统进行实验分析,形成顶层设计、结构优化和能力优化的方案。然后依据这些方案,调整真实的海洋环境监测系统。

上述方法需要建立大量的各类传感器设备模型、网络信息传输模型和数据处理模型。对于海洋

收稿日期 2018-12-02 录用日期 2019-04-09
Manuscript received December 2, 2018; accepted April 9, 2019
国家自然科学基金 (61533019) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61533019)

本文责任编辑 李鸿一

Recommended by Associate Editor LI Hong-Yi

1. 中国科学院大学经济与管理学院 北京 100190 2. 中国电子科技集团科海海洋信息技术研究院有限公司 北京 100041 3. 海军研究院 北京 100161 4. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190

1. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190 2. Ocean Information Co., Ltd., China Electronics Technology Group Corporation (CETC), Beijing 100041 3. Naval Research Academy, Beijing 100161 4. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

环境监测系统这类复杂大系统来说, 建模工作量非常巨大, 由此投入的人力和物力都非常高, 且对人员综合素质要求较高. 更重要的是, 如果模型可信度不高, 仿真运行偏差较大, 则最终得到的方案也没有太大意义.

2004 年, 王飞跃提出了基于人工系统的平行系统和计算实验概念 (Artificial society, computational experiments, parallel execution, ACP)^[4-6], 基于 ACP 的平行系统方法不断在实践中得以完善, 在交通^[7-9]、网络^[10-12]、物流^[13]、农业^[14]、医学^[15-16]、健康、经济等领域得到了广泛应用, 并取得了显著的效果. 当前, 海洋环境研究已经从短暂考察逐步过渡到长期观测, 综合性、全天候、长期连续实时观测海洋环境及其相互关系已经成为新的科学目标. 基于平行系统理论方法, 软硬一体化设备、“云加端”的服务模式、将网络作为促进信息更高效流通及服务承载的平台载体, 可有效解决海洋环境监测面临的复杂性问题. 目前平行系统方法已经在海洋环境监测领域^[17]得到了初步应用. 本文采用平行系统方法对当前正在建设的蓝海信息网络这一复杂系统进行分析研究.

针对海洋环境立体监测体系的诸多问题和不足, 综合考虑体系建设的复杂性本文在蓝海信息网络中采用平行系统方法进行体系建模, 构建完备的海洋环境监测平行系统, 希望通过平行执行为海洋环境监测的高效、智能管理与运营提供保障. 本文结构安排如下: 第 1 节介绍海洋环境平行监测体系框架; 第 2 节详细介绍蓝海信息网络以及基于蓝海信息网络的海洋环境平行监测体系架构; 第 3 节对海洋环境监测设备建模; 第 4 节和第 5 节分别介绍了卫星遥感反演模型和海洋数值模拟同化模型; 第 6 节介绍海洋环境多源信息融合方法; 第 7 节介绍了海洋环境稀疏数据插值方法; 最后给出了本文的结论和展望.

1 海洋环境平行监测体系框架

平行系统理论的基本思路是将人工系统作为建模工具, 以数据为驱动, 采用计算实验方法进行分析评估, 完成人工虚拟系统与现实系统之间的交互, 并对二者之间行为进行对比和分析, 实现对各自未来状况的“借鉴”和“预估”, 相应地调节各自的管理与控制方式, 通过实时在线的模型预测控制方法达到方案优化的目的^[17-19]. 平时以万变应不变, 在人工系统中做计算实验, 自己生成数据、自我学习、自我对抗, 获取经验和知识, 把小数据“炒”成大数据, 再从大数据凝练出精准的“小”知识, 一旦出现问题就是以不变应万变, 按精准知识行事. 海洋环

境平行监测体系框架如图 1 所示.

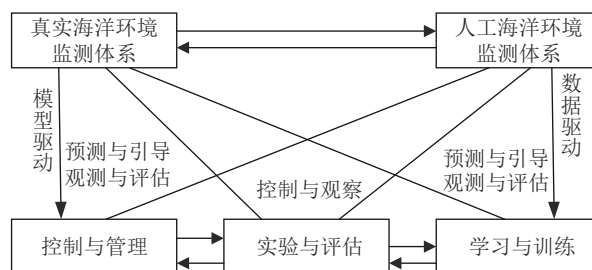


图 1 海洋环境平行监测体系框架

Fig.1 The framework of marine environmental parallel monitoring system

构建海洋环境平行监测体系的理论基础和方法指导是基于社会物理信息系统 (Cyber-Physical-Social systems) 及平行系统. 如图 1 中, 海洋环境人工监测体系与海洋环境真实监测体系之间的交互运行, 构成完整的海洋环境平行监测体系. 海洋环境平行监测体系的运行实际上是人工海洋环境监测体系 and 实际海洋环境监测体系同时运行. 这一运行过程是建立问题、分析判断问题、获得运行结果的过程^[20-22].

2 基于蓝海信息网络的海洋环境平行监测体系

蓝海信息网络是基于新一代信息系统技术体制, 综合集成“感、传、用、管”能力, 实现“天、空、岸、海、潜”一体化的海洋网络信息体系. 该网络着力打造军民融合、开放共享、自主可控的海洋信息基础设施, 逐步形成覆盖我国管辖海域、海上丝绸之路、南北两极与海上战略要道, 乃至全球大洋的“全时域态势感知、全海域网络覆盖、全方位信息服务、全业务综合应用、全体系安全管控”的海洋综合信息系统, 其系统架构如图 2 所示.

为顺利推进蓝海信息网络建设, 中电科集团自筹资金, 开展了蓝海信息网络示范系统建设, 在海南陵水至西沙永兴岛的海上航道周边开展示范系统的部署, 设计海洋信息化体系基本架构和技术体制, 开发关键技术装备, 提供海洋信息服务, 重点验证海域应用、系统集成、运营服务能力, 为海洋环境监测体系建设奠定基础, 示范系统组成如图 3 所示.

蓝海信息网络示范系统包括天基海洋观测、航空海洋观测、岸岛海洋观测、海基海洋观测、水下海洋观测等分系统, 通过卫星通信、散射通信、短波、北斗等手段, 将观测数据传输汇集至海洋环境信息处理中心, 由中心进行数据综合处理、应用, 并实现

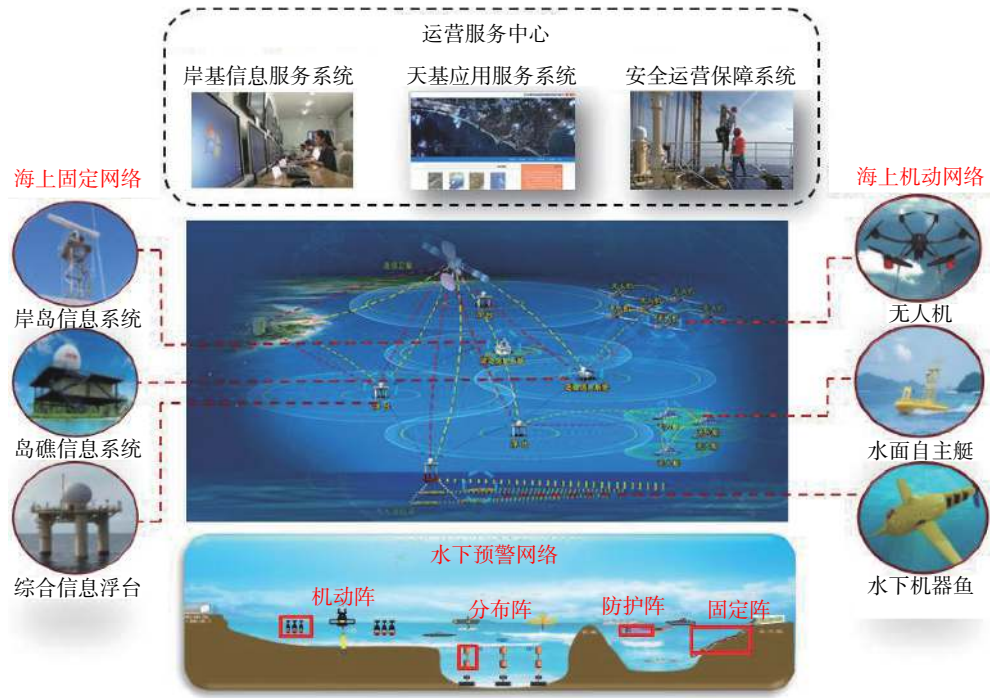


图 2 海洋环境平行监测体系框架

Fig. 2 The architecture of marine environmental parallel monitoring system

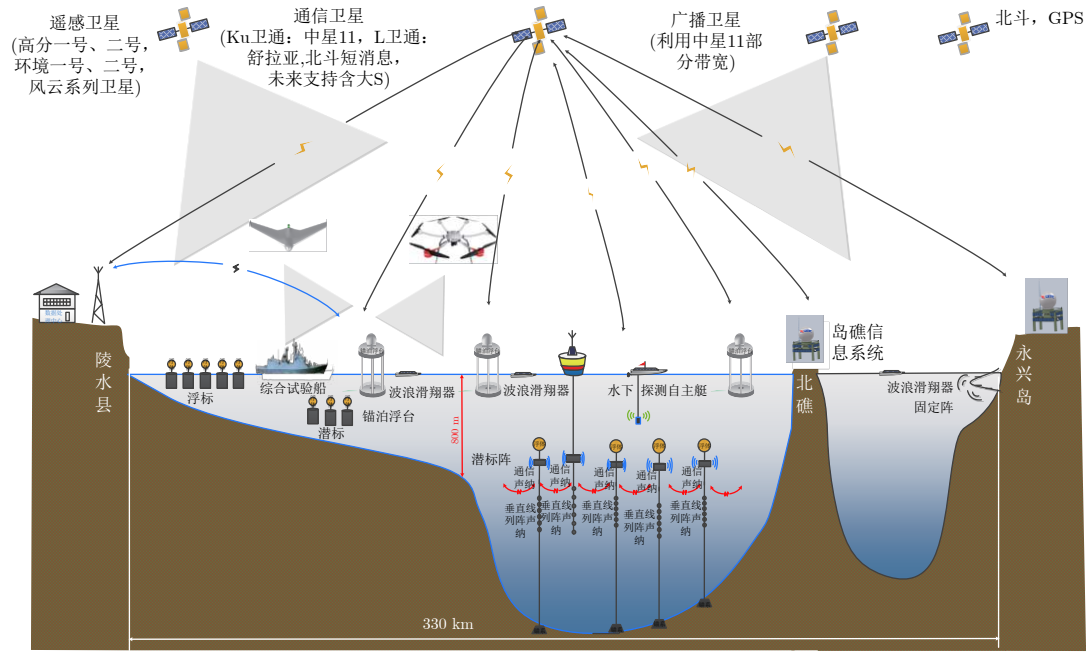


图 3 蓝海信息网络示范系统示意图

Fig. 3 The demonstration system of the Lanhai information network

对各平台各传感器的综合管控. 本文采用平行系统方法构建基于蓝海信息网络的海洋环境平行监测体系, 如图 4 所示.

如图 4 所示, 建立了人工蓝海信息网络后, 通过计算实验及平行执行, 对蓝海信息网络进行评估

与优化迭代, 最终实现蓝海信息网络的描述、预测和引导. 人工蓝海信息网络的系统组成如图 5 所示.

人工蓝海信息网络需要建立的模型主要是各类监测设备类模型. 从蓝海信息网络中各种类型物理传感器及软件定义传感器的感知量到海洋环境物理

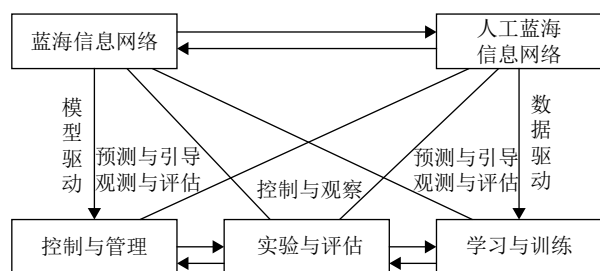


图4 基于蓝海信息网络的海洋环境平行监测体系框架

Fig.4 Framework of parallel monitoring system for marine environment based on the Lanhai information network

特征量, 存在观测数据的反演、数值模拟与同化、定量科学信息提取与融合、稀疏数据差值等海洋环境信息处理方法与模型。

3 监测设备建模

人工蓝海信息网络中的监测设备包括天基海洋观测、航空海洋观测、岸岛、海基及水下海洋环境监测设备等。天基卫星海洋环境遥感观测的传感器主要有: 辐射计、散射计、卫星高度计、合成孔径雷达、重力场卫星、磁力场卫星等。空基海洋观测通常采用固定翼飞机和无人机为平台, 搭载微波和光学遥测设备, 具有分辨率高、机动灵活、探测项目多等特点, 是海洋环境监测的重要观测平台, 能够实时获

取大气海洋环境资料^[23-25]。岸岛、海基及水下海洋环境监测采用岸岛平台、海上锚泊浮台、海洋测量船、锚系式浮标、剖面探测式漂流浮标、潜标、无人潜航器、波浪能滑翔器、海底观测网等海上、水下平台, 搭载各类海洋环境监测传感器, 实现对海洋环境的多手段监测。海洋环境参数常用观测传感器如表1所示。

对海洋环境观测传感器进行建模研究。由于各类传感器的参数存在差异, 这里主要对各类传感器的通用模型进行研究。 t 时刻海洋环境人工检测系统通用模型可表示为

$$F_t = \sum_i \sum_j P_i(L, B, H, t, C_j) \quad (1)$$

其中, P_i 为传感器平台类型, C_j 为传感器获取参数类型, (L, B, H) 为传感器获取参数的空间坐标, t 为传感器获取参数的时间。其中传感器平台、类型、获取参数由表1具体给出。

4 卫星遥感反演模型

卫星空间遥感大大弥补了海洋观测资料的不足(如离散地基台站、离散时间观测)。自20世纪70年代至今, 各类多频段(可见光、红外、微波)多通道的卫星遥感计划提供和积累了海量数据。近30年来, 我国的风云气象卫星、海洋卫星也逐步与

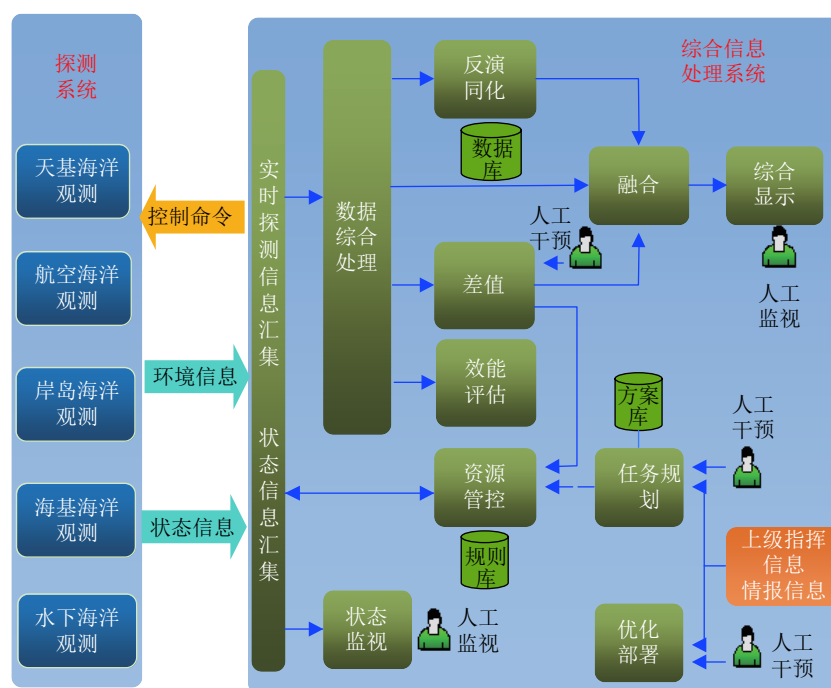


图5 人工蓝海信息网络系统组成

Fig.5 The system of artificial Lanhai information network

表 1 海洋环境监测传感器
Table 1 Marine environmental monitoring sensor

观测参数		传感器
温度	温深盐仪CTD	可连续测量
	抛投式温深仪XBT	抛弃式, 不可回收, 测量范围 450 m以浅
	抛弃式XCTD	抛弃式, 不可回收
盐度	温深盐仪CTD	可连续测量
	抛投式温深盐仪XBT	抛弃式, 不可回收, 测量范围 450 m以浅
	抛弃式XCTD	抛弃式, 不可回收
海流	声学多普勒海流计ADCP	工作深度 50 ~ 6 000 m
	电磁海流计	倾斜影响大
	声学多普勒海流计(单点式)	可连续测量
海浪(波向、波高)	声学测波仪	放置于海底, 通过回波信号测量波高
	雷达测波	海杂波反演海面波高
	波浪浮标	可连续测量
潮汐/潮位(水位)	漂流浮标	需要浮体具有较好的随波性
	声学水位计/超声波验潮计	可连续测量
	压力式验潮仪	可连续测量
	GPS验潮	可连续测量
重力	旋转型重力仪	按照设定频率采样
	直线型重力仪	按照设定频率采样
磁力	铯光泵磁力仪	对铁磁性物质很敏感, 搭载平台必须为无磁性或弱磁性
海底地形(水深)	回声测深仪	可连续测量
	多波束测深	能一次给出与航线相垂直的平面内的几十个至上百个深度

国际卫星遥感一起获取了对海洋观测的大量数据, 取得了可观的成绩. 但遥感观测的数据是复杂海洋电磁散射与电磁热辐射, 并不直接是所需要的各类环境物理参数 (海表温度、盐度、海流、风场等) 的定量信息, 无法直接提供海洋参数规律性知识. 卫星数据的反演是从电磁场到地球物理性质的逆运算, 具体是指从卫星原始数据获得定量海洋环境参数的数学物理方法.

1) 微波辐射计反演海表面温度、盐度、海表风速
微波辐射计的观测能量通过物理辐射传输模型 (Radiative transfer model, RTM) 得到如下亮温表达式

$$T_B = T_{Bu} + \tau[E \times T_S + (1 - E)(T_{Bd} + \tau T_{Bc})] \quad (2)$$

式 (2) 中, T_{Bu} 为上行大气辐射; T_{Bd} 为下行大气辐射; τ 为总路径的透过率. E 为海表发射率, T_S 为海面温度, T_{Bc} 为冷空背景辐射.

海洋产品反演算法利用 RTM 模型进行经验回归得到的, 线性经验方程为

$$P = \sum c_i F_i + c_{10} \quad (3)$$

$$F_i = T B_i - 150, \quad i \neq 7 \quad (4)$$

$$F_i = -\ln(290 - T B_i), \quad i = 7 \quad (5)$$

其中, F_i 为线性经验方程, c_i 为线性经验方程的系数.

2) 散射计反演海表面风场

将散射计后向散射截面测量值转化为海面风矢量场, 根据雷达方程, 后向散射截面计算式为

$$\sigma_0 = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_r}{\lambda^2 G^2 A P_t} \quad (6)$$

其中, R 为目标径向距离, P_r 为雷达接收功率, P_t 为雷达发射功率, λ 为雷达波长, G 为雷达天线增益.

海面风场反演的经验模型为

$$\sigma_0 = F(\theta, U_{10}, \varphi) \quad (7)$$

在反演公式中, 标准化雷达后向散射截面是散射计测量的已知数据, 雷达波束与海面垂直方向 θ 的夹角也是已知条件. 海面上 10 m 高的风速 U_{10} 和风向 φ 是未知变量. 如 ERS-1/2 散射计反演式为

$$\sigma_0 = b_0 \left[1 + b_3 \frac{(1 - e^{-2b_2})}{(1 + e^{-2b_2})} (2 \cos^2 \varphi - 1) \right]^{c_{22}} \quad (8)$$

式中, 常数由机载散射计的测量和浮标同步数据拟合获得.

3) 卫星高度计反演海流

在卫星遥感资料中, 可通过海面风场和海面高

度场反演估算全球尺度的海表流场. 基于物理海洋学理论, 海表流场 (V) 可分解为 Ekman 流 (V_E) 和地转流 (V_g) 两部分: $V = V_E + V_g$.

a) Ekman 流计算

由海表面风应力驱动引起的 Ekman 流, 计算式为

$$\tau = [\tau_x, \tau_y] = \rho_a C_D U_{10} [U_{10}, v_{10}] \quad (9)$$

其中, ρ_a 为空气密度; U_{10} 为海面 10 m 风速大小; u_{10}, v_{10} 分别为纬向、经向的风速大小; C_D 为拖曳系数.

b) 地转流计算

受地球自转作用引起的地转流体 (大气和海洋), 地转速度计算式为

$$f v_s(x, y) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (10)$$

$$f u_s(x, y) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (11)$$

其中, $f = 2\Omega \sin \theta$ 为地转参数; Ω 为地球自转角速度; θ 为纬度. 根据流体静力学平衡

$$p = p_a + \int_z^{h_d} \rho g dz = p_a + \rho g (h_d - z) \quad (12)$$

可求得海表面地转流速的水平分量为

$$v_s(x, y) = \frac{g}{f} \frac{\partial h_d}{\partial x} \quad (13)$$

$$u_s(x, y) = -\frac{g}{f} \frac{\partial h_d}{\partial y} \quad (14)$$

5 海洋数值模拟与同化

目前, 随着海洋观测技术的高速发展, 人们逐渐有能力获取广阔海面上大量、高分辨率的实时观测数据. 海洋卫星遥感反演技术为海洋研究提供了大量的大气与海洋参数资料, 包括海表面温度、海表面风场、海表面高度、辐射、降雨资料等等. 这些大气参数可作为海洋数值模型的外部强迫场, 海洋参数可作为海洋数值模型的初值场和边界条件.

日常海洋环境监测与预报任务包含以下过程: 海洋数据的系统收集处理与质量控制、海洋数值模型的确定和调试、海洋数据同化方法的研制、海洋预报系统的综合集成、预报及其效果检验, 如图 6 所示.

大气和海洋的运动受到流体力学、热力学等物理规律的支配, 可以用方程组的形式定量表达. 在给定边界条件的情况下, 通过数值方法求解, 可以由已知状态预测未来的状态, 这就是数值模拟.

1) 基于 HYCOM (Hybrid coordinate ocean model) 模型的全球海洋同化技术是在美国迈阿密大学等密度面坐标海洋模型基础上发展起来的, 其优势在于利用三种垂直坐标按照深度的转换, 有助于更好地刻画流场.

a) 水平、垂直分辨率

设置全球 HYCOM 模型水平分辨率约为 50 km, 垂向采用混合坐标, 有 28 层, 上面 5 层采用 z 坐标, 其他采用等密度面坐标. 垂直混合参数化方案采用 K-剖面参数化 (K-profile parameterization, KPP) 方案.

b) 同化的观测资料

同化的观测资料包括法国卫星地面接收中心提供的分辨率为 $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ 网格的海平面异常 (Sea surface height anomaly, SSHa)、卫星遥感海面温

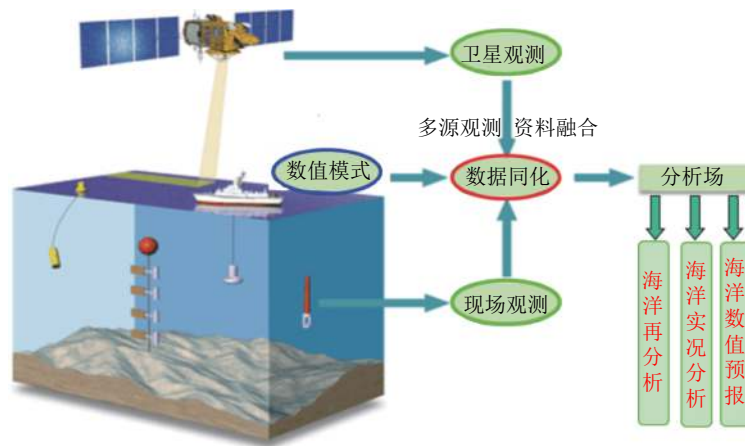


图 6 海洋环境日常监测与预报

Fig.6 Daily monitoring and forecasting of the marine environment

度 (Sea surface temperature, SST) 产品, 以及现场剖面观测资料 (CTD、XBT、Argo 剖面). 来自 ENSEMBLES 的 EN4 综合资料集的现场温度和盐度剖面也将被同化. EN4 资料集包括世界海洋数据库 WOD05 (World Ocean Database 2005)、全球温盐剖面计划 (Global temperature and salinity profile project, GTSSP)、实时地转海洋阵列 Argo 浮标温盐剖面观测资料、以及北极天气海盆尺度海洋学项目所获取的资料等. 法国卫星地面接收中心提供的卫星观测 SSHa 数据来自于法国的测高数据用户服务网站. 该数据集是由 TOPEX/POSEIDON (T/P)、Jason-1、ERS-2 和 Envisat, HY-2 等多颗卫星的测高资料融合而成的海表面高度异常产品, 其中已经扣除了多年平均海表面高度, 网格空间分辨率为 $1/3^\circ \times 1/3^\circ$, 时间分辨率为 7 天. 卫星遥感 SST 数据来自 Reynolds SST 数据集.

c) 模型同化方法

海洋观测资料同化方法采用了集合最优插值法 (EnOI). 根据 EnOI 的定义, 样本不随时间移动和变化. 然而, 在某些区域, 尤其是季风区, 静态不随时间变化的样本似乎不能合理反映误差协方差的流依赖性. 因此, 在资料同化系统中, 采用随季节更新的样本 (即不同的季节用不同的样本). 背景误差协方差以准高斯相关函数来进行局地化, 水平特征尺度为 350 km. 相比传统方法而言, EnOI 方法对观测误差和背景场的统计特征进行了加权考虑, 因此称为统计插值法, 其通过简化算法给定最佳线性无偏估计方程中的权矩阵. EnOI 方法计算式为

$$x_a = x_b + K(Y - H[x_b]) \quad (15)$$

式中, x_a , x_b 分别为模型的分析场和背景场, Y 为观测向量, H 为观测算子.

d) 模型输出参数

模型输出参数包括了逐日的三维海洋温度、盐度、洋流 (经向流速、纬向流速) 场以及二维的海表面高度, 共 5 个变量. 资料格式为 NetCDF (二进制). 原始资料在等密度坐标上, 被内插到标准垂直平面上.

2) 基于 FVCOM 模型的区域海洋同化技术

FVCOM (Finite volume coastal ocean mode) 由 Chen 及其所领导的美国佐治亚大学海洋学院海洋生态动力学实验室开发^[26]. 由于 FVCOM 在近岸岸线模拟上的优势, 采用 FVCOM 模型来构建区域海洋预报系统.

a) 模型同化数据

模型运行中同化了海表温度 SST 数据和表面高度数据 (Sea surface height, SSH). 其中 SST 数

据来自多源业务化海洋卫星数据. SSH 则是通过处理法国卫星高度计资料数据, 插值到各个非结构网格上, 在计算过程中通过三维变分方法进行同化. 三维变分目标泛函可表示为

$$J(x) = J_b + J_c = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}[Y_o - H(x)]^T (E + F)^{-1} O^{-1} [Y_o - H(x)] \quad (16)$$

式中, x 为分析变量, x_b 为的先验估计, B 为背景误差协方差矩阵, E 为观测误差, F 分代表性误差, H 为观测算子, Y_o 为观测值, 上标 -1 代表矩阵的逆. 为了简化问题, 通常只考虑观测误差, 将上式进行简化处理得到

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}[Y_o - H(x)]^T O^{-1} [Y_o - H(x)] \quad (17)$$

式中, O 为观测误差协方差矩阵. 为了求上式的极小值, 一般求解梯度信息, 表达式为

$$\nabla J(x) = B^{-1}(x - x_b) - H^T(x) O^{-1} [Y_o - H(x)] \quad (18)$$

使得梯度信息等于 0 的变量 x , 即为最优化 x_a , 采用解析方法难以求得, 多采用数值求解的方法.

b) 模型输出参数

模型输出参数主要包括海面高度、三维速度、盐度、温度场. 模型输出数据格式为 NETCDF 格式.

6 海洋环境多源信息融合

在多源海洋环境监测手段中, 卫星观测数据、数值模拟数据和气象水文常规观测数据是开展气象水文环境信息融合的主要数据源. 卫星数据能够提供大气和海洋的精细化特征, 数值模拟数据能够得到大气海洋三维分布, 常规观测手段能够提供监测站点周围长时间序列的大气和海洋参数值. 但这些多源数据具有不同的时间、空间分辨率, 具有各自的主要应用对象和局限性. 需要通过数据融合, 对多传感器、多平台的观测数据以数值模拟数据进行综合处理和分析, 突出和强化有用信息, 消除或抑制无关的信息, 弥补单一信息的不足, 提供长期稳定连续可靠的高精度全球范围的观测资料, 改善海上目标识别的影响环境.

1) 多源数据预处理技术

当前, 海洋水文气象数据获取可采用航空、航船等传统的海洋测量方法, 天基卫星海洋遥感, 全球 Argo 浮标测量等多种手段. 观测手段的多样性大大提高了海洋水文气象数据的准确性和充足性, 但同时也增加了数据统一处理和使用难度. 因此,

需要研究气象水文多维观测信息的多源、多时相、多尺度等特征; 基于图像分类、空间分布规律等进行海洋环境信息特征提取; 开展卫星观测数据与常规观测数据的数据验证与质量控制, 并进行噪声平滑处理; 针对不同卫星轨道坐标系与全球格网坐标不统一问题, 开展数据规范化处理, 确保数据的一致性。

2) 时空一致性网格化投影变换技术

当前, 数值模拟大部分都是网格型, 例如 GRAPES 主要的分辨率是 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 。有些数值模型的网格采用莫卡托等投影方式和存在嵌套模型, 而海上观测平台的观测数据多为离散点。这些数据严重制约了与其他数据的比较以及直观的三维动态展示。虽然简单线性插值处理等能够将这些数据网格化投影, 但是会带来一定的插值误差和非均一性。需要考虑气象水文参数特征的空间均一化插值网格投影算法, 保证投影数据的一致性。

3) 多源数据时空无缝集成技术

目前气象水文数值模式的再分析资料分辨率较低, 难以满足海洋环境精细感知的要求。而新兴的遥感数据之间因时间、空间分辨率不统一, 并且空间覆盖不完全, 造成海域数据缺失。因此, 需要通过融合技术把遥感数据与海岸气象站数据结合起来, 形成覆盖全海域的高分辨率数据。需重点研究岸基气象观测、海岛气象水文观测、浮标站等常规观测资料与卫星遥感监测资料的时空融合技术; 研究卫星监测数据与美国 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 再分析数据融合方法; 研究不同卫星监测数据与数值模式预报产品的数据融合方法; 针对不同海洋气象水文参数开展融合方法的实验应用, 并进行融合方法的效果评估。

7 海洋环境的稀疏数据插值

海洋资料反映了海洋环境要素时间变化和空间分布的重要信息。由于观测成本、观测手段以及相关方法技术的制约, 现有的海洋观测资料大多稀疏、零散, 难以满足科学研究的需要。采用有效的算法模型, 对既有的海洋稀疏数据资料进行插值、挖掘和拓展等处理, 是最大限度地利用海洋环境数据信息资源的重要途径, 目前已成为海洋科学研究中的重要基础性工作。常用的方法有: 遗传优化的分形插值、支持向量机-Kriging 插值和信息扩散插值等。

8 结论与展望

本文基于平行系统理论方法提出了基于蓝海

信息网络的海洋环境平行监测体系, 建立了蓝海信息网络的天空基海洋观测系统、航空海洋观测系统、岸岛海洋观测系统、海基海洋观测系统、水下海洋观测系统等功能分系统模型; 构建了卫星遥感信息反演、海洋数值模拟与同化、海洋环境多源信息融合、海洋环境的稀疏数据差值等量化计算模型; 以此为基础, 形成人工蓝海信息网络, 与蓝海信息网络交互形成完备的蓝海信息网络平行系统, 为海洋环境监测的高效、智能管理与运营提供保障。众所周知, 我国近海和远海的气象资料获取能力有限, 海洋表面的气象观测点严重不足, 锚系浮标观测站点稀疏, 海洋气象预报科技基础能力薄弱, 特别是海洋气象数值预报模式等核心技术不高, 远不能满足海洋航运、海上导航、海上工程、海上牧场、海上旅游等方面的需求, 但随着海洋模式、人工智能和大数据处理等技术的发展, 获得更准确、有效的海洋环境立体监测方案和数据, 完善海洋监测缺失地区的数据服务, 推动海洋环境平行监测体系走向精细化、智能化的有效途径, 具有巨大的研究价值和应用前景。

References

- 1 Kang Shou-Ling. Giving more attention to the development of oceanographic instrument, and equipment, increasing the ocean monitoring technology level. *Ocean Technology*, 1996, **15**(2): 1-5
(康寿岭. 注重海洋仪器设备的发展提高海洋监测技术水平. 海洋技术, 1996, **15**(2): 1-5)
- 2 Yuan Xin, Wang Wei-Ping. The arrangement of boat-shaped oceanic date buoy's deployment. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2002, **2**(2): 40-44
(袁新, 王卫平. 船型海洋资料浮标布放作业的组织与实施. 气象水文海洋仪器, 2002, **2**(2): 40-44)
- 3 Xie Bo-Tao, Lei Fang-Hui, Wang Jun-Qin. Development and application of the platform-based marine environment monitoring system. *Ocean Technology*, 2013, **32**(1): 16-20
(谢波涛, 雷方辉, 王俊勤. 平台基海洋环境立体监测系统的研制及应用. 海洋技术, 2013, **32**(1): 16-20)
- 4 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485-489
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, **19**(5): 485-489)
- 5 Wang Fei-Yue. Computational theory and method on complex system. *China Basic Science*, 2004, **41**(6): 3-10
(王飞跃. 关于复杂系统研究的计算理论与方法. 中国基础科学, 2004, **41**(6): 3-10)
- 6 Wang Fei-Yue. Artificial society, computational experiments, parallel systems: A discussion on computational research of complex socioeconomic systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, **1**(4): 25-35
(王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统——关于复杂社会经济系统计算研究的讨论. 复杂系统与复杂性科学, 2004, **1**(4): 25-35)

- 7 Wang F-Y. "Parallel control and management for intelligent transportation systems: Concepts, architectures, and applications". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2010, **11**(3): 630–638
- 8 Lv Yi-Sheng, Ou Yan, Tang Shu-Ming, Zhu Feng-Hua, Zhao Hong-Xia. Computation experiment of evaluating road network traffic condition based artificial transportation systems. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2009, **39**(S2): 87–90
(吕宜生, 欧彦, 汤淑明, 朱风华, 赵红霞. 基于人工交通系统的路网交通运行状况评估的计算实验. 吉林大学学报(工学版), 2009, **39**(S2): 87–90)
- 9 Wang Fei-Yue. Parallel control: A method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293–302
(王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(4): 293–302)
- 10 Wang F-Y, Yang L Q, Cheng X, Han S S, Yang J. Network softwarization and parallel networks: Beyond software-defined networks. *IEEE Network*, 2016, **30**(4): 60–65
- 11 Wang Fei-Yue, Yang Liu-Qing, Hu Xiao-Ya, Cheng Xiang, Han Shuang-Shuang, Yang Jian. Parallel networks and network softwarization: A novel network architecture. *Scientia Sinica Informationis*, 2017, **47**: 811–831
(王飞跃, 杨柳青, 胡晓娅, 程翔, 韩双双, 杨坚. 平行网络与网络软件化: 一种新颖的网络架构. 中国科学: 信息科学, 2017, **47**: 811–831)
- 12 Wang Fei-Yue, Zhang Jun. Internet of minds: The concept, issues and platforms. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(12): 2061–2070
(王飞跃, 张俊. 智联网: 概念、问题和平台. 自动化学报, 2017, **43**(12): 2061–2070)
- 13 Wang Fei-Yue, Dai Ru-Wei, Zhang Si-Ying, Chen Guo-Liang, Tang Shu-Ming, Yang Dong-Yuan, Yang Xiao-Guang, Li Ping. Research on complex systems for urban transportation, logistics and ecological development. *Complex Systems and Complexity Science*, 2004, (2): 60–69
(王飞跃, 戴汝为, 张嗣瀛, 陈国良, 汤淑明, 杨东援, 杨晓光, 李平. 关于城市交通、物流、生态综合发展的复杂系统研究方法. 复杂系统与复杂性科学, 2004, (2): 60–69)
- 14 Kang M Z, Wang F-Y. From parallel plants to smart plants: Intelligent control and management for plant growth. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, **4**(2): 161–166
- 15 Wang F-Y, Wong P K. Intelligent systems and technology for integrative and predictive medicine: An ACP approach. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2013, **4**(2): Article No. 32
- 16 Wang F-Y. Intelligent systems accelerate the improvement of health care [Online], available: <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2014/6/297592.shtm> December 2, 2018
(王飞跃. 智能系统加速提升医疗保健水平, [Online], available: <http://news.sciencenet.cn/htmlnews/2014/6/297592.shtm> December 2, 2018)
- 17 Su Zhen-Dong, Yang Rui-Ping, Wang Fei-Yue. Parallel marine environment monitoring systems: Architecture and application. *Journal of Command and Control*, 2018, **4**(1): 32–36
(苏振东, 杨瑞平, 王飞跃. 海洋环境平行监测体系架构及应用. 指挥与控制学报, 2018, **4**(1): 32–36)
- 18 Yuan Yong, Wang Fei-Yue. Parallel block chain: Concept, methods and issues. *Acta Automatica Sinica*, 2017, **43**(10): 1703–1712
(袁勇, 王飞跃. 平行区块链: 概念、方法与内涵解析. 自动化学报, 2017, **43**(10): 1703–1712)
- 19 Yuan Yong, Wang Fei-Yue. Blockchain: The state of the art and future trends. *Acta Automatica Sinica*, 2016, **42**(4): 481–494
(袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望. 自动化学报, 2016, **42**(4): 481–494)
- 20 Wang Fei-Yue. On the modeling, analysis, control and management of complex systems. *Complex Systems and Complexity Science*, 2006, **3**(2): 27–34
(王飞跃. 关于复杂系统的建模、分析、控制和管理. 复杂系统与复杂性科学, 2006, **3**(2): 27–34)
- 21 Xiong Gang, Wang Fei-Yue, Hou Jia-Chen, Dong Xi-Song, Zhang Jia-Lin, Fu Man-Chang. To improve safety and reliability of nuclear power plant with parallel system method. *Systems Engineering — Theory and Practice*, 2012, **32**(5): 1018–1026
(熊刚, 王飞跃, 侯家琛, 董西松, 张家麟, 付满昌. 提高核电站安全可靠性的平行系统方法. 系统工程理论与实践, 2012, **32**(5): 1018–1026)
- 22 Ning Bin, Wang Fei-Yue, Dong Hai-Rong, Li Run-Mei, Wen Ding, Li Li. Parallel systems for urban rail transportation based on ACP approach. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2010, **10**(6): 22–28
(宁滨, 王飞跃, 董海荣, 李润梅, 文丁, 李莉. 基于 ACP 方法的城市轨道交通平行系统体系研究. 交通运输系统工程与信息, 2010, **10**(6): 22–28)
- 23 Lui F, Zhao F J, Deng Y K, Yu W D, Chen Y Q, Ai J Q. Determination of ocean wave propagation direction based on azimuth scanning mode. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, **8**(6): 1155–1159
- 24 Liu F, Zhao F J, Deng Y K, Yu W D, Ai J Q, Wang Y. Ship detection and speed estimation based on azimuth scanning mode of SAR. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 2011, **PP**(27): 655–661
- 25 Zhao Feng-Jun, Liu Fan, Deng Yun-Kai, Yu Wei-Dong, Feng Jin. A new wind vector algorithm in scanning mode based on gray cross-correlation. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2011, **33**(7): 1667–1670
(赵凤军, 刘凡, 邓云凯, 禹卫东, 冯锦. 一种基于灰度互相关法的扫描模式下的风场反演算法. 电子与信息学报, 2011, **33**(7): 1667–1670)
- 26 Chen C S, Beardsley R C, Cowles G. An unstructured grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. *Oceanography*, 2006, **19**(1): 78–89



苏振东 中国科学院大学经济与管理学院博士研究生. 主要研究方向为海洋环境监测平行系统研究.

E-mail: 13601351829@163.com

(**SU Zheng-Dong** Ph.D. candidate at the School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences. His research interest covers ACP approach for three-dimensional marine monitoring.)



刘 凡 中国电子科技集团海洋信息技术研究院有限公司高级工程师. 2014 年获清华大学博士学位. 主要研究方向为海洋环境监测系统开发与应用. E-mail: liuf@cetcocean.com

(**LIU Fan** Senior engineer of CETC Ocean Information Co., Ltd.. He re-

ceived his Ph.D. degree from Tsinghua University in 2014. His research interest covers development and application of marine environmental monitoring system.)



杨瑞平 海军研究院高级工程师. 2006 年获装甲兵工程学院博士学位. 主要研究方向为海洋环境监测系统建模与仿真. 本文通信作者.

E-mail: naasim@126.com

(**YANG Rui-Ping** Senior engineer at the Naval Research Institute. His

research interest covers modeling and simulation of marine environmental monitoring systems. Corresponding author of this paper.)



王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任, 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术研究中心主任, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任, 青岛智能产业技术研究院院长. 主要研究方向为平行系统的方法与应用, 社会计算, 平行智能以及知识自动化.

E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn

(**WANG Fei-Yue** State specially appointed expert and director of the State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. Professor of the Research Center for Computational Experiments and Parallel Systems Technology, National University of Defense Technology. Director of China Economic and Social Security Research Center in University of Chinese Academy of Sciences. Dean of Qingdao Academy of Intelligent Industries. His research interest covers methods and applications for parallel systems, social computing, parallel intelligence, and knowledge automation.)