基于改进CBR的海洋观测手段配置智能设计方法研究

吕晓莹[1]，　王　祎[1,2]，　李垚鑫[1]，　魏连雪[1,2]

（1.国家海洋技术中心, 天津 300112; 2.自然资源部海洋观测技术重点实验室, 天津 300112）

摘　要: 为提升海洋观测手段配置效率, 本文提出了一种基于改进案例推理的海洋观测手段配置智能设计方法。首先, 选取主要影响因素, 构建海洋观测手段配置评价指标体系, 并根据工程应用的实际情况, 确定案例表征方法, 基于实例构建案例库。其次, 基于相似度理论建立观测手段配置案例检索与重用模型。最后, 基于多目标模拟退火和逼近理想解算法构建案例修正模型。实例分析结果表明: 与现有方法相比, 基于改进 CBR 方法计算得到的海洋观测手段配置方案, 在保证观测能力指标的前提下, 观测经济性指标提升了 18%, 预算节省了 57.1%。同时, 该方法能够根据不同的应用场景设计出满足要求的设计方案, 证明了其科学性和灵活性能够满足实际工程需求。

关键词: 海洋观测手段配置; 智能设计; 多目标优化; 多属性决策

中图分类号: P711　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1007-6336(2025)03-0452-10

Investigation on intelligent design method of ocean observation platforms selection based on improved CBR

LYU Xiaoying[1],　WANG Yi[1,2],　LI Yaoxin[1],　WEI lianxue[1,2]

(1.National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 2.Key Laboratory of Ocean Observation Technology, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300112, China)

Abstract: To enhance the efficiency of the designing of marine observation platform configuration, this study proposes an intelligent design method based on improved Case based reasoning . Firstly, the main influencing factors are selected, and the evaluation index system of marine observation means configuration is constructed. According to engineering application, the case representation method is determined. Secondly, the case retrieval and reuse model of observation platform configuration is established based on the similarity theory. Finally, a case revision model is constructed based on multi-objective simulated annealing algorithm and technique for order of preference by similarity to ideal solution method. The results of the case study reveal that the configuration of ocean observation platforms using the improved CBR method not only boosts economic efficiency by 18% and slashes the budget by 57.1% compared to the existing approach, but it also fulfills the required observation capacity. Moreover, this method allows for the creation of design solutions that are versatile and applicable across diverse scenarios, thus proving its scientific soundness and adaptability. This makes it highly suitable for engineering demands.

Key words: Ocean observation platform selection; intelligent design; multi-objective optimization; multi-attribute decision making

收稿日期: 2024-03-05, **修订日期:** 2024-05-22

基金项目: 自然资源部高层次青年人才项目(G1230NF01)

作者简介: 吕晓莹(1998−), 女, 天津人, 硕士生, 主要研究方向为海洋观测技术, E-mail: 18222101179@139.com

通信作者: 王　祎(1985−), 男, 山西襄汾人, 正高级工程师, 博士, 主要研究方向为海洋观测网及技术设备, E-mail: wangyi_victory@qq.com

海洋观测系统依靠多种海洋观测手段为海洋工程应用及科学研究提供数据支持[1-2]。在联合国“海洋十年”的推动下，建设全球化的海洋观测系统成为迫切需求，其中科学配置观测手段是研究的重点内容之一[3-4]。海洋观测手段的配置过程需要根据多个评价指标进行研究。例如，Chen 等[5] 以时空覆盖率（时间覆盖率和空间覆盖率）、观测完备性和平台安全性为评价指标，对多雷达平台选型问题进行了研究；周欣等[6] 以无人遥控潜水器（remotely operated vehicle, ROV）的等级类型、驱动方式、工作水深、系统功率、吊放方式和布放回收方式为评价指标，对 ROV 的选型问题展开研究；滕惠忠等[7] 结合了无人机航摄作业的主要难点，提出基于飞行安全性、测绘精度等 9 个评价指标的选型方法。然而，现有研究往往聚焦于单一类型的观测手段配置分析，忽略了观测系统中需要综合配置多元化的观测手段的设计需求。

Kim 等[4] 指出，观测系统必须在空间和时间尺度上满足现象的观测要求。他们创新性地提出了一种观测手段配置思路，即通过匹配观测手段与现象的时空尺度指标来选择适合的观测手段。然而，为了全面满足观测需求，还应综合考虑观测手段的观测能力指标以及观测经济性指标。由于这一分析过程涉及大量专家知识，目前海洋观测手段配置主要依赖人工分析等传统方法，需要投入大量劳动和时间[4-6]。

人工智能的快速发展使观测手段配置的智能设计成为可能。智能设计方法能够大大提高观测手段配置的工作效率和质量。因此，为了应对传统方法的局限性，有必要对海洋观测手段配置方案的智能设计方法进行研究，以实现观测配置的自动化和智能化。

基于案例推理的方法（case-based reasoning, CBR）通过检索类似的、已解决的历史案例来求解新问题，被广泛应用于医疗诊断[8]、故障诊断[9]、设备选型[10] 等需要大量专家知识的智能设计方法研究[11]。例如，Berman 等[12] 基于 CBR 方法对建筑材料选型方法进行了研究；赵桐鸣[13] 基于 CBR 等方法对船舶设计选型方法展开研究；詹金武等[14] 从工期、造价和技术进步 3 个方面考虑，基于 CBR 方法对隧道掘进机的选型方法开展了研究。与传统人工选型方法相比，基于 CBR 的方法能够快速检索和重用历史解决方案，具有计算效率高、成本低的优点。然而，CBR 方法的可靠性高度依赖于案例库，案例库中的案例越全面、越充实，CBR 结果可靠性越高[15]。此外，技术进步可能导致海洋观测手段的观测能力和观测成本发生变化，从而导致 CBR 结果不够准确。相比于 CBR，人工方法可以更灵活地处理这些变化。为了解决这些问题，本研究提出了一种优化策略，综合考虑观测能力和观测经济性来对 CBR 计算得到的结果进行优化，以提升 CBR 计算结果的可靠性。

多目标模拟退火（multi-objective simulated annealing, MOSA）是一种启发式搜索算法，能综合考虑观测能力和观测经济性来对 CBR 检索得到的历史案例进行优化[16]。与 CBR 算法不同，MOSA 能够在没有历史经验的情况下，为复杂问题求解可行的解决方案，例如，Xia 等[17] 采用 MOSA 方法，综合考虑燃料总成本、总延迟、吞吐量、公平性等多个指标求解飞机着陆安排问题。然而，MOSA 不能保证找到全局最优解，且算法性能很大程度上依赖于算法参数设置，存在一定的不稳定性。同时，MOSA 求解的结果往往包含多个解的满意解集，需要进一步采用多属性决策方法进行决策。

基于此，本文设计了一种基于改进 CBR 的海洋观测手段智能设计方法。为充分利用历史经验，使用 CBR 算法求解观测手段配置问题的初步解决方案；为综合考虑观测能力和观测成本，基于 MOSA 算法对 CBR 检索的历史最优解进行优化，得到手段配置满意解集；最后，使用逼近理想解算法（technique for order of preference by similarity to ideal solution, TOPSIS）对满意解集进行决策，依据决策者偏好选取最优的设备选型方案。此外，基于实例对本文所设计的方法进行了验证，并讨论了不同观测经济性偏好系数的影响，分析了决策结果的合理性与科学性。

1　海洋观测手段配置原则及案例表征

1.1　海洋观测手段配置原则

海洋观测手段是海洋观测系统的重要实体

支撑，依据“主题需求–观测目标需求–应用场景需求–观测要素需求–观测手段”的设计链条进行选型分析[18]。我国海洋观测系统以海洋防灾减灾、海洋生态预警监测、海洋资源开发与保护、海洋环境安全保障四大主题需求为牵引，依靠海洋站（op_1）、海洋雷达（op_2）、锚系（op_3）、船舶（op_4）、无人船（op_5）、波浪滑翔机（op_6）、小型无人机（op_7）、中型无人机（op_8）、无缆海床基（op_9）、有缆海床基（op_{10}）和卫星遥感（op_{11}）等多种观测手段，对海洋水文要素以及气象要素进行观测。在配置海洋观测手段时，需要综合考虑观测要素、观测位置、观测的时空尺度、观测环境、实时性、连续性以及观测成本等评价指标。基于此，本文构建了海洋观测手段配置评价指标体系。

1.2 海洋观测手段配置评价指标体系

根据海洋观测手段配置要求，依照主要影响因素的不同类型划分属性指标（表 1）。

表 1 观测手段配置评价指标体系

Tab.1 Evaluation criteria system for configuration assessment of observation platforms

一级指标		二级指标	
编号	名称	编号	名称
A^1	观测能力	A_1^1	观测要素
		A_2^1	岸基观测站位数量
		A_3^1	海基观测站位数量
		A_4^1	观测时间分辨率
		A_5^1	观测时间尺度
		A_6^1	观测空间分辨率
		A_7^1	观测空间尺度
		A_8^1	恶劣环境适用性
		A_9^1	观测实时性
		A_{10}^1	观测连续性
A^2	观测经济性	A_1^2	采购与建设成本
		A_2^2	运维成本

根据海洋观测手段配置原则，把海洋观测手段配置决策模型划分为不同的层次。第一层为目标层，即观测手段配置的最优设计方案。第二层为准则层，包括影响观测手段配置的两类因素：观测能力因素 A^1 和观测经济性因素 A^2。观测能力因素描述了观测手段能否完成观测任务，直接影响观测效果；观测经济性因素描述了观测手段的经济可行性以及建设后长期运行的可持续性。第三层为指标层，为描述案例的属性指标。观测能力因素包括 10 个属性指标。其中，观测要素 A_1^1 为观测任务关注的对象，如潮位要素；岸基观测站位数量 A_2^1 为海洋站等陆地观测站位的数量；海基观测站位数量 A_3^1 为浮标等海洋观测站位的数量；观测时间分辨率 A_4^1 为观测数据记录的频率，如每秒记录一次；观测时间尺度 A_5^1 为观测覆盖的总时长；观测空间分辨率 A_6^1 为设备能够分辨的最小空间单元大小或观测站之间的距离；观测空间尺度 A_7^1 为观测任务覆盖的地理范围；恶劣环境适用性 A_8^1 为观测手段在不利条件下仍能正常运行的能力；观测实时性 A_9^1 为观测数据的实时访问能力；观测连续性 A_{10}^1 为观测手段不间断观测的能力。观测经济性因素包括 2 个属性指标。采购与建设成本 A_1^2 为建设观测手段相关的初始投资费用，包括观测手段的购买费用、运输费用、测试与调试费用、基础设施建设费用等。运维成本 A_2^2 为观测系统正常运行所需的持续性资金，包括人员工资、设备维护与修理费用、供电等能源成本、定期校准维护设备所需的费用等。

根据属性指标特征，将 12 个属性指标划分为无法量化的符号型属性指标（A_1^1）、需要量化的数字型属性指标（A_4^1、A_5^1、A_6^1、A_7^1、A_8^1、A_9^1 和 A_{10}^1）以及不需要量化的数字型属性指标（A_2^1、A_3^1、A_1^2 和 A_2^2）。依据表 2 对需要量化的数字型属性指标进行赋值。在该评价指标体系下，本文涉及的海洋观测手段信息见表 3。

1.3 海洋观测手段配置的案例表征

由于同一设备的观测经济性指标会随时间变化，而且在设计初期很难精确把握观测经济性指标，因此仅选用观测能力指标表征案例。设 $Z=\{Z_1,Z_2,\cdots,Z_m\}$ 为包含了 m 个历史案例的案例库。使用二元组 $Z_i=<P_i,SS_i>$ 描述案例库中的案例。其中，P_i 为历史案例 i 的属性特征值的集合，描述了问题状态；SS_i 为对应问题状态下的解。使用 $Z_c=<P_c,SS_c>$ 描述待求解的目标案例，P_c 和 SS_c 分别代表待求解问题的状态和待求

表 2　属性指标特征值划分

Tab.2　Attribute feature value

属性	属性指标特征值							
	0	1	2	3	4	5	6	7
观测时间分辨率	—	分钟	小时	日	周	月	年	十年
观测时间尺度	—	分钟	小时	日	周	月	年	十年
观测空间分辨率	—	<1 km	1 ~ 100 km	≥100 km	—	—	—	—
观测空间尺度	—	小尺度	中尺度	大尺度	—	—	—	—
恶劣环境适用性	—	非常大	大	较大	一般	较小	小	非常小
观测实时性	不能实时观测	实时观测	—	—	—	—	—	—
观测连续性	不能连续观测	连续观测	—	—	—	—	—	—

表 3　备选海洋观测手段信息

Tab.3　The Information of marine observation platforms

手段	观测要素	最小时间尺度	最大时间尺度	最小空间尺度	最大空间尺度	恶劣天气影响	实时性	连续性	采购与建设成本/万元*	运维成本/万元*
op_1	潮汐、温度、盐度、气压、气温、湿度、风、降水、能见度	1	6	1	2	6	1	1	73	9.8
op_2	海流、海浪、风	1	6	1	2	6	1	1	382.3**	50.9**
op_3	海流、海浪、温度、盐度、气压、气温、湿度、风	1	6	1	2	5	1	1	128	17.3
op_4	气压、气温、湿度、风、能见度	3	7	1	2	2	1	0	37.6	4.9
op_5	温度、盐度	1	4	1	3	3	0	0	60	7.7
op_6	温度、盐度	1	5	1	3	3	0	0	90	12.5
op_7	影像	1	5	1	2	3	1	0	49	6.3
op_8	影像	1	5	1	2	4	1	0	262	26.2
op_9	海流、海浪、温度、盐度	1	7	2	2	6	1	1	139	19.0
op_{10}	海流、海浪、温度、盐度	1	7	2	2	7	1	1	961	105.3
op_{11}	潮汐、海浪、风、温度、盐度	5	7	2	3	3	0	0	200	22.8

注：*采购与建设成本、运维成本，依据业务化系统中的设备进行估算；**海洋雷达观测的采购与建设成本、运维成本，均为一对海洋雷达的建设费用

解的手段配置方案。构建的历史案例库和目标案例见表 4，其中 Z_1—Z_m 为历史案例，SS_1—SS_m 为历史解决方案；Z_c 为待求解的目标案例，SS_c 为待求解的解决方案。

表 4　海洋观测手段配置案例库

Tab.4　Case base of marine observation platform configuration

案例	A_1^1	A_2^1	A_3^1	A_4^1	A_5^1	A_6^1	A_7^1	A_8^1	A_9^1	A_{10}^1	解决方案
Z_1	p_1^1	p_2^1	p_3^1	p_4^1	p_5^1	p_6^1	p_7^1	p_8^1	p_9^1	p_{10}^1	SS_1
…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…	…
Z_m	p_1^m	p_2^m	p_3^m	p_4^m	p_5^m	p_6^m	p_7^m	p_8^m	p_9^m	p_{10}^m	SS_m
Z_c	p_1^c	p_2^c	p_3^c	p_4^c	p_5^c	p_6^c	p_7^c	p_8^c	p_9^c	p_{10}^c	SS_c

2　观测手段配置决策方法

2.1　基于案例推理的海洋观测手段配置智能设计方法整体框架

基于案例推理的海洋观测手段配置智能设计方法主要包括以下 4 个步骤：(1)对相关实例进行统计，按照案例表征方法，构建案例库；(2)对历史案例和目标案例之间的相似度进行分析，检索初步设计方案；(3)综合运用多目标优化算法 MOSA 与多属性决策算法 TOPSIS，对初步设计

方案进行修正以及优化，并将修正后的案例推荐给用户作为参考；(4)将目标案例以及求解的解决方案保存在案例库中，以便后续使用。本文提出的海洋观测手段配置智能设计方法整体框架如图 1 所示。

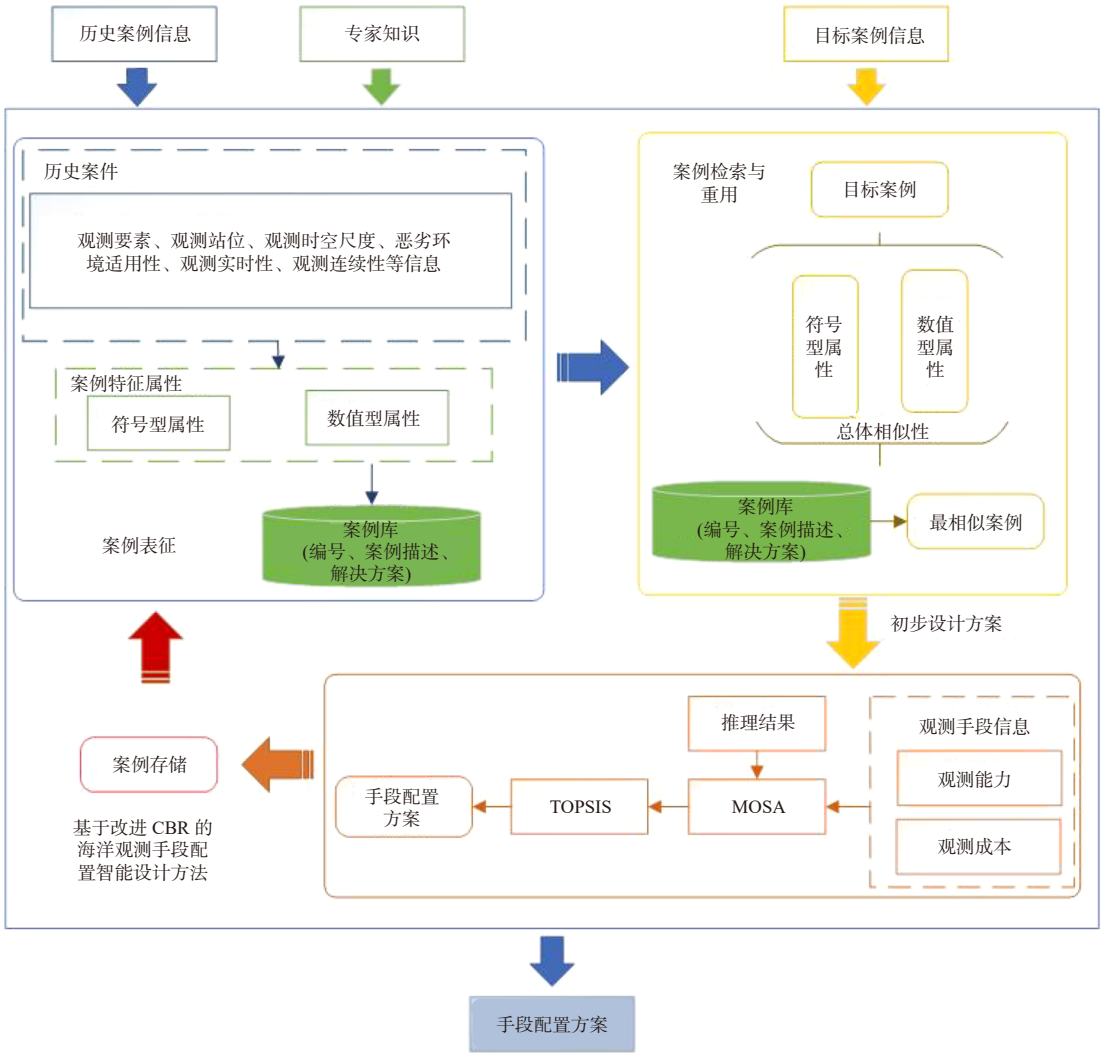

图 1 基于改进 CBR 的海洋观测手段配置智能设计方法框架

Fig. 1 Frame diagram of intelligent design method for configuration of ocean observation platforms based on Improved CBR

2.2 案例检索与重用模型

2.2.1 案例相似度计算

相似度(similarity)表征了不同事物之间属性指标的相似程度。两系统的“相似”可以表达为：

$$\text{系统相似度}=\begin{cases}\text{完全相异} & SIM=0\\ \text{相似} & 0<SIM<1\\ \text{完全相同} & SIM=1\end{cases}$$

以此相似度定义为基准，计算不同手段配置方案之间的相似度。为反映不同属性指标之间的差异，对属性指标A_i^1赋予权重系数W_{CBRi}，则手段配置方案Z_0与Z_j之间的相似度$SIM(Z_0,Z_j)$为：

$$SIM(Z_0,Z_j)=\sum_{0\leqslant i\leqslant 10} sim(p_j^c,p_j^i)\,W_{CBRi} \qquad (1)$$

式中：$sim(p_j^c,p_j^i)$为方案Z_0与Z_j在属性指标A_i^1上的相似度。

符号型属性指标的相似度通过属性指标集合之间的关系进行计算。对于目标案例Z_c与历史案例Z_i，属性指标A_j的目标案例属性特征值p_j^c与历史案例属性特征值p_j^i之间的相似度$sim(p_j^c,p_j^i)$的具体计算方法如下：

$$sim(p_j^c, p_j^i) = \frac{n(p_j^c \cap p_j^i)}{n(p_j^c)} \tag{2}$$

式中：$n(p_j^c \cap p_j^i)$为p_j^c与p_j^i两集合的交集中元素个数；$n(p_j^c)$为p_j^c集合的元素个数。

需量化的数值型属性指标p_j^c与p_j^i之间的距离$\Delta(p_j^c, p_j^i)$的计算方法如下[19]：

$$\Delta(p_j^c, p_j^i) = \frac{1}{\Delta_j^{max}} \sqrt{(p_j^c - p_j^i)^2} \tag{3}$$

式中：Δ_j^{max}为属性指标A_j^1的取值区间的长度。历史案例与目标案例的属性指标特征值越接近，两案例越相似。对于目标案例Z_c与历史案例Z_i，需量化的数值型属性指标A_j^1的目标案例属性值p_j^c与历史案例属性特征值p_j^i之间的相似度$sim(p_j^c, p_j^i)$为：

$$sim(p_j^c, p_j^i) = \exp[-\Delta(p_j^c, p_j^i)] \tag{4}$$

2.2.2　属性指标权重计算

熵权法是一种基于信息熵理论的客观权重分析方法，通过信息熵衡量属性指标的离散程度，进而判断其对决策的贡献指标[20]。对研究中的l_0个属性指标和 m 个历史方案，熵权法的具体步骤如下：

（1）数据归一化。设历史案例数据矩阵为$X = \{x_{ij}\}_{m\times l_0}$。对 X 进行归一化得到归一化矩阵$Z = \{z_{ij}\}_{m\times l_0}$。其中，效益型指标（指标值越大越优）和成本型指标（指标值越小越优）的归一化方法分别如式 (5) 和式 (6) 所示：

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{ij}^-}{x_{ij}^+ - x_{ij}^-} \tag{5}$$

$$z_{ij} = \frac{x_{ij}^+ - x_{ij}}{x_{ij}^+ - x_{ij}^-} \tag{6}$$

式中：$x_{ij}^+ = \max\limits_{1\leqslant i\leqslant m} x_{ij}$；$x_{ij}^- = \min\limits_{1\leqslant i\leqslant m} x_{ij}$。

（2）求各属性指标的信息熵。计算第 j 个属性指标在第 i 个方案中占该指标的比重：

$$p_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum\limits_{i=1}^{m} Y_{ij}} \tag{7}$$

属性指标 j 的信息熵为：

$$E_j = -\ln(m)^{-1} \sum_{i=1}^{m} p_{ij} \ln(p_{ij}) \tag{8}$$

（3）计算各指标对应的权重$W_{CBR} = (w_{CBR1}, w_{CBR2}, \cdots, w_{CBRl})$：

$$W_{CBRj} = \frac{1 - E_j}{n - \sum E_j} \tag{9}$$

2.3　基于 MOSA-TOPSIS 的案例修正

对任何工程而言都不存在完全一致的相似案例，通过案例检索所得到的最相似案例仅能作为初步设计方案[21]。为了综合考虑观测能力和观测经济性，采用 MOSA 和 TOPSIS 算法对初步设计方案进行修正。

MOSA 是一种用于解决多目标优化问题的启发式搜索算法。它基于模拟退火算法，通过模拟物理过程中的退火过程寻找问题的最优解。与传统的模拟退火算法不同，MOSA 需要同时考虑多个目标函数，并求解问题的满意解集。MOSA 的算法步骤如下。

步骤 1：设算法的初始温度为 100 ℃，冷却率为 0.95，同一温度下迭代次数为 30 次，终止温度为 0.01 ℃，无改进情况下的最大迭代次数为 2500 次；

步骤 2：随机产生初始解 X，计算其所有目标函数值并将其加入满意解集；

步骤 3：给定一种随机扰动，产生 X 的邻域解 Y，计算其所有目标函数值；

步骤 4：比较新产生的邻域解 Y 与满意解集中的解，并更新满意解集；

步骤 5：比较 Y 与 X 的支配关系，如果 Y 能够支配 X，则用 Y 代替 X，如果 Y 不能够支配 X，则按照接受概率决定是否接受新解；

步骤 6：如果达到预定的迭代次数或满足其他降温条件，降低温度；

步骤 7：当温度降至终止温度或达到最大迭代次数，输出结果，算法结束。

根据海洋观测手段配置评价指标体系，以海洋观测手段配置方案x为决策变量，以观测能力$f_a(x)$和观测经济性$f_c(x)$为优化目标，基于 MOSA 对海洋观测手段配置方案进行优化。基于熵权法确定各属性指标权重。依据式 (10) 及式 (11) 计算观测要素$f_0(x)$、最小时间尺度$f_1(x)$、最大时间尺度$f_2(x)$、最小空间尺度$f_3(x)$、最大空间尺度$f_4(x)$、恶劣环境影响$f_5(x)$、实时性$f_6(x)$和连续性$f_7(x)$得分，并依据式 (12) 计算观测能力指标

$f_a(x)$。

$$f_i(x) = sim(p_i^x, p_i^c), i = 0,1,2,3,4 \quad (10)$$

$$f_i(x) = sim(p_i^x, p_i^{x_{max}}), i = 5,6,7 \quad (11)$$

$$f_a(x) = f_0(x)\left[\sum_{i=1}^{7} w_{SAi} f_i(x)\right] \quad (12)$$

式中：p_i^x为手段选型方案x属性指标i的属性特征值；$p_i^{x_{max}}$为该属性指标i的属性特征值的取值范围上限。由于观测要素是各设计方案中必须严格满足要求的属性指标，因此当手段配置方案的观测要素属性指标不满足要求时，取$f_a(x) = 0$；其余情况下，依据$f_1(x)$—$f_7(x)$计算$f_a(x)$。

基于方案x的采购与建设成本$f_8(x)$和运维成本$f_9(x)$计算观测经济性指标$f_c(x)$。设在所有观测站位选择部署所有手段的采购与建设成本为$f_8(x_{\max})$，运维成本为$f_9(x_{\max})$。$f_c(x)$的计算方法如下：

$$f_c(x) = \frac{[w_{SA8} f_8(x_{max}) + w_{SA9} f_9(x_{max})] - [w_{SA8} f_8(x) + w_{SA9} f_9(x)]}{w_{SA8} f_8(x_{max}) + w_{SA9} f_9(x_{max})} \quad (13)$$

MOSA 的优化目标可以表示为：

$$\max f(x) = [f_a(x), f_c(x)]^T \quad (14)$$

基于该优化目标利用多目标模拟退火算法对初始设计方案进行优化，得到满意解集$SS = \{SS_1, SS_2, \cdots, SS_n\}$。

TOPSIS 是经典的多属性决策算法，能够从一组备选方案中选取出最具优势的方案[22-23]。本文采用 TOPSIS 方法对SS中的满意解进行决策，其主要步骤如下[23]。

（1）根据满意解集中提供的n个满意解，计算其对应观测能力综合得分f_a和观测经济性综合得分f_c构成的初始矩阵X：

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ \cdots & \cdots \\ x_{n1} & x_{n2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{a1} & f_{c1} \\ \cdots & \cdots \\ f_{an} & f_{cn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

依据式 (16) 采用极值规范法构造规范化评价矩阵$Y = (y_{ij})_{2\times n}$。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i x_{ij}}{\max_i x_{ij} - \min_i x_{ij}} \quad (16)$$

（2）将矩阵Y与观测能力−观测经济性权重向量$w_{TOPSIS} = \{1-\omega, \omega\}$相乘，得出加权后的标准化矩阵：

$$S = w_{TOPSIS} \cdot Y = \begin{bmatrix} (1-\omega)y_{11} & \omega y_{12} \\ \cdots & \cdots \\ (1-\omega)y_{n1} & \omega y_{n2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中：ω为观测经济性偏好系数。

（3）确定正理想解S^+和负理想解S^-：

$$\begin{cases} S^+ = \{s_1^+, s_2^+\}, s_j^+ = \max_i z_{ij} \\ S^- = \{s_1^-, s_2^-\}, s_j^- = \min_i z_{ij} \end{cases} \quad (18)$$

（4）计算样本与正、负理想解之间的欧氏距离d_i^+、d_i^-：

$$\begin{cases} d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{2}(s_{ij} - s_j^+)^2} \\ d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{2}(s_{ij} - s_j^-)^2} \end{cases} \quad (19)$$

（5）计算贴近度C_i：

$$C_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (20)$$

（6）将贴近度从大到小排序，选择数值最高的方案为最优备选方案SS_c。

3 实例验证与分析

3.1 海洋观测手段配置与优化实例分析

本文以海洋防灾减灾主题需求下以风暴潮观测目标为需求的风暴潮灾害预警和海堤越浪漫滩预报应用场景为例，对中国东南沿海某区域的观测手段配置方案进行分析。根据要求对潮汐、海流、海浪等观测要素进行观测，其相关时间分辨率、空间分辨率等观测要求见表 5，案例具体观测要求见表 6。

表 5 案例观测要求

Tab.5 Requirements for ocean observation

指标	要求
时间分辨率要求	1分钟
空间分辨率要求	人口密集区至少50 km一个观测点
恶劣天气影响	受风暴潮影响较小
实时性	实时观测
连续性	连续观测

利用本文提出的 CBR-MOSA 方法对备选观测手段组合配置方案进行求解，具体步骤如下：

(1)根据观测要求，确定案例表示方法，构建案例库。根据中国沿海海洋观测系统手段配置方案，构建如表 6 所示的包含 225 个历史案例的案例库。由于篇幅所限，这里仅展示两个历史案例。

表 6　目标案例与案例库

Tab.6　Target case and case base

案例	A_1^1	A_2^1	A_3^1	A_4^1	A_5^1	A_6^1	A_7^1	A_8^1	A_9^1	A_{10}^1	解决方案*
目标案例	潮汐、海浪、海流	1	1	1	5	1	2	5	1	1	SS_c
历史案例1	潮汐、温度、盐度	1	0	1	6	1	2	6	1	1	$op_1(1)$
历史案例2	潮汐、温度、盐度、海浪、气压、气温、湿度、风、降水、能见度	9	1	1	6	1	2	6	1	1	$op_1(9)$和$op_2(1)$
…	…	…	…	…	…	…	…	…		…	…

注：*解决方案使用“观测手段(手段数量)”进行描述

(2)确定属性指标权重，检索初步设计方案。根据式 (5)—(9) 得到各属性指标的权重为：

$$W_{\mathrm{CBR}}=[0.4613,0.0288,0.0373,0.0105,0.0105,0.0253,0.1448,0.1229,0.0373,0.1213]$$

基于属性指标权重，依据式 (1)—(4) 检索最相似的历史案例。检索得到的最相似案例为案例 60，具体观测手段配置方案SS_0为：海洋站(op_1，建设 1 个观测站)、海洋雷达(op_2，建设 1 对观测站)和锚系(op_3，建设 1 个观测站)，与目标案例的相似度为 0.972。

(3)确定手段配置方案优化目标，利用 MOSA 对初步设计方案进行优化。首先，根据观测手段性能指标，基于熵权法确定各指标权重为：

$$W_{SA}=[0.0056,0.0318,0.0846,0.4566,0.0659,0.0846,0.2628,0.0032,0.0045]$$

接着，根据式 (10)—(14) 计算 MOSA 的优化目标，对初始方案进行优化，得到手段配置满意解集，见表 7。

表 7　手段配置方案具体信息

Tab.7　Specific Information of platform configuration scheme

	岸基观测点数量	海基观测点数量	备选方案	结果		观测能力指标	观测经济性指标	预估的总成本/万元
				手段	建设观测站数量			
初步设计方案	1	1	SS_0	op_1	1个	0.885	0.761	630.214
				op_2	1对			
手段配置满意解集	1	1	SS_1	op_2	1个	0.893	0.832	442.841
				op_1	1个			
			SS_2	op_1	1个	0.882	0.897	270.214
				op_3	1个			
			SS_3	op_1	1个	0.856	0.908	240.928
				op_9	1个			

3.2　基于 TOPSIS 手段配置决策

以同等权重综合考虑观测经济性与观测能力为例进行分析，取$w_{TOPSIS}=[0.5,0.5]$。

(1)根据式 (16) 对手段配置满意解集的指标进行归一化，得到归一化后的初始指标矩阵 Y 为：

$$Y=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0.7027 & 0.8553 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2)根据式 (17) 构建加权标准矩阵 S:

$$S=\begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0.3514 & 0.4276 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix}$$

(3)根据式 (18) 确定正理想解S^+和负理想解S^-:

$$\begin{cases} S^+ = \{0.5, 0.5\} \\ S^- = \{0, 0\} \end{cases}$$

(4)根据式 (19) 得到各指标距正理想解的欧氏距离为$d^+ = [0.5\ \ 0.1653\ \ 0.5]$, 各指标距负理想解的欧氏距离为$d^- = [0.5\ \ 0.5535\ \ 0.5]$。

(5)根据式 (20) 计算各手段配置方案距正负理想解的距离和贴近度, 得到$C = [0.5\ \ 0.77\ \ 0.5]$。依据各手段配置方案的贴近度进行排序, 求得当同等权重综合考虑观测经济性、观测能力指标时, 最优备选方案为SS_2。

CBR 案例检索得到的初步设计方案的观测能力指标为 0.8851, 观测经济性指标为 0.761, 预估的总成本(包括采购与建设成本以及运维成本)为 630.214 万元。优化后, SS_2的观测能力指标为 0.882, 与初步设计方案相当, 而观测经济性指标为 0.897, 相比于初步设计方案提高了 18%, 总成本为 270.214 万元, 比初步设计方案节省了 57.1%。优化后的方案能够在保证观测能力的情况下得到更经济的手段配置方案, 具有较好的工程应用前景。

在适用性方面, 本文所提基于改进 CBR 的海洋观测手段配置方法, 能够针对包含在案例库中的观测要素求解其相应的海洋观测手段配置方案。目前, 案例库中已经包含了丰富的观测要素以及观测手段。针对与这些观测要素及观测手段相关的手段配置问题, 本文所提出的方法都能够提供有效的解决方案。同时, 通过积累更多的案例, 基于改进 CBR 的海洋观测手段配置方法可以适应未来可能出现的新要素、新手段, 从而保证其长期的有效性和实用性。

3.3 观测经济性偏好系数影响

在手段配置问题中, 观测经济性偏好系数ω代表了决策者对观测经济性的重视程度, 是影响决策结果的关键因素。不同观测经济性偏好系数ω对最终选择方案的影响如图 2 所示。

由图 2 可知, 在认为观测能力指标很重要的应用场景($0 < \omega < 0.2802$)中, 观测能力最高的SS_1是最优备选方案; 在认为观测能力指标较为重要的应用场景($0.2802 \leqslant \omega < 0.5$)、认为观测能力指标与观测经济性指标同等重要($\omega = 0.5$)以及观测经济性较为重要($0.5 < \omega < 0.8489$)的 3 种

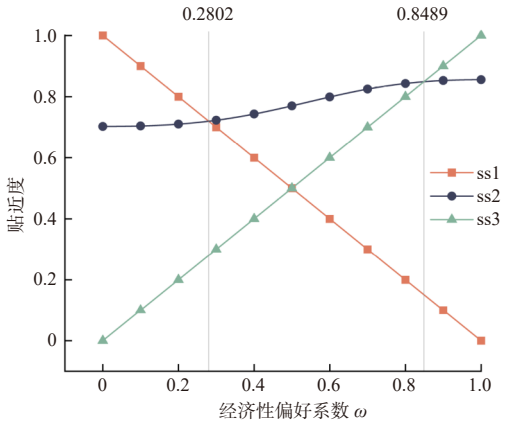

图 2 观测经济性偏好系数对手段配置组合方案选择的影响

Fig. 2 Effects of different observation economic preference coefficient on the choice of platforms configuration scheme

应用场景中, 观测能力与观测经济性较为均衡的设备SS_2为最优备选方案; 在认为观测能力指标非常重要($0.8489 < \omega$)的应用场景中, 观测经济性指标占有优势的SS_3为最优备选方案。

本文利用了 MOSA 的全局搜索能力对初步设计方案进行优化, 求解满意解集。由于满意解集中解的成本与观测能力各不相同, 使用 TOPSIS 方法能够根据具体的决策场景, 综合评价满意解集中的解, 提高决策质量。同时, 由于自动化搜索和排序减少了人工分析的需求, 能够提高配置过程的效率。随着观测技术的发展, 观测手段的观测能力指标与观测成本指标也可能随之改变, 使用 MOSA 方法能够快速适应这些改变并找到最优解。本文所提方法能够根据专家的决策偏好权衡观测经济性与观测能力, 得到不同的决策结果, 提高了决策的灵活性和可用性。

4 结 论

本文综合考虑海洋观测手段配置的复杂性, 充分利用已有历史经验, 基于改进的 CBR 方法, 针对海洋观测手段配置问题展开了研究。本文提出了海洋观测手段配置问题的案例表征方法, 基于实例构建观测手段配置案例库, 并基于相似度理论, 运用案例检索方法检索初步设计方案。该方法能够充分利用已有海洋观测系统手段配置经验, 设计观测手段初步配置方案, 提升海洋

观测手段配置方案的科学性。为综合考虑配置方案的观测能力和成本，基于 MOSA 对初步设计方案进行优化。为综合考虑观测经济性偏好不同的应用场景，利用多属性决策方法对 MOSA 计算得到的满意解集进行决策，提升算法的灵活性以及适用性。实例验证结果证明了改进后的 CBR 手段配置方法的可行性，能够辅助设计人员完成项目的初步设计。

随着海洋观测技术的发展，案例库需要定期更新与扩展，以包含最新的观测手段与手段配置案例，从而提升算法解决手段配置问题的时效性和有效性。同时，鉴于海洋观测手段配置问题自身的复杂性，随着对观测手段配置问题认识的不断加深，可以进一步细化、完善现有评估指标体系，力求本文所提设计方法能够具有更好的效果。

致谢：感谢自然资源部海洋观测重点实验室提供的数据资料和帮助为本研究的顺利开展提供了坚实的基础。

参考文献：

[1] 李大海, 吴立新, 陈朝晖. “透明海洋”的战略方向与建设路径 [J]. 山东大学学报 (哲学社会科学版), 2019(2): 130-136.

[2] HOQUE A, PERRIE W, SOLOMON S M. Application of SWAN model for storm generated wave simulation in the Canadian Beaufort Sea[J]. Journal of Ocean Engineering and Science, 2020, 5(1): 19-34.

[3] GUAN S, QU F Y, QIAO F L. United nations decade of ocean science for sustainable development (2021–2030): from innovation of ocean science to science-based ocean governance[J]. Frontiers in Marine Science, 2023, 9: 1091598.

[4] KIM E, SETO M L. An approach to choose observation systems to observe ocean phenomena[C]//Proceedings of 2022 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Halifax: IEEE, 2022: 306-313.

[5] CHEN T X, GE Q B, LIU W F, et al. Performance indexes analysis for multi-observation platform system[C]//Proceedings of the 2017 29th Chinese Control And Decision Conference. Chongqing: IEEE, 2017: 2964-2969.

[6] 周　欣, 刘文博, 王凤军, 等. 科考型有缆遥控潜水器选型研究 [J]. 海洋科学, 2023, 47(2): 125-134.

[7] 滕惠忠, 辛宪会, 于　波, 等. 海岸地形无人机测绘系统选型分析 [J]. 海洋测绘, 2014, 34(3): 20-24.

[8] BLANCO X, RODRÍGUEZ S, CORCHADO J M, et al. Case-based reasoning applied to medical diagnosis and treatment [M]//OMATU S, NEVES J, CORCHADO RODRIGUEZ J M, et al. Distributed Computing and Artificial Intelligence. Cham: Springer, 2013: 137-146.

[9] CHEN M Q, XIA J Y, HUANG R Y, et al. Case-based reasoning system for aeroengine fault diagnosis enhanced with attitudinal choquet integral[J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5696.

[10] ZHAN J W, WANG J C, CHEN S, et al. Development and application of adaptive evaluation system for TBM tunneling based on case-based reasoning[J]. Sustainability, 2023, 15(7): 5768.

[11] KOLODNER J L. An introduction to case-based reasoning[J]. Artificial Intelligence Review, 1992, 6(1): 3-34.

[12] BERMAN A F, MALTUGUEVA G S, YURIN A Y. Application of case-based reasoning and multi-criteria decision-making methods for material selection in petrochemistry[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2018, 232(3): 204-212.

[13] 赵桐鸣. 基于知识工程的船型方案论证方法研究及系统实现 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.

[14] 詹金武, 李　涛, 黄建华, 等. 基于案例推理的 TBM 选型适应性评价系统开发及应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1562-1570.

[15] CUNNINGHAM P, SMYTH B. Case-based reasoning in scheduling: reusing solution components[J]. International Journal of Production Research, 1997, 35(11): 2947-2962.

[16] NOURMOHAMMADZADEH A, VOSS S. Robust multi-objective gate scheduling at hub airports considering flight delays: a hybrid metaheuristic approach[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Computational Logistics. Enschede: Springer, 2021: 594-610.

[17] XIA Q J, YE Z J, ZHANG Z, et al. Multi-objective optimization of aircraft landing within predetermined time window[J]. SN Applied Sciences, 2022, 4(7): 198.

[18] 韩林生, 王　祎. 全球海洋观测系统展望及对我国的启示 [J]. 地球科学进展, 2022, 37(11): 1157-1164.

[19] LI Z Q, DOU Y J, XIA B Y, et al. System portfolio selection based on GRA method under hesitant fuzzy environment[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2022, 33(1): 120-133.

[20] WANG M, CABALLERO J M, ELVAMBUENA D. Value evaluation of enterprise human resource based on entropy weight and the TOPSIS method[C]//Proceedings of the 2022 7th International Conference on Business and Industrial Research. Bangkok: IEEE, 2022: 51-54.

[21] 刘　勇, 王志丰, 王亚琼, 等. 基于案例推理的隧道洞门智能设计方法研究 [J]. 铁道标准设计, 2023.

[22] 高素英, 王　竞, 刘建朝, 等. 依靠自主创新发展经济研究——基于天津市区县的经验证据 [J]. 天津师范大学学报 (社会科学版), 2010(2): 35-38.

[23] 杨雨莹, 任晓芬, 张　景, 等. 基于改进 AHP-TOPSIS 的村镇太阳能+生物质能联合供暖综合评价 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 342-350.

（本文编辑：胡莹莹）