

[引用格式] 陈维常, 肖刚, 杜琳琳, 等. 基于信息模板库的人机交互信息有用度评估 [J]. 水下无人系统学报, 2025, 33(4): 707-712.

基于信息模板库的人机交互信息有用度评估

陈维常¹, 肖刚¹, 杜琳琳¹, 马静静^{1*}, 吴涛²

(1. 军事科学院 系统工程研究院, 北京, 100101; 2. 陆军工程大学 通信工程学院, 江苏 南京, 210014)

摘要: 针对无人系统采用传统人机交互度评估时交互内容覆盖不全面的问题, 文中基于对不同语句结构传递信息特点的分析, 提出了信息有用度概念, 并将其纳入人机交互度评估指标体系。以此为基础, 将交互内容的核心要素作为信息模板, 构建了分级分类的信息模板库, 并设计了一种对照信息模板库的信息有用度计算方法, 实现交互内容价值的量化评估。案例验证表明了该信息模板库构建的合理性和信息有用度计算方法的有效性, 可为人机交互度评估提供参考和借鉴。

关键词: 无人系统; 人机交互; 信息模板库; 信息有用度; 评估

中图分类号: TJ630; U667

文献标识码: A

文章编号: 2096-3920(2025)04-0707-06

DOI: 10.11993/j.issn.2096-3920.2025-0022

Evaluation of Information Usefulness in Human-Computer Interaction Based on Information Template Libraries

CHEN Weichang¹, XIAO Gang¹, DU Linlin¹, MA Jingjing^{1*}, WU Tao²

(1. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100101, China; 2. College of Communication Engineering, Army Engineering University, Nanjing 210014, China)

Abstract: In response to the problem of incomplete coverage of interactive content in traditional human-computer interaction degree evaluation of unmanned systems, based on the analysis of the characteristics of information transmission in different sentence structures, the concept of information usefulness was proposed and included in the indicator system of human-computer interaction degree evaluation. On this basis, the core elements of interactive content were used as information templates to construct a hierarchically classified library of information templates and design a method for calculating information usefulness by comparing it with the libraries. Quantitative assessment of the value of interactive content was conducted. Case studies verify the rationality of the construction of the information template library and the effectiveness of the information usefulness calculation method, which can provide reference and insights for the evaluation of human-computer interaction degree.

Keywords: unmanned system; human-computer interaction; information template library; information usefulness; evaluation

0 引言

现阶段, 无人系统呈现快速发展态势, 其中无人机作为无人系统的典型代表, 在军事侦察、灾害救援和物流配送中应用日益广泛; 无人水下航行器在未来海战中将发挥不可替代的作用^[1], 已成为

各军事强国争相研制并投入作战运用的热点装备^[2]。2023 年《IEEE Robotics》报告^[3]显示, 全球军用无人机市场预计在 2025 年达 200 亿美元, 年均增长率 12%, 表明其在军事领域尤其复杂战场环境中的应用价值日益凸显^[4]。自主性可以增加无人系统安全性和可靠性、提高反应能力、减轻人

收稿日期: 2025-02-06; 修回日期: 2025-04-05; 录用日期: 2025-05-12.

作者简介: 陈维常(1987-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为无人机自主性评估.

* 通信作者简介: 马静静(1991-), 女, 助理研究员, 主要研究方向为体系设计与评估.

OPEN ACCESS

员的负担、降低成本,且在通信恶化条件下或拒止环境中能够持续作战,具有重要的作战优势^[5]。因此,自主性提升技术和评估方法成为当前研究的热点,而人机交互度评估则是自主性评估研究中的一项重要内容。

在人机交互度评估研究中,不少学者将其分解为多个评估指标。李一波等^[6]将人和平台的交互能力分解为操作者掌控时间、操作者控制平台数量、操作者技术水平及操作者工作强度;杨哲等^[7]将人机交互度分解为“很多”、“一般”、“少”和“几乎没有”4个级别,但未明确各级别的定义;郑剑^[8]将人机交互度分解为人工干预时间比、人机交互级别、操作员技术水平及操作员工作强度;于丽莉等^[9]将自主能力分解为人工干预和人机比,其中人工干预细分为干预类型、干预次数、干预深度及干预时间,人机比细分为多对一、一对一和一对多。以上指标分解方式均能在一定程度上反映人机交互度的特征,但多聚焦时间和频率,未将人机交互的内容作为指标,因此评估指标体系不够全面,导致评估结果与实际效能脱节。

基于此,文中借鉴香农信息论中信息量的概念,即信息的有效性与其减少不确定性的能力相关^[10]。同时,参考 Norman 的用户中心设计理论^[11],即交互内容的有效性应以任务完成需求为核心,促使研究从语句结构和任务关联性出发构建信息模板库。具体为通过将交互内容分级分类,抽取交互内容的主干作为信息模板,建立信息模板库。通过信息模板库反映交互内容,既可减少具体交互内容的繁杂性,又可避免交互的随意性。在此基础上,文中提出信息有用度概念,将其作为人机交互度评估指标,以增加评估的全面性。

1 相关概念

1.1 信息

信息是指音讯、消息以及通信系统传输和处理的对象,广泛指代人类社会传播的一切内容^[12]。信息最常见的外在形式是语句,语句是信息的载体。根据语气和功能不同,语句可分为陈述句、祈使句、疑问句和感叹句^[13]。在操控员与无人系统的交互中,疑问句和感叹句极少使用;祈使句对应操控员告知无人系统操作的方式和步骤;陈述句

通常用来描述目标、障碍物等对象的特征、位置和运动状态等要素的信息,以及对无人系统上报结果、询问信息给予的肯定或否定的判断信息。

为了更好地评价信息的价值,将信息描述某事物的特征、位置、运动状态以及结果的正确性判断等称作要素项,如无人水下航行器的速度、位置及无人系统上报结果是否正确等。将要素项具体的结果和数值称作信息要素值,如目标的颜色是红色、位置是正北方 30 m 且速度是 30 km/h,无人系统上报结果正确等。每条信息均有要素项和要素值,这样信息才完整并具有价值。

结合无人系统遂行任务的实际,根据要素项的种类可将信息分为表征特征类、判断正误类和操控动作类 3 类。表征特征类信息是指由操控员发送,以帮助无人系统更好完成任务为目的,提示目标、任务及障碍物等的性质和状态等信息;判断正误类信息是指由操控员发送,以帮助无人系统更好完成任务为目的,对其遂行任务的情况或上报、询问的信息给予的肯定或否定的评价信息;操控动作类信息是指对无人系统加减速、转弯及升降等操控层面给予帮助的信息。

1.2 信息模板

信息模板是指仅包含要素项、不含要素值的信息框架,同样分为表征特征类、判断正误类和操控动作类 3 类。由于缺少要素值,信息模板不具备完整价值,但便于对语句进行分类。要素项的种类及数量决定着信息模板的潜在价值,潜在价值能否产生效果依赖于要素值。

为保证语句形式的完整性,将“大约”、“部分”和“可能”等表示约数的文字用 L 代替,将表示实义词的文字用 M 代替,将数字用 N 代替。为避免重复, L 和 M 可代替单个文字或多个连续的文字。如目标识别任务中某条交互信息:目标为红色,长方形,长度为 5 m,方向是北偏东 34° ,距离大约 50 m;对应的信息模板:目标为 M 色, M 形,长度为 N m,方向为 M 偏 $M N^\circ$,距离 $L N$ m。

1.3 信息模板库

信息模板库是指由多种信息模板按照一定规则组成的集合,由表征特征类信息模板库、判断正误类信息模板库和操控动作类信息模板库构成。信息模板库在评估实施前构建完成,评估实施过

程中操控员根据具体操作场景选取合适的模板, 填充具体要素值, 发送给无人系统协助其完成任务。任务结束后, 根据所选取的模板及发送的时机, 同时结合其他指标综合计算人机交互度。

1.4 信息有用度

信息有用度是指操控员向无人系统发送的信息对其遂行任务的有用程度, 用 XY 表示, $XY \in [0, 100]$ 。信息有用度具有通用性、客观性和独立性 3 个特征。通用性: 虽然无人系统的种类、所执行任务和任务环境差别很大, 但是均可采用这一概念, 信息有用的实质是信息模板有用, 虽然交互的信息千差万别, 但通过归类整理均可将其归到信息模板库中; 客观性: “有用度”是主观性词语, 按照信息模板要素项的种类和多少确定, 要素项及其取值依据条件清楚、边界清晰, 整个计算过程和方法是客观的; 独立性: 信息有用度的对象是具体某条信息, 不是整个过程出现的信息之和, 信息之间不相关、不累加, 若出现多次交互, 每次交互均是独立的。

2 信息模板库

文中首先建立信息模板库, 将计算信息有用度转化为计算信息模板库各模板的有用度。

2.1 构建思路

1) 分类逐级聚合。信息模板在一定程度上既能反映人机交互的本质和重要特征, 又能用确定的数值或数值区间表示其大小。作为传递信息的基本单位, 单个信息模板能够传递的信息有限, 为了使其传递的信息更加全面系统, 需将信息模板分类、分等级聚合, 形成模板库。

2) 适当简化假设。为有效控制变量并将评估焦点集中于无人系统, 文中假设人机交互过程流畅且实时, 操控员是无人系统“全能”的忠实助手, 其提供帮助的程度与时机均恰到好处。

3) 专家意见前移。在数据积累还不充分的情况下, 文中以专家经验为指导构建信息模板库, 通过分析模板库的使用情况得出评估结果。

4) 类比人际交互。将人机交互类比于成人与儿童之间的交互, 人员帮助无人系统遂行任务类比于成人帮助儿童生活玩耍, 无人系统目标识别类比于儿童寻找某个玩具。梳理总结成人对儿童的帮助信息模板同样适用于人员对无人系统的帮助情形。

5) 规范句型结构。表征特征类和判断正误类信息模板使用简单的陈述句, 句型保持一致。若表达多层意思, 可叠加多个简单句进行。操控动作类信息模板使用祈使句表达, 对其速度、方向、时间及距离等进行说明。

2.2 构建过程

信息模板库的构建基于信息熵和任务相关性分析。首先, 通过分析无人系统任务日志(如侦察、打击), 提取高频交互语句, 运用自然语言处理的依存句法分析识别语句中的要素项(如特征、位置); 其次, 采用层次聚类算法将语句按表征特征、判断正误和操控动作 3 类进行聚合, 生成初始模板集合; 最后, 经专家验证调整模板层级, 形成分级分类的模板库。在构建判断正误类及操控动作类信息模板库时, 应根据等级间的差异性, 列举若干与相应等级对应的信息模板, 作为各等级的初始信息模板库, 后续可根据情况及时扩展补充完善。

2.2.1 表征特征类信息模板库构建

文中将表征特征类信息从信息对象、精确性及修饰语数量 3 个维度进一步细分, 如图 1 所示。在信息对象维度, 按照有用度从大到小分为针对目标、针对障碍物和针对其他物品的信息; 在精确性维度, 按照有用度从大到小分为精确数字类、概略数字类和无数数字类信息; 在修饰语数量维度, 按照有用度从大到小分为修饰语数量为 3、2、1 的信息。

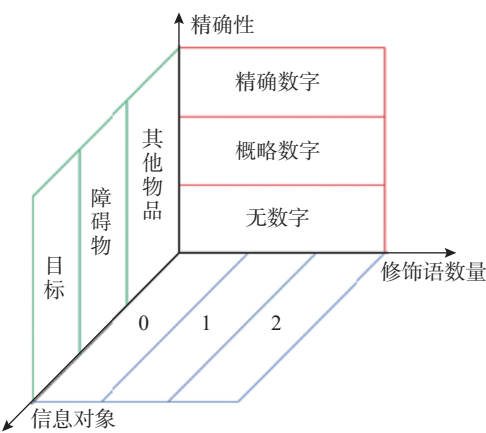


图 1 表征特征类信息三维分解结构图
Fig. 1 Three-dimensional decomposition structure of characteristic category information

表征特征类信息的有用度可用三维坐标(信息对象, 精确性和修饰语数量)量化, 将描述性语言转化为具体的数值。在一条信息中, 信息对象是必定

存在的,但数字和修饰语可能不存在,因此,将信息对象对应的低级初始有用度定为 1,将精确性和修饰语数量的低级初始有用度定为 0。文中将信息对象 3 个层级的初始有用度分别定为 1、3、5;精确性 3 个层级的初始有用度分别定为 0、2、4;修饰语数量 3 个层级的初始有用度分别定为 0、1、2。根据预设分值,表 1 中第 1 条信息的三维坐标为(其他物品,无数字,0),对应的有用度为 1,2、3 条信息的有效度分别为 6、11。为方便描述,将 2、7、12 等通过表征特征类信息通过有用度三维坐标量化得到的有用度称为过渡有用度。

表 1 表征特征类信息数值量化列表
Table 1 Example of numerical quantification for characteristic description information

序号	信息对象	精确性	修饰语数量	过渡有用度
1	其他物品	无数字	0	1
2	障碍物	概略数字	1	6
3	目标	精确数字	2	11

为方便判断正误类和操控动作类信息整合,文中将表征特征类信息分为低、中、高 3 个等级,对应的过渡有用度分别为 1~4、5~7、8~11。按照三维结构的不同,根据每个等级过渡有用度的区别,列举若干包含不同要素项的信息模板,作为每个等级初始信息模板库,随着交互内容的增多,及时补充完善模板库。

2.2.2 判断正误类信息模板库构建

判断正误类信息可根据否定的精准性及肯定的全面性分为概略否定信息、精准否定信息、部分

肯定信息和全部肯定信息 4 个等级,有用度逐步提高。概略否定信息是指对无人系统遂行任务的情况或上报、询问的信息给出模糊的否定答复;精准否定信息是指给出的否定答复是明确的;部分肯定信息只针对部分情况和结果给出肯定答复;全部肯定信息是指给出全面的肯定答复。

2.2.3 操控动作类信息模板库构建

相较于从内容上区分其有用度的大小,按操控程度的深浅进行划分的操作性更强。操控程度由浅至深依次为告知操作方法及步骤、辅助操控及接管操控 3 个等级,其有用度逐步提高。告知操作方法及步骤是指操控员不直接操控,而是告知无人系统在何种情况下加减速、转弯或升降;辅助操控是指操控员参与操控无人系统的时间占比小于 50%;接管操控是指操控员参与操控的时间占比不小于 50%。告知操作方法及步骤与辅助操控的区别在于是否有操控员的参与,辅助操控与接管操控的区别在于操控员操控的时间占比。

2.2.4 信息模板库集成

根据课题组讨论和专家咨询,3 类信息按有用度排序的结果为:表征特征类信息、判断正误类信息、操控动作类信息,每类信息包含多个等级,共 10 个等级,对应的有用度为 10~100。在充分了解当前无人系统所执行任务、任务环境以及人机交互内容的基础上,尽可能全面地列举信息模板,充实信息模板库。具体情况见表 2。

2.3 信息模板库使用步骤

信息模板库对应人机交互的内容,只要发生人

表 2 信息模板库
Table 2 Information template libraries

序号	类别	等级	过渡有用度	有用度	样例1	样例n
1	表征特征类	低等级	1~4	10	任务区最高建筑物高度为N m	障碍物为M形
2		中等级	5~7	20	汽车为M色,速度为N km/h	目标为M色
3		高等级	8~11	30	电视塔为M形,高度为N m,在M方向,距离为N m	目标为M色,在M方向,距离为N m
4	判断正误类	概略否定		40	打击的目标有错误的	视野中的舰艇不是目标
5		精准否定		50	第N个打击目标是错误的	第N个和第N+X个结果是错误的
6		部分肯定		60	第N个打击目标是正确的	红色建筑物为打击目标
7	操控动作类	全部肯定		70	打击的目标均正确	海面上的船只均为目标
8		告知操作方法及步骤		80	向上攀升N m,前行N m后,识别目标	向上攀升N m,前行N m后,瞄准并打击目标
9		辅助操作		90	向M转N°,前行N m后,识别目标	向M转N°,前行N m后,瞄准并打击目标
10		接管操控		100	速度提升至N km/h,保持N min,识别目标	速度提升至N km/h,保持N min,瞄准并打击目标

机交互,就要使用信息模板库。其 在人机交互度评估中使用步骤如下。

1) 根据无人系统的能力情况选取信息模板。操控员根据无人系统的自主能力水平,判断其能否独立完成当前任务,若不能完成,从信息模板库选取合适的信息模板对其实施帮助。选取信息模板需对无人系统和任务充分了解,遵循能够帮助无人系统完成任务和有用度尽可能小这 2 个原则。

2) 根据战场情况完善信息模板并对无人系统实施帮助。操控员根据无人系统、目标和障碍物等的物理特征、运动状态及位置信息等的实时情况,完善信息模板,即将各要素项的要素值补充完整,使信息模板变成有用的信息,发送给无人系统实施帮助,若是表征特征类信息模板和判断正误类信息模板,将填好的信息发送给无人系统,对其实施帮助。若是操控动作类信息模板,操控员直接进行操控。

3) 对照信息模板库确定信息有用度。模板库中每条信息模板均有确定的有用度,根据信息模板的类别、等级、信息对象即可确定其信息有用度。

3 案例验证

3.1 评估科目设置

任务背景为无人机在城市环境中执行识别和监视任务。在 Unreal Engine 仿真平台中设置了复杂度为 0.2 的评估科目,其中,任务区面积为 20 km²,各类楼房 197 栋,各类树木 598 棵,待识别目标为宣传牌,要求完成任务时间 9 min,具体基础变量及取值如表 3 所示。

3.2 仿真评估

在仿真评估中,操控员从样例库选择 1 条信息模板:目标为 M 色,在 M 方向,距离是 N m。根据实际情况将要素值进行补充,补充后为:目标为红色,在正北方向,距离是 300 m。在第 4 min 时发送给无人系统。在第 7 min 时,操控员选取信息模板并补充完整后,向无人系统发送了 1 条信息,内容为“第 3 个结果是错误的”。从第 8 min 开始,操控员辅助操控无人系统,持续时间 1 min。

3.3 信息有用度计算

由评估背景可知,本次评估共干预 3 次,第 1 次干预的信息模板为“目标为 M 色,在 M 方向,距离是 N m”,对照表 1,其对应的信息模板类别为

表 3 评估科目基础变量取值表
Table 3 Value table of basic variable for evaluation subjects

基础变量	取值	备注
任务区面积/km ²	20	—
任务参考时间/min	10	—
要求完成时间/min	9	—
楼房数量	22~56 栋(分6类)	—
树木数量	104~380 颗(分3类)	—
光照角度/(°)	7.06~8.30	随时间变化
能见度/km	5	—
地表照度/lx	3.38~6.73	随时间变化
时间占有度	0.58	—
频谱占有度	0.76	—
空间覆盖率/%	0.85	—
要求上报精度	0.05	—
参考精度	0.79	—
目标明确面积	参考值8 m ² ,实际2 m ²	—
目标参数	5个宣传牌,体积0.5 m ³	颜色多样,表面积1 m ²
目标变化	种类变化1种(坦克)	数量增加2个,第3 min发生
混淆物与目标的距离/m	29	—

表征特征类、等级为高等级、信息有用度为 30。第 2 次干预的信息模板为“第 N 个结果是错误的”,对照表 1,其对应的信息模板类别为判断正误类,等级为精准否定,信息有用度为 50。第 3 次干预对应的类别为操控动作类,等级为辅助操控,信息有用度为 90。

4 结束语

文中将信息有用度作为无人系统人机交互评估中反映交互内容的指标,增加了评估指标选取的全面性。同时,在分析信息、信息模板及信息模板库概念的基础上,分级分类建立了信息模板库,依托信息模板库进行人机交互,可将交互的内容限定于一定范围内,降低操控员交互的随意性,并能在一定程度上遏制潜在的舞弊行为。将信息模板库作为计算信息有用度的工具,通过查表完成计算,降低了计算的主观性。尽管文中将信息模板划分为 10 个等级,并为各等级信息模板赋予了相应的有用度,但该分类和赋值方法的科学性仍需进一步分析和验证。未来的研究将进一步完善信息模板库,以更好地支撑人机交互度评估。

参考文献:

- [1] 钟宏伟. 国外无人水下航行器装备与技术现状及展望[J]. 水下无人系统学报, 2017, 25(4): 215-225.
ZHONG H W. Current situation and prospect of foreign unmanned underwater vehicle equipment and technology[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2017, 25(4): 215-225.
- [2] 孙戡, 潘宣宏, 王幸军, 等. 无人潜航器装备技术发展及作用运用研究[J]. 舰船科学技术, 2023, 45(11): 104-109.
SUN Y, PAN X H, WANG X J, et al. Research on unmanned underwater vehicle technology development and combat application[J]. Ship Science and Technology, 2023, 45(11): 104-109.
- [3] MICHAEL A G, ALAN C S. Human-robot interaction: A survey[J]. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 2007, 1(3): 203-275.
- [4] 刘佩林, 陈祥, 牛小明. 无人系统自主性技术研究现状与发展趋势[J]. 兵工自动化, 2022, 41(12): 61-65.
LIU P L, CHEN X, NIU X M. Research status and development trends of unmanned system autonomy[J]. *Ordnance Industry Automation*, 2022, 41(12): 61-65.
- [5] 秦荀, 李三军. 美军的自主系统参考框架[J]. 兵工自动化, 2020, 39(1): 6-10, 27.
QIN X, LI S J. The autonomous systems reference framework of the U.S. military [J]. *Ordnance Industry Automation*, 2020, 39(1): 6-10, 27.
- [6] 李一波, 王新星, 姚宗信, 等. 无人平台自主能力分级的四指标模型[J]. 电光与控制. 2012, 19(10): 34-37, 83.
LI Y B, WANG X X, YAO Z X, et al. A four-indicator model for the grading of autonomous capability in unmanned platforms[J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(10): 34-37, 83.
- [7] 杨哲, 张汝波. 无人系统自主等级模糊评价方法[J]. 小型计算机系统, 2009, 30(10): 2043-2047.
YANG Z, ZHANG R B. Fuzzy evaluation method for the autonomy level of unmanned systems[J]. *Mini-Micro Systems*, 2009, 30(10): 2043-2047.
- [8] 郑剑. 面向任务的无人作战系统自主性等级评估与分配技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.
- [9] 于丽莉, 何明利, 常书杰. 地面无人装备自主作战效能评估方法研究[J]. 军事运筹与系统工程, 2020, 34(3): 26-32.
YU L L, HE M L, CHANG S J. Research on the evaluation method for the autonomous combat efficiency of ground unmanned equipment[J]. *Military Operations Research and Systems Engineering*, 2020, 34(3): 26-32.
- [10] 施雨轩, 吴泳澎, 张文军. 基于信息论的语义通信: 理论与挑战[J]. 中兴通讯技术, 2023, 29(2): 13-18.
SHI Y X, WU Y P, ZHANG W J. Semantic communication based on information theory: Theories and challenges [J]. *ZTE Communications Technology*, 2023, 29(2): 13-18.
- [11] KIM H, KO W J, KIM D, et al. User-centered design to enhance university students' sex and menstrual education in South Korea: Randomized controlled trial[J]. *BMC Public Health*, 2025, 25(1): 841.
- [12] 百度百科. 信息[EB/OL]. 百度百科, [2025-02-05]. https://baike.baidu.com/item/%E4%BF%A1%E6%81%AF/111163?fr=ge_al.
- [13] 张斌. 现代汉语描写语法[M]. 北京: 商务印书馆, 2015: 415-634.
- (责任编辑: 靳潇倩)
-
- (上接第 706 页)
- [13] LIU H L, HUANG T T. Summary of DARPA suboff experimental program data[R]. West Bethesda: Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, 1998.
- [14] 杨敬东, 赵登, 彭伟, 等. 基于 CFD 的游艇阻力预报及球鼻艏型线变形[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 144-148.
YANG J D, ZHAO D, PENG W, et al. Yacht resistance prediction and bulbous bow profile deformation based on CFD[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science Edition)*, 2023, 42(2): 144-148.
- [15] 刘悦. 基于智能优化方法船舶阻力性能优化设计研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [16] 陈骏喆, 姜栋, 张儒, 等. 小样本规模船型优化策略的选择研究[J]. 中国造船, 2023, 64(4): 248-257.
CHEN J Z, JIANG D, ZHANG R, et al. Study on the selection of ship form optimization strategy with small sample size[J]. *Shipbuilding in China*, 2023, 64(4): 248-257.
- [17] 孙海莎. 基于 CFD 的散货船首部型线优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [18] PRAKS P, BRKIC D. Approximate flow friction factor: Estimation of the accuracy using Sobol's Quasi-Random sampling[J]. *Axioms*, 2022, 11(2): 36.
- [19] ZHENG W, DOERR B. Mathematical runtime analysis for the non-dominated sorting genetic algorithm II(NSGA-II)[J]. *Artificial Intelligence*, 2023, 325: 104016.
- [20] 张帅. 长航程水下滑翔机的减阻技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [21] ŞUMNU A. Passive flow control of Ahmed body using control rod[J]. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2022, 19(4): 10063-10072.
- [22] XIE Z, LIU Y, WANG S, et al. Bio-inspired profile improving the flow near the stern of an underwater vehicle[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 314: 119693.
- (责任编辑: 靳潇倩)