

doi: 10.7690/bgzdh.2022.10.017

基于 ADC 和 AHP 的 UUV 装备作战效能分析

方 勇

(中国船舶重工集团有限公司第七一〇研究所 107 事业部, 湖北 宜昌 443003)

摘要: 为提高水下无人飞行器(unmanned underwater vehicle, UUV)装备作战效能, 对其进行分析。根据某型 UUV 装备的特点, 结合 ADC 和 AHP 建立可用性、可信性和固有能矩阵模型, 并开展 UUV 装备作战效能定量评估。结果表明: 该分析可作为评估 UUV 装备作战效能的参考, 也可为后续 UUV 装备建设发展提供支撑。

关键词: ADC; AHP; 水下无人飞行器; 作战效能

中图分类号: TJ67 **文献标志码:** A

Operational Effectiveness Analysis of UUV Equipment Based on ADC and AHP

Fang Yong

(No. 107 Division, No. 710 Research and Development Institute, CSIC, Yichang 443003, China)

Abstract: In order to improve the operational effectiveness of unmanned underwater vehicle (UUV), the UUV was analyzed. According to the characteristics of a certain type of UUV equipment, the matrix model of availability, dependability and inherent capability is established by combining ADC and AHP, and the operational effectiveness of UUV equipment is quantitatively evaluated. The results show that the analysis can be used as a reference for evaluating the operational effectiveness of UUV equipment, and can also provide support for the subsequent development of UUV equipment.

Keywords: ADC; AHP; UUV; operational effectiveness

0 引言

水下无人飞行器(UUV)根据使命任务的需要, 携带各种传感器载荷和武器系统, 遂行水下环境侦查、目标探测、反水雷、水下通信网络节点等一系列重要军事任务^[1]。UUV 装备拥有广泛而重要的军事用途, 在未来海上作战中将起到力量倍增器的作用, 是水下作战的核心装备^[2]。对 UUV 装备进行科学合理的作战效能评估, 不仅有助于对 UUV 装备进行科学的论证和设计, 而且能够为制定 UUV 装备作战方案提供决策支持, 也是促进装备效能提升、优化改进装备性能必不可少的环节。

武器系统作战效能是指武器系统能在规定的时间和规定环境条件下完成预定任务程度的指标, 表示该系统完成预定作战任务的能力, 是武器系统最重要的综合性能^[3]。武器系统效能评估有多种方法, 目前较常用的主要有试验统计法、ADC、解析法、专家调查法、AHP 以及 SEA 等。ADC 具有考虑因素全面、数学模型清晰、效能指标明晰等优点, 是通用且有效的系统评估模型^[4-5]。笔者采用 ADC 和 AHP 相结合的方法进行 UUV 装备作战效能评估, 构建某型 UUV 装备的可用性、可信性和固有能

矩阵模型, 并对该装备的作战效能进行了评估计算。

1 UUV 系统组成

根据各组成部分的基本功能, 将 UUV 系统划分为 8 个系统, 其组成如图 1 所示。

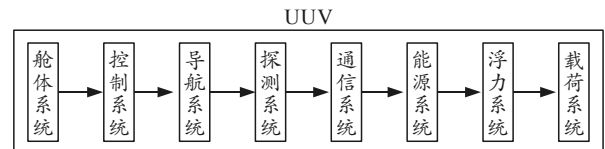


图 1 UUV 组成

UUV 系统中的任何一个分系统出现故障, 都将导致 UUV 无法完成给定任务, 所以 UUV 系统是一个标准的串联系统。UUV 装备在执行作战任务前, 只存在不可用和可用 2 种状态; 执行作战任务过程中, 只存在失效和正常 2 种状态。

2 UUV 装备效能评估模型

2.1 ADC 方法

ADC 方法是由美国工业界武器系统效能咨询委员会(WSEIAC)发展起来的武器系统效能评估方法, 该方法的基本原理: 如果需要系统开始执行任务, 应保证在任何时间它处于可用的工作准备状态;

收稿日期: 2022-06-01; 修回日期: 2022-07-20

作者简介: 方 勇(1979—), 男, 湖北人, 硕士, 高级工程师, 从事 UUV 装备总体技术及综合保障研究。E-mail: 14285229@qq.com。

同时还必须确保系统在执行任务过程中工作可靠，即系统工作正常；最后系统在这些状态下必须能顺利完成给定任务^[6]。采用可用性向量 A 表示系统在任务开始执行时的所有可能状态；采用可信性矩阵 D 表示系统在执行任务过程中若干随机状态；在已知系统可用性与可信性的条件下，采用固有能力向量 C 表示系统完成预定任务的能力度量^[7]。系统总的效能用可用性、可信性、固有能力的乘积来表示，即 $E=ADC$ 。某型 UUV 装备的效能构成如图 2 所示。

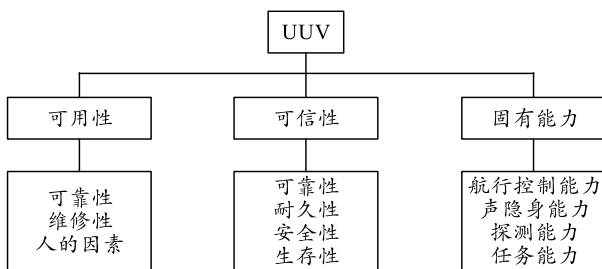


图 2 UUV 装备效能构成

利用 ADC 方法对系统效能进行分析的步骤如下：

1) 系统可用性分析，经过分析得到系统的可用性向量 $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ ，其中 a_i 表示任务开始执行时系统处于 i 种状态的概率， $\sum_{i=1}^n a_i=1$ 。

2) 系统可信性分析，经过分析得到系统的可信性矩阵 $D=(d_{ij})_{mn}$ ，其中 d_{ij} 表示已知在任务开始执行时系统处于状态 i ，而在任务执行过程中处于状态 j 的概率， $\sum_{j=1}^n d_{ij}=1$ 。

3) 系统固有能力分析，经过分析得到系统的固有能力向量 $C=(C_1, C_2, \dots, C_n)^T$ ，其中 C_i 表示系统处于状态 i 时，完成预定任务能力的量度。

2.2 效能评估模型

2.2.1 可用性向量

在效能模型中，可用性表示系统在开始执行作战任务时处于无故障状态的程度，与可靠性、维修性、人的因素密切相关，使用可用度进行衡量，即准备开始执行任务的任何时间，UUV 装备处于无故障状态的概率。对于不可修复的系统，其固有可靠性决定了系统的可用性，而对于可修复的系统，其可靠性及维修性决定了系统的可用性。对 UUV 装备的可用性进行分析，其在任务开始执行前具有可用和不可用 2 种状态，即

$$A=(a_1, a_2)。 \quad (1)$$

式中： a_1 表示系统处于可用状态的概率，使用平均故障间隔时间 (mean time between failures, MTBF) 和平均故障修复时间 (mean time to repair, MTTR) 这 2 个参数来进行计算， $a_1=MTBF/(MTBF+MTTR)$ ； a_2 表示系统处于不可用状态的概率。

2.2.2 可信性矩阵

可信性与可靠性在概念上具有一定的相似性，但二者也存在区别。可靠性一般指一个系统在规定时间内可以正常工作的概率；而系统的可信性还与装备的维修性有关，维修性对系统工作状态的影响必须考虑^[8]。对于在执行任务过程中无法通过战时抢修方式进行修复的系统，系统的可信性仅决定于系统的任务可靠性，而对于在执行任务过程中可以通过战时抢修方式进行修复的系统，系统的可信性决定于系统的可靠性和维修性 2 个因素；由于 UUV 装备在任务执行过程中是一个不可修复的系统，其可信性只取决于系统的任务可靠性。

通过 UUV 装备可用性向量分析，在任务执行过程中，只存在正常和失效 2 种状态，所以，可信性矩阵为：

$$D=\begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}。 \quad (2)$$

式中： d_{11} 、 d_{12} 表示 UUV 装备在任务执行期间始终处于正常状态的概率和由正常状态变为失效状态的概率； d_{21} 、 d_{22} 表示 UUV 装备在任务执行过程中由失效状态变为正常状态的概率和始终处于失效状态的概率。 d_{11} 、 d_{12} 分别为：

$$d_{11}=R_m, \quad d_{12}=1-R_m。 \quad (3)$$

式中 R_m 表示任务可靠度，是 UUV 装备任务可靠性的概率量度。由于 UUV 装备任务执行过程中无法修复，有 $d_{21}=0$ ， $d_{22}=1$ 。

2.2.3 固有能力向量

UUV 装备的固有能力是指完成预定任务的程度，其度量指标为在规定时间内和规定条件下完成预定任务的概率。UUV 装备的固有能力与系统在战场环境下的航行控制能力、声隐身能力、探测能力、任务能力密切相关，系统的固有能力向量为：

$$C=(C_1, C_2)^T。 \quad (4)$$

式中： C_1 、 C_2 表示系统处于正常状态下和处于故障状态下完成给定任务的能力，在故障状态下无需讨论

系统的固有能能力，则 $C_2=0$ 。

固有能能力评估主要使用 AHP 并结合专家打分来确立权重，通过加权求和的方法求解系统的固有能能力。

1) 评价指标权重的确定。

各级分指标的权重采用 AHP 来确定。为确保得出的权重更合理实用，通过相关领域的专家咨询打分，构造两两判断矩阵，然后使用 AHP 确定其最大特征向量作为各因素权重系数^[9]。

2) 固有能能力各级指标的评判

固有能能力评估方式采用由下至上的顺序逐级集成得出评估结果。计算时从二级指标开始，使用评估模型对指标进行评估，评估分值作为上一级指标的评估输入，计算得出一级指标的评估分值，再综合得出固有能能力的总分值^[10]。

专家根据自身的经验，给每个二级指标评定一个标准分值，通过对每个二级指标进行评估打分，得出二级指标的评估分值。

二级指标的权重系数设为 w_{ij} ，评估分值设为 R_{ij} ，其中： i 代表一级指标的编号； j 代表二级指标序号； n 代表相应指标的个数。采用加权求和，可以得出二级指标所属的一级指标的评估分值：

$$R_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} R_{ij} \quad (5)$$

然后再采用加权求和，可以得出系统的固有能能力：

$$C = \sum_{i=1}^n w_i R_i \quad (6)$$

3 UUV 装备效能评估计算

以下为某型 UUV 装备的作战效能评估计算：

1) 可用性向量计算。

根据该型 UUV 装备的可靠性、维修性预计及试验数据可得，MTBF=571 h，MTTR=2 h，计算可得：

$$a_1 = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} = \frac{571}{571+2} = 0.9965, a_2 = 1 - a_1 = 0.0035。$$

故可用性向量为 $A=(0.9965, 0.0035)$ 。

2) 可信性矩阵计算。

根据该型 UUV 装备的可靠性预计及试验数据可得，任务可靠度 $R_m=0.769$ ，计算可得：

$$d_{11}=R_m=0.769, d_{12}=1-R_m=0.231。$$

故可信性矩阵为：

$$D = \begin{bmatrix} 0.769 & 0.231 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

3) 固有能能力向量计算。

根据 UUV 装备的自身性能参数，采取 AHP 和相关专家咨询打分，得出各分指标的评分值，如表 1 所示。

表 1 固有能能力指标权重值及二级指标评分结果

一级指标	权重值	二级指标	权重值	评分值
航行控制能力 C_1	0.30	最大潜深	0.09	0.9
		航速	0.12	0.85
		续航力	0.21	0.80
		操纵性	0.10	0.75
		导航性能	0.18	0.85
		适航性	0.11	0.80
声隐身性能 C_2	0.19	通信性能	0.19	0.85
		辐射噪声	0.54	0.90
		目标强度	0.27	0.85
探测性能 C_3	0.24	自噪声	0.19	0.80
		声呐探测 1	0.35	0.80
		声呐探测 2	0.32	0.85
		声呐探测 3	0.18	0.80
任务能力 C_4	0.27	声呐探测 4	0.15	0.75
		任务能力 1	0.53	0.85
		任务能力 2	0.47	0.80

通过加权求和，求得： $C_1=0.8285$ ， $C_2=0.8675$ ， $C_3=0.8085$ ， $C_4=0.8265$ ， $C=0.83057$ 。即 UUV 装备处于正常状态时固有能能力为 0.83057，故障时为 0，则其固有能能力向量为：

$$C=(0.83057, 0)^T。$$

4) 作战效能计算。

该型 UUV 装备的作战效能为：

$$E=ADC= (0.9965, 0.0035) \begin{bmatrix} 0.769 & 0.231 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} (0.83057, 0)^T = 0.6365。$$

4 结束语

笔者提出一种基于 ADC 和 AHP 的 UUV 装备作战效能评估方法，利用 ADC 模型对 UUV 装备的作战效能进行评估，结合专家打分和 AHP 得到其固有能能力，各个指标在装备效能中的作用得到了具体体现，并结合某型 UUV 装备给出了实际算例。研究结果可作为评估 UUV 装备作战效能的参考，也可为后续 UUV 装备建设发展提供支撑。

参考文献：

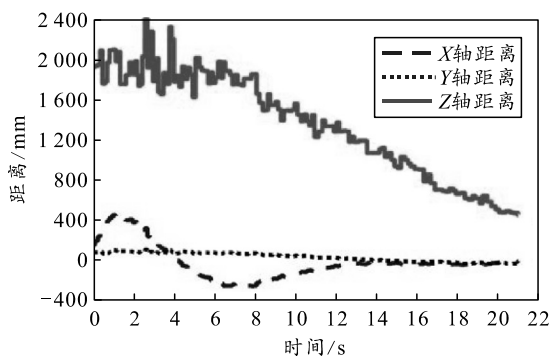
[1] 陈强. 水下无人航行器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 2-8.

[2] 罗晓强, 王浩, 侯发林. 水下航行器航行任务可靠度综

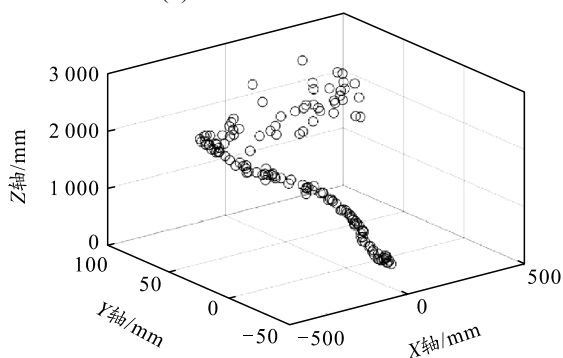
- 合评定法[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(4): 348-357.
- [3] 闫永玲, 张庆波, 李国立. 地空导弹装备战时维修保障效能评估研究[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(7): 51-55.
- [4] 祝华远, 马乃苍, 崔亚君. 基于 ADC 的军用飞机保障效能模型[J]. 兵工自动化, 2014(11): 17-19.
- [5] 黎漫斯, 刘静, 胡志慧. 对潜通信系统效能评估[J]. 兵工自动化, 2019, 38(12): 64-67.
- [6] 宋星, 贾红丽, 赵汝东, 等. 基于 ADC 和模糊综合评判法的合成旅装备保障效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(8): 126-129.

- [7] 苏耀峰. 基于 ADC 法的指挥信息系统效能评估[J]. 现代计算机, 2016(4): 37-40.
- [8] 郝玉生, 李斯宇. 基于 ADC 方法的坦克火控系统效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2018(12): 109-115.
- [9] 温广杰, 钟京立, 谢健. 基于 ADC 和 AHP 的指挥所通信装备效能评估模型构建[J]. 现代电子技术, 2015, 38(19): 37-39.
- [10] 雷宁, 曹继平, 王赛. 基于 AHP 和模糊综合评价法的装备维修保障效能评估[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 76-79.

(上接第 83 页)



(a) 与领航机器人距离



(b) 领航机器人 3 维坐标

图 9 跟随机器人视觉测量结果

4 结论

笔者提出一种领航者跟随模式下, 利用水下视觉系统解算距离的防碰撞策略。根据不同的队形设计理想方位和安全距离, 将视觉系统解算的偏角和偏距作为水下机器人的运动控制输入量。考虑了视觉帧率和控制频率以及防碰撞策略在实际应用中的时间成本, 利用互斥锁保护视觉系统和运动系统的信息; 同时, 利用 2 个机器人的水下编队实验验证

了所提出的防碰撞策略在机器人达到安全距离时可有效地进行减速, 避免了碰撞情况。

参考文献:

- [1] GUO S X, HE Y L, SHI L W, et al. Modeling and experimental evaluation of an improved amphibious robot with compact structure[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2017, 51: 37-52.
- [2] HOU X H, GUO S X, SHI L W, et al. Hydrodynamic Analysis-Based Modeling and Experimental Verification of a New Water-Jet Thruster for an Amphibious Spherical Robot[J]. Sensors, 2019, 19(2): 1-21.
- [3] SHI L W, GUO S X, MAO S L, et al. Development of an Amphibious Turtle-Inspired Spherical Mother Robot[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013, 10(4): 446-455.
- [4] PAN S W, SHI L W, GUO S X. A Kinect-based Real-time Compressive Tracking System for Amphibious Spherical Robots[J]. Sensors, 2015, 15(4): 8232-8252.
- [5] XING H M, GUO S X, SHI L W, et al. Hybrid Locomotion Evaluation for a Novel Amphibious Spherical Robot[J]. Applied Sciences, 2018, 8(2): 1-24.
- [6] SHI L W, HU Y, GUO S X, et al. A Fuzzy PID Algorithm for a Novel Miniature Spherical Robots with Three-dimensional Underwater Motion Control[J]. Journal of Bionic Engineering, 2020, 17(5): 959-969.
- [7] XING H M, SHI L W, TANG K, et al. Robust RGB-D Camera and IMU Fusion-based Cooperative and Relative Close-Range Localization for Multiple Turtle-Inspired Amphibious Spherical Robots[J]. Journal of Bionic Engineering, 2019, 16(3): 442-454.
- [8] GUO S X, PAN S W, SHI L W, et al. Visual Detection and Tracking System for a Amphibious Spherical Robot[J]. Sensors, 2017, 17(4): 870.
- [9] DESAI J P, OSTROWSKI J P, KUMAR V, et al. Controlling formations of multiple mobile robots[C]//international conference on robotics and automation. Leuven, Belgium: IEEE, 1998: 2864-2869.