

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.05.014

基于 FAHP—正态云理论的海洋试验水池 业务能力综合评估模型研究

尹锡帆^{1,3}, 司治涛², 黎鑫^{3*}, 林德欣⁴, 夏文杰¹, 杨星晨¹

(1. 国家海洋技术中心漳州基地筹建办公室, 福建 厦门 361001; 2. 军事海洋环境建设办公室, 北京 100089;
3. 国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京 210001; 4. 中国人民解放军 92101 部队, 福建 福州 350007)

摘 要: 海洋试验水池造价格高昂, 设计使用寿命长。定期对其开展业务能力评估, 有针对性地开展水池维修保养和升级改造, 可以有效保持水池的先进性和可用性。本文通过考虑人脑活动的模糊性, 设计了一个基于模糊层次分析法 (FAHP) —正态云 (Cloud) 理论的海洋试验水池业务能力综合评估模型框架, 并通过详细分析海洋试验水池业务能力, 实现评估指标体系和评估模型的构造。最后, 使用仿真实验验证了该方法的可行性和有效性, 为更加经济高效地利用水池开展海洋研究实验提供了新的思路和方法。

关键词: 海洋试验水池; 业务能力; 综合评估模型; FAHP; 正态 Cloud 模型

中图分类号: P756X **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2020) 05-0092-08

21 世纪是海洋的世纪, 经略海疆必须深入了解海洋的内在规律, 加强对海洋机理的研究。Baolan Wu 等^[1]在国际上首次发现大西洋年代际变化 (AMV) 对北太平洋副热带模态水的年代际和年代际变化存在控制作用, 并进一步指出太平洋十年涛动 (PDO) 主要影响着中东太平洋, 对西太平洋的年代际变化贡献很小。郑崇伟等^[2]通过使用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的海浪再分析数据, 研究了“21 世纪海上丝绸之路”南海—北印度洋区域 1979—2015 年间波浪能气候特征及变化趋势, 发现南海—北印度洋区域波浪能资源气候特征的变异系数在各个季节均无显著的变化趋势。丰富的海洋数据是研究海洋内在机理的充分条件, 而只有通过使用大量海洋观探测设备开展海洋观探测活动, 才能获取大量丰富而有效的海洋数据。海洋观探测设备使用前需完成拖曳、抛投、自航、检定等室内可控试验以检验

可用性。为满足大量海洋观探测设备使用前的室内可控试验, 我国近年来投入大量经费建设了多个满足部分或全部试验需求的海洋试验水池 (如海洋工程水池和试验水槽)。在海洋试验水池的建设使用过程中, 杨松林^[3]通过对拖曳深水池综合技术性能与水池池体、拖车系统、造波系统、试验仪器设备及其他要求的综合分析, 提出了一种拖曳深水池综合技术性能的评优方法, 可供拖曳深水池设计方案或改造方案综合评估。李广年等^[4]针对竖轴潮流能水轮机的水动力性能, 在拖曳水池中开展模型试验研究, 考察了水轮机能效指数, 分析尖速比、叶片偏角以及密度对能效指数的影响, 其期望试验结果为相关研究人员提供了技术支持。周庆伟等^[5]对国内外 ADCP 水池实验检测方法进行了研究, 提出 ADCP 的检测参数和实验检测的技术难点, 据此对今后 ADCP 的检测工作给出意见建议。郭媛媛^[6]从气泡群后向

收稿日期: 2020-05-08

基金项目: 国防科技大学科研计划重点资助项目 (ZK17-02-010); 国家自然科学基金资助项目 (41605051)

作者简介: 尹锡帆 (1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋工程和运筹管理研究。E-mail: 2627507638@qq.com

通讯作者: 黎鑫 (1985-), 男, 博士, 副教授, 主要从事军事气象海洋保障、物理海洋和海气相互作用研究。

E-mail: lixin_atocean@sina.cn

散射特性出发,开展了模拟气泡后向散射特性水池实验研究,详细分析了探测距离及接收视场角对气泡群后向散射特性的影响。

前人的研究对于海洋试验水池应用发展具有极大促进作用,但目前海洋试验水池业务能力评估方面的研究较少。试验水池设计使用寿命一般不少于30年,有些甚至使用超过100年,定期评估其业务能力,有针对性地开展水池维修保养和升级改造,可以有效保持水池的先进性和可用性。因此,为实现海洋试验水池性能评估,保证更加经济高效的利用水池开展海洋研究实验,本文在充分考虑人脑活动模糊性影响的基础上,构建基于FAHP—正态云理论的海洋试验水池业务能力综合评估模型框架,而后通过详细分析海洋试验水池业务能力,构造了评估指标体系,最后利用仿真实验验证该方法的可行性和有效性。

1 综合评估模型框架

社会活动离不开人的影响,而人脑活动存在模糊性,因此开展海洋试验水池业务能力综合评估应充分考虑人脑活动的影响。同样,科技进步影响着试验水池的技术应用,其评估指标和指标权重应具有时效性。基于以上情况,本文构造了基于FAHP—正态Cloud理论的海洋试验水池业务能力综合评估模型框架,见图1。

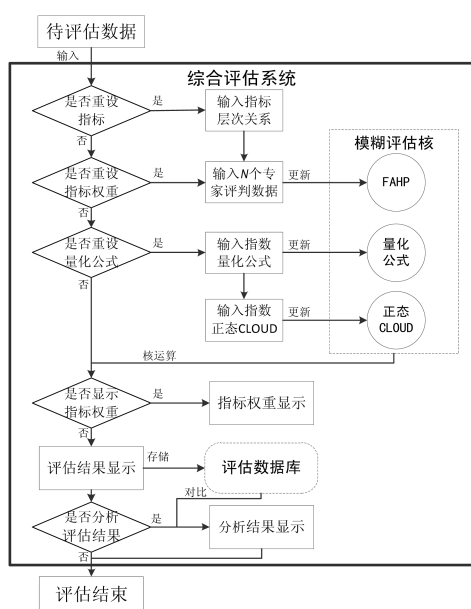


图1 海洋试验水池业务能力综合评估模型框架

海洋试验水池业务能力综合评估模型由判断流程、评估数据库和模糊评估核3部分组成。其中,判断流程用于辅助评估人员判断是否重设评估指标,进行指标权重和量化公式的更新,并在此基础上开展智能评估和评估、分析结果可视化显示;模糊评估核是内置于综合评估模型的模糊评估程序,其中FAHP和正态Cloud是评估运算核,指标量化公式是评估辅助核,该程序在评估指标、专家评判数据和量化公式明确后由评估运算核进行量化评估;评估数据库是综合评估模型的评估资料库、水池性能库和经验数据库,用于辅助开展评估结果对比分析、问题查找和提供经验建议。

2 评估方法

2.1 模糊层次分析法(FAHP)

层次分析法(AHP)是美国运筹学家萨蒂提出用于控制决策的方法,该方法具有简洁实用、所需定量数据信息较少等特点。但社会活动中人的因素存在模糊性特征,会增加AHP评估分析不确定性和评估结果准确性。而FAHP考虑了人判断的模糊性影响,较好的解决了传统AHP的上述问题。因此,本文引入FAHP概念,用于分析准则层和方案层各指标权重。FAHP通常采用0.1~0.9标度法定量描述指标权重的重要程度。

FAHP指标的模糊互判矩阵、模糊互判矩阵权重和一致性的算法^[7]如下:

设 $A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$ 为某位专家给出的

$n \times n$ 阶模糊互判矩阵,其中, $a_{ii}=0.5(i=1,2,\cdots,n)$;

$a_{ij}+a_{ji}=1(i,j=1,2,\cdots,n)$ 。

设 w 为模糊互判矩阵 A 的权重,公式为:

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} (i,j=1,2,\cdots,n) \quad (1)$$

一致性用于判断权重 w 的合理性,可利用相容性指标检验^[8]。设 w 为 A 的 $n \times n$ 阶特征矩阵,

$W_{ij} = \frac{w_i}{w_i + w_j} (i,j=1,2,\cdots,n)$ 。设 $I(A \times W)$ 为模糊互判矩阵 A 的相容性指标, T 为决策者态度,当

$I(A \times W) \leq T$ 时通过一致性检验, T 一般取值 0.1。

$$I(A \times W) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} - b_{ij}| \quad (2)$$

FAHP 实际使用过程中, 存在多个专家给出的模糊互判矩阵 A^k (设专家有 m 个, $k=1, 2, \dots, m$) 不同, 从而权重 W^k 不同的情况, 而指标综合权重 W 需要结合全部专家意见给出。因此, 需要对不同专家的模糊互判矩阵 A^k 进行 T 值判断。设 $I(A^k \times A^l)$ ($k \neq l, k, l=1, 2, \dots, m$) 为不同专家给出的模糊互判矩阵相容性指标。当 $I(A^k \times A^l) \leq T$ 时通过相容性检验。

当上述一致性和相容性指标同时通过检验时, 不同专家指标综合权重 W 可以用 m 个 W^k 的均值代表。

$$\bar{w}_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m w_i^k \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

2.2 正态云理论

正态云理论是李德毅院士结合模糊数学理论提出的实现定量与定性不确定性转换的数学理论^[9]。该理论有效建立了定量、定性概念之间的映射关系, 能够克服常规评价方法在风险评价中存在的模糊性与不确定性的问题^[10]。因此, 本文引入正态云模型概念, 构造方案层与评价集之间的模糊隶属关系。

该理论假设 X 为 N 个 x 组成的集, U 为定量数集, C 为定性概念。若集 X 上任一 x 满足 $x \in U$, 且对定性概念 C 的隶属度 $\mu(x_i)$ 是 $[0, 1]$ 区间上的随机数, 则称集 X 为定量数集 U 上分布的云, $(x_i, \mu(x_i))$ 称为一个云滴。云的数字特征可记为 $C(E_x, E_w, H_e)$, 其中, 期望 E_x 为云在 U 上最能表征 C 的值, 熵 E_n 为 C 的不确定性, 超熵 H_e 为 C 的随机性, 揭示了模糊性和随机性的联系。

正态云滴 $(x_i, \mu(x_i))$ 的 Matlab 软件实现步骤^[11] 如下: 首先, 生成期望 E_n , 方差 H_e^2 的正态分布随机数 E'_m ; 然后, 生成期望 E_x , 方差 $E_m'^2$ 的正态分布随机数 x_i ; 之后, 计算隶属度 $\mu_i(x_i) = \exp(-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_m'^2})$; 最后, 得到正态云滴 $(x_i, \mu(x_i))$ 。

N 个正态云滴 $(x_i, \mu(x_i))$ 的集合就是正态云 X ,

图 2 是用以上算法实现的一维正态云模型, 其中 $E_x=0$, $E_n=1$, $H_e=0.1$, $N=1\ 000$ 。

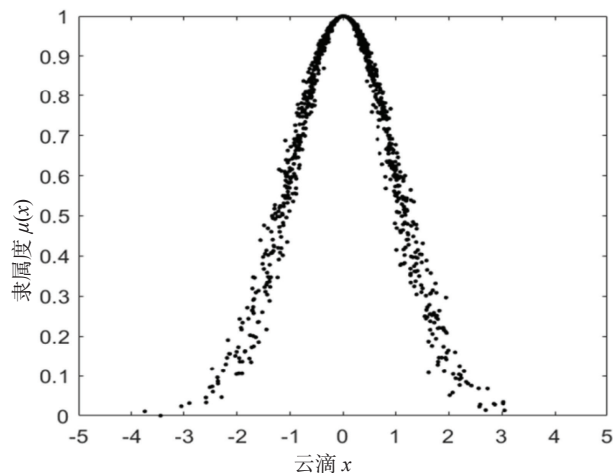


图 2 一维正态云模型

3 评估体系与模型

3.1 确定评估指标层级和量化公式

根据大型海洋试验水池业务开展实际, 通过使用调查问卷的方法, 由业务专家对备选指标进行筛选, 得出准则层 B 有 4 个指标, 方案层 F 有 11 个指标。在基于方案层各指标的量纲不一的情况, 我们在总结业务经验的基础上, 建立方案层指标 $0 \sim 1$ 区间的无量纲量化公式, 并构建海洋试验水池业务能力评估体系, 见表 1。

3.2 确定指标对评价集 V 的模糊关系

评价集是对指标可能结果的集合, 根据各指标对海洋试验水池业务能力的影响, 建立评价集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} = \{\text{优}, \text{良}, \text{中}, \text{劣}, \text{差}\}$, 并构建各指标对评价集的模糊关系矩阵

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{51} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{111} & \cdots & p_{511} \end{bmatrix}, \text{ 其中, } p_{ji} \text{ 表示方案层指标 } f_j$$

对于评价等级 v_j 的隶属度, 且规定 f_i 只对 v_j 及其相邻评价等级存在隶属关系。本文参考心理健康测试的 5 级评分规则, 建立表 2 所示的评价集 V 定性概念和方案层 F 指标量化区间对应关系。

设 y_{ij}^1 和 y_{ij}^2 分别评价等级 v_j 对应指标 f_i 量化值

表 1 海洋试验水池业务能力评估体系

目标层	准则层	方案层	量化公式	说明
海洋试验水池 业务能力 A	软硬件试验状态 b_1	试验水池可用性 f_1 试验装备可靠性 f_2 被试装备可靠性 f_3 集成软件可靠性 f_4	$x=1-\frac{n}{N}$	n 为 N 次试验中因状态异常影响试验的次数
	水池试验熟练程度 b_2	试验硬件熟练度 f_5 试验软件熟练度 f_6 被试装备熟练度 f_7	$x=e^{1-\frac{T}{t}}$	T 为最快 10% 平均 1 次操作时间; t 为多年平均 1 次操作时间
	异常处置能力 b_3	硬件异常处置能力 f_8 软件异常调试能力 f_9	$x=\frac{\sum_{i=1}^{I-1} km_i}{M}$ $\begin{cases} i < I, k=1 \\ i \geq I, k=0 \end{cases}$	M 为异常排除次数; m_i 为不同用时 (i 日) 排除次数; I 为试验周期
	业务人员状态 b_4	人员在位率 f_{10} 思想状态 f_{11}	$x=\frac{m}{M}$	M 为试验标准工位, m 为在位数 M 为民主测评人数, m 为优良数

表 2 评价集 V 定性概念和方案层 指标量化区间对应关系表

评价集	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$
定性概念	优	良	中	差	劣
量化区间	$0.9 \leq x_i \leq 1$	$0.8 \leq x_i < 0.9$	$0.7 \leq x_i < 0.8$	$0.6 \leq x_i < 0.7$	$0 \leq x_i < 0.6$

的左右边界值, y_j 为 v_j 和 v_{j+1} 对应 f_i 量化值的过渡值^[12]。其中, y_j 在 v_j 和 v_{j+1} 的隶属度 p_j 和 p_{j+1} 应无限趋近 0.5, 且对 v_j 是上趋近, 对 v_{j+1} 是下趋近。考虑评价集 V 定性概念“劣”对应的量化区间较大, 可以认为量化值 $x_i \leq 0.3$ 时对于评价集 V 定性概念劣的隶属度为 1, 则其对应关系云模型数字特征 $C(E_x, E_n, H_e)$ 如下:

$$E_x^{ij} = \begin{cases} 0.3, j=1 \\ (y_{ij}^1 + y_{ij}^2)/2, j=2,3,4 \\ 1, j=5 \end{cases} \tag{4}$$

$$E_n^{ij} = \begin{cases} 2|y_{ij}^1 - 1|/2.355, j=1 \\ |y_{ij}^1 - y_{ij}^2|/2.355, j=2,3,4,5 \end{cases} \tag{5}$$

超熵 H_e 的取值与正态云的厚度成正比, 下文 H_e 统一取 0.01。评价等级 V_j 数字特征 $C(E_x, E_n, H_e)$ 具体数值见表 3, 隶属度正态云见图 3, 其中 N 取 2 000。

表 3 评价集 V 数字特征 $C(E_x, E_n, H_e)$ 具体数值表

参数	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
E_x	1	0.85	0.75	0.65	0.3
E_n	0.085	0.042	0.042	0.042	0.255
H_e	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

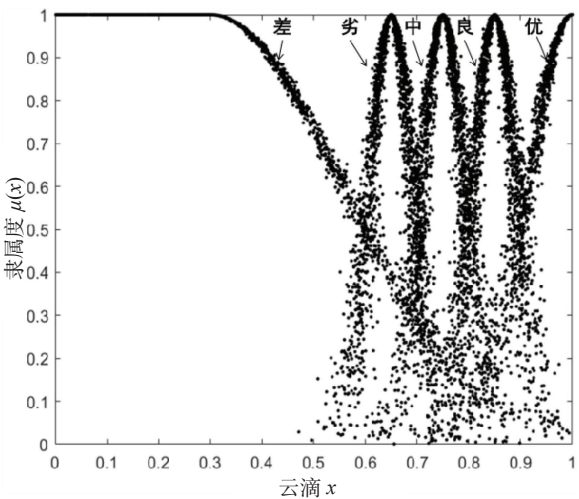


图 3 隶属度正态云

注: v_1 优, v_2 良, v_3 中, v_4 差, v_5 劣, $N=2\ 000$

若干有关联性的正态基云可以融合成为一个综合云,综合云的覆盖范围较基云更广,定性概念更丰富。因此,我们可以利用综合云的概念,计算准则层 B 和方案层 F 指标的综合同评价集 V 的模糊对应关系。根据准则层 B 和方案层 F 指标的性质,方案层 F 指标的综合选用浮动云算法,准则层 B 指标的综合选用综合云算法^[13],则其对应关系云模型数字特征 $C(E_x, E_n, H_e)$ 分别如式(6)和式(7)所示:

$$\begin{cases} E_x = \frac{E_{x1}W_1 + E_{x2}W_2 + \cdots + E_{xm}W_m}{W_1 + W_2 + \cdots + W_m} \\ E_n = \frac{\frac{w_1^2}{w_1 + w_2 + \cdots + w_m} E_{n1} + \frac{w_2^2}{w_1 + w_2 + \cdots + w_m} E_{n2} + \cdots + \frac{w_m^2}{w_1 + w_2 + \cdots + w_m} E_{nm}}{\frac{w_1^2}{w_1 + w_2 + \cdots + w_m} + \frac{w_2^2}{w_1 + w_2 + \cdots + w_m} + \cdots + \frac{w_m^2}{w_1 + w_2 + \cdots + w_m}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} E_x = \frac{E_{x1}E_{n1}W_1 + E_{x2}E_{n2}W_2 + \cdots + E_{xm}E_{nm}W_m}{E_{n1}W_1 + E_{n2}W_2 + \cdots + E_{nm}W_m} \\ E_n = E_{n1}W_1 + E_{n2}W_2 + \cdots + E_{nm}W_m \end{cases} \quad (7)$$

4 仿真分析

4.1 假想案例

某海洋试验水池年底邀请行业内3名技术专家进行业务能力评估,并认定评估达中及以上结果,今年水池业务能力合格。根据综合评估模型业务流程,3名技术专家对准则层 B 和方案层 F 权重重新评估,准则层 B 模糊互判矩阵如下:

$$A = \begin{bmatrix} (0.5, 0.5, 0.5) & (0.3, 0.3, 0.4) & (0.4, 0.3, 0.3) & (0.6, 0.5, 0.5) \\ (0.6, 0.7, 0.7) & (0.5, 0.5, 0.5) & (0.4, 0.5, 0.6) & (0.8, 0.7, 0.7) \\ (0.6, 0.7, 0.7) & (0.4, 0.5, 0.6) & (0.5, 0.5, 0.5) & (0.7, 0.8, 0.8) \\ (0.5, 0.5, 0.4) & (0.3, 0.3, 0.2) & (0.2, 0.2, 0.3) & (0.5, 0.5, 0.5) \end{bmatrix}$$

方案层 F 模糊互判矩阵如下:

$$B_1 = \begin{bmatrix} (0.5, 0.5, 0.5) & (0.2, 0.2, 0.3) & (0.3, 0.2, 0.3) & (0.4, 0.3, 0.4) \\ (0.7, 0.8, 0.8) & (0.5, 0.5, 0.5) & (0.6, 0.5, 0.5) & (0.7, 0.6, 0.6) \\ (0.7, 0.8, 0.7) & (0.5, 0.5, 0.4) & (0.5, 0.5, 0.5) & (0.6, 0.6, 0.6) \\ (0.6, 0.7, 0.6) & (0.4, 0.4, 0.3) & (0.4, 0.4, 0.4) & (0.5, 0.5, 0.5) \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} (0.5, 0.5, 0.5) & (0.7, 0.7, 0.8) & (0.6, 0.5, 0.6) \\ (0.2, 0.3, 0.3) & (0.5, 0.5, 0.5) & (0.4, 0.3, 0.3) \\ (0.4, 0.5, 0.4) & (0.7, 0.7, 0.6) & (0.5, 0.5, 0.5) \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} (0.5, 0.5, 0.5) & (0.6, 0.7, 0.6) \\ (0.6, 0.3, 0.4) & (0.5, 0.5, 0.5) \end{bmatrix}$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} (0.5, 0.5, 0.5) & (0.5, 0.6, 0.6) \\ (0.4, 0.4, 0.5) & (0.5, 0.5, 0.5) \end{bmatrix}$$

方案层 F 指标量化如下: $F = (0.98, 0.95, 0.9, 0.9, 2, 0.85, 0.9, 0.8, 0.78, 0.85, 0.96, 0.9)$ 。

4.2 评估分析

根据第2节给出的计算方法,3名专家对某海洋试验水池各指标模糊互判矩阵的权重和相容性指标如下:

$$\begin{cases} W_A = \begin{bmatrix} 0.233 & 0.300 & 0.267 & 0.200 \\ 0.217 & 0.283 & 0.292 & 0.208 \\ 0.225 & 0.267 & 0.300 & 0.208 \end{bmatrix}, \\ I_A = (0.083, 0.067, 0.073, 0.050, 0.050, 0.075)。 \end{cases}$$

$$\begin{cases} W_{B1} = \begin{bmatrix} 0.200 & 0.300 & 0.267 & 0.233 \\ 0.184 & 0.283 & 0.283 & 0.250 \\ 0.208 & 0.275 & 0.275 & 0.242 \end{bmatrix}, \\ I_{B1} = (0.088, 0.086, 0.061, 0.053, 0.040, 0.038)。 \end{cases}$$

$$\begin{cases} W_{B2} = \begin{bmatrix} 0.383 & 0.284 & 0.333 \\ 0.367 & 0.266 & 0.367 \\ 0.400 & 0.250 & 0.350 \end{bmatrix}, \\ I_{B2} = (0.056, 0.054, 0.082, 0.044, 0.044, 0.044)。 \end{cases}$$

$$\begin{cases} W_{B3} = \begin{bmatrix} 0.550 & 0.600 & 0.550 \\ 0.450 & 0.400 & 0.450 \end{bmatrix}, \\ I_{B3} = (0.025, 0.050, 0.025, 0.050, 0.050, 0.000)。 \end{cases}$$

$$\begin{cases} W_{B4} = \begin{bmatrix} 0.500 & 0.550 & 0.550 \\ 0.500 & 0.450 & 0.450 \end{bmatrix}, \\ I_{B4} = (0.001, 0.033, 0.041, 0.067, 0.017, 0.050)。 \end{cases}$$

其中,相容性指标 $I_A, I_{B1}, I_{B2}, I_{B3}, I_{B4}$ 数值小于0.1通过一致性检验,各指标的权重可以由3名专家给出的模糊互判矩阵的权重加权平均得出:

$$\begin{aligned} \bar{W}_A &= (0.225, 0.283, 0.287, 0.205), \bar{W}_{B1} = (0.197, \\ &0.286, 0.275, 0.242), \bar{W}_{B2} = (0.383, 0.267, 0.350), \\ \bar{W}_{B3} &= (0.567, 0.433), \bar{W}_{B4} = (0.533, 0.467)。 \end{aligned}$$

基于篇幅问题,本文以软硬件试验状态 b_1 为例分析隶属度计算方法。首先,根据第3节给出的计算方法,设 F_{b1} 为软硬件试验状态 b_1 对应方案层 F 指标量化,其中, $F_{b1} = (f_1, f_2, f_3, f_4) = (0.98, 0.95, 0.9, 0.92)$ 。

在云模型理论中, F_{b1} 对于评价集 V 各的隶属度是离散点,可以用所有云滴的平均隶属度作为对应隶属度值。设 p_{b1} 为软硬件试验状态 b_1 对应方案层 F 指标隶属度矩阵,根据云模型理论可得:

$$p_{b1} = \begin{pmatrix} 0.972 & 0.021 & 0 & 0 & 0.029 \\ 0.834 & 0.079 & 0.001 & 0 & 0.040 \\ 0.493 & 0.477 & 0.009 & 0 & 0.063 \\ 0.634 & 0.257 & 0.003 & 0 & 0.053 \end{pmatrix},$$

设 $v_{b1} = \overline{W}_{b1} \times p_{b1}$ 为软硬件试验状态 b_1 对评价集 V 的隶属度,可算出 $v_{b1} = (0.719, 0.220, 0.003, 0.000, 0.047)$,再根据式(6)的浮动云算法,其云模型(图4)的数字特征 $C_{b1}(E_x, E_n, H_e) = (0.935, 0.085, 0.01)$ 。

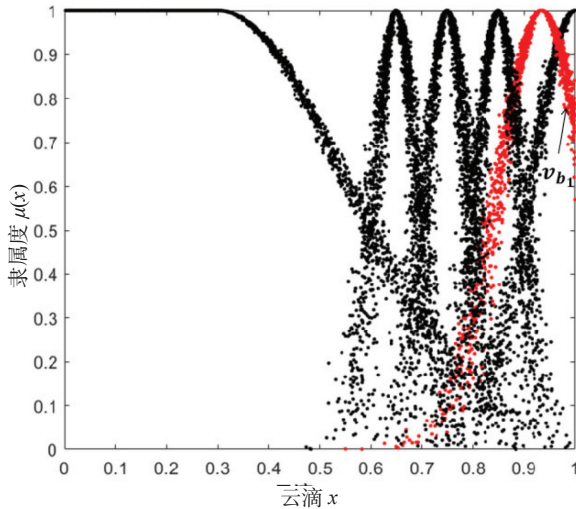


图4 软硬件试验状态 v_{b1} 正态云特征(红色云)

根据 V_{b1} 结果显示,软硬件试验状态 b_1 对评价集 V 定性评价优的隶属度最大为 0.719,再结合图3中软硬件试验状态 b_1 的浮动云模型基本元素大部分落于优良偏优区域,因此可以判定软硬件试验状态 b_1 评估为优。

同理,求出水池试验熟练程度 b_2 、异常处置能力 b_3 和业务人员状态 b_4 的对评价集 V 的隶属度及云模型数字特征(云特征图略)如下:

$$V_{b2} = (0.238, 0.670, 0.195, 0.003, 0.106), \\ C_{b2}(E_x, E_n, H_e) = (0.846, 0.051, 0.01);$$

$$V_{b3} = (0.115, 0.572, 0.455, 0.013, 0.139), \\ C_{b3}(E_x, E_n, H_e) = (0.810, 0.042, 0.01);$$

$$V_{b4} = (0.707, 0.245, 0.004, 0.000, 0.049), \\ C_{b4}(E_x, E_n, H_e) = (0.932, 0.085, 0.01);$$

据此,水池试验熟练程度 b_2 评估为良,异常处置能力 b_3 评估为良,业务人员状态 b_4 评估为优。对于海洋试验水池业务能力 A , 设 p_A 为其对准则层 B 指标隶属度矩阵,根据上文求出的 v_{b1} , v_{b2} , v_{b3} , v_{b4} 可知:

$$p_A = (v_{b1}, v_{b2}, v_{b3}, v_{b4}) = \begin{pmatrix} 0.719 & 0.220 & 0.003 & 0 & 0.047 \\ 0.238 & 0.670 & 0.195 & 0.003 & 0.106 \\ 0.115 & 0.572 & 0.455 & 0.013 & 0.139 \\ 0.707 & 0.245 & 0.004 & 0 & 0.049 \end{pmatrix}$$

根据,可知 $v_A = \overline{W}_A \times p_A = (0.407, 0.454, 0.187, 0.004, 0.091)$,再结合根据式(7)的综合云算法,海洋试验水池业务能力 A 的云模型(图5)数字特征 $C_A(E_x, E_n, H_e) = (0.890, 0.063, 0.01)$ 。

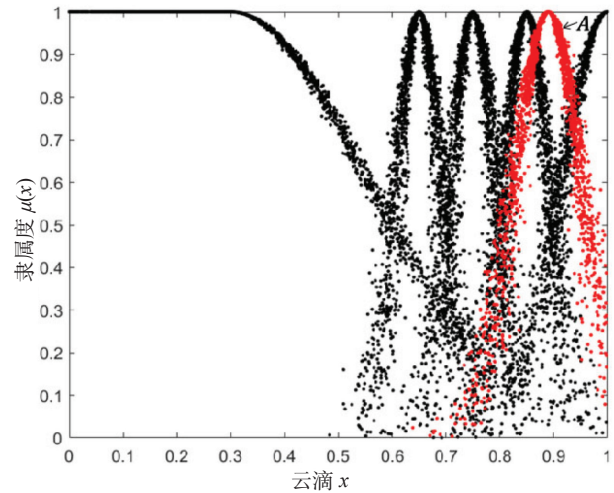


图5 海洋试验水池业务能力 A 正态云特征(红色云)

据此,海洋试验水池业务能力 A 对评价集 V 定性评价良的隶属度最大为 0.454,结合图5中海洋试验水池业务能力 A 的浮动云模型基本元素大部分落于良区域,某海洋试验水池业务能力 A 评估为良。

根据上述某海洋试验水池年底进行业务能力评估特征,可给出如下决策建议:一是某海洋试验水池年底评估结果为良,该年水池业务能力合格;二是软硬件试验状态 b_1 和业务人员状态 b_4 评估为优,说明该年单位软硬件设备自身状态和业务人员精神状态保持较好;三是水池试验熟练程度 b_2 和异常处置能力 b_3 评估为良,说明该年业务人员在试验中试验硬件、被试装备的熟练操作能力,以及试验软硬件异常情况处置能力上相对偏弱,其中被试装备熟练操作能力和试验硬件异常情况处置能力得分较低。因此,可以通过采用增加被试装备业务训练力度和提高试验硬件维修能力等方式,有效的加强该海洋试验水池业务能力。

5 结论

开展海洋试验水池业务能力综合评估方面的研究有利于我们开展水池维修保养和升级改造,保持水池的先进性和可用性。本文通过考虑了人活动的模糊性,构建了基于FAHP—正态云理论的海洋试验水池业务能力综合评估模型框架,并通过详细分析海洋试验水池业务能力,构造了该评估系统评估指标体系,最后使用仿真实验验证了该方法的可行性和有效性,为更加经济高效的利用水池开展海洋研究实验提供了新的思路和方法。

本文有以下创新点:一是构建了海洋试验水池业务能力综合评估模型框架;二是将模糊评估的思想应用于海洋试验水池业务能力综合评估;三是构造了该评估系统评估指标层级和评估模型。目前,研究工作主要针对海洋试验水池业务能力基本要素进行研究分析,下一步,研究方面将考虑增加投入产出比、实验室专家实力等更适用于多个试验水池横向评估的指标内容,进一步增强评估模型的可扩展性,并利用Visual Studio软件完成海洋试验水池业务能力综合评估系统的开发,以及通过收集海洋试验水池业务应用资料,对该系统和算法进行优化。

参考文献:

- [1] Baolan Wu, Xiaopei Lin, Lisan Yu. North Pacific subtropical mode water is controlled by the Atlantic multidecadal variability[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(3): 238-243.
- [2] 郑崇伟, 高成志, 高悦. “21世纪海上丝绸之路”波浪能的气候特征及变化趋势[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1487-1493.
- [3] 杨松林, 杨大明. 一种拖曳深水池综合技术性能评优方法[J]. 造船技术, 2003(6): 27-30, 26.
- [4] 李广年, 吴卫国, 谢永和, 等. 竖轴潮流能水轮机水动力性能水池试验分析[J]. 中国造船, 2014, 55(1): 143-148.
- [5] 周庆伟, 张松, 汪小勇, 等. 声学多普勒剖面流速仪检测方法探讨[J]. 海洋技术学报, 2016, 35(4): 31-35.
- [6] 郭媛媛. 气泡群激光后向散射特性水池试验研究[C]//2016年中国造船工程学会水中目标特性学组学术交流会议论文集. 大连: 中国船舶重工集团公司第七六〇研究所, 2016: 88-90.
- [7] 姬东朝, 宋笔锋, 喻天翔. 基于模糊层次分析法的决策方法及其应用[J]. 火力与指挥控制, 2007(11): 38-41.
- [8] 徐泽水. 模糊互补判断矩阵的相容性及一致性研究[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2002(2): 94-96.
- [9] 刘常昱, 李德毅, 潘莉莉. 基于云模型的不确定性知识表示[J]. 计算机工程与应用, 2004(2): 32-35.
- [10] 丁欣, 谢祥俊, 赵春兰, 等. 基于动态隶属度的模糊时间序列在我国居民消费水平预测上的应用[J]. 模糊系统与数学, 2019, 33(1): 164-174.
- [11] 刘桂花, 宋承祥, 刘弘. 云发生器的软件实现[J]. 计算机应用研究, 2007(1): 46-48.
- [12] 张杨, 严金明, 江平, 等. 基于正态云模型的湖北省土地资源生态安全评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 252-258.
- [13] 宋晨阳, 张韧. 基于犹豫层次分析和云模型的我国沿海军港气候变化影响与风险评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2016, 30(2): 75-80.

Research on the Comprehensive Assessment Model for the Operational Capacity of Ocean Test Pool Based on the FAHP-Normal Cloud Theory

YIN Xi-fan^{1,3}, SI Zhi-tao², LI Xin³, LIN De-xin⁴, XIA Wen-jie¹, YANG Xin-chen¹

1. *National Ocean Technology Center Zhangzhou Base Preparatory Office, Xiamen 361001, China;*

2. *Maritime Environmental Construction Office, Staff Department of PLA Navy Headquarter, Beijing 100089, China;*

3. *College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 210001, China;*

4. *Troop 92101 of People's Liberation Army, Fuzhou 350007, China*

Abstract: The Ocean Test Pool has a high cost, and its design life is long. Regular operational capacity assessment and targeted pool maintenance and upgrading can effectively maintain the advanced and usability of the Pool. In this paper, by considering the fuzziness of human brain activities, researchers design a comprehensive evaluation model framework of the Ocean Test Pool business capacity, which is based on the Fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) - normal Cloud theory. Through detailed analysis of the Ocean Test Pool operational capacity, it achieves the construction of evaluation index system and evaluation model. Finally, the feasibility and effectiveness of the method are verified by simulation experiments, which provide a new idea and method for more cost-effective use of the pool for marine research experiments.

Keywords: ocean test pool; operational capacity; comprehensive evaluation model; FAHP; normal cloud model