

doi: 10.7690/bgzdh.2024.04.018

## 基于云模型的船舶综合船桥建造质量风险评估方法

芦奇, 李启军, 戴荣, 夏铭禹

(中国人民解放军 92942 部队, 北京 100161)

**摘要:** 为掌握综合船桥的建造质量风险, 提出一种基于云模型的综合评估方法。综合运用云模型发生器、合并云算法、多属性评估方法, 解决船舶综合船桥建造质量风险评估过程中定性描述与定量综合计算的问题; 以某民用船舶为例, 对该船舶综合船桥建造质量风险进行评估。结果表明: 该评估模型能融合主、客观信息, 为综合船桥的建造质量风险提供一种有效的评估方法。

**关键词:** 云模型; 综合船桥; 质量风险评估

**中图分类号:** U673.2 **文献标志码:** A

## Risk Assessment Method for Construction Quality of Ship Integrated Bridge Based on Cloud Model

Lu Qi, Li Qijun, Dai Rong, Xia Mingyu

(No. 92942 Unit of PLA, Beijing 100161, China)

**Abstract:** In order to master the construction quality risk of integrated bridge, a comprehensive evaluation method based on cloud model is proposed. Cloud model generator, merged cloud algorithm and multi-attribute assessment method are used to solve the problem of qualitative description and quantitative calculation in the process of quality risk assessment of ship integrated bridge construction. Taking a civil ship as an example, the quality risk assessment of ship integrated bridge construction is carried out. The results show that the assessment model can integrate subjective and objective information, and provide an effective assessment method for the construction quality risk of the integrated bridge.

**Keywords:** cloud model; integrated bridge; quality risk assessment

### 0 引言

综合船桥系统(integrated bridge system, IBS)是一种典型的综合船舶电子装备,综合利用计算机、现代控制技术、信息处理技术、人工智能技术实现船舶航行的自动化、安全化和经济化。船桥综合系统将之前独立的导航系统、操作控制系统和雷达避碰系统通过总线网络有机地整合起来,具备自动操船、自动避碰、可视化较强的图形界面、通信预警等自动化功能。

船舶电子装备系统含有的运行模块多,运行机制复杂,船上装备数量经过统计,电子装备数量比其他装备数量的总和还多。综合船桥的研制过程极其复杂,具有不确定因素多、新技术应用程度高、资金投入大、利润回报周期长和研制要求高等特点,对综合船桥研制质量的研究非常迫切。

作为当前在质量管理领域重要的一种管理逻辑和措施,风险管理的作用还显现不足,在应用过程中存在痛点:首先是管理对象不能聚焦、管理控制因素颗粒度较大、评估方法系统性差以及风险管理

的结果无法令人满意。特别是在模型构建、计算结果分析以及风险评估方面,理论和方法都还没有系统化,无法满足当前研究的现实需求。当前以六西格玛管理为代表的精细化趋势在船舶建造行业迅速发展,质量管理在成本、进度、通用质量特性方面需要突破的领域还很多,亟需开展船舶综合船桥建造质量风险评估与模型构建研究工作<sup>[1]</sup>。

目前对综合船桥建造的质量风险评估还未建立有效的评估方法。通常将熵权模糊综合评估法、质量功能展开法、失效模式与效应分析、贝叶斯网络等应用在综合船桥建造质量风险的评估领域,但在评估过程中,许多指标无法用精确的函数表达式进行数学表达,或者其数值是数学区间中一个不确定的数值,即指标对应的数值是灰色、模糊的,使用传统评估方法计算出的结果往往不准确。怎样能够表达和计算这些模糊信息,是综合船桥建造质量风险评估亟需解决的问题。笔者以云模型理论为基础,把日常语义中表征对象形象化描述的模糊性和任意性相结合,克服形象化描述概念和数字化表征

收稿日期: 2023-12-13; 修回日期: 2024-01-15

第一作者: 芦奇(1987—),男,山西人,硕士。

概念难以统一的缺陷，提高了反映评估指标的客观性<sup>[2]</sup>。

## 1 综合船桥建造质量风险评估体系

### 1.1 指标体系构建

评估指标的波动幅度与质量风险大小之间的关系，是构建综合船桥建造质量风险评估体系的核心，评估指标应该具有以下特性：1) 能够完整涵盖影响质量风险的主要因素；2) 影响质量风险的因素尽可能减少主观因素的影响；3) 指标的选取要符合科学性。质量风险评估指标体系的构建是一个由具体评估问题出发，抽象为宏观评估模型作为解决方案，再具体细化为评估指标体系的过程，是对综合船桥建造质量风险特点不断向细致方向进行梳理和提炼的过程。同时，指标体系的构建也是循环运动的过程，需要经过不断修改和完善。

### 1.2 指标体系的建立

具体分析综合船桥的研制过程，得到较多指标，笔者研究的核心是综合船桥的建造质量风险。根据大质量观的理念，建立在内在质量、外在质量、服务质量上的大质量观，是从系统、整体和综合的角度进行质量管理，工程质量、工程造价、工程进度是建设工程的 3 大目标；因此，笔者构建的指标体系将成本和进度作为主要因素考虑进来，功能特性体现了服务质量的实现程度。综上，为客观全面地反映船舶综合船桥建造质量风险，考虑到模型输入数据的获得是否便捷，指标选取要符合科学、完整、容易实践及系统的原则，从综合船桥建造的成本、进度、质量特性层面和功能实现层面出发，分别选取成本、进度、通用质量特性、功能特性作为评估体系的准则层指标。以进度为例，通过分析直接决定准则层指标情况的各种因素，构建指标层体系，针对进度风险，器材到位情况直接决定了建造工程的各项环节是否会窝工，进而造成进度拖期。目前，全球船舶建造供应链受到国际国内疫情、贸易限制、俄乌冲突等现实因素影响，元器件采购延误风险在影响进度的因素中成为一项十分重要的因素；进度控制计划评审情况决定了编制的计划是否需要调整及能否按时开展，进而影响到工程进度的控制。因此，将器材到位情况、元器件采购延误风险、进度控制计划评审作为进度的指标层指标。

综合船桥建造质量风险评估指标体系如表 1 所示。

表 1 综合船桥建造质量风险评估指标体系

| 目标层              | 准则层    | 指标层           |
|------------------|--------|---------------|
| 船舶综合船桥<br>建造质量风险 | 成本     | 元器件价格浮动风险     |
|                  |        | 研发成本          |
|                  |        | 生产设备引进和维修成本   |
|                  | 进度     | 器材到位情况        |
|                  |        | 元器件采购延误风险     |
|                  |        | 进度控制计划评审      |
|                  | 通用质量特性 | 生产设备情况        |
|                  |        | 工程师的现场指导能力    |
|                  |        | 不合格品隔离情况      |
|                  |        | 电磁骚扰源分析情况     |
|                  |        | 电磁兼容性设计人员分析能力 |
|                  |        | 采用的新技术成熟度     |
|                  | 功能特性   | 技术的创新度        |
|                  |        | 顾客要求识别情况      |
|                  |        | 需求分析明确情况      |
| 校验设备数量充足情况       |        |               |
| 试验的充分性           |        |               |

## 2 云模型理论

### 2.1 云模型

#### 2.1.1 云模型的定义

云模型是由李德毅等提出的一种认知模型，其区别于传统模型的特点：形象化描述概念与数字化表征概念可以相互转换，利用概率论与模糊数学作为工具，数字特征将任意性和模糊性相结合。

设  $U$  为数域空间中 1 个定量论域， $A$  为论域  $U$  上的形象化描述概念，随机元素  $x \in U$  为形象化描述概念  $C$  上的 1 次随机具体响应； $x$  对  $A$  所表示的确定度  $\mu_a(x) \in [0,1] \in U$  为波动率较小的正态分布的不确定数，确定度在论域  $U$  上的分布元组称为云模型，简称云， $\mu_a(x)$  称为云滴确定度；每一个数据元组  $(x, \mu(x_i))$  称为 1 个云滴，即：

$$\mu_a(x): U \rightarrow [0,1], \forall x \in U, x \rightarrow \mu_a(x) \quad (1)$$

#### 2.1.2 云模型数字特征

云滴的定量数据  $x$  在论域上的分布称为云分布，记为  $X \sim C(x|E_x, E_n, E_e)$ ；云模型的数字特征  $E_x, E_n, H_e$  分别为期望、熵、超熵来表征，即  $(E_x, E_n, E_e)$ ，反映定性概念宏观上的定量性质。图 1 为云模型高斯云图，其中：期望  $E_x$  为论域空间的点，是概念在论域中的中心点，代表量化的典型样本点或形象化描述概念的能力比较强；熵  $E_n$  反映形象化描述概念的灰度，即可以度量的程度，针对随机性，熵与正态分布的方差共同描述云滴的离散程度熵越大，表示这个定性概念越模糊，越接近于宏观； $H_e$  为熵的不确定性度量，也可称为熵的二阶运算结果，

代表定性概念值样本出现的随机性，反映云滴的离散程度，将模糊性和随机性联系起来，超熵的大小间接表示了云的厚度，超熵越大，云的厚度越大。

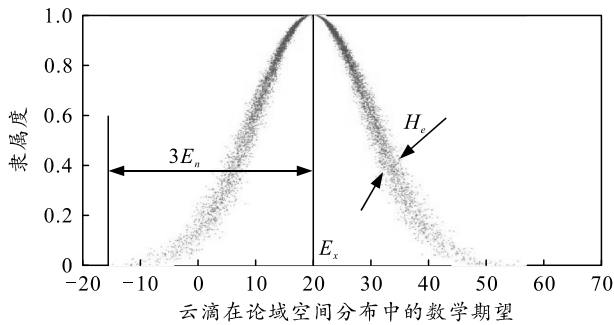


图 1 云模型高斯云图

云模型的特点是允许模糊的隶属度表达，用上文中 3 个数字特征表示概念的模糊性，通过综合计算实现形象化描述概念和数字化表征概念的模糊变换，同时完成模糊性和随机性的集成。

2.1.3 云发生器

云发生器可分为正向云发生器和逆向云发生器。

1) 正向云发生器。

云数字特征是已知条件，正向云发生器处理后生成云滴，将形象化描述概念转化为数字化表征概念的数值。图 2 中 CG 表示正向云发生器，Drop(x, y) 表示云滴。

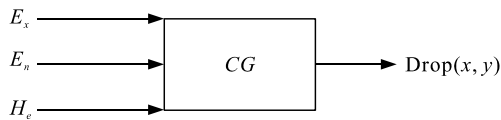


图 2 正向云发生器

具体计算步骤如下：

① 根据云的数字特征( $E_x, E_n, H_e$ )，生成期望为  $E_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 、标准差为  $H_e = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$  的正态随机数  $E'_n$ 。

② 生成一个期望为  $E_x$ ，标准差为  $|E_n|$  的正态随机数  $x$ ， $x$  为论域空间的一个云滴。

③ 计算  $x$  的确定度  $\mu$ ：

$$\mu = \exp[-(x - E_x)^2 / (2E'_n)^2] \tag{2}$$

④ 重复步骤①—③，直至生成  $n$  个云滴。

2) 逆向云发生器。

逆向云发生器(如图 3)是通过获得的一定数量的云滴样本来描述 1 维云的数字特征，能从混沌的云团中提出关键元素( $E_x, E_n, H_e$ )，可实现将数字化表征概念数据转化为形象化描述概念的目的。图 3 中  $CG^{-1}$  表示逆向云发生器<sup>[3-4]</sup>。

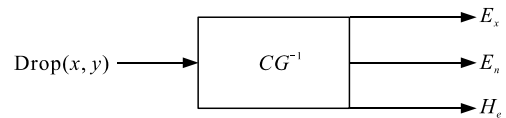


图 3 逆向云发生器

逆向云发生器的算法如下：

计算云滴的期望值  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$  如下：

$$E_x = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \tag{3}$$

$$E_n = \sqrt{\pi/2} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - E_x| \tag{4}$$

$$H_e = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 - E_n^2} \tag{5}$$

2.2 确定指标权重

在评估类模型中涉及到的指标权重计算方法多样，如层次分析法、最小二乘法、熵值法等。上述方法各有优点，为最大程度减少主观因素的影响，选取排队理论作为指标的权重确定方法，排队等级是对指标按其重要程度所作的一个排列，这里用以下公式确定权重：

$$w_i = \begin{cases} 0.5 + \sqrt{-2 \ln(2 - (i-1)/n)} / 6, & 1 < i \leq (n+1)/2 \\ 0.5 - \sqrt{-2 \ln(2 - 2(i-1)/n)} / 6, & (n+1)/2 < i \leq n \end{cases} \tag{6}$$

式中： $n$  为指标的个数； $i$  为排队等级。将各指标按照重要程度依次排序，排队等级可以相同，意味着 2 个指标具有一样的重要程度，最后将  $w_i$  归一化处理即可得到权重  $W_i$ <sup>[5-7]</sup>。

3 综合船桥建造质量风险评估步骤

结合综合船桥建造质量风险的特点和云发生器、云算法等理论，得出综合船桥建造质量风险评估流程如图 4 所示。

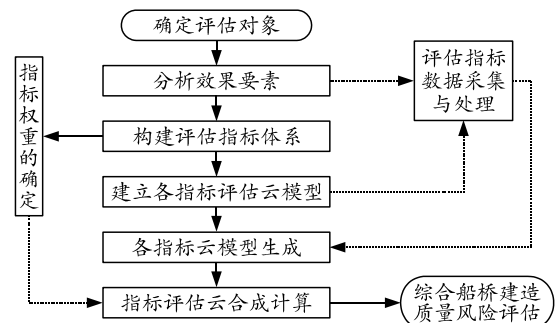


图 4 综合船桥建造质量风险评估流程

根据云模型原理，将整个船舶综合船桥建造质量风险评估指标体系作为一个论域，云滴可抽象理解为是每一位专家，专家团对指标评估综合结果所形成的云团整体特征即反映了船舶评估的结果，据

此对船舶综合船桥建造质量风险评估方法流程设计如下:

1) 确定因素集。已建立的建造质量风险评估指标体系共包含 4 个维度 17 个指标如表 1 所示。

2) 确定评估集和评估云。

评估集为评估过程中各个形象化描述评语属性所形成的集合, 如果实际评估中有  $g$  个不同程度的评估形象化描述评语, 则评估集  $P$  的表示形式为  $P=[P_1, P_2, \dots, P_g]$ 。式中  $P_g$  对应  $g$  个描述性语气强烈不同的形象化描述评语。

如果定性评估的下限和上限分别为  $l_{\min}$ 、 $l_{\max}$ , 根据其两边约束的评语范围来计算评估集中每个指标的云数字特征, 并利用正向云发生器求得评估云, 形成正态准则云图, 将灰色的评估集转化为实际的评估准则, 云数字特征的计算过程为:

$$\left. \begin{aligned} E_x &= (l_{\max} + l_{\min})/2 \\ E_n &= (l_{\max} - l_{\min})/6 \\ H_e &= k \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中  $k$  为根据模糊程度而确定的常量, 本文中取值为 0.3。

3) 确定权重集。

根据排队法计算因素集内各个指标权重, 并得出各维度的权重和各指标在对应所属维度内的权重, 最终得到整个指标体系权重集  $W$ , 各指标权重分别为  $w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{21}, \dots, w_{44}$ 。

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= w_{11} + w_{12} + w_{13} \\ w_2 &= w_{21} + w_{22} + w_{23} \\ w_3 &= w_{31} + w_{32} + w_{33} + w_{34} + w_{35} + w_{36} + w_{37} \\ w_4 &= w_{41} + w_{42} + w_{43} + w_{44} \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

$$w'_1 = \frac{w_{11}}{w_1}, w'_2 = \frac{w_{12}}{w_1}, w'_3 = \frac{w_{13}}{w_1}, \dots, w'_{44} = \frac{w_{44}}{w_4}; \quad (9)$$

$$W = [w_1, w_2, w_3, w_4] = [w'_1, w'_2, \dots, w'_{44}]. \quad (10)$$

4) 确定评估结果云。

以实际调查数据来计算各指标实际的云数字特征, 利用逆向云发生器, 生成指标集的对云参数矩阵  $Z$  如下:

$$Z = \begin{bmatrix} y_{11} \\ y_{12} \\ \vdots \\ y_{44} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{x11} & E_{n11} & H_{e11} \\ E_{x12} & E_{n12} & H_{e12} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ E_{x44} & E_{n44} & H_{e44} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

根据求得的权重集  $W$  和指标云参数矩阵  $Z$ , 船舶综合船桥建造质量风险评估的结果云模型表

述为:

$$Y=W \times Z. \quad (12)$$

根据云模型的运算规则结合模糊运算规律, 计算出各维度的评估云和整体船舶评估的综合评估云。

综合船桥质量风险评估可视为一种虚拟云。虚拟云对各个基础云的数字特征进行计算, 输出的计算结果即为新构建的云所对应的数字特征。

综合评估云特征值的具体计算如下:

$$Y=(E_x, E_n, H_e); \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \sum_{i=1}^m E_{x_i} w_i / \sum_{i=1}^m w_i \\ E_n &= (\sum_{i=1}^m E_{n_i}^2)^{0.5} / m \\ H_e &= \sum_{i=1}^m H_{e_i} E_{n_i} w_i / \sum_{i=1}^m E_{n_i} w_i \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

5) 比较与评估结果确定。

正向云发生器将综合评估云模型生成正态云, 根据正态云在准则云图中所处的云图范围和形态, 可判断出相应的评估结果。正向云发生器在该步骤的流程机理是将综合评估云模型转化为正态云, 经过与评估准则云图进行匹配, 依据正态云在评估准则云图中的范围和形状得出评估结果<sup>[8]</sup>。

本文中仿真过程是将综合评估云特征值利用 Matlab 生成云图, 与建立的准则云进行对比, 可得到所评估综合船桥建造质量风险的综合情况。

### 4 算例计算分析

根据表 1 所示的指标体系和评估流程, 重点对通用质量特性进行评估计算, 其他 3 项指标评估方法与其一致。

#### 4.1 各指标评估云模型建立

参照船舶综合船桥建造质量风险评估的各项指标性质, 评估等级和对应的分值分别为: 弱[0, 45]、较弱(45, 63]、一般(63, 83]、较强(83, 91]、强(91, 100]。根据式(7)分别计算出各等级云参数, 准则云如图 5 所示。

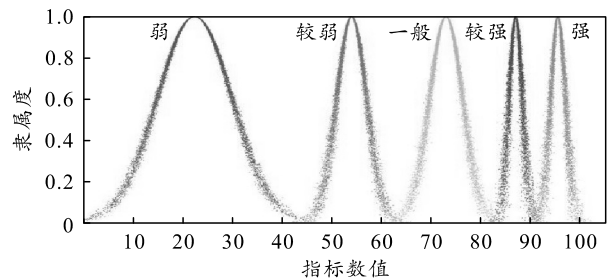


图 5 各评估等级准则云图

### 4.2 评估指标数据采集与处理

邀请 10 名专家对某船舶综合船桥建造质量状态进行定性评估。考虑到质量状态的影响因素较多及篇幅所限，此处以通用质量特性为例，其余一级指标可采用相同方法完成评估。抽取的样本容量越大，评估结果的准确性越高，所以在  $n$  种状态中抽取 100 种状态<sup>[9]</sup>，如表 2 所示。

根据式(3)一(5)分别计算出电磁兼容性设计人员分析能力、电磁骚扰源分析情况、采用的新技术成熟度、技术的创新度、工程师的现场指导能力、

生产设备情况、不合格品隔离情况的实际云特征参数数值分别为：(35.20, 4.20, 0.12)，(42.30, 5.20, 0.14)，(53.20, 6.40, 0.21)，(61.30, 7.30, 0.33)，(66.90, 8.40, 0.36)，(75.40, 9.20, 0.26)，(88.30, 9.80, 0.44)，评估云图如图 6 所示。

### 4.3 指标权重确定

使用式(6)对电磁兼容性设计人员分析能力、电磁骚扰源分析情况、采用的新技术成熟度、技术的创新度、工程师的现场指导能力、生产设备情况、不合格品隔离情况进行权重计算，其结果如表 3 所示。

表 2 评估体系指标状态

| 序号  | 生产设备情况 | 工程师的现场指导能力 | 不合格品隔离情况 | 电磁骚扰源分析情况 | 电磁兼容性设计人员分析能力 | 采用的新技术成熟度 | 技术的创新度 |
|-----|--------|------------|----------|-----------|---------------|-----------|--------|
| 1   | 76.8   | 66.2       | 89.1     | 43.5      | 30.2          | 59.6      | 62.3   |
| 2   | 74.2   | 69.2       | 90.2     | 49.1      | 36.8          | 51.7      | 66.4   |
| 3   | 69.8   | 61.0       | 87.6     | 39.1      | 34.1          | 52.4      | 67.2   |
| ⋮   | ⋮      | ⋮          | ⋮        | ⋮         | ⋮             | ⋮         | ⋮      |
| 100 | 75.3   | 70.4       | 81.1     | 42.7      | 37.4          | 55.8      | 59.8   |

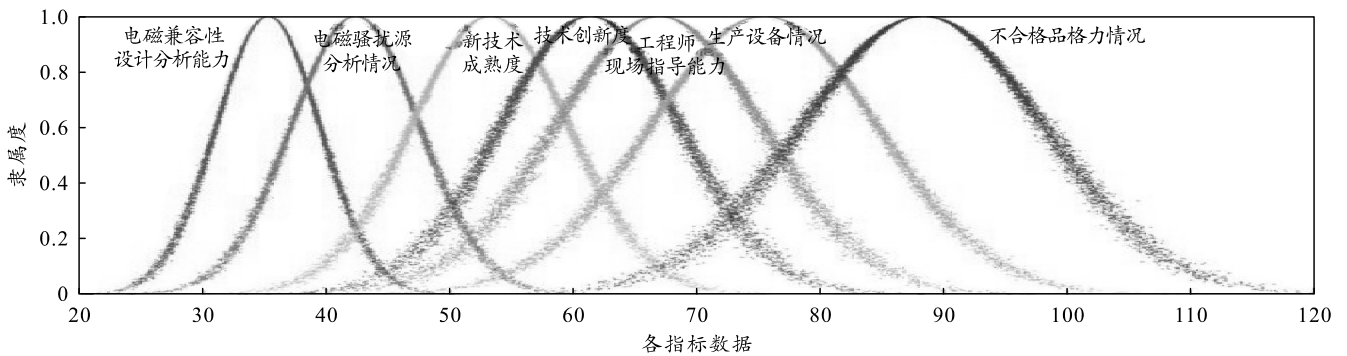


图 6 各指标评估云图

表 3 各指标的排队等级及权重值

| 指标    | 生产设备情况 | 工程师的现场指导能力 | 不合格品隔离情况 | 电磁骚扰源分析情况 | 电磁兼容性设计人员分析能力 | 采用的新技术成熟度 | 技术的创新度 |
|-------|--------|------------|----------|-----------|---------------|-----------|--------|
| 排队等级  | 1      | 2          | 3        | 4         | 5             | 6         | 7      |
| $w_i$ | 1.000  | 0.764      | 0.676    | 0.593     | 0.407         | 0.324     | 0.236  |
| $W_i$ | 0.250  | 0.191      | 0.169    | 0.148     | 0.102         | 0.081     | 0.059  |

根据式(13)和(14)得到通用质量特性的云参数为：

$$\left. \begin{aligned} E_x &= \sum_{i=1}^m E_{x_i} w_i / \sum_{i=1}^m w_i = 64.325 \\ E_n &= \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m E_{n_i}^2 \right)^{1/2} = 2.822 \\ H_e &= \sum_{i=1}^m H_{e_i} E_{n_i} w_i / \sum_{i=1}^m E_{n_i} w_i = 0.300 \end{aligned} \right\} .$$

### 4.4 指标评估效果

将 4.3 节中得到的通用质量特性云特征参数在

准则云模型中进行相似度匹配，可得到通用质量特性与“较弱”“一般”的中间值匹配度最高，匹配云图如图 7 所示。由此图可以得出结论，通用质量特性等级介于较弱与一般之间。

## 5 结束语

在以往对综合船桥建造质量风险等级评估中，指标计算过程的主观性较强，对评估对象需要反映的概念无法实现客观的区别；针对精确的隶属函数表达式结果非此即彼，导致评估对象指标情况模糊时不适用，笔者采用的云理论克服了以上缺点。同

时, 结合多属性评估方法对数据进行合理计算, 各个属性的数字特征均达到量化, 建立了形象化描述概念与数字化表征计算转换的通道。通过实例证

明, 利用云模型能真实反映综合船桥建造质量风险情况, 使评估结果更加客观、真实, 为综合船桥建造质量风险评估的应用提供了一种方法。

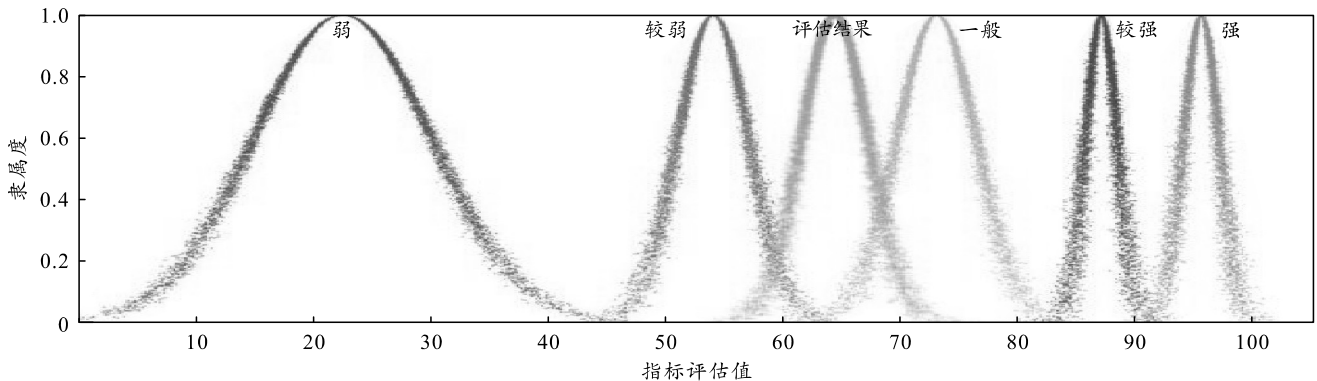


图 7 评估结果匹配

参考文献:

[1] 张子剑, 李能鹏, 潘洪菊, 等. 船舶电子装备研制质量风险建模与评价方法[J]. 船舶工程, 2020, 42(S1): 385-392.

[2] 范阳涛, 汪民乐, 朱亚红, 等. 基于云模型的信息化条件下军事训练效果研究[J]. 现代防御技术, 2015, 43(2): 11-16.

[3] 吴邗君, 王晓峰, 陈中, 等. 基于云模型的配电网抢修质量和效率评价方法[J]. 广东电力, 2020, 33(1): 77-85.

[4] 黄仁东, 黄思宇. 基于云模型的城市居民公共安全教育评价[J]. 科技促进发展, 2021, 17(7): 1303-1310.

[5] 于延君, 王耀辉, 毛荣欣. 基于信息系统的炮兵指挥信息能力评估研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(7): 37-39.

[6] 千代武, 焦利明. 向量相似度在指挥自动化系统效能评估中的应用[J]. 电光与控制, 2007(5): 106-109, 116.

[7] 汪江鹏, 汪民乐, 邓力源, 等. 陆军轻型合成营高原山地进攻特战能力评估[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(11): 118-122.

[8] 李林波, 郭晓凡, 傅佳楠, 等. 基于云模型的城市轨道交通乘客满意度评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 378-385.

[9] 李洪峰, 冯传茂, 杨和梅, 等. 基于云重心评判法的炮兵指挥训练水平评估[J]. 指挥控制与仿真, 2007(4): 90-92.

\*\*\*\*\*

(上接第 86 页)

参考文献:

[1] 马晶, 韩明磊, 刘鹏. 基于马赛克战的海战场技术体系发展研究[J]. 火力与指挥控制, 2021, 46(12): 178-184.

[2] 向南, 豆亚杰, 姜江, 等. 马赛克战概念下作战模块应急重构自主决策[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(3): 223-228.

[3] 吴新峰, 顾鑫, 陆婷婷, 等. 一种基于马赛克战理念的协同作战系统设计—方案设想及关键技术探索[J]. 指挥与控制学报, 2020, 6(3): 278-283.

[4] 郑明, 刘冠邦, 张昕, 等. 美军时敏目标杀伤链[J]. 指挥信息系统与技术, 2020, 11(2): 59-63.

[5] 郜越, 敖志刚, 李宁, 等. 时间敏感目标打击杀伤链的优化问题[J]. 兵工自动化, 2012, 31(5): 9-12.

[6] 孙海洋, 张安, 高飞. 云协同中作战资源两阶段虚拟化方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1036-1042.

[7] 何宜超, 孙鹏, 焦志强, 等. 语义驱动的作战资源服务聚类方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(4): 101-107.

[8] 高强. 面向作战任务的海战场作战资源组织管理技术研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(9): 23-26.

[9] 龙红军, 刘佳铭. 海战场作战资源规划方法研究综述[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(9): 16-19.

[10] 刘兆鹏, 司光亚, 唐宇波, 等. 联合作战资源调度模型研究[J]. 科技导报, 2019, 37(13): 23-31.

[11] 于鸿源, 叶雄兵, 张立韬, 等. 基于 Ripple 共识机制的分布式作战资源分配方法研究[J]. 信息工程大学学报, 2019, 20(6): 750-757.