网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1755.TJ.20211126.1419.001.html 期刊网址：www.ship-research.com

引用格式：彭辉，姜强，邓建辉，等. 基于云模型的舰船战备完好性评估方法 [J]. 中国舰船研究，2021，16(6)：61–71.
PENG H, JIANG Q, DENG J H, et al. Warship operational readiness integrity evaluation method based on cloud model[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(6): 61–71.

基于云模型的舰船战备完好性评估方法

扫码阅读全文

彭辉[1]，姜强[1]，邓建辉[*2]，王岩磊[2]，范敏[1]，宋斌[1]
1 武汉大学 电气与自动化学院，湖北 武汉 430072
2 中国人民解放军 92942 部队，北京 100161

摘　要：［**目的**］针对现有的舰船战备完好性评估方法已无法满足海军任务保障需求这一问题，提出基于云模型的新型评估方法。［**方法**］首先，在指标确定过程中，基于合作博弈权重方法，将层次分析法、熵权法和灰色关联度法所计算的权重进行合作博弈，从而拟合得到组合定权重，并引入变权重理论对定权重进行修正优化；然后，引入云模型理论，利用云相似度替代隶属度，设计基于云模型的模糊综合评估模型；最后，以舰船对空防御任务为例，评估舰船战备完好性。［**结果**］仿真结果表明：变权重模式下，基于云模型的模糊综合评估结果可以更准确地反映实船战备状态。［**结论**］研究成果可为舰船战备完好性评估提供参考。

关键词：战备完好性；变权重理论；云模型；模糊综合评估
中图分类号：U674.7˙03.5　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.19693/j.issn.1673-3185.02337

Warship operational readiness integrity evaluation method based on cloud model

PENG Hui[1], *JIANG Qiang*[1], *DENG Jianhui*[*2], *WANG Yanlei*[2], *FAN Min*[1], *SONG Bin*[1]
1 School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China
2 The 92942 Unit of PLA, Beijing 100161, China

Abstract: ［**Objective**］Aiming at the problem that existing ship combat readiness assessment methods cannot meet the needs of naval mission support, a ship combat readiness assessment method based on cloud model theory is proposed. ［**Methods**］First, in the process of determining the index, based on the cooperative game weight method, the weights calculated by the analytic hierarchy process, entropy weight method and grey correlation method are used for the cooperative game in order to fit the combined fixed weight, and variable weight theory is introduced to modify and optimize the fixed weight. The cloud model theory is then introduced, and a fuzzy comprehensive assessment model based on the cloud model is designed using cloud similarity instead of membership degree. Finally, taking air defense tasks as an example, the combat readiness of the ship is assessed. ［**Results**］The simulation results show that under the variable weight mode, the fuzzy comprehensive evaluation results based on the cloud model can more accurately reflect the combat readiness of real ships. ［**Conclusion**］The results of this study can provide references for ship combat readiness assessment.

Key words: operational readiness；variable weight theory；cloud model；fuzzy comprehensive evaluation

0　引　言

装备的战备完好性，又称战备状态，是指系统/设备在平时和战时使用条件下，遂行所承担全部任务的能力[1]。指挥官和高级领导需要实时掌握特定军事系统的战备完好性状态信息，才能作出

收稿日期：2021–03–31　**修回日期：**2021–07–01　**网络首发时间：**2021–11–29 16:45
基金项目：国家部委基金资助项目
作者简介：彭辉，男，1975 年生，博士，副教授。研究方向：武器装备可靠性与测试性。E-mail: hpeng@whu.edu.cn
邓建辉，男，1966 年生，硕士，研究员
王岩磊，男，1980 年生，博士，高级工程师
*通信作者：邓建辉

downloaded from www.ship-research.com

相应的指挥决策，而这需要战备完好性评估技术予以支撑。

目前，我国海军以使用可用性作为战备完好性的量度，而可用性的常规评估方法是计算系统工作时间占总任务时间的百分比，这种方法难以准确反映系统的实际状态，与美军成熟的战备完好性评估系统的差距较大。国外军方通过建立高度信息化的战备完好性评估系统，实现了海上在编作战舰艇战备完好性信息的实时掌控，可为发现和改进战备完好性缺陷提供信息支持。然而，该领域的相关技术处于封锁状态，无法为我国海军舰艇的战备完好性评估方法研究提供思路。

我国对战备完好性评估技术的研究还处于理论阶段，主要分为数学解析方法和统计试验方法。基于数学解析的战备完好性评估即通过分析影响因素之间的相互关系，来建立描述战备完好性（可用性）与指标因素以及特定条件之间的函数关系式。程莉莉等[2]在假设作战系统的相互关联是简单线性关系的基础上，分析了作战系统的组成关系，建立了适用于作战系统战备状态定量分析的数学模型，但该模型将作战系统相互关联的方式进行了简单的线性化处理，而实际应用场景下的作战系统关联关系却非常复杂。谢宗仁等[3]在分析战备完好性与分系统指标关系的基础上，运用基于多维映射的建模方法，建立了战备完好性多层次协调优化模型。由此可见，虽然基于数学模型驱动的完好性评估方法可以定量地描述完好性与指标因素之间的函数关系，但舰船系统是一个由各类机电设备、信息系统共同组成的复杂非线性系统，所以无法建立精确的评估模型。

基于统计试验的战备完好性评估主要是基于装备的概率模型和统计模型，对故障装备的战备完好性进行评判[4]。魏勇等[5]应用离散事件、Monte-Carlo 法等理论建立了一种基于任务的战备完好性仿真模型，用以预测舰炮装备执行任务时的使用特性，但其在建模过程中假设了各部件的寿命和维修时间均服从指数分布，所以不具备普遍性。程文鑫等[6]利用 Monte-Carlo 法模拟了舰船设备的各种事件，构建了基于设备参数和使用规则的综合完好性评估模型和算法，但其为了简化算法，假设了系统组成单元的失效不会同时发生以及设备故障和修复时间均服从指数分布。李军亮等[7]通过构建逻辑确定而工期随机的计划评估和审查技术（program evaluation and review technique, PERT）网络，并利用 Monte-Carlo 法计算了 PERT 网络路径，得到了机群战备完好率随保障时间的变化曲线，但其作出了工期持续时间服从正态分布的假设，故难以准确地反映机群的实际工作状态。李康等[8]依托 SIMLOX 仿真平台，以战备完好率和使用可用性作为评估参数，运用 Monte-Carlo 抽样、排队论等理论，建立了面向任务的航空地面电源车战备完好性评估模型。统计试验方法一般需要利用函数来预测舰船设备的随机寿命，故难以准确反映舰船的实际运行状态。随着舰船系统级测试技术的深入研究，当舰船处于试验区或在特定战斗场景中执行重大任务时，在具有真实目标、标的物并真实配给兵力的条件下，可以根据特定的系统级测试方案和相关算法对系统某些功能指标进行精确计算。根据舰船系统实时的测试指标数据，利用状态评估方法来获取实时状态已成为实施舰船系统战备完好性评估工程的一种新思路。

基于指标的状态评估主要分为建立评估体系、获取指标值并综合评判 2 个部分，目前常用的方法包括马尔可夫法、贝叶斯网络法、D-S 证据理论法、信息融合法、神经网络法和模糊综合评估法等。受舰船战备完好性测试技术的限制，实船运行状态样本的数据一般较少。然而，除了模糊综合评估法之外，上述评估方法对数据样本量的要求均较高，且评估模型的透明性较差，难以根据实际情况来不断优化评估模型，因此均不适宜作为舰船战备完好性的评估方法。

模糊综合评估法是一种基于模糊数学的评估方法[9]，可以通过隶属函数将模糊信息进行定量化描述，进而解决模糊问题，具有适用范围广、可操作性强、透明度高、易于修改等优点，且不需要大量的样本数据支持，因此，本文将采用模糊综合评估方法对舰船战备完好性进行评估。作为一种优秀的评估方法，模糊综合评估已在多个领域得以应用，但国内外学者的研究成果大多集中于变压器、桥梁，以及舰船系统的设备层面上，很少基于舰船整体角度来评估战备完好性。此外，对于模糊综合评估法中隶属函数的确定，目前尚无统一认可的规范，故受主观影响较大。

云模型作为一种处理定性/定量信息转换的不确定性模型，可以解决模糊理论中隶属函数的局限性问题，其在评估决策领域已发挥了巨大的作用。基于此，本文拟将云模型引入模糊综合评估方法中，首先，利用云模型来代替隶属度函数，设计基于云模型的战备完好性模糊综合评估模型；然后，通过 Python 编程，实现云模型相关算法，并确定评估等级云模型和待评数据云模型参数；最后，在明确云模型相似度实质的基础上，利用云滴的数量规模效应和云模型相交面积来综合

downloaded from www.ship-research.com

描述云模型的相似关系, 用以为实现基于云模型的舰船战备完好性评估提供支撑。

1　基于合作博弈和变权重理论的权重确定方法

指标权重是评估体系中各个指标或因素对评估对象重要程度的客观体现, 因此, 科学合理地确定指标权重对舰船完好性评估而言有着极其重要的意义。

本文拟利用合作博弈拟合思想将层次分析法(主观赋权方法)、熵权法(客观赋权方法)和灰色关联度法分别确定的权重进行拟合, 从而得到精度更高的组合权重[10]; 同时, 通过引入变权重对组合权重进行修正, 具体流程如图 1 所示。

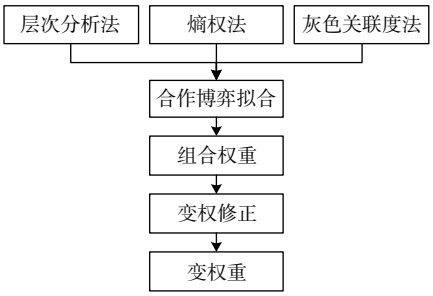


图 1　权重计算流程

Fig. 1　Weight calculation process

1.1　合作博弈计算权重的数学模型

对舰船系统的战备完好性状态进行评估时, 期望得到的是与实船工况尽量接近的指标权重值, 本文将在统一的约束力下利用博弈论方法计算组合权重, 因此称为合作博弈。

组合权重的实质是合理综合不同权重确定方法的计算结果, 从而得到接近实船情况的较为准确的权重, 其中组合权重的确定原则是令总评估误差最小[11]。

合作博弈模型的数学描述如下: 假定有 n 个待评估对象, m 种评估方法; 评估方法集合 $M=\{1, 2, \cdots, m\}$, 代表博弈格局中的参与者。将第 i 种方法($i=1, 2, \cdots, m$)对第 k 个对象($k=1, 2, \cdots, n$)的评估值记为 x_{ik}, 以多种评估方法的线性平均值 x_k 作为基准, 则第 i 种评估方法的误差 $E_{ik}=x_k-x_{ik}$。基于多种评估方法的线性组合评估值 $\widehat{x}_k=l_1x_{1k}+l_2x_{2k}+\cdots+l_ix_{ik}+\cdots+l_mx_{mk}$, 其中 l_i 为评估方法的加权系数。

组合评估模型的误差平方和 $J(M)$ 为

$$J(M)=\sum_{k=1}^{n}E_k^2=\sum_{k=1}^{n}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{m}l_il_jE_{ik}E_{jk} \tag{1}$$

式中: E_k 为第 k 个对象的误差; i 和 j 为 2 种不同的评估方法, 其中 $j=1, 2, \cdots, m$, 且 $i\neq j$。

令 $\boldsymbol{E}=\left(\sum_{k=1}^{n}E_{ik}E_{jk}\right)_{m\times m}$, $\boldsymbol{L}=(l_1,l_2,\cdots,l_m)^{\mathrm{T}}$, 则式(1)可以简化为 $J(M)=\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}\boldsymbol{L}$, 其中: $\boldsymbol{E}$ 为两种不同评估方法的乘积和矩阵; $\boldsymbol{L}$ 为 m 种评估方法的加权系数向量。

以误差平方和最小作为优化目标, 即可获得最优组合评估模型:

$$\begin{cases}\min(J(M))=\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}\boldsymbol{L}\\ \boldsymbol{L}\boldsymbol{L}^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{I}\\ l_i\geqslant 0\end{cases} \tag{2}$$

式中, $\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵。

按照参与者的平均贡献, 将 $J(M)$ 分配给 m 个参与者(即评估方法), 其平均贡献为

$$\varphi_i(v)=\sum_{c}\frac{(m-|c|)!(|c|-1)}{m!}[v(c)-v(c-\{i\})] \tag{3}$$

式中: $\varphi_i(v)$ 为合作博弈 $[M,v]$ 中第 i 种单一方法(参与者)所求得的平均贡献, 其中 v 为参与者贡献; $c\in M$, 为参与者的联盟; $v(c)$ 为 $J(c)$ 的相反数, 其中 $J(c)$ 为联盟 c 的误差平方和; $c-\{i\}$ 为除去参与者 i 之外的联盟; $v(c)-v(c-\{i\})$ 为参与者 i 的贡献。

将平均贡献归一化处理后, 对于 m 种评估方法而言, 第 i 种方法的加权系数 l_i 为

$$l_i=\frac{v(M)}{\varphi_i(v)}\Big/\sum_{j=1}^{m}\frac{v(M)}{\varphi_j(v)} \tag{4}$$

式中: $v(M)$ 为误差平方和 $J(M)$ 的负值; $\varphi_j(v)$ 为合作博弈 $[M,v]$ 中第 j 种单一方法所求得的平均贡献。

1.2　基于合作博弈的组合权重计算过程

计算组合权重, 即在参与者都遵循评估误差最小的原则下完成对评估误差的贡献分配, 其确定的组合权重向量即为最终的支付向量。假设共有 m 种权重计算方法参加合作博弈, 第 i 种方法($i=1, 2, \cdots, m$)计算得到的权重向量 $\boldsymbol{w}^{(i)}=[w_1^{(i)}, w_2^{(i)}, w_3^{(i)}, \cdots, w_n^{(i)}]$, 其中 $w_n^{(i)}$ 为第 i 种方法的第 n 个待评估对象的权重大小, 则 i 种计算方法所得的权重线性组合 $\boldsymbol{W}$ 为

$$\boldsymbol{W}=\sum_{i=1}^{m}\boldsymbol{w}^{(i)}L_{ii} \tag{5}$$

式中, L_{ii} 为第 i 种评估方法的一致相关系数。

由合作博弈最优组合评估模型可知, 组合权重需满足 $\min\|\boldsymbol{W}-\boldsymbol{w}^{(i)}\|$。根据微分特性得到最优的一阶导数条件为

downloaded from www.ship-research.com

$$\sum_{i=1}^{m} \boldsymbol{w}^{(i)} l_i (\boldsymbol{w}^{(i)})^{\mathrm{T}} = \boldsymbol{w}^{(i)} (\boldsymbol{w}^{(i)})^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

将平均值作为组合权重向量的参考基准，则一致相关系数L_{ii}与各个权重之间的关系为

$$L_{ii} = \frac{\sum_{k=1}^{n} [w_k^{(i)} - \overline{\boldsymbol{w}^{(i)}}][W_k^{(m_i)} - \overline{\boldsymbol{W}^{(m_i)}}]}{\left\{\sum_{k=1}^{n} [w_k^{(i)} - \overline{\boldsymbol{w}^{(i)}}]^2\right\}^{1/2} \left\{\sum_{k=1}^{n} [W_k^{(m_i)} - \overline{\boldsymbol{W}^{(m_i)}}]^2\right\}^{1/2}} \tag{7}$$

式中：$w_k^{(i)}$为第 k 个对象使用第 i 种方法计算得到的权重；$\overline{\boldsymbol{w}^{(i)}}$为$\boldsymbol{w}^{(i)}$的共轭向量；$W_k^{(m_i)}$为第 k 个对象使用 m−1 种评估方法（除了第 i 种方法之外）计算得到的权重；$\boldsymbol{W}^{(m_i)}$为除了$\boldsymbol{w}^{(i)}$以外的其他 m-1 种权重的组合权重向量；$\overline{\boldsymbol{W}^{(m_i)}}$为$\boldsymbol{W}^{(m_i)}$的共轭向量。

1.3 基于变权重理论的组合权重修正方法

本文将利用文献 [12] 提出的均衡系数变权重公式对合作博弈法确定的组合定权重进行修正，即

$$w_d'' = \frac{w_d F_d^{\alpha-1}}{\sum_{d=1}^{p} w_d F_d^{\alpha-1}} \tag{8}$$

式中：d=1, 2, ⋯, p，为指标数量，其中 p 为指标的最大数量；w_d''为第 d 个指标的变权重；w_d为第 d 个指标的定权重；F_d为第 d 个指标归一化之后的值，$F_d^{\alpha-1}$为第 d 个指标归一化之后的$\alpha-1$次方；$0 \leqslant \alpha \leqslant 1$，为均衡系数，一般可取$\alpha = 0$。

由式（8）可知，当某个指标值相对于其他指标值明显偏小时，与定权重相比，变权重将明显增加，则最终的评估值也将相应减小，这更加符合实际运行工况。

2 基于云理论的战备完好性模糊综合评估

在舰船系统中，存在很多不符合随机分布特性的指标数据信息，例如雷达探测距离等，这些模糊数据难以通过概率方法进行描述和处理。模糊理论可以通过模糊集来描述这类不确定信息的模糊特性，采用隶属函数实现模糊定性概念的定量转化，并通过将不确定数据代入评估模型中进行计算以实现模糊信息的清晰化。

云模型是云理论的核心，是一种兼顾模糊性和随机性，可以实现由自然语言表示的定性概念和定量表示之间不确定性转换的模型[13]。由于目前没有设计隶属函数的明确规范，当采用综合模糊评判法对舰船系统的战备完好性进行评估时，需根据专家经验来确定各个指标的隶属度函数，所以主观因素对评估结果的影响较大。而云模型可以直接用于指标的单项评估，其参数是通过特定的计算规则而获得，无需专家经验的参与，从而大幅降低了主观性的影响，因此，本文拟将云模型与综合模糊评判法相结合，在此基础上设计综合评估模型。

2.1 基于正态云模型的模糊综合评估步骤

正态云模型是一种最基本的云模型，其通过云相似度来衡量单项指标的评估结果，无需专家经验的参与，因此本文将采用云相似度替代模糊综合评估方法中各个指标对应评估等级的隶属度[14]。

基于正态云模型的模糊综合评估模型结构如图 2 所示，其评估基本步骤为：1）确定评估指标集；2）建立评估集；3）确定各评估等级的正态云模型参数；4）计算待评估数据的正态云模型参数；5）计算待评估云模型与各评估等级正态云模型之间的云相似度；6）确定指标权重；7）将参数代入综合模糊评估模型，得到评估向量并进行结果判定。

2.2 云模型参数确定

2.2.1 云发生器

云发生器是指基于云理论实现定性概念与定量数值转换的算法。

1）正向云发生器。

正向云发生器主要用于实现定性到定量的映射功能，其基本原理是根据云数字特征：期望（Ex）、熵（En）、超熵（He），在精确的数值论域空间产生云滴，如图 3 所示。

正向云发生器算法分为 5 个基本步骤：

步骤 1：生成一个服从期望为 En，方差为 He^2的正态分布的随机数En_e'，其中 e=1, 2, ⋯, a，表示云滴的样本数量。

步骤 2：生成一个服从期望为 Ex，方差为$En_e'^2$的正态分布的随机数 x_e。

步骤 3：计算每个 x_e 的隶属度μ_e：

$$\mu_e = \mathrm{e}^{-\frac{(x_e - Ex)^2}{2En_e'^2}} \tag{9}$$

步骤 4：(x_e，μ_e)为一个云滴，代表定性概念在精确论域 U 上的一次随机实现。

步骤 5：重复步骤 1~步骤 4，总计产生 a 个云滴。

downloaded from www.ship-research.com

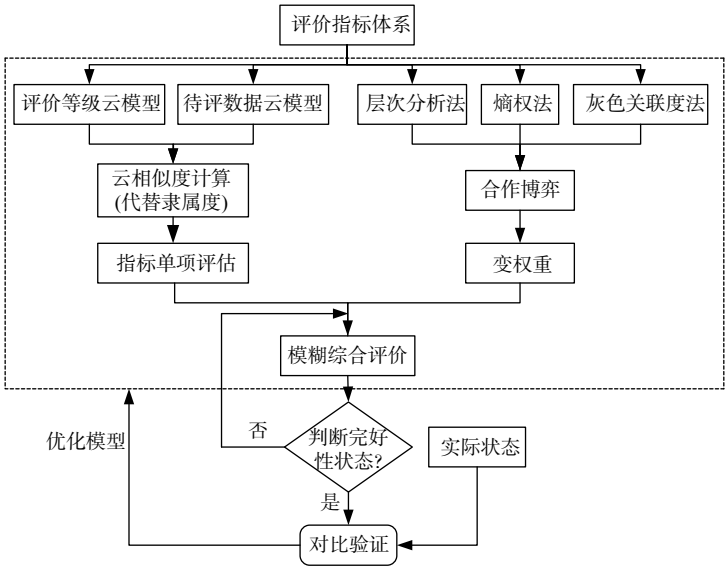


图 2　基于正态云模型的模糊综合评估模型

Fig. 2　Fuzzy comprehensive evaluation model based on normal cloud model

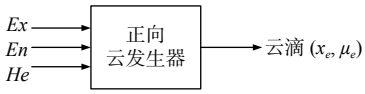


图 3　正向云发生器原理示意图

Fig. 3　Schematic diagram of forward cloud generator

2) 逆向云发生器。

逆向云发生器主要用以实现定量到定性的映射功能，其基本原理是根据一定数量的精确数据计算确定云模型数字特征(Ex, En, He)，其原理如图 4 所示。

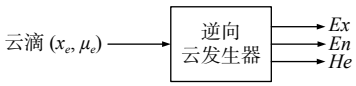


图 4　逆向云发生器原理示意图

Fig. 4　Schematic diagram of reverse cloud generator

逆向云发生器算法分为 2 个基本步骤：

步骤 1: 根据样本点 x_e，计算样本均值、一阶样本绝对中心矩和样本方差：

$$\overline{Z} = \frac{1}{a}\sum_{e=1}^{a} x_e \tag{10}$$

$$S_a^2 = \frac{1}{a}\sum_{e=1}^{a} \left|x_e - \overline{Z}\right| \tag{11}$$

$$S^2 = \frac{1}{a-1}\sum_{e=1}^{a} (x_e - \overline{Z})^2 \tag{12}$$

以上式中: a 为云滴样本 x_e 的总个数; $\overline{Z}$为样本均值; S_a^2为一阶样本的绝对中心矩; S^2为样本方差。

步骤 2: 计算数字特征值 Ex, En, He。

$$Ex = \overline{Z} \tag{13}$$

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{a}\sum_{e=1}^{a} |x_e - Ex| \tag{14}$$

$$He = \sqrt{S^2 - En^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{a-1}\sum_{e=1}^{a}(x_e - \overline{Z})^2\right)^2 - En^2} \tag{15}$$

2.2.2　评估等级云模型的确定

对于舰船战备完好性状态的分类，目前尚无统一标准。根据美军的舰船战备状态等级划分规则，并结合专家意见，本文将舰船战备完好性状态划分为“正常”、“注意”、“异常”、“严重”4 个等级。

根据某型舰船维护保障手册及专家意见，本文获取了该船作战与指挥系统指标参数的标准限值，并将指标划分为 4 个状态区间，建立相应的评估等级云模型，其基本步骤为: 1)在指标参数的“正常”区间内随机生成 5 000 组数据; 2)将随机生成的 5 000 组数据输入逆向云发生器，求得“正常”区间的云数字特征值期望(Ex)、熵(En)、超熵(He); 3)将云数字特征值输入正向云发生器，得到该指标在“正常”区间的评估等级云模型; 4)重复 1)~3)，计算其他评估等级的云数字特征值，并将所有的评估等级云模型绘制在同一论域空间中，从而得到整体云模型数据(表 1)。

基于此，即可确定舰船对空防御系统指标各评估等级的正态云模型参数(Ex_g, En_g, He_g)，其中: g=1, 2, 3, 4, 表示“正常”、“注意”、“异常”、“严重”这 4 个评估等级; Ex_g, En_g, He_g 分别为指标各评估等级的期望、熵、超熵。雷达系统部分评估等级的云模型如图 5~图 6 所示。

2.2.3　确定待评估数据云模型

待评估数据云模型的生成方法与评估等级云

downloaded from www.ship-research.com

表 1 舰船对空防御系统指标的评估等级云模型参数

Table 1 Parameters of hierarchical cloud model for evaluation of ship air defense system index

系统	指标	正常	注意	异常	严重
雷达	航迹稳定度	(2.032, 21.250 3, 0.195 87)	(3.999 6, 1.878 1, 0.133 72)	(6.844 5, 1.853 6, 0.029 128)	(9.498 5, 0.933 69, 0.164 57)
	探测距离/km	(500.96, 62.569, 8.249 3)	(395.81, 61.799, 6.903 1)	(298.72, 62.230, 8.948 1)	(145.38, 95.021, 7.438 2)
	距离精度/m	(94.546, 12.273, 1.838 4)	(129.44, 9.125 6, 1.326 4)	(159.84, 11.574, 1.733 4)	(198.02, 10.973, 1.687 5)
	方位精度/(°)	(0.307 78, 0.183 69, 0.072 371)	(0.597 74, 0.061 88, 0.023 38)	(0.698 09, 0.061 37, 0.012 391)	(0.953 30, 0.092 23,0.034 195)
指挥系统	指示距离精度/m	(96.369, 11.052, 1.348 2)	(132.44, 10.057 3, 1.058 7)	(164.96, 9.812, 1.934)	(203.14, 12.024, 1.368 7)
	指示方位精度/(°)	(0.351 41, 0.121 54, 0.015 243)	(0.612 72, 0.025 78, 0.019 417)	(0.743 54, 0.054 24, 0.016 923)	(1.025 4, 0.071 25, 0.015 635)
	融合距离精度/m	(93.158, 9.157 4, 1.761 2)	(128.42, 8.157 4, 0.935 8)	(158.94, 10.614 7, 1.224 1)	(206.48, 9.444 7, 1.414 5)
	融合方位精度/(°)	(0.297 28, 0.283 78, 0.062 521)	(0.637 25, 0.042 52, 0.017 257)	(0.725 24, 0.055 75, 0.024 748)	(0.982 52, 0.082 57, 0.023 622)
舰炮	目标拦截距离/km	(102.15, 9.158 7, 1.578 4)	(82.348, 10.135 9, 1.264 7)	(67.274 1, 7.569 5, 1.415 6)	(49.154 2, 8.154 3, 1.475 6)
	系统反应时间/s	(2.963 9, 1.458 1, 0.091 48)	(5.143 9, 1.292 5, 0.126 1)	(7.265 9, 1.744 9, 0.091 58)	(10.267, 1.659 1, 0.117 8)
	火控俯仰精度/mrad	(0.091 48, 0.091 21, 0.001 548)	(0.223 91, 0.133 24, 0.001 477)	(0.401 88, 0.117 41, 0.010 216)	(0.532 21, 0.123 17, 0.002 544)
导弹	目标拦截距离/km	(198.19, 9.315 4, 0.915 43)	(167.63, 7.115 6, 1.741 5)	(131.36, 10.684, 1.125 5)	(98.173 6, 8.147 5, 0.812 56)
	系统反应时间/s	(3.156 4, 1.684 1, 0.083 61)	(5.795 2, 1.365 7, 0.121 5)	(7.513 6, 0.921 64, 0.113 61)	(10.364, 1.352 4, 0.181 4)
	火控俯仰精度/mrad	(0.121 87, 0.086 14, 0.002 541)	(0.257 81, 0.136 21, 0.001 271)	(0.387 32, 0.093 18, 0.008 121)	(0.517 25, 0.136 54, 0.001 325)

模型基本相同，区别在于云模型参数是根据舰船系统的待评估测试数据而确定，其基本步骤如下：

1）将某个状态量指标的待评估测试数据组输入逆向云发生器，分别得出待评估数据云模型的数字特征值 Ex, En, He。

2）将待评估数据云模型的数字特征值输入正向云发生器，从而得出相应的云模型。

2.3 正态云模型的相似度计算

2.3.1 X 变量计算方法

通过计算落入评估等级云论域空间 ϕ 中的待评估数据云云滴数量占待评估数据云所有云滴数量的占比[15]，即可确定 X 变量，其具体步骤如下：

1）生成待评估数据云模型。

利用正向云发生器生成待评估数据云模型，总计包含 a 个云滴，其中单个云滴为 (x_e,μ_e)。

2）判断云滴是否落入等级云论域 ϕ。

设定 xy 二维坐标系，其中 x 轴为云滴 x_e，y 轴为云滴隶属度 μ_e。等级云论域 ϕ 的边界由不确定性、离散型的随机云滴组成，本文将对论域 ϕ 作近似处理，采用平滑曲线来定义论域 ϕ 的边界[16]，其过程如下：

（1）在正态云模型中，由于 99.7% 的云滴位

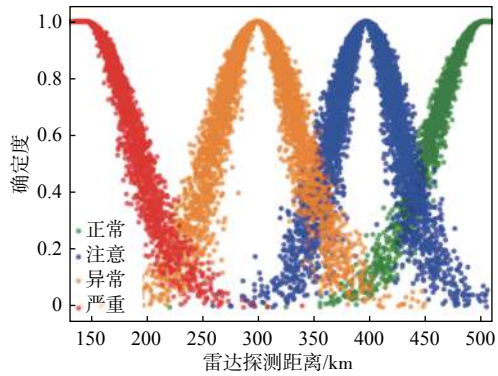


图 5 雷达探测距离指标评估等级的正态云模型

Fig. 5 Normal cloud model of radar detection range index evaluation ratings

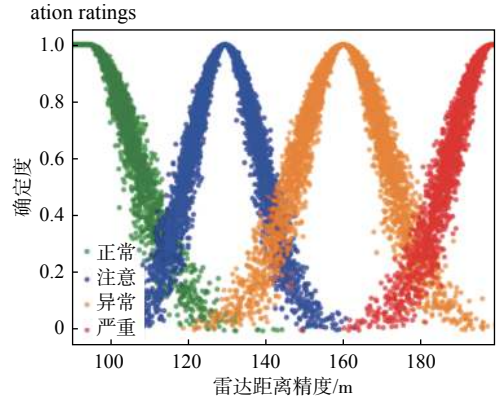


图 6 雷达距离精度指标评估等级的正态云模型

Fig. 6 Normal cloud model of radar range accuracy index evaluation ratings

downloaded from www.ship-research.com

于内围边界曲线 $y_1(x)=\mathrm{e}^{\frac{-(x-Ex)^2}{2(En-3He)^2}}$ 和外围边界曲线 $y_2(x)=\mathrm{e}^{\frac{-(x-Ex)^2}{2(En+3He)^2}}$ 所围成的区域内[17]。因此，当云滴位于边界曲线 $y_2(x)$ 与 x 轴围成的区域内时，即可判定该云滴落入论域 ϕ。

（2）根据云模型的 $3En$ 规则[17]，论域 ϕ 在 x 轴的范围可以简化为 $[Ex_{\mathrm{I}}-3En_{\mathrm{I}},Ex_{\mathrm{I}}+3En_{\mathrm{I}}]$，其中 Ex_{I} 和 En_{I} 分别为数据云 I 的期望和熵。

在论域 ϕ 近似处理之后，可以采用数学约束条件来描述待评估数据云的云滴是否落入论域 ϕ，即：如果云滴 (x_e,μ_e) 满足 $Ex_{\mathrm{I}}-3En_{\mathrm{I}}\leqslant x_e\leqslant Ex_{\mathrm{I}}+3En_{\mathrm{I}}$ 且 $\mu_e\leqslant y_2(x_e)$，即可判定该云滴 (x_e,μ_e) 落入论域 ϕ。

3）统计落入论域 ϕ 中的待评估数据云的云滴数量 N。

4）重复步骤 1)~4)，将多次仿真结果的平均值 $\overline{N}$ 作为落入论域 ϕ 中待评估数据云的云滴数量。云模型是一种不确定性模型，虽然每次生成的云模型整体特性基本不变，但其云滴分布状态将在一定范围内随机变动，故多次仿真的目的是为了保证云模型的“不确定性”本质不被某一次随机实现结果所掩盖。

5）X 变量的值为

$$X=\frac{\overline{N}}{a} \tag{16}$$

2.3.2　Y 变量计算方法

通过计算 $\phi\cap\phi'$ 的面积在论域 ϕ 中的占比，即可确定 Y 变量，其中 ϕ' 为待评估数据云的论域空间。$\phi\cap\phi'$ 的边界同样是由随机云滴组成，而非连续光滑的曲线，因此需对相交部分的边界作近似处理。根据云模型的基本理论，正态云模型的数学期望曲线是一条光滑、连续的曲线，这也是表征定性概念的主体。因此，在计算过程中可以采用待评估数据云期望曲线与评估等级云期望曲线的相交部分 S' 来近似替代，其具体求解步骤如下：

1）确定相交部分 S' 的函数表达式 $s(x)$。

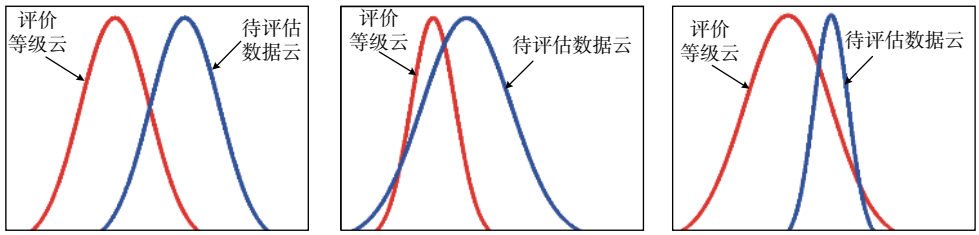
假设 $\mu_{\mathrm{I}}(x)$ 和 $\mu_{\mathrm{II}}(x)$ 分别为评估等级云和待评估数据云的数学期望曲线，根据云模型的基本理论可知：$\mu_{\mathrm{I}}(x)=\mathrm{e}^{\frac{-(x-Ex_{\mathrm{I}})^2}{2(En_{\mathrm{I}})^2}}$，$\mu_{\mathrm{II}}(x)=\mathrm{e}^{\frac{-(x-Ex_{\mathrm{II}})^2}{2(En_{\mathrm{II}})^2}}$，则期望曲线 $s(x)$ 为

$$s(x)=\begin{cases}\mu_{\mathrm{I}}(x) & (\mu_{\mathrm{I}}(x)\leqslant\mu_{\mathrm{II}}(x))\\ \mu_{\mathrm{II}}(x) & (\mu_{\mathrm{II}}(x)<\mu_{\mathrm{I}}(x))\end{cases} \tag{17}$$

式中，Ex_{I} 和 En_{II} 分别为数据云 II 的期望和熵。

2）计算 $\phi\cap\phi'$ 的面积。

理论上而言，$\phi\cap\phi'$ 的面积为期望曲线 $s(x)$ 在 $x\in(-\infty,+\infty)$ 上的积分，但根据云模型的“$3En$ 规则”，评估等级云和待评估数据云在 x 轴上的有效范围分别为 $[Ex_{\mathrm{I}}-3En_{\mathrm{I}},Ex_{\mathrm{I}}+3En_{\mathrm{I}}]$ 和 $[Ex_{\mathrm{II}}-3En_{\mathrm{II}},Ex_{\mathrm{II}}+3En_{\mathrm{II}}]$，因此，可以按照图 7 所示的不同相交情形对 $s(x)$ 的积分范围进行简化，结果如表 2 所示，其中 $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为 $s(x)$ 有效积分范围的下限和上限。



(a) 情形 1　　(b) 情形 2　　(c) 情形 3

图 7　云模型的不同相交情形示意图

Fig. 7　Schematic diagram of different intersection of cloud models

表 2　s(x) 的有效积分范围

Table 2　Effective integral range of s(x)

相交情形	积分范围 $[x_{\min},x_{\max}]$
情形1	$[Ex_{\mathrm{II}}-3En_{\mathrm{II}},Ex_{\mathrm{I}}+3En_{\mathrm{I}}]$
情形2	$[Ex_{\mathrm{II}}-3En_{\mathrm{II}}\ ,\ Ex_{\mathrm{II}}+3En_{\mathrm{II}}]$
情形3	$[Ex_{\mathrm{I}}-3En_{\mathrm{I}}\ ,\ Ex_{\mathrm{I}}+3En_{\mathrm{I}}]$

$\phi\cap\phi'$ 的面积 S' 为

$$S'=\int_{x_{\min}}^{x_{\max}}s(x)\mathrm{d}x \tag{18}$$

3）论域 ϕ 的面积 Y_0 为

$$Y_0=\int_{Ex_{\mathrm{I}}-3En_{\mathrm{I}}}^{Ex_{\mathrm{I}}+3En_{\mathrm{I}}}\mathrm{e}^{\frac{-(x-Ex_{\mathrm{I}})^2}{2(En_{\mathrm{I}})^2}}\mathrm{d}x\cong\sqrt{2\pi}\,En_{\mathrm{I}} \tag{19}$$

4）Y 变量的值为

$$Y=\frac{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}}s(x)\mathrm{d}x}{Y_0} \tag{20}$$

2.3.3　云模型相似度合成

变量 X 和变量 Y 相互独立，本文将二维坐标系 XY 下的向量 $\boldsymbol{\lambda}=(X,Y)$ 作为云模型相似度的数学表达式，当云相似度为 1 时，即表示评估等级云模型与待评数据云模型完全重合。数字型云模型相似度 f_{I} 的定义为：任意云模型相似度向量

downloaded from www.ship-research.com

$\boldsymbol{\lambda}=(X,Y)$在向量$\boldsymbol{\lambda}_0(1,1)$方向的投影长度$L$占向量$\boldsymbol{\lambda}_0$的模的比例，如图 8 所示。

$$f_\lambda=\frac{L}{|\boldsymbol{\lambda}_0|}=\frac{\boldsymbol{\lambda}\cdot\boldsymbol{\lambda}_0}{|\boldsymbol{\lambda}_0|\cdot|\boldsymbol{\lambda}_0|}=\frac{X+Y}{2} \tag{21}$$

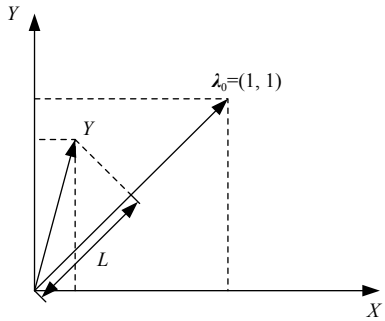


图 8 云相似度的向量化描述

Fig. 8 Vectorization description of cloud similarity

2.4 模糊综合评估

根据上文的云相似度算法，通过计算指标云模型与评估等级云模型之间的相似度，即可得到云相似度向量$\boldsymbol{f}=(f_1,f_2,f_3,f_4)$，其中$f_1,f_2,f_3,f_4$分别为与评估等级“正常”、“注意”、“异常”、“严重”相对应的云相似度。将云相似度向量归一化，即可得到单项指标d的评估向量（隶属度向量）$\boldsymbol{S}_d=(f_{1d},f_{2d},f_{3d},f_{4d})$，其中$f_{1d},f_{2d},f_{3d},f_{4d}$分别对应归一化后的“正常”、“注意”、“异常”、“严重”的云相似度。根据最大相似度原则，即可对单项评估结果进行判定。

将单项评估向量按层构成矩阵$\boldsymbol{S}$，将各个指标权重按层构成权重向量$\boldsymbol{W}'$。将$\boldsymbol{S}$和$\boldsymbol{W}'$运用模糊综合评估运算规则进行合成，即可得到式(22)所示的综合评估向量。由于本文的评估指标体系由多层组成，所以需要从低层逐级向上进行综合评估，从而得到舰船战备完好性评估结果向量$\boldsymbol{B}$。

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{W}'\circ\boldsymbol{S}=[w_1',w_2',\cdots,w_p']_{1\times p}\circ \begin{bmatrix} f_{11} & f_{21} & \cdots & f_{41} \\ f_{12} & f_{22} & \cdots & f_{42} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ f_{1p} & f_{2p} & \cdots & f_{4p} \end{bmatrix}_{p\times 4}=[b_1,b_2,b_3,b_4]_{1\times 4} \tag{22}$$

式中：$\circ$为模糊算子；$w_1',w_2',\cdots,w_p'$为指标d(d=1, 2, $\cdots$, p)归一化之后的权重向量；b_1, b_2, b_3, b_4分别为对应 4 个评估等级（正常、注意、异常、严重）的评估值。

3 算例分析

3.1 仿真系统介绍

基于舰船系统战备完好性状态控制系统原理样机（信息化仿真系统结构如图 9 所示），本文将对战备完好性评估技术开展应用实例分析，用以验证评估模型的有效性。

图 9 所示的战备完好性评估系统在一台军用计算机上装载了本文的源程序。首先，军用计算机发出故障注入命令，舰基系统和测试点通道模

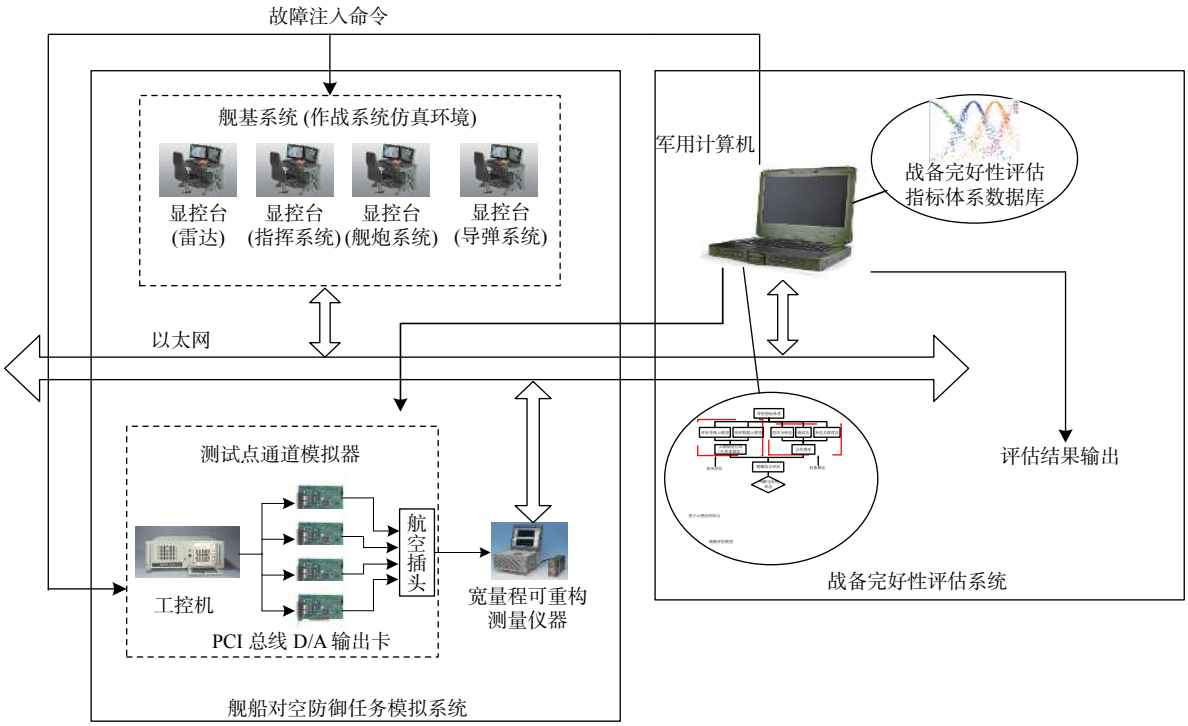


图 9 舰船战备完好性状态的控制系统结构图

Fig. 9 Structure diagram of warship operational readiness integrity state control system

downloaded from www.ship-research.com

拟器作出响应; 然后, 对战备完好性评估指标体系中的主要参数进行仿真, 生成待评估数据, 并经由以太网传输给军用计算机。

图 9 中, 对空防御任务的模拟系统主要为舰基系统, 用以模拟作战系统指标。舰基仿真环境接收战备完好性评估系统的故障注入命令之后, 将通过模拟交战获取相关指标, 并经以太网直接将相关数据传输给评估系统。当测试点通道模拟器接收了上位机故障注入命令、测试请求命令之后, 将通过工控机控制 D/A 卡输出模拟量来模拟实际的测试信号输出, 其接口信号的输出形式与实船一致。宽量程可重构测量仪器用于采集模拟量信号并转换为网络数据, 然后经由以太网传输给评估系统。

3.2　仿真流程及结果

基于图 9 中仿真系统的软、硬件运行组织关系, 首先, 向对空防御系统注入故障模式“目标指示超差”、“通道目指超差”、“舰炮目标拦截超差”; 然后, 通过舰基系统仿真, 产生对空防御系统的指标数据(参见表 1)。

将各指标的仿真数据输入逆向云发生器, 即可获取待评估数据的云模型参数。将云模型参数根据式(23)进行归一化处理, 并利用正态云模型相似度算法来计算待评估数据云模型与评估等级云模型之间的相似度向量, 将其作为指标的单项评估结果, 即可利用最大相似度原则进行等级判定, 舰船系统战备完好性指标的单项评估结果如表 3 所示。

$$F_{kd}(z)=\frac{F_{\text{worst}}-F_{kd}(z)'}{F_{\text{worst}}-F_{\text{best}}} \tag{23}$$

式中: $F_{kd}(z)$为第 k 个评估对象的第 d 个指标的第 z 个检测数据经归一化处理后的指标值, 其中检测数据个数 z=1, 2, ⋯, u(u 为检测数据的最大数量); $F_{kd}(z)'$为第 k 个评估对象的第 d 个指标的第 z 个检测数据; F_{worst}为该指标的极限值, 即最差值; F_{best}为该指标最优值。

表 3　舰船系统战备完好性指标单项评估结果

Table 3　Single evaluation result of combat readiness index of ship system

指标名称	归一化平均数据	单项评估结果(云相似度)	评估等级
航迹稳定度	0.917	(0.906, 0.094, 0, 0)	正常
雷达探测距离	0.922	(0.911, 0.089 0, 0)	正常
雷达距离精度	0.676	(0.013, 0.346, 0.641, 0)	异常
雷达方位精度	0.747	(0.178, 0.701,0.121, 0)	注意
指示距离精度	0.508	(0,0.269, 0.393, 0.338)	异常
指示方位精度	0.632	(0, 0.264, 0.659, 0.077)	异常
融合距离精度	0.897	(0.881, 0.115, 0.004, 0)	正常
融合方位精度	0.869	(0.826, 0.151, 0.023, 0)	正常
舰炮目标拦截距离	0.698	(0, 0, 0.879, 0.121)	异常
舰炮系统反应时间	0.878	(0.784, 0.211, 0.005, 0)	正常
舰炮火控俯仰精度	0.648	(0, 0, 0.826 0.174)	异常
导弹目标拦截距离	0.815	(0.796, 0.202, 0.002, 0)	正常
导弹系统反应时间	0.965	(0.923, 0.077, 0, 0)	正常
导弹火控俯仰精度	0.946	(0.914, 0.086, 0, 0)	正常

在此基础上, 采用指标的云相似度向量来代替综合模糊评估模型中的隶属度, 利用本文确定的定权重作为该仿真实例的定权重, 即可利用表 3 中的归一化平均数据对定权重进行变权修正。按照指标层次结构, 逐层将云相似度向量矩阵与权重矩阵按照式(22)进行模糊运算, 从而得到元件层和系统层的综合评估结果, 其中定权重、变权重模式下的评估结果分别如表 4 和表 5 所示。

3.3　结果分析

由表 4 和表 5 可知: 对于系统层, 定权重与变权重模式下的对空防御系统评估结果出现了分歧, 对于个别定权重判定为“正常”的指标, 变权重则判定为“异常”; 对于元件层, 2 种权重模式在判定舰炮系统和导弹系统状态上的一致性较好, 而在雷达系统和指挥系统状态判定上出现了分

downloaded from www.ship-research.com

表 4 定权重评估结果

Table 4 Fixed weight evaluation results

指标	综合评估向量	评估等级
雷达系统（元件层）	（0.509, 0.311, 0.178, 0）	正常
指挥系统（元件层）	（0.515, 0.184, 0.215, 0.09）	正常
舰炮系统（元件层）	（0.235, 0.063, 0.602, 0.101）	异常
导弹系统（元件层）	（0.856, 0.142, 0.001, 0）	正常
对空防御系统（系统层）	（0.576, 0.168, 0.212, 0.054）	正常

表 5 变权重评估结果

Table 5 Variable weight evaluation results

指标	综合评估向量	评估等级
雷达系统（元件层）	（0.363, 0.375, 0.262, 0）	注意
指挥系统（元件层）	（0.315, 0.211, 0.347, 0.127）	异常
舰炮系统（元件层）	（0.129, 0.051,0.735,0.085）	异常
导弹系统（元件层）	（0.806,0.192, 0.002, 0）	正常
对空防御系统（系统层）	（0.370, 0.159, 0.397, 0.074）	异常

歧。分歧的原因是通过仿真注入故障之后，定权重模式下各指标评估等级不变，而变权重模式下指标评估等级将随着故障注入而发生相应的变化。

此外，在表 3 中，雷达距离精度、方位精度指标较雷达其他指标明显偏小，而指挥系统的指示距离精度、方位精度指标也较指挥系统其他指标明显偏小，这是因为本仿真中注入故障的影响所致。

由于仿真中注入的故障将对舰船对空防御系统状态产生较严重的影响，因此，定权重模式下对空防御系统的评估结果（“正常”）不合理，而变权重模式下的评估结果（“异常”）更符合实际情况，即更加准确。

4 结 论

本文研究了舰船战备完好性评估指标体系构建、指标权重确定、评估方法及评估模型，并以舰船对空防御系统为例开展了仿真验证，主要结论如下：

1）针对单一权重计算方法所导致的权重精度变差和定权重无法将异常指标影响纳入评估体系的问题，本文引入了基于合作博弈和变权重理论的权重计算方法。基于合作博弈方法所确定的组合权重可以均衡多种方法的计算权重，其结果优于单一的权重计算方法。利用变权理论修正优化之后的组合权重，可以避免定权重模式下因指标状态改变而定权重值偏小所导致的评估结果不准确的问题。

2）针对模糊综合评估法中隶属函数确定过程的主观性较强的问题，引入云模型理论，利用云相似度替代隶属度，设计了基于云模型的综合模糊评估模型。云模型仿真与传统计算方法的对比结果表明：本文方法与传统方法的求解结果一致，故具备较高的可行性。

3）舰船战备完好性状态控制系统原理样机（信息化仿真系统）的仿真结果表明：与定权重相比，变权重模式下的评估结果更准确。

参考文献：

[1] 程文鑫, 焦自平, 白桦, 等. 武器系统使用可用性评估模型及应用 [J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(1): 81–84.
CHENG W X, JIAO Z P, BAI H, et al. The evaluation model of weapon system operational availability and its application[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2002, 14(1): 81–84 (in Chinese).

[2] 程莉莉, 罗威, 胡芷毅, 等. 舰载作战系统战备状态评价方法研究 [J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(9): 1790–1794.
CHENG L L, LUO W, HU Z Y, et al. Research on evaluation of the ship-borne combat system operational states[J]. Computer and Digital Engineering, 2017, 45(9): 1790–1794 (in Chinese).

[3] 谢宗仁, 吕建伟, 徐一帆, 等. 大型武器装备总体战备完好性的多层次协调优化 [J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(12): 2729–2737.
XIE Z R, LV J W, XU Y F, et al. Multi-level coordinated optimization of major weapon equipment's overall operational readiness indicators[J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(12): 2729–2737 (in Chinese).

[4] ZHENG K, HAN L N, GUO S L, et al. Fuzzy synthetic condition assessment of wind turbine based on combination weighting and cloud model[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2017, 32(6): 4563–4572.

[5] 魏勇, 徐廷学, 逄大鹏. 基于任务的舰炮装备战备完好性建模与仿真研究 [J]. 火炮发射与控制学报, 2010(4): 15–19.
WEI Y, XU T X, PANG D P. Modelling and simulation research on operational readiness of naval gun weapon equipment based on mission[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2010(4): 15–19 (in Chinese).

[6] 程文鑫, 陈立强, 龚沈光, 等. 基于蒙特卡洛法的舰船装备战备完好性仿真 [J]. 兵工学报, 2006, 27(6): 1090–1094.
CHENG W X, CHEN L Q, GONG S G, et al. Readiness simulation of ship equipment based on Monte-Carlo method[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(6): 1090–1094 (in Chinese).

[7] 李军亮, 滕克难, 徐吉辉, 等. 军用飞机机群战备完好性

downloaded from www.ship-research.com

研究 [J]. 现代防御技术, 2017, 45(3): 147–154.
LI J L, TENG K N, XU J H, et al. Military aircraft fleet operational readiness research[J]. Modern Defense Technology, 2017, 45(3): 147–154 (in Chinese).

[8] 李康, 黄之杰, 朱倩. 航空地面电源车战备完好性评价建模仿真 [J]. 军事交通学院学报, 2017, 19(10): 24–28, 32.
LI K, HUANG Z J, ZHU Q. Modeling and simulation on operational readiness of aerial power supply vehicle[J]. Journal of Academy of Military Transportation, 2017, 19(10): 24–28, 32 (in Chinese).

[9] CHEN J, LU B. Research on universal fuzzy neural comprehensive evaluation network[C]//2007 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Hong Kong, China: IEEE, 2007.

[10] 陈伟, 夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法 [J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(1): 17–22.
CHEN W, XIA J H. An optimal weights combination method considering both subjective and objective weight information[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007, 37(1): 17–22 (in Chinese).

[11] DEVANNEAUX V, KABBAJ H, DAGUES B, et al. An accurate model of squirrel cage induction machines under rotor faults[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems. Shenyang, China: IEEE, 2003.

[12] 李德清, 崔红梅, 李洪兴. 基于层次变权的多因素决策 [J]. 系统工程学报, 2004, 19(3): 258–263.
LI D Q, CUI H M, LI H X. Multifactor decision making based on hierarchical variable weights[J]. Journal of Systems Engineering, 2004, 19(3): 258–263 (in Chinese).

[13] 刘常昱, 李德毅, 潘莉莉, 等. 基于云模型的不确定性知识表示 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(2): 32–35.
LIU C Y, LI D Y, PAN L L, et al. Uncertain knowledge representation based on cloud model[J]. Computer Engineering and Application, 2004, 40(2): 32–35 (in Chinese).

[14] 王洪利, 冯玉强. 基于云模型具有语言评价信息的多属性群决策研究 [J]. 控制与决策, 2005, 20(6): 679–681, 685.
WANG H L, FENG Y Q. On multiple attribute group decision making with linguistic assessment information based on cloud model[J]. Control and Decision, 2005, 20(6): 679–681, 685 (in Chinese).

[15] 路峰, 吴慧中. 网格环境下基于云模型的信任评估与决策方法研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(2): 421–426.
LU F, WU H Z. Research of trust valuation and decision-making based on cloud model in grid environment[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(2): 421–426 (in Chinese).

[16] LIN L, GANG D. A multiple classification method based on the cloud model[J]. Neural Network World Journal, 2010, 20(5): 651–666.

[17] 刘文奇. 均衡函数及其在变权综合中的应用 [J]. 系统工程理论与实践, 1997, 17(4): 58–64, 74.
LIU W Q. Balanced function and its application for variable weight synthesizing[J]. System Engineering Theory and Practice, 1997, 17(4): 58–64, 74 (in Chinese).

downloaded from www.ship-research.com