

船舶状态综合评估模型的建立

上海海事大学 董建华 郑士君

上海远洋 王新全 吴雨华

摘要: 针对船舶状态综合评估传统方法的主观性与单一性, 考虑到船舶评估的复杂性, 本文采用层次分析法与模糊综合评价法相结合的方法建立船舶状态层次模糊综合评估模型, 使船舶状态综合评估的结果更为科学、客观, 并结合实例作简要介绍。

关键字: 船舶 状态评估 层次分析法 模糊综合评价法

船舶状态评估有着自身的特点, 潜在风险因素多而复杂, 且通常具备随机性、模糊性及信息不完全性。综合分析船舶状态评估理论的发展历程, 以及以往常用的工程评估分析理论及方法, 在全面分析这些评估方法的优缺点及适用场合的基础上, 结合船舶状态评估的实际特点, 来选择适用于船舶定量风险评估的理论方法, 并建立了层次分析法与模糊综合评价法相结合的风险评估模型。并综合考虑影响船舶状态评估的人、船、环境和管理四个方面出发, 来建立船舶状态定量评估的指标体系与指标的分级标准。

1. 船舶状态评估方法选择

在实际问题的评估中, 单因素的评估总是比较好办的, 难的就是多因素的综合评判。仔细考虑一下各种较为复杂的事物, 特别是包括人的心理、判断行为等因素在内的各种事物, 不难发现其中存在有许多不确定性, 而这种不确定性中有许多并非传统的随机性, 而是由于各种概念外延的不确定性而造成的一种模糊性。即事物在中介过渡时所呈现的“亦此亦彼”性。诸如综合评估过程、多维决策过程等, 伴随着错综复杂的关系, 模糊性的普遍存在更是不容置疑的。因为, 只要是包含着某种评估的人类行为, 其中的重复和空隙就会在所难免。而且, 事物的复杂性意味着因素的众多和繁杂, 当人们不可能对全部因素都进行考察, 而只是能在一个压缩了的低维因素空间上来观察问题时, 即使本来是明确的事物或概念, 也可能变得模糊起来。不难看出, 船舶状态评估尺度问题显然存在着上述的模糊性。譬如对船舶设备状态的描述方法通常有: 优秀、良好、一般、差等定性表示, 而这些定性表示方式无法用一个严格意义上的判断标准来衡量, 而是一个模糊性概念。对这类模糊性现象的处理、描述与分析, 模糊数学是一种有效的方法。它把传统数学从二值逻辑的基础扩展到连续值上来。同时, 对船舶状态进行综合定量评估时, 还必须对多个层次的各个因素的具体状态进行数量化的综合。即将人们的比较判断的思维过程在较多的层次上进行数量化, 获取船舶状态评估指标权重系数。而对这类问题的处理亦有一种简明实用的方法——层次分析法 (AHP)。因此, 本课题选用层次分析法与模糊综合评价法作为处理问题的工具, 采用定量和定性相结合的方法。

2. 计算指标权重系数的数学模型——层次分析法 (AHP)

层次分析法 (AHP) 是美国著名运筹学家、匹兹堡大学教授 T·L·萨蒂 (T.L.Saaty) 于七十

年代中期提出的。它是一种将定性和定量分析相结合的系统分析方法，是分析多目标、多准则的复杂系统的有力工具。AHP的基本思路是评价者首先将复杂问题分解为若干组成要素，并将这些要素按支配关系形成有序的递阶层次结构；然后通过两两比较，确定层次中诸要素的相对重要性；最后评价各层次的重要程度，得到诸要素的评价对象中的权重系统。利用层次分析法确定指标权重的主要步骤如下：

(1) 建立递阶层次结构模型

对任何一个系统进行评价，都要首先明确评价的目标、评价的准则以及被评价的方案等。因此，我们先要分析评价系统中所包含的因素，按照因素的相互关联影响以及隶属关系，将因素按不同层次聚集组合，形成一个多层次的结构模型。通过对船舶系统结构模型进行分析，参考国内外有关资料并征询专家意见，得到船舶状态综合评价指标体系及分层。并以船用辅锅炉为例，对其子层进一步的细化如图 1-2 所示。

(2) 构造比较判断矩阵

递阶层次结构建立后，第二步就是在各层要素中进行两两比较，并引入判断尺度将其量化，构成比较判断矩阵。

比较判断矩阵是以上一层的某要素 H_K 为评价准则，对下一层次的要素 A_1, A_2, \dots, A_n 进行两两比较，按判断尺度确定其相当重要度 a_{ij} ，以此作为元素值，建立判断矩阵：

H_K	A_1	A_2	...	A_j	...	A_n
A_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1j}	...	a_{1n}
A_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2j}	...	a_{2n}
A_i	a_{i1}	a_{i2}	...	a_{ij}	...	a_{in}
A_n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nj}	...	a_{nn}

判断尺度表示要素对要素的相对重要性的数量尺度，常用的有九标度判断尺度。而在本课题研究为了使被调查专家对各要素的重要度更容易作出判断，避免产生逻辑错误，采用三标度判断尺度的判断矩阵，其判断尺度如表 1-1 所示。

表 1-1 1—3 标度判断尺度表

判断尺度	重要性等级
1	对 H_K 而言， A_i 比 A_j 同等重要
2	对 H_K 而言， A_i 比 A_j 重要
0	对 H_K 而言， A_i 没有 A_j 重要

三标度判断尺度的判断矩阵只是一个间接判断矩阵，在计算各指标权重时需转换成九标度判断尺度的判断矩阵。

(3) 计算指标权重向量

为了从判断矩阵中提炼出有用的信息，达到对事物的规律性认识，为决策提供科学的依据，

就需要计算每个判断矩阵的权重向量和全体判断矩阵的合成权重向量。目前对船舶状态评价研究中主要采用求根法来计算特征值的近似值 \mathbf{W} ，其步骤如下：

由定理：对判断矩阵 \mathbf{B} 的全部列向量求每一分量的几何平均，再规范化后的向量就是权重向量。所以，对判断矩阵 \mathbf{B} 每行诸元求几何评价，有：

$$\bar{w}_i = \left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1-1)$$

再规范化，便得到权重向量

$$w_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n b_{ij} \right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{k=1}^n \left(\prod_{j=1}^n b_{kj} \right)^{\frac{1}{n}}} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (1-2)$$

得到 $\mathbf{W} = (\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2, \dots, \mathbf{W}_n)$ ，即为 \mathbf{B} 的特征向量得近似值，也是各评价因素得相对权重得近似值。

(4) 判断矩阵的一致性检验

在实际评价中评价者只能对 \mathbf{B} 进行粗略的判断，可能会产生判断矩阵不一致性的错误。造成这种情况的原因主要有两个，一是专家在进行两两比较时的价值取向和定级技巧，二是重要性等级赋值的非等比性。为了检验判断矩阵 \mathbf{B} 的一致性（相容性），根据 AHP 的原理，可通过计算一致性指标（简写 CI）进行判断：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (1-3)$$

判断矩阵的最大特征值 λ_{\max} 为：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_i} \quad (1-4)$$

对判断矩阵 \mathbf{B} 有，当 $\lambda_{\max} = n$ 时，由 $CI=0$ ，矩阵 \mathbf{B} 完全一致；当 $\lambda_{\max} \geq n$ 时， CI 的值大于零，矩阵 \mathbf{B} 稍有不一致； λ_{\max} 与 n 的差越大，即 CI 值越大，矩阵 \mathbf{B} 的不一致性也就越大。

随着判断矩阵维数 n 的增大，判断的一致性就越差，维数 n 对矩阵的一致性造成一定的影响。萨迪（Saaty）建议取一致性指标（CI）对平均随机性指标均值（RI）之比，即一致性比率（CR）作为一致性检验的判别式

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1-5)$$

其中，RI 为平均随机一致性指标，它是仅与判断矩阵的维数有关的指标。RI 的取值如表 1-2

所示。

表 1-2 平均随机一致性指标 RI 的值

矩阵维数 n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

注：当矩阵维数 $n \leq 2$ 时，矩阵不存在不一致问题，所以不必检验。

对每个判断矩阵 \mathbf{B} 求 CR ，当 $CR < 0.1$ 时，认为此判断矩阵 \mathbf{B} 有满意的一致性，即评判较为合理，否则，需要重新评审来确定判断矩阵数据。

3. 模糊综合评价 (FCE) 的数据模型

模糊综合评价法(FCE)是近年来发展较快，应用范围正在迅速拓展的一种新方法，其优点在于考虑到了客观事物内部关系的错综复杂性和价值系统的模糊性。在实际应用中，评价对象的因素集往往并非只是单一的，而是有若干组组成，这样就形成多级模糊综合评价的问题。下面就是依据二级模糊综合评价模型来求解决多级模糊综合评价的问题。沿用模糊综合评价数学模型的思路，我们将因素集 U 分成若干组 $U = \bigcup_{i=1}^p U_i$ ，其中 $U_i \cap U_j = \emptyset, i \neq j$ ，设 $U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \Lambda, u_{im_i}\}$ ，于是 $U = \{u_{11}, \Lambda, u_{1m_1}, u_{21}, \Lambda, u_{2m_2}, \Lambda, u_{p1}, \Lambda, u_{pm_p}\}$ ，令 $\bar{U} = \{U_1, U_2, \Lambda, U_p\}$ ，称 \bar{U} 为第 2 层因素集，其元素 U_i 为第 1 层因素集 U 的子集，仍旧对比进行综合评价，便得到多级模糊综合评价模型，具体步骤如下：

步骤 1 对第 2 层的第 i 组 $U_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \Lambda, u_{im_i}\}$ 中诸因素进行单因素评价，即建立模糊映射 $\tilde{f}_i: U_i \rightarrow F(V)$ ，其中 $\tilde{f}_i(u_{ik}) = (r_{k1}^{(i)}, r_{k2}^{(i)}, \Lambda, r_{kn}^{(i)}) \in F(V)$ ，于是可求得评价矩阵 \tilde{R}_i ，以 (U_i, V, \tilde{R}_i) 为原始模型，在 U_i 中给出诸因素的权重分配 $\tilde{A}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im_i})$ ，求得综合评价 $\tilde{B}_i = \tilde{A}_i \circ \tilde{R}_i \in F(V) (i = 1, 2, \Lambda, p)$ 。

步骤 2 考虑第 2 层因素集 $\bar{U} = \{U_1, U_2, \Lambda, U_p\}$ ，以 \tilde{B}_i 作为因素 U_i 的单因素评价，建立模糊映射 $\tilde{f}: \bar{U} \rightarrow F(V)$ ， $U_i \alpha \tilde{f}(U_i) = \tilde{B}_i$ ，于是得到第 2 层的模糊关系综合评价矩阵

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \tilde{B}_1 \\ \tilde{B}_2 \\ \Lambda \\ \tilde{B}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \Lambda & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \Lambda & b_{2n} \\ \Lambda & \Lambda & \Lambda & \Lambda \\ b_{p1} & b_{p2} & \Lambda & b_{pn} \end{bmatrix} \quad (1-6)$$

以 (U, V, \tilde{R}) 为原始模型，在 \bar{U} 中给出诸因素的权重分配 $\tilde{A} = (a_1, a_2, \dots, a_p) \in F(U)$ ，求

得综合评价 $B = A \circ R \in F(V)$ 。

B 即为二级模糊综合评价模型的综合评价，类似地，可推广到多级模糊综合评价模型。二级模糊综合评价模型的步骤可由下面二级转换器表示（如图 1-1）。

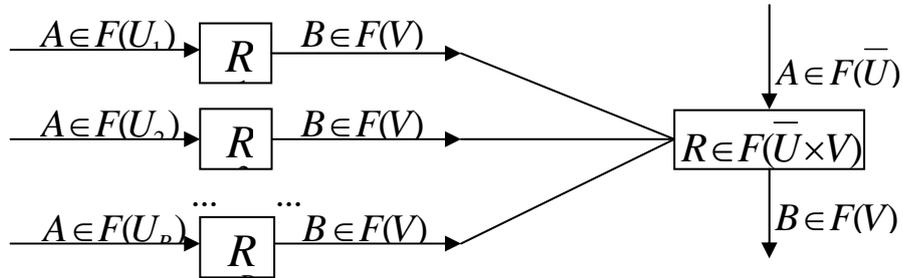


图 1-1 二级模糊转换器

4. 层次模糊综合评估模型应用实例

利用层次模糊综合评估模型来评定某船用辅锅炉的运行状态，该锅炉的评估指标如图 1-2 所示。

为了确定各指标权重，首先进行专家调查。由船舶状态评估专家、资深船员根据其丰富的实践经验与工作阅历对各个指标的重要度进行两两比较，并利用层次分析法编制计算机程序计算，得到各个指标的相对权重。根据专家交回的调查表中每一个评价指标相对重要度两两比较的判断赋值表，通过计算可得到评估指标权重的一个参考值。由式 1-3、1-4、1-5 计算随机一致性比率 CR，当 $CR < 0.1$ 时比较判断矩阵具有满意的一致性，则评价指标权重的参考值可用；若 $CR \geq 0.1$ 时，比较判断矩阵不一致，参考值舍弃，必须进行修正。

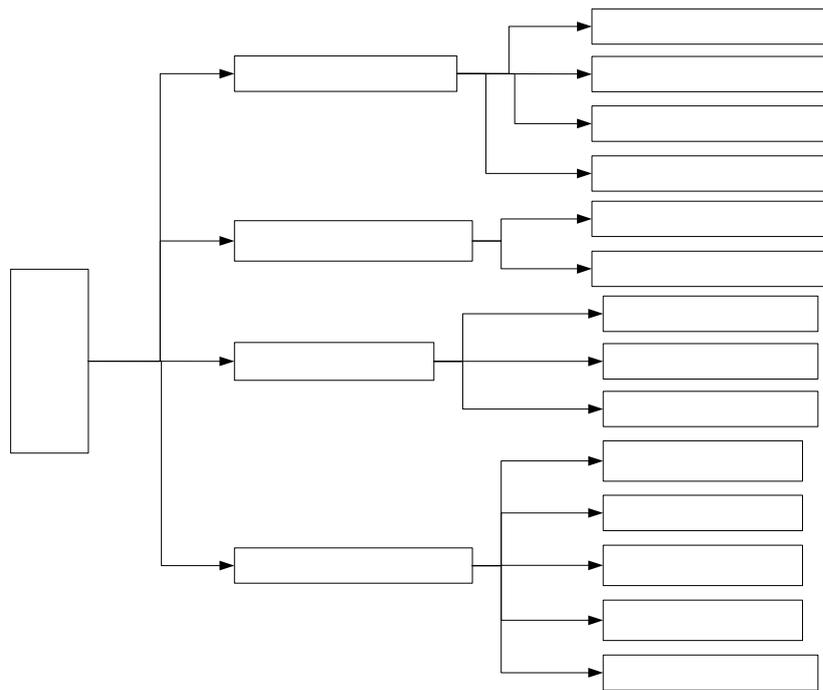


图 1-2 船舶辅锅炉评估指标

依据上述计算方法编成计算机程序运算，运行得到锅炉状态评估指标权重。如表 1-3 至表 1-7 所示。

表 1-3 锅炉整体权重指标

指标	燃烧器部分	电气控制部件	给水部分	锅炉本体部分
权重	0.35	0.15	0.35	0.15

表 1-4 燃烧器组件权重指标

指标	燃烧器	燃油系统	管系阀件	仪表附件
权重	0.34	0.29	0.14	0.23

表 1-5 电气控制部件权重指标

指标	自动控制装置	报警系统
权重	0.53	0.47

表 1-6 给水部件权重指标

指标	水泵情况	管系阀件	仪表附件
权重	0.51	0.14	0.35

表 1-7 锅炉本体部件权重指标

指标	炉膛	烟道	水管闷堵	安全阀件	水位表附件
权重	0.19	0.20	0.22	0.21	0.18

下面按照模糊综合评价的基本步骤对该锅炉进行综合评估。

由因素集 $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\} = \{\text{燃烧器部分, 电气控制部件, 给水部分, 锅炉本体部分}\}$;

$U_1 = \{U_{11}, U_{12}, U_{13}, U_{14}\} = \{\text{燃烧器, 燃油系统, 管系阀件, 仪表附件}\}$;

$U_2 = \{U_{21}, U_{22}\} = \{\text{自动控制装置, 报警系统}\}$;

$U_3 = \{U_{31}, U_{32}, U_{33}\} = \{\text{水泵, 管系阀件, 仪表附件}\}$;

$U_4 = \{U_{41}, U_{42}, U_{43}, U_{44}, U_{45}\} = \{\text{炉膛, 烟道, 水管闷堵, 安全阀件, 水位表附件}\}$ 。

对锅炉各部件运行状态的评估描述决断集（也称评语集），为：

$V = (V_1, V_2, V_3, V_4, V_5) = (\text{优秀, 良好, 一般, 差, 较差})$ 并在评语集 V 中规定 $V_1=100, V_2=80, V_3=60, V_4=40, V_5=20$ 。

将上述主层次分析法获得的锅炉各零部件在评估中的权重表示如下：

$$A = (0.35, 0.15, 0.35, 0.15)$$

$$A_1 = (0.34, 0.29, 0.14, 0.23)$$

$$A_2 = (0.53, 0.47)$$

$$A_3 = (0.51, 0.14, 0.35)$$

$$A_4=(0.19, 0.20, 0.22, 0.21, 0.18)$$

现在由技术专家、资深船员等 10 人组成评估专家组对该锅炉实施评价，其评估结果如下：

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0.2 \\ 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.1 & 0.2 \end{bmatrix} \quad R_2 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0.3 & 0.1 \\ 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \end{bmatrix} \quad R_4 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.3 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}$$

根据各自得权重并利用模糊矩阵进行复合运算，得出一级综合评估：

$$B_1 = A_1 \circ R_1 = (0.3, 0.29, 0.2, 0.2, 0.2)$$

$$\tilde{B}_2 = \tilde{A}_2 \circ \tilde{R}_2 = (0.4, 0.3, 0.2, 0.3, 0.1)$$

$$\tilde{B}_3 = \tilde{A}_3 \circ \tilde{R}_3 = (0.35, 0.3, 0.3, 0.2, 0.1)$$

$$\tilde{B}_4 = \tilde{A}_4 \circ \tilde{R}_4 = (0.22, 0.21, 0.21, 0.22, 0.1)$$

将 $B_1, \tilde{B}_2, \tilde{B}_3, B_4$ 归一化处理，并将所得向量作为上层指标评价矩阵，得出二级综合评估：

$$B = A \circ R = (0.28, 0.24, 0.24, 0.16, 0.17)$$

\tilde{B} 归一化得

$$B' = (0.257, 0.22, 0.22, 0.147, 0.156)$$

由此，计算出该锅炉运行状态的综合得分为：

$$W = \sum_{k=1}^m b_k v_k = B' \cdot V = 65.5$$

5. 总结：

采用层次模糊综合评价模型改进了传统的船舶状态评估方法，克服了传统方法评估过程单一化、主观化的缺点，且极大地消降了传统权数确定过程中的主观随意性成分，很好的解决了评估过程中定性指标难于比较的困难，在定性与定量之间通过层次分析法与模糊数学的理论架起了一座桥梁。

参考文献：

1. 秦寿康. 综合评价原理与应用. 电子工业出版社, 2003-6
2. 上海海运学院系统工程教研室主编. 系统工程, 1998-10
3. 张春来. 船舶设备安全状态的量化评价. 大连海事大学学报, 1998, 24 (3)