基于证据理论的潜艇舱室综合环境质量评价

庞丽萍 曲洪权

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191) (北方工业大学 信息工程学院，北京 100041)

摘 要：以我国核潜艇舱室环境为研究对象，开展综合环境质量评价研究.经分析确定与潜艇舱室环境质量相关的影响因素主要包括温度、湿度、空气污染物、颗粒状污染物、微生物及噪声.为克服上述多评价因素之间的多项性和不确定性，提出采用基于D-S(Dempster-Shafer)证据理论的潜艇舱室综合环境质量评价方法.该方法是在层次分析法的基础上，引入证据理论，利用D-S合成公式对不同权重的多个专家评价信息进行合成.该方法能够有效综合多个不同权威评价专家的不确定性评价意见，提高评价结果可信度.

关 键 词：潜艇；环境质量评价；层次分析法；D-S证据理论

中图分类号：X 820.1

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2008)11-1243-04

Environmental quality evaluation for submarine based on D-S theory

Pang Liping

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Qu Hongquan

(School of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: The integrative environmental quality is very important to staff working in the submarine cabin. There are many factors affecting the integrated environmental quality in a submarine cabin, such as temperature, humidity, air trace contaminants, particle pollutants, microorganism and noise. To better evaluate thses factors contributing to the environmental quality, an integrated environmental quality evaluation was studied based on D-S(Dempster-Shafer) theory and analytic hierarchy process. Firstly, the specialists get the evaluation results with the AHP(analytic hierarchy process), but usually different specialists have different weight coefficients for the same environmental fact. Therefore, it is very difficult to deal with this issue. To solve the issue, the D-S was introduced to synthesize the different specialist results. The results could effectively fuse multi-specialists uncertainty evaluation results and improve its dependability.

Key words: submarine; enviromental quality evaluation; analytic hierarchy process; D-S evidence theory

核潜艇舱室环境是全体艇员出航期间赖以生存的环境，潜艇舱室环境质量是比舱室空气质量内涵更广，对艇员生理和心理具有综合作用[1-2]，直接影响艇员的安全性、舒适性和工作效能，甚至会对战斗力造成一定的损伤[3-4].而我国尚未建立健全的潜艇舱室大气环境综合评价体系，不能为潜艇长期潜伏提供全面的评价标准，所以急需建立用于长期潜航的舱室大气环境综合评价体系.

综合评价常涉及多指标、多属性的不确定性综合评价，主要方法有层次分析法、模糊综合评判法、灰色聚类分析法等.但上述方法都存在一些问题：评价函数难以建立，或者评价方法过于简单，在评价过程中，难以综合不同专家的意见以形成更高可信度的结论.为了克服上述评价方法的不足，本文提出采用基于D-S(Dempster-Shafer)证据理论的综合环境质量评价方法，用于评价潜艇

收稿日期：2007-09-07

作者简介：庞丽萍(1973—)，女，黑龙江海林人，副教授，pangliping@buaa.edu.cn.

舱室综合环境的多项性和不确定性.该方法是在层次分析法的基础上,引入证据理论,利用D-S合成公式对不同权重的多个评价信息进行合成,提高评价结果可信度.

1 综合环境质量评价模型

1.1 基于D-S证据理论的综合环境质量评价

潜艇舱室综合环境由空气、水、噪声、电磁辐射、放射性环境等多方面组成[5],因此需要对潜艇舱室环境质量进行综合评价.

确定多要素环境质量综合指数常采用层次分析法,但该方法由于两两比较结果的主观性,权重系数可能随时间、专家个人的观测值和偏好、各因素的取值范围等变化而有差异,因专家不同而得到不同的权重系数.但每一个专家对评价都有一定的支持,所以应综合考虑各个专家的意见.

证据理论是一种重要的不确定性推理方法,能够有效合成不同专家之间的不确定结论,从而能够将不同专家从不同角度所获得的结果综合起来,形成综合评价.所以,本文提出一种基于D-S证据理论的潜艇舱室综合环境质量评价方法,在层次分析法的基础上,引入证据理论,提高评价结果可信性.该评价方法具体实现方法如图1所示.

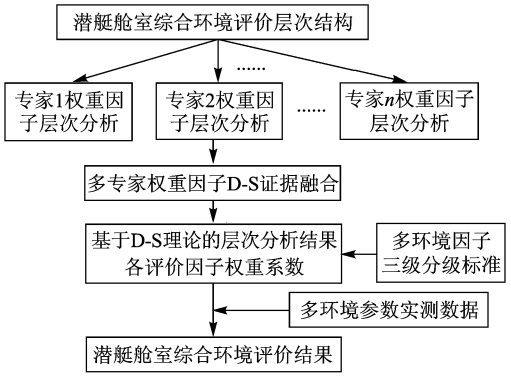

图1 基于D-S证据理论的潜艇舱室综合环境质量评价

1.2 层次分析法模型

层次分析法是一种无结构的多准则决策方法,适合于复杂目标结构情况.若有 n 个因子相互比较重要性,就可以构造出判断矩阵 $\boldsymbol{H}$.将向量 $\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^{\mathrm{T}}$ 左乘矩阵 $\boldsymbol{H}$,则有:$\boldsymbol{HW}=n\boldsymbol{W}$.$\boldsymbol{W}$ 为矩阵 $\boldsymbol{H}$ 的特征向量,n 为特征值.$\boldsymbol{W}$ 代表了 n 件事物的相对重要性.

1.3 D-S理论

在群决策中,需将不同相关知识领域专家的意见综合起来,集结专家意见最有效的理论是D-S证据理论.它能区分不确定和不知道的差异,能较好地处理具有模糊和不确定信息的合成问题,在处理不同意见集结时,具有明显优势[6-7].

1) 证据理论.任意证据均可用一个非空集合 Θ 来表示,即辨识框,2^{Θ} 称为 Θ 的幂集.

证据对 Θ 的幂集中元素的支持程度由如下映射关系表示 $m:2^{\Theta}\rightarrow[0,1]$,$m$ 满足:

$$m(\varnothing)=0$$

$$\sum_{\boldsymbol{H}\subseteq\Theta}m(\boldsymbol{H})=1$$

对任意 $\boldsymbol{H}\in 2^{\Theta}$,$m(\boldsymbol{H})$ 表示证据支持命题 $\boldsymbol{H}$ 发生程度,但不表示对任何 $\boldsymbol{H}$ 的真子集的支持程度.函数 m 称为给定证据下的基本可信度分配函数.

采用Dempster合成公式反映证据的联合作用.设 m_1 和 m_2 是同一辨识框的两个证据所对应的基本可信度分配,焦元分别为:$H_1,H_2,\cdots,H_n$ 和 $Q_1,Q_2,\cdots,Q_n$,则由下式定义的函数 $m:2^{\Theta}\rightarrow[0,1]$ 是两个证据联合后的基本可信度分配:

$$m(\boldsymbol{H})=\begin{cases}0 & \boldsymbol{H}=\varnothing\\ \dfrac{\sum\limits_{H_i\cap Q_j=\boldsymbol{H}}m_1(H_i)m_2(Q_j)}{1-\sum\limits_{H_i\cap Q_j=\varnothing}m_1(H_i)m_2(Q_j)} & \boldsymbol{H}\neq\varnothing\end{cases}$$

当多个证据合成时,可使用该式级联运算.

2) 自然语言描述的基本可信度分配.根据合成公式对意见进行集结.将模糊词语集定为:$U=$ {绝对肯定,很肯定,大致肯定,判断不出,大致否定,否定,绝对否定},用7个类来充分表达各模糊词语,对应可信度取值为:$R=\{1.0,0.9,0.7,0.5,0.3,0.1,0\}$.设 Θ 为一个辨识框 $\boldsymbol{H}\subset\Theta$,设有 p 个专家,第 i 个专家对集合 $H_{i1},H_{i2},\cdots,H_{ik}$ 的确认程度为 $r'_{i_1},r'_{i_2},\cdots,r'_{i_k}$,令

$$r_{i_j}=r'\Big/\sum_{l=1}^{k}r'_{i_l}\qquad j=1,\cdots,k$$

则认为第 i 个专家所提出的评估意见在 Θ 上产生了一个基本可信度分配,$m_i:2^{\Theta}\rightarrow[0,1]$,其中

$$m_i(H_{i_j})=R_{i_j}\qquad j=1,\cdots,k$$

$$m_i(Q)=0\qquad Q\neq H_{i_1},\cdots,H_{i_k}$$

2 潜艇舱室综合环境质量评价分析

潜艇舱室环境污染造成危害的无数事实表明,由单一污染作用的结果很少,多为几种污染联合作用[2],因此需考虑污染的综合效应.

2.1 潜艇舱室综合环境质量评价对象

1) 评价层次结构.通过分析确定潜艇舱室环境综合评价为3层结构[1,8],如图2.

2) 具体因子分级标准.每个具体因子采用3级划分:Ⅰ级代表"优";Ⅱ级代表"可";Ⅲ级代表

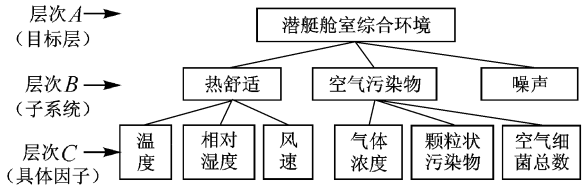

图 2　潜艇舱室综合环境评价层次结构图

"差",如表 1 所示.

表 1　具体因子分级标准

因子	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级
温度/℃	$\|t-25\|\leqslant 2$	$2<\|t-25\|\leqslant 5$	$\|t-25\|>5$
相对湿度/%	$\|\varphi-50\|\leqslant 20$	$20<\|\varphi-50\|\leqslant 30$	$\|\varphi-25\|>30$
夏季风速/(m·s^{-1})	≤0.5	0.5～1	>1
冬季风速/(m·s^{-1})	≤0.25	0.25～0.5	>0.5
有害气体 C_{sum}	≤2.5	2.5～5.5	>5.5
悬浮颗粒物数/(个·m^{-3})	100	100～500	500
夏季空气细菌总数/(cfu·m^{-3})	1 500	1 500～2 500	2 500
冬季空气细菌总数/(cfu·m^{-3})	4 500	4 500～7 000	7 000
噪声污染指数	1	1.01～1.13	1.13

注:表中 t 代表温度值;φ 代表相对湿度值.

表 1 中 $C_{sum}=\sum_{i=1}^{n}C_i/C_{i,max}$. 其中,$n$ 为有害气体数,C_i 为第 i 种气体的测量浓度,$C_{i,max}$ 为第 i 种气体的最大允许浓度. CO_2 的 C_{max} 为 0.5%,其余的有害气体最大允许浓度见表 2.

表 2　有害气体最大容许浓度(核潜艇 90 天)

气体种类	CO	NO_2	H_2S	SO_2	Cl_2	NH_3	氟里昂-12
最高容许浓度/(mg·m^{-3})	11	0.4	0.07	0.5	0.15	3.5	500

2.2　单专家权重因子层次分析

每个专家权重因子分析是基于层次分析法. 如有专家 1 和专家 2,分别按照自己的经验依据层次分析法确定具体因子权重系数.

目标层 A:综合环境质量.

子系统层 B={热舒适,空气污染物,噪声}={b_1,b_2,b_3}.

具体因子层 C={温度,湿度,风速,气体浓度,颗粒状污染物,空气细菌总数,噪声}={c_1,c_2,c_3,c_4,c_5,c_6,c_7}.

1) 经过专家 1 的评价,获得层次之间 A-B,B_1-C,B_2-C 判断矩阵如下:

$$\begin{array}{c} A \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} B_1 & B_2 & B_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/5 & 2 \\ 5 & 1 & 7 \\ 1/2 & 1/7 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} B \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} C_1 & C_2 & C_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} B_2 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} C_4 & C_5 & C_6 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

按层次分析法求权重向量、最大特征值,对评分的结果进行一致性检验,获得专家 1 的评价:最底层各因子 C 对总目标 A 的权重 $W_1=\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_5,c_6,c_7\}=\{0.12,0.06,0.02,0.39,0.02,0.29,0.10\}$. 重要性排序:$c_4>c_6>c_1>c_7>c_2>c_5>c_3$.

2) 经过专家 2 的评价比较,获得层次之间 A-B,B_1-C,B_2-C 判断矩阵如下:

$$\begin{array}{c} A \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} B_1 & B_2 & B_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/6 & 5 \\ 6 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/6 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} B_1 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} C_1 & C_2 & C_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 3 & 7 \\ 1/3 & 1 & 4 \\ 1/7 & 1/4 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} B_2 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} C_4 & C_5 & C_6 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

同理得到专家 2 的计算结果:最底层各因子 C 对总目标 A 的权重 $W_2=\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_5,c_6,c_7\}=\{0.19,0.09,0.02,0.37,0.03,0.22,0.07\}$. 重要性排序:$c_4>c_6>c_1>c_2>c_7>c_5>c_3$.

2.3　多专家权重因子 D-S 证据融合

经专家 1 和专家 2 评分获得的权重系数为

$$W_1=\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_5,c_6,c_7\}=\{0.12,0.06,0.02,0.39,0.02,0.29,0.10\}$$

$$W_2=\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_5,c_6,c_7\}=\{0.19,0.09,0.02,0.37,0.03,0.22,0.07\}$$

由于两个专家对具体因子的重要性观点不同,造成了不同的权重系数. 每个专家对评价结果都是一条有利的证据,需要使用 D-S 理论对评价信息进行融合. 采用证据理论融合结果如下:

最底层各因子 C 对总目标 A 的权重 $W_{D\text{-}S}=\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_5,c_6,c_7\}=\{0.09,0.02,0.002,0.59,0.002\,4,0.26,0.03\}$.

D-S 理论融合后的底层因子重要性顺序为:

$c_4>c_6>c_1>c_7>c_2>c_5>c_3$.

按重要性依次对各评价因素从7到1赋权重值,分别代表相应的重要性.

2.4 基于D-S理论的层次分析法确定权重系数

层次之间A-B,B_1-C,B_2-C判断矩阵如下:

$$\begin{array}{c} \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} A & B_1 & B_2 \quad B_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/6 & 5 \\ 6 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/6 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} B_1 & C_1 \quad C_2 & C_3 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1.67 & 5 \\ 0.6 & 1 & 3 \\ 0.2 & 0.33 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} B_2 & C_4 \quad C_5 & C_6 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 3.5 & 1.17 \\ 0.29 & 1 & 0.33 \\ 0.86 & 3 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

按层次分析法求权重向量、最大特征值,对专家评分的结果进行一致性检验.

最底层各因子C对总目标A的权重系数为

$$W=\{c_1,c_2,c_3,c_4,c_5,c_6,c_7\}=$$
$$\{0.17,0.10,0.03,0.33,0.02,0.28,0.07\}$$

2.5 潜艇舱室综合环境质量评价示例分析

采用基于D-S证据理论的层次分析法确定出权重系数,就可以进行潜艇舱室环境的综合评价了.表3是某潜艇夏季舱室各环境参数测量值,表4是有害气体浓度测量数据,CO_2测量值为0.4%.

表3 某潜艇舱室环境测量数据

温度/℃	湿度/%	风速/(m·s^{-1})	颗粒污染物/(个·m^{-3})	空气细菌/(个·m^{-3})	噪声/污染指数
26	0.75	0.4	90	1000	1.14

表4 某潜艇舱室有害气体浓度测量数据

气体种类	CO	NO_2	H_2S	SO_2	Cl_2	NH_3	氟里昂-12
测量浓度/(mg·m^{-3})	8	0.3	0.05	0.3	0.1	2	200

由表1和表2获得各具体因子分级矩阵$\boldsymbol{I}$和$\boldsymbol{W}$.

$$\boldsymbol{I}'=\begin{array}{c} \\ \text{Ⅰ} \\ \text{Ⅱ} \\ \text{Ⅱ} \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccccccc} c_1 & c_2 & c_3 & c_4 & c_5 & c_6 & c_7 \end{array} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array}$$

$$\boldsymbol{W}=[0.17,0.10,0.03,0.33,0.02,0.28,0.07]$$

某潜艇舱室综合环境评价采用加权求和法:

$$E=\sum_{i=1}^{7}(W_iI_i)\Big/\sum_{i=1}^{7}W_i=\begin{bmatrix}0.504\\0.429\\0.067\end{bmatrix}$$

所以,该潜艇此时的综合环境质量为Ⅰ级.

3 结束语

潜艇舱室大气环境质量影响因素众多,包括热湿环境、空气污染物、颗粒状污染物、微生物及噪声等.为了能有效评价其综合环境质量,本文提出采用基于D-S证据理论的综合环境质量评价方法,用于评价潜艇舱室综合环境的多项性和不确定性.在层次分析法的基础上,引入证据理论,利用D-S合成公式对不同权重的多个专家评价信息进行合成,提高评价结果可信度.该方法是一种新的不确定性综合评价方法,能够有效融合多个不同权威程度的评价专家的不确定性评价意见,提高评价结果的可信性.实例分析也证明了该评价方法的可靠性和可信性.

参考文献(References)

[1] 史德,谢维杰,倪健.潜艇舱室环境概论[M].北京:兵器工业出版社,2002
Shi De, Xie Weijie, Ni jian. The conspectus of cabin environment in submarine[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2002 (in Chinese)

[2] Huang B J, Liao Y C, Kuo T C. Study of a new environmental chamber design[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11): 1967-1977

[3] Severs Y D. A baseline air quality assessment onboard a victoria class submarine [R/OL]. Toronto: Defence R&D Canada, 2006: 34-36. http://www.stormingmedia.us/00/0003/A000374.pdf

[4] HMCS Okanagan. An air quality assessment onboard an oberon class submarine [R/OL]. DCIEM Technical Report No. TR 2000-105. http://pubs.drdc.gc.ca/PDFS/zbd87/p514806.pdf

[5] Raffaelli P. Occupational hygiene problems in submarines-OELs for continuous exposure for prolonged periods of up to 3 months [J]. Ann Occup Hyg, 1989, 33(1):117-121

[6] 吕文红,吴祈宗,郭银景.基于D-S证据理论的群决策专家意见集结方法[J].运筹与管理,2005,14(2):22-25
Lü Wenhong, Wu Qizong, Guo Yinjing. The expertise aggregation method in group decision making based on the D-S evidence theory[J]. Operations Research and Management Science, 2005, 14(2): 22-25(in Chinese)

[7] 罗志增,蒋静平.基于D-S理论的多信息融合方法及应用[J].电子学报,1999,27(9):100-102
Luo Zhizeng, Jiang Jingping. Multisensor data fusion based on Dempster-Shafer evidential reasoning and its application [J]. Chinese of Journal Electronics, 1999, 27 (9):100-102 (in Chinese)

[8] Fox A, Harley W, Feigley C, et al. Increased levels of bacterial markers and CO_2 in occupied school rooms[J]. Journal Environmental Monitor, 2003, 5(2): 246-252

(责任编辑:赵海容)