doi:10.11887/j.cn.201706020　　http://journal.nudt.edu.cn

基于多子网语言决策图的空管体系绩效评估*

马跃飞[1,3],陈　峰[2],姚　頔[2],武小悦[1]
(1. 国防科技大学 系统工程学院,湖南 长沙　410073;2. 国家空域管理中心,北京　100094;
3. 中国人民解放军 92493 部队,辽宁 葫芦岛　125000)

摘　要:为评估空管体系综合绩效水平,制定了关键绩效领域和指标,提出基于多子网语言决策图的群体评估模型。采用多子网策略分析领域及指标间的影响关系,应用语言尺度辅助群体专家建立了领域及指标间的初始判断矩阵和影响连接矩阵。给出了模型的求解方法,在求得各子网内准则的全局权重后,聚合即可得到体系的综合评估值。案例分析表明,相比于不考虑领域及指标间影响的情况,模型结果能更客观、全面地展示各领域及指标的权重,更显著地揭示空管体系间的差距。

关键词:空管体系;绩效评估;语言决策图;群体决策
中图分类号:N945　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-2486(2017)06-134-09

Air traffic management system performance evaluation based on linguistic decision map with multi-subnets

MA Yuefei[1,3], *CHEN Feng*[2], *YAO Di*[2], *WU Xiaoyue*[1]
(1. College of Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;
2. State Airspace Management Center, Beijing 100094, China; 3. The PLA Unit 92493, Huludao 125000, China)

Abstract: For evaluating the performance of air traffic management system, a model based on linguistic decision map with multi-subnets was proposed as well as the indexes. The influences among indexes were analyzed by using a multi-subnets strategy, and the initial judgment matrices and influence connective matrices were built by multiple experts using linguistic scales. The proposed approach can achieve global priorities of indexes and evaluation results of alternatives. Finally, the case study illustrates that, in comparison with the independent situation, results of the model can represent priorities of indexes more objectively and comprehensively, and can present the gap among the alternatives more obviously.

Key words: air traffic management system; performance assessment; linguistic decision map; group decision making

空中交通管理系统(又称空管体系)以分布式的通信、导航、监视系统为支撑,通过整合人、信息、技术、设备,为航空器飞行提供交通管理服务,保障空中交通运行的安全、高效和环保[1]。评估空管体系是定位体系发展水平,探寻发展瓶颈,明晰发展目标的前提。当前空管体系评估研究大多集中在安全性[2]、运行效率[3]、容量[4]、环境影响[5]和空域复杂度[6]等局部领域。这些评估能够反映空管体系在单一领域内的运行情况,但空管体系是一个各部分高度耦合、交互的复杂系统,各领域间存在广泛的深度影响关系,单一领域的评估结果或通过简单的各领域结果叠加都难以客观反映空管体系总体水平。因此,建立合理的综合评估模型是空管体系评估中亟待解决的问题。

近年来,空管体系综合评估问题已引起国际和欧美相关组织的关注。国际民航组织以运行结果为导向,提出了基于运行的概念[1],并制定了空管体系绩效评估框架。但是该框架在部分关键绩效领域内没有设定明确的评估指标,同时缺乏有效的聚合方法。欧美空管机构随之分别制定了各自的空管绩效评估指标,并自 2010 年开始发布欧美空管体系运行比较报告,通过对比各绩效指标值,分析欧美空管体系差异[7]。目前我国的空管体系综合评估尚没有成熟、统一的绩效领域及指标,也缺乏相应的分析与计算方法。

1　模糊决策图

模糊决策图是一种新的解决准则间存在影响

* **收稿日期**:2016-08-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(71401170)
作者简介:马跃飞(1989—),男,吉林辽源人,博士研究生,E-mail:lymayuefei@126.com;
武小悦(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:xiaoyuewu@vip.163.com

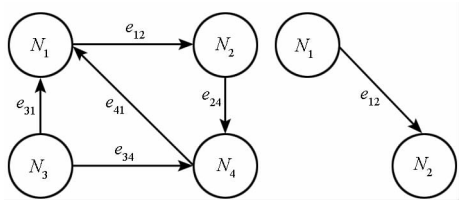
关系的决策方法[8]。该方法通过整合特征向量法和模糊认知图法在描述影响关系与获取权重信息上具有更高的柔性,能够解决一些网络分析法[9]难以求解的情况[10-11],并逐渐得到国内外学者的认可[10,12]。其求解流程如下所示。

设:存在 4 元组$(N,\boldsymbol{E},\boldsymbol{C},f)$,其中$N=\{N_1,N_2,\cdots,N_n\}$为准则集合,$\boldsymbol{E}$是准则间影响连接矩阵;$\boldsymbol{C}^{(t)}$为 t 时刻的准则状态矩阵,$\boldsymbol{C}^{(0)}$为初始状态矩阵;f 为阈值函数,定义 $\boldsymbol{C}^{(t)}$ 到 $\boldsymbol{C}^{(t+1)}$ 的转换关系,常用阈值函数有:

$$f(x)=\tanh(x)=(1-e^{-x})/(1+e^{-x})\cdots\quad(1)$$

步骤 1:建立准则间的初始判断矩阵 $\boldsymbol{O}$,并应用特征向量法[13]求解准则初始权向量 $\boldsymbol{z}$。

步骤 2:应用模糊认知图描述准则间的影响关系,其中 $N_i\rightarrow N_j$ 表示准则 N_i 影响 N_j,$e_{ij}\in(0,1]$ 为根据专家判断得到的影响值,e_{ij}越大表明影响强度越高,进而可建立相应的影响连接矩阵 $\boldsymbol{E}$(见图 1)。



$$\boldsymbol{E}_{(a)}=\begin{bmatrix}0 & e_{12} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & e_{24}\\ e_{31} & 0 & 0 & e_{34}\\ e_{41} & 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\qquad \boldsymbol{E}_{(b)}=\begin{bmatrix}0 & e_{12}\\ 0 & 0\end{bmatrix}$$

情况 1　　情况 2

图 1　模糊认知图

Fig. 1　Fuzzy cognitive map

步骤 3:进一步求解状态矩阵稳态 $\boldsymbol{C}^*$,如下所示。

$$\begin{cases}\boldsymbol{C}^{(t+1)}=f(\boldsymbol{C}^{(t)}\boldsymbol{E})\\ \boldsymbol{C}^{(0)}=\boldsymbol{I}_{n\times n}\\ \boldsymbol{C}^{*}=\lim\limits_{x\rightarrow+\infty}\sum\limits_{t=1}^{x}\boldsymbol{C}^{(t)}\end{cases}\qquad(2)$$

其中,$\boldsymbol{I}_{n\times n}$为单位矩阵,阈值函数 f 根据具体影响情况选择。

步骤 4:合成准则全局权向量。首先标准化准则初始权向量和稳态矩阵,如式(3)所示。

$$\begin{cases}\bar{\boldsymbol{z}}=\boldsymbol{z}/\{\max(\boldsymbol{z})\}\\ \bar{\boldsymbol{C}}^{*}=\boldsymbol{C}^{*}/\gamma\end{cases}\qquad(3)$$

其中,γ 是稳态矩阵行和的最大值。最后,合成准则全局权向量:

$$\boldsymbol{\omega}=\bar{\boldsymbol{z}}+\bar{\boldsymbol{C}}^{*}\bar{\boldsymbol{z}}\qquad(4)$$

模糊决策图的优势是专家不需要对准则间的影响强度进行比较,能够求解一些网络分析法无法计算的情况。如图 1 中情况 2 所示的准则间影响关系,应用模糊决策图方法可以得到准则的全局权向量,但应用 Satty 的网络分析法则建立超矩阵为:

$$\begin{cases}\boldsymbol{S}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 1 & 0\end{bmatrix}\\ \lim\limits_{x\rightarrow\infty}\boldsymbol{S}^{x}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\end{cases}\qquad(5)$$

显然基于 $\boldsymbol{S}$ 无法得到令人满意的准则权重。

然而,由于模糊决策图仅针对单层准则权重的求解,同时缺乏相应的影响强度度量尺度,造成专家有时难以准确地提供准则间影响值 e_{ij},导致该方法很少应用到复杂决策问题的求解中。

2　基于多子网语言决策图的空管体系绩效评估模型

2.1　关键绩效领域和指标

评估空管体系绩效需首先确定评估指标。但是目前国内外尚未形成空管体系绩效评估的统一指标体系。本文借鉴“基于运行”的概念[1],考虑体系评估的宏观性,不纠结于单个系统的性能与功能,并参考欧美空管体系绩效评估经验[7],提出了符合我国实际的关键绩效领域及指标。

在关键绩效领域的选取中,从直接反映空管体系运行结果的“运行绩效”和潜在制约运行结果的“驱动绩效”两方面出发,提出了 7 个关键绩效领域,其中安全、效率、环境影响、容量属于运行绩效;空域结构、系统技术标准、协同决策属于驱动绩效。下文展开论述各领域下的评估指标。

1)安全(S):全面评估安全绩效,既要考虑飞行事故率,也要考虑可能诱发事故的不安全事件,设立:飞行事故万小时率(S_1),不安全事件万小时率(S_2),其中不安全事件包括违反最小间隔、跑道入侵和非授权穿越空域。

2)容量(C):分为空域容量和机场容量。考虑到体系评估的宏观性,首先采用可用空域比例(C_1)来反映军民航实际可用的空域面积占国家空域总面积的比例;其次鉴于我国航空飞行以仪表飞行为主的实际情况,采用仪表飞行总量(C_2)来反映空管体系运行中的容量;最后考虑千万级机场吞吐量占机场总保障量的绝大比例,采用千万级机场数量(C_3)为机场容量的测量指标。

3)效率(E):分为飞行效率和管制效率。从

时间维度出发飞行效率指标包括：起飞准点率(E_1)、到达准点率(E_2)，平均延误时间(E_3)，管制效率则通过人均管制负荷(E_4)来度量，计算方式为仪表飞行总量/管制员数量。

4)环境影响($E-I$)：包括空管相关环保法规政策制定情况($E-I_1$)和航班平均碳排放量($E-I_2$)两方面。

5)空域结构($A-S$)：关注空域规划、配置和管理水平，设立航空网络非直线系数($A-S_1$)、航空网络灵活度($A-S_2$)和空域使用公平性($A-S_3$)3 个指标，其中 $A-S_1$ 越大则表示航路航线的曲折程度越高，$A-S_2$ 考察空管体系通过设立临时航线、采用改航机制等措施避免或降低空中交通拥挤程度的能力；$A-S_3$ 主要考察军民航空域共享机制的公平性。

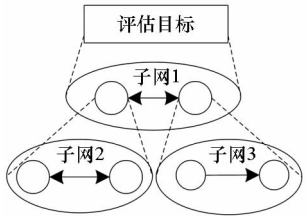
6)系统技术标准($S-S$)：从宏观角度出发，不纠结于单个通信、导航、监视、管制中心系统的性能水平，而关注体系的总体建设情况，设立指标：系统互用性($S-S_1$)，技术标准统一性($S-S_2$)，新技术应用度($S-S_3$)。

7)协同决策($C-D$)：分为战略和战术两个层面。在战略层面，设定各方参与度($C-D_1$)考察在空管体系规划、部署、运营和评估/改进等全寿命周期中各相关方的参与程度；在战术层面，设立军民航协同机制($C-D_2$)考察体系运行中，军民航各级运行部门间的协同情况。

2.2 基于多子网的影响关系分析

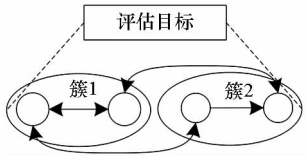
模糊决策图在同一层次内描述所有准则间的影响关系，但是空管体系评估准则众多，可分为领域准则和指标准则，在同一层内难以建立准则间的初始判断矩阵，同时也容易在思考准则间影响关系时陷入混乱。分簇策略[9]是一种常用的降低建模难度的方法，如图 2(b)所示。但是该方法须明确底层每个指标间的影响关系以获取簇间影响，达不到降低影响关系描述难度的目的。为进一步降低建模难度，本文提出了影响关系分析的多子网策略。该策略首先将准则分为不同层级，再按照准则间的层级关系建立多个子网络。在分析影响关系时，决策者仅需考虑各子网内的影响情况，而子网间的影响则由上层子网进行描述(见图 2(a))。这样便降低了决策者每次思考问题的规模，方便其建立初始判断矩阵和准则间影响。

据此由上至下，将空管体系模型分为：目标层、领域层、指标层和方案层，应用多子网策略建立 8 个子网络，分别是领域间影响网络和各领域内指标间影响网络。



(a) 多子网策略

(a) Multiple-sub-nets strategy



(b) 分簇策略

(b) Cluster strategy

图 2 多子网分析策略

Fig. 2 Multiple sub-nets analysis strategy

在领域间影响网络内，“安全”与“容量”相互制约($S\leftrightarrow C$)，而又都影响“效率”($S\rightarrow E$)，同时“效率”则对“容量”存在反馈($E\leftrightarrow C$)。“环境影响”受多种因素制约，但从空管角度出发，飞行效率是其最主要的制约因素($E\rightarrow E-I$)，如绕飞、空中等待都会增加航空器对环境的影响程度。“系统技术标准”是空管体系运行的基础要素对“安全”“容量”“效率”都存在影响($S-S\rightarrow S$，$S-S\rightarrow C$，$S-S\rightarrow E$)；“空域结构”主要影响“效率”和“容量”($A-S\rightarrow E$，$A-S\rightarrow C$)，如：航空网络非直线系数越高，航路航线弯曲程度越大，航空器飞行效率越低；航空网络灵活度越高，则体系调节飞行流的能力越强，体系提高飞行效率，增加实时容量的能力越强。“协同决策”作用于空管体系建设和运行的各个阶段，对“安全”“效率”和“容量”都存在影响($C-D\rightarrow S$，$C-D\rightarrow C$，$C-D\rightarrow E$)，同时其还影响“空域结构”的建设($C-D\rightarrow A-S$)。

对于各领域内子网，在安全领域内，不安全事件可能诱发事故的发生，所以 $S_2\rightarrow S_1$；在效率领域内，管制效率制约着其他 3 个指标($E_4\rightarrow E_1$，$E_4\rightarrow E_2$，$E_4\rightarrow E_3$)，“起飞准点率”和“到达准点率”相互影响($E_1\leftrightarrow E_2$)，并共同影响“平均延误时间”($E_1\rightarrow E_3$，$E_2\rightarrow E_3$)；在容量领域内，机场固有容量和可用空域面积都影响仪表飞行总量($C_1\rightarrow C_2$，$C_3\rightarrow C_2$)；在环境影响领域内，政策法规的制定会影响最终的碳排放量($E-I_1\rightarrow E-I_2$)；在系统技术标准领域内，技术标准的统一性越高则系统互用性越强($S-S_2\rightarrow S-S_1$)；除此之外，其他领域内指标间不存在明显影响关系。

根据上述分析,最终建立空管体系绩效评估模型的多子网结构(见图 3)。

2.3　基于模糊语言尺度的专家群体判断获取

模糊决策图要求专家提供基于明晰数的准则间影响值信息 $e_{ij} \in (0,1]$,但是由于缺乏明确的尺度,专家往往难以回答这一问题。相对而言,专家更容易应用如“一般影响”等语言尺度评价准则间的影响情况。

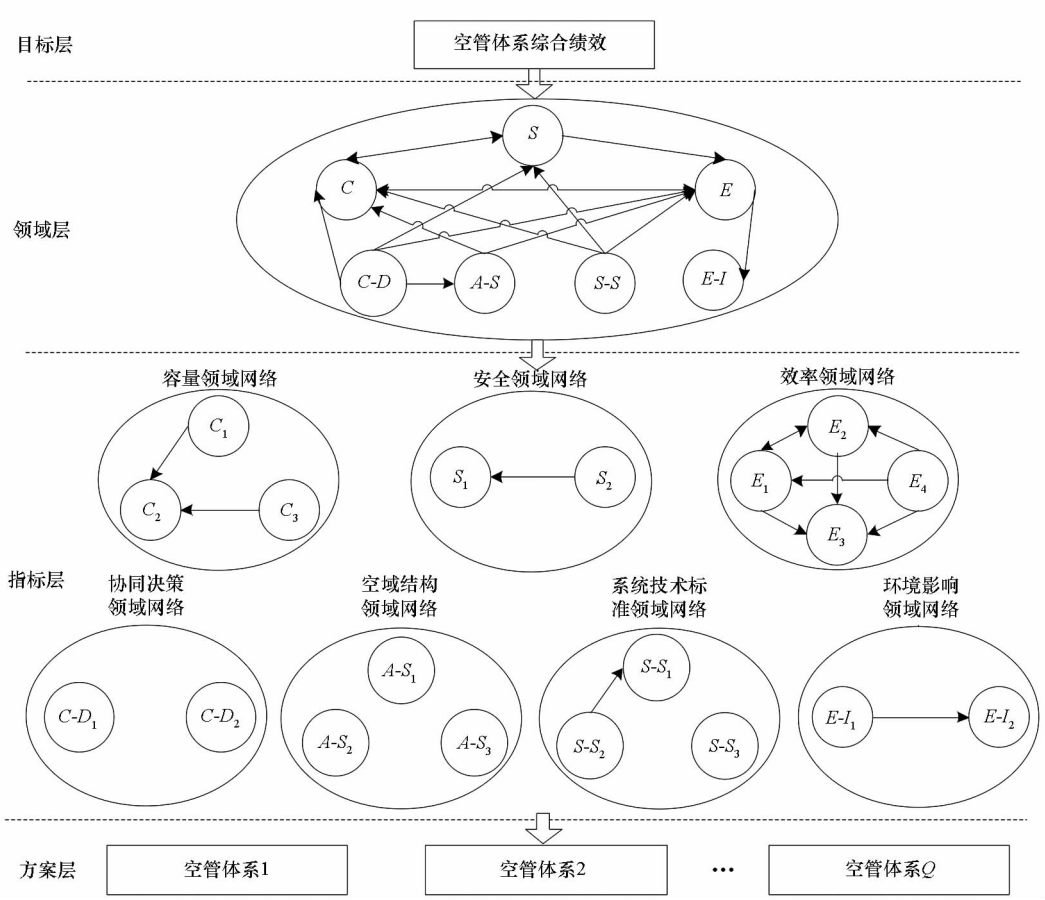


图 3　模型结构

Fig. 3　Structure of the model

为此,在模型中考虑语言判断的不确定性,最终建立基于三角模糊数的语言尺度集(见表 1),其中三角模糊数 $\tilde{a}=(l,m,u)$ 的隶属度函数 $\mu_{\tilde{a}}$ 为:

$$\mu_{\tilde{a}}(x)=\begin{cases}(u-x)/(u-m) & m\leqslant x\leqslant u\\ (x-l)/(m-l) & l\leqslant x\leqslant m\\ 0 & \text{其他情况}\end{cases} \tag{6}$$

表 1　语言尺度表

Tab. 1　Linguistic scale

重要度语言模糊尺度		影响关系语言模糊尺度	
模糊尺度	语言尺度	模糊尺度	语言尺度
(1,1,1)	η_1 = 同样重要	(0,0.1,0.2)	s_1 = 极低影响
(1,2,3)	η_2 = 稍稍重要	(0.1,0.2,0.3)	s_2 = 非常低影响
(2,3,4)	η_3 = 稍重要	(0.2,0.3,0.4)	s_3 = 低影响
(3,4,5)	η_4 = 稍一般重要	(0.3,0.4,0.5)	s_4 = 中低影响
(4,5,6)	η_5 = 一般重要	(0.4,0.5,0.6)	s_5 = 中度影响
(5,6,7)	η_6 = 一般非常重要	(0.5,0.6,0.7)	s_6 = 中高影响
(6,7,8)	η_7 = 非常重要	(0.6,0.7,0.8)	s_7 = 高度影响
(7,8,9)	η_8 = 非常非常重要	(0.7,0.8,0.9)	s_8 = 非常高影响
(8,9,9)	η_9 = 极端重要	(0.8,0.9,1)	s_9 = 绝对影响

为进一步提高评估结果的可信性,降低单个专家的主观性和误差,模型采用多个专家应用表 1 中尺度建立用于导出准则初始权向量的判断矩阵 $\tilde{\boldsymbol{O}}$ 和影响关系连接矩阵 $\tilde{\boldsymbol{E}}$。设专家集为 $D=\{d_1,d_2,\cdots,d_m\}$,单一子网内准则集为 $\Delta=\{N_1,N_2,\cdots,N_n\}$,则专家 d_k 建立的准则间初始判断矩阵为:

$$\tilde{\boldsymbol{O}}_k=\begin{bmatrix}1 & \cdots & \tilde{a}_{1n}^k\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1/\tilde{a}_{1n}^k & \cdots & 1\end{bmatrix} \tag{7}$$

其中,$\tilde{a}_{ij}^k=(a_l,a_m,a_u)_{ij}^k$ 为 N_i 相对于 N_j 的重要度判断,$1/\tilde{a}_{ij}^k=[1/(a_u)_{ij}^k,1/(a_m)_{ij}^k,1/(a_l)_{ij}^k]$。建立准则间影响连接矩阵为:

$$\tilde{\boldsymbol{E}}_k=[\tilde{e}_{ij}^k]_{n\times n}=[(e_l,e_m,e_u)_{ij}^k]_{n\times n} \tag{8}$$

其中,$\tilde{e}_{ij}^k$ 为 N_i 对 N_j 的模糊影响值,当无影响时,$\tilde{e}_{ij}^k=(0,0,0)$。

3 模型求解方法

求解空管体系绩效评估的多子网语言决策图模型共分 4 个步骤。

步骤 1:子网内群体初始权向量获取。应用模糊偏好规划(Fuzzy Preference Programming, FPP)[14] 从 $\tilde{\boldsymbol{O}}_k$ 中获取去模糊化后的归一化权向量。设 $\boldsymbol{\omega}_k=(\omega_k^1,\omega_k^2,\cdots,\omega_k^n)$,$\sum_{i=1}^n\omega_k^i=1$ 为 $\tilde{\boldsymbol{O}}_k$ 的权向量,则:

$$\mu_{ij}\left(\frac{\omega_i^k}{\omega_j^k}\right)=\begin{cases}\dfrac{(\omega_i^k/\omega_j^k)-l_{ij}}{m_{ij}-l_{ij}},\omega_i^k/\omega_j^k\leqslant m_{ij}\\ \dfrac{u_{ij}-(\omega_i^k/\omega_j^k)}{u_{ij}-m_{ij}},\omega_i^k/\omega_j^k\geqslant m_{ij}\end{cases} \tag{9}$$

设 $\theta=\min(\mu(\omega_i^k/\omega_j^k)\mid i,j=1,\cdots,n-1;j>i)$ 为向量的专家判断满意度。最大化 θ,建立模型:

$$\text{Maximize }\theta$$
$$\text{s.t.}\begin{cases}\mu_{ij}(\omega_i^k/\omega_j^k)\geqslant\theta\quad i,j=1,\cdots,n-1;j>i\\ \sum_{i=1}^n\omega_i^k=1\\ \omega_i^k\geqslant 0,i=1,\cdots,n\end{cases} \tag{10}$$

求解得到 $\theta=\theta_{\max}$ 时,$\boldsymbol{\omega}_k^*=(\omega_k^{*1},\omega_k^{*2},\cdots,\omega_k^{*n})$ 为最符合专家 d_k 判断的准则初始权向量。进而采用加权几何平均得到 m 个专家的群体向量:

$$\boldsymbol{\omega}_c^*=\left(\frac{\prod_{i=1}^m(\omega_i^{*1})^{\lambda_i}}{\sum_{j=1}^n\prod_{i=1}^m(\omega_i^{*j})^{\lambda_i}},\frac{\prod_{i=1}^m(\omega_i^{*2})^{\lambda_i}}{\sum_{j=1}^n\prod_{i=1}^m(\omega_i^{*j})^{\lambda_i}},\cdots,\frac{\prod_{i=1}^m(\omega_i^{*n})^{\lambda_i}}{\sum_{j=1}^n\prod_{i=1}^m(\omega_i^{*j})^{\lambda_i}}\right) \tag{11}$$

其中,$\lambda=\{\lambda_1,\lambda_2,\cdots,\lambda_m\}$,$\sum_{q=1}^m\lambda_q=1$,$\lambda_q>0$ 是各专家在群体中的重要度。实际中,专家的重要度由专家的相对权威性确定,越权威的专家具有相对越高的重要度,而在无明显权威差距时则采用等重要度的方式。

步骤 2:子网内状态矩阵稳态形式的获取。子网内模糊语言影响连接矩阵 $\tilde{\boldsymbol{E}}_k$ 可分解为 3 个精确数影响矩阵 $\tilde{\boldsymbol{E}}_k=(\boldsymbol{E}_k^l,\boldsymbol{E}_k^m,\boldsymbol{E}_k^u)$,其中 $\boldsymbol{E}_k^l=[(e_l)_{ij}^k]_{n\times n}$,$\boldsymbol{E}_k^m=[(e_m)_{ij}^k]_{n\times n}$,$\boldsymbol{E}_k^u=[(e_u)_{ij}^k]_{n\times n}$,拓展式(3)得到三角模糊数形式下稳态矩阵求解公式为:

$$\begin{cases}\tilde{\boldsymbol{C}}_k^{(t+1)}=\tilde{F}(\tilde{\boldsymbol{C}}_k^{(t)}\cdot\tilde{\boldsymbol{E}}_k)\\ \qquad=(f(\boldsymbol{C}_k^{l(t)}\boldsymbol{E}_k^l),f(\boldsymbol{C}_k^{m(t)}\boldsymbol{E}_k^m),f(\boldsymbol{C}_k^{u(t)}\boldsymbol{E}_k^u))\\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k^{(0)}=(\boldsymbol{C}_k^{l(0)},\boldsymbol{C}_k^{m(0)},\boldsymbol{C}_u^{k(0)})=(\boldsymbol{I}_{n\times n},\boldsymbol{I}_{n\times n},\boldsymbol{I}_{n\times n})\\ \tilde{\boldsymbol{C}}_k^*=\lim_{x\to+\infty}\sum_{t=1}^x(\boldsymbol{C}_k^{l(t)},\boldsymbol{C}_k^{m(t)},\boldsymbol{C}_k^{u(t)})\\ \qquad=[(c_1,c_m,c_u)_{ij}^k]_{n\times n}\end{cases} \tag{12}$$

而后,应用中心法[15] 去模糊化得到稳态矩阵:

$$\boldsymbol{C}_k^*=\left[\left(\frac{c_l+c_m+c_u}{3}\right)_{ij}^k\right]_{n\times n} \tag{13}$$

由于准则间影响强度判断不存在两两比较形式,应用加权算数平均聚合得到 m 个专家稳态矩阵:

$$\boldsymbol{C}_c^*=\sum_{q=1}^m\lambda_q\boldsymbol{C}_q^* \tag{14}$$

步骤 3:子网内准则全局权重获取。应用 $\boldsymbol{\omega}_c^*$ 和 $\boldsymbol{C}_c^*$,得到全局权向量:

$$g\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{\omega}_c^*+\boldsymbol{C}_c\boldsymbol{\omega}_c^* \tag{15}$$

进一步归一化处理得到 $g\boldsymbol{\omega}^*$。

步骤 4:多子网方案评估值聚合。求解空管体系绩效综合评估值,首先获取各底层指标评估值。指标按获取方式分为主观和客观两类,而从效用类型角度则可分为成本型和效益型(见表 2)。通过建立模糊判断矩阵,应用式(9)~(11)可获取专家对主观指标下各体系方案的归一化评估向量。客观指标值在采集后则需进行去量纲处理,如式(16)所示。

$$r_i=\begin{cases}\text{效益型}\begin{cases}(y_i-y^b)/(y^t-y^b),y^b\leqslant y_i\leqslant y^t\\ 1\text{ or }0,y_i\geqslant y^t\text{ or }y_i\leqslant y^b\end{cases}\\ \text{成本型}\begin{cases}(y^b-y_i)/(y^b-y^t),y^t\leqslant y_i\leqslant y^b\\ 1\text{ or }0,y_i\leqslant y^t\text{ or }y_i\geqslant y^b\end{cases}\end{cases} \tag{16}$$

表 2　指标分类表

Tab. 2　Categories of indexes

获取方式	类型	指标名称	基准值、目标值
客观	效益型	起飞准点率(E_1)	[0.4,1]
		到达准点率(E_2)	[0.4,1]
		人均管制负荷(E_4)	[0.05,0.2]
		可用空域比例(C_1)	[0.3,1]
		仪表飞行总量(C_2)	[600,1600]
		千万级机场数量(C_3)	[16,34]
	成本型	飞行事故万小时率(S_1)	[0,0.01]
		不安全事件万小时率(S_2)	[0,1]
		平均延误时间(E_3)	[0,30]
		航空网络非直线系数($A-S_1$)	[1,1.2]
		航班平均碳排放量($E-I_2$)	[3,15]
主观	效益型	环保法规政策制定情况($E-I_1$),航空网络灵活度($A-S_2$),空域使用公平性($A-S_3$),系统互用性($S-S_1$),技术标准统一性($S-S_2$),新技术应用度($S-S_3$),各方参与度($C-D_1$),军民航协同机制($C-D_2$)	NULL

其中,y_i 为方案 i 的初始指标值,y^b 和 y^t 分别为指标的基准值和目标值(见表2 列4)。当 y_i 劣于 y^b 时,$r_i=0$;当 y_i 优于 y^t 时,$r_i=1$。归一化各方案在指标下的评估值,得到方案 i 处理后评估值 r_i^*。由下至上进行评估值聚合,设某领域内准则的全局权向量为 $g\boldsymbol{\omega}^*$,各方案评估值矩阵 $\boldsymbol{R}$ 为:

$$\boldsymbol{R}=\begin{array}{c} \\ P_1 \\ \vdots \\ P_Q \end{array}\begin{array}{c} \begin{array}{ccc} N_1 & \cdots & N_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} r_{11}^* & \cdots & r_{1n}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{Q1}^* & \cdots & r_{Qn}^* \end{bmatrix} \end{array} \tag{17}$$

则聚合得到该领域下的方案评估向量为:

$$U\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}\times g\boldsymbol{\omega}^* \tag{18}$$

在获取所有领域下体系评估向量后,应用领域间全局权向量,再次采用式(18)则可得到空管体系综合绩效评估值。

4　数值案例

应用基于多子网语言决策图的空管体系绩效评估模型,采用 2013 年指标数据,对比 A、B、C 三国空管体系差距。表 3 是三国各绩效领域下的指标值,其中定性指标值基于空管知识获取,定量指标中第一列为指标初始值,第二列为应用式(16)去量纲后的归一化值。

实际评估中,基于图 3 所示模型结构,邀请了 3 名空管体系专家应用表 1 中语言尺度提供了相应的初始判断矩阵和影响连接矩阵。首先计算得到各子网内准则的初始权向量(见表 4“初始权重”);然后,获取各语言影响连接矩阵(见表 3 下方专家 1 ~3 矩阵)的模糊值。

表 3　A,B,C 三国空管体系各指标值

Tab. 3　Index values of A,B and C

	S_1		S_2		E_1		E_2		E_3	
A 国	0	0.341	0.038	0.476	0.714	0.272	0.727	0.281	21	0.183
B 国	0.001	0.318	0.270	0.377	0.835	0.376	0.836	0.375	9.5	0.415
C 国	0	0.341	0.714	0.147	0.807	0.352	0.800	0.344	11.2	0.402
	E_4		C_1		C_2		C_3		$E-I_2$	
A 国	0.064	0.086	0.60	0.194	791	0.131	24	0.182	10.31	0.212
B 国	0.083	0.201	0.90	0.387	960	0.246	34	0.409	4.78	0.460
C 国	0.167	0.713	0.95	0.419	1510	0.623	34	0.409	7.72	0.328

表 3(续)

	$A-S_1$		$E-I_1$	$A-S_2$	$A-S_3$	$S-S_1$	$S-S_2$	$S-S_3$	$C-D_1$	$C-D_2$
A 国	1.11	0.220	0.2	0.070	0.090	0.230	0.280	0.242	0.170	0.2
B 国	1.03	0.414	0.4	0.280	0.455	0.385	0.360	0.363	0.415	0.4
C 国	1.05	0.366	0.4	0.650	0.455	0.385	0.360	0.395	0.415	0.4

专家 1

$$\boldsymbol{E}_1^P=\begin{bmatrix}0&s_3&s_3&0&0&0&0\\0&0&s_2&s_8&0&0&0\\s_3&s_6&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0\\0&s_7&s_3&0&0&0&0\\s_2&s_3&s_3&0&0&0&0\\s_2&s_6&s_5&0&s_5&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_1^E=\begin{bmatrix}0&s_6&s_6&0\\s_3&0&s_5&0\\0&0&0&0\\s_5&s_5&s_5&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{E}_1^S=\begin{bmatrix}0&0\\s_3&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{E}_1^{E-I}=\begin{bmatrix}0&s_4\\0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_1^C=\begin{bmatrix}0&s_6&0\\0&0&0\\0&s_7&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{E}_1^{S-S}=\begin{bmatrix}0&0&0\\s_7&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$$

专家 2

$$\boldsymbol{E}_2^P=\begin{bmatrix}0&s_3&s_3&0&0&0&0\\0&0&s_3&s_6&0&0&0\\s_2&s_5&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0\\0&s_7&s_5&0&0&0&0\\s_1&s_3&s_3&0&0&0&0\\s_3&s_6&s_5&0&s_2&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_2^E=\begin{bmatrix}0&s_5&s_7&0\\s_3&0&s_4&0\\0&0&0&0\\s_6&s_6&s_4&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{E}_2^S=\begin{bmatrix}0&0\\s_4&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{E}_2^{E-I}=\begin{bmatrix}0&s_3\\0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_2^C=\begin{bmatrix}0&s_4&0\\0&0&0\\0&s_5&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{E}_2^{S-S}=\begin{bmatrix}0&0&0\\s_3&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$$

专家 3

$$\boldsymbol{E}_3^P=\begin{bmatrix}0&s_2&s_2&0&0&0&0\\0&0&s_3&s_7&0&0&0\\s_1&s_5&0&0&0&0&0\\0&0&0&0&0&0&0\\0&s_6&s_2&0&0&0&0\\s_4&s_3&s_3&0&0&0&0\\s_2&s_6&s_6&0&s_3&0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_3^E=\begin{bmatrix}0&s_7&s_7&0\\s_4&0&s_5&0\\0&0&0&0\\s_5&s_5&s_5&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{E}_3^S=\begin{bmatrix}0&0\\s_2&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{E}_3^{E-I}=\begin{bmatrix}0&s_2\\0&0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{E}_3^C=\begin{bmatrix}0&s_7&0\\0&0&0\\0&s_7&0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{E}_3^{S-S}=\begin{bmatrix}0&0&0\\s_3&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$$

表 4 空管体系各领域及指标权重值

Tab. 4 Priorities of each area and index of air traffic management system

	关键绩效领域							安全领域	
准则名称	S	E	C	$E-I$	$A-S$	$S-S$	$C-D$	S_1	S_2
初始权重	0.379	0.183	0.188	0.036	0.123	0.059	0.032	0.871	0.129
全局权重	0.260	0.135	0.170	0.021	0.144	0.111	0.159	0.771	0.229

	效率领域				容量领域			环境影响领域	
准则名称	E_1	E_2	E_3	E_4	C_1	C_2	C_3	$E-I_1$	$E-I_2$
初始权重	0.267	0.329	0.267	0.137	0.482	0.204	0.314	0.177	0.823
全局权重	0.292	0.281	0.158	0.269	0.481	0.182	0.337	0.267	0.733

	空域结构领域			系统技术标准领域			协同决策领域	
准则名称	$A-S_1$	$A-S_2$	$A-S_3$	$S-S_1$	$S-S_2$	$S-S_3$	$C-D_1$	$C-D_2$
初始权重	0.609	0.238	0.153	0.296	0.469	0.235	0.304	0.696
全局权重	0.609	0.238	0.153	0.278	0.501	0.221	0.304	0.696

设 $f(x)=\tanh(x)$ 且专家具有相同的重要度，进而应用相应算法得到各子网内准则间影响的稳态矩阵，其中 $\boldsymbol{C}_c^{*P}$、$\boldsymbol{C}_c^{*S}$、$\boldsymbol{C}_c^{*E}$、$\boldsymbol{C}_c^{*C}$、$\boldsymbol{C}_c^{*E-I}$ 和 $\boldsymbol{C}_c^{*S-S}$ 分别为绩效领域间影响稳态矩阵和指标间影响稳态矩阵，如下所示：

$$\boldsymbol{C}_c^{*P}=\begin{bmatrix}0.019 & 0.181 & 0.162 & 0.066 & 0 & 0 & 0\\ 0.015 & 0.042 & 0.142 & 0.351 & 0 & 0 & 0\\ 0.106 & 0.293 & 0.057 & 0.106 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0.026 & 0.387 & 0.223 & 0.137 & 0 & 0 & 0\\ 0.138 & 0.225 & 0.201 & 0.082 & 0 & 0 & 0\\ 0.157 & 0.475 & 0.378 & 0.171 & 0.164 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}_c^{*E}=\begin{bmatrix}0.054 & 0.308 & 0.414 & 0\\ 0.175 & 0.055 & 0.303 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0\\ 0.322 & 0.358 & 0.424 & 0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{C}_c^{*S-S}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0\\ 0.211 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{C}_c^{*S}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0.148 & 0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{C}_c^{*E-I}=\begin{bmatrix}0 & 0.148\\ 0 & 0\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{C}_c^{*C}=\begin{bmatrix}0 & 0.275 & 0\\ 0 & 0 & 0\\ 0 & 0.305 & 0\end{bmatrix}$$

进一步求解各子网内准则全局权重(见表 4 “全局权重”),最终聚合得到 A、B 和 C 三国空管体系综合评估值(见表 5)。评估结果显示,A 国空管体系综合绩效水平与 B、C 两国存在很大差距,而从领域角度出发,A 国仅在“安全”绩效领域领先于其他两国。

进一步分析评估结果,依据领域及指标间影响的稳态矩阵,对比表 4 中“初始权重”和“全局权重”,可以发现考虑影响关系后,权重值发生了明显变化。对于仅存在单向简单影响的子网络,如“安全子网络”,影响指标的全局权重得到了提升,如“不安全事件万小时率”权重从 0.129 提升到 0.229。而对于存在相互影响的子网络,如“领域间子网络”和“效率子网络”,准则间全局权重的变化则受到影响强度、广度及被影响准则初始权重的制约。例如,管制效率、空域结构、系统技术标准和协同决策对各自子网内其他准则存在广泛的深度影响,最终导致这些指标或领域的全局权重大幅上升(见表 4);再如:效率仅对“环境影响”的影响强度较大(见 $\boldsymbol{C}^{*P}$),而“环境影响”本身初始权重又很低,最终导致其对提升“效率”全局权重不能起到关键性作用,使得“效率”的全局权重在归一化后不升反降。综上可以说明,相对于不考虑影响的情况,模型通过全面描述要素间影响,可以合理地修正初始权重,避免专家直观判断造成的偏差,提升那些对体系建设存在重要潜在影响的领域及指标的权重,从而帮助决策者更客观地认识各领域、指标的权重。

进一步应用“初始权重”聚合得到三国综合评估值(见表 6)(即层次分析法),发现在考虑指标间影响关系的情况下 A 国与 B、C 两国间差距更为明显(见表 5)。这是由于 A 国在管制效率、空域结构、协同决策等准则下的评估值相对更低(见表 3)造成的。这从侧面说明了应用模型考虑要素间影响关系获取评估结果能够更显著地揭示出 A 国空管体系存在的问题。

表 5　A、B、C 三国空管体系评估值

Tab. 5　Evaluation results of A, B and C

	综合绩效	*S*	*E*	*C*	*E* – *I*	*A* – *S*	*S* – *S*	*C* – *D*
A 国	0.243	0.372	0.210	0.178	0.208	0.165	0.258	0.191
B 国	0.364	0.331	0.335	0.369	0.444	0.388	0.367	0.404
C 国	0.393	0.297	0.455	0.453	0.348	0.447	0.375	0.405

表 6　不考虑影响关系的 A、B、C 三国空管体系评估值

Tab. 6　Evaluation results of A, B and C without influence relations

	综合绩效	*S*	*E*	*C*	*E* – *I*	*A* – *S*	*S* – *S*	*C* – *D*
A 国	0.259	0.358	0.226	0.177	0.210	0.165	0.256	0.191
B 国	0.357	0.326	0.362	0.365	0.449	0.388	0.368	0.404
C 国	0.384	0.316	0.412	0.458	0.341	0.447	0.376	0.405

5　结论

为评估空管体系综合绩效,制定了 7 个关键领域及 19 个指标,提出了基于多子网语言决策图的群体评估模型。模型在模糊决策图基础上,采用多子网策略分析了领域及指标间的影响关系,应用模糊语言尺度辅助专家提供了准则间的影响值,克服了影响值难以判断的问题。数值案例验证了模型求解方法的有效性,对比了 A、B、C 三国空管体系间的差距,通过结果分析发现,相比于不考虑领域及指标间影响的情况,模型能够帮助决策者更客观、全面地认识各领域及指标的重要度。

参考文献(References)

[1] International Civil Aviation Organization. Global air traffic management operational concept:doc 9854[R]. USA, 2005.

[2] Gravio G, Mancini M, Patriarca R, et al. Overall safety performance of the air traffic management system: indicators and analysis [J]. Journal of Air Transport Management, 2015, 44/45: 65 – 69.

[3] Ahna Y H, Minb H. Evaluating the multi-period operating efficiency of international airports using data envelopment analysis and malmquist productivity index [J]. Journal of Air Transport Management, 2014, 39: 12 – 22.

[4] Cheng Y H, Solak S, Clarke J P, et al. Models for single-sector stochastic air traffic flow management under reduced airspace capacity [J]. Journal of the Operational Research Society, 2016, 67(1): 54 – 67.

[5] Reynolds T G. Air traffic management performance assessment using flight inefficiency metrics[J]. Transport Policy, 2014, 34: 63 – 74.

[6] 丛玮, 胡明华, 谢华, 等. 基于指标体系的扇区复杂性评估方法[J]. 交通运输系统工程与信息,2015,15(5): 136 – 141.
CONG Wei, HU Minghua, XIE Hua, et al. An evaluation method of sector complexity based on metrics system [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(5): 136 – 141. (in Chinese)

[7] EUROCONTROL & FAA. U.S./Europe comparison of ATM-related operational performance [C]//Proceedings of 8th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, 2013.

[8] Yu R C, Tzeng G. A soft computing method for multi-criteria decision making with dependence and feedback[J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 180(1): 63 – 75.

[9] Saaty T. Decision making with dependence and feedback: the analytic network process [M]. USA: RWS Publications, 1996.

[10] LiC H, Sun Y H, Du Y W. An improved analytic network process based on fuzzy decision maps[C]//Proceedings of Control and Decision Conference, 2008: 2100 – 2105.

[11] 石福丽, 方志刚, 杨峰, 等. 基于仿真的潜艇装备作战能力ANP幂指数评估方法[J]. 国防科技大学学报,2011, 33(4): 168 – 174.
SHI Fuli, FANG Zhigang, YANG Feng, et al. ANP power index evaluation method for operational capability of submarine equipment based on simulation [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011, 33(4): 168 – 174. (in Chinese)

[12] Tzeng G H, Chen W H, Yu R C, et al. Fuzzy decision maps: a generalization of the DEMATEL methods [J]. Soft Computing, 2010, 14(11): 1141 – 1150.

[13] Saaty T L, Vargas L G. Uncertainty and rank order in the analytic hierarchy process [J]. European Journal of Operational Research, 1987, 32(1): 107 – 117.

[14] Mikhailov L. Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgments [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2003, 134(3): 365 – 385.

[15] Vahdani B, Mousavi S, Tavakkoli-Moghaddam R. Group decision making based on novel fuzzy modified TOPSIS method [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(9): 4257 – 4269.

(上接第78页)

[10] Avalos G O G, Wanderley J B V, Fernandes A C, et al. Roll damping decay of a FPSO with bilge keel [J]. Ocean Engineering, 2014, 87: 111 – 120.

[11] Irvine M, Longo J, Stern F. Forward speed calm water roll decay for surface combatant 5415: global and local flow measurements[J]. Journal of Ship Research, 2013, 57(4): 202 – 219.

[12] Zhou Y H, Ma N, Shi X, et al. Direct calculation method of roll damping based on three-dimensional CFD approach[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2015, 27(2): 176 – 186.

[13] Lugni C, Greco M, Faltinsen O M. Influence of yaw-roll coupling on the behavior of a FPSO: an experimental and numerical investigation[J]. Applied Ocean Research, 2015, 51: 25 – 37.

[14] Brizzolara S, Vernengo G. Automatic optimization computational method for unconventional SWATH ships resistance[J]. International Journal of Mathe-matical Models and Methods in Applied Sciences, 2011, 5(5): 882 – 889.

[15] Qian P, Yi H, Li Y. Numerical and experimental studies on hydrodynamic performance of a small-waterplane-area-twin-hull (SWATH) vehicle with inclined struts [J]. Ocean Engineering, 2015, 96: 181 – 191.

[16] Wassermann S, Feder D F, Abdel-Maksoud M. Estimation of ship roll damping—a comparison of the decay and the harmonic excited roll motion technique for a post panamax container ship[J]. Ocean Engineering, 2016, 120: 371 – 382.

[17] Kim Y, Park M J. Identification of the nonlinear roll damping and restoring moment of a FPSO using Hilbert transform[J]. Ocean Engineering, 2015, 109: 381 – 388.

[18] Avalos G O G, Wanderley J B V, Fernandes A C, et al. Roll damping decay of a FPSO with bilge keel [J]. Ocean Engineering, 2014, 87: 111 – 120.

[19] Faltinsen O. Sea loads on ships and offshore structures[M]. USA: Cambridge University Press, 1993.

[20] Chakrabarti S K. Offshore structure modeling [M]. USA: World Scientific, 1994.

[21] Stern F, Wilson R, Shao J. Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2006, 50(11): 1335 – 1355.

[22] Tezdogan T, Demirel Y K, Kellett P, et al. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behavior and performance in head seas due to slow steaming[J]. Ocean Engineering, 2015, 97: 186 – 206.

[23] Castiglione T, Stern F, Bova S, et al. Numerical investigation of the seakeeping behavior of a catamaran advancing in regular head waves[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(16): 1806 – 1822.