

文章编号: 2095-4980(2015)02-0316-06

基于 D-S 证据理论空中交通管制系统能力评估

王长春, 朱永文, 赵晨光, 程 奔

(国家空域技术重点实验室, 北京 100085)

摘 要: 空中交通管制系统能力评估存在底层指标类型多样、评估信息不确定的问题。为此, 提出一种基于 D-S 证据理论推理的评估方法。该方法构造信度规则库, 将多种类型的不确定性数据转换成统一的信度结构, 通过证据推理方法获得空中交通管制系统的能力满足度分布。以某空中交通管制中心系统能力评估为例说明方法的可行性和有效性。

关键词: 空中交通管制系统; 能力评估; 证据推理; 信度规则库; 信度结构

中图分类号: TN953

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201502.0316

A novel approach for air traffic control system capability evaluation using Dempster-Shafer evidential reasoning

WANG Changchun, ZHU Yongwen, ZHAO Chenguang, CHENG Ben

(National Key Laboratory of Airspace Technology, Beijing 100085, China)

Abstract: There exist various kinds of low level indices and uncertainty of evaluation information in the capability evaluation for air traffic control system. To solve this problem, a novel evaluation methodology using Dempster-Shafer(D-S) evidence reasoning is proposed. Firstly, the rule base is built with belief structure, and the input information is transformed into a pre-defined form. Then the activation weight of input is calculated. After that, the final assessment distribution is obtained by using evidence reasoning for index aggregation. The capability evaluation of a certain air traffic control system is investigated, so as to illustrate the feasibility and effectiveness of the new methodology.

Key words: air traffic control; capability evaluation; evidential reasoning; belief rule base; belief structure

空中交通管制系统是维护空中飞行秩序、保障航空器飞行安全间隔的重大使命任务系统^[1-2], 该系统有 3 个显著特点: 1) 24 小时连续运转的人机交互式系统; 2) 对外部输入的飞行计划、监视和气象等信息依赖程度较高; 3) 系统运行的异常将直接危及空中飞行安全。空中交通管制系统能力, 是指系统在规定条件下, 使用相关资源要素执行一组任务并达到预期效果, 完成使命任务的本领。空管系统能力是该系统的固有属性, 与其型号、数量、性能指标、相互依赖关系、支撑关系和信息关系等结构有关。通过对空中交通管制系统的能力进行评估, 可以量化系统标称能力与实际能力的匹配程度, 发现系统现状与实际使用需求之间的差距。这些量化后得到的差距数据既可以为系统需求的改进和后续系统的规划、设计、运行、管理和维护提供有力的理论基础, 同时这些数据也可为系统运行、管理和使用提供参考模型, 为系统日常维护和状态监控指明关注要点和改进方向。本文针对空中交通管制系统能力评估中, 底层能力指标类型多样、评估信息不完全情形, 提出一种基于证据推理的评估方法, 该方法首先依据专家经验, 构建信度规则库, 然后将多种类型的不确定性数据转换成统一的信度结构, 最后通过证据推理方法获得能力评估结果。文末, 以某管制中心系统能力评估为例说明方法运用和优点。

1 问题背景和模型假设

空中交通管制系统能力评估有 2 个显著特点: 1) 底层能力指标和能力需求类型多样。从能力指标的论域来

收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-07-12

基金项目: 国家自然科学基金重点研究计划资助项目(71031007); 国家自然科学基金青年基金资助项目(71401175)

看,既有数值型指标,值域为整数、实数或离散点等,也有能力指标,是布尔型、语言型指标。能力指标类型的多样性,带来能力需求指标类型的多样性及能力需求满足度计算方式的不同,如能力需求中有的指标是效益型的,即越大越好,如监视范围;也有成本型指标,即越小越好,如时间延迟;2)输入的评估信息具有多种不确定性。评估信息的不确定性包括以下几种情形:部分系统能力水平指标由仿真获取,是概率型数据;有的能力水平指标用区间数表示,即空管系统该项能力在某一区间内。此外,空管系统部分指标的取值不能通过实验或观测获得,只能依据专家的经验知识主观判断,用自然语言表述,是模糊的、定性的主观数据^[3-4]。鉴于上述分析,本文基于以下假设展开研究。

假设 1 空中交通管制系统能力的层次结构

通过系统能力分析获取的系统能力是一种层次结构,上一层能力的满足依赖于下一层能力的满足。这种依赖关系以规则库中规则的形式给出。如顶层空中交通管制系统能力需求的满足,依赖于下一层通信能力、指挥控制能力、监视能力的满足。

假设 2 空中交通管制系统能力结构中不同层次元素间关系限定假设

在系统能力中下一层能力对上一层能力的支持作用限于与、或 2 种逻辑关系。如规则库中的规则 R_k 表示如下,其中 cr_a, cr_b, cr_c 为下一层能力, cr_d 为系统上一层能力。 $R_k: \text{If } ((cr_a \text{ 被满足}) \wedge (cr_b \text{ 被满足}) \vee (cr_c \text{ 被满足})), \text{ then } cr_d \text{ 被满足}。$

假设 3 空中交通管制系统能力满足关系单向性假设

规则库中的规则是单向的,如下面 2 条规则不能同时存在。 $R_k: \text{If } (cr_a \text{ 被满足}), \text{ then } cr_b \text{ 被满足}; R_l: \text{If } (cr_b \text{ 被满足}), \text{ then } cr_a \text{ 被满足}。$

2 空中交通管制系统能力评估方法

通过分析空中交通管制系统的种类、型号、数量、质量及搭配情况,提出基于证据理论的空中交通管制系统能力评估方法,获取系统能力水平。具体包含如下 4 个步骤:

Step1: 面向能力评估问题构造信度规则库; Step2: 将输入数据转换为信度结构模式; Step3: 输入数据对信度规则激活程度计算; Step4: 采用证据推理算法融合激活的信度规则,获取最终评价结果。

2.1 构造信度规则库

在进行能力评估之前,首先要构造信度规则库。构造规则库的过程实际上是将评价准则、专家经验、能力需求的结构用统一的框架进行显示表达的过程。面向能力评估的信度规则库定义为:

$$RB = \langle C, A, R, F \rangle \quad (1)$$

式中: $C = \{c_1, c_2, \dots, c_l\}$ 表示能力需求中各项能力的集合; $A = \{A_1, A_2, \dots, A_l\}$ 表示规则库与各项能力对应的取值集合,其中 $A_i = \{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{i|A_i|}\}$, $|A_i|$ 表示集合 A_i 中元素个数; $R = \{r_1, r_2, \dots, r_l\}$ 表示所有结论的集合。结论中元素可能是能力、任务或使命,即 $R = \{C\} \cup \{OA\} \cup \{Mission\}$; F 是规则的前提和结论之间的映射函数。

2.2 输入数据的转换

能力评估的输入是待评价的空中交通管制系统提供的各项能力及其能力指标取值。匹配度计算是求解输入数据对规则前提中各项能力或能力指标的匹配程度。输入数据可表示为:

$$(x_1, \varepsilon_1) \wedge (x_2, \varepsilon_2) \wedge \dots \wedge (x_l, \varepsilon_l) \quad (2)$$

式中: x_i 表示能力或能力指标对应的输入值; ε_i 是输入 x_i 的信度,反映输入的不确定性。对于仿真结果数据,信度取仿真结果的频率值^[5],对于确定性数据,其信度为 1。采用式(3)~式(4)计算带有信度输入数据对底层能力的匹配程度。

$$T(x_i, \varepsilon_i) = \{(A_{ij}, \alpha_{ij}), i = 1, 2, \dots, l; j = 1, 2, \dots, J_i\} \quad (3)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\varphi(x_i, A_{ij})}{\sum_{j=1}^{J_i} \varphi(x_i, A_{ij})} \varepsilon_i \quad (4)$$

式中: $\alpha_{ij} \in [0, 1]$, A_{ij} 表示能力或能力指标在规则中的取值, α_{ij} 表示输入 x_i 对规则前提项 c_i 的第 j 个取值 A_{ij} 的综合匹配度; $\varphi(x_i, A_{ij})$ 刻画 x_i 与 A_{ij} 的匹配度,称为匹配函数, φ 的选取与能力指标的类型及特点相关。

1) 规则前提项为单点 A^*

$$\varphi_1(x_i, A_i^*) = 1 - \frac{|x_i - A_i^*|}{\max\{|A_i^* - p|, |q - A_i^*|\}} \quad (5)$$

式中 x_i 为空中交通管制系统该项能力的取值, $x_i \in [p, q]$ 。函数 φ 可以保证当 $x_i = A_i^*$ 时, 取值为 1, x_i 远离 A_i^* 时函数 φ 递减。

2) 规则前提项为离散序列

规则库中的能力 c_i 的取值 A_{ij} 为 $\{A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{i|A_i|}\}$, 不失一般性, 假设序列单调递增, 定义匹配函数 φ_2

$$\varphi_2(x_i, A_{ij}) = \begin{cases} \frac{A_{i(k+1)} - x_i}{A_{i(k+1)} - A_{ik}} & j = k (A_{ik} \leq x_i \leq A_{i(k+1)}) \\ \frac{x_i - A_{ik}}{A_{i(k+1)} - A_{ik}} & j = k + 1 \\ 0 & j = 1, 2, \dots, |A_i|, j \neq k, k + 1 \end{cases} \quad (6)$$

3) 规则前提项为专家经验主观判断

此时直接用输入值, 即 $a_{ij} = \varepsilon_i$, 如指挥控制能力包括的子能力—决策能力^[6], 在规则库中的取值为 A/B/C, 对应为强/中/一般, 实际输入值(强, 0.8), (中, 0.2), (一般, 0), 则 $\alpha_A = 0.8$, $\alpha_B = 0.8$, $\alpha_C = 0.8$ 。

2.3 输入对规则的匹配程度计算

2.3.1 输入对规则前提条件匹配程度计算

根据式(3)~式(4), 设输入对应于第 k 条规则依次转换成 $(A_1^k, \alpha_1^k), (A_2^k, \alpha_2^k), \dots, (A_{T_k}^k, \alpha_{T_k}^k)$, α_i^k 为输入对第 k 条规则的前提项 A_i^k 的综合匹配程度。输入对规则匹配程度的计算实质是将输入对规则前提的每一个前提项进行聚集, 即 $\alpha_k = g(\alpha_1^k, \alpha_2^k, \dots, \alpha_{T_k}^k)$ 。按照前提项间的关系分 2 种情况讨论:

1) 规则前提中 A_i^k 采用合取“ \wedge ”连接, 定义规则前提激活程度:

$$\alpha_k = \prod_{i=1}^{T_k} (\alpha_i^k)^{\bar{\delta}_{ki}} \quad (7)$$

式中: $\bar{\delta}_{ki} = \frac{\delta_{ki}}{\max_i \{\delta_{ki}\}}$, δ_{ki} 表示第 k 条规则前提项 A_i^k 的相对权重; α_i^k 表示输入对第 k 条规则的前提属性 A_i^k 激活程度, 由式(7)知 $\alpha_i^k \leq 1$ 。显然, $\alpha_i^k \in [0, 1]$, $\bar{\delta}_{ki} \in (0, 1]$, $\alpha_k \leq \min_{i=1, 2, \dots, T_k} \{\alpha_i^k\}$, $\alpha_k = 1$, 当且仅当 $\alpha_i^k = 1 (i=1, 2, \dots, T_k)$ 。

2) 规则前提中 A_i^k 采用析取“ \vee ”连接, 定义规则激活程度:

$$\begin{cases} h_j^k = \bar{\delta}_{kj} \times \alpha_j^k, & \alpha_{k(1)} = h_1^k \\ \alpha_{k(i+1)} = \alpha_{k(i)} + (1 - \alpha_{k(i)}) h_{i+1}^k, & \alpha_k = \alpha_{k(T_k)} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $i=1, 2, \dots, T_k-1$; $j=1, 2, \dots, T_k$ 。 h_j^k 表示规则 k 前提项 A_j^k 的相对激活程度。

在此基础上, 定义综合激活程度 ω_k 为:

$$\omega_k = \frac{\theta_k \alpha_k}{\sum_{i=1}^K \theta_i \alpha_i} \quad (9)$$

式中: ω_k 表示考虑信度规则权重后输入数据对第 k 条规则的激活程度, ω_k 越大, 该条规则对结论的影响越大; θ_k 是第 k 条规则的相对权重; α_k 是输入数据对第 k 条规则的激活程度。显然, 若 $\alpha_k = 0$, 则 $\omega_k = 0$ 。

2.3.2 输入对规则结论信度分布的修正

$$\bar{\beta}_{kl} = \mu_k \beta_{kl}, \mu_k = \frac{\sum_{i=1}^{T_k} (\phi(k, i) \sum_{j=1}^{|A_i|} \alpha_{ij})}{\sum_{i=1}^{T_k} \phi(k, i)} \quad (10)$$

式中： $\phi(k,i)=\begin{cases} 1, & \text{规则}R_k\text{中包含能力(能力指标)}c_i \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$ ； μ_k 称为修正因子，是根据输入信息的不完全性对信度规则结论的修正^[7]； T_k 表示规则 k 中包含的前提项数目； $l=1,2,\dots,L,k=1,2,\dots,K$ ，表示规则库中共有 K 条规则， L 个结论。若某条规则被激活且输入信息是完全的，即 $\forall_i, \sum_{j=1}^{|A_i|} \alpha_{ij}=1$ 始终成立，则 $\mu_k=1, \bar{\beta}_{kl}=\beta_{kl}$ 。

2.4 基于证据推理的指标聚集

以上 3 个步骤，构造了信度规则库，完成了输入数据转换，获得输入数据对相应规则的激活程度，下一步是基于证据推理的指标聚集^[8]，其实质是由下一层系统能力的满足程度推导出上一层能力满足程度的分布^[5]。

2.4.1 构造基本可信数

$$m_{k,l} = \omega_k \bar{\beta}_{kl}, \quad k=1,2,\dots,K, l=1,2,\dots,L \tag{11}$$

$$m_{k,R} = 1 - \omega_k \sum_{l=1}^L \bar{\beta}_{kl} \tag{12}$$

$$\bar{m}_{k,R} = 1 - \omega_k \tag{13}$$

$$\tilde{m}_{k,R} = \omega_k (1 - \sum_{l=1}^L \bar{\beta}_{kl}) \tag{14}$$

式中： $m_{k,l}$ 是为第 k 条规则第 l 个结论分配的基本可信数； $m_{k,R}$ 表示第 k 条规则没有分配到任何结论的基本可信数； $\bar{m}_{k,R}$ 表示 $m_{k,R}$ 中与激活权重 ω_k 相关的不确定性， $\tilde{m}_{k,R}$ 表示 $m_{k,R}$ 中与规则结论 $(\sum_{l=1}^L \bar{\beta}_{kl})$ 相关的不确定性。显然， $m_{k,R} = \bar{m}_{k,R} + \tilde{m}_{k,R}$ 。

2.4.2 证据组合

这一步是将激活的多条规则($\omega_k > 0$)按照证据推理算法进行融合。不妨设前 S 条规则被激活，采用递归形式的证据推理算法^[9]，其过程如下：

$$K_{E(k+1)} = (1 - \sum_{l=1}^L \sum_{t=1, t \neq l}^L m_{E(k),l} m_{k+1,t})^{-1} \tag{15}$$

$$m_{E(k),R} = \bar{m}_{E(k),R} + \tilde{m}_{E(k),R} \tag{16}$$

$$m_{E(k+1),l} = K_{E(k+1)} (m_{E(k),l} m_{k+1,l} + m_{E(k),l} m_{k+1,R} + m_{E(k),R} m_{k+1,l}) \tag{17}$$

$$\bar{m}_{E(k+1),R} = K_{E(k+1)} (\bar{m}_{E(k),R} \bar{m}_{k+1,R}) \tag{18}$$

$$\tilde{m}_{E(k+1),R} = K_{E(k+1)} (\tilde{m}_{E(k),R} \tilde{m}_{k+1,R} + \tilde{m}_{E(k),R} \bar{m}_{E(k),R} + \bar{m}_{E(k),R} \tilde{m}_{k+1,R}) \tag{19}$$

$$\beta_l = \frac{m_{E(S),l}}{1 - m_{E(S),R}}, \beta_R = \frac{\tilde{m}_{E(S),R}}{1 - m_{E(S),R}} \tag{20}$$

3 示例分析

以某空中交通管制中心系统能力评估为例说明该方法的应用。对能力满足程度划分为 3 个等级：满足、基本满足、不满足。空中交通管制系统能力结构如图 1 所示，并且假设规则库中规则的权重相等，规则的前提条件的相对权重也相等，即 $\theta_k = \theta_l (l,k=1,2,\dots,124)$ ， $\delta_{k1} = \delta_{k2} = \dots = \delta_{kT_k}$ 。规则库中涉及的能力及取值如表 1 所示，规则库中共有 124 条规则，限于篇幅，列出部分规则，见表 2。其中， A 代表满足或强， B 代表基本满足或中， C 代表不满足或一般。

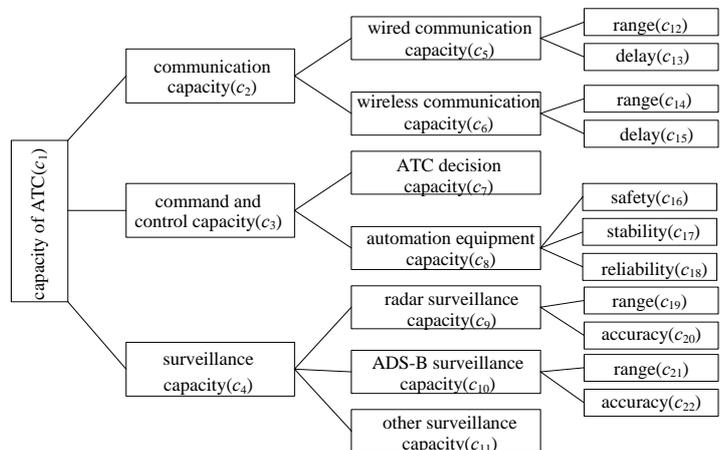


Fig.1 Capability structure of air traffic control system
图1 空中交通管制系统能力需求结构示意图

假设某空中交通管制中心系统，其能力参数可以表示为 $S=\{c_7=((\text{强},0.9),(\text{中},0.1)),c_{11}=(\text{中},1),c_{12}=(75,1),c_{13}=(10,1),c_{14}=(75,1),c_{15}=(10,1),c_{16}=(\text{强},1),c_{17}=(\text{强},1),c_{18}=(\text{强},1),c_{19}=(150,1),c_{20}=(\text{强},1),c_{21}=(150,1),c_{22}=(\text{强},1)\}$ 。需特别指出的是，本案例所用数据都是虚构的，没有实际的物理意义。

考虑到随着自底向上计算过程中，越上层的能力，被激活的规则条数会越多，因此在 Matlab 7.0 编程实现上述算法。该算法的输入为激活规则的结果矩阵 R 、修正因子矩阵 U 、激活权重 W ，处理过程为式(10)~式(20)，输出结果为满足程度的分布。通过计算得到空中交通管制中心系统 S 满足能力需求的概率为 0.954 6，基本满足能力需求的概率为 0.042 7，不满足能力需求的概率为 0。

表 1 空中交通管制系统涉及的各项能力及取值表
Table1 Capability indices and values of air traffic control system

ID	class	value	ID	class	value
c_1	capacity of ATC	satisfied/basicly satisfied/not satisfied	c_{12}	range/ km	40,60,80
c_2	communication capacity	satisfied/basicly satisfied/not satisfied	c_{13}	delay/s	5,10,15
c_3	command and control capacity	satisfied/basicly satisfied/not satisfied	c_{14}	range/ km	40,60,80
c_4	surveillance capacity	satisfied/basicly satisfied/not satisfied	c_{15}	delay/s	5,10,15
c_5	wired communication capacity	strong/medium/general	c_{16}	safety	strong/medium/general
c_6	wireless communication capacity	strong/medium/general	c_{17}	stability	strong/medium/general
c_7	ATC decision capacity	strong/medium/general	c_{18}	reliability	strong/medium/general
c_8	automation equipment capacity	strong/medium/general	c_{19}	range/ km	40,120,200
c_9	radar surveillance capacity	strong/medium/general	c_{20}	accuracy	strong/medium/general
c_{10}	ADS-B surveillance capacity	strong/medium/general	c_{21}	range/ km	40,120,200
c_{11}	others surveillance capacity	strong/medium/general	c_{22}	accuracy	strong/medium/general

表 2 带有信度结构的能力评估规则库
Table2 Capability evaluation rule with belief structure

ID	prerequisite	conclusion	ID	prerequisite	conclusion
1	$(c_{12}=80) \wedge (c_{13}=15)$	$c_5\{(A,1.0)(B,0)(C,0)\}$	8	$(c_{12}=40) \wedge (c_{13}=10)$	$c_5\{(A,0.5)(B,0.3)(C,0.2)\}$
2	$(c_{12}=80) \wedge (c_{13}=10)$	$c_5\{(A,0.8)(B,0.2)(C,0)\}$	9	$(c_{12}=40) \wedge (c_{13}=5)$	$c_5\{(A,0)(B,0.2)(C,0.8)\}$
3	$(c_{12}=80) \wedge (c_{13}=5)$	$c_5\{(A,0)(B,0.8)(C,0.2)\}$	10	$(c_{19}=0.9) \wedge (c_{20}=300)$	$c_9\{(A,1)(B,0)(C,0)\}$
4	$(c_{12}=60) \wedge (c_{13}=15)$	$c_5\{(A,0.9)(B,0.1)(C,0)\}$	11	$(c_{19}=0.9) \wedge (c_{20}=200)$	$c_9\{(A,0.9)(B,0.1)(C,0)\}$
5	$(c_{12}=60) \wedge (c_{13}=10)$	$c_5\{(A,0.6)(B,0.4)(C,0)\}$	12	$(c_{19}=0.8) \wedge (c_{20}=300)$	$c_9\{(A,0.8)(B,0.2)(C,0)\}$
6	$(c_{12}=60) \wedge (c_{13}=5)$	$c_5\{(A,0)(B,0.5)(C,0.5)\}$	13	$(c_{19}=0.8) \wedge (c_{20}=200)$	$c_9\{(A,0.7)(B,0.3)(C,0)\}$
7	$(c_{12}=40) \wedge (c_{13}=15)$	$c_5\{(A,0.7)(B,0.3)(C,0)\}$	⋮	⋮	⋮

4 结论

本文提出的基于证据理论的空中交通管制系统能力评估方法是一种定性与定量相结合，仿真结果与专家经验相结合的综合评估方法。与常见的评估方法相比，该方法得到的评估结果不是一个简单的数值，而是整个系统能够满足需求的一个分布及相关的不确定性。该方法可用于研究特定设备对整个系统的能力的影响，也可用于装备关键性能参数的分析，探索关键性能参数的变化对系统能力的影响。应用该方法进行评估时，难点和关键是构造信度规则库。

参考文献：

[1] 白松浩,兰洪亮,郑娜,等. 基于贡献度模型方法对空中交通管制中心系统的效能评估[J]. 航空学报, 2011,32(3): 438-447. (BAI Songhao,LAN Hongliang,ZHENG Na,et al. Effectiveness evaluation of air traffic control system based on the method of system contributory model[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011,32(3):438-447.)

[2] 白松浩. 系统效能指标和效能因子的计算模型与方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010,30(11):2112-2120. (BAI Songhao. Computational model and method for system effectiveness index and factor[J]. Systems Engineering Theory &Practice, 2011,30(11):2112-2120.)

[3] DoD architecture framework group. DoD architecture framework version 2.0[R]. US:Department of Defense, 2008.

[4] Shafer G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton:Princeton University Press, 1976.

[5] YANG J B,LIU J,WANG J,et al. Belief rule-based inference methodology using the evidential reasoning approach-RIMER[J]. IEEE Transactions on Systems,Man,and Cybernetics-part A:Systems and Humans, 2006,36(2):266-285.