

## 改进证据推理的联合防空作战效能评估模型

彭方明,邢清华,刘睿渊

(空军工程大学 导弹学院,陕西 三原 713800)

(pengfming@163.com)

**摘要:**根据证据理论在处理不确定性推理问题时的优势,运用证据理论对联合防空作战效能进行评估。首先建立基于证据推理的基本模型,然后引入模糊数学方法来处理具有模糊概念或推理关系的复杂问题,并且还考虑了实际问题中可能出现的加权证据或者相关证据的情况,提出了利用改进的证据模型进行联合防空作战效能评估的方法。通过实例分析,证明了改进证据推理模型在联合防空作战效能评估中的实用性与有效性。

**关键词:**证据理论;证据推理;联合防空作战;效能评估

**中图分类号:** E911; TP391.3 **文献标志码:** A

## Efficiency evaluation model of joint air defense operation based on advanced evidence reasoning

PENG Fang-ming, XING Qing-hua, LIU Rui-yuan

(Institute of Missile, Air Force Engineering University, Sanyuan Shaanxi 713800, China)

**Abstract:** According to the advantage in dealing with uncertainty reasoning problems, the evidence theory was introduced to evaluate the efficiency of joint air defense operation. Firstly an ordinary model based on evidential reasoning was proposed, then fuzzy theory was applied to solve the problems with fuzzy concept or relations. The advanced evidence model was introduced to evaluate the efficiency of joint air defense operation aiming at the weighted or correlative evidence combination problems occurred in actual condition. An example has been given to show the correctness of this new method and show the practicability and effectiveness in efficiency evaluation of joint air defense operation.

**Key words:** evidence theory; evidential reasoning; joint air defense operation; efficiency evaluation

### 0 引言

联合防空作战是指在联合防空指挥机构统一指挥下,由多军兵种防空作战力量、武装警察部队和人民防空力量,共同实施的一系列防空作战行动。信息化条件下的联合防空作战将由火力防空和电子防空等多种力量参加,以信息化武器装备为作战基础、以信息化条件下的联合防空作战战法为基本模式的防空作战。因此,如何对联合防空作战效能进行准确有效的评估显得尤为重要,也是决策机构十分关心的重要问题。现阶段,作战效能评估主要有层次分析法、主成分分析法、云理论、模糊综合评判等方法,文献[1]对联合防空作战效能评估进行了研究,主要探讨了联合防空作战效率与作战指挥效率之间的关系,但模型的建立很大程度上依赖于防空作战指挥效率。文献[2]运用模糊综合评判的方法对军队指挥效能进行了评估,取得了不错的效果。为了更有效评估联合防空作战效能,引入了证据理论。证据理论是一种重要的不确定性推理方法,它的主要特点在于其先验数据的直观性和易获得性;其证据即是专家经验和知识的一部分,是对系统观察和研究的结果。而证据理论的组合规则为综合多个专家的意见提供了有力的工具。基于此,在证据理论的基础上建立了综合评估模型,并对模型进行了改进和完善,能够对联合防空作战效能做出比较合理、客观的评估,可为指挥员决策提供重要依据。

### 1 联合防空作战效能指标体系

联合防空作战效能评估<sup>[3]</sup>,就是在一定作战条件下,组织运用联合防空作战力量执行作战任务所达到预期目标的程度。由于防空作战是由多个子系统通过多个子过程完成其作战任务的,这就决定了建立防空作战效能指标时,不仅需要建立总体指标,还需要建立表征各子系统、子过程完成任务的有效程度的单项指标。由这些从不同侧面表征防空部、分队完成其作战任务有效程度的指标所形成的指标体系,称为防空作战效能指标体系。联合防空作战效能指标体系如图1所示。其中,E1、E2、E3、E4、E5、E6为一级评估指标,E11、E12、E21、E22、E23、E31、E32、E41、E42、E43、E51、E52、E61、E62、E63为二级评估指标。

### 2 证据理论基础<sup>[4]</sup>

**定义1** 设 $U$ 为一识别框架,则函数 $m:2^U \rightarrow [0,1]$ 在满足式(1)的条件时,称 $m(A)$ 为 $A$ 的基本概率赋值函数。基本概率赋值函数 $m(A)$ 表示对命题 $A$ 的信任程度。

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \in 2^U} m(A) = 1 \end{cases} \quad (1)$$

**定义2** 设 $m_1$ 和 $m_2$ 是同一识别框架 $U$ 上的基本概率赋值,焦元分别为 $A_1, \dots, A_k$ 和 $B_1, \dots, B_l$ ,则证据组合规则为:

收稿日期:2010-01-10;修回日期:2010-01-10。 基金项目:空军装备科研基金资助项目(KJ206063)。

**作者简介:**彭方明(1984-),男,湖北孝感人,硕士研究生,主要研究方向:防空作战智能信息融合、辅助决策;邢清华(1966-),女,山西文水人,教授,博士生导师,主要研究方向:防空作战智能决策、防空作战信息融合、仿真建模;刘睿渊(1984-),男,江西抚州人,硕士生,主要研究方向:防空作战智能信息融合、辅助决策。

$$m(C) = \begin{cases} 0, & C = \emptyset \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i) m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j)}, & \forall C \subset U, C \neq \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

在利用证据推理作决策时,设  $U$  为识别框架,  $m$  为组合后的基本概率赋值函数,则基于基本概率赋值的决策为:设  $\exists A_1, A_2 \subset U$ , 满足:

$$\begin{cases} m(A_1) = \max\{m(A_i), A_i \subset U\} \\ m(A_2) = \max\{m(A_i), A_i \subset U, A_i \neq A_1\} \end{cases}$$

若式(3)成立,则  $A_1$  为判决结果,其中  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  为预先设定的门限。

$$\begin{cases} m(A_1) - m(A_2) > \varepsilon_1 \\ m(U) < \varepsilon_2 \\ m(A_1) > m(U) \end{cases} \quad (3)$$

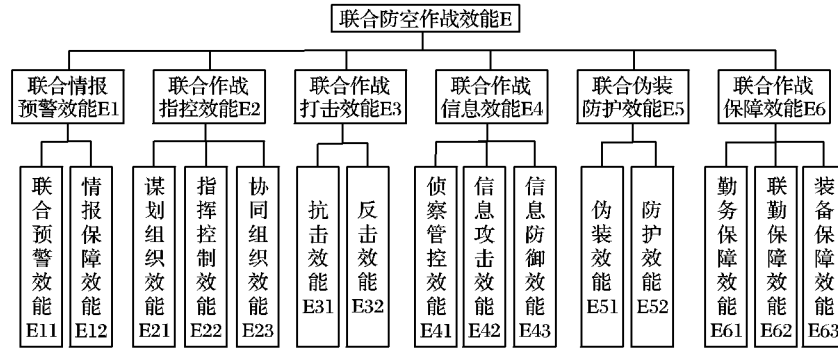


图1 联合防空作战效能评估指标体系

### 3 改进证据推理的综合评估模型设计

#### 3.1 证据推理综合评估的基本思想

由于证据推理允许将整个决策问题和表示该问题的证据分解为若干子问题、子证据,在对子问题、子证据进行处理的基础上,利用证据合成法则得到目标问题的解,这可以设计成为一种层次推理的过程,因此就提供了将它应用到多指标决策问题中的可行性<sup>[5]</sup>。模型设计的基本思想是:设某个问题有若干个评价指标,对这些指标进行分析后可以构造出层次化的指标体系,该体系中每个指标都是上层指标的细化,底层指标则是可以直接从外部获得数据信息并反映该问题最本特征的因素。将指标体系中的每个非底层指标看成一个判别问题,并将该指标细化后的下级指标看成支持该指标的证据,在对子指标、子证据进行处理后,由下层往上层利用证据组合规则进行多次的证据组合运算,计算出顶层目标的基本概率赋值,然后选择合适的决策规则得出原问题的判决结果。

#### 3.2 证据推理模型的改进和完善

##### 1) 证据的模糊化处理。

在实际问题中,常常会遇到一些模糊性的概念或推理关系,例如在效能评估中效能很好和效能较好就是两个模糊的概念。为了使模型具有实用性,有必要引入一些模糊数学的方法。对于识别框架下的某些命题,有时会具有概念上的模糊性,可以用模糊集合来表示,此时需要对证据组合规则进行一些改进以处理模糊证据组合问题。模糊证据组合方法如下所述。

设在识别框架  $\tilde{U}$  下的两个独立模糊证据  $\tilde{E}_1, \tilde{E}_2$  基本赋值概率为  $\tilde{m}_1, \tilde{m}_2$ , 模糊焦点分别为  $\tilde{A}_i, \tilde{B}_j$ , 模糊焦点  $\tilde{A}_i$  和  $\tilde{B}_j$  交的程度为:

$$J(\tilde{B}_j/\tilde{A}_i) = \frac{\max\{\mu_{\tilde{A}_i \cap \tilde{B}_j}(x)\}}{\min\{\max(\mu_{\tilde{A}_i}(x)), \max(\mu_{\tilde{B}_j}(x))\}}$$

其中  $\mu_{\tilde{A}_i \cap \tilde{B}_j} = \min\{\mu_{\tilde{A}_i}(x), \mu_{\tilde{B}_j}(x)\}$ 。又设:

$$K = \sum_{\tilde{A}_i^0 \cap \tilde{B}_j^0 \neq \emptyset} J(\tilde{B}_j/\tilde{A}_i) m_1(\tilde{A}_i) m_2(\tilde{B}_j)$$

其中:  $\tilde{A}_i^0$  和  $\tilde{B}_j^0$  分别为  $\tilde{A}_i$  和  $\tilde{B}_j$  的强0截集,则可得到组合后的

基本概率赋值函数为:

$$m(\tilde{A}) = \begin{cases} 0, & \tilde{A} = \emptyset \\ K^{-1} \sum_{\tilde{A}_i^0 \cap \tilde{B}_j^0 = \tilde{A}^0} J(\tilde{B}_j/\tilde{A}_i) m_1(\tilde{A}_i) m_2(\tilde{B}_j), & \tilde{A} \neq \emptyset, \tilde{A} \in 2^{\tilde{U}} \end{cases} \quad (4)$$

有时证据的认知结果对目标识别框架的支持关系不是一一映射,因此需要对这些对应关系进行模糊化处理,使得证据认知更符合实际情况<sup>[6]</sup>。设  $\tilde{U} = (\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \dots, \tilde{\theta}_l)$  为目标问题的识别框架,  $\tilde{U}' = (\tilde{\theta}'_1, \tilde{\theta}'_2, \dots, \tilde{\theta}'_n)$  为对证据的认知结果集,可以定义若干模糊集合:

$$\tilde{\theta}'_i = \mu_{i1}/\tilde{\theta}_1 + \mu_{i2}/\tilde{\theta}_2 + \dots + \mu_{il}/\tilde{\theta}_l, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

其中:  $\mu_{ij}$  为命题  $\tilde{\theta}_j$  对认知结果的隶属度,  $j = 1, 2, \dots, l$ 。设给出的认知结果的概率赋值为:

$$\begin{cases} m'_{\tilde{\theta}_i} = m'(\tilde{\theta}'_i) \\ m'_{\tilde{\theta}} = m'(\tilde{U}') \\ \left( \sum_{i=1}^n m'(\tilde{\theta}'_i) \right) + m'(\tilde{U}') = 1 \end{cases}$$

其中:  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $m'(\tilde{U}')$  表示对证据结果无法进行判断的概率值,则可得出基本概率赋值函数的计算公式如下:

$$\begin{cases} \tilde{m}(\emptyset) = 0 \\ \tilde{m}(\tilde{\theta}_i) = \frac{\sum_{i=1}^n m'_i \mu_{ij}}{\sum_{j=1}^l \mu_{ij}} \\ \tilde{m}(\tilde{U}) = m'_{\tilde{\theta}} \end{cases} \quad (5)$$

计算出各个证据的基本概率赋值后,代入式(4),得到对目标问题的基本概率赋值,然后用式(3)就可以得到目标问题的判决结果。

##### 2) 证据加权的处理。

在传统的证据理论组合规则中,通常假设各证据的重要程度相同。而在联合防空作战效能指标体系中,各个子目标作为证据对于上级目标的重要程度可能不同,这样就要考虑证据具有不同权重的证据组合问题<sup>[7-8]</sup>。

假设识别框架  $\tilde{U}$  下有  $r$  条证据  $E_1, \dots, E_r$  的相对权重分别为  $\omega_1, \dots, \omega_r$ , 如果  $\omega_f = \max\{\omega_1, \dots, \omega_r\}$ , 则称  $E_f$  为关键证据, 其他的称为非关键证据。若其他非关键证据相对于关键证据的权重为  $\beta_i = \omega_i/\omega_f, 0 < \beta_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, r$ , 则  $\beta_i$  为各条证据相对于关键证据的证据权。关键证据的证据权为 1。

设识别框架为  $\tilde{U} = (\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \dots, \tilde{\theta}_l), \tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \dots, \tilde{\theta}_l$  为识别框架的  $l$  个焦元, 对于证据  $E_j$ , 根据其相对于关键证据  $E_i$  的证据权  $\beta_j$ , 可对其基本概率赋值函数进行转换, 经转换后的基本概率赋值函数为:

$$\begin{cases} m'(\tilde{\theta}_i) = \beta_j m(\tilde{\theta}_i) \\ m'(\tilde{U}) = \beta_j m(\tilde{U}) + (1 - \beta_j) \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $m(\cdot), m'(\cdot)$  分别为转换前后的基本概率赋值;  $j \neq s$ 。

转换后的各证据的证据权可看成相等, 这时就可以用证据理论组合规则, 将转换后的基本概率赋值函数进行组合。

### 3) 证据相关的处理。

应用证据组合规则时要求被组合的证据必须是相互独立的, 而联合防空作战效能中的指标可能存在相关性, 一般可以用 AND 或 OR 关系来表示指标之间常见的相关性, 并在此基础上对证据组合规则做相应的处理。

设识别框架  $\tilde{U} = (\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \dots, \tilde{\theta}_l)$  存在  $n$  个具有 AND 或 OR 关系的子证据, 对应的基本概率赋值函数分别为  $m_i(\tilde{\theta}_k) (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, l)$ , 对这些子证据进行组合后的基本概率赋值函数为  $m$ , 则证据组合规则为:

对于 AND 关系:

$$\begin{cases} m(\tilde{\theta}_k) = \min\{m_i(\tilde{\theta}_k) | i = 1, 2, \dots, n\} \\ m(\tilde{U}) = 1 - \sum_{k=1}^l m(\tilde{\theta}_k) \\ m(\emptyset) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

对于 OR 关系:

$$\begin{cases} m(\tilde{\theta}_k) = \max\{m_i(\tilde{\theta}_k) | i = 1, 2, \dots, n\} \\ m(\tilde{U}) = 1 - \sum_{k=1}^l m(\tilde{\theta}_k) \\ m(\emptyset) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

### 3.3 联合防空作战效能评估模型及流程

根据模型设计的基本思想以及联合防空作战效能二级指标的基本概率赋值, 可按图 2 的算法流程计算联合防空作战效能的基本概率赋值, 对联合防空作战效能进行评估。

## 4 实例分析

设某次联合防空作战中, 有甲乙两份作战方案, 现在对这两份方案的作战效能进行评估。

设联合防空作战效能的识别框架为:  $\tilde{U} = \{\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \tilde{\theta}_3, \tilde{\theta}_4, \tilde{\theta}_5\}$ , 其中:  $\tilde{\theta}_1$  为作战效能很好;  $\tilde{\theta}_2$  为作战效能较好;  $\tilde{\theta}_3$  为作战效能一般;  $\tilde{\theta}_4$  为作战效能较差;  $\tilde{\theta}_5$  为作战效能很差。因为效能很好、效能很差都是模糊概念, 所以做模糊拓展并应用模糊证据合成公式。

设  $\mu = (\mu_{\tilde{\theta}_1}, \mu_{\tilde{\theta}_2}, \mu_{\tilde{\theta}_3}, \mu_{\tilde{\theta}_4}, \mu_{\tilde{\theta}_5})$  表示相应的模糊量化结果, 则可设:

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{\theta}_1} &= 0.2/8 + 0.7/9 + 1/10; \\ \mu_{\tilde{\theta}_2} &= 0.1/5 + 0.4/6 + 1/7 + 0.4/8 + 0.1/9; \\ \mu_{\tilde{\theta}_3} &= 0.1/3 + 0.4/4 + 1/5 + 0.4/6 + 0.1/7; \\ \mu_{\tilde{\theta}_4} &= 0.1/1 + 0.4/2 + 1/3 + 0.4/4 + 0.1/5; \\ \mu_{\tilde{\theta}_5} &= 0.2/3 + 0.7/2 + 1/1 \end{aligned}$$

其中 1 到 10 表示根据由低到高的效能等级数。

以二级指标 E12 为例, 设认知结果集  $\tilde{U}' = (\tilde{\theta}'_1, \tilde{\theta}'_2, \tilde{\theta}'_3)$ ,  $\tilde{\theta}'_1$  为效能很好,  $\tilde{\theta}'_2$  为效能一般,  $\tilde{\theta}'_3$  为效能很差。根据专家经验得到识别框架下的命题  $\tilde{\theta}_j$  对认知结果集  $\tilde{\theta}'_i$  的隶属度矩阵为:

$$\begin{bmatrix} 0.9 & 0.6 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 1.0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.7 & 1.0 \end{bmatrix}$$

除 E12 外, 其他证据的认知结果对目标识别框架的支持关系仍为一一映射。

设甲乙两个作战方案中, 一级指标 E1, E2, E3, E4, E5, E6 的权重为 (0.3, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1, 0.1), 二级指标权重相等。又设二级指标 E21、E23 之间具有 AND 关系, E61、E62 之间具有 OR 关系。根据专家经验给出的初始值, 经处理后得到的二级指标基本概率赋值如表 1 所示。

表 1 二级指标基本概率赋值表

参数	方案	E11	E12	E21	E22	E23	E31	E32	E41	E42	E43	E51	E52	E61	E62	E63
$\tilde{\theta}_1$	甲	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	乙	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\tilde{\theta}_2$	甲	0.2	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.2	0.1	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
	乙	0	0.1	0	0	0	0.1	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0
$\tilde{\theta}_3$	甲	0.5	0.5	0.6	0.7	0.8	0.7	0.5	0.6	0.5	0.6	0.8	0.6	0.5	0.7	0.5
	乙	0.1	0.1	0.2	0.1	0.2	0	0.2	0.1	0.1	0	0.2	0.1	0.1	0.1	0
$\tilde{\theta}_4$	甲	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	乙	0.7	0.5	0.6	0.8	0.6	0.7	0.5	0.7	0.8	0.8	0.7	0.6	0.7	0.8	0.6
$\tilde{\theta}_5$	甲	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0	0	0.2	0.1	0	0	0.1	0.1	0	0
	乙	0.1	0.2	0.1	0	0.2	0	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0	0.2
$\tilde{U}$	甲	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0	0.1	0	0	0.1	0	0.1	0.1	0	0.1
	乙	0.1	0.1	0	0.1	0	0.2	0.1	0.1	0	0.1	0.2	0.1	0	0.1	0.2

然后, 按照图 2 所示的算法流程, 经过计算得出联合防空作战效能的基本概率赋值为: 方案甲 (0, 0.15, 0.68, 0.11, 0.04, 0.02), 方案乙 (0.01, 0.12, 0.66, 0.16, 0.05)。利用基

于基本概率赋值的决策规则, 门限值分别取为  $\varepsilon_1 = 0.4, \varepsilon_2 = 0.1$ , 则由式 (2) 可知方案甲作战效能较好, 方案乙作战效能较差。

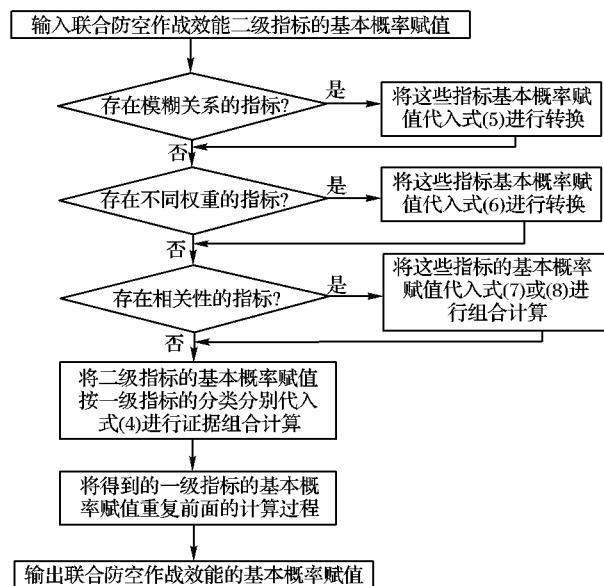


图2 基于证据理论的联合防空作战效能评估运算流程

## 5 结语

联合防空作战效能评估是一个复杂而重要的问题。本文通过对证据理论的深入分析,并利用这种重要的不确定性推理方法,建立了基于改进证据推理的联合防空作战效能综合评估模型,并充分考虑了模糊、证据加权、证据相关等可能出现的实际问题。通过对模型进行改进和完善,将联合防空作战效能评估问题划分为若干个评价指标,并对这些指标进行

分析和细化,构造出了层次化的指标体系。在对子指标、子证据进行处理后,由下层往上层利用证据组合规则进行多次证据组合运算,计算出顶层目标的基本概率赋值,然后选择合适的决策规则得出原问题的判决结果。实例表明,利用该模型能对联合防空作战效能进行全面、客观的评估,比较符合实际,可为作战指挥员决策提供重要依据,本文的研究也将为联合防空作战效能的评估提供一个崭新的研究思路和方法。

### 参考文献:

- [1] 孙巨为,王贻峰,王仰国. 一体化联合防空作战指挥效率评估研究[J]. 现代防御技术, 2008, 36(1): 70-74.
- [2] 李明军,张志顺. 模糊综合评判在军队指挥效能评估中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(5): 51-53.
- [3] 王颖龙. 联合防空战役研究[R]. 三原: 空军工程大学导弹学院, 2003.
- [4] 何友,王国宏. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [5] BEYNON M, CURRY B, MORGAN P. The dempster-shafer theory of evidence: an alternative approach to multicriteria decision modeling[J]. The International Journal of Management Science, 2000, 28(1): 37-50.
- [6] 胡子康,王永县,朱涛. 基于改进的证据推理方法的多指标决策模型[J]. 运筹与管理, 2006, 15(6): 1-7.
- [7] LEFEVRE E. Belief function combination and conflict management[J]. Information Fusion, 2002, 3(2): 149-162.
- [8] 杨春,李怀祖. 一个证据推理模型及其在专家意见综合中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(4): 43-48.

(上接第2237页)

其分级效果如表5所示。

表5 测试集分级结果

5级		4级		3级	
实际品级	预测品级	实际品级	预测品级	实际品级	预测品级
5	5.3607	4	4.3876	3	3.2764
5	5.2675	4	3.9042	3	3.4651
5	5.3176	4	4.5390	3	3.0453
5	4.3410	4	4.2905	3	3.7923
5	5.2544	4	5.2043	3	3.2192
5	4.7963	4	4.3756	3	3.3559
5	5.4760	4	4.0988	3	2.8391

预测品级为浮点数,实际品级为正整数,采取四舍五入的方法对预测品级进行取整后,5级样本的分级精度为85.7%,4级样本的分级精度为71.4%,3级样本的分级精度为85.7%,总的分级精度为81.0%。

## 3 结语

依据国家籽棉品级的分级标准,结合籽棉样本图像的特殊性,提取优白棉比重、次白棉比重、黄棉比重、杂质比重作为品级分级判断的特征参数。通过对图像中各个区域像素的抽样分析,归纳出各区域像素在RGB颜色空间下的统计特征,以此为原则遍历并划分像素,统计出各区域比重。为了减小非标准拍摄环境所带来的亮度抖动,采用亮度修正系数对图像亮度进行了补偿,取得较好的效果。分类器选用了BP神经网络,针对本文具体的输入输出要求,确定了网络的传递函

数、隐含层数,隐单元数等拓扑参数。在标准BP算法的基础上,同时引入了动量项和自适应步长改善网络的收敛速度,实验证明,改进后的学习算法收敛速度明显加快。使用已分好级的样本图像对网络进行训练和测试,其训练精度为100%,测试精度为81%,高于人工分级的精度,效果较为理想。

### 参考文献:

- [1] WAN S-A. Research and analysis of cotton quality[J]. China cotton processing, 2002, 5: 18-21.
- [2] 于慧春. 霜黄棉的品级检验[J]. 中国棉花加工, 2003(5): 14-17.
- [3] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [4] 史忠植. 神经网络[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [5] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAM R J. Learning representation of back-propagation errors[J]. Nature, 1986, 323: 533-536.
- [6] 韩立群. 人工神经网络[M]. 北京: 北京邮电出版社, 2006.
- [7] RUMELHART D E, MCCLELAND J L. Parallel distributed processing: exploration in the microstructure of cognition[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1986.
- [8] DAYAN P. Computation modeling[J]. Current Opinion in Neurobiology, 1994, 4: 212-217.
- [9] HAGAN M T, DEMUTH H B, BEALE M. 神经网络设计[M]. 戴葵, 译. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [10] NGUYEN D, WIDOW B. Improving the learning speed of 2-layer neural networks by choosing initial values of adaptive weights[C]// Proceeding of the International Joint Conference on Neural Networks. San Diego, CA: [s.n], 1990: 21-26.