

基于证据理论的多任务抢修重要度决策

郭 军, 宋建社, 杨 檬, 古西睿

(西安高技术研究所, 陕西 西安 710025)

摘要: 针对多任务抢修重要度决策中信息类型多样、描述不确定、传递不完整、历史无记录的现象, 建立了基于证据推理的重要度决策指标体系和决策模型。将不同类型定性和定量决策信息通过相应的方法转换为同一框架下的基本信度效用值, 然后根据各决策信息的重要度, 通过证据理论合成方法对各因素基本信度效用值进行分类逐层合成, 并根据决策信息中非空信息数量提出了重要度决策的量化方法。仿真算例验证了该方法的有效性。

关键词: 抢修重要度; 决策模型; 证据理论; 多任务; 不确定; 不完全; 多属性

中图分类号: O 224; E 92 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-506X.2011.03.22

Recovery importance decision making for multi-missions based on Dempster-Shafer theory

GUO Jun, SONG Jian-she, YANG Meng, Gu Xi-rui

(Xi'an Research Institute of High-Tech, Xi'an 710025, China)

Abstract: To solve weight decision of multi-mission recovery for a variety of informations, uncertain description, incomplete transmission and little historical record, an index system and decision model of weight decision based on Dempster-Shafer theory are put forward. Various types of quantitative and qualitative decision information are translated into basic probability assignment in the same framework. According to each weight of information, basic weight effective values are assorted and integrated layer by layer through Dempster-Shafer theory. And a quantitative method based on non-empty information is given. Simulation results show the effectiveness of the approach.

Keywords: recovery importance; decision making model; Dempster-Shafer theory; multi-mission; uncertain; incomplete; multiattribute

0 引 言

战时多抢修任务资源需求冲突客观存在, 在限定的抢修时间内, 当系统可用抢修资源一定, 且不能完全满足多抢修任务资源需求时, 需要优选战场抢修任务, 并通过重组抢修资源来满足抢修任务的资源需求, 实现抢修系统整体抢修效益的最大化。抢修任务的重要度体现了完成抢修任务后对作战的影响度大小, 即对整个作战系统的“产出”, 是进行抢修任务选择决策时的重要依据^[1]。在信息化条件下体系对抗作战中, 决策人员要从全局的高度综合考虑多种影响因素下的战场抢修任务的重要度, 包括抢修任务相关作战任务的重要性, 以及抢修任务自身特性和资源重组后协同维修的难易程度等。在复杂战场环境中, 这些多样性、多属性影响因素信息具有不确定性或不完全的特点, 如何通过这些信息来确定抢修任务重要度, 是优选抢修任务首要解决的问题。

证据理论是通过对于命题和子证据的合成获得在他们共同作用下对命题的支持程度, 允许子证据信息的不完全, 从而作为一种不确定性的推理方法得到了广泛研究^[2-5]。目

前证据理论的应用包括信息融合、专家评判、决策分析、风险评估、目标识别等^[6-10]。本文将证据理论应用于多任务抢修重要度决策中, 为多样性、多属性、不确定性影响因素信息背景下的多任务抢修重要度决策提供理论与方法支持。

1 多任务抢修重要度决策问题描述

1.1 指标体系

多任务抢修重要度决策应兼顾战场抢修的一般原则, 即先轻损装备, 后重损装备; 先主要装备, 后次要装备; 以战场抢修为主, 以后送维修为辅。同时还要考虑资源配套需求、协同需求以及抢修环境等因素的影响, 即易于资源重组, 易于协同维修, 易于抢修任务展开。以文献^[1, 11-13]为基础, 结合一般抢修原则和战场抢修资源动态重组系统的要求及特点, 总结多抢修任务重要度决策时需考虑的影响因素, 建立决策指标体系如表 1 所示, 其中包括第一层 5 个一级影响因素, 和第二层 23 个二级影响因素, 每个任务的重要度决策由第一层的 5 个影响因素综合得到, 第一层影响因素的重要度由其相关的第二层影响因素综合得到。

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-12-05。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(69931040)资助课题

作者简介: 郭军(1978-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为信息系统分析、战场抢修。E-mail: guojun78@gmail.com

影响因素分为定量影响因素和定性影响因素,定性影响因素包括综合评价或客观描述。

表 1 战场抢修任务重要度决策指标体系

序号	选择原则 (一级因素)	二级因素
1	受损装备担负作战任务重要程度 e_1	担负任务实施阶段 e_{11} ; 担负任务相关性 e_{12} ; 担负任务类型 e_{13} ; 损伤对当前任务影响 e_{14} ; 任务截止期 e_{15} ; 执行任务作战单元级别 e_{16}
2	抢修任务的抢修性特征 e_2	抢修度 e_{21} ; 抢修率 e_{22} ; 平均抢修时间 e_{23}
3	资源的重组性 e_3	配套设施设备要求 e_{31} ; 备件的通用性 e_{32} ; 抢修人员协同能力要求 e_{33} ; 修理方法多样性 e_{34} ; 修理方法的复杂性 e_{35} ; 道路通行能力 e_{36} ; 远程信息交互能力 e_{37}
4	装备受损情况 e_4	装备受损程度 e_{41} ; 受损部位的相关性 e_{42} ; 抢修方式需求 e_{43}
5	抢修环境 e_5	三防能力 e_{51} ; 隐蔽伪装能力 e_{52} ; 供水能力 e_{53} ; 供电能力 e_{54}

1.2 问题描述

根据战场多任务的重要度决策指标体系,该问题可以描述为一个四元数组,即 $S=(X, E, V, f)$, 其中 X 为非空有限待选任务集 $X=\{x_i, i=1, 2, \dots, N\}$, x_i 为待选任务; $E=\{e_{jk}, j=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, O\}$ 为非空有限影响因素; 对于每个影响因素 $e_{jk} (j=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, O)$, 有 $f: X \times E = V_{jk}^i, f(x_i, e_{jk}) \in V_{jk}^i, V = \bigcup_{e_{jk} \in E} V_{jk}^i, i=1, 2, \dots, N; j=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, O$, V_{jk}^i 为待选抢修任务 x_i 在影响因素 e_{jk} 下的实际赋值。 V_{jk}^i 可以是定量数值,也可以是定性描述,影响因素中如有不确定信息,则该信息相关影响因素的 V_{jk}^i 为空,记做“*”。

2 多任务抢修重要度决策模型

2.1 基本理论

证据理论是 Dempster 在 1967 年最初提出^[2],并由他的学生 Shafer 改进推广^[3],因此又称 Dempster-Shafer(D-S)理论。在证据理论中,某个命题的各种相互独立的方案或样本构成一个有限集合 2^Θ ,即 $\Theta = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 称为识别框架。 Θ 中所有可能集合用幂集合表示,当 Θ 中有 2 个元素,则 Θ 的幂集合 2^Θ 的元素个数为 2^2 ,即 $2^\Theta = \{\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_1, x_2\}, \emptyset\}$ 。借鉴并引用基本可信度分配、信度函数、焦元等定义,以及相应的证据合成规则,据此给出对抢修任务重要度的量化指标值。

定义 1^[2] 设 Θ 为识别框架,如果集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 且满足 $m(\emptyset) = 0, \sum m(x) = 1, \forall X \subseteq \Theta$, 则称 m 为框架 Θ 上的基本概率分配(basic probability assignment, BPA), $m(X)$ 称为命题 X 的基本可信度函数。 $m(X)$ 则表示证据支

持命题 X 发生的程度。若 $X \subseteq \Theta$ 且 $m(X) > 0$, 则称 X 为证据的焦元,所有焦元称为核。

定义 2^[2] 设 Θ 为识别框架, $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为框架 Θ 上 BPA, 则称由

$$Bel(X) = \sum_{Y \subseteq X} m(Y), \quad \forall X, Y \subseteq \Theta \quad (1)$$

所定义的函数 $Bel: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 为 Θ 上的信度函数,其中 $Bel(X)$ 为所有 X 子集的精确定信度总和。

定义 3^[2] 设 Θ 为识别框架,如果 $m(\Theta) = 1, m(X) = 0$, 则称 Bel 为空信度函数,任何信度函数与空信度函数合成都不会改变原有信度函数。

设有两个证据是完全独立的,它们在识别框架 Θ 上的集函数分别为 m_1 和 m_2 , 根据 Dempster 合成法则, m_1 与 m_2 的合成记做 $m_1 \oplus m_2, \oplus$ 表示直和,且 $m_1 \oplus m_2: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 其中焦元 $A \neq \emptyset$, 则

$$m_{12}(A) = (m_1 \oplus m_2)(A) = \begin{cases} m_{12}(\emptyset) = 0 \\ \frac{\sum_{X \cap Y = A} m_1(X) m_2(Y)}{1 - K} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $K = \sum_{X \cap Y = \emptyset} m_1(X) m_2(Y)$ 是证据冲突的程度,称为冲突因子。 $m_{12}(A)$ 为证据 m_1 和 m_2 对命题 A 的联合支持程度。如果 $K=1$, 则证据间不能直和,如果 $K \neq 1$, 则可以通过 Dempster 合成法则对不同证据的信度函数合成,得到所有证据联合作用下的信度函数。

2.2 参数转换

建立战场抢修任务重要度评价集 $G_l (l=1, \dots, L)$, 分别对应 G_1 (较弱)、 G_2 (一般)、 G_3 (较强)、 G_4 (强)。分别给各评价等级分配相应的效用值, $u(G_1) = 0.25, u(G_2) = 0.5, u(G_3) = 0.75, u(G_4) = 1$ 。因素中实际值越大或评价越优则影响越大的为效益型因素,实际值越大或评价越优则影响越劣的为成本型因素。按照证据理论的合成计算要求,对影响因素取值进行规范化处理,其中效益型定量因素 e_{21}, e_{22} 通过式(3)进行规范,成本型定量因素 e_{15}, e_{23} 通过式(4)进行规范。

$$u_{jk}^i = \frac{V_{jk}^i}{\max \{V_{jk}^i\}} \quad (3)$$

$$u_{jk}^i = \frac{\max \{V_{jk}^i\} + \min \{V_{jk}^i\} - V_{jk}^i}{\max \{V_{jk}^i\}} \quad (4)$$

式中, u_{jk}^i 为抢修任务 x_i 关于第 e_{jk} 项影响因素的规范化值,且 $0 \leq u_{jk}^i \leq 1$ 。当 $u(G_{l-1}) \leq u_{jk}^i \leq u(G_l)$, 则 u_{jk}^i 关于重要度评价集 G 的基本信度可以通过式(5)和式(6)计算,即

$$G_{l-1}(e_{jk}^i) = \frac{u(G_l) - u_{jk}^i}{u(G_l) - u(G_{l-1})} \quad (5)$$

$$G_l(e_{jk}^i) = 1 - G_{l-1}(e_{jk}^i) \quad (6)$$

定性因素中综合评价的基本信度由决策人员和装备使用单位综合确定,关于评价集 G 的映射关系如表 2 所示。客观描述的基本信度由装备使用单位的上报信息确定,关于评价集 G 的映射关系如表 3 所示。

表 2 客观描述关于评价集 G 的映射

描述信息	影响因素							重要度评语集
	e_{11}	e_{12}	e_{13}	e_{14}	e_{16}	e_{42}	e_{43}	
1	战斗	战役相关	主攻	全部	一级作战单位	零件	战场抢修	G_4
2	机动	战术相关	助攻	部分	二级作战单位	组件	后送野战修理所	G_3
3	准备	独立任务	佯动	单项	三级作战单位	分系统	后送基地	G_2
4	撤退	待命	保障	不影响	非作战单位	系统	返厂	G_1

表3 综合评价关于评价集G的映射

综合评价	影响因素												重要度评语集
	e ₃₁	e ₃₂	e ₃₃	e ₃₄	e ₃₅	e ₃₆	e ₃₇	e ₄₁	e ₅₁	e ₅₂	e ₅₃	e ₅₄	
1	低	高	低	多	简单	好	强	轻	高	高	高	高	G ₄
2	一般	较高	一般	较多	一般	较好	较强	较轻	较高	较高	较高	较高	G ₃
3	较高	一般	较高	一般	较复杂	一般	一般	中	一般	一般	一般	一般	G ₂
4	高	差	高	少	复杂	差	弱	重	低	低	低	低	G ₁

D-S合成法则要求所有证据独立,并具有相同的重要程度。在对多任务抢修重要度决策时,由于各证据具有不确定性影响因素,对合成结果的支持程度不同,因此不能直接通过D-S合成法则进行合成。构造同层影响因素两两比较的判断矩阵,通过层次分析法确立影响因素的权重,根据权重关系将各证据所提供的基本可信度分配函数进行转化,以使转化后的各证据具有相同的重要程度。

2.3 算法流程

步骤1 战场抢修任务重要度决策人员根据获得的抢修任务相关影响因素信息构建决策矩阵。按照表2和表3给出底层定性影响因素关于评价集的G的基本信度值,底层定量影响因素关于评价集的G的基本信度值通过式(3)~式(6)得到,信息为空的影响因素关于评价集的G的基本信度值赋值为0,不确定因素Θ的基本信度赋值如下

$$m_{jk}^i(\Theta) = 1 - \sum_{l=1}^4 m_{jk}^i(G_l | e_{jk}^i) \quad (7)$$

步骤2 对同层因素间对上层某因素重要性进行评价,构造两两比较判断矩阵,并通过层次分析法计算各层影响因素的权重值,得到第一层影响因素的权重向量w_j(j=1,2,...,M)和第二层影响因素的权重向量w_{jk}(j=1,2,...,M;k=1,2,...,O)。

步骤3 根据权重向量间的关系,将各证据所提供的基本信度分配函数转化如下

$$m_{jk}^i(G_l | e_{jk}^i) = \frac{1}{\max\{w_{jk}\}} w_{jk} m_{jk}^i(G_l | e_{jk}^i) \quad (8)$$

$$m_{jk}^i(\Theta) = 1 - \frac{a}{\max\{w_{jk}\}} w_{jk} [1 - m_{jk}^i(\Theta)] \quad (9)$$

式中,G_l|e_{jk}ⁱ≠∅,m_{jk}ⁱ(G_l|e_{jk}ⁱ)为调整后影响因素e_{jk}ⁱ关于G的基本信度赋值;m_{jk}ⁱ(Θ)为调整后对不确定因素的可信度赋值;a/max{w_{jk}}为信度调整系数,其中a=(2^θ-1)/2^θ。

步骤4 第二层影响因素对其上一层影响因素信度合成如下

$$m_j^i(G_l | e_j^i) = \frac{1}{1-K} \times \sum_{(G_l|e_{j_1}^i) \cap \dots \cap (G_l|e_{j_k}^i) = (G_l|e_j^i)} m_{j_1}^i(G_l | e_{j_1}^i) \dots m_{j_k}^i(G_l | e_{j_k}^i) \quad (10)$$

$$m_j^i(\Theta) = \frac{\prod_{k=1}^o m_{jk}^i(\Theta)}{1-K} \quad (11)$$

式中

$$K = \sum_{(G_l|e_{j_1}^i) \cap \dots \cap (G_l|e_{j_k}^i) = \emptyset} m_{j_1}^i(G_l | e_{j_1}^i) \dots m_{j_k}^i(G_l | e_{j_k}^i)$$

步骤5 根据式(8)和式(9),第i项抢修任务关于重要度评价集G的信度分配函数转化如下

$$m_j^i(G_l | e_j^i) = \frac{a}{\max\{w_j\}} w_j m_j^i(G_l | e_j^i), G_l | e_j^i \neq \emptyset \quad (12)$$

$$m_j^i(\Theta) = 1 - \frac{a}{\max\{w_j\}} w_j [1 - m_j^i(\Theta)] \quad (13)$$

步骤6 第i项抢修任务关于重要度评价集G的信度合成如下

$$m^i(G_l | e^i) = \frac{1}{1-K} \times \sum_{(G_l|e_1^i) \cap \dots \cap (G_l|e_j^i) = (G_l|e^i)} m_1^i(G_l | e_1^i) \dots m_j^i(G_l | e_j^i) \quad (14)$$

$$m^i(\Theta) = \frac{\prod_{j=1}^M m_j^i(\Theta)}{1-K} \quad (15)$$

式中

$$K = \sum_{(G_l|e_1^i) \cap \dots \cap (G_l|e_j^i) = \emptyset} m_1^i(G_l | e_1^i) \dots m_j^i(G_l | e_j^i)$$

步骤7 根据定义3,当e_{jk}为{e_{jk}}中权重最大的影响因素,同时e_j为{e_j}中权重最大的影响因素,且其他影响因素都为空时,有mⁱ(G_l|eⁱ)=m_{jk}ⁱ(G_l|e_{jk}ⁱ)。据此,有以下结论,即只有一个重要影响因素信息支持命题和有多个影响因素信息支持的命题,将可能得到相同的合成结果,显然与可靠信息越多可信度越大的实际常理相悖。这里引入重要度调节系数的概念,认为多任务抢修重要度决策量化值和影响因素信度函数为非空的数量成正比,其量化公式如下

$$\lambda^i = \frac{N_{e_{jk}(\Theta)}^i}{N_{e_{jk}}^i} [(1-a)m^i(\Theta) + \sum_{l=1}^L m^i(G_l | e^i) u(G_l)] \quad (16)$$

式中,N_{e_{jk}}ⁱ为底层影响因素的总量;N_{e_{jk}(Θ)}ⁱ为任务x_i信度函数非空的底层影响因素的总量;N_{e_{jk}(Θ)}ⁱ/N_{e_{jk}}ⁱ为重要度合成调节系数。

3 仿真实验

假设决策人员接到3项抢修任务,各抢修任务定量影响因素的相关信息如表4所示。

表4 抢修任务定量影响因素赋值

抢修任务	影响因素			
	e ₁₅ /h	e ₂₁ /h	e ₂₂ /(%)	e ₂₃ /(%)
1	1.5	2	80	55
2	2.5	1.5	75	45
3	3	2.5	85	45

由2.3节给出算法步骤1和步骤2,并结合表2和表3,将决策人员收到的相应信息转化为基本信度分配值,如表5所示。第一层影响因素的权重赋值{w₁,w₂,w₃,w₄,w₅}={0.337 5,0.154 6,0.273 5,0.143 6,0.090 8},第二层影响因素的权重赋值见表5最后一行。

表 5 各影响基本信度和权重赋值

抢修任务	影响因素										
	e_{11}	e_{12}	e_{13}	e_{14}	e_{15}	e_{16}	e_{21}	e_{22}	e_{23}	e_{31}	e_{32}
1	$(G_4, 1)$	$(G_4, 1)$	$(G_4, 1)$	$(G_4, 1)$	$(G_4, 1)$	$(G_4, 1)$	$(G_4, 0.2)$ $(G_3, 0.8)$	$(G_4, 0.76)$ $(G_3, 0.24)$	$(G_4, 1)$	$(G_4, 0.8)$ $(G_3, 0.2)$	$(G_4, 0.7)$ $(G_3, 0.3)$
2	$(G_3, 1)$	$(G_3, 1)$	$(G_4, 1)$	$(G_3, 1)$	$(G_3, 0.68)$ $(G_2, 0.32)$	$(G_4, 1)$	$(G_4, 1)$	$(G_4, 0.52)$ $(G_3, 0.48)$	$(G_4, 0.28)$ $(G_3, 0.72)$	$(G_4, 0.6)$ $(G_3, 0.4)$	$(G_3, 0.9)$ $(G_2, 0.1)$
3	$(G_3, 1)$	$(G_4, 1)$	$(G_\theta, 1)$	$(G_\theta, 1)$	$(G_2, 1)$	$(G_3, 1)$	$(G_3, 0.4)$ $(G_2, 0.6)$	$(G_4, 1)$	$(G_4, 0.28)$ $(G_3, 0.72)$	$(G_4, 0.5)$ $(G_3, 0.5)$	$(G_4, 0.5)$ $(G_3, 0.5)$
ω	0.169 6	0.187 4	0.293 2	0.110 1	0.151 9	0.087 8	0.240 2	0.209 8	0.549 9	0.134 3	0.227 6

抢修任务	影响因素											
	e_{33}	e_{34}	e_{35}	e_{36}	e_{37}	e_{41}	e_{42}	e_{43}	e_{51}	e_{52}	e_{53}	e_{54}
1	$(G_4, 0.7)$ $(G_3, 0.3)$	$(G_4, 0.6)$ $(G_3, 0.4)$	$(G_3, 0.7)$ $(G_2, 0.3)$	$(G_4, 0.7)$ $(G_3, 0.3)$	$(G_3, 0.8)$ $(G_2, 0.2)$	$(G_4, 0.2)$ $(G_3, 0.8)$	$(G_4, 0.6)$ $(G_3, 0.4)$	$(G_4, 0.6)$ $(G_3, 0.4)$	$(G_4, 0.6)$ $(G_3, 0.4)$	$(G_4, 0.2)$ $(G_3, 0.8)$	$(G_4, 0.7)$ $(G_3, 0.3)$	$(G_4, 0.3)$ $(G_3, 0.7)$
2	$(G_3, 0.9)$ $(G_2, 0.1)$	$(G_4, 0.7)$ $(G_3, 0.3)$	$(G_4, 0.3)$ $(G_3, 0.7)$	$(G_3, 0.9)$ $(G_2, 0.1)$	$(G_3, 0.4)$ $(G_2, 0.6)$	$(G_3, 0.7)$ $(G_2, 0.3)$	$(G_3, 0.7)$ $(G_2, 0.3)$	$(G_4, 0.7)$ $(G_3, 0.3)$	$(G_3, 0.7)$ $(G_2, 0.3)$	$(G_4, 0.3)$ $(G_3, 0.7)$	$(G_4, 0.6)$ $(G_3, 0.4)$	$(G_3, 0.4)$ $(G_2, 0.6)$
3	$(G_4, 0.5)$ $(G_3, 0.5)$	$(G_4, 0.8)$ $(G_3, 0.2)$	$(G_4, 0.5)$ $(G_3, 0.5)$	$(G_4, 0.7)$ $(G_3, 0.3)$	$(G_4, 0.3)$ $(G_3, 0.7)$	$(G_3, 0.4)$ $(G_2, 0.6)$	$(G_4, 0.3)$ $(G_3, 0.7)$	$(G_3, 0.4)$ $(G_2, 0.6)$	$(G_4, 0.8)$ $(G_3, 0.2)$	$(G_3, 0.4)$ $(G_2, 0.6)$	$(G_4, 0.6)$ $(G_3, 0.4)$	$(G_3, 0.9)$ $(G_2, 0.1)$
ω	0.267 6	0.182 1	0.086 6	0.050 9	0.050 9	0.240 2	0.209 9	0.549 9	0.333 3	0.333 3	0.166 7	0.166 7

通过算法步骤 3~步骤 7 得到各抢修任务合成后的信度值,如表 6 所示。根据算法步骤 7, $\{\lambda^1, \lambda^2, \lambda^3\} = \{0.989 7, 0.788 7, 0.737 8\}$ 分别为任务 x_1, x_2, x_3 的抢修重要度量化值。

表 6 合成结果

抢修任务	影响因素				
	G_1	G_2	G_2	G_4	G_θ
1	0	0	0.012 9	0.979 6	0.007 5
2	0	0.002 7	0.775 9	0.204 4	0.017 0
3	0	0.033 6	0.537 2	0.385 6	0.043 6

4 结 论

通过算例可以看出,本文设计的基于证据理论的模型和算法,可以解决有不确定信息的多任务抢修重要度决策问题。文中提出的重要度分配计算和抢修重要度决策量化方法,可以有效避免合成过程中悖论的产生,使重要度量化值更为合理,为解决不确定信息前提下的多任务抢修重要度决策问题提供了一种新的求解思路,并能够反映未来联合作战、联合保障的需求。

参考文献:

[1] Guo J, Song J S, Yang M, et al. Multi-agent based resource reconfiguration framework in agile armament battlefield recovery system[C] // Proc. of International Workshop on Education Technology and Training & International Workshop on Geosciences and Remote Sensing, 2008:724 - 727.

[2] Dempster A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. *Annals of Mathematical Statistical*, 1967, 38(4):325 - 339.

[3] Shafer G. *A mathematical theory of evidence*[M]. New Jensey: Princeton University Press, 1976.

[4] Beynon M J. Understanding local ignorance and non-specificity in the DS/AHP method of multi-criteria decision making[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 163(2):403 - 417.

[5] Beynon M J. A method of aggregation in DS/AHP for group

decision-making with the non-equivalent importance of individuals in the group[J]. *Computers & Operations Research*, 2005, 32(7):1881 - 1896.

[6] 王坚强,孙超. 信息不完全确定的多准则语言群体指派方法[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(6):877 - 882. (Wang J Q, Sun C. Method of group multi-criteria assignment problem with linguistic assessment information and incomplete certain information on weights[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006, 28(6):877 - 882.)

[7] 龚本刚. 基于证据理论的不完全信息多属性决策方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2007. (Gong B G. Methods based on Dempster-Shafer theory for multi-attribute decision making with incomplete information[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007.)

[8] 张军. 证据理论中冲突证据的处理及应用[D]. 南昌:南昌大学, 2007. (Zhang J. Approaches to conflict evidence in D-S evidence theory and its applications[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.)

[9] 侯俊. 证据推理的组合方法、评价体系与应用研究[D]. 西安:西北工业大学, 2006. (Hou J. The combination rules, performance indexes and applications of evidence reasoning [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.)

[10] Chen T L, Que P W. Target recognition based on modified combination rule[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2006, 17(2):279 - 283.

[11] 宋建社,曹小平,曹耀钦,等. 装备维修信息化工程[M]. 北京:国防工业出版社, 2005. (Song J S, Cao X P, Cao Y Q, et al. *Armament maintenance and support informatization engineering*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005.)

[12] 李建平,石全,甘茂治. 装备战场抢修理论与应用[M]. 北京:兵器工业出版社, 2000. (Li J P, Shi Q, Gan M Z. *Theory and application of armament battle damage assessment and repair*[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2000.)

[13] 曹继平,宋建社,郭军,等. 一种战时装备维修保障资源优化调度算法[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(15):3390 - 3394. (Cao J P, Song J S, Guo J, et al. Optimization dispatching arithmetic of equipment maintenance support resources in wartime[J]. *Journal of System Simulation*, 2007, 19(15):3390 - 3394.)