

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0673. 2026. 01. 002

考虑技战术信息融合的低空目标敌我识别方法

牛晓伟¹, 沈 堤¹, 余付平¹, 郭艺夺², 何兴宇¹

(1.空军工程大学 空管领航学院,陕西 西安 710038; 2.空军工程大学 防空反导学院,陕西 西安 710038)

摘要:针对敌我识别(IFF)可靠性不足,且现有方法难以适配高冲突低空战场环境等问题,构建多维证据修正与融合框架并提出一种战场空域控制体系下的低空目标敌我识别方法。首先,通过模糊推理处理战术信息,利用综合冲突系数与收缩—膨胀函数修正证据,利用 D-S(Dempster-Shafer)组合规则得到战术识别结果;其次,将技术手段获取的数据转换为直觉模糊数,分别通过 AIFS 交叉熵与皮尔逊相关系数确定识别手段与探测周期权重;最后,运用证据折扣法修正各周期各手段证据,通过 D-S 组合规则获取多周期识别结果。实例计算与对比分析表明,所提方法能够有效解决复杂战场环境下敌我属性误判问题。

关键词:敌我识别;低空目标;D-S 证据理论;模糊推理;直觉模糊集;证据折扣法

中图分类号:TP391.4;E917

文献标识码:A

文章编号:1671-0673(2026)01-0010-09

Method for Low-Altitude Targets Identification of Friend or Foe Considering Fusion of Technical and Tactical Information

NIU Xiaowei¹, SHEN Di¹, YU Fuping¹, GUO Yiduo², HE Xingyu¹

(1.Air Traffic Control Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2.Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: To address insufficient reliability of identification of friend or foe (IFF), as well as existing methods' poor adaptability to high-conflict low-altitude battlefield environments, an IFF method for low-altitude targets under the battlefield airspace control system via a multi-dimensional evidence correction and fusion framework is proposed. Initially, tactical information is processed via fuzzy reasoning and evidence is modified by using the comprehensive conflict coefficient and contraction-expansion function to derive tactical identification results using the Dempster-Shafer (D-S) combination rule. Subsequently, technical data is converted into intuitionistic fuzzy numbers. Identification means and detection cycle weights are respectively determined by using AIFS cross-entropy and Pearson correlation coefficient. Ultimately, evidences of each means per cycle are optimized via the evidence discount method, with multi-cycle fused results derived using the D-S combination rule. Case studies and comparisons demonstrate the proposed method effectively resolves the problem of friend-or-foe attribute misjudgment in complex battlefield environments.

Key words: identification of friend or foe; low-altitude targets; Dempster-Shafer evidence theory; fuzzy reasoning; intuitionistic fuzzy sets; evidence discount method

空中目标敌我识别指利用各类手段判别特定
时空范围内的空中目标的身份属性。随着隐身、

电子干扰等技术以及多目标协同等战术的不断发
展,战场环境日益动态复杂,敌我识别面临更严峻

收稿日期:2025-10-15;修回日期:2025-11-21

基金项目:国家自然科学基金军事学重点项目(2024-SKJJ-B-035);陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBMS-466)

作者简介:牛晓伟(2001—),男,硕士生,主要研究方向为空中目标敌我识别体系构建。E-mail:niuxiaowei945@163.com

通信作者:沈 堤(1983—),男,教授,博士,主要研究方向为空战场管控。E-mail:shendi1103@163.com

的挑战。为构建精细化防空体系,提升联合作战效能,大量学者围绕军事理论^[1]与技术创新开展了广泛研究。

军事理论层面,美军在《JP3-52 联合空域控制》中健全了战场空域控制体系及空中目标敌我识别的理论体系^[2]。随后提出了“敏捷作战”^[3]概念,并明确了空中目标识别的核心框架与作战流程^[4]。

技术创新方面,主要聚焦于装备系统与算法模型。装备系统以北约 M5 型敌我识别器为代表,正从体系、平台和效能等维度持续优化。算法研究集中于信息融合^[5]、智能算法^[6]以及不确定性理论^[7]。例如,文献[8]通过设置航线规则,基于战机飞行参数赋予其不同属性,但只考虑雷达一种信息源,不适用于低空目标识别。文献[9]引入空域协同措施与敌我识别器,扩大信息源,增强了识别结果的可靠性,但未考虑与其他技术手段融合的结果。文献[10]结合模型、规则和领域知识,基于时域融合规则重构权重因子,进而辅助识别,但受历史数据影响较大,不适用于动态变化的实战场景。

基于上述研究现状,参考多模态融合^[11]以及模糊层次分析法^[12]相关思想,提出了一种考虑技战术信息融合的低空目标敌我识别方法。针对低空目标敌我识别,改进 D-S (Dempster-Shafer) 证据理论融合策略。首先使用模糊推理对战术识别问题建模,通过雷达、电子支援措施获取低空目标的飞行参数;而后构建变量间的模糊推理规则,采用重心

法解模糊,使用冲突系数 k 与 J-S (Jensen-Shannon) 散度量战术手段证据冲突;再基于加权平均冲突 f 和收缩—膨胀函数调整战术手段权重以修正证据,并采用 D-S 组合规则得到战术识别结果。然后,使用直觉模糊集对技术识别问题建模,将直觉模糊数转换为 D-S 证据理论所用的基本概率赋值,并搭建整体融合识别框架,基于 Atanassov 直觉模糊集 (Atanassov's Intuitionistic Fuzzy Sets, AIFS) 交叉熵确定技术识别手段权重,基于皮尔逊相关系数度量探测周期证据冲突,并根据权重系数与证据冲突修正手段证据以及周期证据,使用 D-S 组合规则融合,得到单周期技战术敌我识别结果与多周期技战术敌我识别结果。最后针对典型场景与高冲突场景,将本文方法与各类现有改进方法、经典 Yager 改进方法进行对比。仿真实验结果表明,所提方法在典型场景以及高冲突场景下均能取得较好的识别结果。

基于防空作战的空域规划与控制体系如图 1 所示,主要由防空导弹作战区、预警指挥区、战斗中巡逻以及各类预先规划空域构成。我方执行作战任务的高速固定翼飞机在前出与返航时均需在预先规划的通道中飞行,包括最小风险通道、低高度层穿越通道、空中通道,并遵守预先设置的飞行参数。通道划设一方面能协调解决空中作战各类行动用空的矛盾冲突,另一方面能辅助进行敌我识别。

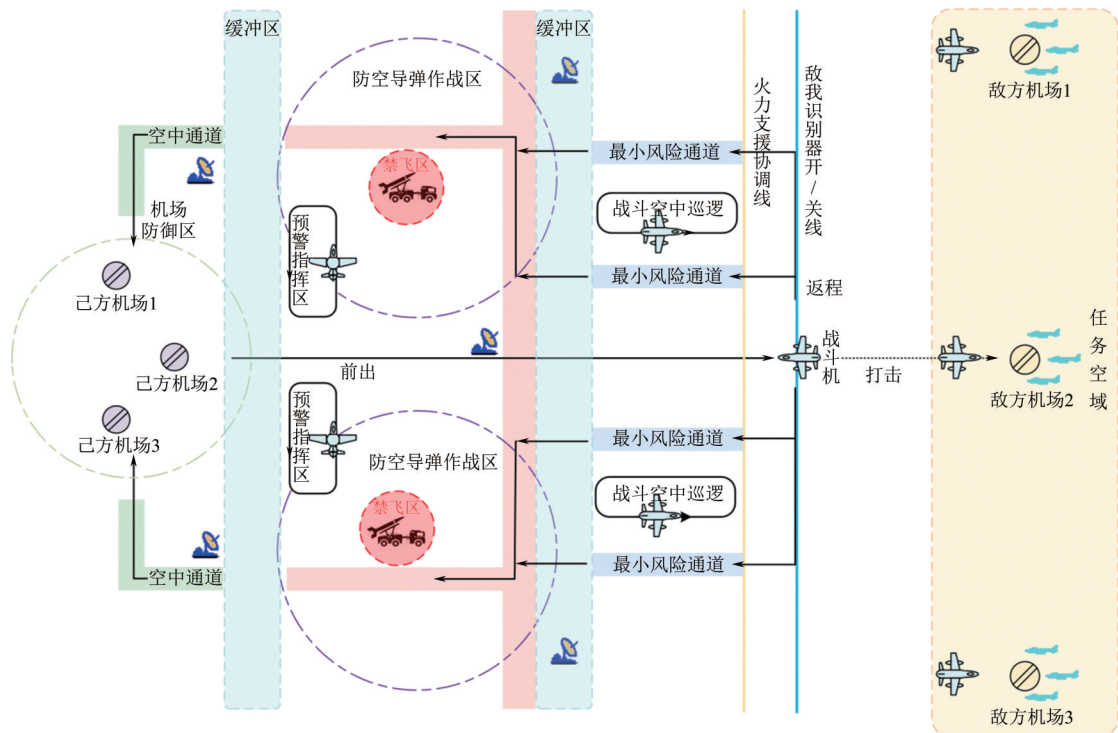


图1 基于防空作战的空域规划与控制体系

1 技战术信息融合敌我识别问题

空中目标的技战术敌我识别手段包括技术与战术两个方面。技术识别手段以敌我识别器为核心,依托各类传感器实现目标身份判别;战术识别手段主要指依据预先筹划的程序控制措施与颁布的空域控制指令辅助敌我识别的程序控制手段^[13]。参考美军先进做法,并结合我国的研究实际情况,对空中目标技战术识别手段总结如图2所示。

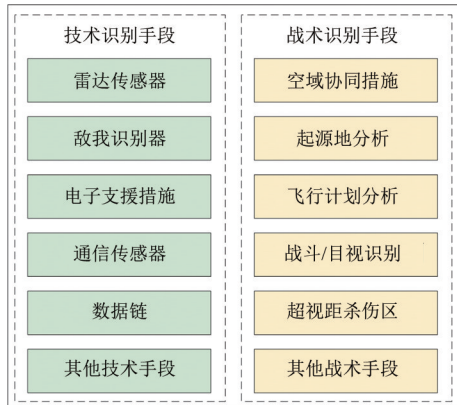


图2 技战术识别手段

当空中目标被我方探测手段侦获后,技术识别手段即对其识别。敌我识别器主要侦获目标发送的脉冲框架,而后对其解码,并根据数字信息进行判决^[14];雷达通过目标辐射出的喷气发动机调制(Jet Engine Modulation, JEM)特征、多维雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)特征以及高维距离像特征综合判断目标的身份^[15];电子支援措施(Electronic Support Measures, ESM)捕获目标雷达辐射源的频谱特征,通过判别辐射源类型进一步判别身份^[16]。在实际低空场景下各技术手段均有一定局限,例如敌我识别器只能接收特定频道的回波,雷达对低空目标的探测易受障碍物影响,通信传感器易侦获虚假信号,同时各技术平台会因火力压制与电磁干扰导致功能受限。仅依赖单个传感器的探测结果支撑最终决策易引发较大偏差导致误判。为此,需设置空域协同措施等战术手段辅助技术手段敌我识别,并基于战场空域控制体系融合各手段的判别结果,最终得到空中目标身份属性的综合结论,提升复杂战场环境下敌我识别的可靠性。

2 基础理论

对考虑技战术信息融合识别的相关基础理论进行介绍,为后续算法设计与实现提供理论支撑。

2.1 D-S证据理论

D-S证据理论是一种决策级融合算法^[17],该理论通过信度量化命题的可能性,处理模糊性信息,适用于信息冲突场景,其相关定义如下。

定义1 设辨识框架 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$, 基本概率指派 m_1 与 m_2 对应的焦元分别为 $A_1, A_2, \dots, A_k$ 和 $B_1, B_2, \dots, B_l$ 。则对于二者组合后的新证据 m 的基本概率赋值(Basic Probability Assignment, BPA)有 D-S 组合规则,如式(1)所示:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0; \\ m(A) = \frac{1}{1-k} \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i) m_2(B_j). \end{cases} \quad (1)$$

式中, $k = \sum_{A_i \cap B_j = \emptyset} m_1(A_i) m_2(B_j)$ 为冲突系数。

2.2 模糊推理

采用飞行参数与通道规则融合识别获取最终识别结果,需采用合适的算法工具构造 BPA,在此借助模糊推理及模糊数学工具降低模糊不确定性造成的影响。

定义2 设论域为 X , A 的模糊集合 $\tilde{A}$ 由隶属函数 $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ 来表征,即 $\mu_A(x)$ 是从论域 X 中的元素 x 到实轴闭区间 $[0,1]$ 的映射。

2.3 直觉模糊集

直觉模糊集^[18]通过表述对某类信息“支持”、“中立”或“反对”的程度进一步描述信息间的模糊关系。

定义3 对于论域 $X, \forall x \in X$ 若存在映射和,使得 $0 \leq \mu_A(x) + \gamma_A(x) \leq 1$ 始终成立,则称论域 X 上的一个直觉模糊集 $A = \{ \langle x, \mu_A(x), \gamma_A(x) \rangle \mid x \in X \}$, 其中, $\mu_A(x)$ 和 $\gamma_A(x)$ 分别为隶属度和非隶属度。犹豫度 $\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \gamma_A(x)$, 表示“既不支持也不反对”的不确定性程度。3者共同构成对元素与集合关系的完整刻画。

定义4 隶属度 $\mu_A(x)$ 与非隶属度 $\gamma_A(x)$ 所构成二元组 $\langle \mu_A(x), \gamma_A(x) \rangle$ 称为直觉模糊数。全体直觉模糊数 $z_{ij} = \langle \mu_{ij}, \gamma_{ij} \rangle (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 构成的矩阵 $Z = (z_{ij})_{m \times n}$ 为直觉模糊矩阵。用直觉模糊数表示辨识框架 Θ 上的 Mass 函数,如式(2)所示:

$$\begin{cases} m_A(x_i) = \mu_A(x_i) / \sum_{i=1}^n [1 - \gamma_A(x_i)]; \\ m_A(\varphi) = 0; \\ m_A(\Theta) = 1 - \sum_{i=1}^n m_A(x_i). \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_i 表示辨识框架 Θ 中某个具体的辨识假设; φ

表示不可能事件; Θ 表示包含所有可能辨识假设的非空有限集合,用于刻画辨识框架的所有可能情况。

3 改进D-S证据理论的信息融合识别

3.1 输入变量与输出变量的模糊化与规范化

基于战术手段的空中目标敌我识别需借助预设的返航通道规则以及航空器返航过程的实时飞行参数。最小风险通道的高度常设为600~1 200 m,属于低空,雷达探测易受自然地形及障碍物等因素影响。而ESM能通过捕获目标辐射电磁能量进而获取其方位角,并通过两基站交叉定位进一步推算目标高度。因此考虑使用雷达与ESM联合获取飞行参数。而后通过比对预先设置的通道使用规则与空中目标的实际飞行参数,通过模糊推理赋予其敌我属性。

选取雷达探测高度 H_1 、低空目标速度 V 、低空目标航向 C 以及ESM探测高度 H_2 为输入变量。选取友军 F_R 、假定友军 A_C 、假定敌军 S_T 以及敌军 F_O 为输出变量。而后需描述模糊化后变量之间的模糊关系。高斯型隶属函数^[19]是一种连续且平滑的钟形曲线,其隶属度随变量的变化始终连续可导,能更自然地刻画目标飞行参数连续变量与敌我属性模糊集合之间的渐变隶属关系,计算方法如式(3)所示:

$$\begin{cases} \mu_A(x) = \exp(-(x-c)^2/2\sigma^2); \\ \gamma_A(x) = 1 - \pi_A(x) - \exp(-(x-c)^2/2\sigma^2). \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\pi_A(x)$ 指犹豫度; c 和 σ 分别为隶属函数的中心和宽度。

为便于计算,将输入输出变量进行规范化处理,均划分为5个区间:小[0,0.125)、较小[0.125,0.25)、中[0.25,0.5)、较大[0.5,0.75)和大[0.75,1]。在此,以速度大小的偏离值为代表,如式(4)所示,其他规范化处理以此类推。

$$\Delta v = \begin{cases} x/80, & x < 10; \\ (x-15)/40 + 0.25, & 10 \leq x < 20; \\ (x-25)/40 + 0.5, & 20 \leq x < 30; \\ (x-35)/40 + 0.75, & 30 \leq x < 40; \\ (50-x)/80 + 1, & 40 \leq x \leq 50. \end{cases} \quad (4)$$

3.2 模糊推理规则以及模糊推理系统的构建

由第3.1节可知,飞行参数的4类输入变量分别对应5个隶属函数,由此可建立多重战术推理规则,共有 $N = N_{\Delta H_1} \cdot N_{\Delta V} \cdot N_{\Delta C} \cdot N_{\Delta H_2} = 5^4 = 625$ 个,具体的模糊推理规则由专家确定。考虑4类敌我

属性,在此选用“ $\vee - \wedge$ ”合成规则,得到飞行参数偏离值与敌我属性之间的综合模糊关系如下:

$$\begin{cases} R_{F_R} = \bigvee_{n=1}^N (\mu_n(H_1) \wedge \mu_n(V) \wedge \mu_n(C) \wedge \mu_n(H_2) \wedge \mu_n(F_R)); \\ R_{A_C} = \bigvee_{n=1}^N (\mu_n(H_1) \wedge \mu_n(V) \wedge \mu_n(C) \wedge \mu_n(H_2) \wedge \mu_n(A_C)); \\ R_{S_T} = \bigvee_{n=1}^N (\mu_n(H_1) \wedge \mu_n(V) \wedge \mu_n(C) \wedge \mu_n(H_2) \wedge \mu_n(S_T)); \\ R_{F_O} = \bigvee_{n=1}^N (\mu_n(H_1) \wedge \mu_n(V) \wedge \mu_n(C) \wedge \mu_n(H_2) \wedge \mu_n(F_O)). \end{cases}$$

式中, F_R 、 A_C 、 S_T 、 F_O 代表了低空目标的敌我属性。

低空目标识别过程中,飞行参数的模糊推理集合往往是连续分布的模糊集合,而重心法能够综合所有隶属度的贡献,避免识别过程中某时刻因局部信息丢失导致的识别偏差。因此,为获取平滑的输出结果,选取重心法作为解模糊算法,如式(5)所示,解模糊化即可得到低空目标敌我属性的输出值。

$$z_0 = \frac{\int_U [z(1 + \mu_F(z) + \gamma_F(z))] dz}{\int_U [1 + \mu_F(z) + \gamma_F(z)] dz} \quad (5)$$

式中: U 表示论域,取值范围[0,1],即低空目标敌我属性模糊输出变量的所有可能取值构成的集合; z 表示论域 U 中的元素,具体指低空目标敌我属性的模糊输出变量,通过重心法计算得到其精确值 z_0 ; F 为模糊集合。

由以上过程得到对应的飞行参数输入变量与敌我属性输出变量之间的部分关系,如图3所示。

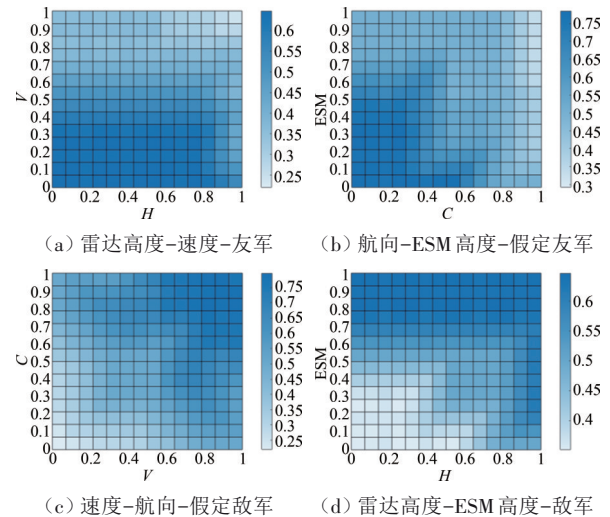


图3 部分飞行参数与敌我属性隶属度关系

图3中,颜色越深代表对该属性的隶属程度越高。图3(a)展示了雷达探测高度与速度联合关于低空目标“友军”属性的模糊隶属分布;图3(b)展示了航向与ESM探测高度联合关于低空目标“假

定友军”属性的模糊隶属分布;图3(c)展示了速度与航向联合关于低空目标“假定敌军”属性的模糊隶属分布;图3(d)展示了雷达探测高度与ESM探测高度联合关于低空目标“敌军”属性的模糊隶属分布。图3展示了多参数组合与特定敌我属性之间的模糊隶属关系,平滑性验证了模糊推理进行复杂映射过程的合理性。

3.3 战术手段BPA获取及证据的修正与融合

由3.2节描述过程,构建证据理论所用的辨识框架 $\Theta = \{F_R, A_C, S_T, F_O\}$,而后对输出结果进行归一化处理,并确定证据的可靠度,得到各焦元所用的初始BPA,如式(6)所示:

$$\begin{cases} m_l(U^p) = w_l U^p / \sum_{p=1}^4 U^p; \\ m_l(\Theta) = 1 - \sum_{p=1}^4 m_l(U^p). \end{cases} \quad (6)$$

式中: $w_l (0 < w_l < 1)$ 为证据的可靠度,由专家确定; U^p 为第 P 类敌我属性的模糊综合输出值; l 表示构造的 Mass 函数数量。

度量证据间冲突并修正证据,以尽可能消除各证据的不确定性及证据间冲突性造成的影响。单一冲突系数 k 仅能反映焦元分配的直接矛盾,而 J-S 散度^[20]能够有效刻画证据概率分布间的差异特征。本文通过将二者加权平均以实现冲突信息的互补度量^[21],并计算最终的冲突系数 f 。J-S 散度相关定义如式(7)、式(8)所示:

$$D_{JS}(P \| M) = \frac{1}{2} D_{KL}(P \| M) + \frac{1}{2} D_{KL}(Q \| M) \quad (7)$$

$$D_{KL}(P \| Q) = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 \frac{p_i}{q_i} \quad (8)$$

式中: $M = \frac{1}{2}(P + Q)$ 是 P 和 Q 的平均分布; $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$; $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$; $D_{KL}(P \| Q)$ 为 K-L 散度。根据冲突系数 f 得到各焦元对应的证据权重,如式(9)所示:

$$\alpha_i = \sum_{s=1, s \neq L}^L (1 - f_{is}) / \sum_{l=1}^L \sum_{s=1, s \neq L}^L (1 - f_{ls}) \quad (9)$$

式中: α_i 为第 i 个证据的权重; f_{ls} 为第 l 个和第 s 个证据的集合冲突系数; L 为证据总数。对得到的 Mass 函数采用证据折扣法进一步修正,如式(10)所示:

$$\begin{cases} m'_l(U^p) = \varphi_l \cdot m_l(U^p); \\ m'_l(\emptyset) = 0; \\ m'_l(\Theta) = 1 - \sum_{p=1}^4 m_l(U^p). \end{cases} \quad (10)$$

式中: φ_l 为折扣系数,且 $\varphi_l = \alpha_l / \alpha_{\max}$; $\alpha_{\max} = \max(\alpha_l)$ 。

实际多周期探测识别中,某周期的电磁干扰

以及目标机动等因素均会导致证据动态变化,与其他证据冲突。因此需考虑对具体时刻突发性造成的误差影响,而收缩—膨胀函数能够对证据权重进行幂律调节^[22]。当证据冲突较高时,幂函数的非线性压缩能够显著降低冲突焦元的影响,同时保持主要焦元的信息完整性,其相关公式如式(11)和式(12)所示:

$$p_{ij} = \begin{cases} 10^{2 + P_{ij}^{(0)} - 2/M}, & P_{ij}^{(0)} \leq 1/M; \\ 10^{2 P_{ij}^{(0)} + 2/M}, & P_{ij}^{(0)} > 1/M. \end{cases} \quad (11)$$

$$p'_{ij} = p_{ij} / \sum_{j=1}^M p_{ij} \quad (12)$$

式中: p_{ij} 表示第 i 个特征对第 j 个类别的 BPA 值; M 为类别数量。

采用 D-S 组合规则融合折扣证据,得到战术识别结果,如式(13)所示:

$$\begin{aligned} m(A) &= m_1(A_1) \oplus m_2(A_2) \oplus \dots \oplus m_L(A_L) = \\ &\begin{cases} \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_L = A} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_L(A_L)}{1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_L = \emptyset} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_L(A_L)}, & A \neq \emptyset; \\ 0, & A = \emptyset. \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

依据软决策思想,根据证据得到战术识别结果。

3.4 基于 AIFS 交叉熵确定识别手段权重

空中目标技战术识别本质上可看作多属性决策问题,本文考虑使用多属性决策语言描述各探测周期、各识别手段与低空目标敌我属性之间的评价关系。

假设可采用直觉模糊数 $d_{ij}^k = \langle \mu_{ij}^k, \gamma_{ij}^k \rangle$ 表示多属性决策中的评价价值,并设技战术识别手段为模型的“方案集”,空中目标属性为“属性集”,探测周期为“决策者”,由此可根据各技战术手段得到相应的直觉模糊矩阵 $D^k = (d_{ij}^k)_{m \times n \times o}$ 。

而后度量各识别手段结果的不确定性程度,以确定识别手段权重。传统的交叉熵难以兼顾直接模糊集中隶属度、非隶属度以及犹豫度的3重信息,而文献[23]提出的一种基于散度的 AIFS 交叉熵能够完整刻画直觉模糊集间的差异。为更加精准地度量各手段结果中的不确定性程度,本文选取该类交叉熵确定识别手段权重的方法,如式(14)~式(16)所示:

$$E_s(A) = \frac{1}{2} (E_l(A) + E_f(A)) \quad (14)$$

$$E_1(A) = \frac{1}{n \ln 2} \sum_{i=1}^n \pi_A(x_i)(1 + \pi_A(x_i)) \quad (15)$$

$$E_F(A) = \frac{1}{n \ln 2} \sum_{i=1}^n (\Delta_A(x_i) - 1) \ln \frac{1 + \Delta_A(x_i)}{2} \quad (16)$$

式中: $E_1(A)$ 为直觉模糊熵; $E_F(A)$ 为模糊熵; Δ_A 为隶属度与非隶属度的差值。而后可基于 AIFS 交叉熵确定第 i 种识别手段的权重如式(17)所示:

$$\omega_i^k = (1 - E_{S_i}^k) / \sum_{i=1}^m (1 - E_{S_i}^k) \quad (17)$$

基于权重确定各手段对应 BPA 的折扣系数, 结合文献[24], 考虑基于权重确定折扣系数的方法, 对所得证据进行修正, 如式(18)所示:

$$\begin{cases} \hat{m}_i^k(x_j) = \alpha \cdot m_i^k(x_j); \\ \hat{m}_i^k(\emptyset) = 0; \\ \hat{m}_i^k(\Theta) = 1 - \sum_{j=1}^n \hat{m}_i^k(x_j). \end{cases} \quad (18)$$

式中, α 为折扣系数, $\alpha = \omega_i^k / \max(\omega_i^k)$ 。

采用式(13)所示的 D-S 组合规则过程对式(18)修正后得到的各手段对应 Mass 函数进行融合, 即可得到单周期技术识别结果。

3.5 基于皮尔逊相关系数多周期技战术信息融合

为获取更准确的技战术识别结果, 还需量化各探测周期证据的冲突性与一致性。皮尔逊相关系数^[25]能够有效度量两个变量间的线性相关性, 将其应用于多周期证据分析时, 能够直观反映不同周期证据的可信程度与一致性水平, 为周期证据修正提供可靠依据, 因此本文选取该系数量化各周期证据冲突, 其相关计算如式(19)所示:

$$s_{12} = \frac{\text{cov}(m_1, m_2)}{\sigma_{m_1} \sigma_{m_2}} = \frac{E[(m_1 - \mu_{m_1})(m_2 - \mu_{m_2})]}{\sigma_{m_1} \sigma_{m_2}} \quad (19)$$

式中: $\text{cov}(m_1, m_2)$ 为协方差; $E(\cdot)$ 为数学期望。 μ_{m_i} 和 σ_{m_i} 的计算式如式(20)和式(21)所示:

$$\mu_{m_i} = E(m_i) \quad (20)$$

$$\sigma_{m_i}^2 = E(m_i^2) - E^2(m_i) \quad (21)$$

而证据相关性矩阵 S 如式(22)所示:

$$S = (s_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1} & s_{n1} & \cdots & s_{nn} \end{bmatrix} \quad (22)$$

定义 m_i 的可信度为 $\text{cred}(m_i)$, $\text{cred}(m_i) \in [0, 1]$,

且 $\sum_{i=1}^n \text{cred}(m_i) = 1$ 。其计算过程如式(23)所示:

$$\text{cred}(m_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^n s_{ij}(m_i, m_j) / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n s_{ij}(m_i, m_j) \quad (23)$$

修正后的证据如式(24)所示:

$$m_i^*(X) = m_i(X) \cdot \text{cred}(m_i) \quad (24)$$

综合以上, 考虑技战术信息融合的低空目标敌我识别算法步骤描述如下。1)构造关于飞行参数的规范化函数, 将输入变量与输出变量分别模糊化, 并选取高斯型隶属函数描述变量间的模糊关系; 2)建立空中目标飞行参数与敌我属性间的模糊推理规则, 采用重心法对输出变量进行解模糊化; 3)对输出变量归一化, 采用综合冲突系数 k 以及 J-S 散度的方式计算各证据间的冲突度; 4)根据冲突度修正证据, 采用收缩—膨胀函数进一步修正证据, 通过 D-S 组合规则得到战术识别结果; 5)将各技术手段识别数据转换为直觉模糊数, 通过隶属度与非隶属度计算各手段的 BPA; 6)计算各直觉模糊数的 AIFS 交叉熵确定识别手段权重, 并计算折扣系数, 而后修正证据, 采用 D-S 组合规则得到单周期证据; 7)计算皮尔逊相关系数及各探测周期证据的可信度, 修正证据后采用 D-S 组合规则得到技战术综合识别结果。

综合以上步骤, 得到考虑技战术信息融合的低空目标敌我识别方法, 具体流程如图4所示。

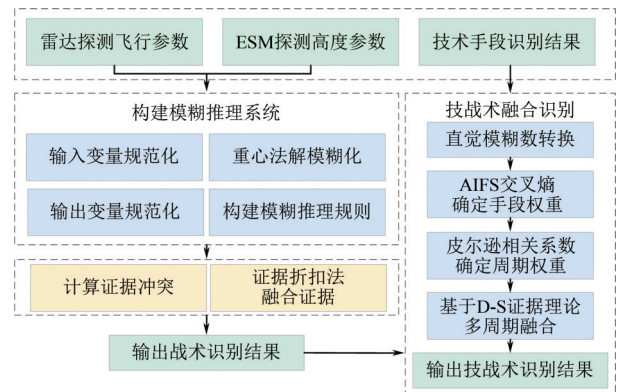


图4 空中目标技战术敌我识别算法流程

4 仿真实验

在某次联合防空作战中, 我方拟采用敌我识别器(X_1)、通信传感器(X_2)两类技术手段对低空目标进行识别。由于敌方实施电磁干扰, 导致技术手段受到一定压制, 为此采用最小风险通道这一战术手段(X_3)辅助敌我识别。

4.1 实例计算

战前设置某条最小风险通道内的标准飞行高度为 1 200 m、速度为 650 km/h、磁航向为 270°。为验证本文方法的合理性, 假设现有一运行状态良好的友军返航。将 X_1 、 X_2 获取的数据转换成直觉模糊数, 如表1所示。

表1 技术手段数据对应直觉模糊数

探测 周期	识别 手段	识别结果			
		F_R	A_C	S_T	F_O
T_1	X_1	(0.65,0.11)	(0.64,0.14)	(0.59,0.10)	(0.62,0.35)
	X_2	(0.75,0.06)	(0.71,0.16)	(0.63,0.14)	(0.56,0.07)
T_2	X_1	(0.72,0.16)	(0.63,0.14)	(0.31,0.48)	(0.42,0.38)
	X_2	(0.57,0.33)	(0.56,0.30)	(0.61,0.16)	(0.65,0.13)
T_3	X_1	(0.66,0.11)	(0.61,0.14)	(0.54,0.35)	(0.62,0.19)
	X_2	(0.65,0.25)	(0.68,0.21)	(0.55,0.16)	(0.60,0.12)
T_4	X_1	(0.76,0.10)	(0.82,0.12)	(0.40,0.47)	(0.71,0.18)
	X_2	(0.71,0.15)	(0.58,0.31)	(0.75,0.09)	(0.49,0.29)

雷达与ESM探测的目标飞行参数如表2所示。

表2 低空目标飞行参数

周期	雷达高度/m	速度/(km·h ⁻¹)	磁航向/(°)	ESM高度/m
T_1	1 216	665	271.0	1 205
T_2	1 185	644	269.0	1 214
T_3	1 205	653	270.5.0	1 215
T_4	1 190	660	269.5	1 188

根据第3.1和3.2节所提方法,首先对飞行参数进行模糊化与规范化处理,基于模糊推理规则得到输入输出变量的模糊关系,由式(5)解模糊后,通过式(6)得到各属性的初始BPA,如表3所示。

表3 低空目标初始BPA

周期	$m(F_R)$	$m(A_C)$	$m(S_T)$	$m(F_O)$	$m(\Theta)$
T_1	0.317	0.307	0.099	0.078	0.200
T_2	0.331	0.313	0.078	0.077	0.200
T_3	0.344	0.314	0.072	0.070	0.200
T_4	0.325	0.312	0.083	0.080	0.200

根据式(7)、式(8)及定义,得到证据间冲突系数矩阵 F 如下:

$$F = (f)_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 0 & 0.213 & 0.212 & 0.214 \\ 0.213 & 0 & 0.209 & 0.211 \\ 0.212 & 0.209 & 0 & 0.212 \\ 0.214 & 0.211 & 0.212 & 0 \end{bmatrix}.$$

根据式(9)确定各焦元对应证据的权重及折扣系数,利用式(10)~式(12)修正证据,根据式(13)得到各周期基于战术手段的最终BPA,如表4所示。

表4 低空目标战术获取BPA

周期	$m(F_R)$	$m(A_C)$	$m(S_T)$	$m(F_O)$	$m(\Theta)$
T_1	0.411	0.392	0.015	0.014	0.168
T_2	0.420	0.387	0.013	0.013	0.167
T_3	0.432	0.377	0.012	0.012	0.167
T_4	0.415	0.391	0.014	0.014	0.166

根据式(14)~式(16)计算表1数据中各探测周期技术手段的AIFS交叉熵矩阵:

$$E = (e)_{2 \times 4} = \begin{bmatrix} 0.167 & 0.265 & 0.187 & 0.157 \\ 0.123 & 0.204 & 0.166 & 0.182 \end{bmatrix}.$$

根据式(17)得到各探测周期内对于技术手段的权重值以及其对应的识别结果的BPA,结合战术手段识别结果,如表5所示。

表5 各探测周期各手段获取BPA

周期	手段	$m(F_R)$	$m(A_C)$	$m(S_T)$	$m(F_O)$	$m(\Theta)$
T_1	X_1	0.187	0.184	0.170	0.178	0.281
	X_2	0.210	0.199	0.177	0.157	0.257
	X_3	0.411	0.392	0.015	0.014	0.168
T_2	X_1	0.254	0.222	0.109	0.148	0.267
	X_2	0.185	0.182	0.198	0.211	0.224
	X_3	0.420	0.387	0.013	0.013	0.167
T_3	X_1	0.206	0.190	0.168	0.193	0.243
	X_2	0.199	0.209	0.169	0.184	0.239
	X_3	0.432	0.377	0.012	0.012	0.167
T_4	X_1	0.243	0.262	0.128	0.227	0.140
	X_2	0.218	0.178	0.230	0.150	0.224
	X_3	0.415	0.391	0.014	0.014	0.166

依据式(18)修正证据,利用D-S组合规则得到单探测周期识别结果,如表6所示。

表6 低空目标各周期融合BPA

周期	$m(F_R)$	$m(A_C)$	$m(S_T)$	$m(F_O)$	$m(\Theta)$
T_1	0.377	0.353	0.108	0.103	0.059
T_2	0.405	0.353	0.084	0.102	0.056
T_3	0.385	0.346	0.102	0.117	0.050
T_4	0.409	0.374	0.087	0.102	0.028

由式(19)~式(22)计算相关性矩阵为

$$S = (s_{ij})_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} 1 & 0.9966 & 0.9978 & 0.9986 \\ 0.9966 & 1 & 0.9975 & 0.9972 \\ 0.9978 & 0.9975 & 1 & 0.9998 \\ 0.9986 & 0.9972 & 0.9998 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据式(23)得到各周期证据的可信度,并依据式(24)修正各周期证据,采用D-S组合规则得到多周期技战术敌我识别结果:

$$m = \{0.595, 0.399, 0.002, 0.003, 0.001\}.$$

由软决策思想可知,空中目标技战术多周期信息融合的识别结果为友军,与实际情况一致。

4.2 对比分析

为验证本文方法的合理性与有效性,设置单技术手段、不同改进方法以及冲突场景下的对比试验。

4.2.1 单技术手段对比实验

技术手段融合结果如表7所示。

表7 低空目标各周期技术手段融合BPA

周期	$m(F_R)$	$m(A_C)$	$m(S_T)$	$m(F_O)$	$m(\Theta)$
T_1	0.245	0.233	0.206	0.196	0.120
T_2	0.268	0.243	0.173	0.211	0.105
T_3	0.244	0.239	0.193	0.222	0.102
T_4	0.278	0.263	0.182	0.214	0.063

由第4.1节所提融合识别过程得到敌我识别结果: $m = \{0.394, 0.315, 0.111, 0.174, 0.006\}$ 。

对比4.1节所得的技战术综合识别结果分析可知,技战术综合识别相比于单技术识别对应属性的BPA值更大,说明了战术识别的合理性。

4.2.2 不同改进方法对比实验

为进一步说明技战术识别的可靠性,将本文方法与文献[21]及文献[25]方法对比,如表8所示。

表8 各方法融合识别结果对比

方法	$m(F_R)$	$m(A_C)$	$m(S_T)$	$m(F_O)$	$m(\Theta)$
文献[21]	0.579	0.405	0.006	0.008	0.001
文献[25]	0.577	0.406	0.006	0.009	0.002
本文方法	0.595	0.399	0.002	0.003	0.001

由表8可知,本文方法所得最大的两个识别结果的差值最大,且对最大识别结果的支持度最高,进一步说明本文方法的可靠性与优越性。

4.2.3 冲突场景对比实验

为证明本文方法在高冲突场景下的优越性,设置技术与战术手段分别产生异常结果对比实验。

场景1:假设敌方对我方实施电子干扰造成敌我识别器及通信传感器功能异常,因而得到对我方某高度固定翼飞机的 T_2 周期的高冲突证据有: $m_1 = \{0.98, 0.01, 0.01, 0.0\}$, $m_2 = \{0.0, 0.99, 0.01, 0.0\}$ 。

在此将本文方法与单独使用证据理论以及Yager方法^[26]进行比对,基于表5数据计算得到的结果如表9所示。可知,Yager合成公式与证据理论普通组合均在该组证据面前失效,而本文方法仍能获取合理结果,由此验证本文方法的通用性。

场景2:我方某高速固定翼飞机返航时由于敌方火力打击进行机动规避,造成 T_1 和 T_2 速度与航向偏离通道飞行规则,由此得到 T_1 和 T_2 的速度与航向分别为698 km/h、279°和674 km/h、274°,由此得到 T_1 和 T_2 战术手段获取的初始BPA分别为 $m_1 = \{0.116, 0.117, 0.296, 0.271, 0.200\}$, $m_2 = \{0.262, 0.292, 0.136,$

$0.109, 0.200\}$ 。

表9 冲突场景1融合结果对比

方法	周期	$m(F_R)$	$m(A_C)$	$m(S_T)$	$m(F_O)$	$m(\Theta)$
证据理论	T_1	0.410	0.382	0.085	0.080	0.043
	T_2	0.000	0.997	0.003	0.000	0.000
	T_3	0.420	0.372	0.079	0.091	0.038
	T_4	0.425	0.387	0.076	0.089	0.024
	综合	0.000	0.996	0.004	0.000	0.000
Yager法	T_1	0.275	0.244	0.008	0.006	0.467
	T_2	0.000	0.553	0.000	0.000	0.447
	T_3	0.282	0.239	0.005	0.007	0.467
	T_4	0.287	0.238	0.006	0.006	0.463
	综合	0.000	0.435	0.483	0.082	0.000
本文方法	T_1	0.377	0.353	0.108	0.103	0.059
	T_2	0.507	0.470	0.001	0.001	0.021
	T_3	0.385	0.346	0.102	0.117	0.050
	T_4	0.409	0.374	0.087	0.102	0.028
	综合	0.583	0.413	0.001	0.002	0.001

将本文方法与单独使用证据理论、Yager方法以及文献[21]、文献[25]方法对比,如表10所示。

表10 冲突场景2融合结果对比

方法	周期	$m(F_R)$	$m(A_C)$	$m(S_T)$	$m(F_O)$	$m(\Theta)$
证据理论	T_1	0.195	0.189	0.296	0.269	0.052
	T_2	0.320	0.318	0.153	0.162	0.044
	T_3	0.420	0.372	0.079	0.091	0.038
	T_4	0.425	0.387	0.076	0.089	0.024
	综合	0.502	0.399	0.022	0.026	0.051
Yager方法	T_1	0.095	0.089	0.185	0.158	0.473
	T_2	0.214	0.205	0.051	0.059	0.471
	T_3	0.282	0.239	0.005	0.007	0.467
	T_4	0.287	0.238	0.006	0.006	0.463
	综合	0.019	0.542	0.012	0.000	0.427
文献[21]	T_1	0.201	0.193	0.285	0.260	0.061
	T_2	0.319	0.315	0.152	0.163	0.051
	T_3	0.385	0.346	0.102	0.117	0.050
	T_4	0.409	0.374	0.087	0.102	0.028
	综合	0.507	0.414	0.035	0.043	0.001
文献[25]	T_1	0.196	0.189	0.296	0.269	0.052
	T_2	0.321	0.318	0.154	0.163	0.044
	T_3	0.420	0.372	0.079	0.091	0.038
	T_4	0.425	0.386	0.076	0.089	0.024
	综合	0.531	0.418	0.023	0.027	0.001
本文方法	T_1	0.216	0.205	0.299	0.252	0.028
	T_2	0.328	0.332	0.128	0.074	0.138
	T_3	0.433	0.376	0.012	0.012	0.167
	T_4	0.415	0.391	0.014	0.013	0.167
	综合	0.553	0.439	0.002	0.001	0.005

由表10结果可知,Yager方法在此场景下失效,而证据理论、文献[21]、文献[22]与本文所提方法均有效,且本文方法对“我方”的支持度最高,且

对于支持度最大的两个属性的 BPA 差值最大,由此进一步验证了本文方法的通用性与优越性。

5 结束语

面向高速固定翼飞机低空返航过程的敌我识别,提出了一种基于改进 D-S 证据理论的技战术信息融合方法。该方法通过证据冲突、不确定性以及可信度量化调节证据间的冲突并修正证据,结合冲突系数 k 与 J-S 散度确定战术手段识别权重,通过 AIFS 交叉熵确定技术手段识别权重,利用皮尔逊相关系数确定探测周期权重。采用证据折扣法修正证据后,结合 D-S 组合规则实现多周期技战术信息融合。仿真结果显示,所提的技战术识别方法具备有效性;与其他改进 D-S 证据理论算法相比,本文方法可靠性更高;在高冲突场景下仍能输出合理的识别结果,对于复杂战场环境下敌我识别有一定参考意义。

参考文献:

- [1] 杨任农,沈堤,戴江斌.对联合空战空战场管控问题的思考[J].指挥信息系统与技术,2019,10(1):1-6.
- [2] USA Joint Staff. Joint airspace control: joint publication 3-52 [M]. Washington D.C., USA: USA Joint Staff, 2014:1-115.
- [3] U.S. Air Force. AFDN 1-21 agile combat employment[R]. Washington D.C., USA: U.S. Air Force, 2021:1-12.
- [4] 杨任农,宋祺,李寰宇.美军“敏捷作战运用”概念与行动构想[J].指挥与控制学报,2025,11(1):1-13.
- [5] 何友,刘瑜,李耀文,等.多源信息融合发展及展望[J].航空学报,2025,46(6):29-54.
- [6] 张晨浩,周焰,蔡益朝,等.空中目标作战意图识别研究综述[J].现代防御技术,2024,52(4):1-15.
- [7] 徐建平,张立凡,韩德强,等.基于模糊推理的空中目标意图识别[J].指挥信息系统与技术,2020,11(3):44-48.
- [8] 陈致远,沈堤,余付平,等.基于模糊推理和证据理论的空中目标敌我识别[J].电光与控制,2022,29(6):85-92.
- [9] 陈致远,沈堤,余付平,等.基于空域协同的空中目标综合识别方法[J].现代防御技术,2022,50(3):61-77.
- [10] 崔艺涵,梁彦,宋欠欠,等.知识辅助的空中目标综合识别[J].电子学报,2024,52(9):2961-2970.
- [11] 张海龙,李立春,潘宏怡,等.基于多模态融合的欠定混合矩阵估计[J].信息工程大学学报,2025,26(4):393-400.
- [12] 柳颜,乔丽,付琪,等.基于 FAHP-TOPSIS 的装备保障能力评估[J].信息工程大学学报,2024,25(4):492-498.
- [13] U. S. Army. Airspace control: field manual 3-52 [M]. Washington D.C., USA: Department of the Army, 2016:1-110.
- [14] 朱倪瑶.北约敌我识别现状与发展趋势[J].电讯技术,2023,63(9):1448-1454.
- [15] LIN C L, CHEN T P, FAN K C, et al. Radar high-resolution range profile ship recognition using two-channel convolutional neural networks concatenated with bidirectional long short-term memory[J]. Remote Sensing, 2021, 13(7): No.1259.
- [16] 杨益川,曹旭源,史小伟,等.时变多辐射源跟踪任务的时-频扫描方案评估方法[J].系统工程与电子技术,2024,46(1):219-226.
- [17] HU J W, ZHENG B Y, WANG C, et al. A survey on multi-sensor fusion based obstacle detection for intelligent ground vehicles in off-road environments[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020, 21(5):675-692.
- [18] 张宇,安志琦.基于直觉模糊多属性决策的装备作战适用性评估方法[J].火力与指挥控制,2020,45(11):173-177;182.
- [19] 唐潇潇,黄康.基于模糊推理脉冲神经膜系统的变压器故障诊断方法[J].电气应用,2023,42(11):76-83.
- [20] CHEN L Y, DENG Y, CHEONG K H. Permutation Jensen-Shannon divergence for random permutation set [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 119:No.105701.
- [21] 闫善勇.基于证据冲突及不确定性的敌我识别作战效能评估[J/OL].电讯技术, 2025-06-26. <https://link.cnki.net/doi/10.20079/j.issn.1001-893x.2412.29001>.
- [22] CHEN X, ZHANG H, ZHANG S H, et al. A space infrared dim target recognition algorithm based on improved DS theory and multi-dimensional feature decision level fusion ensemble classifier[J]. Remote Sensing, 2024, 16(3): No.510.
- [23] SONG Y F, FU Q, WANG Y F, et al. Divergence-based cross entropy and uncertainty measures of Atanassov's intuitionistic fuzzy sets with their application in decision making[J]. Applied Soft Computing, 2019, 84:No.105703.
- [24] 陈致远,沈堤,余付平,等.基于直觉模糊集和证据理论的空中目标综合识别[J].航空兵器,2022,29(1):58-66.
- [25] 刘科,曾行,李鑫龙.基于改进策略的 DS 证据融合算法[J/OL].系统工程与电子技术,2025-06-11. <https://link.cnki.net/urlid/11.2422.TN.20250611.0925.020>.
- [26] YAGER R R. On the dempster-shafer framework and new combination rules[J]. Information Sciences, 1987, 41(2):93-137.

(编辑:冯春)