

## 威胁联网下的飞行器航迹规划研究

张淘沙, 鲁艺, 吕跃, 张亮  
(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 针对威胁建模中忽略威胁之间信息交换的问题, 在目标指示概率模型的基础上, 建立了基于探测概率的威胁联网模型, 利用该模型改进了常用的航迹代价函数。介绍了微分进化算法(DEA), 结合该算法和仿真, 重点分析了威胁联网对威胁源的威胁强度和航路点威胁代价的影响, 最后仿真分析了威胁联网模型对航迹规划的影响, 检验了威胁联网模型的可行性和必要性。

**关键词:** 航迹规划; 威胁联网模型; 微分进化算法; 代价函数

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0029-05

## Path Planning of Aircrafts Under Threat Netting

ZHANG Tao-sha, LU Yi, LÜ Yue, ZHANG Liang

(Engineering College of Aeronautics and Astronautics, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In usual threat modeling, the information exchange among the threats is often ignored. To solve the problem, a target instruction probability model was established. On which basis, a threat netting model based on detection probability was built up. Common path cost function was improved by using the threat netting model. The Differential Evolution Algorithm (DEA) was introduced, and analysis was made to the effect of threat netting on threat intensity and threat cost of waypoint by using the method. Simulation was made to the effect of the threat netting model on path planning, which shows the necessity and feasibility of threat netting model.

**Key words:** path planning; threat netting; Differential Evolution Algorithm(DEA); cost function

### 0 引言

飞行器航迹规划,是指根据飞行器机动性能、威胁分布、气象条件、燃料和时间限制等各项约束信息,运用航迹规划算法,在综合考虑飞行器机动性能、碰地概率、突防概率、油耗、威胁等各种因素下,找到一条或几条从起始点到目标点或目标空域较优的可飞轨迹,并需要选择最佳航迹作为参考飞行航迹<sup>[1]</sup>。由于飞行器航迹规划广阔的应用前景,国内外许多学者进行了广泛而深入的研究,并提出了很多规划方法,主要有:A\*算法、遗传算法、V图法、神经网络法、模拟退火法等<sup>[2]</sup>。

飞行器突防所面对的对象不再是过去孤立的防空系统,而是联网后的协同反导体系,因此,研究如何进行威胁联网建模及其航迹规划更有实际意义和应用价值。

真实的航迹规划环境十分复杂,以往的航迹规划

对于威胁的处理过于简化,建模仿真度不高,这将对航迹规划结果有很大影响,因此,在此基础上进行改进是很有必要的。例如,文献[3-4]提出了以探测圆表示雷达探测区域的方法,广泛应用于规划空间建模,但不足之处在于将各个威胁源简化为独立个体,并未考虑威胁之间的联系;文献[5-6]基于威胁作用区域和威胁源的类型建立了威胁联网支援表进行目标指示,该支援信息由多种战场属性决定,这种方法虽然简单但主观性较强,而且只考虑了信息交互过程,没有结合威胁网的拓扑结构,本文对此进行了改进。

在综合考虑威胁之间信息交互的条件下,建立了一种基于杀伤概率的威胁联网模型,结合微分进化算法进行仿真分析,验证了威胁联网模型对保证飞行器生存概率的必要性以及它对航迹规划的影响。

### 1 威胁联网建模

#### 1.1 威胁联网

在实际战场环境中,各个威胁区域时刻都进行着信息交流和资源共享,称之为威胁联网。具体的含义

就是威胁之间能够进行通信和信息共享,某个特定威胁可以从邻近威胁获取信息,在这些指示信息的基础上,防御方可以通过增长雷达的搜索时间,并重点搜索指定区域等方法,增强对入侵飞行器的打击效果<sup>[7]</sup>。需要说明的是,威胁联网针对的是具有探测能力的火炮、地空导弹等火力单元以及警戒雷达。为方便问题研究,本文将火力单元的杀伤概率计算等效为雷达探测概率。

图1所示的威胁联网中,航迹B穿越两个威胁,尽管威胁X可能来不及拦截飞行器,但如果威胁之间可通信,实现信息共享,那么它可以为威胁Y提供预警,使其提前实施拦截。

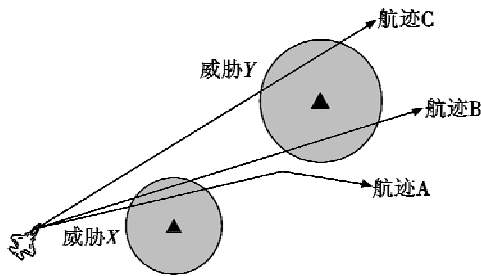


图1 威胁联网示意图

Fig.1 Sketch map of threat netting

### 1.2 威胁联网模型的建立

威胁之间传递的目标信息称为目标指示信息,其传递的成功率用目标指示概率表示,指前面的威胁区成功捕获目标信息并成功传递给当前威胁区的概率。

在考虑目标指示信息对目标探测概率影响的情况下,文献[8]给出了联网后的雷达探测概率 $P_{SD}$ 为

$$P_{SD} = P_A P_{AD} + (1 - P_A) \cdot P_{ZD} \quad (1)$$

式中: $P_A$ 为目标指示概率; $P_{AD}$ 为有目标指示条件下的探测概率; $P_{ZD}$ 为无目标指示的探测概率;其他威胁源的计算参照这种方法。

式(1)中, $P_{ZD}$ 没有给出具体算式,也未考虑地面火力单元接收预警信息的概率。通常地空导弹火力单元承担要地防空时,指挥所的通信设备和警戒雷达昼夜开机,如探测到入侵飞行器,通信设备将空情预警的信息传递给搜索雷达<sup>[9]</sup>。将此指挥控制过程运用到威胁联网模型中,引入一个乘数因子 $\beta_i$ ,当第*i*个威胁没有收到预警信息时, $\beta_i = 1$ ,否则 $\beta_i > 1$ ,为简化模型,接收到预警信息时,一律取 $\beta_i = 1.3$ ,用来表征警戒雷达的预警信息<sup>[10-11]</sup>。

下面给出具体的改进过程。

假设某一规划空间中,有 $N_i$ 个威胁,对于某一部特定的雷达威胁*i*( $i = 1, 2, \dots, N_i$ ),在威胁联网时,雷达发现目标的概率仍是由两部分组成:第一部分为没有目标指示信息时,单部雷达的探测概率;第二部分为有目标

指示信息时,雷达的探测概率。具体计算过程为

$$\begin{cases} P_{NET}(i) = \beta_i \cdot (P(i) \cdot (1 - P_A(i)) + P_{except}(i) \cdot P_A(i)) \\ P_{except}(i) = 1 - \prod_{k=1}^{i-1} (1 - P(k)) \prod_{n=i+1}^{N_i} (1 - P(n)) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{NET}(i)$ 表示威胁联网后雷达*i*的探测概率; $P_A(i)$ 表示目标指示概率,其值的求解将在1.3节进行介绍; $P_{except}(i)$ 表示除雷达*i*以外的 $N - i$ 部雷达发现目标的概率; $P(i)$ 表示联网前雷达*i*的探测概率。

式(2)表明,在有目标指示信息的条件下,威胁区可以根据所提供的信息有针对性地为目标进行跟踪和探测,所以探测概率将会比没有联网的概率大。下文中将结合威胁联网模型改进威胁代价函数,运用微分进化算法进行威胁联网分析。

### 1.3 信息支援下的目标指示概率模型

在考虑目标信息的传递时,为得到与战场环境相符的目标指示概率,应考虑当前威胁源在威胁网拓扑结构中的位置和交互的过程,这就涉及到威胁源的信息相互支援问题。

为更好地说明问题,如图2所示,圆点代表威胁源中心,将原坐标系转换为以起始点和目标点连线为横轴的新的坐标系。

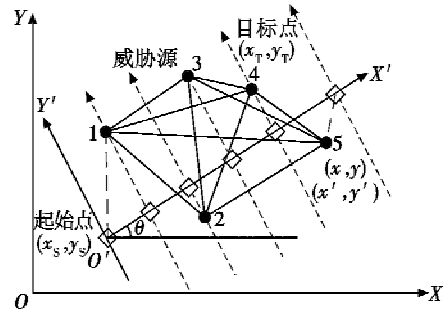


图2 目标指示的信息拓扑图

Fig.2 Information topography of target instruction

由于目标指示在拓扑图中是沿着航迹规划进行的方向传递,将初始威胁源在旋转坐标系下按 $X'$ 轴坐标由小到大分别进行标记,图中数字1~5即表示标记的威胁源序号,由此可以构建一组矩阵

$$P_{Instruction} = \begin{pmatrix} 1 & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ & 1 & & \vdots \\ & & & P_{(n-1)n} \\ & & & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: $P_{ij} = K \frac{x_{ij} \cdot P_i}{e_{ij}}$ ( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ),表示威胁源*i*对威胁源*j*的指示概率,其中, $x_{ij}$ 表征不同威胁源之间的信息支援程度<sup>[12]</sup>,威胁类型相同的记为1,具体参见表1(由专家评估得到,表中数据已进行了标准化处理);

$e_{ij}$ 表示拓扑图中威胁源之间的距离,其值增大信息支援能力减小,是威胁源之间距离进行归一化处理得到的值; $P_i$ 表示威胁源*i*的威胁强度; $K$ 为补偿因子。

表1 威胁源信息支援矩阵

Table 1 Supporting matrix of threat source

| 威胁源 | 威胁源  |      |      |
|-----|------|------|------|
|     | 雷达   | 导弹   | 高炮   |
| 雷达  | 1    | 0.95 | 0.95 |
| 导弹  | 0.85 | 1    | 0.85 |
| 高炮  | 0    | 0    | 1    |

由矩阵  $P_{Instruction}$  可以得到式(2)中  $P_A(i)$  的算式(第一个威胁源的目标指示概率为0)为

$$P_A(i) = \max\{P_{1i}, \dots, P_{(i-1)i}\}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

进行坐标转换

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $(x, y)$ 为点在原地面坐标系  $OXY$  下的坐标; $(x', y')$ 为该点在旋转坐标系  $O'X'Y'$  下的坐标值; $\theta$ 为坐标系的旋转角度。

## 2 算法

### 2.1 改进威胁代价函数

飞行器航迹规划的性能指标主要包括完成规定任务的安全性能指标和燃油性能指标,即威胁代价最小性能指标和燃油代价最小性能指标。

威胁代价最小性能指标为

$$\min J_t = \int_0^L \omega_t dl \quad (6)$$

油耗代价性能指标为

$$\min J_f = \int_0^L \omega_f dl \quad (7)$$

式中, $L$ 为航迹的长度,在仿真计算时取  $\omega_f$  值恒为1。飞行器的航迹代价函数为

$$\min J = kJ_t + (1 - k)J_f \quad (8)$$

式中, $k$ 为代价权值,反映了决策者对于威胁程度与油耗消耗的选择倾向。

飞行器在空间中点  $x$  处受第  $j$  个威胁影响的代价函数为<sup>[13]</sup>

$$f_{TAj}(x) = \begin{cases} t_j / (R_j)^4, & R_j \leq R_{jmax} \\ 0, & R_j > R_{jmax} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $R_j$ 为点  $x$  到第  $j$  个威胁源的距离; $t_j$ 为不考虑威胁联网情况下,表征威胁源强度(或威胁等级)的系数,如果考虑威胁联网,结合式(2),则该系数可以表示为

$$\sigma_j = t_j \cdot P_{NET}(j) \quad (10)$$

则当飞行器沿路径  $L$  飞行时, $N_t$ 个威胁源对其产生的

总威胁代价为

$$\omega_{i,L} = \int_0^L \sum_{j=1}^{N_t} f_{TAj}(x) dl \quad (11)$$

为计算  $i$  段航迹的威胁代价需要沿第  $i$  段航迹进行积分,为简化,只计算航迹段上的若干个点的威胁代价的平均值,再乘以该航迹段受影响的长度<sup>[13]</sup>。为此,取3个分割点: $l_i/6, l_i/2, 5l_i/6$ ,具体算式为

$$f_{TAi} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{N_t} \{l_{ij} [f_{TAj}(l_i/6) + f_{TAj}(l_i/2) + f_{TAj}(5l_i/6)]\} \quad (12)$$

式中: $l_{ij}$ 为第  $i$  段航迹处于第  $j$  个威胁最大覆盖区域内的长度; $N_t$ 为规划区域内已知的威胁源的个数。通过计算每一段的航迹代价值就可以求出一条航迹的总的航迹代价值。

### 2.2 微分进化算法

微分进化算法是一种基于群体进化的仿生智能计算方法,又称差分进化算法,具有记忆个体最优解和种群内部信息共享以及收敛速度快、性能良好的特点,具有高效性、收敛性、鲁棒性等优点,相比遗传算法它保留了基于种群的全局搜索策略。微分进化算法的基本操作包括变异、交叉和选择3种操作<sup>[14]</sup>。

运用该算法进行飞行器航迹规划时,同样要利用1.3节的坐标变换将规划问题转换成一个  $D$  维函数优化问题,不同的是变换对象变为航路点坐标。结合威胁联网模型下的航迹规划,具体的流程如下<sup>[15]</sup>所述。

1) 建立旋转坐标系,将战场威胁源的信息转化到旋转坐标系上,将旋转坐标系的横轴  $D$  等分,每一个可行的航路点的坐标解是由  $D$  个浮点数表示的坐标组成的数列,记为  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_D\}$ 。

2) 利用威胁联网模型求解威胁源序列以及联网后每个威胁源的强度。

3) 在战场范围允许的条件下,随机产生  $M$  条初始路径,根据战场上各个威胁的信息,运用改进后的代价函数,计算每一条可行路径的代价值。

4) 执行迭代计算。

5) 对由  $M$  个可行解组成的种群,进行变异操作。

6) 执行交叉操作。

7) 计算交叉产生个体的代价值函数值,执行选择操作。

8) 若迭代次数大于最大迭代次数,则退出循环,否则转4)进入下一代。

9) 将最终得到的最优路径坐标进行坐标反变换,并输出。

## 3 仿真分析

仿真1 威胁联网对威胁源的威胁强度的影响。

规划空间由空间起始点和空间终止点确定,假设在 100 km × 100 km 的规划空间内,威胁源数目以 4 个为例进行求解分析,具体信息如表 2 所示。

表 2 威胁源及威胁强度

Table 2 Threat source and threat intensity

| 威胁类型 | 威胁强度 | 坐标/km   |
|------|------|---------|
| R-1  | 0.65 | (19,40) |
| M-2  | 0.6  | (40,50) |
| G-3  | 0.7  | (67,65) |
| R-4  | 0.6  | (80,85) |

表 2 中:R 表示雷达;M 表示导弹;G 表示高炮;表中的坐标值是已经进行坐标转换得到的。

利用建立的威胁联网模型求解出目标指示概率矩

$$P_{\text{Instruction}} = \begin{pmatrix} 1 & 0.86 & 0.36 & 0 \\ 0 & 1 & 0.6 & 0.3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

根据 1.2 节威胁联网模型,解算出联网时威胁源的威胁强度并同没有联网的情形进行比较,得到图 3。

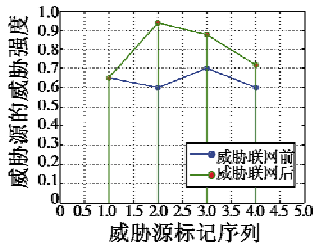


图 3 威胁联网对威胁强度的影响

Fig. 3 Effect of threat netting model on threat intensity

由图 3 可知,随着规划的进行,威胁源的威胁强度均增加,结论与威胁联网建模的目的是一致的,这使战场环境仿真度更高,为进一步搜寻生存力较好的航迹奠定了基础;同时,威胁源的威胁强度的增加幅度呈递减趋势,这是因为威胁源数目少且分布不集中。这些变化对于防守方防空阵地的布置和进攻方进攻方向的选择也有重要的参考价值。

仿真 2 威胁联网模型对航迹规划的影响。

设飞行器执行任务的起点坐标为(2 km, 2 km),终点坐标为(69 km, 92 km),任务的战场环境如表 3 所示。

表 3 战场环境设置

Table 3 Battlefield environment settings

| 威胁源参数    | 取值  |     |     |     |     |      |     |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| x 轴坐标/km | 65  | 19  | 36  | 40  | 80  | 40   | 53  |
| y 轴坐标/km | 67  | 40  | 70  | 20  | 85  | 48   | 85  |
| 作用范围/km  | 10  | 10  | 8   | 11  | 9   | 8    | 7   |
| 威胁强度     | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.6 | 0.5 | 0.75 | 0.7 |

微分进化算法的初始参数设定<sup>[16]</sup>:优化维数  $D = 20$ ,种群规模为 20,最大迭代次数  $N_{\text{max}} = 200$ ,变异因

子  $F = 0.5$ ,交叉因子为 0.9。假设飞行器在二维平面飞行,最小直飞距离为 1 km,飞行器的最大转弯角为 45°,代价权值  $k = 0.5$ 。

在没有考虑威胁联网的情形下,运用微分进化算法求出最小代价航迹,如图 4 中黑色航迹所示。

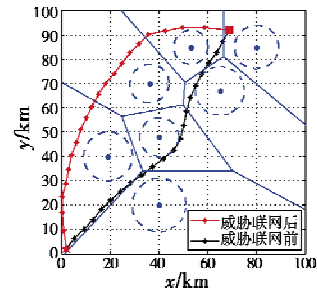


图 4 威胁联网前后的航迹对比

Fig. 4 Path comparison

图 4 中,“★”表示起点,“■”表示终点,星号标记代表航路点,数目为 20。根据规划任务的起点和终点建立旋转坐标系,结合威胁联网模型,根据表 2 的数据,在相同条件下,用微分进化算法求出最小代价航迹,如图 4 中红色航迹所示。

对于图 4,首先分析两种规划方法中,威胁源对航路点的威胁代价值有何不同,图 5 给出了两种方法的比较:威胁联网对航路点的威胁代价值有较大影响,威胁联网前,威胁源对飞行器的杀伤最大值约为 0.75,威胁联网后,航路点杀伤概率的最大值约为 0.95,这样的航路点可能不再满足任务要求,需要重新调整。

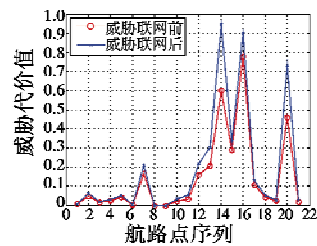


图 5 航路点威胁代价值对比

Fig. 5 Comparison of waypoint threat cost

然后分析联网前后航迹总代价的不同,图 6 给出了两条航迹的航迹总代价对比图,联网后的航迹总代价明显高于联网前,并且收敛速度基本没变。

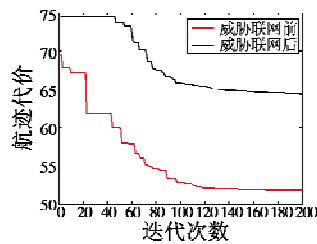


图 6 联网前后的航迹总代价对比

Fig. 6 Comparison of total path cost

联网前后的航迹可以看出,由于信息威胁联网使得每个威胁源的威胁强度变大,航迹代价也相应增加,导致联网后航迹也产生了较大的改变:图4中联网后的航迹航程明显增大,约为联网前的1.5倍,而且真实的航迹代价也相应增加,如果此时的结果不满足飞行器的物理限制和任务要求,可以认为航迹规划失败,需要航迹重规划。

如果联网后的航迹不满足飞行器的油料限制条件,此时航迹的重规划可以根据任务具体特点,通过适当降低飞行器生存力即牺牲航迹代价来重新规划,本文采取人为减小威胁源的强度来减小航迹代价的方法,即每个威胁源乘以一个缩放系数 $k$ (理论上 $0 < k < 1$ ),该缩放系数对于执行任务必须是可接受的,本文在仿真中取 $k = 0.8$ ,在相同条件下进行航迹寻优,最终的航迹结果如图7所示。

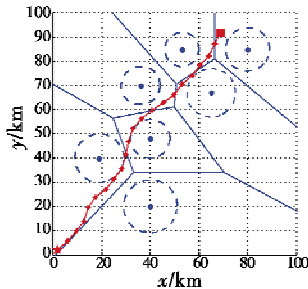


图7 重规划后的航迹

Fig. 7 Replanned path under threat netting

#### 4 结论

针对实际作战过程中,威胁之间进行信息交流不断增强的事实,以及现有威胁建模方法难以描述威胁源联网对航迹规划的影响,为保证飞行器的突防安全性,建立了基于探测概率的威胁联网模型,模拟了真实的战场对抗环境,利用微分进化算法进行仿真分析对比验证,说明了威胁联网对航迹性能的影响,验证了威胁联网具有重要的实际意义,在保证飞行器生存概率的前提下,进一步完善了航迹规划相关理论。

#### 参考文献

[1] 胡中华,赵敏,姚敏,等. 无人机航迹规划技术研究及发展趋势[J]. 航空电子技术,2009,40(2):24-29.  
HU Z H, ZHAO M, YAO M, et al. Research of path planning for unmanned air vehicle and its development [J]. Avionics Technology, 2009, 40(2):24-29.

[2] 何兵,刘刚,闫建峰,等. 基于 Voronoi 图和量子遗传算法的飞行器航迹规划方法[J]. 电光与控制,2013,20(1):5-8.  
HE B, LIU G, YAN J Z, et al. A UAV route planning meth-

od based on Voronoi diagram and quantum genetic algorithm[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(1):5-8.

[3] BHATTACHARYA P, GAVRILOVA M L. Roadmap-based path planning using the Voronoi diagram for a clearance-based shortest path [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2008, 15(2):58-66.

[4] 曾剑新,周焰,何彦杰. 一种飞行器在线航路重规划方法[J]. 空军雷达学院学报,2010,24(5):333-336.  
ZENG J X, ZHOU Y, HE Y J. A method of re-planning aircraft online route [J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2010, 24(5):333-336.

[5] 姜礼平,姚毅,邹明. 威胁联网下低空突防航路规划研究[J]. 海军工程大学学报,2008,20(4):51-54.  
JIANG L P, YAO Y, ZOU M. Route planning research of low altitude penetration on threat netting [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(4):51-54.

[6] 孟波波,高晓光. 信息联网下的多无人作战飞机多任务规划[J]. 飞行力学,2010,28(4):93-96.  
MENG B B, GAO X G. Mission planning for multiple UCAVs under the information netting [J]. Flight Dynamics, 2010, 28(4):93-96.

[7] 王欣,姚佩阳,周翔翔,等. 信息共享条件下传感器组网发现概率建模[J]. 电光与控制,2012,19(11):26-30.  
WANG X, YAO P Y, ZHOU X X, et al. Detection probability modeling of sensor network based on information sharing [J]. Electronics Optics & Control, 2012, 19(11):26-30.

[8] 田阔,符小卫,高晓光. 威胁联网下无人机路径在线规划[J]. 西北工业大学学报,2011,29(3):367-373.  
TIAN K, FU X W, GAO X G. Exploring further UAV online path planning in the presence of threat netting [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(3):367-373.

[9] 娄寿春. 地空导弹射击指挥控制模型[M]. 北京:国防工业出版社,2009:44-50.  
LOU S C. Command and control models of surface-to-air missile firing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009:44-50.

[10] 李望西,黄长强,李相伟,等. 基于图论的电视指令制导空地导弹航路规划[J]. 火力与指挥控制,2010,35(6):110-113.  
LI W X, HUANG C Q, LI X W, et al. Route planning of TV-command-guided air-to-ground missile based on graph theory [J]. Fire Control & Command Control, 2010, 35(6):110-113.

### 3.3 训练评估

对抗训练评估与任务紧密相关,如多机对抗时,有的负责掩护或支援干扰敌机,有的负责进攻,所以需根据任务不同来评估,本文只对进攻训练进行分析评估。

首先可以把对抗训练评估分成导航阶段、跟踪阶段、攻击阶段、命中与脱离阶段,评估流程如图4所示。

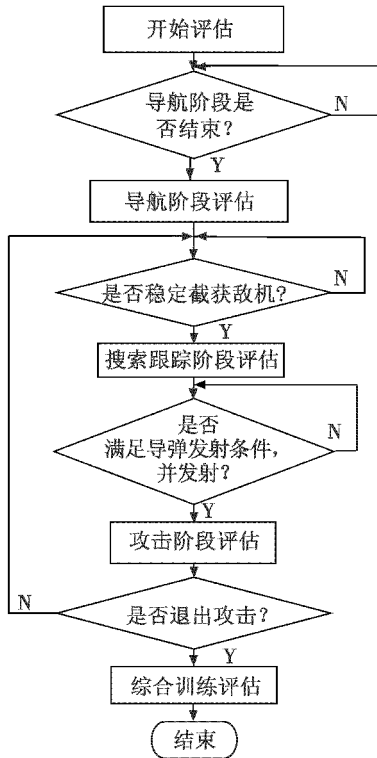


图4 训练评估框图

Fig.4 Training evaluation block diagram

在各个阶段有可能出现雷达被干扰、被敌跟踪、被导弹攻击等情况,若使用雷达制导武器远程攻击时需要无线电指令修正,所以这些情况都需要列入评估内容。

训练评估与效能评估最大区别在于效能评估的各个阶段的结果是以概率情况给出的,而训练评估的各

阶段结果已知。现在可以为对抗训练的各阶段设置权重,即  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ , 并有  $w_i > 0$ , 且  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。其权重具体数值需要根据当前的空战训练重点来制定,如图4所示,若训练时未出现的情况,则其权重值为“0”。把训练出现的各阶段的结果设为  $L$ , 评估最终结果为

$$C = w_1 L_1 + w_2 L_2 + \dots + w_n L_n \quad (11)$$

### 4 结束语

本文主要通过对采集的火控数据进行处理,建立了空战分析流程和武器使用及评估模型,对复杂情况下的空战训练进行分析评估。

空战评估系统主要检查飞行员对装备的使用和战术配合,找出不足之处,最终得到本次训练的评估结果,对提高部队训练水平和飞行员战术素养具有重要的意义。

### 参考文献

[1] 陆彦,周志刚,夏英明. 航空火力控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,1990.  
LU Y, ZHOU Z G, XIA Y M. Airborne fire control technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.

[2] 谢希权,易华. 机载多目标攻击武器系统信息处理[M]. 北京:国防工业出版社,2012.  
XIE X Q, YI H. Data processing of airborne multi-target attacking system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.

[3] 王月星,周德云,田涛. 机载多传感器跟踪航迹数据融合研究[J]. 电光与控制,2007,14(1):25-29.  
WANG Y X, ZHOU D Y, TIAN T. On target track fusion for multiple sensors onboard fighter aircrafts [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(1):25-29.

[4] 郑昌文,严平,丁明跃,等. 飞行器航迹规划[M]. 北京:国防工业出版社,2008,35-36.  
ZHENG C W, YAN P, DING M Y, et al. Route planning for air vehicles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008, 35-36.

[5] 符小卫,高晓光,何建华. 威胁联网下的飞行路径规划[J]. 飞行力学,2003,21(3):67-70.  
FU X W, GAO X G, HE J H. Flight path planning for threat netting [J]. Flight Dynamics, 2003, 21(3):67-70.

[6] 郑昌文,丁明跃,周成平,等. 多飞行器协调航迹规划方法[J]. 宇航学报,2003,24(2):115-120.  
ZHENG C W, DING M Y, ZHOU C P, et al. Coordinated route planning for multiple air vehicles [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(2):115-120.

[7] WANG Y Y, WEI T T, QU X J. Study of multi-objective fuzzy optimization for path planning[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1):51-56.

[8] 苏海军,杨煜普,王宇嘉. 微分进化算法的研究综述[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(9):1793-1797.  
SU H J, YANG Y P, WANG Y J. Research on differential evolution algorithm: A survey [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(9):1793-1797.

[9] STORN R. System design by constraint adaptation and differential evolution[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(1):22-34.

(上接第33页)

[10] 郑昌文,严平,丁明跃,等. 飞行器航迹规划[M]. 北京:国防工业出版社,2008,35-36.  
ZHENG C W, YAN P, DING M Y, et al. Route planning for air vehicles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008, 35-36.

[11] 符小卫,高晓光,何建华. 威胁联网下的飞行路径规划[J]. 飞行力学,2003,21(3):67-70.  
FU X W, GAO X G, HE J H. Flight path planning for threat netting [J]. Flight Dynamics, 2003, 21(3):67-70.

[12] 郑昌文,丁明跃,周成平,等. 多飞行器协调航迹规划方法[J]. 宇航学报,2003,24(2):115-120.  
ZHENG C W, DING M Y, ZHOU C P, et al. Coordinated