

文章编号: 1001-0920(2005)02-0222-04

## 智能化战术飞行轨迹规划方法研究

周锐, 成晓静, 余舟毅, 池沛, 陈宗基

(北京航空航天大学 自动控制系, 北京 100083)

**摘要:** 对态势评估与规划系统进行集成, 提出了智能化战术飞行轨迹规划系统方案。基于贝叶斯网络和模糊推理技术, 实现了战场威胁级别及其相对重要性程度的综合评估。利用模型预测控制的滚动优化和在线校正原理, 实现了飞机在线飞行路径规划。建立了路径规划代价函数中加权因子的智能化分配方法, 进而实现了威胁评估与路径规划之间的集成, 使得路径规划系统能够自适应战场态势的动态变化。最后通过仿真验证了所提出方法的有效性。

**关键词:** 路径规划; 态势评估; 模糊逻辑; 贝叶斯网络

中图分类号: TP301

文献标识码: A

## Methods for intelligent tactical flight path planning

ZHOU Rui, CHENG Xiaojing, YU Zhouyi, CHI Pei, CHEN Zongji

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China  
Correspondent: ZHOU Rui, Email: zhr@dept3.buaa.edu.cn)

**Abstract:** Intelligent tactical flight path planning system is proposed by integrating situation assessment with path planning. The algorithms of assessment for threat level and relative importance are established based on Bayesian networks and fuzzy logic. The flight path planning is implemented using the model predictive control depending on its receding horizon optimization and correction on-line. The intelligent assignment of weighting factors in cost function of path planning is developed based on fuzzy logic, which integrated situation assessment with path planning. The proposed intelligent tactical flight path planning system can adapt the dynamic variable situations in battlefield. The simulation results show the good effectiveness.

**Key words:** path planning; situation assessment; fuzzy logic; Bayesian networks

### 1 引言

现代作战飞机正向高度自动化、综合化及智能化方向发展, 提供给驾驶员的信息复杂多样, 仅依靠飞行员本身作出规划和决策几乎是不可能的。战术飞行轨迹规划系统对于提高作战飞机的生存性和完成任务的有效性具有重要意义, 其主要技术难点是如何适应动态变化的战场态势以及出现突发威胁情况下在线实时重规划<sup>[1]</sup>。有些路径规划系统中已考虑战场态势对规划结果的影响, 但没有研究态势评估问题<sup>[2]</sup>, 或者仅研究态势评估问题<sup>[3]</sup>, 缺乏系统的集成。

本文研究了态势评估和飞行路径规划算法, 并

基于模糊推理技术实现了两个子系统之间的集成。

### 2 智能化战术飞行轨迹规划系统

本文采用模型预测控制(MPC)作为在线飞行轨迹规划方法。由于MPC是基于滚动优化和在线校正原理, 对模型的预测误差具有鲁棒性, 可选取简单的飞机质点运动学方程作为预测模型<sup>[4]</sup>, 即

$$\begin{aligned}\theta(k+1) &= \theta(k) + \Theta_{u\theta}(k), \\ \varphi(k+1) &= \varphi(k) + \Phi_{u\varphi}(k), \\ x(k+1) &= x(k) + s_0 \cos(\varphi(k) + \\ &\quad \Phi_{u\varphi}(k)) \cos(\theta(k) + \Theta_{u\theta}(k)), \\ y(k+1) &= y(k) + s_0 \sin(\varphi(k) + \\ &\quad \Phi_{u\varphi}(k)) \sin(\theta(k) + \Theta_{u\theta}(k)),\end{aligned}$$

收稿日期: 2004-03-19; 修回日期: 2004-06-21

基金项目: 国家自然科学基金和航空科学基金联合基金项目(10377001)

作者简介: 周锐(1968—), 男, 湖北钟祥人, 教授, 博士, 从事飞行控制、制导等研究; 陈宗基(1943—), 男, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事飞行控制、仿真、智能控制等研究

$$z(k+1) = z(k) + s_0 \sin(\theta(k) + \theta_0 u_\theta(k)). \quad (1)$$

其中:  $\theta, \varphi, x, y, z$  分别是飞机的俯仰角、方位角和位置坐标;  $\theta_0, \varphi_0, s_0$  为步长;  $u_\varphi$  和  $u_\theta$  为离散控制量 飞行路径规划系统代价函数为

$$J(k) = \sum_{j=k}^{k+N-1} g^T(j|k)g(j|k) + Qh(j|k). \quad (2)$$

其中:  $N$  为预测的时间长度,  $g$  表示飞机当前位置到目标点  $(x_{end}, y_{end}, z_{end})$  的距离代价, 即

$$g(j|k) = \begin{bmatrix} x(j|k) - x_{end} \\ y(j|k) - y_{end} \\ z(j|k) - z_{end} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$h$  表示飞机受到的各种威胁代价, 即

$$h(j|k) = \begin{bmatrix} \text{missile}(x(j|k), y(j|k), z(j|k)) \\ \text{flack}(x(j|k), y(j|k), z(j|k)) \\ \text{radar}(x(j|k), y(j|k), z(j|k)) \\ \dots \end{bmatrix}, \quad (4)$$

各种威胁模型参见文献[1];  $Q = [q_{导弹}, q_{高炮}, q_{雷达}, \dots]$  为加权矩阵, 反映了各种威胁源相对飞机的重要性程度, 其不同选择对路径规划结果具有重要影响 传统的路径规划方法大都是在规划以前, 由规划人员凭经验给定, 不能准确反映各种威胁的重要性程度, 而且这种重要性程度也是随着态势的变化而变化 下面将根据威胁程度的评估结果, 由模糊推理系统动态确定各威胁的加权因子, 原理如图 1 所示

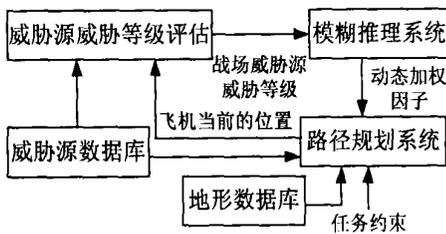


图 1 智能化飞行轨迹规划系统结构

### 3 威胁源威胁级别评估

#### 3.1 贝叶斯网络推理过程

由于贝叶斯网络具有与人类相似的诊断和推理过程, 非常适合不确定性战场环境中的推理 考虑一个典型的树状贝叶斯网络, 假设某节点  $X$  有  $m$  个子节点  $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$  和一个父节点  $U$ . 定义符号:  $Bel$  为节点的信度值或后验概率分布;  $\lambda$  为从子节点获得的诊断信息;  $\pi$  为从父节点获得的因果信息;  $M_{x|u} = P(X = x | U = u)$  为条件概率矩阵, 表示父节点  $U$  中某态势  $u$  发生情况下子节点  $X$  中某事件  $x$  发生的概率, 这实际给出了网络的推理规则 算法以单个节点为中心, 从子节点得到  $\lambda$  从父节点得到  $\pi$ , 计算本节点的  $Bel, \lambda$  和  $\pi$ , 并触发相邻节点进行更

新, 其更新过程为<sup>[5]</sup>:

Step 1: 更新自身的置信度, 即

$$Bel(x) = \alpha \lambda(x) \pi(x). \quad (5)$$

其中  $\alpha$  为归一化算子, 保证  $Bel(x) = 1, \lambda(x) =$

$$\lambda_j(x), \pi(x) = \pi_k(u) M_{x|u}.$$

Step 2: 自底向上更新, 即

$$\lambda_k(u) = \lambda(x) M_{x|u}. \quad (6)$$

Step 3: 自顶向下更新, 即

$$\pi_{y_j}(x) = \alpha \pi(x) \lambda_k(x). \quad (7)$$

### 3.2 威胁级别评估

正确及时的威胁源等级评估, 对战术任务和飞行路径的规划具有重要影响 战场中威胁源主要包括敌方雷达、地空导弹以及高射炮等, 这些威胁源相对飞机的威胁等级评估的贝叶斯网络模型如图 2 所示<sup>[3]</sup>. 网络中各节点的状态集合分别定义为: ThreatLevel = {高, 中, 低} 为威胁源级别,  $D = \{\text{雷达}, \text{导弹}, \text{高炮}\}$  为威胁源的类型, Ability = {好, 中, 差} 为飞机对抗威胁源的能力, WEZ = {内, 边, 外, 方位} 为飞机相对威胁源有效威胁区域的位置和方位关系

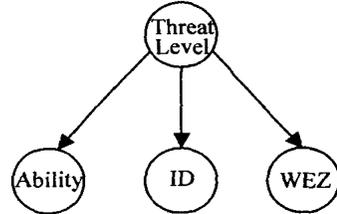


图 2 威胁等级评估的贝叶斯网络模型

网络输出为根节点的后验概率或信度值, 即根据已有信息对威胁源威胁级别作出评估结果

$$Bel(\text{ThreatLevel}) =$$

$$P(\text{threatlevel} = \{\text{高}, \text{中}, \text{低}\}).$$

网络的输入包括初始化输入和实时信息输入, 初始化输入是指预先确定的网络节点的条件概率矩阵和根节点的先验概率, 先验概率记为

$$\pi(\text{ThreatLevel}) = P(\text{threat} = \{\text{高}, \text{中}, \text{低}\}).$$

实时信息输入是指在推理过程中输入到子节点的外部信息, 这些输入记为

$$\lambda(\text{Ability}) = P(\text{ability} = \{\text{好}, \text{中}, \text{差}\});$$

$$\lambda(D) = P(\text{id} = \{\text{雷达}, \text{导弹}, \text{高炮}\});$$

$$\lambda(\text{WEZ}) = P(\text{wez} = \{\text{内}, \text{边}, \text{外}, \text{方位}\}).$$

假设在没有取得任何先验信息情况下, 各种状态出现概率相同, 并设先验概率  $\pi(\text{Threat}) = (0.3, 0.4, 0.3)$ , 网络的其余输入分别初始化为  $\lambda(\text{Ability}) = \alpha(1, 1, 1), \lambda(D) = \alpha(1, 1, 1), \lambda(\text{WEZ})$

表 1 推理规则条件概率矩阵

$M_{x y}$	$P(\text{ability} \text{threatlevel})$			$P(\text{id} \text{threatlevel})$			$P(\text{weiz} \text{threatlevel})$				
	高	中	低	雷达	导弹	高炮	内	边	外	方位	
ThreatLevel	高	0.1	0.3	0.6	0.1	0.5	0.4	0.8	0.1	0.1	0
	中	0.4	0.4	0.2	0.4	0.3	0.3	0.6	0.2	0.1	0.1
	低	0.6	0.3	0.1	0.6	0.2	0.2	0	0.1	0.45	0.45

$= \alpha(1, 1, 1)$ . 威胁等级评估规则由先验概率矩阵  $M_{\text{id}|\text{threatlevel}}, M_{\text{ability}|\text{threatlevel}}$  和  $M_{\text{weiz}|\text{threatlevel}}$  给出, 如表 1 所示. 初始化完毕, 网络进入等待状态, 此时如果有传感器关于战场新的威胁源信息, 便可触发贝叶斯网络的推理过程.

表 2 给出了不同情况下的仿真结果. 以表 2 中第一组数据为例, 我方对抗能力较差, 而敌方威胁为导弹, 杀伤力较高, 飞机又处于其攻击范围之内, 故贝叶斯网络的评估结果为: 导弹对飞机威胁程度为高、中、低的概率分别为 0.833, 0.167, 0, 其结果符合常理.

表 2 3 种情况下威胁级别评估结果

$\lambda$	$P(\text{threatlevel} = \{\text{高, 中, 低}\})$
$\lambda_{\text{ability}} = [0 \ 0 \ 1]$ $\lambda_{\text{D}} = [0 \ 1 \ 0]$ $\lambda_{\text{WEZ}} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$	$\text{Bel} = [0.833 \ 0.167 \ 0]$
$\lambda_{\text{ability}} = [0.3 \ 0.4 \ 0.3]$ $\lambda_{\text{D}} = [0.8 \ 0.1 \ 0.1]$ $\lambda_{\text{WEZ}} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$	$\text{Bel} = [0.303 \ 0.697 \ 0]$
$\lambda_{\text{ability}} = [0.1 \ 0.8 \ 0.1]$ $\lambda_{\text{D}} = [0.0 \ 0.2 \ 0.8]$ $\lambda_{\text{WEZ}} = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$	$\text{Bel} = [0 \ 0.047 \ 0.953]$

### 4 威胁源模糊动态加权因子

需要根据威胁级别评估结果对威胁源进行综合评估, 并进行威胁排序, 用动态加权因子  $q_{\text{id}}$  (id = 雷达, 导弹, 高炮) 表示各威胁的相对重要性程度, 且满足  $q_{\text{id}} = 1$ . 在威胁级别评估基础上, 采用模糊推理方法确定各威胁源的加权因子, 其规则的一般形式为

- if threatlevel is high, then  $q$  is high;
- if threatlevel is medium, then  $q$  is medium;
- if threatlevel is low, then  $q$  is low.

令规则条件部分的隶属度即为相应威胁评估的信度  $\text{Bel}(\text{ThreatLevel})$ , 即相应威胁级别的后验概率  $P(\text{threatlevel} = \{\text{高, 中, 低}\})$ . 规则结论部分(加权因子)采用三角形隶属函数, 如图 3 所示. 其权值范围不是  $[0, 1]$ , 而是  $[0.1, 1]$ , 目的是为不重要的威胁分配一个较小权值<sup>[2]</sup>. 另外, 隶属函数范围设为  $[-0.35, 1.45]$ , 这是因为采用质心解模糊法并不会覆盖到三角形隶属函数的边界, 而域  $[-0.35, 1.45]$

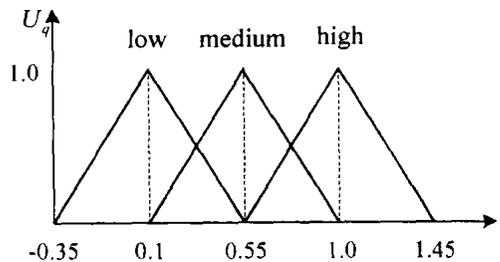


图 3 图加权因子的隶属函数

允许输出覆盖  $[0, 1, 1]$ .

威胁源加权因子的模糊推理过程如下: 用每条规则条件部分的隶属度(威胁级别评估的信度值)对规则结论部分中每个模糊变量的隶属函数分别进行裁剪. 将所有规则中同一加权因子经裁剪后的隶属函数分别叠加; 然后分别求出叠加以后所形成的阴影部分的质心位置  $q_i^c$  和面积  $A_i, i = 1, 2, \dots$ . 采用质心解模糊方法得到的表征每个威胁源重要性程度的加权因子为

$$q_i^s = q_i^c \times A_i, i = 1, 2, \dots;$$

再进行权值的规范化处理, 可得到表征多威胁源相对重要性程度的加权因子为

$$q_i = q_i^s / \sum_i q_i^s$$

假设战场中有 3 个威胁源, 其威胁级别的评估结果为

$$\begin{aligned} \text{Bel}_1 &= [0.6 \ 0.1 \ 0.3], \\ \text{Bel}_2 &= [0.2 \ 0.5 \ 0.3], \\ \text{Bel}_3 &= [0.0 \ 0.8 \ 0.2] \end{aligned}$$

考虑第 1 个威胁源: 根据权值的模糊推理过程, 得到加权因子  $q_1$  的隶属函数被  $\text{Bel}_1$  裁减叠加后形成的图形如图 4 所示, 则得到  $q_1$  对应的阴影部分质心位置和面积分别为  $q_1^c = 0.6465$  和  $A_1 = 0.6930$ . 同理可得  $q_2^c = 0.5084, A_2 = 0.7290, q_3^c = 0.4273, A_3 = 0.5940$ . 最终得到归一化的加权因子  $q_1 = 0.4178, q_2 = 0.3456, q_3 = 0.2366$ . 由此可见, 加权因子的大小与威胁源的威胁程度是相对应的, 综合反映了多威胁相对重要性程度.

假设威胁分布和飞机运动轨迹如图 5 所示, 圆圈表示威胁范围. 由贝叶斯网络和模糊推理, 可得各威胁对飞机综合威胁程度(加权因子)的连续动态评估结果, 如图 6 所示. 由此可见, 各威胁相对飞机的威

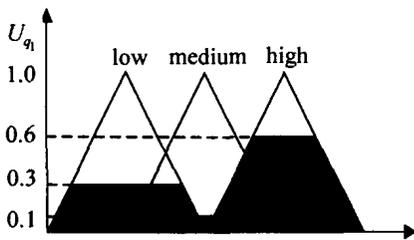


图 4 被 Bel<sub>1</sub> 裁剪叠加以后 q<sub>1</sub> 隶属函数

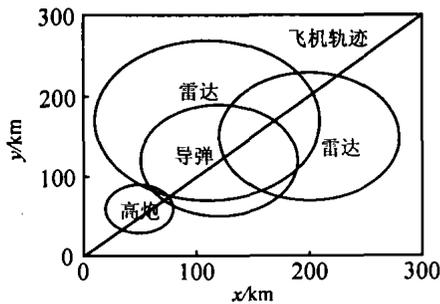


图 5 威胁分布与飞机运动轨迹

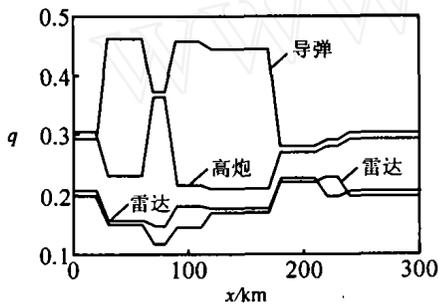


图 6 威胁程度的综合动态评价)

胁重要性程度或其加权因子是随飞机运动而动态变化的,这反映了战场态势的变化

### 5 系统集成仿真

为提高实时性,预测模型中的控制量采用有限离散控制集合  $u_\theta, u_\varphi$   $U = \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ , 并且只考虑  $u_\theta, u_\varphi$  之间的有效组合.以 3 种威胁源不同分布情况为例,图 7 和图 8 分别给出了采用模糊智能变权和固定权值下的飞行轨迹规划结果

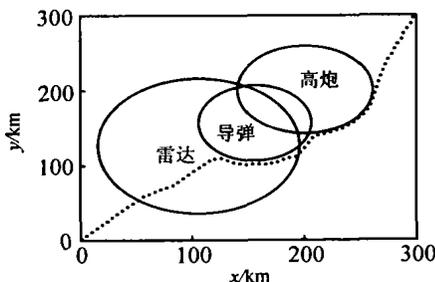


图 7 模糊动态权值下路径规划结果

由仿真结果可以看出,由于模糊智能变权考虑了各威胁源对飞机的动态威胁程度,由模糊推理系统,其对应加权因子也得到动态调整,反映了当前战场态势.其规划路径回避了当前时刻高威胁级别的威胁源,而在固定权值下则发生了穿越

另外,规划路径之所以穿越雷达威胁区域,是由于假设雷达相对导弹和高炮而言,其威胁程度相对较低,这体现在表 1 所示的威胁评估推理规则(条件概率矩阵)和图 6 所示的威胁级别评估结果中.由模糊推理结果,其加权因子自然相对较小,因而发生了穿越现象

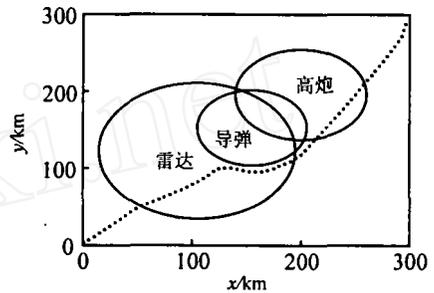


图 8 固定权值下路径规划结果

### 6 结 论

采用贝叶斯网络和模糊推理实现了对威胁源威胁级别和相对重要性的连续动态评估,实现了威胁评估与路径规划之间的集成,使规划结果反映了战场态势的动态变化.并基于 MPC 实现了在线路径规划问题.研究结果既可应用于有人作战飞机智能决策辅助系统,也可应用于无人作战飞机控制、决策与管理系统的

### 参考文献(References)

- [1] 胡昱. 飞机战术飞行轨迹优化方法及其实现研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999: 70-80
- [2] Al-Hasan S, Vachtsevanos G. Intelligent route planning for fast autonomous vehicles operating in a large natural terrain[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2002, 40(1): 1-24
- [3] Hanson M, Sullivan O, Harper K. On-line situation assessment for unmanned vehicles [A]. *Proc of the Florida Artificial Intelligence Research Society (FLAIRS) Conf* [C]. FLorida, 2001: 1-5
- [4] Sjanic Z. On-line mission planning based on model predictive control[D]. Sweden: Linkoping University, 2001: 5-18
- [5] Pearl J. *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*[M]. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc, 1988