

文章编号: 1001-0920(2004)04-0441-03

战术任务规划系统研究

周 锐, 成晓静, 陈宗基

(北京航空航天大学 自动控制系, 北京 100083)

摘 要: 驾驶员智能决策辅助系统对于提高作战飞机的生存性和完成任务有效性具有重要意义, 研究现代军机战术任务规划和管理系统结构、组成及功能, 给出了信息融合、态势评估和任务规划各子系统实现方法; 基于目标和任务模型, 实现了冲突检测与消解, 利用模型预测控制的滚动优化和在线校正技术, 实现了突发事件情况下战术飞机飞行轨迹的在线规划问题, 具有较好的鲁棒性和抗干扰性, 研究结果表明了该方法的有效性

关键词: 态势评估; 任务规划; 路径规划; 模型预测控制

中图分类号: TP301 **文献标识码:** A

Tactical mission planning systems for modern fighter plane

ZHOU Rui, CHEN G X iao-jing, CHEN Zong-ji

(Department of Automatic Control, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Correspondent: ZHOU Rui, E-mail: zhr@dept3.buaa.edu.cn

Abstract: The tactical mission planning and management system for modern fighter plane are proposed. The technical approaches and methods for implementing each subsystem of the tactical mission planning system are developed, such as information fusion, situation assessment and mission planner, etc. The model of goals and tasks is proposed for conflict detection and resolution. It is emphasized on the problem of tactical flight path planning on-line based on model predictive control (MPC). Depending on the receding horizon (RH) optimization and correction on-line of MPC, the flight path replanning on-line is implemented in the case of pop-up threat or special circumstance. The simulation results show the effectiveness of the method.

Key words: situation assessment; mission planning; path planning; model predictive control

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, 仅仅依靠飞行员本身来考虑众多因素, 进而作出规划和决策, 几乎是不可能的。因此, 需要一种战术任务规划与管理系统来辅助驾驶员作出实时决策。比较典型的这类系统有: 美国的驾驶员助手计划^[1]、综合飞行管理系统以及座舱自动化技术^[2]、英国的任务管理辅助计划等^[3]。战术任务规划与管理系统是提高现代军机作战任务有效性和安全性的重要技术保障。

本文给出了战术任务规划与管理系统结构、组成以及各组成子系统实现的技术途径和方法。

2 战术任务规划系统

战术任务规划系统的主要功能是在对各种敏感信息的处理和当前态势评估的基础上, 对当前和未来战术任务作出规划与预测^[3]。系统组成和结构如图 1 所示, 其核心功能模块主要包括信息融合、态势评估和任务规划器。

1) 信息融合: 信息类型主要是指多平台和多传感器对目标位置、速度、方位、属性等特征参数的测

收稿日期: 2003-05-05; 修回日期: 2003-07-07

基金项目: 国家自然科学基金和航空科学基金联合资助项目(10377001)

作者简介: 周锐(1968—), 男, 湖北钟祥人, 副教授, 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

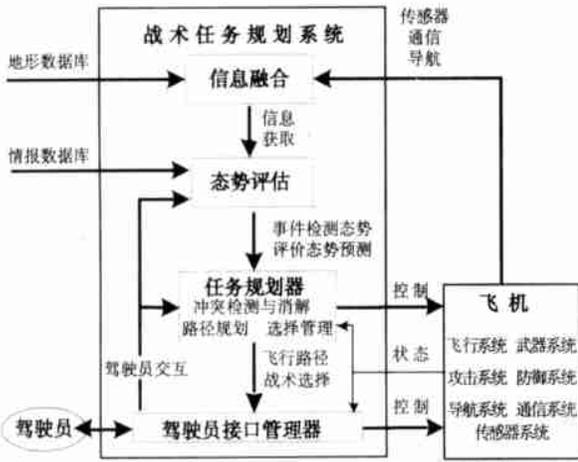


图1 战术任务规划系统主要组成

量信息 信息融合内容主要包括数据配准、数据关联、目标跟踪、目标分类等过程,信息融合可以采用JPDA方法^[4]。

2) 态势评估: 主要包括战术事件检测、当前态势评价、未来态势预测、前后关联处理等过程^[5]。

3) 任务规划器: 是整个系统的核心, 主要实现战术路径规划、冲突检测与消解, 以及选择性管理等。其主要技术难点是当出现突发威胁源或突发事件时, 规划系统能够根据态势动态评估结果, 对飞行路径作出实时重规划, 并实现冲突检测与消解。

3 冲突检测与消解

目标和任务模型实际是对驾驶员意图的建模,

一般可分为3种^[2]:

1) 飞行安全: 如地形回避, 以及最大速度、过载、攻角的检测与保护等

2) 战术生存: 如躲避敌方的地空导弹(SAM)和雷达探测等

3) 任务完成: 如满足给定到达目标时间(TOT)和方位角等

规划系统对每一个任务进行连续的监控, 以判断在当前态势之下目标能否得以实现, 进而对机会/冲突进行检测, 并进行冲突的消解或重规划, 原理如图2所示。对并行冲突的消解主要基于优先级排序, 并结合态势评估、飞行阶段, 以及任务和冲突类型等对冲突进行消解。典型的冲突消解手段主要包括任务/路径重规划、系统重构、任务终止等手段。

4 在线飞行轨迹规划

由于战场环境的动态性和不确定性(例如突发威胁源或突发事件), 需要在飞行中对飞行路径作出在线实时重规划。由于模型预测控制(MPC)的滚动优化和反馈校正特点, 利用滚动的有限时段优化取代了一成不变的传统全局优化, 具有更强的鲁棒性^[6], 比较适合于战术飞行轨迹的在线规划需求。

4.1 基于模型预测控制的在线轨迹规划

基于MPC的在线飞行轨迹规划系统如图3所示。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

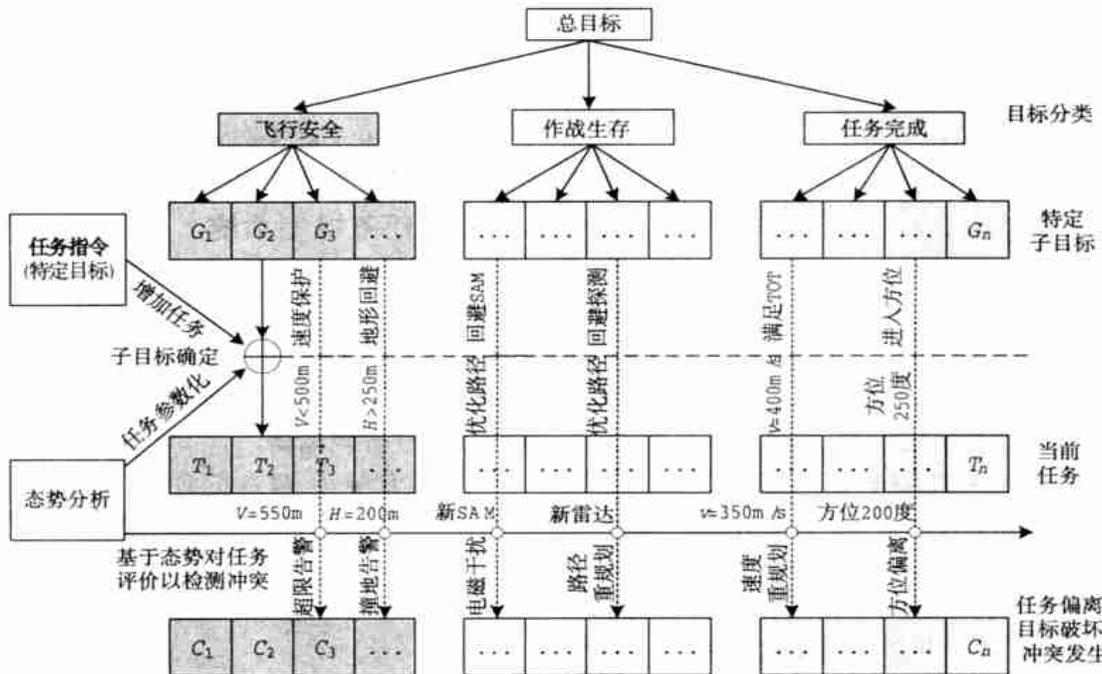


图2 基于目标和任务模型的冲突检测原理

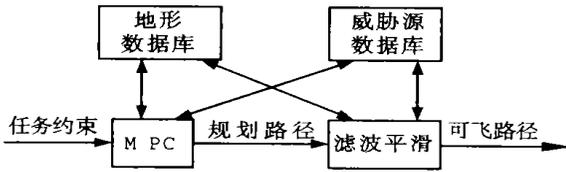


图 3 在线轨迹规划算法结构图

点运动学方程作为预测模型^[7], 即

$$\begin{cases} \theta(k+1) = \theta(k) + \theta u_{\theta}(k), \\ \varphi(k+1) = \varphi(k) + \varphi u_{\varphi}(k), \\ x(k+1) = x(k) + s_0 \cos(\varphi(k) + \varphi u_{\varphi}(k)) \cos(\theta(k) + \theta u_{\theta}(k)), \\ y(k+1) = y(k) + s_0 \sin(\varphi(k) + \varphi u_{\varphi}(k)) \sin(\theta(k) + \theta u_{\theta}(k)), \\ z(k+1) = z(k) + s_0 \sin(\theta(k) + \theta u_{\theta}(k)). \end{cases} \quad (1)$$

其中: θ, φ, x, y, z 分别是飞机的俯仰角、方位角和位置坐标, θ, φ, s_0 是步长, u_{φ}, u_{θ} 是离散控制量。在线轨迹规划系统代价函数为

$$J(k) = \sum_{j=k}^{k+N-1} g^T(j|k) Q_1 g(j|k) + Q_2 h(j|k), \quad (2)$$

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, h 表示在当前预测和优化时段内飞机受到的各种威胁代价, Q_1 和 Q_2 为加权矩阵

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

$$h(j|k) = \begin{bmatrix} \text{terrain}(x(j|k), y(j|k), z(j|k)) \\ \text{threat}(x(j|k), y(j|k), z(j|k)) \\ \text{height}(z) \\ \text{fuel}(\theta(j|k)) \\ \text{weather}(x(j|k), y(j|k), z(j|k)) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中 $\text{terrain}(x(j|k), y(j|k), z(j|k))$ 表示飞机对山峰的撞毁概率, 若飞行高度上山峰半径和飞机距山峰中心的距离分别为 R 和 R_{AT} , 则撞毁概率可近似表示为^[8]

$$P_T = \begin{cases} 0, & R_{AT} > (10 + R); \\ 1/R_{AT}, & (2 + R) < R_{AT} < (10 + R); \\ 1, & R_{AT} < (2 + R). \end{cases} \quad (5)$$

$\text{threat}(x(j|k), y(j|k), z(j|k))$ 表示飞机被敌方雷

达探测概率。若雷达最大探测半径为 R_{max} , 飞机距雷达的水平距离为 R_{AR} , 则探测概率可近似表示为^[8]

$$P_R = \begin{cases} 0, & R_{AR} > R_{max}; \\ R_{max}^4 / (R_{AR}^4 + R_{max}^4), & R_{AR} \leq R_{max}. \end{cases} \quad (6)$$

$\text{height}(z)$ 为飞机的飞行高度约束代价, 这里只考虑水平面内轨迹规划问题; $\text{weather}(x(j|k), y(j|k), z(j|k))$ 表示恶劣气候对飞机的影响, 可近似为对山峰的处理方法; $\text{fuel}(\theta(j|k))$ 描述飞机的燃油消耗代价, 可表示为

$$\text{fuel}(\theta(j|k)) = s_0 e^{-\theta(j|k)}. \quad (7)$$

关于加权因子 Q_1 和 Q_2 的确定, 目前有 3 种方法:

- 1) 预先给定: 由规划人员预先根据各威胁源和约束情况, 凭经验对每个权重进行赋值;
- 2) 知识推理: 事先建立专家知识库, 并结合当前各威胁源和约束情况, 由一定的推理机制给出每个加权值;
- 3) 智能变权: 随着战况变化及每个因素的重要性和可行性的转变, 动态调整每个加权值, 以适应当前战况和任务要求

4.2 仿真结果

对于式(2)所示代价函数优化, 可采用动态规划方法得到非线性最优解, 但计算量和存储量太大, 不适于在线应用。为提高实时性, 采用有限离散控制集合 $u_{\theta}, u_{\varphi} \in U = \{-2, -1, 0, +1, +2\}$, 得到一种次优解。各种威胁源分布(雷达、导弹、天气和地形)以及由 MPC 规划出的飞行路径如图 4 所示。从仿真结果可看出, MPC 并不是全局最优算法, 而是一种有限预测时段内的局部优化, 比较适合于出现突发威胁和突发事件情况下在线轨迹规划。实际中还需要对 MPC 规划轨迹进行滤波和平滑处理。

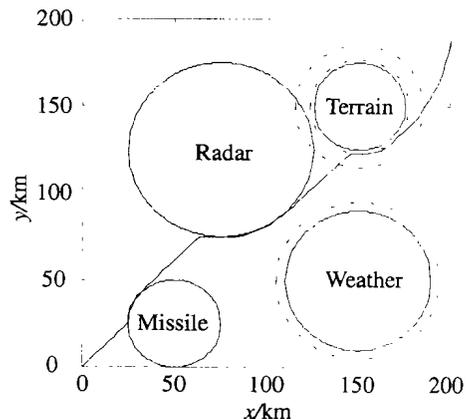


图 4 MPC 在线轨迹规划结果

(下转第 447 页)

4 性能分析

下面给出本文的主要结果:

定理 1 考虑由式(2), (4), (25), (31) 构成的鲁棒直接型模型参考自适应控制方案. 若系统、参考模型和 $\Delta(s)d$ 分别满足假设 1) ~ 假设 6), 则存在 $\beta^* > 0$, 对任意的 $\beta \in [0, \beta^*]$, 有:

- 1) 闭环系统的所有信号有界, 且 $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = 0$;
- 2) 若 K_p 未知, r 是 $2n$ 阶充分丰富信号^[1], d

l_2 , 且 $R_p(s)$ 和 $\bar{Z}_p(s)$ 互质, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} |\bar{\theta}(t)| = 0$

证明 选取如下 Lyapunov 函数:

$$V = V_1 + \gamma_0 \frac{r_0^2}{2} + \frac{\mu x_1^T P_1 x_1}{2} + \frac{\mu x_2^T P_2 x_2}{2}, \quad (32)$$

其中 V_1 如式(24) 定义, $\mu > 0$ 是待定参数. 经过一些运算, 总可找到 $\beta^* > 0$, 使得对任意的 $\beta \in [0, \beta^*]$, 有

$$\dot{V} = -q_0 \frac{\bar{c}_1^2}{2} - \frac{\mu x_1^2}{4} - \frac{\mu x_2^2}{4} - \gamma_0 p_0 r_0^2 < 0 \quad (33)$$

限于篇幅, 详细证明略.

5 结 语

本文针对相对阶 $n^* = 3$ 的具有噪声的一类简单系统(2), 研究了具有未规范化自适应律的鲁棒直接型模型参考自适应控制器的全局稳定性, 跟踪和参数估计问题. 据作者所知, 这个结果是新的. 但仍

有大量问题值得进一步考虑: 如何将这个结果推广到更一般的系统; 如何设计和分析相对阶 $n^* = 3$, 具有噪声和未知高频增益符号的鲁棒直接型模型参考自适应控制器等.

参考文献(References):

- [1] Ioannou P A, Sun J. *Robust Adaptive Control* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1996.
- [2] Xie X J, Wu Y Q. Robust model reference adaptive control with hybrid adaptive law [J]. *Int J of Systems Science*, 2002, 33(14): 1109-1119.
- [3] Morse A S. A comparative study of normalized and unnormalized tuning errors in parameter-adaptive control [A]. *Proc of the 30th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Brighton, 1991. 135-138.
- [4] 解学军, 吴昭景, 张嗣瀛. 具有未规范化自适应律的直接型模型参考自适应控制器 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(1): 53-56.
(Xie X J, Wu Z J, Zhang S Y. Direct model reference adaptive backstepping controller with unnormalized adaptive law s [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(1): 53-56.)
- [5] Miyasato Y. A model reference adaptive controller for systems with uncertain relative degrees r , $r = 1$ or $r + 2$ and unknown signs of high-frequency gains [J]. *Automatica*, 2000, 36(6): 889-896.

(上接第 443 页)

5 结 论

本文提出了现代军机战术任务规划和管理系统设计方案以及组成子系统——信息融合、态势评估及任务规划器的实现方法和技术途径; 基于目标和任务模型, 实现了对冲突的检测与消解. 基于 MPC 的滚动优化和在线校正技术, 实现了当出现突发威胁和突发事件情况下飞机在线轨迹规划问题. 本文结果既可应用于有人作战飞机的智能决策辅助系统, 也可应用于无人战术飞机的自主控制系统的设计, 而且随着计算机技术的快速发展, 系统实时性问题也会得到解决.

参考文献(References):

- [1] Shella B Bank, Carl S Lizza. Pilot's associate: A cooperative, knowledge-based system application [J]. *IEEE Expert*, 1991, 6(3): 18-29.
- [2] Schulte A. Cognitive automation for tactical mission management [J]. *Cognitive Technology and Work*,

2002, 4(1): 146-159.

- [3] Pipe H J. The UK management AD project [A]. *IFAC Automatic Control in Aerospace* [C]. Octobrunn, 1992. 263-268.
- [4] Bar Shalom Y, Li X R. *Multitarget-multisensor Tracking: Principles and Techniques* [M]. Storrs: YBS Publishing, 1995.
- [5] Mulgund S, Rinkus G, Ilgen C. On-line intelligent processor for situation assessment [A]. *2nd Annual Symposium and Exhibition on Situational Awareness in the Tactical Air Environment* [C]. Patuxent River, 1997. 1-13.
- [6] 席裕庚. 预测控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993. 1-10.
- [7] Sjanic Z. On-line mission planning based on model predictive control [D]. Sweden: Linkoping University, 2001. 15-20.
- [8] 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.