

基于滚动时域控制的战斗机空战机动决策

付昭旺¹, 李战武¹, 强晓明², 徐安¹

(1. 空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038; 2. 空军沈阳航空装备训练基地西宁训练大队, 西宁 810006)

摘要: 采用滚动时域控制(Receding Horizon Control, RHC)方法对空战机动决策进行建模研究。首先, 基于空战态势和战斗机作战能力给出探测优势和攻击优势的集合描述, 并建立定量评估函数, 得到机动决策的目标集; 其次, 综合考虑战斗机的战术优势、机动时间和控制损耗构建了决策指标函数; 然后, 基于直接多重打靶法给出其数值求解方法。仿真结果表明: 基于RHC的机动决策方法能够在规避目标威胁的情况下, 有效地达成攻击条件。

关键词: 空战; 机动决策; 滚动时域控制; 探测优势; 攻击优势; 直接多重打靶法

中图分类号: V271.4; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0020-05

Tactical Decision-Making Method Based on Receding Horizon Control for Air Combat

FU Zhaowang¹, LI Zhanwu¹, QIANG Xiaoming², XU An¹

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

2. Training Brigade of Xi'ning, Air Force Shenyang Aviation Equipment Framing Base, Xining 810006, China)

Abstract: Based on the Receding Horizon Control (RHC) model, a tactical decision-making method was proposed for the air combat. Firstly, the set description of detecting superiority and attacking superiority was given based on combat situation and operational capability of the fighter. The quantitative evaluation function was established, and the tactical decision-making object set was acquired. Then, an index function for decision-making was constructed taking the tactic superiority, maneuvering time and control cost into consideration. After that, a numerical solution was given based on the direct multiple shooting method. The simulation result shows that tactical decision-making model based on RHC can effectively reach the attack condition while avoiding the threats, and the solution can satisfy the real-time requirement.

Key words: air combat; tactical decision-making; receding horizon control; detection advantage; shot advantage; direct multiple shooting method

0 引言

空战机动决策是双方动态的博弈过程, 飞行员需要根据敌我态势进行一系列的机动, 直至最终达成有利攻击条件。机动决策问题常采用专家系统^[1-2]和对策论^[3]等方法进行研究, 这些方法在解决不确定性的机动决策问题时都不够理想, 如专家系统泛化能力弱, 且难以考虑决策者的决策偏好^[4]; 对策论模型的决策过于理性, 难以获得符合实际的有效决策。文献[4-5]

采用多级影响图研究了机动决策问题, 基于影响图的机动决策虽然能引入环境的不确定性和决策偏好, 但其建模复杂, 求解计算量大, 难以满足决策的实时性要求。

空战是一个极其复杂的过程, 机动决策模型必须引入动态环境, 并充分利用实测信息来增强决策的有效性。空战机动决策的本质是基于敌我态势变化寻找一条最优攻击路径, 以最快的速度 and 最小的威胁代价达成对目标的攻击条件, 所以机动可以抽象为航迹优化^[6]问题。优化原则为: 规避敌机探测威胁和火力威胁, 并以最快的速度达成对目标的攻击条件, 实现“先敌发射”。

基于以上考虑, 本文将机动决策问题建模为最优控制问题, 将整个机动接敌过程进行时间和空间的离

收稿日期: 2012-03-16

修回日期: 2013-01-22

基金项目: 航空科学基金(20095196012); 空军工程大学研究生科研创新基金(DX20111104)

作者简介: 付昭旺(1985—), 男, 湖南邵阳人, 博士生, 研究方向为航空武器系统总体、控制与仿真。

散化,分段求取最佳的机动策略,从而使得整个接敌过程为最优。滚动时域控制^[7](Receding Horizon Control, RHC)是一种基于在线计算、滚动优化求解系统最优控制问题的控制技术,在优化过程中利用实测系统信息进行反馈校正,增强了系统的鲁棒性,且其求解相对简单,所以本文采用RHC进行机动决策建模。

1 战斗机战术优势区的集合描述

机动决策的目标是占据有利战术位置,即有利于我机探测和攻击而不利于目标探测和攻击的距离、方位和高度,所以,机动决策问题是战斗机在三维空间的航迹控制问题。由于战斗机的三维机动可分解为水平和俯仰两个互相垂直平面来研究^[8],在中远距对决态势下,忽略载机和目标之间的高差,近似认为载机和目标在同一平面内运动,仅考虑水平面内的机动决策。

由于空战可以划分为探测和攻击两个阶段,将载机的战术优势分为探测优势和攻击优势,探测优势区和攻击优势区是目标周围空间满足探测优势或攻击优势条件的位置集合。为了描述战术优势,采用如图1所示的关系量描述战斗机和目标相对态势。

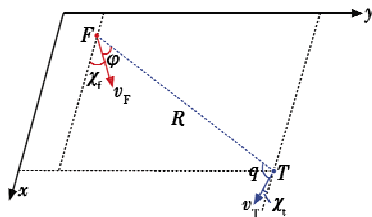


图1 空战态势关系描述

Fig.1 Description of air combat situation

图中: R 为目标距离; φ 为目标方位角; q 为目标进入角; v_f 和 v_t 分别为载机和目标的速度; χ_f, χ_t 分别为载机和目标的航向角。规定 χ_f, χ_t 以顺时针为正,逆时针为负, φ 和 q 以右偏为正,左偏为负,则有 $0 \leq |\chi_f| \leq \pi, 0 \leq |\chi_t| \leq \pi, 0 \leq |\varphi| \leq \pi, 0 \leq |q| \leq \pi$ 。

1.1 探测优势区

机载雷达是战斗机的主要传感器,在分析探测优势时主要考虑机载雷达。以战斗机为中心建立极坐标系,机载雷达探测区域可表示为

$$\begin{cases} R < R_{\max}(q) \\ |\varphi| < \psi_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $R_{\max}(q)$ 为与目标进入角 q 有关的雷达最大探测距离; ψ_{\max} 为雷达探测的最大方位角。

载机对目标的探测能力与目标的距离、目标方位和目标进入角都有关系。基于敌我双方探测能力对比,载机对目标的探测优势可分为优势、均势和劣势。优势为我机能探测到目标而目标无法探测我机;均势

为敌我双方都能探测或都不能探测到对方;劣势为目标能探测到我机而我机无法探测目标。在敌我双方传感器性能确定的情况下,考虑双方的态势关系,则载机的探测优势区域可记为

$$S_k = \left\{ (R, \varphi, q) \mid R \in [0, R_{\max}(q)], \varphi \in [-\psi_{\max}, \psi_{\max}], q \in [-\pi, -\psi'_{\max}] \cup [\psi'_{\max}, \pi] \right\} \quad (2)$$

其中, ψ'_{\max} 为目标雷达的最大探测方位角。

1.2 攻击优势区

攻击优势区是我机能够形成先敌发射的区域,本文主要考虑导弹攻击。导弹攻击需要目标进入导弹可攻击区。导弹攻击区采用外边界和内边界来描述,分别由空间各方位的最远发射距离和最近发射距离构成,攻击区的边界可表示为^[9]

$$D_{\max} = f(H_f, H_t, V_A, V_T, n_T, \varphi, q, t_0) \quad (3)$$

$$D_{\min} = f(H_f, H_t, V_A, V_T, n_T, \varphi, q, t_0) \quad (4)$$

其中: H_f, H_t 分别为载机和目标的高度; V_f, V_t 分别为载机和目标的速度; n_T 为目标机动过载; φ 为导弹离轴角; q 为目标进入角; t_0 为导弹工作时间。

现代空空导弹可攻击范围大大扩大,具备周围全向可达能力。但考虑载机探测范围的限制,其攻击区急剧缩小,以战斗机为中心建立极坐标系,导弹攻击范围可表示为

$$\begin{cases} R < D_{\max}(q) \\ |\varphi| < \vartheta_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $D_{\max}(q)$ 为与目标进入角 q 有关的导弹最大攻击距离; ϑ_{\max} 为载机导弹最大离轴发射限制的载机速度提前角。

攻击优势区域主要考虑敌我双方态势关系和导弹的攻击距离,本文仅考虑攻击区的远边界,载机的攻击优势区可记为

$$S_A = \left\{ (R, \varphi, q) \mid R \in [0, D_{\max}(q)], \varphi \in [-\vartheta_{\max}, \vartheta_{\max}], q \in [-\pi, -\vartheta'_{\max}] \cup [\vartheta'_{\max}, \pi] \right\} \quad (6)$$

其中, ϑ'_{\max} 为目标导弹最大离轴发射限制的载机速度提前角。

1.3 机动决策目标集

根据前面的分析,采用集合来描述敌我双方的战术态势,将目标周围的空间划分为如图2所示的5个区域: S_E 为载机的探测优势区(\bar{S}_E 表示探测非优势区, \bar{S}_A 表示攻击非优势区); $S_E \cap S_A$ 为载机同时具有攻击优势和探测优势的区域; $\bar{S}_E \cap S_A$ 为载机不具有探测优势,但具有攻击优势的区域; $\bar{S}_E \cap \bar{S}_A$ 为载机同时不具备探测优势和攻击优势的区域,基于区域划分的连续性和封闭性,将 $\bar{S}_E \cap \bar{S}_A$ 划分为了两个区域。则,载机

机动决策问题的目标集可描述为

$$S_A \cap S_E = \left\{ (R(q), \varphi, q) \mid R(q) \in [0, D_{\max}(q)], \right. \\ \left. \varphi \in [-\vartheta_{\max}, \vartheta_{\max}], q \in [-\pi, -\psi'_{\max}] \cup [\psi'_{\max}, \pi] \right\} \quad (7)$$

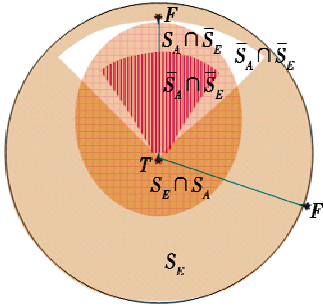


图2 机动决策目标集

Fig.2 Target of maneuvering decision

2 战术优势函数的构建

探测优势区和攻击优势区仅对空间区域进行了定性划分,为了定量描述优势区中不同位置优势值的大小,分别建立探测优势指标函数 $d_s(R, \varphi, q)$ 和攻击优势指标函数 $a_s(R, \varphi, q)$,则载机对目标的战术优势可表示为

$$E(R, \varphi, q) = \omega_1 \cdot d_s(\cdot) + (1 - \omega_1) \cdot a_s(\cdot) \quad (8)$$

其中, ω_1 为探测优势和攻击优势的调节系数。

因为战斗机的可攻击范围必然包含于其可探测范围内,即 $S_A \subset S_E$ 。机动是探测优势转化为攻击优势的过程,机动的目标是实施导弹攻击,所以, ω_1 取值不固定,根据载机与目标的距离变化而变化。本文定义 ω_1 的变化规律为

$$\omega_1 = \begin{cases} \frac{R - D_{\max}}{R_{\max}}, & R > D_{\max} \\ 0, & R \leq D_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

其中, R_{\max}, D_{\max} 分别为战斗机的最大探测距离和最大攻击距离。式(9)的含义是战斗机与目标的距离越接近,攻击优势的权重越大。

探测优势主要考虑载机的探测能力、探测的隐蔽性和探测持续性。战斗机不同,进入角目标的探测能力不同,前半圆探测能力优于后半圆;隐蔽性是指战斗机在探测目标的同时,应避免暴露于目标的探测区;持续性是指目标处于战斗机探测区的深度,如果目标处于探测区边缘,则探测的持续性难以保证。但是,如果目标不处于当前探测区,不能简单认为其探测优势为零,考虑到目标越接近当前探测区,战斗机越有可能达成探测条件。综合上述因素,定义载机的探测优势指标函数为

$$d_s = \cos\left(\frac{R}{R_{\max}(q)}\right) \cdot \frac{2}{1 + |2\varphi/\psi_{\max}|^2} \cdot \exp\left(-\frac{|q|}{\pi}\right) \quad (10)$$

从 $d_s(\cdot)$ 可以看出,在 S_E 内, R, φ 和 q 越小, d_s 越大,反之 d_s 越小。载机对不同进入角目标的探测能力通过 $R_{\max}(q)$ 引入,根据目标所处的不同半球给定不同值。

从攻击区的定义可知,导弹对可攻击范围内的目标的命中概率是相等的,与探测优势不同,载机的攻击优势主要考虑导弹的最大攻击距离,攻击优势指标定义为

$$a_s = \frac{2}{1 + R/D_{\max}(q)} \quad (11)$$

从 $a_s(\cdot)$ 可以看出, R 越小, a_s 越大。 $R = D_{\max}(q)$ 时, $a_s = 1$ 。载机对不同进入角目标的最大攻击距离通过 $D_{\max}(q)$ 引入, $D_{\max}(q)$ 由导弹攻击区的拟合函数实时计算得到^[10-11]。

3 机动决策的最优控制模型

机动决策问题可建模为如下最优控制问题

$$J(u) = \int_{t_0}^{t_f} L(x, u, t) dt + \varphi(x_f, t_f) \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \dot{x} = f(x, u, t), x(t_0) = x_0$$

$$g(x, u, \dot{u}, \ddot{u}) \leq 0$$

$$h(x_f) = 0$$

其中: $J(u)$ 为性能指标; $\dot{x} = f(x, u, t), x(t_0) = x_0$ 为系统状态方程; $g(x, u, \dot{u}, \ddot{u}) \leq 0$ 为控制约束; $h(x_f) = 0$ 为时间边界条件; t_0 和 x_0 分别为初始时间和初始状态; t_f 和 x_f 分别为终端时刻和终端状态; u 为系统控制量。

3.1 系统状态方程

系统状态向量记为 $x = [x_F, x_T]^T$, x_F 和 x_T 分别表示载机和目标在惯性坐标系下的运动状态向量。

为了描述载机和目标的相对运动,设 $x_k = [x_k, y_k, v_{xk}, v_{yk}]^T$, 下标 $k = \{F, T\}$ 分别表示载机和目标。其中: (x_k, y_k) 为战斗机在惯性坐标系下的位置; v_{xk}, v_{yk} 分别为战斗机在惯性坐标系下的速度分量。

目标运动状态 x_T 通过我机雷达测量并经过滤波处理后得到,目标运动状态方程表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_T = v_T \cdot \cos \chi_T \\ \dot{y}_T = v_T \cdot \sin \chi_T \\ \dot{v}_T = a_T \end{cases} \quad (13)$$

其中: v_T 为目标速度; χ_T 为目标航向角; a_T 为目标机动加速度。

则载机的运动方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_F = v_F \cdot \cos \chi_F \\ \dot{y}_F = v_F \cdot \sin \chi_F \\ \dot{v}_F = a_F \end{cases} \quad (14)$$

其中: v_F 为战斗机速度; χ_F 为战斗机航向角; a_F 为机动

加速度。

为了描述载机和目标的相对态势,取相对坐标,载机和目标的相对运动参数为

$$\begin{cases} x = x_t - x_f \\ y = y_t - y_f \\ v_x = v_t - v_f \end{cases} \quad (15)$$

则载机和目标的相对运动状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{x}_t - \dot{x}_f = v_t \cdot \cos \chi_t - v_f \cdot \cos \chi_f \\ \dot{y} = \dot{y}_t - \dot{y}_f = v_t \cdot \sin \chi_t - v_f \cdot \sin \chi_f \\ \dot{v}_x = \dot{v}_t - \dot{v}_f = a_t - a_f \end{cases} \quad (16)$$

载机和目标之间的相对态势关系为

$$\begin{cases} R = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \varphi = \arctan(x/y) \\ q = \pi - \chi_f - \chi_t - \varphi \end{cases} \quad (17)$$

得到载机和目标的相对态势后,即可根据优势指标函数求得载机的战术优势值 $E(R, \varphi, q)$ 。

3.2 控制向量及控制约束

机动决策是通过控制载机和目标的相对运动状态达成攻击条件。取系统控制向量为 $\mathbf{u} = [a_f, \chi_f]^T$, 其中: a_f, χ_f 分别为载机的加速度和航向角; 控制约束 $g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}) \leq 0$, 参见文献[5]。

3.3 指标函数

空战机动的目标是以最短时间达成对目标的攻击条件。所以, 机动决策的指标函数主要考虑战术优势、接敌的快速性和载机的控制损耗。

以接敌过程战术优势最大给出优势指标函数

$$J_s(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_f} E(t) dt \quad (18)$$

对于快速性, 以达成攻击条件的时间最短给出如下指标

$$J_e(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_f} dt = t_f - t_0 \quad (19)$$

其中, t_f 为终端时间, 即载机进入目标集(达成攻击态势)的时刻。

对于控制损耗, 以载机旋转角速度量来构建如下指标函数

$$J_c(\mathbf{u}) = \int_{t_0}^{t_f} \dot{\chi}_f(t) dt \quad (20)$$

其中, $\dot{\chi}_f(t)$ 为载机航向角角变率。

根据攻击优势的定义可知, 我方对目标的战术优势越大, 则目标对我方的威胁越小。综合考虑上述指标, 给出如下指标函数

$$J(\mathbf{u}) = -J_s(\mathbf{u}) + w_1 J_e(\mathbf{u}) + w_2 J_c(\mathbf{u}) \quad (21)$$

其中, w_1 和 w_2 为指标重要性加权因子, 根据决策者的决策偏好取值。

3.4 终端条件

根据目标集的定义, 终端时间 t_f 由下述时间边界条件确定

$$h(\mathbf{x}_f) = \{ \mathbf{x} | \varphi_f(t_f) \leq \varphi_f, q(t_f) \leq q_f, R(t_f) \leq R_f \} \quad (22)$$

式中: R_f, φ_f, q_f 为达成我机攻击态势的终止条件; $\varphi_f = \tilde{\vartheta}_{\max}$, 为载机导弹最大离轴发射限制的载机速度提前角; $q_f = \pi - \vartheta'_{\max}$, 为威胁规避约束下的目标最大进入角; $R_f = \tilde{D}_{\max}(\varphi_f, q_f)$, 为与 φ_f 和 q_f 有关的载机导弹最大攻击距离, 由载机火控系统给出。

4 滚动时域控制及其数值解法

4.1 滚动时域控制方法

滚动时域控制中, 载机的控制量 \mathbf{u} 的决策在离散时刻 $t_k = k\Delta t$ 进行, k 是步长计数器, Δt 是决策时间间隔。 t_k 时刻的状态记为 $\mathbf{x}(t_k)$, 在时域 $t \in [t_k, t_k + T]$ 上, 通过求解如下模型获取最优开环控制 $\mathbf{u}^*(\mathbf{x}(t_k))$

$$\tilde{J}_k(\mathbf{u}) = \int_{t_k}^{t_k+T} L(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt + V(\mathbf{x}(t_k + T), t_k + T) \quad (23)$$

$$\text{s. t. } \dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t), \mathbf{x}(t_k) = \mathbf{x}_k$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \dot{\mathbf{u}}, \ddot{\mathbf{u}}) \leq 0$$

$$h(\mathbf{x}(t_k + T)) = 0$$

式中: 积分部分等于规划时域 $T(T > \Delta t)$ 上的指标函数 J 的累积值; $V(\cdot)$ 为值函数, 用以逼近从 $t_k + T$ 时刻(状态为 $\mathbf{x}(t_k + T)$)到最终状态 \mathbf{x}_f 的最优代价。

将当前状态测量值作为初始条件, 并视为欧拉-拉格朗日型轨迹优化问题进行求解, 在线计算出最优控制解 \mathbf{u}^* , 在时域 T 内执行控制 \mathbf{u}^* , 直到系统获得新的状态测量值, 并将其作为新的初始条件。重复上述过程, 计算出下一有限时域的最优控制解, 不断反复进行直到满足要求, 便得到一组状态反馈控制律。滚动时域控制方法只要求对沿系统当前轨迹中遇到的状态求解最优控制, 避免了 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方法的维数灾问题。

4.2 近似值函数的确定

滚动时域控制中, 选择合适的值函数非常关键。对于简单的最优控制问题, 可从相对应的 HJB 偏微分方程求得, 但此问题的 HJB 方程实际上难以求解。此处给出近似值函数^[12]。

在规划时域 $t \in [t_k, t_k + T]$, 剩余飞行时间通过双方接近速度估计得出。记 v_c 为双方接近速度, 对于战术优势, 值函数为剩余时间的优势值的累积, 则

$$\tilde{J}_s(\mathbf{u}) = \int_{t_k}^{t_k+T} E(t) dt + E(t_k + T) \frac{r(t_k + T) - r_f}{v_c(t_k + T)} \quad (24)$$

对于快速性, 值函数为系统剩余运行时间, 则

$$\tilde{J}_t(\mathbf{u}) = \frac{r(t_k + T) - r_t}{v_c(t_k + T)} \quad (25)$$

对于控制损耗,值函数为剩余时间的控制损耗的累积,则

$$\tilde{J}_c(\mathbf{u}) = \int_{t_k}^{t_k+T} (\dot{\gamma}_t(t) + \dot{\chi}_t(t)) dt + (\dot{\chi}_t(t_k + T) + \dot{\chi}_t(t_k + T)) \frac{r(t_k + T) - r_t}{v_c(t_k + T)} \quad (26)$$

综上,基于滚动时域控制的指标函数即为

$$\hat{J}(\mathbf{u}) = -\hat{J}_s(\mathbf{u}) + w_1 \hat{J}_1(\mathbf{u}) + w_2 \hat{J}_c(\mathbf{u}). \quad (27)$$

4.3 RHC 的数值解法

最优控制问题的一般解法是,将最优控制问题转化为参数最优化问题,再采用非线性规划求解。本文采用一种直接多重打靶的参数化方法将上述最优控制问题转化为非线性规划(NLP)问题。首先,离散化时间 $t_k = t_k^0 < t_k^1 < \dots < t_k^N = t_k + T$,并参数化载机控制量 $\mathbf{u}(t_k^i) = \mathbf{u}_i, i = 0, \dots, N$ 。为减小问题的规模,令 $t_k^{i+1} - t_k^i = \Delta t + qi\Delta t, i = 0, \dots, N - 1$,其中, q 决定时间步长的增长率。转换后的NLP问题即为如下最小化目标函数

$$F(\mathbf{u}_0, \dots, \mathbf{u}_{N-1}) = \sum_{i=0}^{N-1} L(\bar{\mathbf{x}}_i, \mathbf{u}_i, t_k^i)(t_k^{i+1} - t_k^i) + V(\bar{\mathbf{x}}_N, t_k^N) \quad (28)$$

$$\text{s. t. } g(\bar{\mathbf{x}}_i, \mathbf{u}_i, \dot{\mathbf{u}}_i, \ddot{\mathbf{u}}_i) \leq 0, \quad i = 0, \dots, N$$

$$h(\bar{\mathbf{x}}_N) = 0$$

给定控制向量 \mathbf{u}_i 和初始状态 $\bar{\mathbf{x}}_i(\bar{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{x}_0)$, t_k^{i+1} 时刻的系统状态 $\bar{\mathbf{x}}_{i+1}$ 即通过状态方程的一步时间积分得到,采用 SNOPT 工具箱求解。

5 仿真分析

为了验证 RHC 机动决策算法的有效性,根据模型数值求解方法进行仿真,分别考察目标不机动和目标机动对抗两种情况,仿真初始条件如表 1 所示。

表 1 仿真初始条件

Table 1 Initial conditions for simulation

$x_1(0)/\text{km}$	$y_1(0)/\text{km}$	$v_1(0)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$a_1(0)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$\chi_1(0)/(^{\circ})$	w_1
80	60	300	0	-100	0.8
$x_f(0)/\text{km}$	$y_f(0)/\text{km}$	$v_f(0)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$a_f(0)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$\chi_f(0)/(^{\circ})$	w_2
0	0	300	0	30	0.2

图 3 和图 4 分别为目标不机动对抗和机动对抗下的仿真结果。“*”和“Δ”分别为航迹起点和终点。由图 3 可以看出,在目标不进行机动对抗的情形下,载机采用基于 RHC 的机动决策能够在规避目标威胁的情形下迅速达成对目标的攻击条件,载机的战术优势值迅速增加。如图 4 所示,在目标进行机动对抗时,载机同样能够在规避目标威胁下最终达成攻击条件,其

战术优势值变化有一定的波动,但总体变化是递增的。

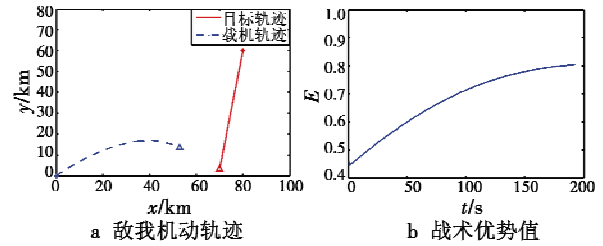


图 3 目标不对抗下的机动决策

Fig. 3 Maneuver decision under non-confrontation

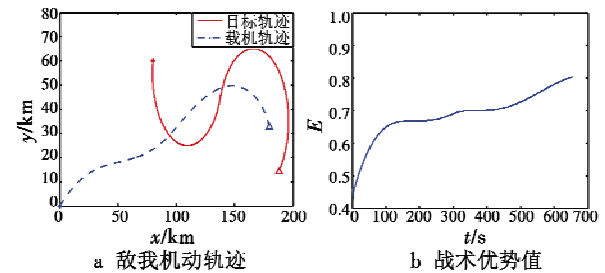


图 4 目标对抗下的机动决策

Fig. 4 Maneuver decision under confrontation

6 结论

本文采用滚动时域控制方法对战斗机机动决策问题进行了建模研究。在综合考虑作战态势和战斗机的作战能力的基础上,给出了机动决策的目标集,构建了综合考虑战术优势、机动时间和控制损耗的决策指标函数,并采用 RHC 给出了简单有效的数值求解方法。最后对模型进行了仿真实验,结果表明,本文建立的模型能够实现合理有效的机动决策。

现代空战对抗日益激烈,涉及因素众多、态势复杂多变,机动决策需要在综合考虑战斗机的探测能力、武器性能、电子战能力、机动能力和隐身能力等各方面因素的基础上,建立更加精确的机动目标集和指标函数,以获得符合空战实际的有效决策,这也是本文下一步的研究方向。

参考文献

[1] 魏强,周德云. 基于专家系统的无人战斗机智能决策系统[J]. 火力与指挥控制,2007,32(2):115-119.
 [2] 钟友武,柳嘉润,杨凌宇. 自主近距空战中机动动作库及其综合控制系统[J]. 航空学报,2008,29(s1):114-121.
 [3] 徐自祥. 微分对策理论及其在作战指挥中的应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
 [4] 钟麟,佟明安,钟卫,等. 多级影响图在空战机动决策中的应用[J]. 系统工程理论与实践,2006(10):137-141.

(下转第 29 页)

因此,各网络同步时间: $T_1 > T_3 > T_2$ 。对 NET_1 , NET_2 , NET_3 的同步效率综合分析如图4所示,在现有作战指挥网络情况下,在作战允许调整时间的约束下,网络迅速调整联接关系或转移决策目标,将决策目标节点促成网络中最重要节点,提高目标节点对网络资源的控制能力,有利于提升作战决策同步性能,这便是网络中心作战的本质所在。

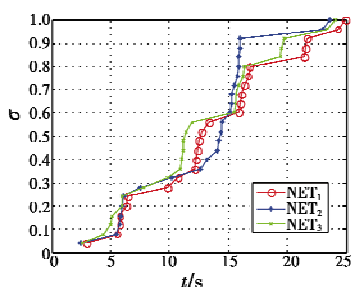


图4 作战决策同步效率

Fig. 4 Efficiency of decision-making synchronization

4 总结

本文从时间角度考虑,在分析和理解作战决策同步的基础上,建立面向时间的时滞耦合决策同步模型。通过模型的分析与验证可知,该模型较好地解决了沟通策略不合理和沟通指标不明确的问题,并在作战允许调整时间约束下,提出改变网络结构或转移目标节点来加速同步时间,更加符合作战需求。但对实例作战允许调整时间和网络联接所消耗时间的确定,以及对于存在一定沟通误差的不完全同步(如 $x_i \in [0.95, 1]$)策略研究将是下一步研究工作。

参考文献

- [1] BUTLER J R. Network Centric Warfare (NCW): The mechanism for change [R]. Marine Corps Univ, 2003.
 - [2] CARSKA J, AIBERTS D. Network centric operations conceptual framework (Version 2.0) [R]. Washington D C, 2004.
 - [3] 解放军军事科学院. 中国人民解放军军语 [M]. 北京: 军事科学出版社, 1997.
 - [4] 贾华杰, 鲜明, 陈永光. 网络中心战及其新技术 [J]. 国防科技, 2011, 32(4): 44-49.
 - [5] 李德毅, 王新政, 胡钢锋. 网络化战争与复杂网络 [J]. 中国军事科学, 2006, 3(19): 111-119.
 - [6] 王斌. 基于复杂网络的作战同步建模研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
 - [7] 鲍鲜鲲. 基于复杂网络的作战同步建模与分析 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
 - [8] 王林, 张婧婧. 复杂网络的中心化 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2006, 1(3): 13-20.
 - [9] 赵毅寰, 王祖林, 郑晶, 等. 利用重要性贡献矩阵确定通信网中最重要节点 [J]. 北京航空航天大学学报, 2009, 9(35): 1076-1079.
 - [10] WU J, TANT Yuejin. Finding the most vital node by node contraction in communication network [J]. IEEE Trans on Communications, Circuits and Systems, 2005, 2: 1282-1286.
 - [11] 姜军. 可执行体系结构及 DoDAF 的可执行化方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
 - [12] 王欣, 姚佩阳, 周翔翔, 等. 指挥信息系统网络信息传输能力评估 [J]. 计算机应用, 2011, 31(8): 2033-2036.
-
- (上接第24页)
- [5] VIRTANEN K, KARELAHII J, RAIKIO T. Modeling air combat by a moving horizon influence diagram game [J]. Journal of guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(5): 9-10.
 - [6] 雍恩米, 陈磊, 唐国金. 飞行器轨迹优化数值方法综述 [J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 396-406.
 - [7] XU B, KURDILA A, STILWELL D J. Hybrid receding horizon control method for path planning in uncertain environments [C]//The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems October 11-15, 2009: 4887-4892.
 - [8] 吴海文, 刁军, 沈春林, 等. 时间最优飞机追踪导引律研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(9): 1268-1271.
 - [9] 王凯, 李望西, 轩永波. 基于 BP 神经网络的空空攻击区解算及其仿真 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(1): 75-78.
 - [10] 杜昌平, 周德云, 江爱伟. 一种空空导弹可攻击区快速算法 [J]. 西北工业大学学报, 2006, 24(6): 682-686.
 - [11] 张平, 方洋旺, 金冲, 等. 空空导弹攻击区实时解算的新方法 [J]. 弹道学报, 2010, 22(4): 11-15.
 - [12] YOSHIOKA Y, HASHIMOTO T, OHTSUKA T. A numerical solution method to receding horizon control for nonlinear diffusion systems [C]//SICE Annual Conference 2010, August 18-21, 2010: 1092-1095.