

# 无人作战飞机空战自主机动决策研究

郭 昊, 周德云, 张 堃  
(西北工业大学, 西安 710072)

**摘 要:** 针对无人作战飞机自主空战的要求, 通过空战机动方式的分析, 提出一种基于风险型决策的空战自主机动决策算法。以对策论为基础, 构建空战机动攻击阶段的对策模型, 通过模糊决策分析找出最优机动策略。就不同条件下的实例进行仿真, 仿真结果表明, 该算法考虑空战机动决策的主动性和风险性, 体现空战过程的对抗性, 符合空战实际情况。

**关键词:** 无人作战飞机; 空战; 自主机动决策; 对策论; 模糊决策; 风险型决策

中图分类号: V271.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2010)08-0028-05

## Study on UCAV Autonomous Air Combat Maneuvering Decision-Making

GUO Hao, ZHOU Deyun, ZHANG Kun

(Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Considering the requirements to UCAV autonomous air combat, a method for autonomous air combat maneuvering decision-making based on risk type decision was proposed by analyzing the maneuvering strategy. Based on game theory, a model for air combat maneuvering decision-making was established. Then the optimal maneuvering strategy was obtained through fuzzy decision analysis. Simulations of maneuvering decision-making under different conditions were carried out. The result showed that the algorithm takes into account of the initiative and risk in maneuvering decision making, and reflects the antagonism of air combat, which is in accordance with the actual situation.

**Key words:** UCAV; air combat; autonomous maneuvering decision-making; game theory; fuzzy decision; risk type decision

## 0 引言

目前, 无人机已成为航空技术的重要发展方向, 无人作战飞机更是处于研究的前沿。随着航电火控技术、通信与导航技术和先进制导武器的发展, 无人作战飞机将逐步承担起包括综合打击、对地火力压制等作战任务, 甚至参与制空权的夺取。能够在复杂的空战环境下进行自主空战决策是无人作战飞机进行空战的关键技术之一。在空战最为激烈的机动攻击阶段, 无人作战飞机应根据空战态势及时抢占并保持有利位置, 寻机歼敌, 保全自己。自主机动决策是自主空战决策的核心内容。在空战过程中, 交战双方是一个动态

的对抗过程, 机动策略的选择具有主动性、目的性和风险性<sup>[1]</sup>。目前, 对机动策略的研究常用的方法有微分对策法、矩阵对策法、人工智能法等<sup>[2]</sup>, 但这些方法都未考虑决策过程的风险性。本文以对策论为基础, 研究基于风险型决策的空战自主机动策略, 并对不同条件下的实例进行仿真。

## 1 空战自主机动决策模型

在一对一空战机动攻击阶段, 交战双方的对抗过程可以看作是一个有限二人零和对策过程。根据对策论的知识, 构建空战机动攻击阶段的对策模型。模型包括局中人、策略集和支付等3个要素。

局中人为我方攻击机和敌方目标机。策略集以常用空战操纵方式为基础, 进而设计提出的7种基本机动方式<sup>[3-4]</sup>, 包括最大加速、最大减速、最大过载爬升、最大过载俯冲、最大过载右转、最大过载左转、保持稳

收稿日期: 2009-09-08

修回日期: 2009-12-17

基金项目: 航空科学基金(20080553017)

作者简介: 郭 昊(1984—), 男, 北京人, 硕士生, 研究方向为先进控制理论及应用。

定飞行。通过实时进行机动选择, 由此 7 种机动方式组合出多种机动动作。在交战双方策略集选定以后, 就可构造出我方攻击机的支付矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{17} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{27} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{71} & s_{72} & \cdots & s_{77} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$S_{ij}$  为针对目标机执行第  $j$  种机动策略, 攻击机选择第  $i$  种机动策略与之进行对抗时, 攻击机的赢得值。赢得值越大, 表示攻击机优势越大, 损失越小, 目标机优势越小, 损失越大。

## 2 空战态势评估函数

支付矩阵中的赢得值是以空战态势为依据, 通过依次分别预测一段时间后, 交战双方执行 7 种机动方式所达到的状态, 并计算各状态的评估函数来实现<sup>[5]</sup>。本文采用的空战态势评估函数主要由交战双方的角度、距离、接近速度、相对高度及武器性能等因素决定。

### 2.1 角度跟踪优势函数

角度跟踪优势函数为

$$S_{\alpha} = \frac{|q_R| + |q_B|}{360^\circ} \quad (2)$$

式中:  $q_R$  为攻击机 R 速度矢量与目标线夹角;  $q_B$  为目标机 B 速度矢量与目标线夹角。

### 2.2 接近速度优势函数

接近速度优势函数为

$$S_{V_c} = 0.5 + \text{sign}(S_{\alpha} - 0.5) \cdot \frac{1}{\pi} \arctan\left(\frac{V_c}{100}\right) \quad (3)$$

式中:  $V_c$  为攻击机 R 与目标机 B 的接近速度。

### 2.3 高度优势函数

高度优势函数为

$$S_h = \begin{cases} e^{-\left(\frac{h-h_X}{\sigma_{h_X}}\right)^2}, & h \leq h_X \\ 1, & h > h_X \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $h$  为攻击机与目标机的相对高度差;  $h_X$  为门限高度差, 其值随空战形式的不同而变化, 可由决策者根据经验设定;  $\sigma_{h_X} = 1.2h_X$ 。

### 2.4 攻击优势函数

现代空战武器主要以各型空空导弹为主, 对于全向空空导弹来讲, 在目标周围存在一可攻击区, 只有攻击机进入该区内, 且目标机处于攻击机有效截获区时方可进行攻击<sup>[6]</sup>, 即攻击机应满足:

$$\begin{cases} |\nu_R| \leq \Delta\varphi_s \cap |\mu_R| \leq \Delta\varphi_c \\ R_{\min} \leq r \leq R_{\max} \\ D_{\min} \leq r \leq D_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\nu_R$  为目标方位角;  $\mu_R$  为目标俯仰角;  $\Delta\varphi_s$  为攻击机雷达水平扫描范围;  $\Delta\varphi_c$  为攻击机雷达垂直扫描范围;  $R_{\min}$ ,  $R_{\max}$  为导弹最小允许发射距离和最大允许发射距离;  $D_{\min}$ ,  $D_{\max}$  为雷达最小截获距离和最大截获距离。一般总有  $R_{\max} < D_{\max}$ ,  $R_{\min} > D_{\min}$ , 因而只需满足式 (5) 的前两式即可。当相对距离  $r \gg R_{\max}$  时, 攻击机 R 远离目标机 B 的攻击区, 可以认为距离优势很小; 当  $r$  逐渐减小, 从而靠近  $R_{\max}$  时, 距离优势随之增大; 当  $R_{\min} \leq r \leq R_{\max}$  时, R 机处于 B 机的可攻击区内, 可认为距离优势很大; 当  $r$  进一步减小, 使得  $r < R_{\min}$  时, R 机出了 B 机的可攻击区, 距离优势减小。因此, 构造距离优势函数:

$$S_r = e^{-\left(\frac{r-R_0}{\sigma_r}\right)^2} \quad (6)$$

式中:  $R_0 = (R_{\max} + R_{\min})/2$ ;  $\sigma_r = 2(R_{\max} - R_{\min})$ 。

同理可构造截获优势函数:

$$S_c = e^{-\left[\left(\frac{\nu_R}{\sigma_s}\right)^2 + \left(\frac{\mu_R}{\sigma_c}\right)^2\right]} \quad (7)$$

式中:  $\sigma_s = 2.5\Delta\varphi_s$ ;  $\sigma_c = 2.5\Delta\varphi_c$ 。从而, 可定义攻击优势函数:

$$S_{At} = S_r S_c \quad (8)$$

### 2.5 总的态势评估函数

空战态势评估函数是决策者选择机动策略的依据, 不同的空战形式, 影响空战态势的因素有所不同。在近距格斗中, 空战双方对抗激烈, 机动转换迅速, 机动目的以摆脱敌方瞄准跟踪、抢占有利攻击位置为主, 决策者应综合考虑角度、距离、接近速度、高度及武器性能等对空战态势的影响。与近距格斗相比, 在超视距空战中, 交战双方大都在彼此的前半球进行对射攻击, 机动目的以保持对敌方的瞄准跟踪、调整姿态满足武器发射条件为主, 这在一定程度上限制了彼此的角度优势的大小, 因此决策者需着重考虑距离、高度和武器性能的影响。综合考虑交战双方的角度、距离、接近速度、相对高度、武器性能以及空战形式等因素, 则攻击机和目标机分别采取第  $i$  种机动和第  $j$  种机动进行对抗后的总的空战态势评估函数, 即攻击机的赢得值为

$$S_{ij} = w_1 S_{\alpha} S_{V_c} + w_2 S_h + w_3 S_{At} \quad (9)$$

式中:  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  为各优势函数的权重, 其值可根据当前空战形式以及决策者的经验、偏好确定。计算得到赢得值后, 就可构造攻击机支付矩阵  $S$ 。

## 3 基于风险型决策的自主机动策略

空战是一种在冲突环境下的激烈对抗过程, 机动策略的选择通常采用对策论方法, 以找出“稳定解”或“平衡解”。这样的结果比较保守, 本文将冲突局势下的双边对策问题, 转变为单边风险决策问题, 并通过模

模糊决策方法对其进行分析求解,找出最优对抗策略。

### 3.1 风险型决策矩阵

风险型决策是指决策者在决策环境不是完全确定,但对各个状态发生的概率已知的情况下所作出的决策<sup>[7]</sup>。能否准确预测当前时刻交战双方执行各种机动策略的概率是影响机动决策有效性的关键因素之一。本文通过在每一决策时刻依次分别预测一段时间后交战双方执行 7 种机动策略所达到的状态,确定当前时刻交战双方执行各种机动策略的概率。

设  $\Gamma_R = (r_1, r_2, \dots, r_7)$  为攻击机 R 的机动策略集,  $\Gamma_B = (b_1, b_2, \dots, b_7)$  为目标机 B 的机动策略集。根据第 1、第 2 节的分析,可确定攻击机 R 对目标机 B 的机动决策矩阵  $S = (s_{ij})_{7 \times 7}$ 。

设  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_7)$  为攻击机 R 采取 7 种机动策略的概率向量,则有:

$$y_i = \sum_{j=1}^7 s_{ij} \quad (10)$$

$$y_i = y_i / \sum_{n=1}^7 y_n \quad (11)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, 7$ 。

同理,设  $X = (x_1, x_2, \dots, x_7)$  为目标机 B 采取 7 种机动策略的概率向量,则有:

$$\beta_j = \sum_{i=1}^7 s_{ij} \quad (12)$$

$$\hat{x}_j = 1 - \beta_j / \sum_{k=1}^7 \beta_k \quad (13)$$

$$x_j = \hat{x}_j / \sum_{k=1}^7 \hat{x}_k \quad (14)$$

式中:  $j = 1, 2, \dots, 7$ 。

根据  $\{S, Y\}$ , 可建立攻击机 R 对目标机 B 的风险型机动决策矩阵<sup>[8]</sup>:

$$A = \begin{bmatrix} y_1 s_{11} & y_1 s_{12} & \dots & y_1 s_{17} \\ y_2 s_{21} & y_2 s_{22} & \dots & y_2 s_{27} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_7 s_{71} & y_7 s_{72} & \dots & y_7 s_{77} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中:  $y_i s_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, 7$  为针对目标机执行第  $j$  种机动策略,攻击机选择第  $i$  种机动策略与之进行对抗时,攻击机所得的风险收益。

### 3.2 风险型决策方法

在建立攻击机 R 对目标机 B 的风险型机动决策矩阵  $A = (a_{ij})_{7 \times 7}$  的基础上,令:

$$\xi_j(\min) = \min_{1 \leq i \leq 7} \{a_{ij} = y_i s_{ij}\} \quad (16)$$

$$\xi_j(\max) = \max_{1 \leq i \leq 7} \{a_{ij} = y_i s_{ij}\} \quad (17)$$

式中:  $j = 1, 2, \dots, 7$ 。定义相对偏差为

$$\mu_{ij} = \frac{a_{ij} - \xi_j(\min)}{\xi_j(\max) - \xi_j(\min)} \quad (18)$$

于是得到由相对偏差值构成的模糊决策矩阵  $\Delta = (\mu_{ij})_{7 \times 7}$ 。采用最大隶属度偏差法<sup>[9]</sup>可确定攻击机 R 执行各种机动策略的相对风险收益值为

$$E_i = 7 \times \left( \sum_{j=1}^7 [x_j (\mu_{ij} - b_j)]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

式中:  $b_j = \min_{1 \leq i \leq 7} (\mu_{ij})$ 。攻击机 R 的最优机动策略应满足:

$$E_{i^*} = \max \{E_i, 1 \leq i \leq 7\} \quad (20)$$

则攻击机 R 的最优机动策略为  $r_{i^*}$ 。

## 4 决策触发器

决策时机的确定是能否有效进行机动决策的关键因素之一。为了提高机动决策的快速性及有效性,决策触发器采用决策触发机制,决策时机根据空战实际情况确定。在决策触发器中设置一些条件,在每个采样周期都对这些条件进行判断,若有条件满足则触发一次决策<sup>[10]</sup>,决策触发条件如下所述。

1) 初始决策时刻。在空战开始时刻,即  $t = t_0$  时,应触发第一次决策。

2) 战术终止时刻。每次决策都对未来一段时间内的空战过程进行预测,以此为基础进行机动决策。因此,一次决策的有效期就是其最优空战过程的时间跨度。若实际的空战过程与上一次决策时预测的最优过程基本一致,则应在该最优过程的终止时刻  $t = t_k$  时触发新的一次决策  $t_k = t_{k-1} + \Delta T$ 。其中:  $t_{k-1}$  为上一次决策时刻;  $\Delta T$  为最优空战过程的时间跨度,即空战过程预测时间。  $\Delta T = K \Delta t_f$ ,  $\Delta t_f$  为空战积分步长,  $K$  为预测时间间隔数。根据专家经验,  $K$  主要依赖于攻击机速度矢量与目标线的夹角  $\omega$  以及攻击机与目标机距离  $r$  的变化而确定<sup>[11-12]</sup>,三者之间关系如图 1 所示。图中  $K_c$  为  $K$  的上限,  $\omega_d = 0.2\omega_c$ ,  $\omega_c$  决定曲线  $K(\omega)$  的拐点,其值可按曲线  $\omega_c(r/R_m)$  确定,  $R_m$  为武器作用范围,  $\omega_c$  的值可由经验确定。

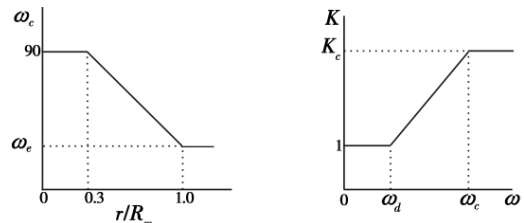


图 1 预测时间间隔数  $K$  示意图

Fig. 1 Time predicting interval  $K$

3) 本方局势危急或决策失误。若空战过程中本机高度过低、速度过低、空战状态非常不利,或实际空战态势与最近一次决策的预测结果发生显著偏差,则此时不能再采用上一次的决策结果,应触发新一次决策以便及时改出。在  $t$  时刻,若满足以下条件之一则

触发决策:

$$H(t) \leq H_{\min} \quad (21)$$

$$V(t) \leq V_{\min} \quad (22)$$

$$S(t) < S_{\min} \quad (23)$$

$$|S(t) - \hat{S}(t)| > \Delta S \quad (24)$$

式中:  $S(t)$  为空战态势评估函数值;  $H_{\min}$ ,  $V_{\min}$  及  $S_{\min}$  为高度、速度和  $S(t)$  的阈值;  $\hat{S}(t)$  为最近一次决策中对  $S(t)$  的预测值,  $\Delta S$  为阈值。

决策触发机制充分考虑了空战态势变化的快速性及不可预见性,能够根据空战实际情况灵活选择决策时机,提高了机动决策的快速性及有效性。

## 5 仿真分析

设攻击机为 A, 目标机为 T, A, T 机最大可用过载均为  $7g$ 。仿真采用北-天-东坐标系。

1) 近距 (WVR) 决策仿真。A 机初始位置 (单位: m): (1 000 5 200 2 000)。T 机初始位置 (单位: m): (6 700 4 500 5 300)。A 机初始速度  $V_A = 280$  m/s, 初始航迹俯仰角  $\theta_A = 0^\circ$ , 初始航迹偏转角  $\varphi_A = 0^\circ$ 。T 机初始速度  $V_T = 310$  m/s, 初始航迹俯仰角  $\theta_T = 9^\circ$ , 初始航迹偏转角  $\varphi_T = 45^\circ$ 。

双方在 120 s 中的机动对抗情况如图 2、图 3 所示。

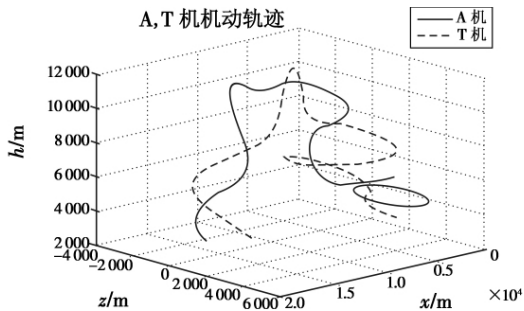


图 2 A, T 机近距对抗轨迹

Fig. 2 The trajectory of aircrafts in WVR combat

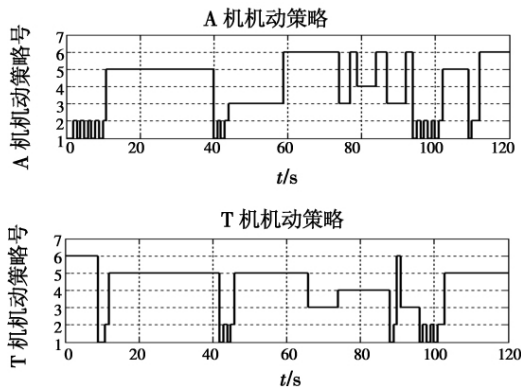


图 3 A, T 机近距对抗机动决策结果

Fig. 3 The maneuvering decision-making of aircrafts in WVR combat

2) 超视距 (BVR) 决策仿真。A 机初始位置 (单位: m): (1 000 2 500 2 000)。T 机初始位置 (单位: m): (36 000 4 500 34 300)。A 机初始速度  $V_A = 450$  m/s, 初始航迹俯仰角  $\theta_A = 0^\circ$ , 初始航迹偏转角  $\varphi_A = 0^\circ$ 。T 机初始速度  $V_T = 420$  m/s, 初始航迹俯仰角  $\theta_T = 0^\circ$ , 初始航迹偏转角  $\varphi_T = 270^\circ$ 。

双方在 25 s 中的机动对抗情况如图 4、图 5 所示。

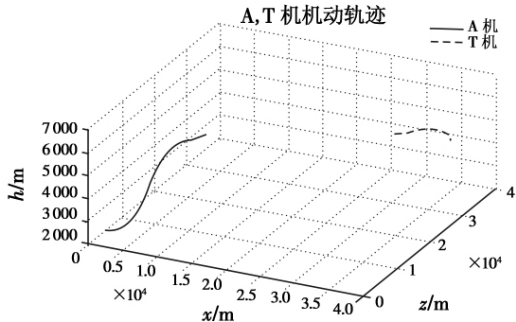


图 4 A, T 机超视距对抗轨迹

Fig. 4 The trajectory of aircrafts in BVR combat

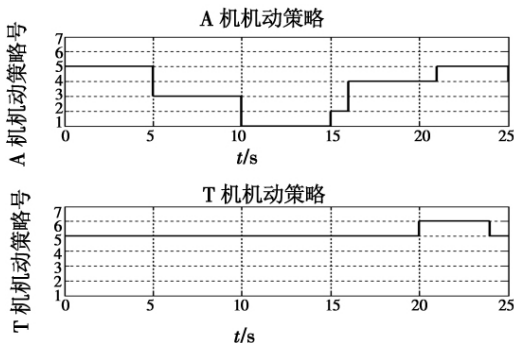


图 5 A, T 机超视距对抗机动决策结果

Fig. 5 The maneuvering decision-making of aircrafts in BVR combat

3) 仿真结果分析。图 2 描述了近距对抗过程中 A, T 机的飞行轨迹, 图 3 中的纵坐标表示 A, T 机的机动策略号, 其值依次对应于第 1 节中的 7 种基本机动方式, 它分别描述了近距对抗过程中 A, T 机在每一时刻所执行的机动策略。由图 2、图 3 可以看出, 在空战初始时刻, A 机在速度上并不占优。在空战的前 10 s, A 机不断调整速度以增大本机总体优势, T 机由于 A 机的机动对其现有的优势影响不大, 因此保持向左盘旋上升以增大角度及高度优势。在第 11 s 时, 由于 A 机相对于 T 机的角度优势降低, 因此 A 机采取水平向右盘旋以摆脱 T 机的跟踪瞄准, T 机则相应地采取向右盘旋上升, 试图进入 A 机尾后上方区域, 以获得有利的攻击位置。在第 43 s 时, A 机加速跃升以降低 T 机的高度优势, T 机则继续向右盘旋上升, 以保持对 A 机的跟踪。由此可以看出, 在近距情况下, 交战双方对空战态势变化敏感, 能够及时根据空战态势及敌方机

机动动作的转换,相应地改变机动策略,以摆脱敌方的跟踪瞄准,并抢占有利的攻击位置。

图 4 描述了超视距对抗过程中 A、T 机的飞行轨迹,图 5 分别描述了超视距对抗过程中 A、T 机在每一时刻所执行的机动策略。由图 4、图 5 可以看出,在空战的前 15 s, A 机向右转弯,加速跃升,在保持对 T 机截获跟踪的情况下,增大高度优势; T 机则水平右转盘旋以实现 A 机的截获跟踪。在 15 ~ 25 s, T 机不断调整方位角,以保持对 A 机的跟踪; A 机则不断调整本机的速度、姿态,完成对 T 机的跟踪瞄准。由此可以看出,与近距格斗相比,在超视距情况下,交战双方相距较远,空战方式以迎头对攻为主,空战态势变化平缓,交战双方对敌方机动动作的敏感程度降低,机动动作的转换主要以满足中距武器发射条件为主。

## 6 结束语

空战机动对抗是一个复杂的、动态的过程,影响机动动作选择的因素很多。本文通过对空战机动方式的分析,以对策论为基础,将空战态势作为预测机动策略概率的依据,提出了一种基于风险型决策的空战自主机动决策算法,并在不同的条件下,对空战机动攻击阶段的自主机动决策进行了仿真。仿真结果符合空战实际情况,较好地体现了空战过程的对抗性,机动决策的主动性、目的性和风险性。对无人机空战自主机动决策具有一定参考价值。

### 参 考 文 献

[1] 刘昌云,刘进忙,陈长兴. 基于风险型决策的目标机动

策略研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003(10): 99-102.

[2] 董彦非,郭基联,张恒喜. 空战机动决策方法研究[J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(2): 75-78.

[3] 钟友武,柳嘉润,杨凌宇,等. 自主近距空战中机动作库及其综合控制系统[J]. 航空学报, 2008, 29(增): 114-121.

[4] HERBST W B. Dynamics of air combat [J]. Aircraft, 1982, 20(7): 594-598.

[5] 吴云洁,宋立国,姜玉宪. 飞行综合控制系统空战决策方法[J]. 北京航空航天大学学报, 1999, 25(3): 272-274.

[6] 周德云,李锋,蒲小勃,等. 基于遗传算法的飞机战术飞行动作决策[J]. 西北工业大学学报, 2002, 20(1): 109-112.

[7] 运筹学教材编写组. 运筹学[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.

[8] 罗小明. C<sup>3</sup>I 系统攻防对抗作战决策的建模及仿真研究[J]. 指挥技术学院学报, 2001(1): 54-56.

[9] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

[10] 柳嘉润,钟友武,张磊,等. 自主空战决策的试探机动方法及仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(5): 1238-1242.

[11] 王芳,姜长生. 基于风险型决策的多目标空战机动策略研究[J]. 电光与控制, 2008, 15(12): 21-26.

[12] AUSTIN F, CARBONE G, FALCO M, et al. Game theory for automated maneuvering during air-to-air combat [J]. J Guidance, 1990, 13(6): 1143-1149.

(上接第 23 页)

了几种基本的机动飞行动作。本文设计的基于 LMI 求解的鲁棒控制器有效地解决了直升机飞行控制系统包含的不确定部分和在环境干扰地情况下的机动飞行问题,有一定的现实意义。

### 参 考 文 献

[1] 张安,章敏,张旗. 直升机空战分析仿真研究[J]. 系统仿真学报, 1998, 10(2): 30-34.

[2] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[3] 姜长生,孙隆和,吴庆宪,等. 系统理论与鲁棒控制[M]. 北京: 航空工业出版社, 1998.

[4] MARRISON C, STENGEL R F. Design of Robust control systems for a hypersonic aircraft [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1998, 21(1): 58-63.

[5] LIU Yong, WU Xiaofei, ZHU J, et al. Omni-directional mobile robot controller design by trajectory linearization [C]//Proceedings of the American Control, Denver, 2003: 3423-3428.

[6] WANG Q, STENGEL R F. Robust nonlinear control of a hypersonic aircraft [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23(4): 577-585.

[7] 杨一栋. 直升机飞行控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.

[8] 绍义龙. 武装直升机对地攻击关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[9] 唐永哲. 直升机控制系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[10] 蒋新桐. 武装直升机文集[G]. 景德镇: 航空工业总公司第 602 研究所, 1996.