

## 无人机认知防碰撞系统安全边界研究

许卓凡<sup>2†</sup>, 魏瑞轩<sup>1</sup>, 周 凯<sup>1</sup>, 张启瑞<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 国防大学 联合作战学院, 河北 石家庄 050084)

**摘要:** 无人机认知防碰撞控制是借鉴人类认知智能, 建立复杂动态环境无人机防碰撞控制的新思路, 其认知决策的安全边界是系统设计的重要问题. 本文整体考虑环境威胁与无人机的相互作用关系, 建立了“认知无人机-环境系统”模型. 进而定义了系统的防碰撞稳定性, 并导出了认知无人机-环境系统的防碰撞稳定条件. 在此基础上, 通过分析防碰撞稳定的安全特征量, 解算出面向动态正向碰撞的无人机认知防碰撞系统的安全边界. 仿真实验分析了“云雀”无人机的安全边界特性和防碰撞控制要求, 并与其他方法进行了对比.

**关键词:** 无人机; 认知防碰撞系统; 防碰撞稳定性; 安全边界

**引用格式:** 许卓凡, 魏瑞轩, 周凯, 等. 无人机认知防碰撞系统安全边界研究. 控制理论与应用, 2020, 37(4): 776 – 783

DOI: 10.7641/CTA.2019.80809

## Study on safety boundary of cognitive anti-collision system for unmanned aerial vehicle

XU Zhuo-fan<sup>2†</sup>, WEI Rui-xuan<sup>1</sup>, ZHOU Kai<sup>1</sup>, ZHANG Qi-rui<sup>1</sup>

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

2. Joint Operations College, National Defense University, Shijiazhuang Hebei 050084, China)

**Abstract:** The cognitive anti-collision control method is a novel idea to build anti-collision control of UAV in complex dynamic environment by using human cognition intelligence. The safety boundary of cognitive decision-making is an important issue in system design. This paper considers the interaction between obstacles and UAVs as a whole, and establishes a “cognitive UAV-environment system” model. Furthermore, the anti-collision stability of the system is defined, and the anti-collision stability condition of the cognitive UAV-environment system is derived. On this basis, by analyzing the safety feature of anti-collision stability, the safety boundary of the UAV cognitive anti-collision system for dynamic forward collision is solved. The simulation experiment analyzes the safety boundary characteristics and anti-collision control requirements of the “Lark” UAV, and the comparison with other methods is carried out at last.

**Key words:** UAVs; cognitive anti-collision system; anti-collision stability; safety boundary

**Citation:** XU Zhuofan, WEI Ruixuan, ZHOU Kai, et al. Study on safety boundary of cognitive anti-collision system for unmanned aerial vehicle. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(4): 776 – 783

### 1 引言

近年来, 随着科学技术的进步以及低空空域的逐渐开放, 无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)相关技术迅猛发展, 在航空摄影、灾难救援、战地侦查、火力打击等民用和军用领域中都发挥着愈来愈重要的作用<sup>[1-4]</sup>. 现在, 低空环境中无人机越来越多, 低空飞行的复杂性正在不断增大, 这将会给低空飞行的安全带来巨大压力, 也会导致无人机在飞行时发生碰撞事故的风险概率逐渐增高, 如何确保无人机在复杂空域中飞行时的安全是无人机领域研究的热点问题<sup>[5-7]</sup>.

周凯针对无人机未知障碍规避问题, 将参考点航路跟踪制导法进行改进给出了一种障碍规避制导律<sup>[8]</sup>. 崔军辉采用微分对策和生存能力理论对无人机感知-规避问题进行描述和分析, 提出一个理论框架和解决方案<sup>[9]</sup>. Xu等人基于分布感知与决策框架对未知环境中无人机的避障问题提供了一种思路<sup>[10]</sup>. 陈伟锋等人针对冲突解脱方法提出了一种基于析取关系直接变换的联立求解方法, 大大提高了计算效率<sup>[11]</sup>. Luo使用扩展卡尔曼滤波算法解决了基于接收信号强度的无人机位置估计与障碍规避问题<sup>[12]</sup>. Lee等人通

收稿日期: 2018-10-19; 录用日期: 2019-09-11.

†通信作者. E-mail: 15129006715@163.com; Tel.: +86 15129006715.

本文责任编辑: 裴海龙.

国家自然科学基金项目(61573373)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61573373).

过单目视觉以及概率分布理论提出了无人机威胁探测与规避的算法, 具有更高的鲁棒性<sup>[13]</sup>. Prévost等人使用扩展卡尔曼滤波算法对三维空间内的无人机以及威胁的位置进行预测, 提出了一种基于模型预测控制的障碍规避算法<sup>[14]</sup>.

当前的防撞研究通常考虑的是较为简单的碰撞威胁环境. 为了使无人机能够适应复杂威胁环境的安全飞行, 基于人脑智能的方法受到了广泛关注, 赵欣怡等人研究了类脑智能技术在无人系统上的应用<sup>[15]</sup>. 魏瑞轩等人基于人脑认知发育特点提出了基于自主心智发育的无人机防撞控制方法<sup>[16]</sup>. Stenger等人基于Soar认知架构提出了无人机与动态环境的自主交互决策方法<sup>[17]</sup>. 认知发育是人类智能发育现象的体现, Savastano等人通过对人类智力发育特性的分析, 提出了基于心智发育的机器人决策思想, 并开展了一系列的研究<sup>[18]</sup>. 何仁珂等人受这一思想的启发, 将认知发育特性引入无人机的防撞决策, 研究了基于Skinner认知发育理论的无人机应急威胁规避方法<sup>[19]</sup>,

Zhang等人则研究了基于认知发育思想的小型无人机避障方法<sup>[20]</sup>. 倪天等人运用IDI理论, 导出了使认知无人机-环境系统防撞稳定的充要条件, 为无人机认知防撞决策的有效性提供了依据<sup>[21]</sup>. 基于上述研究, 本文从防撞稳定的角度, 着重研究分析系统的防撞安全边界问题.

## 2 认知无人机-环境系统建模

认知防撞的基本思想是无人机通过对环境威胁认知做出防撞决策, 再通过无人机飞行控制系统驱动无人机产生规避行为. 所以无人机的认知防撞控制必须整体考虑环境与无人机的相互作用. 为此, 本文首先建立认知无人机-环境系统的整体模型.

### 2.1 无人机认知防撞系统结构

不同于传统结构的无人机防撞控制系统<sup>[22]</sup>, 认知防撞系统模拟人类的认知学习机理, 针对动态突发威胁的规避问题, 通过一定的认知学习算法, 形成了从感知到规避的避障策略<sup>[19-20]</sup>. 认知防撞系统的结构如图1所示.

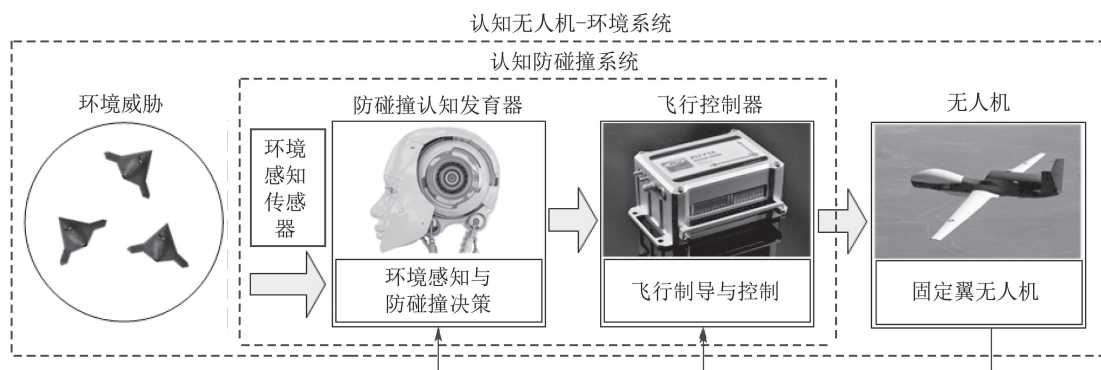


图1 认知防撞系统结构

Fig. 1 Structure of cognitive anti-collision system

认知防撞系统一般包括防撞认知发育器、飞行控制器和环境感知传感器3大部分. 其中防撞认知发育器是整个系统的核心单元, 它的作用就像人类的大脑, 主要功能是环境感知和防撞决策, 决策指令通过飞行控制器对无人机的飞行姿态进行控制, 从而完成无人机的避障动作. 与此同时, 无人机的状态信息反馈至防撞认知发育器和飞行控制器, 从而形成信息的闭环.

### 2.2 认知无人机-环境系统模型

首先建立无人机的数学模型. 根据文献[23], 配置有自驾仪的固定翼无人机可用式(1)的简化模型进行描述. 式中参数( $a_V$ ,  $a_{(\phi)}$ )分别描述了飞行速度控制系统和滚转角控制系统中存在的惯性因素. 本文为简化问题的分析, 参照飞行器空中管制与航路层的管理规定<sup>[24-25]</sup>, 设定无人机防撞行为只在固

定高度层实施, 为此, 式(1)中的高度方程在分析时可以不考虑.

$$\begin{cases} \dot{V} = a_V(V_c - V), \\ \dot{\phi} = a_{(\phi)}(\phi_c - \phi), \\ \dot{\psi} = \frac{g \tan \phi}{V}, \\ \dot{x} = V \cos \psi, \\ \dot{y} = V \sin \psi, \\ \ddot{h} = -a_h \dot{h} + a_h(h_c - h). \end{cases} \quad (1)$$

对于防撞认知发育器的建模, 考虑到人脑的认知发育过程无法使用确定性的数学模型进行描述, 但从人脑的skinner条件反射机制<sup>[26]</sup>看, 可将防撞的认知决策过程看成是一系列决策脉冲的发生过程. 为此, 将防撞认知发育器的功能用式(2)描述如下:

$$I_c = \sum_{i=1}^K A_i \delta(t_i), \quad K \in \mathbb{N}, \quad A_i \in [-d, +d], \quad (2)$$

其中:  $\delta(t_i)$ 表示单个脉冲信号;  $A_i$ 表示脉冲信号的幅值, 其取值范围为 $[-d, +d]$ , 分别表示无人机飞行控制器响应信号的最低和最高幅值;  $t_i$ 为避障机动的触发时间. 基于上述分析, 将认知无人机-环境系统(UAV environment system, UES)建模为方程组(3)描述的系统

$$\begin{cases} S_{UES} = A(t) \cup \left\{ \bigcup_{i=1}^p O_i(t) \right\}, \quad p \in \mathbb{N}, \quad t \in \mathbb{R}^+, \\ I_c = \sum_{i=1}^K K_i \delta(t_i), \quad K \in \mathbb{N}, \quad K_i \in [-g, +g], \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $A(t)$ 表示 $t$ 时刻无人机的碰撞域;  $O_i(t)$ 表示 $t$ 时刻环境中第 $i$ 个威胁的碰撞域(碰撞域表示空间中的运动体投影在水平面所形成的区域范围);  $\delta(t_i)$ 表示单个脉冲信号;  $K_i$ 表示第 $i$ 个脉冲信号的幅值, 其取值范围为 $[-g, +g]$ , 表示无人机飞行控制器响应信号的最低和最高幅值;  $t_i$ 为避障机动的触发时间. 定义无人机-环境系统的输入输出关系为

$$D(t) = f(X(t)), \quad (4)$$

其中: 输入状态向量 $X(t) = \{\phi(t), V(t)\}$ ,  $\phi(t)$ 表示 $t$ 时刻无人机的滚转角,  $V(t)$ 表示 $t$ 时刻无人机的速度, 输出量 $D(t) = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ ,  $n \in \mathbb{N}^+$ 表示 $t$ 时刻无人机与所有威胁之间距离的集合.

### 3 认知无人机-环境系统的防碰撞稳定性

从无人机防碰撞的角度看, 认知防碰撞问题的研究对象是整体的“认知无人机-环境”系统, 而非单独的无人机. 所以, 本文认为, 如果这个系统的控制能力能够使系统中包含的无人机始终保持在和威胁不发生碰撞的状态, 则可将整个系统看成是防碰撞稳定的; 反之, 该系统则处于防碰撞意义下的不稳定.

**定义 1** 防碰撞稳定: 对于方程组(3)描述的认知无人机-环境系统, 如果无人机与环境威胁的碰撞域总是不相交, 即对于任意的 $t \in \mathbb{R}^+$ , 都满足

$$A(t) \cap \left\{ \bigcup_{i=1}^p O_i(t) \right\} = \Phi, \quad p \in \mathbb{N},$$

则认为认知无人机-环境系统是防碰撞稳定的.

**定义 2** 碰撞域等效半径: 将空间中运动体的碰撞域用一个圆形区域全部包含, 这个圆形区域的半径称为碰撞域的等效半径.

在认知无人机-环境系统中, 运动体可以是无人机, 也可以是任何可能的威胁. 根据不同的任务需求, 同一个运动体的碰撞域等效半径可以有多种选

择, 其中最小的碰撞域等效半径使用运动体的最小外接圆半径<sup>[27]</sup>进行表示. 进而可以导出使认知无人机-环境系统防碰撞稳定的条件. 给出如下定理:

**定理 1** 防碰撞稳定条件. 设在认知无人机-环境系统中, 存在 $n$ 个威胁 $O_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , 无人机A在任意时刻 $t$ 与威胁 $O_i$ 的距离记为 $d_i(t)$ , 无人机和威胁的碰撞域等效半径分别记为 $R$ 和 $R_i (i = 1, 2, \dots, n)$ . 则认知无人机-环境系统防碰撞稳定的充要条件是存在 $\varepsilon > 0$ , 对于任意 $t \in \mathbb{R}^+$ , 均满足

$$\min_{i=1}^n d_i(t) \geq R + R_i + \varepsilon,$$

其中 $\varepsilon$ 称为无人机与威胁之间的安全距离裕度.

**证** 记无人机的位置向量为 $x$ , 第 $i$ 个威胁的位置向量为 $o_i$ , 令 $d(t) = \|x - o_i\|$ , 其中 $\|v\|$ 表示向量范数.

证明充分性.

设无人机在区域中的飞行时间区间为 $[0, T]$ , 函数 $d(t) = \|x - o_i\|$ 在 $t \in [0, T]$ 上连续, 根据极值定律, 存在正实数 $p \in [0, T]$ 和正实数 $q \in [0, T]$ , 对于任意的 $t \in [0, T]$ 满足 $d(p) \leq d(t) \leq d(q)$ . 即

$$\min_{i=1}^n d_i(t) = d(p), \quad (5)$$

因此有

$$d(t) \geq d(p) \geq R + R_i. \quad (6)$$

设存在 $\varepsilon > 0$ , 使得

$$d(t) = R + R_i + \varepsilon. \quad (7)$$

对于任意点 $a \in A(t)$ 和任意点 $b \in O_i(t)$ , 两点之间的距离

$$\text{Distance}(a, b) \in [\varepsilon, \varepsilon + 2R + 2R_i], \quad (8)$$

即 $\min_{i=1}^n d_i(t) = \varepsilon > 0$ .

根据定义1-2和以上推导, 对于任意 $t \in [0, T]$ , 无人机的行动域与环境威胁域不相交, 即

$$A(t) \cap \left\{ \bigcup_{i=1}^n O_i(t) \right\} = \Phi. \quad (9)$$

因此认知无人机-环境系统是防碰撞稳定的.

证明必要性.

若认知无人机-环境系统是防碰撞稳定的, 即对于任意 $t \in [0, T]$ 满足

$$A(t) \cap \left\{ \bigcup_{i=1}^n O_i(t) \right\} = \Phi, \quad (10)$$

使用反证法, 假设 $\min_{i=1}^n d_i(t) < R + R_i$ .

根据定义1-2, 存在点 $a \in A(t)$ 和点 $b \in O_i(t)$ , 点

$a$ 和点 $b$ 之间的距离

$$\text{Distance}(a, b) = 0, \quad (11)$$

即存在点 $a \in A(t)$ , 同时 $a \in O_i(t)$ .

这和条件 $A(t) \cap \{\bigcup_{i=1}^n O_i(t)\} = \Phi$ 矛盾, 因此假设不成立, 即对于任意 $t \in \mathbb{R}^+$ , 均满足 $\min_{i=1}^n d_i(t) \geq R + R_i + \varepsilon$ . 证毕.

上述关于防撞稳定性条件的分析说明, 当无人机在复杂威胁环境中飞行时, 当且仅当无人机与各个威胁之间的最小距离大于等于两者的碰撞域等效半径之和, 则可最低限度地保证无人机不会与威胁发生碰撞. 为此, 需要进一步分析使认知无人机-环境系统保持防撞稳定的安全特征量.

### 4 防撞稳定的安全特征与控制边界分析

#### 4.1 防撞稳定的安全特征量分析

设无人机和动态威胁都在相同的高度平面运动, 如图2所示, 在某一时刻, 无人机 $A$ 正以速度 $V$ 向前飞行, 当机载的环境感知传感器探测到周围存在的威胁 $C$ 时, 无人机将立刻以最小转弯半径 $R_0$ 做紧急避障机动. 由于无人机避障时最危险的情况就是正前方出现的威胁, 因此本文以这类情况作为研究对象, 即无人机的初始速度方向经过动态威胁的威胁域等效圆圆心. 记无人机与动态威胁之间的距离 $AC = d$ , 无人机 $A$ 碰撞域的等效半径为 $R_1$ , 威胁 $C$ 碰撞域的等效半径为 $R_2$ . 无人机的避障航迹为曲线 $ABF$ , 在这条航迹上, 无人机与威胁相距最近的点记为 $B$ 点, 并称此时的 $BC$ 为碰撞脱离距离. 根据定理1, 可导出如下推论.

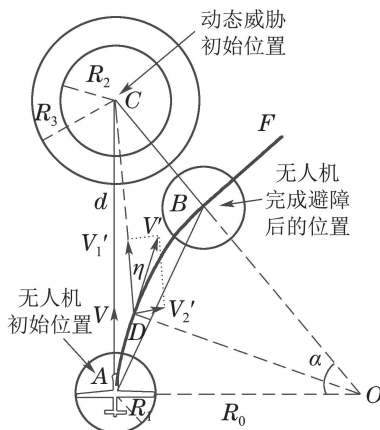


图2 无人机避障几何关系图

Fig. 2 UAV anti-collision geometric diagram

**推论 1** 对于与无人机可能发生正向碰撞的动态威胁情况, 通过控制该系统的碰撞脱离距离 $BC$ , 即可使认知无人机-环境系统保持防撞稳定状态. 也称碰撞脱离距离 $BC$ 为该系统的安全特征量.

**证** 取无人机在曲线 $ABF$ 上飞行时任意一点 $D$ , 此时无人机的速度大小不变, 方向为 $V'$ , 与 $DC$ 连线的夹角记为 $\eta$ .

将无人机的速度 $V'$ 分别分解到 $DC$ 以及和 $DC$ 垂直的方向上, 其中 $DC$ 方向的分量 $V'_1$ 表示无人机向着威胁运动的速度, 和 $DC$ 垂直方向的分量 $V'_2$ 表示无人机与威胁平行运动的速度. 可以得到如下关系式:

$$\begin{cases} V'_1 = V' \cos \eta, \\ V'_2 = V' \sin \eta. \end{cases} \quad (12)$$

随着无人机从 $A$ 点飞行至 $B$ 点, 角度 $\eta$ 从 $0^\circ$ 变化到 $90^\circ$ ,  $V'_1$ 的值从 $V$ 变化到 $0$ , 即无人机在 $B$ 点处向着威胁运动的速度分量为零, 可以判断出 $B$ 点是无人机与威胁之间的距离最小点, 即

$$\min_{t=0}^T d_1(t) = BC. \quad (13)$$

根据定理1, 碰撞脱离距离 $BC$ 为该系统的安全特征量. 接下来求解碰撞脱离距离 $BC$ .

假设动态威胁的运动方向随机变化的, 其运动速度大小恒定为 $V_1$ . 则在时间 $\tau_s$ 内, 威胁可能出现的区域可用半径为 $R_3$ 的圆表示. 图2中存在数学关系:

$$R_3 - R_2 = \tau_s V_1. \quad (14)$$

在直角 $\triangle ACO$ 中存在几何关系:

$$CO = \sqrt{d^2 + R_0^2},$$

于是可以导出无人机与威胁的碰撞脱离距离为

$$BC = \sqrt{d^2 + R_0^2} - R_0. \quad (15)$$

根据无人机在水平面内进行协调转弯的几何关系<sup>[28]</sup>, 可以求解无人机的最小转弯半径.

如图3所示, 当无人机做协调转弯的时候, 由于在水平面内运动, 因此升力在垂直方向的分量与重力相等, 即满足

$$G = mg = F_2 = F \cos \phi. \quad (16)$$

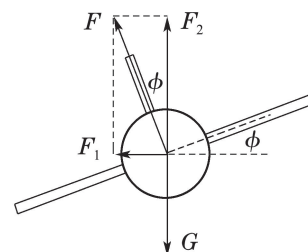


图3 无人机协调转弯受力分析

Fig. 3 Force analysis of UAV coordinated turn

在水平方向上, 由于无人机在做圆周运动, 而圆周运动的向心力由升力的分量提供

$$F_1 = F \cdot \sin \phi = \frac{mV^2}{R_0}, \quad (17)$$

其中 $R_0$ 表示无人机的转弯半径,则可以求得无人机的转弯半径为

$$R_0 = \frac{V^2}{g \tan \phi}, \quad (18)$$

其中 $\phi$ 为无人机的滚转角大小,当滚转角取最大值时,即 $\phi = \phi_{\max}$ ,无人机的转弯半径最小。证毕。

根据以上证明可知,对于认知无人机-环境系统来说,只要控制安全特征量 $BC$ 保持在合理的范围内,就可以使认知无人机-环境系统保持防碰撞稳定。基于这一推论,可以进一步分析认知无人机-环境系统的安全控制变量及其边界。

#### 4.2 认知无人机-环境系统安全边界分析

在上一节中解算出了无人机认知防碰撞问题的安全特征量 $BC$ ,若要保证无人机在整个避障机动过程中不与威胁发生碰撞,那么安全特征量 $BC$ 应不小于无人机和威胁的碰撞域等效半径之和,即

$$BC = \sqrt{d^2 + R_0^2} - R_0 \geq R_1 + R_3 = R_1 + R_2 + \tau_s V_1, \quad (19)$$

其中

$$\tau_s = \frac{1}{V} = \frac{\alpha R_0}{V} = \arctan \frac{d}{R_0} \frac{R_0}{V}. \quad (20)$$

极限情况下等式两边相等,此时无人机与威胁刚好“擦肩而过”,即无人机与威胁的碰撞域相切,因此可算出此时无人机与威胁之间的距离关系式

$$\sqrt{d_0^2 + R_0^2} - R_0 = R_1 + R_2 + \arctan\left(\frac{d_0}{R_0}\right) \frac{R_0 V_1}{V}, \quad (21)$$

其中 $d_0$ 表示极限情况下无人机与威胁的最小距离。根据上述推导,得出认知无人机-环境系统稳定的3种情况如下:

1) 对于任意的 $t \in [0, T]$ ,无人机在每一次避障决策时 $d \geq d_0$ ,这时无人机不会发生碰撞。

2) 对于任意的 $t \in [0, T]$ ,无人机在避障决策时除了 $d \geq d_0$ 的情况之外只存在 $R_3 + \frac{R_1}{2} \leq d \leq d_0$ 的情形,这时无人机有一定的概率与威胁发生碰撞。

3) 对于任意的 $t \in [0, T]$ ,在无人机避障决策时存在 $d < R_3 + \frac{R_1}{2}$ 的情形,无人机将会与威胁发生碰撞。

以上分析使作者明确了,对于无人机的防碰撞控制问题,核心的是要控制无人机与威胁的距离 $d$ ,即防碰撞稳定意义下的安全控制量。只要保证 $d$ 始终大于安全边界 $d_0$ ,就可使无人机保持安全的飞行。

## 5 仿真与分析

### 5.1 安全边界特征分析

根据式(21),认知无人机-环境系统的安全边界和无人机的速度 $V$ 、无人机的滚转角 $\phi$ 、威胁的运动速度 $V_1$ 、威胁的等效半径 $R_2$ 以及无人机的等效半径 $R_1$ 4个参数有关,分别依次改变这4个参数的值进行仿真,安全边界 $d$ 数值的变化规律如图4-7所示。

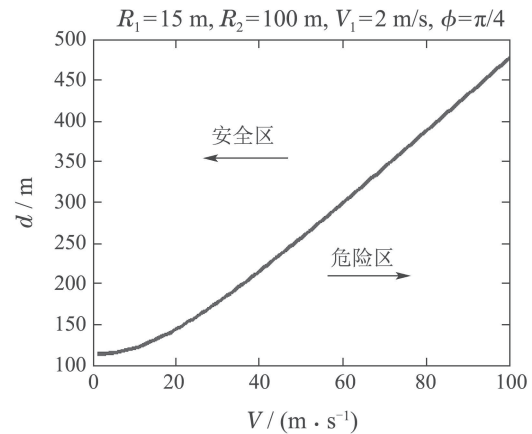


图4 速度-安全边界曲线

Fig. 4 Curve of velocity safety boundary

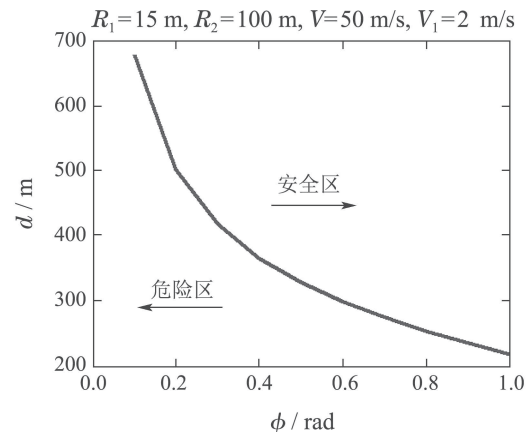


图5 滚转角-安全边界曲线

Fig. 5 Curve of roll angle safety boundary

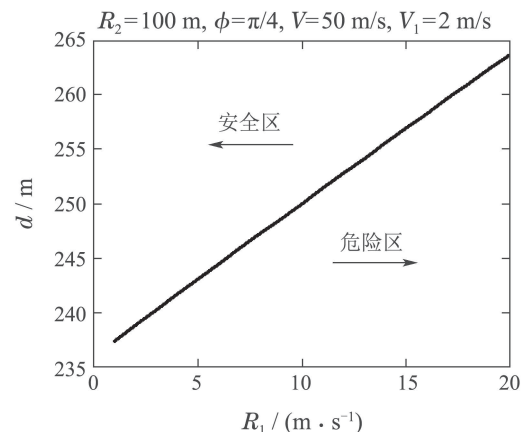


图6 无人机碰撞域等效半径-安全边界曲线

Fig. 6 Curve of UAV collision region radius safety boundary

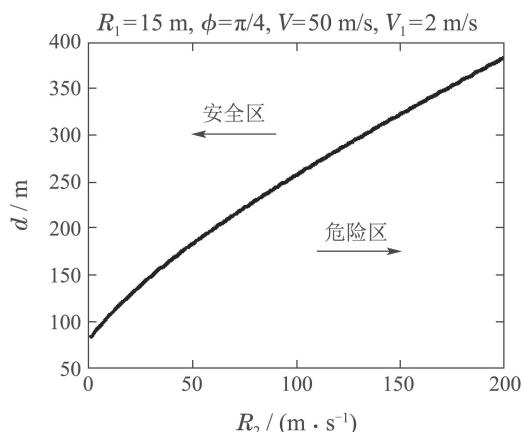


图 7 威胁碰撞域等效半径-安全边界曲线

Fig. 7 Curve of obstacle collision region radius safety boundary

在图4-7中, 4条曲线分别表示在改变无人机速度、无人机滚转角、无人机等效半径以及威胁等效半径的情况下安全边界的尺寸变化特征, 图中的箭头方向表示曲线上的点如果向左或者向右移动时对无人机防撞安全性的影响, 相应的结果如表1所示。

表 1 参数变化对防撞安全性的影响

Table 1 Influence of parameter changes on anti-collision safety

	$V$	$\phi$	$R_2$	$R_1$
参数增大	危险	安全	危险	危险
参数减小	安全	危险	安全	安全

因此对于无人机有效避障来说, 在无人机允许的性能参数范围之内, 以较小的飞行速度以及较大的滚转角进行障碍规避安全性较好, 随着飞行速度以及转弯半径的增大, 所需要的安全边界数值随之增大, 保持安全性所需要的条件愈来愈高, 这也对无人机防撞的认知发育器提出了更高的设计要求。

以上分析了无人机安全边界受不同参数变化的影响, 接下来分析在实际无人机防撞应用中, 确定参数的无人机和威胁的安全边界特征。

### 5.2 云雀无人机防撞要求

选取“云雀”无人机作为研究对象, 如图8所示, 这是一款小型常规布局的固定翼无人机, 翼展2.0 m, 机长2.2 m; 飞行速度的调节范围: 15~28 m/s; 滚转角调节范围:  $\pm 30^\circ$ 。

选取无人机与威胁的等效半径分别为2.2 m和10 m, 改变无人机的速度和滚转角, 得到的防撞安全边界可以绘成图9所示的曲面。图中曲面表示“云雀”无人机在遇到等效半径为10 m的威胁时保

持有效避障可以采用的速度以及滚转角的数值, 其中水平横纵坐标轴分别表示无人机的速度以及滚转角的变化范围, 纵坐标轴表示安全边界的数值。从图中可以分析出, 当“云雀”无人机的速度较小以及滚转角较大的情况下安全边界值的变化率较小, 而当无人机的速度较大以及滚转角较小的情况下安全边界的数值迅速增大。

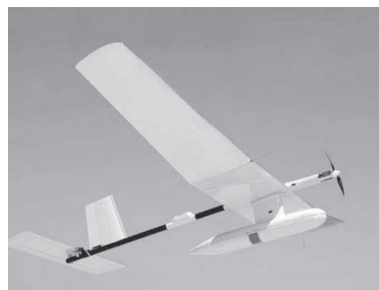


图 8 “云雀”无人机

Fig. 8 The Lark drone

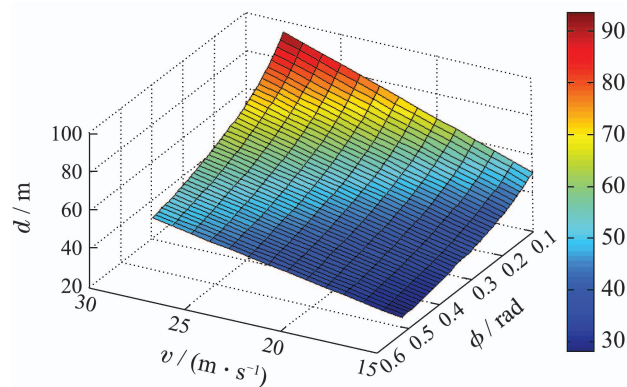


图 9 “云雀”无人机避障安全边界

Fig. 9 The anti-collision safety boundary of “Lark” UAV

由于“云雀”这类小型无人机所装备的机载传感器探测范围较小, 因此为了保证无人机防撞的有效性, 在任务需求和无人机参数限制允许的前提下应尽量选择较小的飞行速度和较大的滚转角, 这个结论对于认知防撞系统以及小型无人机控制系统的设计具有一定的理论参考价值。

下面在模拟飞行环境中对本文研究内容进行试验验证。

假设无人机的任务空间中存在20个速度大小不变, 速度方向连续随机变化的威胁目标, 无人机的制导指令变化周期为 $\Delta t = 200 \text{ ms}$ , 既在每个周期开始时无人机自主感知所处环境信息以及自身状态并制定出相应的防撞策略, 这里使用的是本团队所研究的基于自主发育的无人机认知防撞控制算法, 主要思路是无人机通过在模拟飞行环境中自主飞行, 通过“试探”、“认知”、“学习”和“记忆”不

断地提高自身的防碰撞能力, 由于其在本文中并非主要研究内容, 因此不做详细阐述. 在无人机认知防碰撞学习的过程中, 本文所设计的安全边界特征代替人工对无人机的认知防碰撞学习起监督、指导和反馈作用.

无人机防碰撞训练期间所得到的结果如图10所示.

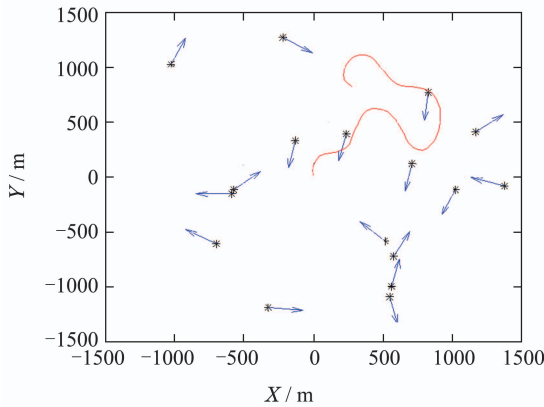


图 10 无人机的飞行轨迹

Fig. 10 Flight path of the UAV

图10中: 红色曲线所示无人机的飞行轨迹, 符号“\*”表示威胁目标, 蓝色箭头表示此时威胁目标的运动方向. 整个飞行过程中无人机的滚转角指令如图11所示.

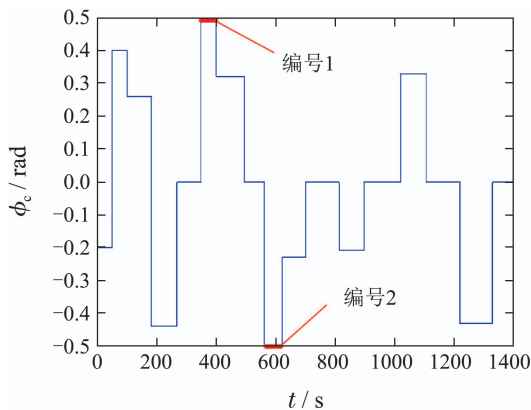


图 11 无人机的滚转角

Fig. 11 Roll angle of the UAV

图11中编号1和编号2处红色线段表示无人机在进行认知发育的学习过程中, 由于发育初期知识库的知识不完备所带来的错误判断, 这里本文所设计的方法自动判断出此时的认知无人机-环境系统的不稳定, 因此对无人机发出了满足稳定性条件的控制量, 一方面避免了无人机与威胁的碰撞, 另一方面有效指导了无人机对当时防碰撞威胁情况进行认知学习和记忆, 从而提高了无人机的自主防碰撞能力. 在实验每次进行防碰撞稳定性判断的时候, 同

时使用其他方法替代本文方法, 所得到的反馈准确率和平均反馈时间如表2所示.

表 2 实验对比

Table 2 Performance comparison

	实验1	实验2	实验3	实验4	实验5
本文方法	100%	100%	100%	100%	100%
	50 ms	66 ms	49 ms	63 ms	52 ms
势场法	100%	100%	100%	100%	100%
	129 ms	113 ms	158 ms	96 ms	102 ms
人工方法	95.3%	100%	82.9%	98.6%	92.5%
	223 ms	306 ms	198 ms	268 ms	334 ms

通过将本文方法与势场法以及人工方法相对比, 可以看出本文的方法和势场法均能够实现100%的反馈准确率, 而人工方法的反馈准确率浮动较大, 较难保证每次的反馈指令的正确性. 而平均反馈时间上, 本文方法用时最短, 人工方法耗时最长, 这与人的经验、人的反应速度等客观因素息息相关. 因此, 本文所采用方法较为简单易用, 反馈准确率高, 用时较短, 适合于代替人工及其他方法对无人机的认知防碰撞学习起监督、指导和反馈作用.

## 6 结论

本文针对无人机认知防碰撞系统的安全边界问题进行了建模、求解与仿真分析, 提出了认知无人机-环境系统及其防碰撞稳定性的概念, 进而分析了防碰撞稳定意义下的安全特征、安全控制量及其边界, 解算出了安全边界的数学描述式, 分析了影响无人机安全边界的因素, 为无人机认知防碰撞系统的设计提供了理论指导. 然而, 复杂情况下的无人机认知防碰撞问题是非常复杂的, 还有许多问题需要深入研究.

## 参考文献:

- [1] CHEN Zongji, ZHANG Rulin, ZHANG Ping, et al. Flight control: Challenges and opportunities. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(6): 703 – 710.  
(陈宗基, 张汝麟, 张平, 等. 飞行器控制面临的机遇与挑战. *自动化学报*, 2013, 39(6): 703 – 710.)
- [2] BAO Weimin. Present situation and development tendency of aerospace control techniques. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(6): 697 – 702.  
(包为民. 航天飞行器控制技术研究现状与发展趋势. *自动化学报*, 2013, 39(6): 697 – 702.)
- [3] ZHU L H, CHENG X H, YUAN F G. A 3D collision avoidance strategy for UAV with physical constraints. *Measurement*, 2016, 77: 40 – 49.
- [4] YANG X L, ALVAREZ L M, BRUGGEMANN T. A 3D collision avoidance strategy for UAVs in a non-cooperative environment. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, 70: 315 – 327.

- [5] CRUZ G C S, ENCARNACION P M M. Obstacle avoidance for unmanned aerial vehicles. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 65: 203 – 217.
- [6] VOLOVOI V, BALUEVA A, VEGA R V. Analytical risk model for automated collision avoidance systems. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(1): 359 – 363.
- [7] CETIN O, ZAGLI I, YILMAZ G. Establishing obstacle and collision free communication relay for UAVs with artificial potential fields. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, 69: 361 – 372.
- [8] WEI Ruixuan, ZHOU Kai, WANG Shulei, et al. UAV guidance law for obstacle avoidance in unknown environment. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(9): 2096 – 2101.  
(魏瑞轩, 周凯, 王树磊, 等. 面向未知环境的无人机障碍规避制导律设计. 系统工程与电子技术, 2015, 37(9): 2096 – 2101.)
- [9] CUI Junhui, WEI Ruixuan, ZHANG Xiaoqian. Dynamic decision-making method for safety region of sense and avoid system for unmanned aerial vehicle. *Control and Decision*, 2014, 29(12): 2196 – 2200.  
(崔军辉, 魏瑞轩, 张小倩. 无人机感知-规避系统安全区域动态决策方法. 控制与决策, 2014, 29(12): 2196 – 2200.)
- [10] XU Z F, WEI R X, ZHANG Q R, et al. Obstacle avoidance algorithm for UAVs in unknown environment based on distributional perception and decision making. *Proceedings of the IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*. Nanjing, China: IEEE, 2016: 1072 – 1075.
- [11] CHEN Weifeng, SHAO Zhijiang. Research on direct disjunction transcription based conflict resolution approach. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(4): 1122 – 1133.  
(陈伟锋, 邵之江. 基于析取关系直接变换的冲突解脱方法研究. 航空学报, 2014, 35(4): 1122 – 1133.)
- [12] LUO C, MCCLEAN S I, PARR G, et al. UAV position estimation and collision avoidance using the extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(6): 2749 – 2762.
- [13] LEE D J, MERRELL P, WEI Z Y, et al. Two-frame structure from-motion using optical flow probability distributions for unmanned air vehicle obstacle avoidance. *Machine Vision and Applications*, 2010, 21: 229 – 240.
- [14] PRÉVOST C G, DESBIENS A. Unmanned aerial vehicle optimal cooperative obstacle avoidance in a stochastic dynamic environment. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2011, 34(1): 29 – 43.
- [15] ZHAO Xinyi, ZONG Qun, ZHANG Ruilong, et al. Application of brain-inspired intelligence technology in unmanned vehicles. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(1): 1 – 12.  
(赵欣怡, 宗群, 张睿隆, 等. 类脑智能技术在无人系统上的应用. 控制理论与应用, 2019, 36(1): 1 – 12.)
- [16] WEI Ruixuan, ZHANG Qirui, XU Zhuofan, et al. A brain-like mechanism for developmental UAVs' collision avoidance. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(2): 175 – 182.  
(魏瑞轩, 张启瑞, 许卓凡, 等. 类脑发育无人机防碰撞控制. 控制理论与应用, 2019, 36(2): 175 – 182.)
- [17] STENGER A, FERNANDO B, HENI M. Autonomous mission planning for UAVs: A cognitive approach. *Proceedings of the Deutscher Luftund Raumfahrtkongress*. Berlin, Germany: DLRK, 2012: 1 – 10.
- [18] SAVASTANO P, NOLFI S. A robotic model of reaching and grasping development. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 2013, 5(4): 326 – 336.
- [19] WEI Ruixuan, HE Renke, ZHANG Qirui, et al. Skinner-based emergency collision avoidance mechanism for UAV. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(6): 620 – 624.  
(魏瑞轩, 何仁珂, 张启瑞, 等. 基于Skinner理论的无人机应急威胁规避方法. 北京理工大学学报, 2016, 36(6): 620 – 624.)
- [20] ZHANG Q R, WEI R X, HE R K, et al. Small UAVs with autonomous avoidance using humanlike thoughts. *Proceedings of the IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*. Nanjing, China: IEEE, 2016: 1080 – 1084.
- [21] WEI Ruixuan, NI Tian, ZHAO Xiaolin, et al. Collision avoidance stability of the cognitive unmanned aerial vehicle & environment system. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(9): 1453 – 1460.  
(魏瑞轩, 倪天, 赵晓林, 等. 认知无人机-环境系统的防碰撞稳定性. 控制理论与应用, 2019, 36(9): 1453 – 1460.)
- [22] CHEN Zongji, WEI Jinzhong, WANG Yingxun. UAV autonomous control levels and system structure. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(6): 1075 – 1083.  
(陈宗基, 魏金钟, 王英勋, 等. 无人机自主控制等级及其系统结构研究. 航空学报, 2011, 32(6): 1075 – 1083.)
- [23] BEARD R, KINGSTON D, QUIGLEY M. Autonomous vehicle technologies for small fixed-wing UAVs. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*, 2005, 3(2): 92 – 108.
- [24] National assembly of the PRC and Central Military Commission of the People's Republic. *General Aviation Flight Control Regulations*, 2003.  
(中华人民共和国国务院, 中华人民共和国中央军事委员会. 通用航空飞行管制条例, 2003.)
- [25] ZHANG Jun. *Modern Air Traffic Management*. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005.  
(张军. 现代空中交通管理. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.)
- [26] RUAN X G, WU X. The skinner automaton: A psychological model formalizing the theory of operant conditioning. *Science China Technological Sciences*, 2013, 56(11): 2745 – 2761.
- [27] WEI Ruixuan, XU Zhuofan, WANG Shulei, et al. Self-optimization A-Star algorithm for UAV path planning based on Laguerre diagram. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(3): 577 – 582.  
(魏瑞轩, 许卓凡, 王树磊, 等. 基于Laguerre图的自优化A-Star无人机航路规划算法. 系统工程与电子技术, 2015, 37(3): 577 – 582.)
- [28] WU Sentang, FEI Yuhua. *Flight Control System*. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2005.  
(吴森堂, 费玉华. 飞行控制系统. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.)

#### 作者简介:

**许卓凡** 博士, 目前研究方向为无人飞行器智能控制、空域管制, E-mail: 15129006715@163.com;

**魏瑞轩** 教授, 博士生导师, 研究方向为飞行器导航制导与控制, E-mail: 2731237255@qq.com;

**周凯** 博士研究生, 研究方向为无人飞行器协同控制与作战管理, E-mail: kzou@163.com;

**张启瑞** 博士研究生, 研究方向为无人飞行器协同控制与作战管理, E-mail: xianyangrui@126.com.