

## 无人机感知-规避系统安全区域动态决策方法

崔军辉<sup>1,2</sup>, 魏瑞轩<sup>1</sup>, 张小倩<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学 无人机运用工程系, 西安 710038; 2. 中国人民解放军 69220 部队, 新疆 阿克苏 842000; 3. 第二炮兵工程大学 402 教研室, 西安 710025)

**摘要:** 为了解决无人机在空域交通中的感知-规避安全性需求问题, 根据无人机的感知能力定义空域交通的安全边界, 采用微分对策和生存能力理论对感知-规避问题进行描述和分析, 提出一个理论框架和解决方案, 给出了安全区域对无人机飞行策略和制导律的影响. 只要无人机与冲突航线内的其他飞行器保持必要的间隔, 所提出的方法就可采取有效的策略减小冲突航线上的不确定边界, 并选择相应的规避决策调整航线, 避免飞行冲突.

**关键词:** 无人机; 感知-规避; 安全区域; 决策

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## Dynamic decision-making method for safety region of sense and avoid system for unmanned aerial vehicle

CUI Jun-hui<sup>1,2</sup>, WEI Rui-xuan<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-qian<sup>3</sup>

(1. UAV Application Engineering Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Unit 69220 of PLA, Aksu 842000, China; 3. Staff Room 402, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China.

Correspondent: CUI Jun-hui, E-mail: jhcui@mail.ustc.edu.cn)

**Abstract:** In order to resolve the safety requirement of unmanned aerial vehicle (UAV) sense and avoid system in the air traffic, some nested zones around the UAV according to its sensing capacity in the air traffic are defined. By using the differential game and the viability theory in this problem, the UAV sense and avoid problem based on these theory is defined and analyzed, and a theory framework and a solution scheme are proposed on the basis of the above work. As a conclusion, a flight strategy and guidance law associated with the safety zones is given. The uncertainty margin on other traffic intruder trajectories is reduced, by adopting some effective evasion maneuvers if only necessary separation with other aircrafts is held. Consequently, the flight trajectory is adjusted to avoid a flight conflict.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; sense and avoid system; safety region; decision-making

### 0 引言

随着无人机(UAV)的广泛应用,越来越多的空域被无人机占用,当无人机与有人驾驶飞机共享空域时,空中交通的安全问题将是不得不考虑并解决的问题<sup>[1]</sup>.近年来,相继报道的无人机与有人驾驶飞机相撞事件基本上都是由空域交通冲突造成的,这迫切要求无人机应该具有像有人驾驶飞机飞行员一样对空域态势的感知和判断能力.有人机驾驶员“看见并规避”的态势判断和决策生成过程对于无人机而言就是“感知-规避”技术<sup>[2]</sup>.感知-规避系统通过无人机自身携带的传感器对空域进行探测,基于数据链路或卫星与其他有人驾驶飞机、无人机及地面站通讯,自动生

成决策,应对各种威胁实时更新飞行策略,确保航线不发生冲突.

感知-规避技术是无人机自主化程度的重要标志,更为重要的是,感知-规避能力直接关系到无人机的安全控制和飞行<sup>[3]</sup>.目前,国内外对无人机感知-规避技术的研究不断深入,Shim等<sup>[4]</sup>采用模型预测控制思想,基于航迹规划预测出闯入的飞行器的运动轨迹,控制和调整无人机,使其与该飞行器保持必要的距离,避免发生碰撞,解决了这类状态受限和输入饱和的非线性动态系统的简化和计算问题,但并没有给出确切的安全边界.Ryan等<sup>[5]</sup>详细分析和比较了有人驾驶飞机与无人机感知探测和决策规避机制的异同,为感

收稿日期: 2013-09-01; 修回日期: 2014-01-19.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61105012); 航空科学基金项目(20135896027); 博士后基金面上项目(2012M512149).

作者简介: 崔军辉(1979-),男,博士生,从事无人机自主控制的研究; 魏瑞轩(1968-),男,教授,博士生导师,从事无人机编队、无人机自主控制、飞行器任务规划等研究.

知-规避技术的研究提供了一种新思路. 国内大部分研究还处于理论分析和论证阶段. 蔡志浩等<sup>[1]</sup>和张进等<sup>[6]</sup>分别从无人机全空域飞行的影响因素和空中交通管理中的复杂性分析等方面进行了定性分析, 但未给出实质的无人机感知-规避决策方法.

根据感知-规避系统能够探测到的不同安全区域范围, 在无人机周围定义一些与感知-规避相关的区域, 在此基础上, 采用微分对策和生存能力理论对感知-规避问题进行定义和分析, 给出安全区域对无人机飞行策略和制导律的影响. 如果不考虑导弹袭击或者自杀式碰撞攻击的情况, 只要无人机能够与冲突航线内的其他飞行器保持必要的间隔, 该方法就可采取有效的策略减小与冲突航线内其他飞行器的不确定边界, 并采取相应的规避决策实时调整飞行轨迹, 避免飞行冲突.

## 1 无人机感知-规避系统的动力学分析

就整个任务空域而言, 感知-规避系统动态决策和制导无人机时不仅要考虑无人机本身的姿态、速度、高度等因素, 还要预测和判断空域内其他飞行器的相应信息. 因此, 无人机感知-规避系统的动力学模型是一个包含了无人机、闯入航线的其他飞行器或障碍物在内的复杂混合系统, 其简单的系统框图如图 1 所示.

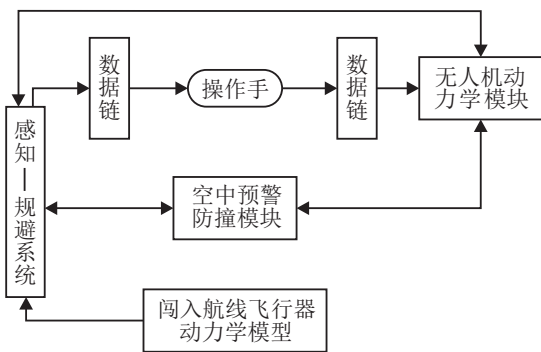


图 1 无人机感知-规避系统框图

### 1.1 无人机的动力学建模

一个好的飞行控制模型不但可以降低计算复杂

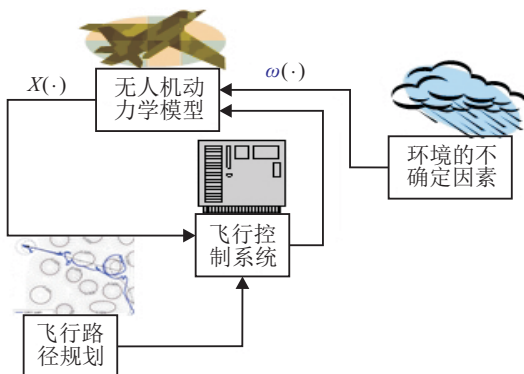


图 2 无人机动力学模型

度, 同时还要保证飞行控制的内在逻辑不会使整个系统的行为产生异常<sup>[5]</sup>. 为了预测无人机的运动轨迹和交通态势, 可以根据实际情况建立无人机的动力学模型, 本文采用 EUROCONTROL 的 base of aircraft data (BADA)<sup>[7]</sup> 无人机动力学模型 (如图 2 所示), 该模型在一定程度上具有一般性.

假设无人机的质量和空气密度都是常数, 在点质量框架下, 无人机的动力学方程可以描述为

$$\begin{bmatrix} x & y & h & V & \psi \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} V \cos(u_3) \cos(\psi) \\ V \cos(u_3) \sin(\psi) \\ V \sin(u_3) \\ -\frac{C_D S \rho}{2m} V^2 - g \sin(u_3) + \frac{1}{m} u_1 \\ \frac{C_L S \rho}{2m} V^2 \sin(u_2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

其中:  $(x, y)$  为无人机水平位置,  $\rho$  为空气密度,  $h$  为无人机飞行高度,  $\psi$  为滚转角,  $S$  为机翼的表面积,  $V$  为真空速度,  $C_L$  和  $C_D$  分别为升力系数和阻力系数,  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$  为风等对系统的不确定性影响, 推力  $u_1$ 、转弯角  $u_2$  和航迹倾斜角  $u_3$  为控制量.

结合无人机的飞行状态, 可采用分离表示法将飞行规划表示成连续航路规定好的策略, 每次对不连续状态的合并都要结合确定的反馈控制律对控制量  $u_1$ 、 $u_2$  和  $u_3$  进行控制. 而闯入航线内的其他飞行器可采用稳定平飞、匀速转弯和起飞与降落等简化模型.

### 1.2 无人机的感知模型分析

无人机感知规避系统作为一个混杂系统不仅要具有像人类飞行员一样对空域交通环境态势的判断功能, 还应该能够根据无人机本身与其他可能发生航路冲突的飞行器之间的相对运动轨迹自动生成相应的飞行控制决策, 避免冲突发生. 人类基于先验知识对航路内的交通态势进行判断, 使用非常简单的模型 (即外推) 生成相应的规避策略.

一般情况下, 飞行员采取常参量进行决策, 只要发现闯入者的飞行轨迹在期望轨迹可接受的范围之内, 就保持原来的控制量不变. 假设无人机总能稳定地探测到闯入航线内的其他飞行器, 则可以将是否改变无人机相应的飞行策略简化成只判断无人机与闯入航线内其他飞行器的相对距离是否满足空域交通中规定的安全距离即可.

## 2 安全区域的数学描述

根据感知规避问题涉及的安全、可达和生存确认 3 个方面对安全区域进行定义, 通过让无人机动态系统判断是否规避了状态空间内的威胁区域、是否达到了指定的目标、是否满足约束条件等, 决定采取什

么策略.

## 2.1 空域中安全等级区域的定义和划分

飞行安全通用规则中定义空域交通中飞行器之间的水平安全距离为 0.5 海里, 垂直安全距离为 500 英尺<sup>[8]</sup>. 感知规避系统必须具有既能提供必要的间隔距离又能保证冲突情况发生的功能, 作为感知规避结果的策略必须既遵守可通行规则, 又遵守 ATC 规定.

冲突避免定义为: 其他飞行器都保持在以无人机为中心、以  $D_r$  为半径、 $D_h$  为高度的圆柱体之外的空域内. 根据安全等级的不同对相应的交通态势区域进行状态空间描述, 这些区域的边界只与无人机的动态以及当前交通情况有关, 具体定义如下:

1)  $Z_0$  是可能发生碰撞的位置集合, 在此集合内无人机至少与一个闯入航线飞行器的水平距离小于  $D_r$  或者垂直距离小于  $D_h$ , 同时  $Z_0$  还包含无人机与地面距离小于  $D_h$  的位置集合, 此时感知规避系统必须采取相应的规避策略增大与闯入飞行器或者地面的距离.

2)  $Z_1$  是探测到的其他飞行器不能保证一直位于  $Z_0$  之外的位置集合, 由于无人机有可能动态不可控或环境中存在不确定因素,  $Z_1$  是  $Z_0$  的超集.

3)  $Z_2(T)$  是一个位置集合, 从  $Z_2(T)$  内某一位置出发, 如果在时间  $[0, T]$  内不采取策略, 飞行器将存在闯入  $Z_1$  的风险. 无论什么时候飞行器进入  $Z_2(T)$  都可能变成一个潜在的威胁, 但只要在这个集合内, 就仍然可以采取策略保证安全距离或者避免发生碰撞. 因此在飞行器进入  $Z_1$  之前, 很有必要开始采取规避策略.

4)  $Z_3(T)$  是一个位置集合, 从  $Z_3(T)$  内任意位置出发, 飞行器都不需要采取任何规避策略即能保证不会进入  $Z_1$ . 根据定义,  $Z_3(T)$  是  $Z_2(T)$  的补集.

通过上面定义, 感知规避系统可以与空域交通态势的相应区域联系起来, 即: 如果飞行器位于  $Z_3(T)$ , 则可以依照原来的飞行规划保持飞行; 一旦进入  $Z_2(T)$ , 则必须采取相应的策略以保证安全间隔; 感知规避系统必须能够防止其他飞行器进入  $Z_0$ , 同时尽可能地让其处于  $Z_1$  之外. 根据飞行器距离无人机的远近程度, 该方法可以使用不同的  $T$  值或者不同的策略集来保证无人机不与其他飞行器发生碰撞.

## 2.2 无人机运动轨迹的脉冲微分包含描述

通常, 脉冲微分包含 (IDI)<sup>[9]</sup> 既可以描述状态由常微分系统影响产生的动态系统, 也可以描述状态由阶跃响应产生的动态系统. 只需对动态作适度假设就可以用 IDI 对无人机感知-规避这种大型混杂系统问题进行描述, 为了描述策略, 借用混杂系统中的混合时

间轨迹<sup>[10]</sup>概念. IDI 用连续状态变量  $x$  描述动态系统轨迹, 状态变量  $x$  采用两个多值的函数  $F: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$  和  $R: \mathbf{R}^n \supset \text{Dom}(R) \rightarrow \mathbf{R}^n$ , 并且开集  $\Omega \subset \text{Dom}(R)$  服从如下定义.

**定义 1** 设初始条件  $x_0$  的混合时间集为  $\{I_i\}_{i=0}^N$ , 如果对于所有  $i < N$ , 有

$$\begin{cases} x_i(\tau_i') \in \text{Dom}(R), \\ x_{i+1}(\tau_{i+1}) \in R(x_i(\tau_i')). \end{cases}$$

成立, 则混合时间集上的运动趋势轨迹可以由微分包含  $\dot{x} \in F(x)$  的绝对连续解集  $S_F(\mathbf{R}^n)$  的一个序列  $\{x_i(\cdot)\}_{i=0}^N$  来定义, 将该运动趋势轨迹表示为 IDI( $F, R, \Omega$ ).

称脉冲系统  $(F, R, \Omega)$  的轨迹为函数  $x$ ,  $x$  是  $\mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^n$  的映射, 并且满足如下的运动趋势:

$$x(t) = \begin{cases} x_0, & t < \tau_0; \\ x_i(t), & t \in I_i. \end{cases} \quad (1)$$

将脉冲微分包含 IDI( $F, R, \Omega$ ) 从  $x_0$  出发的轨迹集合用  $S_{F,R,\Omega}(x_0)$  表示. 需要说明的是微分包含与常微分方程解是有对应关系的, 它们解集之间的关系可以用下面的引理给出.

**引理 1** 如果在紧凸集  $U$  上定义函数  $F(x) = \bigcup_{u \in U} f(x, u)$ , 并且  $f(x, u)$  对  $u$  是连续的、对  $x$  是李普西茨连续的, 则称常微分方程  $\dot{x} = f(x, u)$  和微分包含  $\dot{x} \in F(x)$  有相同的解集<sup>[11]</sup>.

## 2.3 对 IDI 定义轨迹的安全确认

**定理 1** 如果用  $\text{Viab}_{(F,R)}(K, C)$  表示  $K$  是  $C$  的生存核, 对于满足初始条件集合  $x_0 \in K$  的点, 只要从该点出发的状态不能到达  $C$ , 则其运动轨迹  $x(\cdot) \in S_{(F,R)}(x_0)$  能停留在  $K$  中, 即

$$\forall t \leq \inf\{s : x(s) \in C, x(t) \in K\}. \quad (2)$$

在给出定理 1 的证明之前, 先进行以下分析: 由于阶跃的存在, 当无人机进入  $\Omega$  域时, 要得到连续的轨道几乎是不可能的. 同时, 若规定系统中不允许同时出现多重阶跃, 则根据上面的定义可以将无人机的飞行轨迹看成一个没有强迫阶跃 ( $\Omega = \emptyset$ ) 的微分包含, 用 IDI( $F, R$ ) 表示. 若给定约束集  $K \subset \mathbf{R}^n$  和集合  $C \subset K$ , 则期望的目标是该 IDI 在离开  $K$  之前是否可能永远停留在  $K$  内或者达到  $C$ .

**证明** 为了保证所有初始条件在  $[0, +\infty)$  上的轨迹都存在, 需做如下假设:

1) 集值映射  $F$  是上半连续的, 并且具有非空紧凸集值和线性递增的性质;

2) 集值映射  $R$  是上半连续的, 并且具有紧集值和压缩域, 即满足  $\forall x \in \text{Dom}(R), R(x) \cap \text{Dom}(R) = \emptyset$ ;

3)  $\Omega \subset \text{Dom}(R)$ .

根据以上假设,若存在一个闭子集  $D(D \subset K)$ , 则  $\text{Viab}_{(F,R)}(K, C)$  是该闭子集中的最大元素, 因为对于所有  $x \in D$ , 有

$$\forall \pi \in \text{NP}_D(x), \inf_{y \in F(x)} \langle y, \pi \rangle \leq 0; \quad (3)$$

或者

$$R(x) \cap (D \cup C) \neq \emptyset. \quad (4)$$

其中  $\text{NP}_D(x)$  表示集合  $D$  在  $x$  处接近法线的集合. 于是有

$$\text{NP}_D(x) := \{\pi : \inf_{y \in D} \|(x + \pi) - y\| = \|\pi\|\}. \quad (5)$$

根据上面假设, 如果域  $\text{Dom}(R)$  的内部与  $K$  的交集为空, 那么在域  $\text{Dom}(R)$  的边界上必然存在一个与微分包含  $x(\cdot) \in S_{(F,R)}(x_0)$  相关联的运动趋势  $\{I_i, x_i(\cdot)\}_{i=0}^N$ , 满足下式:

$$x_i(\tau_i') = \inf\{t : x_i(t) \in \text{Dom}(R)\}. \quad (6)$$

又因为  $K$  是  $C$  的生存核, 而  $i < t < N$ , 所以有

$$\forall t \leq \inf\{s : x(s) \in C, x(t) \in K\}.$$

由此定理得证.  $\square$

需要指出的是: 如果 **IDI** 表示控制系统, 则生存核  $\text{Viab}_{(F,R)}(K, C)$  是这样一些初始位置集合, 即只要位于该集合内的 UAV 未达到期望状态  $C$ , 就总可以采取控制策略防止其进入状态干扰约束集  $K$  中; 如果 **IDI** 表示不确定系统, 则生存核  $\text{Viab}_{(F,R)}(K, C)$  所代表的是这样一些初始位置集合, 存在某种干扰, 该干扰可以阻止位于该生存核内的 UAV 到达期望状态集  $\mathbf{R}^n|K$ , 并且最终可以驱使其进入危险状态集  $C$ .

## 2.4 追逃驱动的微分策略

无人机与其他飞行器之间的态势冲突可以看作一个无显著特点的追逃问题<sup>[11]</sup>, 博弈的一方代表着相对航线上的不确定性, 用脉冲动态  $(G, P)$  来表示; 另一方代表无人机控制系统, 用脉冲动态  $(H, Q)$  来表示, 它的目标是结合机动策略来优化代价<sup>[12]</sup>. 当博弈双方的动态特性是相互独立的, 不需要先验的知识, 博弈的双方即可做出相互独立的策略进行博弈. 假设第 1 个博弈者采用策略  $y(\cdot) \in S_{G,P}(y_0)$ , 第 2 个博弈者采用策略  $z(\cdot) \in S_{H,Q}(z_0)$ , 下面给出策略的概念<sup>[11]</sup>.

**定义 2** 若  $B$  是满足初始条件  $(y_0, z_0)$  的映射,  $B : S_{(G,P)}(y_0) \rightarrow S_{H,Q}(z_0)$ , 则称  $B$  映射为 **Varaiya-Roxin** 策略.

对于任意  $\theta > 0$ , 在相应  $[t_0, t_0 + \theta]$  内轨迹集合  $S_{(G,P)}(y_0)$  中的任意轨迹  $y(\cdot)$ 、 $\tilde{y}(\cdot)$  以及与之对应的策略  $z(\cdot) = B(y(\cdot))$ 、 $\tilde{z}(\cdot) = B(\tilde{y}(\cdot))$ , 其控制集合便可以用  $(y_0, z_0)$  处的 **VR** 策略  $\mathbf{B}(y_0, z_0)$  表示.

在安全控制问题中, 用状态空间中的闭子集  $K$  代表控制方 (第 2 个博弈方) 的约束,  $C$  代表安全集合,

且  $C$  是  $K$  的闭子集, 即有  $C \subset K$ . 干扰方 (第 1 个博弈方) 试图将状态  $(y, z)$  驱逐出  $K$ , 同时又阻止该状态到达  $C$ ; 而控制方具有相反的目标需求, 即只要状态没有到达  $C$ , 就一直使它保持在  $K$  中.

## 3 安全区域计算和仿真

感知-规避系统的动态是由描述飞行控制系统动态的连续时间系统交互描述的, 通过有限状态机构成的闭环决定无人机的推力、转弯角和航向角. 在没有不确定因素的环境下, 给定的飞行规划产生确定的航线, 而不产生任何规避决策. 但是对于感知-规避这样的混杂系统, 不确定性是动态且随机的.

由前面 **IDI** 对感知-规避系统的定义, 不确定的脉冲阶跃是与飞控系统状态改变相联系的. 当一个脉冲干扰或者多个干扰的叠加合并穿越设定的门限时, 自动阶跃模型改变从而触发状态发生相应改变. 如果阶跃与初始决策策略相关, 则该跳变是被感知-规避系统所允许的.

结合前面分析中采用的无人机模型, 感知-规避系统的一个策略  $x(\cdot)$  可以写成

$$x(t) = x_{\text{norm}}(t) + \Delta_x(t), \quad \forall t \geq 0. \quad (7)$$

其中  $\Delta_x(t)$  代表对于航线的不确定贡献. 如果将受控航线的无人机动态系统表示为  $(H, Q, \Omega)$ , 不确定因素的贡献和闯入者的动态可以表示成微分包含  $\dot{y} \in G(y)$ , 结合追逃策略, 将状态空间表示成  $\mathbf{R}^n$ , 则有开集  $Z_0 \subset \mathbf{R}^n$ , 状态空间取决于每个飞行器所用的具体模型和给定场景中闯入者的数量.

### 3.1 区域 $Z_1$ 的计算

根据前文对  $Z_1$  的定义, 在作用无人机决策生成过程中, 对于第 2 个博弈方起约束的集合是  $K = \mathbf{R}^n|Z_0$ , 并且对于控制不存在安全集合, 从而

$$Z_1 = \mathbf{R}^n|\text{Disc}(\mathbf{R}^n|(Z_0 \cup \Omega), \emptyset). \quad (8)$$

式 (8) 表明只有在可以找到能保持状态永远位于  $Z_1$  之外的一个策略下才能赢得控制. 因为只能得到代表阶跃控制的离散集合, 在这种情况下, 一个策略是一个位置集合的选择, 这些位置又与决策的初始化和机动相关联. 该策略可以从判别核  $\text{Disc}(\mathbf{R}^n|(Z_0 \cup \Omega), \emptyset)$  得到.

$Z_1$  的计算是对稳定平飞、常速转弯等经典模型的挑战, 目前还没有非常有效的办法用来处理混杂非线性不确定模型. 一些学者正在探索一种由可行计算演化的方法, 这种方法没有理论上的限制, 可以用来处理维数灾难对状态空间中状态的限制, 采用简化模型计算近似值, 由于严格的策略设置, 可以保证得到近似的典型值.

假设无人机和闯入的其他飞行器都以常速保持

平飞, 可变参量只有目标航线和不确定性航线之间的夹角, 而航线的不确定性是由闯入者关于无人机的速度和航向的量测所引起的, 这里只考虑在给定半径的情况下采用左(右)转弯引起的平面冲突和平面策略.

图 3 是在给定水平距离  $D_r = 0.5 \text{ nm}$  条件下对  $Z_1$  的仿真结果, 仿真中设置的几个常参量分为: 闯入飞行器的速度为 400 节; 无人机速度为 160 节; 无人机最大转弯角为  $18^\circ$ . 图中虚线区域显示的是在闯入者和无人机速度都已知的前提下, 闯入飞行器从不同方向进入无人机航线时的位置集合; 实线区域显示的  $Z_1$  是无人机与闯入者朝向夹角为  $90^\circ$  时的情况.

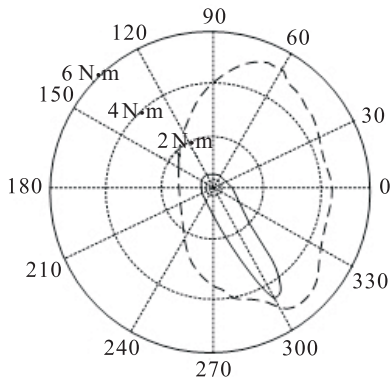


图 3  $Z_1$  区域的仿真结果

### 3.2 区域 $Z_2$ 和 $Z_3$ 的计算

由  $Z_2(T)$  和  $Z_3(T)$  的关系可知,  $Z_3(T)$  是  $Z_2(T)$  的补集, 即

$$Z_2(T) = \mathbf{R}^n \setminus Z_3(T). \quad (9)$$

如果由  $Z_3$  来计算  $Z_2$ , 则计算过程可以不涉及任何控制策略, 这样比由  $Z_1$  直接计算和推导要简单得多. 为此, 定义如下映射:

$$\begin{cases} \Phi: \theta, y, z \rightarrow \{-1\} \times G(y) \times H(z), \\ \Psi: \theta, y, z \rightarrow \{-1\} \times \{y\} \times \tilde{Q}(z). \end{cases} \quad (10)$$

于是有

$$Z_3(T) = \{(y, z) : (T, y, z) \in \text{Viab}_{(\Phi, \Psi)}([0, T] \times (\mathbf{R}^n \setminus (Z_1 \cup \Omega)), \{T\} \times \mathbf{R}^n)\}. \quad (11)$$

假设每个闯入飞行器能够探测到的安全区域是

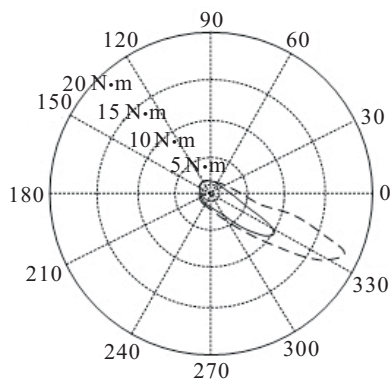


图 4  $T = 60 \text{ s}$  时  $Z_2$  的仿真结果

相互独立的, 如果将  $Z_1$  的全局知识映射到与其相关的状态空间中, 则只要对  $Z_1$  的估计是可用的,  $Z_2$  便可以通过式 (9) 和 (11) 联合计算出来. 图 4 显示的是  $T = 60 \text{ s}$  时  $Z_2$  的仿真结果.

## 4 安全区域内的制导策略分析

感知-规避作用不断迭代完成两个主要子功能: 一个是监视其周围的空中交通; 另一个是实时修正无人机的轨迹, 即制导. 监视过程主要体现在更新交通态势、决定当前安全区域的内部模式上, 需要跟踪邻域内其他飞行器并更新与之关联的闯入模型. 制导是由监视过程生成的交通态势模型不断被修正得到的. 迭代速度取决于感知率和处理能力, 还取决于当前安全区域对动态资源的分配. 可以从安全区域分析得到制导逻辑, 该逻辑可表示成图 5.

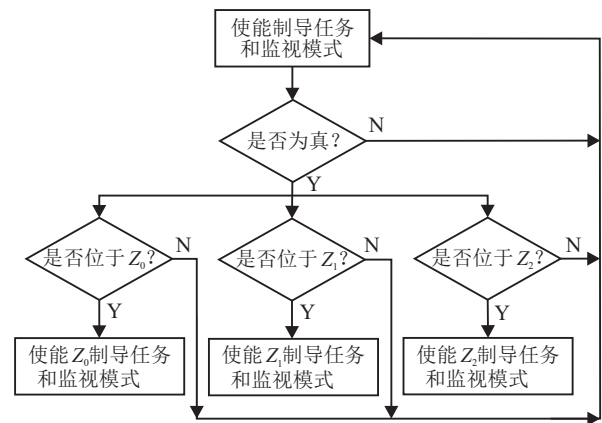


图 5 安全区域决定的制导逻辑算法框图

由监视过程和当前安全区域所维持的交通态势模型属于态势感知的范畴, 这里不作讨论, 但它的结果可以下载到地面控制站, 为制导提供条件.

### 4.1 $Z_0$ 和 $Z_1$ 区域的制导策略分析

当闯入飞行器位于  $Z_1$  内时, 可以保证安全间隔的制导动作是不存在的. 因此,  $Z_0$  和  $Z_1$  中的制导策略非常相似, 这时任务的优先级被取消, 所有制导策略的目标都致力于增加无人机与其他闯入飞行器或障碍物的间隔,  $Z_0$  和  $Z_1$  区域内制导律的不同之处只是采取的策略集不同而已. 在  $Z_1$  中存在很高的碰撞风险, 因此, 任务中允许采取大的机动策略. 需要说明的是, 在处理冲突规避时, 对于  $Z_1$  距离间隔的保证应该符合当前的空中防撞系统 (ACAS)<sup>[8]</sup> 版本的定义, 即制导策略必须能够提供水平距离从  $0.2 \sim 1.2$  海里, 垂直距离从  $300 \sim 700$  英尺的安全距离保证.

### 4.2 $Z_2$ 区域的制导策略分析

当闯入飞行器位于  $Z_2(T)$  区域但不在  $Z_1$  内时, 存在可以保证安全间隔的制导动作. 由微分对策理论可知, 只要  $Z_1$  的边界不存在交叠, 那么对于制导系统而言, 就总能找到让闯入飞行器保持在  $Z_1$  之外的策

略. 因此,  $Z_2$  中的制导律不但取决于任务和间隔的优先级, 还取决于空域的划分.

实际上, 在受控制的空域内, ATC 希望无人机能够按它自己的飞行方案飞行. 在此基础上, 直到有其他飞行器进入  $Z_1$  的风险变得很高时, ATC 才根据判断的结果采取相应的策略为无人机提供安全间隔保证. 因此,  $Z_2$  中的制导律要具备与 ACAS 类似的警告功能, 以便告知 ATC 为什么要采取规避策略.

不管采取哪种策略, 制导系统所给出的防止进入  $Z_1$  区域的策略都必须尽可能小地影响无人机的正常任务. 因此, 对于感知-规避技术或者方法而言,  $Z_1$  可以看作一个虚拟的障碍.

## 5 结 论

为了解决无人机在空域交通中的感知-规避安全性需求问题, 本文提出了一个无人机感知-规避系统的数学框架, 并通过分析和仿真表明了该方法的可行性. 根据无人机的感知能力定义了空域交通的安全边界, 采用微分对策和生存能力理论对感知-规避问题进行了定义和分析, 给出了不同安全区域对无人机飞行决策和制导律的影响. 仿真结果表明, 只要无人机能够与冲突航线内的其他飞行器保持必要的间隔, 该方法就可以采取有效的策略减小与冲突航线内其他飞行器的不确定边界, 并采取相应的规避决策实时调整飞行轨迹. 后续研究不但要开发一套可支持验证该方法的有效平台和工具, 还要不断完善感知-规避系统模型, 使其更加符合无人机实际的探测和决策.

## 参考文献(References)

- [1] 蔡志浩, 杨丽曼, 王英勋, 等. 无人机全空域飞行影响因素分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(2): 175-179. (Cai Z H, Yang L M, Wang Y X, et al. Analysis for whole airspace flight key factors of unmanned aerial vehicles[J]. J of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(2): 175-179.)
- [2] Xavier Prats, Luis Delgado, Jorge Ramirez, et al. Requirements, issues, and challenges for sense and avoid in unmanned aircraft systems[J]. J of Aircraft, 2012, 49(3): 677-687.
- [3] Hottman S B, Hansen K R, Berry M. Literature review on detect, sense and avoid technology for unmanned aircraft systems[D]. New Mexico State: GARTA and ACPSL Center of New Mexico, 2009: 15-31.
- [4] Shim D H, Sastry S. An evasive maneuver algorithm for uavs in see-and-avoid situations[C]. Proc of American Control Conf. New York: IEEE, 2007: 621-636.
- [5] Kephart R J, Braasch M S. See-and-avoid comparison of performance in manned and remotely piloted aircraft[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2010, 25(5): 36-42.
- [6] 张进, 胡明华, 张晨. 空中交通管理中的复杂性研究[J]. 航空学报, 2009, 30(11): 2132-2142. (Zhang J, Hu M H, Zhang C. Complexity research in air traffic management[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(11): 2132-2142.)
- [7] Euro Control Experimental Centre. User manual for the base of aircraft data (BADA) revision 3.3[Z]. Munich: Euro Control Experimental Centre, 2002.
- [8] Zeitlin A, Lacher A, Kuchar J, et al. Collision avoidance for unmanned aircraft: Proving the safety case[D]. Massachusetts: MITRE and Lincoln Laboratory, 2006: 1-11.
- [9] 邓慧, 张立琴. 一类脉冲微分控制系统的稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2011, 33(11): 8110-8113. (Deng H, Zhang L Q. The stability study of one class of impulsive control differential systems[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 33(11): 8110-8113.)
- [10] Aubin J P, Lygeros J, Quincampoix M, et al. Impulse differential inclusions: A viability approach to hybrid systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(1): 2-20.
- [11] Crück E, Quincampoix M, Saint-Pierre P. Pursuit-evasion games with impulsive dynamics[M]. Birkhauser, 2006: 35-50.
- [12] 方宝富, 潘启树, 洪炳镕, 等. 多追捕者-单-逃跑者追逃问题实现成功捕获的约束条件[J]. 机器人, 2012, 34(3): 282-291. (Fang B F, Pan Q S, Hong B R, et al. Constraint conditions of successful capture in multi-pursuers vs one-evader games[J]. Robot, 2012, 34(3): 282-291.)

(责任编辑: 齐 霖)