

文章编号: 1000-6893(2008)增-S107-07

# 无人机在恶劣气象条件下的自主决策技术

董卓宁<sup>1</sup>, 张汝麟<sup>2</sup>, 陈宗基<sup>1</sup>

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

(2. 飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

## Autonomous Decision-making Technique of UAVs Under Hazardous Weather Condition

Dong Zhuoning<sup>1</sup>, Zhang Rulin<sup>2</sup>, Chen Zongji<sup>1</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 710065, China)

**摘 要:** 无人机(UAV)在实际战场环境中受恶劣气象条件等许多不确定因素的影响, 因此必须不断提高其自主决策能力。主要研究无人机自主探测恶劣气象并进行自主决策的问题, 首先介绍了影响无人机飞行的典型恶劣气象条件, 然后提出了利用机载传感器获取气象信息并建立恶劣气象数学模型的方案, 并提出了采用专家系统理论解决无人机遭遇恶劣气象时的自主决策问题。最后, 对无人机在风切变、雷暴和紊流 3 种常见恶劣气象下的自主决策过程进行仿真。经分析, 决策结果合理, 仿真结果验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 自主决策; 专家系统; 无人机; 恶劣气象条件; 风切变

**中图分类号:** V249 **文献标识码:** A

**Abstract:** In order to endure the uncertain complexity and variation of the battlefield, especially the hazardous weather, unmanned aerial vehicle's (UAV's) ability of autonomous decision-making must be enhanced continuously. This paper deals with the autonomous hazardous weather detecting and decision-making problems of UAVs. First of all, typical hazardous weather affecting UAVs is introduced. Secondly, the scheme is proposed of using airborne sensors to get meteorological information and then founding the mathematical model. Thirdly, expert system is adopted to resolve the autonomous decision-making problem of UAVs under hazardous weather condition. Finally, simulations of the UAV's autonomous decision-making process under windshear, thunderstorm and turbulence flow conditions are accomplished respectively. Simulation results are reasonable and thereby prove the feasibility and effectivity of the scheme.

**Key words:** autonomous decision-making; expert system; UAV; hazardous weather; windshear

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)在现代军事战争中扮演着越来越重要的角色, 但无人机在实际飞行中受到很多不确定因素的影响, 如平台信息的不确定, 目标任务的变化, 环境和战场态势的变化, 未建模动态以及复杂的非线性因素的存在等。无人机在这种复杂、不确定的条件下执行任务, 不能只依赖于地面站的控制, 必须具备一定的自主决策能力。但现阶段已有的技术手段只能实现半自主控制, 尽可能地给无人机赋予智能。

无人机在起飞、着陆或执行任务过程中, 一旦

旦遭遇到突发的恶劣气象条件, 其正常飞行、作战任务的执行都会受到严重的影响, 甚至发生坠机。因此在现代战争中, 无人机应具备在复杂的气象条件下自主执行复杂任务的能力, 做到及时、准确探测恶劣气象, 综合评估战场环境, 提前给出战术决策, 及时进行路径重规划。

文献[1]提出了影响有人机飞行的恶劣气象因素、驾驶员获取气象信息的途径和对恶劣气象的理解。而有人机在恶劣气象条件下飞行的研究侧重于利用机载气象雷达和机场气象综合探测系统等提供的信息直接进行实时路径规划, 减轻驾驶员的负担<sup>[2-3]</sup>。而以往对无人机自主决策技术的研究一般针对无人作战飞机的作战方案<sup>[4]</sup>, 未考虑气象因素的影响。因此研究无人机在恶劣气象条

收稿日期: 2007-09-12; 修订日期: 2007-12-24

通讯作者: 董卓宁 E-mail: dongzhuoning@buaa.edu.cn

### 件下的自主决策技术具有重要的现实意义。

无人机在复杂的战场环境中可利用的信息援助有限,因此自主决策技术包括两层含义,即自主态势感知和智能推理。有人机的这种分析决策能力来自驾驶员,无人机常规条件下的智能来自于控制站的指挥员,因此要想让无人机具备同样的能力,最直接的方法就是应用人工智能技术,根据驾驶员或指挥员所提供的知识和经验进行推理和判断,模拟他们的决策过程。

本文着重研究无人机按照预定任务路径规划飞行中,遭遇到突发的恶劣气象条件时,如何利用机载设备进行有效探测,如何进行自主决策的问题。首先介绍严重影响无人机飞行安全的典型气象条件,提出了利用机载传感器提取气象信息并建立数学模型,依据模型进行威胁度评估,最后应用人工智能的方法建立专家系统进行推理决策。

## 1 影响无人机飞行的典型恶劣气象条件

影响无人机飞行安全的气象条件有风切变、雷暴、紊流、闪电、暴雨、冰雹和龙卷风等,其中风切变、雷暴和紊流的影响最具有代表性。

### 1.1 风切变

风切变是风向和风速在水平和垂直方向突然变化的一种极其危险的紊流现象。尤其在600 m以下的低空风切变是航空界公认的飞机在起飞和着陆阶段的“杀手”。低空风切变具有时间短、尺度小、强度大等特点,无人机常因飞行高度比较低时,缺乏足够的空间进行机动而发生事故。

对付低空风切变最好的办法就是避开,目前一般通过机载风切变探测系统和安装在机场范围内的地面风切变预警系统来探测<sup>[5]</sup>,如终端多普勒风切变雷达、低空风切变预警系统等。

### 1.2 雷暴

雷暴是夏季常见的天气现象,由对流旺盛的积雨云所产生的。雷暴包含了各式各样的危及飞行安全的天气现象,如紊流、颠簸、结冰、闪电击和暴雨,有时还伴有冰雹、龙卷风、下击暴流和低空风切变。据美国空军气象原因发生飞行事故分析统计,雷暴原因占55%~60%<sup>[6]</sup>。目前主要通过地面和机载气象雷达进行探测和预报。

### 1.3 紊流

紊流是指发生在一定空域中的急速并且多变

的运动气流。其主要特征是在一个较小的空域中的不同位置处,气流运动速度向量之间存在很大的差异,且变化急剧。飞机一旦进入这样的区域,不但会导致急剧的颠簸和操纵困难,而且飞机不同位置处会承受巨大的应力,严重的则可能造成对飞机结构强度的破坏<sup>[7]</sup>。气象学家研究表明,紊流往往存在于雷暴区域附近。

## 2 气象信息获取及恶劣气象模型的建立

### 2.1 气象信息的获取

气象信息一般利用控制站、指挥机、预警机等通过气象雷达、气象卫星或专用无人机来获取。由于目前多数无人机不会装备专门的气象雷达,因此无人机获取气象信息有两种渠道:①接收控制站、预警机、友机等传输的信息;②从机载任务传感器信息中通过信息处理提取必要的气象信息。第②种渠道有助于无人机自主性的提高,在这里加以介绍。

目前无人机有效任务载荷一般包括:合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)、前视红外(Forward-looking Infrared, FLIR)、电视摄像机(CCD/TV)等<sup>[8]</sup>。通过无人机任务传感器提取有用的气象信息,基本宗旨是既要满足气象探测的需求又不影响传感器原有的工作。这里提出利用SAR和FLIR获取气象信息的方案。

SAR是一种先进的微波观测设备,具有全天候、全天时工作的特点。SAR利用雷达载体与目标之间相对运动产生的多普勒频移,将在不同位置接收的回波进行相干处理,获得高的方位向分辨率<sup>[9]</sup>,相当于把许多小孔径天线合并为一个孔径天线,距离向分辨率由脉冲压缩技术保证。

从SAR的原理可知,虽然它一般处理地面静止或运动目标的成像问题,但具备了回波的多普勒频率分析能力,且一般工作在X波段,合理的脉冲宽度和天线带宽使其具备了专业气象雷达的气象探测原理要求,SAR采用了相控阵技术实现电子扫描,使扫描速度比普通气象雷达提高了几十倍,这保证了充足的气象数据来完成数据分析。因此,若想利用SAR实现对气象的探测,只需在原有基础上增加一个合理的气象数据处理器,并且增加对空前视扫描功能,则可实现在不影响SAR预订任务的前提下获取气象信息。

FLIR是通过光学系统把景物的红外辐射成

像在红外敏感元件阵列上并变换成视频电信号的一种红外成像探测器。不同温度和湿度的物体发出的红外辐射是不同的,而一般的恶劣气象条件都包含了强冷空气、剧烈的风速变化和湿性气流等现象,而风速增加对应于温度下降<sup>[10]</sup>,因此恶劣气象条件会在红外成像中有很明显的特征。因此将红外图像进行必要的特征提取和分析处理即可实现 FLIR 探测气象的目的。

下文结合 SAR 方案的探测方法介绍几种典型恶劣气象条件的工程化数学模型。

## 2.2 典型恶劣气象条件的模型

### (1) 风切变模型

目前一般采用工程化仿真模型,即建立能描述风切变现象最本质的机理及运动过程的简化数学模型。这种工程化风切变模型简单灵活,使用方便,又具有较好的真实性。

微下击暴流的风切变工程化模型<sup>[11]</sup>中水平风速和垂直风速分别为

$$w_x = \begin{cases} \left[ w_{x\max} - 2.6 \times 10^{-5} (h - h_m) \right] \sin\left(\frac{r\pi}{2r_m}\right), & h \geq h_m \\ 4.095 \cdot \ln\left(\frac{h}{1000}\right) \cdot \sin\left(\frac{r\pi}{2r_m}\right), & h < h_m \end{cases} \quad (1)$$

$$w_h = \begin{cases} -3.632 \cdot \ln\left(\frac{h}{h_m}\right) \cdot \cos\left(\frac{r\pi}{2r_m}\right), & h \geq h_m \\ 3.632 \cdot \ln\left(\frac{h}{h_m}\right) \cdot \cos\left(\frac{r\pi}{2r_m}\right), & h < h_m \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $w_{x\max}$  为最大出流速度;  $r_m$  和  $h_m$  分别为与之对应的半径和高度。改变这3个参数的大小,可以得到强度不同,作用范围不同的微下击暴流。模型的适用条件为  $r < 2000$  m,  $h < 500$  m。

风切变的探测原理是考察雷达回波的多普勒频移特性。如探测微下击暴流,用雷达信号照射时,首先照射到顶风一侧,顶风区域相对于飞机的速度较高,所以产生的反射回波的多普勒频移明显高于平均多普勒频率。反之,照射顺风一侧时,多普勒频移低于平均多普勒频率。显然,风切变区域的水平风速差越大,对应多普勒频谱的中心频率差就越大。而顶风到顺风所产生的多普勒频谱沿时间轴的差值就是该区域直径的度量。

### (2) 雷暴的影响区域模型

雷暴天气形式复杂,因此很难建立起描述其内部结构的准确数学模型,一般用一定高度范围内的圆柱体近似表示其影响区域<sup>[12]</sup>,见图1。

若无人机当前位置  $W$  的经纬度为  $(x, y)$ , 在同一水平面内雷暴中心  $A$  的经纬度为  $(x_A, y_A)$ , 则无人机与雷暴中心间的水平距离  $R_{AW}$  可表示为

$$R_{AW} = \sqrt{(x_A - x)^2 + (y_A - y)^2} \quad (3)$$

若将无人机在雷暴天气中的危险程度记为  $\xi$  ( $0 < \xi \leq 1$ ), 则  $R_{AW}$  与  $\xi$  关系见图2。

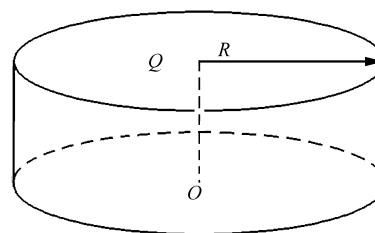


图1 雷暴天气影响区域

Fig. 1 Affecting area of thunderstorm

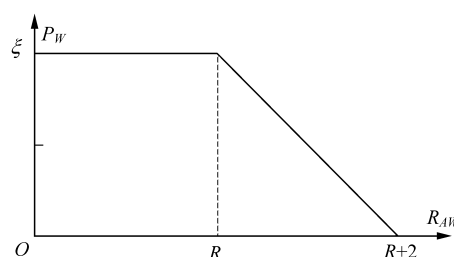


图2 雷暴的威胁度分布图

Fig. 2 Threatening degree distribution of thunderstorm

雷暴的影响区域模型可表示如下:

$$P_W = \begin{cases} \xi & , R_{AW} \leq R \\ \xi \left[ 1 - \frac{1}{2} (R_{AW} - R) \right] & , R < R_{AW} < R+2 \\ 0 & , R_{AW} \geq R+2 \end{cases} \quad (4)$$

在实际的飞行中,无人机可通过机载雷达回波分布和强度来探测雷暴区域的平面分布和垂直结构。由于降雨率综合了雨滴直径、密度以及雨滴下降速度等因素,因此回波强度与降雨率之间存在着定量的关系:  $z = \alpha \gamma^{1.6}$ ,  $z$  为反射系数;  $\gamma$  为降雨率;  $\alpha$  为常数。

由降雨率可对应得到雷暴的强度等级<sup>[7]</sup>,如表1所示。

### (3) 紊流模型

通常认为紊流是一种平稳、均匀、各态经历及各向同性的随机过程。最常见的两种紊流模型是冯·卡门模型和德莱顿模型。但前者频谱函数不能在时间域内得到实现。而德莱顿模型是冯·

卡门模型的一个近似, 能在时域实现仿真。

表 1 降雨率和降雨强度等级对应关系

Table 1 Rainfall rate corresponding to intensity level

降雨等级	降雨率/(mm·h <sup>-1</sup> )	强度等级
小雨	0.25~2.50	1
中雨	2.5~12	2
大雨	12~25	3
特大雨	25~30	4
暴雨	30~125	5
特大暴雨	>125	6

德莱顿紊流速度频谱<sup>[13]</sup>为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_u(\Omega) &= \sigma_u^2 \frac{2L_u}{\pi} \frac{1}{1+(L_u\Omega)^2} \\ \Phi_v(\Omega) &= \sigma_v^2 \frac{L_v}{\pi} \frac{1+3(L_u\Omega)^2}{[1+(L_u\Omega)^2]^2} \\ \Phi_w(\Omega) &= \sigma_w^2 \frac{L_w}{\pi} \frac{1+3(L_w\Omega)^2}{[1+(L_w\Omega)^2]^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_u$ 、 $\sigma_v$  和  $\sigma_w$  为紊流强度;  $L_u$ 、 $L_v$  和  $L_w$  为紊流尺度。

紊流的探测也基于多普勒原理, 如图 3 所示。分析紊流的多普勒频谱,  $\Delta f_0$  为飞机与紊流的相对速度对应的多普勒分量;  $f_{dm}$  为整个紊流区与平均速度的平均多普勒频率, 因此雨滴相对速度偏差越大, 多普勒频谱宽度就越宽。

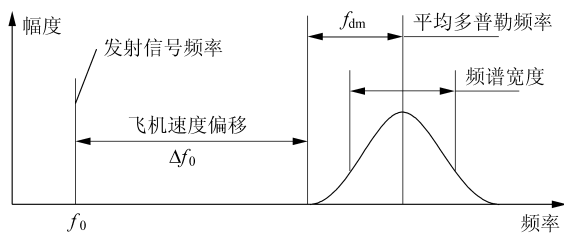


图 3 紊流的多普勒频谱

Fig. 3 Doppler frequency amplitude diagram of turbulence

由上述分析可知, 紊流探测只需将信号的多普勒频谱宽度与门限值(312.5 Hz)进行比较<sup>[7]</sup>。紊流范围可构造成类似雷暴影响区域的圆柱模型。

### 3 恶劣气象威胁度的评估方法

态势评估对决策制定具有非常重大的意义。因此, 为了使无人机高效地完成自主决策, 就必须对恶劣气象等灾情进行有效评估。正确、快速的态势评估, 还对任务规划、路径规划等问题具有重要的研究价值。下面对恶劣气象条件的评估

过程是针对前面所建的模型进行的。

#### 3.1 风切变因子法

风切变危险因子是基于飞行力学和已知的风切变知识而提出的。风切变对无人机的潜在威胁程度用危险因子  $F$  来定量描述<sup>[14]</sup>:

$$F = \frac{\dot{W}_x}{g} - \frac{W_h}{V_a} \quad (6)$$

式中:  $W_x$  为相对于水平飞行航线风切变水平风速分量;  $\dot{W}_x$  为  $W_x$  的变化率;  $W_h$  为垂直风速分量;  $g$  为重力加速度;  $V_a$  为飞机真空速。

然而实际的机载雷达一般只能探测到沿飞机飞行航线方向的水平风速, 由于垂直风速  $W_h$  对飞机飞行的影响又不能忽视, 因此, 可以采用改进的  $F$  因子进行评估<sup>[14]</sup>。

$$F \approx \left( \frac{V_g}{g} - K \frac{h}{V_a} \right) \frac{\Delta W_x}{\Delta R} \quad (7)$$

式中:  $V_g$  为飞机地速;  $h$  为地面以上的高度 ( $h < 300$  m);  $\Delta W_x$  为在距离  $\Delta R$  上的径向风速变化;  $\Delta R$  为两次风速测量之间的距离。  $K = -2$  为飞机性能下降的风切变;  $K = -1$  为飞机性能上升的风切变。这一改进方法符合机载雷达的探测原理。

#### 3.2 雷暴威胁程度评估

雷暴威胁程度可直接用其影响区域模型中的  $\xi$  来标定。  $\xi$  介于 0 和 1 之间, 其值越接近 0 雷暴威胁度越低, 越接近 1 则雷暴威胁度越高。

#### 3.3 紊流的威胁度评估

紊流的威胁度可直接通过其数学模型中的强度  $\sigma$  来衡量。模型参数如下:

中空/高空参数: 尺度和强度以 2 000 ft (1 ft = 0.305 m) 以上的紊流是各向同性的假定为根据, 则  $\sigma_u = \sigma_v = \sigma_w$  及  $L_u = L_v = L_w$ , 紊流的均方根强度是高度和超越频率的函数。

低空参数:  $\sigma_u$  和  $\sigma_v$  是  $\sigma_w$  和高度的函数。

### 4 自主决策方法

#### 4.1 决策方法选取

常规的自主决策方法一般是基于人工智能的方法, 如专家系统、模糊推理、神经网络、遗传算法、贝叶斯估计、灰色推理技术和马尔可夫决

策等。其中基于专家系统的方法知识维护方便、推理过程简单、便于解释,且实时性强,而无人机在恶劣气象条件下进行自主决策最重要的就是及时给出恰当的决策方案,因此这里选用基于专家系统的方法。

专家系统是一个具有大量专门知识与经验的程序系统,它应用人工智能和计算机技术,根据某领域一个或多个专家的提供的知识和经验进行推理和判断,模拟人类专家的决策过程。这一特点恰好符合无人机在复杂战场环境下执行任务的需要,尤其是在远距离作战或通讯中断等情况下,无人机的自主决策能力显得更为重要。

## 4.2 知识库的建立

知识是专家系统的核心要素,要建立完善的专家系统必须首先建立相关领域知识库。该过程要解决知识获取、表示、推理和完善等问题。

### (1) 原始知识的处理

建立知识库的关键问题是确定恶劣气象条件下飞行和作战的知识表示,本文采用规则表示法来表示知识,形成知识库。在知识库的建立过程中,通过对战术文献和战例进行分析,总结出在恶劣气象条件下影响战术决策的主要因素和决策的主要内容,并归纳出“决策因素-决策内容”的规则形式,即常用的(IF-THEN)形式。

### (2) 知识库中知识的表示

上述规则表示方法并不是最简表示方法,有很大的冗余性,所以有必要在保护知识库分类能力不变的基础上,对规则进行约简,剔除不必要的属性,约简后的知识库形式如表2所示。

表2 无人机针对恶劣气象条件的知识库  
Table 2 Knowledge database of UAVs to hazardous weather

决策因素		决策内容	
气象威胁度	强, 弱	优先级	1~100数字
威胁源距离	近, 远, 中		返航
平台健康状况	好, 坏		穿越改出
飞行阶段	起飞, 途中, 着陆	战术	规避机动
剩余油量	多, 少		正常飞行
...	...		...

规则具体形式如下(规则1), 其中优先级反映规则置信度, 优先级数值越高则置信度越大。

IF	气象威胁度	(强)
	威胁源距离	(中)

	平台健康状况	(好)
	飞行阶段	(途中)
	剩余油量	(多)
THEN	战术	规避机动
	优先级	100

## 4.3 自主决策系统结构和工作原理

整个自主决策系统的结构原理即为一个典型专家系统推理的基本过程,如图4所示,该系统结构由态势信息评估模块、数据库、知识库、专家系统推理机和推理结果5个模块组成。

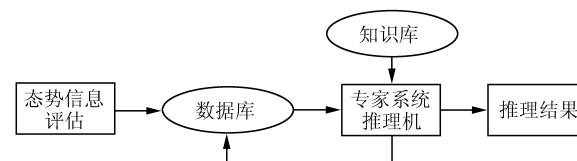


图4 自主决策系统结构

Fig. 4 Architecture of autonomous decision-making system

图4中态势信息评估模块的作用是把通过控制站和机载传感器等获取的数据进行融合和评估,评估结果经过模糊处理导入到数据库中。数据库负责存储专家系统运行过程中所需要和产生的各种事实数据,并提交给专家系统推理机。知识库为推理机提供推理过程所需的所有知识,该模块是整个系统的核心。推理机采用正向推理的方式,将战场态势信息与知识库中所有规则的前件(IF)进行逐一匹配,对应的后件(THEN)为推理结果,即无人机在当前情况下所要采取的战术。

## 5 仿真验证

无人机在恶劣气象条件下的决策受众多因素影响,本文只考虑几个典型因素:气象条件威胁度、威胁源距离、平台健康状况、飞行阶段、剩余油量。这里除气象威胁度利用前面的方法得到外,其余因素假设已知。另外根据表2所示的规则形式,确定仿真验证所需要的最终决策规则,其中各决策因素的模糊处理方法如表3所示。

推理过程采用基于专家系统的方法,这里选用NASA的CLIPS专家系统开发工具实现,在CLIPS环境中建立规则文件,实现表2的所有规则,将此文件封装并在VC环境中进行仿真。仿真过程中将已知的平台信息和完成的气象威胁度评估结果经过模糊处理提交给专家系统推理机进行匹配、推理,得到最终的战术。无人机可根据

战术确定如何继续飞行, 完成既定任务。

表 3 各决策要素的数值范围与状况名称对应关系

Table 3 Decision-making element scales corresponding to UAVs status

决策要素	数据范围	状况名称	状况编码
平台健康状况	0~0.3	损坏	ERROR
	0.3~0.9	故障	FAULT
	0.9~1.0	好	GOOD
气象威胁度	0~0.5	弱	WEAK
	0.5~1.0	强	STRONG
威胁源距离	0~0.2	近	NEAR
	0.2~0.8	中	MIDDLE
	0.8~1.0	远	FAR
剩余油量	0~0.3	少	FEW
	0.3~0.7	中	SOME
	0.7~1.0	多	SOME
飞行阶段	0~0.3	起飞	TAKEOFF
	0.3~0.7	途中	MIDWAY
	0.7~1.0	降落前	LANDING

下面首先以微下击暴流形式的风切变为例说明无人机自主决策系统的整个决策过程。

选用前面介绍的风切变模型式(1)和式(2), 设定初始条件, 最大出流速度  $w_{x\max}$ , 对应半径  $r_m$ , 对应高度  $h_m$ , 分别为 50 m/s, 1 500 m, 300 m。飞机飞行速度 150 m/s, 飞行高度 150 m。由模型计算可得到, 水平风速随位置变化的曲线如图 5 所示, 风切变  $F$  因子随位置变化的曲线如图 6 所示。

风切变  $F$  因子的最大值出现在中心地带, 即由逆风转入顺风的区域, 此区域最为危险。通过计算可知, 威胁度评估结果(式(6))曲线和改进的威胁度评估结果(式(7))曲线基本重合且最大值都超过了告警门限值(0.13), 而只考虑水平风速影响的评估结果(式(6)的前一项)曲线最大值却未达到该门限值, 因此改进的评估方法对垂直风速部分

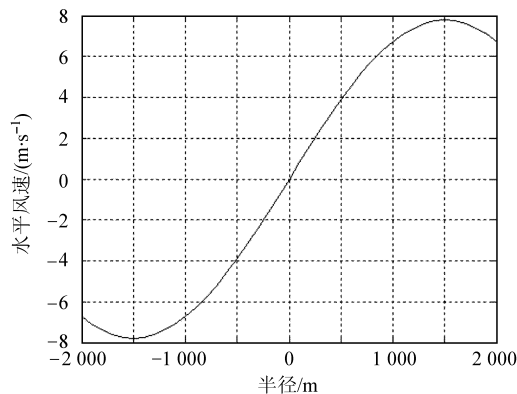


图 5 风切变水平风速随位置的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of horizontal speed of windshear vs location

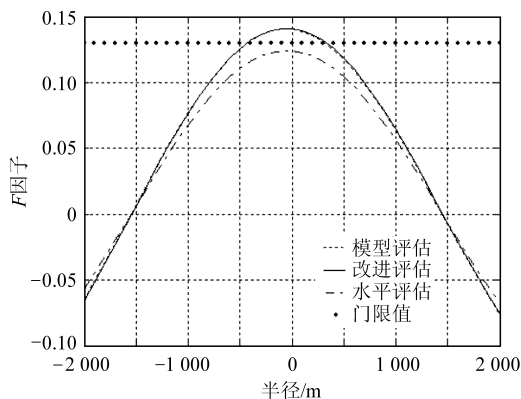


图 6 风切变  $F$  因子随位置的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of  $F$ -factor of windshear vs location

的补偿是对安全有利的。以上评估结果存放到数据库中等待提交给专家系统推理机进行推理。

由以上分析可知, 该例中气象威胁度为(强), 加入威胁源距离(中)、平台健康状况(好)、剩余油量(多)和飞行阶段(途中)4个已知的因素, 提交给专家系统推理机进行推理, 得到的战术决策结果是规避机动, 优先级100。

分析已知条件和推理结果可知, 由于气象威胁度很大且自身条件有能力完成绕飞, 因此这一结果是合理的, 无人机将按照规避机动的原则开始规划新航线, 这部分内容将在以后加以研究。

下面以雷暴为例进行仿真验证, 设定初始条件,  $R$  为 2 km,  $R_{AW}$  为 3 km,  $\xi$  为 0.8。按照式(4)计算可得,  $P_W$  为 0.4, 对照表 3 可知, 气象威胁度为弱, 加入威胁源距离(近)、平台健康状况(好)、剩余油量(多)和飞行阶段(途中)4个已知的因素, 进行推理, 得到战术结果为正常飞行。

紊流的仿真过程, 设置初始条件, 给出其紊流强度  $\sigma$ , 其余与雷暴的仿真过程类似。

按照上述方法, 改变已知条件继续进行多次仿真并分析。仿真验证表明, 决策结果合理有效, 因此本文所建立的专家系统符合实际要求。

## 6 结 论

无人机在恶劣气象条件下的自主决策技术需要研究包括气象态势感知与建模、威胁度评估、决策计算、路径规划和控制律调整等多方面的问题, 是一个综合性的技术。现有的无人机自主决策技术研究一般针对作战方案方面, 但无人机所处的环境是一个复杂变幻的战场环境, 有很多不确定因素, 因此研究恶劣气象条件对无人机飞行的影响及自主决策技术是对研究无人机在复杂战



场环境下飞行、作战的重要补充。本文提出了自主获取气象信息的方案和智能评估决策方法,并以风切变、雷暴和紊流为例对决策过程分别做了仿真验证,仿真结果表明该方法的可行性和有效性。今后还需继续研究无人机自主感知气象态势的有效方法,完善无人机自主决策系统,并在决策基础上进行实时的三维路径重规划,增强无人机在复杂战场环境中的自主能力和生存能力。

### 参 考 文 献

- [1] Sand W R, Biter C J. Weather-related aircraft accidents, new sensors and pilot's weather understanding[R]. AIAA-1997-0411, 1997.
- [2] Krozel J. Terminal area guidance incorporating heavy weather[C]//AIAA Guidance Navigation and Control Conference. 1997: 413-420.
- [3] Krozel J. Estimating time of arrival in heavy weather conditions[C]//AIAA Guidance Navigation and Control Conference. 1999: 1481-1490.
- [4] 祝世虎. 基于神经网络与专家系统的智能决策支持系统[J]. 电光与控制, 2006, 13(1): 1-2.  
Zhu Shihu. An intelligent decision-making system based on neural networks and expert system[J]. Electronics Optics and Control, 2006, 13(1): 1-2. (in Chinese)
- [5] 唐民, 庄卫方. 低空风切变的探测技术[J]. 航空气象, 2005(5): 47-49.  
Tang Min, Zhuang Weifang. Detection technology of low level wind shear[J]. Aeronautical Meteorology, 2005(5): 47-49. (in Chinese)
- [6] 李春生. 雷暴——航空飞行的天敌[J]. 航空气象, 2006(1): 38-39.  
Li Chunsheng. Thunderstorm—natural enemy of aviation[J]. Aeronautical Meteorology, 2006(1): 38-39. (in Chinese)
- [7] 蔡成仁. 现代气象雷达系统[M]. 北京: 中国民航出版社, 2004.  
Cai Chengren. Modern weather RADAR system[M]. Beijing: China Civil Aviation, 2004. (in Chinese)
- [8] 孙滨生. 无人机任务有效载荷技术现状与发展趋势研究[J]. 电光与控制, 2001(增刊): 14-16.  
Sun Binsheng. Study on present and future of UAV mission payloads[J]. Electronics Optics and Control, 2001(Supplement): 14-16. (in Chinese)
- [9] 刘光炎. 斜视及前视合成孔径雷达系统的成像与算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2002.
- Liu Guangyan. The study on the algorithm and imaging of the squint and forward-looking SAR system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2002. (in Chinese)
- [10] Kuhn P M, Kurkauskis R L, Caracena F. Airborne operation of an infrared low-level windshear prediction system[J]. Aircraft, 1982, 20: 170-173.
- [11] 陈勇, 曹义华, 金长江. 飞机穿越风切变的非线性动态逆控制[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(7): 1037.  
Chen Yong, Cao Yihua, Jin Changjiang. Nonlinear inversion dynamics control during windshear penetration[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15 (7): 1037. (in Chinese)
- [12] 窦永金. 智能驾驶员辅助系统[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2004.  
Dou Yongjin. Research on intelligent pilot's associate[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004. (in Chinese)
- [13] 董庚寿. 军用规范——有人驾驶飞机的飞行品质 (MIL-F-8785C)[M]. 西安: 飞行力学编辑部, 1982.  
Dong Gengshou. Mil-standard—flying qualities of air vehicles[M]. Xi'an: Flight Dynamics Editorial Office, 1982. (in Chinese)
- [14] Bowles R L. Windshear detection and avoidance: airborne systems survey[C]//Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control. 1990: 712-714.

### 作者简介:

董卓宁 (1981— ) 男, 博士研究生。主要研究方向: 无人机自主决策技术。

Tel: 010-82316849-71

E-mail: dongzhuoning@buaa.edu.cn

张汝麟 (1937— ) 男, 研究员。主要研究方向: 先进飞行控制技术, 无人机控制技术、飞机数字控制技术、余度技术、电传和主动控制技术等。

陈宗基 (1943— ) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 飞行控制系统设计方法和CAD技术、自适应控制理论、自修复控制系统理论、混合系统理论、虚拟样机技术等。

(责任编辑: 赵利)