

基于过程的UCAV控制权限动态管理方法

张 堃¹, 周德云¹, 袁斌林², 顾潮琪¹, 徐 杰²

(1. 西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710072;

2. 成都飞机设计研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 针对无人作战飞机(unmanned combat air vehicle, UCAV)自主控制权限管理问题,结合作战过程,建立UCAV控制权限划分模型和基于过程的UCAV控制权限管理模型,设计控制权限调整流程,并进行仿真研究。仿真结果表明,该方法与作战过程和UCAV健康状态紧密结合,动态管理控制权限,合理利用UCAV自主优势,有效减轻地面人员操作负担。

关键词: 控制权限; 动态管理; 威胁

中图分类号: V 27

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2012.06.15

Management of UCAV's autonomous control level based on process

ZHANG Kun¹, ZHOU De-yun¹, YUAN Bin-lin², GU Chao-qi¹, XU Jie²

(1. Department of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Chengdu Aircraft Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: In view of the difficult in the management of UCAV's autonomous control level, a control level model is established combined with the war process, meanwhile, a mathematical model of dynamic management of UCAV's autonomous control level based on process is established, the level calculation process is given. Finally, the simulation results show that the method can compose battlefield objectives and tactics effectively, complete control level management rapidly, and the method is reasonable and effective.

Keywords: control level; dynamic management; threat

0 引言

随着无人作战飞机(unmanned combat air vehicle, UCAV)技术水平的发展,计算机和通信技术的进步,UCAV的自动化、智能化程度越来越高,UCAV的控制方式也由传统人工操控转变为操控自主一体化。但是,如何最大程度地赋予UCAV智能,实现自主飞行控制、决策、管理,这就提出了UCAV控制权限管理问题,并成为目前无人机领域内一个热点问题。

国内外在无人机自主等级方面展开了相应的一些研究,美国NASA定义了自主等级随着态势感知能力^[1];美国空军研究实验室确立了11级无人机系统自主控制方案^[2];美国国防部在《无人机系统路线图2005-2030》提出了自主等级划分方法^[3];美国国家标准与技术研究所试图对所有无人系统自主能力进行等级划分^[4-7];相关学者提出了自主性框架^[8-10]等。国

内在这方面的研究还处于起步阶段,部分学者对国外相关研究进行了跟踪^[11-14];有些学者提出了自主控制分级递阶控制结构^[15]、分层式智能控制结构^[16]等。但在确立结构级别后,权限管理/调节方面却未见相关报道。本文提出构建UCAV操作控制权限管理系统,将权限级别控制管理与作战过程结合起来,实现UCAV自主飞行、自主决策、自主攻击与人为操控有机结合,提高作战能力和战术效果。

1 UCAV控制权限划分模型

本文将作战过程划分为起飞、巡航、传感器管理、威胁评估、武器管理、武器投放、返航多个过程,UCAV操作控制权限管理系统在各个过程中均发挥作用,其各过程控制权限如表1所示。

综合考虑UCAV自主能力、战术执行复杂度等因素,本文构建了6层控制权限级别,如图1所示。

表 1 UCAV 作战过程及控制权限

序号	过程	控制权限
A1	起飞	人工 自主
A2	巡航	
A3	传感器管理	
A4	威胁评估	
A5	武器管理	
A6	武器投放	
A7	返航	

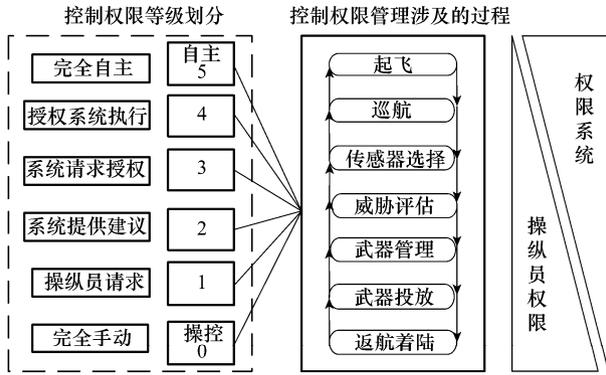


图 1 控制权限级别

随着控制权限级别由 0~5 变化,操纵员权限越来越小,参与程度越来越低,控制权限分配系统权限越来越大,参与程度越来越高。各个级别含义如表 2 所示。在操控级别 L_0 中,操纵员完成所有指令控制,实现系统执行,系统级别为 L_1, L_2, L_3, L_4 时,操纵员权限逐级递减,控制系统权限逐级递增。 L_1 级由操纵员给出系统控制需求指令,系统根据指令完成计算,给出建议,由操纵员决定采纳建议与否; L_2 级中,系统不需操纵员指令需求,自身完成计算,给出建议,由操纵员决定采纳与否; L_3 级由系统给出建议及下一步工作需求,操纵员授权后完成相应任务及对应下一步需求; L_4 级由操纵员给出授权指令,系统自动完成执行任务; L_5 级为自主级别,所有需求任务均由系统自主完成,操纵员主要对系统监控,只有中断系统行为的权利。

表 2 控制权限级别划分表

级别	描述	系统权限	操纵员权限	自适应
L_5	自主	完全自主	中断系统行为	操纵员监控
L_4	授权系统执行	建议并执行,除非操纵员中断拒绝	取消系统行为	操纵员支持系统
L_3	系统请求执行	系统提供建议并在得到授权时自动执行	接受建议并授权系统执行	系统支持操纵员
L_2	系统提供建议	建议	接受建议	系统辅助
L_1	操纵员请求	若操纵员请求,则提供建议	所有	请求后系统辅助
L_0	指令输出	无	完全	操纵员

2 基于过程的控制权限管理模型

2.1 控制权限管理关键问题

2.1.1 过程通用级别确定

不同作战过程由于重要程度、对战局影响程度等因素不同,需确定基准控制权限级别,在无变态势中以此控制权限完成飞行、控制、作战;并确定不同作战过程的权限约束。本文根据不同专家经验、偏好不同,采用修正波达选择函数在 0~5 间打分确定过程基准控制权限及权限约束。设共有 l 个决策专家, m 个作战过程,第 k 个决策专家对第 i 个过程 A_i 的基准权限打分为 $p_k(A_i)$, 权限约束打分为 $q_k(A_i)$, $i=1, 2, \dots, m, k=1, 2, \dots, l$, 其波达选择函数为

$$p(A_i) = \left[\sum_{k=1}^l \eta_k p_k(A_i) \right] \quad (1)$$

$$q(A_i) = \left[\sum_{k=1}^l \eta_k q_k(A_i) \right] \quad (2)$$

式中, η_k 为第 k 个决策专家权重, $\sum_{k=1}^l \eta_k = 1, \eta_k \geq 0, k=1, 2, \dots, l$; $[]$ 表示取整。

2.1.2 故障威胁确定

不同故障级别下, UCAV 控制权限约束不同。设与第 i 个过程相关的机载设备共有 b^i 个, 每个设备对完成该过程的影响情况不同。设计对第 i 个过程第 j 个设备的影响权重为 θ_j^i , 且 $\sum_{j=1}^{b^i} \theta_j^i = 1$, 设第 j 个设备故障状态为 $\sigma_j, \sigma_j = 0$ 表示该设备正常, $\sigma_j = 1$ 表示故障, 则采用式(3)调整控制权限级别。

$$L = \begin{cases} L_0, & \epsilon_1 < \delta^i \leq \epsilon_0 \\ L_0 \sim L_1, & \epsilon_2 < \delta^i \leq \epsilon_1 \\ L_0 \sim L_2, & \epsilon_3 < \delta^i \leq \epsilon_2 \\ L_0 \sim L_3, & \epsilon_4 < \delta^i \leq \epsilon_3 \\ L_0 \sim L_4, & \epsilon_5 < \delta^i \leq \epsilon_4 \\ L_0 \sim L_5, & \delta^i \leq \epsilon_5 \\ \text{error}, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, 故障率 $\delta^i = \sum_{j=1}^{b^i} \sigma_j \theta_j^i$; $\epsilon_0, \epsilon_1, \dots, \epsilon_5$ 为分级阈值; “~”表示在此权限级别内可调; error 表示 UCAV 存在故障不能完成任务。

2.1.3 战场目标威胁确定

敌目标对我方 UCAV 具有威胁, 威胁越大, 我方 UCAV 越需快速反应决策、避免人为错误。设战场共有 s 个目标, 采用式(4)计算战场目标总威胁。

$$h_1 = \sum_{t=1}^s \omega_t e_t \quad (4)$$

式中, $e_t (0 < e_t < 1)$ 为第 t 个目标威胁值; ω_t 为第 t 个目标权重, 且 $\sum_{t=1}^s \omega_t = 1$ 。

2.1.4 时延威胁确定

数据链是地面站与UCAV之间的联系纽带,指令数据在空间传输中会产生时延,不同环境下数据时延不同,时延很可能造成复杂战场态势中战机的错失。通过调整不同权限,最大化捕捉战机,设地面控制命令发送时刻为 τ_s ,UCAV收到命令时刻为 τ_r ,则时延威胁为

$$h_2 = \begin{cases} 1, & \mu > 1.5 \\ 0, & \mu < 0.5 \\ \mu - 0.5, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\mu = \Delta\tau_r / \tau_a$ 为时延比; $\Delta\tau_r = \tau_r - \tau_s$ 为当前时延; $\tau_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta\tau_i$ 为平均时延; $\Delta\tau_i$ 为当前时刻之前的第*i*次时延。

2.1.5 权限调整

综合考虑战场目标威胁及时延威胁,采用式(6)计算综合威胁:

$$h = \alpha h_1 + \beta h_2 \quad (6)$$

式中, α 表示目标威胁权重; β 表示时延威胁权重,且 $\alpha + \beta = 1$ 。在不同作战过程取不同权值。采用式(7)调整权限:

$$L = \begin{cases} L + 1, & h > 0.7c^i \\ L - 1, & h < 0.3c^i \\ L, & 0.3c^i \leq h \leq 0.7c^i \end{cases} \quad (7)$$

式中, c^i 为第*i*个过程调整系数。

2.2 控制权限管理流程

UCAV控制权限动态管理计算步骤如下:

- 步骤 1 作战过程确定;
- 步骤 2 过程通用级别确定,通过式(1)~式(2)确定过程通用级别及过程权限级别约束;
- 步骤 3 通过式(3)计算故障威胁,修订权限级别约束;
- 步骤 4 通过式(4)计算目标威胁,式(5)计算时延威胁;
- 步骤 5 采用式(6)计算综合威胁;
- 步骤 6 采用式(7)调整控制权限级别;
- 步骤 7 采用修订后的权限级别进行约束;
- 步骤 8 给出权限控制级别。

3 仿真研究

3.1 仿真算例 1

假设作战过程按照起飞、巡航、传感器管理、威胁评估、武器管理、武器投放、返航 7 过程描述,如图 2 所示。

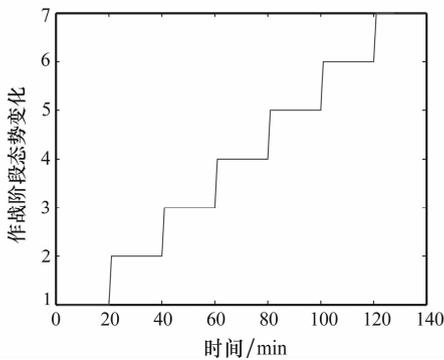


图 2 战场态势变化曲线

战场目标威胁、数据链时延比动态变化曲线分别如图 3、图 4 所示。综合威胁变化曲线如图 5 所示。

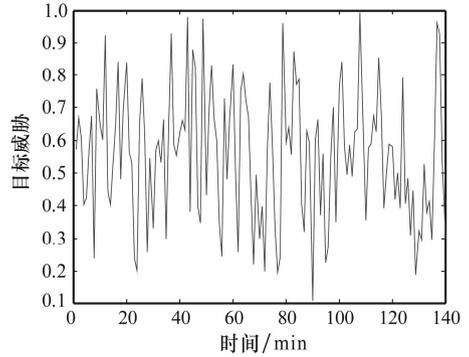


图 3 战场目标威胁变化曲线

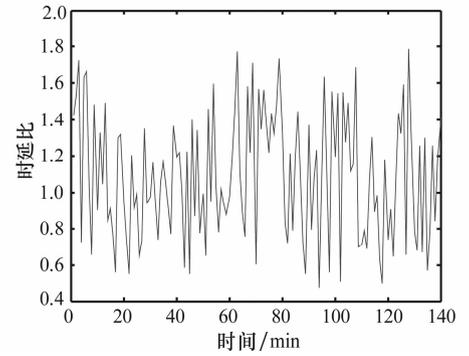


图 4 时延比变化曲线

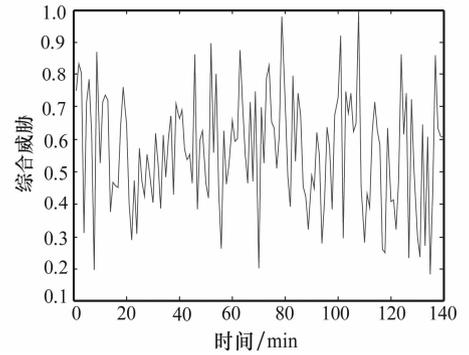


图 5 综合威胁变化曲线

采用本文算法得到的UCAV控制权限变化结果如图 6 所示。

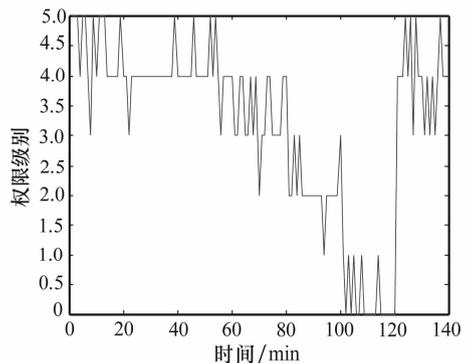


图 6 控制权限变化曲线

可见战场目标威胁与时延比随作战阶段推进动态变化,UCAV 控制权限也随之改变。初始阶段,权限授权级别较高,多为授权系统执行或系统自主执行。随着作战阶段进行到威胁评估、武器管理阶段,由于武器的参与,控制权限逐步降低,到武器投放阶段,基本为地面操控或操控请求级别,全部由人员控制,完成攻击后权限级别又回归到高权限级别。这也与实际真实情况相吻合。在 UCAV 飞抵战区、返航过程中,多由 UCAV 系统自主飞行,在参与作战、武器发射等情况下,武器的加入易导致人员伤亡等状况发生,需谨慎处理,多由人员参与控制,降低系统控制权限。

3.2 仿真算例 2

采用仿真算例 1 设置条件,在 55~70 min、130~140 min 时段内人为设置 UCAV 故障,生成新的控制权限变化曲线如图 7 所示。

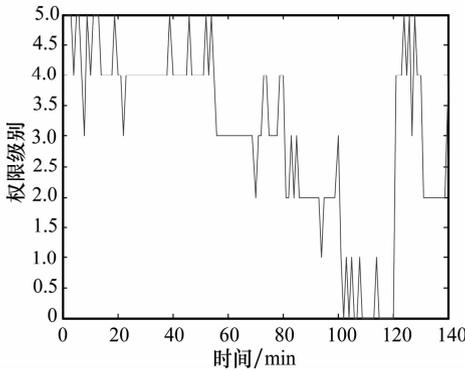


图 7 控制权限变化曲线

UVAV 在 55~70 min 内发生故障,与图 6 相比,控制权限被限制为 3 级,随着故障修复,控制权限继续动态变化;在 130~140 min 内,新故障的出现,控制权限被限制为 2 级。可见权限变化与 UCAV 故障状态相关联。UCAV 正常状态下,其权限控制紧随战斗进程而变化;出现故障状态下,UCAV 在系统自身能力下,调整权限控制,完成权限动态管理。

4 结 论

本文针对 UCAV 自主控制权限管理问题,结合作战过程,建立了 7 阶段 6 层体系的 UCAV 控制权限划分模型。在过程通用级别、故障威胁、目标威胁、时延威胁计算模型基础上,建立了基于过程的 UCAV 控制权限动态管理模型,设计了控制权限调整流程,并进行了仿真研究。该方法与整个作战过程紧密结合,在故障实时自我诊断基础上,动态调整 UCAV 控制权限,在地面人员的控制下,合理利用 UCAV 自主优势,有效减轻地面人员操作负担。

参考文献:

[1] Proud R W, Hart J J, Mrozinski R B. Methods for determining the level of autonomy to design into a human spaceflight vehicle: a function specific approach[C]// *Proc. of the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop*, 2003;1-15.
 [2] Clough B T, Schmetrics M. How the heck do you determine a UAV's autonomy anyway[C]// *Proc. of the Performance Met-*

rics for Intelligent Systems Workshop, 2002;313-319.
 [3] Cambone S A, Krieg K, Pace P, et al. Unmanned aircraft systems(UAS) roadmap, 2005-2030[R]. Washington DC: Office of the Secretary of Defence, 2005.
 [4] Huang H M. Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework volume I; terminology version 2. 0[R]. Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology, 2008.
 [5] Huang H M, Pavek K, Novak B, et al. A framework for autonomy levels for unmanned systems (ALFUS)[C]// *Proc. of the AUVSI's Unmanned Systems*, 2005;1-9.
 [6] Huang H M, Pavek K, Albus J. Autonomy levels for unmanned systems (ALFUS) framework; an update[C]// *Proc. of the SPIE Defense and Security Symposium*, 2005;439-448.
 [7] Huang H M. Autonomy levels for unmanned systems(ALFUS) framework; safety and application issues[C]// *Proc. of the Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS) Workshop*, 2007;48-53.
 [8] Freedy A, Sert O, Freedy E, et al. Multiagent adjustable autonomy framework(MAAF) for multi-robot, multi-human teams[C]// *Proc. of the Symposium on Collaborative Technologies & Systems*, 2008;498-505.
 [9] Fereidunian A, Lesani H, Lucas C, et al. A framework for implementation of adaptive autonomy for intelligent electronic devices[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2008, 8(20): 3721-3726.
 [10] Kaupp T, Makarenko A. Measuring human-robot team effectiveness to determine an appropriate autonomy level[C]// *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena*, 2008;2146-2151.
 [11] 高劲松,王朝阳,陈哨东.对美国无人机自主控制等级的研究[J]. *航空科学技术*, 2010(2): 40-43. (Gao J S, Wang C Y, Chen S D. Study on UAV's autonomous control level[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2010(2): 40-43.)
 [12] 高劲松,邹庆元,陈哨东.无人机自主性概念研究[J]. *电光与控制*, 2007, 14(5): 58-61. (Gao J S, Zou Q Y, Chen S D. Study on the concept of autonomy for UAV[J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(5): 58-61.)
 [13] 朱华勇,牛铁峰,沈林成,等.无人机系统自主控制技术研究现状与发展趋势[J]. *国防科技大学学报*, 2010, 32(3): 115-120. (Zhu H Y, Niu Y F, Shen L C, et al. State of the art and trends of autonomous control of UAV systems[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2010, 32(3): 115-120.)
 [14] 唐强,朱志强,王建元.国外无人机自主飞行控制研究[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(3): 418-422. (Tang Q, Zhu Z Q, Wang J Y. Survey of foreign researches on autonomous flight control for unmanned aerial vehicles[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(3): 418-422.)
 [15] 陈海,王新民,赵凯瑞.无人作战飞机自主控制分级递阶控制结构[J]. *航空学报*, 2008, 29(s1): 224-228. (Chen H, Wang X M, Zhao K R. Hierarchical control architecture of autonomous control for unmanned combat aerial vehicles[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(s1): 224-228.)
 [16] 周锐,李惠峰,陈宗基.无人战术飞行器的自主控制[J]. *控制与决策*, 2001, 16(3): 344-346. (Zhou R, Li H F, Chen Z J. Autonomous control of unmanned tactical aircraft[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(3): 344-346.)