

无人作战飞机操控/自主 CCRP 攻击系统建模与仿真

尹茂阳¹, 陈哨东², 张安¹, 李冲¹

(1. 西北工业大学电子信息学院, 西安 710129; 2. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘要: 基于空地轰炸的模式设计了无人作战飞机操控/自主攻击系统。该系统有智能化的自主决策能力、对复杂环境的适应力、较高的可靠性,能合理地消除攻击过程中的瞄准偏差。借鉴模糊控制原理构建了操控导引系统,将火力控制系统和飞行控制系统结合起来。仿真结果表明,该系统可有效地完成轰炸任务。

关键词: 无人作战飞机; 操控/自主攻击系统; 火力控制系统; 操控导引系统; 模糊控制

中图分类号: V249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)02-0001-04

Modeling and Simulation of a Controlled/Autonomous CCRP Attack System for UCAVs

YIN Maoyang¹, CHEN Shaodong², ZHANG An¹, LI Chong¹

(1. College of Electronic Communication, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Science and Technology on Electron-Optic Control Laboratory, AVIC, Luoyang 471009, China)

Abstract: Based on air to ground bombing mode, a controlled/autonomous attack system was designed for Unmanned Aerial Combat Vehicles (UCAV). The system has the advantages of autonomous decision-making capability, adaptability to complex environment and high reliability, which can reasonably eliminate the aiming deviation in attacking process. The control and guidance system was designed by using fuzzy control theory as a reference, which combined the fire control system with the flight control system. Simulation results show that the UCAVs equipped with this system can achieve good performance in automatic ground target attacking.

Key words: UCAV; controlled/autonomous attack system; fire control system; control and guidance system; fuzzy control

0 引言

在现代高技术条件下的陆、海、空、天、电五维一体的战争中,由于作战模式的变化,UCAV 凭借其“长航时”、“高机动”、“零伤亡”、“低损耗”等特点,受到了各国越来越多的关注。UCAV 在战场中要完成自主攻击全过程,对其控制系统的特性提出较高的要求。

文献[1-3]提出无人机自主控制技术,本文在此基础上引入智能控制理论,设计了UCAV 操控/自主攻击系统,将相互关联的子系统集成一个宏观有序的大系统。它以自动化指挥与控制系统为核心,实现了探测器系统、数据传输系统、地面指挥控制系统、火力控制系统、飞行控制系统以及武器毁伤评估系统的综

合。通过该系统,取得攻击所需要的正确的火力决策,进而独立完成各类复杂作战任务。

1 操控/自主攻击系统配置

UCAV 进入战场后,获取攻击目标信息有时间延迟,延迟对操控/自主攻击精度会产生影响。UCAV 获取目标信息的流程如图1所示。

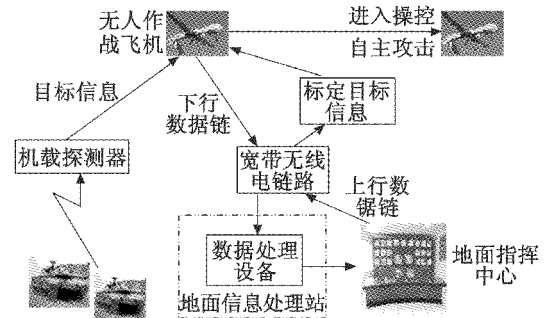


图1 UCAV 获取目标信息流程

Fig.1 The process for UCAV to get target information

收稿日期:2011-12-30

修回日期:2012-03-07

基金项目:航空科学基金(2011ZC53)

作者简介:尹茂阳(1986—),男,山东肥城人,硕士生,研究方向为先进火力/飞行耦合控制,复杂系统建模与仿真。

机载探测器获取地面目标信息后,将信息通过下行数据链路传输给地面指挥控制中心进行目标甄别和标定,地面指挥中心再将要攻击目标通过上行数据链路传输给UCAV。获取到要攻击目标信息后,UCAV启动操控/自主攻击系统对目标进行打击。

UCAV操控/自主攻击系统实现的模型结构如图2所示。

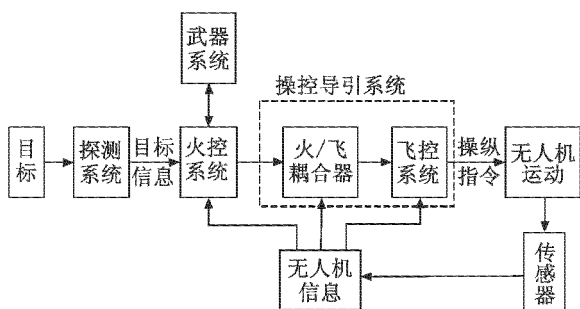


图2 UCAV操控/自主攻击模型结构图

Fig.2 Structure of controlled/autonomous attack system

UCAV进入战场后,机载探测器获取到目标的相关信息,输入到火控系统中。火控计算机根据UCAV当前位置信息、目标相关信息和武器信息解算出火控瞄准偏差。再由火/飞耦合器根据偏差进行类别判断,飞行控制系统根据判断结果生成操纵指令,操纵UCAV实现航迹控制。待到方向瞄准误差和距离瞄准误差都消除到满足攻击条件时,向武器系统发送投放指令攻击地面目标。整个操控/自主攻击系统简化分为两大模块,一个是火控系统模块,另一个是操控导引系统模块,包括了火/飞耦合器和飞行控制系统。文献[4-7]使用经典PID控制理论解决火力/飞行耦合问题,本文用模糊控制思想设计了操控导引系统,解决了UCAV火力/飞行系统的耦合问题。

2 操控/自主攻击系统的建模

2.1 火控系统

UCAV在对地面目标进行轰炸时,可采用水平轰炸、水平机动轰炸和俯冲拉起轰炸3种攻击模式^[8],模式的选取根据UCAV和目标间的相对位置关系以及战场环境状况。本文中基于炸弹弹道拟合方程,火控系统采用CCRP攻击方式计算出瞄准误差。方向瞄准误差指UCAV当前飞行方向和轰炸有解方向之间的差值。距离瞄准误差是指UCAV当前点和投弹点的距离误差。

图3为UCAV水平轰炸俯视图。图中: O 为投弹点; α 为偏流角; U, ε 分别为风速和风向角; ΔK 为航向修正量; K_m 为目标相对UCAV速度矢量的水平方位角; C, M 分别为爆炸点和目标点; A_0 为炸弹水平射程; α^* 为爆炸点偏侧角。

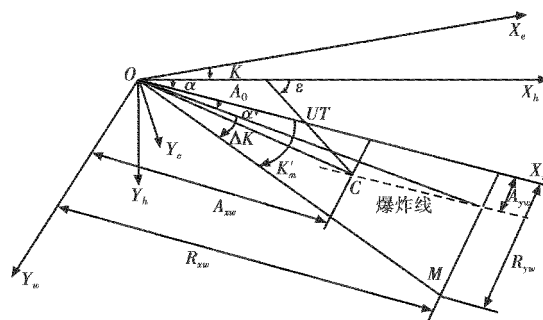


图3 UCAV水平轰炸俯视图

Fig.3 Top view of UCAV level bombing

根据图3得到炸弹综合射程 A 在航向坐标系 $(OXYZ)_h$ 中的坐标分量为

$$\begin{cases} A_{xh} = A_0 + UT \cos \varepsilon \\ A_{yh} = UT \sin \varepsilon \\ A_{zh} = H \end{cases} \quad (1)$$

式中: T 为风速修正量; H 为飞机高度。

将 A 转换到地速坐标系 $(OXYZ)_w$ 中得到

$$\begin{aligned} A &= [A_{xh} \ A_{yh} \ A_{zh}] I_h = \\ &[A_{xh} \ A_{yh} \ A_{zh}] T_{w,h}^T I_w = [A_{xw} \ A_{yw} \ A_{zw}] I_w \end{aligned} \quad (2)$$

则 A 在地速坐标系 $(OXYZ)_w$ 中的分量可表示为

$$\begin{cases} A_{xw} = A_0 \cos \alpha + UT \cos(\alpha - \varepsilon) \\ A_{yw} = -A_0 \sin \alpha - UT \sin(\alpha - \varepsilon) \\ A_{zw} = H \end{cases} \quad (3)$$

从目标标定时刻起到达 O 点,UCAV飞行了 t 时间,目标斜距在地速坐标系 $(OXYZ)_w$ 中的水平距离分量为 R_{xw} 和 R_{yw} 。若到达 O 点, $A_{yw} = R_{yw}$,则UCAV完成方向瞄准。若 $A_{yw} \neq R_{yw}$,应修正UCAV航向。

方向瞄准偏差为 ΔK ,有

$$\Delta K = K'_m - \alpha^* \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} K'_m = \arcsin \frac{R_{yw}}{\sqrt{R_{xw}^2 + R_{yw}^2}} \\ \alpha^* = \arcsin \frac{A_{yw}}{\sqrt{R_{xw}^2 + A_{yw}^2}} \end{cases} \quad (5)$$

距离瞄准应在方向瞄准完成的基础上进行。距离瞄准偏差 ΔD 为

$$\Delta D = \sqrt{R_{xw}^2 + A_{yw}^2} - \sqrt{A_{xw}^2 + A_{yw}^2} \quad (6)$$

2.2 操控导引系统

该系统负责获取火控系统解算的准确攻击误差后对偏差的转换。决策产生飞行控制量控制UCAV运动。偏差转换借鉴了模糊控制原理,同时结合实际工程应用需要,将方向瞄准偏差即 ΔK 的计算结果按区间分为高方向、中方向、低方向3个误差段。每个误差段选择不同的操控导引控制策略。

1) 高方向误差段,也称为粗调段,表现为方向误差较大,此段内,控制规则要求飞机以大的法向过载做水平机动,以迅速减小方向误差。

2) 中方向误差段,也称为微调段,仍未完成方向瞄准,但误差已经不大。此段与高方向误差段的分界为一个仿真步长的方向调整量。算法如下所述。

假设某一时刻,无人作战飞机速率为 v ,水平机动过载为 n ,综合射程为 L ,则水平转弯角速度为

$$\omega = ng/v \quad (7)$$

若仿真步长为 d_s ,则单位仿真步长的方向调整量为

$$Y_0 = \omega d_s L = ngd_s L/v \quad (8)$$

若该时刻,方向瞄准误差 $D_y > Y_0$,则属于高误差段,否则为中误差段。

3) 低方向误差段,又称直飞段,表示方向瞄准已经完成,控制规则为保持无人作战飞机航向直飞,以减小距离瞄准误差,直至距离瞄准完成。

在仿真中 ΔK 用 D_y 表示, ΔD 用 D_x 表示; X_T, Y_T 为误差允许的最小值。操作流程如图4所示。

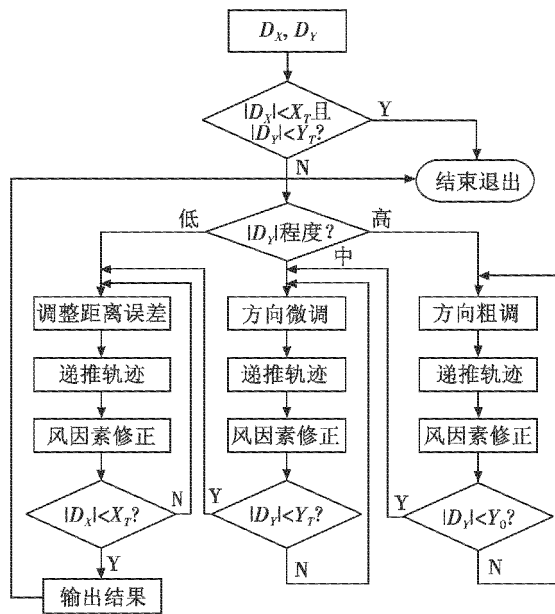


图4 操控导引控制分析

Fig. 4 Analysis of control and guidance system

2.3 UCAV 运动模型

在地面坐标系下,UCAV 运动学方程组为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_{dx} = v \cos \theta \cos \psi_s \\ \frac{dy}{dt} = v_{dy} = v \sin \theta \\ \frac{dz}{dt} = v_{dz} = -v \cos \theta \sin \psi_s \end{cases} \quad (9)$$

式中: (x, y, z) 为 UCAV 位置向量在地面坐标系上的投影矢量; v 为速度; θ 为航迹倾斜角; ψ_s 为航向角。

在地面坐标系下,UCAV 的动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{dv_{dx}}{dt} = g \cdot n_{dx} \\ \frac{dv_{dy}}{dt} = g \cdot n_{dy} + g \\ \frac{dv_{dz}}{dt} = g \cdot n_{dz} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $(v_{dx}, v_{dy}, v_{dz})^T$ 为 UCAV 速度的分量; $(dv_{dx}/dt, dv_{dy}/dt, dv_{dz}/dt)^T$ 为 UCAV 加速度在地面坐标系 $(OX_d Y_d Z_d)$ 上的投影矢量; $(n_{dx}, n_{dy}, n_{dz})^T$ 为过载在地面坐标系 $(OX_d Y_d Z_d)$ 上的投影矢量。

$n_s = (n_{sx}, n_{sy}, n_{sz})^T$ 为过载在速度坐标系 $(OX_s Y_s Z_s)$ 上的投影矢量,具体计算方法为

$$n_s = (n_{sx}, n_{sy}, n_{sz})^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{mg} (P \cos(\alpha + \varphi_p) \cos \beta - Q) \\ \frac{1}{mg} (P \sin(\alpha + \varphi_p) + Y) \\ \frac{1}{mg} (-P \cos(\alpha + \varphi_p) \sin \beta + Z) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: P 为 UCAV 的发动机推力; Q 为 UCAV 飞行时受到的空气阻力; Y 为空气流经机翼表面时产生的升力; Z 为侧向力; g 为重力加速度; α 为 UCAV 的攻角; β 为 UCAV 的侧滑角; φ_p 为 UCAV 发动机的安装角。

3 仿真算例

在 VC 平台下进行仿真,分为动态和静态两种模式。动态模式动态演示 UCAV 自主攻击过程;静态模式通过蒙特卡罗误差分析法分析目标信息标定延迟对轰炸精度的影响。

3.1 动态模式下仿真

1) UCAV 进入战场后,首先得出 UCAV 的初始位置,选择 UCAV 攻击模式为俯冲拉起模式。风速设定为 5 m/s ,风向为 0° ;软件可设定多次执行,选取 2 次攻击演示。

2) 当仿真开始,UCAV 先向前直飞,进入探测目标状态,此时 UCAV 信息为:位置 $(118.352^\circ, 24.559^\circ)$,高度 1000 m ,速度 200 m/s 。界面中显示:“直飞中,等待标定目标……”。UCAV 获取标定目标后,目标位置为 $(118.863^\circ, 24.875^\circ)$,高度为 0 m 。标定会出现延迟,延迟时间为 9.72 ms 。UCAV 立即进行转向,消除火控解算中的方向偏差,粗略调整到目标轰炸有解方向飞行。

3) 当 UCAV 到目标附近,自动投下炸弹对目标进行轰炸。UCAV 高度由 1000 m 降至 400 m 左右进行投弹。UCAV 投弹点为 $(118.849^\circ, 24.868^\circ)$,高度 498.7 m 。

攻击状态如图5所示。

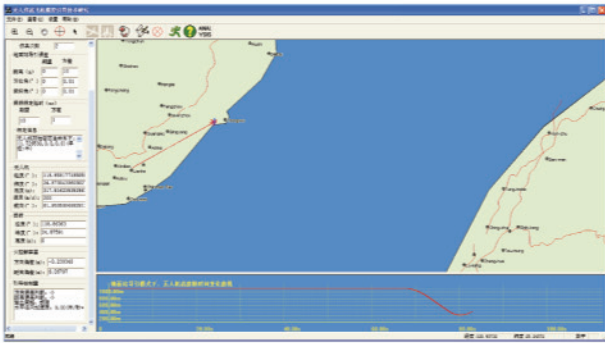


图5 UCAV 攻击效果图

Fig. 5 Attack effect of UCAV

4) 攻击结果分析如表1所示。

表1 攻击结果分析图

Table 1 Analysis of attack results

	弹着点 方向误 差/m	弹着点 距离误 差/m	方向 误差 期望 /m	方向 误差 均方 差/m	距离 误差 期望 /m	距离 误差 均方 差/m	落点 直线 误差 期望 /m	落点 直线 误差 均方 差/m
第一次 攻击	-25.01	29.13	-13.7	16.1	44.9	22.3	49.6	15.8
第二次 攻击	-2.303	60.67	-13.7	16.1	44.9	22.3	49.6	15.8

通过两次仿真和结果分析可知,UCAV 对目标的轰炸过程是有效的。

3.2 在静态模式下仿真

1) UCAV 初始位置(118.362°,24.635°),高度1000 m,速度200 m/s;UCAV 攻击模式为俯冲拉起模式。标定目标后目标位置(118.198°,24.921°),高度0 m;风速5 m/s。仿真次数50次。

2) 使用蒙特卡罗法分析标定延迟对轰炸精度的影响。

炸弹落点和目标的直线误差期望曲线如图6所示。

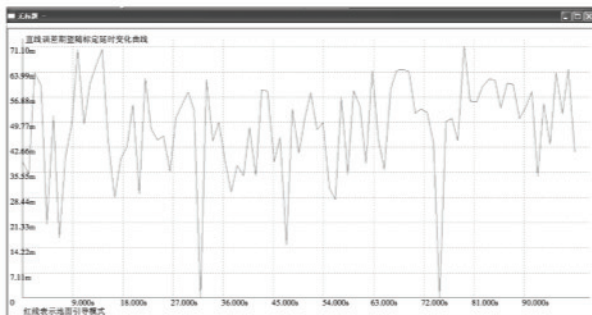


图6 攻击误差期望分析

Fig. 6 Analysis of attack mean deviation

由图6可知:在标定信息延迟的情况下,无人作战飞机获取目标确定信息时间滞后导致UCAV进行火控解算的初始位置改变,影响了轰炸效果。炸弹落点和目标的直线误差期望曲线分布在0~71.10 m之间,符

合预先设定要求。

炸弹落点和目标的直线误差方差曲线如图7所示。

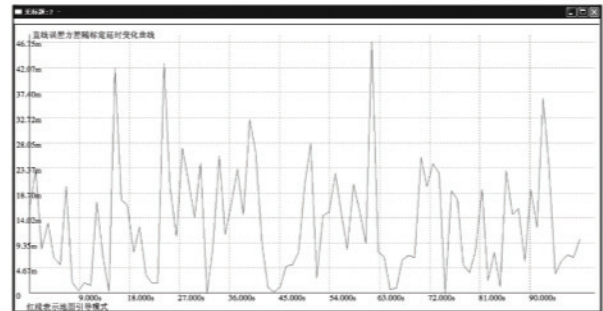


图7 攻击误差方差分析

Fig. 7 Variance analysis of deviation

由图7可知:攻击误差的方差在0~46.75 m之间,分布在允许范围内。

标定延迟会对攻击投弹精度产生影响。应该尽量提高UCAV自主决策能力,减少和地面指挥站之间的信息交互;如必须要进行数据链路传输,应提高数据链路的传输效率和抗干扰能力,尽量减少或者缩短延迟。

4 结论

通过建模和仿真实验验证可知,UCAV采用操控/自主攻击系统不论从操控导引效果、轰炸精度等指标衡量,还是基于模糊控制理论的实现的可行性来看,都不失为一种很有效的智能化攻击系统。将智能控制理论引入具体的实践工程中是可行的,同时对今后UCAV自主攻击系统设计有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 郭锁凤,申功章,吴成富,等.先进飞行控制系统[M].北京:国防工业出版社,2003.
- [2] 任宏光,刘颖.无人作战飞机侦察打击一体化武器系统发展[J].飞航导弹,2009(6):47-49.
- [3] 曹璐.UCAV侦察/打击一体化自主控制关键技术研究[D].西安:西北工业大学,2011.
- [4] 龚华军,杨一栋.智能火力/飞行综合控制系统研究[J].东南大学学报:自然科学版,2003,33(s1):27-30.
- [5] 秦啸.无人作战飞机综合火力/飞行系统建模与仿真[D].西安:西北工业大学,2007.
- [6] 王庆田,杨一栋,王新华,等.综合火力/飞行控制系统轰炸模态设计[J].海军航空工程学院学报,2004,19(5):573-516.
- [7] 王新华,杨一栋,周波.综合火力/飞行控制系统火飞耦合器设计技术研究[J].南京航空航天大学学报,2003,35(2):203-207.
- [8] 雷仲魁,仲筱艳,钱默抒.无人驾驶飞机飞行控制新技术[J].南京航空航天大学学报,2009,41(s):12-14.