

1-3-2019

## Evasive Maneuvers Against Missiles for Unmanned Combat Aerial Vehicle in Autonomous Air Combat

Xizhong Yang

*Department of Aeronautics and Astronautics, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

Jianliang Ai

*Department of Aeronautics and Astronautics, Fudan University, Shanghai 200433, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Evasive Maneuvers Against Missiles for Unmanned Combat Aerial Vehicle in Autonomous Air Combat

### Abstract

**Abstract:** For UCAV having the capability to deal with autonomous air combat, the flight dynamics model with the overload input and the 3-dimensional proportional navigation guidance model were established. Based on artificial neural network, an evasive maneuver decision was presented for avoiding incoming missiles. *The degrees of freedom for UCAV-missile system were reduced by coordinate transformation, which simplified the complicated model as a non-linear model with relatively small amount of input and a single output.* After the neural network samples were generated and trained, *evasive results could be directly predicted from the relationship of positions between UCAV and missile through neural network, providing real-time evasive strategies to UCAV.* Simulation example was also presented to verify the evasive method's effectiveness.

### Keywords

UCAV, autonomous air combat, neural networks, maneuvers decision, evasive strategy

### Recommended Citation

Yang Xizhong, Ai Jianliang. Evasive Maneuvers Against Missiles for Unmanned Combat Aerial Vehicle in Autonomous Air Combat[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1957-1966.

## 自主空战中无人机规避导弹机动策略研究

杨曦中, 艾剑良

(复旦大学航空航天系, 上海 200433)

**摘要:** 针对具有一定自主空战能力的无人机, 建立了以过载为输入的飞行动力学模型和采用三维比例导引法的导引弹道模型, 并且结合神经网络为无人机设计了一种规避来袭导弹的机动策略。通过坐标系的变换减少了“无人机—导弹”这一复杂系统的自由度, 将系统模型简化为少数变量输入和单变量输出的非线性模型。基于此模型生成并学习神经网络的样本库, 并利用神经网络直接从无人机与导弹的位置关系预测规避结果, 为无人机实时提供规避策略。仿真算例验证了规避算法的有效性。

**关键词:** UCAV; 自主空战; 神经网络; 机动决策; 规避策略

中图分类号: TP.391.9 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2018) 05-1957-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805043

## Evasive Maneuvers Against Missiles for Unmanned Combat Aerial Vehicle in Autonomous Air Combat

Yang Xizhong, Ai Jianliang

(Department of Aeronautics and Astronautics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** For UCAV having the capability to deal with autonomous air combat, the flight dynamics model with the overload input and the 3-dimensional proportional navigation guidance model were established. Based on artificial neural network, an evasive maneuver decision was presented for avoiding incoming missiles. *The degrees of freedom for UCAV-missile system were reduced by coordinate transformation, which simplified the complicated model as a non-linear model with relatively small amount of input and a single output.* After the neural network samples were generated and trained, evasive results could be directly predicted from the relationship of positions between UCAV and missile through neural network, providing real-time evasive strategies to UCAV. Simulation example was also presented to verify the evasive method's effectiveness.

**Keywords:** UCAV; autonomous air combat; neural networks; maneuvers decision; evasive strategy

## 引言

未来战争里, 空中是一个主要战场, 制空权的争夺对于争取战场优势具有重要意义。作为

未来主要的空中武器——无人战斗机(Unmanned Combat Aerial Vehicle, UCAV), 其自主空战能力的研究是目前世界先进航空技术和军事技术的前沿领域之一。自主空战中的机动决策, 指的是基于数学优化算法和人工智能等方法, 模拟空战中飞行员的空战决策, 依托计算机系统生成对战斗机的战术机动决策和操纵指令。成熟的无人机自主空战技术, 不仅有助于提高战斗机的作战能力, 还能减少人员的伤亡, 降低战斗成本, 因此



收稿日期: 2016-05-27 修回日期: 2016-11-16;  
作者简介: 杨曦中(1990-), 男, 河南焦作, 博士, 研究方向为飞行力学与飞行控制, 自适应滤波算法等; 艾剑良(1965-), 男, 江西临川, 博士, 教授, 博导, 研究方向为飞行器总体设计, 飞行控制与仿真技术等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1957 •

受到研究人员的重视。

在传统的空战中,战斗机面对来袭导弹,飞行员通常依靠自己的经验做出决策——何时做出何种机动动作进行规避。然而现代高性能导弹使战斗机的作战环境愈加恶劣,甚至有研究表明当导弹最大可承受过载达到飞行器3倍以上时,飞行员使用传统的空战模式已经很难逃脱导弹的攻击。这些都迫使今后研发的UCAV寻找更有效的规避策略。战斗机除了依赖于良好的生存能力设计特性以外,很大程度上还要依赖于飞行机动或飞行战术的运用。长期以来,研究人员对于战斗机生存能力的研究集中在飞机本身的设计方法上,而关于战术策略对于飞机生存能力的研究也偏向于定性。所幸,具备自主空战能力的UCAV拥有了新的优势对抗导弹:一是依靠计算机强大的数据处理能力做出自主决策,比人类大脑可以更快速地计算和更准确地分析各项复杂的数据;二是UCAV不需要考虑飞行员生理条件的限制,可以做出更多高过载的机动动作来完成逃逸。

上个世纪后半段以来,学者们就致力在理论上研究战斗机规避导弹的机动方法,并取得了一些初步结论。Fumiaki Imado<sup>[1]</sup>通过数值计算对比了大过载时滚筒和破S机动对导弹脱靶量的不同影响,指出战斗机采用滚筒机动对抗导弹更有优势。Shaw Ong<sup>[2]</sup>研究了战斗机对抗萨姆导弹的最优机动决策问题,主要针对初始时刻飞机的不同飞行状态,定性地给出了在水平面内和竖直面内选择规避机动动作的指导性方案。Remzi Akdag和Deniz Altılar<sup>[3]</sup>设计了使用一架战斗机模型模拟导弹追击另一架战斗机的仿真场景,用包含不等式约束的最优化问题求解三维逃逸轨迹,最终验证了水平面内的破S机动规避导弹的有效性。

近年来,随着无人机和未来空战模式研究的兴起,研究的重点从有人战斗机转移到无人战斗机规避导弹的问题上。文献[4]研究了战斗机防御一种基于视线角导引律的导弹时,自身最大速度和最大加速度对逃逸机动路线的影响。文献[5]研究了战

斗机同时防御两枚导弹攻击时的逃逸策略问题。文献[6]主要研究了在同一平面内运动的UCAV规避导弹的机动策略问题。文献[7]基于微分对策理论,以导弹的脱靶量和能量为指标,以初始时刻的机动状态、初始位置和速度作为参数建立解析表达式,仿真验证战斗机的突防效果,证明了在有限的过载下,选择适当的机动可以提高规避效果。文献[8]研究了具有矢量推力发动机的UCAV以一定的概率选择不同机动规避导弹时的逃逸概率,并得到了“UCAV最大可用过载越大,逃逸概率越大”这一结论。文献[9]对战场威胁评估、决策优化和机动防御三方面进行了综合研究,参考导弹方位,通过遗传算法计算了几种机动方案的逃逸概率,并选择出最优方案。文献[10]基于人工势场理论,对导弹相对无人机的势力场进行分析后,构建一个态势模型,并利用该模型研究了迎头攻击和尾追攻击时无人机的规避机动策略。

总体上来看,首先,已有的相关研究多数是在较多限制条件下完成的,比如固定了飞机和导弹初始位置关系和姿态关系,或者两者的性能严格限定、算法扩展性不强,或者只做一种或少数机动动作、甚至是目前UCAV可能还不便完成的超机动动作等;其次,目前的研究结果偏向于定性而非定量,只能模糊地说明在某一类战场态势下选取哪些机动较优,却难以用明确的包线界定选择的标准。本文通过对导弹攻击UCAV过程的飞行仿真,研究无人机战术机动对其逃逸导弹攻击能力的影响,并利用神经网络的快速预测能力选择规避机动和开始机动的时刻,为UCAV提供可以量化的机动策略。

## 1 “UCAV-导弹”模型的建立

### 1.1 UCAV 规避导弹的数学模型介绍

建立模型前,首先提出几条在一定程度上简化问题而又不失实用性的假设:

- (1) 考虑规避过程的UCAV和导弹的空间位

置变化相对地球半径尺寸较小, 建立坐标系时忽略地球表面的曲面效应;

(2) 忽略由于飞行高度变化带来的大气密度变化对飞机和导弹的气动参数的影响;

(3) 考虑 UCAV 通常情况下为水平平飞状态, 因此假定规避过程初始时刻为水平飞行;

(4) 假设 UCAV 发现导弹的时刻, 导弹已经完成对目标的比对过程, 导弹速度矢量指向攻击目标, 以稳定速度飞行;

(5) 为了充分发掘 UCAV 规避导弹的能力, 假设导弹的性能发挥到最佳, 即忽略导引头的瞄准盲区限制; 导弹具有全向攻击能力; 导弹具有近炸引信且杀伤区内破坏力达到最大。

基于以上假设, 给定初始条件, 可以建立导弹追击 UCAV 的仿真模型。UCAV 在侦测到导弹来袭后, 开始做出一系列的反应(即机动动作)躲避, UCAV 的位置变化和姿态变化由机动动作决定。而导弹根据自身与 UCAV 的相对位置关系在制导作用下调整姿态保持追击, 直至满足仿真结束条件。总体上, 在一次仿真中, 需要推进的计算有:

(1) 根据飞行器动力学和运动学方程, 计算 UCAV 每一时刻的姿态和位置变化;

(2) 根据导弹与 UCAV 的空间位置关系以及导引规律, 计算导弹的位置变化;

(3) 判断是否满足仿真结束条件。

## 1.2 坐标系转换过程介绍

初始时刻, UCAV 和导弹即使各自三维坐标确定(即相对位置关系确定), 考虑到飞机的速度矢量不同, 飞行路径也就不同, 导弹相应追击路线也不同, 导弹能否击中 UCAV 的结果也大相径庭。“UCAV—导弹”两者构成的一个运动学系统是一个多自由度问题, 研究起来就比较复杂。笔者通过坐标系转换, 使得问题大大简化。

(1) 平移坐标系。把新坐标系原点定于导弹质心, 这样可以把两者独立的三维坐标关系从 6 个自由度简化到 3 个自由度。

(2) 旋转坐标系。使新坐标系的  $x$  轴方向与

UCAV 的速度矢量方向一致。加上初始条件限定——UCAV 初始时刻为水平面内的机动, 纵向速度分量为 0, UCAV 的角位置由 3 个自由度简化为 1 个自由度。

这种坐标系转换的有效性可以简单说明: 以导弹为圆心, 初始时刻 UCAV 位于圆周上任何一点且速度矢量方向与半径的夹角相同时, “UCAV—导弹”系统的计算过程相同, UCAV 和导弹飞行路径的形状完全一致, 攻击结果相同。可以把这些相似的情况统一为同一模型, 如图 1 所示。出于简化计算的考虑, 设定新坐标系的  $x$  轴方向为 UCAV 的速度矢量方向。

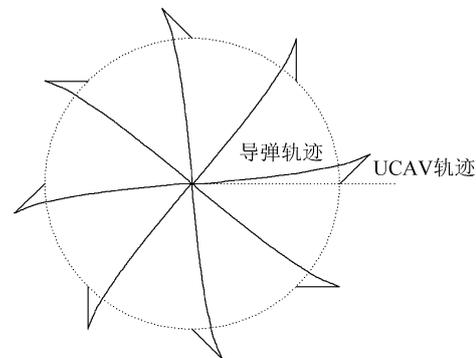


图 1 相似“UCAV—导弹”位置关系与轨迹示意图  
Fig. 1 UCAV-missile paths of similar position relationships

设初始时刻, UCAV 在地面坐标系  $O_d x_d y_d z_d$  中的坐标为  $A_{d0}(x_{d,a0}, y_{d,a0}, z_{d,a0})$ , 导弹的坐标为  $M_{d0}(x_{d,m0}, y_{d,m0}, z_{d,m0})$ ; UCAV 的速度矢量为  $\mathbf{v}_{d,a0} = v_{x,a0}\mathbf{i}_d + v_{y,a0}\mathbf{j}_d + v_{z,a0}\mathbf{k}_d$ , 导弹的速度矢量为  $\mathbf{v}_{d,m0} = v_{x,m0}\mathbf{i}_d + v_{y,m0}\mathbf{j}_d + v_{z,m0}\mathbf{k}_d$ 。其中  $\mathbf{i}_d$ 、 $\mathbf{j}_d$ 、 $\mathbf{k}_d$  为坐标系  $O_d x_d y_d z_d$  的单位矢量。

取导弹的质心位置为原点  $O_n$ 、导弹质心指向 UCAV 质心的方向为  $O_n x_n$  方向, 根据右手法则建立另一坐标系  $O_n x_n y_n z_n$ , 相应地在此坐标系中, 导弹的坐标为  $M_{n0}(0,0,0)$ , UCAV 的坐标换算为  $A_{n0}(x_{n,a0}, y_{n,a0}, z_{n,a0})$ , 且对于 UCAV 的三维坐标有关系式:

$$\begin{cases} x_{n,a0} = x_{d,a0} - x_{d,m0} \\ y_{n,a0} = y_{d,a0} - y_{d,m0} \\ z_{n,a0} = z_{d,a0} - z_{d,m0} \end{cases} \quad (1)$$

然后, 将坐标系围绕  $O_n z_n$  轴旋转  $\psi_a$  角得到新坐标系  $Oxyz$ , 使  $Ox$  轴与UCAV的速度矢量平行, 此坐标系中, UCAV的坐标为  $A_0(x_{a0}, y_{a0}, z_{a0})$ , 导弹的坐标为  $M_0(0,0,0)$ 。 $\psi_a$  满足关系式:

$$\begin{cases} \cos \psi_a = \frac{v_{x,a0}}{\sqrt{v_{x,a0}^2 + v_{y,a0}^2}} \\ \sin \psi_a = \frac{v_{y,a0}}{\sqrt{v_{x,a0}^2 + v_{y,a0}^2}} \end{cases} \quad (2)$$

根据平面内二维坐标旋转关系有:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x_{a0} \\ y_{a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_a & \sin \psi_a \\ -\sin \psi_a & \cos \psi_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n,a0} \\ y_{n,a0} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x_{n,a0} \\ y_{n,a0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi_a & -\sin \psi_a \\ \sin \psi_a & \cos \psi_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{a0} \\ y_{a0} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

而  $z_{a0} = z_{n,a0}$ 。

根据式(1)和式(3), 在新的坐标系  $Oxyz$  里, UCAV的初始时刻坐标为:

$$\begin{cases} x_{a0} = (x_{d,a0} - x_{d,m0}) \cos \psi_a + (y_{d,a0} - y_{d,m0}) \sin \psi_a \\ y_{a0} = -(x_{d,a0} - x_{d,m0}) \sin \psi_a + (y_{d,a0} - y_{d,m0}) \cos \psi_a \\ z_{a0} = z_{d,a0} - z_{d,m0} \end{cases} \quad (4)$$

仿真开始后的时刻, UCAV按照既定机动动作或机动轨迹飞行, 新坐标系中三维坐标  $A(x_a, y_a, z_a)$  以时间推进形式计算:

$$\begin{cases} x_a^{(k+1)} = x_a^{(k)} + v_{x,a}^{(k)} \Delta t \\ y_a^{(k+1)} = y_a^{(k)} + v_{y,a}^{(k)} \Delta t \\ z_a^{(k+1)} = z_a^{(k)} + v_{z,a}^{(k)} \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

导弹轨迹则根据导引规律(研究中取比例导引法)计算, 新坐标系中导弹坐标用  $M(x_m, y_m, z_m)$  表示, 由式(1)和式(4)反解回地面坐标系的关系式为:

$$\begin{cases} x_{d,m} = x_m + x_{d,m0} \\ y_{d,m} = y_m + y_{d,m0} \\ z_{d,m} = z_m + z_{d,m0} \\ x_{d,a} = x_a \cos \psi_a + y_a \sin \psi_a + (x_{d,a0} - x_{d,m0}) \\ y_{d,a} = -x_a \sin \psi_a + y_a \cos \psi_a + (y_{d,a0} - y_{d,m0}) \\ z_{d,a} = z_a + (z_{d,a0} - z_{d,m0}) \end{cases} \quad (6)$$

### 1.3 以过载为输入的飞行动力学建模

通常情况下研究UCAV和导弹的运动时, 需要考虑飞行器的刚体效应, 通过气动参数、几何外形参数等众多复杂的参数建立6自由度方程, 才可以详细计算飞行器的位置和欧拉角的变化过程。本研究中UCAV规避导弹的过程中, 空间尺度远大于研究对象本身的尺度, 因此只需要将两者考虑为质点, 只关心它们的位置关系。这里可以采用过载表示UCAV的飞行动力学关系求解飞行路径, 研究UCAV通过机动动作的变化规避导弹攻击的策略。这种处理方法可以避免算法中引入大量难以确定的气动参数。

设UCAV速度为  $V$ 、迎角为  $\alpha$ 、侧滑角  $\beta$ 、航迹倾斜角为  $\gamma$ 、航迹方位角为  $\chi$ 、航迹滚转角为  $\mu$ 、重量为  $m$ 、升力为  $Y$ 、阻力为  $D$ 、侧力为  $C$ 、发动机推力为  $T$ 、发动机安装角为  $\phi_T$ 、飞行高度上重力加速度为  $g$ , 地面坐标系中UCAV的三维坐标用  $A(x, y, z)$  表示。根据飞行动力学, 有方程:

$$\begin{cases} m\dot{V} = T \cos(\alpha + \phi_T) \cos \beta - D - mg \sin \gamma \\ -mV\dot{\gamma} = C \sin \mu - L \cos \mu + mg \cos \gamma + \\ T[-\sin(\alpha + \phi_T) \cos \mu - \cos(\alpha + \phi_T) \sin \beta \sin \mu] \\ mV \cos \theta \dot{\chi} = C \cos \mu + L \sin \mu + \\ T[\sin(\alpha + \phi_T) \sin \mu - \cos(\alpha + \phi_T) \sin \beta \cos \mu] \end{cases}$$

并且, 高速飞行小迎角无侧滑的情况下上式简化为:

$$\begin{cases} m\dot{V} = T - D - mg \sin \gamma \\ mV \cos \gamma \dot{\chi} = L \sin \mu \\ -mV\dot{\gamma} = -L \cos \mu + mg \cos \gamma \end{cases} \quad (7)$$

结合过载的定义有:

$$\begin{cases} n_x = (T - D) / mg \\ n_y = L \sin \mu / mg \\ n_z = L \cos \mu / mg \end{cases} \quad (8)$$

这里的  $n_x$  沿着速度方向, 称为切向过载;  $n_y$  和  $n_z$  垂直于速度方向, 其合过载为  $n_n = \sqrt{n_y^2 + n_z^2}$ , 称为法向过载。

联立式(7)和式(8), 得到:

$$\begin{cases} \dot{V} = g(n_x - \sin \gamma) \\ \dot{\chi} = gn_y / V \cos \gamma \\ \dot{\gamma} = g(n_z - \cos \gamma) / V \end{cases} \quad (9)$$

举例说明过载与机动状态的关系<sup>[11]</sup>:

(1) 当  $n_x = \sin \gamma$  时 UCAV 做等速飞行;  $n_x > \sin \gamma$  时做加速飞行;  $n_x < \sin \gamma$  时做减速飞行。

(2) 如果 UCAV 在铅垂面内运动, 当  $n_z = \cos \gamma$ , UCAV 直线爬升;  $n_z > \cos \gamma$ , 飞行轨迹上弯;  $n_z < \cos \gamma$ , 飞行轨迹下弯。

(3) 如果  $\gamma = 0$ , UCAV 在水平面内运动。若同时还有  $n_y = 0$ , 此时 UCAV 做水平直线飞行;  $n_y < 0$ , 左转弯;  $n_y > 0$ , 右转弯。转弯角速度为  $\dot{\chi} = gn_y / V = g\sqrt{n_n^2 - 1} / V$ , 相应的转弯半径为  $R_y = V / \dot{\chi} = V^2 / g\sqrt{n_n^2 - 1}$ 。

可见, 飞机的运动状态是可以通过过载描述的, 研究中便采用这种方法建立了一个包含多种机动动作在内的机动库。基于上述分析, 可以先通过运动学关系计算坐标变化:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_x = V \cos \gamma \cos \chi \\ \dot{y} = v_y = V \cos \gamma \sin \chi \\ \dot{z} = v_z = -V \sin \gamma \end{cases} \quad (10)$$

然后根据 UCAV 的机动动作, 将式(9)和式(10)离散, 计算坐标和姿态角的变化:

$$\begin{cases} V^{(k+1)} = V^{(k)} + g(n_x^{(k)} - \sin \gamma^{(k)})\Delta t \\ \chi^{(k+1)} = \chi^{(k)} + \frac{g}{V^{(k)} \cos \gamma^{(k)}} n_y^{(k)} \Delta t \\ \gamma^{(k+1)} = \gamma^{(k)} + \frac{g(n_z^{(k)} - \cos \gamma^{(k)})}{V^{(k)}} \Delta t \\ x^{(k+1)} = x^{(k)} + V^{(k)} \cos \gamma^{(k)} \cos \chi^{(k)} \Delta t \\ y^{(k+1)} = y^{(k)} + V^{(k)} \cos \gamma^{(k)} \sin \chi^{(k)} \Delta t \\ z^{(k+1)} = z^{(k)} + V^{(k)} \sin \gamma^{(k)} \Delta t \end{cases} \quad (11)$$

### 1.4 导弹的典型导引形式与破坏模式

现在服役的导弹一般使用比例导引法导引系统完成对目标的跟踪。三维空间中的导引法有两种方案: 一是在两个相互垂直的控制平面内, 实行同一个或者不同的导引法控制; 二是利用一个控制通道, 将导弹的运动在瞬时分解为一个导引平面内

后, 再用一定的导引法控制。研究中采用第一种方案仿真。将三维运动分解成水平面和包含竖直速度矢量的垂直平面内的两个独立运动, 在这两个平面内分别建立相应的极坐标系下的导引方程, 求解各自的导引角, 建立比例导引控制。

现在的导弹主要由制导装置、战斗部、动力装置和弹翼等部分组成, 其中, 战斗部也多数采用不需要接触目标、没有延迟机构和触发机构的近炸引信, 在距离目标一定的距离时便可以起爆攻击目标。实质上导弹高速飞行, 考虑弹体和弹药的惯性以及爆炸力学效应, 导弹的实际杀伤远界曲面非常复杂, 曲面内的杀伤效果也是难以计算精确的, 因此, 在研究中简便地假设导弹杀伤范围为一个近似球面范围, 并且爆炸效果最大。设定杀伤区的半径为  $d_{\max}$ , 当 UCAV 与导弹的空间距离满足  $d \leq d_{\max}$  时, 即认为导弹可以自动引爆摧毁 UCAV。

### 1.5 仿真结束条件的设计

根据建立的“UCAV—导弹”系统的模型, 假定 UCAV 和导弹是已知的型号, 其基本性能确定。给定 UCAV 和导弹的位置, 初始时刻 UCAV 的机动是机动库里的某种机动, UCAV 能否逃逸的结论通过仿真计算是可以确定的。UCAV 规避导弹的结果有以下可能性:

(1) UCAV 被导弹击中。

在迭代过程中, 如果  $d \leq d_{\max}$ , 同时满足其他一系列条件(比如导弹仍在工作时间范围、整个追击过程导弹过载没有超出弹体结构材料承受能力的限制条件等), 视为 UCAV 被导弹击中, 逃逸失败。

(2) UCAV 成功规避导弹。

这种情况也有多种可能:

一是导弹燃料耗尽、追击时间超出工作时间或射程达到最大, 无法继续追击 UCAV。

二是导弹发射后首先要解除引信保险才可以摧毁目标, 这个过程需要满足一定的时间要求。

三是在仿真过程中，弹体过载过大，导弹转弯角速度受到限制无法持续跟踪或者有解体风险，也认为UCAV可以逃逸。事实上，在实战中飞行员也是通常利用这一点，操纵飞机做快速机动甩掉尾随导弹。

计算中为了方便标记，引入 $q$ 作为评价规避导弹结果的参数，并设定 $q=0$ 表示UCAV成功逃逸； $q=1$ 表示UCAV未能逃逸。

## 2 基于神经网络的规避策略算法设计

### 2.1 建立位置关系与规避结果的网络

人工神经网络是一种模仿生物神经系统结构和功能的数学计算模型。它是一种非线性统计型数据建模工具，通过统计学的数学方法，使网络能够类人一样具有判断能力和决策能力，因而常被用来对输入和输出间的复杂关系进行建模，实现对某种函数或算法的逼近，或是对一种逻辑策略的表达。

对应于某一初始时刻开始仿真计算的“UCAV—导弹”系统，规避的结果与两者的坐标和速度有非线性关系：

$$q = f(A_{d0}, M_{d0}, v_{d,a0}, v_{d,m0}) \quad (12)$$

展开为：

$$q = f(x_{d,a0}, y_{d,a0}, z_{d,a0}, x_{d,m0}, y_{d,m0}, z_{d,m0}, v_{x,a0}, v_{y,a0}, v_{z,a0}, v_{x,m0}, v_{y,m0}, v_{z,m0}) \quad (13)$$

即系统为包含了12个自变量的非线性模型。经过坐标转换以及给定UCAV初始机动动作等条件，令系统简化为仅包含3个自由度的模型：

$$q = h(x_{a0}, y_{a0}, z_{a0})$$

利用神经网络快速准确的拟合能力和预测能力，训练一个网络描述函数关系 $h(\cdot)$ ，就可以避免繁琐的仿真迭代计算。假设神经网络一共取 $M$ 个样本，机动库里包含 $N$ 种机动动作。由于初始UCAV在新坐标系 $Oxyz$ 里的三维坐标 $A_0(x_{a0}, y_{a0}, z_{a0})$ 决定了逃逸结果 $q$ 的值，可以设置第 $i$ 个神经网络样本的输入为 $p_i = (x_{a0,i}, y_{a0,i}, z_{a0,i})$ ，输出 $q_i$ 为 $N$ 维行向量，

$i=1,2,3,\dots,M$ ， $j=1,2,3,\dots,N$ 。其中 $q_{i,j}$ 表示在 $p_i$ 的位置关系下UCAV做第 $j$ 个机动的逃逸结果。令 $P$ 和 $Q$ 分别表示包含了所有样本的输入矩阵和输出矩阵(均为 $M \times N$ 维矩阵)。从 $M$ 个样本中，随机提取 $M_{train}$ 个作为网络的训练样本，其余的 $M_{test} = M - M_{train}$ 个作为测试样本，相应地拆分为 $P = [P_{train}; P_{test}]$ ， $Q = [Q_{train}; Q_{test}]$ 。以 $P_{train}$ 和 $Q_{train}$ 作为训练样本的输入和输出，训练神经网络；并以 $P_{test}$ 作为测试样本的输入，记 $\hat{Q}_{test}$ 为测试样本的输出，比对 $\hat{Q}_{test}$ 与 $Q_{test}$ 中所有 $q$ 值，以检验网络的性能。

值得注意的是：首先，神经网络的训练中，因为 $P$ 和 $Q$ 的各维数据分别处于同一数量级，故这里可以省略数据归一化与反归一化。其次，因为采用的BP神经网络不是一种二值神经网络或分类神经网络，而是一种拟合算法，通过训练好的网络输出的 $q_{i,j}$ 并非严格的都是0(逃逸成功)或1(未能逃逸)，需要经过修正处理。研究中设定一个阈值 $q_{th}$ 来修正 $q_{i,j}$ ：

- (1) 如果 $|q_{i,j} - 0| \leq q_{th}$ ，置 $q_{i,j} = 0$ ；
- (2) 如果 $|q_{i,j} - 1| \leq q_{th}$ ，置 $q_{i,j} = 1$ 。

### 2.2 神经网络搜索规避策略的算法

使用前文所述的方法，通过神经网络不必仿真迭代即可得知在任意初始位置关系下，UCAV发现导弹立即做机动规避追击的结果。然而实际中，根据战斗经验，飞行员通常并未采取这样的策略，而是先保持原状态飞行，当导弹靠近到一定程度，再伺机做机动动作规避，这种方式的规避成功率很高。这是因为导弹与目标接近的时候，跟踪的法则过载会显著增大，容易造成“脱靶”的情况。此外，先进的导弹已经具有丢失目标后再次寻找目标(可以是此前追踪的UCAV或者是友方其他UCAV等空中目标)的能力。因此，从工程实际应用的考虑出发，有必要研究一种策略，使之充分利用UCAV的性能，从发现导弹到逃逸的过程中，尽可能多地提供规避时机与机动，或者尽量拖住导弹，在最晚能够逃逸的时刻再开始做逃逸的机动动作。

基于这些要求, 设计下文的策略。  $t=0$  时刻给定初始状态后, UCAV 以初始机动动作飞行, 经过仿真计算, 如果可以逃逸, 那么不必做出改变, 保持原来的飞行状态即可; 如果被导弹击中, 则记录计算得到的被击中的时刻为  $t=T_S$ 。假设 UCAV 控制系统的反应时间间隔为  $\Delta T$ , 即每隔  $\Delta T$  时间, UCAV 的计算机系统可以判断一次是否需要改变机动以及下一步采取何种机动。记录  $t_s$  时刻 ( $s=1,2,3\cdots S$ ,  $t_s=T_S$ ), UCAV 空间坐标为  $A_{ds}(x_{d,as}, y_{d,as}, z_{d,as})$ , 导弹的空间坐标为  $M_{ds}(x_{d,ms}, y_{d,ms}, z_{d,ms})$ 。通过之前的坐标变换方法, 得到当前时刻的新坐标系  $Oxyz$  中, UCAV 和导弹的坐标分别为  $A_s(x_{as}, y_{as}, z_{as})$  和  $M_0(0,0,0)$ 。这里考虑到了远距离攻击的情况下, 导弹的离轴发射角一般较小, 因此近似认为  $t_s$  时刻导弹仍朝向 UCAV 飞行。令  $p_s=(x_{as}, y_{as}, z_{as})$ , 通过之前训练好的神经网络可以得到相应的  $q_s$  ( $s=1,2,3\cdots S$ ) 其中, 参数  $q_{s,j}$  表示在  $t=t_s$  的时刻, UCAV 不再保持原来的机动动作, 而是采用第  $j$  种 ( $j=1,2,3,\cdots N$ ) 机动动作飞行后的规避结果。

通过分析  $q_s$ , 寻找  $q_{s,j}=0$  的点便知 UCAV 的哪一时刻采用哪种机动动作可以规避导弹的攻击。更进一步, 从击中时刻反推 ( $s$  从  $s=S$  搜索, 直至  $s=1$ ), 整个过程中发现第一个  $q_{s,j}=0$  的位置, 即可确定 UCAV 可以最晚逃逸的时间点。此外, 如果在  $t=t_s$  时刻存在多个  $j$  值满足  $q_{s,j}=0$ , 说明此时不止一种机动可以使 UCAV 逃逸。

当然, 搜索过程中存在没有  $s$  值和  $j$  值同时满足  $q_{s,j}=0$  成立的可能性, 这说明基于研究设定的机动库中的机动, 没有能够为 UCAV 提供规避导弹的策略。这时可以提示 UCAV 采用超机动或者释放干扰弹等其他方式寻求规避的可能性<sup>[12]</sup>。

### 3 仿真分析

利用 MATLAB, 对 UCAV 规避导弹的模型进行仿真, 以验证模型的准确性和算法的有效性。

仿真中用到的主要参数设定为: UCAV 的极限过载为 15, 初始时刻巡航高度上巡航速度为

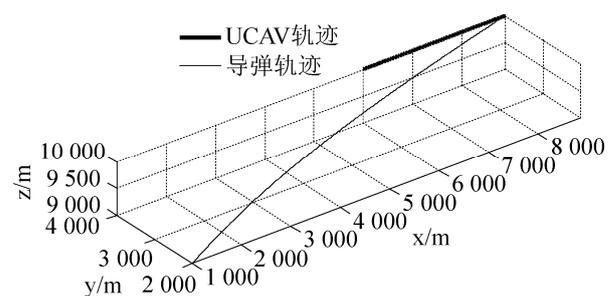
280 m/s, 最大飞行速度为 750 m/s; 导弹的极限过载为 40, 飞行速度为 800 m/s, 燃料提供的飞行时间为 20 s, 杀伤区半径为 10 m。导弹的导引律为比例导引法, 其导引系数为 2(从理想弹道的形状和弹体过载限制等多方面看, 这个系数不宜过大或者过小)。仿真时间步长为 0.001 s。

### 3.1 三维坐标系下“UCAV—导弹”模型仿真

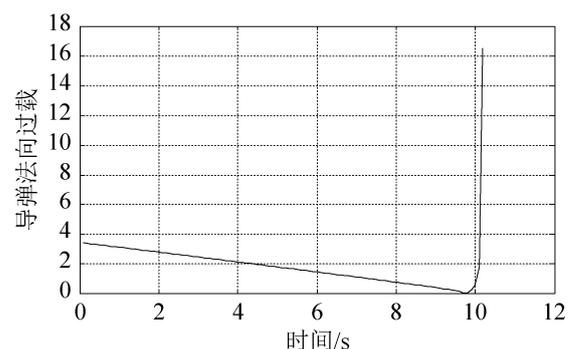
#### 3.1.1 UCAV 水平直线平飞

初始时刻参数为按照以下设定。

UCAV 的坐标为  $A_{d0}(6000,4000,10000)$ , 导弹的坐标为  $M_{d0}(1000,2000,9000)$ , 坐标单位均为 m, UCAV 的速度矢量为  $v_{d,a0}=(1,0,0)$ , 导弹的速度矢量为朝向 UCAV。设定 UCAV 保持初始时刻的水平直线平飞状态(即改变机动)。计算结果为: 经过 10.230s, UCAV 被导弹击中。如图 2 所示。



(a) UCAV 与导弹轨迹



(b) 导弹法向过载

图 2 UCAV 水平直线平飞仿真结果

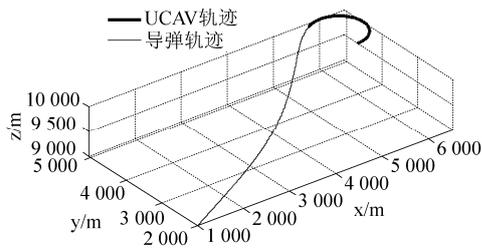
Fig. 2 Simulation results of UCAV's straight and level flight

#### 3.1.2 UCAV 做正常盘旋

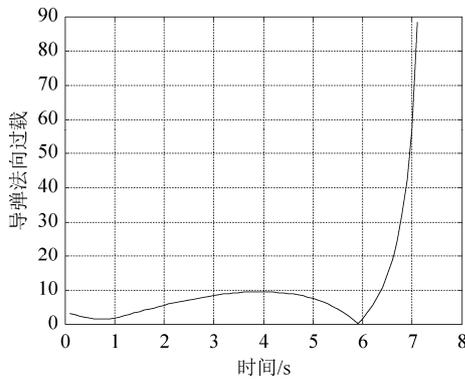
初始位置与速度矢量与上节相同, 设定 UCAV 初始时刻即做向左的正常盘旋, 法向过载

为UCAV可承受的最大过载,验证UCAV以极限过载做逃逸机动的规避结果。

经过7.134 s,两条轨迹相交,然而发现在仿真临近结束的时候,导弹过载已经非常大,远超出弹体可以承受的过载40,因此认为导弹不能完成比例导引法的跟踪,UCAV逃逸成功。如图3所示。



(a) UCAV与导弹轨迹



(b) 导弹法向过载

图3 UCAV做正常盘旋仿真结果

Fig. 3 Simulation results of UCAV's circulating flight

### 3.2 神经网络的训练过程及精确性分析

以上两节只是简单地对UCAV在初始时刻做出逃逸反映的仿真测试。研究UCAV在特定时刻才开始做出逃逸机动的策略借助了神经网络。

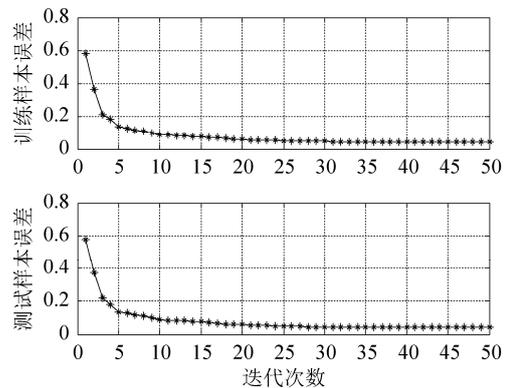
神经网络样本的输入选取为:在坐标系 $Oxyz$ 下,导弹的初始坐标为 $M_{d0}(0,0,0)$ ,UCAV的初始坐标 $A_{d0}(x_{d,a0},y_{d,a0},z_{d,a0})$ 在长和宽为导弹射程、高为导弹半射程、中心为 $M_{d0}$ 的长方体空间包线范围内均匀地取样本点,共取了35937个样本点。对这些样本点分别计算相应的 $P$ 和 $Q$ 矩阵。此外研究中采用 $q_{th} = 0.5$ 。

考虑到目前UCAV的性能和实战中的实用性,暂时选取了 $N=11$ 种常见机动动作建模。这

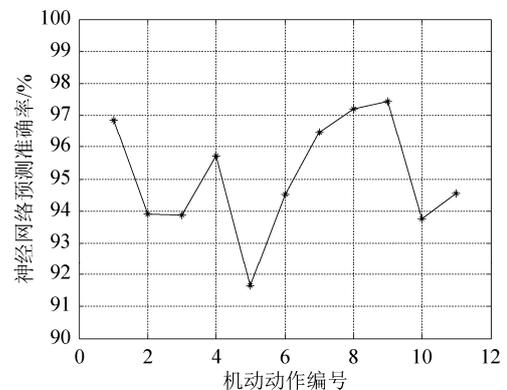
些机动及其编号依次为:1.水平平飞;2.水平盘旋(向左);3.水平盘旋(向右);4.爬升;5.滚筒;6.俯冲;7.平飞加减速;8.U型机动(向左);9.U型机动(向右);10.S型机动(向左);11.S型机动(向右)。同一种机动区分左右方向是考虑到旋转坐标系后,机动方向不同,UCAV和导弹的轨迹不同,需要分别讨论。

将所有样本随机取出其中80%(四舍五入取整数,为28750个)作为训练样本用于神经网络学习,其余部分(7187个)作为测试样本用来测试网络性能。

网络采用2层隐含层(为了兼顾训练时间和收敛效果,经过多次尝试,两个隐含层的节点数分别为15和7时,网络性能较优)。经过30次迭代学习,网络训练样本误差和测试样本误差收敛,这里用平均标准差表征网络误差的大小。网络收敛过程和11种机动的逃逸结果预测准确率如图4所示。



(a) 神经网络训练的迭代过程



(b) 测试样本各机动动作逃逸结果的预测准确率

图4 神经网络训练过程及学习效果

Fig. 4 Neural network training process and learning result

可见网络对于各个机动规避结果的预测准确率都能达到 90% 以上, 满足一定的工程实用意义。

### 3.3 基于神经网络的规避机动策略算例

仿真的初始时刻, UCAV 的三维坐标设定为  $A_{d0}(6000, 4000, 10000)$ , 相应的, 导弹的坐标为  $M_{d0}(0, 1000, 8000)$ , 仿真时间步长 0.001 s, 采样步长  $\Delta T$  为 0.1 s。经过仿真计算, 若保持水平直线平飞, 12.846 s 后 UCAV 被击中。图 5 表示基于 2.2 节的算法通过神经网络搜索规避策略, 各种机动动作逃逸结果随时间变化的情况。

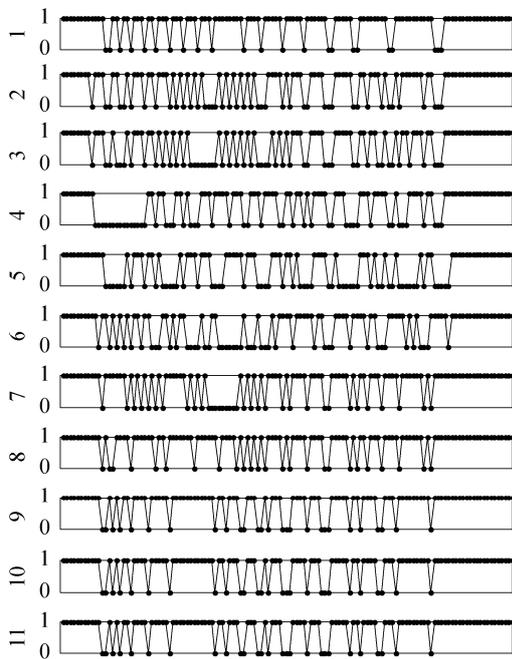


图 5 各种机动动作逃逸结果  $q$  随时间变化曲线  
Fig. 5 Evasive results curve over time by different maneuvers

由图 5 可见, 在仿真初始阶段, UCAV 做各种机动均无法规避导弹的攻击。0.8 s 后, 开始做部分机动动作可以逃逸, 最晚到 11.0 s 的时刻,  $q_{110,5} = 0$ ,  $q_{110,6} = 0$ , 说明可以做滚筒或俯冲机动进行规避。图 6 中, 虚线是 UCAV 不改变机动时, 导弹的法向过载变化情况, 可见直至击中 UCAV, 弹体最大法向过载仅仅略高于 10, 远小于弹体所能承受的设定极限过载 40, 导弹可以完成仿真的追击过程, UCAV 无法逃逸; 实线是 UCAV 按照本文算法提供的策略, 从 11.0 s 开始做

滚筒机动后, 导弹法向过载的变化情况, 相应地, 导弹的法向过载在 UCAV 改变机动动作后陡增, 并且超过了极限过载 40, 可以认为导弹无法持续追击, UCAV 逃逸成功。

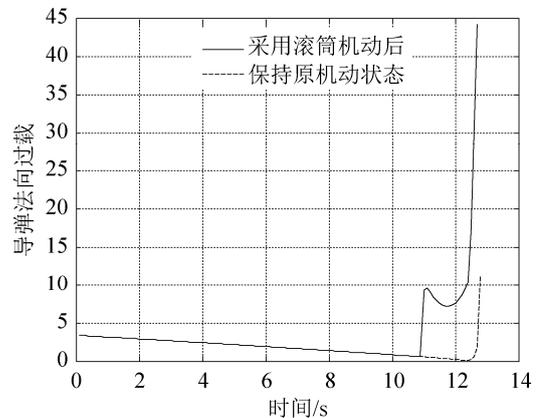


图 6 采用规避策略前后导弹的法向过载  
Fig. 6 Missile's normal overloads before and after adopting evasive strategies

由此可见, 采用了本文的规避方案后, 导弹追踪末段的过载大大增加, 超出弹体所能承受的极限过载而无法持续跟踪目标, 即 UCAV 可以逃逸成功, 算法为 UCAV 提供了有效的规避策略。

## 4 结论

自主空战是未来无人机发展趋势之一, 自主决策更是无人机的关键技术。本文通过坐标系的转换以及人工神经网络的运用, 设计了一种为无人机提供规避来袭导弹的决策算法, 并通过了算例验证了该算法的有效性。

UCAV 规避导弹本是一个复杂的非线性系统, 研究中通过建立以过载为输入的飞行动力学方程和比例导引法的导弹导引律方程, 仿真计算了导弹攻击 UCAV 的过程。在计算中采用了坐标平移和旋转的方式, 成功的将系统简化为输入为 UCAV 三维坐标、输出为逃逸结果的函数关系。这种减少输入变量的维数的方法, 减少了输出对于样本库数量的依赖, 极大的便利了神经网络的建立。研究中利用神经网络很好地拟合了这个函数, 训练出的神经网络的置信度也比较高, 已能

满足一定的工程实用要求。借助神经网络的预测能力，瞬时得到了可以逃逸的时刻点和对应的机动动作，在空战中为UCAV实时提供规避导弹的机动策略。

需要补充说明的是，在生成神经网络样本库时，为了提高网络的精准度，要提供足够多的样本，因此样本库的计算是非常耗时的(研究中用到的包含35 937个数据点的样本库在配置3代i7处理器的普通台式电脑上MATLAB环境下计算时间接近80 h)。基于此样本库生成离线神经网络，并借助此网络通过本文算法得出机动策略的计算时间一般为0.5~2 s(此时间包含“UCAV—导弹”这一非线性系统的仿真计算)；作为对比，研究中测试未使用样本库和神经网络计算同样作战环境下的机动策略，耗时大约为50~120 s。考虑可以采用更高效的编程语言和改进无人机硬件设备可以提高计算速度，可见算法可以在一定程度上满足实时性。此外，研究的局限是，UCAV和导弹的性能是预先设定的，基于此样本库学习得到的网络，只能针对同性能的“UCAV—导弹”系统。如果两者的性能与计算样本库时的设定不同，则该网络不再适用。这就需要UCAV在地面离线学习，生成空战中可能遇到各种导弹的相关样本库。所幸的是，目前主要空空导弹或地空导弹的型号是有限的，且可以在计算能力较高的处理器上计算，便于分别建立相关的网络，备份在UCAV的计算机系统中以应对空战时的威胁。

## 参考文献:

- [1] Imado F, Miwa S. Three Dimensional Study of Evasive Maneuvers of a Fighter against a Missile[C]// AIAA Astrodynamics Conference, Williamsburg, VA. USA: AIAA, 1986: 957-966.
- [2] Ong S, Pierson B. Optimal Evasive Aircraft Maneuvers against a SAM Guided by Proportional Navigation[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, Hilton Head Island, SC. USA: AIAA, 1992: 92-101.
- [3] Akdag R, Altılar D. Modeling Evasion Tactics of a Fighter Against Missiles in Three Dimensions[C]// AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Keystone, Colorado. USA: AIAA, 2006: 1-12.
- [4] Ratnoo A, Shima T. Line-of-Sight Interceptor Guidance for Defending an Aircraft[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics (S0731-5090), 2011, 34(2): 522-532.
- [5] Imado F, Kuroda T. Engagement Tactics for Two Missiles Against an Optimally Maneuvering Aircraft[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics (S0731-5090), 2011, 34(2): 574-582.
- [6] Yomchinda T. A Study of Autonomous Evasive Planar-maneuver against Proportional-navigation Guidance Missiles for Unmanned Aircraft[C]// Asian Conference on Defence Technology. USA: IEEE, 2015: 210-214.
- [7] Yang T, Geng L, Duan M, et al. Research on the evasive strategy of missile based on the theory of differential game[C]// IEEE Control Conference, 2015: 5182-5187.
- [8] 高民, 艾剑良, 李建波, 等. 导弹攻击下带矢量推力无人战斗机逃逸概率分析[J]. 计算机测量与控制, 2009(10): 2027-2029.
- [9] 刘佐, 孟凡计, 王玉文. 基于MATLAB的无人机攻防决策优化仿真[J]. 火力与指挥控制, 2013(12): 187-189.
- [10] Liu Z, Meng F J, Wang Y W. Optimization of UAV's Attacks and Defenses Decisions Based on MATLAB[J]. Fire Control & Command Control, 2013(12): 187-189.
- [11] 刘杰, 张健, 李世晓, 等. 基于三维空间的无人机规避攻击导引设计[J]. 电光与控制, 2014, 21(4): 34-37.
- [12] Liu J, Zhang J, Li S X, et al. Design of a UAV Escape Guidance Law Based on Three Dimensional Space [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(4): 34-37.
- [13] 方振平, 陈万春, 张曙光, 等. 航空飞行器飞行动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005: 92-94.
- [14] Fang Z P, Chen W C, Zhang S G, et al. Aircraft flight dynamics[M]. Beijing: Beihang University Press, 2005: 92-94.
- [15] Vermeulen A, Maes G. Missile Avoidance Maneuvers with Simultaneous Decoy Deployment[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, Illinois. USA: AIAA, 2009: 1-17.