

# 基于瞄准误差的战斗机攻击轨迹跟踪仿真实现

左星星<sup>1</sup>, 张斌<sup>1</sup>, 梅桂芳<sup>2</sup>, 李浩亮<sup>1</sup>

(1.空军工程大学航空航天工程学院,陕西西安,710038;2.西安交通大学电气工程学院,陕西西安,710049)

**摘要** 战斗机对攻击轨迹精确跟踪是实现战机自动攻击的关键。首先分析战机空战攻击轨迹跟踪过程,将战机瞄准误差引入攻击轨迹跟踪算法,提出基于瞄准误差的战斗机攻击轨迹跟踪方法;将瞄准误差算法分解在2个平面内进行分析,建立轨迹跟踪模型,并利用 Simulink 工具箱,结合 FlightGear 飞行仿真软件综合模拟仿真轨迹跟踪过程。实景仿真结果表明该模型算法能够不断地减小瞄准误差实现对攻击轨迹的精确跟踪飞行。

**关键词** 轨迹跟踪;自动攻击;瞄准误差;Simulink,FlightGear

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.06.004

**中图分类号** V249 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2012)06-0015-05

现代空战环境日趋复杂,猛增的信息量给飞行员带来了巨大的压力<sup>[1-2]</sup>。因此,实现战斗机精确跟踪生成的攻击轨迹飞行进而实现自动攻击,对取得空战胜利具有重要意义<sup>[3-6]</sup>。基于此,本文将瞄准误差作为一个重要指标引入战机攻击轨迹跟踪,通过瞄准误差解算战机攻击轨迹跟踪的控制信息,飞行员根据解算信息操控战机不断调整姿态消除瞄准误差,实现对攻击轨迹进行精确跟踪,为实现自动攻击打下基础。

## 1 攻击轨迹跟踪概念

本文基于瞄准误差的战斗机攻击轨迹跟踪是利用本机探测系统探测敌机的运动信息并将其送入瞄准误差模块进行误差模块,将战机的瞄准误差信息解算为控制信息,由平显显示,飞行员根据控制信息操控战机对攻击轨迹进行跟踪,同时也可进一步解算出控制指令直接送给战机飞行系统和推进系统,实现战机自动跟踪攻击轨迹攻击目标,最终要求消除战机的瞄准误差达到攻击条件。

## 2 轨迹跟踪算法分析及建模

瞄准误差是指瞄准线与目标线之间的夹角<sup>[7]</sup>,近距离空战中瞄准误差是判断战斗机是否满足攻击条件的重要指标。本文采用战斗机瞄准误差趋于零或在允许范围内作为攻击轨迹跟踪控制的指标,根据瞄准误差的实时变化情况来操控飞机进行攻击轨迹跟踪。

### 2.1 水平面瞄准误差算法

在图1的水平面  $oxy$  内, $D_a$  为战斗机与敌机之间相对距离; $q_{c\alpha}$ 、 $q_\alpha$  分别为战斗机速度矢量的所需前置角和实际前置角; $V_{c\alpha}$ 、 $V_\alpha$  分别为战斗机所需速度矢量和实际速度矢量; $t_H$  为战斗机攻击时间; $\theta_{r\alpha}$  为敌机速度矢量前置角; $V_{r\alpha}$  为敌机速度矢量; $V_{d\alpha}$  为水平面武器速度矢量;水平面内瞄准误差为  $\Delta q_\alpha = q_\alpha - q_{c\alpha}$ 。假设  $V_{c\alpha} = V_\alpha$ ,敌机速度大小不变。

收稿日期:2012-07-02

基金项目:航空科学基金资助项目(20095196012)

作者简介:左星星(1989-),男,江苏涟水人,硕士生,主要从事航空火力指挥与电子综合研究。

E-mail:57811146@qq.com

由图1可知,将水平面内战斗机、敌机和导弹的飞行轨迹投影到瞄准线及其法线方向,可得运动方程:

$$D_\alpha = V_\alpha t_H \cos q_{C\alpha} + V_{da} t_d \cos q_{C\alpha} - V_{T\alpha} t_H \cos \theta_{r\alpha} \quad (1)$$

$$V_\alpha t_H \sin q_{C\alpha} + V_{da} t_d \sin q_{C\alpha} = V_{T\alpha} t_H \sin \theta_{r\alpha} \quad (2)$$

通过计算可得:

$$\dot{D}_\alpha = V_{T\alpha} \cos \theta_{r\alpha} - V_\alpha \cos q_{C\alpha} \quad (3)$$

$$D_\alpha \omega_{r\alpha} = V_\alpha \sin q_{C\alpha} - V_{T\alpha} \sin \theta_{r\alpha} \quad (4)$$

将式(4)乘  $t_H$ ,联立式(1~2)比较可得:

$$t_H = \frac{D_\alpha - V_{da} t_d \cos q_{C\alpha}}{-\dot{D}_\alpha} \approx \frac{D_\alpha - V_{da} t_d}{-\dot{D}_\alpha} \quad (5)$$

$$\sin q_{C\alpha} = -\frac{D_\alpha \omega_{r\alpha} t_H}{V_{da} t_d} \quad (6)$$

联立式(5~6)解得:

$$q_{C\alpha} = \arcsin \frac{D_\alpha \omega_{r\alpha}}{K_\alpha} \approx \frac{D_\alpha \omega_{r\alpha}}{K_\alpha} \quad (7)$$

式中  $K_\alpha = \frac{\dot{D}_\alpha V_{da} t_d}{D_\alpha - V_{da} t_d}$ 。则战斗机在水平面内攻击轨迹跟踪瞄准误差的表达式为:

$$\Delta\alpha = \kappa(q_\alpha - q_{C\alpha}) = \kappa(q_\alpha - \frac{q_{C\alpha} D_\alpha \omega_{r\alpha}}{K_\alpha}) \quad (8)$$

式中:  $q_\alpha$  可由战斗机机上传感器测量计算得到;  $\kappa$  为由显示器的尺寸和灵敏度所决定的比例系数。

## 2.2 垂直面瞄准误差算法

在图2中的垂直面  $ozx$  内  $D_\beta$  为战斗机与敌机之间相对距离;  $q_{C\beta}$ 、 $q_\beta$  分别为战斗机速度矢量的所需前置角和实际前置角;  $V_{C\beta}$ 、 $V_\beta$  分别为战斗机所需速度矢量和实际速度矢量;  $t_H$  为战斗机攻击时间  $\theta_{r\beta}$  为敌机速度矢量前置角;  $V_{T\beta}$  为敌机速度矢量;  $V_{d\beta}$  为垂直面武器速度矢量; 垂直面内瞄准误差为  $\Delta q_\beta = q_\beta - q_{C\beta}$ 。假设,  $V_{C\beta} = V_\beta$ , 敌机速度大小不变。

由图2可知,将垂直面内战斗机、敌机和导弹的飞行轨迹投影到瞄准线及其法线方向,可得运动方程:

$$D_\beta = V_\beta t_H \cos q_{C\beta} + V_{d\beta} t_d \cos q_{C\beta} - V_{T\beta} t_H \cos \theta_{r\beta} \quad (9)$$

$$V_\beta t_H \sin q_{C\beta} + V_{d\beta} t_d \sin q_{C\beta} = V_{T\beta} t_H \sin \theta_{r\beta} \quad (10)$$

通过计算可得:

$$\dot{D}_\beta = V_{T\beta} \cos \theta_{r\beta} - V_\beta \cos q_{C\beta} \quad (11)$$

$$D_\beta \omega_{r\beta} = V_\beta \sin q_{C\beta} - V_{T\beta} \sin \theta_{r\beta} \quad (12)$$

将式(11)乘  $t_H$ ,联立式(9~10)可得:

$$t_H = \frac{D_\beta - V_{d\beta} t_d \cos q_{C\beta}}{-\dot{D}_\beta} \approx \frac{D_\beta - V_{d\beta} t_d}{-\dot{D}_\beta} \quad (13)$$

$$\sin q_{C\beta} = -\frac{D_\beta \omega_{r\beta} t_H}{V_{d\beta} t_d} \quad (14)$$

由式(13~14)可得:

$$q_{C\beta} = \arcsin \frac{D_\beta \omega_{r\beta}}{K_\beta} \approx \frac{D_\beta \omega_{r\beta}}{K_\beta} \quad (15)$$

式中  $K_\beta = \frac{\dot{D}_\beta V_{d\beta} t_d}{D_\beta - V_{d\beta} t_d}$ 。则战斗机在垂直面内攻击轨迹跟踪瞄准误差的表达式为:

$$\Delta\beta = \kappa(q_\beta - q_{C\beta}) = \kappa(q_\beta - \frac{q_{C\beta} D_\beta \omega_{r\beta}}{K_\beta}) \quad (16)$$

其中:  $q_\beta$  可由战斗机机上传感器测量计算得到;  $K$  是由显示器的尺寸和灵敏度所决定的比例系数。

## 2.3 轨迹跟踪建模

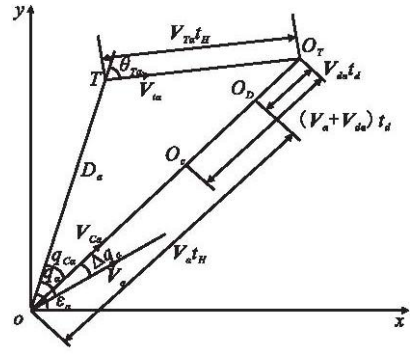


图1 水平面瞄准误差

Fig.1 Sight error of level

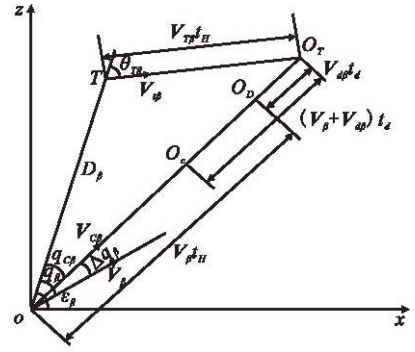


图2 垂直面瞄准误差

Fig.2 Sight error of vertical plane

依据 2.1、2.2 节对瞄准误差算法的分析,得出瞄准误差计算模型如下:

$$\Delta\alpha = \kappa(q_\alpha - \frac{q_{C\alpha} D_\alpha \omega_{r\alpha}}{K_\alpha}) \tag{17}$$

$$\Delta\beta = \kappa(q_\beta - \frac{q_{C\beta} D_\beta \omega_{r\beta}}{K_\beta}) \tag{18}$$

对于水平面  $oxy$ ,可以将式(17)作为战斗机水平面攻击轨迹跟踪指标。同理可以将式(18)作为垂直面攻击轨迹跟踪指标。攻击轨迹跟踪过程中战斗机切向过载、切向过载分别为:

$$n_\alpha = D_\alpha \omega_{r\alpha} \tag{19}$$

$$n_\beta = D_\beta \omega_{r\beta} \tag{20}$$

### 3 轨迹跟踪仿真设计

本文选用 Matlab 中 Simulink 工具箱<sup>[8]</sup>和 FlightGear 飞行软件<sup>[10]</sup>进行综合仿真设计。

#### 3.1 仿真框架

仿真需要通过 3 台计算机共同完成,分别模拟我机、敌机和 FlightGear 显示,3 台计算机之间通过网络传递信息。为了实现对瞄准误差解算、信息打包和网络传递信息,需要设计瞄准误差模块和网络通信模块。对于信息打包盒网络通信,本文直接采用 Simulink 工具箱提供的 Packet 打包模块和 UDP 协议网络模块。瞄准误差模块利用 Simulink 工具箱提供的自主开发模块 S-Function 进行编程自定义,误差模块封装好见图 3。

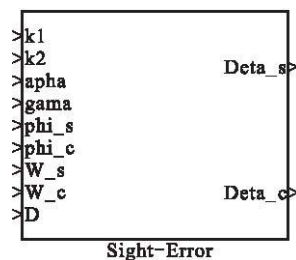


图 3 瞄准误差模块

Fig. 3 Sight error module

#### 3.2 仿真实现

根据基于瞄准误差的轨迹跟踪原理将所设计的模块连接成仿真框图,见图 4。依次设定敌、我机初始条件,仿真步长等信息,仿真开始;战机获取敌机信息后打包发送到我机平台,综合本机信息送给瞄准误差模块进行控制信息解算并发送给 FlightGear 平台显示,同时解算出控制指令送给操控系统实现轨迹跟踪。

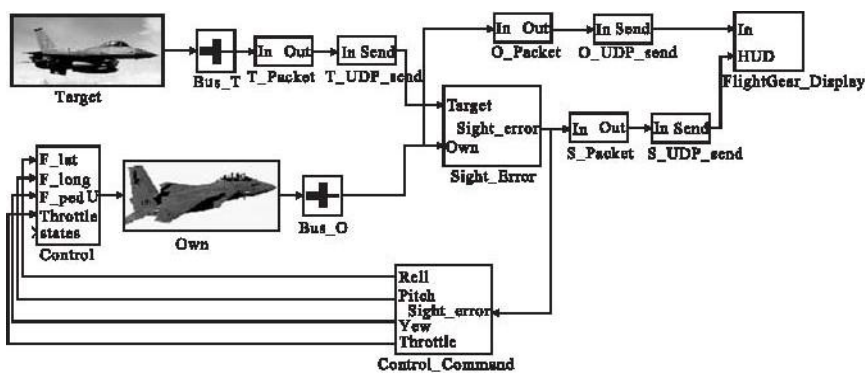


图 4 Simulink-FlightGear 仿真框图

Fig. 4 Simulation frame of Simulink-FlightGear

### 4 仿真分析

假设敌机作曲线运动,设定敌机初始条件:坐标为  $X_m=800\text{ m}$ ,  $Y_m=1\ 000\text{ m}$ ,  $Z_m=5\ 500\text{ m}$ ;初速度为  $V_m=180\text{ m/s}$ ;侧滑角为  $\beta_m=0$ ,迎角为  $\alpha_m=3^\circ$ ;升降舵角为  $E_m=2.5^\circ$ ;舵偏角为  $R_m=1.5^\circ$ ;横滚角为  $A_m=0.8^\circ$ ;油门为  $P_m=0.162\ 3$ ;转动力矩为  $p_m=1$ ,  $q_m=-0.5$ ,  $r_m=0.5$ 。我机初始条件:坐标为  $X_w=-1\ 000\text{ m}$ ,  $Y_w=500\text{ m}$ ,  $Z_w=2\ 800\text{ m}$ ;初速度为  $V_w=156\text{ m/s}$ ;侧滑角为  $\beta_w=0$ ;迎角为  $\alpha_w=8^\circ$ ;升降舵角为  $E_w=2^\circ$ ;偏舵角为  $R_w=5^\circ$ ;副翼角为  $A_w=1^\circ$ ;油门为  $P_w=0.3$ ;转动力矩为  $p_w=1$ ,  $q_w=-1$ ,  $r_w=1$ 。仿真时间为  $T=50\text{ s}$ 。

图 5 为战机轨迹跟踪过程中、迎角的变化。由图可知开始跟踪阶段需要不断调整战机姿态,2 个角度变

化比较剧烈,随着跟踪稳定,角度也趋于稳定,在 10 s 左右达到稳定状态。

图 6~8 分别为轨迹跟踪中敌、我机航向、瞄准误差和战机过载的变化情况。由图 6 可以看出敌、我机的航向在不断增大;图 7 显示战机在水平、垂直方向的瞄准误差不断减小最后趋近于零,跟踪开始阶段瞄准误差变化比较大且剧烈,到达 5 s 时垂直瞄准误差趋于稳定,在 10 s 时水平瞄准误差稳定,满足轨迹跟踪的指标要求;图 8 为战机的过载变化,由图可知切向过载最终减小到零,法向过载趋于稳定为 1.2 个方向过载分别在 5 s 和 10 s 达到稳定。

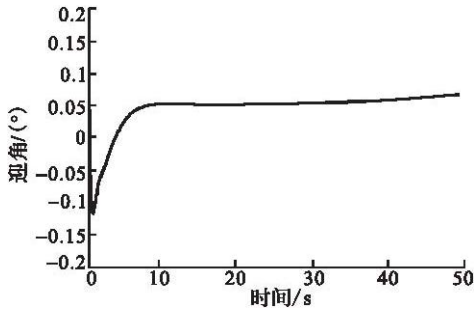


图 5 战机迎角变化

Fig.5 Angle of track of fighter plane

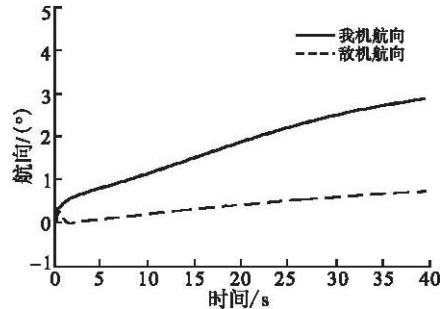


图 6 敌、我机航向变化

Fig.6 The course of enemy and own fighter plane

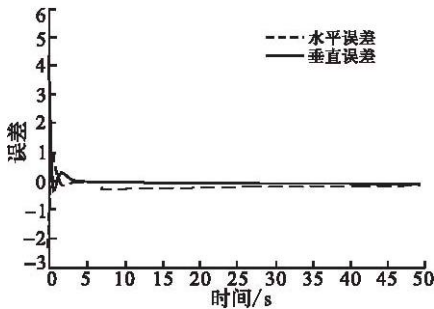


图 7 战机瞄准误差变化

Fig.7 Sight error of fighter plane

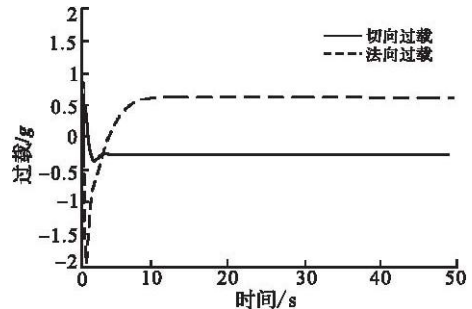


图 8 战机过载变化

Fig.8 Over loading of fighter plane

## 5 结语

本文提出基于瞄准误差的战斗机攻击轨迹跟踪方法,将瞄准误差作为战机攻击轨迹跟踪控制的重要评价指标,分析了水平面和垂直面的瞄准误差算法,建立轨迹跟踪模型,通过不断降低瞄准误差来达到战机对已知的攻击轨迹的精确跟踪。同时,提出了基于 Simulink 工具箱和 FlightGear 飞行软件对该方法进行实景仿真实现,结果表明该方法能够不断地减小瞄准误差最后趋于零,实现战机对攻击轨迹精确跟踪。

## 参考文献(References):

- [1] 董彦非. 空中作战效能评估与智能决策[D].西安:空军工程大学,2002.  
DONG Yanfei. Operational effectiveness assessment and intelligence decision of air operations[M].Xi'an: Air force engineering university, 2002. (in Chinese)
- [2] 蒲宏斌,詹浩.飞机低空突防轨迹优化研究[J].飞行力学,2008,26(3):26-28.  
PU Hongbin, ZHAN Hao. Research on the trajectory optimization of low altitude penetration[J]. Flight dynamics, 2008,26(3):26-28. (in Chinese)
- [3] 童中翔,叶广强.基于由驾驶员参与的多机空战模拟效能评估方法[J].系统仿真学报,2007,19(8):1680-1682.  
TONG Zhongxiang, YE Guangqiang. Method of evaluation of air-to-air combat effectiveness of simulations operated by pilots[J]. Journal of system simulation, 2007,19(8):1680-1682. (in Chinese)
- [4] 杨恩泉,高金源.无人机机动轨迹跟踪系统设计[J].飞行力学,2007,25(2):30-33.  
YANG Enquan, GAO Jinyuan. UAV maneuver trajectory tracking system design[M]. Flight dynamics, 2007,25(2):30-

33. (in Chinese)

- [5] Paul W. Real-time computation of optimal three-dimensional aircraft trajectories including terrain following[R]. AIAA 2006-6603.
- [6] 高桦,邢志刚.基于轨迹跟踪的飞行器大角度机动物理仿真[J].飞行器测控学报,2008,27(6):14-17.  
GAO Hua, XING Zhigang. Physical simulation for spacecraft large angle maneuver based on trajectory control[J]. Journal of spacecraft TT & C technology, 2008,27(6):14-17. (in Chinese)
- [7] 周志刚.航空综合火力控制原理[M].北京:国防工业出版社,2008.  
ZHOU Zhigang. The theory of aviation integrated fire control[M]. Beijing:Defense industry press, 2008. (in Chinese)
- [8] Palm William J. III. Introduction to MATLAB 7 for engineers[M]. American: The mcgraw-hill companies, 2005.
- [9] 黄华,徐幼平,邓志武.基于FlightGear模拟器的实时可视化飞行仿真系统[J].系统仿真学报,2007,19(19):4421-4423.  
HUANG Hua, XU Youping, DENG Zhiwu. Real-time visual flight simulation system based on flightgear simulator[J]. Journal of system simulation, 2007,19(19):4421-4423. (in Chinese)

(编辑:徐敏)

## Simulation of Fighter Attack Track Following Based on Sight Error

ZUO Xing-xing<sup>1</sup>,ZHANG Bin<sup>1</sup>,MEI Gui-fang<sup>2</sup>,LI Hao-liang<sup>1</sup>

(1.Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;2.Electrical Engineering College, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Fighter attack track following is the key of realizing fighter auto attack. This paper firstly analyzes the process of the fighter attack track following, taking the fighter sight error into attack track following algorithm, and proposes a method of fighter attack track following based on sight error. By dividing the sight error into two faces for analysis, the model of track following is built up. And by using Simulink toolbox and FlightGear, the process of track following is simulated comprehensively. The result shows that sight error will be reduced continuously to realize accurate flight following the tracks of attack.

**Key words:** track following; auto attack; sight error; Simulink; FlightGear

### 本刊相关链接文献:

- [1]寇英信,付昭旺,冯国强,张平,王琳.网络瞄准下空空导弹允许发射区模拟仿真分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(2):24-28.
- [2]王占磊,张建业,张鹏,程洪炳.一种改进的变结构交互多模型被动跟踪算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(4):18-22.
- [3]翁木云,谢宇昕.一种改进的自适应质心跟踪算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2009,10(2):81-85.
- [4]鄢余武,王睿,郑富军,等.考虑目标航向机动信息的机动目标跟踪算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2007,8(3):36-38.