

# 双机空战效能评估的半实物仿真研究

万少松, 刘兴堂, 严 聪

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**简述了双机空战效能评估研究的重要意义,讨论了在实验室条件下,利用地面飞行模拟器进行双机空战效能评估的半实物仿真系统的组成和工作原理,着重研究了几个关键技术问题:(1)双机空战仿真流程设计;(2)机载雷达目标发现概率计算;(3)空-空导弹可攻击区模型建立;(4)空战结果评估与分析。

**关键词:**双机空战;作战效能评估;半实物仿真

**中图分类号:**E844 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2000)04-0083-04

战斗机作为现代进攻和防御武器装备之一,其作战优劣对现代战争尤其是高技术局部战争的胜负至关重要。空战效能评估不仅是对战斗机综合性能的最终检验,而且是武器系统评估的核心,他对于战斗机的研制、采购决策、双方军事实力对比及战术技术研究都将起到关键性的作用。

实战和仿真研究表明,现代空战常常是机群对机群的对抗,但战斗中很难保持四架飞机以上的编队作战,大机群相遇很快会分解成“一对一”、“双对双”、或至多“四对四”的空战。一般来讲,“一对一”空战的能力优势最大,而且随着飞机数量的增加,这种优势将下降。所以,双机空战不仅有实战价值,而且是研究多机空战的基础。为此,本文将重点讨论对双机空战效能的评估。

评估空战效能的方法很多,如性能对比法、计算法、专家评判法、计算机模拟法以及试飞法等<sup>[1]</sup>。这里研究的是有飞行员直接参加的,利用地面飞行模拟器进行空战效能评估的半实物仿真方法。

## 1 仿真系统组成及其工作原理

双机空战效能评估的半实物仿真系统组成及其工作原理如图1所示。由图可见,仿真系统主要由飞行员、飞行模拟器、航电火控子系统模型、多媒体显示记录子系统、指挥管理监控系统、空战效能评估子系统以及局域网和总线等部分组成。

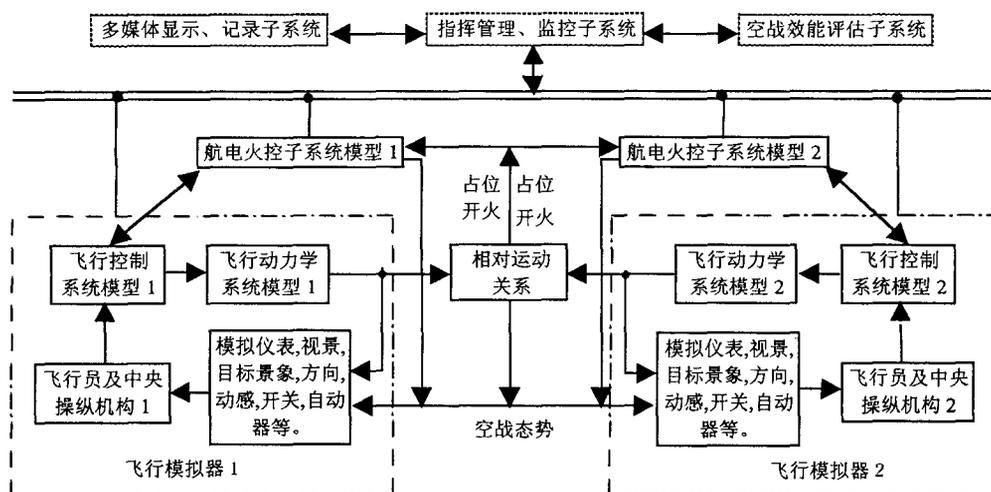


图1 双机空战仿真系统原理图

收稿日期:2000-02-17

作者简介:万少松(1961-),男,安徽滁县人,教授,博士,主要从事导航制导与控制研究。

空战仿真中,敌我飞行员分别驾驶预先定义战机的相应飞行模拟器1、2。在地面防空系统或空中预警机引导下,使战机进入目标附近,即目标已处于我机载雷达有效探测距离以内。这时,双方飞行员或身临超视距空战环境,或从本模拟座舱可亲眼看见外面的目标机影像和天、地景,从而目视观测到空战态势。并由此做出判断及决策,随即操纵本机实现机动、占位、跟踪、攻击或规避及逃逸等。飞机运动过程、发动机系统、控制系统、航电火控系统等工作及所产生的导引、控制、开火等系统功能的每下一步动作,都是按照飞行员操纵飞行模拟器的中央操纵机构(杆、蹬、油门杆)和各种电器开关后,由仿真系统自动计算得到的。计算用的原始数据来自飞机设计计算、风洞试验、飞行试验及实际打靶结果。因此,仿真计算数据原则上可逼真地反映实际飞机的性能和机载武器的威力。加之,这种仿真试验有飞行员直接参加并提供良好的空战仿真环境,应该说更加接近实战,仿真结果是有效、可信的。

空战效能评估结论是对上述仿真结果进行综合评判处理后得出的。其评判准则为:①空战仿真结束时,被击毁一方告负;②以累计生存概率判优劣,生存概率高者为优方;③将上述仿真评判结果与算法评估结果相比较,作为置信度参考。

## 2 几个关键技术问题

在双机空战效能评估的半实物仿真研究中,有许多必须解决的关键技术问题,主要有:

### 2.1 双机空战仿真流程设计

空战仿真流程以实际空战全过程为基础。作战飞机由机场起飞,经历远距和近距导航。远距导航目的是使战机尽快进入目标发现区,并通过机载雷达搜索和发现目标;近距离导航为了让战机短时进入武器发射区,并机动、占位以获得抢先发射机会。为研究方便起见,可认为远距导航已将战机导引至目标发现区附近,机载雷达开始搜索。当发现目标机后,本机即实行机动、占位,创造武器开火条件;当具备使用武器条件时,可对目标射击造成杀伤。同时,若发现自己遭受攻击,飞机作机动规避或逃逸,还可依据空战时间长短、武器载弹量多少及战斗态势,由飞行员决定是否退出战斗。空战结束后,以累计生存概率判定其胜负。

综上所述,双机空战主要仿真模块将由机载雷达、空-空导弹和航炮、机动策略选择、数据显示与纪录以及飞机累计生存概率等五部分组成,而相应由计算机和软件实现的仿真流程如图2所示。

### 2.2 机载雷达发现概率计算

现代战斗机的作战效能很大程度上取决于机械雷达目标发现概率,在整个航向导引阶段,机载雷达发现概率为:

$$\rho_t = \rho_v \cdot \rho_d \quad (1)$$

式中,  $\rho_v$ ——机载雷达角度上的目标搜索概率;

$$\rho_v = \int_{-\theta}^{+\theta} \frac{1}{\sigma_{\tau} 2\pi} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{\theta - \theta_p}{\sigma_{\tau}} \right]^2} d\theta \quad (2)$$

其中,  $\theta$ ——机载雷达天线方位角;  $\sigma_{\tau}$ ——碰撞路线航向误差的均方根;  $\theta_p$ ——碰撞路线前置角。  $\rho_d$ ——在一定虚警概率  $\rho_{fa}$  下,一次扫描机载雷达距离上对目标发现概率:

$$\rho_d = \int_0^{\infty} e^{-t} \left\{ 1 - \varphi \left[ \frac{y_0 - n_0 \left( 1 + \frac{S}{N} t \right)}{\sqrt{n_0 \left( 1 + 2 \frac{S}{N} t \right)}} \right] \right\} dt \quad (3)$$

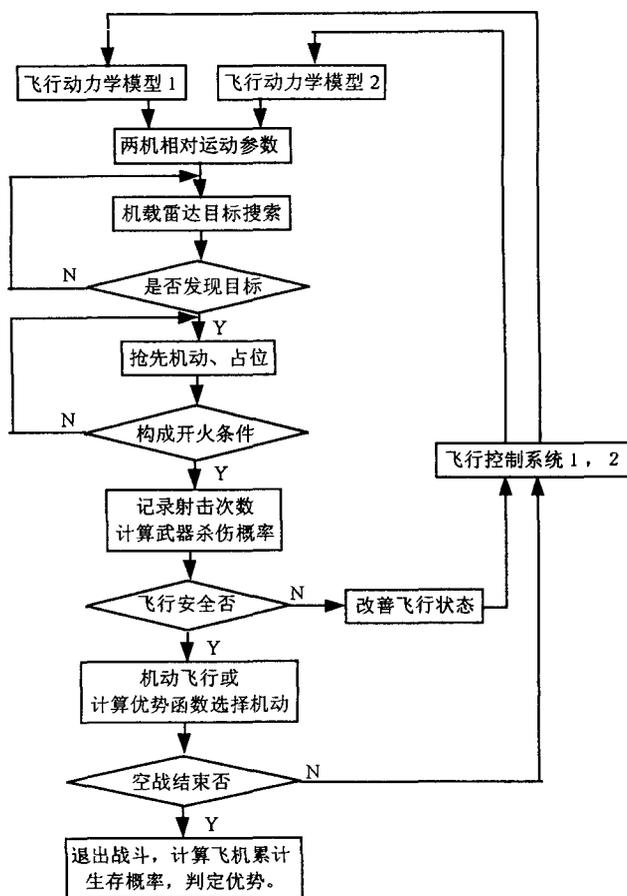


图2 双机空战仿真流程图

这里,  $\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ ;  $n_0$ ——一次扫描脉冲积累数;  $Y_0$ ——虚警时的检测门限;  $S/N$ ——信噪比。

$$\frac{S}{N} = \left[ \frac{F}{R} \right]^4 \frac{C_s \sigma}{L_a} \left( \frac{S}{N} \right)_{\min} (\rho_d) \tag{4}$$

式中,  $\left( \frac{S}{N} \right)_{\min}$ ——系统最低可检测信噪比;  $F$ ——天线方向图传播因子;  $R$ ——载机至目标机距离;  $\left[ \frac{C_s \sigma}{L_a} \right]$ 可由

雷达最大作用距离  $R_{\max}$  的简化方程得到 
$$R_{\max} = \left[ \frac{C_s \sigma}{L_a} \right]^{\frac{1}{4}} F \tag{5}$$

此处,  $C_s$ ——雷达系统特征常数;  $\sigma$ ——目标的雷达散射截面;  $L_a$ ——大气耗损因子。

为了确定(2)式中的  $\sigma_{cr}$ , 还需要建立航向引导模型并计算导引误差。导引误差应包括: 操纵误差、测量目标相对应位置不准确误差、测量航向不准确误差及测量航速不准确误差等<sup>[2]</sup>。

### 2.3 空-空导弹和航炮可攻击区建模

空-空导弹和航炮的可攻击区计算是现代战斗机火控系统的主要任务。因此, 可攻击区建模应该是本航电火控子系统模块的核心部分。

所谓可攻击区是指在某种发射方式(追踪、前置或后置发射等)下, 能够成功发射武器命中目标的各发射点在目标坐标中所组成的空间区域。它由远界、近界和侧界构成, 分别取决于武器最大发射距离  $R_{\max}$ , 最小射击距离  $R_{\min}$  和目标机机动过载、导引头位标器的最大跟踪距离角速度及最大允许跟踪方位角等。当然,  $R_{\max}$  又与火控雷达截获目标距离、导引头截获目标距离、导弹最大可控飞行时间、战斗部引信所要求的最小相对速度、导弹正常飞行的最小速度以及发射离轴角大小等有关; 而  $R_{\min}$  取决于引信的解除保险时间、引信对最大相对速度的要求及载机自身安全等。

在详细分析上述因素对可攻击区影响并考虑导弹系统性能对可攻击区边界限制的基础上, 可建立起空-空导弹的可攻击区数学模型。模型包括: ①基本假设和已知条件; ②大气数据方程; ③动力学及运动方程组: 导弹动力学方程、运动方程、质量变化方程、发动机推力方程、气动力(力矩)及其系数方程、目标运动方程、弹目相对运动方程、导引规律方程以及其他补充方程等。

利用上述模型, 在已知发射方式和各种目标机动下, 通过所设计的处理算法便可实时计算出空-空导弹的可攻击区曲线。其实时计算流程如图 3 所示。具体建模过程及处理算法设计可参考文献[3]。

除此, 还建立了固定基航炮在前置跟踪瞄准射击下的可攻击区曲线方程实时算法模型。模型包括: 简化假设、攻击区曲线方程、航炮总修正角算法等<sup>[3]</sup>, 其计算流程如图 4 所示。

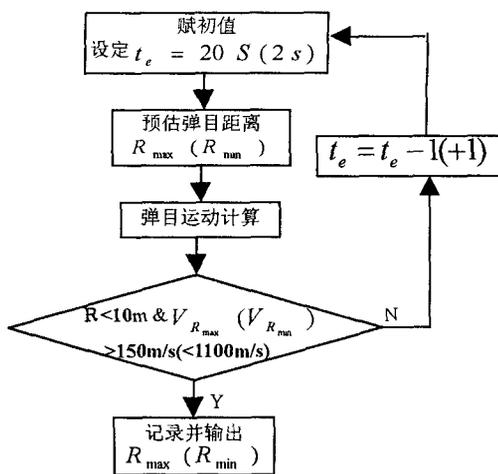


图 3 空-空导弹可攻击区远界(近界)实时计算流程图

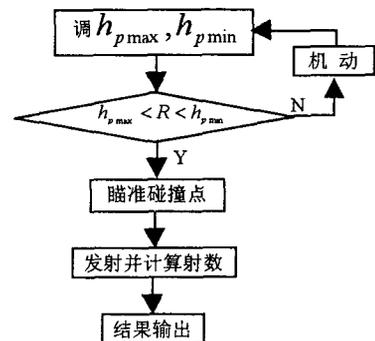


图 4 航炮攻击实时计算流程图

### 2.4 空战结果评估与分析

飞机作战能力体现在两个方面: 对目标杀伤能力及本机生存能力。为此, 需要从空战仿真结果给出能客观反映上述两个方面能力的效能评估模型。显然, 采用累计生存概率评价战机优劣是较合理的。

设空战中对目标机的第一次攻击, 目标机被击毁的概率为  $P_{k1}^{(1)}$ , 生存概率为  $Q_2^{(1)}$ ,  $Q_2^{(1)} = 1 - P_{k1}^{(1)}$ 。这时, 只要未被击毁, 则目标机仍可反击。他对本机的击毁概率为  $P_{k2} = Q_2^{(1)} \cdot P_{k2}^{(1)}$ , 其中  $P_{k2}^{(1)}$ ——目标机反

击时的杀伤概率。这样,本机在目标机反击时的生存概率为  $Q_1^{(1)}Q_2^{(1)}=1-Q_2^{(1)}P_{k_2}^{(1)}$ 。若此后本机又对目标机发动第二次攻击,对目标机的击毁概率变为  $P_{k_1}^{(2)}=Q_1^{(1)}P_{k_1}^{(1)}$ 。而目标机遭受第二次攻击后的生存概率为:  $Q_2^{(2)}=Q_2^{(1)} \cdot (1-P_{k_1}^{(2)})=Q_2^{(1)} \cdot (1-Q_1^{(1)}P_{k_1}^{(1)})$ 。

依此类推,有目标机的累计生存概率:

$$Q_2^{(i)} = Q_2^{(i-1)} \cdot (1 - Q_1^{(i)} P_{k_1}^{(i)}) \quad (6)$$

式中,  $Q_2^{(i)}$ ——目标机遭受本机攻击后的生存概率;

$Q_2^{(i-1)}$ ——目标机遭受本机攻击前的生存概率;

$Q_1^{(i)}$ ——本机实施本次攻击的自身生存概率;

$P_{k_1}^{(i)}$ ——本机实施本次攻击时所使用武器的杀伤概率。

同时有武器杀伤概率算法:

$$P_k = \frac{R_L^2}{R_L^2 + \frac{CEP^2}{1.386}} \cdot \text{EXP}\left(\frac{-R_{CA}^2}{R_L^2 + \frac{CEP^2}{1.386}}\right) \quad (7)$$

式中,  $R_L$ ——导弹战斗部杀伤半径;  $R_{CA}$ ——计算得到的脱靶量;  $CEP$ ——用以描述系统导引误差的园概率误差。

$$\text{脱靶量计算可采用如下近似公式:} \quad R_{CA} = \frac{1}{57.3} \dot{q} \left(\frac{R^2}{R}\right) + \frac{1}{2} (n_{z_M} - n_{z_T}) g \left(\frac{R}{R}\right)^2 \quad (8)$$

式中,  $(\dot{R}q)$ 、 $R$ 、 $\dot{R}$ 、 $n_{z_M}$ 和  $n_{z_T}$ 分别表示导弹在接近目标末端某瞬时  $t_{g0}$ (剩余时间)的视线切线速度、相对距离、相对速度、横向过载和目标的横向机动过载。一种改进形式的  $t_{g0}$ 算法公式为:

$$t_{g0} = - (R/\dot{R})(\dot{R}/V_R)^2, \quad V_R^2 = \dot{R}^2 + R^2\dot{q}^2 \quad (9)$$

经分析,不难发现上述仿真方法虽然可提供准实践环境下的高逼真仿真效果,但存在着飞行员素质和驾驶技术差异对空战效能评估质量的严重影响。为此,可采取如下措施来排除:

(1)利用多个飞行员进行多次仿真评估,取其均值;

(2)将两机飞行员交换再次仿真,将对比结果作为最终评估结论的参考;

(3)借助“理论”飞行员(或称飞行员模型)和数字式仿真飞机代替其中一个飞行员及其驾驶的飞机模拟器进行空战仿真,然后同原来仿真结果比较,从而做出合理的空战效能评估结论。“理论”飞行员和数字式仿真飞机设计及机动策略选择可参考文献[4]。

本文得到了某飞行实验研究院基金资助。研究成果在该院的飞行模拟器上得到应用并通过了验收。

#### 参考文献:

- [1] 朱宝鏊. 作战飞行效能评估[M]. 北京:航空工业出版社,1999.
- [2] 王宏宽. 全过程双机空战仿真研究[D]. 西安:空军导弹学院,1999.
- [3] 赵红言. 双机空战效能评估物理模拟研究[D]. 西安:空军导弹学院,1999.
- [4] 韩亮. 双机格斗仿真系统的实时决策方法[J]. 系统仿真学报,1997,9(1):28-30.

## A Study on the Effectiveness Evaluation of One to One Fighter's Combat in Hardware-in-the-Loop Simulation

WAN Shao-song, LIU Xing-tang, YAN Cong  
(The Missile Institute, AFEU., Sanyuan 713800, China)

**Abstract:** This paper briefly introduces the important role on the study of the effectiveness evaluation of one-to-one fighter's combat, and discusses the system composition and operating principle in hardware in-the-loop simulation on the effectiveness evaluation of one-to-one fighter's combat by ground flight simulator in laboratory condition. Then some technical problems have been studied in detail: (1)the design on simulation program of one-to-one fighter's combat; (2)the calculation of probability for airborne radar to discover objects; (3)modeling of the attack zone of air-to-air missile; (4)evaluating and analyzing of result of air combat.

**Key words:** one-to-one fighter's combat; evaluating of the operational effectiveness; hardware-in-the-loop simulation