

战斗机中远距空战建模与仿真分析*

王安丽,张 安,李杰奇

(西北工业大学电子信息学院,陕西 西安 710072)

摘要:针对中远距一对一的空战问题,从效能分析的角度建立了一对一中远距空战及作战效能分析的模型,包括飞机运动模型、飞机机动作控制模型、推力模型、火控系统模型、导弹运动模型、导弹制导与控制模型、信息系统模型和效能评估模型等。依据该模型进行了空战仿真并给出效能分析结果,仿真结果与实际吻合,证明模型的有效性,为进一步研究多对多空战仿真打下基础。

关键词:空对空;中远距;作战效能

中图分类号:TJ85;V271.4

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1673-3819.2012.03.022

Fighter modeling and Simulation Analysis for Midand Long Rang Air to Air Combat

WANG An-li, ZHANG An, LI Jie-qi

(College of Electronics Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: With air to air missile range, amounts and airborne radar performance improving, the super sonic fighter has the ability to execute long range air combat mission. In this paper, the simulation system is established for automatic air combat simulation system. Firstly, modern air combat process is represented. The air combat simulation system is modeled detailed with the idea of modularization modeling. Then, the function of sub models is discussed as well as the interrelation of main sub models. According to the top design method, the sub models are modeled. The fighter's motion and control system model, AAM model, airborne radar model and air combat effectiveness evaluation model are established particularly. The analysis of the simulation results proves the method correction and the software usability.

Key words: air to air; mid and long range; combat effectiveness

随着空空导弹有效射程的增加、机载雷达性能的改进和战斗机携带导弹数目的增多,新型超音速战斗机已具备单机执行复杂环境下空战任务的能力,而中远距空战也正在成为战争的主要模式。先发制人的中远距空战集中体现了“先视、先射、先命中”这一现代空战的基本原则成为争夺战场制空权、制电子权和提高战场生存能力最重要的手段^[1]。战斗机一对一空战是空战对抗的最小作战单元,是构成大规模多机空战的基础,而且能充分表现战斗机各方面性能的优劣,对于定量或定性分析战斗机的各项性能都具有最好的直观性。而空战效能分析可以给我们提供在实战中如何高效地取得胜利的准则。对空战进行作战效能分析不仅可以改进旧机载设备,而且可探索研制新型战斗机及其机载设备,从而

缩短作战飞机的研制周期、节省研制、试验费用^[2]。因此,研究中远距一对一空战的作战效能分析有十分重要的意义。

1 现代战斗机空战系统的组成

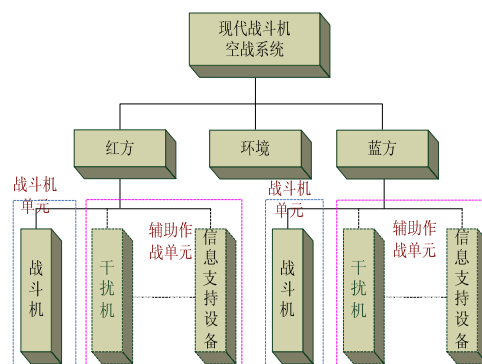


图1 战斗机空战系统

现代战斗机空战是一个复杂的空空攻防对抗过程,与一般攻防对抗过程的不同点在于,参战的每一方既是进攻方又是防守方,即参战的战斗机既要伺机歼敌,又要防止被敌所歼。现代战斗机空战中参战的武器系统在实体组成上可包括多个作战子单元,可由战斗机、干扰机、外部信息支持系统等组成。一般情况下,干扰机、外部信息支持系统等并不直接实施攻击等具体打击动作,可看作是现代战斗机空

收稿日期:2012-01-10

修回日期:2012-03-09

*基金项目:航天支撑技术基金项目(2010-HT-XGD);

航空科学基础基金项目(2011ZC53)

作者简介:王安丽(1963-),女,湖北武昌人,高级工程师,研究方向为航空电子系统与作战效能分析。

张 安(1962-),男,教授,博士生导师。

李杰奇(1986-),男,硕士研究生。

战武器系统中的辅助(备选)作战单元。因而,战斗机空战武器系统可分为战斗机单元和辅助作战单元。在战斗过程中,战场环境对空战有着不可忽略的影响,故空战系统可由红、蓝对抗方和战场环境组成,如图1所示。

2 空战系统模型及作战效能分析

战斗机空战系统空战效能分析所涉及到的空战中的数学模型主要有飞机运动模型、飞机机动动作控制模型、推力模型、火控系统模型、导弹运动模型、导弹制导与控制模型、信息系统模型和效能评估模型八部分。

2.1 飞机运动模型

飞机运动模型主要包括飞机运动学模型、推力模型、飞机机动动作控制模型和信息系统模型。飞机模型的各个模块之间的关系为:飞机的信息模块判断所探测到的目标信息,并将探测到的目标信息分别传给飞行控制模型和火控系统。飞行控制模型再依据目标信息,自身信息和武器系统的信息等做出飞行决策,并控制飞机作相应的机动飞行。推力模块则由所选定的机动动作调整推力。火控系统则依据空战态势和武器系统的信息快速判断是否可以发射武器。

2.1.1 飞机的运动模型

飞机模型采用可操纵质点模型,在地面坐标系下战斗机的动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{dv_{dx}}{dt} = g \cdot n_{dx} \\ \frac{dv_{dy}}{dt} = g \cdot n_{dy} + g \\ \frac{dv_{dz}}{dt} = g \cdot n_{dz} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $(v_{dx}, v_{dy}, v_{dz})^T$ 为战斗机速度在地面坐标系上的投影矢量; $(\frac{dv_{dx}}{dt}, \frac{dv_{dy}}{dt}, \frac{dv_{dz}}{dt})^T$ 为战斗机加速度在地面坐标系上的投影矢量; $(n_{dx}, n_{dy}, n_{dz})^T$ 为过载在地面坐标系上的投影矢量。

在地面坐标系内,战斗机运动学方程组为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_{dx} = v \cos \theta \cos \psi_s \\ \frac{dy}{dt} = v_{dy} = v \sin \theta \\ \frac{dz}{dt} = v_{dz} = -v \cos \theta \sin \psi_s \end{cases} \quad (2)$$

其中, $(x, y, z)^T$ 为战斗机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。

2.1.2 推力模型

推力模型较为复杂,因此,我们给出较为简化后的推力模型:

$$P = \xi P_{\max} \quad (3)$$

其中, ξ 为油门控制系数; P_{\max} 为当前最大可用推力。

2.1.3 飞机机动动作控制模型

飞行机动动作控制模型的主要作用是选择机动策略并控制飞机飞行。飞机控制模型的好坏直接影响飞机的作战效能。飞机的机动策略是由敌我双方的战场态势决定的。战术机动的目的是操纵飞机实现武器的瞄准和发射,实践中具体考虑的因素有敌我位置的几何关系、攻击的几何关系、武器的攻击区、飞机当前飞行状态和飞机的持续作战能力等。飞机根据所需达到的目的进行适当的组合即产生多种机动策略如俯冲/跃升、战术转弯、桶滚、追踪、反追踪等,仿真中建立了基于专家系统的机动决策模型,并在此基础上实现了规则的再定义以增加决策系统的灵活性。确定机动策略后飞机将依据其具体方案对飞机进行控制解算求得所需的速度、过载要求,控制飞机飞行。

2.2 导弹模型

空对空导弹是现代战斗机进行空战的主要武器,具有机动灵活、射程远、杀伤能力强、攻击机会多、发射条件宽松等特点。空空导弹按射程分为远距、中距和近程三种。射程在 12~100km 的称为中远距导弹。本文针对中远距空空导弹研究。

2.2.1 导弹的动力学模型

导弹模型亦采用可操纵质点模型。地面坐标系下的导弹动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{dv_{dx}}{dt} = g \cdot n_{dx} \\ \frac{dv_{dy}}{dt} = g \cdot n_{dy} + g \\ \frac{dv_{dz}}{dt} = g \cdot n_{dz} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $(v_{dx}, v_{dy}, v_{dz})^T$ 为导弹速度在地面坐标系上的投影矢量; $(\frac{dv_{dx}}{dt}, \frac{dv_{dy}}{dt}, \frac{dv_{dz}}{dt})^T$ 为导弹加速度在地面坐标系上的投影矢量; $(n_{dx}, n_{dy}, n_{dz})^T$ 为过载在地面坐标系上的投影矢量。

地面坐标系下的导弹运动学方程为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = v_{dx} = v \cos \theta \cos \psi_s \\ \frac{dy}{dt} = v_{dy} = v \sin \theta \\ \frac{dz}{dt} = v_{dz} = -v \cos \theta \sin \psi_s \end{cases} \quad (5)$$

其中, (x, y, z) 为弹位置向量在地面坐标系上的投影; v 为弹速度; θ 为弹道倾角; ψ_s 为弹道偏角。

2.2.2 导弹的制导与控制系统模型

制导控制系统必定具备“制导”和“控制”两方面的功能,因此将其划分为导引系统和控制系统。导引系统完成“制导”功能,并被进一步划分为导引头和导引律两个模块;而控制系统完成“控制”功能。在超视距目标攻击时,导引头在超出其发现距离的中制导阶段处于关机状态,导弹利用发射时载机装订的目标参数,递推目标位置,惯性导航。在预计进入开机距离时,导引头开机,扫描并截获目标,锁定目标后实现末段导引。导引头模型主要用于实现导弹导引头的探测功能,包括主动导引头模型和被动导引头模型,导引率计算则根据导引头探测到的目标信息及载机在发射时装订的导引方式计算控制量。

2.3 机载雷达模型

机载雷达就像战斗机的“眼睛”,是现代战斗机获取敌方信息的重要手段,但在机载雷达工作过程中,地表条件、大气状况、敌方有源压制干扰等背景因素都制约着机载雷达的探测性能,因此在仿真建模中建立了复杂背景下的机载雷达数学模型,使得模型更加贴近实战。仿真中将机载雷达的工作状态主要划分为关机、开机、搜索和跟踪。机载雷达在开机后,首先对目标进行较大范围的搜索扫描,确定发现目标后,机载雷达的工作状态转为跟踪。机载雷达跟踪成功后,机载雷达可以给载机提供更为准确的目标信息。

2.4 火控系统模型

针对空空远距作战的特点,本文主要研究导弹的火控解算模型。导弹的火控任务就是按照导弹攻击的要求导引导弹以一定的规律飞行进入攻击区,并达到规定的发射条件。对于导弹攻击区的计算常见的有六自由度模拟或三自由度模拟。在空战中导弹发射的先后可以直接影响飞机的存亡。仿真在满足一定精度的条件下利用拟合公式进行计算。

$$R_{\max} = c_0 v_f \cos \phi + c_1 v_f + c_2 v_t + c_3 H_f + c_4 H_t + c_5 v_t \cos q + c_6 \quad (6)$$

$$R_{\min} = k_m R_{\max} \quad (7)$$

其中, R_{\max} 为导弹发射包线的最大距离; R_{\min} 为导弹发射包线的最小距离; v_f 、 H_f 为载机的飞行速度和高度; v_t 、 H_t 为敌机的飞行速度和高度; ϕ 为前置角; q 为目标进入角; c_i 为描述导弹发射包线参数; k_m 为计算导弹最小发射距离系数。

2.5 作战效能分析

作战效能可以理解为任务完成的成功程度。对效能的估计也可以选择不同的数据准则,但总是以对目标攻击后得到的各种损伤特性作为效能准则^[7]。目标杀伤确定后,战术标准杀伤 u_0 即可确定。作战任务可取作功能损伤不低于 u_0 的任务形式(如果 U 的值随物理损伤增大而递增);或者不大于 u_0 的任务形式(如果 U 的值随物理损伤增大而递减)。对于所有的攻击条件,大多数因子经常会有许多随机的性质。所以,损伤量实质上是一个随机量,对应它的估计应采用损伤随机量的概率效能准则。可以采用如下两种形式作为空战效能的准则。

1) 损伤的数学期望值(即取自射击目标的平均损伤值)

$$M_u = E(U) \quad (8)$$

2) 损伤不小于给定值 u_0 的概率 R_{u_0} 。如果 U 为随物理损伤增长而递增的函数,则:

$$R_{u_0} = P(U \geq u_0) \quad (9)$$

如果 U 为随物理损伤增长而递减的函数,则

$$R_{u_0} = P(U \leq u_0) \quad (10)$$

准则的选定,在很大程度上取决于在相应采用的目标杀伤概念中有多少确切的战术标准杀伤 u_0 需确定。这一关系确定后,作战效能估计准则就会使概率取得结果。若 u_0 值很难确定,则损伤按目标取数学期望值作为效能准则^[7]。

作战效能准则与目标本身密切相关。为便于确定效能准则,以下具体给出一对一空战的作战效能指标。

一对一中远距空战(红方、蓝方)的事件可记为:

① A_1 为红方歼灭蓝方;② A_2 为蓝方歼灭红方;③ A_3 为两架飞机互相歼灭;④ A_4 为两架飞机均未被歼灭。

一次空战的效能指标用 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 四个事件的概率来描述。

$$P(A_1) = p_1(1 - p_2)$$

$$P(A_2) = (1 - p_1)p_2$$

$$P(A_3) = p_1 p_2$$

$$P(A_4) = (1 - p_1)(1 - p_2)$$

其中, p_1 、 p_2 分别是红机和蓝机的生存概率。

对于一定条件下的空战效能指标, 可以进行统计分析给出效能指标:

$$P(A_1) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i(A_1)}{N}, P(A_2) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i(A_2)}{N}$$
$$P(A_3) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i(A_3)}{N}, P(A_4) = \frac{\sum_{i=1}^N P_i(A_4)}{N}。$$

可进一步得到交战双方的交换比 $E = \frac{p(A_1)}{p(A_2)}$ 以描述一定条件下双方的效能对比。此外, 导弹发射的

先后也是重要的效能分析指标。

3 仿真示例

基于所建立的数学模型, 采用面向对象的仿真技术, 开发了现代战斗机空战仿真分析软件, 该软件功能完备, 具有二维及三维视景可视化显示功能, 可实现空战双方攻防对抗动态仿真, 不仅可用于分析战斗机各组成部分对其作战性能的影响, 还可用于研究各种空战战术的使用。仿真程序主控制流程和战斗机的仿真核心斗争流程如图 2、3 所示。利用上面所给的空战模型, 进行了一对一的中远距空战仿真, 以下仿真中空战双方均出动一架 Su-27 飞机。

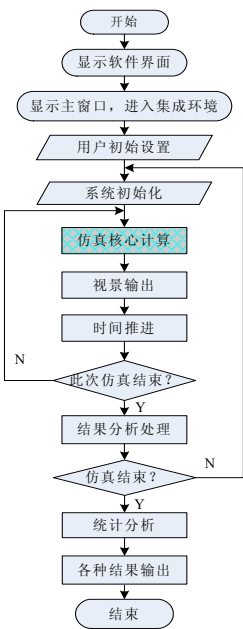


图 2 仿真程序主控制流程图

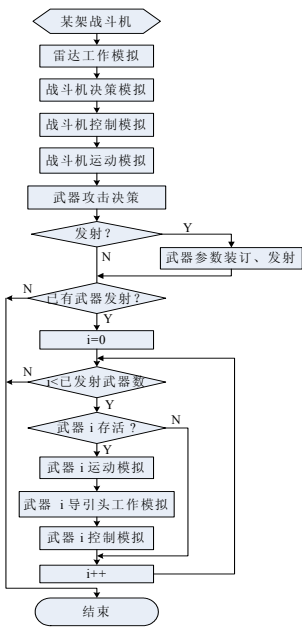


图 3 战斗机的仿真核心计算流程图

仿真算例 1: 仿真不同机动策略对战斗机空战结果的影响。双方均携带 2 枚 AA-10E 型中远距空导弹。战斗机初始运动参数设置如表 1 所示。

表 1 红蓝双方飞行参数设置

	红方战斗机	蓝方战斗机
X(km)	0	30
Y(km)	5	5
Z(km)	0	0
V _x (m/s)	350	-350
V _y (m/s)	0	0
V _z (m/s)	0	0

仿真系统采用的仿真步长: 10ms, 次数 300 次。

红蓝双方在发射完全部武器后采用的策略如表 2 所示, 其他机动策略相同。红蓝双方导弹发射信息如表 3 所示。

表 2 红蓝机机动策略

红方	增加高度的转弯机动, 增加 3km 高度
蓝方	降低高度的转弯机动, 降低 3km 高度

表 3 红蓝双方导弹发射信息

导弹	导弹发射时间(s)
红机	导弹 1 6.1
	导弹 2 7.2
蓝机	导弹 1 6.1
	导弹 2 7.2

红、蓝方战斗机主要机动过程如表 4 所示。

表 4 红蓝双方空战中的机动过程

双方机动信息		1	2	3
红机	机动	纯追踪	增加高度的转弯	降低高度的反追踪
	时间(s)	4.4	7.3	20.9
蓝机	机动	纯追踪	降低高度的转弯	降低高度的反追踪
	时间(s)	4.4	7.3	16.6

红、蓝方的交换比为: 1.58:1。单次仿真结果如图 4 所示。

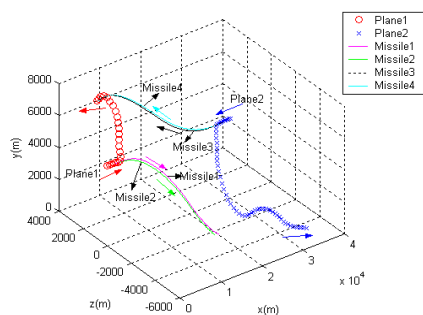


图 4 情景 1 单次仿真结果图

由战场初始态势设置及表 4 可以看出,红、蓝机从空战开始到红、蓝机双方导弹均发射完为止,双方的态势基本相同,在 7.3s 时红、蓝机采用了不同的机动策略,红机采用增加高度的战术转弯,蓝机则采用降低高度的战术转弯。由于采用了不同的机动策略导致红机、蓝机开始下一个机动的时间略有差距。此仿真算例 1 中,红、蓝方的交换比较大主要是因为,蓝机在降低高度后又继续进行降低高度的反追踪机动,很容易造成由高处来袭的导弹由于飞行高度过低,速度过快,无法及时转弯而撞地。红机则采用了爬升策略,使得由低处来袭导弹的攻击轨迹较平直,因而较容易被命中。由此仿真算例 1,我们可以看到在相同的态势下,使用不同的机动策略可能对空战结果产生很大的影响,因此在中远距空战中研究战斗机空战的机动策略有很大意义。

仿真算例 2:仿真携带不同导弹数目对空战结果的影响。情景 1、2 的武器配置如表 5 所示。情景 1、2 中双方战斗机的机动策略不变,其他配置同仿真算例 1。情景 2 单次仿真结果如图 5 所示。

表 5 情景 1、2 下的双方武器配置

	红机所携导弹		蓝机所携导弹	
	型号	数目	型号	数目
情景 1	AA-10E	2	AA-10E	2
情景 2	AA-10E	4	AA-10E	2

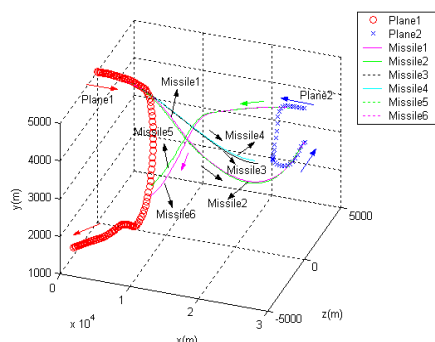


图 5 情景 2 单次仿真结果图

情景 1 中双方的交换比为:1:1

情景 2 中双方的交换比为:1:1.15

情景 2 中红机携带了更多的导弹,并且所载导弹均在与蓝机的导弹遭遇之前被发射,导致蓝机的生存概率大大下降,需要注意的是由于红机为了发射更多的导弹,希望以更大的概率杀伤蓝机,限制了自身的机动,因而使得蓝机导弹对红机的杀伤概率略有增加,使得红机生存概率减小。

在作战中红机为了完成第二轮导弹的发射,需继续向前追踪蓝机,导致与蓝方导弹提前遭遇。同时,蓝机在探测到红机仍继续前进时,为了防止红机尾追采用绕目标转动的策略,并未果断转弯返航,故而延误了一定的战术转弯时间以规避敌方导弹,使得与红机导弹的遭遇时间也略有提前。从整体上看,使用更多的导弹进行攻击,更加有利于歼灭敌方。

4 结束语

空战过程是一个极其复杂的过程,对空战模型的建立需要考虑多种因素,包括攻防双方战斗机单元和辅助战斗单元以及战场环境因素。模型建立的好坏直接影响作战效能分析的结果。本文重点研究了战斗机单元一对一中远距空战仿真建模,并讨论了空战模型及对空战作战效能的影响,经仿真证明与实际基本吻合。后续还需进一步开展战斗机带有辅助作战单元(包括干扰机和信息支援设备等)的多对多中远距空战仿真,如敌我识别和电子对抗等因素,使空战仿真更趋完善和真实。

参考文献:

- [1] 单睿子,汤晓云.远距空战相关技术[J].飞船导弹,2005(9) 28-32.
- [2] 张安,卢广山.飞机武器系统作战效能分析研究的进展[J].火力与指挥控制,2001,26(2):1-4.
- [3] 高晓光.航空军用飞行器导论[M].西安:西北工业大学出版社,2005..
- [4] 管彦深,张如桢.航空动力装置控制[M].北京:国防工业出版社,1985.
- [5] 刘代军,高晓光.中远程空空导弹允许攻击区的快速模拟算法[J].西北工业大学学报,1999,17(4):530-533.
- [6] 王宏伦,佟明安.多机空战仿真系统[J].西北工业大学学报,1998,16(1):70-74.
- [7] 高晓光,陈大庆.空战效能分析准则[J].飞行力学,1998,16(3):12-16.