

## 空战训练评估方法研究

潘卫华, 余熙武, 邓永利, 李国英, 施敬平

(北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

**摘要:** 针对空战评估的关键问题进行阐述, 分析评估系统的数据采集和处理方式, 建立数据处理模型。采用航迹关联的方式, 较好地解决了被攻击目标的识别问题。最后, 根据当前空战训练的特点, 阐述在复杂条件下的武器使用评估和训练评估方法, 并得出评估结论。

**关键词:** 空战; 训练; 评估; 航迹关联

**中图分类号:** V271.4      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0076-04

## Evaluation of Air Combat Training System

PAN Wei-hua, YU Xi-wu, DENG Yong-li, LI Guo-ying, SHI Jing-ping

(Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The critical problem of air combat evaluation was studied. Analysis was made to the data acquisition and processing mode of the evaluation system, and a data processing model was established. Track association method was used to solve the problem of target identification. Based on the features of current air combat, the methods for weapon operation evaluation and for training evaluation under complicated environment were presented with the conclusion.

**Key words:** air combat; training; evaluation; track association

### 0 引言

空战对抗训练是当前培养飞行员作战能力的主要手段, 在训练中, 飞行员采用雷达、光学雷达、数据链、雷达告警器和电子干扰吊舱等设备对目标实施探测和反探测, 跟踪到目标后, 飞行员主要通过导弹对目标进行攻击, 攻击过程中, 目标会实施规避或释放干扰等措施, 武器的使用方法直接影响到对抗的结果。对复杂的空战训练过程进行评估, 必须把各种作战要素分析清楚, 然后建立合理的对抗评估模型, 评估系统最终提供双方的截获时刻、目标距离、导弹发射时刻、载机脱离时刻、脱靶原因和被干扰原因等评估结果。

### 1 对抗参数获取方式分析

空战训练评估参数的获取是通过机载数据总线记录和发送来实现的。机载总线数据记录系统是在对抗训练后, 将参数卸载并进行事后评估, 具有参数记录全面和数据不丢失等优点, 但是在对抗训练中, 尤其是大

型空战演习中, “被击落方”无法及时得到退出战斗指令, 继续在空战中扮演角色, 使对抗演习的真实性大打折扣。因此, 在数据采集记录的同时, 需要将火控参数进行解析压缩, 然后通过数传电台发送到地面接收台, 最后实时解算和显示, 这样, 地面指挥部门可以实时了解空战情况, 及时对参训飞行员发出指令。由于干扰或遮挡等原因, 实时数据发送会出现不连续或丢帧等现象, 可能会影响评判结果, 所以当前空战评估中大多是同时使用两种参数获取方法。

为了有效评估空战训练, 需要采集载机的飞行、传感器、火控、武器控制、电子对抗等信息, 由于当前战斗机大多使用 1553B 总线, 可分为飞行、作战、武器、电子对抗和通信总线, 参数多、数据量大, 其中, 掺杂了很多与评估无关的数据和计算过程参数以及矢量字, 为了提高空战评估效率, 总线采集系统应采用可选择消息的和数据字筛选的采集方式进行采集和记录。

在采集机载航电系统信息的同时, 还需采集载机 GPS 的时间、经纬度和高度信息。GPS 信息为对抗训练飞机提供统一的时间基准和精确的态势信息, 当前不论使用 GPS 还是 BD 导航, 所提供的载机位置都十分精确, 当然, 在对抗训练中对 GPS 不实施干扰是训练评估的前提条件。

收稿日期: 2013-08-19

修回日期: 2014-05-09

作者简介: 潘卫华(1977—), 男, 江西寻乌人, 硕士, 工程师, 研究方向为航空火力控制。

## 2 评估数据处理

评估数据处理的目的是进行参数的整理和预加工(包括时统协调、插值处理、坐标换算等),转换成符合计算精度的输入接口要求数据。

### 2.1 时间同步插值处理

由于采集的各种火控数据参数周期不同,包括周期型消息、事件型消息和条件周期型消息,若要对数据进行回放和评估,需要将数据帧统一到一个时标下,模拟量数据进行平滑插值处理,开关量需要进行分段赋值处理。

本文主要采用二次插值的方法进行时间同步。各数据源对参数的采样速率和采样时间大都不同,以采样速率最大的参数为标准,对采样速率较小的参数进行插值,从而使其在时间上达到同步。

设要进行插值处理的参数为  $y=f(t)$ ,  $t$  为时间。已知其在  $t_0, t_1, t_2$  时的值为  $y_0, y_1, y_2$ , 可以求出一个二次多项式  $y=p(t)$ ,  $p(t)$  的求法为

$$p(t) = \frac{(t-t_1)(t-t_2)}{(t_0-t_1)(t_0-t_2)}y_0 + \frac{(t-t_0)(t-t_2)}{(t_1-t_0)(t_1-t_2)}y_1 + \frac{(t-t_1)(t-t_0)}{(t_2-t_0)(t_2-t_1)}y_2 \quad (1)$$

需要指出的是,若参数是角度数据,范围在  $\pm 180^\circ$ , 在  $t_0, t_1, t_2$  时刻进行插值处理时,若  $y_0, y_1, y_2$  的参数值有正值和负值,公式计算会出现歧义点,需要将负值参数加  $360^\circ$  进行计算,然后分情况处理,得到最终角度。

如果参数是开关量和事件型数据,就需要根据参数的定义和传输协议进行分段赋值处理。

### 2.2 攻击目标的坐标转换

在空战对抗过程中,往往采取多机协同形式,同时,在跟踪过程中可能受到敌方的欺骗干扰,有时跟踪的是友机或假目标,所以在多机空战中确定哪一架飞机被截获,哪一架飞机被击落,是判断攻击效果的关键环节。

由于传感器截获的目标信息大多是自身坐标系的坐标值,然后通过总线传送到任务计算机中进行坐标转换和火控解算,所以,攻击机与被攻击机需要统一到同一坐标系下,再进行比对,其转换坐标流程如图1所示。

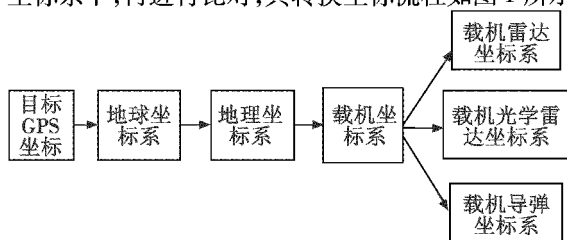


图1 坐标转换流程图

Fig.1 Flow chart of coordinates transformation

稳定截获目标后,雷达、光学雷达或者导弹导引头不断向火控计算机发送目标角度和距离信息,同时根据载机实时采集的 GPS 经度、纬度、高度和时间,以及惯导采集的姿态和地速等数据,通过坐标转换得到载机相对其他作战飞机的方位角、高低角和距离信息“真实”值。

GPS 的坐标转换过程如下:先将 GPS 的经度、纬度和高度值转换成地球坐标系即 WGS-84 地心坐标系的  $X, Y, Z$  值。其算式为

$$\begin{cases} X = (N + H_{Zl}) \cos \varphi_{GPS} \cos \lambda_{GPS} \\ Y = (N + H_{Zl}) \cos \varphi_{GPS} \sin \lambda_{GPS} \\ Z = [N(1 - e^2) + H_{GPS}] \sin \varphi_{GPS} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $H_{Zl}$  为载机高度;  $\lambda_{GPS}$  为 GPS 经度;  $\varphi_{GPS}$  为 GPS 纬度;  $N$  为地球半径;  $e$  为椭球的第一偏心率。

设载机坐标为  $(X_0, Y_0, Z_0)$ , 目标坐标为  $(X_1, Y_1, Z_1)$ , 则载机到目标的距离矢量为

$$\begin{cases} X_d = X_1 - X_0 \\ Y_d = Y_1 - Y_0 \\ Z_d = Z_1 - Z_0 \end{cases} \quad (3)$$

从地球坐标系转换到以载机为原点的地理坐标系(北天东坐标系)

$$1_e = T_{f,d} 1_d = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ \cos \varphi & \cos \varphi \sin \lambda & \sin \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \end{bmatrix} 1_d \quad (4)$$

然后转换到载机坐标系

$$1_f = T_{f,e} 1_e = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi & \sin \theta & -\cos \theta \sin \varphi \\ -\cos \gamma \sin \theta \cos \varphi + \sin \gamma \sin \varphi & \cos \gamma \cos \theta & \cos \gamma \sin \theta \sin \varphi + \sin \gamma \cos \varphi \\ \sin \gamma \sin \theta \cos \varphi + \cos \gamma \sin \varphi & -\sin \gamma \cos \theta & -\sin \gamma \sin \theta \sin \varphi + \cos \gamma \cos \varphi \end{bmatrix} 1_e \quad (5)$$

式中:  $\varphi$  为载机航向角;  $\theta$  为载机俯仰角;  $\gamma$  为载机横滚角。

如果传感器为雷达、光学雷达或导引头,传感器会有偏离机轴垂直方向的一个安装角,则需要绕  $Z$  轴旋转  $\delta$  度,若是导引头直接截获目标,还需要将跟踪线坐标系转换到导弹坐标系,即绕  $X$  轴旋转  $45^\circ$ , 旋转角度方向按照弹型的规定和坐标系右手定则来确定,在这里不再赘述,可得到载机到目标矢量在传感器坐标系下的坐标,表示为  $(X_{cgs}, Y_{cgs}, Z_{cgs})$ , 这样,目标距离为

$$D_{GPST} = \sqrt{(X_{cgs})^2 + (Y_{cgs})^2 + (Z_{cgs})^2} \quad (6)$$

传感器坐标系下的目标方位角为

$$\varphi_{GPST} = \arctan \left( \frac{Z_{cgs}}{X_{cgs}} \right) \quad (7)$$

传感器坐标系下的目标高低角为<sup>[1]</sup>

$$\theta_{GPST} = \arctan \left( \frac{Y_{cgs}}{\sqrt{X_{cgs}^2 + Z_{cgs}^2}} \right) \quad (8)$$

### 3 空战评估

#### 3.1 航迹关联评估

由参训飞机的 GPS 信息得到目标方位角、高低角和距离值(分别为  $\varphi_{\text{GPST}}$ 、 $\theta_{\text{GPST}}$ 、 $D_{\text{GPST}}$ ), 这样可以得到 GPS 和机载传感器两个目标航迹信息, 要确定是否是同一条航迹, 这涉及到航迹关联问题。具体方法如下: 将传感器航迹  $m$  和 GPS 航迹  $n$  相同时刻的对应位置分量相减, 若各位置分量差的绝对值小于各自对应的门限, 则认为传感器航迹  $m$  和 GPS 航迹  $n$  可能相关联, 否则认为两者不关联。

这里可以认为, GPS 误差与传感器误差不相关, 根据误差合成的原理, 门限值由系统根据传感器和 GPS 对应位置分量的均方差设定, 同时考虑到极限误差的存在, 采用  $3\sigma$  法则<sup>[2]</sup>, 所以其门限值设为

$$\sigma_z = 3\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_{\text{GPST}}^2} \quad (9)$$

考虑到验证航迹的相似性不能仅验证某一时刻, 而应验证一段时间, 这样可以增强航迹融合和态势显示的稳定性, 所以具体算式为

$$\prod_i^k |GpsTPostion[i] - SensorPostion[i]| < \prod_i^k \sigma_z \quad (10)$$

式中:  $SensorPostion[i]$  为传感器测量的目标方位角、俯仰角和距离;  $GpsTPostion[i]$  为 GPS 测量的转换成传感器坐标系的目标方位角、高低角和距离;  $\sigma_z$  为传感器测角精度或测距均方差;  $\sigma_{\text{GPST}}$  为 GPS 测角或测距均方差;  $i$  为第  $i$  维位置数据方差<sup>[3]</sup>。

这里忽略飞机姿态角带来的坐标转换误差, 同时载机传感器是在校靶良好的情况下取值的, 尽量消除其他因素导致的系统误差。

若传感器探测的目标位置与 GPS 目标位置对比不在门限值范围内, 转换下一个目标机; 若都不符合, 可以认为跟踪系统被干扰或是友机, 若在此时攻击, 则可判定无效。

#### 3.2 武器使用评估

飞行员的操作、火控系统状态、武器的选择和使用方式是空中对抗评估系统中判定胜负的关键因素。火控状态和武器状态直接影响评判流程, 其评估流程如图 2 所示。

载机的武器和火控状态参数可以由载机系统获取, 但在空战训练中, 并无真实武器发射, 所以评估导弹的命中情况, 需要建立复杂的导弹精确仿真模型和干扰模型(模型在这里不再赘述), 仿真模块通过记录系统获取载机发射瞬间的位置姿态数据和目标的位置等数据, 同时判断目标释放干扰类型, 并建立模型, 然后进行仿真推进, 考虑到弹道仿真模块的实时性、精确

性及脱靶量的设定, 仿真步长应设为 2 ms。

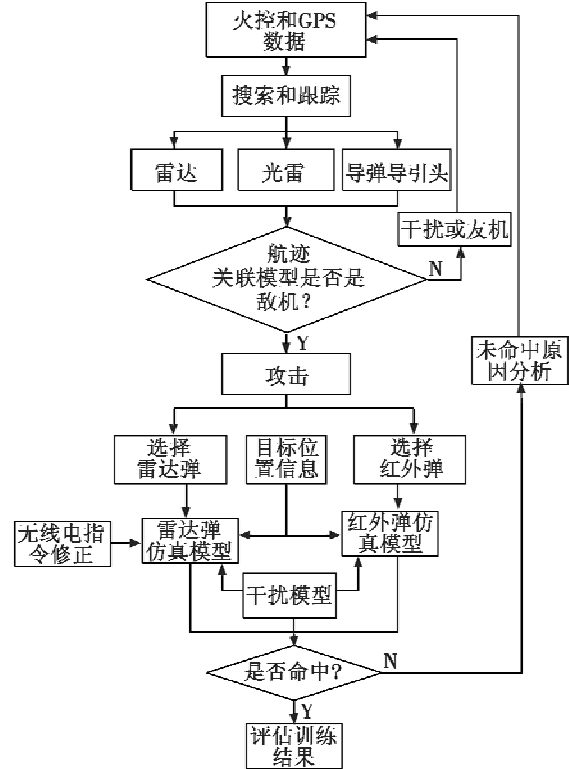


图2 空战对抗评估系统流程图

Fig. 2 Flow chart of air combat evaluation system

通过导弹仿真判定导弹是否命中目标: 若命中, 通过指挥塔台通知被命中敌机退出战斗; 若脱靶, 给出原因, 是目标释放干扰使导引头截获不稳定, 或者是目标实施规避, 最终弹目相对速度小于规定最小速度等。最后画出弹目交汇曲线, 如图 3 所示。

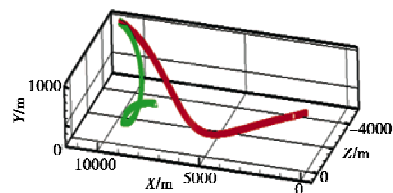


图3 弹目交汇三维曲线

Fig. 3 Meeting of the missile and target

这样做有利于飞行员总结经验教训, 从中获取经验。同样, 若对方实施的干扰使跟踪目标误差大, 或者目标丢失, 可分析其干扰方法和样式, 并形成时间和干扰样式列表, 供训练完成后的战法分析使用, 见表 1。

表1 作战过程分析表

Table 1 The training process analysis

飞机编号	时间	关键事件	事件结果
0537	13:14:35	被敌跟踪	采取机动摆脱跟踪
0537	13:16:05	跟踪敌机	稳定截获目标
0537	13:16:20	跟踪目标失锁	敌机用距离和角度欺骗干扰
0537	13:16:57	转入近距格斗状态	使用头盔瞄准具截获目标
0537	13:17:07	满足红外弹发射条件	武器发射命中目标

### 3.3 训练评估

对抗训练评估与任务紧密相关,如多机对抗时,有的负责掩护或支援干扰敌机,有的负责进攻,所以需根据任务不同来评估,本文只对进攻训练进行分析评估。

首先可以把对抗训练评估分成导航阶段、跟踪阶段、攻击阶段、命中与脱离阶段,评估流程如图4所示。

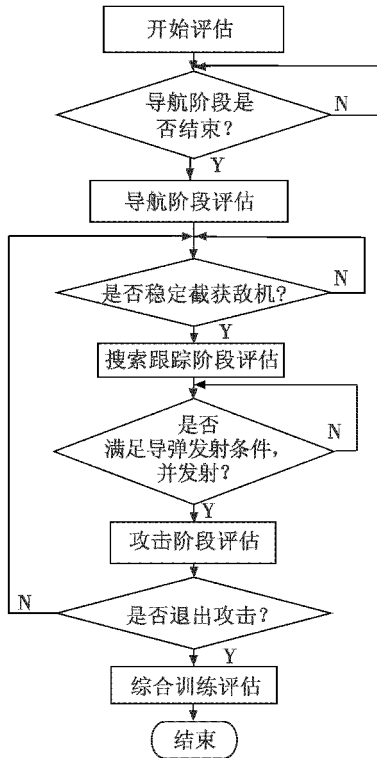


图4 训练评估框图

Fig.4 Training evaluation block diagram

在各个阶段有可能出现雷达被干扰、被敌跟踪、被导弹攻击等情况,若使用雷达制导武器远程攻击时需要无线电指令修正,所以这些情况都需要列入评估内容。

训练评估与效能评估最大区别在于效能评估的各个阶段的结果是以概率情况给出的,而训练评估的各

阶段结果已知。现在可以为对抗训练的各阶段设置权重,即  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ , 并有  $w_i > 0$ , 且  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 。其权重具体数值需要根据当前的空战训练重点来制定,如图4所示,若训练时未出现的情况,则其权重值为“0”。把训练出现的各阶段的结果设为  $L$ , 评估最终结果为

$$C = w_1 L_1 + w_2 L_2 + \dots + w_n L_n \quad (11)$$

### 4 结束语

本文主要通过对采集的火控数据进行处理,建立了空战分析流程和武器使用及评估模型,对复杂情况下的空战训练进行分析评估。

空战评估系统主要检查飞行员对装备的使用和战术配合,找出不足之处,最终得到本次训练的评估结果,对提高部队训练水平和飞行员战术素养具有重要的意义。

### 参考文献

[1] 陆彦,周志刚,夏英明. 航空火力控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,1990.  
LU Y, ZHOU Z G, XIA Y M. Airborne fire control technique [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990.

[2] 谢希权,易华. 机载多目标攻击武器系统信息处理[M]. 北京:国防工业出版社,2012.  
XIE X Q, YI H. Data processing of airborne multi-target attacking system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.

[3] 王月星,周德云,田涛. 机载多传感器跟踪航迹数据融合研究[J]. 电光与控制,2007,14(1):25-29.  
WANG Y X, ZHOU D Y, TIAN T. On target track fusion for multiple sensors onboard fighter aircrafts [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(1):25-29.

[4] 郑昌文,严平,丁明跃,等. 飞行器航迹规划[M]. 北京:国防工业出版社,2008,35-36.  
ZHENG C W, YAN P, DING M Y, et al. Route planning for air vehicles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008, 35-36.

[5] 符小卫,高晓光,何建华. 威胁联网下的飞行路径规划[J]. 飞行力学,2003,21(3):67-70.  
FU X W, GAO X G, HE J H. Flight path planning for threat netting [J]. Flight Dynamics, 2003, 21(3):67-70.

[6] 郑昌文,丁明跃,周成平,等. 多飞行器协调航迹规划方法[J]. 宇航学报,2003,24(2):115-120.  
ZHENG C W, DING M Y, ZHOU C P, et al. Coordinated route planning for multiple air vehicles [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24(2):115-120.

[7] WANG Y Y, WEI T T, QU X J. Study of multi-objective fuzzy optimization for path planning[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(1):51-56.

[8] 苏海军,杨煜普,王宇嘉. 微分进化算法的研究综述[J]. 系统工程与电子技术,2008,30(9):1793-1797.  
SU H J, YANG Y P, WANG Y J. Research on differential evolution algorithm: A survey [J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(9):1793-1797.

[9] STORN R. System design by constraint adaptation and differential evolution[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(1):22-34.

(上接第33页)

[10] 郑昌文,严平,丁明跃,等. 飞行器航迹规划[M]. 北京:国防工业出版社,2008,35-36.  
ZHENG C W, YAN P, DING M Y, et al. Route planning for air vehicles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008, 35-36.

[11] 符小卫,高晓光,何建华. 威胁联网下的飞行路径规划[J]. 飞行力学,2003,21(3):67-70.  
FU X W, GAO X G, HE J H. Flight path planning for threat netting [J]. Flight Dynamics, 2003, 21(3):67-70.

[12] 郑昌文,丁明跃,周成平,等. 多飞行器协调航迹规划方法[J]. 宇航学报,2003,24(2):115-120.  
ZHENG C W, DING M Y, ZHOU C P, et al. Coordinated