基于空域划分的超视距空战态势威胁评估

肖 亮 黄 俊 徐钟书

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191) (辽宁省交通厅港航管理局, 沈阳 110003)

摘 要: 编队超视距空战(BVR,Beyond Visual Range)已成为现代空战的主要模式.在空战优势区域与劣势区域判断的基础上对整个空域进行划分,并给出4种特定空域态势.从空中态势和编队作战能力两方面对空战态势进行分析.使用主成分分析法选取输入变量分析编队作战能力,降低评估过程中收集数据的复杂度.应用遗传神经网络对影响BVR各因素进行效能评估,将遗传算法(GA,Genetic Algorithms)与多层前馈(BP,Back Propagation)网络结合,利用GA的全局搜索优化BP网络的结构参数,有效克服BP算法的局部收敛等问题.结果表明:该模型能在综合分析空战各指标后给出红蓝双发的态势评估指标,该模型可有效减少评估中的人为因素,使评估结果更为客观可信.

关 键 词: 超视距空战; 优势区域; 空域划分; 态势评估; 遗传神经网络; 编队协同空战

中图分类号: V 271.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)10-1309-05

Modeling air combat situation assessment based on combat area division

Xiao Liang Huang Jun

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Xu Zhongshu

(Harbor and Shipway Branch, Liaoning Transportation Admin Bureau, Shenyang 110003, China)

Abstract: The beyond visual range(BVR) air combat has become one of the most important air modes of modern air combat. The whole airspace division was made base on advantages and disadvantages of regional area. Four specific airspace situations were put forward. A new model was set up combined situation assessment model and formation combat capacity model. Using principal component analysis(PCA) to select input variables of formation combat capacity model, which can reduce the complexity of collecting data. Combined neural network was used for effectiveness evaluation of BVR. Combine genetic algorithms(GA) with back propagation(BP) neural network, using GA's global to search optimized BP network structure parameters, overcome the local convergence and other issues of BP algorithm effectively. The result shows that the model can limit the artificial factors, making the solution more objective and creditable.

Key words: beyond visual range(BVR) air combat; advantage region; combat area division; situation assessment; GA-BP neural network; cooperative combat of airplane formation

现代空战任务[1]按过程大体可分为超视距(BVR, Beyond Visual Range)空战和视距内(WVR,Within Visual Range)空战[2].随着预警发现能力、数据链分析处理能力和超视距空战能力等作战性能的发展,超视距空战成为空战的主要模式[3].国外,美、俄等军事强国开展了许多有关

收稿日期: 2012-12-12; **网络出版时间**:2013-03-14 09:15

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130314.0915.001.html

基金项目: 装备预先研究计划项目(51310010504)

作者简介: 肖 亮(1983-),男,辽宁沈阳人,博士生,vin.x@qq.com.

多机空战方面的研究工作[4-5]. 在空战优势函数构造和目标分配方面,文献[6]给出了一种用于近距空战的优势函数选取方法. 文献[7]介绍了多机空战模拟的一种数值方法,并根据进入角指向误差来确定攻击优势,但该方法仍只适用于近距空战. 文献[8]提出了一种利用匈牙利算法解决目标分配问题的新思路. 国内近年来,有关多目标攻击技术的研究主要体现在多机协同攻击多目标技术[9]、协同空战的智能化[10]等方面.

超视距空战态势评估是超视距空战多目标分配的基础,是一个多参数、动态的复杂过程,以前的研究重点,往往是理论公式推导. 本文在分析超视距空战优势区域与劣势区域的基础上,提出将一种空域划分方法,并针对红蓝双方飞机的位置关系,提出 4 种特定空战态势关系,并以此为基础,应用一种新型的基于遗传神经网络的效能评估模型对空战态势进行结算.

遗传算法和人工 BP(Back Propagation)神经网络[11]都具有非线性、学习性强的特点,是目前常用的人工智能的热点技术. 但是都存在相应的缺陷:BP 神经网络算法具有收敛速度慢、容易陷入局部极值、隐层和隐层节点的个数难以确定等缺点;遗传算法有稳定性差、难于处理非线性约束等缺点.

将遗传算法和神经网络结合,是一种优化的非线性方法[12].

1 超视距空战空域划分方法

本文将超视距空战区域进行划分,定义出 4 种特定情况的态势,并以 4 种特定态势下的数据作为遗传神经网络的训练数据对网络进行训练.

红蓝双方战机的空战态势如图 1 所示. 超视距空战过程中,红蓝双方都想使对方处于本机攻击范围之内,同时尽可能地避开敌机的侦查、攻击范围.

超视距空战中先敌发现、先敌发射,即本机在目标即侧后方、正后方的优势区域形成攻击态势. 空战中尽量避开敌方雷达探测区域,不进入劣势区域. 图 2 所示为载机的优势区域和劣势区域.

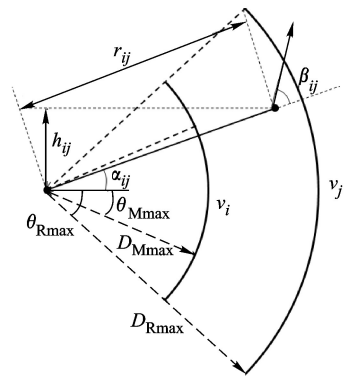
在定义空战优势区域和劣势区域的基础上,本文将载机的整个区域进行划分,得到了 4 种特定的空战态势,如图 3 所示.

1) 红机相对于蓝机处于绝对优势或劣势的情况,即红机处于蓝机正前方或正后方,如图 3a 所示.

2) 红机相对于蓝机处于瞬时优势或瞬时劣势,即红机或蓝机当前处于对方的最佳攻击区域内,但处于劣势区域的一方速度垂直于对方,在具有性能、高度和速度优势的情况下较易于摆脱此不利境况,如图 3b 所示.

3) 红机相对于蓝机有一定优势或一定劣势,是指红机或蓝机相对于对方只存在机动占位上的一定优势,具体情况如图 3c 所示.

4) 红蓝双方态势均等,如图 3d、图 3e 所示情况.



α_{ij}—红方战机位置角;β_{ij}—蓝方战机进入角;r_{ij}—红方战机 i 与蓝方战机 j 之间距离;h_{ij}—红方战机 i 与蓝方战机 j 之间的高度差;v_i—红方战机 i 速度;v_j—蓝方战机 j 速度;θ_{Rmax}—红方雷达最大探测角;θ_{Mmax}—红方导弹最大离轴发射角;D_{Rmax}—红方雷达最大探测距离;D_{Mmax}—红方导弹最大发射距离.

图 1 红蓝双方空战态势示意图

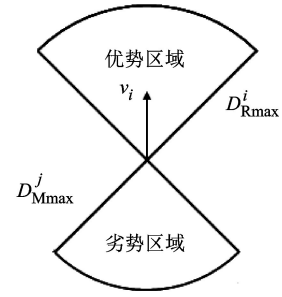


图 2 优势区域和劣势区域

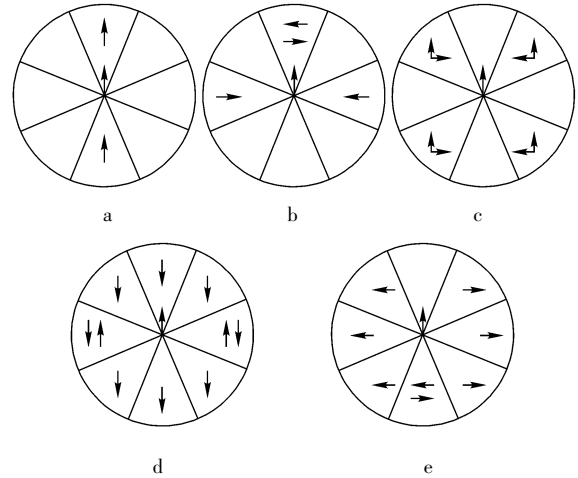


图 3 超视距空战区域划分情况示意图

2　编队超视距空战效能评估模型

现代空战中的作战以战场态势为背景,需要根据空战中敌我双方的整体态势及空战能力对比,推断敌方编队战机对我方编队的威胁程度,是进行战术决策和火力分配的前提. 本文对整个体系做出分析,其空战优势结构如图 4 所示.

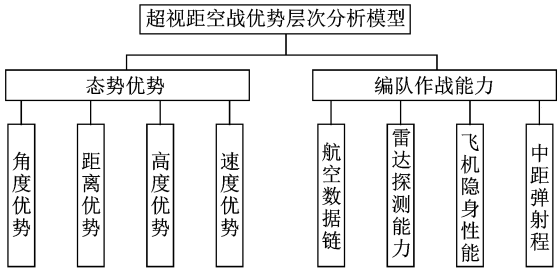


图 4　编队超视距优势模型

2.1　态势优势指数

在确定红方各战机的可探范围后,进而确定红方各战机针对蓝方各战机的态势优势指标. 本文定义各项优势指标如下:

1）角度优势指数

$$E_{\alpha}^{ij}=\mathrm{e}^{-\frac{|\alpha_{ij}+\beta_{ij}|}{180^{\circ}}} \tag{1}$$

2）距离优势指数

设红方战机雷达的最大探测距离是 $D_{\mathrm{R\,max}}^{i}$,导弹最大射程是 $D_{\mathrm{M\,max}}^{i}$,蓝方战机雷达的最大探测距离是 $D_{\mathrm{R\,max}}^{j}$,导弹最大射程是 $D_{\mathrm{M\,max}}^{j}$,不妨假设双方性能为:$D_{\mathrm{M\,max}}^{j}\leqslant D_{\mathrm{M\,max}}^{i}\leqslant D_{\mathrm{R\,max}}^{j}\leqslant D_{\mathrm{R\,max}}^{i}$,则,

$$E_{D}^{ij}=\begin{cases}0.1839\mathrm{e}^{-\frac{r-D_{\mathrm{R\,max}}^{i}}{D_{\mathrm{R\,max}}^{i}}} & r\geqslant D_{\mathrm{R\,max}}^{i}\\ 0.5\mathrm{e}^{-\frac{r-D_{\mathrm{R\,max}}^{j}}{D_{\mathrm{R\,max}}^{i}-D_{\mathrm{R\,max}}^{j}}} & D_{\mathrm{R\,max}}^{j}\leqslant r\leqslant D_{\mathrm{R\,max}}^{i}\\ \mathrm{e}^{-\frac{r-D_{\mathrm{M\,max}}^{i}}{D_{\mathrm{R\,max}}^{i}-D_{\mathrm{M\,max}}^{i}}} & D_{\mathrm{M\,max}}^{i}\leqslant r\leqslant D_{\mathrm{R\,max}}^{j}\\ 2\mathrm{e}^{-\frac{r-D_{\mathrm{M\,max}}^{j}}{D_{\mathrm{M\,max}}^{i}-D_{\mathrm{M\,max}}^{j}}} & D_{\mathrm{M\,max}}^{j}\leqslant r\leqslant D_{\mathrm{M\,max}}^{i}\\ 0 & r\leqslant D_{\mathrm{M\,max}}^{j}\end{cases} \tag{2}$$

3）高度优势指数

$$E_{H}^{ij}=\begin{cases}0 & h_{ij}\leqslant -5\mathrm{km}\\ 0.5+0.1h_{ij} & -5\mathrm{km}<h_{ij}\leqslant 5\mathrm{km}\\ 1 & h_{ij}>5\mathrm{km}\end{cases} \tag{3}$$

其中,E_{H}^{ij} 为红方战机 i 对蓝方战机 j 的高度优势指数;h_{ij} 为红方 i 与蓝方战机 j 间的高度差值.

4）速度优势指数

$$E_{V}^{ij}=\begin{cases}0 & v_i/v_j\leqslant 0.5\\ -0.5+v_i/v_j & 0.5<v_i/v_j\leqslant 1.5\\ 1 & v_i/v_j>1.5\end{cases} \tag{4}$$

其中,E_{V}^{ij} 为红方战机 i 对蓝方战机 j 的速度优势指数.

2.2　编队作战能力指数

在综合、借鉴已有成果[13-14]的基础上,根据影响战争胜负的战术因素以及建立评估指标应遵循的原则,建立影响编队超视距空战效能的层次分析模型,如图 5 所示.

通过模拟 100 组超视距空战算例结果,并利用主要成分分析法对 100 编队空战算例的数据各性能指标进行综合评估[15],可以得到,影响编队空战的主要元素为航空数据链(此处只考虑有、无航空数据链)、雷达探测能力、飞机隐身性能与中距弹射程等,具体如图 4 所示.

本文主要分析编队作战飞机的航空数据链、雷达探测能力、隐身能力和空空导弹性能指标. 其中,航空数据链只考虑有、无情况对比,其他 3 个参数均采用以下方法进行评判.

$$X_{c}^{ij}=\begin{cases}0.1 & a_i/a_j\leqslant 0.6\\ -0.5+a_i/a_j & 0.6<a_i/a_j\leqslant 1.5\\ 1 & a_i/a_j>1.5\end{cases} \tag{5}$$

其中,$a_i(a_j)$ 分别对应于红(蓝)方飞机的雷达探测能力,隐身能力和空空导弹性能.

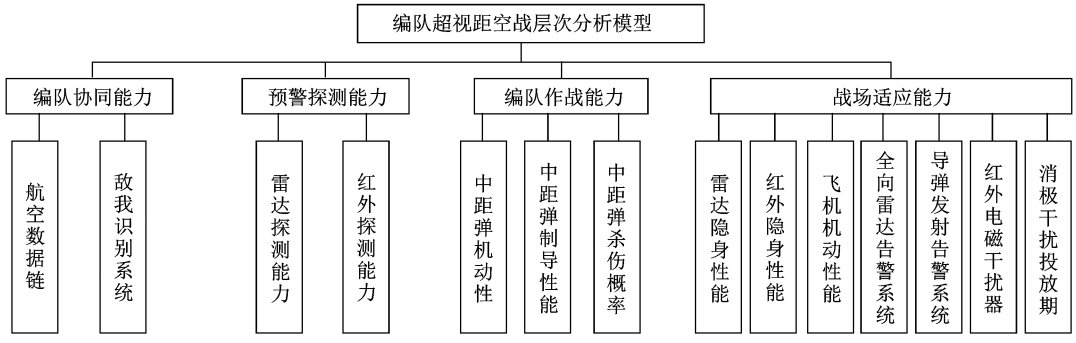


图 5　飞机编队协同作战能力层次分析模型

2.3 特定空域态势评估

根据上文提到的 4 种态势分类,在对我机优势值进行计算时先确定当前态势属于哪类情况,再根据态势所属类别选择相应的指标权重系数. 最后根据直接线性加权法求得总的优势值. 直接线性加权法就是直接将我机相对于各架敌机的 5 项优势指数 E_c,E_α,E_r,E_h 和 E_v 分别乘以权系数,然后求和,总优势值为

$$E_j = \sum_{i=1}^{5} w_{ij} \times E_{ij} \quad j = 1,2,\cdots,n \tag{6}$$

$$E_c = \left[\ln\left(\sum X^1 + 1\right) + \ln\left(\sum X^2\right)\right] X^3 \cdot 1.5^{X^4} \tag{7}$$

其中,X^1 为导弹射程;X^2 为雷达探测距离;X^3 是飞机隐身能力;X^4 为数据链能力,有数据链取 1,无数据链取 0.

本文由文献[16]中的方法计算出 4 种特定情况下各评估指标权重系数,见表 1.

表 1 优势指数权重系数

	S^c	S^α	S^D	S^H	S^V
情况 1	0.3412	0.3125	0.1505	0.1362	0.1097
情况 2	0.3336	0.2694	0.1970	0.1238	0.07616
情况 3	0.3396	0.2638	0.1930	0.1410	0.0626
情况 4	0.3844	0.1992	0.1748	0.1645	0.07702

3 遗传算法神经网络的构建

3.1 遗传神经网络初始参数

基于遗传算法的 BP 神经网络训练方法,其网络优化过程如下:首先进行编码初始化,确定评价函数,选择算子并计算误差,判断误差是否达到要求,满足则停止,不满足即计算交叉算子和变异算子. 具体步骤见图 6.

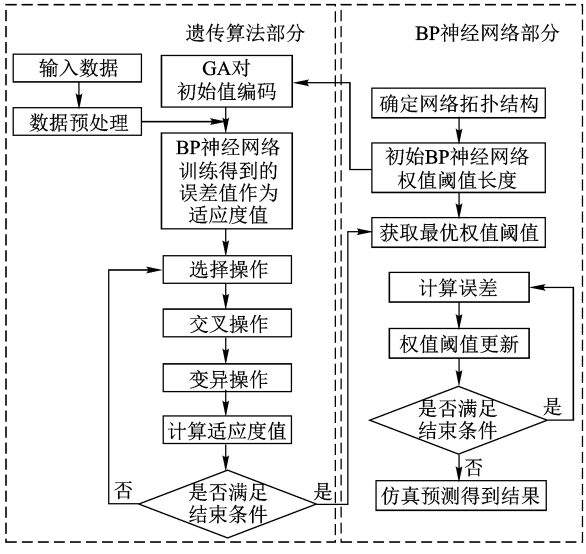


图 6 遗传算法优化网络示意图

将 BP 网络的层数选为 3,各节点均采用 S 型函数,输入层节点数为 8,隐层节点数初定为 3(以后再进行调整),输出层节点数为 1,学习速率为 0.27,BP 网络训练的最终允许误差($\varepsilon_{\max}$)初设为 0.001,动量常数为 0.95.

遗传算法参数:种群大小定为 100,交叉概率为 0.15,变异概率为 0.005,最大遗传进化代数为 100.

3.2 遗传神经网络训练

每一个网络训练样本有 7 个输入值,分别为:角度优势、距离优势、高度优势、速度优势、雷达探测能力、飞机隐身能力和导弹射程,1 个期望输出值(当前空战态势指标). 本文选取 200 组训练数据对网络进行训练,训练数据来源于上文提到的 4 种特定情况(每种情况选取 50 组数据).

通过调整隐含节点数目来训练网络,本文对隐节点数为 3 作为起始,按照一定规律逐渐增加节点数目,得出隐节点数为 6 的神经网络泛化能力最强.

4 实例分析

通过以上步骤训练,该遗传网络已经满足了超市距空战的基本要求,应用此网络对编队超视距空战进行评估本文仿真试验中,主要考虑蓝方两架战机协同攻击红方 4 架战机. 设双方雷达最大探测角均为 60°,导弹发射角均为 35°. 双方战机具体指标见表 2 ~ 表 4.

表 2 蓝方空战能力参数

雷达偏号	雷达最大探测距离/km	导弹最大射程/km	RCS 值/m^2
1 号	150	60	3
2 号	120	50	0.5

表 3 红方空战能力参数

雷达信号	雷达最大探测距离/km	导弹最大射程/km	RCS 值/m^2
1 号	200	70	1
2 号	130	55	3
3 号	100	50	3
4 号	92.6	50	5

根据表 4 所示态势,将红蓝双方的态势数据导入训练好的遗传神经网络中,即可得空战态势矩阵为

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} 0.5423 & 0.5556 & 0.5788 & 0.6979 \\ 0.4925 & 0.5167 & 0.6831 & 0.7221 \end{bmatrix}$$

可见优势值排序(由大到小):$E_{24} > E_{23} > E_{14} > E_{13} > E_{12} > E_{11} > E_{22} > E_{21}$,其结果与文献[16]的排序结果一致,但数值大小与其不尽相同.

表 4　红蓝双方空战态势

空战态势	红机位置角/(°)	蓝机进入角/(°)	两机距离/km	两级高度差/m	红机速度/(m·s^{-1})	蓝机速度/(m·s^{-1})
红 1 号 VS 蓝 1 号	-23	-10	57	-500	598	612
红 1 号 VS 蓝 2 号	-88	-13	55	-1000	598	561
红 1 号 VS 蓝 3 号	-92	-62	62	-3000	598	544
红 1 号 VS 蓝 4 号	-77	-79	84	-2500	598	510
红 2 号 VS 蓝 1 号	-33	-21	46	-1200	543	612
红 2 号 VS 蓝 2 号	-12	-29	39	-2500	543	561
红 2 号 VS 蓝 3 号	-14	-32	77	-500	543	544
红 2 号 VS 蓝 4 号	-41	-61	92	-1000	543	510

5　结　论

通过对载机进行优势区域与劣势区域的定义,对超视距空战空域进行划分,并给出了 4 种特定的态势情形,将复杂的超视距空战简单化.

建立超视距空战态势评估模型,将态势评估主要分为角度优势、距离优势、速度优势、高度优势和编队优势等几个方面进行分析,降低了评估过程中收集数据的复杂度.

通过基于遗传算法优化的 BP 神经网络对影响指标进行模拟分析. 其结果表明遗传神经网络在解决作战效能评估这一类复杂的非线性问题时,有其独特的优势.

参考文献 (References)

[1] Sivazlian B D. Aircraft sortie effectiveness model [R]. AD-A211594,1989

[2] 康崇禄. 国防系统分析方法[M]. 北京:国防工业出版社,2003:442-467
Kang Chonglu. Method ofnational system analysis[M]. Beijing: National Defence Industry Press,2003:442-467(in Chinese)

[3] 曲东才. 超视距空空导弹与超视距空战[J]. 中国航天,1999(8):23-27
Qu Dongcai. BVR air-to-air missile and BVR air combat[J]. Aerospace China,1999(8):23-27(in Chinese)

[4] Tom Ring. US airborne command and control system [J]. World Air Power,1999(36):40-57

[5] Paddon H G. Maneuvering target simulation for testing the terminal guidance of air-to-air missiles[R]. ADA039757/OSL,1977

[6] Austin F,Lewis M. Automated maneuvering decision for air-to-air combat[R]. AIAA-87-2393,1987

[7] Hague D S. Multiple-tactical aircraft combat performance evaluation system [R]. AIAA-80-0189,1980

[8] Coleman N,Papanagopoulos G. Advanced mine-to-target assignment algorithms and simulation[R]. AIAA-99-3993,1999

[9] Geng Yanluo,Jiang Changsheng,Li Weihao. Multi-fighter coordinated multi-target attack system [J]. Transact ions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2004,21(1):18-23

[10] 李林森,佟明安. 协同多目标攻击空战决策及其神经网络实现[J]. 航空学报,1999,20(4):309-312
Li Linsen,Tong Ming an. Air combat decision of cooperative multi-target attack and its neural net realization[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,1999,20(4):309-312(in Chinese)

[11] Phua P K H,Zhu X T,Koh C H. Forecasting stock index increments using neural networks with trust region methods[C]// Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks. Singapore:IEEE,2003:260-265

[12] 范睿,李国斌,景韶光. 基于实数编码遗传算法的混合神经网络算法[J]. 计算机仿真,2006,23(1):161-164
Fan Rui,Li Guobin,Jing Shaoguang. A method of mixed neural network based on real-coded genetic algorithm[J]. Computer Simulation,2006,23(1):161-164(in Chinese)

[13] 张最良,李长生,赵文志,等. 军事运筹学[M]. 北京:军事科学出版社,1993:109-123
Zhang Zuiliang,Li Changsheng,Zhao Wenzhi,et al. Military operational research[M]. Beijing: Military Science Press,1993: 109-123(in Chinese)

[14] 朱宝鎏,朱荣昌,熊笑非. 作战飞机效能评估[M]. 北京:航空工业出版社,1993:64-91
Zhu Baoliu,Zhu Rongchang,Xiong Xiaofei. Military aircraft combat effectiveness assessment [M]. Beijing: Aeronautics Industry Press,1993:64-91(in Chinese)

[15] 姬春煦,张骏. 基于主成分分析的股票指数预测研究[J]. 计算机工程与科学,2006,28(8):122-124
Ji Chunxu,Zhang Jun. Stock forecasting based on principal component analysis[J]. Computer Engineering and Science, 2006,28(8):122-124(in Chinese)

[16] 姜长生,丁全心,王建刚,等. 多机协同空战中的威胁评估与目标分配[J]. 火力与指挥控制,2008,33(11):8-13
Jiang Changsheng,Ding Quanxin,Wang Jiangang,et al. Research on threat assessment and target distribution for multi-aircraft cooperative air combat[J]. Fire Control and Command Control,2008,33(11):8-13(in Chinese)

(编　辑:李　晶)