基于回归型支持向量机的空战目标威胁评估

郭 辉 徐浩军 刘 凌

(空军工程大学 工程学院，西安 710038)

摘 要：空战目标威胁评估是协同多目标攻击中的关键问题.针对传统空战目标威胁评估方法在确定权重系数方面的不足,提出了一种新的基于回归型支持向量机的评估方法.在分析了现有的空战目标威胁评估方法中距离威胁模型存在缺陷的基础上,提出了改进的距离威胁模型.建立了基于回归型支持向量机的空战目标威胁评估模型,利用该模型对想定的空战目标进行了威胁评估.仿真结果表明,该方法具有很好的预测能力,可以快速、准确地完成空战目标威胁评估.

关 键 词：空战；威胁评估；支持向量机；回归型支持向量机

中图分类号：V 271

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)01-0123-04

Target threat assessment of air combat based on support vector machines for regression

Guo Hui Xu Haojun Liu Ling

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Target threat assessment method for air combat was a key problem of cooperative multiple target attack. Aiming at the deficiencies of traditional target threat assessment method for air combat in calculating the weights, a new assessment method based on support vector machines for regression was proposed. An improved distance threat model was proposed based on analyzing the existing target threat assessment methods for air combat which had disadvantages in distance threat model. The model of target threat assessment for air combat was established based on support vector machines for regression, then using this model the threat of some supposed air combat target was evaluated . The simulation results show that the method has good ability of forecast, which can accomplish target threat assessment for air combat fleetly and exactly.

Key words: air combat; threat assessment; support vector machines; support vector machines for regression

随着航空科技的发展,多目标攻击能力已经成为现代机载武器系统的研究方向和衡量现代战斗机作战能力的一个重要标准.威胁评估是多目标攻击的关键技术之一,它是目标分配和火力分配的前提,常用的威胁评估方法有优势函数法、威胁指数法、多属性决策法等.上述方法在确定威胁指标权重时,一定程度上有效地结合了专家经验,但最终确定的权重系数是以恒值向量的形式给出,难以适应瞬息万变的战场态势.近年来,以神经网络为代表的智能技术在模式识别、控制、决策和预测等领域得到了广泛的应用.文献[1－3]采用神经网络方法解决目标威胁评估问题,取得了较好的评估结果,但是,神经网络理论存在一些不可避免的缺陷,如网络结构选择困难、过学习、局部极值以及推广能力较差等.支持向量机 SVM (Support Vector Machines)是近年来兴起的一种

收稿日期：2009-06-19

基金项目：国家自然科学基金资助项目(70671106)

作者简介：郭 辉(1981－),男,吉林柳河人,博士生,guohui731506@163.com.

基于统计学习理论的新型机器学习算法，它以结构风险最小化为原则，能够较好地解决小样本、非线性和高维数的问题. 文献[4－5]利用回归型支持向量机对空袭目标威胁评估问题进行了研究，取得了精度较高的评估结果. 因此，本文尝试采用回归型支持向量机进行空战目标威胁评估研究，以期取得好的效果.

1 威胁评估指标的确定

在复杂的空战环境中，评估目标威胁程度需要考虑许多因素，不仅包括空战中敌我飞机的几何位置关系以及距离和速度变化率等空战态势，还包括敌机的类型和机载武器情况，以及我方机载武器情况及所处状态等. 本文选取目标的空战能力和空战态势作为影响目标威胁评估排序的指标，其中空战态势因素包括角度、距离和速度，分别用角度威胁因子、距离威胁因子和速度威胁因子来表示，双方的空战态势如图1所示. 图1中 $\boldsymbol{v}_i$ 为我机 i 的速度矢量，$\boldsymbol{v}_j$ 为目标机 j 的速度矢量，q_{R} 为目标前置角，q_{B} 为目标航向与目标线夹角(右偏为正)，r_{ij} 为我机与目标机之间的距离.

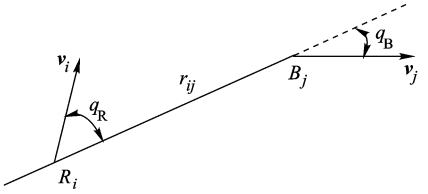


图1 空战态势示意图

角度威胁因子 T_{aij} 和速度威胁因子 T_{vij} 的定义[6]如下：

$$T_{aij}=\frac{(|q_{\mathrm{b}}|+|q_{\mathrm{r}}|)}{360} \tag{1}$$

$$T_{vij}=\begin{cases}0.1 & v_j<0.6v_i\\ -0.5+v_j/v_i & 0.6v_i\leqslant v_j\leqslant 1.5v_i\\ 1.0 & v_j>1.5v_i\end{cases} \tag{2}$$

目前大多数文献都采用文献[7]中的模型计算距离威胁因子，但该方法仅考虑了我方飞机的雷达最大探测距离和导弹的最大射程以及敌方飞机所携带导弹的最大射程，没有考虑敌方飞机的雷达最大探测距离. 实际上，双方飞机雷达最大探测距离和导弹最大射程的不同对距离威胁因子的计算有着重要影响. 例如，当我方飞机的雷达最大探测距离和导弹最大射程均大于敌方飞机时，在相同距离上距离威胁因子应当小于我方飞机的雷达最大探测距离和导弹最大射程均小于敌方飞机的情况.

考虑双方飞机性能对比的各种情况，本文认为可以分4种情况来计算距离威胁因子 T_{rij}. 设 r_{mi}，r_{tmi} 分别为我机 i 与目标机 j 所携带导弹的最大射程，r_{ri}，r_{trj} 分别为我机 i 与目标机 j 的雷达最大探测距离，则4种情况分别为

1) r_{trj}，r_{ri}，$r_{tmj}>r_{mi}$ 时

$$T_{r_{ij}}=\begin{cases}0 & r_{ij}\geqslant r_{trj}\\ 0.4-0.4\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{ri}}{r_{trj}-r_{ri}} & r_{ri}\leqslant r_{ij}<r_{tri}\\ 1-0.6\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{tmj}}{r_{ri}-r_{tmj}} & r_{tmj}\leqslant r_{ij}<r_{ri}\\ 0.5+0.5\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{mi}}{r_{tmj}-r_{mi}} & r_{mi}\leqslant r_{ij}<r_{tmj}\\ 0.5+0.3\cdot\dfrac{r_{mi}-r_{ij}}{r_{mi}} & r_{ij}<r_{mi}\end{cases} \tag{3}$$

2) $r_{ri}>r_{trj}$，$r_{tmj}>r_{mi}$ 时

$$T_{r_{ij}}=\begin{cases}0 & r_{ij}\geqslant r_{ri}\\ 0.3-0.3\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{trj}}{r_{ri}-r_{trj}} & r_{trj}\leqslant r_{ij}<r_{ri}\\ 1-0.7\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{tmj}}{r_{trj}-r_{tmj}} & r_{tmj}\leqslant r_{ij}<r_{trj}\\ 0.5+0.5\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{mi}}{r_{tmj}-r_{mi}} & r_{mi}\leqslant r_{ij}<r_{tmj}\\ 0.5+0.3\cdot\dfrac{r_{mi}-r_{ij}}{r_{mi}} & r_{ij}<r_{mi}\end{cases} \tag{4}$$

3) $r_{trj}>r_{ri}$，$r_{mi}>r_{tmj}$ 时

$$T_{rij}=\begin{cases}0 & r_{ij}\geqslant r_{trj}\\ 0.2-0.2\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{ri}}{r_{trj}-r_{ri}} & r_{ri}\leqslant r_{ij}<r_{trj}\\ 0.2+0.2\cdot\dfrac{r_{ri}-r_{ij}}{r_{ri}-r_{mi}} & r_{mi}\leqslant r_{ij}<r_{ri}\\ 0.5-0.1\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{tmj}}{r_{mi}-r_{tmj}} & r_{tmj}\leqslant r_{ij}<r_{mi}\\ 0.5+0.2\cdot\dfrac{r_{tmj}-r_{ij}}{r_{tmj}} & r_{ij}<r_{tmj}\end{cases} \tag{5}$$

4) $r_{ri}>r_{trj}$，$r_{mi}>r_{tmj}$ 时

$$T_{rij}=\begin{cases}0 & r_{ij}\geqslant r_{ri}\\ 0.1-0.1\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{trj}}{r_{ri}-r_{trj}} & r_{trj}\leqslant r_{ij}<r_{ri}\\ 0.1+0.1\cdot\dfrac{r_{trj}-r_{ij}}{r_{trj}-r_{mi}} & r_{mi}\leqslant r_{ij}<r_{trj}\\ 0.5-0.3\cdot\dfrac{r_{ij}-r_{tmj}}{r_{mi}-r_{tmj}} & r_{tmj}\leqslant r_{ij}<r_{mi}\\ 0.5+0.2\cdot\dfrac{r_{tmj}-r_{ij}}{r_{tmj}} & r_{ij}<r_{tmj}\end{cases} \tag{6}$$

空战能力威胁因子 T_{C_j} 为

$$T_{C_j}=C_j/\max(C_j) \tag{7}$$

式中,C 为空对空作战能力指数,一般用机动性、火力、探测目标能力、操纵效能、生存力、航程和电子对抗能力这 7 个主要因素来衡量飞机的空对空作战能力. 空战能力指数 C 的计算公式[8]如下:

$$C=\left[\ln B+\ln\left(\sum A_1+1\right)+\ln\left(\sum A_2\right)\right]\varepsilon_1\varepsilon_2\varepsilon_3\varepsilon_4 \tag{8}$$

式中,B 为机动性参数;A_1 为火力参数;A_2 为探测目标能力参数;ε_1 为操纵效能系数;ε_2 为生存力系数;ε_3 为航程系数;ε_4 为电子对抗能力系数.

2　威胁评估模型

作为统计学习理论中结构风险最小化准则的具体实现,支持向量机具有结构简单、全局最优、泛化能力强的优点,近年来得到了广泛的研究和应用. 支持向量机方法最早是针对模式识别问题提出来的,随着 ε 不敏感损失函数的引入,支持向量机已推广到非线性系统的回归函数估计,并展现了较好的学习性能[9]. 回归型支持向量机是支持向量机在回归学习中的应用,对于回归型支持向量机,首先考虑用线性回归函数 $f(\boldsymbol{x})=(\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{x})+b$ 估计训练样本集 $D=\{(\boldsymbol{x}_i,y_i)\}$,$i=1,2,\cdots,n$,$\boldsymbol{x}_i\in\mathbf{R}^d$,$y_i\in\mathbf{R}$. 假设所有训练数据在精度 ε 下无误差地用线性函数拟合,即

$$\begin{cases}y_i-\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{x}_i-b\leqslant\varepsilon\\ \boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{x}_i+b-y_i\leqslant\varepsilon\end{cases}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{9}$$

则优化目标为

$$\min\frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}^2\| \tag{10}$$

考虑到允许拟合误差情况,引入松弛变量 $\xi_i\geqslant0$ 和 $\xi_i^*\geqslant0$,则式(9)变为

$$\begin{cases}y_i-\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{x}_i-b\leqslant\varepsilon+\xi_i\\ \boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{x}_i+b-y_i\leqslant\varepsilon+\xi_i^*\end{cases}\quad i=1,2,\cdots,n \tag{11}$$

式(10)的优化目标变为

$$\min\left\{\frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}^2\|+c\sum_{i=1}^{n}(\xi_i+\xi_i^*)\right\} \tag{12}$$

式中,$c>0$,表示对超出误差 ε 样本的惩罚程度. 这是一个凸二次规划问题,构造 Lagrange 函数:

$$L(\boldsymbol{w},\xi_i,\xi_i^*)=\frac{1}{2}\|\boldsymbol{w}^2\|+c\sum_{i=1}^{n}(\xi_i+\xi_i^*)-\sum_{i=1}^{n}\alpha_i[\xi_i+\varepsilon-y_i+(\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{x}_i+b)]-\sum_{i=1}^{n}\alpha_i^*[\xi_i^*+\varepsilon+y_i-(\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{x}_i+b)]-\sum_{i=1}^{n}(\gamma_i\xi_i+\gamma_i^*\xi_i^*) \tag{13}$$

式中,$\alpha_i,\alpha_i^*\geqslant0$;$\gamma_i,\gamma_i^*\geqslant0$;$i=1,2,\cdots,n$.

采用优化方法可以得到其对偶问题,为

$$\min W(\alpha,\alpha^*)=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}(\alpha_i-\alpha_i^*)(\alpha_j-\alpha_j^*)(\boldsymbol{x}_i\cdot\mathbf{x}_j)+\varepsilon\sum_{i=1}^{n}(\alpha_i+\alpha_i^*)+\sum_{i=1}^{n}y_i(\alpha_i-\alpha_i^*)$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}\sum_{i=1}^{n}(\alpha_i-\alpha_i^*)=0\\ 0\leqslant\alpha_i,\alpha_i^*\leqslant C,i=1,2,\cdots,n\end{cases}$$

得到的回归函数为

$$f(x)=(\boldsymbol{w}\cdot\boldsymbol{x})+b=\sum_{i=1}^{n}(\alpha_i-\alpha_i^*)(\boldsymbol{x}_i\cdot\boldsymbol{x})+b \tag{14}$$

对于非线性回归问题,可以通过非线性变换将其转化为高维空间中的线性回归问题,即用核函数 $K(\boldsymbol{x}_i\cdot\boldsymbol{x}_j)$ 替代原来的内积运算 $(\boldsymbol{x}_i\cdot\boldsymbol{x}_j)$,实现非线性函数拟合. 常用的核函数有多项式核、多层感知核、样条核、高斯径向基核、傅里叶核等.

为了应用回归型支持向量机解决目标威胁评估问题,本文将 T_C,T_a,T_r 和 T_v 作为输入,即 $\boldsymbol{x}=(T_C,T_a,T_r,T_v)$,威胁度作为输出. 用于训练的目标威胁度采用威胁指数法[6]计算获取,其中各指标的权重利用层次分析法确定. 核函数选用高斯径向基核函数:

$$K(\boldsymbol{x}_i\cdot\boldsymbol{x}_j)=\exp\left(-\frac{\|\boldsymbol{x}_i-\boldsymbol{x}_j\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

3　仿真实验

在仿真实验中,考虑红军为 1 架具有多目标攻击能力的歼击机,在空战中遭遇蓝军 12 架 3 种机型(1#、2# 和 3#)的敌机,且都在红军火控雷达的跟踪范围内. 红军飞机速度 $v_r=318$ m/s,导弹最大射程 $r_m=60$ km,雷达最大跟踪距离 $r_{tm}=120$ km. 蓝军 3 种机型的空战能力指数分别为 17.9,19.8 和 16.8;导弹最大射程分别为 55,70,50 km,雷达最大跟踪距离分别为 130,200,100 km. 红军与蓝军的空战态势如表 1 所示. 通过广泛征求专家的意见,利用层次分析法计算可以得到空战能力、角度、距离和速度 4 个威胁指标的权重 $\boldsymbol{\omega}=(0.47,0.16,0.24,0.13)$. 回归型支持向量机的仿真参数设置:$c=1\,000$,$\varepsilon=0.000\,1$,$\sigma=10$.

将表 1 中的数据按照式(1)～式(7)规范化,

并将前8个目标作为回归型支持向量机的训练样本，得到如表2所示的回归型支持向量机的训练结果，其中的评估值是利用威胁指数法求得的.为了检验回归型支持向量机的泛化能力，利用表1中的后4个目标对其进行测试，得到的威胁评估结果如表3所示.从表3可以看出，回归型支持向量机预测的威胁度与威胁指数法计算出的评估值十分接近，4个目标的威胁程度由大到小依次为10，11，9，12，说明利用回归型支持向量机可以精确地估算出空战目标的威胁度.

表1 空战态势表

目标	机型	q_R/(°)	q_B/(°)	r_{ij}/km	v_j/(m·s^{-1})
1	1#	−50	70	62	320
2	1#	55	60	56	308
3	1#	40	65	52	312
4	2#	50	−45	110	310
5	2#	−60	−40	50	290
6	3#	−70	45	48	330
7	3#	45	85	49	326
8	3#	60	65	40	322
9	1#	80	50	52	312
10	2#	−50	60	105	285
11	2#	−45	60	55	308
12	3#	−40	95	45	326

表2 回归型支持向量机的训练结果

目标	T_C	T_a	T_r	T_v	评估值	预测值	误差/%
1	0.904	0.306	0.373	0.494	0.6383	0.6382	0.016
2	0.904	0.333	0.440	0.487	0.6251	0.6251	0.000
3	0.904	0.361	0.511	0.481	0.6568	0.6569	−0.015
4	1.000	0.306	0.580	0.396	0.6988	0.6989	−0.014
5	1.000	0.292	0.525	0.469	0.7000	0.6999	0.014
6	0.848	0.375	0.520	0.525	0.6415	0.6416	−0.016
7	0.848	0.319	0.470	0.538	0.6455	0.6454	0.015
8	0.848	0.333	0.504	0.519	0.6504	0.6503	0.015

表3 回归型支持向量机的测试结果

目标	T_C	T_a	T_r	T_v	评估值	预测值	误差/%
9	0.904	0.361	0.511	0.481	0.6678	0.6675	0.045
10	1.000	0.306	0.580	0.396	0.7096	0.7093	0.042
11	1.000	0.292	0.525	0.469	0.7037	0.7034	0.043
12	0.848	0.375	0.520	0.525	0.6516	0.6514	0.031

4 结 论

空战目标威胁评估是空战战术决策和武器资源分配的基础，对空战结局起着举足轻重的作用.本文在分析了现有的空战目标威胁评估方法中距离威胁模型存有缺陷的基础上，对其进行了改进，进一步提出了一种新的智能评估方法——回归型支持向量机法.采用回归型支持向量机，可以获取威胁度与威胁指标的非线性量化关系，从而估算出目标的威胁程度.训练样本的生成使用威胁指数法，一定程度上有效地结合了专家经验，如果对训练样本进行调整校正，可以使得评估结果更加符合空战的实际情况.此方法简单、易实现，同时还可以得到精度较高的评估结果.

参考文献（References）

[1] 王俊，姜长生.基于LSRBF神经网络的空战目标威胁评估[J].电光与控制，2007，14(4)：43－48
Wang Jun，Jiang Changsheng. Target threat assessment based on LSRBF neural network for air combat[J]. Electronics Optics & Control，2007，14(4)：43－48(in Chinese)

[2] 邱浪波，刘作良，刘明.一种应用神经网络技术的威胁估计算法[J].空军工程大学学报：自然科学版，2002，3(6)：25－28
Qiu Langbo，Liu Zuoliang，Liu Ming. A threat assessment algorithm by using the neural network techniques[J]. Journal of Air Force Engineering University：Natural Science Edition，2002，3(6)：25－28(in Chinese)

[3] 王向华，覃征，刘宇，等.径向基神经网络解决威胁排序问题[J].系统仿真学报，2004，16(7)：1576－1579
Wang Xianghua，Qin Zheng，Liu Yu，et al. RBF neural network for threat sequencing[J]. Journal of System Simulation，2004，16(7)：1576－1579(in Chinese)

[4] 高尚，杨静宇.基于支持向量机的威胁判断模型[J].火力与指挥 控制，2006，31(2)：55－59
Gao Shang，Yang Jingyu. Threat estimation model based on support vector machines[J]. Fire Control and Command Control，2006，31(2)：55－59(in Chinese)

[5] 高尚.基于主成分分析和支持向量机的威胁判断模型[J].数学的实践与认识，2008，38(4)：1－6
Gao Shang. Threat estimation model based on principal component analysis and support vector machines[J]. Mathematics in Practice and Theory，2008，38(4)：1－6(in Chinese)

[6] 董彦非，郭基联，张恒喜.多机空战目标威胁评估算法[J].火力与指挥控制，2002，27(4)：73－76
Dong Yanfei，Guo Jilian，Zhang Hengxi. Threat assessment for multi-aircraft air combat[J]. Fire Control and Command Control，2002，27(4)：73－76(in Chinese)

[7] 谢希权，李伟仁.单机多目标攻击逻辑的对策型决策[J].系统工程与电子技术，2000，22(7)：28－31
Xie Xiquan，Li Weiren. Game form decision for air combat logic of multi-target attack system[J]. Systems Engineering and Electronics，2000，22(7)：28－31(in Chinese)

[8] 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，2006：63－68
Zhu Baoliu，Zhu Rongchang，Xiong Xiaofei. Effectiveness evaluation of combat aircraft[M]. Beijing：Aeronautics Industry Press，2006：63－68(in Chinese)

[9] 胡良谋，曹克强，徐浩军.基于回归型支持向量机的液压舵机故障诊断[J].系统仿真学报，2007，19(23)：5509－5512
Hu Liangmou，Cao Keqiang，Xu Haojun. Fault diagnosis for hydraulic actuator based on support vector regression[J]. Journal of System Simulation，2007，19(23)：5509－5512(in Chinese)

（编 辑：李 晶）