

基于 Rough 集和回归型 SVM 的 超视距空战威胁评估

张文忠¹, 孙永芹^{1,2}, 杨洪立¹, 张国贤¹

(1. 中国人民解放军91206部队, 青岛 266108; 2. 海军潜艇学院, 青岛 266071)

摘要:针对现有超视距空战威胁评估方法的不足,提出了基于 Rough 集和回归型 SVM 的超视距空战威胁评估方法。该方法结合对超视距空战过程和影响参数的分析,构造了参战双方战机的态势、效能、事件、目标战役价值等优势函数,将导弹射程作为距离因素的一种引入威胁评估优势函数模型中,改进了距离优势函数,优化了方位角、进入角、能量、效能等优势函数,并将目标战役价值作为威胁评估的因素;然后采用 Rough 集的知识简约方法简约了各优势函数中的冗余信息,并采用回归型 SVM 实现了最终的威胁评估排序;经仿真计算验证,该方法合理、有效。

关键词:超视距空战;威胁评估;优势函数;Rough 集;知识简约;支持向量机(SVM)

中图分类号:V271

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)07-0014-05

Threat Assessment Based on Rough Set and Support Vector Machines for Regression in Beyond-Visual-Range Air Combat

ZHANG Wen-zhong¹, SUN Yong-qin^{1,2}, YANG Hong-li¹, ZHANG Guo-xian¹

(1. The 91206th Unit of PLA, Qingdao 266108, China; 2. Navy Submarine Academy, Qingdao 266071, China)

Abstract: To cope with the shortage of current threat assessment method in beyond-visual-range air combat, a new threat assessment method based on rough set and support vector machines for regression is proposed. The process of air combat and inflation parameters are analyzed in the method, and superiority functions such as situation, efficiency, events and the goal campaign value are constructed. Also, missile scope is introduced as a factor of distance. Superiority functions such as azimuth, enter angle, energy, efficiency are optimized, and distance is improved. Moreover, the goal campaign value is considered as a factor of threat assessment. Then, redundancy information of each superiority function is eliminated by reduction of knowledge based on rough set, and the final taxis of threat assessment are deduced by support vector machines for regression. Finally, the rationality and effectiveness are verified by simulation results.

Key words: beyond-visual-range air combat; threat assessment; superiority functions; rough set; reduction of knowledge; support vector machines(SVM)

近几年来,威胁评估研究已被激活,各种理论和算法^[1-9]被用于威胁评估分析中,而且多种算法相互交叉、融合生成新的算法^[1-7],使得各算法优势互补,取长补短,是研究的一个热点。但这些方法^[1-4]所用的威胁评估模型大多参考了近距离空战的威胁评估模型,已经不适于超视距空战。

同时,由于传感器性能以及敌方干扰、欺骗等行为,超视距空战环境下所获得的信息往往具有高度的不确定性,为了满足处理信息不确定性的要求,在此结合对超视距空战过程和影响参数的分析,采用 Rough 集理论和 SVM 研究威胁评估问题,为威胁评估提供一种新的思路。

收稿日期:2013-03-27

作者简介:张文忠(1970—),男,主要从事武器系统一体化技术、雷达信号处理研究。

1 超视距空战威胁评估指标的确定

在超视距空战中,敌方目标威胁程度的大小是由多种因素决定的,本文结合空战实际,综合考虑敌我双方战机(包括其武器)性能,从整个体系做出分析,选取来自空战态势、空战效能、对双方做出威胁行为的事件、目标战役价值为主要影响威胁评估的指标,建立威胁评估优势函数模型。

1.1 空战效能优势模型

空战能力指数 C ,本文取参考文献[10]中的定义。并将双方战机的空战能力进行对比分析,构造空战效能优势如下:

$$T_M = (T_{C_A} - T_{C_T} + 1)/2 \quad (1)$$

式(1)中, T_{C_A} 、 T_{C_T} 分别为归一化后的战机与目标机的空战能力指数。

1.2 空战态势优势模型

1.2.1 距离优势函数建模

现有的超视距空战威胁评估方法^[11-12]中构建的距离优势函数大多是在载机迎头对飞、速度不变的前提下建立的,忽视了载机飞行速度和高度对导弹射程影响,存在一定的不足。首先,攻击机和目标机速度对导弹射程有着重要影响^[13-14],若攻击机和目标机速度的增大,会降低从后半球攻击时导弹的射程,而从前半球攻击时导弹的射程则会增大。其次,载机高度对导弹射程也有着重要影响^[13-14],其载机高度对导弹射程影响因素系数与载机高度成指数关系。而且一般来说,导弹对目标的杀伤概率在中间发射距离时较大,而在最近和最远发射区附近,杀伤概率较小且变化较快。在不可逃逸区发射时,无论目标以何种方式规避,都无法逃脱导弹攻击。基于上述分析,构建距离优势函数如下:

导弹从前半球实施攻击时,距离优势函数:

$$T_D = \begin{cases} 1 & D_{M_{\min}} \leq D \leq D_{M_{k\max}} \\ 0 & D \leq D_{M_{\min}} \\ 2 \frac{D - D_{M_{k\max}}}{nm_1 D_{M_{\max}} - D_{M_{k\max}}} & D_{M_{k\max}} \leq D \leq nm_1 D_{M_{\max}} \\ 0.5 e^{-\frac{D - nm_1 D_{M_{\max}}}{D_{R_{\max}} - nm_1 D_{M_{\max}}}} & nm_1 D_{M_{\max}} \leq D < D_{R_{\max}} \\ 0.1839 e^{-\frac{D - D_{R_{\max}}}{D_{R_{\max}}}} & D_{R_{\max}} \leq D \end{cases} \quad (2)$$

导弹从后半球实施攻击时,距离优势函数:

$$T_D = \begin{cases} 1 & D_{M_{\min}} \leq D \leq nm_2 D_{M_{k\max}} \\ 0 & D \leq D_{M_{\min}} \\ 0.5 e^{-\frac{D - nm_2 D_{M_{\max}}}{D_{R_{\max}} - nm_1 D_{M_{\max}}}} & nm_2 D_{M_{\max}} \leq D < D_{R_{\max}} \\ 0.183 e^{-\frac{D - D_{R_{\max}}}{D_{R_{\max}}}} & D_{R_{\max}} \leq D \end{cases} \quad (3)$$

$$m_1 = \alpha \cdot (25v + 20)/3 \quad (4)$$

$$m_2 = \beta(-5v + 12) \quad (5)$$

$$n = \xi \cdot 2 \frac{h}{6} \quad (6)$$

其中, D 是战机和目标机之间的距离, $D_{R_{\max}}$ 是雷达最大搜索

距离, $D_{M_{\max}}$ 是导弹最大攻击距离, $D_{M_{\min}}$ 是导弹最小攻击距离, $D_{M_{k\max}}$ 是导弹不可逃逸区最大距离, h 是载机高度; v 是载机速度; n 是载机高度对导弹射程的影响系数; m_1 是载机速度对前半球实施攻击导弹射程影响系数; m_2 是载机速度对后半球实施攻击导弹射程影响系数; α 、 β 、 ξ 是不同作战环境下的函数系数,与作战环境和武器性能有关,可通过大量实验或仿真等到。

1.2.2 角度优势函数建模

在超视距空战中,进入角对优势函数的影响主要体现在对导弹杀伤概率的影响上。目标在做直线飞行时,杀伤概率值在攻击区内分布情形为左右对称,大杀伤概率值往往分布在进入角 $\pm 30^\circ \sim \pm 90^\circ$ 内,前半球杀伤概率值比后半球的杀伤概率值要低,在进入角 $0^\circ \sim \pm 30^\circ$ 以及 $\pm 165^\circ \sim \pm 180^\circ$ 区间内的杀伤概率值比后半球的杀伤概率值要低^[11,15]。但是在双方迎头作战和尾追条件下,进入角的优势是不同的,一般说来,双方迎头作战时优势较大,尾追条件下优势较小。故而构造进入角优势函数:

$$T_q = \begin{cases} e^{-\frac{|180^\circ + \varphi + q|}{180^\circ/\pi}} & \varphi \geq 0 \text{ 且 } q < -\varphi \\ e^{-\frac{|\varphi - q|}{180^\circ/\pi}} & \varphi > 90^\circ \text{ 且 } \varphi < -90^\circ \\ e^{-\frac{|\varphi + q - 180^\circ|}{180^\circ/\pi}} & \varphi < 0 \text{ 且 } q > -\varphi \end{cases} \quad (7)$$

式中, φ 是目标方位角, q 是目标进入角。 $0 \leq |q| \leq 180^\circ$, $0 \leq |\varphi| \leq 180^\circ$,且 $|q| + |\theta| = 180^\circ$ 。

方位角对优势函数的影响主要反映在雷达发现概率和导弹的杀伤概率上,一般说来,不同的方位角度下,其方位角优势是不同的。故而给出如下方位角优势函数:

$$T_\varphi = \begin{cases} 0.1 - (|\varphi - 85^\circ|/\{10(180 - 85^\circ)\}) & 85^\circ \leq |\varphi| \\ 0.2 - (|\varphi - \varphi_{R_{\max}}|/\{10(85^\circ - \varphi_{R_{\max}})\}) & \varphi_{R_{\max}} \leq |\varphi| < 85^\circ \\ 0.3 - (|\varphi - \varphi_{M_{\max}}|/\{10(\varphi_{R_{\max}} - \varphi_{M_{\max}})\}) & \varphi_{M_{\max}} \leq |\varphi| < \varphi_{R_{\max}} \\ 0.8 - (|\varphi - \varphi_{M_{k\max}}|/\{2(\varphi_{M_{\max}} - \varphi_{M_{k\max}})\}) & \varphi_{M_{k\max}} \leq |\varphi| < \varphi_{M_{\max}} \\ 1 - |\varphi|/(5\varphi_{M_{k\max}}) & 0^\circ \leq |\varphi| < \varphi_{M_{k\max}} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, φ 是目标方位角, $\varphi_{R_{\max}}$ 为雷达最大搜索方位角, $\varphi_{M_{\max}}$ 为空空导弹最大离轴发射角, $\varphi_{M_{k\max}}$ 为不可逃逸区圆锥角。

由于方位角优势和进入角优势中如果有一项为零,则整机的角度优势为零,所以构造整机的角度优势为二者乘积。

$$T_A = T_q^\delta T_\varphi^\delta \quad (9)$$

式中, δ_1 、 δ_2 为权重系数,用以调整二者在乘积中的比例。

1.2.3 能量优势函数建模

在超视距空战中,进行导弹攻击时,为保证本机的导弹相对于敌机导弹的发射距离和接近速度占优,即保证本机对目标的能量优势,这需要在进入发射区前从高度 h 和速度 v 上占据战术有利位置,此时,本机能够在空战中尽快机动到最佳空战位置,从而对敌方具有空战优势。因此,结合战机高度和速度构造能量优势函数。定义战机单位能量为 $E = h + v^2/2g$,则战机能量优势数:

$$T_E = \begin{cases} 1 & \frac{E}{E_T} > 2 \\ 1.6 - 1.2 \frac{E}{E_T} & 0.5 \leq \frac{E}{E_T} \leq 2 \\ 0.1 & \frac{E}{E_T} < 0.5 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中, E 表示战机能量, E_T 表示目标机能量, v 表示战机速度, g 表示当地重力加速度。

1.2.4 态势优势函数建模

综合角度优势、距离优势、能量优势,即可得到态势优势。由于三者之间并不完全独立,因此处理为乘法关系。

$$T_G = T_A^{\tau_1} \times T_D^{\tau_2} \times T_E^{\tau_3} \quad (11)$$

式(11)中, τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分别为战斗机相对于目标机的角度优势、距离优势、能量优势的权值。

1.3 空战事件优势模型

空战实体在作战过程中会不断出现加(减)速、拐弯、爬升、辐射源开(关)机、导弹符合发射条件等属性变化行为,这些行为都可能对对方空战实体产生威胁,这些产生威胁的行为即事件^[12]。事件优势涉及面广,尤其是复合事件,需要经专家系统确定其优势,本文简单选取以下几个具备代表性的相关事件,并定义如下事件优势 T_i 。

1) 实体雷达辐射:未辐射时, T_i 取 0;战斗机对目标机扫描时, T_i 取 0.5;战斗机对目标机多目标跟踪时, T_i 取 0.8;战斗机对目标机连续跟踪时, T_i 取 1。

2) 实体导弹发射:战斗机对目标机发射导弹时, T_i 取 1。

1.4 目标战役价值对威胁评估的影响

任何空中战斗都是在双方各自的任务背景下进行的。执行的任务不同,相应地就会影响对目标战役价值的评价。目标的战役价值 J 一般由作战指挥系统确定,也可以根据目标的对地攻击能力或者特种作战能力(预警、电子干扰等)确定。目标的对地攻击能力可以由对地攻击能力指数评价。根据文献[10],对地攻击能力指数的计算公式:

$$\text{空对地作战能力指数} = [\ln(\text{当量射程}) + \ln(\text{当量载弹量})] \times \varepsilon_1 \quad (12)$$

式(12)中 ε_1 为电子对抗能力系数。需要说明的是,为了和其他因素的数量级一致,一般 J 乘以 0.1,用 T_j 表示,即 $T_j = J \times 0.1$ 。

2 Rough 集的超视距空战威胁评估应用

在超视距空战中,对目标进行威胁等级判断时,获得的信息往往具有不完全性和不确定性,遇到不完整的信号模式时,尽可能给出问题的最大可能的解,无疑是很有实际意义的。同时,建立优势函数模型时,不可能建立包括所有影响威胁程度的参数方程体系,应该选择尽可能少的参数或参数的某种组合来建立模型。通常将多个指标化为少数指标的方法可以采用多元统计分析中的主成分分析方法。主成分分析方法计算量比较大,不便于应用。本文把 Rough 集理论

引入到威胁评估中,采用知识约简方法来挑选关键特征参数。

2.1 基本概念

Rough 集(Rough Set, RS)^[16-17],又称粗糙集、粗集,是波兰数学家 Z. Pawlak 在 1982 年提出的,能有效地分析不精确、不一致、不完整等各种不完备的信息。其主要优势之一是不需要任何预备或额外的有关数据信息。Rough 集理论为处理含噪声、不精确或不完整的数据分类问题,提供了严密的数学工具。Rough 集理论已经在机器学习、从数据库中发现知识、决策支持和分析等方面得到了广泛应用。其主要思想是保持分类能力不变的前提下,通过知识约简导出问题的决策和分类规则。知识约简方法是 Rough 集理论的核心内容之一。知识库中知识(属性)并不是同等重要的,甚至其中某些知识是冗余的。所谓知识约简就是保持知识库分类能力不变的条件下,删除其中不相关或不重要的知识。

定义 1 知识约简:在保持知识库分类能力不变的条件下,删除其中不相关或不重要的知识。设 P 为一个属性集, $R \in P$, $IND(P)$ 表示在 P 上的等价关系,如果 $IND(P) = IND(P - \{R\})$ 称属性 R 为 P 中可约简的,否则为 P 中不可约简的。设 QP ,若 Q 中所有属性都是不可省的,且 $IND(Q) = IND(P)$,则称 Q 为 P 的一个约简,称为 $red(P)$ 。 P 中所有不可省关系组成的集合称为 P 的核,记为 $core(P)$,核与约简有如下关系:

$$core(P) = \cap red(P) \quad (13)$$

定义 2 属性依赖度:两个属性集合 B, RU 之间的相互依赖程度,定义如下:

$$\gamma_R(B) = \frac{card(POS_R(B))}{card(U)} \quad (14)$$

$$POS_R(B) = \bigcup_{X \in IND(B)} \underline{R}(X) \quad (15)$$

定义 3 属性重要度:不同属性对于条件属性和决策属性之间的相互依赖关系起着不同的作用。属性 a 加入 R ,对于分类 $U/IND(B)$ 的重要度定义为

$$SGF(a, R, B) = \gamma_R(B) - \gamma_{R-\{a\}}(B) \quad (16)$$

2.2 属性简约算法

利用每一个条件属性值对信息表进行划分,同时求出该属性值的倚赖度和重要度,并根据属性的重要度进行排序,然后,选择重要度最大的属性进入约简属性集,直到约简集和最初信息表的所有属性的倚赖度一致为止。在此约简集的基础上,合并相同的行得到约简表。

具体思路如下:

- 1) 初始化约简集为空;
- 2) 计算所有不在约简集中的条件属性的重要度并排序;
- 3) 取重要度最大的条件属性,将其加入约简集中,并判断此时的约简集的倚赖度,若倚赖度为 1,则算法结束,否则转 2)。

3 回归型 SVM 的威胁度评估模型

支持向量机^[18] (Support Vector Machines, SVM) 是一类新型机器学习方法,具有完备的统计学习理论基础和出色的学习性能,具有训练速度比神经网络等黑箱模型快、小样本情况下分类准确率高等优点。回归型 SVM 是支持向量机在回归学习中的应用。支持向量机解决回归问题的基本原理如下:

设训练样本集 $Z = \{(x_i, y_i) | i = 1, 2, \dots, l\}$, $x_i \in R^n, y_i \in R$ 。首先介绍线性回归问题,线性回归方程: $f(x) = \langle w, x \rangle + b$,常用的损失函数有 C-insensitive 损失函数、Quadratic 损失函数等。这里采用 C-insensitive,其形式如下:

$$L(y) = \begin{cases} 0 & \text{当 } |f(x) - y| < \partial \\ |f(x) - y| - \partial & \text{否则} \end{cases} \quad (17)$$

支持向量机解决回归问题,可转化为求解下列数学规划问题:

$$\begin{aligned} \min_{w, b, \zeta_1, \zeta_i^*} \Phi &= \frac{1}{2} \|w\|^2 + \Omega \sum_{i=1}^l (\zeta_i + \zeta_i^*) \\ \text{s. t.} \begin{cases} ((w \cdot x_i) + b) - y_i \leq \partial + \zeta_i, i = 1, 2, \dots, l \\ y_i - ((w \cdot x_i) + b) \leq \partial + \zeta_i^* \\ \zeta_i, \zeta_i^* \geq 0, i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

其对偶问题:

$$\begin{aligned} \max_{\omega, \omega^*} W &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l (\omega_i - \omega_i^*)(\omega_j - \omega_j^*)(x_i \cdot x_j) + \\ &\quad \sum_{i=1}^l [\omega_i(y_i - \partial) - \omega_i^*(y_i + \partial)] \\ \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^l (\omega_i - \omega_i^*) = 0 \\ 0 \leq \omega, \omega^* \leq \Omega, i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

得回归方程式:

$$\text{因为 } Af(x) = \langle w \cdot x \rangle + b = \sum_{i=1}^l (\omega_i - \omega_i^*)(x_i \cdot x) + b \quad (20)$$

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 $K(x_i \cdot x_j)$ 替代原来的内积运算 $(x_i \cdot x_j)$ 。常用的核函数有如 Polynomial 核、Gaussian Radial Basis 核、Splines 核等^[18]。

回归型 SVM 解决目标威胁评估问题的具体计算思路是,将 T_C, T_M, T_I, T_J 作为输入,即 $x = (T_C, T_M, T_I, T_J)$,威胁度作为输出,采用优势函数法^[12] 计算获取用于训练的目标威胁度,层次分析法确定各指标的权重,核函数选用 Gaussian Radial Basis 核函数^[18]:

$$K(x_i \cdot x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (21)$$

3 仿真验证与分析

假设空战中,我战机是 F-16C,12 架三种类型的目标敌机,分别是 F-16C、F-15E、F-5E 三种类型,其空战能力指数 C 为 16.8、19.8、8.2;且都在我战机火控雷达的跟踪范围内。层次分析法计算 T_C, T_M, T_I, T_J 的权重为 (0.16, 0.12, 0.12, 0.6)。回归型 SVM 的参数: $\Omega = 1\ 000, \sigma = 10, \partial = 0.000\ 1$ 。运行 Matlab,得到如表 1 所示的训练结果,其中的评估值是利用优势函数法求得的。利用本文的 Rough 集和回归型 SVM 威胁评估模型可计算其他目标的威胁等级,表 2 计算出了目标 9、10、11、12 的优势函数值,由此,可得 4 个目标的威胁排序为(由大到小):(10, 11, 12, 9),说明利用 Rough 集和回归型 SVM 威胁评估模型可以精确地估算出空战目标的威胁排序。

表 1 Rough 集和回归型 SVM 威胁评估模型的训练结果

	1	2	3	4	5	6	7	8
	F-16C	F-16C	F-5E	F-5E	F-15E	F-15E	F-5E	F-5E
C	16.8	16.8	8.2	8.2	19.8	19.8	8.2	8.2
T_C	0.848	0.848	0.414	0.414	1.000	1.000	0.414	0.414
T_M	0.500	0.500	0.717	0.717	0.424	0.424	0.717	0.717
V	9.2	9.2	6.3	6.3	8.5	8.5	6.3	6.3
T_C	0.443	0.293	0.351	0.478	0.222	0.371	0.756	0.722
T_I	0.5	0.5	0.5	0.3	0.3	0.5	0.8	0.5
评估值	0.743	0.719	0.579	0.576	0.628	0.676	0.678	0.638
预测值	0.742	0.719	0.580	0.575	0.629	0.675	0.679	0.637
误差/%	0.013	0.000	-0.017	0.017	-0.014	0.015	-0.015	0.016

表2 目标9-12的优势函数值

	9	10	11	12
	F-16C	F-5E	F-15E	F-15E
C	16.8	8.2	19.8	19.8
T_C	0.848	0.414	1.000	1.000
T_M	0.500	0.717	0.424	0.424
V	9.2	6.3	8.5	8.5
T_G	0.443	0.351	0.222	0.371
T_I	0.5	0.5	0.3	0.5
优势函数预测值	0.745	0.582	0.625	0.676

4 结束语

综上所述,本文综合考虑态势优势、效能优势、事件优势、目标战役价值,研究了超视距空战威胁评估方法,建立了威胁评估优势函数模型,将导弹射程作为距离因素的一种引入威胁评估方法中,改进了态势优势、效能优势威胁因素,增加了目标战役价值威胁评估因素。针对空战信息中可能的不确定,引入 Rough 集理论,采用知识约简方法简约了威胁评估指标。并采用回归型 SVM 获取优势值与特征参数的非线性量化关系,实现最终的威胁排序,回归型 SVM 通过对知识样本的学习进行预测,弥补了专家评定法的不足,从而更符合超视距空战的实际情况。最后进行了仿真分析,仿真结果表明所建立的模型合理、可行。

参考文献:

- [1] 黄洁,李弼程,赵拥军.基于 Choquet 模糊积分的目标威胁评估方法[J].信息工程大学学报,2012,13(1):18-21.
- [2] 谷向东,童中翔,郭辉,等. IAHP 和熵权相结合的 TOPSIS 法的空战目标威胁评估[J].火力与指挥控制,2012,37(1):69-72.
- [3] Gong Y, Chen S. Multi-attribute Decision-making based on Subjective and Objective Integrated Eigenvector Method [J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2007,23(1):144-147.
- [4] 谷向东,童中翔,柴世杰,等.基于 IAHP 和离差最大化 TOPSIS 法目标威胁评估[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(2):27-31.
- [5] CHEN J, YU G, GAO X. Cooperative Threat Assessment of Multi-aircrafts Based on Synthetic Fuzzy Cognitive Map [J]. J Shanghai Jiaotong Univ (Sci.), 2012, 17(2): 228-232.
- [6] 王改革,郭立红,段红,等.基于 Elman-AdaBoost 强预测器的目标威胁评估模型及算法[J].电子学报,2012,40(5):901-906.
- [7] 陈华,张可,曹建蜀.基于 PSO-BP 算法的目标威胁评估[J].计算机应用研究,2012,29(3):900-901,932.
- [8] 蔡佳,胡杰,黄长强.协调优势粗糙集方法及其在 UCAV 目标威胁估计中的应用[J].系统工程理论与实践,2012,32(6):1377-1384.
- [9] 韩占朋,王玉惠,姜长生,等.基于马尔可夫链的新型威胁评估预测方法[J].吉林大学学报:信息科学版,2012,30(2):151-156.
- [10] 朱宝鏊,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.
- [11] 高永,向锦武.一种新的超视距空战威胁估计非参量法模型[J].系统仿真学报,2006,18(9):2570-2573.
- [12] 肖冰松,方洋旺,胡诗国,等.一种新的超视距空战威胁评估方法[J].系统工程与电子技术,2009,31(9):2163-2166.
- [13] 张洪波,李国英,丁全心,等.超视距空战下的态势评估技术研究[J].电光与控制,2010,17(4):9-13.
- [14] 马伟江,姚佩阳,周翔翔,等.改进的超视距空战态势评估方法[J].计算机工程与设计,2011,32(6):2096-2099,2107.
- [15] 乔鑫,孔繁峨,冯星,等.单机超视距空战智能辅助决策方法[J].电光与控制,2011,18(6):9-15.
- [16] 王晓帆,王宝树,罗磊.基于粗糙集与计划识别的威胁估计方法[J].计算机科学,2011,38(10A):140-142.
- [17] 郭辉,徐浩军,周莉.粗糙集和区间数空袭目标威胁评估[J].火力与指挥控制,2011,36(9):46-50,54.
- [18] 郭辉,徐浩军,刘凌.基于回归型支持向量机的空战目标威胁评估[J].北京航空航天大学学报,2010,36(1):123-126.

(责任编辑 周江川)