

文章编号: 1006-1576 (2009) 01-0022-03

基于分层防御的舰艇编队空中目标威胁度排序模型

张松涛, 王公宝

(海军工程大学 理学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 结合我方舰艇编队防空火力的主要性能和敌方空中目标的部分属性值, 按照分层防御的原则, 建立空中目标威胁度的分级模型, 再在同一威胁级中运用模糊理论根据目标的属性进行进一步排序, 从而建立基于分层防御的空中目标的威胁度排序模型。该模型可为舰艇编队防空作战决策提供一定的参考。

关键词: 分层防御; 威胁度排序; 舰艇防空; 分级模型; 模糊理论

中图分类号: N945.12; O224 **文献标识码:** A

Threat Sequencing Model of Aerial Targets of Warship Fleet Based on Layered Defense

ZHANG Song-tao, WANG Gong-bao

(College of Science, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Combining the capability of anti-air weapons of our warship fleet with some aerial target attributes of the enemy, establish the grade model of threat according to the principle of layered defense at first, then sequence the threat of the aerial targets in the same grade based on target attributes by fuzzy theory. The threat sequencing model of aerial targets of warship fleet based on layered defense can provide reference for the air defense battle of warship fleet.

Keywords: Layered defense; Threat sequencing; Air defense of warship; Model of threat grade; Fuzzy theory

0 引言

对空中目标的威胁度进行排序是舰艇编队防空作战的重要组成部分, 其任务是通过合理的方法建立空中目标的威胁度排序模型, 为指挥员指挥决策提供参考依据。目前, 有很多专家已建立了空中目标的威胁度排序模型, 采用的方法有层次分析法^[1]、神经网络^[2]、模糊理论^[3]、灰色关联度分析^[4]或多种方法的合成^[5]等, 但这些模型仅考虑了空中目标的属性, 没考虑我方防空火力的性能, 具有相同属性的空中目标对不同性能的防空火力而言, 其威胁度就有可能不同。故根据我方舰艇编队防空火力的拦截射程、拦截速度和拦截高度等火力性能, 按分层防御的原则, 结合空中目标的距离、速度和高度属性, 对空中目标威胁度进行分级, 完成分级后, 在各个威胁级别里再根据空中目标的属性, 运用模糊理论进一步排序, 从而对空中目标的威胁度排序。

1 威胁度排序的主要影响因素

1.1 空中目标的属性

空中目标的属性主要有目标的距离、速度、加速度、高度、类型、遂行任务企图、抗干扰能力、空袭样式和敌舷角等。海战中, 在没有其他预警平

台配合的情况下, 舰载雷达对目标的探测距离有限, 供我方判断决策的时间较短, 且由于敌方的保密性, 空中目标的某些属性无法得知, 只能根据雷达探测信息及有限的情报资料进行快速判断决策。取某时刻测得的目标距离、目标速度、目标高度、敌舷角、目标类型和自定义的紧迫度作为评判因素。以上 6 种因素, 前 4 种是可以直接测出的定量指标, 第 6 种可以经过数学计算得到, 第 5 种目标类型, 无法直接测得, 可通过目标反射面积大小进行快速判断, 并用三角形模糊数表示成定量指标。

1.2 我方舰艇编队防空火力性能

舰艇防空系统由探测系统、跟踪制导系统、指控系统、舰空导弹及舰炮系统等组成, 探测系统的性能主要是对不同高度和大小目标的探测距离和发现概率, 跟踪制导系统的性能主要是对目标和导弹运动参数测量精度以及能否导引导弹命中目标, 指控系统的性能主要体现在进行合理决策和火力分配的时间上, 舰空导弹和舰炮系统的性能主要是对目标的可拦截高度、距离、速度和自身的反应时间、导弹(舰炮)速度、可同时攻击目标的数量、转火射击时间和对目标的命中概率等。一般意义上, 探测系统能够探测到目标的最大距离, 在当前目标的

收稿日期: 2008-08-25; 修回日期: 2008-09-11

作者简介: 张松涛(1982-), 男, 安徽人, 海军工程大学硕士研究生, 从事军事系统建模与优化决策研究。

速度下,都有足够的时间供指控系统和导弹及舰炮对目标进行拦截,跟踪制导系统也能够导引导弹对目标进行有效拦截,所以不单独考虑探测系统、跟踪制导系统和指控系统的性能,而将探测到目标并建立目标航迹的时间 t_1 和指控系统的反应时间 t_2 计入导弹和舰炮的反应时间 t , $t=t_1+t_2+t_3$, t_3 为导弹和舰炮自身的反应时间。现代舰艇编队一般拥有多层防空火力网,有远、中、近程防空导弹及末端防御系统(主要为近防炮),威胁度排序取其部分性能参数,见表1。若同一种类的武器有多种型号,性能参数取其平均值。

表1 我方防空火力的性能参数

性能参数	远程导弹	中程导弹	近程导弹	近防炮
反应时间	$t_{远}$	$t_{中}$	$t_{近}$	$t_{炮}$
最大拦截速度	$v_{远拦}$	$v_{中拦}$	$v_{近拦}$	$v_{炮拦}$
最大拦截高度	$h_{远max}$	$h_{中max}$	$h_{近max}$	$h_{炮max}$
最小拦截高度	$h_{远min}$	$h_{中min}$	$h_{近min}$	$h_{炮min}$
最远拦截射程	$l_{远max}$	$l_{中max}$	$l_{近max}$	$l_{炮max}$
最近拦截射程	$l_{远min}$	$l_{中min}$	$l_{近min}$	$l_{炮min}$
武器飞行速度	$v_{远}$	$v_{中}$	$v_{近}$	$v_{炮}$

2 空中目标威胁度排序模型

2.1 空中目标威胁度分级模型

1) 分级模型

分级模型根据空中目标的距离 $l_{目标}$ 、速度 $v_{目标}$ 和高度 $h_{目标}$ 对照我方防空火力的性能参数,忽略我舰艇编队的航速并把编队看作点目标,以确定我方可采用拦截武器的种类。按分层防御原则,优先采用射程远的武器进行拦截,因为射程远的武器一旦拦截失败,射程更近的武器可以继续拦截,提高目标被拦截成功的概率。按照优先采用的拦截武器的种类,建立分级模型如下:

$$\begin{cases} \text{近防炮} & \text{1级威胁} \\ \text{近程导弹} & \text{2级威胁} \\ \text{中程导弹} & \text{3级威胁} \\ \text{远程导弹} & \text{4级威胁} \end{cases} \quad (1)$$

说明:

(1) 1级威胁为最高级别的威胁,4级威胁为最低级别的威胁;

(2) 当 $l_{目标}$ 大于远程导弹的3倍射程时,不参与威胁度评估,认为对我无威胁;

(3) 当 $l_{目标}$ 小于或等于远程导弹的3倍射程,且目标远离时,认为对我无威胁。

2) 确定优先采用的拦截武器种类的方法:

(1) 最大拦截速度和高度的筛选:

$$\begin{cases} v_{目标} \leq v_{武器拦} \\ h_{武器min} \leq h_{目标} \leq h_{武器max} \end{cases} \quad (2)$$

(2) 可拦截武器的射程筛选:

$$l_{目标} = v_{武器} \cdot t_{飞行} + v_{目标} \cdot (t_{反应} + t') \quad (3)$$

$l_{目标}$ 为目标与编队相遇的最短距离;

$t_{飞行}$ 为我导弹(炮弹)从发射到与目标遭遇的时间;

t' 为我等待目标进入我武器可拦截范围的时间, $t' \geq 0$ 。

$$t_{飞行} = \frac{l_{目标} - v_{目标} \cdot (t_{反应} + t')}{v_{武器} + v_{目标}} \quad (4)$$

$$l_{武器min} \leq v_{武器} \cdot t_{飞行} \leq l_{武器max} \quad (5)$$

$$l_{武器min} \leq v_{武器} \cdot \frac{l_{目标} - v_{目标} \cdot (t_{反应} + t')}{v_{武器} + v_{目标}} \leq l_{武器max} \quad t' \geq 0 \quad (6)$$

$$t'_{max} = \frac{l_{目标} - \frac{l_{武器min}}{v_{武器}}(v_{武器} + v_{目标}) - v_{目标} \cdot t_{反应}}{v_{目标}} \quad (7)$$

定义紧迫度作为衡量供指挥员人工决策时间的紧迫程度,建立函数:

$$\tau = \begin{cases} 1 & t'_{max} \leq 20 \\ e^{-0.02(t'_{max} - 20)} & t'_{max} > 20 \end{cases} \quad (8)$$

(3) 同时满足式(2)、式(6)的为可使用的拦截武器,选择射程最远的为优先采用的拦截武器。

2.2 同一威胁级中目标的威胁度排序模型

模型对同一威胁级中的目标,采用目标类型、目标高度、敌舷角和紧迫度等因素进行威胁度排序,其隶属函数采用 F 分布^[6]的方法确定。

1) 目标威胁属性隶属函数的确定与表示

(1) 目标类型。在雷达屏幕上可直接显示出目标反射面积的大小,由于时间紧迫、情报有限,不易快速判断目标类型,此按反射面积 σ 的大小区分为大、中、小型目标3类,运用模糊理论,用三角模糊数对各型目标威胁属性值的大小进行量化:

$$\begin{cases} \text{大型目标} & \text{预警机、轰炸机、运输机等} \\ \text{中型目标} & \text{歼击机、歼轰机、强击机等} \\ \text{小型目标} & \text{反舰导弹、隐形飞机等} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \text{大型目标} & \sigma > 10 \text{ m}^2 & (0.3, 0.4, 0.6) \\ \text{中型目标} & 1 \text{ m}^2 < \sigma < 10 \text{ m}^2 & (0.5, 0.6, 0.8) \\ \text{小型目标} & \sigma < 1 \text{ m}^2 & (0.7, 0.8, 1.0) \end{cases} \quad (10)$$

(2) 目标高度。对战机和先进反舰导弹而言,大都采用超低空突防以提高突防成功的概率,目标的高度越低,被发现距离就越近,就越难拦截,被命中概率也越低,根据目标高度区分为超低空目标、低空目标、中空目标、高空目标,并用三角模

糊数对其威胁属性值的大小进行量化:

$$\begin{cases} \text{高空目标} & h_{\text{目标}} > 7000 & (0.1, 0.2, 0.4) \\ \text{中空目标} & 7000 \geq h_{\text{目标}} \geq 1000 & (0.3, 0.5, 0.7) \\ \text{低空目标} & 1000 > h_{\text{目标}} \geq 100 & (0.5, 0.7, 0.9) \\ \text{超低空目标} & h_{\text{目标}} < 100 & (0.8, 0.9, 1.0) \end{cases} \quad (11)$$

(3) 敌舷角 α 。我处于目标方位的舷角, $0 \leq \alpha \leq 180$, 当 $90 < \alpha \leq 180$ 时, 目标远离我, 对我无威胁, 当 $\alpha=0$ 时, 对我威胁最大, 当 $\alpha=90$ 时, 对我威胁最小, 威胁隶属函数选取偏小型岭形分布, 即:

$$r_{\alpha} = \begin{cases} \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \frac{\pi}{90} (\alpha - 45) & 0 \leq \alpha \leq 90 \\ 0 & 90 < \alpha \leq 180 \end{cases} \quad (12)$$

(4) 紧迫度 τ 。根据其定义, 隶属函数为式 (8)。

2) 目标威胁属性权重的确定方法

采用最小加权法^[7]来确定各属性的权重, 先由决策者对 2 个比较属性的相对重要程度进行判断, 得出矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_1/\omega_1 & \omega_1/\omega_2 & \cdots & \omega_1/\omega_n \\ \omega_2/\omega_1 & \omega_2/\omega_2 & \cdots & \omega_2/\omega_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_n/\omega_1 & \omega_n/\omega_2 & \cdots & \omega_n/\omega_n \end{bmatrix} \quad (13)$$

权重可以通过下述优化问题得到:

$$\begin{cases} \min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} \omega_j - \omega_i)^2 \\ s.t. \sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \omega_i > 0, i \in N \end{cases} \quad (14)$$

为了最小化 z , Lagrange 函数为:

$$L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (a_{ij} \omega_j - \omega_i)^2 + 2\lambda (\sum_{i=1}^n \omega_i - 1) \quad (15)$$

(其中 λ 是 Lagrange 乘数)

对 ω_1 微分, 可得:

$$\sum_{i=1}^n (a_{i1} \omega_i - \omega_i) a_{i1} - \sum_{j=1}^n (a_{ij} \omega_j - \omega_i) + \lambda = 0 \quad i \in N \quad (16)$$

综合求解 $n+1$ 元非齐次线性方程组, 可求得 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n, \lambda$ 。

综合专家意见, 得出:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3/2 & 2 & 6/7 \\ 2/3 & 1 & 5/2 & 2/3 \\ 1/2 & 2/5 & 1 & 1/3 \\ 7/6 & 3/2 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

用最小加权法求得权重值 $\omega_1=0.3002, \omega_2=0.2306, \omega_3=0.1171, \omega_4=0.3521$ 。

3) 同一威胁级下的威胁度排序模型

第 i 个目标的第 j 个属性值为 x_{ij} , 则第 i 个目标的综合威胁度值为:

$$X_i = \sum_{j=1}^n \omega_j x_{ij} \quad (17)$$

由于目标的属性值中含有三角模糊数, 需要考虑三角模糊数的运算法则及排序方法。对任意 2 个三角模糊数 $\tilde{p}_1 = (l_1, m_1, n_1), \tilde{p}_2 = (l_2, m_2, n_2)$, 根据扩展原理, 有相应的模糊数运算规则为^[8]:

$$\begin{cases} \tilde{p}_1 \oplus \tilde{p}_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, n_1 + n_2) \\ \lambda \otimes \tilde{p}_1 = (\lambda l_1, \lambda m_1, \lambda n_1), \quad \lambda > 0, \lambda \in R \end{cases} \quad (18)$$

三角模糊数的排序方法采用均值散布法^[7], 这类方法使用 2 个准则, 即模糊数的平均值和散布, 这种方法合乎逻辑, 分辨力较高, 对三角模糊数计算十分简便。对于常见的三角模糊数 $\tilde{M} = (l, m, n)$, 其均值和标准差可简化为:

$$\bar{X}(\tilde{M}) = \frac{1}{4}(l + 2m + n) \quad (19)$$

$$\sigma(\tilde{M}) = \frac{1}{80}(3l^2 + 4m^2 + 3n^2 - 4ml - 2nl - 4mn) \quad (20)$$

Lee-Li 定义了模糊集的综合排序指标:

$$F(\tilde{M}) = \beta \bar{X}(\tilde{M}) + (1 - \beta)[1 - \sigma(\tilde{M})] \quad (21)$$

β 是由决策者选定的权值, 反映了均值与散布在决策者心中的相对重要程度, 这里取 $\beta=0.8$ 。

3 实例计算

假定我编队的防空武器的性能参数如表 2, 某时刻测得敌空中来袭目标的属性值如表 3。

表 2 我舰艇编队的防空武器的性能参数

性能参数	远程导弹	中程导弹	近程导弹	近防炮
反应时间	14	10	8	4
最大拦截速度	900	950	1050	1300
最大拦截高度	25000	20000	15000	5000
最小拦截高度	20	10	5	0
最远拦截射程	110000	35000	11000	5000
最近拦截射程	10000	1000	500	0
武器飞行速度	1100	1200	1000	1500

表 3 敌空中来袭目标的属性值

目标	高度(m)	速度(m/s)	距离(m)	反射面积(m ²)	我舷角(°)	敌舷角(°)
1	10	800	10000-	0.5	80	20
2	500	930	50000-	20	60	45
3	1000	250	100000+	15	90	120
4	800	310	44100-	2	24	30
5	745	343	20000-	5	80	62
6	5	510	21000-	0.1	30	21
7	45	320	15000-	9	15	20
8	3	560	16000-	0.8	88	50

(+表示距离加大, -表示距离缩短)

根据建立的分级模型, 经过计算, 进行分级。1 级威胁: 8; 2 级威胁: 6; 3 级威胁: 1、2、7; 4 级威胁: 4、5; 无威胁: 3。根据分级结果, 3 级和 4 级威胁分别进行进一步的排序, 根据建立的威胁隶属函数求得隶属度值见表 4、表 5。

(下转第 31 页)

可据此进行后续的研究, 比如数据规模比较大, 可采用智能优化算法(比如蚁群、遗传算法等)以提高选择关联的最好方案的搜索效率。

4 结论

多 Agent 集成决策的系统框架能满足完成任务的各种约束条件, 每个 Agent 在单独决策的同时互相共享信息与合作实现整体的任务分配与集成, 使决策具有柔性及连续性, 将有效提高装备指挥效能和管理水平, 更好地发挥整体装备保障能力。需进一步研究的问题包括: 1) 集成决策中的人机互动; 2) 决策方案的评估; 3) 寻找最优的关联方案时, 采用智能优化算法(比如蚁群、遗传算法等)提高搜索效率。

参考文献:

[1] 宋建社, 曹小平, 曹耀钦, 等. 装备维修信息化工程[M].

(上接第 24 页)

表 4 3 级威胁中目标的隶属度

目标	r 类型	r_h	r_a	τ
1	(0.7,0.8,1.0)	(0.8,0.9,1.0)	0.8830	1.0000
2	(0.3,0.4,0.6)	(0.5,0.7,0.9)	0.5000	0.6459
7	(0.5,0.6,0.8)	(0.8,0.9,1.0)	0.8830	0.7723

$\tilde{M}_1 = (0.8501, 0.9032, 0.9863), \tilde{M}_2 = (0.4913, 0.5675, 0.6736),$
 $\tilde{M}_7 = (0.7099, 0.7630, 0.8461), F(\tilde{M}_1) = 0.9285, F(\tilde{M}_2) = 0.6598,$
 $F(\tilde{M}_7) = 0.8163, X_1 > X_7 > X_2。$

表 5 4 级威胁中目标的隶属度

目标	r 类型	r_h	r_a	τ
4	(0.5,0.6,0.8)	(0.5,0.7,0.9)	0.7500	0.2623
5	(0.5,0.6,0.8)	(0.5,0.7,0.9)	0.2204	1.0000

$\tilde{M}_4 = (0.4456, 0.5217, 0.6279), \tilde{M}_5 = (0.6433, 0.7194, 0.8256),$
 $F(\tilde{M}_4) = 0.6232, F(\tilde{M}_5) = 0.7814, X_5 > X_4。$

最终排序结果为: $\begin{cases} 1 \text{ 级威胁} & 8 \\ 2 \text{ 级威胁} & 6 \\ 3 \text{ 级威胁} & 1 > 7 > 2 \\ 4 \text{ 级威胁} & 5 > 4 \end{cases}$

4 结束语

水面舰艇编队防空火力的性能与空中目标的部分特征结合, 按分层防御原则, 建立了分级的目标威胁度排序模型, 该模型构造简洁, 可通过计算机编程实现排序结果的计算, 为舰艇编队分层防御空中目标进行威胁度排序提供决策参考。

北京: 国防工业出版社, 2005: 1-8.

- [2] 曹小平, 路广安. 装备维修器材保障[M]. 北京: 国防大学出版社, 2005: 1-10.
- [3] GOSAIN S, MALHOTRA A, EL SAWY O. Coordination for Flexibility in E-Business Supply Chains [J]. Journal of Management Information Systems, 2005, 21(3): 7-45.
- [4] 马雪芬, 孙树栋. 多目标的供应链集成优化及数值仿真[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 174-180.
- [5] LEE H L, WHANG S. E-Business and Supply Chain Integration[C]. Stanford Global Supply Chain Management Forum, 2001.
- [6] FOX M S, BARBUCEANU M, TEIGEN R. Agent-Oriented Supply Chain Management [J]. International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 2000, 12(2/3): 165-188.
- [7] IN F, LIN Y. Integrating Multi-Agent Negotiation to Resolve Constraints in Fulfilling Supply Chain Orders [J]. Electronic Commerce Research and Applications, 2006, 5(4): 313-323.
- [8] MENASE D A. Composing Web Services: A QoS view [J]. IEEE Internet Computing, 2004, 8(6): 88-90.

参考文献:

- [1] 田桐良, 刘作良, 王广云, 等. 部分特征值未知的空中目标威胁程度排序方法[J]. 空军工程大学学报, 2004, 5(2): 55-58.
- [2] 马海涛. 基于神经网络和遗传算法的威胁度估计算法[J]. 军事运筹与系统工程, 2005, 19(3): 71-74.
- [3] 张濡川, 刘作良, 王硕. 基于模糊多属性决策的威胁度评估与排序研究[J]. 现代防御技术, 2005, 33(1): 15-18.
- [4] 于军善, 张涛, 曹宁, 等. 灰色关联分析中的空袭目标威胁度判断[J]. 火力与指挥控制, 2004, 29(4): 68-70, 78.
- [5] 刘雁兵, 刘付显. 基于模糊神经网络的空袭目标威胁评估[J]. 战术导弹技术, 2005(3): 9-12.
- [6] 杨纶标, 高英仪. 模糊数学原理及应用[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2005: 49-53.
- [7] 徐玖平, 吴巍. 多属性决策的理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 44, 250-251.
- [8] 姜艳萍, 樊治平. 一种三角模糊数互补判断矩阵的排序方法[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(7): 34-36.

欢迎读者订阅

欢迎作者赐稿

欢迎广告惠顾

恭 祝 2009

新 年 快 乐