

## 反导体系结构交战程序链评价模型

夏璐, 邢清华, 谢松江, 范海雄

(空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051)

**摘要** 针对反导交战程序链评价问题,以3参数 Vague 值对反导体系结构链路信息流参数的不确定性和模糊性进行描述,并依托 GERT 网络理论,构建了信息优势转化评价 V-GERT 网络模型,给出了 V-GERT 网络参数求解的基本定理,建立了交战程序链信息优势转化概率和信息优势转化效果评价因子模型,以此作为衡量反导交战程序链优劣的标准,从而为反导体系结构交战程序链的设计与优化提供决策依据。

**关键词** 反导交战程序链;3 参数 Vague 值;GERT 网络

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.05.007

**中图分类号** O231.5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)05-0027-04

### Engage Schedule Chain Evaluation Model of Missile Defense System-of-systems Architecture

XIA Lu, XING Qing-hua, XIE Song-jiang, FAN Hai-xiong

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Aimed at the evaluation problem of the missile defense engage schedule chain, in the description of the uncertain and fuzzy information flow parameter by three-parameter Vague value, the information superiority conversion evaluation V-GERT network model is established by the GERT network theory. The basic parameter calculation theorem of V-GERT network is also given. Then the information superiority conversion probability and conversion effect evaluation factor model are put forward. The probability and evaluation factor can be considered as an engage schedule chain measurement to provide a way for the design and optimization of missile defense engage schedule chain.

**Key words:** missile defense engage schedule chain; three-parameter Vague value; GERT network

反导体系结构是一个复杂网络系统,要求各个防御单元相互关联,作为一个一体化的系统共同工作<sup>[1]</sup>。反导作战必须按照规则、按程序自动进行<sup>[2]</sup>。如果反导体系网络结构是完全连接,那么在提高信息优势的同时,也会由于网络结构成本剧增、信息资源海量和指挥层级模糊而使网络自身的信息处理及指挥控制涌现出不可预知的复杂性<sup>[3]</sup>。因此,在设计、构建反导体系结构时,应当合理规划体系结构中

各作战单元之间的信息链路和连接关系。但如何对这种由信息链路连接而形成的交战程序链进行评价目前成果不多,尚需研究。

### 1 反导交战程序链概述

所谓反导交战程序链是指一条由特定的感知单

收稿日期:2013-01-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61272011);空军工程大学研究生科技创新课题资助项目(HX1112)

作者简介:夏璐(1985-),男,安徽无为,人,博士生,主要从事反导体系结构优化研究.E-mail: xialuhappy@163.com

元、决策单元、火力单元组合,协同探测、跟踪、决策及拦截来袭弹道导弹,完成反导作战任务的杀伤链。2条或2条以上交战程序链就组成了反导体系结构的交战程序组。其中感知类资源包括预警卫星、侦察监视卫星、空基预警平台、远程探测P波段预警雷达、X波段多功能相控阵雷达、高层反导武器系统制导雷达、目标指示雷达及低层反导武器系统制导雷达等;决策类资源包括国家C<sup>2</sup>BMC、战区C<sup>2</sup>BMC及战术C<sup>2</sup>BMC等;火力类资源包括中段反导武器系统、末段高层反导武器系统及末段低层反导武器系统等。

## 2 基于信息优势转化的交战程序链评价模型

### 2.1 信息流评价参数描述

信息流是反导体系结构交战程序链的内在驱动,其评价指标往往带有模糊性。由于Vague集同时考虑了非空集元素隶属度与非隶属度2方面的信息,使得Vague集在处理不确定性信息时比Fuzzy集具有更强的表达能力和灵活性,更适合用来处理现实中的实际问题<sup>[4-5]</sup>。进一步,借助3参数区间数的模式可以增强Vague值对模糊信息的表示,即3参数Vague值<sup>[6]</sup>。设 $X$ 是非空有限论域, $\forall x \in X$ ,令 $t(x)$ 、 $f(x)$ 和 $m(x)$ 分别为 $x$ 的真隶属度函数,假隶属度函数和重心隶属度函数,则信息流参数的优劣用3参数Vague值 $x$ 描述,即 $x = [t(x), m(x), 1 - f(x)] = [x^-, x^0, x^+]$ 。

### 2.2 信息优势转化评价V-GERT网络模型

根据GERT网络理论<sup>[7-10]</sup>,针对反导体系结构内部信息流动,在GERT网络中,若2个节点之间传递的是信息流,且信息流由 $n$ 个相互独立的信息流参量 $v(1), v(2), \dots, v(n)$ 描述。当这些参量的评价用3参数Vague值 $x(1), x(2), \dots, x(n)$ 表示时,则称该网络为反导体系结构信息优势转化评价V-GERT网络。

令网络 $G = (N, A)$ ,节点集合 $N$ 中仅含“异或”型节点。设 $x(1), x(2), \dots, x(n)$ 相互独立且矩母函数都存在, $x(k)$ 为信息流传递活动集合 $A$ 中某个活动 $(ij)$ 的第 $k$ 个信息流评价参量,对于任意实数 $s_k$ ,其评价参量 $x(k)$ 的矩母函数为: $M_{x(k)}(s_k) = E[e^{s_k x(k)}] =$

$$E[e^{s_k [x_k^-, x_k^0, x_k^+]}] = \begin{cases} e^{s_k x_k^-}, & x(k) \text{取最劣评价价值时} \\ e^{s_k x_k^0}, & x(k) \text{取最可能评价价值时。} \\ e^{s_k x_k^+}, & x(k) \text{取最优评价价值时} \end{cases}$$

令 $f = w_1 x(1) + w_2 x(2) + \dots + w_n x(n)$ 为信息流活动的综合评价参量, $p_{ij}$ 为给定节点 $i$ 实现时,活动 $(ij)$ 被执行的传递概率, $M_{ij}(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 为从节点 $i$ 到 $j$ 的信息流评价参量矩母函数, $W_{ij}(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 为活动 $(ij)$ 的传递函数,则: $W_{ij}(s_1, s_2, \dots, s_n) = p_{ij} M_{ij}(s_1, s_2, \dots, s_n) = p_{ij} M_f(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 。

## 3 交战程序链评价标准的确立

**定理1** 在V-GERT网络中,设 $x(1), x(2), \dots, x(n)$ 为反导交战程序链信息流动过程 $(ij)$ ( $i, j = 1, 2, \dots, m$ )中相互独立的 $n$ 个信息流评价参量,各评价参量的矩母函数均存在,信息流综合评价参量 $f = w_1 x(1) + w_2 x(2) + \dots + w_n x(n)$ ,且这个过程实现的概率为 $p_{ij}$ ,则信息流动过程 $(ij)$ 的传递函数 $W_{ij}$ 为 $x(1), x(2), \dots, x(n)$ 的矩母函数之积与 $p_{ij}$ 的乘积,即:

$$W_{ij}(s_1, s_2, \dots, s_n) = p_{ij} \prod_{k=1}^n M_{x(k)}(s_k w_k) \quad (1)$$

在此基础上,结合V-GERT网络串联、并联及自环等效传递函数的性质,可以得到反导交战程序链起点(某感知节点 $u$ )到终点(某火力节点 $v$ )之间的等效传递函数 $W_w$ ,从而得到如下定理。

**定理2** 在V-GERT网络中,若反导交战程序链中起点 $u$ 到终点 $v$ 的等效传递函数为 $W_w(s_1, s_2, \dots, s_n)$ ( $u = 1, 2, \dots, m_1; v = 1, 2, \dots, m_2$ ),则从节点 $u$ 到节点 $v$ 的交战程序链信息优势转化概率 $p_w$ 等于 $W_w(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 将所有 $s_k$ ( $k = 1, 2, \dots, n$ )置0的值,即:

$$p_w = W_w(s_1, s_2, \dots, s_n) \Big|_{s_1 = s_2 = \dots = s_n = 0} = W_w(0, 0, \dots, 0) \quad (2)$$

从节点 $u$ 到节点 $v$ 的等效矩母函数为其等效传递函数与信息优势转化概率的比值,即:

$$M_w(s) = M_{f_w}(s_1, s_2, \dots, s_n) = \frac{W_w(s_1, s_2, \dots, s_n)}{W_w(0, 0, \dots, 0)} \quad (3)$$

**定理3** 在V-GERT网络中,若反导交战程序链中起点 $u$ 到终点 $v$ 的等效传递函数为 $W_w(s_1, s_2, \dots, s_n)$ ( $u = 1, 2, \dots, m_1; v = 1, 2, \dots, m_2$ ),信息流动过程的信息流综合评价参量 $f_w = w_1 x_w(1) + w_2 x_w(2) + \dots + w_n x_w(n)$ ,则从起点 $u$ 到终点 $v$ 第 $k$ 个信息流评价参量值的增量 $E[x_w(k)]$ 为:

$$E[x_w(k)] = \frac{1}{w_k} \frac{\partial}{\partial s_k} \left[ \frac{W_w(s_1, s_2, \dots, s_n)}{W_w(0, 0, \dots, 0)} \right] \Big|_{s_1 = s_2 = \dots = s_n = 0} \quad (4)$$

由此,得到从反导交战程序链起点 $u$ 到终点 $v$ 的信息流综合评价参量值的增量 $E[f_w]$ 为:

$$E[f_w] = E[w_1 x_w(1) + w_2 x_w(2) + \dots + w_n x_w(n)] = \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial}{\partial s_k} \left[ \frac{W_w(s_1, s_2, \dots, s_n)}{W_w(0, 0, \dots, 0)} \right] \Big|_{s_1=s_2=\dots=s_n=0} \right) \quad (5)$$

假设反导交战程序链经过  $N$  次信息优势转化活动才完成由起点  $u$  到终点  $v$  的转化, 则增量  $E(f_w)$  就是从  $u$  到  $v$  各信息优势转化活动评价值的累加, 所以  $N$  次信息优势转化活动评价的均值可以用来衡量该交战程序链信息优势转化的效果。

在 V-GERT 网络中, 若从反导交战程序链起点  $u$  到终点  $v$  的信息流综合评价参量值的增量为  $E(f_w)$ , 且该反导交战程序链经过  $N$  次信息优势转化活动(每次进项信息传递活动视为一次信息优势转化活动), 则反导交战程序链信息优势转化效果评价因子  $\eta^w$  定义为:

$$\eta^w = \frac{E[f_w]}{N} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial}{\partial s_k} \left[ \frac{W_w(s_1, s_2, \dots, s_n)}{W_w(0, 0, \dots, 0)} \right] \Big|_{s_1=s_2=\dots=s_n=0} \right) \quad (6)$$

评价因子  $\eta^w$  反映了反导交战程序链信息优势转化效果优劣的平均程度, 而交战程序链信息优势转化概率  $p^w$  反映了这种信息优势转化效果达成的不确定程度。综合 2 个评价参数就可以衡量反导体

系结构交战程序链的优劣, 以便为自动化、程序化反导作战设计科学、合理的交战程序组。

### 4 案例分析

以文献[1]中弹道导弹防御“杀伤网”中的某条交战程序链为例, 分析其信息流程, 经过适当简化, 得到图 1 反导交战程序链信息优势转化评价 V-GERT 网络模型。图 1 中: 节点 1、2、3、4、5、6、7、8、E、F 分别表示预警传感器单元、国家 C<sup>2</sup>BMC、探测传感器单元、战区 C<sup>2</sup>BMC、目标跟踪传感器单元、目标识别传感器单元、战术 C<sup>2</sup>BMC、火力拦截单元、任务完成虚拟节点及任务失败虚拟节点。

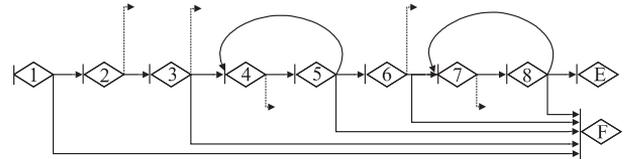


图 1 反导交战程序链信息优势转化评价 V-GERT 网络

Fig. 1 Information superiority conversion evaluation V-GERT

该 V-GERT 网络中各项参数的取值见表 1。信息流时效性、精确性、完备性评价指标的权重分别为  $w_1=0.35, w_2=0.35, w_3=0.30$ 。

表 1 V-GERT 网络中各项参数数值

Tab.1 All parameter values of V-GERT

$(i, j)$	$p_{ij}$	各信息流评价参量的 3 参数 Vague 值		
		时效性 $x(1)$	精确性 $x(2)$	完备性 $x(3)$
(1, 2)	0.99	[0.90, 0.95, 0.97]	[0.70, 0.73, 0.79]	[0.81, 0.83, 0.87]
(1, F)	0.01			
(2, 3)	0.85	[0.88, 0.90, 0.94]	[0.85, 0.87, 0.91]	[0.73, 0.76, 0.81]
(3, 4)	0.91	[0.90, 0.92, 0.94]	[0.83, 0.86, 0.90]	[0.85, 0.88, 0.89]
(3, F)	0.07			
(4, 5)	0.90	[0.95, 0.96, 0.99]	[0.82, 0.87, 0.90]	[0.85, 0.90, 0.93]
(5, 4)	0.06	[0.89, 0.93, 0.95]	[0.90, 0.94, 0.97]	[0.82, 0.87, 0.91]
(5, F)	0.01			
(5, 6)	0.93	[0.87, 0.91, 0.94]	[0.79, 0.82, 0.83]	[0.85, 0.86, 0.88]
(6, 7)	0.94	[0.91, 0.92, 0.93]	[0.89, 0.91, 0.95]	[0.86, 0.90, 0.98]
(6, F)	0.03			
(7, 8)	0.89	[0.93, 0.95, 0.99]	[0.89, 0.94, 0.96]	[0.87, 0.91, 0.94]
(8, 7)	0.03	[0.92, 0.96, 0.97]	[0.83, 0.87, 0.88]	[0.81, 0.82, 0.85]
(8, E)	0.90			
(8, F)	0.07			

根据 V-GERT 网络相关性性质, 可以得到该反导交战程序链的等效传递函数  $W_{18} = W_{12} W_{23} W_{34} / (1 - W_{45} W_{54}) W_{56} W_{67} / (1 - W_{78} W_{87})$ , 由式(2)可得该反导交战程序链信息优势转化概率  $p_{18} = W_{18}(s_1, s_2, s_3) \Big|_{s_1=s_2=s_3=0} = 0.7271$ 。由于节点 1 为预警节点, 节点

8 为火力节点, 故该反导交战程序链信息流感知优势转化为火力优势的可能性为 0.7271。

由式(5)可得该反导交战程序链起点 1 到终点 8 的信息流综合评价参量值的增量  $E[f_{18}] = \sum_{k=1}^3 \frac{\partial}{\partial s_k} \cdot$

$[W_{18}(s_1, s_2, s_3)/W_{18}(0, 0, 0)] \Big|_{s_1=s_2=s_3=0} = [4.359\ 6$   
 $4.499\ 4\ 4.672\ 6]$ , 则根据式(6)可以得到该反导交  
 战程序链信息优势转化效果评价因子  $\eta^8 = \frac{E[f_{18}]}{N} =$   
 $\frac{[4.359\ 6\ 4.499\ 4\ 4.672\ 6]}{5} = [0.871\ 9\ 0.899\ 9$   
 $0.934\ 5]$ , 即认为该反导交战程序链信息优势转化效  
 果为优的支持度上界为 0.934 5, 下界为 0.871 9, 最  
 可能的支持度为 0.899 9。

需要说明的是, 在实际设计反导交战程序链时,  
 如果构建的反导交战程序链方案的信息优势转化效  
 果评价因子的取值区间越趋近于 1 且信息优势转化  
 概率满足阈值要求, 则该反导交战程序链方案为反导  
 交战程序组的可行方案。

## 5 结语

基于 Vague 值参量描述的 V-GERT 网络模型  
 实现了对反导交战程序链信息优势转化效果的定量  
 评价, 后续研究重点在于建立能够综合反映反导交战  
 程序链信息优势转化概率和信息优势转化效果评价  
 因子参数特性的评价模型, 以更科学、合理地反导  
 体系结构设计提供决策工具。

### 参考文献(References):

- [1] 黄树彩, 刘军兰, 康红霞. 弹道导弹防御的交战程序组设计[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(3): 35-39.  
 HUANG Shucui, LIU Junlan, KANG Hongxia. Design of the engage schedule group for ballistic missile defense[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(3): 35-39. (in Chinese)
- [2] Missile defense agency. Missile defense agency fiscal year 2009 (FY 09) budget estimates overview [EB/OL]. (2009-01-12)[2010-10-11]. <http://www.go.com>.
- [3] 俞杰, 沈寿林, 闵雷雷, 等. 基于小世界网络模型的“梅特卡夫定律”反思[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(2): 26-28.  
 YU Jie, SHEN Shoulin, MIN Leilei, et al. Think of
- the ‘Metcalf laws’ network complexity based on the model of small world[J]. Command control & simulation, 2009, 31(2): 26-28. (in Chinese)
- [4] Xu Z S, Yager R. Intuitionistic and interval-valued intuitionistic fuzzy preference relations and their measures of similarity for the evaluation of agreement within a group [J]. Fuzzy optimization decision making, 2009, 8(2): 123-139.
- [5] Kumar A, Yadav S P, Kumar S. Fuzzy system reliability using different types of Vague sets[J]. Applied science and engineering, 2008, 6(1): 71-86.
- [6] 兰蓉, 范九伦. Vague 值和三参数 Vague 值上的贴适度[J]. 模式识别与人工智能, 2010, 23(3): 341-348.  
 LAN Rong, FAN Jiulun. Similarity measures on Vague values and three-parameter Vague values [J]. PR & AI, 2010, 23(3): 341-348. (in Chinese)
- [7] 俞斌. 多传递参量 GERT 网络模型及其应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
 YU Bin. Study on a new GERT network model and its application based on multiple transfer parameters[D]. Nanjing: Nanjing university of aeronautics and astronautics, 2010. (in Chinese)
- [8] 李成川, 李聪波, 曹华军, 等. 基于 GERT 图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 298-305.  
 LI Chengchuan, LI Congbo, CAO Huajun, et al. Uncertain remanufacturing process routings model for used components based on GERT network [J]. Computer integrated manufacturing systems, 2012, 18(2): 298-305. (in Chinese)
- [9] 汪涛, 吴琳丽. 军事物流供应链 G-GERT 网络风险识别模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(1): 231-233.  
 WANG Tao, WU Linli. Research on G-GERT risk identification model of military logistics supply chains [J]. Computer engineering and applications, 2012, 48(1): 231-233. (in Chinese)
- [10] Reza A, Hamid R G, Shamsollah A, et al. Modeling and analysis of mechanization projects of wheat production by GERT networks [J]. Agricultural sciences in China, 2010, 9(7): 1078-1083.

(编辑: 田新华)