

GA-BP 模型在弹道导弹协同突防效能评估中的应用

葛鲁亲,南英,谢如恒,孙旺

(南京航空航天大学 航天学院,江苏 南京 210016)

摘 要:针对弹道导弹协同突防效能评估的问题,采用层次分析法建立弹道导弹协同突防能力评估指标体系,进一步从突防能力与防御能力上建立了攻防体系之间的突防度模型,并给出了基于 GA-BP 神经网络下的优化权重选取方法。仿真结果表明:GA-BP 神经网络与层次分析法和熵权法相比,有着更好的泛化能力,更精确地反映实际作战效能。该方法避免了主观因素的不确定性和事物本身的绝对客观性,利用实时作战数据对弹道导弹协同突防效能进行评估。

关键词:弹道导弹;协同突防;效能评估;层次分析法;突防度;GA-BP 神经网络

中图分类号:TJ761.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)03-0119-04

Application of GA-BP Model in Ballistic Missile Cooperative Penetration Effectiveness Evaluation

GE Luqin, NAN Ying, XIE Ruheng, SUN Wang

(School of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the problem of evaluating the cooperative penetration efficiency of ballistic missiles, the evaluation index system of ballistic missile cooperative penetration capability is established by analytic hierarchy process (AHP), and the penetration degree model with penetration capability and defense capability is established, a method of optimizing weights based on GA-BP neural network is proposed. Simulation results show that GA-BP neural network has better generalization ability and reflects actual combat effectiveness more accurately, compared with AHP and entropy weight method. This method is used to avoid the uncertainty of subjective factors and the absolute objectivity of things themselves. And the real-time combat data is used to evaluate the cooperative penetration efficiency of the ballistic missiles.

Keywords: ballistic missiles; cooperative penetration; effectiveness evaluation; analytic hierarchy process; penetration degree; GA-BP neural network

0 引言

弹道导弹突防效能指的是以导弹为主突单元的突防作战系统在突防过程中各个阶段面对的防御措施,应用突防系统中各种武器单元完成各种作战任务的有效程度。对突防效能进行评估,为导弹在作战过程中提供参考,有助于优化作战决策,是对作战指挥过程的有效保证^[1-2]。

目前对于突防效能的评估方法主要分为 3 大类:靶场物理实验法、半物理仿真法和计算机仿真法。因为导弹发射成本高且步骤繁琐,前两者的方法不符合突防效能评估的发展,计算机仿真法着重建立数学模型和仿真模型的过程,代表着突防效能评估今后的发展方向。具体的突防效能评估方法分为 ADC 评估法、指数模型评估法、层次分析法、专家方法等方法。ADC 评估法^[3]效能评估的主要对象为相互对抗的武器,考虑的因素存在局限性,没有考虑到作战环境、武器的机动性能、摧毁能力等因素,无法完整顾及到作战双方的系统。指数模型评估法^[4]模型对指数取值很灵敏,但如何合理确定该系数成为难点。层次分析法^[5]将定性定量的方法有机结合,具有系统、直观和准确等特点。专家方法^[6]主要选取导弹效能一些关键特征

指标,专家根据自己的经验对各个指标进行“打分”,然后对不同意见集中处理。该方法主观因素影响较大,实行起来有一定的操作难度。

总的来说,以上评估方法普遍存在如下问题:首先,评估形式单一,无法满足效能评估的错综复杂、多样性的需求;其次,现有导弹突防评估过程中没有顾及反导防御系统的防御能力,仅考虑弹道导弹的攻击能力并不能体现出对防御系统的整体突防效能。

本文针对弹道导弹突防效能评估问题,在层次分析法的基础上,采用了 GA-BP 神经网络分别对弹道导弹与反导防御系统指标体系能力效用值进行优化解算。在建立标准反导防御系统指标体系的基础下,应用突防度表示弹道导弹系统对于防御系统的整体突防效能。

1 问题描述

针对弹道导弹的协同突防效能评估问题,考虑突防过程是进攻方与防御方系统之间的对抗,需建立导弹突防系统与反导防御系统。具体的突防作战可表述为以下形式:

$$W_{JP} = \frac{J}{P} \quad (1)$$

式中: W_{jp} 为突防作战效能, 该值越大, 说明该进攻突防作战系统相对于反导防御系统的突防能力越大; J 为进攻体系突防能力效用值; P 为反导体系防御能力效用值。

对突防能力与防御能力进行系统评估, 需对其能力指标进行系统分析, 即利用层次分析法 (AHP) 建立导弹突防体系的突防能力效用值模型 J 与标准反导防御体系的防御能力效用值模型 P , 具体的过程为:

$$J = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$x_i = f_2(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{im}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$P = s_1(y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (4)$$

$$y_i = s_2(b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中: f_1, f_2 为突防系统各个层级之间的关系; $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为突防能力 J 的直接相关量; $a_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$ 为 x_i 的直接相关量; s_1, s_2 为反导系统各个层级间的关系; $y_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为反导防御能力 P 的直接相关量; $b_{ij} (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k)$ 为 y_i 的直接相关量。

2 弹道导弹协同突防效能评估指标体系

弹道导弹协同突防效能评估指标体系有着较高的复杂度, 不仅涉及弹道导弹的协同突防能力, 更要考虑反导防御系统的防御能力。本文综合利用层次分析法 (AHP) 分别对弹道导弹协同突防能力、反导防御系统防御能力系统地建立评估指标体系。

2.1 弹道导弹攻防对抗中各评估指标体系

1) 弹道导弹协同突防能力评估指标体系

对于弹道导弹的协同突防^[7], 在确定突防导弹类型、数量、突防模式等基础上, 需进一步对导弹群体协同能力 E 进行评估, 评估过程中主要考虑导弹突防过程中的态势感知能力 E_1 , 指挥系统的指挥协同能力 E_2 , 导弹的火力组网打击协同能力 E_3 。这些二级指标也需继续细分为底层指标, 表 1 为多枚弹道导弹突防能力评估指标体系。

表 1 弹道导弹协同突防能力评估指标体系

顶层目标	二级指标	底层指标
弹道导弹协同突防能力评估指标 E	战场态势感知能力 E_1	对战场态势获取能力 m_1
		态势信息处理能力 m_2
		态势信息反应能力 m_3
	指挥控制协同能力 E_2	决策者心理素质 m_4
		决策者指挥能力 m_5
		决策者知识结构特性 m_6
		决策者指挥经验 m_7
		辅助决策手段特性 m_8
		指挥决策手段特性 m_9
		指挥信息处理能力 m_{10}
	火力组网打击协同能力 E_3	组网通信能力 m_{11}
		组网反应时间能力 m_{12}
		时间协调能力 m_{13}
		空间协调能力 m_{14}
		对敌毁伤能力 m_{15}

2) 反导防御系统防御能力评估指标体系

反导防御系统在导弹突防打击过程中有着十分重要的地位, 它能够检验弹道导弹突防能力。标准反导防御系统防御能力 F 初步分解为发现能力 F_1 、识别能力 F_2 和摧毁能力 F_3 。二级指标仍需进一步分解为底层指标, 表 2 为反导防御系统防御能力评估指标体系。

表 2 反导防御系统防御能力评估指标体系

顶层目标	二级指标	底层指标
反导防御系统防御能力评估指标 F	发现能力 F_1	卫星最大发现距离 u_1
		预警雷达最大发现距离 u_2
		预警雷达抗干扰能力 u_3
		侦察探测卫星扫视频率 u_4
		云雾等大气影响程度 u_5
	识别能力 F_2	成像卫星的清晰度 u_6
		成像卫星的地面分辨率 u_7
		成像卫星扫视频率 u_8
		成像卫星信息处理能力 u_9
	摧毁能力 F_3	制导雷达作用范围 u_{10}
		制导雷达信息处理能力 u_{11}
		拦截弹杀伤范围 u_{12}

2.2 多弹道导弹攻防对抗中各评估指标体系

在对单枚弹道导弹协同突防能力及反导防御系统的防御能力进行评估指标体系建立的基础上, 合理选取指标权重, 建立弹道导弹对于反导防御系统的协同突防效能模型, 也称为突防度 J_g , 即:

$$J_g = \frac{E(E_1, E_2, E_3)}{F(F_1, F_2, F_3)} \quad (6)$$

式中 $E(E_1, E_2, E_3)$ 、 $F(F_1, F_2, F_3)$ 分别为弹道导弹协同突防能力、反导防御系统防御能力。

3 GA-BP 神经网络的效能评估

进行效能评估需确定指标权值, 权值确定主要分为主观赋权法和客观赋权法^[8]。主观赋权法主要包括专家调查法、二项系数法、环比评分法, 该类方法更多反映了决策者主观信息, 无法客观反映各指标真实情况; 客观赋权法主要包括主成分分析法、熵权法、均方差法、多目标规划法, 该类方法不能完整地顾及系统所有指标, 而且并不能满足高精度、实时解算的需求。GA 优化后的 BP 神经网络, 利用 GA 在网络的解空间找到较优的搜索空间, 并搜索网络最优解, 能够克服 BP 神经网络在复杂网络中过学习、无法全局搜索、局部收敛等问题。

3.1 GA-BP 神经网络评估流程

GA-BP 神经网络主要是分别对弹道导弹、反导防御系统的指标体系进行权值和阈值进行优化选取, 应用训练好的网络最优权值与阈值进行效能评估, 图 1 为 GA-BP 神经网络的效能评估流程。具体的评估流程为:

1) 初始化网络权值、阈值。

2) 将网络的权值和阈值抽象成一组有序染色体,GA 随机对染色体中的权值和阈值编码,染色体 $X_k = [M, \omega_1, \omega_2, \theta_1, \theta_2]$, 其中: M 为隐含层节点数; ω_1, ω_2 为权值, θ_1, θ_2 为阈值。

3) 构建样本数据库,经过标准归一化预处理之后,使指标用 0~1 之间无量纲化值表示,用来训练网络,不同指标量化类型不同,对于量化值越小越好的指标可表示为式(7),对于量化值越大越好的指标可表示为式(8)。

$$a_i = 1 - \frac{x_i}{x_{\max}} \quad (7)$$

$$a_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (8)$$

式中: a_i 为无量纲化的值; x_i 为指标量化值; $x_{\max}, x_{\min}$ 分别为指标量化的最大值、最小值。

4) 个体的适应度计算,个体适应度函数 $F(X_k)$ 是根据网络的实际输出与期望输出之差的误差平方和的倒数表示,具体过程为:

$$F(X_k) = E^{-1}(X_k) = 2N / \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^q (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 \quad (9)$$

式中: y_{ij} 表示第 k 个个体在第 i 个训练样本作用下第 j 个输出节点下的输出; $\hat{y}_{ij}$ 为期望的输出。

5) 进化,个体进化主要是通过基因进行选择、交叉、变异操作进化为新一代种群。

6) 判断网络输出是否满足最优解的误差条件,若满足,输出优化后的权值与阈值;若不满足,返回到 5)、6) 继续执行评估流程,直到获取到最优的权值与阈值。

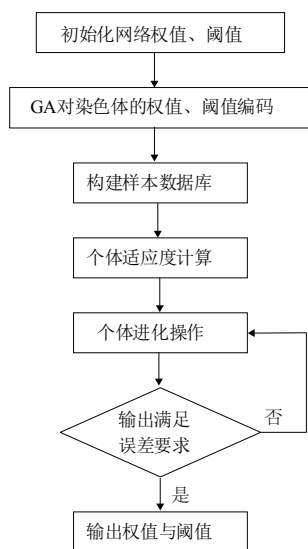


图1 GA-BP 神经网络效能评估流程

3.2 GA-BP 神经网络结构与初始参数设定

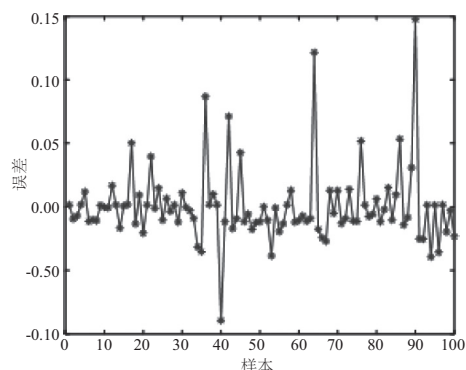
该 GA-BP 神经网络由输入层、1 个隐含层、输出层构成。针对单弹道导弹突防系统、多弹道导弹协同突防系统与反导防御系统,网络输入分别为 $P_1 = \{m_1, m_2, \dots, m_{15}\}$, $P_2 = \{u_1, u_2, \dots, u_{12}\}$, 网络输出分别为弹道导弹协同突防能力 T_1 , 标准反导防御系统防御能力 T_2 , 输出通过专家评分法确定。隐含层节点为 $l = \sqrt{m+n} + k$, 其中: l, m, n 分别

为隐含层、输入、输出节点数, $m \in \{15, 12\}$, $n = 1$, k 为 1~10 之间的整数,本文中的 l 取值分别为 7、6。输入层到隐含层的转换函数 f_1 为 $\text{tansig}()$, 隐含层到输出层的转换函数 f_2 为 $\text{Purelin}()$ 。

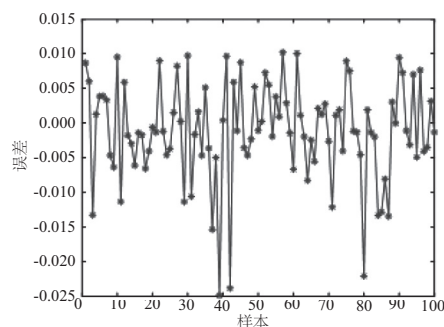
遗传算法中,设置最大迭代次数为 100,学习速率为 0.1,性能指标为 1×10^{-5} ,种群的规模设置为 30,交叉概率为 0.3,变异概率为 0.1,进化时采用轮盘式选择。

3.3 GA-BP 神经网络的样本训练与测试

针对 GA-BP 神经网络,收集了 600 组数据,从中随机选取 500 组数据作为训练样本,剩下 100 组数据作为测试样本。其中,输入指标都为无量纲化处理后的概率值。图 2 为 GA-BP 网络预测与实际测试样本之间误差。



(a) 弹道导弹协同突防模型网络预测误差



(b) 反导防御系统模型网络预测误差

图2 GA-BP 网络的预测误差

由图 2 可知,测试样本输出量与网络仿真预测输出量之间误差很小,满足网络预测精度的需要。

4 仿真结果分析

为验证评估效果,选用某次攻防对抗中多弹道导弹协同突防作战演习的作战数据为例,无量纲化处理后的输入: $P_1 = \{m_1, m_2, \dots, m_{15}\} = \{0.85, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.80, 0.75, 0.80, 0.85, 0.75, 0.75, 0.75, 0.85\}$, $P_2 = \{u_1, u_2, \dots, u_{12}\} = \{0.75, 0.75, 0.75, 0.75, 0.60, 0.75, 0.75, 0.75, 0.80, 0.85, 0.80, 0.80\}$ 。分别从层次分析法、熵权法、GA-BP 神经网络法分别计算权重向量。

1) 层次分析法

根据专家打分法对弹道导弹的下级突防指标建立相应判断矩阵,并得弹道导弹与反导防御系统的评价指标权

重向量分别为 $W'_1 = (0.069, 0.061, 0.032, 0.059, 0.057, 0.056, 0.047, 0.039, 0.045, 0.062, 0.113, 0.117, 0.098, 0.141, 0.060)$, $W'_2 = (0.035, 0.036, 0.030, 0.043, 0.018, 0.047, 0.039, 0.045, 0.062, 0.225, 0.198, 0.106)$ 。

2) 熵权法

根据样本数据中各指标的无量纲数值组,可由熵权法得出弹道导弹、反导防御系统的评估指标权重分别为 $W''_1 = (0.059, 0.015, 0.050, 0.055, 0.049, 0.045, 0.067, 0.032, 0.058, 0.093, 0.120, 0.062, 0.118, 0.070, 0.108)$, $W''_2 = (0.061, 0.057, 0.060, 0.062, 0.099, 0.068, 0.061, 0.085, 0.061, 0.133, 0.123, 0.132)$ 。

3) GA-BP 神经网络

GA-BP 神经网络的权值是根据样本训练得出,具体的弹道导弹、反导防御系统的评估指标权重分别为 $W'''_1 = (0.054, 0.045, 0.041, 0.050, 0.049, 0.051, 0.057, 0.040, 0.041, 0.083, 0.112, 0.101, 0.097, 0.110, 0.080)$, $W'''_2 = (0.043, 0.047, 0.046, 0.057, 0.053, 0.052, 0.056, 0.063, 0.070, 0.165, 0.171, 0.123)$ 。

在权值和效能指标都给定的基础上,把相应的参数带入式(6)中可计算出不同评估方法下的突防效能,表3为不同方法下的评估效能对比表。

表3 不同方法下的评估效能对比表

评估方法	T_1	T_2	突防效能 J_{if}
层次分析法	0.821	0.701	1.171
熵权法	0.786	0.766	1.026
GA-BP 神经网络法	0.789	0.736	1.072

由表3可以看出,层次分析法主要考虑了作战指挥员主观因素;熵权法主要考虑系统内部客观存在的因素;GA-BP神经网络从大量实例作战数据出发,综合考虑主

客观因素,对作战效能做出精准评估。

5 结语

本文采用层次分析法建立了弹道导弹协同突防能力评估指标体系,提出了弹道导弹协同突防效能评估计算模型,并对比了层次分析法、熵权法与GA-BP神经网络法下的权重分配,进行了相应的效能评估计算。数值仿真算例表明,GA-BP神经网络能够避免指标权重选取过程中不确定因素的影响,可精确地对弹道导弹协同突防效能进行评估。

参考文献:

- [1] 杨峰,王维平. 武器装备作战效能仿真与评估[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [2] 方洋旺,伍友利,方斌. 机载导弹武器系统作战效能评估[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [3] 潘高田,周电杰,王远立,等. 系统效能评估 ADC 模型研究和应用[J]. 装甲兵工程学院学报,2007,21(2):5-7.
- [4] 董彦非,张旺,崔巍. 有人机/无人机协同空地攻击效能评估的综合指数模型[J]. 火力与指挥控制,2015,32(2):472-476.
- [5] 滕臣,李忠新. 层次分析法在步枪口径效能评估中的应用[J]. 机械制造与自动化,2014,43(6):86-89.
- [6] 张冉,杨小军,闫了了,等. 基于云模型和专家群体的 C4ISR 系统效能评估方法[J]. 光电与控制,2013(8):24-28.
- [7] 惠耀洛,南英,陈哨东,等. 对临近空间飞行器的多弹协同拦截策略研究[J]. 弹箭与制导学报,2015,35(5):149-154.
- [8] 郭齐胜,袁益民,鄧志刚. 军事装备效能及其评估方法研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2004,18(1):1-5.

收稿日期:2019-01-23

(上接第89页)

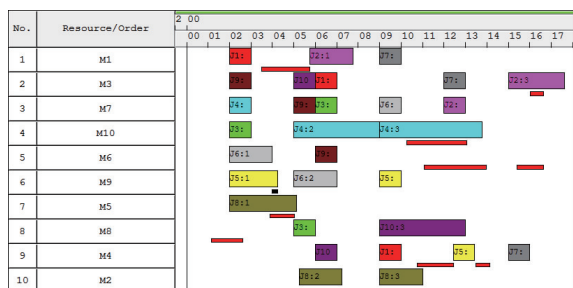


图11 10×10实例综合各因素的甘特图

况的柔性作业车间制造系统的仿真模型。将考虑不确定因素的调度方案放在仿真模型中执行,以研究故障和物流转运对调度方案的影响。结果表明:物料的物流转运时间和机器故障对于工单执行情况的影响较大,这些因素都会增加工单的完工时间。

参考文献:

- [1] BANGSOW S. Plant simulation; manufacturing simulation with plant simulation and simTalk[M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] STEFFEN Bangsow. Manufacturing simulation with plant simulation and simTalk[M]. Berlin:Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [3] KACEM I, HAMMADI S, BORNE P. Approach by localization and multiobjective evolutionary optimization for flexible job-shop scheduling problems[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Part C Applications & Reviews, 2002, 32(1):1-13.
- [4] 兰成均,夏志辉,岳晓斌,等. 基于精益生产模式的制造流程效率评估研究[J]. 机械制造与自动化,2016,45(5):31-32.
- [5] 梁丰,张志利,高钦和,等. 大型武器装备故障建模与仿真技术研究[J]. 系统仿真学报,2011(b07):42-46.
- [6] 孙星. 基于 Petri 网和 eM-Plant 的飞机装配线建模与仿真研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2011.

收稿日期:2019-01-22