

导弹动态可攻击区实时在线算法研究

苗涛, 杨毅, 南英

(南京航空航天大学 航天学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 为满足对空导弹在真实空战环境中射后动态攻击区实时在线计算的需要, 提出了一种基于改进 BP 神经网络算法的导弹射后动态可攻击区的实时在线高精度拟合方法。该神经网络可用于对空导弹各种飞行总体状态下的射后动态可攻击区实时在线高精度拟合。数值仿真结果表明, 该方法所求得的拟合导弹射后动态可攻击区与实际计算结果误差很小。在实际的导弹攻防对抗、群体导弹拦截一体化等工程应用中, 能够实时在线地计算导弹射后动态可攻击区, 对现代国防技术有较大的推进作用。

关键词: 对空导弹; 实时在线; BP 神经网络; 共生有机搜索算法

中图分类号: TJ760.12; TJ761.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0853(2018)02-0039-05

DOI: 10.13645/j.cnki.f.d.20180110.001

Research on real-time online algorithm of missile dynamic attack zone

MIAO Tao, YANG Yi, NAN Ying

(College of Astronautics, NUAA, Nanjing 210016, China)

Abstract: The attack zone of anti-aircraft missile after being launched is important information during an antagonistic process of flight vehicles. To satisfy its real-time online calculation demand, this paper presents a real-time online high-precision fitting method based on improved BP neural network. The final obtained BP neural network can real-time online calculate attack areas of air-to-air missiles after being launched with high precision. Numerical simulation results indicate that the error between fitting results and simulation results of dynamic attack areas of air-to-air missiles being launched is very small. It is a major breakthrough in practical engineering application such as missile offensive and defensive confrontation, as well as integrated conduct operations of mass interception missiles.

Key words: anti-aircraft missile; real-time online; BP neural network; symbiosis organism search algorithm

0 引言

对空导弹射后动态可攻击区作为导弹飞行过程实时可攻击范围区域, 是飞行器攻防对抗过程中的重要信息。不同于传统导弹动态可攻击区, 导弹射后动态可攻击区是指导弹发射之后飞行过程中的某一时刻能够命中目标的四维空间区域范围^[1]。导弹动态可攻击区的算法研究主要分为两类: 一类是如何快速准确地计算得到导弹动态可攻击区边界数据^[1-5]; 另一类是在存在随机干扰和误差的情况下, 导弹动态可攻击区的变化和快速计算^[6-8]。

鉴于对抗战场的瞬时多变性, 导弹射后动态可攻击区的计算速度对战场态势有很大的影响, 能够

实时在线地计算导弹射后动态可攻击区便可以及时地利用所具有的信息。例如在群体导弹协同一体化作战中, 能够实时计算各拦截导弹射后动态可攻击区, 便可以为各拦截导弹实时在线地动态分配拦截目标。由此可见, 快速准确地实时在线算法将大大提高导弹射后动态可攻击区的工程价值与理论意义。但是, 目前一般对空导弹动态可攻击区的算法计算时间太长, 难以满足实时在线的需求。

本文为满足对空导弹射后动态可攻击区的实时在线需求, 提出了一种基于共生有机搜索(Symbiosis Organism Search, SOS)算法^[9]优化的改进 BP 神经网络算法, 用于实时在线计算导弹射后动态可攻击区。首先通过仿真计算得到大量的导弹射后动态可

收稿日期: 2017-06-28; 修订日期: 2017-11-06; 网络出版时间: 2018-01-11 16:00

作者简介: 苗涛(1991-) 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为导航、制导与控制。

攻击区数据,以此作为训练样本数据库,然后利用 SOS 算法优化 BP 神经网络结构和参数,并根据训练样本数据库训练该网络,最终得到最优 BP 神经网络。该最优神经网络可用于对空导弹各种飞行总体状态下的射后动态可攻击区实时在线高精度拟合。

1 问题描述

针对一枚对空导弹,其周围存在 N_T 架突防机动飞行器,该对空导弹需要实时在线地、高精度地获得哪些突防机动飞行器在其当前时刻总体飞行状态下的可攻击区范围内,即:

$$P_{T_i}(t, x_T, H_T, z_T, V_{xT}, V_{HT}, V_{zT}) \in \Omega(t, x, H, z, V_x, V_y, \mu_V, m_{\text{Fuel}}, n_y) \quad (1)$$

式中: P_{T_i} ($i=1, 2, \dots, N_T$) 为突防飞行器的飞行总体状态; t 为当前时刻; (x_T, H_T, z_T) 为突防飞行器的位置; (V_{xT}, V_{HT}, V_{zT}) 为突防飞行器的速度; Ω 为对空导弹的射后动态可攻击区; (x, H, z) 为对空导弹的位置; (V_x, V_y, μ_V) 为对空导弹的速度; m_{Fuel} 为当前时刻对空导弹的燃料质量; n_y 为对空导弹的当前法向过载。

为解决以上问题,传统概念中的导弹可攻击区已经无法满足以上的任务需求,必须实时在线地求解导弹当前总体飞行状态下的动态可攻击区,即射后动态可攻击区。对空导弹的射后动态可攻击区 Ω 是指对空导弹发射后,沿其预定飞行轨迹飞行过程中,基于导弹当前的飞行状态,在各种约束条件下能够命中目标的四维空间区域范围,即:

$$\left. \begin{aligned} R_{\max}(t) &= R_{\max}(H, H_T, V, V_T, n_y, m_{\text{Fuel}}, q_T, N_1, N_2, \dots, t) \\ R_{\min}(t) &= R_{\min}(H, H_T, V, V_T, n_y, m_{\text{Fuel}}, q_T, N_1, N_2, \dots, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $R_{\max}(t)$ 和 $R_{\min}(t)$ 分别为对空导弹发射后 t 时刻的最大和最小可攻击边界; V, V_T 为对空导弹和拦截目标的速度; q_T 为拦截目标相对对空导弹的方

位角; N_1, N_2, \dots 为其他约束条件,如导弹推进系统特性、气动特性、子系统随机误差和控制误差、目标飞行器的机动类型和外界大气风场干扰等。

2 导弹射后动态可攻击区实时在线计算

为了获得导弹射后动态可攻击区实时在线的数据,需要作以下计算:首先,建立对空导弹在各种可能总体飞行状态下的射后动态可攻击区数据库;然后,将此射后动态可攻击区数据库作为训练样本(通过神经网络算法)拟合成近似解析式。其具体计算方法与过程表述如下:

(1) 对空导弹射后动态可攻击区数据库构建

由于所建立的导弹射后动态可攻击区数据库非常庞大,本文仅考虑导弹飞行高度、飞行速度、弹道倾角、发动机剩余燃料质量、当前法向过载(或当前气动舵偏角)。导弹飞行高度范围为 $[5, 20]$ km; 飞行速度范围为 $[250, 600]$ m/s; 弹道倾角范围为 $[-20^\circ, 20^\circ]$; 燃料剩余质量(占总燃料质量的百分比)范围为 $[0, 1]$; 气动舵偏角范围为 $[-30^\circ, 30^\circ]$ (只考虑当前模值最大的气动舵偏角)。

对于不同总体飞行状态下的导弹,采用进退法计算导弹在该总体飞行状态下的射后动态可攻击区,具体算法步骤参见文献[1-2]。对空导弹射后动态可攻击区数据库中所有参数组合如图 1 所示,共有 $2 \times 5^5 = 6250$ 组数据,包括最大可攻击区和最小可攻击区。

(2) 神经网络优化和训练

利用 SOS 算法全局优化 BP 神经网络结构和内部参数初值,并用 BP 算法训练网络进行局部搜索,最终得到最优的 BP 神经网络。BP 神经网络仅包含一层隐含层,输出变量为最大拦截边界 R_{\max} ,输入变量为导弹飞行高度、飞行速度、弹道倾角、剩余燃料质量、舵偏角以及拦截目标与导弹高度差、拦截目标速度、拦截目标相对导弹方位角,即:

$$R_{\text{in}} = [H, V, \gamma, m_{\text{Fuel}}, \delta_{\max}, \Delta H, V_T, \eta_T] \quad (3)$$

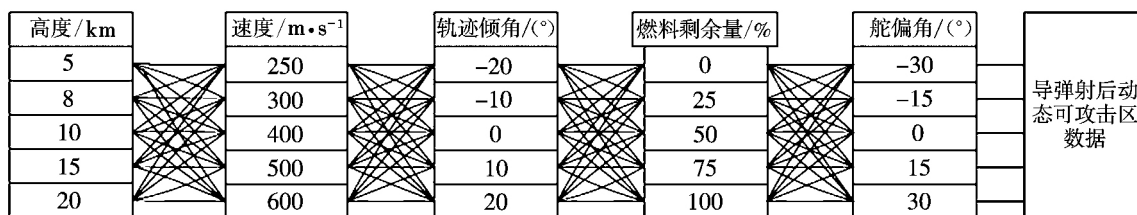


图 1 对空导弹射后动态可攻击区数据库示意图

Fig. 1 Schematic diagram of database of the anti-aircraft missile dynamic attack area after being launched

BP神经网络由输入层、隐含层和输出层构成,神经网络内神经元的传递函数为:

$$\left. \begin{aligned} a &= f_1(\omega_1 p + b_1) \\ y &= f_2(\omega_2 a + b_2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: a 和 b_1 分别为 $M \times 1$ 维的向量,其中 M 为隐含层神经元个数; ω_1 为 $M \times 5$ 维的输入层到隐含层的转换矩阵,转换函数为 $\text{tansig}()$; p 为 5×1 维的输入向量; y 和 b_2 分别为实数; ω_2 为 $1 \times M$ 维的隐含层到输出层的转换矩阵,转换函数为 $\text{purelin}()$ 。

本文采用了一种新型智能优化算法 SOS,同时优化 BP 神经网络结构和初始参数。BP 神经网络结构和参数优化问题描述如下:

BP 神经网络中,训练样本个数为 N 。将式(4)代入式(5),优化变量 $M, \omega_1, \omega_2, b_1$ 及 b_2 ,使式(5)的性能指标最小:

$$J(N, M) = \left\{ N \log \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - y_i)^2 \right] + 4M \right\} + b \quad (5)$$

式中: $b > 0$ 为一个足够大的值。

SOS 算法将所求解的问题抽象成一个生态系统,生态系统中的所有有机个体分别对应所求问题解空间中的一组解,个体的适应度函数就是其解的性能指标。算法的寻优过程是通过模拟生态系统中常见的 3 种生态关系(共生关系、共栖关系和寄生关系),并反复迭代直到搜索到最优解或者满足终止条件。基于 SOS 优化算法的 BP 神经网络结构和参数优化步骤如下:

步骤 1: 初始化生态系统,随机生成 eco_size 个个体, eco_size 为种群规模,其中有机个体构成为 $X_i = [M, \omega_1, \omega_2]$, $M \in [M_{down}, M_{up}]$, M_{down}, M_{up} 分别为 M 的下限和上限; ω_1 为 $7 \times M$ 维的矩阵, ω_2 为 $M \times 1$ 维的矩阵;

步骤 2: 将有机个体和训练样本集合带入 BP 神经网络中训练,用 BP 算法进行局部收敛,将最终误差值和 M 带入式(6)计算个体适应度函数,选出最优个体 X_{best} ;

步骤 3: 执行共生关系操作,在共生关系中,双方个体都能从相互关系中受益。假设生态系统中两个随机个体 X_i 和 X_j 处于共生关系下,鉴于共生的影响,个体 X_i 和 X_j 都会向有益于自身适应度的方向进化。 X_i 和 X_j 的更新函数如下:

$$\left. \begin{aligned} X_{i\text{new}} &= X_i + \text{rand}(0, 1) (X_{best} - V_M BF_1) \\ X_{j\text{new}} &= X_j + \text{rand}(0, 1) (X_{best} - V_M BF_2) \\ V_M &= (X_i + X_j) / 2 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $\text{rand}(0, 1)$ 为 0 到 1 之间的一个随机向量; X_{best}

为生态系统中的最优个体; V_M 为共生向量,表示两个个体的中间点; BF_1, BF_2 为受益因子,由于存在每个个体受益程度不同,所以取值为 1 或 2;

步骤 4: 执行共栖关系操作,在共生关系中,一个个体能够受益,而另一个个体则不受影响。对于第 i 个个体 X_i ,从其他个体中随机选取一个个体 X_j , X_j 不会因为共栖关系的影响而改变自身, X_i 在共栖关系的影响下更新函数为:

$$X_{i\text{new}} = X_i + \text{rand}(-1, 1) (X_{best} - X_j) \quad (7)$$

式中: $\text{rand}(-1, 1)$ 为 -1 到 1 之间的一个随机向量; $(X_{best} - X_j)$ 为由个体 X_j 帮助个体 X_i 提供有益进化方向用来提高 X_i 的适应度函数;

步骤 5: 执行寄生关系操作,在寄生关系中,个体 X_i 会像类似疟蚊的寄生模式一样生成由人工产生寄生向量 V_p , V_p 是生态系统中 X_i 的复制个体,但是个体中某一随机位上的数值被一个随机数代替。 X_j 是从生态系统中剩下的个体中随机选出的一个宿主,若 V_p 的适应度函数小于 X_j ,则 X_j 被 V_p 代替,否则,保留 X_j ;

步骤 6: 判断是否满足终止条件,如果满足,则输出最优解即最优 BP 神经网络,否则,返回步骤 3。

通过 SOS 算法优化得到的 BP 神经网络最优结构参数 $M^*, \omega_1^*, \omega_2^*, b_1^*$ 及 b_2^* 构成改进 BP 神经网络,函数如下:

$$\left. \begin{aligned} a &= f_1(\omega_1^* p + b_1^*) \\ y &= f_2(\omega_2^* a + b_2^*) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将以上得到的最优 BP 神经网络参数输入导弹机载系统,导弹飞行过程中,实时将导弹当前时刻的总体飞行状态量作为 BP 神经网络的输入变量,根据式(8)计算输出量,便可实时得到导弹射后动态可攻击区的拟合数据。

3 实时导弹射后动态可攻击区数值仿真

根据以上的对空导弹优化设计方法,可以得到一个最优 BP 神经网络作为实时导弹射后动态可攻击区的快速拟合方法。将导弹当前飞行总体状态、拦截目标飞行总体状态等变量输入神经网络,便可得到该对空导弹的实时射后动态可攻击区。

SOS 算法的初始设置为:最大迭代数 200 次,种群规模 20,优化后的均方误差可以缩小到 2.45×10^{-5} 。优化性能指标进化曲线如图 2 所示。下面给出两个仿真算例,分别取不同的初始状态,对比导弹射后动态可攻击区的拟合结果和真实结果。

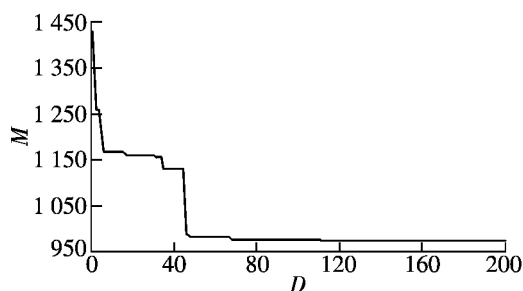


图 2 性能指标进化曲线

Fig. 2 Performance indicator evolution curve

(1) 数值仿真算例 1

设置导弹当前时刻总体飞行状态 $[H, V, \gamma, m_{\text{Fuel}}, \delta_{\text{max}}] \big|_{t=0} = [10 \text{ km}, 300 \text{ m/s}, 0^\circ, 100\%, 0^\circ]$, (以弹体为中心) 导弹在水平面内坐标为 $[0, 0] \text{ m}$, 拦截目标位置位于相对于导弹 $\pm 5 \text{ km}$ 的高度、 $\pm 30^\circ$ 的方位角范围内。导弹射后动态可攻击区的三维仿真结果如图 3 所示。图中, 虚线为飞行仿真所得真实导弹射后动态可攻击区, 点线为 BP 神经网络计算得到的拟合导弹射后动态可攻击区。

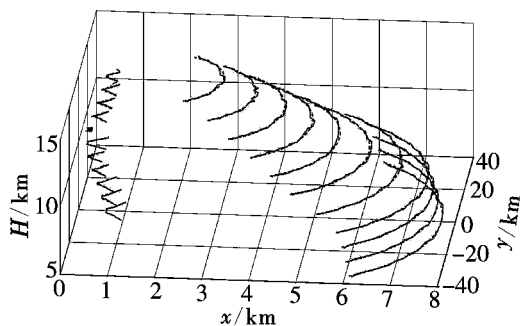


图 3 三维仿真结果 1

Fig. 3 3-D simulation results 1

(2) 数值仿真算例 2

设置导弹当前时刻总体飞行状态 $[H, V, \gamma, m_{\text{Fuel}}, \delta_{\text{max}}] \big|_{t=10} = [8.02 \text{ km}, 443.23 \text{ m/s}, 9.37^\circ, 88.12\%, 27^\circ]$ (以弹体为中心) 导弹在水平面内坐标为 $[0, 0] \text{ m}$, 拦截目标位于相对导弹 $\pm 5 \text{ km}$ 的高度、 $\pm 30^\circ$ 的方位角范围内。导弹射后动态可攻击区的三维仿真结果如图 4 所示(线形说明同图 3)。

以上两个算例分别选取了不同飞行总体状态下的对空导弹射后动态可攻击区进行仿真模拟计算和神经网络拟合。神经网络拟合结果和仿真模拟计算结果的误差如表 1 所示。由表 1 可知, 拟合结果和模拟结果的均方误差最大为 7.1329×10^{-5} , 最大误差最大值为 1235 m , 最小误差最大值为 67.31 m , 考虑模拟结果中步长的误差, 该拟合结果基本可等同于导弹射后动态可攻击区的结果。

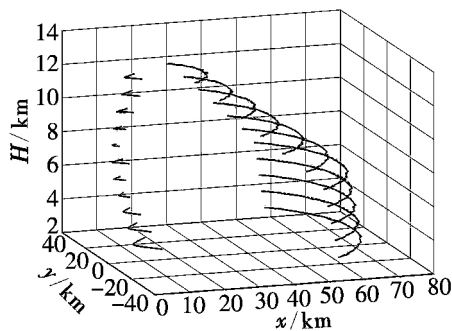


图 4 三维仿真结果 2

Fig. 4 3-D simulation results 2

表 1 仿真算例拟合误差

Table 1 Fitting error of simulation examples

算例	均方误差/m	最大误差/m	最小误差/m
1	2.3521×10^{-5}	607.324	24.867
2	7.1329×10^{-5}	1235.000	67.310

针对同一飞行状态与机动对策的被拦截目标, 导弹飞行过程中利用 BP 神经网络实时计算导弹射后动态可攻击区最大外边界的仿真曲线如图 5 所示。

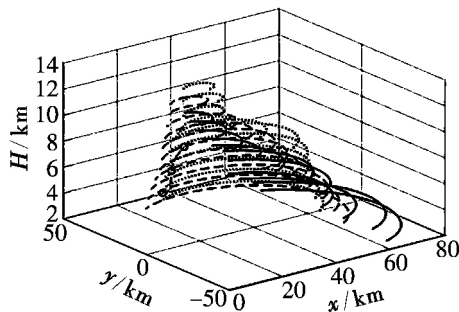


图 5 实时计算仿真曲线

Fig. 5 Real-time computational simulation curves

图 5 中, 点划线表示导弹飞行轨迹, 实线表示导弹射前可攻击区, 虚线表示导弹发射后 10 s 时刻的动态可攻击区, 点线表示导弹发射后 25 s 时刻的动态可攻击区。由仿真结果可知, 导弹射后动态可攻击区并不一定包含于射前可攻击区内^[1]。

4 结束语

本文针对对空导弹射后动态可攻击区实时在线的计算问题, 给出构建导弹射后动态可攻击区的数值算法。仿真结果表明, 该方法所求得的拟合导弹射后动态可攻击区与实际计算结果误差很小, 在实际工程应用中, 如导弹攻防对抗、群体导弹拦截一体化协同等, 能够实时在线计算导弹射后动态可攻击区, 在现代与未来导弹技术研究中有很广泛的工程

应用前景。

参考文献:

- [1] 吴胜亮,南英.空空导弹射后动态可攻击区计算[J].弹箭与制导学报,2013,33(5):49-54.
- [2] Hui Y L,Nan Y,Chen S D,et al. Dynamic attack zone of air-to-air missile after being launched in random wind field[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2015,28(5):1519-1528.
- [3] 杜昌平,周德云,江爱伟.一种空空导弹可攻击区快速算法[J].西北工业大学学报,2006,24(6):682-685.
- [4] 杜昌平,周德云,江爱伟.空空导弹可攻击区的递推算法研究[J].弹箭与制导学报,2005,25(S5):632-634.
- [5] 李强,夏群利,崔莹莹,等.空地制导炸弹可攻击区的快速解算方法[J].兵工学报,2012,33(4):390-394.
- [6] 黄国强,南英,陈芳,等.风场中无动力滑翔弹可攻击区研究[J].飞行力学,2008,26(4):47-50.
- [7] 吴胜亮,南英,黄国强,等.随机风场与升阻比误差对空空导弹可攻击区的敏感度研究[J].弹道学报,2012,24(2):25-30.
- [8] 惠耀洛,南英,陈哨东.舰空导弹在随机环境中的攻击区仿真[J].指挥控制与仿真,2015,37(2):92-97.
- [9] Cheng M Y,Prayogo D. Symbiotic organisms search: A new metaheuristic optimization algorithm[J]. Computers and Structures,2014,139(15):98-112.

(编辑:方春玲)

(上接第34页)

- [6] Sujit P B,Saripalli S,Sousa J B. An evaluation of UAV path following algorithms[C]//IEEE 2013 European Control Conference. Zürich,Switzerland: IEEE,2013:3332-3337.
- [7] 钱志丛.无人机编队飞行队形控制研究[D].厦门:厦门大学,2015.
- [8] Desai J P. A graph theoretic approach for modeling mobile robot team formations[J]. Journal of Robotic Systems,2002,19(11):511-525.
- [9] Arnold I V. Mathematical methods of classical mechanics[M]. Germany: Springer,1978,75-97.
- [10] Ge S S,Cui Y J. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method[J]. Autonomous Robots,2002,13(3):207-222.
- [11] 常凯,黄考利,马代亮.无人机编队对地面目标追踪问题研究[J].电光与控制,2016,23(6):11-15.
- [12] 王伟,王华.基于约束人工势场法的弹载飞行器实时避障航迹规划[J].航空动力学报,2014,29(7):1738-1743.
- [13] 殷路,尹怡欣.基于动态人工势场法的路径规划仿真研究[J].系统仿真学报,2009,21(11):3325-3341.
- [14] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[C]//International Conference on Robots and Automation. St. Louis: IEEE,1986:500-505.
- [15] Jain A. Unified formulation of dynamics for serial rigid multibody systems[J]. Journal of Guidance,Control and Dynamics,1991,14(3):531-542.
- [16] Reza O S,Richard M M. Graph rigidity and distributed formation stabilization of multi-vehicle systems[C]//Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control. Las Vegas,NV: IEEE,2002:2965-2971.
- [17] Wang J G,Gosselin C M,Cheng L. Modeling and simulation of robotic systems with closed kinematic chains using the virtual spring approach[J]. Multibody System Dynamics,2002,7(2):145-170.
- [18] Rengifo C,Aoustin Y,Chevallereau C,et al. A penalty-based approach for contact forces computation in bipedal robots[C]//IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Paris,France: IEEE,2009:121-127.

(编辑:方春玲)

(上接第38页)

- [4] 卢飞,张兆宁,魏志强,等. 近距平行跑道配对进近纵向碰撞风险安全评估[J]. 中国安全科学学报,2013,23(8):108.
- [5] 王维,王美玲,潜雪冰. 机场近距平行跑道间距和入口错开的选择研究[J]. 中国民航大学学报,2011,29(2):23-26.
- [6] 朱博. 近距平行跑道运行碰撞风险评估研究[D]. 天津:中国民航大学,2016.
- [7] ICAO. Manual on simultaneous operations on parallel or near-parallel instrument runways(SOIR)[M]. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization,2004.

(编辑:方春玲)