

【引用格式】祝明思, 张霄, 王红雨, 等. 基于改进近似模型的水下鱼雷打靶快速预报方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(3): 325-331.

基于改进近似模型的水下鱼雷打靶快速预报方法

祝明思¹, 张霄², 王红雨¹, 张焯³

1. 武汉理工大学 船海与能源动力工程学院, 湖北 武汉 430000;
2. 海装驻北京地区第四军事代表室, 北京 100094;
3. 中国船舶集团有限公司系统工程院, 北京 100094)

摘要 鱼雷打靶试验对评价武器系统对目标的打击性能具有重要意义。水动力参数是模拟鱼雷水下运动轨迹、预报鱼雷打靶落点的关键参数。随着现代 CFD 技术的发展, 采用数值方法获取水动力参数, 提高了轨迹预报精度, 但计算效率不高, 不利于多工况下鱼雷打靶预报。首先, 基于刚体动量和动量矩定理建立了鱼雷的水下运动方程组, 运用 4 阶龙格-库塔 (Runge-Kuta) 法对运动方程组进行数值求解, 对鱼雷水下轨迹进行模拟, 从而获取鱼雷打靶性能。其次, 提出了基于遗传算法的近似模型 (GA-BP) 和自适应遗传算法优化的近似模型 (AGA-BP) 模拟鱼雷水下打靶落点, 对鱼雷打靶性能进行快速预报。通过仿真和数据对比, 结果表明: AGA-BP 预测模型相对于 BP 预测模型更稳定、GA-BP 预测模型收敛速度更快, 实现对鱼雷水下打靶快速预报。

关键词 鱼雷打靶; 近似模型; BP 神经网络; 自适应遗传算法 (AGA)

中图分类号 U661.1 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2023)03-0325-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.03.009

Fast Prediction Method of Underwater Torpedo Targeting Based on Improved Approximate Model

ZHU Mingsi¹, ZHANG Xiao², WANG Hongyu¹, ZHANG Ye³

1. School of Naval Architecture, Ocean and Energy Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China;
2. The Fourth Military Representative Office of Beijing Naval Equipment Department, Beijing 100094, China;
3. Systems Engineering Research Institute, CSSC, Beijing 100094, China)

Abstract Torpedo targeting experiment is of great significance to evaluate the striking performance of weapon systems against targets, in which hydrodynamic parameters are the key link to accurately predict the trajectory. With the development of modern CFD technology, numerical methods are used to obtain hydrodynamic parameters, which can improve the forecast accuracy, but the computational efficiency is not high, which is not conducive to the prediction of torpedo targeting under multiple working conditions. In this paper, we firstly establish a set of underwater equations of motion for torpedoes based on rigid body momentum and momentum moment theorems, and also numerically solve the established set of equations of motion by using the 4th order Runge-kuta method. Then an approximate model based on genetic algorithm (GA-BP) is proposed on the basis of the BP model, after which the model is optimized and an approximate model optimized by adaptive genetic algorithm (AGA-BP) is proposed. Finally, simulations and data comparison of the three models are conducted, and the results show that the AGA-BP prediction model is more stable and the GA-BP prediction model converges

收稿日期: 2023-03-22

作者简介: 祝明思 (1995-), 男, 硕士生, 主要从事船舶水动力研究。

faster compared to the BP prediction model.

Key words torpedo targeting; approximate model; BP neural network; adaptive genetic algorithm (AGA)

0 引言

水下靶标能够为鱼雷试验提供模拟目标,是模拟战场环境的重要手段,在部队开展试验、训练、演练的过程中起着不可替代的作用^[1]。在鱼雷实航打靶试验中快速预报鱼雷攻击靶标的位置,对于试验的准确测量、数据结果分析、提高鱼雷命中效果以达到最大毁伤有重要的现实意义。

鱼雷运动轨迹预报是快速预报鱼雷打靶落点的基础。鱼雷水下运动轨迹可以通过水下弹道设计数学模型进行预报,其中准确预估水动力参数是关键。通常,水动力参数可以通过理论计算或模型实验间接获得,但理论计算精度不高,模型实验成本高。随着现代 CFD 技术的发展,基于 CFD 方法可以获取水动力参数,该方法轨迹预报精度较高,但仍需要一定的计算资源及时间,不利于多工况下鱼雷打靶预报。本文基于近似模型^[2-3]技术对鱼雷水下打靶落点进行快速预报,并对传统的 BP 近似模型技术进行改进,实现快速有效鱼雷水下打靶预报,为数值模拟鱼雷水下弹道和打靶试验提供技术途径。

近似模型是指在保证一定精度前提下构建一个计算量小、计算周期短但计算结果与数值分析或物理实验结果接近的数学模型。其中,基于 BP 神经网络的近似模型技术的应用已相当广泛^[4],但传统的 BP 网络采用梯度下降法进行网络权值及阈值的调整,不可避免的会存在算法学习速度慢、容易收敛于局部最优等缺陷^[5]。针对这些缺陷,可通过改进 BP 网络学习算法和学习速率,以及采用其它优化算法(如粒子群算法 (PSO)^[6]、遗传算法 (GA)^[7])优化 BP 神经网络的初始权值、阈值、网络结构等。

本文首先基于运动学方程和动力学方程求解鱼雷运动轨迹,进而获取鱼雷水下打靶性能;然后将遗传算法 (GA)与 BP 神经网络相结合,采用遗传算法优化的 BP 网络模型 (GA-BP)和基于自适应遗传算法优化的 BP 网络模型 (AGA-BP),以增强模型收敛速度;最后基于 3 种模型对鱼雷打靶落点进行预报,对比分析预报结果。

1 鱼雷水下打靶预报

1.1 运动坐标系

本文基于鱼雷水下运动轨迹给出鱼雷打靶落点,需确定坐标系。本文所涉及的坐标系主要包括地面坐标系、弹体坐标系、速度坐标系。

地面坐标系 $ox_0y_0z_0$ 用来描述鱼雷在空间中的位置,它的各轴与大地固连(相对于地面静止不动),坐标原点 o 选在发射管管口的中心在水平面上的投影点, ox_0 轴位于水平面内; oy_0 轴铅直向上; oz_0 轴与 oy_0 、 ox_0 构成右手坐标系。

鱼雷(后将鱼雷称为弹体)坐标系 $oxyz$ 也是固连坐标系,它以弹体的浮心作为坐标原点 o , ox 轴沿弹体纵轴指向前方; oy 轴在弹体纵对称面内且垂直于 ox 轴指向上方; oz 轴与 ox 、 oy 构成右手系。

速度坐标系 $ox_1y_1z_1$ 的原点 o 为弹体的浮心, ox_1 轴与原点处弹体的速度矢量重合; oy_1 轴位于鱼雷的纵对称面内,与 ox_1 轴垂直并指向上方; oz_1 轴垂直于 x_1oy_1 平面,指向按右手坐标系确定,如图 1 所示。

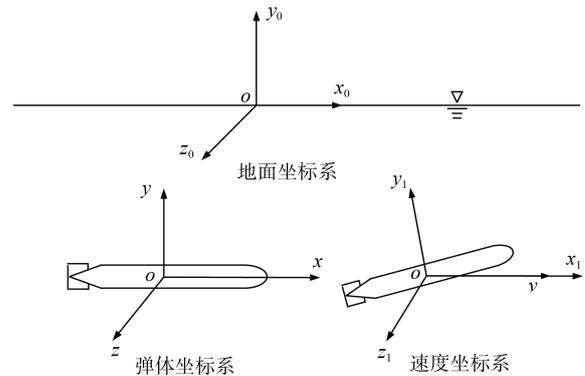


图 1 地面、弹体与速度坐标系

Fig. 1 Ground, torpedo, and velocity coordinate systems

1.2 鱼雷运动轨迹求解

1) 动力学方程。

作用在鱼雷上的力和力矩主要有重力、浮力、流体动力、流体阻力、流体动力矩、流体阻力矩等。根据动量定理以及动量矩定理,建立鱼雷水中运动的动力学方程组如下:

$$A_{m\lambda} \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \\ \dot{v}_z \\ \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y & 0 & 0 & 0 \\ \omega_z & 0 & -\omega_x & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_y & \omega_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -v_z & v_y & 0 & -\omega_z & \omega_y \\ v_z & 0 & -v_x & \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -v_y & v_x & 0 & -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{\alpha\mu} + X_B + X_G + X_T \\ Y_{\alpha\mu} + Y_{\omega\mu} + Y_B + Y_G \\ Z_{\alpha\mu} + Z_{\omega\mu} + Z_B + Z_G \\ M_{\alpha\mu x} + M_{\omega\mu x} + M_{Gx} \\ M_{\alpha\mu y} + M_{\omega\mu y} + M_{Gy} \\ M_{\alpha\mu z} + M_{\omega\mu z} + M_{Gz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$A_{m\lambda} = \begin{bmatrix} m + \lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & mz_t & -my_t \\ 0 & m + \lambda_{22} & 0 & -mz_t & 0 & mx_t + \lambda_{26} \\ 0 & 0 & m + \lambda_{33} & my_t & -mx_t + \lambda_{35} & 0 \\ 0 & -mz_t & my_t & J_{xx} + \lambda_{44} & 0 & 0 \\ mz_t & 0 & -mx_t + \lambda_{35} & 0 & J_{yy} + \lambda_{55} & 0 \\ -my_t & mx_t + \lambda_{26} & 0 & 0 & 0 & J_{zz} + \lambda_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m 为鱼雷质量; x_t, y_t, z_t 为鱼雷的浮心到质心的矢径在弹体坐标系下的分量; v_x, v_y, v_z 为鱼雷浮心处的速度矢量在弹体坐标系下的分量; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 为鱼雷浮心处的角速度矢量在弹体坐标系下的分量; J 为鱼雷的转动惯量矩阵, 根据鱼雷的对称特征, 可表示为鱼雷相对于弹体坐标系的 3 个轴的转动惯量 J_x, J_y, J_z ; λ_{jk} 为附加质量, j 依次为 1、2、3、4、5、6, k 依次为 1、2、3、4、5、6。

2) 运动学方程。

式中:

$$C_0^b = \begin{pmatrix} \cos\psi \cos\theta & -\cos\psi \sin\theta \cos\varphi + \sin\psi \sin\varphi & \cos\psi \sin\theta \sin\varphi + \cos\varphi \sin\psi \\ \sin\theta & \cos\varphi \cos\theta & -\cos\theta \cos\varphi \\ -\sin\psi \cos\theta & \sin\psi \sin\theta \cos\varphi + \sin\varphi \cos\psi & -\sin\psi \sin\theta \sin\varphi + \cos\psi \cos\varphi \end{pmatrix} \quad (5)$$

该式是鱼雷弹体坐标系到地面坐标系的转换矩阵。

3) 运动方程组求解。

结合运动学方程和动力学方程, 采用数值差分的方法可以得到所要求精度的解。龙格-库塔 (Runge-Kuta) 方法是一种具有很高精度的单步算法, 可以通过调节步长来减少误差, 计算稳定, 并且具有计算过程简单无须求解高阶导数等特点。本文采用工程中最常见的四阶 Runge-kuta 方法。

对于一般微分方程组:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = f_1(t, y_1, y_2, \dots, y_n) \\ \dots \\ \dot{y}_n = f_n(t, y_1, y_2, \dots, y_n) \end{cases} \quad (6)$$

鱼雷水下运动转动方程为

$$\begin{cases} \omega_x = \frac{d\varphi}{dt} + \frac{d\psi}{dt} \sin\theta \\ \omega_y = \frac{d\psi}{dt} \cos\theta \cos\varphi + \frac{d\theta}{dt} \sin\varphi \text{ 或} \\ \omega_z = \frac{d\theta}{dt} \cos\varphi - \frac{d\psi}{dt} \cos\theta \sin\varphi \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega_y \sin\varphi + \omega_z \cos\varphi \\ \frac{d\psi}{dt} = \omega_y \sec\theta \cos\varphi - \omega_z \sec\theta \sin\varphi \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega_x - \omega_y \tan\theta \cos\varphi + \omega_z \tan\theta \sin\varphi \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ 为俯仰角; ψ 为偏航角; φ 为横滚角。鱼雷浮心在地面坐标系中的位置设为 (x, y, z) , 于是鱼雷的浮心速度在地面坐标系的分量为 $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 。于是就可以得到鱼雷的运动学方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = C_0^b \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

采用四阶 Runge-Kuta 方法求解:

$$\begin{cases} y_{i,j+1} = y_{i,j} + \frac{h}{6}(K_{i,1} + 2K_{i,2} + 2K_{i,3} + K_{i,4}) \\ K_{i,1} = f_i(t_j, x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{n,j}) \\ K_{i,2} = f_i(t_j + \frac{h}{2}, x_{1,j} + \frac{1}{2}k_{1,1} + \dots, x_{n,j} + \frac{1}{2}k_{n,1}) \\ K_{i,3} = f_i(t_j + \frac{h}{2}, x_{1,j} + \frac{1}{2}k_{1,2} + \dots, x_{n,j} + \frac{1}{2}k_{n,2}) \\ K_{i,4} = f_i(t_j + h, x_{1,j} + k_{1,3} + \dots, x_{n,j} + k_{n,3}) \end{cases} \quad (7)$$

1.3 鱼雷打靶性能计算

鱼雷打靶试验中, 根据鱼雷水下预报轨迹计算落在标靶范围内的落点 (轨迹与标靶平面的交点), 根

据实际打靶需要，确定标靶范围，判断落点是否落在标靶内，通过多次试验确定鱼雷打靶性能。

决定鱼雷水下空间运动轨迹的因素有很多，而鱼雷轨迹预报精度直接影响鱼雷打靶性能。文献[8]指出，鱼雷的初始运动学参数对鱼雷水下运动影响最大。因此本文在计算鱼雷落点时，对鱼雷初始发射条件（如初始速度）中加入随机扰动项，计算鱼雷水下运动轨迹，从而获取鱼雷的打靶落点，基于多次试验结果使用蒙特卡洛法统计分析打靶效果。

图 2 为某一初始条件下的水下鱼雷运动轨迹图。将初始条件加入随机扰动项进行蒙特卡洛打靶，得到 n 个打靶落点 $[x_i, z_i]$ ，计算落在标靶范围内的点，对蒙特卡洛打靶结果进行统计分析，鱼雷落点的数学期望值和方差计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \\ \bar{z} &= \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \\ \sigma_x &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \\ \sigma_z &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

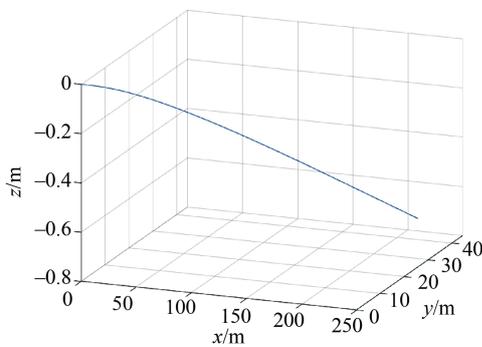


图 2 水下鱼雷打靶落点图

Fig. 2 Underwater torpedo trajectory

根据鱼雷落点散布的方差 σ_x 和 σ_z ，进一步可以获得鱼雷打靶的圆概率误差（CEP）^[9]：

$$C_{EP} = \begin{cases} 0.615\sigma_x + 0.562\sigma_z & (\sigma_x \leq \sigma_z) \\ 0.615\sigma_z + 0.562\sigma_x & (\sigma_x > \sigma_z) \end{cases} \quad (9)$$

2 基于遗传算法的近似模型

采用 CFD 仿真获取水动力参数，需要建立仿真模型、划分系统空间网格、录入样本、迭代计算、获

得仿真结果等过程，计算量大。而蒙特卡罗法打靶需要大量的落点，每个落点采用 CFD 计算将耗费大量的计算资源。本文提出近似模型技术对鱼雷打靶性能进行快速预报，以兼顾预报计算精度和效率。

采用 BP 神经网络近似模型是常用的近似模型，但易于陷入局部最优解，遗传算法强大的全局寻优能力对 BP 算法是很好的补充。遗传算法是模拟自然界生物遗传和进化原理而构想出来的一种随机寻优搜索方法。自适应遗传算法对遗传算法的交叉和变异概率做了改进，其优化 BP 的过程与单纯的遗传算法优化 BP 网络相同。具体的流程图如图 3 所示。

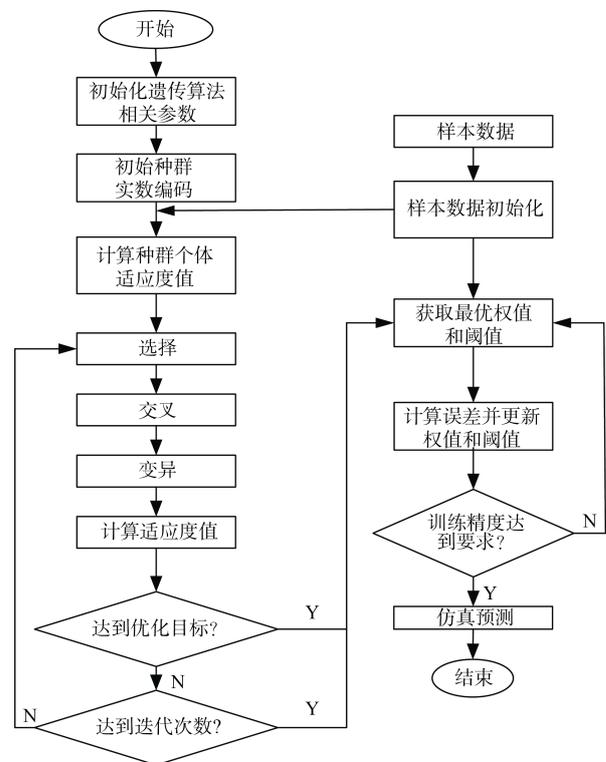


图 3 遗传算法优化 BP 流程图

Fig. 3 Flow chart of BP optimization by genetic algorithm

针对遗传算法存在的不足，本文采用了交叉概率、变异概率自适应的算法。

1) 交叉操作。

交叉是遗传算法的核心操作之一，对种群进化起到了至关重要的推动作用。交叉是种群中 2 个个体部分基因交换从而形成新个体的方法。其计算公式如下：

$$\begin{aligned} X^{i+1} &= rY^i + (1-r)X^i \\ Y^{i+1} &= rX^i + (1-r)Y^i \end{aligned} \quad (10)$$

式中: X, Y 为种群中 2 个个体; i 表示进化的代数; r 表示交叉参数。

交叉操作是基于一定的概率条件下发生的, 这个概率称为交叉概率, 它反映的是种群中 2 个个体发生交叉的可能性。Srinivas^[10]针对标准遗传算法的缺陷提出了自适应遗传算法, 具体做法是使交叉和变异概率自适应调整:

$$P_c = \begin{cases} \frac{k_1(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{ave}}} & f' \geq f_{\text{ave}} \\ k_2 & f' < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: f_{ave} 、 f_{\max} 分别为种群适应度平均值、最大适应度值; f' 表示 2 个个体中适应度较大的值; k_1, k_2 以及下文的 k_3, k_4 均为 [0, 1] 内的常数。

2) 变异操作。

遗传算法中变异是交叉操作的补充, 变异操作在于对种群个体基因进行微调, 有利于种群进化后期个体收敛到最优解。其计算式如下:

$$x_{i+1} = \begin{cases} 1 - x_i, U(0,1) < P_m \\ x_i, \text{other} \end{cases} \quad (12)$$

x_i 为第 i 代种群个体某个基因编码值。

同样, 自适应变异算子如下:

$$P_m = \begin{cases} \frac{k_3(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{ave}}} & f \geq f_{\text{ave}} \\ k_4 & f < f_{\text{ave}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: f 为进行变异的个体适应度值。

3 仿真结果

3.1 鱼雷打靶落点计算

鱼雷初始运动学参数包括 $v_x, v_y, v_z, \theta, \psi, \varphi, \omega_x, \omega_y, \omega_z$, 本文假设初始发射条件 v_x, v_y, v_z 是服从正态分布的统计特征量。预测模型的输入为上述 9 个初始运动参数, 输出为鱼雷质心对应 x, y 的值。

以一定的初始条件从原点发射鱼雷, 取 $y=40$ m 平面为鱼雷靶平面, 将打靶次数设为 100, 加载随机干扰进行蒙特卡洛打靶, 得到鱼雷在 Ozx 靶平面内落点的分布情况如图 4 所示。图中, “*” 为受扰鱼雷落点在靶平面的散布, “☆” 为散布点的均值, 即期望弹着点。

对蒙特卡洛打靶结果进行统计分析, 鱼雷落点的数学期望值和方差如表 1 所示。

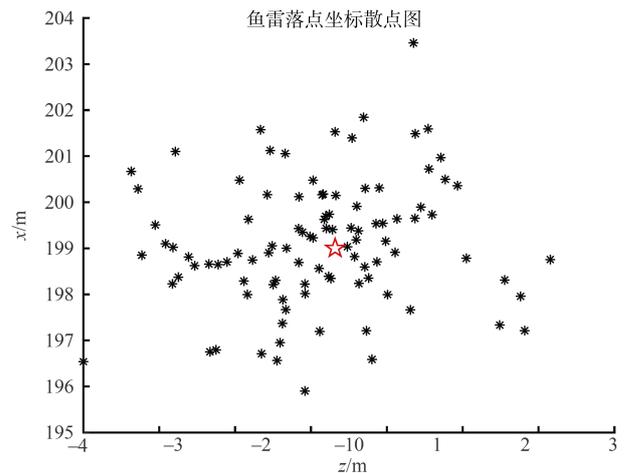


图 4 鱼雷打靶落点图

Fig. 4 Underwater torpedo trajectory

表 1 鱼雷落点参数统计值

Table 1 Parameter statistics of torpedo impact points

| 统计量 | 期望值/m | 方差值/m |
|-------|----------|---------|
| x 轴落点 | 199.049 | 1.371 3 |
| z 轴落点 | -0.659 3 | 0.316 2 |

从计算机蒙特卡洛打靶仿真可得, 采用蒙特卡洛法对鱼雷进行 100 次模拟打靶, 能快速仿真得到鱼雷的命中精度; 鱼雷的落点在 Ozx 靶平面内分布密集程度高, 其散布服从正态分布规律, 且平均落点位于靶平面的中心位置; 由表 1 中鱼雷落点参数的统计量可知, 鱼雷的期望落点与理想落点 $(-0.682 2, 199.344 0)$ 十分接近, 且落点在两轴向的方差都较小, 说明鱼雷在受到一定干扰因素作用时, 仍能达到较高的命中精度; 由式 (9) 计算得到鱼雷 CEP=0.96 m, 鱼雷的命中精度较高。

3.2 基于近似模型鱼雷打靶预报

基于鱼雷运动轨迹数学模型, 分别搭建基于 BP 神经网络、遗传算法优化的 BP 网络和自适应遗传算法优化的 BP 神经网络鱼雷打靶落点预测模型, 并通过仿真和测试数据对 3 种模型进行对比分析, 初始发射条件是服从一定统计特征的随机变量。本文假设初始发射条件是服从正态分布的统计特征量, 之后基于鱼雷轨迹方程求得鱼雷落点坐标由此构成原始数据, 从原始数据当中随机挑选部分数据作为 BP 网络的训练样本点, 最后利用原始数据中剩余数据作为验证样本点验证所建鱼雷打靶落点预测模型的准确性, 仿真结果如图 5、图 6 所示。

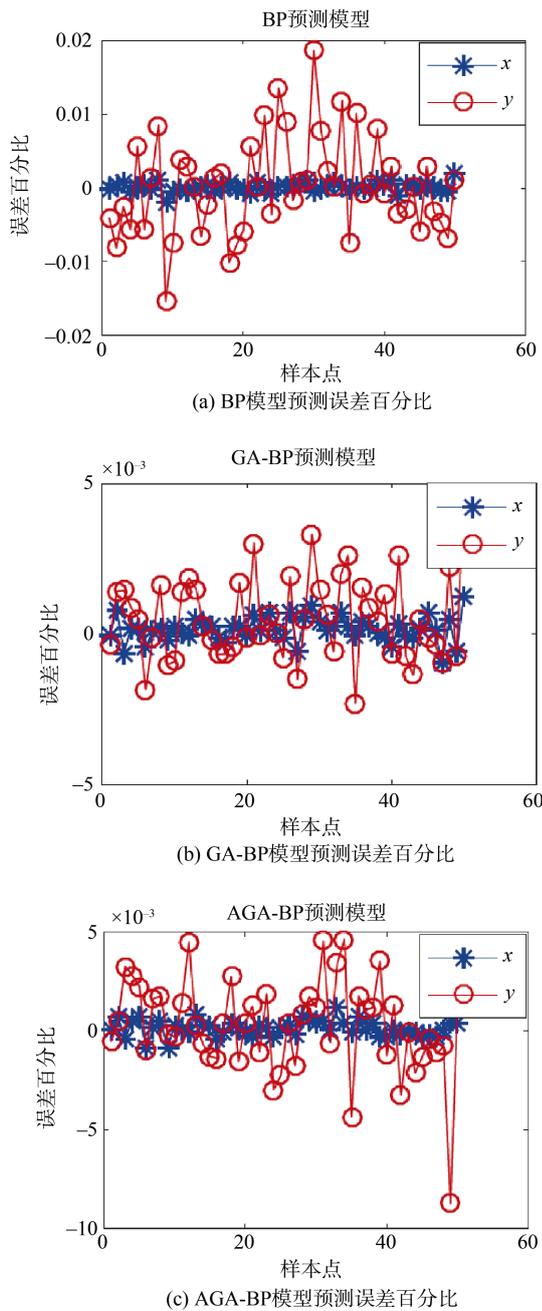


图5 基于BP、GA-BP、AGA-BP模型预测误差百分比

Fig. 5 Percentage of prediction error based on BP, GA-BP, and AGA-BP models

从图5可以看出，对于相同的训练样本，基于AGA-BP模型和基于GA-BP模型对于鱼雷落点的预测效果明显更佳。对于鱼雷落点坐标x，3种预测模型的预测效果差别不大，BP模型的预测误差大致在0.1左右，而其它2种预测模型大部分落点坐标x误差均在0.05的范围以内，从预测误差及误差百分比

来看，AGA-BP和GA-BP模型相对于BP模型预测稍稍占优。对于落点坐标y，近似模型的预测精度起伏略大，但误差仍在1%以内，基本满足工程需要。

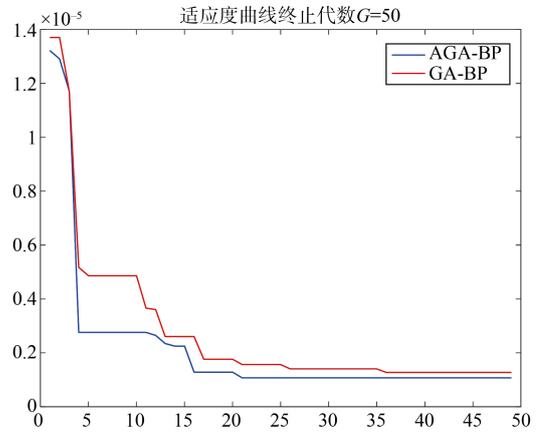


图6 改进前后算法适应度

Fig. 6 Adaptation of the algorithm before and after improvement

图6显示AGA-BP模型在第21代时已经收敛，反映出了相对于GA-BP模型，AGA-BP模型有更快的收敛速度。为了进一步说明AGA-BP模型和GA-BP模型相对于单纯的BP模型的预测效果更佳。本文针对相同的训练样本对3种模型均做10次训练，取10次训练后3种模型验证样本点的均方误差（Mean Square Error, MSE）的平均值作为对比。

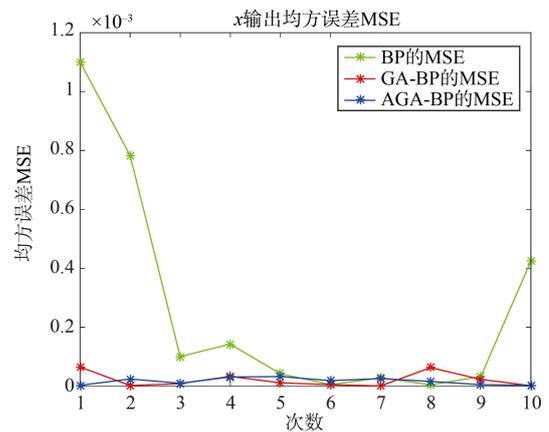


图7 输出坐标均方误差

Fig. 7 Mean square error of output coordinates

从图7可以看出，针对相同的训练样本点，3种预测模型的验证样本点均方误差（MSE）存在差异，以x坐标为例，BP预测模型的平均预测精度不如AGA-BP和GA-BP模型，说明遗传算法优化后的BP网络模型

在一定程度上提升了鱼雷落点的预测精度。传统 BP 算法是基于梯度下降法的一种算法,很容易收敛到局部最优解,网络训练以及预测效果在一定程度上依赖于网络初始权值和阈值的赋值,从图 6 中 BP 预测模型的 MSE 也可以看出, BP 预测模型预测误差不稳定,预测精度波动比较大,有时候训练不能收敛到预设训练精度。而经过遗传算法优化后的 GA-BP 预测模型及 AGA-BP 预测模型明显具有更好的稳定性,预测误差均能达到较为满意的结果,与此同时,AGA-BP 模型收敛速度相对于 GA-BP 预测模型更快。

4 结束语

本文建立了鱼雷水下运动轨迹数学求解模型,之后提出了基于 AGA-BP、GA-BP 以及 BP 鱼雷打靶落点预测模型,产生合适数量的预测模型训练样本点,对 3 种鱼雷落点预测模型进行了训练以及验证,最终通过数据对比分析得出了 AGA-BP 预测模型相对于 BP 预测模型更稳定、GA-BP 预测模型收敛速度更快的结论。

本文采用近似模型技术对鱼雷水下打靶落点进行了快速预测,相比较于直接 CFD 数值仿真,节约了时间成本;针对 BP 易陷于局部最优化的缺陷,基于自适应遗传算法优化的 BP 神经网络模型,提高了预报的稳定性和快速性。

参考文献

[1] 邓伟,苏建军.水下靶标基于鱼雷攻击方位模拟潜艇

多亮点仿真[C]//中国声学学会水声学分会 2019 年学术会议.中国声学学会水声学分会 2019 年学术会议论文集.西安:中国声学学会水声学分会,2019.

- [2] EKINCI S, CELEBI U B, BAL M, et al. Predictions of oil/chemical tanker main design parameters using computational intelligence techniques[J]. Applied Soft Computing, 2011, 11 (2): 2356-2366.
- [3] 杨晓光,陈焕龙,刘华坪,等.导弹水下运动及出水过程的三维流场仿真[J].弹道学报,2010,22(1): 107-110.
- [4] RUMELHART D E, HINTON G E, WILLIAMS R J. Learning representations by back-propagating errors[J]. Nature, 1986, 323 (6088): 533-536.
- [5] 孙一兵.浅议 BP 网络的优缺点及改进[J].科技创新导报,2009(24): 18.
- [6] SHAO Y, WITARSYAH D. Fast recognition method of moving video images based on BP neural networks[J]. Open Physics, 2018, 16 (1): 1024-1032.
- [7] 任浩然.基于自适应遗传算法优化的 BP 神经网络股价预测模型[D].延安:延安大学,2017.
- [8] 葛晖.潜射导弹发射安全性研究[D].西安:西北工业大学,2004.
- [9] 王华,徐军,张芸香.基于 Matlab 的弹道蒙特卡洛仿真研究[J].弹箭与制导学报,2005(S1): 181-183.
- [10] SRINIVAS M, PATNAILK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1994, 24 (4): 656-667

(责任编辑:肖楚楚)