

鱼雷攻潜雷目交会态势线性回归预测方法研究

韩大伟*, 董金鑫, 黄伟佳, 聂神送

中国人民解放军92337部队, 辽宁 大连

收稿日期: 2021年12月24日; 录用日期: 2022年1月14日; 发布日期: 2022年1月26日

摘要

鱼雷攻潜雷目交会态势是潜艇毁伤评估的重要一环。本文以一种鱼雷攻击潜艇模型仿真试验数据为基础, 建立一种雷目交会态势的线性回归预测方法, 通过全样本、相似样本和随机样本三种训练样本检验该方法的预测准确度, 并对比分析了这三种训练样本选择方案下的预测效果, 结果表明以相似样本作为训练样本方案下预测效果最优, 研究结果为鱼雷攻击潜艇时雷目交会态势分析提供了一种新的思路和方法。

关键词

潜艇, 交会态势, 线性回归, 预测函数, 相似样本

Study on the Encountering Situation Predicting Method by Linear Regression for Torpedo Attacking Submarine

Dawei Han*, Jinxin Dong, Weijia Huang, Shensong Nie

The No. 92337 Troop of PLA, Dalian Liaoning

Received: Dec. 24th, 2021; accepted: Jan. 14th, 2022; published: Jan. 26th, 2022

Abstract

The Encountering Situation for torpedo attacking submarine has great influence on the damage evaluation of the submarine. Based on the simulative test data of torpedo attacking submarine, a torpedo-target's encountering situation predicting method by linear regression was proposed. Full sample, similar sample and random sample were selected as the training sample to test the predicting accuracy, and the predicting effects were contrastively analyzed with each other, which

*通讯作者。

revealed that it has the best predicting effect to select the similar sample as the training sample. The research proposed a new kind of line and method to study the torpedo-target's encountering situation.

Keywords

Submarine, Encountering Situation, Linear Regression, Prediction Function, Similar Sample

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

鱼雷攻击潜艇的雷目交会态势,指的是潜艇遭受鱼雷攻击被命中时鱼雷引信动作瞬间战斗部与潜艇的相对位置,它是潜艇毁伤评估的重要初始条件。近年来,随着潜艇装备实战化研究的不断深入,传统的单纯分析鱼雷命中概率的方法已经无法适应潜艇毁伤精准评估的需求,主要有三个方面原因:其一,鱼雷命中部位的不同对潜艇结构造成的毁伤程度是不同的;其二,鱼雷命中部位的不同对潜艇生命力(尤其是水下损管抗沉能力)的影响是不同的;其三,由于潜艇功能舱室划分和各设备布局不同,鱼雷命中部位的不同对潜艇作战能力造成的影响是不同的。基于此,在潜艇装备等水下目标毁伤评估领域,针对雷目交会态势的研究逐渐成为重难点问题。

对于鱼雷攻潜雷目交会态势分析,实装试验无疑是最可靠的研究手段,实装试验无疑是最可靠的研究手段,但鱼雷水下末端弹道测量难度大,且试验风险和成本难以有效管控,加之各国技术保密等原因,雷目交会态势的试验数据未见公开报道。随着计算机仿真技术在军事领域的大量应用,以往很多学者基于一定合理假设,依靠建模仿真手段对鱼雷攻击潜艇问题开展了大量有益探索研究[1] [2] [3] [4] [5],吴晓海等[1]基于极限攻击角分析,研究了潜射鱼雷攻击时可攻区域的影响因素及变化规律;刘勇等[2]基于鱼雷航程实时预报研究了潜射线导鱼雷可攻性的一种判断方法;李微波等[3]仿真分析了线导鱼雷现在方位导引攻击的可行域,表明该可行域可近似为一个前突的圆;董严红等[4]通过对大量样本建模仿真,分析得出鱼雷纯方位攻击时不同情况下的最优解;以上研究对于鱼雷作战运用中如何设定发射参数、选择有利攻击阵位以提高鱼雷命中概率具有较好的指导借鉴意义,但对于鱼雷命中目标部位无法给出分析估计。文献[5]通过分析鱼雷和潜艇的水平面运动控制方程,给出了一种用于雷目交会态势定量分析的分步时间增量法,但该仿真方法建模分析过程相对较为复杂,在潜艇规避鱼雷作战运用中急需建立一种较为快速准确的雷目交会态势预测估计方法。近年来,人工智能理论与应用研究不断深入,各类机器学习算法依托历史数据对结果表现出良好的预测效果,因而在多个领域展现出强大的应用前景。卫一慢等[6]建立了灰色加权关联方法与多尺度最小二乘支持向量机组合的学习模型,较好地解决了备件消耗与其影响因素之间的非线性关系;刘忠宝[7]提出一种用于风速预测的模糊流形支持向量机,将分布形状、边界信息以及局部流形作为分类的重要参考,可减少噪声对分类决策的影响;马家欣等[8]通过改变重要度权重系数适应不同的现场需求以提高预测精度,提出一种带有外部输入的线性/非线性自回归模型,但该模型结构相对冗长且适用性检验尚无成熟统一的理论方法。

本文以一种鱼雷攻击潜艇模型仿真试验数据为基础,建立一种雷目交会态势的线性回归预测方法,通过全样本、相似样本和随机样本三种训练样本检验该方法的预测准确度,并对比分析了这三种训练样

本选择方案下预测函数的预测效果, 研究结果为鱼雷攻击潜艇时雷目交会态势分析提供了一种新的思路和方法。

2. 鱼雷攻潜雷目交会态势问题描述

潜艇遭受线导鱼雷攻击, 鱼雷航向始终指向潜艇的几何中心位置, $t=0$ 时刻潜艇发现鱼雷来袭并立即采取转向机动措施规避, 完成预定转向角 φ 后直航, 鱼雷来袭舷角为 θ , 初始雷目距为 L 。本文线性回归算法的数据样本采用对文献[5]鱼攻潜模型进行 245 次仿真试验得到的仿真数据, 其中 231 组数据作为训练样本, 14 组数据作为预测样本。潜艇规避过程中保持定速航行, 航速取为 5 m/s, 航向变化率取为 $1^\circ/\text{s}$; 线导鱼雷航速取为 25 m/s, 可根据潜艇当前位置实时改变航向; 鱼雷引信动作时, 记录命中部位与潜艇几何中心的纵向距离 y , 作为雷目交会态势的表征。

2.1. 主要影响因素选取

鱼雷攻潜雷目交会态势受鱼雷导引方式、鱼雷引信动作机理、雷目初始态势和潜艇机动规避动作等多种因素影响, 在对其进行回归预测分析时必须先确定主要影响因素, 不然可能导致维数爆炸而影响预测效率和精度。本文以文献[5]中的鱼雷攻潜仿真模型为基础, 从潜艇规避来袭鱼雷机动的战术需要出发, 确定以下几个主要影响因素。

- 1) 鱼雷来袭舷角 θ : 对于潜艇发现鱼雷来袭的相对方位, 假定以潜艇右舷为正, 本文中选取 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 进行仿真计算获取样本数据。
- 2) 初始雷目距 L : 潜艇发现鱼雷来袭时与鱼雷的初始距离, 本文中选取 4000 m、4500 m、5000 m、5500 m、6000 m、6500 m、7000 m 进行仿真计算获取样本数据。
- 3) 潜艇转向角 φ : 潜艇发现鱼雷来袭时所下达的指令转向角度, 假定以逆时针转向为正, 本文中选取 60° 、 70° 、 80° 、 90° 、 100° 、 110° 、 120° 进行仿真计算获取样本数据。
- 4) 常数项 b : 为提高预测结果的准确度, 增加一列常数项, 赋初值为 1。

2.2. 预测结果评价标准

通过对训练样本进行线性回归分析获得预测模型, 然后对测试样本进行预测获得预测值, 将预测值与实际仿真值进行比对, 选取最大相对误差 RE_{Max} 和平均相对误差 RE_{Ave} 作为预测结果评价标准, 要求最大相对误差不超过 10%, 平均相对误差不超过 5%, 评价标准分别按式(1)和式(2)计算。

$$RE_{Max} = \text{Max}_i \left(\left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right| \times 100\% \right) \quad (1)$$

$$RE_{Ave} = \frac{1}{N} \sum_i \left(\left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right| \times 100\% \right) \quad (2)$$

式中, y 表示实际仿真值; \hat{y} 表示预测值; N 表示测试样本总组数。

3. 线性回归预测方法

3.1. 线性回归预测函数

由前文分析可知, 预测函数的输入变量包含鱼雷来袭舷角 θ 、初始雷目距 L 、潜艇转向角 φ 和常数项 b (把常数项看作取值恒为 1 的自变量项) 4 项, 设每项所占权重系数分别为 α_1 、 α_2 、 α_3 和 α_4 , 则预测函数 \hat{y} 可表示为

$$\tilde{y} = \alpha_1\theta + \alpha_2L + \alpha_3\varphi + \alpha_4b \tag{3}$$

将输入变量权重参数向量表示为 $\mathbf{A} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)^T$ ，样本数据集输入变量矩阵表示为

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \theta_1 & L_1 & \varphi_1 & b_1 \\ \theta_2 & L_2 & \varphi_2 & b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \theta_n & L_n & \varphi_n & b_n \end{bmatrix}, \text{ 预测输出变量矩阵表示为 } \tilde{\mathbf{Y}} = [\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_n]^T, \text{ 可得预测函数的矩阵形式为}$$

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{XA} \tag{4}$$

3.2. 预测函数最优化

将实际仿真输出变量矩阵为 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ ，预测值与实际仿真结果之间的误差矩阵表示为 $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n]^T$ 为，可得

$$\mathbf{Y}^{(i)} = \mathbf{X}^{(i)}\mathbf{A} + \boldsymbol{\varepsilon}^{(i)} \tag{5}$$

其中，上标 i 表示第 i 组数据。

假设误差服从均值为 0、方差为 σ^2 的高斯分布，样本独立同分布，则参数向量 \mathbf{A} 的似然函数可表示为

$$L(\mathbf{A}) = \prod_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\mathbf{Y}^{(i)} - \mathbf{X}^{(i)}\mathbf{A})^2}{2\sigma^2}} \tag{6}$$

则预测函数的最优化问题转化为求似然函数式(6)的最大值问题。对式(6)两边取自然对数，得

$$l(\mathbf{A}) = N \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} - \frac{1}{\sigma^2} \cdot \frac{1}{2} \sum_1^N (\mathbf{Y}^{(i)} - \mathbf{X}^{(i)}\mathbf{A})^2 \tag{7}$$

令

$$J(\mathbf{A}) = \frac{1}{2} (\mathbf{XA} - \mathbf{Y})^T (\mathbf{XA} - \mathbf{Y}) \tag{8}$$

则最优化问题转化为求 $J(\mathbf{A})$ 的最小值。将 $J(\mathbf{A})$ 对参数向量 \mathbf{A} 求偏导，化简整理可得

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{A}} (J(\mathbf{A})) = \mathbf{X}^T \mathbf{XA} - \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \tag{9}$$

令 $\frac{\partial}{\partial \mathbf{A}} (J(\mathbf{A})) = 0$ ，求得使得预测函数最优化的参数向量为

$$\mathbf{A} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \cdot \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \tag{10}$$

将式(10)代入式(4)，得到最优化预测函数为

$$\tilde{\mathbf{Y}} = \mathbf{X} (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \tag{11}$$

3.3. 训练样本选择方案

在 14 组预测样本数据中，其中 7 组样本中鱼雷来袭舷角为 30°、初始雷目距为 5000 m，另外 7 组样本中鱼雷来袭舷角为 30°、初始雷目距为 5500 m，如表 1 所示。为对比不同训练样本下的分析预测效果，本文训练样本采用 3 种不同的选择方案，即全样本、相似样本和随机样本。全样本作为训练样本数据共计 231 组，部分数据如表 2 所示；对全样本数据分别以鱼雷来袭舷角(30°)、初始雷目距(5000 m 或 5500 m)

两个条件进行筛选, 得到预测样本的相似样本, 共计数据 91 组, 部分数据如表 3 所示; 对 231 组全样本数据进行两次随机筛选, 分别得到两个包含 91 组数据的随机样本, 随机样本 1 的部分数据如表 4 所示, 随机样本 2 的部分数据如表 5 所示。

Table 1. Data table of the prediction sample

表 1. 预测样本数据

序号	鱼雷来袭舷角(°)	初始雷目距(m)	潜艇转向角(°)	常数项
1	30	5000	60	1
2	30	5000	70	1
3	30	5000	80	1
4	30	5000	90	1
5	30	5000	100	1
6	30	5000	110	1
7	30	5000	120	1
8	30	5500	60	1
9	30	5500	70	1
10	30	5500	80	1
11	30	5500	90	1
12	30	5500	100	1
13	30	5500	110	1
14	30	5500	120	1

Table 2. Partial data table of the full sample as the prediction sample

表 2. 全样本作为训练样本的部分数据表

鱼雷来袭舷角(°)	初始雷目距(m)	潜艇转向角(°)	常数项	命中部位与潜艇中部的纵向距离(m)
0	4000	60	1	13.1244
0	4000	90	1	15.8278
0	5000	70	1	14.3637
0	6500	100	1	20.1723
15	4500	80	1	17.6791
15	6000	110	1	24.5883
15	7000	70	1	17.9016
15	7000	120	1	27.2106

Continued

30	4500	60	1	16.9161
30	6000	80	1	22.2837
30	6500	100	1	26.2233
30	7000	120	1	31.8143
45	4000	80	1	23.0477
45	5000	60	1	20.5691
45	5500	90	1	26.4313
45	6500	100	1	29.8373
60	4500	70	1	24.6195
60	5500	90	1	30.7623
60	6500	120	1	45.8526
60	7000	80	1	28.9196
...				

Table 3. Partial data table of the similar sample as the prediction sample
表 3. 相似样本作为训练样本的部分数据表

鱼雷来袭舷角(°)	初始雷目距(m)	潜艇转向角(°)	常数项	命中部位与潜艇中部的纵向距离(m)
0	5000	90	1	16.6819
0	5000	110	1	20.7016
15	5000	70	1	16.5974
15	5000	100	1	22.0692
30	4000	70	1	18.4096
30	6000	100	1	25.6797
30	6500	90	1	24.1889
30	7000	80	1	23.0136
45	5000	90	1	26.3778
45	5500	110	1	33.0947
60	5000	80	1	27.6095
60	5500	70	1	25.3993
...				

Table 4. Partial data table of No.1 random sample as the prediction sample
表 4. 随机样本 1 作为训练样本的部分数据表

鱼雷来袭舷角(°)	初始雷目距(m)	潜艇转向角(°)	常数项	命中部位与潜艇中部的纵向距离(m)
0	4500	60	1	13.6447
0	5000	80	1	15.3586
0	6000	90	1	17.8982
15	4500	110	1	23.1904
15	6000	70	1	17.4585
30	6000	60	1	18.4677
30	6500	110	1	28.4414
45	4500	90	1	25.8918
45	5000	80	1	24.1761
60	4500	60	1	22.9589
60	6000	70	1	26.0478
60	7000	100	1	34.0759
...				

Table 5. Partial data table of No.2 random sample as the prediction sample
表 5. 随机样本 2 作为训练样本的部分数据表

鱼雷来袭舷角(°)	初始雷目距(m)	潜艇转向角(°)	常数项	命中部位与潜艇中部的纵向距离(m)
0	4000	100	1	17.0185
0	5000	110	1	20.7016
0	5500	70	1	14.8257
15	5000	60	1	15.2133
15	6000	120	1	26.7332
30	4000	90	1	22.2305
30	7000	100	1	26.2977
45	4000	120	1	39.2565
45	5000	70	1	22.3863
45	6500	80	1	25.1277
60	5500	60	1	23.7716
60	6500	90	1	31.4332
...				

4. 预测结果及分析

将各训练样本数据集代入式(10)求得各预测函数的参数向量,代入式(11)得到各训练样本下的预测函数,用预测函数分别求得预测样本的预测值和相对误差,结果如表 6 所示。三种训练样本选择方案下,预测值的最大误差均在 10%以内,满足预测要求,验证了本文预测方法的有效性。

Table 6. Data table of the prediction results

表 6. 预测结果数据表

序号	仿真试验 值(m)	全样本		相似样本		随机样本 1		随机样本 2	
		预测值(m)	相对误差	预测值(m)	相对误差	预测值(m)	相对误差	预测值(m)	相对误差
1	17.5047	17.2816	0.012745	17.2255	0.01595	17.7416	0.013534	17.4981	0.000377
2	19.4539	19.6206	0.008569	19.5205	0.003423	20.0516	0.030724	19.7981	0.017693
3	21.5352	21.9596	0.019707	21.8155	0.013016	22.3616	0.038374	22.0981	0.026139
4	22.8988	24.2986	0.06113	24.1105	0.052915	24.6716	0.077419	24.3981	0.065475
5	24.9046	26.6376	0.069586	26.4055	0.060266	26.9816	0.083398	26.6981	0.072015
6	27.4554	28.9766	0.055406	28.7005	0.04535	29.2916	0.066879	28.9981	0.056189
7	31.4524	31.3156	0.00719	30.9955	0.017339	31.6016	0.001877	31.2981	0.007745
8	17.9116	17.5816	0.018424	17.5255	0.021556	17.8916	0.001117	17.6481	0.014711
9	19.7839	19.9206	0.00691	19.8205	0.00185	20.2016	0.021113	19.9481	0.0083
10	21.9102	22.2596	0.015947	22.1155	0.00937	22.5116	0.027448	22.2481	0.015422
11	23.3681	24.5986	0.052657	24.4105	0.044608	24.8216	0.0622	24.5481	0.050496
12	25.5137	26.9376	0.055809	26.7055	0.046712	27.1316	0.063413	26.8481	0.052301
13	27.7315	29.2766	0.055716	29.0005	0.04576	29.4416	0.061666	29.1481	0.051083
14	31.3435	31.6156	0.008681	31.2955	0.001531	31.7516	0.01302	31.4481	0.003337

由式(2)计算各训练样本下预测结果的平均误差,各样本下预测结果的最大误差和平均误差如图 1 所示。与全样本相比,随机样本 1 下预测结果的平均误差比全样本下的大,随机样本 2 下的预测结果的平均误差比全样本下的小,表明随机样本的选择方案其预测结果同样存在随机性;而相比于其它两种训练样本选择方案,相似样本下预测结果的最大误差和平均误差均最小,这是由于减少了对相似样本以外数据的过拟合而提高了对预测样本的预测精度。

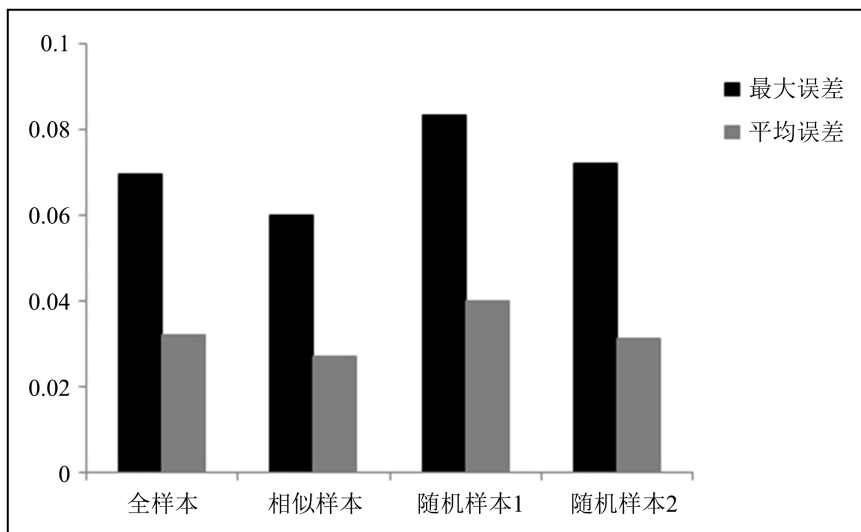


Figure 1. The maximum error and average error of the prediction results to each sample
图 1. 各样本下预测结果的最大误差和平均误差图

5. 结论

本文以一种鱼雷攻击潜艇模型仿真试验数据为基础，建立一种雷目交会态势的线性回归预测方法，通过全样本、相似样本和随机样本三种训练样本检验该方法的预测准确度，并对比分析了这三种训练样本选择方案下预测函数的预测效果，结果表明以相似样本作为训练样本求得的预测函数预测效果最优，研究结果为鱼雷攻击潜艇时雷目交会态势分析提供了一种新的思路和方法。

基金项目

国家“十三五”规划专项项目(2019HJHS26)。

参考文献

- [1] 吴晓海, 周智超, 杜海. 潜艇鱼雷攻击可攻区域[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(4): 131-133.
- [2] 刘勇, 李本昌, 张靖康. 基于鱼雷航程实时预报的潜射线导鱼雷可攻性判断[J]. 指挥控制与仿真, 2009, 31(3): 49-51.
- [3] 李微波, 傅调平, 刘斌. 现在方位导引法的线导鱼雷攻击可行域仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 29(5): 28-31.
- [4] 董严红, 卫翔, 孙春生. 鱼雷纯方位攻击提前角优化分析[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(8): 121-123, 127.
- [5] 韩大伟, 王天忠, 李宏明. 鱼雷现在方位攻击潜艇雷目交会态势分析[J]. 海军大连舰艇学院学报, 2020, 43(1): 11-15.
- [6] 卫一熲, 邢焕革. 基于灰色加权关联与 MS-LSSVM 组合的舰船备件需求预测[J]. 舰船电子工程, 2015, 35(1): 126-130.
- [7] 刘忠宝. 新型支持向量机在风速预测模型中的应用研究[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(5): 754-757.
- [8] 马家欣, 许飞云, 黄仁. 一种线性/非线性自回归模型及其在建模和预测中的应用[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2013, 43(3): 509-514.