

船舶航行非线性规避碍航物航线方法研究

李成海¹, 胡甚平², 崔建辉³, 王建涛¹

(1. 山东交通职业学院 航海学院, 山东 潍坊 261206; 2. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306;
3. 天津理工大学 航海学院, 天津 300191)

摘要:传统的航行船舶规避碍航物航线预估方法针对范围小,对于碍航物小目标预估准确率低或遗漏小目标,不利于航行船舶的安全。针对上述问题,提出了基于非线性条件模型的航行船舶规避碍航物航线预估方法。根据航行船舶规避碍航物预估具有非线性的特性,首先构建航行船舶规避碍航物航线非线性条件下初始模型,根据条件模型变量之间的关系,定义规避碍航物条件模型;然后对规避碍航物非线性条件模型进行规避碍航物航线程序计算;最后通过实验验证的数据分析,进一步证明了该研究方法能够提高对范围小、碍航物小目标的预估准确率,防止遗漏小目标,对保障航行船舶安全具有较强的现实意义。

关键词:航行船舶;非线性条件模型;规避碍航物;航行航线预估

中图分类号:U664.82

文献标志码:A

文章编号:2097-0358(2023)4-0030-05

0 引言

随着船舶大型化、高速化和自动化的发展,海上船舶规避碍航物航线预估准确率低这一难题引起了业界的高度重视。传统航行船舶避障航线预测法大多针对一些小的物标或者小范围内的碍航物,这些方法避障准确率较低,避障效果不理想,给航行船舶带来风险。

目前,已经有多位学者针对船舶航行非线性规避方法进行研究,并取得了一定成果。郭欢教授根据船舶避障预估非线性的特点,构建航行船舶航线非线性的初始模型,进行计算求取变量关系,定义避障航线关系量和避障模型,实现避障航程计算,仿真实验结果验证对比数据证明此方法避障航行成功率高。^[1]王仁强等基于 Sigmoid 函数的航行船舶避障航线规划方法分析了航行船舶避障过程及 Sigmoid 函数的几何特征,借鉴路径设计理念建立基于 Sigmoid 函数航行船舶避险位移轨迹,设计一个航行船舶位移自抗扰的控制系统来实现船舶避障位移轨迹实时跟踪,仿真验证表明基于 Sigmoid 函数建立限制水域航行船舶避险航线实际有效,可保证航行船舶避让碍航物。^[2]宋勇教授运用 Graham 算法对海上环境边界及碍航物构建凸多边形模型方便简化海上环境模型及设计出初始航行路径,通过混沌理论的混沌序列进行种群初始化,以保证初始运动粒子质量及分布均匀性,构建多种机制的平衡种群全局性搜索能力及提高局部性搜索能力,实现算法快速收敛,提高解算精度;利用 Matlab 中 GUI 可视化的程序构建模块建立了航行船舶航线设计仿真平台,实现初始航线规划、海上环境建模、全局静态航线设计和动态避障仿真。^[3]孙耀东教授基于操纵性数学模型,指定仿真海上环境进行操纵旋回实验,取得相应操纵性参数,为全程航线设计提供了数据支持。在分析全程航线设计中,基于航行船舶操纵能力构建海上环境模型并设置栅格的分辨率,在改进算法时对船舶航行角进行扩展和限制,以便较好地反映船舶操纵性;以与栅格海上环境模型及结合较紧密的 A* 算法、势场栅格算法作为基础,分析了船舶操纵性和船舶航行实际,总结出基于改进法 A* 算法、改进势场的栅格算法运行双层航行航线设计算法。^[4]郭超麒教授在内河航行船舶导航过程中加入虚拟力概念,利用基于虚拟力内河航行船舶导航的两种方法,通过建模分析,求取推荐船舶实时航向,结合现有船舶定位导航设备,实现

收稿日期:2023-06-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC2801000);国家重点研发计划项目(2019YFB1600602)

作者简介:李成海(1965—),男,山东青岛人,山东交通职业学院航海学院教授、正高级船长,硕士。

对内河航行船舶的准确导航。结合内河航行船舶模型进行验证,结果证明在不考虑风和流致漂移的情况下,此方法取得的虚拟力合力可为内河船舶航行导航决策提供依据。^[5]陈鹏教授提出一种通过人工势场无人船舶航行自主避障算法,以实现无人船舶航行的自主避障。^[6]

在不考虑海上外部环境因素条件下,船舶航行航线上的范围小,碍航物小目标的规避预估已由静态预估演变为更复杂的动态预估。因此,依靠传统的航行船舶规避碍航物航线预估方法,难免出现遗漏小目标或对范围小碍航物小目标预估准确率低情况的发生,对航行船舶安全以及海洋环境构成了威胁。根据上述研究中存在的碍航物小目标预估效能不理想的问题,本研究提出的非线性规避碍航物航线方法可有效消除传统方法的弊端,提高对范围小、碍航物小目标的预估准确率,对保障船舶航行安全具有重要意义。

1 建立航行船舶非线性构造模型

笔者基于神经网络及遗传计算算子对规避函数隐蔽层具有抑制力的实际,提出运用非线性函数方法作为规避函数隐蔽层的基础,通过与泛化拟合计算,取得包括航行船舶纵向航行路线的初始非线性模型。根据构造层原理将非线性模型分为 3 个结构层,在输出结构层设置非线性模型输出唯一变量的结构点一个,根据航行船舶航行路线所经过的碍航物点模拟训练对象数决定输出结构层的结构点数,模型结构层如图 1 所示。

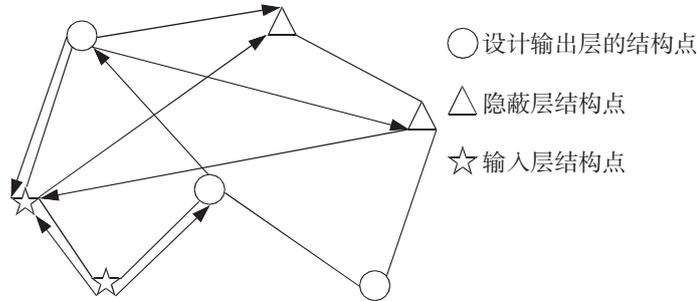


图 1 非线性船舶航行航线初始结构层

假定初始非线性模型对航行船舶规避碍航物输出期望值用 \hat{u} 表示,则:

$$\hat{u} = \sum_{m=1}^B G_m \bar{\omega} \left(\frac{d - n_m}{e_m} \right) \tag{1}$$

式中: G_m 表示约束条件输出变量的权重系数。

非线性函数隐蔽层输出对象为 $y_m = \sum_{h=1}^Z o_{nh} d_h$, 其中 o_{nh} 表示隐蔽层输入训练对象的权重系数,可得到:

$$\hat{u} = \sum_{M=1}^B G_m \bar{\omega} \left(\frac{\sum_{m=1}^Z o_{nh} d_h - n_m}{e_m} \right) \tag{2}$$

对模拟训练对象进行非线性数据降维练习^[7],得到航行船舶规避碍航物预估误差系数,函数表达式为:

$$V = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J (u_i - \hat{u}_i)^2 \tag{3}$$

式中: u_i 表示第 l 个航行船舶航行线的非线性特征值, 此处的非线性规避碍航物初始非线性模型输出表达式为:

$$\bar{\omega}(d) = \cos(wd) \times v^{-\frac{d}{2}} \tag{4}$$

式中: w 表示输入其他计算法的相连权重值。

1.1 非线性规避碍航物模型的关系量

基于航行船舶规避碍航物航线过程在非线形构造模型中必须满足曲线约束条件的要求,引入规避航线 sigmoid 曲线方法^[8],sigmoid 曲线函数表达式为:

$$u = \frac{n}{1 + v^{-e(d-w)}} \quad (5)$$

式中: u 表示航行船舶规避碍航物航线中船位所在计划航线上的纵向距离; d 表示航行船舶规避碍航物中船位所在计划航线上的横距; e 、 n 、 w 表示 sigmoid 曲线 3 个任意变量, 变量值由运算中模拟练习对象和当时的实际确定^[9-10]。航行船舶规避碍航物模型的真实规避碍航物航线 $u = s(d)$ 的限制条件如下。

限制条件 1: 航行船舶航行航线最小航迹带宽度必须满足最外侧 Q 点到规避碍航物航线 sigmoid 曲线最小间距 p , 且对应系数不小于碍航物危险半圆直径, 即

$$p \geq P \quad (6)$$

式中: p 表示碍航物危险半圆直径。

依据 Q 点表示坐标 (d_1, u_1) 和 sigmoid 函数曲线, 可计算求得:

$$p = \frac{\left| \frac{en}{4}d_1 - u_1 - \frac{enw}{4} + \frac{n}{2} \right|}{\sqrt{\left(\frac{en}{4}\right)^2 + 1}} \quad (7)$$

限制条件 2: 航行船舶航行航线船位与碍航物间定位误差 u_0 应满足约束条件。

$$p \leq u_0 \leq p + k_0 + u_2 \quad (8)$$

从 sigmoid 函数曲线计算式, 可求得:

$$u_0 = \frac{n}{1 + v^{e-w}} \quad (9)$$

限制条件 3: sigmoid 函数曲线横坐标 u 值约束系数的最大限制应满足 $u_{\max} \leq G$, 从 sigmoid 函数可推导出 $u_{\max} = n$, 则

$$n \leq G \quad (10)$$

限制条件 4: 船舶沿计划航线航行中, 航线起始位置需满足约束条件要求。船舶自停车静止最后时刻启动船位和碍航物间切线相切点位置, 切线点距离即为 sigmoid 函数曲线从 0 点到拐点之间的距离, 也是变量 w 取值范围, 则

$$W \geq \text{ship } p \text{ pmain} \quad (11)$$

式中: $\text{ship } p \text{ pmain}$ 表示航行船舶规避碍航物预估控制距离范围。

1.2 非线性模型规避碍航物航行航线预估计算

依据非线性模型和规避碍航物初始模型要求条件及度量, 进行符合非线性模型的规避碍航物航行航线预估计算, 计算步骤如下。

(1) 将规避碍航物航行航线预估次数设置为一集合。在这一集合中, 单一个体 m 被任意抽取的可能性可通过计算概率公式求取^[11-13], 即

$$t_m = \frac{s_m}{\sum_h s_h} \quad (12)$$

式中: s_m 表示规避碍航物航行航线个体 m 的任意系数。

(2) 控制基因码范围, 运用变异算子进行变异平均值计算, 计算求取的变异平均值设定为 \bar{T} , 求取其方差总量 T^2 , 将其引入规避碍航物航行航线预估的非线性模型, 对预估集合基因进行更新。

$$\bar{T} = 0.3(b_n(m) + o_i(m)) \quad (13)$$

$$T^2 = \frac{O_n(m) - b_n(m)}{3} \quad (14)$$

式中: b_n 、 O_n 表示规避碍航物航行航线预估遗传因子的限制最大值和最小值, m 表示基因染色体在非线性模型中的位置。

(3) 更新基因后求得非线性模型船舶航行航线规避碍航物航线预估函数为:

$$\min (s(d) = p_v) \rightarrow \begin{cases} w(d) = p_g - p_2 \leq 0 \\ w_v(d) \in \alpha \\ b_n = -30^\circ, O_n = 30^\circ \\ d \in [b_n \quad O_n] \end{cases} \quad (15)$$

式中: $s(d)$ 代表待规避碍航物的目标函数; $w(d)$ 代表非线性限制条件对应的目标函数式; $w_v(d)$ 代表非线性限制条件对应的目标函数变量式; d 代表更新后的基因染色体数。

以上四步骤,可完成非线性条件模型的航行船舶规避碍航物航行航线预估分析过程。

2 预估方法匹配程度测验

2.1 设定测验数据

(1)测验数据设定。任意模拟一组航行船舶航行航线,并在航行航线上设定 15 个碍航物,其中碍航物危险半圆直径大于船长 1/2 的碍航物 3 个,碍航物危险半圆直径等于船长 1/2 的碍航物 3 个,碍航物危险半圆直径小于船长 1/2 的碍航物 9 个,这 9 个中含有可位移碍航物 5 个^[14-15]。

(2)测验程序。将上文设置的测验数据引入仿真研究系统,并将传统的规避碍航物航行航线预估方法与本研究的规避碍航物航行航线预估计算法引入测验系统,在参量相同的条件下,记录测验系统对上述 15 个碍航物预估的匹配程度和测验数据,如表 1 所示。

表 1 两种方法匹配程度测验结果

碍航物类型	本研究方法的规避碍航物 航线预估匹配程度/%	传统方法的规避碍航物航线 预估匹配程度/%
碍航物危险半圆直径大于船长 1/2	98.8	86.2
碍航物危险半圆直径等于船长 1/2	97.9	85.7
碍航物危险半圆直径小于船长 1/2	96.2	72.4
碍航物危险半圆直径小于船长 1/2 的可位移碍航物	96.3	67.9

2.2 验证的结论

从表 1 的规避碍航物预估匹配程度测验结果可以看出,本研究提出的非线性条件模型的航行船舶规避碍航物航行航线预估方法,具有提高发现范围小、碍航物小目标的能力,满足设计方法要求,与海上实际应用相符合,能有效克服传统规避碍航物航行航线预估方法存在的遗漏小目标,或对范围小、碍航物小目标预估准确率低的难题。

3 结束语

基于传统船舶规避碍航物航行航线预估方法遗漏小目标,或对范围小、碍航物小目标预估准确率低的问题,笔者提出了基于非线性模型设计航行船舶规避碍航物航行航线预估方法。通过更新船舶航行规避碍航物目标集合染色体这一途径,高效完成了优化规避碍航物目标预估范围,提高了对范围小、碍航物小目标预估准确率,避免遗漏小目标,并且对比实验验证了效果,证明了本研究所提出方法的有效性,在航行船舶规避碍航物航行航线研究上开拓了预估方法的新思路,具有较高的应用价值和推广意义。

参考文献:

- [1]郭欢.基于非线性模型的船舶避障路径预测方法分析[J].舰船科学技术,2021(6):49-51.
- [2]王仁强,赵越.基于 Sigmoid 函数的限制水域船舶避障路径建模[J].广州航海学院学报,2019(1):25-28,33.
- [3]宋勇.船舶路径规划算法的研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [4]孙耀东.一种船舶航行路径的智能规划研究[D].大连:大连海事大学,2018.
- [5]郭超麒.基于虚拟力的内河船舶导航建模研究[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- [6]陈鹏.基于改进人工势场的无人船自主避障研究与实现[D].武汉:武汉理工大学,2019.
- [7]杨瑞云.基于云推理的船舶航行速度非线性数学控制模型[J].舰船科学技术,2021(6):55-57.
- [8]闫佩玉.舰船航行非线性轨迹预测的数学模型[J].舰船科学技术,2020(18):25-27.
- [9]魏文英,潘宝柱,杨翠.航行速度的非线性建模与仿真研究[J].舰船科学技术,2019(14):46-48.

- [10]陈兴伟.大风环境下船舶触礁角度高效预测方法分析[J].舰船科学技术,2021(8):61-63.
- [11]杜志啸,赵甲文,郭鹏,等.船舶避障技术综述[J].舰船电子工程,2019(5):12-15.
- [12]李红岩.船舶海上事故避障路线自导方法研究[J].舰船科学技术,2019(2):49-51.
- [13]崔峻铭.小型船舶预警避障系统的设计[J].广东蚕业,2018(1):34.
- [14]王奎民,洪晔,边信黔,等.基于碰撞危险度模型的 AUV 三维避障研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2008(6):1002-1004,1020.
- [15]腾飞.基于虚拟力场法的船舶避障功能的实现[J].舰船科学技术,2009(7):99-102.

(责任编辑:张 利)

Study on Nonlinear Obstacle Avoidance Route Method for Ship Navigation

LI Cheng-hai¹, HU Shen-ping², CUI Jian-hui³, WANG Jian-tao¹

(1. School of Nautical Sciences, Shandong Transport Vocational College, Weifang 261206, China;

2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

3. College of Nautical Sciences, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China)

Abstract: Traditional route prediction method for navigating ships to avoid obstacles covers a small range, and the accuracy of small obstacle targets' prediction is low or small targets are missed, which is adverse to ships' safe navigation. In order to solve the above-mentioned problem, a nonlinear conditional model obstacle avoidance route prediction method is proposed. Based on the nonlinear characteristics of a navigational ship obstacle avoidance estimation, firstly an initial model under the nonlinear condition for vessel obstacle avoidance route method is constructed, and the conditional model of obstacle avoidance is defined according to the relationship between the variables of the conditional model; then, the calculation of obstacle avoidance route procedure for nonlinear conditional model is carried out; and finally, through the analysis of the data of experimental validation, it is further proved that the method of the present study is able to improve the accuracy of navigational route estimation for small range and small targets and prevent the omission of small targets, which is of major significance for ensuring ship's safe navigation.

Key words: navigational ship; nonlinear conditional model; obstacle avoidance; navigational route prediction