

多目标船会遇实验自动生成算法研究及应用

牛亮亮, 陈国权, 李丽娜

(集美大学航海学院, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为验证船舶拟人智能避碰决策(personifying intelligent decision-making for vessel collision avoidance, PIDVCA)算法的合理性, 基于船舶智能操控(ship intelligent handling and control, SIHC)仿真研究平台, 通过对雷达标绘中矢量三角形绘图方法逆推分析, 初步形成多目标船会遇实验自动生成算法。该算法可以根据验证需求自动生成所需要的实验方案, 使得设置多船会遇实验更为便捷、客观和全面。

[关键词] 多目标船; 雷达标绘; 自动生成算法; 船舶智能操控; 船舶拟人智能避碰决策

[中图分类号] U 675.7

Research and Application of Automatically Generated Algorithm in Multi-target Ships' Encounter Experiment

NIU Liang-liang, CHEN Guo-quan, LI Li-na

(Navigation College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to verify the rationality of decision-making for vessel collision avoidance (PIDVCA) algorithm, and based on the ship intelligent handling control simulation platform (SIHC), the algorithm in multi-target ships' encounter experiment is generated automatically through reversely analyzing the vector triangle plotted in radar. This algorithm can automatically generate the experiment schedule, according to the validation requirements. The implementation of the algorithm makes setting the ship encounter experiment more convenient, objective and comprehensive.

Keywords: multi-ships' encounter; vector triangle plotted in radar; automatically generated algorithm; SIHC; PIDVCA

0 引言

在船舶智能避碰系统的研究中, 不仅需要对两船之间避碰进行研究, 对多船会遇局面下避碰的研究也是非常必要的^[1]。目前国内的船舶避碰仿真平台和模拟器, 在设置船舶会遇实验时还是采用手动添加船舶方式。例如, 集美大学自主研发的船舶智能操控(ship intelligent handling and control, SIHC)仿真研究平台, 集成于该平台中的船舶拟人智能避碰决策(personifying intelligent decision-making for vessel collision avoidance, PIDVCA)算法主要致力于解决宽水域船舶避碰问题。该算法通过解算各个目标船之间避让参数(如目标船危险等级, 初始施舵时间, 复航时间等), 从而给出各种会遇态势下的避让决策方案, 根据所得决策进行自动避让操船^[2-4]。为测试PIDVCA算

法的合理性,在现有的 SIHC 仿真平台上设计多船会遇的实验是十分繁琐的工作,需要手动添加每一条目标船,并反复修改初始化位置、航向和航速等参数,以满足实验需求。此外,设计实验者往往会根据自己的习惯去设置船舶的位置、航向和航速等参数,所设计的实验会带有设计者一定的主观性和片面性。

本文在对矢量三角形绘图逆推的基础上提出了自动生成多船会遇局面的算法。操作者可以任意设置多艘目标船,并将其中的若干艘目标船设置为危险船,该算法将会根据添加船舶的危险属性自动在不同位置生成符合要求的多只目标船,快速地设计出多船会遇局面的实验,从而节省大量的时间。该功能不仅可以快速生成多船会遇局面,而且可以排除操作者主观因素的干扰,具有一定的随机性,可以较全面地形成不同的会遇态势。

1 手动设置多目标船会遇实验

SIHC 仿真平台主要由控制服务器、智能目标船运算服务器和本船服务器组成。船舶智能操控仿真平台基于 UDP 协议进行信息交互,从而实现不同模块之间的协同工作。具体步骤可分为:编辑练习、初始化练习、运行练习、本船操纵、结束练习和回放练习等^[5-7]。其中,控制服务器主要功能是编辑练习,即设置会遇局面,目前编辑练习是通过实验设计者手动添加目标船来完成的。设计多船会遇实验具体步骤如下:1) 选择练习类型、海区以及海图号等;2) 设置航行环境,包括风、流、浪、能见度等;3) 手动添加本船,选择本船的船舶类型、名称和装载状态,设置本船的初始船位、速度和航向;4) 手动添加目标船,选择目标船类型、名称,设置目标船初始船位、速度、航线;5) 修改目标船初始参数,根据实验需求,通过观察相对运动线修改目标船初始参数,使其符合实验要求的危险属性;6) 设置完成,初始化并运行实验。

根据上述步骤可实现手动添加目标船,从而设计完成满足测试要求的实验,但是如果添加多艘目标船,该方法较为繁琐,设计实验将会耗费很长时间。因此,如果可以根据所需要的目标船数量和危险属性自动添加目标船,实现快速自动生成多船会遇实验,将会更便捷和容易。

2 多目标船会遇实验自动生成方法

2.1 雷达标绘方法概述

相对运动作图是分析船舶避碰时最常用的雷达标绘方法,根据本船和目标船的动态信息,包括位置、航向、航速等参数,利用相对运动作图法求出最近会遇距离(d_{DCPA})和达到最近会遇距离点的时间(t_{TCPA}),从而可以准确判断两船是否正在形成紧迫局面或存在碰撞危险。如图 1 所示。

根据文献[8-9],雷达标绘的作图步骤如下:

- 1) 以本船位置 O 为原点,本船航向 v_0 为纵坐标轴建立本船坐标系,并在本船坐标系下确定来船的位置 T 。
- 2) 选择长度比例尺(例如 1 cm 代表航速 5 kn),以目标船坐标 T 为起点,按照本船航向的反方向画出长度比例尺下本船航速 v_0 ,从而确定点 B 。
- 3) 按照相同的长度比例尺,以 B 为起点,按照目标船航向画出长度比例尺下目标船航速 v_t ,从而确定点 A 。
- 4) 连接 TA ,即为目标船的相对运动线。
- 5) 过本船位置 O 作线段 TA 的垂线交于点 P ,此时线段 OP 即为目标船最近会遇距离 d_{DCPA} 。
- 6) 比较 d_{DCPA} 与 d_{SDA} (船舶安全会遇距离)的大小,便可以判断两船是否存在碰撞危险。

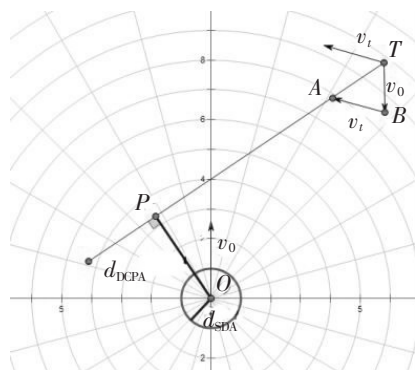


图 1 雷达标绘方法示意图

Fig.1 Schematic of radar plotting method

2.2 多目标船会遇实验自动生成基本思路和方法

由雷达标绘方法可判断目标船与本船是否存在危险，主要是判断 d_{DCPA} 与 d_{SDA} 的大小，即图 1 中相对运动线与安全会遇距离圈是否相交。如果已知来船为危险船，那么可以通过雷达标绘方法逆推求出来船的航向和航速等参数。

以本船坐标系第一象限中生成目标船为例，已知本船 O 的参数（位置、航向、航速）和危险目标船 T 的位置，并且相对运动线过本船中心，那么危险目标船位置如图 2 所示。

图 2 中， O 为本船位置， T 为目标船位置，以目标船 T 为中心，本船航向的反方向得到一定比例尺下的本船航速矢量线 \overrightarrow{TB} 。以点 B 为圆心，随机半径做圆，并保证与方位线 OT 相交，交点为 C_1 和 C_2 。为保证目标船为危险目标船，选取 C_1 点，则矢量线 $\overrightarrow{BC_1}$ 的大小为目标船的船速。

在 $\triangle TBC_1$ 中， \overrightarrow{TB} 为本船航速， $\angle b$ 为目标船相对本船方位角， $\overrightarrow{BC_1}$ 为目标船航速。利用三角函数关系的正弦定理可以求得 $\angle r$ ， $\angle r = \arcsin(\overrightarrow{TB} \times \sin \angle b / \overrightarrow{BC_1})$ ， $\angle TBC_1 = 180^\circ - \angle r - \angle b$ 。

求取目标船航向应以大地坐标为基准，如图 2 所示， ON 为大地坐标的真北方向， $\angle a$ 为本船的航向，在 $\triangle POC_1$ 中，利用三角函数关系的外角定理可以求得相对运动线过本船中心的危险目标船航向 $\angle h$ ， $\angle h = \angle a + \angle b + \angle r + 180^\circ$ 。此时危险目标船的相对运动线必过本船中心，即 d_{DCPA} 等于 0。判断目标船是否为危险船舶的条件为 $|d_{DCPA}| < d_{SDA}$ ，故需求取使得 $|d_{DCPA}| = d_{SDA}$ 的目标船的参数临界值。过目标船位置 T 作本船安全会遇距离圈的切线，分别交于点 E 和 F ，于随机生成的航速圈交于点 D_1 和 D_2 。此时矢量线 $\overrightarrow{BD_1}$ 和 $\overrightarrow{BD_2}$ 的方向便是危险目标船航向临界值，如图 3 所示。

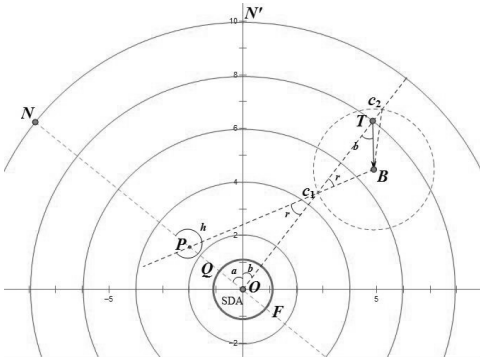


图 2 第一象限危险目标船图解 1

Fig.2 Diagram 1 of dangerous target ship in the first quadrant

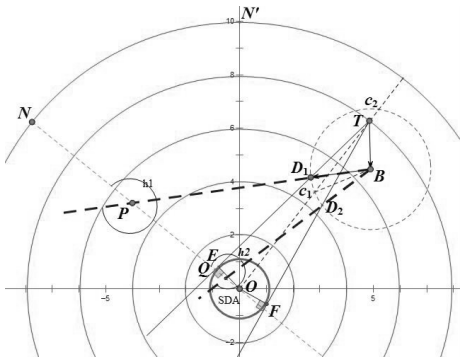


图 3 第一象限危险目标船图解 2

Fig.3 Diagram 2 of dangerous target ship in the first quadrant

在 $RT\triangle OET$ 中， OT 为两船的距离， OE 为本船最小安全会遇距离。根据直角三角形定理可以求得 $\angle OTE = \arcsin(OE/OT)$

在 $\triangle TBD_1$ 中， \overrightarrow{TB} 为本船航速， $\overrightarrow{BD_1}$ 为目标船航速， $\angle BTD_1$ 为目标船方位角 $\angle b$ 与 $\angle OTE$ 之和。根据三角形函数关系的正弦定理可以求得 $\angle TBD_1 = 180^\circ - \angle BTD_1 - \arcsin(\overrightarrow{TB} \times \sin \angle BTD_1 / \overrightarrow{BD_1})$ 。

同理，在 $\triangle TBD_2$ 中， \overrightarrow{TB} 为本船航速， $\overrightarrow{BD_2}$ 为目标船航速， $\angle BTD_2$ 为目标船方位角 $\angle b$ 与 $\angle OTF$ 之差（ $\angle OTF = \angle OTE$ ）。根据三角形函数关系的正弦定理和三角和定理可以求得 $\angle TBD_2 = 180^\circ - \angle BTD_2 - \arcsin(\overrightarrow{TB} \times \sin \angle BTD_2 / \overrightarrow{BD_2})$ 。

危险目标船航向的两个临界值 h_1 与 h_2 计算如下，

$$\begin{cases} \angle D_1 BC_1 = \angle TBC_1 - \angle TBD_1, & \angle D_2 BC_1 = \angle TBD_2 - \angle TBC_1, \\ \angle h_1 = \angle h + \angle D_1 BC_1; & \angle h_2 = \angle h + \angle D_2 BC_1. \end{cases}$$

若需设置目标船为危险目标船，则随机生成的航向应介于两个航向临界值之间；反之，则自动生

成的航向在两个航向临界值之外。

同理，当生成的目标船位置位于本船坐标系的其他象限区，计算方法相同，目标船航向的计算公式略有差别。由于文章篇幅所限，在此不再赘述。

3 多目标船会遇实验自动生成算法

3.1 算法流程及步骤

在 SIHC 仿真平台中初始化本船，则可得本船参数，通过本文 2.2 节中所述的方法自动生成目标船，以及目标船数据结构的参数。其算法流程图如图 4 所示，执行步骤如下：

1) 两船会遇距离随机生成 以本船为中心，分别以 $(2 \times i) n \text{ mile}$ 为半径 $(i = 1, 2, 3, 4, 5)$ 设置多个会遇距离圈，利用 Srand 函数随机确定目标船的会遇距离，使得目标船都在会遇距离圈上生成。

2) 目标船位置随机生成 以本船为中心，本船真航向为纵坐标，建立坐标系。利用均匀分布随机数产生器随机生成 $0^\circ \sim 359.9^\circ$ 之间的目标船的方位角。该方位角的随机生成应以满足平均概率分布为约束条件，使得目标船的位置能平均位于本船坐标系的四个象限中，然后结合本船的位置求得目标船的位置。

3) 目标船速度随机生成 利用 Srand 函数随机生成 $5 \sim 20 \text{ kn}$ 之间的目标船航速，且该航速应满足目标船相对运动线过本船中心的约束条件，否则重新生成航速。

4) 目标船航向随机生成 根据步骤 2) 中生成的目标船方位角判断目标船相对于本船的方位区域，即目标船处于本船坐标系中的象限区。在不同的象限区利用 2.2 节中的方法计算出目标船航向的两个临界值。判断目标船的危险属性，若为危险船舶，利用 srand 函数随机生成介于两个临界值之间的航向，否则，随机生成两个临界值之外的航向。

5) 目标船之间检测 若当随机生成的目标船为第一个目标船时，直接输出目标船参数；若生成的目标船不为第一个目标船时，分别调用船舶结算模块判断该目标船与之前生成的目标船是否存在危险，若无危险，输出参数；若有危险返回步骤 1) 重新生成。

6) 多只目标船随机生成 步骤 5) 结束

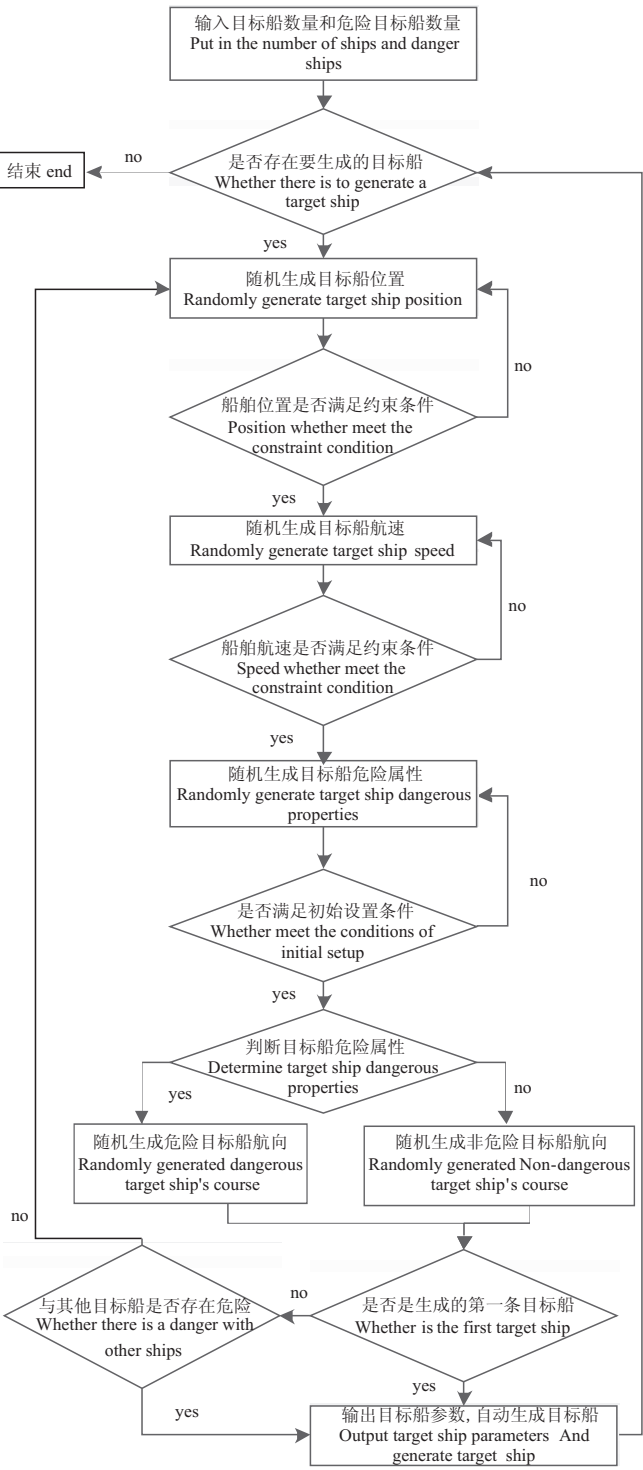


图 4 目标船自动生成算法流程图

Fig.4 Flow chart of target ship automatic generation algorithm

之后，返回循环，判断是否还有需要生成的目标船，如果没有，直接结束，如果存在，则继续步骤1)。

3.2 算法编程实现

目标船数据结构定义如下：

```
Struct tagTargetShip
{
    double m_flat;
    double m_flon;           //目标船位置
    double m_fBearing;       //目标船方位
    double m_fRange;         //目标船会遇距离
    double m_fspeed;         //目标船速度
    double m_fHeading;       //目标船航向
    double fDanger;          //是否为危险目标船
}
```

多目标船自动生成器主要定义如下：

```
class CJMURandSituationGenerator
{
    void GetRandTShipInfo( tagTargetShip&TshipInfo ) ;//生成目标船位置
    void CalculateRelativeMotionInfo( tagTargetShip&TshipInfo ) ;//生成目标船航速
    void GetTShipHeading( tagTargetShip TshipInfo ,double &fHeading,bool bDanger) ;//生成目标船航向
    void FillTShipData( )//生成多条目标船
};
```

在多目标船自动生成器中主要利用 FillTShipData 函数实现多目标船的连续添加，定义目标船链表，每次取出一条目标船调用 GetRandTShipInfo 函数、CalculateRelativeMotionInfo 函数和 GetTShipHeading 函数来解算目标船参数。

4 仿真实验验证

在 SIHC 仿真平台的控制服务器端设计多船自动添加的 UI 界面，如图 5 所示，实验设计者可以通过该界面输入添加的目标船个数及危险目标船个数，从而自动生成多目标船。本文选取添加 5 艘目标船，设置 3 艘目标船为危险目标船，通过自动生成目标船模块，在 SIHC 本船服务器端截取仿真，结果如图 6 所示，其中虚线表示相对运动线。



图 5 多目标船自动生成 UI 界面

Fig.5 Multiple target ship automatically generate UI interface



图 6 仿真实验截图

Fig.6 The simulation experiments screenshot

对目标船服务器端输出的信息进行分析，如表 1 所示。其中目标船 2、3、4 的最近会遇距离 d_{DCPA} 分别为：0.656，0.154，-0.077 nmile，均小于本船的安全会遇距离 d_{SDA} ，且施舵时间为 0，说明该三艘目标船已经与本船构成了碰撞危险，而目标船 1 和目标船 5 的 d_{DCPA} 大于本船 d_{SDA} ，且施舵时间不计算，说明两船与本船没有构成碰撞危险。该仿真实验结果符合算法要求。

表 1 仿真结果分析
Tab.1 The analysis of simulation results

目标船编号 Number of ship	距离 Distance /nmile	方位 Position /(°)	d_{DCPA} /nmile	t_{TCPA} /min	d_{SDA} /nmile	施舵时间 Time of rudder /min	复航时间 Time of recovery /min
1	4.0	25.600	1.6100	8.370	1.15	—	—
2	6.0	325.270	0.6560	24.270	1.77	0	14.645
3	2.0	128.296	0.1539	9.065	1.19	0	13.960
4	8.0	10.440	-0.0770	17.701	1.14	0	26.911
5	6.0	219.189	5.9600	-0.240	1.18	—	—

5 结语

在确定本船前提下，利用雷达标绘中矢量三角形绘图方法进行逆推，确定目标船位置、航向、航速等参数，并自动生成满足需求的多船会遇实验。实验室设计者只需在控制台服务器端界面中输入目标船数量和危险目标船数量，控制台服务器端将自动添加目标船。此方法不仅适用于 SIHC 仿真平台，也可用于其他研究船舶避碰的仿真平台和船舶模拟器。该算法的实现不仅使在 SIHC 仿真研究平台设置多船会遇实验更加便捷，而且一定程度上可排除实验设计者的主观因素，具有一定的随机性。该算法合理性还需要进行更多的实验进行验证分析。

[参 考 文 献]

[1] 李丽娜, 熊振南, 任勤生. 多船避碰智能决策的生成与优化方法. 中国航海, 2003(2): 189-192.
[2] 李丽娜, 杨神化, 尹勇. 船舶自动避碰仿真平台的构建与测试方法研究. 中国航海, 2006(3): 48-49.
[3] LI L, YANG S, SUO Y, et al. Automation method for personifying intelligent decision-making for vessel collision avoidance//2008 IEEE International Confence on Automation and Logistics. Qingdao: IEEE, 2008: 1876-1881.
[4] 李丽娜, 杨神化, 熊振南, 等. 船舶拟人智能避碰决策理论框架的研究. 中国航海, 2009(2): 30-34.
[5] 杨神化, 施朝健, 李丽娜, 等. 船舶自动避碰仿真平台 (VACASP) 的构建与实现. 中国航海, 2009(3): 50-52.
[6] SHENHUA Y, XINGHUA W, GUOQUAN C. Design and implement on intelligent ship handling simulator//2012 Third International Conference on Digital Manufacturing & Automation. Wuhan: IEEE, 2010: 473-477.
[7] 赵晴. 船舶航迹智能控制算法的研究. 厦门: 集美大学, 2012: 37-38.
[8] 李旭东. 基于 AIS 信息和船舶领域的几何避碰研究. 上海: 上海海事大学, 2006: 6-16.
[9] 倪德山, 洪碧光. 航海雷达模拟器训练. 大连: 大连海事大学出版社, 2011: 74-75.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 周云龙)