

6-3-2020

Modeling and Simulation of Marine Traffic Macroscopic Flow Complexity

Yuanqiao Wen

1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; ;2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China; ;3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China; ;

Du Lei

1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; ;

Yamin Huang

1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; ;

Tengda Sun

4. China Transport Telecommunications & Information Center, Beijing 100011, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling and Simulation of Marine Traffic Macroscopic Flow Complexity

Abstract

Abstract: To accurately describe the difficulty of cognitive traffic in the view of traffic managers, *a method for quantitative calculation of marine traffic macroscopic flow complexity was proposed*. The similar ships were cataloged into a traffic cluster; According to the historical traffic flow field by interpolation method, *the aggregation complexity, the speed-diachronic complexity and the density-diachronic complexity were evaluated*. *The cognitive complexity was obtained by the marine traffic macroscopic flow complexity, showing the cognitive complexity in the macroscopic complexity map*. The simulation experiment shows the macroscopic complexity model is available for demonstrating the distribution of complexity in space.

Keywords

traffic cluster, traffic flow, aggregation complexity, speed-diachronic complexity, density- diachronic complexity

Authors

Yuanqiao Wen, Du Lei, Yamin Huang, Tengda Sun, Changshi Xiao, and Chunhui Zhou

Recommended Citation

Wen Yuanqiao, Du Lei, Huang Yamin, Sun Tengda, Xiao Changshi, Zhou Chunhui. Modeling and Simulation of Marine Traffic Macroscopic Flow Complexity[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(4): 826-831.

水上交通流宏观复杂度建模与仿真

文元桥^{1,2,3}, 杜磊¹, 黄亚敏¹, 孙腾达⁴, 肖长诗^{1,2}, 周春辉^{1,2}(1. 武汉理工大学航运学院, 湖北 武汉 430063; 2. 湖北省内河航运技术重点实验室, 湖北 武汉 430063;
3. 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063; 4. 中国交通通信信息中心, 北京 100011)

摘要: 为了准确描述交通管理人员对水上交通流认知的难易程度, 提出了一种定量计算水上交通流宏观复杂度的方法。通过模糊聚类将区域交通流的宏观复杂度量转化为对交通簇内、外认知复杂性的测度, 并根据交通流动力方程插值得到整个水域的历史交通流场, 分别计算聚集复杂度、速度特征复杂度以及密度特征复杂度, 通过水上交通流宏观复杂度模型获得水上交通流宏观复杂度。构造典型水域进行仿真实验, 验证了该模型可客观反映水上交通流宏观复杂度的空间分布, 交通管理人员能及时地发现复杂度较高的区域, 并识别偏离航道或逆航道航行等船舶异常行为。

关键词: 交通簇; 交通流; 聚集复杂度; 速度特征复杂度; 密度特征复杂度

中图分类号: U698 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2017) 04-0826-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201704016

Modeling and Simulation of Marine Traffic Macroscopic Flow Complexity

Wen Yuanqiao^{1,2,3}, Du Lei¹, Huang Yamin¹, Sun Tengda⁴, Xiao Changshi^{1,2}, Zhou Chunhui^{1,2}(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China; 3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China;
4. China Transport Telecommunications & Information Center, Beijing 100011, China)

Abstract: To accurately describe the difficulty of cognitive traffic in the view of traffic managers, a method for quantitative calculation of marine traffic macroscopic flow complexity was proposed. The similar ships were cataloged into a traffic cluster; According to the historical traffic flow field by interpolation method, the aggregation complexity, the speed-diachronic complexity and the density-diachronic complexity were evaluated. The cognitive complexity was obtained by the marine traffic macroscopic flow complexity, showing the cognitive complexity in the macroscopic complexity map. The simulation experiment shows the macroscopic complexity model is available for demonstrating the distribution of complexity in space.

Keywords: traffic cluster; traffic flow; aggregation complexity; speed-diachronic complexity; density-diachronic complexity

引言

船舶的大型化、船舶数量的增加、港口航路的增多等因素使得水上交通流越来越复杂, 也使得现

代水上交通监管面临越来越大的挑战。在水上交通管理中, 虽然现代监管设备为提高监管水平和减轻监管压力提供了日益丰富的手段, 但日益增多的船舶数量和船舶类型、日益增加的港口航道/航路数量、日益增大的船舶体积、日益提高的船舶航速, 使得监管人员不得不处理越来越多的信息, 所以传统的基于管理人员的直觉判断和分析已经不能满足水上交通管理的需要。



收稿日期: 2015-07-06 修回日期: 2015-09-08;
基金项目: 国家自然科学基金(51679180, 51579204), 中央高校基本科研业务费专项资金(142212001), 武汉理工大学双一流项目;
作者简介: 文元桥(1975-), 男, 湖北松滋, 博士, 教授, 研究方向为水上交通安全与仿真等。

<http://www.china-simulation.com>

近年来, 复杂性学科发展迅猛, 为交通运输系统研究带来了新的思路和方法。从复杂性科学的视角审视交通运输系统, 已成为交通运输领域研究的热点。目前国内外学者针对交通流复杂度做了大量的研究, 主要分为以下 2 个方面: 1. 交通网络复杂性研究: Chen 等^[1]对不同形态的道路交通网络进行实证研究, 结果表明道路网络是一种无标度网络; 吴建军等^[2]在研究中发现交通拥堵现象及其阈值对网络的规模、拓扑结构和空闲能力有着强烈的依赖; 赵焱飞等^[3]提出五边到场航路交通模型, 描述当前五边到场交通态势的安全特征。2. 交通行为复杂性研究: Prandini^[4]等研究了基于航空器位置不确定性的三维空间中区域交通流冲突概率, 通过冲突概率测度交通流的复杂度; Treleaven^[5]以交通流的最小纵向偏移量作为衡量交叉口空域交通流的复杂度; 戴福青等^[6]选取交通密度、飞行状态、飞机机型和交通结构等要素构建了空域交通复杂度; 田炜等^[7]研究了国际航运网络的小世界与无标度特性, 并对其具有的一些不符合典型复杂网络统计特性的现象进行了分析; 宗刚等^[8]运用复杂网络理论研究了我国海港网络的复杂性, 研究结果表明我国港口之间的航线布局比较分散, 对区域性枢纽港口的形成较为不利; 文元桥等^[9]为研究水上交通系统安全特性引入了水上交通系统安全模态概念。

综上所述, 在交通领域应用复杂科学分析交通系统已经成为一种趋势, 在道路、航空交通方面的研究已经比较成熟, 但是在水上交通领域对复杂性测度的研究相对较少, 并且对船舶交通行为本身复杂性的研究尚未开展, 无法满足水上交通管理部门对复杂通航环境下交通安全管理的需要。

本文以水上宏观交通流为研究对象, 以交通簇为基本单元, 根据水上交通流宏观复杂度的定义, 建立了交通管理者视觉下的水上交通流宏观复杂度模型, 客观反映出水上交通流宏观复杂度的空间分布。通过定量计算区域内船舶的航行状态的信息含量, 描述交管人员认知交通的难易程度。

1 水上交通流宏观复杂度模型

1.1 宏观交通流聚类分析

当区域内某一部分船舶状态相近, 可以将其视为一个整体, 得到的交通系统的平均信息量较小, 当不对区域内的船舶进行分类, 水域内的平均信息量会虚高。为了更真实地反应出区域的交通态势对交通管理人员造成的认知复杂度, 有必要通过聚类分析对区域宏观交通流进行预处理。

在船舶流中, 航向相近、相对距离较小的一艘或多艘船舶视为一类, 称为一个交通簇。将区域内船舶方位、航向、航速的集合表达为矩阵:

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{X}_1, \dot{\bar{X}}_1 \\ \bar{X}_2, \dot{\bar{X}}_2 \\ \vdots \\ \bar{X}_n, \dot{\bar{X}}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1, y_1, vx_1, vy_1 \\ x_2, y_2, vx_2, vy_2 \\ \vdots \\ x_n, y_n, vx_n, vy_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: x_i, y_i 分别为船舶 i 在该水域内的位置坐标; vx_i, vy_i 分别为船舶 i 在方向上的速度; n 为该水域内船舶数目。

对船舶位置和航向数据进行标准化处理后, 采用欧氏距离法计算船舶航迹点之间的距离, 即:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{m=1}^3 (u_{im} - u_{jm})^2} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (v_{xi} - v_{xj})^2 + (v_{yi} - v_{yj})^2} \quad (2)$$

然后利用层次聚类法对改水域内所有船舶进行聚类分析, 将所有船舶划分为不同的交通簇。对交通流进行聚类, 消除了交通流的维度复杂性的干扰。对区域交通流的宏观复杂度量, 就转化为对交通簇内、外认知复杂性的测度。

1.2 水上交通流宏观复杂度模型

在交通簇内, 船舶位置接近、航向航速相接近, 主要存在由密度引起的交通认知复杂性。而在各个交通簇之间的速度和距离有较大的差异, 主要存在由交通簇与历史交通流速度场之间的差异引起的认知复杂度。由此可知, 区域的水上交通簇宏观复杂度(认知复杂度)不仅和交通簇内部的聚集程度相

关,也和交通簇与历史交通流信息的一致程度有关。因此,构建如下水上交通簇宏观复杂度模型^[10]:

$$C_{\text{cog}} = f(C_{\text{den}}, D_{\text{dia}}, C_{\text{dia}}) = C_{\text{den}} \cdot (D_{\text{dia}} + C_{\text{dia}}) \quad (3)$$

式中: C_{den} 为聚集复杂度,是由船舶交通流密度引起的交通流认知复杂度; C_{dia} 为交通簇的速度特征复杂度,是由交通簇运动趋势与区域内交通流的历史趋势的不同而引起的认知复杂度; D_{dia} 为交通簇的密度特征复杂度,是由交通簇的位置与区域内交通流的历史分布特征的不同而引起的认知复杂度。

区域水上交通流宏观复杂度即为区域内所有交通簇宏观复杂度的集合,即:

$$CON = \{C_{\text{cog}1}, C_{\text{cog}2}, \dots, C_{\text{cog}n}\} \quad (4)$$

1.2.1 交通流历史速度特征场

为了分析交通簇之间的复杂度,首先需要获得区域的历史交通流速度场。根据 Delahaye^[11]对航空交通流的抽象方法,可以类比得到水上交通流的线性动力方程:

$$\dot{\vec{X}} = A \cdot \vec{X} + \vec{B} \quad (5)$$

式中: \vec{X} 是船舶的位置信息; $\dot{\vec{X}}$ 为速度矢量信息; A 为系统的状态方程; \vec{B} 为一个常数矩阵。

利用上述动力方程,对区域的交通流进行插值,可以得到整个区域的历史交通流场。

1.2.2 交通簇内聚集复杂度模型

通过分析交通簇内密度因子建立宏观交通簇内聚集复杂度模型:

$$C_{\text{den}} = \sum_i^n f(\bar{d}_{iG}) = \sum_i^n e^{-\alpha \|\bar{d}_{iG}\|} \quad (6)$$

式中: α 为距离权重,与交管人员对两船之间距离的敏感度相关, $\alpha = -\frac{2}{L_{\text{max}}} \ln(0.5)$; L_{max} 为入侵船与本船 i 之间的距离; $\|\bar{d}_{iG}\|$ 为船舶 i 到船舶流质心位置矢量的模。

1.2.3 交通簇速度特征复杂度模型

在交通簇内,船舶间的航向相同,因此可以用交通簇内所有船舶的平均速度来表示交通簇的速度矢量 $\dot{\vec{X}}_{\text{cluster}}$:

$$\dot{\vec{X}}_{\text{cluster}} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n vx_i, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n vy_i \right] \quad (7)$$

为了不丢失交通簇所在区域内的交通矢量场的全部信息,将交通簇内交通矢量场的所有速度矢量表示为一个集合 \vec{V}_{cluster} :

$$\vec{V}_{\text{cluster}} = \{\vec{V}_{\text{clu},1}, \vec{V}_{\text{clu},2}, \dots, \vec{V}_{\text{clu},m}\} \quad (8)$$

式中: $\vec{V}_{\text{clu},m}$ 表示交通簇内的一个速度矢量; m 表示交通簇所在区域内不同速度矢量的个数。

则交通簇速度与交通流历史特征场内所有速度矢量的相似度 $P(X)$ 可记为:

$$P(X) = \sum_{i=1}^m P(\vec{V}_{\text{clu},i}) \cdot \text{Sim}_i \quad (9)$$

式中: $P(\vec{V}_{\text{clu},m})$ 为第 m 种速度矢量在交通矢量场中出现的概率, $P(\vec{V}_{\text{cluster}}) = \{P(\vec{V}_{\text{clu},1}), P(\vec{V}_{\text{clu},2}), \dots, P(\vec{V}_{\text{clu},m})\}$, 并且有 $\sum_{i=1}^m P(\vec{V}_{\text{clu},i}) = 1$; Sim 为 $\dot{\vec{X}}_{\text{cluster}}$ 与 \vec{V}_{cluster} 之间的距离,可以利用改进型的夹角余弦法求取,即

$$\text{Sim}(\dot{\vec{X}}_{\text{cluster}}, \vec{V}_{\text{cluster}}) = \left[\frac{1}{2} \frac{\dot{\vec{X}}_{\text{cluster}} \cdot \vec{V}_{\text{clu},1}}{\|\dot{\vec{X}}_{\text{cluster}}\| \|\vec{V}_{\text{clu},1}\|} + \frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \frac{\dot{\vec{X}}_{\text{cluster}} \cdot \vec{V}_{\text{clu},m}}{\|\dot{\vec{X}}_{\text{cluster}}\| \|\vec{V}_{\text{clu},m}\|} + \frac{1}{2} \right]$$

交通簇速度特征复杂度 C_{dia} 的取值与交通簇的速度、交通矢量场的速度密切相关,由交通簇运动趋势与区域内的交通流历史趋势的不同而引起的,利用信息量来衡量速度特征复杂度的大小:

$$C_{\text{dia}} = f(\dot{\vec{X}}_{\text{cluster}}, \vec{V}_{\text{cluster}}) = -\ln P(X) \quad (10)$$

1.2.4 交通簇密度特征复杂度模型

通过对截面历史交通数据的研究,可以发现船舶的位置分布一般服从正态分布^[12],即 $X \sim N(\mu, \sigma)$ 。对交通簇密度因子的研究主要通过船舶位置的分布特征,由船舶位置分布服从正态分布可得到其密度函数:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, -\infty < x < \infty \quad (11)$$

利用信息量来衡量这种由交通簇当前状态与历史特征的差异性引起的密度特征复杂度 D_{dia} :

$$D_{\text{dia}} = -\ln T(X) \quad (12)$$

式中: $T(X)$ 表示当前交通簇的位置与交通流特征的相似程度, 有 $T(X) \in (0, 1]$, 可以由交通簇出现的概率与 $f(\mu)$ 的比值得到, 即 $T(X) = \frac{f(d_{\perp})}{f(\mu)}$, 其中 d_{\perp} 表示交通簇的质心到达航道中心轴线的距离。

2 仿真实验

2.1 实验设计

2.1.1 航道设置

研究水域为设置的面积为 $6 \times 6 \text{ nmile}^2$ 的可航水域(如图 1), 水域内有一条“Y”字形航道; 交通流从坐标为(9, 6)的入口自南向北进入航道, 在进入航道的中心位置(9, 9)后交通流分离, 分别以 315° 和 045° 方向驶离该水域。

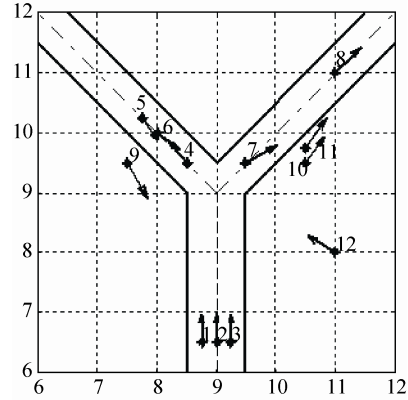


图 1 航道及船舶空间分布图

Fig. 1 Space distribution map of ship and channel

2.1.2 船舶设置

在该水域内生成 12 艘船舶(如图 1), 坐标、航速航向如表 1 所示。

表 1 模拟交通数据

Tab. 1 Simulated traffic data

船舶编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
X 轴/nmile	8.75	9	9.25	8.5	7.75	8	9.5	11	7.5	10.5	10.5	11
Y 轴/nmile	6.5	6.5	6.5	9.5	10.25	10	9.5	11	9.5	9.5	9.75	8
航速/kn	6	4.25	6	6.4	6	6.5	8	8	9	7.21	8.14	7.2
航向/ $^\circ$	000	000	000	320	145	125	060	045	150	035	035	300

2.1.3 交通流设置

假设两个航道入口处的交通流分布都服从正态分布, $X_{in} \sim N(0, 0.16)$, 出口交通流同样服从正态分布, $X_{out} \sim N(0, 0.12)$ 。

2.2 实验结果

2.2.1 交通流聚类分析

根据 1.1 的方法, 对交通流进行聚类分析, 得到聚类结果如图 2 所示。

通过对水上交通流的聚类分析可知, 该水域内的 12 艘船舶被划分为 8 个交通簇, 即位置和航向相接近的 1~3, 5~6, 10~11 可各自归为一类, 其余的船舶之间的相对位置距离较远或者航向相差较大, 则各自单独成为一类。

2.2.2 历史交通流场分析

根据基本交通流场的描述可知, 该区域的航道

成“Y”字形, 交通流在中心位置分离, 分别以 315° 和 045° 方向驶离该水域。假设有观测截面观测到航道中不同位置的历史交通流速度和航向(图 3 长箭头所示), 根据 1.2.1 节的方法, 插值出整个区域的水上交通流历史流场(图 3 短箭头所示)。

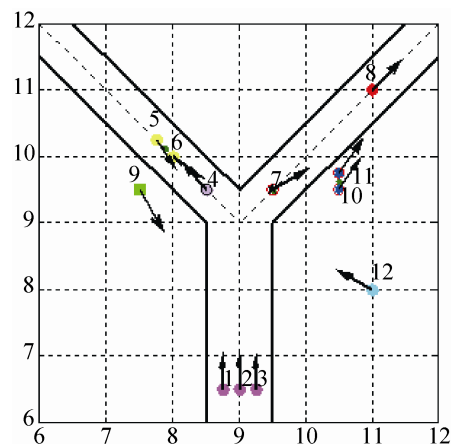


图 2 交通流聚类分析

Fig. 2 Traffic flow clustering analysis

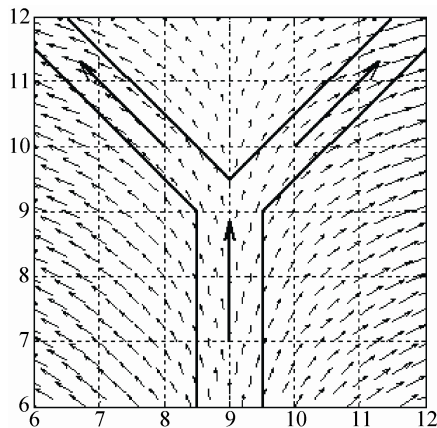


图3 历史交通流场
Fig. 3 Historical traffic flow field

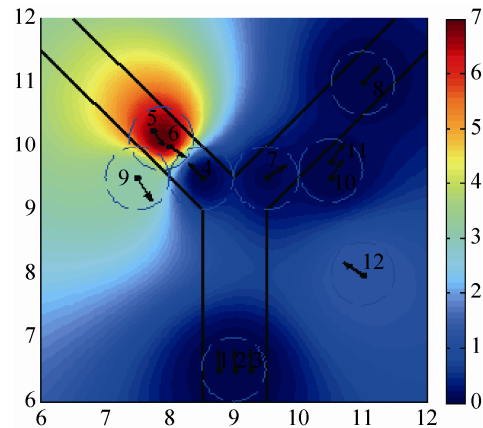


图5 交通簇速度特征复杂度分布图
Fig. 5 The speed-diachronic complexity of the cluster

2.2.3 交通簇内密度分析

据 1.2.2 节方法, 可计算出每个交通簇内船舶的密集程度(图 4): 1~3 船舶簇的密度最大; 5~6 由于船舶之间的间距比 10~11 船间距大, 因此 5~6 的密度相对较小; 其他单船的交通簇密集程度都为 1。

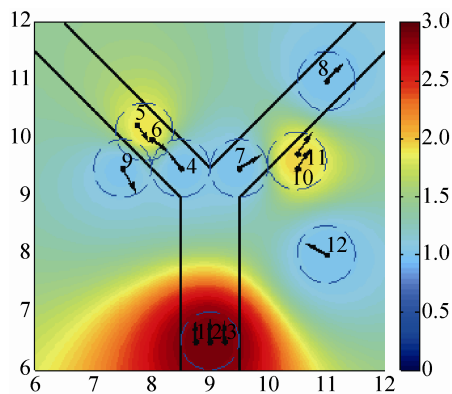


图4 交通簇内聚集复杂度分布图
Fig. 4 The aggregation complexity in the cluster

2.2.4 交通簇速度特征复杂度分析

根据 1.2.3 节的方法对交通簇的速度因子进行分析, 得到交通簇速度特征复杂度空间分布图(如图 5)。由图 5 可知 5~6 船构成的交通簇, 速度与航道历史交通流差异较大, 因此复杂度值最高; 其次是船舶 9 构成的交通簇和船舶 12 构成的交通簇, 其他船舶的航向与历史交通流场航速航向相近, 因此复杂度较低, 其中船舶 1, 2, 3 构成的交通簇和该处的历史交通流场航速航向一致, 因而此处的速度特征复杂度为 0。

2.2.5 交通簇密度特征复杂度分析

通过分析交通簇到航道的距离, 得到交通簇密度特征复杂度空间分布图(如图 6)。由图 6 可知, 在航道内的交通簇 9, 10~11 和 12 的交通簇中心偏离了航道中心, 因而复杂度较高, 其中交通簇 12 距离航道中心位置最远, 因此其复杂度最高。而在航道内的其他船舶交通簇距离航道中心近, 复杂度相对偏低。

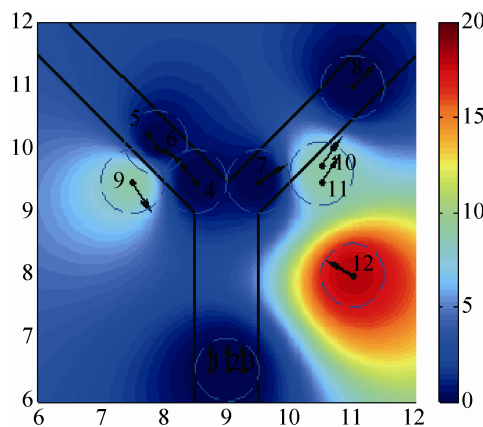


图6 交通簇密度特征复杂度分布图
Fig. 6 Density-diachronic complexity of the cluster

2.2.6 水上交通宏观复杂度分析

根据式(5)~(12), 即可得到交通簇内的聚集复杂度、交通簇与历史交通流场的速度特征复杂度和交通簇的密度特征复杂度。根据式(3)即可得到各个交通簇的宏观复杂度。再通过插值, 即可得到空间上水上交通流宏观复杂度的空间分布图(如图 7 所示)。

由图 7 可知, 在航道内并且遵守航道的航行规则的船舶, 认知复杂度都比较低, 如 1~4 船、7~8 船; 虽然在航道内, 但是逆航道交通流流向的交通簇认知复杂度较高, 如 5~6 船; 在航道外, 不按照区域航道结构航行的船舶, 其认知复杂度较高, 如 9~12 船。因此, 交通管理人员能够根据区域交通流认知复杂度分布图, 直观地发现区域内认知复杂度较高的交通簇, 有助于发现区域内船舶的异常行为。

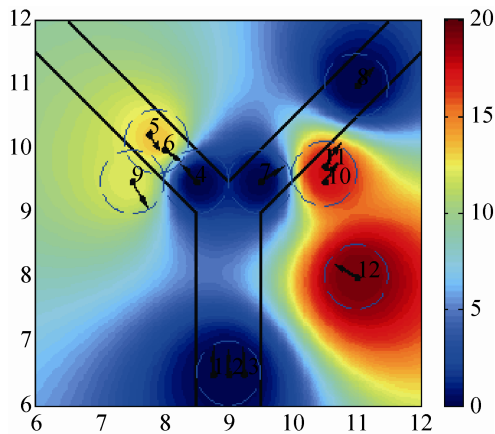


图 7 区域交通流宏观复杂度分布图

Fig. 7 The cognitive complexity in the macroscopic complexity map

3 结论

1) 本文构建了水上交通流宏观复杂度模型, 客观反映出水上交通流认知复杂度的空间分布, 准确的描述交管人员认知交通的难易程度。2) 根据认知复杂度的空间分布图, 交通管理人员能够方便地发现复杂度较高的区域; 此外, 认知复杂度也能用于辨别偏离航道或逆航道航行等船舶异常行为的识别。3) 后续将进一步探讨水上交通流宏观复杂度和船舶潜在风险之间的定量关系。

参考文献:

- [1] Chen Y, Li N, He D. A study on some urban bus transport networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* (S0378-4371), 2007, 376(1): 747-754.
- [2] Wu Jianjun, Gao Ziyong, Sun Huijun. Model for dynamic traffic congestion in scale-free networks [J]. *Euro-physics Letters* (S0295-5075), 2006, 76(5): 787-793.
- [3] 赵巍飞, 周阳. 五边到场交通态势安全评估研究 [J].

- 中国安全科学学报, 2011, 21(6): 99-103. (Zhao Yi-fei, Zhou Yang. Safety evaluation on five-edge arrival complexity [J]. *China Safety Science Journal*, 2011, 21(6): 99-103.)
- [4] Prandini M, Putta V, Hu J. A probabilistic measure of air traffic complexity in 3-D airspace [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* (S1099-1115), 2010, 24(10): 813-829.
- [5] Treleven K, Zhi-hong M. Conflict Resolution and Traffic Complexity of Multiple Intersecting Flows of Aircraft [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* (S1524-9050), 2008, 9(4): 633-643
- [6] 戴福青, 洪兰收. 空域交通复杂度计算方法研究 [J]. *中国民航大学学报*, 2010, 28(3): 1-4, 19. (Dai Fu-qing, Hong Lan-shou. Study on airspace traffic complexity computational methods [J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2010, 28(3): 1-4, 19.)
- [7] 田炜, 邓贵仕, 武佩剑, 等. 世界航运网络复杂性分析 [J]. *大连理工大学学报*, 2007, 47(4): 605-609. (Tian Wei, Deng Gui-shi, Wu Pei-jian, et al. Analysis of complexity in global shipping network [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2007, 47(4): 605-609.)
- [8] 宗刚, 胡蓓蓓, 韩建飞. 中国沿海港口网络空间结构的复杂性研究 [J]. *中国软科学*, 2012 (12): 171-178. (Zong Gang, Hu Bei-bei, Han Jian-fei. Complexity research on spatial structural characteristics of China's coastal port network [J]. *China Soft Science Magazine*, 2012 (12): 171-178.)
- [9] 文元桥, 吴定勇, 张恒, 等. 水上交通系统安全模态定义与建模 [J]. *中国安全科学学报*, 2013, 23(6): 32-38. (Wen Yuan-qiao, Wu Ding-yong, Zhang Heng, et al. Water traffic system safety modality: definition and modeling [J]. *China Safety Science Journal*, 2013, 23(6): 32-38.)
- [10] 黄亚敏. 水上交通复杂性测度研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014. (Huang Ya-min. Study on marine traffic flow complexity metric [D]. Wuhan, China: Wuhan University of Technology, 2014.)
- [11] Delahaye D, Puechmorel S. Air traffic complexity based on dynamical systems [C]// *IEEE Control Systems Society. The 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. Atlanta, USA: IEEE, 2010: 2069-2074.
- [12] 杜磊, 文元桥, 肖长诗, 等. 自由航行海域船舶碰撞概率计算 [J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(1): 53-59. (DU Lei, Wen Yuan-qiao, Xiao Chang-shi, et al. Collision probability calculation for ship sailing in free navigational sea area [J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(1): 53-59.)