

文章编号:1000-4653(2024)01-0027-09

船舶交通流速度离散特性研究

田序伟, 杨凯, 邓志鹏, 尉子璇, 殷彤, 郑冰
(浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 410000)

摘要:为更深刻地理解船舶交通流运行特性,以速度离散度研究为切入点,提出描述船舶交通流速度离散特性的两种指标,根据交通流基本图理论,对速度离散度在船舶交通流基本图上的分布及其与船舶交通流三参数之间的关系进行定量分析。结果表明:随着船舶流量、密度和速度的增加,速度离散度的分布趋于稳定,在低流量、高速度离散度区间内,速度离散度随着船舶流量的增加逐渐降低,在低速度离散度区间内,速度离散度随着船舶流量增加逐渐升高;基于改进的K-means-FCM算法,使用船舶交通流流量、密度、速度和速度离散度作为分类指标,对船舶交通流进行聚类分析,得到4个聚类中心与指标值的分布范围。基于试验结果,抽象总结船舶交通流运行状态图,将船舶交通流划分自由态、同质态、稳定态和异质态等4种状态。该研究对更好地认识船舶交通流特性起到一定的作用。

关键词:船舶交通流;速度离散特性;交通流基本图;聚类分析

中图分类号:U697 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2024.01.004

Research on the experimental features and characteristics of speed dispersion in vessel traffic flow

TIAN Xuwei, YANG Kai, DENG Zhipeng, YU Zixuan, YIN Tong, ZHENG Bing
(Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 410000, China)

Abstract: In order to understand the operation characteristics of vessel traffic flow more deeply, taking the study of speed dispersion as the entry point, this paper proposes two kinds of indexes to describe the speed dispersion characteristics of vessel traffic flow. According to the theory of traffic flow fundamental diagram, this paper quantitatively analyzes the distribution of speed dispersion on the fundamental diagram of vessel traffic flow and its relationship with the three parameters of vessel traffic flow. The results show that the distribution of speed dispersion tends to be stable with the increase of ship flow, density and velocity. The speed dispersion gradually decreases with the increase of ship flow in the low and high speed dispersion range, and increases with the increase of ship flow in the low speed dispersion range. The improved K-means and FCM (Fuzzy C-means) algorithm are applied to do the cluster analysis for VTF condition. In the end, four substates of VTF condition are proposed: stochastic state, equilibrium state, tradition state and nonequilibrium state. This research plays a role in better understanding the characteristics of vessel traffic flow.

Key words: vessel traffic flow; speed dispersion; traffic flow fundamental diagram; cluster analysis

海上运输作为全球贸易的主要运输手段,随着全球贸易的发展,海上运输的效率及安全性也愈发引起人们的关注。船舶交通流作为海上运输的重要内容,与船舶安全、水域交通容量和港口设计规划等研究密切相关,因此,很多学者投入该领域的研

究中。

交通流特性的研究起源于道路交通,流量、密度和速度是其中最重要的3个要素,随着船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)设备的应用,可获取大量的船舶静态和动态信息,因此,许

收稿日期:2022-12-05

基金项目:浙江省交通运输厅科技计划项目(2024010)

作者简介:田序伟(1995—),男,工程师,研究方向为港航信息化。E-mail: 961737006@qq.com

引用格式:田序伟,杨凯,邓志鹏,等.船舶交通流速度离散特性研究[J].中国航海,2024,47(1):27-35.

TIAN X W, YANG K, DENG Z P, et al. Research on the experimental features and characteristics of speed dispersion in vessel traffic flow[J]. Navigation of China, 2024, 47(1): 27-35. (in Chinese)

多研究从船舶行为建模的角度来对船舶交通流进行仿真模拟,依据建模的范式可分为基于规则的模型和数学模型两大类^[1]。

有学者致力于从船舶交通流特性分析的角度进行研究,对比道路交通流特性分析的模型已从早期的 Greenshield 模型发展至网络水平模型,而对于船舶交通流特性的相关研究水平仍然停留在早期的研究模型阶段,并且大多数模型的研究集中在海峡、水道等一维区域,因此,提出一种区域船舶交通流特性分析模型^[2]。

从更宏观的角度,LIU 等^[3]分析现有的模型从船舶的静态特性、动态特性或者是船舶行为等角度在一定程度上能够描述船舶交通流,但由于缺少船舶交通流特性分析的数学模型,限制了船舶交通流特性分析的实际应用,因此,建立船舶交通流特性模型来对船舶交通流的类型、结构和行为特性及其他们之间的关系进行描述。

除上述所提到的关于船舶交通流特性的研究,还有大量的研究从相似的角度对船舶交通流特性进行分析,然而,在这些研究当中,大部分都是在船舶交通流处于一种稳态流或者称为平衡流、同质流的状态下进行的,船舶流量和密度在流量密度图上遵循一条过原点的曲线,且有一个最大值,这条曲线也被称作交通流基本图,这意味着船舶交通流中的每个个体都以相同的间距和相同的速度移动。然而,在实际的船舶交通流中是不大可能出现这种状态的,通常用一定时间间隔内的测量平均值来形容三参数之间的关系,可发现这些测量点以一种区域性散射状态分布在交通流基本图曲线的附近,在研究道路交通流中发现^[4]这些测量点呈现一种非稳态性质。在这种非稳态的状态当中,个体之间以不同的速度行驶,被称为交通流的速度离散性,因此,为更加真实地描述船舶交通流的真实状态,必须把速度离散特性纳入考虑当中。

道路交通流领域的研究如:CASTILLO 等^[5]用车速标准差与平均速度的比值小于 15% 作为标准,挑选准平衡状态的交通流数据,发现速度离散度较小的速度样本点更好地拟合速度密度曲线;CASSIDY^[6]对接近平衡状态和非平衡状态下的数据在流量-密度图上的分布进行比较,发现在基本图上非平衡状态下的数据并不总是遵循接近平衡状态下的关系,但倾向于分布在接近平衡状态下数据的下方。这些研究表明速度离散特性与交通流三参数或运行状态之间存在某种联系。

上述研究都没有对速度离散特性进行更进一步

的分析,也没有解释其在流量密度上分布的现象,基于此目的,WANG 等^[7]通过对高速公路采集的交通流数据进行分析,发现流量与速度离散度呈现一种负指数关系,并对速度离散特性在交通流上分布的现象及潜在的机理进行解释。CHUNGA 等^[8]为弥补前人研究中的样本不足的问题,使用 25 万条数据来构建速度离散度与交通流三参数之间的一般关系。另外,亦有研究从交通流中非机动车辆占比、行人和匝道类型等因素对速度离散度的影响进行分析^[9-11]。

综上所述,速度离散特性反映了交通流运行的稳定性,与交通安全和效率有着密切的联系。在水上交通领域,对于船舶速度离散特性的认识不够,评价一个水域或航道的交通状况,往往只从宏观交通流参数,如从船舶流量、密度的角度进行分析,在船舶数量较少时或许适用,但随着船舶数量的增加,交通流稳定性发生变化,其难以反映完整情况。在上述理由推动下,将速度离散特性引入到船舶交通流特性研究是十分必要的。

本文从以下 3 个方面对船舶速度离散特性进行研究:速度离散特性在船舶交通流基本图上的分布、速度离散度指标同船舶交通流三参数之间的相关性和考虑在速度离散状态下的船舶交通流运行状态的划分。

1 研究方法

1.1 逻辑框架

船舶交通流速度离散特性研究的逻辑框架见图 1,其包括船舶 AIS 数据的采集与处理、船舶交通流参数计算和船舶交通流速度离散特性分析等 3 部分内容。

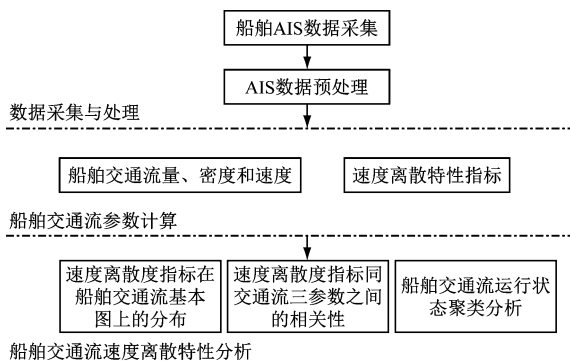


图 1 船舶交通流速度离散特性研究框架

Fig. 1 A framework for the study of ship speed dispersion

1.2 数据采集和处理

本研究收集了来自新加坡海峡航段和长山水道航段的 AIS 数据并进行分析,数据分别来自船信网

和天津海事局。新加坡海峡航段的数据时间范围是2019年6月—2019年7月,所选范围顶点坐标为(1°29'640N, 103°12'60E)、(1°23'820N, 103°06'840E)、(1°06'600N, 103°38'220E)、(1°33'600N, 103°39'60E),共604390条数据;长山水道航段的数据时间范围是2018年6月—2018年9月,所选范围顶点坐标为(38°39'600N, 120°33'900E)、(38°07'

200N, 120°52'140E)、(38°28'200N, 120°33'480E)、(37°59'760N, 120°51'720E),共3683912条数据。

AIS信息选取字段包括船舶的海上业务识别码(Maritime Mobile Service Identity, MMSI),接收AIS信息时间、经度、纬度、对地航向和对地航速等,部分AIS数据样本见表1。

表1 AIS数据样本
Tab.1 The AIS sample

MMSI	接收AIS信息时间	经度/(°)	纬度/(°)	对地航向/(°)	对地航速/(°)
477 003 200	2018-05-31T 16:00:03	120°34'.735E	38°02'.620N	279.1	14.5
413 523 880	2018-05-31T 16:00:06	120°40'.892E	38°01'.996N	284.9	9.3
413 489 010	2018-05-31T 16:00:07	120°48'.46E	38°00'.929N	282.7	8.5
477 003 200	2018-05-31T 16:00:10	120°34'.705E	38°02'.624N	279.1	14.5
477 003 200	2018-05-31T 16:00:15	120°34'.675E	38°02'.628N	279.1	14.5
413 489 010	2018-05-31T 16:00:17	120°48'.17E	38°00'.935N	281.3	8.5
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
413 489 010	2018-05-31T 16:05:26	120°47'.111E	38°01'.89N	281.8	8.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
413 807 000	2018-08-31T 15:59:57	120°41'.317E	38°01'.981N	279.7	8.2

由于AIS数据在收集、传送和接收的过程中不可避免地会产生错误,因此,在数据分析前必须清除数据的误差和噪声,采用KANG等^[12]使用的方法对原始AIS数据进行处理。

1.3 船舶交通流参数计算

1.3.1 船舶交通流量、密度和速度

参考道路交通流理论,用单位时间内通过观察位置的船舶数量作为船舶流量,记作 Q_τ 。

$$Q_\tau = N_\tau \quad (1)$$

式(1)中: N_τ 为在统计时间间隔 $t_\tau = [t_i, t_j]$ 内通关观测点的船舶数量, t_i, t_j 分别为观测开始时刻和结束时刻。

速度可分为时间平均速度和空间平均速度^[13]。本文关注的是船舶航行过程中船舶速度的变化,因此,选用空间平均速度,其计算为

$$v_i = \frac{\Delta d_i}{\Delta t_i}, \quad i \in [1, n] \quad (2)$$

式(2)中: v_i 为在 t_τ 内第 i 艘船舶的平均速度; Δd_i 为船舶的航行距离; Δt_i 为船舶的航行时间。

$$v_\tau = \frac{\Delta d_1 + \Delta d_2 + \cdots + \Delta d_i}{\Delta t_1 + \Delta t_2 + \cdots + \Delta t_i}, \quad i \in [1, n] \quad (3)$$

式(3)中: v_τ 为 t_τ 内的船舶交通流的平均速度。

由式(1)和式(3)可得到船舶交通流的密度为

$$K_\tau = \frac{Q_\tau}{v_\tau} \quad (4)$$

式(4)中: K_τ 为 t_τ 内的船舶交通流的密度; Q_τ 为船舶流量。

1.3.2 速度离散特性指标

在进行样本的离散性分析当中,样本的标准差是最常用的指标为

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_\tau)^2}{n-1}} \quad (5)$$

式(5)中: S 是基于样本标准差定义的速度离散度指标。

文献[7]为考察速度离散分析性中的车辆跟驰现象,使用相邻速差的定义,基于同样的目的,相连船舶的速度标准差为

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |v_i - v_{i+1}|}{n-1} \quad (6)$$

式(6)中: A 是基于相邻速差定义的速度离散度指标。

为对不同平均速度情况下的离散性指标进行对比,对 S 和 A 进行标准化处理,得到他们的无量纲形式 S_R 和 A_R 为

$$S_R = S/v_\tau \quad (7)$$

$$A_R = A/v_\tau \quad (8)$$

式(7)和式(8)中:速度离散性指标为 S 、 A 、 S_R 和 A_R 。

1.4 船舶交通流速度离散特性分析

1.4.1 速度离散度指标在交通流基本图上的分布

通过数据计算得到船舶交通流三参数和船舶速度离散性指标后,为研究速度离散性质,需对数据样本进行分类,CASTILLO 等^[5]使用 S_R 是否小于 15%,将数据样本划分为 2 个部分, S_R 小于 15% 被看作同质流。WANG 等^[7]使用 S_R 的值为 10% 和 20% 将数据样本分为 3 组,用于分类的值的大小并无绝对的标准,其目的是观察不同范围内的速度离散性指标在交通流基本图上的分布情况。因此,只要使分类后各组内的数据的量相差不大就可以。

1.4.2 速度离散度指标同交通流三参数的关系

在道路交通流的研究中,通过回归分析,文献[7]发现密度是 S_R 的指数形式,而文献[8]的研究正好相反,发现 S_R 是密度的指数形式。本文也将从相似的角度对速度离散性指标同交通流参数之间的关系进行探讨。

1.4.3 船舶交通流运行状态聚类分析

聚类方法是适合交通状态数据分类的一种数据挖掘方法,基于聚类分析的交通状态量化方法是以交通流的基础数据为基础,通过对这些基础数据的分析处理,从这些基础交通数据中提取交通流参数,最后由聚类分析方法根据每种交通状态其中的样本具有的相似性和不同状态之间的样本之间的相异性,得到适合不同道路的合理交通状态分类。

文献[14]提出模糊 C 均值聚类算法(Fuzzy C-means, FCM)将模糊理论应用于聚类分析中,是一种“软聚类”方法,与硬聚类方法如 K 均值聚类算法(K-means)不同,要求每个样本被严格地划分到不同类别中,分析每一个样本与不同聚类中心的隶属关系,以隶属度的大小来确定每个数据样本属于不同类别的不确定程度,由此客观地反映研究对象的数据特征和规律。

由于交通流是一个复杂的、不断变化的连续过程,各交通运行状态等级之间没有明显的界限,交通运行状态的描述也具有明显的模糊性和不确定性。因此,FCM 算法适用于对交通流运行状态的分类。例如,AZIMI 等^[15]利用 FCM 算法对快速路交通流运行状态进行分类,并与《道理通行能力手册》的分级标准进行对比。

速度离散指标作为船舶交通流运行状态的重要指标,却很少应用于交通流运行状态的分析当中,因

此,本文选取船舶交通流的流量、密度、速度和速度离散性指标,应用 FCM 算法来对船舶交通流运行状态进行分类。

FCM 的求解过程是利用迭代使数据样本距离聚类中心的距离加权和最小,其目标优化函数为

$$\begin{aligned} \operatorname{argmin} \quad & \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n \mathbf{u}_{m,ij} \|x_j - \mathbf{c}_i\|^2 \\ & \sum_{i=1}^c \mathbf{u}_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中: c 为聚类中心个数; n 为数据样本个数; $\mathbf{u}_{m,ij}$ 为样本 j 对类 i 的隶属度; m 为模糊加权指数, $m > 1$; x_j 为第 j 个数据样本; \mathbf{c}_i 为第 i 个聚类中心。

利用拉格朗日乘法对目标函数求解,得到目标函数达到最优的条件为

$$\mathbf{c}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_j \mathbf{u}_{m,ij}}{\sum_{j=1}^n \mathbf{u}_{m,ij}} \quad (10)$$

$$\mathbf{u}_{m,ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_j - \mathbf{c}_i\|}{\|x_j - \mathbf{c}_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (11)$$

先初始化聚类中心或隶属度矩阵 \mathbf{c}_i 或者 $\mathbf{u}_{m,ij}$, 通过式(10)和式(11)进行迭代,使最终在 $\|c_{(r+1)} - c_{(r)}\| < \varepsilon$ 时停止,其中, r 为迭代次数, ε 为迭代终止条件,其值在 0~1 之间。 \mathbf{c}_k 为第 k 个聚类中心。

考虑到 FCM 的复杂性较高,收敛速度慢,同时,避免由于随机选出初始聚类中心出现的聚类结果收敛到局部最优的情况,对初始聚类中心的选取采取的方法如下:

1) 为提高 FCM 的效率,采用 K-means 算法和 FCM 相结合的聚类策略进行聚类分析,选取 K-means 算法的聚类结果作为 FCM 聚类的初始聚类中心。

2) 为避免随机选取初始聚类中心出现局部最优的情况,通过设定条件,对 K-means 算法的初始聚类中心进行有目的地选取,过程如下:

① 先随机选取一个数据样本作为第一个聚类中心。

② 找到距离第一个聚类中心最远的数据样本作为第二个聚类中心。

③ 选取距前两个聚类中心最短距离最大的那个点作为第三个聚类中心。

④ 以此类推,直到找到所有聚类中心。

K-means-FCM 算法流程见图 2。

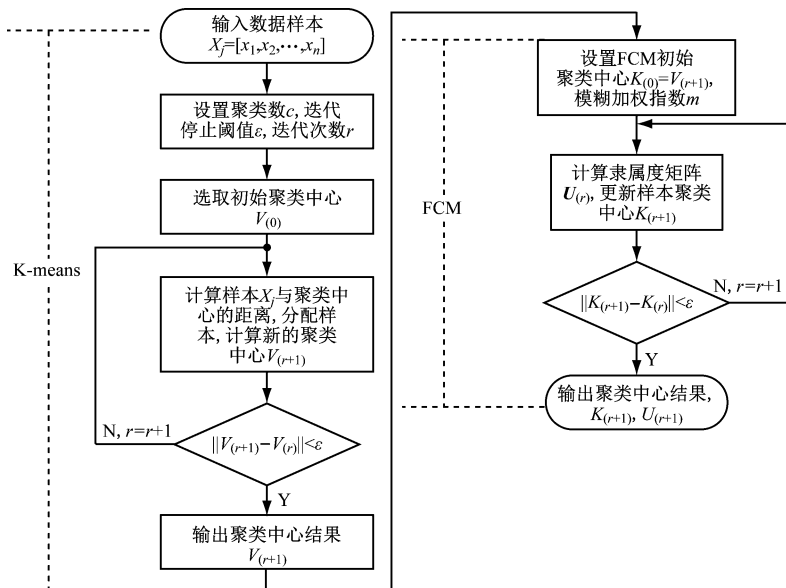


图 2 K-means-FCM 算法流程

Fig. 2 Flowchart of the K-means-FCM algorithm

2 结果和分析

2.1 速度离散度指标在交通流基本图上的分布

根据 S_R 的值,将数据样本分为 S_R 在 $[0, 15\%)$ 、 $[15\%, 30\%)$ 、 $[30\%, 100\%]$ 这 3 组,根据相似的原则,对 S 、 A_R 和 A 进行分类,见表 2 和表 3。

1) 从新加坡海峡的分类结果来看, S_R 在 $15\% \sim 30\%$ 的数据量最多,其次是小于 15% ,大于 30% 的数据量最少; A_R 结果与之相比,小于 30% 的数量减少,大于 30% 的数据量增多,这表明使用 A_R 作为速度离散度指标其离散程度更为明显。

2) 从长山水道的结果来看, S_R 小于 15% 的数据量最多,其次是 $15\% \sim 30\%$,高于 30% 最好; A_R 结果与之相比,小于 15% 的数据量减少,大于 15% 的数据量增多。

比较新加坡海峡和长山水道的结果可知:长山水道的数据主要集中在小于 15% 和 $15\% \sim 30\%$ 的区间,而新加坡海峡的数据分布相对平均,说明长山水道的速度离散度整体上小于新加坡海峡; A_R 指标结果在两个区域的 30% 以上数据样本量都增多,说明使用 A_R 指标得到的船舶速度离散度结果比 S_R 更大。

表 2 速度离散度指标分类结果 (S_R and S)

Tab. 2 Classification results of speed dispersion index (S_R and S)

位置	指标					
	S_R			$S/(n \text{ mile/h})$		
	$[0, 15\%)$	$[15\%, 30\%)$	$[30\%, 100\%]$	$[0, 1.8)$	$[1.8, 3.6)$	$[3.6, +\infty)$
新加坡海峡	240	283	109	255	298	79
长山水道	967	708	116	1 191	539	61

表 3 速度离散度指标分类结果 (A_R and A)

Tab. 3 Classification results of speed dispersion index (A_R and A)

位置	指标					
	A_R			$A/(n \text{ mile/h})$		
	$[0, 15\%)$	$[15\%, 30\%)$	$[30\%, 100\%]$	$[0, 1.8)$	$[1.8, 3.6)$	$[3.6, +\infty)$
新加坡海峡	193	245	194	218	263	151
长山水道	788	764	239	995	653	143

两个区域的船舶流量-密度图分别见图3和图4。由图3和图4可知:2个区域的流量同密度基本上是处于正比例增长状态,处于道路交通流理论所谓的自由流状态。

布在基本图上的表现基本一致,在无量纲指标中,指标大于30%的数据样本多集中在流量、密度较小的区域,这似乎表示速度离散度的分布同交通流三参数之间存在某种联系,为进一步探究,进行速度离散指标同三参数之间的定量分析。

在4个速度离散性指标中,船舶速度离散度分

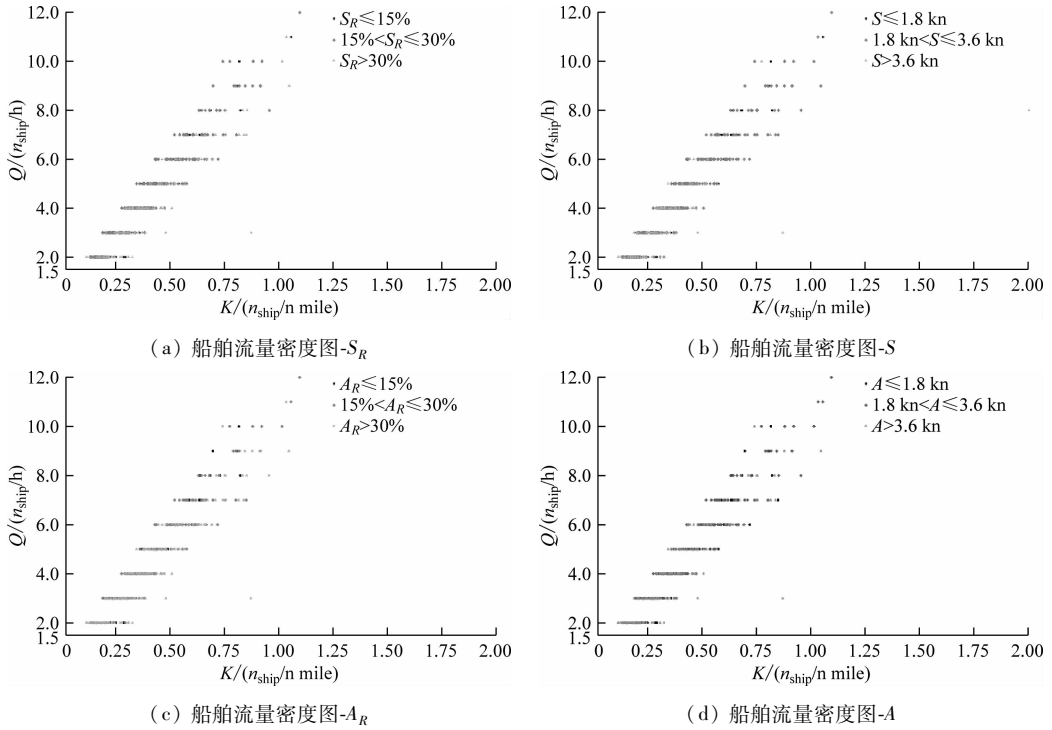


图3 新加坡海峡流量-密度图

Fig. 3 Flow-density diagram of Singapore strait

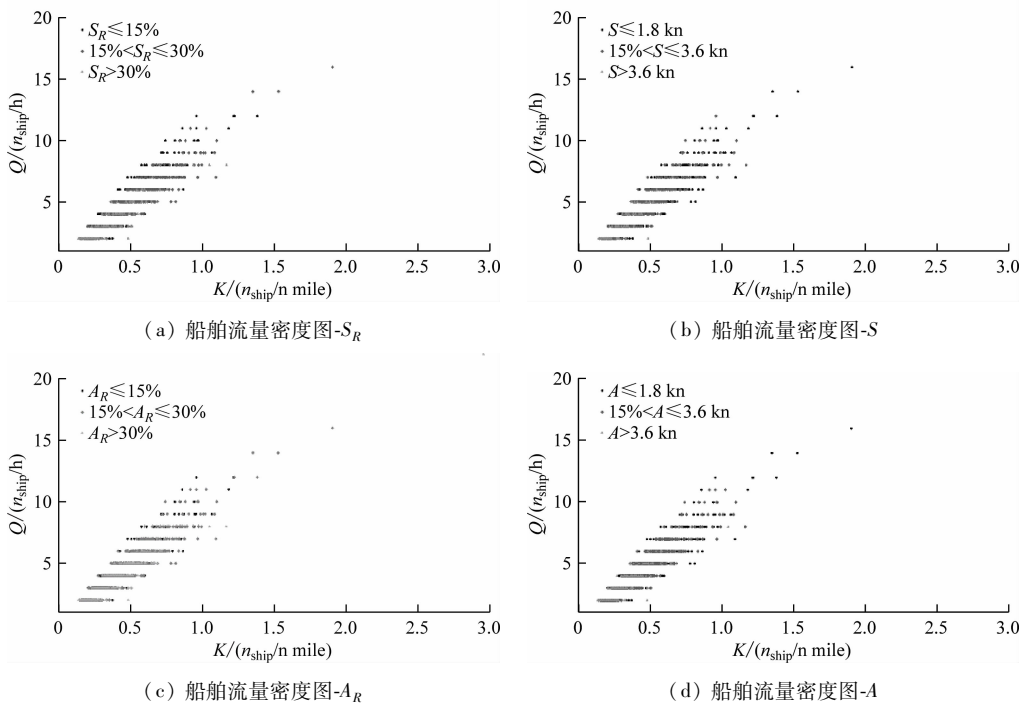


图4 长山水道流量-密度图

Fig. 4 Flow-density diagram of Changshan waterway

2.2 速度离散度指标同交通流三参数的关系

由于长山水道的数据更加丰富,因此,选取长山水道的数据作为样本,对 S_R 同船舶交通流的流量、密度和速度进行分析,分析结果见图5。

图5中: S_R 与 Q 和 K 的图像呈现相同的规律,

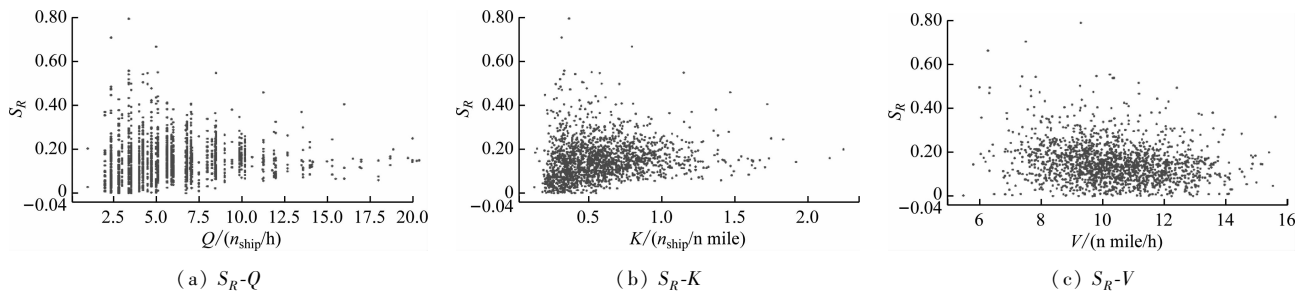


图5 S_R - Q 、 K 和 V 关系图

Fig. 5 The relationship of S_R with Q 、 K 、 V

在 S_R 与 V 的图像中,没有发现明显的规律,数据点广泛分布在一个二维区域,但在低速度区域,速度离散度分布在(0,0.9)内,而在高速度区域,速度离散度分布降低至(0,0.4),所以,速度离散度的分布范围会随着船舶速度的升高而缩小。

为进一步辨析,对 S_R - Q 进行定量分析,见图6。

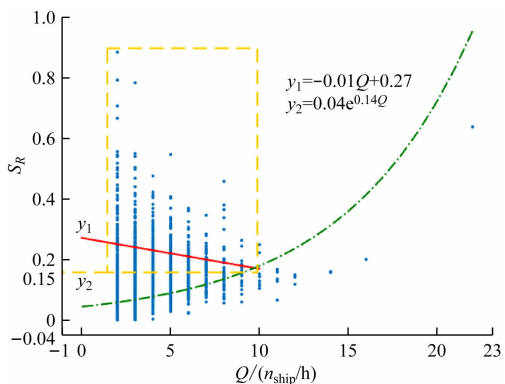


图6 S_R - Q 关系图

Fig. 6 The relationship of S_R with Q

当船舶流量为10时,此时的 S_R 稳定约在0.15,因此,将数据样本分为两部分,将船舶流量小于10且 S_R 大于0.15归为一组,即图6中矩形区域内;余下的数据归为一组,分别进行回归分析。

图6中:在矩形区域内, S_R 随着船舶流量的升高而降低,用线性回归的形式定量描述他们之间的关系,即 y_1 。在另一组数据中, S_R 随着船舶流量的增加一直处于增长中,经过回归分析,发现 S_R 与船舶流量符合指数分布,即 y_2 。

2.3 船舶交通流运行状态聚类分析

以长山水道的数据样本为例,选取 Q 、 K 、 v 和 S_R 作为分类指标,进行聚类分析,将样本分为4类,聚

与前面的分析相一致,因为二者处于正相关的关系,在低流量(密度)区域,船舶速度离散度分布的范围很大,随着船舶流量(密度)的升高,船舶速度离散度的分布范围逐渐减小,至船舶流量等于10时,船舶速度离散度基本稳定约在0.15。

类中心见表4,不同类别的各指标区间范围见表5,聚类结果见图7。分类结果能支持图6的分析如图7b所示,以此为底图,根据交通流的流量、密度、速度和速度离散度4个属性,将交通流运行分为4种状态,分别命名为自由态、同质态、稳定态和异质态,对应聚类结果中的第一类、第二类、第三类和第四类。将此结果抽象总结,用 S_R - Q 关系图进行描述,船舶交通流运行状态图见图8。

图8中: A 是自由态,在此状态中,船舶流量(密

表4 聚类中心结果

Tab. 4 Cluster center results

类中心	参数			
	$Q/(n_{ship}/h)$	$K/(n_{ship}/n\ mile)$	$V/(n\ mile/h)$	S_R
类1中心	2.69	0.25	10.83	0.09
类2中心	3.33	0.37	9.20	0.20
类3中心	4.44	0.40	11.30	0.15
类4中心	6.51	0.66	9.91	0.17

表5 不同类别的各指标区间范围

Tab. 5 Range of indicators

类	参数			
	$Q/(n_{ship}/h)$	$K/(n_{ship}/n\ mile)$	$V/(n\ mile/h)$	S_R
类1	[2,4]	[0.13,0.44]	[6.84,15.54]	[0,0.25]
类2	[2,5]	[0.16,0.68]	[4.22,12.42]	[0,0.89]
类3	[2,8]	[0.13,0.57]	[9.67,15.62]	[0.02,0.41]
类4	[5,22]	[0.51,2.96]	[6.21,13.61]	[0.06,0.64]

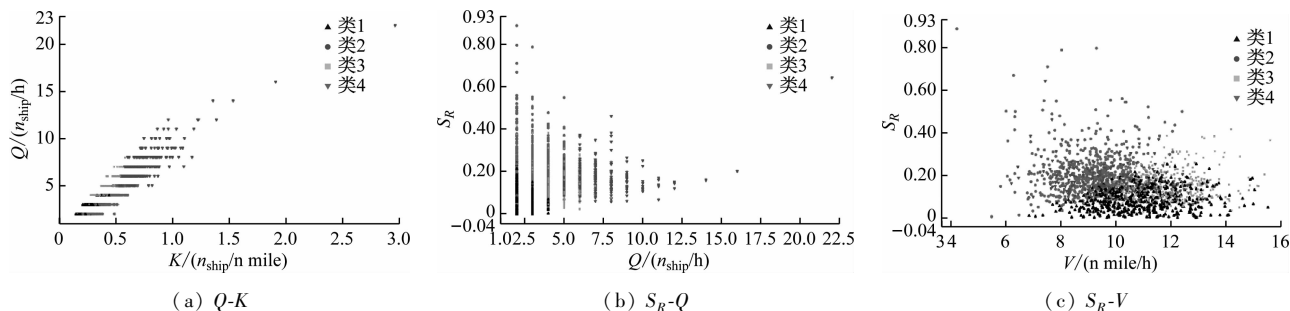


图7 聚类结果图

Fig. 7 The graph of clustering results

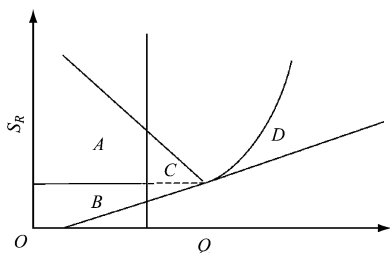


图8 船舶交通流运行状态图

Fig. 8 The graph of vessel traffic flow states

度)处于较低水平,船舶间的相互影响较小,船舶根据自己期望的速度航行,呈现出速度离散度分布范围广、离散值大的特点;**B**是同质态,在此状态中,船舶流量(密度)同样处于较低水平,但速度离散度较低,此时在航道中航行的船舶虽然没有相互影响,但他们都以一个相近的期望航速航行;**C**是稳定态,在此阶段,速度离散度的分布范围不断缩小,由于船舶密度的增加,船舶间距减小,船舶间的相互影响也越来越强,个体为保证安全航行,使航速保持相近的状态,在整体上呈现效果为交通流速度离散度趋于稳定;**D**是异质态,随着船舶流量(密度)的继续升高,速度离散度也越来越大,在此状态下,船舶间的相互作用达到很强的水平,个体船舶已无法通过控制船速来维持交通流整体的稳定,此时,船舶交通流处于极其不稳定的状态,同时,由于密度很大,易发生航行安全事故。

3 结束语

本文为认识船舶交通流的速度离散特性,理解船舶交通流的运行机理,主要做了以下3个方面的研究。

1) 提出船舶交通流速度离散度的两种定义:船舶交通流速度标准差和船舶交通流相邻速差及其他的无量纲形式,并得到船舶速度离散度在交通流基本图上的分布情况。

2) 分析速度离散度指标同交通流三参数之间的关系,对速度离散度同交通三参数之间的相关性

进行定性与定量研究。

3) 用流量、密度、速度和速度离散度作为分类指标,使用K-means-FCM算法对交通流运行状态进行聚类分析,根据分类结果,进行归纳总结,得到船舶交通流运行状态图,对船舶交通流状态划分为自由态、同质态、稳定态和异质态4个状态,并对其特点和形成原因进行说明。

本文以船舶交通流速度离散特性为切入点,在分析其性质的过程中,逐步加深对船舶交通流特性的认识。该工作在船舶交通流领域属于初创性工作,可为船舶交通流特性研究、航道交通组织、船舶航行安全等领域作为参考;另一方面,由于本文是基于海上实际数据的实证分析,为更加完善其理论内容,后续还需更多水域作为研究对象进行验证。

参 考 文 献

- [1] ZHOU Y, DAAMEN W, VELLING T, et al. Review of maritime traffic models from vessel behavior modeling perspective[J]. Transportation Research Part C, 2019, 105: 323-345.
- [2] LIU Y, JI Z, LUO X X, et al. Exploring characteristics and fundamental relations of area-wide vessel traffic flow [C]. 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Maui:IEEE,2018.
- [3] LIU Z, LIU J X, LI Z Z, et al. Characteristics analysis of vessel traffic flow and ITS mathematical model[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2017, 25 (2): 230-241.
- [4] KERNER B S, KOLLER M, KLENOV S L, et al. The physics of empirical nuclei for spontaneous traffic breakdown in free flow at highway bottlenecks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2015,438: 365-397.
- [5] CASTILLO D, BENITEZ F G. On the functional form of the speed-density relationship- II: empirical investigation[J]. Transportation Research B, 1995,29 (5): 391-406.

- [6] CASSIDY M J. Bivariate relations in nearly stationary highway traffic[J]. *Transportation Research B*, 1998, 32(1): 49-59.
- [7] WANG H, WANG W, CHEN X, et al. Experimental features and characteristics of speed dispersion in urban freeway traffic[C]. *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, 2007: 150-160.
- [8] CHUNGA C, WILL W. Characteristics of speed dispersion and its relationship to fundamental traffic flow parameters[J]. *Transportation Planning and Technology*, 2014, 37(7): 581-597.
- [9] 李爱增,刘金阳,李文权. 信号交叉口下游车速离散特性[J]. *公路交通科技*, 2015, 32(12): 114-119.
LI A Z, LIU J Y, LI W Q. Speed dispersion characteristics of backward section of signalized intersection[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2015, 32(12): 114-119.
- [10] 周旦,许镭. 混行非机动车交通流车速离散特性研究[J]. *交通节能与环保*, 2019, 15(5): 45-48.
ZHOU D, XU L. Research on discrete characteristics of mixed speed of non-motorized traffic flow[J]. *Transport Energy Conservation & Environmental Protection*, 2019, 15(5): 45-48.
- [11] 刘莹莹,李健,陈小鸿. 城市快速路车速离散特征及其影响因素研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(5): 111-120.
LIU Y Y, LI J, CHEN X H. Traffic speed dispersion on urban expressways: the characteristics and its influence factors[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(5): 111-120.
- [12] KANG L J, MENG Q, LIU Q. Fundamental diagram of ship traffic in the Singapore strait[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 340-354.
- [13] 崔晓琳,贾顺平,孙明东. 空间平均速度与时间平均速度关系模型验证[J]. *综合运输*, 2012(11): 66-68.
CUI X L, JIA S P, SUN M D. Model verification of the relationship between space mean speed and time mean speed[J]. *China Transportation Review*, 2012(11): 66-68.
- [14] 周开乐. 模糊C均值聚类及其有效性检验与应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2014.
ZHOU K L. Theoretical and applied research on Fuzzy C-means clustering and its cluster[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
- [15] AZIMI M, ZHANG Y. Categorizing freeway flow conditions by using clustering methods[J]. *Transportation Research Record*, 2010, 2173: 105-114.

(上接第 26 页)

- [25] 李志强. 公路隧道火灾数值模拟及人员逃生研究[D]. 西安:长安大学, 2011.
LI Z Q. Research on highway tunnel fire simulation and person escape[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011. (in Chinese)
- [26] HURLEY M J. SFPE handbook of fire protection engineering[M]. New York: Society of Fire Protection Engineers, 2016.
- [27] 周勇狄. 长大公路隧道火灾数值模拟及逃生研究[D]. 西安:长安大学, 2006.
ZHOU Y D. Numerical simulation and escape research of fire in long-distance highway tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)
- [28] 龚波. 基于运输车辆人员安全的公路隧道火灾疏散研究[D]. 西安:长安大学, 2018.
GONG B. Study on the fire spread and evacuation of road tunnel-based on the safety of transportation vehicle personnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [29] CHEN L Y, MIHO S, NOBUYOSHI K, et al. Walking speed probability distribution in smoke-filled tunnel experiments[J]. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 2022, 45: 1-8.
- [30] Comité Technique 5 Tunnels Routiers. Fire and smoke control in road tunnels [M]. Paris: PIARC Committee on Road Tunnels, 1999.
- [31] 陈汉波. 巴朗山高海拔单洞对向交通公路隧道火灾疏散救援研究[D]. 重庆:西南交通大学, 2014.
CHEN H B. Study on fire evacuation and rescue for single-tunnel subtended traffic in Balangshan high altitude road tunnel[D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2014.