内河船舶交通流量的时空分布特征

廖　鹏
（东南大学 交通学院，江苏 南京　210096）

摘要： 掌握内河船舶的交通流量特征是进行合理的航道和通航设施规划、设计、运营、管理与控制的前提. 根据大量的航道(段)船舶交通流资料，提出了两个不均衡系数来反映内河船舶流量的时空分布特征. 其中，具有一定保证率的单位流量不均衡系数能够较好地反映内河船舶流量的时间分布特征，拓展了《船闸总体设计规范》中月运量不均衡系数的内涵；单位流量方向系数则表明船舶单向流量并不一定等于双向流量的一半，研究内河船舶交通问题时，应按船舶航向分别进行讨论.

关　键　词： 内河；船舶；交通流；时空分布；船闸
中图分类号： U641.73　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1009-640X(2009)02-0033-06

内河船舶交通流在某种程度上具有随机性，通过航道某一点、某一断面或某一条航段的船舶流量是一个随机数，不同时间、不同地点的船舶流量都是变化的[1]. 船舶流量随时间和空间变化的现象，可称为船舶流量的时空分布特征. 研究船舶流量的变化规律，对于进行内河航道的规划、通航设施布局以及通过能力研究等均具有重要的意义[2-5]. 本文结合笔者近年收集的大量相关资料，在文献[6]的基础上进一步分析内河船舶流量的时空分布特征，以期为内河船舶交通流研究提供基础.

1　内河船舶交通流数据

根据研究需要及资料的获得性，重点收集了京杭运河苏北段、川江和三峡库区以及西江桂平至梧州段(简称西江桂梧段)多个断面的资料作为本文研究的基础数据；同时考虑国外内河航运发达的特点，收集了美国 3 个典型船闸断面的运行资料作为参考[7]. 收集的航道(段)船舶交通流资料情况见表 1 和表 2.

表 1　航道(段)船舶交通流资料

Tab. 1　General information of vessel traffic flow

航道(段)		船闸或断面	资料年限	资料形式	资料主要内容
京杭运河苏北段		施桥船闸	2001-2005	过闸船舶的详细信息	每条船舶的基本情况、到(过)闸时间、运输信息等
川江及三峡库区		葛洲坝船闸 三峡船闸	2000-2005 2003-2005	运量月报表 运量月报表	以月为单位统计的货运量、船舶艘数、过闸次数、闸室利用率和船舶吨位分布等
西江桂梧段		梧州水运站	2004	船舶的吨位资料	每条船舶的吨位
美国	Illinois	LaGrange	1996-2001	年运行统计数据	年过闸货运量、船队数，驳船尺度和吨位，闸室利用率，船舶平均待闸时间等
	Mississippi	27			
	Tennessee	Kentucky			

收稿日期： 2008-10-08
基金项目： 交通部西部交通建设科技项目“提高三峡船闸综合通过能力关键技术研究”(2005 328 222 25)；东南大学新进博士科研启动基金资助项目(9221002440)
作者简介： 廖　鹏(1979-)，男，湖北赤壁人，讲师，博士，主要从事港口航道工程研究. E-mail：pliao@seu.edu.cn

表 2 京杭运河施桥船闸断面年交通量

Tab. 2 Vessel traffic volumes at Shiqiao lock on the Grand Canal (单位:艘)

航 向	船舶类型		2001 年	2002 年	2003 年[1]	2004 年	2005 年[2]
上行	船队	船队数	10 700	10 081	8 345	10 745	6 139
		驳船数	106 253	98 516	77 644	95 617	55 508
	单放挂机船		46 066	48 054	36 569	45 025	24 744
下行	船队	船队数	11 783	11 498	9 317	11 692	6 566
		驳船数	120 261	115 781	89 185	106 435	61 344
	单放挂机船		53 801	54 199	33 794	51 125	28 040

注:[1] 受“非典”事件和 7 月船闸因故停航影响;[2] 资料时间至 2005 年 8 月 31 日

需要指出的是,京杭运河施桥船闸的数据采集系统分别布置在船闸上游和下游的远调站,记录的下行(至长江)和上行(往苏北方向)船舶到达情况与在航段断面直接观测是略有差异的. 因堵航、交通管制、记录误差等因素可能造成个别数据或个别时段的数据不能完全反映航道船舶流的情况,但不会造成统计分析结果的偏差.

2 内河船舶流量的时间分布特征

2.1 船舶流量的不均衡性

以施桥船闸断面流量为例,该断面 2004 年上行和下行船舶(拖轮、驳船、单放挂机船)总艘数 15.1 和 16.9 万艘,船舶总载重吨位 4 745.7 和 5 174.4 万 t. 这些船舶并非均匀到达该断面,而是随时间呈现出一定的波动性. 该断面 2004 年船舶月流量、周流量和日流量的分布见图 1. 可见,时间单位愈小,船舶流量的随机性愈强,船舶流量的不均衡愈大.

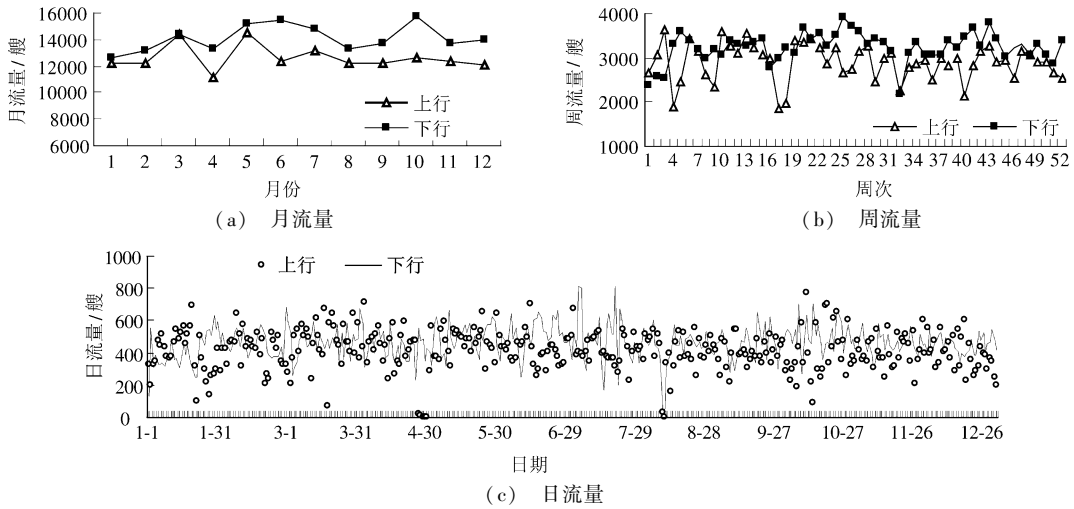


图 1 京杭运河施桥船闸断面 2004 年船舶流量分布

Fig. 1 Distribution of vessel traffic flow at Shiqiao lock on the Grand Canal

2.2 流量不均衡系数

为描述时间上的随机性,在道路交通流中,通常采用季/月/周/日交通量变化系数进行分析[1]. 在船闸通过能力计算中,规范[8]以 β(=年最大月货运量/年平均月货运量)表示月运量的不均衡. 从图 1 可见,以月为时间单位并不能充分反映船舶流量的时间随机性,还需采用更小的时间单位(日或小时)来进行分析. 引入工程中常用的时间保证率概念来反映单位时间内船舶流量(简称单位流量)的不均衡性,将单位流量不均

衡系数 α 定义为：$\alpha_p = q_p / q_{50\%}$，其中：$\alpha_p$ 为保证率为 p 的单位流量不均衡系数；q_p 为保证率为 p 时对应的单位流量；$q_{50\%}$ 为保证率为 50% 的单位流量.

根据已知的船舶流量资料统计分析单位流量不均衡系数，参考工程中广泛采用的频率法[9]，将单位流量从小到大排列，各单位流量对应的经验频率为：$p = \frac{m}{n+1} \times 100\%$，其中：$p$ 为频率；n 为单位流量样本的总项数；m 为单位流量样本系列从小到大的序号. 如果给定一定的保证率，可根据频率曲线查到对应的单位流量，然后根据 α_p 计算式就可计算一定保证率下的单位流量不均衡系数. 为充分反映船舶流量的随机性，时间单位应该选取日或小时，而且可类似道路交通量的研究，采用半年、季、月、周、天的时间概念，将其对应的保证率 p 计为 50%、75%、92%、98% 和 99.7%，就可得到具有半年/季/月/周/日保证率的单位流量不均衡系数. 保证率 50% 所对应的单位流量即为其中值，与年平均值非常接近.

施桥船闸断面 2001 ~ 2005 年在不同保证率下的日流量不均衡系数见表 3. 可见，不同年份的日流量不均衡系数均比较接近，表明该方法和系数具有一定的代表性；下行船舶受上游梯级船闸的控制，来船相对集中，随机性较弱，上行船舶则处于自由状态，来船相对分散，流量的随机性较强，下行的流量不均衡系数较上行均小，表明该系数能够反映船舶流量的随机性；保证率越高，流量不均衡系数越大，船舶流量的随机性愈强.

表 3　京杭运河施桥船闸断面日流量不均衡系数

Tab. 3　Daily-flow non-equilibrium coefficients at Shiqiao lock on the Grand Canal

航　向	保证率	按艘数计算的不均衡系数					按吨位计算的不均衡系数				
		2001	2002	2003	2004	2005	2001	2002	2003	2004	2005
上行	99.7%	1.81	1.90	2.63	1.84	1.77	1.86	1.77	2.35	1.94	2.01
	98%	1.61	1.69	1.94	1.61	1.63	1.68	1.61	1.83	1.68	1.56
	92%	1.42	1.39	1.63	1.36	1.40	1.44	1.37	1.52	1.40	1.41
	75%	1.17	1.18	1.33	1.18	1.21	1.18	1.18	1.27	1.19	1.20
下行	99.7%	1.63	1.53	1.91	1.77	1.88	1.58	1.76	1.97	1.75	2.04
	98%	1.37	1.42	1.77	1.46	1.62	1.46	1.49	1.68	1.51	1.57
	92%	1.27	1.29	1.56	1.30	1.33	1.31	1.32	1.42	1.32	1.37
	75%	1.12	1.10	1.34	1.13	1.16	1.15	1.14	1.20	1.14	1.16

表 4 给出了京杭运河淮安船闸断面 2002 年和西江梧州水运站断面 2004 年的日流量不均衡系数. 可见，淮安船闸与施桥船闸所处位置的特点相近（上游船闸距离较近，下游船闸距离较远或无船闸），上行和下行船舶交通流特性相近，两个断面得到的日流量不均衡系数基本一致；珠江水系的西江桂梧段的日流量不均衡系数与京杭运河徐扬段的结果也比较接近，进一步论证了该方法得到的流量不均衡系数具有一定的代表性，可用来研究分析船舶流量的不均衡性.

表 4　京杭运河淮安船闸和西江梧州断面日流量不均衡系数

Tab. 4　Daily-flow non-equilibrium coefficients at Huai′an lock and Wuzhou section

保证率	2002 年淮安船闸断面按吨位计算的不均衡系数		2004 年西江梧州断面不均衡系数			
			上行		下行	
	上行	下行	按吨位计	按艘数计	按吨位计	按艘数计
99.7%	1.82	1.57	2.00	2.61	2.08	2.34
98%	1.49	1.48	1.42	1.97	1.41	1.90
92%	1.32	1.30	1.29	1.27	1.20	1.20
75%	1.16	1.14	1.12	1.11	1.11	1.09

此外，注意到具有月保证率（p=92%）的日流量不均衡系数主要在 1.20 ~ 1.50 之间，与规范中推荐的月运量不均衡系数的取值 1.3 ~ 1.5 基本一致，而且与统计的葛洲坝和三峡船闸以及美国典型船闸的月运量不

均衡系数(见表 5 和表 6)也接近,表明日流量不均衡系数还能够反映月运量不均衡系数,规范中的月运量不均衡系数仅是具有 92% 保证率的日流量不均衡系数,从而拓展了规范中月运量不均衡系数的内涵. 当然,具体的数值关系有待进一步分析.

表 5 葛洲坝和三峡船闸的月运量不均衡系数

Tab. 5 Monthly-flow non-equilibrium coefficients at Three Gorges and Gezhouba locks

航 向	葛洲坝船闸						三峡船闸		
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2003[1]	2004	2005
上行	1.25	1.17	1.34	1.68	1.27	1.17	1.04	1.60	1.20
下行	1.15	1.29	1.17	1.43	1.32	1.17	1.10	1.19	1.16

注:[1] 资料时间自 2003 年 7 月 1 起

表 6 美国典型船闸的月运量不均衡系数

Tab. 6 Monthly-flow non-equilibrium coefficients at some locks in America

船 闸	1995	1996	1997	1998	1999
Illionois LaGrange	1.44	1.45	1.31	1.35	1.40
Mississippi 27	1.26	1.27	1.46	1.20	1.21
Tennessee Kentucky	1.15	1.17	1.22	1.30	1.16

类似地,表 7 计算了施桥船闸断面不同保证率的小时流量不均衡系数. 可以看出,除 2003 年外,不同年份的小时流量不均衡系数也比较接近,再次表明了该方法的可行性;随着时间单位的变小,小时流量不均衡系数比日流量不均衡系数大得多,而且保证率越高,两者的比值越大,表明时间单位越小,船舶流量将表现出更强的随机性;在小时单位时间内,航段上船舶流量的随机性很强,受控制节点的影响也较小. 因此,上行和下行的小时流量不均衡系数的差别较小.

表 7 京杭运河施桥船闸断面小时流量不均衡系数

Tab. 7 Hourly-flow non-equilibrium coefficients at Shiqiao lock on the Grand Canal

航 向	保证率	按艘数计算的不均衡系数					按吨位计算的不均衡系数				
		2001	2002	2003	2004	2005	2001	2002	2003	2004	2005
上行	90%	2.93	2.79	3.18	3.00	3.18	2.91	2.89	3.70	3.25	3.61
	85%	2.50	2.43	2.55	2.62	2.73	2.47	2.47	3.05	2.71	3.03
	80%	2.14	2.14	2.18	2.15	2.27	2.16	2.16	2.57	2.32	2.54
	75%	1.93	1.86	1.91	1.92	2.00	1.90	1.89	2.17	2.04	2.21
下行	90%	2.65	2.81	8.00	3.14	3.64	2.69	2.90	13.66	3.23	3.94
	85%	2.29	2.38	6.25	2.64	3.00	2.29	2.48	10.15	2.70	3.12
	80%	2.00	2.13	5.00	2.29	2.36	2.02	2.13	7.90	2.32	2.62
	75%	1.76	1.88	4.00	2.00	2.09	1.80	1.89	6.14	2.01	2.23

通过上述横向和纵向比较,可认为具有一定保证率的日流量不均衡系数和小时流量不均衡系数能够用来衡量船舶流量的时间随机特性,而且拓展了《船闸总体设计规范》中月运量不均衡系数的内涵,可应用于船闸通过能力和有关内河船舶交通流的研究.

3 内河船舶流量的空间分布特征

船舶流量的大小与社会经济发展水平、地域、物产、货运市场等多方面的因素有关,它除了随时间变化外还随空间位置变化. 以京杭运河苏北 10 个梯级船闸断面的船舶流量为例,图 2 给出了各船闸断面 2001 年的船舶流量. 可见,船舶流量在空间上也是不均匀的,中间 6 个船闸断面的船舶流量最大,解台和刘山船闸断面的船舶流量要明显小于其他断面;对于每个断面,上行和下行方向上的船舶流量也不相等,一般下行船舶流

量要大于上行，而且在淮安、邵伯和施桥尤为明显.

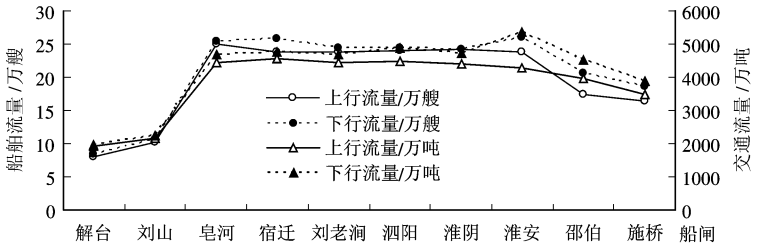


图 2　京杭运河苏北段 2001 年船舶流量空间分布

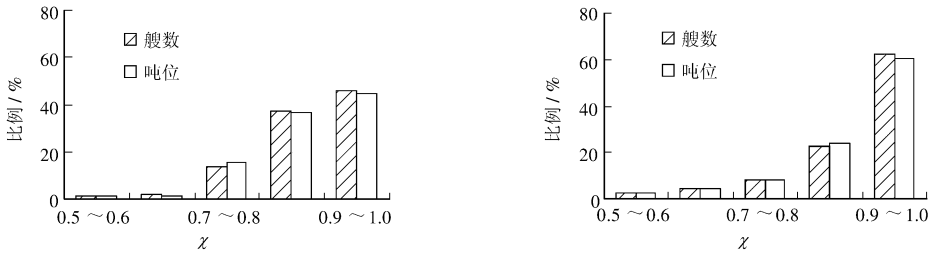
Fig. 2　Spatial distribution of vessel traffic flow in 2001 on the Grand Canal

某航段两个方向的船舶流量在很长时间内可能是平衡的，但在某一短时间内，两个方向的船舶流量会有较大的不同. 为了表示这种方向上的不均衡性，提出下式来表示：

$$\chi = \frac{q_u + q_d}{2 \times \max(q_u, q_d)} \tag{2}$$

式中：χ 为单位流量方向系数；q_u 和 q_d 分别为上行和下行的单位时间船舶流量.

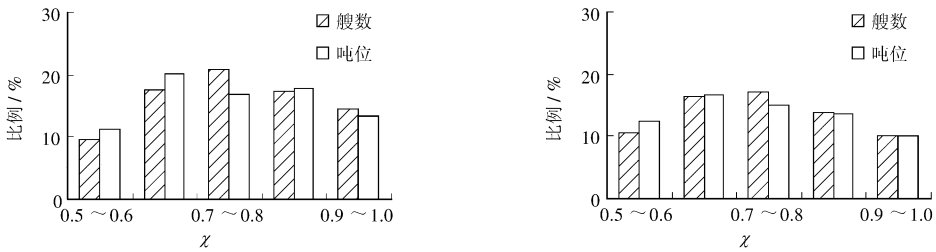
由(1)式可知，当 $\chi = 0.5$ 时，为单向流；当 $\chi = 1$ 时，上行和下行两个方向上的船舶单位流量相等，因此，$0.5 \leqslant \chi \leqslant 1$，且 χ 值越小，表明流量的方向性越强. 根据施桥船闸和西江梧州水运检查站断面 2004 年的日流量，可统计其日流量方向系数主要分布在 0.9 ~ 1.0 之间，分别占其总数的 45.2% 和 61.4%，均值分别为 0.87和 0.90(见图 3). 另外，施桥船闸断面小时船舶流量的抽样资料分析表明，小时流量方向系数 χ 则较为均匀地分布在 0.5 ~ 1.0 之间(见图 4).



(a)　京杭运河施桥船闸断面 2004 年　　(b)　西江梧州水运检查站断面 2004 年

图 3　船舶日流量方向系数分布

Fig. 3　Distribution of daily-flow direction coefficient



(a)　2001 年 7 月抽样　　(b)　2004 年 7 月抽样

图 4　京杭运河施桥船闸断面抽样船舶小时流量方向系数分布

Fig. 4　Distribution of hourly-flow direction coefficient at Shiqiao Lock on the Grand Canal

由此可见，单位流量方向系数与时间单位有关，时间单位愈小，愈趋向于区间为[0.5，1.0]的均匀分布，流量的方向性越强. 而且，χ 并不处处等于 1，即船舶单向流量并不等于双向流量的一半. 因此，在分析船舶交通流以及研究航道和船闸通过能力时，应按船舶的航向分别进行讨论. 然而，这一问题尚未在规范推荐的

船闸通过能力计算方法中得到很好的解决[10].

4 结 语

内河船舶流量的时空分布特征是内河船舶交通流特性的重要内容.研究内河船舶流量的时空分布规律,对于进行内河航道的规划、通航设施布局以及通过能力研究等均具有重要意义.根据大量的内河航道(段)船舶交通流观测数据,本文提出的具有一定保证率的单位流量不均衡系数以及单位流量方向系数能够较好地反映内河船舶流量的时空分布特征,可应用于船闸通过能力和有关内河船舶交通流的研究.

参 考 文 献:

[1] 王 炜, 过秀成. 交通工程学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2000: 22-28. (WANG Wei, GUO Xiu-cheng. Traffic Engineering[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2000: 22-28. (in Chinese))

[2] 廖 鹏, 张 玮. 施桥船闸日到船概率分布初探[J]. 水利水运工程学报, 2004, (3): 70-74. (LIAO Peng, ZHANG Wei. Probability distribution of daily ship arrival at Shiqiao Lock[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004, (3): 70-74. (in Chinese))

[3] 张 玮, 廖 鹏, 黄海鸥, 等. 施桥船闸到船特性分析[J]. 水利水运工程学报, 2004, (1): 70-73. (ZHANG Wei, LIAO Peng, HUANG Hai-ou, *et al*. Characteristics analysis on the ship arriving at Shiqiao lock[J]. Hydro-Science and Engineering, 2004, (1): 70-73. (in Chinese))

[4] 廖 鹏. 船闸通过能力研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (LIAO Peng. Research on lock capacity at inland waterway locks [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))

[5] JTJ305-2001, 船闸总体设计规范[S]. (JTJ305-2001, Code for Master Design of Ship Locks[S].)

[6] 詹道江. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000. (ZHAN Dao-jiang. Engineering Hydrology[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2000. (in Chinese))

[7] 张 玮, 廖 鹏, 梁应辰, 等. 船闸通过能力计算中的若干问题研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2005, 29(5): 681-684. (ZHANG Wei, LIAO Peng, LIANG Ying-chen, *et al*. Discussion on the calculation of lock capacity [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering), 2005, 29(5): 681-684. (in Chinese))

Temporal and spatial distribution of traffic flow in inland waterways

LIAO Peng

(*School of Transportation*, *Southeast University*, *Nanjing* 210096, *China*)

Abstract: The characteristics of traffic flow in inland waterways are the basis for the reasonable planning, design, operation, management, and control of navigation waterways and facilities. Based on lots of data, two non-equilibrium coefficients are introduced to reflect the temporal and spatial distribution of inland vessel traffic flow. The unit flow non-equilibrium coefficient with a guarantee percentage is reasonable to reflect the temporal stochastic characteristics, and to extend the meaning of the monthly-flow non-equilibrium coefficient in Code for Master Design of Ship locks. The unit flow direction coefficient shows that the flow in a single direction is not always half of the total flows in two directions. So the problem about inland vessel transport should be discussed according to the direction of vessel traffic flow.

Key words: inland waterway; vessel; traffic flow; temporal and spatial distribution; lock