



集装箱班轮到港规律的耦合性特征 及其应用研究*

王 诺, 徐灵杰, 张源凌, 冷丽艳

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 指出了集装箱班轮运行方式下船舶到港规律具有耦合性特征, 建立了耦合度表达式和相应的爱尔朗分布族模型。通过对大连港集装箱码头连续3年1.56万个班轮到港记录的统计分析, 证明了同一航线同一公司编组船队内部各船舶之间在到港规律上具有很强的耦合性。

关键词: 集装箱班轮; 运行; 到港规律; 耦合; 特征

中图分类号: U 691.33

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0098-05

Coupling characteristics of arrival discipline based on container liner operation mode and its application

WANG Nuo, XU Ling-jie, ZHANG Yuan-ling, LENG Li-yan

(Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: This paper addresses the coupling characteristics of the arrival law based on the container liner operation mode, and develops an interrelated Erlang model. The arrival time of 15 600 container vessels from one container port of north China are counted and analyzed, and the results prove the coupling characteristics in the same line and the same company.

Key words: container liner; operation mode; arrival law; coupling; characteristics

集装箱班轮运输方式的出现和发展, 从本质上改变了传统的货船随机到港的运行方式, 作为一种航线和船期均已确定的有组织行为, 按时到港、定时发班是集装箱班轮的基本特点^[1]。近年来, 有学者对集装箱班轮船舶到港规律等问题进行过一些研究, 归纳起来大致有两类: 1) Han X.L.等和Kia M.等认为集装箱班轮的到港规律服从泊松(Poisson)分布, 船舶到港的时间间隔服从负指数(Exponential)分布^[2-3], 按此观点, 集装箱班轮的运行规律与传统货船随机运行的规律没有差别; 2) 刘敬贤等^[4]、余劲等^[5]、刘剑等^[6]认为集装箱班轮的到港规律符合爱尔朗(Erlang)高阶分布, 其运行规律蕴含有一定程度的组织性特

征。尽管上述研究有实例进行了佐证, 但进一步的分析发现, 这些成果或者是针对所有集装箱班轮到港规律予以分析, 没有针对系统的内部结构展开研究; 或者是使用的样本数据较少, 因而代表性不强。关于集装箱班轮到港规律的组织特性分析, 在目前文献中还没有看到相关的研究成果。

当前, 集装箱班轮运输已成为新兴的现代运输方式的代表和发展方向, 掌握集装箱班轮的运行规律, 在理论研究上寻求新的进展, 将有助于班轮公司优化航线、安排船期和提高港口的管理水平, 因此, 开展集装箱班轮船舶到港规律的特性研究, 具有重要的理论意义和现实意义。

本文以大连港集装箱码头连续3年共计1.56万

收稿日期: 2013-06-22

*基金项目: 国家自然科学基金(71072081, 71372087)

作者简介: 王诺(1954—), 男, 博士, 教授, 主要从事系统工程、港口工程的应用研究。

个航次班轮到港记录的统计分析为基础, 讨论集装箱班轮运行方式下船舶到港规律所具有的耦合性特征。在此基础上, 构建了耦合度表达式和相应的到港时间间隔概率分布模型, 通过实例进行了验证, 并进行了应用研究。

1 集装箱班轮到港规律的耦合性

1.1 集装箱班轮运行的特点

实际上, 集装箱班轮的运行方式与日常生活中城市公交系统有类似之处, 比如, 班轮航线如同公交线路, 码头如同公交站点, 集装箱班轮如同公交车辆等等, 当航线确定后, 集装箱班轮便会周而复始地沿着各挂靠港循序运行。不同的是, 要求集装箱班轮到达港口的时间是确定的, 如果一旦出现提前或延迟, 便会人为地调整; 有的航线运行的班轮公司仅有一家, 有的航线运行的班轮公司有多家, 各家公司将船队编组后按照各自的节奏运行^[7-8]。所谓编组船队, 是指为保证航线上固定航班的需要, 按照约定的周期(如单周、旬、单双周等)逐一发班的船舶总和(例如5艘), 其数量由往返航次时间和航班设置密度等因素确定, 形成有序运行的固定船队。在理论上, 编组船队内部的船舶相继到达的间隔时间应为确定型分布, 但因台风、大雾等自然因素等不可预见因素的干扰, 所以船舶的到港时间可能会以船期为中心前后波动。

综上所述, 可以初步得到这样的认识: 如果将船舶看作变量, 那么, 在集装箱班轮运输网络中, 不同航线、不同班轮公司的船舶运行相互间基本上是独立的, 但对于同一航线编组船队内部的船舶运行是非独立的, 相互间存在协调运作、彼此影响。

1.2 到港时间的概率分布

集装箱班轮到港的时间间隔同时具有随机型和确定型两种特性, 根据随机过程的有关理论, 利用爱尔朗分布^[9]函数能够描述船舶到港时间间隔从随机型分布到确定型分布的渐变过程, 较好地表达集装箱班轮在有干扰因素影响状况下按船期表运行的实际状态。

爱尔朗分布的密度函数表达式为:

$$f(t) = \frac{k\mu(k\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-k\mu t} \quad t > 0 \quad (1)$$

分布函数为:

$$F(t) = 1 - e^{-k\mu t} \left[1 + k\mu t + \dots + \frac{(k\mu t)^{k-1}}{(k-1)!} \right] \quad t > 0 \quad (2)$$

数学期望 $E[T] = \frac{1}{\mu}$; 方差 $Var[T] = \frac{1}{k\mu^2}$ 。

显然, 爱尔朗分布族提供了更为广泛的模型类, 比负指数分布函数有更大的适应性。事实上, 当 $k=1$ 时, 爱尔朗分布函数即为负指数分布函数, 反映出完全随机的特征; 随着 k 的增大, 爱尔朗分布函数的图形便会朝着对称的方向变化, 当 $k \geq 30$ 时, 爱尔朗分布函数近似于正态分布; 当 $k \rightarrow \infty$ 时, $Var[T] \rightarrow 0$, 爱尔朗分布函数便转化为确定型分布, 所以, 爱尔朗分布函数是一种完全随机与完全确定的中间型函数。

1.3 耦合性分析

所谓耦合(coupling), 原意是指两个分开的电路之间或同一电路中两个相互分开部分之间的影响效应, 引申意义为两个或者两个以上事物或者系统(模块)相互依赖、相互协调的动态关联关系。如果将同一航线编组船队内部的船舶看作在设定系统中若干个相互依赖、相互协调的“模块”, 则可以发现在集装箱班轮运输的方式中明显存在耦合现象。

为便于分析, 可以先这样建立集装箱班轮运行状态中的耦合概念: 在集装箱班轮的运输方式中, 各船舶的运行状态受其他船舶运行状态制约或相互间彼此影响, 耦合的程度即耦合度, 以符号 Q 表示。

由上述概念, 集装箱班轮的运行特点可描述为: 在全港整体或宏观层面, 不同航线、不同公司的到港船舶相互间并无约定, 彼此间的行为无影响, 其运行规律是随机型的, 这时的耦合度为0; 在局部或微观层面, 同一编组船队的船舶相互间影响明显, 其运行规律向确定型方面转化, 于是其耦合度也将增大。

依据上述变化特点, 可以构造以参数 k 为自变量的耦合度表达式如下:

$$Q = 1 - \frac{1}{k} \quad (3)$$

Q 与 k 的变化关系曲线见图1。显然，耦合度 Q 的变化区间为 $[0,1]$ 。当 $k=1$ 时， $Q=0$ ，表示船舶各自独立运行，相互间没有制约和影响，即船舶运行状态没有耦合性，此时到港规律将服从爱尔朗1阶分布；当 $k \rightarrow \infty$ 时， $Q \rightarrow 1$ ，表示船舶间的运行具有很强的关联性，即船舶运行状态具有强耦合性，此时到港规律服从爱尔朗高阶分布或接近确定型分布；处于两者之间时，到港规律近似于正态分布。对照图1的曲线变化规律，可以将耦合度的物理意义理解为实际值分布于密度函数曲线均值周边的集中程度。

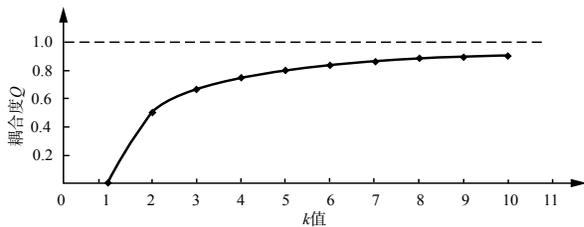


图1 耦合度 Q 与爱尔朗 k 值关系

将式(3)整理后得到如下表达式：

$$k = \frac{1}{1-Q} \tag{4}$$

将式(4)代入式(2)，便得到以耦合度表示的爱尔朗分布函数表达式：

$$F(t) = 1 - e^{-\frac{ut}{1-Q}} \cdot \left[1 + \frac{ut}{1-Q} + \dots + \frac{(\frac{ut}{1-Q})^{\frac{Q}{1-Q}}}{(\frac{Q}{1-Q})!} \right] \tag{5}$$

$(t > 0)$

数学期望 $E[T] = \frac{1}{\mu}$ ；方差 $Var[T] = \frac{1-Q}{\mu^2}$ 。

式(5)表示，当各船舶到港时间的耦合性 $Q=0$ 时，分布函数化为爱尔朗1阶分布，显现出随机性分布特征；当各船舶到港时间的耦合性很强，即 $Q \rightarrow 1$ 时，分布函数化为爱尔朗高阶分布，显现出确定型分布特征。

2 实证分析

大连港集装箱码头是我国北方重要的集装箱港口，现有泊位14个，设有集装箱航线92条，每年航班5 000余个，2011年吞吐量达到600万TEU。笔者收集了该港2009—2011年3 a年间共计15 628条船舶到港时间的完整记录，按照集装箱班轮的运

行特点，以全港整体、各航线和同一航线上编组船队等3种情况，分别计算出各种情况下船舶实际到达时间间隔的经验分布，进而揭示出内在的耦合性特征及其变化规律。

2.1 全港集装箱班轮到港规律及其耦合性

当对所有到港集装箱船舶进行统计分析时(表1)，发现船舶相继到港时间间隔服从负指数分布即爱尔朗1阶分布，理论分布与经验分布基本吻合，相应的卡方检验统计见表1。显然，此时各船舶间相互基本上没有影响，即在整体上船舶间运行的耦合度为0。

表1 全港所有船舶到港时间间隔分析

时间间隔/d	理论频率	理论频数	实测频率	实测频数
1	0.999 389	15 618.45	0.999 360	15 618.00
2	0.000 611	9.55	0.000 576	9.00
3	0	0.00	0.000 064	1.00
4	0	0.00	0.000 000	0.00
5	0	0.00	0.000 000	0.00

2.2 各航线集装箱班轮到港规律及其耦合性

当以各航线为单元对集装箱船舶进行统计分析时，情况较为复杂，这时的船舶到港时间间隔概率分布状态和耦合度相差较为悬殊。仔细观察各参数变化，发现仍有规律可循，其结果分为两类：一类 $k=1$ ，一类 k 值远大于1。再深入分析，发现 $k=1$ 的是有多个班轮公司参与运行的航线。实际上，由于航线上有多个编组船队相互独立运行，其组织性必然较低，所以此时的船舶相继到港时间间隔概率分布仍会服从负指数分布即爱尔朗1阶分布，体现出弱耦合性特征。 k 值明显较大的则基本上是单一船公司经营的航线，因船舶的组织性显著增强，故会服从爱尔朗高阶分布，体现出强耦合性特征(表2)。

2.3 编组船队到港规律及其耦合性

为不失一般性，现选取不同海区典型航线中有代表性的编组船队作为样本进行分析，分别为韩国航线斗宇船务公司靠泊记录153条，日本航线中远船务公司靠泊记录61条，欧洲线中远船务公司靠泊记录140条和美西线中远船务公司靠泊记录155条，分析结果及耦合度见表3。显然，在以

同一航线同一编组船队的运行状态进行具体分析时, 各船舶具有较高的组织性, 即具有很强的耦合性。

表2 大连港各航线船舶到港时间分布函数及耦合度

航线	参与船公司数	船舶到港(航班)数	k	μ	Q
日本航线	15	3 514	1	4.100 0	0.00
韩国航线	15	2 100	1	2.900 0	0.00
东南亚线	13	1 096	1	1.385 0	0.00
朝鲜航线	12	971	1	1.310 0	0.00
欧洲航线	6	563	1	0.530 0	0.00
台湾航线	6	425	1	0.439 0	0.00
印度航线	6	270	1	0.320 0	0.00
美西航线	5	394	1	0.325 0	0.00
中东航线	2	190	20	0.134 0	0.95
黑海航线	2	157	95	0.133 0	0.99
地中海线	1	158	75	0.132 0	0.99
东非航线	1	135	25	0.132 0	0.96
内贸线、内支线及其他		5 653			
合计		15 626			

表3 大连至不同海区航线典型编组船队到港时间分布函数及耦合度

航线	船务公司	k	μ	Q
韩国线	斗宇	95	0.145 0	0.99
日本线	中远	105	0.151 5	0.99
欧洲线	中远	60	0.153 0	0.98
美西线	中远	45	0.148 0	0.98

3 应用研究

为了说明船舶到港的规律对集装箱码头泊位通过能力的影响, 现分别对各种情况进行计算对比。由排队论理论, 船舶靠泊作业占用泊位时间符合负指数分布, 泊位数为 S , 即由随机服务系统理论形成 $M/M/S$ 模型(当船舶到港规律符合泊松分布, 船舶靠泊作业占用泊位时间符合负指数分布, 泊位数为 S)、 $E_2/M/S$ 模型(当船舶到港规律符合爱尔朗二阶分布, 其余不变)、 $E_7/M/S$ 模型(当船舶到港规律符合爱尔朗七阶分布, 其余不变), 得出不同泊位利用率下 T_w/T_b 的值(其

中, T_w 为船舶平均待泊时间, T_b 为船舶平均靠泊时间)。本文取其中泊位数为4时不同泊位利用率下的 T_w/T_b 值(表4)。国际上通常用 T_w/T_b 来评价一个港口的服务水平, 一般认为等待泊位时间不宜超过装卸作业时间的10%~50%, 即 T_w/T_b 的取值范围应介于0.1~0.5。由表4可知, 在相同的港口服务水平下, 服从 $E_7/M/S$ 模型船舶到港比服从 $M/M/S$ 模型船舶到港可以提高泊位的利用率, 即有组织的服务将会提高泊位的能力。

表4 设泊位数为4时, 不同模型下 T_w/T_b 的值

泊位利用率	$M/M/S$ 模型	$E_2/M/S$ 模型	$E_7/M/S$ 模型
0.40	0.040	0.039	0.036
0.45	0.058	0.057	0.055
0.50	0.087	0.085	0.080
0.55	0.126	0.121	0.112
0.60	0.179	0.176	0.152
0.65	0.253	0.243	0.202
0.70	0.357	0.332	0.263
0.75	0.509	0.485	0.338
0.80	0.746	0.567	0.427
0.85	1.149	0.716	0.535

为了具体比较, 在相同的码头服务水平下, 根据表4查出相应的泊位利用率, 代入我国港口设计规范提出的计算公式(6), 可分别得出不同服务水平对应的3种模型下的港口通过能力曲线(图2)。

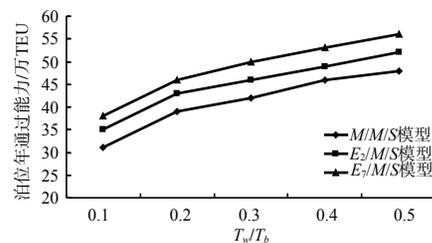


图2 3种船舶到港概率分布模型下泊位年通过能力比较

$$P_i = \frac{T_y A_p Q}{p t_s + t_d} \quad (6)$$

式中: P_i 为集装箱泊位年通过能力(TEU); Q 为集装箱船舶装卸箱量; T_y 为泊位年营运天数(d); A_p 为泊位有效利用率(%); P 为设计船时效率; n 为岸边集装箱装卸桥配备台数; P_1 为岸边集装箱装卸桥台时效率; K_1 为集装箱标准箱折算系数; K_2 为岸边集装箱装卸桥同时作业率;

K_3 为装卸船作业倒箱率； t_g 为昼夜装卸作业时间； t_f 为船舶的装卸辅助作业及船舶靠离泊时间之和； t_d 为昼夜小时数。

从图2可以看出，码头在服务水平、泊位规模、装卸设备数量及效率、到港船装卸箱量等都相同的情况下，船舶到港的规律不同时，泊位的年通过能力将有很大的不同。 E_7/MIS 模型的泊位通过能力最大，即到港越有规律，泊位的通过能力就越大， E_2/MIS 模型次之， M/MIS 模型最小。进一步计算，可得出不同模型、不同服务水平下拥有4个泊位的集装箱码头通过能力增长率（表5）。由表5可知，对于4个泊位的码头， E_7/MIS 模型下的泊位通过能力比 E_2/MIS 模型大约提高7%，比 M/MIS 模型大约提高15%。可以证明，随着 k 的增大，船舶到港的有组织性逐步提高，泊位的实际通过能力也将随之增大。

表5 不同模型下的泊位通过能力的变化 %

服务水平	M/MIS 模型	E_2/MIS 模型	E_7/MIS 模型
0.1	100	116	123
0.2	100	114	119
0.3	100	112	116
0.4	100	110	113
0.5	100	108	110

4 结语

集装箱班轮的到港规律按研究层次有体系多样性的特点，在不同研究层次下，船舶到港规律的耦合特性及相应的概率分布会有不同，表现为如下3种情况：

1) 当以整个港区作为研究对象时，船舶到港的时间间隔服从负指数分布即爱尔朗1阶分布，所有船舶的运行规律在整体上显现出弱耦合性。

2) 当以航线作为研究对象时，船舶的运行规律分为两类：一类是有多家公司共同经营航线，船舶到港的时间间隔服从负指数分布即爱尔朗1阶分布，各船舶运行中的相互联系没有耦合性；另一类是单一公司经营的航线，船队内部具有较强的组织性，船舶到港时间间隔服从爱尔朗高阶分

布且接近正态分布，各船舶运行中的相互联系显现出强耦合性。

3) 当以同一航线同一公司的编组船队作为研究对象时，各船舶的运行具有较强的组织性，船舶到港时间间隔服从爱尔朗高阶分布且接近正态分布，各船舶运行中的相互联系显现出强耦合性。

4) 随着船舶到港规律耦合性提高，泊位的实际通过能力也将随之增大。

总之，通过集装箱班轮运行的耦合性分析，可以加深业界对班轮运行规律本质的认识，有助于港口优化泊位调度、合理安排生产计划。对于班轮运输耦合参数与港口相关运行因素的定量关系和具体应用，还有待于今后更深入的研究。

参考文献:

- [1] 杨秋平, 谢新连, 赵家保. 船队规划研究现状与动态[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(4): 85-90.
- [2] Han X L, Lu Z Q, Xi L F. A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 207:1 327-1 340.
- [3] Kia M, Shayan E, Ghotb F. Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation[J]. Computers & Industrial Engineering, 2002, 42(2-4): 533-540.
- [4] 刘敬贤, 李云斌. 天津港主航道船舶到达规律的统计分析[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 32(2): 351-353.
- [5] 余劲, 张玮, 姜继红, 等. 西江航道船舶流的概率分布特性[J]. 交通运输工程学报, 2006(2): 88-93.
- [6] 刘剑, 王诺, 陈俊虎, 等. 关于集装箱码头年泊位通过能力核定的几个问题[J]. 水运工程, 2008(4): 42-45.
- [7] Pasquale Legato, Rina M. Mazza. Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 133(3): 537-547.
- [8] 宋向群, 杨沛霖, 唐国磊, 等. 沿海集装箱港区泊位装卸效率对单线航道利用率的影响[J]. 水运工程, 2011(4): 51-53.
- [9] 胡运权. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(本文编辑 武亚庆)