

基于排队论的双渡口车辆高峰期船舶调度的研究

方景芳, 陈家伟, 叶波, 刘军
(兰州理工大学 机电工程学院, 兰州 730050)

摘要: **目的** 针对车流量达到高峰期时, 制定更加高效、低成本的双渡口船舶渡运方案。**方法** 对在高峰期时的双渡口待渡车辆的排队特点进行分析, 结合排队论中批处理的 $M/M/1$ 系统的分析方法, 确定了船舶装载量与车辆排队长的理论关系。**结果** 以某汽渡企业的实际渡运情况, 针对船舶装载量 $M_i=21, 22, 24, 27, 29, 30$ 的情况和船舶到达时间间隔 $TA_i^{-1}=6.7, 7.1, 7.6, 9.3, 9.9, 15.1$ 的情况, 分别计算了理论的排队长 L , 并采用统计学方法, 判断出船只的装载量 M_i 对于待渡车辆的排队长 L 具有显著影响 ($P < 0.05$), 并拟合了队长和船舶载重的函数关系曲线。**结论** 在服务强度为 0.9 的情况下, 结合船舶的渡运成本, 在排队系统的到达率 λ_1 为每分钟 2 辆时, 用载重量为 16 辆车的渡运船只, 以 3.2 min 的到岸时间间隔, 即可满足高峰期的渡运需求。

关键词: 船舶调度; 高峰期; $M/M/1$ 系统; 排队长

中图分类号: O22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)23-0218-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.23.032

Ship Scheduling of Dual-Ferry Crossing in Traffic Peak Period Based on Queuing Theory

FANG Jing-fang, CHEN Jia-wei, YE Bo, LIU Jun

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT: The paper aims to formulate a more efficient and low-cost dual-ferry ship scheme during the peak period of traffic flow. Through analysis on the queuing characteristics of waiting vehicles during rush hours, combining with a formula in batch processing of the $M/M/1$ queuing system of the queuing theory, the theoretical relationship between the loading capacity of ship and the queue length of cars theoretically. Under the actual situation of a ferry enterprise, the queue length L was calculated respectively in the case of $M_i=21, 22, 24, 27, 29, 30$ and $TA_i^{-1}=6.7, 7.1, 7.6, 9.3, 9.9$ and 15.1. After using the statistical method, it can be find that M_i had a significant influence on the queue length L for waiting vehicles (results of the statistical analysis: $P < 0.05$), and the functional relation curve between the queue length and the ship's load was fitted. Under the condition of setting service intensity of 0.9, and combine with the cost of ferry, when the arrival rate of the queue system $\lambda_1=2$ vehicles/minute, ferry ship with the loading capacity of 16 cars can meet the ferry demand during peak period with a 3.2 minute arrival time interval.

KEY WORDS: ship scheduling; peak period; $M/M/1$ system; queue length

在实际双渡口车辆高峰期船舶调度中, 企业通常是根据以往的调度经验来制定船舶调度的运行策略。

在实际调度的过程中, 根据经验所制定的船舶调度策略依旧存在着与两岸车流量抵达情况匹配性差的问

收稿日期: 2019-04-29

基金项目: 国家自然科学基金 (71861025)

作者简介: 方景芳 (1964—), 女, 硕士, 兰州理工大学教授, 主要研究方向为智能优化调度。

题。尤其是在双渡口的船舶调度问题中,在车流量抵达的高峰期时,渡船的调度并不是简单的即停即装、即装即走。调度策略的不合理将直接导致两岸待渡车辆陷入较长时间的等待,这对于汽渡企业的运营也将产生负面影响。同时,根据经验制定的船舶渡运策略,往往并不是最优的船舶渡运策略,这也会导致企业的渡运成本增加。

针对船舶调度存在的问题,在国外:D. Lagana等通过对基于排队网络的仿真模拟,研究了泊位分配、起重机分配等港口装卸服务^[1];Arango等^[2]基于整合遗传算法的仿真模型,解决了塞维利亚港泊位分配等问题;Yeo^[3]通过对釜山港港区、航道等因素进行了研究,在获取到的大量数据基础上,得出了港口相关要素之间的规律,并就港口现有的拥堵现象以及如何有效防止港口发生拥堵方面,给出了相应意见和建议;Eduardo Lalla-Ruiz等^[4]通过利用不同的水路调度进出港的船舶,使船舶等待时间最小化,并提出了一个新的数学模型和启发式算法,以长三角(上海)为例,进行了改进;Frank Meisel和Kjetil Fagerhoult^[5]提出了几种新的优化模型,包括船舶可变速度、侧线区段的容量以及船舶等待时间的限制,以减少船舶的总过境时间,并根据实际数据实验证实了一种快速解决问题的数学启发式算法,并确定了为船舶提供高质量服务的潜力;Guido Maione等^[6]通过构建应用Petri网理论的系统仿真建模,对集装箱码头的实际运营情况进行了模拟分析。在国内,郑红星、刘保利等^[7]利用船舶间需保持安全航行距离、进出港时段交替条件和成簇进出港规则等为约束条件,以进港船舶总等待时间最小为目标,构建了混合整数线性规划模型,利用混合算法进行了求解,使目标的优化值显著提升;陈琦等^[8]建立了港口运营系统仿真模型,分析了港口在运营时服务水平受到的影响要素;齐乐^[9]建立了基于元胞自动机的海上航道内船舶交通流模型,分析了航道内船舶的实际交通数据,研究了航道内船舶行为特征;吴泰云^[10]探索了蚁群算法用于多目标船舶调度优化问题的思路和途径;刘敬贤等^[11]在锚地、泊位分析的基础上,对于船舶在离散状态下的船舶运营构建了仿真模型,对港口的服务效率、锚地、泊位使用率及航道使用率、排队时长等进行了仿真研究;张燕涛^[12]在分析了港口服务系统各要素的特征基础上,通过利用遗传算法对港口泊位调度进行了优化仿真,构建了基于总船舶靠泊时间最少为目的的泊位调度数学模型,并给出了相应的约束条件;何春华^[13]为提高双向通航港口船舶的通行能力,进行双向通航船舶自适应调度,提出了基于大数据信息融合的船舶调度算法,提高了港口的吞吐能力和船舶航行的畅通能力。

文中利用运筹学中排队论的有关知识,针对双渡

口船舶调度问题,给出车流量排队长的计算公式,然后通过数值实验,通过Matlab软件拟合了船舶装载量和待渡车辆排队长的函数关系,再结合船舶的渡运成本,最后确定了最佳的车辆装载数量和船舶的到岸时间间隔。

1 排队系统分析

1.1 待渡车辆排队过程的表示

在双渡口A/B的汽渡调度问题中,待渡车辆在2个渡口的排队过程是类似的,单个渡口的排队情况可以用图1表示,其中服务台(渡船)的服务过程具有双向性。

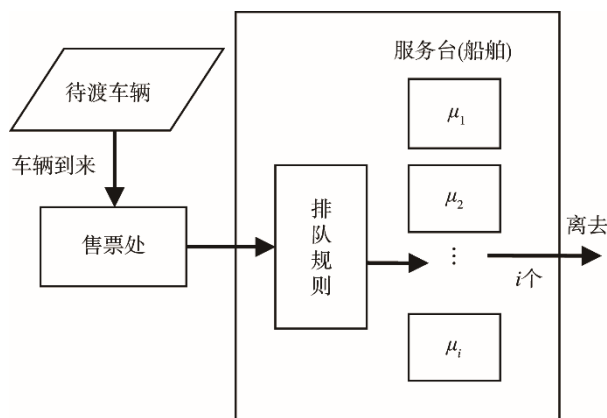


图1 车辆在A或B渡口排队过江的过程

Fig.1 Map of cars crossing the river at ferry A or B.

1.2 该排队系统的特点

在一般的汽渡渡运过程中,待渡车辆驶入等待区排队之前,需要经过售票站的称重和售票,因此在待渡车辆到达的高峰期时段,其进入排队系统的到达率可以看成是由售票处控制的一个常量,记为 λ_1 。在待渡车辆到达的低峰期时,由于待渡车辆较少,其进入排队系统的到达率可以近似看成待渡车辆的到达率,记为 λ_2 。

该问题的排队规则可以看作是先到先服务的等待制,且遵循一般服务规则:当系统排队长小于定值 M_i 时,该批服务延迟,直到排队长等于或大于定值 M_i 时,服务台才开始服务,这里的 M_i 可以看作是渡船每次的装载量。将等待区的待渡车辆整体看作是一个队列数为1的大队伍。渡船的停靠为每次1艘,服务过程为成批服务,服务时服从负指数分布。在服务时,待渡车辆陆续上船,假设待渡车辆上下船的过程中不发生事故。对于A(B)渡口的待渡车辆而言,服务时间 $1/\mu_1$ ($1/\mu_2$)取决于船只到岸的时间间隔 T_{Ai}^{i+1} (T_{Bi}^{i+1})、待渡车辆上下船所用的时间 t ,以及可能存在的服务延迟所占用的时间 $t_{\text{延迟}}$ 和 M_i 有关的量。首

先, 由于 T_{Ai}^{i-1} (T_{Bi}^{i-1}) 是一组受船舶数量 i 和渡船策略的影响较为显著的负指数分布的随机变量^[14], 船舶在渡运过程中还需要满足以下几个假设: 等待区的容量足够大, 能够满足待渡车辆在高峰期的排队需求; 船只的渡运成本只与自身的吨位有关, 为固定值, 渡运系统的成本为船舶的运输成本; 船只每次起航, 均为满载; 若当前渡口的待渡车辆数不足 M_i 时, 则需要等待待渡车辆数达到 M_i ; 参与渡运的船舶数量, 不超过系统中渡口的总泊位; 船舶在运输过程中不会出现故障, 不考虑停航的状态; 同一艘渡船同一时刻只能被选择一次, 但同一艘渡船可以被连续选择; 船舶在运行过程中均保持匀速, 彼此间的运动过程相互独立, 互不影响。

2 模型的建立

2.1 参数的设置

λ_i 为 i 时期车辆进入排队系统的到达速率, 其中 $i=1$ 或 2 , 1 表示高峰期, 2 表示低谷期; μ_i 表示 i 渡口单位时间内被服务完毕离去的平均顾客数, 其中 $i=1$ 或 2 , 1 表示 A 渡口, 2 表示 B 渡口; T_{Ai}^{i-1} 表示第 i 艘与第 $i-1$ 艘渡船到达 A 港的时间间隔; T_{Bi}^{i-1} 表示第 i 艘与第 $i-1$ 艘渡船到达 B 港的时间间隔; t 表示待渡车辆上下船所用的时间, 为一个固定常数; $t_{\text{延迟}}$ 表示系统排队长小于 M_i 时, 该批服务延迟所占用的时间; i 表示执行渡运任务渡船的数量, 其中 $i \in N^*$; R_i 表示第 i 艘渡船的有效容积; Z_i 表示第 i 艘渡船的安全载重吨位; X_{ij} 表示 i 渡口的第 j 辆待渡汽车的质量, 其中 $j \in N^*$, $i=1$ 或 2 , 1 表示 A 渡口, 2 表示 B 渡口; ρ_i 表示服务强度, $i=1$ 或 2 , 1 表示高峰期, 2 表示低谷期; Π_j 表示系统队长的平稳分布; L 为平均队长; M_i 表示第 i 艘渡船一次所能承载的车辆数; S_1, S_2, S_3 分别为大型车、中型车和小型车的体积; α_{xij} 为决策变量, 表示 i 渡口第 j 辆待渡汽车为 x 型车, 则为 1 , 否则为 0 , 其中 $x=1, 2, 3$, 1 表示大, 2 表示中, 3 表示小, $i=1, 2$, 1 表示 A 渡口, 2 表示 B 渡口, $j \in N^*$ 。

2.2 模型的分析

由 1.2 节的论述可知, 关于双渡口 A/B 船舶调度的问题, 可以简化为待渡车辆单个到达, 到达过程服从泊松分布。服务过程可以看作是服务时间 $1/\mu$ 的单服务台系统, 每次服务容量为 M_i 的单队列排队模型。其中, M_i 是与渡船的 R_i 和 Z_i 有关的整数变量。

此外, 由于车辆在进入售票处之前需要过磅称重且待渡车辆的体积为 S_1, S_2, S_3 , 因此 A/B 渡口每辆待渡车辆的吨位和体积信息可以看作已知; 停靠在 A 渡口的第 i 艘渡船的 $M_i = \min(j_{\text{质量}}, j_{\text{体积}}) - 1$ 。当 $R_i - \sum X_{Aj}$ 第 1 次

小于 0 时, 取 $j_{\text{质量}} = j$; 当 $Z_i - \sum \alpha_{11j} S_1 - \sum \alpha_{21j} S_2 - \sum \alpha_{31j} S_3$ 第 1 次小于 0 时, 取 $j_{\text{体积}} = j$ (B 渡口第 i 艘渡船的 M_i 与之类似)。服务时间 $1/\mu = (T_{Ai}^{i-1} (T_{Bi}^{i-1}) + t + t_{\text{延迟}}) / M_{i0}$ 。

故而, 该排队系统简化为 $M/M^{M_i}/1$ 模型, 其中每次的服务批量为 M_i , 所以该系统队长的平稳分布为:

$$\pi_j = \begin{cases} \frac{1}{M_i} \left(1 - \frac{1}{u_0^{j+1}} \right), & 0 \leq j \leq M_i - 1 \\ \frac{\rho(u_0 - 1)}{M_i u_0^{j-M_i+1}}, & j \geq M_i \end{cases} \quad (1)$$

$$\rho = \lambda/\mu < 1, \text{ 其中 } u_0 \text{ 满足}^{[15]}: \\ 1 + \rho u_0^{M_i+1} = (1 + \rho) u_0^{M_i} \quad (2)$$

因此可得平均队长为:

$$L = \sum_{j=1}^{\infty} j \pi_j \quad (3)$$

利用式 (1—3), 可以确定平均队长与船舶装载数量之间的关系。渡运系统的运行成本=各船只运行次数×对应船只的运行成本。

3 实例分析

马和汽渡南北两岸各有一个渡口, 分别记为 A 和 B。马和汽渡现有船只 6 艘, 船只到达 A 渡口的时间间隔 6.7, 7.1, 7.6, 9.3, 9.9, 15.1 min 时, 对应的每艘船只的平均装载量分别为 21, 22, 24, 27, 29, 30。在车流量高峰期时, $\lambda_1=2$, $t=4$ min; $t_{\text{延迟}}=0$ 。可对应求得 μ_1, ρ_1, u_0, L , 见表 1。

根据表 1, 利用 SPSS 分别对 T_{Ai}^{i-1} 和 M_i 与 L 分别进行方差分析, 判断二者对 L 是否具有显著性影响。其结果见表 2 和 3。

由表 2 和 3 可知, M_i 对 L 具有显著性影响。故而, 再根据表 1, 利用 Matlab 自带数据拟合 cftool 工具箱对 M_i 和 L 进行三次多项式拟合, 见图 2, 结果为:

$$L = 0.005469 M_i^3 - 0.4458 M_i^2 + 12.57 M_i - 109$$

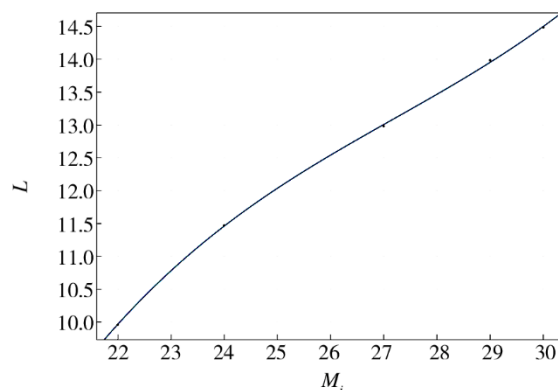


图 2 M_i 与 L 的拟合关系
Fig.2 Fitting chart of M_i and L

表 1 对应的计算结果
Tab.1 Corresponding values of calculation

M_i	μ_1	ρ_1	u_0	L	M_i	μ_1	ρ_1	u_0	L
21	1.97	1.02	—	—	27	2.53	0.79	2.26	12.98
	1.9	1.05	—	—		2.44	0.82	2.22	12.98
	1.81	1.11	—	—		2.32	0.86	2.16	12.97
	1.58	1.27	—	—		2.03	0.98	2.02	12.96
	1.52	1.32	—	—		1.95	1.03	—	—
	1.1	1.82	—	—		1.42	1.41	—	—
22	2.06	0.97	2.03	9.96	29	2.71	0.74	2.36	13.98
	1.99	1.01	—	—		2.62	0.76	2.31	13.98
	1.89	1.06	—	—		2.5	0.8	2.25	13.98
	1.66	1.21	—	—		2.18	0.92	2.09	13.97
	1.59	1.26	—	—		2.09	0.96	2.05	13.97
	1.15	1.73	—	—		1.52	1.31	—	—
24	2.25	0.89	2.12	11.47	30	2.81	0.71	2.4	14.48
	2.17	0.92	2.09	11.46		2.71	0.74	2.36	14.48
	2.07	0.97	2.03	11.46		2.58	0.77	2.29	14.48
	1.81	1.11	—	—		2.26	0.89	2.13	14.47
	1.73	1.15	—	—		2.17	0.92	2.08	14.47
	1.26	1.59	—	—		1.57	1.27	—	—

表 2 方差分析结果 1
Tab.2 Result of variance analysis (part 1)

			平方和	df	均方	F	显著性
排队长与船 只到岸时间 间隔	组间	(组合)	5.097	4	1.274	0.642	0.642
		线性	4.512	1	4.512	2.273	0.156
		线性偏差	0.585	3	0.195	0.098	0.960
	组内		25.807	13	1.985		
	总计		30.903	17			

表 3 方差分析结果 2
Tab.3 Result of variance analysis (part 2)

			平方和	df	均方	F	显著性
排队长与装 载的车辆数	组间	(组合)	30.903	4	7.726	273 676.628	0.000
		线性	30.735	1	30.735	1 088 747.42	0.000
		线性偏差	0.168	3	0.056	1986.364	0.000
	组内		0.000	13	0.000		
	总计		30.903	17			

求解 L 与 M_i 可知, 当 $M_i \approx 16$ 时 L 取得最小值 0.3962; 当设定 $\rho_1=0.9$ 时, $T_{Af}^{i-1}=3.2$ 。即在服务强度为 0.9, $\lambda_1=2$ 时, 用载重量仅为 16 辆的渡运船只, 以 3.2 min 的到岸时间间隔, 即可满足高峰期的渡运需求。

然而在实际的船舶调度问题中, 还需要考虑船只的渡运成本, 而船舶的渡运成本仅与船只的吨位有关, 吨位越低, 渡运一次的成本越低; 待渡车辆的等待时间则与船舶到岸的时间间隔直接相关, 但船舶的

到岸时间间隔可以通过服务强度 ρ 进行调节。再结合 L 与 M_i , 便可以给出双渡口船舶在实际车辆高峰期的具体调度方案。

4 结语

通过研究双渡口汽渡船舶在车流量高峰期的调度问题, 结论如下所述。

1) A 渡口车辆到达的高峰期与低谷期的到达率

特征不同,因此若还要对 A 渡口低谷期的调度方案进行确定的话,则还需要增加 λ_2 对于 L 的显著性检验,其余同高峰期一致;对于 B 渡口的处理,则基本同 A 渡口一致。

2) 船舶的到岸时间间隔对于待渡车辆的排队长不具有显著影响,而船舶一次的装载量,对待渡车辆的排队长具有显著影响。

3) 双渡口船舶调度的问题,在一定条件下,可以转换成 $M/M/1$ 成批处理的模型。

4) 在满足假设条件的情况下,排队论勇于确定双渡口船舶问题的调度运行方案,具有使用参数少、计算方便的特点。

参考文献:

- [1] LAGANA D, LEGATO P, PISACANE O, et al. Solving Simulation Optimization Problems on Grid Computing Systems[J]. Parallel Comput, 2006(32): 688—700.
- [2] ARANGO C, CORTES P, MUNUZURI J, et al. Berth Allocation Planning in Seville Inland Port by Simulation and Optimisation[J]. Adv Eng Inform, 2011(25): 452—461.
- [3] YEO G T, ROE M, SOAK S M. Evaluation of the Marine Traffic Congestion of North Harbor in Busan Port[J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 2007, 133(2): 87—93.
- [4] LALLA-RUIZ E, SHI Xiao-ning, VOSS S. The Waterway Ship Scheduling Problem[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018(60): 191—209.
- [5] MEISEL F, FAGERHOLT K. Scheduling Two-Way Ship Traffic for the Kiel Canal: Model, Extensions and a Matheuristic[J]. Computers & Operations Research, 2019(106): 119—132.
- [6] MAIONE G, OTTOMANELLI M. A Petri Net Model for Simulation of Container Terminals Operations[J]. Advanced OR and AI Methods in Transportation, 2005: 374—378.
- [7] 郑红星, 刘保利, 邓春远, 等. 单向航道散货港口船舶调度优化[J]. 运筹与管理, 2018, 27(12): 28—37.
ZHENG Hong-xing, LIU Bao-li, DENG Chun-yuan, et al. Ship Scheduling Optimization of One-way BulkPort[J]. Operation and Management, 2018, 27(12): 28—37.
- [8] 陈琦, 郭子坚, 宋向群, 等. 船舶进出港的安全时距对散货港口服务水平的影响[J]. 港工技术, 2011(12): 19—22.
CHEN Qi, GUO Zi-jian, SONG Xiang-qun, et al. Effect of Safe Time Distance of Ships' Entry and Exit on Service Level of Bulk Port[J]. Port Engineering Technology, 2011(12): 19—22.
- [9] 齐乐. 基于元胞自动机的海上航道内船舶交通流研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
QI Le. Research on Vessel Traffic Flow in Marine Channel Based on Cellular Automata[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [10] 吴泰云. 广州港航班调度优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
WU Tai-yun. Study on Flight Scheduling Optimization of Guangzhou Port[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [11] 刘敬贤, 李昌伟, 刘文. 锚地泊位系统服务能力仿真[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36(2): 11—14.
LIU Jing-xian, LI Chang-wei, LIU Wen. Service Capability Simulation of Mooring Berth System[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2010, 36(2): 11—14.
- [12] 张燕涛. 基于遗传算法的泊位调度问题优化研究及仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
ZHUANG Yan-tao. Research and Simulation of Berth Scheduling Problem Based on Genetic Algorithm[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [13] 何春华. 大数据分析下双向通航港口船舶自适应调度算法[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(10): 43—45.
HE Chun-hua. Adaptive Ship Scheduling Algorithms for Bidirectional Navigable Ports Based on Large Data Analysis[J]. Ship Science and Technology, 2018, 40(10): 43—45.
- [14] 徐灵杰. 集装箱班轮到港规律的概率分布及其特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
XU Ling-jie. Probability Distribution and Characteristics of Container Liner Arrival Law[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [15] 何选森. 随机过程与排队论[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 2010.
HE Xuan-sen. Stochastic Process and Queuing Theory [M]. Changsha: Hunan University Press, 2010.