

基于船舶优先权的 集装箱港口泊位分配问题

童 珊

西南交通大学，交通运输与物流学院，成都 610031

摘 要 :泊位作为港口的重要资源,它的有效管理对于港口有着重要意义。集装箱港口泊位分配问题(BAP),实质是为到达集装箱港口的船舶安排最佳停靠位置与停靠时间。本文考虑到船舶动态到达的情况,以及实际操作中码头装卸效率对船舶在港作业时间和船舶优先权的影响,以最小化包括等待时间在内的船舶在港停留时间为目标,建立了基于船舶优先权的连续布置泊位分配模型。该模型是0-1混合整数规划模型,对于小规模问题,可采用商业优化软件求解,对于大规模问题,可设计遗传算法处理。算例分析表明,考虑了连续布置泊位分配问题的二维特性和船舶优先权,能够找到更符合实际的泊位分配方案。

关键词 :连续泊位分配;集装箱运输;港口管理;优先权;遗传算法

中图分类号:U691+.33

文献标识码:A

文章编号:1672-4747(2012)01-0105-06

Solving Dynamic Berth Allocation Problem at Container Terminal Based on Ships' Service Priority

TONG Shan

College of Transportation and Logistics,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract : As one of the most important resources in port, berth efficient management is essential to the port's profit. Berth allocation problem of a container port is to assign a berthing position and a berthing period to every ship at a container terminal. Ships' dynamic arrival with continuous layout was considered in this paper, taking the impact of port's actual handling efficiency on ships' service time and priority into consideration,

收稿日期:2011-04-19.

作者简介:童珊(1987-),女,四川崇州人,西南交通大学交通运输与物流学院硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。

and aiming at minimizing the total service time including waiting time, an optimization model with ships' service priority was proposed. This is a 0-1 mixed integer programming model. For small-scale instances it could be solved by commercial optimization software efficiently, as to the large-scale one, it could be handled by a designed genetic algorithm. A numerical example showed that the model of this paper could likely to find a better solution.

Key words: Continuous berth allocation, container transportation, terminal management, port service priority, genetic algorithm

0 引言

经济一体化、贸易全球化、科学技术进步为集装箱运输发展提供了有利条件,作为集装箱物流体系中的重要枢纽,集装箱港口在国际物流和国民经济中具有重要的战略地位。随着集装箱货物运输量的不断增长,集装箱港口之间的竞争也越来越激烈。船舶压港时间的缩短,服务效率的提高,对集装箱港口在竞争激励环境中处于不败之位有着重要作用,但在泊位分配问题上,码头岸线作为不可再生资源,新建和购买配套设施所付出的成本是巨大的,且传统的先到先服务的人工泊位分配方式已经不能满足集装箱港口运营的发展需要。因此,怎样在有限的泊位资源前提下,合理提高泊位利用率,缩短船舶的在港时间,降低码头运营成本是集装箱港口亟待解决的关键问题^[1]。泊位分配问题(Berth Allocation Problem,简称BAP),根据泊位布置形式,可以分为离散布置和连续布置两种情况。离散布置是将码头岸线严格按照泊位来划分,停靠于泊位上的船舶不能超过泊位长度,且一个泊位只能停靠一艘船舶;而连续布置是将码头岸线视为一条直线,所有到港船舶可以任意停靠于不超过码头岸线的位置上进行作业,没有严格的泊位划分。由于船舶长度的多样性,为了提高泊位利用率,在实际操作中船舶长度往往会超过泊位的长度,所以研究连续布置泊位分配问题具有重要意义。

在既有文献中,Imai等^[3]提出了集装箱港口的动态到达泊位分配问题,以最小化每艘船舶的等待时间与作业时间为目标,设计了基于拉格朗日松弛算法的启发式算法来求解;Imai等^[4]考虑到船舶服务的优先权问题,修改了既有模型,并使用遗传算法来对该

问题进行求解;Cordeau J.et al.^[5]提出了两个模型:其中第一个为Imai等^[3]所提出的模型,另一个为基于时间窗的多仓库车辆路径问题(Multi-depot Vehicle-routing Problem,简称MDVRP),设计了禁忌搜索启发式算法来解决这两个问题;Imai等^[2]考虑了连续布置泊位分配问题,以最小化在港停留时间为目标建立了优化模型,并设计了启发式算法进行求解,但并未考虑船舶作业的优先权;M. Monaco等^[6]将离散泊位分配问题构建为动态调度问题,借用Akio Imai等所构建的模型,设计了拉格朗日启发式算法。而在国内的相关文献中,李平等^[7]进行了港口泊位分配与装卸桥调度系统的建模与优化,所建的泊位分配模型考虑了水深及长度限制,但并没有考虑船舶的等待时间,所建立的模型也相对简单。

总的来看,国外研究泊位分配问题起步较早,但多数集中在对离散泊位分配问题的研究上,对连续泊位分配问题的研究较少,而国内仍然停留在对离散泊位分配问题的研究上,并且所建立的模型更简单,与实际操作存在着较大的差距。本文所建立的模型考虑到我国许多繁忙港口作业并不是严格的按照泊位来进行作业的情况,有时为了提高泊位的利用率,船舶长度超过了泊位的长度,即船舶可以停靠于不超过码头岸线的任意位置进行作业,也就是连续泊位分配问题,并且根据船舶的装卸箱量确定了船舶作业的优先权,因此,本文所提出的模型更具实用价值。

1 模型构建

连续布置泊位分配问题可以由二维图来表示,如图1所示。其中矩形表示船舶,矩形的长代表船长,矩形

的宽代表船舶装卸作业时间。纵轴表示泊位分配计划的规划期间，横轴表示码头岸线长度。连续布置泊位

分配问题可以被描述为船舶(用矩形表示)怎样有效地分配在此二维图上，即确定其停靠时间和停靠位置^[2]。

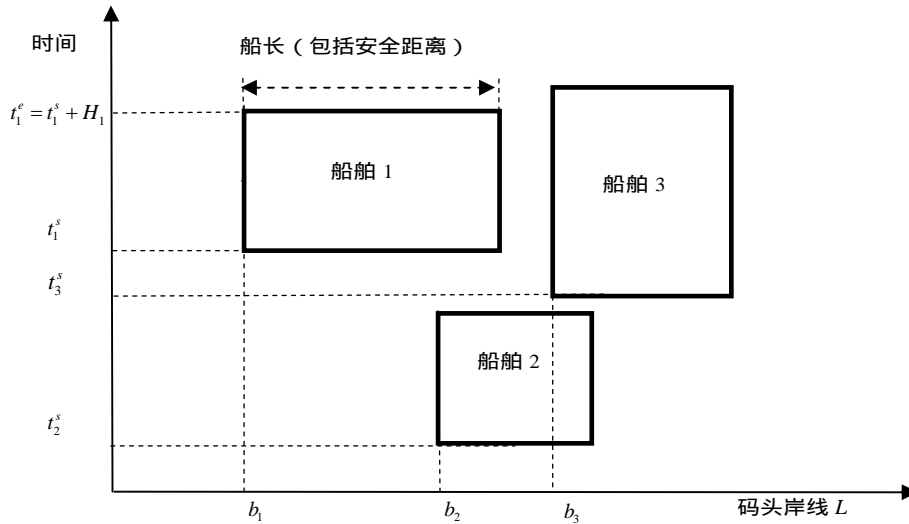


图 1 泊位分配问题示意

Fig.1 Berth allocation problem

本文所建模型综合考虑了船舶动态到达、连续布置和船舶作业优先权。为更好地构建模型，提出了以下假设：(1) 船舶的装卸时间取决于船舶的装卸箱量以及码头的作业效率；(2) 船舶的优先权与船舶装卸集装箱量有关，装卸箱量越多，在港服务时间越长，要优先对其进行作业；(3) 船舶预计到港时间可提前获知，即符合动态泊位分配的特点。模型如下：

$$\text{Min} \sum_{i \in N} (t_i^e - a_i) p_i \quad (1)$$

s.t.

$$t_j^s - t_i^s - H_i - (x_{ij} - 1) \cdot T = 0 \quad \forall i, j \in N (i \neq j) \quad (2)$$

$$b_j - b_i - l_i - (y_{ij} - 1) \cdot L = 0 \quad \forall i, j \in N (i \neq j) \quad (3)$$

$$x_{ij} + x_{ji} + y_{ij} + y_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in N (i \neq j) \quad (4)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in N (i \neq j) \quad (5)$$

$$y_{ij} + y_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in N (i \neq j) \quad (6)$$

$$t_i^e = t_i^s + H_i \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$H_i = w_i / v_i \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$p_i = 1 - \frac{\varepsilon}{w_i} \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$a_i - t_i^s = (T - H_i) \quad \forall i \in N, t_i^s \in \mathbf{R}^+, \quad (10)$$

$$0 < b_i < (L - l_i) \quad \forall i \in N, b_i \in \mathbf{R}^+, \quad (11)$$

$$x_{ij}, y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in N (i \neq j), \quad (12)$$

式中， $i \in N (i=1, \dots, n)$ 表示船舶的集合； L 表示码头岸线长， m ； T 表示规划期间， h ； l_i 表示船舶长度， m ； H_i 表示船舶装卸时间， h ； w_i 表示船舶装卸箱量，TEU； v_i 表示装卸效率，TEU/h； b_i 表示船舶停靠的位置， m ； a_i 为船舶预计到达时间， h ； t_i^s 为船舶开始作业的时间， h ； t_i^e 为船舶完成作业的时间， h ； p_j 为船舶服务优先权； ε 为影响因子； x_{ij} 为 0-1 变量：当泊位分配二维图中船舶 i 完全停靠于船舶 j 的左边时， $x_{ij} = 1$ ，反之 $x_{ij} = 0$ ； y_{ij} 为 0-1 变量：当泊位分配二维图中船舶 i 完全停靠于船舶 j 的下方时， $y_{ij} = 1$ ，反之 $y_{ij} = 0$ 。

目标函数 (1) 考虑到基于船舶优先权的到港船舶在港停留时间为最小，且停留时间包括了等待时间；式 (2) ~ (6) 保证了在泊位分配问题的二维示

意图中船舶 i 与船舶 j 无重叠,式(7)表示船舶完成作业时间与停靠时间之间的关系;式(8)定义船舶的作业时间由船舶的装卸箱量以及码头作业效率两个因素决定;式(9)表示船舶优先权,其中 ε 是衡量装卸箱量对泊位分配的影响因子, ε 越大,则装卸箱量对泊位分配的影响越大;式(10)保证船舶只有在到港后方能停靠;式(11)表示船舶虽可以任意停靠在码头上,但是需满足每艘到港船舶停靠在码头岸线内;式(11)和式(12)定义了变量范围。

此模型为0-1混合整数规划模型,对于小规模问题,运用商业优化软件可以迅速找到可行解。对于大规模问题,商业优化软件在一定的时间内并不能找到可行解,所以本文采用了遗传算法求解该泊位分配问题。

2 遗传算法

20世纪70年代,美国Michigan大学的Holland教授及其学生们共同研究了具有开创意义的遗传算法(Genetic Algorithms,简称GA),它是一种借鉴生物界“物竞天择,适者生存”自然选择和进化机制发展起来的高度并行、随机、自适应搜索算法。经过多年的发展,遗传算法已经在数据挖掘、生产调度、函数优化、机器学习、图像处理等领域得到成功的应用,并显示出其良好的性能^[1]。下面将简要介绍如何将该算法应用于求解泊位分配问题。

步骤1:染色体编码。

步骤2:随机产生初始种群,进行种群多样性检查,保证每个个体只有一个,直至满足种群规模要求。

步骤3:计算个体的适应度,并判别最优个体是否达到最优水平或者迭代次数是否达到预先设定值。若符合,输出最佳个体及其代表的最佳解,计算结束;否则,转步骤4。由于本模型为求最小值,其适应度值使用求目标函数倒数的方法,为保证目标函数值的变化范围处在合理区间进行指数变化,因此,适应度

$$\text{函数为: } f(x) = \frac{1}{(1 + \exp(y(x)/10000))}。$$

步骤4:根据各个个体的适应度,选择再生个体。

适应度高的个体被选中的概率高,适应度低的个体可能被淘汰。

步骤5:采用单点交叉算子的方法,以一定的交叉概率(0.1~0.5)生成新的个体。

步骤6:采用逆转变异算子的方法,以一定的变异概率(0.001~0.05)生成新的个体。

步骤7:启动精英保护策略,用当前最佳个体将当代的最差个体替换掉,产生新种群,返回步骤3。

3 算例

虽然很多港口的泊位分配采取离散布置形式,但对于吞吐量较大、作业繁忙的集装箱港口,采用连续布置形式会更有效地利用有限的岸线资源,提高港口泊位利用率,从而提高港口的效益和竞争力。本文选取上海洋山深水港北港区第一期工程,对所建立的基于船舶优先权的泊位分配问题模型进行求解。该港区一期工程由港区、东海大桥、沪芦高速公路、芦潮港陆域配套工程(临港新城)等四部分组成,于2002年6月开工,2005年12月竣工,总投资143亿元。共建设5个10万t级深水泊位,前沿水深15.5m。码头岸线长1600m,可停靠第五、六代集装箱船,同时兼顾8000标准TEU船舶靠泊,陆域面积为1.53km²,堆场87万m²,年吞吐能力为220万TEU,由上港集团独自经营。

在一个 $T=5$ 天的泊位分配计划期间内,预计到港船舶信息如表1所示。

表1 船舶信息

Tab.1 Information of ships

船舶 i	预计到 达时间/h	装卸 量/TEU	船长 (包括安全距离)/m
船舶1	0	1000	280
船舶2	1	1500	270
船舶3	4	1000	260
船舶4	7	1500	300
船舶5	10	2500	320
船舶6	13	3000	330
船舶7	15	2500	280
船舶8	19	2000	290
船舶9	21	1500	320
船舶10	23	1400	330

使用 Lingo 11.0 进行编程,假设码头装卸机具的效率为 100TEU/h, $\varepsilon = 500$, 分别设计了不考虑船舶优先权和考虑船舶优先权的两组实验,运行程序分别可得到这两种情况下的泊位分配计划,如表 2 和表 3 所示。

表 2 泊位分配计划 (不考虑优先权)

Tab.2 The berth allocation plan (without considering ships' service priority)

船舶 i	停靠位置/m	开始时间/h	等待时间/h	作业时间/h	总服务时间/h
船舶 1	870	0	-	10	210.0
船舶 2	0	1	-	12	
船舶 3	270	4	-	10	
船舶 4	570	7	-	15	
船舶 5	1 280	10	-	26	
船舶 6	940	13	-	30	
船舶 7	290	15	-	35	
船舶 8	0	19	-	25	
船舶 9	620	22	1	19	
船舶 10	1 270	36	13	14	

表 3 泊位分配计划 (考虑优先权)

Tab.3 The berth allocation plan (considering ships' service priority)

船舶 i	停靠位置/m	开始时间/h	等待时间/h	作业时间/h	总服务时间/h
船舶 1	0	0	-	10	155.094
船舶 2	1330	1	-	12	
船舶 3	320	4	-	10	
船舶 4	610	7	-	15	
船舶 5	0	10	-	26	
船舶 6	930	13	-	30	
船舶 7	330	15	-	35	
船舶 8	1310	19	-	25	
船舶 9	610	22	1	19	
船舶 10	0	36	13	14	

从表 2 和表 3 对比可知,考虑船舶优先权可以更有有效的缩短船舶在港停留时间。停靠位置表示将码头岸线视为一条直线后,按照泊位分配二维示意图从左到右的停靠点,如表 3 中的船舶 2 到港后无需等待直接停靠于 1330m 处进行作业,船舶 3 则停靠于 320m 处,以此类推。开始时间表示船舶进港后的停靠时间,不一定所有的船舶到港后均可以马上作业,若到港船舶多,会产生船舶在锚地等候的现象,如表 3 中船舶 9 和船舶 10 到港后,由于港口码头岸线的长度限制,只能在锚地等候,待其他船舶作业完毕,方能作业,船舶 9 等待 1h 后停靠于 610m 处进行作业,船舶 10 则等待 13h 停靠于 0m 处。由此可见,本文所建模型更符合实际,可以有效地解决基于船舶优先权的连续泊位分配问题。

4 结 论

到港船舶的装卸箱量对船舶服务优先权和船舶的在港作业时间都有着重要影响。在进行泊位分配时,船舶装卸箱量决定船舶的靠泊优先权,箱位大的船舶优先级应高于箱位小的船舶。基于这种关系,本文提出了一个最小化在港服务时间的(包括作业时间及等待时间在内)泊位分配问题。结合繁忙港口作业的实际,考虑到船舶可以任意沿码头岸线停靠的情况,建立了基于船舶优先权的连续布置泊位分配模型。该模型为 0-1 混合整数规划模型,对于小规模问题,可直接运用商业优化软件求解,对于大规模问题,本文采用了遗传算法求解。算例表明,本文模型找到更好解的可能性更大,即有效地确定到港集装箱船舶的停靠位置和停靠时间,进一步提高集装箱港口的资源利用及作业效率。

参考文献

- [1] 代丽利. 基于广义遗传算法的泊位分配问题优化研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
- [2] Imai A., Sun X., Nishimura E., Papadimitriou S.. Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach [J]. Transportation Research Part B, 2005, 39: 199- 221.
- [3] Imai A., Nishimura E., Papadimitriou S.. The dynamic berth allocation problem for a container port[J]. Transportation Research Part B, 2001, 35(4): 401-417.

- [4] Imai A., Nishimura E., Papadimitriou S. Berth allocation with service priority [J]. *Transportation Research Part B*, 2003, 37(5): 437-457.
- [5] Cordeau J., Laporte G., Legato P., Moccia L. Models and tabu search heuristics for the berth-allocation problem [J]. *Transportation Science*, 2005, 39(4): 526-538.
- [6] Monaco M., Sammarra M. The berth allocation problem: a strong formulation solved by a lagrangian approach [J]. *Transportation Science*, 2007, 41(2): 265-280.
- [7] 李平, 孙俊清, 韩梅. 泊位调度问题的 GATS 混合优化策略[J]. *天津理工大学学报*, 2006, 22(4): 58-61.

(中文编辑: 刘娉婷)

上接第78页

息素, 遗传算法防止局部最优, 模拟退火算法过滤粗糙解。并根据基本蚂蚁算法和3种改进观念, 设计了4种混合算法。

应用这4种混合算法于测试网络 Sioux Falls, 可以从试算结果中看出这三种改进观念都对基本蚂蚁

算法有积极作用。

虽然混合算法比基本蚂蚁算法更优化, 但对于简单的问题没必要用复杂的算法, 基本蚂蚁算法就足以胜任。Imp4算法的成本比较适合解决复杂庞大的问题。

参考文献

- [1] Poorzahedy H., Tumquist M. A. Approximate algorithms for the discrete network design problem[J]. *Transportation Research B*, 1982, 16(1): 44-55.
- [2] Chen M. Y., Alfa A. S. Algorithms for solving fisk's stochastic traffic assignment model[J]. *Transportation Research B*, 1991, 25(6): 405-412.
- [3] Gao Z. Y., Wu J. J., Sun H. J. Solution algorithm for the bi-level discrete network design Problem [J]. *Transportation Research B*, 2005, 39(6): 479-495.
- [4] 覃刚力, 杨家本. 自适应调整信息素的蚁群算法[J]. *信息与控制*, 2002, 31(3): 198-201.
- [5] Poorzahedy H., Abulghasemi F. Application of ant system to network design problem. *Transportation*, 2005, 32(3): 251-273.
- [6] Dorigo M., Maniezzo V., Colnari A. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agent. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B*, 1996, 26(1): 1-13.
- [7] Dorigo M., Gambardella L. M. Ant colonies for the traveling salesman problem. *Biosystems*, 1997, 43(2): 73-81.
- [8] 赵朝卿. 蚁群算法的改进及其应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [9] Marcin P. L., Tony W. Using genetic algorithms to optimize ACS-TSP[C]. Brussels: Proc of 3rd Int workshop ANTS. 2002: 282-287.
- [10] Poorzahedy H., Rouhani O. M. Hybrid meta-heuristic algorithms for solving network design problem. *European Journal of Operational Research*, 2007, 182(2): 578-596
- [11] LeBlanc L. J. An algorithm for the discrete network design problem[J]. *Transportation Science*, 1975, 9(3): 183-199.

(中文编辑: 吴继屏)