

文章编号:1006-7736(2009)03-0032-05

集装箱支线运输航次调度优化*

靳志宏¹, 胡 洁², 杨永志¹

(1. 大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026;

2. 东软信息技术学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:为优化集装箱支线船舶运输调度,在分析其特点的基础上,提出航次串的概念,并利用其对集装箱支线运输船舶调度问题进行建模,开发了集采用深度优先搜索算法得到航次串组合及采用混合整数规划(MIP)模型求解航次串与船舶最优匹配于一体的两阶段混合算法.实证研究证明了模型及算法的有效性.

关键词:集装箱; 支线运输; 航次调度; 航次串; 深度优先搜索; 混合整数规划(MIP)

中图分类号:U695.22;F550.5

文献标志码:A

Optimization on voyage scheduling for container feeder lines

JIN Zhi-hong¹, HU Jie², YANG Yong-zhi¹

(1. Transportation Management College,
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Neusoft Information Technology College,
Dalian 116023, China)

Abstract: To optimize voyage scheduling for container feeder lines, the concept of voyage cluster was proposed based on its characteristics, and a two-phase algorithm was developed and integrated, phase 1 of which adopted the depth-first search algorithm to get all the combination of voyage clusters, and phase 2 used a mixed integer programming (MIP) to obtain the optimal assignment of container ships in voyage clusters. Empirical research shows the efficiency of the proposed model and algorithm.

Key words: container; feeder line; voyage scheduling; voyage cluster; depth-first search; mixed integer programming (MIP)

0 引言

现今的集装箱港口网络由干线港、枢纽港以及支线港组成,基于这种港口网络进行集装箱运输的模式即是所谓的 hub-spoke 海上运输模式^[1].现行的关于船舶调度问题的研究主要集中于干线运输船舶的调度,其中部分文献将车辆调度问题(VRP)理论扩展应用到船舶调度问题(SRP)的研究.文献[2]和文献[3]将有时限取送车辆调度问题(VRPPD)扩展到散货船舶干线运输,分别提出了集货送货一体化的软时间窗多船型的船舶调度模型.文献[4]提出了带回程配货的干线集装箱船舶调度问题的混合整数规划模型,并应用禁忌搜索法和临近搜索法进行求解.相比之下,对支线运输船舶调度的研究较少.文献[5]构建了包含枢纽港和喂给港、多航线、多船型的支线集装箱船舶调度模型,并基于该问题解的特征,运用粒子群算法对模型进行求解.仿真算例验证了模型的合理性及算法的有效性.本文在上述研究的基础上,进一步对构成支线运输调度基础的航次调度问题进行深入研究.

1 航次调度问题建模

1.1 航次调度的现实约束

航次调度需要满足以下约束条件:

- (1) 一个航次只能由一条船舶来执行;
- (2) 每条船舶在同一时间段内最多只能执行一个航次任务;

(3) 满足港口衔接要求,即在没有任何特殊情况(如空箱调运)时,某条船若执行了从 A 港口到 B 港口的航次任务,则要执行的下一航次的始发港口只能

* 收稿日期:2009-03-10.

基金项目:教育部博士点基金资助项目(20070151002);辽宁省自然科学基金资助项目(20082141);辽宁省教育厅重点实验室资助项目(2008S028).

作者简介:靳志宏(1963-),男,沈阳人,教授,博士生导师, E-mail: jinzhihong@dlnu.edu.cn.

是B港口而不能为其他港口;

(4)满足航次时间衔接要求.即船舶应在所指定执行航次的出发时刻之前到达该航次的出发港口,且船舶的到达时刻距下一航次出发时刻的时间间隔不得低于船舶完成在港作业(卸货、装货、等泊、办理相关手续)所需的最低停泊时间要求;

(5)船舶与所指派航次的物理匹配,主要包括:

①船舶装载能力与航次要求匹配.船舶适航证书要求的载重吨、集装箱舱位应该满足指定航次的货物重量、箱量要求;

②船舶应该满足航次一些特殊属性(冷冻柜、危险品、特种柜)的要求.如有危险品的航次就不能安排无危险品适载证书的船舶去运输;有冷冻柜的航次也不能安排无冷冻柜插头的船舶去运输;

③航次与船舶限航航线的匹配.由于各种原因(证书、桥高等),某些船舶可能受限于某些航线,则这些航线的航次不能指派给该类船舶;

④船舶与航次涉及的码头的匹配.受某些码头的泊位数量、长度、吃水的限制,某些船舶不能够挂靠这些码头.

1.2 “航次串”概念的提出

从上述航次调度的现实约束条件可以看出,直接构造并求解一个能满足船舶排班要求的数学模型比较困难,主要体现在:(1)问题的规模过大.对于一个拥有百艘驳船的中型支线航运公司来说,每日航次量一般在数百个以上,涉及数十个码头,如果直接研究船舶对航次的指派问题,问题的规模会非常大,增加了求解的难度;(2)许多匹配约束条件不易进行数学处理;(3)对航次之间衔接要求等的处理需要引入描述航次的驶离港和抵达港的逻辑变量,并做逻辑运算,等等.

鉴于此,首先根据支线运输航次组织方式的特点引入“航次串”的概念,对问题进行简化.船舶调度就是要确定船舶在未来一定时间内所要执行的航次序列.对于船舶而言,在一定的时间内它必须承担多个航次的运输任务,而这一系列航次不是任意给定的,必须按照一定的固有准则顺序排列.在这里,按照一定的固有准则顺序排列的航次称其为“航次串”.通过分析支线运输船舶运行情况可以发现,许多航次之间存在一种“天然”的衔接关系,如表1中的航次1和2,航次3、4和5分别构成了以香港(HK)和深圳(SZ)为起点和终点的航次串.

通过引入航次串的概念,可以将船舶对航次的分配问题转化为船舶对航次串的分配问题,从而使

问题的规模和复杂性大为降低,可以让船舶连续执行多个航次,较好地避免了船舶在执行了某个航次

表1 航次间的内在联系

序号	航次号	离港		抵港	
		港口	时刻	港口	时刻
1	0422N	HK	04221200	SZ	04221600
2	0423S	SZ	04222300	HK	04230400
3	0422E	SZ	04221300	HP	04221900
4	0423W	HP	04222300	NSA	04230500
5	0423E	NSA	04231000	SZ	04231600

后下一个航程却没有安排的情况的发生.每个航次串均以枢纽港口为起点和终点,枢纽港口的航次比较多,便于进行航次衔接.同时,利用航次串可降低航次数量,进而降低了船舶空箱调运的计算复杂性及其处理难度.

1.3 航次串的指派

基于航次串的概念,将支线运输航次调度问题进行分步处理.首先,利用航次之间的天然衔接关系,将各个航次组合成为满足衔接条件的航次串,即将调度计划期内所有的航次用最少的航次串来覆盖.然后,将船舶对航次的指派问题转化为船舶对航次串的指派问题,并解决计算复杂性相对较低的船舶对航次串的指派问题.

2 航次调度问题求解

2.1 基本思路

采用2阶段法对航次调度问题进行求解.

在第1阶段,生成航次串.即通过“航次-航次”的匹配,采用深度优先搜索算法找出所有可能生成的航次串,并通过一个整数规划模型求解最优的航次串组合,确保用最少的航次串覆盖所有的航次.

在第2阶段,为每个航次串指派具体的船舶,也就是“航次串-船舶”匹配.首先通过计算机比对排除一些不匹配、不满足、不易量化的约束条件的一些指派方案,然后建立一个混合整数规划模型,以船舶载箱率最大为目标求出最优的船舶指派方案.

2.2 航次串的生成

2.2.1 航次串的生成规则

影响航次组合成航次串的主要因素是航次间的衔接,包括3方面内容:

(1)时间衔接.对于相邻的两个航次来说,前一个航次的结束时间和后一个航次的开始时间需要有一定的时间间隔,即在港作业时间.间隔长度会根据港口的作业情况、船舶、船员的素质、天气的不同而不同.一般来说,有一个最小及最大的允许时间范

围。

(2)港口衔接.对于相邻的两个航次来说,前一个航次的抵达港口和后一个航次的出发港口相同。

(3)属性衔接.对于相邻的两个航次来说,保证承担该两航次的货物属性(货量、冷冻柜、危险品)对船舶的船型要求能够匹配.同时,如果相邻两个航次箱量差距比较大,则安排同一条船运输会导致运力浪费.一般箱量的上下波动不能超过一定范围,该数值主要取决于公司的接受能力。

2.2.2 航次串的深度优先搜索算法

航次串的深度优先搜索算法如图 1 所示.首先对获取的航次信息进行格式化,以满足系统的要求.种子航次需要满足下列条件:(1)从航运公司的枢纽港口出发;(2)航次出发时间满足航运公司的要求,一般根据当前计划期内各港口航次最早出发时间确定。

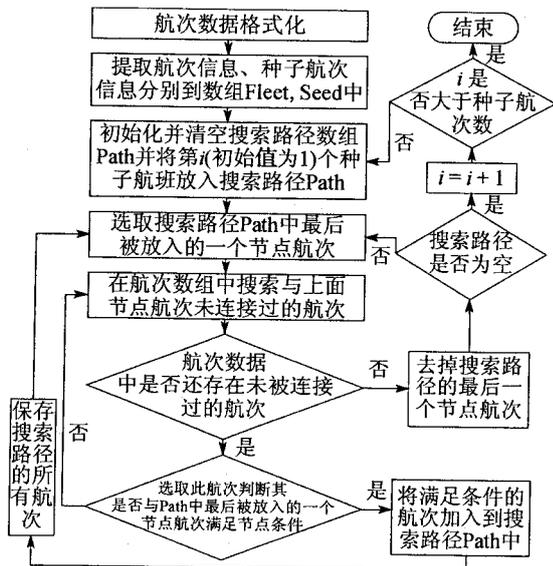


图 1 航次串生成的深度优先探索算法

2.3 航次串的配船

每艘船的船型、载箱量、适载性能、当前的可执行性是不同的,如何选择合适的船舶执行航次串,使其在适载情况下总体载箱率最大是配船的优化目标.航次串配船的过程主要包含以下 2 个阶段。

2.3.1 物理匹配的筛选

该过程通过计算机比对来实现,比对的结果是找出每个航次串适用的船舶.物理匹配主要与货物属性、航次、码头、船舶资料有关,通过建立船舶适载资料模块、航次信息模块、码头资料模块和船舶动态资料模块等 4 个模块,输入相应的相关因素,然后通过计算机程序进行机器比对,遴选出合适的船舶-航次串组合.筛选过程如图 2 所示。

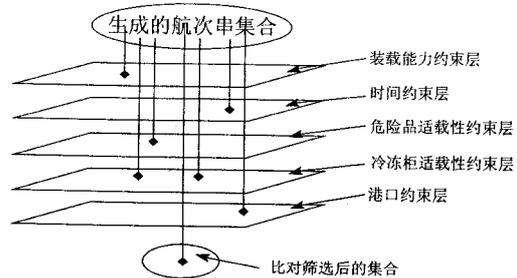


图 2 物理匹配的筛选过程

经过计算机比对,得到航次串及与其匹配的船舶集合.如果用 1 代表匹配,0 代表不匹配,则航次串与船舶匹配矩阵如图 3 所示。

	船 1	船 2	...	船 m
航次串 1	1	0	...	1
⋮	⋮	⋮	...	⋮
航次串 n	0	1	...	0

图 3 航次串与船舶匹配矩阵

2.3.2 优化筛选

经过计算机比对,虽然剔除了大量物理比对中不相匹配的航次串-船舶配对,但仍然存在某航次串存在多艘可以指派的船舶问题.为此,利用 0-1 混合整数规划来优化航次串与船舶的指派问题.该指派问题定义如下参数: $M = \{1, \dots, m\}$ 为所有船舶的集合; $N = \{1, \dots, n\}$ 为所有航次串的集合; $V_i = \{1, \dots, v_i\}$ 为第 i 个航次串覆盖的航次集合; L_{ij} 为第 i 个航次串的第 j 个航次的箱量,其中在该航次装箱量为“+”,而卸箱量为“-”,包括空箱在内; C_k 为第 k 条船的额定载箱量。

决策变量为

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{船 } k \text{ 执行第 } i \text{ 个航次串} \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

该指派问题的目标函数为

$$\max z = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^{v_i} L_{ij} x_{ik}}{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n v_i C_k x_{ik}} \quad (1)$$

约束条件:

$$\sum_{i \in V_i} L_{ij} x_{ik} \leq C_k, \forall k \in M, \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} \leq 1, \forall k \in M \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{ik} = 1, \forall i \in N \quad (4)$$

目标函数(1)表示指派合理的船舶使船队整体的平均载箱率实现最大,充分利用每条船的舱位;约

束条件(2)表示每条船执行每一航次串额定载箱量的约束;约束条件(3)表示每条船舶在同一时间段内最多只能执行一个航次串;约束条件(4)表示一个航次串能且只能由一条船舶来执行.

3 实证研究

选取珠三角地区某支线运输公司的调度数据进行实证研究.选择该地区的香港(HK)、深圳(SZ)和南沙(NSA)3个港口作为该支线集装箱运输的枢纽港口,这几个港口一般有干线船挂靠,货源充足,航次比较多,便于衔接.黄埔(HP)、中山(ZS)、顺德(SD)3个港口为喂给港口.每日 17:00 作为决策时点进行未来 2 天的船舶滚动调度安排.表 2 为各港口间航行时间数据,表 3 为某决策时点搜集的 25 个新运输航次信息.

表 2 港口间航行时间资料

	HK	SZ	NSA	HP	SD	ZS
HK	0	2	4	8	9	7
SZ	2	0	2	6	8	6
NSA	4	2	0	5	2	2
HP	8	6	5	0	5	6
SD	9	8	2	5	0	—
ZS	7	6	2	6	—	0

表 3 决策时点的航次信息

航次编号	出发时间	出发港口	抵达时间	抵达港口	航次箱量 /TEU
A1	042406	HK	042414	HP	40
A2	042412	HK	042420	HP	73
A3	042505	HK	042513	HP	110
A4	042414	HK	042416	SZ	36
A5	042408	HK	042410	SZ	117
A6	042412	HK	042421	SD	85
A7	042407	HK	042411	NSA	120
A8	042419	HK	042423	NSA	119
A9	042407	HK	042409	SZ	105
A10	042415	SZ	042421	HP	86
A11	042411	SZ	042413	NSA	95
A12	042420	SZ	042422	NSA	46
A13	042408	SZ	042410	HK	28
A14	042420	NSA	042422	HK	108
A15	042508	NSA	042513	HP	26
A16	042407	NSA	042409	SZ	111
A17	042505	NSA	042507	ZS	36
A18	042409	NSA	042413	HK	129
A19	042507	HP	042515	HK	85
A20	042504	HP	042512	HK	77
A21	042420	HP	042501	NSA	33
A22	042419	NSA	042424	HP	94
A23	042417	SZ	042419	HK	90
A24	042506	SD	042515	HK	110
A25	042406	SZ	042408	NSA	73

采用深度优先搜索算法获得的结果如表 4 所

示.运算结果表明,最少用 11 个航次串覆盖航次表中所有航次,其中最长的航次串覆盖了 4 个航次.

表 4 航次串筛选运算结果

选取的航班串编号	航次 1	航次 2	航次 3	航次 4	航次串包含航班数量
B3	A1	A21	A15		3
B5	A2	A20			2
B6	A5				1
B10	A6	A24			2
B11	A7				1
B15	A9	A23			2
B21	A11	A14	A3		3
B25	A13	A4	A12	A17	4
B27	A16	A10			2
B30	A18	A8			2
B34	A25	A22	A19		3
总计					25

生成上述航次串后,通过计算机比对物理匹配,排除了一些指派的可能性,找到 12 条船舶可供指派,再根据各船舶的装载能力约束(表 5),得到如图 4 的匹配矩阵.

表 5 船舶额定载箱量

船舶	S1	S2	S3	S4	S5	S6
额定载箱量/TEU	48	50	96	106	112	112
船舶	S7	S8	S9	S10	S11	S12
额定载箱量/TEU	120	120	125	125	130	130

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
B3	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0
B5	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1
B6	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1
B10	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
B11	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
B15	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
B22	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
B26	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1
B28	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1
B31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
B34	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1

图 4 航次串与船舶匹配结果矩阵

根据上述匹配矩阵及实际运行参数,利用优化模型(1)~(4),通过 Lingo 软件求解.窗口信息显示该 MIP 模型在迭代了 3887 次后找到最优解,用时仅 3 s,实现目标函数最大时载箱率达 84.9%.最优指派结果如表 6 所示.

表 6 最优调度结果

航次串	B3	B5	B6	B10	B11	B15	B21	B25	B27	B30	B33
指派船舶	S2	S4	S9	S7	S10	S8	S5	S1	S6	S11	S4

从表 6 中可以看出,11 个航次串均找到了适合运营的船舶,船 S12 没有运输任务.

4 结 论

本文在对集装箱支线船舶运输调度特点进行分析的基础上,引入了“航次串”的概念,从而将对航次配船转化为对“航次串”配船,有利于航次之间的连贯衔接.通过对集装箱支线船舶调度问题建模分析,提出了 2 个阶段的求解思路.通过 MIP 优化模型,得到以实现船舶载箱率最大为目标的最优船舶指派方案.

实证研究结果表明,与人工调度相比,利用优化模型得到的调度结果使船舶的利用率得到很大提高,并且可以利用较少的船舶实现运输任务,降低了公司的日常船舶保有量,节约了租船成本,有益于公司降低运营成本和提高经济效益.

参考文献(References):

- [1]MOURAO M C, PATO M V, PAIXAO A C. Ship assignment with hub and spoke constraints[J]. *Maritime Policy & Management*, 2001, 29(2): 135-150.
- [2]CHRISTIANSEN M, NYGREEN B. A method for solving ship routing problem with inventory constraints[J]. *Annals of Operations Research*, 1998, 81: 357-378.
- [3]FAGERHOLT K. Ship scheduling with soft time windows: an optimization based approach[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 31: 559-571.
- [4]JIN Zhi-hong, YANG Yin-qi, YANG Hua-long. The ship routing problem with backhaul and time windows: formulation and a heuristic approach[C]// *Proceedings of the 11th International Conference on Industrial and Engineering Management*. Shenyang:China Machine Press, 2005: 766-769.
- [5]靳志宏,解玉真,韩 骏.集装箱支线运输的船舶调度优化问题[J]. *中国航海*, 2008, 31(4):415-419.