

集装箱码头的双桥同贝同步装卸调度方法

吴志佩¹, 胡燕海^{2*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 结合集装箱舱位协同作业的同步装卸方法, 提出了集装箱码头的双桥同贝同步装卸方法, 建立了装卸桥、集装箱卡车与龙门吊加权作业时间最短的多目标优化模型, 并求解同个贝位中不同舱位间最优装卸顺序下的装卸桥、集装箱卡车及龙门吊加权作业时间. 运用 Matlab 进行数值模拟, 对比传统装卸策略的数据, 验证了集装箱码头同贝同步装卸方法的可行性与有效性.

关键词: 集装箱码头; 双桥; 同步装卸; 同贝装卸

中图分类号: U691

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2013) 03-0118-05

集装箱码头是港口物流基地、物流枢纽、物流节点, 是港口内各物流企业的集群. 作为集装箱运输中的枢纽环节, 其装卸效率反映了港口码头的整个运营管理先进化程度.

当前, 国内外学者针对集装箱码头作业系统各环节的调度优化问题进行了大量的研究. 为降低装卸桥与龙门吊作业时间, 曾庆成等^[1]通过建立同贝同步装卸调度模型, 在同个贝位内同时实现装卸桥的装船与卸船作业. Goodchild 等^[2-3]证明了集装箱同贝同步装卸的可行性, 并分析了同贝同步装卸对装卸箱码头作业系统的影响. 为了提高设备利用率和装卸效率, 王嘉民等^[4]介绍了边装边卸和同贝位边装边卸作业流程的设计和应用, 采用这种新的作业模式, 使集装箱卡车和装卸桥都满载运行. 包起帆等^[5]指出了集装箱卡车的合理调配是集装箱同贝位装卸工艺得以实施的重要保障, 具体可以通过固定分配法与动态分配法实施集装箱卡车调度. 刘琴等^[6]提出进出口箱同贝位堆放的新型堆场堆放策略, 并设计同贝同步装卸的岸边及堆场装卸工艺. 何济燕等^[7]在集装箱同步装卸方法的研究基础上提出了舱位协同作业, 建立了基于装卸桥与集装箱卡车加权作业时间最短的多目标优化模型, 优化集装箱作业时间.

1 问题描述

目前, 码头研究的集装箱混合作业主要都集中在装卸桥实现双循环作业, 一个作业在往返的同时, 同时进行集装箱的吊上和吊下操作, 并同一时间对同艘船舶实现装卸作业. 但是龙门吊作业作为集装箱码头的一个重要组成部分, 其工作效率直接影响整个码头集装箱的操作效率. 因此笔者在现有基础上提出了一种新的操作模式——多种吊桥实行双循环作业, 即装卸桥与龙门吊同时实现双循环作业. 龙门吊双循环作业是指龙门吊在一个作业往返中同时进行集装箱的吊上和吊下操作, 同一时间对同个箱区进行进口箱/出口箱同步装卸作业(图 1); 最终, 实现龙门吊与装卸桥双同

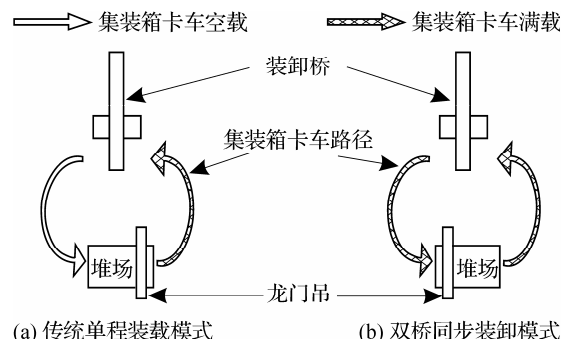


图1 集装箱卡车的装载状态

收稿日期: 2012-03-12.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 教育部规划基金项目(10YJA790277); 浙江省科技厅重点软科学项目(2010C35022); 浙江省新苗项目(009-A00161114200).

第一作者: 吴志佩(1988-), 男, 浙江温州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 企业信息化及智慧物流. E-mail: wuzhipei10000@163.com

*通信作者: 胡燕海(1966-), 男, 浙江舟山人, 博士/教授, 主要研究方向: 企业信息化及智慧物流. E-mail: huyanhai@nbu.edu.cn

步装卸模式, 进一步缩短集装箱卡车的行进路径, 更好地完善集装箱卡车“重进重出”。

龙门吊同步装卸过程是指在1个箱区内对进口箱和出口箱采用混合堆存、递推式堆垛的协同作业。堆场最初始堆放着出口箱, 出口箱卸载从左边第1列开始, 采用自上向下取箱。待第1列出口箱全部卸载完毕, 在第2列出口箱开始卸载时, 同时也在第1列进行进口箱的装载操作, 实现进、出口箱的混合装卸工作, 减少了集装箱装卸时的单程装卸次数, 继而节约了该堆场中集装箱的全部装卸时间, 并实现集装箱卡车的重进重出(图2)。

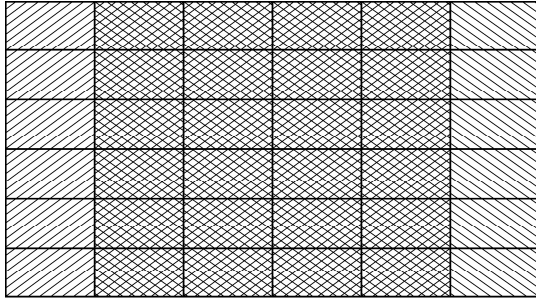


图2 箱区内进出口箱混合堆放装卸

2 数学模型

笔者以装卸桥、集装箱卡车与龙门吊三者作业时间加权的最短为目标建立数学模型, 模型中的参数和变量做以下设定: 装卸桥编号 $q \in Q = \{1, 2, \dots, \bar{Q}\}$; 集装箱卡车编号 $p \in P = \{1, 2, \dots, \bar{P}\}$; 龙门吊编号 $k \in Y = \{1, 2, \dots, \bar{Y}\}$; 集装箱编号 $j \in J = \{1, 2, \dots, \bar{J}\}$; $t_q^{(1)}$ 为装卸桥 q 完成所有单程装卸作业的时间, $\tilde{t}_q^{(1)}$ 为装卸桥 q 完成1个单程装卸作业的时间; $t_q^{(2)}$ 为装卸桥 q 完成所有同步装卸作业的时间, $\tilde{t}_q^{(2)}$ 为装卸桥 q 完成1个同步装卸作业的时间; $t_p^{(1)}$ 为集装箱卡车 p 完成所有单程装卸作业的时间, $\tilde{t}_p^{(1)}$ 为集装箱卡车 p 完成1个单程装卸作业的时间; $t_p^{(2)}$ 为集装箱卡车 p 完成所有同步装卸作业的时间, $\tilde{t}_p^{(2)}$ 为集装箱卡车 p 完成1个同步装卸作业的时间; $t_k^{(1)}$ 为龙门吊 k 完成所有单程装卸作业的时间, $\tilde{t}_k^{(1)}$ 为龙门吊 k 完成1个单程装卸作业的时间; $t_k^{(2)}$ 为龙门吊 k 完成所有同步装卸作业的时间, $\tilde{t}_k^{(2)}$ 为龙门吊 k 完成1个同步装卸作业的时间; $x_{j,p} = 1$, 表示 p

集装箱卡车完成 j 作业任务; $x_{j,q} = 1$, 表示 q 装卸桥完成 j 作业任务; $x_{j,k} = 1$, 表示 k 龙门吊完成 j 作业任务; $y_{j,p} = 1$, 表示 p 集装箱卡车的第1个作业任务是 j ; $y_{j,q} = 1$, 表示 q 装卸桥的第1个作业任务是 j ; $y_{j,k} = 1$, 表示 k 龙门吊的第1个作业任务是 j ; $v_{j,j',p} = 1$, 表示 j, j' 的作业任务都是由 p 集装箱卡车完成; $v_{j,j',q} = 1$, 表示 j, j' 的作业任务都是由 q 装卸桥完成; $v_{j,j',k} = 1$, 表示 j, j' 的作业任务都是由 k 龙门吊完成; $z_{j,j',q} = 1$, 表示 j, j' 的作业任务都由 q 装卸桥完成, 并且 j' 在 j 之后完成; $z_{j,j',p} = 1$, 表示 j, j' 的作业任务都是由 p 集装箱卡车完成, 并且 j' 在 j 之后完成; $z_{j,j',k} = 1$, 表示 j, j' 的作业任务都是由 k 龙门吊完成, 并且 j' 在 j 之后完成; $u_{j,j'}^{(p)} = 1$, 表示 j' 作业任务在集装箱卡车运送 j 的过程中完成; $u_{j,j'}^{(q)} = 1$, 表示 j' 作业任务在装卸桥吊运 j 的过程中完成; $u_{j,j'}^{(k)} = 1$, 表示 j' 作业任务在龙门吊吊运 j 的过程中完成; $f_{j,j'}^{(p)} = 1$, 表示 j, j' 连续的2个作业任务在集装箱卡车运送时采用同步装卸; $f_{j,j'}^{(q)} = 1$, 表示 j, j' 连续的2个作业任务在装卸桥吊运时采用同步装卸; $f_{j,j'}^{(k)} = 1$, 表示 j, j' 连续的两个作业任务在龙门吊吊运时采用同步装卸。

双桥同贝同步装卸调度模型为:

$$T = \min \left(\max \left(\omega_1 \sum_{q \in Q} C_q + \sum_{p \in P} T_p + \omega_2 \sum_{k \in Y} C_k \right) \right), \quad (1)$$

S.t.,

$$C_q = t_q^{(1)} + t_q^{(2)}, \forall q \in Q, \quad (2)$$

$$T_p = t_p^{(1)} + t_p^{(2)}, \forall p \in P, \quad (3)$$

$$C_k = t_k^{(1)} + t_k^{(2)}, \forall k \in Y, \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} x_{j,p} = 1, \forall j \in J, \quad (5)$$

$$\sum_{q \in Q} x_{j,q} = 1, \forall j \in J, \quad (6)$$

$$\sum_{k \in Y} x_{j,k} = 1, \forall j \in J, \quad (7)$$

$$\sum_{j \in J} y_{j,p} = 1, \forall p \in P, \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} y_{j,q} = 1, \forall q \in Q, \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} y_{j,k} = 1, \forall k \in Y, \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P} y_{j,p} \leq 1, \forall j \in J, \quad (11)$$

$$\sum_{q \in Q} y_{j,q} \leq 1, \forall j \in J, \quad (12)$$

$$\sum_{k \in Y} y_{j,k} \leq 1, \forall j \in J, \quad (13)$$

$$\sum_{j' \in J} z_{j,j',q} \leq 1, \sum_{j' \in J} z_{j',j,q} \leq 1, \forall j \in J, \forall q \in Q, \quad (14)$$

$$\sum_{j' \in J} z_{j,j',p} \leq 1, \sum_{j' \in J} z_{j',j,p} \leq 1, \forall j \in J, \forall p \in P, \quad (15)$$

$$\sum_{j' \in J} z_{j,j',k} \leq 1, \sum_{j' \in J} z_{j',j,k} \leq 1, \forall j \in J, \forall k \in Y, \quad (16)$$

$$u_{j,j'}^{(p)} + v_{j,j',p} \leq 1, \forall j \in J, \forall p \in P, \quad (17)$$

$$u_{j,j'}^{(q)} + v_{j,j',q} \leq 1, \forall j \in J, \forall q \in Q, \quad (18)$$

$$u_{j,j'}^{(k)} + v_{j,j',k} \leq 1, \forall j \in J, \forall k \in Y, \quad (19)$$

$$C_q - \max \left[\sum_{j \in J} f_{j,j'}^{(q)} \cdot \tilde{t}_q^{(2)} + \sum_{j \in J} (1 - f_{j,j'}^{(q)}) \cdot \tilde{t}_q^{(1)} \right] \geq 0, \\ \forall j, j' \in J, \forall q \in Q, \quad (20)$$

$$T_p - \max \left[\sum_{j \in J} f_{j,j'}^{(p)} \cdot \tilde{t}_p^{(2)} + \sum_{j \in J} (1 - f_{j,j'}^{(p)}) \cdot \tilde{t}_p^{(1)} \right] \geq 0, \\ \forall j, j' \in J, \forall p \in P, \quad (21)$$

$$C_k - \max \left[\sum_{j \in J} f_{j,j'}^{(k)} \cdot \tilde{t}_k^{(2)} + \sum_{j \in J} (1 - f_{j,j'}^{(k)}) \cdot \tilde{t}_k^{(1)} \right] \geq 0, \\ \forall j, j' \in J, \forall k \in Y, \quad (22)$$

$$\tilde{t}_q^{(1)} \ll t_q^{(1)}, \tilde{t}_q^{(2)} \ll t_q^{(2)}, \tilde{t}_p^{(1)} \ll t_p^{(1)}, \tilde{t}_p^{(2)} \ll t_p^{(2)}, \\ \tilde{t}_k^{(1)} \ll t_k^{(1)}, \tilde{t}_k^{(2)} \ll t_k^{(2)}. \quad (23)$$

(1)式目标函数 T 表示装卸桥、集装箱卡车与龙门吊三者作业时间加权的最短。在实际装卸作业中,由于1个集装箱所需的集装箱卡车时间是所需的装卸桥吊运时间的5倍以上,是龙门吊吊运时间的8倍以上,权重系数取 $\omega_1 = 6$, $\omega_2 = 9$; (2)式表示每座装卸桥的装卸时间包括单程装卸和同步装卸时间; (3)式表示每辆集装箱卡车的运送时间包括单程运送时间和集装箱同步装卸的双程运送时间; (4)式表示每座龙门吊的装卸时间包括单程装卸和同步装卸时间; (5)~(7)式表示每个集装箱只能由1座装卸桥/1辆集装箱卡车/1座龙门吊进行作业; (8)~(10)式表示每种装卸作业设备有且仅有一个初始操作; (11)~(13)式表示每个集装箱最多只能是每一种装卸作业设备的初始操作; (14)~(16)式表示每种装卸作业设备最多有一个前后连续的作业任务; (17)~(19)式表示每种装卸作业设备在作业时,只能操作1只集装箱; (20)式表示每座装卸桥的总装卸时间大于等于其所有装卸形式的装卸总时间; (21)式表示每辆集装箱卡车的总运送时间大于等于其

所有装卸形式的装卸总时间; (22)式表示每座龙门吊的总装卸时间大于等于其所有装卸形式的装卸总时间; (23)式表示每种装卸作业设备的单程装卸以及同步装卸时间约束条件。

3 数值模拟

对于装卸桥调度模块,笔者采用舱位协同的同步装卸策略,在1个贝位能实现同步装卸。舱位协同是指首列舱位中的集装箱只卸集装箱,第2列舱位的集装箱进行卸集装箱的同时首列舱位进行集装箱的装载,以此类推,最后尾舱进行单程的集装箱装载^[7]。假定船舶1个贝位分为4个舱位,那么装卸桥的选择实际上就是一个排列组合问题,有 $A_4^4 = 24$ 种装卸方案,因此,不同的方案会导致装卸桥来回操作次数以及相应的集装箱卡车来回运输次数的不同。

龙门吊调度模块中,笔者假设箱区左边第1列为空列,用于放置船舶上最初卸载下来的进口箱。而箱区内的出口箱是从左边第2列开始卸载,之后的装卸顺序是从左到右,从上到下。装卸完成后,箱区内右边第1列是处于空列状态。

由于笔者研究的是集装箱码头多种吊桥调配策略对集装箱装卸作业效率的影响,系统调度模型基于以下假设条件:

(1) 忽略船舶甲板上与舱内布局差异以及不同贝位的结构差异;

(2) 所有装卸桥、龙门吊在每个计划时段内具有相同的工作能力,并且它们的作业开始和结束时间都在同个时段内;

(3) 由于箱区大小的限制和潜在的龙门吊碰撞危险,任何时候1个箱区最多只能有2台龙门吊;

(4) 装卸的集装箱都是FEU标箱,忽略特殊集装箱的特殊处理工作;

(5) 集装箱卡车数量充足,忽略由集装箱卡车因素造成的装卸桥、龙门吊等待;

(6) 在集装箱的装卸过程中,装卸桥 q 完成1个单程装卸平均时间 $\tilde{t}_q^{(1)} = 2 \text{ min}$,装卸桥 q 完1个同步装卸时间 $\tilde{t}_q^{(2)} = 2.5 \text{ min}$; 集装箱卡车 p 完成1个单程装卸平均时间 $\tilde{t}_p^{(1)} = 12 \text{ min}$,集装箱卡车 p 完成1个同步装卸平均时间是 $\tilde{t}_p^{(2)} = 15 \text{ min}$; 龙门吊 k 完成1个单程装卸平均时间 $\tilde{t}_k^{(1)} = 4/3 \text{ min}$,龙门吊

k 完成 1 个同步装卸的平均时间是 $\tilde{t}_k^{(2)} = 5 / 3 \text{ min}$;

(7) 以超巴拿马式集装箱船规模 5500 标箱的集装箱船为试验船舶, 布局为 25 个贝位, 每个贝位中 4 个舱位, 每个舱位最多可放置 50 个 FEU 的

标箱.

船舶贝位中各个舱位的配积载计划见表 1, 用 Matlab 计算样本结果见表 2. 由表 2 的计算数据可知, 与传统装卸调度方法相比, 采用双桥同贝同步

表 1 船舶贝位中各个舱位对应的集装箱装卸量 FEU

舱位号	装卸量	贝位号												
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
1	卸箱量	33	32	12	46	31	5	12	34	5	25	2	41	49
	装箱量	19	30	9	49	36	14	23	20	14	39	38	29	36
2	卸箱量	41	11	12	22	12	41	49	19	17	36	26	10	26
	装箱量	27	16	22	6	6	2	28	50	34	46	24	12	24
3	卸箱量	18	24	16	13	15	47	27	2	7	45	46	45	3
	装箱量	47	12	47	21	16	37	12	45	37	17	31	2	35
4	卸箱量	44	43	22	30	22	25	25	46	6	35	31	25	3
	装箱量	28	10	10	14	26	29	32	40	33	10	43	9	4

舱位号	装卸量	贝位号												
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1	卸箱量	27	49	9	33	19	14	34	2	8	30	42	41	
	装箱量	5	33	20	32	10	22	27	29	43	12	50	14	
2	卸箱量	41	41	42	15	25	28	35	45	33	20	37	30	
	装箱量	41	23	41	22	17	48	34	34	19	30	18	2	
3	卸箱量	37	22	4	1	48	21	9	10	10	13	30	22	
	装箱量	8	42	20	50	47	50	7	19	22	15	6	16	
4	卸箱量	33	5	27	9	3	16	50	24	25	31	46	9	
	装箱量	26	7	21	6	37	36	92	50	74	14	44	9	

表 2 双桥同贝同步装卸调度方法与传统单程装卸方法的加权作业时间对比

贝位号	01	02	03	04	05	06	07	08	09
传统作业时间/min	9 252	6 408	5 400	7 236	5 904	7 200	7 488	9 216	5 508
同步作业时间/min	6 498	4 842	4 050	4 968	4 068	5 040	5 247	6 543	4 698
时间节省率/%	29.77	24.44	25.00	31.34	31.10	30.00	29.93	29.00	14.71

贝位号	10	11	12	13	14	15	16	17	18
传统作业时间/min	9 108	8 676	6 228	6 480	7 848	7 992	6 624	6 048	7 416
同步作业时间/min	6 354	5 895	4 878	4 374	5 823	5 427	4 518	4 509	4 932
时间节省率/%	30.24	32.05	21.68	32.50	25.80	32.09	31.79	25.45	33.50

贝位号	19	20	21	22	23	24	25
传统作业时间/min	8 460	7 380	7 668	6 012	5 940	9 828	5 148
同步作业时间/min	6 705	5 490	5 535	4 176	4 347	6 804	4 095
时间节省率/%	20.74	25.61	27.82	30.54	26.82	30.77	20.45

装卸调度方法的集装箱装卸加权时间平均提高了27.73%(时间节省率的平均值),改善了集装箱装卸效率.

4 结语

研究了同步装卸中,1个贝位的双桥同步装卸顺序问题,提出了装卸桥与龙门吊双同步的作业方式,以提高集装箱码头内装卸作业设备的工作效率.在此基础上建立了基于装卸桥、集装箱卡车及龙门吊加权作业时间最短的多目标优化模型,采用Matlab数值分析,效率提高为14.71%~33.50%,平均提高27.73%.而整条集装箱船的同步装卸方法有待下一步研究.

参考文献:

- [1] 曾庆成, 杨忠振, 陆靖. 集装箱码头同贝同步装卸调度模型与算法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 2(10):1671-

1673.

- [2] Goodchild A V, Daganzo C F. Double-cycling strategies for container ships and their effect on ship loading and unloading operations[J]. Transportation Science, 2006, 40(4):473-483.
- [3] Goodchild A V, Daganzo C F. Crane double cycling in container ports: planning methods and evaluation[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2007, 41(8):875-891.
- [4] 王嘉民, 何琪敏, 李晓鸣. 边装边卸流程的系统开发[J]. 港口装卸, 2006(3):1-4.
- [5] 包起帆, 施思明, 沈联红, 等. 数字化港口集装箱生产关键技术[J]. 港口装卸, 2004(3):14-15.
- [6] 刘琴, 周强, 张艳伟. 同贝位同步装卸的集装箱码头装卸工艺与堆场平面布置[J]. 水运工程, 2011(6):66-69.
- [7] 何赧燕, 胡燕海. 基于舱位协同作业的集装箱同步装卸方法[J]. 宁波大学学报: 理工版, 2012, 25(3):105-108.

Controlling of Synchronized Loading and Unloading Operations of Double Cranes for the Bay-shared Container Terminal

WU Zhi-pei¹, HU Yan-hai^{2*}

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on simultaneous hatches operations, the method of synchronized loading and unloading operations in the same ship-bay at container terminal with double cranes is presented. With the objective of minimizing weighted quay-crane handling time, vehicle transporting time and yard-crane handling time, a multi-objective optimization model is established. Numerical tests are conducted to compare with the traditional operations. The feasibility and efficiency of the proposed method are validated using numerical simulations. .

Key words: container terminal; double cranes; synchronized loading and unloading; the bay-shared operations

(责任编辑 章践立)