

港口集装箱码头轮胎式龙门吊优化调度研究

魏众¹, 申金升¹, 肖荣娜², 张智文³, 石定寰³

(1. 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044; 2. 交通物流工程研究中心, 北京 100088;

3. 中华人民共和国科学技术部, 北京 100862)

[摘要] 随着贸易全球化的到来, 集装箱运输业飞速发展, 港口集装箱码头受到越来越多的重视。轮胎式龙门吊体积大, 作业效率低, 该环节已经成为码头作业的瓶颈。提出了轮胎式龙门吊优化调度混合整数规划模型, 研究了定量作业条件下的龙门吊优化调度问题, 通过实际案例分析为码头管理者提供决策支持。

[关键词] 集装箱码头; 堆场; 轮胎式龙门吊; 优化调度

[中图分类号] U653.921 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009 - 1742(2007)08 - 0047 - 05

随着贸易全球化和市场国际化的到来, 集装箱运输在世界各地飞速发展, 大型港口集装箱码头不断涌现。由于集装箱码头处在海陆联运接口处的战略位置, 因此受到各界的广泛关注。图1形象地描述了港口集装箱码头的物流过程。在进口作业中, 船舶到达码头靠岸停泊后, 岸边的桥吊为集装箱船

进行卸载服务, 卸载的集装箱通过拖车运送到堆场, 再由堆场的龙门吊把集装箱搬运到合适的位置堆存, 等待转运; 在出口作业中, 堆场的龙门吊把出口的集装箱搬运到拖车上, 并运送到岸边的桥吊处, 最后由桥吊把集装箱装载到船舶上出港。

由图1可知, 龙门吊是港口集装箱码头装卸

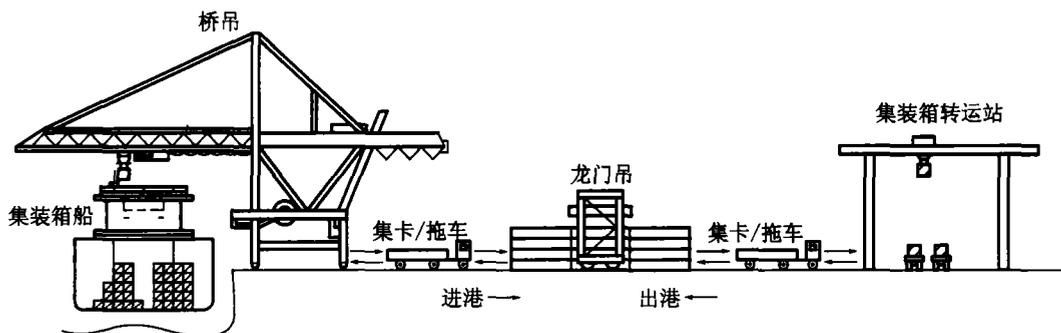


图1 港口码头集装箱物流作业流程

Fig.1 Logistics operation process of port container terminal

搬运集装箱的常用设备之一。由于龙门吊体积大, 作业速度慢(作业率仅为桥吊的一半左右), 如果不能有效使用, 在堆场段位附近或者段内拖车通道处将引发拖车拥堵或闲置, 致使桥吊窝工, 整个码头

作业发生延误。因此, 龙门吊作业环节已经成为码头集装箱物流的瓶颈之一。对龙门吊作业进行优化调度, 可以缩短拖车的等待时间, 提高桥吊作业率, 降低船舶周转时间, 最终提高港口集装箱码头的作

[收稿日期] 2006-08-02; 修回日期 2006-09-12

[基金项目] 国家“十五”科技攻关资助项目(2004BA205A29-1)

[作者简介] 魏众(1977-), 男(蒙古族), 辽宁北票市人, 北京交通大学博士研究生, 主要从事物流管理相关研究

业效率。因此,研究龙门吊优化调度问题对于港口集装箱码头的作业管理具有重要意义。

我国有关龙门吊的作业研究尚处于初始阶段,凭经验进行龙门吊作业调度。龙门吊的相关研究主要集中在荷兰、香港等国家和地区。文献[1]提出了龙门吊调度问题,目标函数是堆场内工作量延误最小化,并且建立混合整数规划模型,用拉格朗日松弛算法求解。文献[2]提出的龙门吊优化调度问题,目标函数是等待时间最小化,通过实验分析用分支定界法求得最优解。文献[3]通过段位间龙门吊指派作业研究为管理者提供决策支持。上述研究工作以时间为阶段划分作业环节,没有系统地考虑码头堆场作业的现实性和可操作性。结合目前港口码头作业的实际情况,笔者以段位作业最早结束时间为目标进行龙门吊作业优化调度研究,为码头管理人员提供决策依据。

1 龙门吊作业简介

目前,龙门吊分为轨道式和轮胎式两大类。受港口地质条件、设备投资、作业环境的影响,轮胎式龙门吊(RTGC)是大多数集装箱码头的首选^[3,4]。在堆场内,轮胎式龙门吊通过轮胎移动搬运、堆垛集装箱,如图2所示。在集装箱进港作业时,轮胎式龙门吊从拖车上将集装箱卸到堆场堆存;在出港作业时,轮胎式龙门吊把堆场的集装箱吊到在通道内等候的拖车上,由拖车运送到岸边桥吊处装船出港。

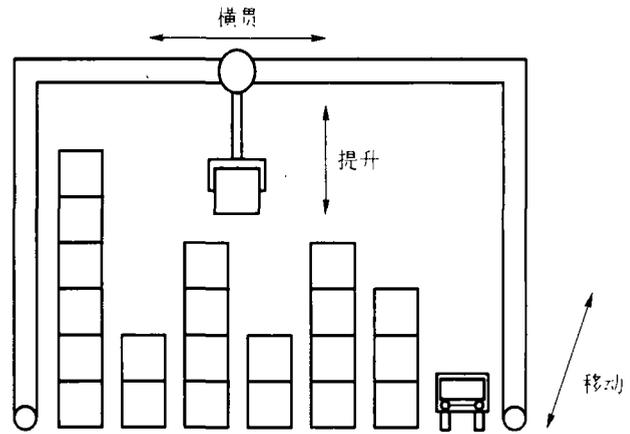


图2 轮胎式龙门吊结构图

Fig.2 The structure figure of RTGC

图3表示堆场段位之间的吊车移动^[5]。堆场一般分为若干区,每个区由若干段组成。段宽为6个标箱(TEU)宽度加1个拖车通道,约等于龙门吊的跨度。段长根据堆场的实际面积决定,通常为30个标箱长度,堆垛高度由轮胎式龙门吊的作业能力决定,一般为4层或5层。受堆场内集装箱搬运堆垛工作量不平衡性的影响,轮胎式龙门吊需要在各段位之间移动。如果两个段位相邻且共线,例如1段和2段,轮胎式龙门吊不需要转弯,沿直线即可从一个段位移到另一个段位;如果两个段位处于平行位置,例如1段和3段,轮胎式龙门吊从一个段位移到另一个段位需要两次旋转90°角,加之龙门吊体积大,动作缓慢,需要一定的时间和空间^[6]。

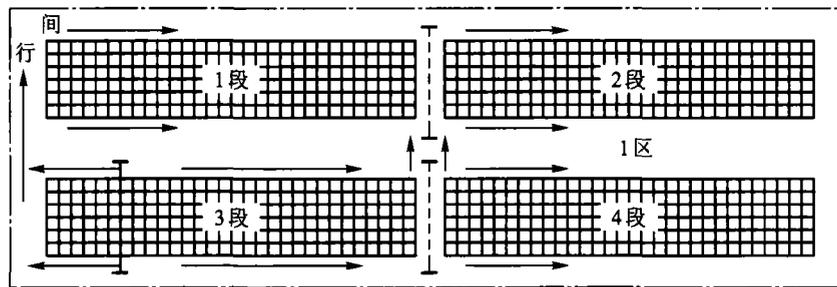


图3 堆场段位之间的吊车移动

Fig.3 Transfer of cranes between two blocks

2 模型算法

轮胎式龙门吊按码头实际作业设定相关符号:

N —总段位数;

M —龙门吊总数;

n_i —段位 i 装载的集装箱数;

τ —龙门吊搬运集装箱平均时间, min;

t_{ij} —龙门吊从段位 i 移动到段位 j 所需时间, min;

X_i —段位 i 内轮胎式龙门吊数量;

w_i —一段位 i 内搬运集装箱作业时间, min;

w_i^n —完成第 n 轮作业后,段位 i 剩余搬运集装箱作业时间, min;

w_{kij}^n —轮胎式龙门吊 k 在段位 i 完成第 n 轮作业后到达段位 j 的搬运集装箱作业时间, min;

T_B —一段位 i 搬运装载集装箱最早结束时间, min;

B_i —段位。

目标函数：

$$\min T_{B_i} = \begin{cases} w_i & \text{单吊作业} \\ w_i/2 & \text{双吊作业} \\ (w_i - w_i^n) + t_{ji} + (w_i^n - t_{ji})/2 & \text{先单吊,后双吊} \end{cases}$$

$$s. t \quad \begin{aligned} X_i &\leq 2 \quad i=1, 2, 3, \dots, N & (1) \\ X_{L_i} &\leq 2 \quad i=1, 2, 3, \dots, N & (2) \\ C_k &\leq \delta \quad i=1, 2, 3, \dots, M & (3) \end{aligned}$$

约束条件：**a.** 保证段位 i 内轮胎式龙门吊总数 ≤ 2 , $X_i \in \{0, 1, 2\}$ $i=1, 2, 3, \dots, N$;**b.** 假设轮胎式龙门吊初始位置相同;**c.** 保证作业时间不超过龙门吊作业能力;**d.** 保证龙门吊作业连续性;**e.** 遵循小号优先指派原则, 即龙门吊编号 $i < j$ 时, i 作业优先;**f.** 作业结束后允许吊车闲置。

模型求解：

Step 1 计算各段位内装载集装箱作业时间：

$w_i = n_i \tau$ 。

Step 2 计算 $w_i/2$, 并按各段位装载集装箱作业时间由大到小排序, $\text{Rank}\{w_i, w_i/2\} = \{w_i, w_j,$

$\dots, w_n/2, \dots, w_i, w_m/2\}$ 。按序指派 $\text{RTGC}_1 \rightarrow B_i$, $\text{RTGC}_2 \rightarrow B_j$, 然后开始第一轮作业。

Step 3 计算最小单位龙门吊作业时间: 假设段位 B_i, RTGC_k , 需对其进行第二轮作业指派。计算堆场段位内单吊或者无吊剩余作业时间 w' , 并按由大到小排序为 $\text{Rank}\{w'_j - t_{ij}, w'_i - t_{ii}, \dots\}$, 将 $\text{RTGC}_k \rightarrow B_j$, 开始第二轮作业。

Step 4 重复 Step 3, 进行下一轮作业; 若段位内为单吊作业, $w_i^n \leq 50$, 考虑到龙门吊移动过程对拖车运输环节的影响, 剩余作业时间由该龙门吊独立完成, 不指派其他龙门吊到此段位作业。

Step 5 所有段位龙门吊作业完成, 作业结束。

3 示例分析

某港口集装箱码头堆场内有 4 000 TEU 需要进行装载作业, 集装箱分布在 10 个段位内(如图 4 所示), 此次装卸作业可支配使用 15 台 RTGC, 各段位间 RTGC 移动所需时间如表 1 所示。在拖车、桥吊、人力资源均能满足龙门吊作业需求的前提下, 调度轮胎式龙门吊使作业时间最短。

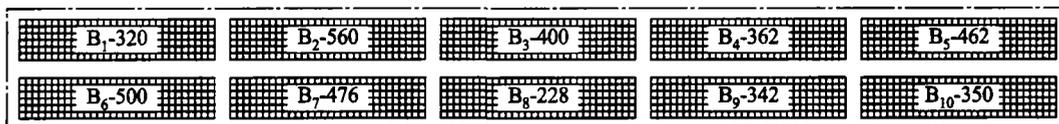


图 4 段位内集装箱分布图

Fig. 4 The container distribution figure at block

表 1 段位之间轮胎式龙门吊移动时间 t_{ij}

Table 1 RTGC traveling time t_{ij} between blocks min

B_j	B_i									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	10	20	30	40	15	15	25	35	45
2	10	0	10	20	30	5	15	15	25	35
3	20	10	0	10	20	25	15	15	15	25
4	30	20	10	0	10	35	25	15	15	15
5	40	30	20	10	0	45	35	25	15	15
6	15	15	25	35	45	0	10	20	30	40
7	15	15	15	25	35	10	0	10	20	30
8	25	15	15	15	25	20	10	0	10	20
9	35	25	15	15	15	30	20	10	0	10
10	45	35	25	15	15	40	30	20	10	0

Step 1 首先计算各段位内装载集装箱作业时间: $w_i = \tau n_i$, $\tau = 3$ min。

B_i : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
 w_i/min : 960 1680 1200 1086 1386 1500 1428 682 1026 1050

Step 2 计算 $w_i/2$ 并按各段位装载集装箱作业时间 $\{w_i, w_i/2\}$ 由大到小排序, 得 $\text{Rank}\{w_i, w_i/2\} = \{w_2, w_6, w_7, w_5, w_3, w_4, w_{10}, w_9, w_1, w_2/2, w_6/2, w_7/2, w_5/2, w_8, w_3/2, w_4/2, w_{10}/2, w_9/$

$2, w_1/2, w_8/2, \dots\}$ 。根据轮胎式龙门吊小号作业原则, 指派 $\text{RTGC}_{1/10} \rightarrow B_2$, $\text{RTGC}_{2/11} \rightarrow B_6$, $\text{RTGC}_{3/12} \rightarrow B_7$, $\text{RTGC}_{4/13} \rightarrow B_5$, $\text{RTGC}_{5/15} \rightarrow B_3$, $\text{RTGC}_6 \rightarrow B_4$, $\text{RTGC}_7 \rightarrow B_{10}$, $\text{RTGC}_8 \rightarrow B_9$, $\text{RTGC}_9 \rightarrow B_1$, $\text{RTGC}_{14} \rightarrow B_8$, 开始第一轮搬运装载作业。

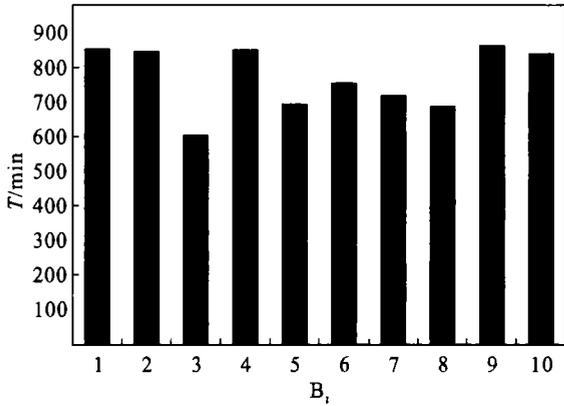
Step 3 计算最小单位作业时间轮胎式龙门吊为 $\text{RTGC}_{5/15}$, 即经过 600 min 装载作业后结束, 对其进行第二轮作业指派, 其他吊车作业继续。计算堆场段位内单吊剩余作业时间, 为满足同一段位内龙门吊总数 ≤ 2 原则, B_2, B_6, B_7, B_5 暂不考虑。计算其他段位, $\{w'_j - t_{ij}; i=3, j=1, 4, 8, 9, 10\}$, 即: $w'_1 - t_{3,1} = 360 - 20 = 340$, 同理 $w'_4 - t_{3,4} = 476$, $w'_8 - t_{3,8} = 69$, $w'_9 - t_{3,9} = 411$, $w'_{10} - t_{3,10} = 425$ 。然后按由大到小顺序排列为 $\text{Rank}\{w'_4 - t_{3,4}, w'_{10} - t_{3,10}, w'_9 - t_{3,9}, w'_1 - t_{3,1}, w'_8 - t_{3,8}\}$, 由此应指派 $\text{RTGC}_5 \rightarrow B_4$, $\text{RTGC}_{15} \rightarrow B_{10}$, 开始第二轮作业。

Step 4 重复 Step 3, $\text{RTGC}_{14} \rightarrow B_9$, $\text{RTGC}_4 \rightarrow B_1$ 。

考虑到轮胎式龙门吊在段位移动过程中占据的空间位置给拖车带来的不便,当 $w_i^n < 50$ 时,不进行轮胎式龙门吊转换作业服务,等待作业完成。

Step 5 整个装卸搬运作业结束。

根据具体轮胎式龙门吊指派过程,可得出各段位内龙门吊作业最早结束时间如图 5 所示,其中, $\max\{T_{B_1}, T_{B_2}, T_{B_3}, T_{B_4}, T_{B_5}, T_{B_6}, T_{B_7}, T_{B_8}, T_{B_9}, T_{B_{10}}\} = T_{B_9}$,即完成整个作业所需时间为 860 min。



$T_{B_1} = 846.5 \text{ min}; T_{B_2} = 840 \text{ min}; T_{B_3} = 600 \text{ min}; T_{B_4} = 848 \text{ min};$
 $T_{B_5} = 693 \text{ min}; T_{B_6} = 750 \text{ min}; T_{B_7} = 714 \text{ min}; T_{B_8} = 684 \text{ min};$
 $T_{B_9} = 860 \text{ min}; T_{B_{10}} = 837.5 \text{ min}$

图 5 各段位 RTGC 作业最早结束时间

Fig. 5 The RTGC earliest finish time at every block

图 6 表示轮胎式龙门吊在同一段位内连续作业,不发生段位间移动,图中标有具体作业时间。RTGC_{4/5/14/15}需要在段位之间移动。图 7 表示 RTGC₄在段位 5 作业 693 min 后,从段位 5 移动到段位 1 耗时 40 min,在段位 1 作业 113.5 min 后结束;其他轮胎式龙门吊作业调度同理,详见图 8 ~ 图 10。

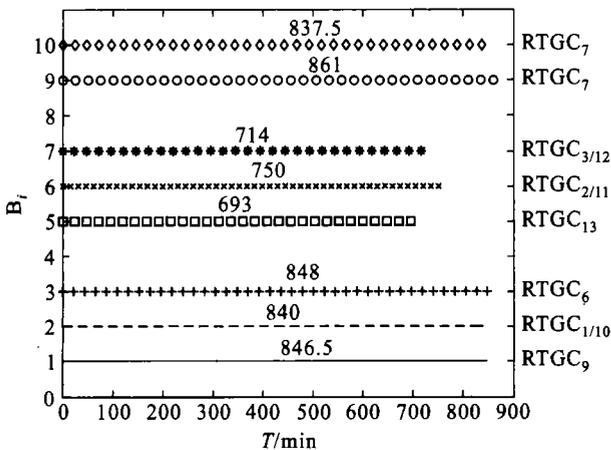


图 6 段位之间不移动的 RTGC 作业时间

Fig. 6 Un-transfer RTGC operation time between blocks

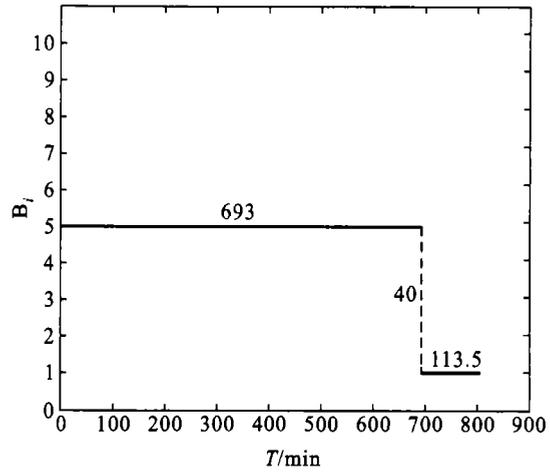


图 7 RTGC₄ 作业调度示意图

Fig. 7 Operation scheduling figure of RTGC₄

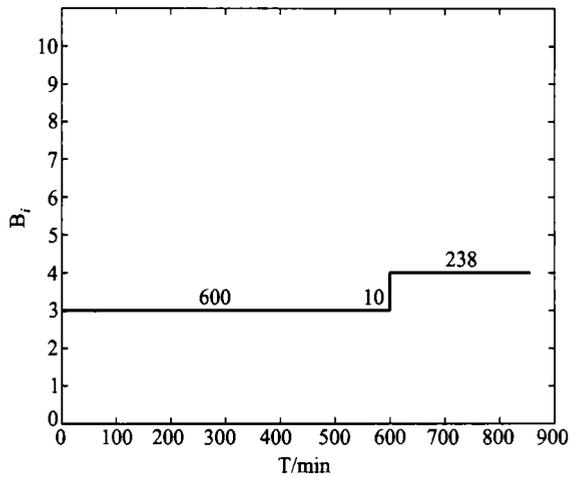


图 8 RTGC₅ 作业调度示意图

Fig. 8 Operation scheduling figure of RTGC₅

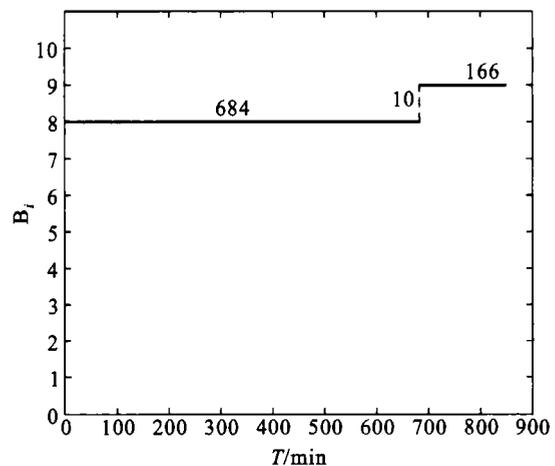


图 9 RTGC₁₄ 作业调度示意图

Fig. 9 Operation scheduling figure of RTGC₁₄

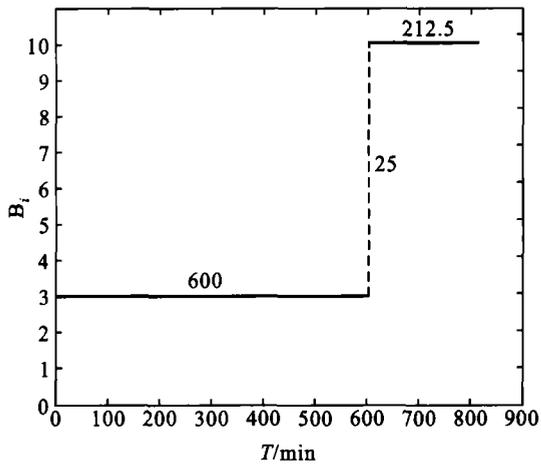


图 10 RTGC₁₅作业调度示意图

Fig. 10 Operation scheduling figure of RTGC₁₅

4 结语

集装箱码头作业效率很大程度上取决于不同搬运阶段码头内资源指派的有效性。轮胎式龙门吊作为堆场使用的昂贵设备,同时也成为集装箱搬运过程中的瓶颈。研究了给定作业条件下的轮胎式龙门吊优化调度问题,建立了混合整数规划模型,通过实

际案例分析计算了堆场各段位内龙门吊作业最早结束时间,为码头管理人员提供决策支持。为进一步提高码头作业效率和改善客户服务水平,满足码头的实际作业需求,今后应对拖车、桥吊、龙门吊、等码头搬运设备开展集成优化调度方面的研究工作。

参考文献

- [1] Zhang Chuqian, Wan Yat-wah, Liu Jiyin, et al. Dynamic crane deployment in container storage yards [J]. Transportation Research Part B, 2002, 36: 537~555
- [2] Ng W C, Mak K L. Yard crane scheduling in port container terminals [J]. Applied Mathematical Modelling, 2005, 29: 263~276
- [3] Murty K G, Liu Jiyin, Wan Yat-wah, et al. A decision support system for operations in a container terminal [J]. Decision Support Systems, 2005, 39: 309~332
- [4] 陶其钧. 集装箱堆场机械选型配置研究[J]. 港口装卸, 2004, 141(1): 1~6
- [5] Ng W C. Crane scheduling in container yards with inter-crane interference [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164: 64~78
- [6] Linn R, Liu Ji-yin, Wan Yat-wah, et al. Rubber tired gantry crane deployment for container yard operation [J]. Computers & Industrial Engineering, 2003, 45: 429~442

Research on Rubber Tired Gantry Crane Scheduling of Port Container Terminal

Wei Zhong¹, Shen Jinsheng¹, Xiao Rongna², Zhang Zhiwen³, Shi Dinghuan³

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiao Tong University, Beijing 100044, China;

2. Center of Logistics Engineering and Technology, MOC, Beijing 100088, China;

3. Ministry of Science and Technology, Beijing 100862, China)

[Abstract] With the coming of trade globalization, container transportation rapidly develops all over the world. Port container terminal is much more emphasized than before as a node of container transportation. At container terminal, rubber tired gantry crane has already been a bottleneck of terminal operation with its large volume and low efficiencies. This paper studies the rubber tired gantry crane scheduling of port container terminal in the quantitative operation condition by using proposed mixed integer programming (MIP) model, which gives decision support to terminal managers through case analysis.

[Key words] container terminal; yard; rubber tired gantry crane (RTGC); scheduling