

港口集装箱装卸工艺系统仿真优化研究

苗 明^{*1}, 郭晓霞¹, 金 淳²

(1. 大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 管理学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 运用仿真优化方法对集装箱港口装卸工艺问题进行了研究. 首先, 根据系统作业中存在的确定性、随机性等活动行为, 建立了仿真模型的约束条件和目标函数以及装卸工艺系统的数学模型; 其次, 在满足系统作业要求的前提下最小化装卸工艺的配置及运营费用, 建立了装卸工艺系统的优化模型, 并运用仿真优化工具 Tabu 算法对建立的优化模型进行求解. 某港口实际运行数据验证了模型的正确性及方法的可靠性.

关键词: 集装箱装卸工艺系统; 排队论; 仿真模型; 优化方法

中图分类号: U6; TP301.6 **文献标志码:** A

0 引言

现在对于集装箱港口装卸工艺系统及其机械设备配备问题的研究很多, 对于港口的最优运营和港口设备利用率的提高、港口运营成本的降低起到了很好的作用. 郝旭等从定性和定量的角度对港口集装箱装卸机械选型和数量配置进行了研究, 建立设备完好率、港机拥有量和设备最佳出勤台数三者之间的函数关系式, 来计算港机的最佳拥有量^[1]. 刘颖等对于港口机械合理拥有量给出了计算模型^[2]. 高玮等提出了新的集卡作业模式即多路排队模式, 并用仿真软件证明了此模式高的作业效率^[3]. 张新艳对于港口集装箱物流系统规划仿真建模方法进行了研究, 并用物流仿真软件建立了集装箱作业过程的模型表示^[4].

可以看出对于此问题的研究多是先建立抽象的数学模型, 然后用某些专业仿真软件进行仿真建模. 研究方法只是局限在对选定的装卸工艺方案进行建模仿真, 然后对结果进行比较得出一个最佳方案以及此方案下机械设备的最优配比. 这种方式虽然利用了仿真优化工具, 最终还是流于给出一个经验配比, 没有考虑各个港口地理位置和服务对象的特殊性.

本文针对以上问题, 基于离散事件系统建模与仿真优化方法对港口一个作业路的机械设备进行最优配备. 首先, 建立港口装卸工艺系统的数学模型和仿真模型; 接着利用基于禁忌搜索的优化方法及仿真优化软件对所建立的模型进行优化, 给出在选定装卸工艺方案下机械设备的最优配比.

1 装卸工艺系统的作业流程

集装箱港口装卸工艺系统是典型的离散事件动态系统, 船舶、提箱卡车、送箱卡车到达及机械设备服务时间等参数都是随机的、动态变化的, 因此这种系统难于用常规的解析模型来描述. 本文运用基于离散事件系统的仿真优化方法对集装箱港口装卸工艺系统进行模拟、分析、优化.

由于集装箱运输自身大容量、高效率的特点, 制定的集装箱装卸工艺应满足以下要求: 有效地利用堆场区域、能加快集装箱船舶的周转、堆场和通道的布置要合理、装卸机械操作要简便、作业要可靠.

港口布局由泊位前沿、空箱堆场、重箱堆场、大门四部分组成, 系统进行的集装箱操作主要有

前沿船舶的装卸和大门处提、送箱的外部卡车的装卸.

具体的操作过程如图 1 所示.

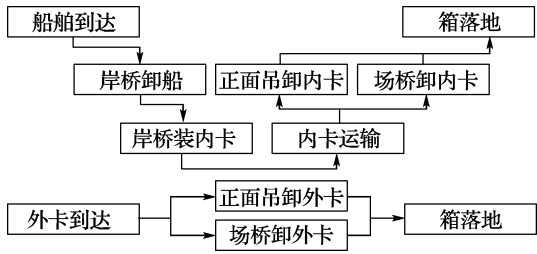


图 1 港口装卸系统操作流程

Fig. 1 Terminal container handling system operation flow

2 装卸工艺系统的模型设计

2.1 集装箱装卸工艺选择

集装箱装卸工艺是指装卸集装箱的方法,一般包括:集装箱船舶装卸、集装箱堆场装卸和水平运输等环节.集装箱港口的装卸机械主要分为港口岸边装卸机械、水平运输机械和堆场装卸机械,装卸船普遍采用岸边集装箱岸桥(简称岸桥).根据堆场装卸和水平运输机械设备的差别,目前世界上集装箱码头装卸工艺系统较广泛应用的装卸工艺有如下几种:

(1)岸桥-拖挂车工艺系统

该系统具有“门对门运输”的优点.

(2)岸桥-跨运车工艺系统

该系统中的跨运车单机造价低,并且可以完成多种作业任务,但结构复杂、完好率低、维修的工作量大.

(3)岸桥-轮胎式龙门吊(也称为场桥)工艺系统

该系统堆场面积利用率高,机械结构比跨运车简单,但作业时调线作业不方便、动力费用较大.

(4)岸桥-轨道式龙门吊工艺系统

该系统的堆场利用率高,机械结构简单、可靠,维修比较方便,易于实现自动化控制,但单机自重、初始投资费用高,当吞吐量较小时,营运费较高.

(5)岸桥-正面吊工艺系统

该系统正面吊造价低,并且正面吊可以完成多种作业任务^[4].

本文采用(1)、(3)、(5)集成的方案进行仿真优化,即泊位前沿由岸桥对船舶进行装卸,水平运输由拖挂车来负责,重箱堆场由场桥完成对拖挂车的操作,空箱堆场由正面吊完成对拖挂车的操作.系统主要决策参数为装卸船作业机械的台数、水平搬运机械的台数、堆场作业机械的类型及其台数.

2.2 优化模型中参数定义

本仿真程序中采用单泊位单路排队模式,仿真模型中有两个重箱堆场、两个空箱堆场.本文为配备的机械设备定义如下变量: x_1 ,岸桥设备组一的数量; x_2 ,岸桥设备组二的数量; x_3 ,重箱堆场一的场桥数量; x_4 ,重箱堆场二的场桥数量; x_5 ,空箱堆场的正面吊数量; x_6 ,拖挂车的数量.设备的运营成本包括购置成本、空闲成本和繁忙成本三部分.因此定义各种成本变量 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 和 C_5 、 C_6 、 C_7 、 C_8 依次表示岸桥、场桥、正面吊、集装箱卡车单个设备繁忙和空闲的小时费用,主要包括设备的维持和维修费用、操作人员的工资等. C_9 、 C_{10} 、 C_{11} 、 C_{12} 分别表示岸桥、场桥、正面吊、拖挂车的单个设备的购置成本.

2.3 目标函数

装卸工艺系统规划目标是在港口装卸系统正常运营的前提下,优化各种机械设备的最优配比,最小化港口装卸工艺系统运营成本与设备购置成本的总费用,决策变量组成的向量 $\mathbf{X}$ 如式(1)所示:

$$\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6) \quad (1)$$

装卸工艺系统规划的目标函数 $F(x)$ 如式(2)所示:

$$\begin{aligned} F(x) = & (C_1 + C_4 + C_7)x_1 + \\ & (C_2 + C_5 + C_8)(x_2 + x_3) + \\ & (C_3 + C_6 + C_9)(x_4 + x_5) + C_{10}x_6; \end{aligned}$$
$$\mathbf{X} = (x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6) \quad (2)$$

2.4 约束条件

(1) 由于堆场空间有限,设备排队的队长 Q_x 应该小于堆场容许的最大队长 $S_{\max}$:

$$Q_x \leq S_{\max} \quad (x = 1, 2, \dots, 6) \quad (3)$$

(2) 各种机械设备在使用过程中均会有损耗且有固有的寿命周期,设备在港口运营时间内不能 100% 被使用,因此机械设备的利用率 Y_u 应在给定的范围 $[\rho_{\min}, \rho_{\max}]$ 内:

$$\rho_{\min} \leq Y_u \leq \rho_{\max} \tag{4}$$

集装箱港口装卸工艺系统优化模型的参数可根据式(1)的决策变量、式(2)的目标函数和式(3)、式(4)的约束条件来设置。

3 仿真模型建立

集装箱大门系统的作业过程是典型的动态多级排队系统,建立仿真模型要把系统中实体不断到达、等待、被服务和离开等过程用一系列的离散事件表示出来,并按照已知的某种概率分布,来展示整个系统的动态演变过程.仿真建模主要完成:①根据已知的到达时间间隔的概率分布,用随机数发生器生成符合该概率分布的一系列时间间隔值,按照这种间隔,不断地产生顾客输入到模型中;②用随机数发生器生成每个顾客被服务的随机时间,而使得这些时间符合已知的概率分布;③采用面向对象的建模方式完成系统中随机事件的向逻辑模型转换的过程。

本文中的仿真模型只考虑卸船作业,基于排队论的集装箱港口装卸工艺系统仿真模型如图2所示。

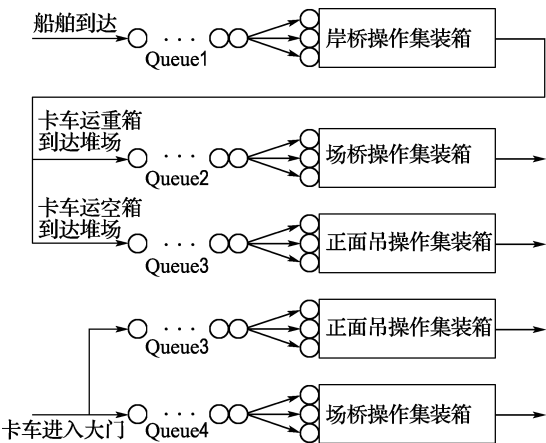


图2 港口装卸工艺排队模型

Fig. 2 Terminal handling techniques queuing model

本排队系统要素分别为

(1) 顾客到达过程

到达的船舶与外卡视为顾客,顾客源是无限的,且均为随机单个到达,到达规律采用随机分布表示.但装卸过程中设备操作的对象是集装箱,因此在模型中要涉及到顾客的转变,包括转换规则。

(2) 顾客排队规则

如服务台被占用顾客就进入队列等待,队列

为单队列,服务规则为先到先服务(FIFO)。

(3) 顾客接受服务过程

岸桥小车、场桥小车、正面吊、堆场视为服务台,是三级串联的形式,各服务台每次服务一位顾客,服务时间是一个随机变量,本系统给与一个随机分布。

4 仿真优化过程简介

本问题优化问题属于组合优化问题,根据式(1)所列决策变量对其状态空间进行禁忌搜索.本文提出了基于仿真的优化方法.其原理如图3所示,选择禁忌搜索作为优化算法.优化问题的决策变量 $\mathbf{X} = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6)$ 作为港口装卸工艺系统仿真模型的输入参数,优化算法对各决策变量的取值进行优化组合,计算仿真模型的目标函数 $f(x)$, $f(x)$ 为优化系统性能的评价函数,进行多次仿真,将输出结果进行比较,直到找到满足约束条件的最优解^[5]：

$$\min E f(x)$$

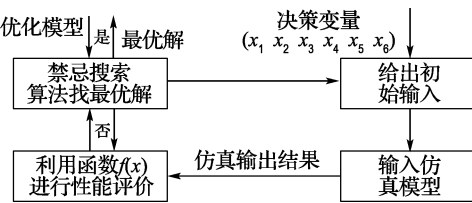


图3 仿真优化过程

Fig. 3 Simulation optimization process

5 方法实例化

5.1 系统主要参数及分布

本文以某集装箱码头港口装卸工艺系统为对象进行应用研究.变量参数的取值范围说明： $x_1: 1 \leq x_1 \leq 4; x_2: 1 \leq x_2 \leq 6; x_3: 1 \leq x_3 \leq 6; x_4: 1 \leq x_4 \leq 6; x_5: 1 \leq x_5 \leq 6; x_6: 1 \leq x_6 \leq 8, t_1 = \text{TRIA}(1.5, 1.75, 2), t_2 = \text{TRIA}(2.0, 2.4, 2.5)$ 。

由于设备对集装箱服务的时间因集装箱的装箱位置和类型不同,在本模型中对于服务时间做了下面的处理:首先为待服务的集装箱赋予一个属性,为岸桥、场桥设置对应的服务因子,然后就可以用一个表达式来对服务时间进行区分定义。

利用基于事件仿真的Arena软件将建立的仿真抽象模型转换为仿真模块,此模块中所设置

的关键参数如表 1 所示。

表中 Quay Crane 表示岸桥,Stack Crane 表示场桥,Front Lift 表示正面吊,Cart 表示拖挂车;成本数据来源于大连港二期的实际数据,通过对此港口历史运行数据的统计分析,得出集装箱到达高峰的某月内每天提、送箱的外部卡车到达分布情况如图 4 所示,该月内某天每小时提、送箱的外卡到达分布情况如图 5 所示(集装箱数量单位为 TEU)。这些分布作为仿真模型大门模块触发事件的输入。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

参数	参数值	参数	参数值
Berth Number	2	$\rho_{\min}/\%$	20
$N(\text{Quay Crane})$	2	$\rho_{\max}/\%$	80
$N(\text{Stack Crane } 1)$	3	$C_1/\text{元}$	1 000
$N(\text{Stack Crane } 2)$	2	$C_2/\text{元}$	1 000
$N(\text{Front Lift } 1)$	3	$C_3/\text{元}$	100
$N(\text{Front Lift } 2)$	2	$C_4/\text{元}$	300
$N(\text{Cart})$	6	$C_5/\text{元}$	300
$S_{\max}$	5	$C_6/\text{元}$	50
$Q_n/10^3 \text{ TEU}$	3 000	$C_7/\text{元}$	10 000 000
$C_8/\text{元}$	3 000 000	$C_8/\text{元}$	8 000 000
T_d/h	24	$C_{10}/\text{元}$	1 000 000

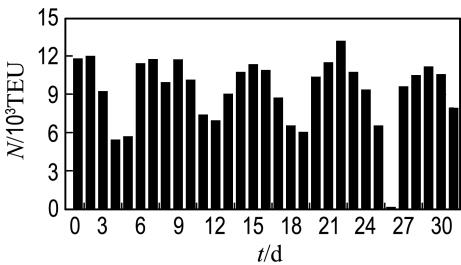


图 4 某月内每天集装箱到达分布情况
Fig. 4 Containers arrival distribution in one month

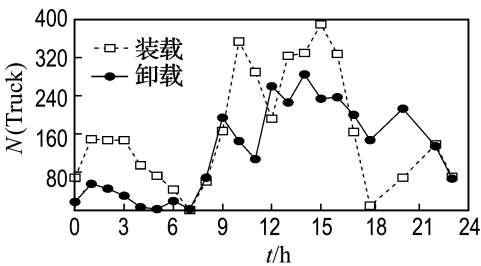


图 5 某天每小时外卡到达分布情况
Fig. 5 Truck arrival distribution in one day

系统内的随机事件有:船舶到达泊位、提箱送箱外卡到达大门、正面吊提供服务等事件。其分布函数分别为指数分布 EXPO $f_1(x)$ 、指数分布

EXPO $f_2(x)$ 、三角分布 TRIA $f_3(x)$,如表 2 所示。

表 2 本装卸工艺系统随机事件的分布函数
Tab.2 Random affairs' distribution of this system

分布函数	分布函数类型	单位
$f_1(x)$	EXPO(8)	h
$f_2(x)$	EXPO(3)	min
$f_3(x)$	TRIA(2, 0, 2, 5, 3, 0)	min

5.2 仿真优化结果

本文采用 Arena 的仿真优化器 OptQuest 作为优化工具对优化模型进行求解。仿真模型运行的时间长度为 24 h,每次仿真重复的次数为 4 次,评价解的性能的置信区间设为 95%。

仿真优化模型输出的最优解为

$$\mathbf{X}^* = (x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5 \quad x_6) = (2 \quad 3 \quad 2 \quad 1 \quad 2 \quad 4)$$
 (5)

目标函数的最小值为

$$\min(F(x)) = 61\,200\,000$$
 (6)

经过优化,本文对港口设备配置推荐的一个最优结果为岸桥设备组一的数量 $x_1 = 2$,岸桥设备组二的数量 $x_2 = 3$,重箱堆场一的场桥数量 $x_3 = 2$,重箱堆场二的场桥数量 $x_4 = 1$,空箱堆场的正面吊数量 $x_5 = 2$,拖挂车的数量 $x_6 = 4$ 。

5.3 结果分析

设备利用率是一种纵向延伸的指标,考核它不仅可以反映设备的投资效果、设备的转运率和作业效率,而且可以反映设备系统功能的投入及性能发挥的状况。考核的最终目的在于提高设备的利用效率,充分发挥设备的能力和潜力。港口规划考虑到设备的寿命,要求所有设备的利用率不超过 80%。某港口对于一条作业路装卸设备的配备数量为(2 6 6 2 2 10)。下面对模型优化结果中各设备利用率与大连港设备的实际利用率做对比^[6],如表 3。

表 3 输出结果
Tab.3 Output results

设备名称	仿真结果/%	实际利用率/%
岸桥设备组一	50.10	21.86
岸桥设备组二	50.34	25.46
重箱堆场一场桥设备	28.46	13.21
重箱堆场二场桥设备	34.25	26.93
空箱堆场正面吊设备	30.82	21.27
拖挂车	51.21	16.02

研究上表结果可以发现,有些设备利用率相差比较大,这是提供数据港口的船舶到港特殊性和港口的设备配备不切合实际造成的. 本仿真模型的最优结果符合港口对于机械设备利用率的要求,而港口运营设备实际利用率则偏低,没有把机械设备的能力发挥出来,这样使得设备的折旧成本相当大,无形中加大了港口的运营成本. 因此本文优化得出的设备配置更为合理.

6 结 论

本文研究了运用仿真优化方法求解集装箱港口装卸工艺系统机械设备最优配比问题. 文中给出了一种新的装卸工艺方案,建立了装卸工艺系统仿真优化模型,提出了仿真优化方法对模型进行求解. 然后利用某港口实际运行数据验证了模型的正确性及方法的有效性. 最后将优化结果与港口实际数据进行了比较,发现本文的结果更加合理. 以往港口在配备工艺系统时,往往根据经验

来进行,没有考虑实际港口的条件及港口吞吐量的需求,本文认为可以在配备之前利用某些专业仿真软件及本文介绍的优化方法对系统配置进行预测与仿真,以期建厂的时候以最优比进行配备,以节省初期建设成本.

参考文献：

[1] 郝 旭,谢新连. 集装箱码头装卸机械优化配置研究[D]. 大连:大连海事大学, 2003

[2] 刘 颖,杨 赞. 港口装卸机械合理拥有量研究[D]. 大连:大连海事大学, 2003

[3] 高 玮,周 强. 集装箱码头集卡作业模式及其建模与仿真[J]. 港口装卸, 2003(2):15-16

[4] 张新艳. 港口集装箱物流系统规划仿真建模方法的研究与实现[D]. 武汉:武汉理工大学, 2002

[5] 杨湘龙,王 飞,冯允成. 仿真优化原理与方法综述[J]. 计算机仿真, 2000, 17(5):1-5

[6] 刘志雄. 设备拥有量模型的研究[J]. 港口装卸, 2001(2):37-39

Research on simulation optimization of container handling system on container terminal

MIAO Ming^{*1}, GUO Xiao-xia¹, JIN Chun²

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Management, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A simulation optimization method is presented to realize the optimal planning on the load & unload system on container terminal. At first, considering the uncertain and stochastic activities in the system, the discrete-event system's mathematical simulation model including the planning objectives and constraints according to the analysis on the operation requirement of the load & unload system is built. Then, to solve the optimization problem, the optimization method is presented by Tabu algorithm. The optimal objective is to minimize the total cost of operation and ensure the desired operation efficiency. The actual performance of port testifies the correctness of the model and the reliability of the method.

Key words: container handling system; queue research; simulation model; optimization method