



集装箱码头设备更新投资优化模型 及算法研究

李应平, 佟士祺, 王 飞

(大连海事大学 交通运输管理学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为解决集装箱码头设备更新的合理投资问题, 在综合考虑投资成本、平均单船装卸效率的基础上建立了集装箱码头设备更新投资混合整数规划模型; 利用遗传算法与仿真相结合的方式构建了模型的求解算法; 以某集装箱码头设备更新投资方案的优化为实例对模型及算法进行了验证。结果表明该模型综合考虑投资的成本和效益, 对集装箱码头装卸设备的投资进行优化; 模型的求解方法能够在兼顾码头实际投资效果的基础上提高全局搜索的效率。

关键词: 集装箱码头; 设备更新投资; 优化; 遗传算法; 仿真

中图分类号: U 653.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0097-05

On optimization model and algorithm for investment of handling equipment in container terminal

LI Ying-ping, TONG Shi-qi, WANG Fei

(Transportation Management College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: To solve the reasonable investment problems of handling equipment in container terminal, a mixed integer programming model is built with comprehensive consideration on investment cost and average handling efficiency. And a solution algorithm is established with genetic algorithm and system simulation. An experiment about handling equipment investment plan optimization in a container terminal is given to verify the validity of the model and feasibility of solution method. The results show that the model can optimize the handling equipment investment plan with comprehensive consideration on cost and efficiency. The solution algorithm can effectively improve the global search efficiency and the real investment effect.

Key words: container terminal; handling equipment investment; optimization; genetic algorithm; simulation

伴随着港口企业竞争的日趋激烈, 泊位单船装卸效率已成为衡量集装箱码头服务水平高低的核心指标之一, 是集装箱码头企业核心竞争力的重要组成部分。在这一现实背景下, 各集装箱码头企业近年来实施了大量的装卸设备更新, 通过对现有装卸设备改造和更换, 提高泊位的单船装卸效率, 提升集装箱码头的泊位通过能力。但是, 由于集装箱码头装卸设备更新的投资成本往往较大, 需要更新的设备数量众多且种类各异,

单纯依靠经营管理者经验开展优化的难度较大; 而且, 由于设备的更新对单船装卸效率的影响相对复杂, 单纯利用解析的方式很难对设备更新方案的效果进行全面、系统、客观的分析与评估。因此, 如何构建科学合理的设备更新投资模型来反映设备更新投资方案与单船装卸效率之间的关系, 并在综合考虑单船装卸效率提高与投资成本节约的基础上对装卸设备更新方案进行有效优化, 已成为当前集装箱码头的经营管理者最为关

收稿日期: 2012-03-13

作者简介: 李应平(1970—), 男, 博士研究生, 高级经济师, 从事企业管理和交通运输规划与管理研究。

注且亟待解决的重要实践问题之一。

当前，有关集装箱码头设备方面已经有了一定的研究，也获得了一些可供实践应用的研究成果。但这些成果主要集中在设备选型与工艺优化^[1-4]上，对设备投资活动的研究相对较少，尤其是对集装箱码头设备更新投资方面的研究尚未见到。为此，本文从客观描述集装箱码头设备更新方案的投资成本与平均单船装卸效率之间的关系出发，提出了集装箱码头设备更新投资优化模型，并利用遗传算法与仿真相结合的方式构建了模型的求解方法，为集装箱码头的设备更新投资优化提供了有效的手段。

1 优化模型

1.1 有关符号和概念

C 表示设备更新支出费用的总和， C_1 表示用于新增设备的支出费用总和， C_2 表示用于设备更换的支出费用总和， C_3 表示用于设备更新投资贷款的利息总和， r 表示设备更新投资贷款的比率， IR 表示设备更新投资贷款的年利率， t 表示贷款年限， $P_{i,l}$ 表示第*i*种设备的第*l*型号的单价， $N_{i,l}$ 表示新增第*i*种设备的第*l*型号的总量， $S_{i,j}$ 表示第*i*种设备的第*j*台更换时的残值， $x_{i,j,l}$ 表示第*i*种设备的第*j*台是否需要更新成第*l*型号的设备， T 表示码头作业集装箱船的平均装卸时间， Q_u 表示在码头作业的第*u*条集装箱船的装卸总量， $E_{i,l}^*$ 表示*i*种设备的第*l*型号的额定工作效率， $RE_{i,j,u}$ 表示第*j*台岸桥在进行第*u*条集装箱船作业时的实际效率， $y_{i,j,u}$ 表示第*u*条集装箱船是否选择第*j*台岸桥进行装卸作业， v 表示第*k*年在集装箱码头作业的船舶总数， OF^* 表示码头用于设备更新的自有资金总额， r^* 表示设备更新投资贷款的比率上限。

1.2 目标函数

1) 尽量降低设备的更新成本。

设备更新的投资成本主要包括新增设备费用 C_1 ，原有设备的更新费用 C_2 和设备投资贷款利息 C_3 等3部分。作为码头的经营管理者来说，一般都会希望尽量降低装卸设备的更新成本。因此，成本优化目标可表述为：

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 = \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^{w(i)} P_{i,l} N_{i,l} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n(i)} \sum_{l=1}^{w(i)} x_{i,j,l} \cdot (P_{i,l} - S_{i,j}) [1 + r \cdot IR(t+1)/2] \quad (1)$$

其中：

$$C_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^{w(i)} P_{i,l} N_{i,l} \quad (2)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n(i)} \sum_{l=1}^{w(i)} x_{i,j,l} (P_{i,l} - S_{i,j}) \quad (3)$$

$$C_3 = (C_1 + C_2)r \cdot IR(t+1)/2 \quad (4)$$

2) 尽量提高泊位的平均单船装卸效率。

在集装箱码头的运营管理中，船舶的单船装卸效率是集装箱码头装卸设备的通过能力与服务水平的核心指标，码头经营管理者大都希望尽量提高泊位的单船平均装卸效率。对于码头来讲，泊位装卸效率可用集装箱岸桥的平均装卸效率来反映。在此，可设需要更新的第1种设备为集装箱岸桥，则效率优化目标可表述为船舶的平均装卸时间，目标函数为：

$$\min T = \left[\sum_{u=1}^v Q_u / \left(\sum_{j=1}^{n+N_{i,l}} y_{1,j,u} RE_{1,j,u} \right) \right] / v \quad (5)$$

1.3 约束条件

1) 投资约束。

$$\textcircled{1} \quad 0 \leq (C_1 + C_2)(1-r) \leq OF^* \quad (6)$$

$$\textcircled{2} \quad 0 \leq r \leq r^* \quad (7)$$

$$\textcircled{3} \quad x_{i,j,l} \in \{0,1\} \quad (8)$$

$$\textcircled{4} \quad 0 \leq \sum_{l=1}^w x_{i,j,l} \leq 1 \quad (9)$$

$i=1,2,3,\dots,m; \quad j=1,2,3,\dots,n$

约束①表示当年设备投资的自有资金总额应不大于之前码头年总体净收益中可用于设备更新方面的费用总和；约束②表示当年设备投资的贷款比例*r*不能超出银行规定的贷款比率上限*r**；约束③表示第*i*种设备的第*j*台是否需要更新成第*l*型号的设备；约束④表示*i*种设备的第*j*台最多能选择1种设备更新。

2) 设备约束。

$$\textcircled{5} \quad D_{i,l}^{(k)} = f(P_{i,l}, E_{i,l}^*) \quad (10)$$

$$\textcircled{6} \quad 0 \leq RE_{i,j,u} \leq E_{i,l}^* \quad (11)$$

$$\textcircled{7} \quad y_{1,j,u} \in \{0,1\} \quad (12)$$

$$\textcircled{8} \quad 0 \leq \sum_{j=1}^{n+N_{i,l}} y_{1,j,u} \leq 1$$

$$u = 1, 2, 3, \dots, v \quad (13)$$

约束⑤表示当年第*i*种第*l*个型号的设备*D_{i,l}*可用单机的价格*P_{i,l}*和额定工作效率*E_{i,l}^{*}*进行描述; 约束⑥表示单机设备的实际工作效率应不大于其额定工作效率; 约束⑦表示第*u*条集装箱船是否选择第*j*台岸桥进行装卸作业; 约束⑧表示*j*台岸桥同时最多只能对一艘船舶进行装卸作业。

2 模型转化

从优化目标可以看出, 集装箱码头设备更新的投资为一个多目标规划问题。由于不同优化目标之间的量纲不统一, 这就为模型的求解带来了一定的困难。在处理此类问题时, 常用的方法有主要目标法、线性加权法、理想点法、功效系数法等。在实践中, 码头的经营管理者们在考虑设备更新的问题时大多是以尽量降低更新成本为主要优化目标, 而装卸效率目标则考虑满足一定的规格要求即可。为符合码头设备更新投资实践中的决策习惯, 本文采用主要目标法, 将主要目标设定为成本优化目标, 而设备更新目标作为优化模型的约束条件, 则优化模型可转化为

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^{w(i)} P_{i,l} N_{i,l} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n(i)} \sum_{l=1}^{w(i)} x_{i,j,l} \cdot (P_{i,l} - S_{i,j}) \right] [1 + r \cdot IR(t+1)/2] \quad (14)$$

$$\text{s.t.} \quad \left\{ \sum_{u=1}^v \left[Q_u / \left(\sum_{j=1}^{n+N_{i,l}} y_{1,j,u} RE_{1,j,u} \right) \right] \right\} / vS \leq T^* \quad (15)$$

3 求解算法

3.1 搜索规则的制定

不难看出, 该模型在求解中需要进行决策的变量为新增设备变量*N_{i,l}*, 更换设备变量*x_{i,j,l}*和投资的贷款比例*r*, 因此优化模型是一个混合整数规划问题。由于此类问题的解空间与需要进行决策的变量数目成指数关系, 当需要进行决策的设备数量较多时, 分支定界法、动态规划法等确定性算法的适应能力较差。自适应遗传算法因其整体搜索策略及计算时不依赖于梯度信息的特点, 在求

解大规模混合整数规划问题时具有明显的优势^[5], 因此本文采用该方法制定模型的搜索规则。

1) 染色体结构。

根据目标函数(13), 每条染色体需要包含新增设备变量*N_{i,l}*, 更换设备变量*x_{i,j,l}*和投资的贷款比例*r*等3部分决策内容。因此, 其基因数目为

$$GN = \sum_{i=1}^m w(i) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n(i)} w(i) + 1 \quad (16)$$

模型的染色体结构如图1所示。

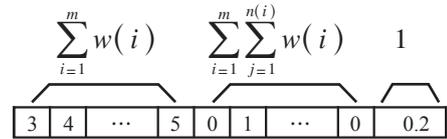


图1 染色体结构

2) 遗传操作。

选择操作采用基于排序的适应度分配方法的轮盘赌选择方法; 交叉操作采用两点交叉方法; 变异操作作为二进制变异操作。

3) 自适应调整交叉概率和变异概率。

在遗传算法参数中, 交叉概率*pos_{crs}*和变异概率*pos_{mut}*直接影响算法的搜索效率和收敛性, 针对不同的优化问题, 采用下式自适应调节这两个参数:

$$pos_{crs} = \begin{cases} \beta_1 - \beta_2 (P_{avg} - P) / (P_{avg} - P_{min}) & P \leq P_{avg} \\ \beta_1 & P > P_{avg} \end{cases} \quad (17)$$

$$pos_{mut} = \begin{cases} \beta_3 - \beta_4 (P_{avg} - P) / (P_{avg} - P_{max}) & P \leq P_{avg} \\ \beta_3 & P > P_{avg} \end{cases} \quad (18)$$

式中: *P*为进行遗传操作的两个个体的较大适应值; *P_{min}*为种群中的最小适应值; *P_{avg}*为种群的平均适应值, 系数 $0 \leq \beta_v \leq 1.0 (v = 1, 2, 3, 4)$ 。

4) 适应值的选取。

选取*P*为适应值, 进化沿着适应值大的方向前进。

5) 计算终止规则。

在遗传进化过程中, 当每代中的最优个体连续20代没有变化时, 进化计算终止。

3.2 可行解的判定方法

对于转化后的目标函数公式(14), 其可

行解空间是由所有约束条件共同构成。对于其他约束条件，可直接代入相关约束条件的公式进行计算；但对于从由效率优化目标转化而来的公式（14），其可行解的判定则要复杂得多。这主要是因为：码头泊位的实际装卸效率具有明显的瓶颈效应。一个完整的集装箱码头的泊位装卸活动是由泊位分配、船舶装卸、水平运输和堆场装卸4项串连活动组成的，其泊位实际装卸效率的大小实际上是上述活动中效率最低的一项活动决定的；此外，设备更新的位置也对装卸效率有明显的影响，能够兼顾更多作业区域的设备使用效率越高。因此，尽管泊位装卸效率直观反映的是岸桥的装卸效率，但实际上是参与活动的所有设备综合效率的体现。

基于以上原因，直接采用解析方法对约束条件（13）进行判定相对困难。因此，本文将约束条件（14）转化为船舶靠泊、装卸、运输与堆存的联合调度问题，利用排队理论和系统仿真方法构建集装箱码头泊位装卸仿真模型，对码头的船舶装卸过程进行仿真，对公式（14）的可行解空间进行判定。该仿真模型主要包括泊位调度、岸桥调度、集卡调度和堆场调度等4个仿真子模型，其系统仿真流程如图2所示。

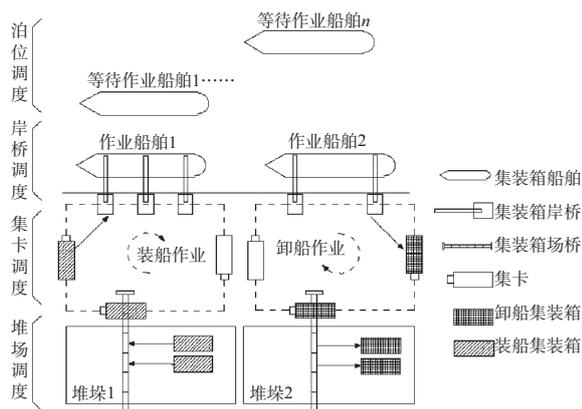


图2 集装箱装卸作业流程仿真

以该模型为基础，利用自适应遗传算法获得初始解，结合码头船舶的实际到港情况和基本作业规则，对码头装卸设备的作业情况进行模拟，并将每艘船舶的单船装卸效率代入式（9），以判断设备更新方案是否可行。利用这种方式，便可以将遗传算法和码头装卸过程的计算机仿真结合

起来，对本文提出的模型进行求解。

4 算例验证

4.1 情况介绍

以某集装箱码头的岸桥更新投资方案优化为例，对模型及算法的有效性进行验证。该集装箱码头拥有4个集装箱泊位，配备有岸桥数量为8台，岸桥平面位置如图3所示，设备型号及价格表1所示。根据对码头装卸过程的统计，船舶年到港数量为3 300艘，平均载箱量为690.3 TEU，船舶的平均单船装卸作业时间为12.1 h。

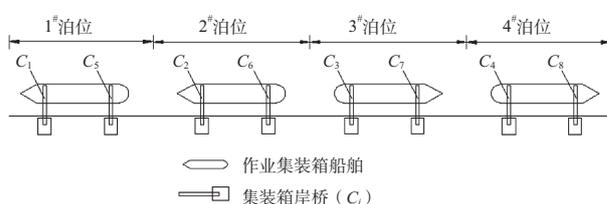


图3 更新前码头岸桥配备情况

表1 现有岸桥情况

设备编号	效率/ (自然箱·h ⁻¹)	设备型号	价格/ 万元	现有 台数
C ₁ , C ₂ , C ₃ , C ₄	25	单小车单20 ft (40.5 t)	2 600	4
C ₅ , C ₆ , C ₇ , C ₈	30	单小车单40 ft (50 t)	3 500	4

由于船舶大型化而使得集装箱船对港口装卸效率提出了更高的要求，而该码头原有的岸桥的单船装卸效率已无法满足提升港口通过能力的需要，因此拟对现有设备进行更新。经市场调查发现，可供选择的岸桥有5种，设备的具体型号及性能见表2。

表2 市场可供选择岸桥型号及价格

岸桥	效率/(自然箱·h ⁻¹)	价格/万元
单小车单20 ft (40.5 t)	25	2 000
单小车单40 ft (50 t)	30	3 000
单小车双40 ft (61 t)	60	5 600
双小车单40 ft (50 t)	45	4 800
双小车双40 ft (61 t)	90	6 300

4.2 建模及优化

根据周边码头的装卸效率调查及分析，公司决定进行设备更新，将平均单船装卸作业时间减

少到8 h内。公司现有可调用的设备更新投资资金总额 $OF^* = 1$ 亿元人民币, 银行当年贷款利率为 $IR=7\%$, 港口企业贷款的比率上限 $r^*=65\%$, 贷款年限为15 a; 此外, 由于现有设备是一次性购买的, 其计算期内残值比例相同, 均为新设备价格的5%。

将上述数据与表1和表2中的设备效率和价格代入式(14)构建优化目标函数, 利用文中提出的遗传算法对解空间进行搜索、并基于VITNESS仿真软件构建仿真系统对设备实际运营效率进行仿真, 判定式(15)的计算值是否在8 h以内。最终计算结果为: 用于设备更新的直接投资总额为2.08亿元, 其中自有资金投入为0.98亿元, 贷款为1.10亿元; 加之未来15 a内所需支付贷款利息总额为0.62亿元, 因此设备更新的总费用为2.70亿元。

更新后码头岸桥配置情况如图4所示。相较更新前的情况(图4), 在5#和2#岸桥以及7#和4#岸桥之间各加一台单小车双40尺岸桥, 并将2#和7#岸桥更换为双小单车40尺岸桥, 这样可使岸桥平均装卸效率提高到37.5自然箱/h, 平均每条船舶在港作业时间降到7.36 h。更新后的岸桥的设备型号及工作效率如表3所示。

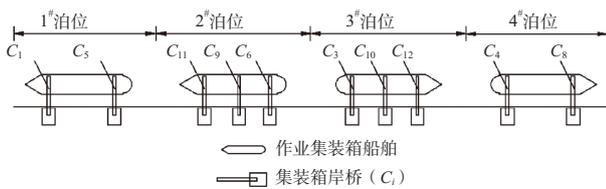


图4 更新后码头岸桥配备情况

表3 更新后码头岸桥型号与效率

设备编号	设备型号	装卸效率/(自然箱·h ⁻¹)
C ₁ , C ₃ , C ₄	单小单车20 ft (40.5 t)	25
C ₅ , C ₆ , C ₈	单小单车40 ft (50 t)	30
C ₉ , C ₁₀	双小单车40 ft (50 t)	45
C ₁₁ , C ₁₂	单小单车双40 ft (61 t)	60

4.3 计算结果分析

1) 考虑该码头的实际情况, 平均单船装卸效率的提高效果主要取决于更新岸桥自身的装卸

效率及更新岸桥的相对位置等两方面因素的综合作用。

2) 由于在投资成本方面的限制, 采用装卸效率最大的岸桥(例如双小车双40尺)并不能有效满足该码头对平均单船装卸时间的要求, 即更新岸桥的装卸效率并非越大越好。

3) 装卸效率较高的岸桥应尽可能配备在两个泊位相邻区域, 以便可以在两个泊位之间灵活调度, 从而在投资相对较小的情况下使码头获得更高的平均单船装卸效率。

5 结论

本文从集装箱码头企业设备更新的实际需求出发, 建立了综合考虑更新投资成本和装卸效率的多目标优化模型, 并设计了自适应遗传算法与计算机仿真相结合的求解方法。由具体算例可以看出, 由于考虑了更新成本和单船装卸效率之间的相互制约作用, 本文建立的集装箱码头设备更新投资优化模型可以有效反映码头经营管理人员对设备更新的实际决策需求; 在求解算法中, 通过计算机仿真的方式反映码头装卸系统的实际通过能力, 其可行解的判定更为贴近实际作业情况, 能够获得更为符合实践需求的、较优的满意解。

参考文献:

- [1] 温智民, 陆志强, 孙小明. 自动化集装箱码头运输系统配置的仿真优化[J]. 工业工程与管理, 2009 (1): 36-43.
- [2] 杨静蕾, 丁以中. 一种基于闭排队网络的集装箱码头设备配置优化模型[J]. 中国管理科学, 2006, 14(6): 56-60.
- [3] 赵宏光, 陶其钧. 模糊评价在大型集装箱码头堆场设备选型中的应用[J]. 中国工程机械学报, 2004(3):275-278.
- [4] 杨静蕾, 丁以中. 集装箱码头设备配置的模拟研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(8): 1 069-1 073.
- [5] 杨春霞, 王诺. 基于多目标遗传算法的集装箱码头泊位—岸桥分配问题研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1 720-1 725.

(本文编辑 武亚庆)