

文章编号:1671-1637(2014)01-0090-07

港区堆场集装箱垂直运输用能结构改造最优策略

彭云, 王文渊, 宋向群, 唐国磊

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘要:基于动态规划理论,以场桥寿命期内的总成本最小为目标函数,以碳排放量和投资成本为约束条件,考虑了场桥营运成本和碳排放的动态变化,建立了港区堆场集装箱垂直运输用能结构改造的离散型动态规划模型。通过逆序法进行求解,确定了用能结构改造的最优策略。计算结果表明:当轮胎式集装箱门式起重机役龄为1年时,应在第6年年初完成用能结构改造,最优策略下单场桥寿命期内总成本为937.66万元;当轮胎式集装箱门式起重机役龄为2年时,应在第5年年初完成用能结构改造,最优策略下单场桥寿命期内总成本为958.59万元;当轮胎式集装箱门式起重机役龄大于等于3年时,应在第2年年初完成用能结构改造,最优策略下单场桥寿命期内总成本为967.33万元;当碳排放量限额值小于等于100 t时,应立即进行用能结构改造;当碳排放量限额值大于400 t时,应在第6年年初完成改造,相当于不需考虑碳排放约束。碳排放成本仅占营运成本的0.6%~0.7%,对决策的影响较小,建议通过提高碳税价格或施加碳排放总量限额的方法减少碳排放。

关键词:港口运输;轮胎式集装箱门式起重机;动态优化;用能结构;碳排放;设备更新

中图分类号:U653.93 **文献标志码:**A

Optimal strategy of container vertical transportation energy structure conversion on port yard

PENG Yun, WANG Wen-yuan, SONG Xiang-qun, TANG Guo-lei

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China)

Abstract: Based on the dynamic programming theory, the minimum total cost during crane lifetime was taken as objective function, the carbon emission amount and investment cost were taken as constraint conditions, the dynamic changes of crane operation cost and carbon emission were considered, and the dynamic discrete programming model of container vertical transportation energy structure conversion on port yard was established. The athwart order method was carried out to solve the model, and the optimal strategy of crane energy structure conversion was determined. Calculation result shows that when rubber tire gantry (RTG) is 1 year old, the energy structure conversion should be completed at the start of the sixth year, and the total cost during the total lifetime of single crane under the optimal strategy is 9 376 600 yuan. When RTG is 2 years old, the energy structure conversion should be completed at the start of the fifth year, and the total cost during the total lifetime of single crane under the optimal strategy is 9 585 900 yuan. When RTG is equal to or older than 3 years, the energy structure conversion should be completed at the start of the second year, and the total cost during the total lifetime of single crane under the optimal strategy is 9 673 300 yuan. When the carbon limit value is less than or equal to 100 t,

收稿日期:2013-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51079022,51309049)

作者简介:彭云(1988-),女,辽宁铁岭人,大连理工大学工学博士研究生,从事港口规划研究。

导师简介:宋向群(1959-),女,辽宁大连人,大连理工大学教授。

RTG energy structure should be converted immediately. When the carbon limit value is more than 400 t, the energy structure conversion should be completed at the start of the sixth year, and the constraint of carbon emission can be ignored. Because the carbon emission cost only accounts for 0.6-0.7 percent of operation cost and does not affect the decision greatly, it is advised to reduce carbon emission by increasing carbon tax or controlling carbon limit value. 3 tabs, 6 figs, 20 refs.

Key words: port transportation; rubber tire gantry; dynamic optimization; energy structure; carbon emission; equipment replacement

Author resumes: PENG Yun(1988-), female, doctoral student, +86-411-84707174, yun_peng@yahoo.com; SONG Xiang-qun(1959-), female, professor, +86-411-84707174, sxqun@126.com.

0 引 言

港口作为能源密集型行业,其能源消耗量和碳排放量均较高。交通运输部交政法发[2011]315号文件《公路水路交通运输节能减排“十二五”规划》设定港口碳排放强度指标:与2005年相比,港口生产单位吞吐量二氧化碳排放下降10%。随着燃油价格的攀升以及国家节能减排的要求,港内机械设备的用能结构优化已成为集装箱码头迫切需要解决的问题。港区堆场集装箱垂直运输工具(本文主要指场桥)作为集装箱码头主要的耗能设备,应用电力驱动来代替柴油驱动(油改电)的用能结构改造技术已在中国多个港区推行。徐德麟总结了上海港油改电节能降耗技术^[1];傅其兆分析了中国集装箱码头油改电的现状和动向,介绍了天津港、青岛港油改电的技术工艺^[2];姚剑分析指出天津港场桥的油改电工程改造完成后,每年可节约标准煤约1.33万t^[3]。

轮胎式集装箱门式起重机(RTG)油改电实施的前期工作是确定RTG用能结构改造的时机。此外,改造后的电动轮胎式集装箱门式起重机(ERTG)在使用过程中,由于磨损老化,需要进行更新。同时,在使用过程中,场桥的营运成本、碳排放量以及残余价值均与RTG用能结构改造时机以及ERTG的更新时机有关,场桥运行状态的好坏直接影响港口的经济和社会效益,因此,有必要合理规划场桥的使用年限,确定在碳排放和投资成本约束下RTG用能结构改造与更新的最优策略。

目前,对于场桥用能结构改造的研究大多集中在场桥改造技术方案的比较分析、选型、改进等方面。何勤奋介绍了目前最常见的3种油改电技术,即电缆卷筒、低空滑触线、高空跨箱区滑触线,并从技术、工程、造价、应用效果、未来发展等多方面进行分析比较^[4];王龙伟在分析ERTG特性和使用规则

的基础上,探讨了合理的场地计划和生产组织程序^[5];郑小楠介绍了2种具有代表性的RTG油改电的技术方案,从电压等级、电力上机方式等方面进行分析比较^[6];杨忠对天津港集装箱码头油改电场桥进行了选型研究,并对所选方案进行财务评价^[7];王焜分析了RTG目前所存在的不足及油改电项目实施的必要性,阐述了改进的措施与方案^[8];刘洪波等结合上海外高桥港区码头作业系统节能减排改造示范工程,论述了几种常见的RTG油改电接电方式,并对高架滑触线RTG油改电关键技术及节能减排效果进行了分析^[9];祁崇波研究了国内外RTG主要采用的节能降耗技术的原理、特点和效果,总结了各集装箱码头现有堆场装卸设备节能改造或新购置时应优选的节能减排方案^[10];彭传圣通过对比分析用能结构改造前后能源消耗和碳排放状况,指出油改电是缓解行业二氧化碳减排压力的合理手段^[11];张志伟应用动态规划理论研究了港口流动机械的更新策略^[12]。

已有研究并没有共同考虑场桥用能结构改造前后性能的改变,场桥用能结构改造是一个多阶段决策过程,因此,本文在已有研究的基础上,通过建立多阶段离散型动态规划模型,研究考虑碳排放影响的单场桥用能结构改造最优策略,确定RTG用能结构改造与ERTG更新的最优时机,为有效利用资源,提高港口的经济、环境效益提供参考。

1 场桥用能结构离散型动态规划模型

1.1 问题描述

RTG役龄与改造策略的关系见图1,假设研究RTG在5年内用能结构改造的最优策略,RTG的当前役龄为第2年,则RTG在每年均需要作出决策。对于改造后的电动轮胎式集装箱门式起重机(ERTG),在RTG进行改造后的每年需要作出决

策,ERTG 进行更新与 ERTG 继续使用。

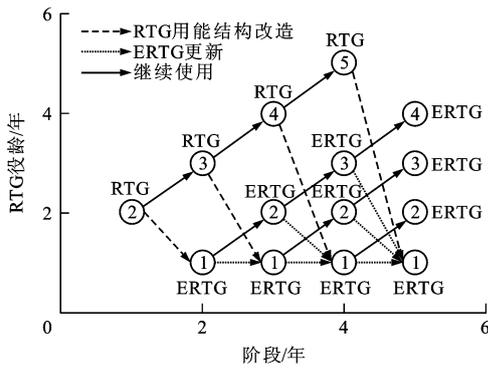


图 1 RTG 役龄与改造策略的关系

Fig. 1 Relationship between RTG age and conversion strategy

考虑场桥的磨损和消耗,ERTG 的营运和碳排放成本将会随着时间而增大,因此,有可能会进行更新,否则,ERTG 将继续使用直到寿命期结束,RTG 在第 i 年改造后的问题为 ERTG 的设备更新问题。为确定集装箱港区场桥用能结构改造的最优策略,将场桥用能结构改造问题转化为在场桥寿命期内 RTG 先进行用能结构改造(油改电)、ERTG 再进行更新的问题。同时,RTG 用能结构改造的决策结果会对 ERTG 更新的决策产生影响。场桥用能结构改造问题就是要合理地规划各阶段场桥的使用年限,在满足节能减排效益的情况下使总成本达到最低,确定改造的最优策略。

此外,RTG 的油改电策略与 ERTG 的更新策略均受各阶段的成本与碳排放约束的影响,如 ERTG 的改造与更新成本、场桥的营运成本(能耗成本、人工成本、维修成本等)与场桥的残值成本等。

1.2 假设条件

为方便模型构建,本文做了如下假设:场桥用能结构的改变不影响场桥生产作业;不计入场桥改造过程中产生的碳排放;场桥用能结构改造过程中对其他场桥没有影响,均在 1 年内完成,并且场桥在改造过程中不产生营运成本;场桥用能结构改造不影响其使用寿命;各年的成本费用按年初法进行计算。

1.3 离散型动态规划模型

在假设条件下,场桥的寿命为 T_r ,从阶段 h 到阶段 $h+1$ 的状态转移方程为

$$S_{h+1} = \begin{cases} S_h + 1 & d_h = 0 \\ 0 & d_h = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_h 为阶段 h 时场桥的状态,即为在第 h 年开始时的场桥役龄; d_h 为场桥在阶段 h 时的决策状态, d_h 取 1 表示场桥进行改造或更新, d_h 取 0 表示

场桥继续运行。

从碳税成本与碳排放总量限额 2 个角度综合考虑场桥碳排放影响,建立场桥用能结构改造策略的离散型动态规划模型为

$$Z = \min \{A, B\} \quad (2)$$

$$A = C + P(2) \quad (3)$$

$$B = \min_{i=3, \dots, T_r} [C + D + P(i)] \quad (4)$$

$$C = C_c + C_q \quad (5)$$

$$D = \sum_{h=0}^{i-3} [C_r(S_h)Q + E_{r,CO_2}(S_h)P_{CO_2}] \quad (6)$$

$$s. t \quad C + C_c(0)Q + \sum_{k=1}^{f(j)} C_{n,e}(k) \leq I \quad (7)$$

$$E_r + E_t \leq E_{CO_2} \quad (8)$$

$$E_r = \sum_{h=0}^{i-1} E_{r,CO_2}(S_h) \quad (9)$$

$$E_t = \sum_{h=i}^{T_r-(i-1)} E_{t,CO_2}(S_h) \quad (10)$$

式中: Z 为场桥在寿命期 T_r 内的最小总成本; j 为 RTG 改造完成后 ERTG 进行更新的时间; A 为当役龄为 S_h 时,场桥在第 2 年年年初($i=2$)完成油改电改造与在第 $j(j=i, i+1, \dots, T_r)$ 年 ERTG 完成更新时的总成本, i 为 RTG 用能结构改造完成时间; B 为当役龄为 S_h 时,场桥在第 $i(i=3, 4, \dots, T_r)$ 年年年初完成油改电改造与在第 $j(j=i, i+1, \dots, T_r)$ 年 ERTG 完成更新时的总成本; C 为 RTG 进行用能结构改造的改造成本和改造当年的营运成本之和; $C_c(S_h)$ 为 ERTG 在役龄为 S_h 时的营运成本,因此, $C_c(0)$ 为 RTG 在第 i 年年年初完成改造后,ERTG 当年($S_h=0$)的营运成本; Q 为单场桥的年操作箱量; $C_{n,e}(k)$ 为 ERTG 的更新成本; $f(j)$ 为计数函数; k 为计算次数; I 为投资额度; E_r 为 RTG 改造前直接的碳排放量; E_t 为 ERTG 转场时直接的碳排放量; E_{CO_2} 为单场桥的碳排放限额,当不限制 CO_2 排放时, E_{CO_2} 趋于无穷大; $P(i)$ 为 RTG 在第 i 年年年初完成改造后,ERTG 在剩余阶段最优策略下的总成本最小值; D 为 RTG 在第 $i-1$ 年进行油改电之前场桥的营运成本及碳排放成本之和; C_c, C_q 分别为在第 $i-1$ 年到第 i 年年年初 RTG 进行油改电的改造成本(机上改造与土建基础等)和改造当年的营运成本,只与场桥的役龄有关; $C_r(S_h), E_{r,CO_2}(S_h)$ 分别为在场桥进行用能结构改造前,RTG 役龄为 S_h 时的营运(人工、维修、能耗)成本和碳排放量; P_{CO_2} 为碳税值,当不考虑碳税成本时,令 P_{CO_2} 为 0; $E_{t,CO_2}(S_h)$ 为在 ERTG

的役龄为 S_h 时,ERTG 转场时的碳排放量。

$P(i)$ 为采用重生点方法 (Regeneration Point Approach) 建立的 ERTG 更新问题的后向递归关系,即

$$P(i) = \min\{G, H\} \quad (11)$$

$$G = \sum_{h=i}^{T_r-(i-1)} M(S_h) - S_{S_{T_r}} \quad (12)$$

$$M(S_h) = C_e(S_h)Q + E_E V_e(S_h)P_{CO_2} + E_{t,CO_2}(S_h)P_{CO_2} \quad (13)$$

$$H = \min_{j=i, \dots, T_r} \left[\sum_{h=i}^{j-i} M(S_h) + C_{n,e}(k) - C_{t,e} + C_e(0)Q + P(j+1) \right] \quad (14)$$

式中: G 为 RTG 改造完成后,ERTG 在寿命期的剩余阶段不再进行更新的总成本; H 为 RTG 改造完成后,ERTG 在剩余阶段于第 j 年进行更新的总成本最小值; $M(S_h)$ 为 ERTG 在役龄为 S_h 时的营运成本与碳排放成本(使用电力间接排放和转场时使用柴油直接排放的碳排放成本)之和; S_{S_h} 为 ERTG 在役龄为 S_h 的残值,通常使用年限越长,其再出售时的残值越小, $S_{S_{T_r}}$ 为 ERTG 运营到寿命期最后一年的残值; E_E 为场桥使用电力的 CO_2 排放系数; $V_e(S_h)$ 为役龄为 S_h 时的 ERTG 的单位能耗; $C_{t,e}$ 为 ERTG 在第 j 年进行更新时的交易费用,与役龄相关; $P(j+1)$ 为 ERTG 在第 j 年进行更新(在第 $j+1$ 年时, $S_h=1$)后,在剩余阶段($j+1, \dots, T_r$)最优决策下的总成本最小值。

$P(i)$ 递推公式的边界条件为

$$P(T_r + 1) = -S_1 \quad (15)$$

在实际工程中, $i=2, 3, \dots, T_r$, 因此,当 i 取 T_r+1 时,仅为对函数迭代进行的理论上的选值。

2 计算结果分析

2.1 模型输入

环渤海地区某集装箱港区进行 RTG 用能结构改造工程时,投资额度 I 与碳排放限额 E_{CO_2} 均趋近于无穷大。RTG 当前役龄为 S_h ,单场桥的年操作箱量 Q 为 9.6 万 TEU。场桥用能结构改造当年不产生营运成本,2012 年单台 RTG 与 ERTG 第 1 年使用时的营运成本见表 1、2。

参考文献[13],柴油的单位热值 CO_2 排放系数缺省值为 $74\ 100\ kg \cdot TJ^{-1}$,根据 2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南,柴油的低位热值为

表 1 RTG 的营运成本

Tab. 1 Operation cost of RTG

平均耗油/($kg \cdot TEU^{-1}$)	0.91
单位油耗费用/($元 \cdot L^{-1}$)	7.40
能耗费用/($元 \cdot TEU^{-1}$)	8.14
维修保养费用/($元 \cdot 年^{-1}$)	0.95
人工费用/($元 \cdot TEU^{-1}$)	2.50
营运成本/($元 \cdot TEU^{-1}$)	11.59

表 2 ERTG 的营运成本

Tab. 2 Operation cost of ERTG

电耗/($kW \cdot h \cdot TEU^{-1}$)	3.03
单位电耗费用/[$元 \cdot (kW \cdot h^{-1})$]	1.05
能耗费用/($元 \cdot TEU^{-1}$)	3.18
维修保养费用/($元 \cdot TEU^{-1}$)	0.35
人工费用/($元 \cdot TEU^{-1}$)	1.67
营运成本/($元 \cdot TEU^{-1}$)	5.20

$0.000\ 042\ 652\ TJ \cdot kg^{-1}$,因此,场桥使用柴油的 CO_2 排放系数为 $3.160\ 5$ 。根据所在省市所属区域电网,选用相应的电力碳排放系数,实例场桥所在地区使用电力的 CO_2 排放系数为 E_E 为 $1.085\ 2\ kg \cdot (kW \cdot h)^{-1}$ 。中国现没有碳税的取值标准,参考国际碳税价格,碳税 P_{CO_2} 取值为 $0.023\ 元 \cdot (kg \cdot CO_2)^{-1}$ 。机上改造成本 C_e 为 $100\ 万元 \cdot 台^{-1}$; C_q 为 $80\ 万元 \cdot 台^{-1}$; ERTG 更新成本 $C_{n,e}(k)$ 为 $750\ 万元 \cdot 台^{-1}$ [14]。表 3 为场桥各参数的取值,其中 S_{S_h} 按直线法进行折旧,考虑折旧年限为 10 年。

表 3 场桥参数

Tab. 3 Crane parameters

$S_h / 年$	成本			
	$C_r(S_h) / (元 \cdot TEU^{-1})$	$C_e(S_h) / (元 \cdot TEU^{-1})$	$C_{t,e} / (万元 \cdot 台^{-1})$	$S_{S_h} / (万元 \cdot 台^{-1})$
0	11.59	4.74		
1	12.91	5.18	660	678.8
2	14.22	5.65	585	607.5
3	14.41	5.82	510	536.3
4	14.73	5.93	435	465.0
5	14.89	6.00	360	393.8
6	15.47	6.32	285	322.5
7	14.88	6.00	210	251.3
8	14.72	5.91	135	180.0
9	14.38	5.82	60	108.8
10	14.22	5.74	0	37.5
11	13.74	5.51	0	0.0
12	12.91	5.23	0	0.0

2.2 结果分析

本文采用逆序法对后向递归关系进行求解[15-20],根据式(11)~(15)计算出递归关系 $P(i)$ 的

函数值以及对应的最优策略,从而根据式(1)~(10)计算出最小总成本Z。

场桥寿命期内最小总成本Z等于RTG在1~(i-1)年产生的成本以及P(i)的函数值之和,因Z的取值与RTG的役龄 S_h 及RTG用能结构改造完成时间i有关。当RTG的役龄 S_h 为1年时,由式(2)得出RTG用能结构改造完成时间i与总成本的关系。图2为当RTG的当前役龄 S_h 为1年时,单场桥寿命期内总成本与RTG改造完成时间i的关系。当i为6时,单场桥寿命期内最小总成本为937.66万元,因此,RTG在第5年开始进行改造工程,第6年年初完成改造工程。

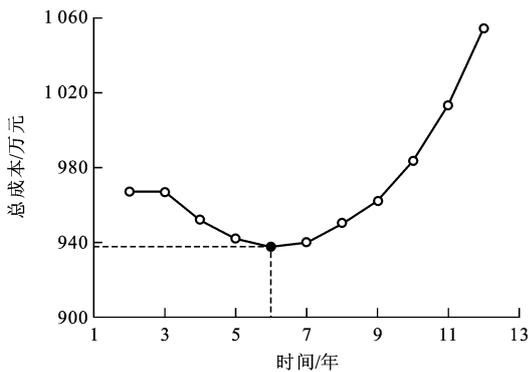


图2 当 S_h 为1年时的总成本与改造时间的关系
Fig.2 Relationship between total cost and conversion time when S_h is 1 year old

图3为当RTG的当前役龄 S_h 为1年时,RTG先进行改造后进行更新的最优策略。当在第6年年初完成改造后,ERTG在第8年年初进行更新,此时如果不进行更新,则会产生较高的费用。

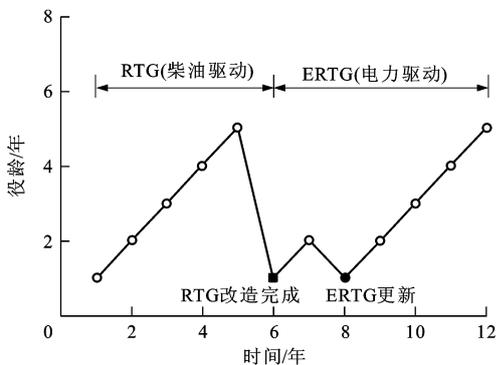


图3 当 S_h 为1年时的最优策略
Fig.3 Optimal strategy when S_h is 1 year old

图4为当RTG当前役龄 S_h 分别取1、2、...、12年时与总成本最小时的相应的用能结构改造时间。当RTG的役龄 S_h 为2年时,最优策略为RTG在第5年年初完成用能结构改造工程,ERTG在第8年年初进行更新;当RTG的役龄 S_h

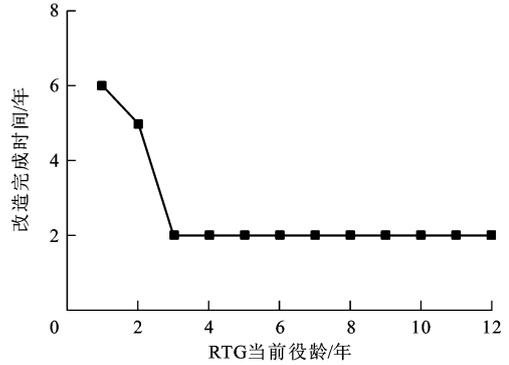


图4 改造完成时间
Fig.4 Conversion completion time

大于等于3年时,最优策略均为RTG在第2年年初完成用能结构改造工程,之后ERTG不再进行更新,即当RTG的役龄 S_h 大于等于3年时,应立即进行更新。

图5为当RTG当前役龄 S_h 分别取1、2、...、12年时,最优策略下的总成本。RTG当前役龄 S_h 取1年时,单场桥寿命期内最小总成本为937.66万元; S_h 取2年时,单场桥寿命期内最小总成本为958.59万元;当 S_h 大于等于3年时,单场桥寿命期内最小总成本为967.33万元。

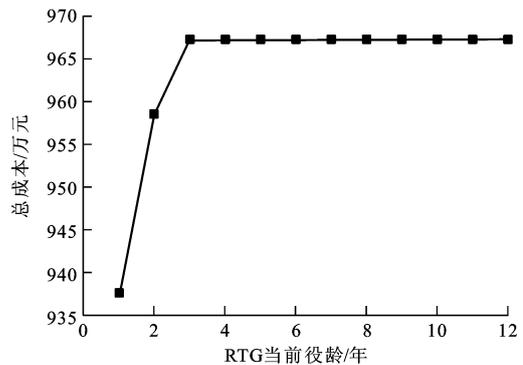
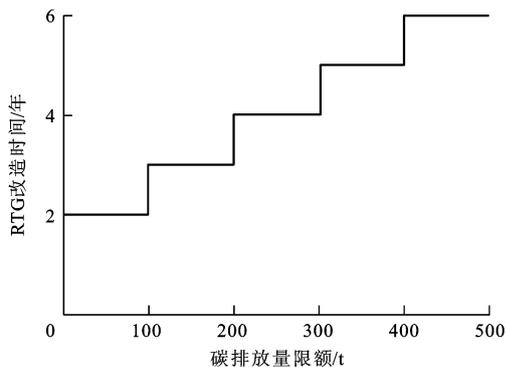


图5 场桥总成本
Fig.5 Total cost of crane

在计算总成本的过程中,碳排放成本仅占运营成本成本的0.6%~0.7%,对决策的影响较小,很难仅通过征收碳税来影响决策者减少碳排放量,因此,应考虑将碳税价格提高或采用碳排放限额2个角度来减少碳排放量。

图6为当RTG当前役龄 S_h 取1年时,碳排放量限额与RTG改造时机的关系。当碳排放量限额值 E_{CO_2} 小于等于100 t时,应立即进行油改电改造,在第2年年初完成油改电工程;当 E_{CO_2} 大于400 t时,应在第6年年初完成改造,此时相当于不需考虑碳排放限额约束;当 $100 t < E_{CO_2} \le 400 t$ 时,改造时机分别对应第3~5年。

图 6 当 S_h 为 1 年时的 E_{CO_2} 与 i 关系Fig. 6 Relationship between E_{CO_2} and i when S_h is 1 year old

3 结 语

本文建立考虑碳排放的集装箱港区单场桥用能结构改造策略的离散型动态规划模型。模型以单场桥寿命期内的总成本最小为目标函数,考虑场桥各成本随时间的动态变化以及碳排放量和投资成本约束,通过后向递推逆序法进行求解,并用环渤海地区某港口实例进行了求解和分析。研究表明,使用场桥用能结构离散型动态规划模型,能确定用能结构改造的最优时机,但是碳排放成本在总成本中所占比例略小,建议通过提高碳税价格或施加碳排放总量限额的方法影响决策者,从而减少场桥的碳排放量,达到经济和环境效益。未来的研究可考虑多场桥改造前后装卸效率和寿命变化下的用能结构改造策略。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 徐德麟. 上海港节能降耗技术的研究与应用[J]. 水运工程, 2011(1):198-202.
XU De-lin. Study on and application of energy-saving technique implemented by Shanghai Port[J]. Port and Waterway Engineering, 2011(1): 198-202. (in Chinese)
- [2] 傅其兆. 集装箱码头 RTG“油改电”的现状和动向[J]. 港口装卸, 2009(2):7-9.
FU Qi-zhao. Status and trend of RTG with electric driven changed from fuel driven in container terminal[J]. Port Operation, 2009(2): 7-9. (in Chinese)
- [3] 姚 剑. 天津港集装箱场桥油改电能源省耗[J]. 港口科技, 2011(9):48-49.
YAO Jian. Energy saving after electric instead of fuel in Tianjin Port[J]. Science and Technology of Ports, 2011(9): 48-49. (in Chinese)
- [4] 何勤奋. “油改电”ERTG 技术比较和探讨[J]. 港口科技, 2008(10):8-12,16.
HE Qin-fen. Technical comparison and probing on the ERTG by “electricity instead of oil”[J]. Science and Technology of

- Ports, 2008(10): 8-12, 16. (in Chinese)
- [5] 王龙伟. ERTG 特性分析及使用优化研究[D]. 大连:大连海事大学, 2010.
WANG Long-wei. ERTG features analysis and use optimization[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010. (in Chinese)
- [6] 郑小楠. RTG“油改电”技术方案探讨[J]. 港口装卸, 2007(5): 22-24.
ZHENG Xiao-nan. A design concept of more flexible to petrochemical terminal's technique to fit markets[J]. Port Operation, 2007(5): 22-24. (in Chinese)
- [7] 杨 忠. T 港集装箱码头“油改电”场桥选型研究[D]. 大连:大连海事大学, 2009.
YANG Zhong. The “oil change electricity” lectotype research of RTG in T Port[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009. (in Chinese)
- [8] 王 垚. 关于轮胎式集装箱起重机“油改电”节能项目工程的可行性研究[J]. 港口科技, 2010(3):38-40.
WANG Yao. Teasibility study on the power saving project of “electricity instead of oil” of the rubber type container gantry crane[J]. Science and Technology of Ports, 2010(3): 38-40. (in Chinese)
- [9] 刘洪波,汪 锋,张志平. 集装箱轮胎吊“油改电”技术在港口节能减排中的应用[J]. 水运工程, 2011(9):123-125.
LIU Hong-bo, WANG Feng, ZHANG Zhi-ping. Application of “electricity instead of oil” technology to RTGs for port energy conservation and pollution reduction[J]. Port and Waterway Engineering, 2011(9): 123-125. (in Chinese)
- [10] 祁崇波. 集装箱码头堆场装卸设备的节能减排研究[D]. 大连:大连海事大学, 2010.
QI Chong-bo. Research on energy saving and emission reduction on the yard cranes of the container terminal[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010. (in Chinese)
- [11] 彭传圣. 电动轮胎式集装箱门式起重机与节能减排[J]. 中国港口, 2010(8):60-62.
PENG Chuan-sheng. ERTG energy conservation and emission reduction[J]. China Ports, 2010(8): 60-62. (in Chinese)
- [12] 张志伟. 港口流动机械合理更新问题研究[D]. 大连:大连海事大学, 2010.
ZHANG Zhi-wei. Study on port mechanical reasonable update[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010. (in Chinese)
- [13] 彭传圣. 集装箱码头碳排放核算方法[J]. 集装箱化, 2012, 23(7): 14-17.
PENG Chuan-sheng. Carbon emission accounting method of container terminal[J]. Containerization, 2012, 23(7): 14-17. (in Chinese)
- [14] 苏君利. 大型集装箱码头堆场装卸工艺研究[J]. 水运工程, 2006(10):86-90.
SU Jun-li. Yard handling technology in large-scale container terminals[J]. Port and Waterway Engineering, 2006(10): 86-90. (in Chinese)
- [15] HARTMAN J C. The parallel replacement problem with

- demand and capital budgeting constraints[J]. *Naval Research Logistics*, 2000, 47(1): 40-56.
- [16] 阮 宁,李 翔,刘志学. 基于江海直达运输模式和投资约束的长江干散货运优化模型[J]. *交通运输工程学报*, 2012, 12(4): 93-99.
RUAN Ning, LI Xiang, LIU Zhi-xue. Optimization model of dry bulk freight in Yangtze River based on river-sea transportation mode and investment constraint[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2012, 12(4): 93-99. (in Chinese)
- [17] MARDIN F, ARAI T. Capital equipment replacement under technological change[J]. *The Engineering Economist*, 2012, 57(2): 119-129.
- [18] ROGERS L J, HARTMAN C J. Equipment replacement under continuous and discontinuous technological change[J]. *IMA Journal of Management Mathematics*, 2005, 16(1): 23-36.
- [19] YATSENKO Y, HRITONENKO N. Network economics and optimal replacement of age structured IT capital[J]. *Mathematical Methods of Operations Research*, 2007, 65(3): 483-497.
- [20] EGGLESTON S, BUENDIA L, MIWA K, et al. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Yokosuka: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- ~~~~~
- (上接第 89 页)
- [3] NEAL D T, WOOD W, LABRECQUE J S, et al. How do habits guide behavior? perceived and actual triggers of habits in daily life[J]. *Journal of Experimental Social Psychology*, 2012, 48(2): 492-498.
- [4] MAYER W. The infant-export industry argument[J]. *Canadian Journal of Economics*, 1984, 17(2): 249-269.
- [5] WINDLE R, DRESNER M. Airport choice in a multiple airport region[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1987, 21(6): 439-449.
- [6] PELS E, NIJKAMP P, RIETVLD P. Access to and competition between airports: a case study for the San Francisco Bay Area[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2003, 37(1): 71-83.
- [7] 赵凤彩,吴彦丽. 中国区域多机场系统旅客吞吐量预测方法研究[J]. *中国民航大学学报*, 2008, 26(6): 56-60.
ZHAO Feng-cai, WU Yan-li. Method of passenger throughput forecasting in multi-airports system[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2008, 26(6): 56-60. (in Chinese)
- [8] ISHII J, JUN S, DENDER K V. Air travel choices in multi-airport markets[J]. *Journal of Urban Economics*, 2009, 65(2): 216-227.
- [9] WINDLE R, DRESNER M. Airport choice in multiple-airport regions[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 1995, 212(4): 332-337.
- [10] WOOD W, NEAL D T. A new look at habits and the habit-goal interface[J]. *Psychology Review*, 2007, 114(4): 843-863.
- [11] AARTS H, VERPLANKEN B, KBIPPENBERG A V. Habit and information use in travel mode choice[J]. *Acta Psychologica*, 1997, 96(1/2): 1-14.
- [12] KLOCKNER C A, MATTHIES E. How habits interfere with norm-directed behavior: a normative decision-making model for travel mode choice[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2004, 24(3): 319-327.
- [13] HIRAGUCHI R. The overlapping generations model with habit formation: a comment[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2008, 32(12): 4016-4017.
- [14] JABER M Y, KHER H V. Variant versus invariant time to total forgetting: the learn-forget curve model revisited[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2004, 46(4): 697-705.
- [15] OUELLETTE J A, WOOD W. Habit and intention in everyday life: the multiple processes by which past behavior predicts future behavior[J]. *Psychological Bulletin*, 1998, 124(1): 54-74.
- [16] VERPLANKEN B, ORBELL S. Reflections on past behavior: a self-report index of habit strength[J]. *Journal of Applied Social Psychology*, 2003, 33(6): 1313-1330.
- [17] KAHNEMAN D, TVERSKY A. Choices, values, and frames[J]. *American Psychologist*, 1984, 9(4): 341-350.
- [18] 赵 凜,张星臣. 基于“前景理论”的先验信息下出行者路径选择模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2006, 6(2): 42-46.
ZHAO Lin, ZHANG Xing-chen. A prospect theory-based route choice model of traveler with prior information[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2006, 6(2): 42-46. (in Chinese)
- [19] GLAZE J A. The association value of non-sense syllables[J]. *Pedagogical Seminary and Journal of Genetic Psychology*, 1928, 35: 255-269.
- [20] JABER M Y, BONNEY M. Production breaks and the learning curve: the forgetting phenomenon[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1996, 20(2): 162-169.
- [21] 黄宇菲,汪应洛. 基于学习遗忘曲线模型的员工生产率研究[J]. *管理学报*, 2011, 8(9): 69-75.
HUANG Yu-fei, WANG Ying-luo. Study on worker productivity with learn forget curve model[J]. *Chinese Journal of Management*, 2011, 8(9): 69-75. (in Chinese)