

# 自动化集装箱码头冷藏箱区插拔电路径优化

张晓龙 浦新平 林 洋

上海国际港务(集团)股份有限公司尚东集装箱码头分公司

**摘 要:** 冷藏箱箱区的插拔电管理对自动化集装箱码头堆场箱区冷藏箱的温度控制尤为重要。针对自动化集装箱码头冷藏箱箱区的结构特点,考虑箱区中冷藏箱的插拔电时间窗约束,基于传统带有时间窗的 TSP 问题,以操作员行走路径最小为目标,建立了整数规划模型,确定待插拔电冷藏箱的插拔电作业顺序,将求解结果与当前码头冷藏箱区插拔电策略进行比较。结果表明,该模型能够更好解决冷藏箱的插拔电顺序问题,实现人员行走路径最优。

**关键词:** 自动化集装箱码头; 冷藏箱; 带有时间窗的 TSP 问题; 整数规划; 路径优化

## Path Optimization of Plug-in Circuit in Refrigerated Container Area of Automated Container Terminal

Zhang Xiaolong Pu Xinping Lin Yang

Shanghai International Port (Group) Co., Ltd. Shangdong Container Terminal Branch

**Abstract:** The plug-in management of the refrigerated container area is particularly important for the temperature control of refrigerated containers in the automated container terminal. Considering the structural characteristics of the refrigerated container area of automated container terminal and the time window constraints of the plug-in of refrigerated containers, an integer programming model is established based on the traditional TSP problem with time window, which aims at minimizing the operator's walking path. By solving the model, the order of plug-in operation is determined, and the results are compared with the current plug-in strategy of the refrigerated container area. Comparison results show that the model performs better in solving the plug-in order of refrigerators, which provides an optimal walking path for personnel.

**Key words:** automated container terminal; refrigerated container; TSP problem with time window; integer programming; path optimization

### 1 引言

自动化集装箱码头(ACT, Automated Container Terminal)在降低码头人力成本、提高港口通过能力、降低装卸作业能耗、提升港口品牌形象等方面发挥着重要的作用,是未来港口发展的必然趋势。集装箱码头处理的集装箱绝大多数为普通箱,冷藏箱的处理数量在码头总吞吐量中所占比例较小,但是基于冷藏箱的特殊作业要求,冷藏箱箱区的作业管理对码头作业效率及箱区作业人员工作效率都有重要的影响。

冷藏集装箱是符合国际标准、具有隔热性能、能保持一定低温要求,适用于各类食品和特殊货物冷藏贮运而进行特殊设计的集装箱<sup>[1]</sup>。随着世界食品工业的发展和食品冷藏运输的需要,近年来公路、

铁路、海上食品冷藏运输已越来越多地采用各类冷藏集装箱。目前,国际上集装箱尺寸和性能都已标准化,基本分为3类:20×8×8, 20×8×8.6, 40×8×8.6(长×宽×高, ft), 使用温度范围为-30(用于运送冻结食品)~+12℃(用于运送香蕉等果蔬),更通用的范围是-30~20℃。

冷藏箱区是集装箱堆场中用来暂时堆存进出口冷藏箱的区域,自动化集装箱码头冷藏箱区的布置不同于传统集装箱码头的平行布置,而是垂直于码头岸线。由于冷藏箱内的货物需要保持一定的温度,如冷藏集装箱运送冻结货时通常使用温度应不高于-18℃;箱内的货物是水果蔬菜时,其箱内温度应保持在12℃左右;冷冻货长距离运输时,箱内设定温度与设定温度差不能超过3℃;若运送冷却货,其温度误差应不大于0.5℃,最好不大于0.25℃。因

此,为保证箱区内冷藏箱的箱内温度,箱区内设有专门的电源支架,支架上设有电源插头,当冷藏箱进场后应该及时插电,而在冷藏箱离场前又应该及时拔掉电源。

本文阐述了冷藏箱箱区的结构与插拔电操作的约束和目标;基于传统带有时间窗的 TSP 问题,考虑箱区中冷藏箱的插拔电时间窗约束,以操作员行走路径最小为目标建立整数规划模型,以确定待插拔电的冷藏箱的插拔电作业顺序;对模型求解,并将求解结果同当前码头冷藏箱区插拔电策略作比较。

## 2 问题描述

上海洋山深水港四期全自动化集装箱码头共有

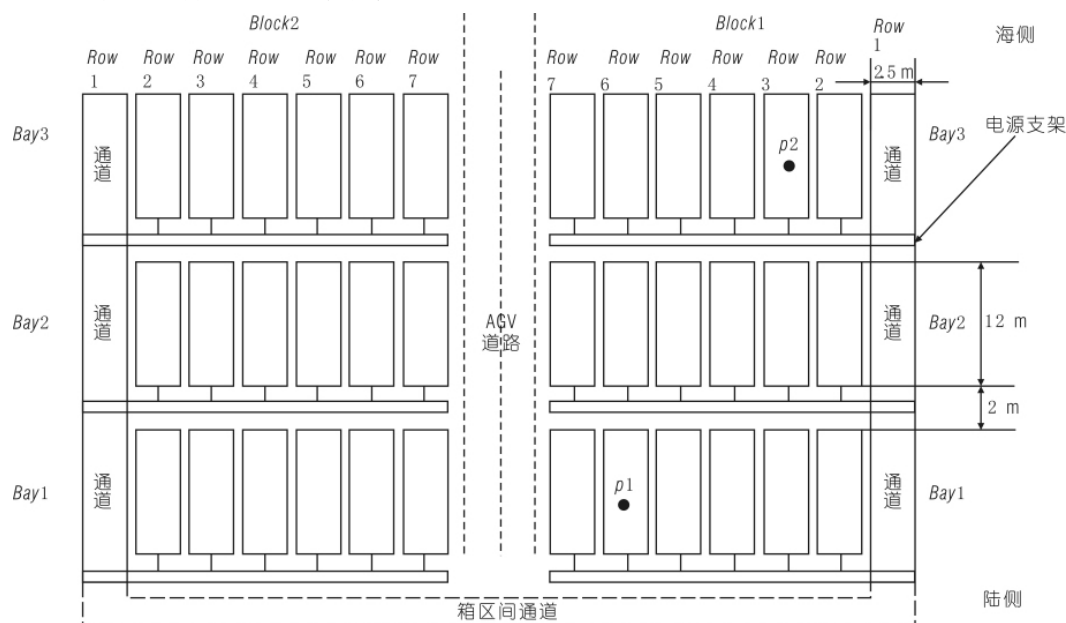
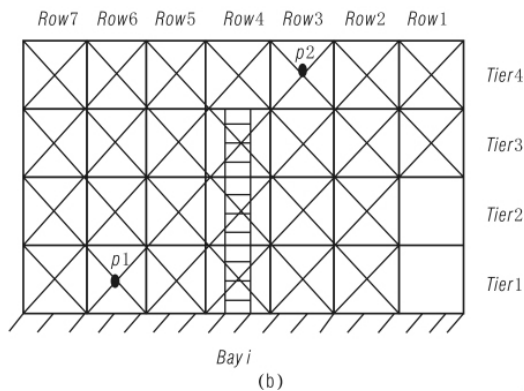


图 1 冷藏箱区平面图



(a)



(b)

图 2 冷藏箱区支架结构图

冷藏箱在运输途中或是堆场中都有严格的温度要求,提前拔电或延后插电都有可能使箱内温度不能达到要求,造成货物腐败。因此当冷藏箱进场后应该及时插电,一般要求进场后 10 min 内插上电源;在冷藏箱离场前应该及时拔掉电源,一般要求出

6 块冷藏箱箱区,分布在 14#与 15#、30#与 31#、46#与 47#箱区,每个箱区靠近陆侧垂直于码头岸线布置(如图 1 所示)。相邻的 2 个箱区之间设有 AGV (Automated Guided Vehicle, 自动导引车) 车道,插拔电操作人员只允许在通道和支架上行走,如果需要跨箱区作业,只能通过箱区间通道进入另一箱区。冷藏箱区支架结构图见图 2。一个箱区共有 8 个大贝和 2 个小贝,每个贝位可以堆放 7 排,除第一排只能在第三、四层码放 2 层冷藏箱外,其余每排可以放 4 层冷藏箱。

场前 30 min 内拔掉电源。这样每个需要进场的冷藏箱的插拔电都有一个具体的时间窗,工作人员应该严格按照该时间窗前往各冷藏箱位进行插拔电。假设箱区中有一个冷藏箱  $i$  需要插或拔电,要求的时间窗为  $[e_i, l_i]$ ,那么操作员能为  $i$  插拔电

的时间不能早于  $e_i$ , 如果早于  $e_i$ , 则必须等待, 但也不能晚于  $l_i$ 。另一方面, 操作员接到的插拔电任务通常是多个冷藏箱, 这些冷藏箱又分布在箱区的不同地方, 箱区的长度超过 100 m, 箱区间通道之间的距离超过 50 m, 如果操作员没能在箱区里选择较好的插拔电顺序, 为了完成所有插拔电任务, 则需要行走很长距离, 造成人员疲惫。

如何在满足各待插拔电的时间窗约束的情况下, 使操作员在顺利完成所有插拔电任务后所行走的距离最短, 是本文研究的主要问题。从根本上来说, 该问题就是一个带有时间窗的 TSP 问题, 将分布在不同场箱位所有的待插拔电冷藏箱抽象为 TSP 问题中的各个城市节点, 任意两场箱位之间的距离抽象为城市之间的距离, 各个箱子插拔电时间窗抽象为各个城市的服务时间窗<sup>[2-3]</sup>。

在计算距离时, 因为箱子在排位中随机分布, 为了计算方便, 对扶梯的位置作折中处理, 假设扶梯位于支架的正中间, 可以从最底层垂直上到最高层, 如图 2(b) 所示。任意一个冷藏箱的场箱位可以表示为  $(z, b, r, t)$ , 其中,  $z$  表示箱区,  $b$  表示贝位,  $r$  表示排位,  $t$  表示层位。假设冷藏箱  $i$  的场箱位为  $(z_i, b_i, r_i, t_i)$ , 冷藏箱  $j$  的场箱位为  $(z_j, b_j, r_j, t_j)$ 。  $d_{ij}$  表示在箱区 1 和 2 内任意 2 个冷藏箱  $i$  和  $j$  之间的操作员行走距离; 箱区之间的外通道距离  $z_{ij} = 50$  m, 当跨箱区作业时有效;  $sts_i$  和  $sts_j$  表示  $i$  和  $j$  到扶梯的距离, 当需要上下扶梯时有效, 即当在第一排作业时无效;  $ss_i$  和  $ss_j$  表示  $i$  和  $j$  上(下)扶梯的距离, 当需要上下扶梯时有效;  $sa_i$  和  $sa_j$  表示从某一贝位第一层某位置(扶梯处或第一层其他排位处)到通道的距离, 都有效;  $sbb_{ij}$  表示两贝位通道之间的通道距离, 跨箱区时无效;  $sbl_i$  和  $sbl_j$  表示从  $i$  和  $j$  所在贝位到 Bay1 的通道距离, 仅在跨箱区时有效; 则  $d_{ij} = sts_i + sts_j + ss_i + ss_j + sta_i + sta_j + sbb_{ij} + sbl_i + sbl_j + z_{ij}$ , 但是求和时各单项的有效性视具体情况而定<sup>[4]</sup>。

### 3 数学模型

#### 3.1 参数设定

$V$  为所有需要插拔电的冷藏箱箱位点与起点 1 的集合, 假设起点 1 位于场箱位  $(1, 1, 1, 1)$ ,  $\forall i \in V$ ,  $V = \{1, 2, \dots, n\}$ ;  $st_i$  为每个箱子的插拔电时间, (起点除外) 统一设置为一个定值: 30 s;  $[e_i, l_i]$  为箱子  $i$  的插拔电时间窗, 其中  $e_i$  为  $i$  箱子插拔电最早开始时间,  $l_i$  为  $i$  箱子插拔电最迟开始时间, 则  $e_i \leq at_i + wt_i \leq l_i$ ;  $t_{ij}$  为从冷藏箱  $i$  到  $j$  所需要的时间;  $pt_i$  为操作员未在冷藏箱  $i$  的时间窗内到达而迟到的时间;  $\lambda$  为

惩罚时间转化为距离的惩罚系数, 则  $\lambda \sum_{i \in V} pt_i$  为迟到的惩罚距离;  $pt_i = \max\{0, at_i - l_i\}$ ,  $\forall i \in V$ ;  $pt_i \geq 0$ ,  $\forall i \in V$  在时间窗之后到达就会有迟到时间<sup>[5-7]</sup>。

#### 3.2 假设条件

为了方便问题的研究, 作如下假设:

(1) 假设人始终匀速行走, 且步速是 1 m/s, 这样  $t_{ij}$  与  $d_{ij}$  在数值上是相等的。

(2) 在计算冷藏箱之间的距离时, 假设扶梯位于支架的正中间。

(3) 现实情况下, 由于冷藏箱内货物的不同, 所要求的温度不同的, 对温差变化的敏感度也是不同的, 进而插拔电的提前时间是不同的。这里对该问题进行了简化, 只考虑所有冷藏箱的进出场属性, 即假设所有进场箱或出场箱的允许提前插拔电时间是相同的, 所有的冷藏箱进场后 10 min 内应该插上电源, 而出场前 30 min 内应该拔掉电源。

(4) 假设操作员只在相邻的 2 个箱区作业, 不涉及更多冷藏箱区。

#### 3.3 决策变量

(1)  $x_{ij}$ 。如果操作员行走路线经过弧  $\langle i, j \rangle$ , 则  $x_{ij} = 1$ , 否则为 0。

(2)  $at_i$ 。操作员到达冷藏箱  $i$  (支架) 的时间。

(3)  $wt_i$ 。箱子  $i$  插拔电的等待时间,  $wt_i \geq 0$ , 则  $i$  的插拔电开始时间是  $at_i + wt_i$ , 箱子  $i$  插拔电结束时间为  $at_i + wt_i + st_i$ 。

(4)  $u_i$ 。虚拟变量, 取值为正整数, 表示节点  $i$  的遍历顺序, 如果冷藏箱  $i$  是第  $t$  个操作的冷藏箱, 则  $u_i = t$ 。

完整模型如下:

$$\min \left\{ \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} d_{ij} x_{ij} \right\} \quad (1)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1, \forall j \in V \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1, \forall i \in V \quad (3)$$

$$u_i - u_j + nx_{ij} \leq n - 1, \forall i, j \in V \setminus \{1\}, i \neq j \quad (4)$$

$$at_i \leq l_i, \forall i \in V \quad (5)$$

$$et_i \leq at_i + wt_i \leq l_i, \forall i \in V \quad (6)$$

$$at_i + wt_i + st_i + t_{ij} + (1 - x_{ij})M \leq at_j, \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (7)$$

$$at_1 = wt_1 = st_1 = 0 \quad (8)$$

$$wt_i = \max\{0, et_i - at_i\}, \forall i \in V \quad (9)$$

$$at_i, wt_i, st_i \geq 0, \forall i \in V \quad (10)$$

$$x_{ij} = 0, 1, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (11)$$

$$u_i \in Z, \forall i \in V \quad (12)$$

式(1)为目标函数, 最小化行走距离; 式(2)、(3)为

访问唯一性约束,1个节点只进入和离开1次;式(4)为次回路消除约束;式(5)表示到达时间不能晚于插拔电要求的最迟时间;式(6)表示开始插拔电时间务必在时间窗内;式(7)为前驱与后继节点之间的时间关系;式(8)为起始点处的时间参数;式(9)表示在时间窗之前到达就会有等待时间;式(10)、(11)、(12)为参数和决策变量的基本取值范围<sup>[8-9]</sup>。

#### 4 模型求解与算例分析

现实情况下,某一次插拔电任务操作员需要插拔电的冷藏箱数量通常不多,该模型的计算复杂度不大,如果采用启发式算法求解,则存在计算结果不稳定的现象,并且也不能确保得到的是最优解。因

此本文对该模型的求解采用精确算法,即用 MATLAB 软件 Yalmip 工具箱调用 ILOG Cplex 求解器求解。

现假设相邻两箱区共有 10 个插拔电任务,这 10 个冷藏箱的箱位与时间窗见表 1。其中,(1,1,1,1)表示该冷藏箱位于第 1 箱区、第 1 贝、第 1 排、第 1 层,并设定其为任一任务的出发点,非任务点,其他箱位含义同理;时间窗为该冷藏箱节点的最早与最晚插拔电时间,如(1,1,3,1)的时间窗为(100,700),表示该冷藏箱的插拔电要求的最早开始时间是第 100 s,最晚开始时间是第 700 s。表 2 给出了这 11 个节点之间的距离,用 MATLAB 求解得到的结果如表 3 中“优化模型”一栏所示。

表 1 待插拔电冷藏箱箱位与时间窗

| 序号 | 场箱位       | 时间窗/s                           | 序号 | 场箱位        | 时间窗/s                           |
|----|-----------|---------------------------------|----|------------|---------------------------------|
| 1  | (1,1,1,1) | $\setminus [0,0\setminus]$      | 7  | (1,10,3,4) | $\setminus [0,400\setminus]$    |
| 2  | (1,1,3,1) | $\setminus [100,700\setminus]$  | 8  | (2,10,4,4) | $\setminus [0,180\setminus]$    |
| 3  | (1,1,7,2) | $\setminus [0,600\setminus]$    | 9  | (2,9,5,2)  | $\setminus [0,450\setminus]$    |
| 4  | (1,9,5,3) | $\setminus [0,1\ 000\setminus]$ | 10 | (2,1,6,1)  | $\setminus [500,1800\setminus]$ |
| 5  | (1,6,6,4) | $\setminus [0,500\setminus]$    | 11 | (2,3,7,2)  | $\setminus [100,900\setminus]$  |
| 6  | (1,1,7,1) | $\setminus [150,750\setminus]$  |    |            |                                 |

表 2 各任务点之间的距离

| $d_{ij}$ | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1        | 0     | 5     | 17.5  | 132   | 97.5  | 15    | 145   | 206.5 | 177   | 62.5  | 98    |
| 2        | 5     | 0     | 12.5  | 137   | 102.5 | 10    | 150   | 211.5 | 182   | 67.5  | 103   |
| 3        | 17.5  | 12.5  | 0     | 147   | 112.5 | 17.5  | 160   | 221.5 | 192   | 77.5  | 113   |
| 4        | 132   | 137   | 147   | 0     | 79.5  | 137   | 43    | 328.5 | 299   | 184.5 | 220   |
| 5        | 97.5  | 102.5 | 112.5 | 79.5  | 0     | 97.5  | 87.5  | 289   | 259.5 | 145   | 180.5 |
| 6        | 15    | 10    | 17.5  | 137   | 97.5  | 0     | 160   | 221.5 | 192   | 77.5  | 113   |
| 7        | 145   | 150   | 160   | 43    | 87.5  | 160   | 0     | 350.5 | 321   | 206.5 | 242   |
| 8        | 206.5 | 211.5 | 221.5 | 328.5 | 289   | 221.5 | 350.5 | 0     | 30.5  | 140   | 119.5 |
| 9        | 177   | 182   | 192   | 299   | 259.5 | 192   | 321   | 30.5  | 0     | 134.5 | 114   |
| 10       | 62.5  | 67.5  | 77.5  | 184.5 | 145   | 77.5  | 206.5 | 140   | 134.5 | 0     | 60.5  |
| 11       | 98    | 103   | 113   | 220   | 180.5 | 113   | 242   | 119.5 | 114   | 60.5  | 0     |

码头目前拟采用的策略是按照时间最紧迫或下一距离最近法。按照时间最紧迫策略,则在完成当前冷藏箱的插拔电作业之后,应该选择带有与当前时间最接近的最晚插拔电时间的冷藏箱作为下一作业箱;按照下一距离最短策略,则在完成当前冷藏箱

的插拔电作业之后,应该选择与当前所在位置最近的冷藏箱作为下一待插拔电的冷藏箱。用这两种策略安排出的行走路径计划所得到的结果如表 3 中“时间最紧迫”与“下一距离最短”两栏所示。

表 3 几种插拔电顺序策略的比较

| 策略     | 路径                        | 总行走距离<br>/m | 总行走时长<br>/s | 是否违背<br>时间窗 |
|--------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|
| 时间最紧迫  | 1→8→7→9→5→3→2→6→11→4→10→1 | 1 852.5     | 1 852.5     | 否           |
| 下一距离最短 | 1→2→3→6→5→4→7→10→11→9→8→1 | 873         | 873         | 是           |
| 优化模型   | 1→8→9→5→7→4→6→3→2→11→10→1 | 1 020       | 1 020       | 否           |

(下转第 49 页)

间隙,实施必要的翻倒作业,有利于减少外集卡在陆侧作业的等待时间,提升码头的对外服务质量。

### 参考文献

- [1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 上海国际航运中心深水港区四期工程初步设计[R]. 上海: 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 2014.
- [2] 罗勋杰. 自动化集装箱码头水平运输工艺系统及其对码头布局的影响[J]. 集装箱化, 2015(2): 16-19.
- [3] 李厚源. 基于部分集卡信息的进口箱提箱顺序与翻箱

策略协同优化模型[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.

- [4] L.Zhen, L.H.Lee, E.P.Chew, D.F. Chang and Z.X.Xu, "A Comparative Study on Two Types of Automated Container Terminal Systems" [C]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol.9, no.1, (2012) January: 56-69.
- [5] 吴萍. 基于集卡到达信息的进口箱翻箱策略研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.

顾志华: 201306, 上海市浦东新区同汇路1号

收稿日期: 2018-12-21

DOI: 10.3963/j.issn.1000-8969.2019.01.014

(上接第13页)

由表3可以看出,使用不同策略得到的结果是不同的。若使用第一种策略,时间窗可以很好的满足,但是往往会由于过分追求时间窗而导致作业任务路径不简洁,部分路段重复行走次数增多,最终导致总行走距离延长,其路径虽满足时间窗约束,但是总行走距离却是3种策略中最长的。若使用第二种策略,作业路径简洁明了,减少多余回路,但会出现错过时间窗的情况。而使用优化模型与精确算法求解所得到的结果最优,在满足时间窗约束的前提下,可得到一个最短路径。

### 5 结语

实际案例分析表明,“时间最紧迫”与“下一距离最短”这2种策略不能满足码头实际操作的需要,而采用采用建立优化模型与选择精确求解算法,可解决考虑时间窗约束的自动化集装箱码头冷藏箱区插拔电路径优化问题,具有较高的实用性与适用性,能为码头冷藏箱区插拔电作业提供很大便利。

本文采用的模型只考虑了基本的时间窗约束,在实际情况下,可能会遇到某个箱子的时间窗无法满足的情况,这时模型就求解不出可行解。因此,进一步研究可以考虑软时间窗约束,对不满足时间窗的操作进行惩罚,当该惩罚最小化时,即求出最优解。另外,本文将进出口箱子的插拔电提前时间作统一处理,后期研究需要考虑不同货物对该时间的影响。

### 参考文献

- [1] 汪庆国. 冷藏集装箱室内流场与温度场的数值计算及

实验研究[D]. 上海: 上海海事大学, 2001.

- [2] Kara I, Derya T. Formulations for Minimizing Tour Duration of the Traveling Salesman Problem with Time Windows☆[J]. Procedia Economics & Finance, 2015, 26(8): 1 026-1 034.
- [3] Cheng C B, Mao C P. A modified ant colony system for solving the travelling salesman problem with time windows.[J]. Mathematical & Computer Modelling, 2007, 46(9): 1 225-1 235.
- [4] 马华伟. 带时间窗车辆路径问题及其启发式算法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [5] López-Ibáñez M, Blum C, Ohlmann J W, et al. The travelling salesman problem with time windows: Adapting algorithms from travel-time to makespan optimization☆[J]. Applied Soft Computing Journal, 2013, 13(9): 3 806-3 815.
- [6] 杨燕霞, 伍岳庆, 姚宇, 等. 带时间窗车辆调度问题的启发式算法研究与应用[J]. 计算机应用, 2013, 33(s1): 59-61.
- [7] 张钦, 李辉. 带有时间窗约束的车辆路径问题的一种改进遗传算法[J]. 系统管理学报, 2010, 19(5): 589-592.
- [8] Karabulut K, Tasgetiren M F. A variable iterated greedy algorithm for the traveling salesman problem with time windows[J]. Information Sciences, 2014, 279: 383-395.
- [9] 姜昌华. 遗传算法在物流系统优化中的应用研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.

张晓龙: 201306, 上海市浦东新区同汇路1号

收稿日期: 2018-12-12

DOI: 10.3963/j.issn.1000-8969.2019.01.003