

文章编号: 1001-0920(2006)06-0656-05

## 大型钢铁企业原料场存储分配问题的研究

李韶华<sup>a,b</sup>, 唐立新<sup>b</sup>

(东北大学 a 教育部暨辽宁省流程工业综合自动化重点实验室, b 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

**摘要:** 为钢铁企业原料存储分配问题建立了以降低成本并保持原料成分稳定为目标函数的非线性数学模型, 并提出了改进禁忌搜索算法进行求解. 该算法利用基于随机 kick 移动的迭代局域搜索策略作为跳出局部最优的策略, 其中迭代局域搜索策略的邻域以环交换移动产生. 通过 150 组随机数据的实验证明, 引入迭代局域搜索策略的禁忌搜索算法具有较强的全局搜索能力, 是解决该类实际工业问题的快速有效的近优算法.

**关键词:** 钢铁企业; kick 移动; 环交换; 迭代局域搜索; 禁忌搜索

中图分类号: TP278

文献标识码: A

## Storage Space Allocation in Material Yards of Integrated Iron and Steel Plants

LI Shao-hua<sup>a,b</sup>, TANG Li-xin<sup>b</sup>

(a Key Lab of Process Industry Automation of Ministry of Education, b College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China Correspondent: TANG Li-xin, Email: tanglixin@ise.neu.edu.cn)

**Abstract:** A nonlinear mathematical model is presented for the storage space allocation problem in material yards of integrated iron and steel plants with the objective function of reducing transportation costs and keeping material components. An improved tabu search algorithm is developed to solve it by using an iterated local search strategy based on random kick moves as a method to escape from local optima. The neighborhood in iterated local search is generated by cyclic exchange moves. The test with 150 random data sets shows that the tabu search with iterated local search strategy achieving global diversification is a fast and effective near optimal algorithm to solve such practical industry problems.

**Key words:** Iron and steel industry; Kick move; Cyclic exchange; Iterated local search; Tabu search

### 1 引言

大型钢铁企业的原料场是用来存放高炉、烧结等所需各种原燃料的场地, 它主要有贮存和缓冲两种机能. 由于钢铁企业所需的原材料品种繁多且数量大, 如何制订一个好的料场存储分配计划是降低原料运输与存储费用, 保持原料品质的关键所在. 这也使得该类问题成为一类急需解决的优化问题.

原料场存储分配问题与已引起学术界广泛关注的选址问题<sup>[1-3]</sup>和集装箱码头存储分配问题<sup>[4-6]</sup>有

着一定的相似性. 尽管这些现有的模型和算法已成功解决了多种问题, 但由于钢铁企业原料贮存的特殊性, 使得以上这些模型和算法不能直接用于描述和求解该类问题.

目前已有的关于钢铁行业的研究成果多集中在生产研究上, 而对原料场存储分配问题的研究则很难找到相关文献<sup>[7]</sup>. 本文以上海宝山钢铁公司(宝钢)为背景, 研究静态料场存储分配问题. 首先为该类问题建立能够充分体现钢铁企业原料场原料存储

收稿日期: 2005-03-11; 修回日期: 2005-05-25

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(70425003); 国家自然科学基金项目(70171030, 60274049); 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划项目(教育司[2002]383); 霍英东青年教师基金项目(81073).

作者简介: 李韶华(1977—), 女, 内蒙古包头人, 博士生, 从事物流与供应链建模及优化方法的研究; 唐立新(1966—), 男, 黑龙江兰西人, 教授, 博士生导师, 从事生产调度、物流与供应链建模及优化方法等研究.

特点的数学模型, 然后提出了多种禁忌搜索算法和多点下降算法, 并对该问题进行求解和性能比较

## 2 问题描述和数学模型

### 2.1 问题描述

用于宝钢生产的原料主要可分为矿石、副原料、煤和混匀料 4 大类, 为保持原料成分稳定, 宝钢将不同种类的原料存放在不同类别的料场中, 并尽量将成分相同或相近的原料堆放在同一料堆上。这种管理方式基本上消除了同一料堆上的原料成分差异所造成的原料成分变化, 但对于存放过程中不同料堆间的相互影响而造成的原料变质却无能为力。因此将这些品种繁多的原料配置在合适的位置上, 使得节约费用的同时又保证原料品质的稳定成为典型的优化问题。

本文所研究的钢铁企业原料场存储分配问题由于原料之间存在相互影响而使得料场存储分配问题不仅是分配问题, 而且在同一料场内部还存在着排序问题。因而在制定存储分配计划时, 除需要确定所开设的料场和每种原料所放置的料场外, 还需要计算出各原料在所属料场中的具体堆积位置。

原料场静态分配问题的特性使得其不同于常规的分配问题和选址问题, 从而增加了钢铁企业原料场存储分配问题的数学建模的难度。

### 2.2 数学模型

用  $\Omega$  表示所有原料(料堆)集合,  $\Omega_1$  表示矿石集,  $\Omega_2$  表示所有副原料集,  $\Omega_3$  表示所有煤原料集,  $\Omega_4$  表示匀矿集  $\Omega = \{1, \dots, N\} = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \cup \Omega_4$ , 这里  $N$  为所有原料(料堆)总数。用  $\Psi$  表示所有料场集合,  $\Psi_1$  表示矿石料场集,  $\Psi_2$  表示副原料场集,  $\Psi_3$  表示煤场集,  $\Psi_4$  表示匀矿料场集  $\Psi = \{1, \dots, M\} = \Psi_1 \cup \Psi_2 \cup \Psi_3 \cup \Psi_4$ , 这里  $M$  为所有料场总数。  $w_i$  为料堆  $i$  的重量;  $W_j$  为料场  $j$  对每个料堆的最大重量限制;  $V_j$  为料场  $j$  总重量限制;  $l_i$  为料堆  $i$  的长度;  $D_j$  为料场  $j$  任意相邻两料堆间的间隔距离;  $L_j$  为料场  $j$  总长度;  $h_i$  为料堆  $i$  的高度;  $H_j$  为料场  $j$  对每个料堆的最大高度限制;  $c_{ij}$  为原料  $i$  分配至料场  $j$  的费用;  $f_j$  为开放料场  $j$  的固定费用;  $\alpha_{ij}$  为原料  $i$  与原料  $i$  在料场  $j$  相邻堆放时所引起的惩罚费用;  $M$  是一个很大的数。决策变量  $x_{ij}$  当原料  $i$  被分配至料场  $j$  存储为 1, 否则为 0;  $y_j$  如果开设料场  $j$  为 1, 否则为 0;  $z_{ij}$  如果原料  $i$  和原料  $i$  在料场  $j$  相邻为 1, 否则为 0。  $s_{ij}$  是原料  $i$  在料场  $j$  的起始存放单元;  $e_{ij}$  是原料  $i$  在料场  $j$  的末尾存放单元,  $e_{ij} = s_{ij} + l_i - 1$ 。

$$\min \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in \Psi} c_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in \Psi} f_j y_j + \sum_{i \in \Omega} \sum_{i' \in \Omega \setminus \{i\}} \alpha_{ij} z_{ii'}$$

$$\sum_{j \in \Psi} (W_j - w_i) x_{ij} = 0, \forall i \in \Omega \quad (1)$$

$$\sum_{j \in \Psi} (H_j - h_i) x_{ij} = 0, \forall i \in \Omega \quad (2)$$

$$\sum_{i \in \Omega} w_i x_{ij} \leq V_j y_j, \forall j \in \Psi; \quad (3)$$

$$\sum_{i \in \Omega} (l_i + D_j) x_{ij} \leq (L_j + D_j) y_j, \forall j \in \Psi; \quad (4)$$

$$\max(s_{ij}, s_{i'j}) - \min(e_{ij}, e_{i'j}) + M(2 - x_{ij} - x_{i'j}) \leq D_j, \forall i, i' \in \Omega \setminus \{i\}, j \in \Psi; \quad (5)$$

$$x_{ij} = 1, \forall i \in \Omega, k = 1, \dots, 4; \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M; \quad (7)$$

$$y_j \in \{0, 1\}, j = 1, \dots, M; \quad (8)$$

$$z_{ii'} \in \{0, 1\}, i, i' = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M; \quad (9)$$

$$s_{ij} \text{ 和 } e_{ij} \text{ 是整数, } i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, M. \quad (10)$$

目标函数的第 1 项表示各原料被分配至料场的运输费用总和。第 2 项为所开设料场的固定费用之和, 其包括料场管理和维护费用及料场内堆取料机作业费用等。第 3 项为任意两种原料相邻时由状态差异或成分差异所引起的惩罚费用之和。约束 (1) 和 (2) 表示在任一料场存放原料时, 每堆原料的重量和高度不能超过该料场单个料堆的最大重量和高度限制。约束 (3) 指出存放在某一料场的所有原料的重量之和不能超过该料场的总重量限制。约束 (4) 表示存放在某一料场的所有料堆长度之和再加上相邻两料堆之间的间距应小于该料场的总长度。为尽量保持原材料的成份在料场存放的时候不发生改变, 约束 (5) 确保在同一料场堆放的任两个料堆之间应保持一个安全距离。约束 (6) 表示每一类原料只能存放在与之相应的料场中, 而每一种原料必须且只能在一个料场里堆放。约束 (7) ~ (10) 为变量类型约束。

以上模型充分体现了钢铁企业原料场静态存储分配问题的特性, 但却使得问题的求解变得更加困难。物料间并不相互独立的特性转化为目标函数的第 3 项后, 由于不能将此问题分解为子问题, 从而导致常用于求解选址问题的拉格朗日松弛算法并不适用; 同样, 分支定界算法也因为难以确定下界而不适用, 因此需寻求近优算法来求解该问题。

## 3 两类邻域结构

目前的近优算法多为邻域搜索算法, 其性能的优劣与邻域选择有着密切的联系。本文拟选用两交换邻域和环交换邻域来测试各种近优算法的性能。

### 3.1 两交换邻域

两交换邻域是将两个原料进行交换所得到的所

有解的集合. 由于本文所研究的原料间存在相关性, 所以除考虑料场间的两交换移动外, 还要考虑在同一料场内的两交换移动

### 3.2 环交换邻域

环交换邻域是一种两交换邻域的扩展邻域, 将其用于本文所研究的问题可定义如下:

对于原料集合  $\Omega = \{1, \dots, N\}$ , 将  $\Omega$  分为  $M$  个两两不相容的子集 (料场)  $\{A_1, A_2, \dots, A_M\}$ , 其中  $A_j$  表示存储在料场  $j$  的所有原料的集合. 如果所有的子集都满足模型的约束条件, 则称这是一个对集合  $\Omega$  的可行分配  $A$ . 图 1(a) 所示的环交换移动是指对应于  $A$  的如下一些操作: 原料  $a_1$  从  $A_1$  移到  $A_2$ , 原料  $a_2$  从  $A_2$  移到  $A_3$ , 以此类推, 直至原料  $a_k$  从  $A_k$  移到  $A_1$  而形成环交换移动  $W = (a_1, a_2, \dots, a_k, a_1)$ . 对于一类图 1(b) 所示的路径交换, 如果对每一个子集引入一个虚拟原料 (用  $-1$  表示), 且虚拟原料也与真正的原料一样可以参与交换移动, 则该类路径交换可转换为带有虚拟节点的环交换移动. 本文所研究的环交换移动均指这类引入虚拟节点的环交换移动.

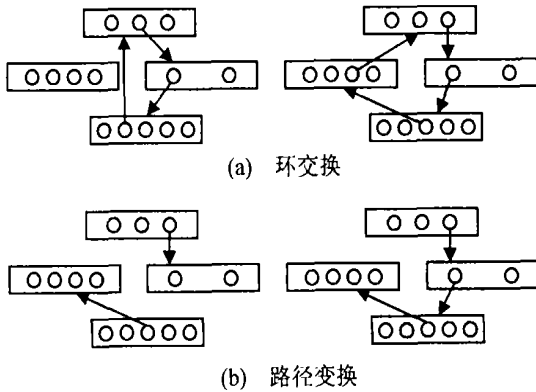


图 1 路径交换和环交换

经过这样构建的环交换邻域具有非常多的邻居, 并且邻域规模随着参与移动的子集个数  $K$  的增长而成指数倍的增长, 因此该邻域属于大规模邻域. 对每一个环交换移动来说, 只有当参与该环交换中的各移动所形成的总费用为负时, 才能使得目标函数减少. 因此, 如何在一个环交换邻域中找到具有最小负费用的环交换移动, 是一个关键问题. 由于寻找最小负费用是一个 NP-Complete 问题, 这里将采用基于动态规划算法的启发式方法来近似寻找该最小负费用.

根据环交换的特点, 可依照环交换的起点 (终点) 来设计动态规划算法. 任选某一料场内的某一原料作为动态规划的起点和终点, 环交换所涉及到的料场数即为阶段总数  $k$ , 每一个料场即为一个阶段  $j, 1 \leq j \leq k$ . 各料场内所存放的原料个数为该阶

段  $j$  的状态总数  $T_j$ , 每一个原料即为该阶段的一个状态  $S_i^j, 1 \leq i \leq T_j, 1 \leq j \leq k$ . 则图 2 所示的动态规划可表示为

$$\begin{cases} f_1(S_i^1) = \text{cost}(S_i^1, S_i^1), i = 1, \dots, T_1; \\ f_j(S_i^j) = \min_{1 \leq i' \leq T_{j-1}} \{ \text{cost}(S_{i'}^{j-1}, S_i^j) + f_{j-1}(S_{i'}^{j-1}) \}, \\ i = 1, \dots, T_j; j = 2, \dots, k \end{cases} \quad (11)$$

其中  $\text{cost}(S_{i'}^{j-1}, S_i^j)$  表示原料  $S_{i'}^{j-1}$  进入料场  $j$  和原料  $S_i^j$  离开料场  $j$  所引起的目标函数的改变, 这一共包含 3 方面的因素: 两种原料运输费用的改变、料场  $j$  的固定费用改变和原料的相邻关系发生变化所造成的惩罚费用的变化. 当原料  $S_{i'}^{j-1}$  进入料场  $j$  时, 并不直接占用  $S_i^j$  的位置, 而在所有可能的位置上进行插入测试, 以便找到一个最佳的插入位置.

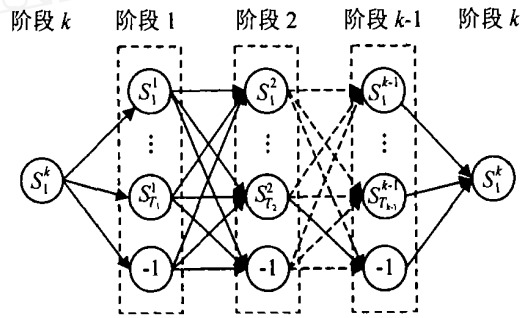


图 2 以某一原料为起点和终点的动态规划

以上的动态规划可以找到所有具有同一起点的环交换的最负费用. 当各原料为起点的动态规划均被搜索过后, 即可找到整个环交换邻域的近似最小负费用环.

### 4 嵌入迭代局域搜索策略的禁忌搜索算法

禁忌搜索算法是可以为许多难解的优化问题在较短时间内提供较好近优解的启发式算法. 其本身所具有的长短期禁忌表和回跳等机制使得其在整个运算过程的前期可以成功地跳出局部最优而得以快速下降, 但在运行的后期靠其自身的力量已难以找到良好的搜索方向而最终仍要陷入局部最优. 为进一步改进解的质量, 在禁忌搜索运行后期引入基于随机 kick 移动的迭代局域搜索策略, 该策略的随机特性增强了算法脱离局部最优的能力, 从而有可能将搜索引入一个更为有利的空间以找到更好解.

#### 4.1 禁忌搜索算法

本文所采用的禁忌搜索算法的主要结构与 Nowicki<sup>[8]</sup> 中的相似, 为节省篇幅这里只介绍重点部分.

初始解: 首先按照料场的能力与固定费用的比值对料场进行排序, 之后开设未开料场中该比值最

大的那个料场并将其设为当前料场 将所有未安排存储空间的原料按其存在的状态分为块状原料、粉状原料和其他原料 对每一类原料,按照各原料运至当前料场的运输费用分别对它们进行排序 之后以块状原料、其他原料和粉状原料的顺序,将所有未分配原料排成一个未分配存储空间的原料序列并依次放入当前料场,直至该料场能力已被充分利用 重复前面的步骤直到所有的原料都被分配存储空间,此时得到问题的一个初始解 将原料按状态分类存放可以避免状态差别较大的块状原料和粉状原料处于同一料场的相邻位置而形成一个很大的惩罚

**邻域和禁忌表:** 由于搜索大规模的环交换邻域需耗费较多时间,故主体部分的禁忌搜索算法采用两交换移动来产生当前解的邻域 在每一次移动后,将参与该次移动的一对原料  $T_j = (g, h)$  记入到有固定长度  $\max T$  的禁忌表  $T$  中的最后一个位置(该移动被禁),同时该表中最旧的一个记录被删除(该移动解禁).

**两段搜索策略:** 1) 首先选择最好的未被禁移动或最好的被禁但可破禁的移动(移动后的目标值小于当前最好解); 2) 如果所有的移动都被禁并且不可破禁,则在禁忌表中填入一对  $(0, 0)$ ,使得表中最旧的记录得以释放,这个过程一直进行下去直到可以选出一个未被禁移动

**回跳机制:** 该机制利用长期表记忆在搜索过程中所找到的当前最好解的  $\max C$  个未被访问过的有利邻居和其对应的禁忌表 如果在连续  $\max I$  次连续迭代中没有改进当前最好解,则搜索从当前最好解处重新开始,此时搜索邻域由存储在长期表中的  $\max C$  个有利邻居组成,且禁忌表恢复至长期表中保存的禁忌状态 这一被称为回跳的过程及时变更了不利的搜索方向,从而增加了引导搜索朝向有利方向的可能性

**停止准则:** 当长期表为空或达到最大迭代次数时算法停止

#### 4.2 基于随机 kick 移动的迭代局域搜索策略及其嵌入禁忌搜索中的作用

迭代局域搜索算法最早由 Baum<sup>[9]</sup> 提出用来求解旅行商问题,之后引起了学术界的广泛关注 相对于禁忌搜索、遗传算法和模拟退火等近优算法而言,基于随机 kick 移动的迭代局域搜索算法具有比较简单的算法结构和随机的搜索方向,所以适宜将其用作随机扰动策略插入到禁忌搜索算法的运行后期,以提高整个算法的全局搜索能力

迭代局域搜索策略的核心要素是由一个或一组随机移动构成的随机 kick 移动 该移动的随机特性

有助于将搜索引入新的空间而脱离深陷的局部最优 在每次 kick 移动后进行局域下降搜索以进一步提高解的质量 为应对搜索陷入过深的局部最优或进行单次随机 kick 移动后解的质量变差的情况,在迭代局域搜索的每一次迭代中要进行连续多次的随机 kick 移动,其目的是为了找出多次 kick 移动所找到的最好的搜索方向 迭代局域搜索策略的主要步骤<sup>[10]</sup> 和其在禁忌搜索算法中的嵌入方式可以表示在图 3 中

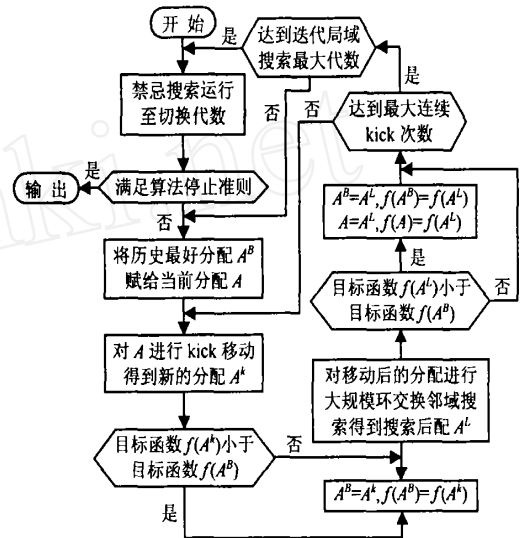


图 3 嵌在禁忌搜索中的迭代局域搜索策略流程图

当禁忌搜索自身难以找到好的搜索方向时(即已连续很长时间没有改进当前最好解),则在指定的切换代数切换至迭代局域搜索策略,待变更了搜索方向之后再切换回禁忌搜索进行运行 这一过程循环进行直至满足算法停止准则 这种嵌入方式的原理在于禁忌搜索本身的搜索能力较强,如果在其自身能够改进目标函数时就嵌入迭代局域搜索策略,该策略的随机特性有可能将搜索过早地引入不利的方向,使解的质量变差;而当禁忌搜索已深陷局部最优时,迭代局域搜索的随机特性则会起到快速脱离局部最优的作用,从而将搜索引入新的区域,增加改进目标函数的可能性 经过这种改进的禁忌搜索算法,既保留了其本身较为出色的局域搜索能力,又利用随机特性很好地增强了全局搜索能力

根据迭代局域搜索策略在禁忌搜索中的初步实验判断,当 kick 移动和局域下降算法与禁忌搜索的邻域构成有着较大不同时,改进后的禁忌搜索算法会取得较好的效果 故本文采用随机产生的两两互不交叉的多交换移动作为 kick 移动,每次 kick 产生的移动数  $k_n$  随着原料数的增加而增大;对于 kick 移动后的局域下降搜索,采用环交换移动构成其邻域

## 5 算法性能实验

本文共产生  $15 \times 10$  组例子, 采用 C++ 语言编写了所有算法程序, 并在 Pentium IV 系列主频 2.4 GHz 的计算机上, 对 150 组数据进行了实验仿真。原料运输费用、料场固定费用、物料之间的惩罚费用、料场总重量、料场总长度、原料重量、原料堆积长度均由专门的随机数产生程序生成。各参数分布区间根据宝钢原料场实际情况来确定。本文设定禁忌表长度为  $T=8$ , 长期表中可存储的最大未访问移动数  $\max C=50$ , 第 1 次执行回跳的连续未改进目标函数代数  $\max I=1000$ , 之后  $\max I=200$ , 最大迭代次数为  $I=5000$ 。当迭代次数达到 4000 时(经初步实验表明, 在各种算例下禁忌搜索算法运行至此切换代数已有连续 1500 代以上未改进当前最好解), 第 1 次切换到基于随机 kick 移动的迭代局域搜索策略, 之后每隔 400 代切换一次。

本文设计了两种多点下降算法作为两种禁忌搜索算法的对比算法。两个多点下降算法都采用交换移动来产生下降算法的搜索邻域。第 1 个多点下降算法采用随机方法来产生料场存储空间的分配, 而第 2 个多点下降算法首先对原料按照块状、粉状和其他状态进行分类, 之后按照块状、其他状态和粉状的顺序采用随机方法对各类原料进行存储空间分配。如果以  $TS^{LS}$  来代表嵌入迭代局域搜索策略的禁忌搜索算法,  $TS$  代表未加入随机策略的禁忌搜索算法,  $MS^1$  表示第 1 种多点下降算法, 以  $MS^2$  表示第 2 种多点下降算法, 则在相同的运行时间下实验结果如表 1 所示。

从以上运算结果, 可得出以下结论:

1) 基于随机 kick 移动的迭代局域搜索策略具有较强的跳出局部最优的能力, 经过该策略的引导,  $TS^{LS}$  比  $TS$  算法又改进了 1.58%。

2) 相对于两种多点下降算法,  $TS^{LS}$  和  $TS$  在目标函数上占有很大的优势(平均分别优于  $MS^1$  11.08% 和 9.50%, 优于  $MS^2$  11.99% 和 10.41%), 是明显有效的近优算法。

3) 两种多点下降算法性能基本相当, 在单种规模上各有优劣, 但总地来说  $MS^2$  要略逊于  $MS^1$ 。可见, 多点下降算法的每一个初始点的目标函数值好并不一定意味着最后结果也一定会好。这可能是由于  $MS^2$  的出发点产生原理使其多个初始点被限制在一定的范围之内, 从而有时会失去寻找更好解的机会。

4) 目前所解决的最大规模问题已高于宝钢实际的原料和料场数, 所以本文所设计的 4 种算法均可用于求解实际工业问题。

表1  $TS^{LS}$ ,  $TS$ ,  $MS^1$  和  $MS^2$  在相同运行时间下算法性能比较

原料数	料场数	归一化目标函数值				运行时间/s
		$TS^{LS}$	$TS$	$MS^1$	$MS^2$	
20	3	1.000 0	1.030 1	1.123 7	1.158 1	3.02
	4	1.000 0	1.019 0	1.158 5	1.137 8	3.58
	5	1.001 3	1.017 3	1.131 7	1.117 3	3.79
40	6	1.000 0	1.021 6	1.156 7	1.152 1	29.00
	8	1.000 0	1.023 5	1.148 2	1.135 1	36.50
	10	1.000 8	1.020 1	1.112 1	1.117 5	42.13
60	10	1.000 8	1.025 2	1.137 0	1.138 7	151.26
	12	1.000 1	1.021 7	1.102 3	1.107 1	164.04
	15	1.002 0	1.007 9	1.113 8	1.113 5	210.57
80	12	1.000 0	1.016 0	1.134 6	1.132 4	374.78
	16	1.000 4	1.015 0	1.119 6	1.117 2	449.41
	20	1.005 6	1.006 5	1.090 5	1.077 5	612.64
100	16	1.010 8	1.025 3	1.078 8	1.117 5	981.91
	20	1.013 5	1.018 6	1.063 2	1.092 9	1129.63
	25	1.018 1	1.024 1	1.044 8	1.137 5	1319.16
all		1.003 6	1.019 4	1.114 4	1.123 5	

## 6 结 语

本文研究了以降低费用和保持原料质量为目标的大型钢铁企业原料场存储分配问题。为该问题建立了非线性数学模型, 并提出了一种嵌入随机迭代局域搜索策略的禁忌搜索算法进行求解。该策略所使用的多交换随机 kick 移动和大规模环交换邻域很好地增强了禁忌搜索算法跳出局部最优的能力。通过对比实验证明了改进后的禁忌搜索算法是解决此类实际工业问题的快速有效的近优算法。这种基于随机 kick 移动的迭代局域搜索策略具有一定的推广性, 也可以应用到其他静态邻域搜索算法以帮助其跳出局部最优。

## 参考文献 (References)

- [1] Tragantalermsak S, Holt J, Ronnqvist M. An Exact Method for the Two-echelon, Single-source, Capacitated Facility Location Problem [J]. *European J of Operational Research*, 2000, 123(3): 473-489.
- [2] Mazzoia J B, Neebe A W. Lagrangian-relaxation-based Solution Procedures for a Multiproduct Capacitated Facility Location Problem with Choice of Facility Type [J]. *European J of Operational Research*, 1999, 115(2): 285-299.
- [3] Diaz J A, Fernández E. A Branch-and-price Algorithm for the Single Source Capacitated Plant Location Problem [J]. *J of the Operational Society*, 2002, 53(7): 728-740.

(下转第 665 页)

出了计程轮、低频电磁波和视觉传感器这 3 种方法来获取管道机器人的定位数据。在考虑 3 种传感器定位精度差异的基础上,给出了根据传感器优先权系数来计算传感器基本可信度的方法。通过多传感器信息融合规则,为管内移动机器人的控制器提供定位决策传感器。实验结果表明,该信息融合规则能够充分考虑 3 种传感器的定位精度及定位范围的不同,选择定位传感器;机器人根据定位传感器的特点控制机器人运动速度,实现管道机器人准确、快速地定位。

### 参考文献(References)

- [1] Choi H R, Ryew S M. Robotic System with Active Steering Capability for Internal Inspection of Urban Gas Pipelines[J]. *Mechatronics*, 2002, 12(5): 713-736
- [2] Zhang X G, Xu J J, Ge G Y. Defects Recognition on X-ray Images for Weld Inspection Using SVM [A]. *Proc of 2004 Int Conf on Machine Learning and Cybernetics* [C]. Shanghai: IEEE press, 2004: 3721-3725
- [3] 马红雨, 苏剑波. 基于自抗扰控制器的机器人无标定三维手眼协调[J]. *自动化学报*, 2004, 30(3): 400-406  
(MA H Y, SU J B. Uncalibrated Robotic 3D Hand-Eye Coordination Based on Auto Disturbance Rejection Controller [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(3): 400-406)
- [4] 付鹰, 蔡自兴, 杨勇. 移动机器人视觉导航的并行处理技术研究[J]. *华中科技大学学报*, 2004, 32(S): 80-82  
(Fu Y, Cai Z X, Yang Y. Parallel Processing Investigation for Mobile Robot Vision-navigation [J]. *J Huazhong University of Science & Technology*, 2004, 32(S): 80-82)
- [5] 张国亮, 赵彦玲, 王义文, 等. 焊缝视觉跟踪系统中标定算法的研究[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2005, 10(1): 25-28  
(Zhang G L, Zhao Y L, Wang Y W, et al. Study of Calibration in Auto-vision Welding Seam System [J]. *J Harbin University Science & Technology*, 2005, 10(1): 25-28)
- [6] Zhang X H, Li J Y, Chen H J. Visual Feature Recognition of an X-ray Based Inspection Pipeline Robot [A]. *The Fifth Int Conf on Control and Automation* [C]. Shanghai: IEEE press, 2005: 966-970
- [7] 赵凯华, 陈熙谋. *电磁学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990  
(Zhao K H, Chen X M. *Electromagnetism* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1990)
- [8] Luo R C, Scherp R S. Dynamic Multi-sensor Data Fusion System for Intelligent Robots [J]. *IEEE J Robotics and Automation*, 1998, 4(4): 386-396
- [9] Bogler P L. Shafer-dempster Reasoning with Applications to Multisensor Target Identification System [J]. *IEEE Trans on System, Man and Cybernetics*, 1987, 17(3): 968-977.
- [10] 朱大奇, 于盛林. 光电雷达电子部件故障的盲诊断方法研究[J]. *控制与决策*, 2004, 19(7): 746-750  
(Zhu D Q, Yu S L. A Blind Diagnosis Method for Photovoltaic Radar Electronic Equipment [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(7): 746-750)

(上接第 660 页)

- [4] Zhang C, Liu J, Wan Y W, et al. Storage Space Allocation in Container Terminals [J]. *Transportation Research, Part B*, 2003, 37(10): 883-903
- [5] Kim K H, Kim H B. The Optimal Sizing of the Storage Space and Handling Facilities for Import Containers [J]. *Transportation Research, Part B*, 2002, 36(9): 821-835
- [6] Kim K H, Park K T. A Note on a Dynamic Space-allocation Method for Outbound Containers [J]. *European J of Operational Research*, 2003, 148(1): 92-101
- [7] Kao C, Wu C, Li D C, et al. Scheduling Ship Discharging via Knowledge Transformed Heuristic Evaluation Function [J]. *Int J of Systems Science*, 1992, 23(4): 631-639
- [8] Nowicki E. The Permutation Flow Shop with Buffers: A Tabu Search Approach [J]. *European J of Operational Research*, 1999, 116(1): 205-219
- [9] Baum E B. Towards Practical 'Neutral' Computation for Combinatorial Optimization Problems [A]. *Proc AIP Conf 151* [C]. New York: American Institute of Physics, 1986: 53-58
- [10] 李韶华, 唐立新. FSFIS 问题的基于随机 kick 的 LS & TS 混合算法 [J]. *东北大学学报*, 2004, 25(6): 543-546  
(Li S H, Tang L X. LS&TS Hybrid Algorithm Based on Random Kick Mechanism for FSFIS Problem [J]. *J of Northeastern University*, 2004, 25(6): 543-546)