

文章编号: 1000-5862(2017)04-0354-06

基于改进的禁忌搜索算法求解带2维装箱约束的低碳车辆路径问题

王永胜, 万 龙*, 李胜胜

(1. 江西财经大学信息管理学院 江西 南昌 330013)

摘要: 同时考虑2维装箱和车辆路径2个NP难问题,以碳排放量为目标函数,对低碳环境下带2维装箱约束的车辆路径问题进行研究.求解思路是以禁忌搜索算法(Tabu Search, TS)为主要框架,然后基于贪心的思想采用4种启发式装箱策略生成初始解,并通过改进编码解码方式以及使用动态增长的禁忌长度对TS算法进行改进;由给出算例的计算结果可知,改进的禁忌搜索算法对于求解该类问题具有一定的优越性.

关键词: 低碳车辆路径问题; 改进的禁忌搜索; 贪心算法; 2维装箱约束

中图分类号: O 223 文献标志码: A DOI: 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.04.05

0 引言

作为全球最大的碳排放国,中国在2012年的排放量已增加至97亿t,4年里以每年8.5%的速度增长,几乎与GDP增速同步,中国也因此成为了头号雾霾大国.2014年初,中科院相关专家提出汽车尾气对PM_{2.5}的贡献率为22.2%,而广东专家则表示在珠三角地带,这一比例可能高达30%左右^[1].无论是从数据显示还是近年来广大群众对空气质量的切身感受来看,加大对低碳环境相关问题的研究力度至关重要.

本文基于低碳环境拟对带2维装箱约束的车辆路径问题(2LC-LCVRP)进行研究.其中,装箱问题(BPP)和车辆路径问题(VRP)都是组合优化中经常被学者独立研究的2个经典NP难题,虽然目前对于这2个难题都得到了一定质量的解,如求解2维装箱的著名近似算法包括最底最左算法BL(Bottom-Left)^[2]、最佳适应算法BF(Best-Fit)^[3]、砌墙式启发式算法^[4]和一系列拟人拟物算法^[5-6];求解路径规划问题的旅行商法、动态规划法等^[7];但是若从现实生活中的应用出发将2个问题合并,之前得到的许多部分优秀解就会变为不可行,需要兼顾装箱和路径2方面的约束才能实现全局最优.此外,物

流企业在对货物装载之前,往往都会将货物打包成垛,然后利用叉车的优越性对一个个垛进行装载;这样,现实生活中的3维装箱问题实际上就简化成一个2维装箱的问题.

基于以上背景,本文同时考虑2维装箱和车辆路径2个NP难问题,以碳排放为目标函数,然后基于带2维装箱约束的特点,提出了改进的禁忌搜索(Enhance-Tabu Search, E-TS)算法对2LC-LCVRP进行求解.目前研究2LC-LCVRP的主要文献有: E. E. Zachariadis等^[8]结合禁忌搜索算法与引导性局部搜索策略,提出了引导性禁忌搜索算法; G. Fuellerer等^[9]以蚁群算法为主框架,在其中融入了同时考虑装箱和路径的启发式知识,并针对2LC-LCVRP 4个版本的变体问题分别进行了研究.

1 问题建模

带2维装箱约束的低碳车辆路径问题(2LC-LCVRP)可定义在图 $G = (V, N)$ 上,其中 $V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$, v_0 为配送中心, $v_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为 n 个客户点, $N = \{(v_i, v_j) | i \neq j\}$, 每条边 $(v_i, v_j) \in N$ 代表 v_i 到 v_j 的距离(可记为 d_{ij}),每辆车(同型车辆)的最大载重均为 Q ,车厢的底面尺寸均为 $L \times W$,客户点 v_i 需求货物的总质量为 q_i ,其第 m 个货物在车

收稿日期: 2017-03-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11601198),江西省教育厅科技计划(GJJ150464, GJJ160457),江西省社会科学规划(15GL12)和江西财经大学第十一届学生科研课题(XS16486, XS16470)资助项目.

通信作者: 万 龙(1981-),男,江西南昌人,副教授,博士,主要从事调度问题的算法研究. E-mail: cocu3328@163.com

厢底面投影为一个 $l_{im} \times w_{im}$ 尺寸的小矩形,以车厢底面的左下角为坐标原点,其长度平行于 y 轴,宽度平行于 x 轴,每个客户点的坐标位置均已知,以矩形左下角的坐标 (h_{im}, p_{im}) 代表客户点 v_i 的第 m 个货物装入后的坐标位置,问题要求给出一个优秀的路径规划方案使其在满足以下条件下实现碳排放总量最小,约束条件为: 1) 每辆车均是从配送中心出发,完成配送任务后必须返回到配送中心; 2) 每条路径上所有货物的总质量小于车辆的最大载重; 3) 每个客户点的需求均被满足且只能被访问一次; 4) 每个车厢中的矩形(货物在车厢底面的投影)之间不能发生重叠,且能够被完全装入.

根据 H. R. Kirby 等^[10]的研究,碳排放量与耗油量之间成正比例的关系,并且可由一个常数 r 将碳排放量近似转化为耗油量;因此,可将碳排放的计算公式定义为 $C = r f f$ 为耗油量;基于文献 Xiao Yiyong 等^[11]考虑耗油量与车辆载重和运输距离相关,并且是成正相关的关系.因此,每单位距离的碳排放的计算公式可进一步写为 $C = r[a(Q_0 + q_{ij}) + b]$,其中 a, b 分别为常数, Q_0 为车辆自重, q_{ij} 为从客户点 v_i 到客户点 v_j 的实际载重,设完成任务所需车辆数为 m ,而配送中心拥有足够多的车辆.

将2个变量定义为

$$x_i^j(k) = \begin{cases} 1, & \text{车辆 } k \text{ 由第 } i \text{ 个客户驶至第 } j \text{ 个客户,} \\ 0, & \text{其他,} \end{cases}$$

$$y_i(k) = \begin{cases} 1, & \text{第 } i \text{ 个客户的任务有车辆 } k \text{ 来完成,} \\ 0, & \text{其他,} \end{cases}$$

则将问题建立数学模型,目标函数为

$$\min Z = r \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m [a(Q_0 + q_{ij} + b) d_{ij} x_i^j(k)], \quad (1)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^n q_i y_i(k) \leq Q, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m y_i(k) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i^j(k) = y_j(k), \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^n x_i^j(k) = y_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad k = 1, 2, \dots, m, \quad (5)$$

$$0 \leq h_{im} \leq W - w_{im}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

$$0 \leq v_{im} \leq L - l_{im}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (7)$$

$$h_{im} + w_{im} \leq h_{i'm'},$$

$$i, i' = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq i', \quad m \neq m', \quad (8)$$

$$v_{im} + l_{im} \leq v_{i'm'},$$

$$i, i' = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq i', \quad m \neq m', \quad (9)$$

其中 d_{ij} 为从客户点 v_i 到客户点 v_j 的直线距离, $i'm'$ 表示客户点 i' 的第 m' 件货物, (1) 式为完成所有配送任务所产生的碳排放总量, (2) 式为车辆载重约束, (3) 式表示每个客户点只能被访问一次, (4) 式和 (5) 式表示车辆从配送中心出发,完成任务后返回配送中心, (6) 式和 (7) 式为完全装入约束, (8) 式和 (9) 式表示装入的矩形两两之间不发生重叠.

2 2LC-LCVRP 的求解算法

对于求解 2LC-LCVRP 问题,主要思路是以禁忌搜索(Tabu Search, TS) 算法为求解框架,然后基于贪心的思想对 TS 算法进行改进,以路径规划为重点,辅以装箱约束和载重约束的检查给出由 n 个客户点及配送中心排列而成的序列,最终基于该序列生成 m 条车辆路径.

2.1 改进的禁忌搜索算法

对于求解 2LC-LCVRP 问题,采用禁忌搜索算法可以避免迂回搜索,具有速度快、效率高的优点;但是大多数文献都是采用随机的策略选取一个初始解,然后基于该初始解来进一步探索全局最优解的思路;与文献不同的是:本文首先基于带 2 维装箱约束本身的特点提出用贪心的思想将配送中心及 n 个客户点编码为 4 个初始序列,再通过给出的解码方式将 4 个初始序列分别断开,生成 4 个初始解;然后调用目标函数选取函数值最小对应的解为确定初始解;最后基于给出的编码和解码方式通过 1-0 交换和逆转这 2 种邻域算子分别进行邻域搜索.

改进的禁忌搜索算法主要步骤如下:

步骤 1 选取确定的初始解 x_{begin} , 禁忌表设置为 $Z = (\text{空集})$;

步骤 2 若达到给定的迭代步数,则转入步骤 5; 否则,在当前解 x_{now} 的邻域 $N(x_{now})$ 中选出候选解 x ;

步骤 3 判断 x_i 是否满足特赦准则,若满足,则更新全局最优状态和当前解为 x_i ,同时更新禁忌表,转入步骤 2; 否则,转入步骤 4;

步骤 4 判断候选解 x 的禁忌属性,选择候选解集中非禁忌对象对应的最佳状态为当前解 x_{now} ,同时将候选解集中的禁忌对象加入禁忌表并更新禁忌表,转入步骤 2;

步骤 5 输出全局最优状态.

2.1.1 生成确定的初始解 与传统编码方式不同,本文采用带约束的自然数编码方式;首先将配送中心(用自然数 0 表示)作为第 1 个节点,然后选取全部货物质量最大的客户点作为第 2 个节点,基于

该节点分别计算到其他未服务的 $n-1$ 个客户点之间的碳排放量,选取碳排放量最小的客户作为第 3 个节点,以此类推,除自然数 0 的下一个节点按质量最大选取外,其他节点一律按碳排放量最小选取,依次得到第 t 个节点(n 个客户点全部排列完);其中,当选取客户 $v_i (i=1, 2, \dots, n)$ 作为第 $j (j=1, 2, \dots, t)$ 个节点时,同时需要检查 v_i 在第 j 个节点上是否满足装箱约束和载重约束,若其中的任何一条约束不满足,则在第 $j-1$ 与第 j 个节点之间加自然数 0 (代表配送中心),然后重新选取第 j 个节点;否则,继续选取第 $j+1$ 个节点;最后将得到的 t 个节点的客户编号依次排列形成一个初始序列 R (如 0-3-2-6-0-4-8-1-5-7)。

当选择第 i 个客户 v_i 时,首先比较客户 v_i 所有货物的总质量 q_i 与车厢剩余载重 Q_{remain} 的大小,若 q_i 不超过 Q_{remain} ,则将 v_i 的所有货物分别按面积、质量、长度、宽度从大到小的顺序依次排列形成 4 个矩形序列,记为 $R_i(j) (j=1, 2, 3, 4)$,然后调用装箱算法装载 v_i 的货物;否则,返回不满足载重约束的结果;若装箱算法能够将 v_i 全部货物装入,则满足装箱约束,否则,返回不满足装箱约束的结果。

由以上的编码方式可知,对于任意给定 n 个客户点,可由给出的编码方式生成 4 个初始序列,但这 4 个初始序列都不是问题的可行解,需要采用合适的解码方式将初始序列解码。以其中的一个初始序列为例,本文采用的方法是首先在得到的初始序列尾部加自然 0 (如 0-3-2-6-0-4-8-1-5-7-0),然后以自然数 0 为分界点断开初始序列,形成若干个新的序列,其中要求每个新的序列首尾必须为自然数 0,没有 0 的补上 0 (如 0-3-2-6-0, 0-4-8-1-5-7-0); 2 个 0 之间的序列即为一辆车的初始路径,这样 m 个新的序列就构成该问题的一个初始解,共有 4 个初始解。

对于以上生成的 4 个初始解,调用碳排放的计算公式,取碳排放量最少的那个初始解为确定初始解;由初始解的产生过程可知,矩形(代表货物在车厢底面的投影)的异构性越强,产生的 4 个初始解相同的概率就越小,初始解的优度就越高;退一步,即使 4 个初始解相同,也可通过碳排放的计算公式过滤掉相同的初始解,但是却可以通过这种改进的编码方式降低禁忌搜索(TS)算法对初始解的高度依赖性。

2.1.2 邻域的结构设计 显然,初始序列 R 中自然数 0 的位置决定了每条路径的划分,只有当第 j 个节点不满足装箱约束或者载重约束时,才会在第 $j-1$ 与第 j 个节点之间加自然数 0,即当装载当前客户

点货物之前,可用矩形空间列表 S_{List} 和车厢剩余载重 Q_{remain} 均大于或等于 0;而本文的初始序列正是基于贪心的思想按碳排放量排序得到,极有可能后面客户的货物底面积和总质量远小于前面的货物;也就是说,当第 j 个节点不满足装箱约束或者载重约束时,通过交换第 j 个节点的客户点和第 $j+x (j+1 \leq j+x \leq t)$ 个节点的客户点,极有可能使第 j 个节点满足装箱约束以及载重约束,则第 1 辆车的利用率就可以进一步提高,后面每辆车的利用率也可能会出现变化,目标函数值也会因此不同。从另一个角度讲,若通过交换子路径上的 2 个客户点,也可能由于货物的拼装结构发生变化导致车厢能够继续装载更多货物,进而提高车厢的利用率,对目标函数也可能产生影响。因此,从优化的角度来看这 2 种搜索方法都是很好的优化方向。

基于以上分析,采用 2 种邻域算子进行邻域搜索,分别为 1-0 交换和逆转;其中 1-0 交换也称为 Swap 移动,即将子路径中的某一客户点插入另一条子路径中,如初始序列 0-3-2-6-0-4-8-1-5-7-0 中将 7 插入 6 与 0 之间,则新的序列变为 0-3-2-6-7-0-4-8-1-5-0,属于路径间的优化。逆转是将子路径某部分逆转,如初始序列 0-3-2-6-0-4-8-1-5-7-0 中将 8 和 5 逆转,新的序列变为 0-3-2-6-0-4-5-1-8-7-0,属于路径内部优化。需要注意的是 2 种搜索方法都需要对载重约束和装箱约束进行验证。本文以目标函数作为评价函数,目标函数的值越小,对应解的优度越高。

2.1.3 禁忌对象 每次迭代得到的局部最优解即为禁忌对象,把各个禁忌对象加入禁忌表中,通过禁忌长度的控制来更新禁忌表;用 1 和 -1 来标记各个禁忌对象的禁忌状态。

2.1.4 禁忌长度 禁忌长度是禁忌对象在不考虑藐视准则的前提下不被选取的最大次数。与文献中的方法不同,本文采用动态增长机制的策略,将禁忌长度构建为一个与迭代次数 k 相关的线性方程,即 $\theta = a_0 + \sigma k$ (其中 a_0 和 σ 均为常数),这样禁忌长度在迭代初期比较小,可以实现分散搜索的目标,从而避免陷入局部最优,浪费时间;到迭代后期,寻找最优解特别困难,这个时候禁忌长度比较大,便于收敛结果。

2.1.5 特赦准则 由以上提出的禁忌长度动态增长的特点可知,随着往后逐步迭代,禁忌长度也逐步增大,在某一过程中,可能会出现全部候选解被禁忌而此时返回结果优度不高这样的状态;为实现更好的优化性能,可以采用以下策略:若某个禁忌对象优于当前最佳状态,则不考虑此禁忌对象的禁忌属性,直接更新当前最佳状态为该禁忌对象。这种策略为

特赦准则。

2.2 首适应启发式装箱算法

2维装箱问题是2LC-LCVRP的一个子问题,很多学者是将2维装箱问题独立出来研究,这样缺点是不能兼顾车辆路径问题,导致最终给出的方案不一定是目标函数的最优解。为避免此缺点,以车辆路径问题为主线,辅以装箱问题的检查共同生成合理的初始路径。本节中主要讨论装箱问题,主要思路为给定一个小矩形的有序序列,装箱算法按照顺序把小矩形依次装入车厢底部。在装箱过程中,用“可用矩形空间”来表示每个小矩形的可放位置,然后采

用首适应策略来装填每个小矩形。

2.2.1 矩形空间 车厢底面可分成已用区域和可用区域,其中已用区域由所有已放入的矩形(货物在车厢底面的投影,后文不再解释)组成,可用区域是指车厢底面中的其它区域。如图1(a)所示,黑色部分表示已用区域,白色部分表示可用区域;其中可用区域又可用若干个矩形区域表示,图1中,可用区域可由 S_{12} 、 S_3 和 S_4 表示。把包含车厢门的那条边的矩形区域称为可用矩形空间, S_3 、 S_4 都是可用矩形空间而 S_{12} 不是。对于一个可用矩形空间 S ,可以用 S 的左下角坐标(S_x , S_y)以及其宽度 S_w 和长度 S_l 来描述。

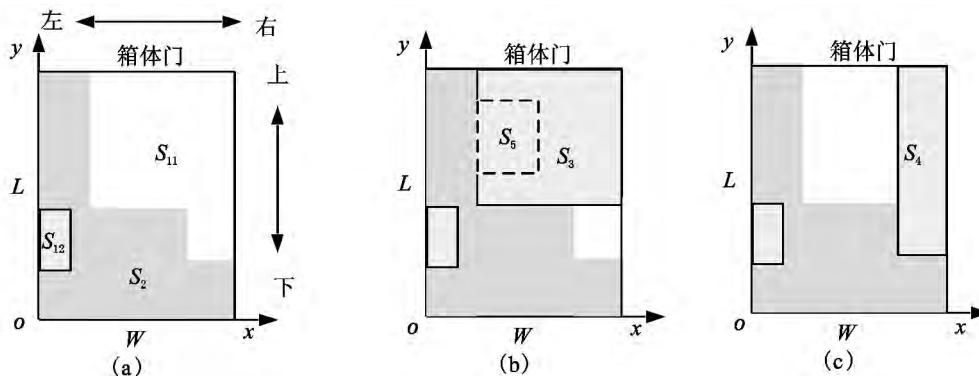


图1 可用矩形空间的例子

给定2个可用矩形空间 S 和 S' ,如果 S 和 S' 左下角 x 坐标相同且 S 被 S' 包含,即($S_x = S'_x$) \wedge ($S_y \geq S'_y$) \wedge ($S_w \leq S'_w$) \wedge ($S_l \leq S'_l$),则称 S 被 S' 支配。称不被其它可用矩形空间支配的可用矩形空间为极大可用矩形空间。在图1中, S_5 被 S_3 支配,因此 S_5 不是极大可用矩形空间,而 S_3 不被其可用矩形空间支配,因此 S_3 是极大可用矩形空间。

在装箱过程中,算法维护一个极大可用矩形空间的列表 S_{List} 。一开始,整个车厢底面可以用一个左下角在(0,0)点,宽为 W ,长度为 L 的极大可用矩形空间表示。在每一步装填过程中,把一个小矩形 r 放在所选的极大可用矩形空间 S 内(小矩形的左下角对应极大可用矩形空间的左下角),然后通过下面步骤来更新 S_{List} : 1) 把 S 从 S_{List} 中删除并引入2个新的可用矩形空间,这2个新的可用空间是通过选取 S 的3条边(必须包含箱体门的那条边)和 r 的1条边来生成的(见图2), S_1 通过 S 的左右上3条边和 r 上部的边生成, S_2 通过 S 的下边、上边和右边以及 r 的右边生成。2) 检查 S_{List} 中的每一个可用矩形空间 S' ,如果 S' 跟 r 相交,首先把 S' 从 S_{List} 中删除,同时生成最多可能的3个新的可用矩形空间。这3个新的可用矩形空间是通过选取 S' 的3条边(必须包含箱体

门的那条边)和 r 的1条边生成的,如图3所示。 S'_3 是由 S' 的左、右、上3条边和 r 上部的边生成。

对于每一个新生成的可用矩形空间,为了保证其是极大可用矩形空间,把它与 S_{List} 中已经存在的极大可用矩形空间逐个比较,只有当这个可用矩形空间没有被已存在极大可用矩形空间支配时,这个可用矩形空间才会加入 S_{List} 中。在图2和图3中, S'_2 不会被加入列表中,因为 S'_2 被 S_2 支配。

2.2.2 基于可用矩形空间的首适应启发式装箱算法 给定车厢底部长度和宽度分别为 L 、 W ,一个矩形序列 $R_i(j)$ ($j = 1, 2, 3, 4$),基于可用矩形空间的首适应启发式算法(First Fit Pack)依次装填 $R_i(j)$ 中的矩形,并返回最终装填方案的极大可用矩形空间列表 S_{List} 以及车辆剩余载重 Q_{remain} ;在整个装填过程中,该算法维持一个极大可用矩形空间的列表 S_{List} 。首先,用一个极大可用矩形空间表示初始车厢初始底面并把该可用矩形空间加入列表 S_{List} 中,然后按给定顺序依次装填 $R_i(j)$ 中每一个矩形。对每个矩形 r ,首先从 S_{List} 中找到第1个能装入 r 的极大可用矩形空间 S 。如果没能找到合适的 S ,则返回不满足装箱约束的结果并将 $R_i(j)$ 中所有已装载的小矩形块卸出;否则,把 r 放入 S 中(r 左下角对应 S 左

下角) 并把 r 从 $R_i(j)$ 中删除, 同时更新 S_{List} 和车厢剩余载重 Q_{remain} . 在更新 S_{List} 的过程中, 维持整个列表的有序性, 使得左下角坐标 y 值小的开空间排在 y 的值大的开空间前面. 如果 y 值相同, 则比较 x 值, 使

得 x 值小的排前面. 也就是说, 优先使用靠下靠左的可用矩形空间. 这吻合问题的目标——在载重允许下装载更多的矩形, 提高车厢利用率.

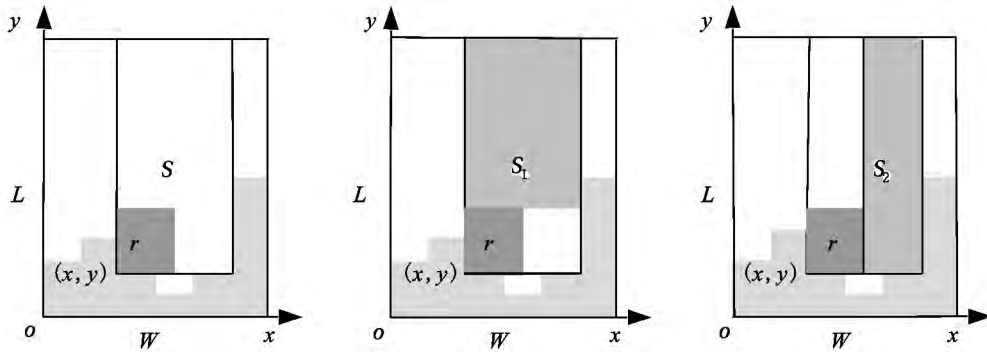


图2 生成开空间第1步

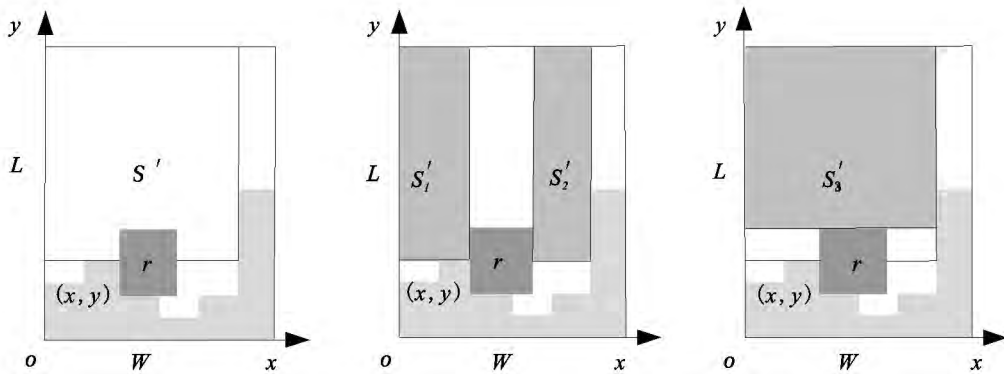


图3 生成开空间第2步

算法 First Fit Pack 如下:

Begin algorithmic

Input Q : 车厢允许的最大载重 S : 车厢底面尺寸

寸 $R_i(j)$: 客户点 v_i 所有货物排列的其中一种序列;

While($R_i(j)$ 不为空) do

$r = R_i(j)$ 中第 1 个未装载的矩形;

按顺序从 S_{List} 中找到第 1 个能放入 r 的矩形空间 G ;

If(找到合适的该开空间 G)

把 r 放入 G 中并把 r 从 $R_i(j)$ 中删除;

更新可用矩形空间列表 S_{List} 和车厢剩余载重 Q_{remain} ;

Else

返回不满足装箱约束的结果并将 $R_i(j)$ 中所有已装载的小矩形块卸出;

End If

End While

返回此时车厢的剩余载重 Q_{remain} 和列表 S_{List} ;

End algorithm

3 实验结果分析

本实验中的算例由 1 个配送中心、8 个客户构成, 单位距离的碳排放的计算公式中设定 a 为 0.05, b 为 0.03, 碳排放量与耗油量之间的近似转换系数 r 为 0.25, 每辆车的最大载重为 8 t, 车辆的尺寸为 8×25 , 已知配送中心(以 0 代表)、各个客户点的坐标位置及各客户点的货物总质量 q_i 如表 1 所示; 同时为了系统测试改进禁忌搜索算法性能, 将每个客户点的货物数量和货物尺寸用 2 种随机规则产生; 规则 1 将各个客户点的货物数量及货物尺寸都设定为 1, 这相对于车厢尺寸来说是个很小的值, 因此, 车厢的载重约束总能先于装箱约束起作用, 于是, 规则 1 产生的问题就完全等同于 CVRP 问题; 规则 2 随机产生每个客户的货物数量及货物尺寸, 如表 2 所示.

表 1 配送中心及各个客户点的坐标

客户编号	客户货物 总质量 /t	横坐标 x/km	纵坐标 y/km
0	0	3	4
1	4	2	3
2	1	4	3
3	1	3	5
4	2	1	2
5	2	7	3
6	1	2	6
7	1	5	1
8	3	6	4

根据规则 1 问题得到的最优解为 0-1-4-6-3-0 , 0-8-5-7-2-0 ,总碳排放量为 $Z = 5.649\ 79\ \text{kg}$.

表 2 各个客户的货物参数

客户编号	各个客户货物数量	货物尺寸
0	0	无
1	5	(1 ,1) (6 ,3) (5 ,5) (2 ,3) (2 ,1)
2	3	(2 ,2) (1 ,1) (2 ,3)
3	2	(2 ,1) (2 ,2)
4	8	(4 ,3) (3 ,2) (3 ,1) (3 ,1) (4 ,1) (2 ,3) (2 ,1) (2 ,4)
5	5	(5 ,5) (5 ,5) (5 ,1) (3 ,2) (1 ,1)
6	4	(6 ,7) (3 ,5) (3 ,3) (3 ,6)
7	3	(3 ,3) (4 ,1) (2 ,1)
8	7	(5 ,3) (5 ,2) (4 ,2) (3 ,5) (4 ,2) (2 ,1) (1 ,1)

注: 表 2 中括号里的数据表示货物底面的长和宽 ,如(1 ,1) 表示货物底面的长为 1 ,宽为 1.

根据规则 2 ,问题得到的最优解为 0-1-4-6-0 ,0-8-5-7-2-3-0 ,总碳排放量为 $Z = 6.073\ 38\ \text{kg}$.

为了评价本文中改进禁忌搜索算法的性能 ,将其与遗传算法、禁忌搜索算法比较 ,遗传算法由规则 1 得到的总碳排放量为 $5.648\ 91\ \text{kg}$,规则 2 得到的总碳排放量为 $5.852\ 31\ \text{kg}$; 传统禁忌搜索算法由规则 1 得到的总碳排放量为 $5.648\ 70\ \text{kg}$,由规则 2 得到的总碳排放量为 $6.635\ 68\ \text{kg}$; 由 3 种算法的结果可知 ,对于求解带装箱约束的车辆路径规划问题 ,改进的禁忌搜索算法性能较传统禁忌搜索算法有较大提升 ,而对于传统 VRP 问题 ,其与遗传算法性能相当.

4 结论

本文以禁忌搜索算法为求解框架 ,首先基于贪心的思想生成初始解 ,然后通过改进编码解码方式

以及使用动态增长的禁忌长度对禁忌搜索算法进行改进 ,从而降低了 TS 算法对初始解的依赖程度 ,通过给出算例的计算结果可知 ,改进的禁忌搜索算法对于求解带装箱约束的低碳车辆路径问题具有一定的优越性.

5 参考文献

[1] 张如云 ,刘清. 考虑低碳的城市配送车辆路径优化模型研究 [J]. 工业工程与管理 ,2015 ,20(4) : 29-34.

[2] Baker B S ,Coffman E G J ,Rivest R L. Orthogonal packings in two dimensions [J]. Siam Journal on Computing ,1980 ,9(4) : 846-855.

[3] Wei Lijun ,Qin Hu ,Cheang B ,et al. An efficient intelligent search algorithm for the two-dimensional rectangular strip packing problem [J]. International Transactions in Operational Research ,2016 ,23(1/2) : 65-92.

[4] 张德富 ,韩水华 ,叶卫国. 求解矩形 Packing 问题的砌墙式启发式算法 [J]. 计算机学报 ,2008 ,31(3) : 509-515.

[5] Huang Wenqi ,Chen Duanbing ,Xu Ruchu. A new heuristic algorithm for rectangle packing [J]. Computers and Operations Research ,2007 ,34(11) : 3270-3280.

[6] He Kun ,Huang Wenqi ,Jin Yan. An efficient deterministic heuristic for two-dimensional rectangular packing [J]. Computers and Operations Research ,2012 ,39(7) : 1355-1363.

[7] Gillett B E ,Miller L R. A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem [J]. Operations Research ,1974 ,22(2) : 340-349.

[8] Zachariadis E E ,Tarantilis C D ,Kiranoudis C T. A guided tabu search for the vehicle routing problem with two-dimensional loading constraints [J]. European Journal of Operational Research ,2009 ,195(3) : 729-743.

[9] Fuellerer G ,Doerner K F ,Hartl R F ,et al. Ant colony optimization for the two-dimensional loading vehicle routing problem [J]. Computers & Operations Research ,2009 ,36(3) : 655-673.

[10] Kirby H R ,Hutton B ,Mcquaid R W ,et al. Modelling the effects of transport policy levers on fuel efficiency and national fuel consumption [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment ,2000 ,5(4) : 265-282.

[11] Xiao Yiyong ,Zhao Qihong ,Kaku I ,et al. Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem [J]. Computers and Operations Research ,2012 ,39(7) : 1419-1431.

The Congruences on Normal Cryptic rpp Semigroups

GUO Junying¹, GUO Xiaojiang^{2*}, YE Huoping²

(1. College of Science and Technology, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330027, China;

2. College of Mathematics and Informatics, Jiangxi Normal University, Nanchang Jiangxi 330022, China)

Abstract: The congruences on normal cryptic rpp semigroups is studied by the abundant semigroup theory. The construction of \mathcal{L}^* -unary congruences on normal cryptic rpp semigroups is established by introducing the concept of \mathcal{L}^* -unary congruence aggregate. In addition, some special cases are considered.

Key words: rpp semigroup; super rpp semigroup; cryptic rpp semigroup; unary congruence

(责任编辑: 曾剑锋)

(上接第 359 页)

The Enhanced Tabu Search Algorithm for Solving Low-Carbon Vehicle Routing Problem with Two-Dimensional Box Constraints

WANG Yongsheng, WAN Long*, LI Shengsheng

(1. School of Information Management, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: Two NP hard problems of two-dimensional packing and vehicle path are considered, and Carbon emissions are taken as the objective function, which studies the vehicle routing problem (2L-CVRP) with two-dimensional packing constraints in low-carbon environment. The main idea is to take the tabu search algorithm (Tabu Search TS) as the main frame for this problem and use four heuristic boxing strategy to generate the initial solution based on the greedy idea, by improving the encoding and decoding methods and using the dynamic growth of the tabu length of the TS algorithm to enhance this algorithm. The results show that the enhanced tabu search algorithm has some advantages for solving this kinds of problems.

Key words: the vehicle routing problem in low carbon; enhanced tabu search algorithm; greedy algorithm; two-dimensional packing constraint

(责任编辑: 曾剑锋)