

分区域多目标进化算法在协同车辆路径问题中的应用

谢桂芬, 涂井先

(广东工业大学 应用数学学院, 广东 广州 510520)

摘要: 在以原有的车辆配送总费用最小化为目标的基础上, 兼顾顾客的满意度目标, 建立带有时间窗的多物流中心协同配送的车辆路径多目标优化问题的数学模型. 对建立的多目标优化问题, 采用分区域多目标进化算法思想, 构造了利于产生可行解的编码方式, 从而提高算法的运行效率. 通过算例验证了建立的模型能有效地解决协同物流配送车辆路径问题.

关键词: 协同运输; 多目标优化; 进化算法; 车辆路径问题

中图分类号: TP183

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2011)04-0038-07

物流配送优化主要是对车辆路径的优化问题, 车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem, VRP)^[1] 最早由 Dantzig 和 Ramser 于 1959 年提出, 是现代物流配送领域的一个核心问题. 带时间窗的车辆路径问题 (Vehicle Routing Problem with Time Window, VRPTW)^[2-3] 是对简单车辆路径问题 VRP 的扩展, 它是在 VRP 问题的基础上增加了服务时间窗的限制, 这里的服务时间窗是指车辆到达各客户的时间范围. 多物流中心的物流配送问题 (Multi-Depot VRP, MDVRP)^[4-6] 是基本车辆路径问题的进一步扩展, 协同配送车辆路径问题 (Collaborative Vehicle Routing Problem, CVRP)^[7] 是 MDVRP 发展的高级阶段. 协同配送是指各物流企业共享各种资源信息, 如客户、仓库等, 通过 Internet 等信息技术创造协同环境, 为所属不同公司的客户统一配送货物以降低物流配送成本. 由于通讯和计算机技术的发展为协同运输提供了技术保障, 因此协同运输问题将成为物流领域的重要研究内容之一.

目前, 国内外对多物流中心协同配送车辆路径问题的研究还很少, 而且现有的研究仅以降低配送总费用为目标的单目标车辆路径优化调度, 求解算法也是分两阶段化, 第一阶段将多物流中心问题转化为单物流中心问题, 第二阶段再对每个物流中心分别按单物流中心求解, 这样只具有局部优化的性质. 带有时间窗的多物流中心协同配送的车辆路径问题的目标应主要包括: (1) 合理安排物流配送使得成本最低; (2) 按照客户的要求及时配送货物提高物流服务质量. 以上目标相互联系、彼此影响, 组

成一个目标体系, 因此对协同配送中的车辆路径问题所建立的模型应该是多目标的. 基于此, 本文在原有的车辆配送总费用最小化为目标的基础上, 兼顾顾客的不满意度最小化目标, 建立带有时间窗的多物流中心协同配送的车辆路径多目标优化问题 (Multi-Depot Collaborative Vehicle Routing Problem with Time Window, MDCVRPTW) 的多目标数学模型. 随着客户对物流配送及时性要求的提高, 并且由于许多定性因素难以量化, 本文主要通过配送及时性衡量客户满意度. 该车辆路径问题是多种约束、多个目标的 NP 难题, 考虑问题的复杂性, 本文采用文献 [8-9] 的分区域多目标进化算法思想用于求解问题. 根据问题的特点在算法求解过程中构造一种新的编码方式, 能够更有利地产生初始可行解, 并更有利于杂交变异后产生可行解, 从而提高算法的运行效率. 最后通过算例验证了该模型的建立能有效地解决 MDCVRPTW, 多物流中心相互协作不仅能降低系统配送总成本, 而且能减少系统时间, 提高物流配送服务质量. 多目标优化得到的一组 Pareto 最优解更有利于决策者做出正确的决策.

1 问题描述及数学建模

本文所研究的 MDCVRPTW 可描述为: 属于不同公司的 M 个物流中心 (物流中心编号 $m = 1, 2, \dots, M$) 为跨区域的 N 个客户 (客户编号 $n = 1, 2, \dots, N$) 协同配送货物; 第 n 个客户的坐标位置为 (x_n, y_n) , 货物需求量为 $g(n)$, 要求接受货物的最早服务时间为 $Et(n)$, 最迟的服务时间为 $Lt(n)$, 考虑卸货、

收稿日期: 2011-07-06

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (10251009001000002)

作者简介: 谢桂芬 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为多目标进化算法.

搬运的服务时间为 $T(n)$; 物流中心 m 坐标位置为 (x_m, y_m) , 拥有足量可供调度的车辆总数为 m_k (车辆编号 $k = 1, 2, \dots, m_k$), 车辆 k 的最大载重量为 $g_{\max}(m, k)$, 平均车速为 $v(m, k)$, 行驶每公里消耗费用为 $pc(m, k)$, 调度车辆 k 的固定费用为 $pf(m, k)$. 已知: 各个物流中心各自拥有一定的客户, 即每个客户在协同配送前都有指定负责配送的物流中心, 在协同配送中, 客户的货物需求除了可以由先前指定的中心配送外还可以由其他对该客户可提供货物的中心配送, 每个客户只能由一个物流中心配送, 即每个客户只能由一辆车一次性服务, 车辆均从配送中心出发最后回到原配送中心, 如何规划协同运输调度方案, 使得总运输费用最小, 且顾客的不满意度最小.

对模型中的变量定义如下:

$D(i, j)$: 坐标点 i 到点 j 的距离, 可以是顾客到顾客、顾客到中心或中心到顾客的距离.

$$S(m, k, n) = \begin{cases} 1, & \text{物流中心 } m \text{ 派出车辆 } k \text{ 为客户 } n \text{ 配送货物,} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

$$L(m, k, i, j) = \begin{cases} 1, & \text{物流中心 } m \text{ 派出车辆 } k \text{ 经客户 } i \text{ 到达客户 } j, \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

$$FL(m, k, n) = \begin{cases} 1, & \text{站点 } n \text{ 为物流中心 } m \text{ 派出车辆 } k \text{ 服务的第一个客户或最后一个客户,} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

数学模型建立:

$$\min Z_1 = \left\{ \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{m_k} pf(m, k) f(S(m, k, n)) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{m_k} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N L(m, k, i, j) D(i, j) pc(m, k) + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{m_k} \sum_{n=1}^N FL(m, k, n) D(m, n) pc(m, k) \right\}. \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_{i=1}^N p(i). \quad (2)$$

s. t

$$\sum_{n=1}^N g(n) s(m, k, n) \leq g_{\max}(m, k), m = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, m_k. \quad (3)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{m_k} S(m, k, n) = 1, n = 1, 2, \dots, N. \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N L(m, k, i, j) = S(m, k, j), m = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, m_k; j = 1, 2, \dots, N. \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^N L(m, k, i, j) = S(m, k, i), m = 1, 2, \dots, M; k = 1, 2, \dots, m_k; i = 1, 2, \dots, N. \quad (6)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{m_k} \sum_{n=1}^N S(m, k, n) = N. \quad (7)$$

$$T_{mk}(j) = T_{mk}(i) + \max \{ (Et(i) - T_{mk}(i)), 0 \} + T(i) + \frac{D(i, j)}{v(m, k)}, L(m, k, i, j) = 1. \quad (8)$$

$$T_{mk}(i) - Lt(n) \leq \Delta t. \quad (9)$$

$$p(i) = p_1 \max \{ (Et(i) - T_{mk}(i)), 0 \} + p_2 \max \{ (T_{mk}(i) - Lt(n)), 0 \}. \quad (10)$$

$$f(S(m, k, n)) = 1 - \max \left\{ 1 - \max \left\{ \sum_{n=1}^N S(m, k, n), 0 \right\}, 0 \right\}, m = 1, 2, \dots, M. \quad (11)$$

式(1)和式(2)分别表示目标总运输费用最小和顾客的不满意度最小; 约束(3)表示每辆车装货不超过其最大载重量; 约束(4)表示每个客户只由一辆车配送; 约束(5)表示指派的车辆只驶入所送货的客户; 约束(6)表示指派的车辆只驶出所送货的客户; 约束(7)表示所有的客户都能得到服务; 约束(8)表示当 $L(m, k, i, j) = 1$, 即车辆经客户 i 到达客户 j 时, 计算车辆到达客户 j 的时间等于车辆到达客户 i 的时间、客户 i 所需服务时间、车辆到达客户 i 的等待时间及车辆经客户 i 到达客户 j 的行驶时间四者之和; 约束(9)表示迟到不得超过最大迟到时间 Δt , 因为迟到时间无限大是没有实际意义的; 约束(10)表示客户 i 对服务的不满意度由配送的及时性衡量, 即早到处罚和晚到处罚之和来衡量, 其中 p_1, p_2 分别为早到处罚因子和晚到处罚因子; 约束(11)判断配送中心 m 的车辆 k 是否被调用, 是为 1, 不是为 0.

2 基于分区域和极大极小策略的协同配送路径优化的多目标遗传算法 (记为 MOEADWSS)

本文采用的是文献[8-9]提出的 MOEADWSS 算法思想求解 MDCVRPTW. 该算法的主要思想是将目标函数空间分成若干个子区域, 在更新种群前, 将当代所有个体及其后代分到各个区域的子种群, 如果一个区域内子种群的个体数不超过给定的上界 U , 那么任何个体都不会被淘汰, 如果一个区域内子种群的个体数超过 U , 那么用极大极小策略选择 U 个较好的个体到该区域的子种群中. 杂交的两个父代要从同一区域的个体中选. 下面给出算法的详细

求解过程.

2.1 编码、初始种群的构造、解码

如何找到一个合适的编码方式,是实现算法的关键问题. 根据该问题的求解特点,这里采用整数编码方式,这种编码方式比较直观. 本文构造了 M 个物流中心、 N 个客户,可确定各物流中心配送方案的编码. 每个个体用一个 2 行 N 列的矩阵表示,这里矩阵的列序号对应客户编号,矩阵第 1 行的数字表示物流中心编号,取值 $1, 2, \dots, M$, 即该数字所在列对应的客户由该数字表示的物流中心配送,第 2 行的数字表示客户由同一物流中心配送的序号. 例如,令 $M=3, N=14$, 即 3 个物流中心协同为 14 个客户配送货物,物流中心编号分别为 1、2、3, 以下的式 (12) ~ 式 (15) 都表示个体,个体是由 2 行 14 列的的矩阵表示,矩阵的第 1 行取值为 1、2、或 3. 在式 (12) 中,矩阵的第 4 列对应客户 4, 该列的第 1 行数字为 1 表示客户 4 由物流中心 1 配送,该列的第 2 行数字为 1 表示客户 4 被同一物流中心配送的序号为 1, 那么第 4 列的数字表示客户 4 由物流中心 1 安排配送的序号为 1; 同样,第 1 列的数字表示客户 1 由物流中心 1 安排配送的序号为 4.

$$\begin{matrix} 1 & 2 & 2 & 1 & 2 & 2 & 3 & 2 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & 7 & 5 & 1 & 6 & 4 & 1 & 8 & 2 & 3 & 9 & 3 & 1 & 2 \end{matrix} \quad (12)$$

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 3 & 3 & 1 & 3 & 2 & 2 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 3 & 1 & 6 & 4 & 1 & 3 & 2 & 4 & 2 & 3 & 1 & 2 \end{matrix} \quad (13)$$

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 1 & 3 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & 5 & 3 & 1 & 6 & 4 & 1 & 3 & 2 & 4 & 2 & 3 & 1 & 2 \end{matrix} \quad (14)$$

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 3 & 3 & 1 & 3 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & 5 & 3 & 1 & 6 & 5 & 1 & 2 & 2 & 3 & 2 & 4 & 1 & 3 \end{matrix} \quad (15)$$

在产生初始种群时,为了得到可行个体并加快算法收敛速度,本文采用本节的编码方式产生可行个体. 由本节的编码方式知道个体用一个 2 行 N 列的矩阵表示,由矩阵列序号确定客户,由矩阵第 1 行数字确定客户被指定配送的物流中心,由矩阵第 2 行数字确定客户被同一物流中心配送的序号. 因为不是所有的物流中心都可以为客户配送货物,那么对于不能为该客户配送货物的物流中心来说,该客户对应列的第 1 行数字就不能取该物流中心编号,所以在初始化个体时,先根据客户信息初始化个体第 1 行,再根据第 1 行信息初始化第 2 行. 例如,假设 3 个物流中心中除了物流中心 3 由于缺货不能为客户 3 配送,剩下的物流中心 1 和物流中心 2 都

可以为客户 3 配送货物,那么所有个体的第 3 列的第 1 行数字取值只能取 1 或 2, 不能取 3.

在解码当中,由上述编码方式可以知道每个物流中心所配送客户及客户的配送顺序号,那么按照顺序号就可以确定各个物流中心配送客户的顺序列,简称配送客户列. 例如,在式 (12) 表示的个体中,由第 1 行可以确定物流中心 1 配送客户 1、4、9 和 10, 由第 2 行可以知道客户 1、4、9 和 10 的配送顺序号分别为 4、1、2 和 3, 从而确定配送客户列为 4-9-10-1, 依照此方法可以确定物流中心 2 的配送客户列为 13-14-12-6-3-5-2-8-11, 物流中心 3 的配送客户列为 7.

在得到各个物流中心配送客户列之后,再根据约束 (3) 车辆装货量必须不大于其最大载重量和约束 (9) 迟到时间不得超过最大迟到时间 Δt 确定每个物流中心车辆的配送路径,并以路径数目确定车辆的数目,从而确定具体调度方案. 例如,对于物流中心 2, 根据其配送客户列,该物流中心车辆 1 首先配送客户 13, 依照配送顺序把客户 14 添加为待选节点,因为添加客户 14 后没有违反约束,则把客户 14 添加到车辆 1 所在路径. 接着把客户 12 添加为待选节点,添加后违反了约束 (3) 和约束 (9) 其中之一,则确定车辆 1 配送客户列为 13-14-12. 确定车辆 2 的配送客户列,按照物流中心的配送客户列,车辆 2 首先配送 6, 按照上述方法,直至该中心配送的客户都被服务完为止,最终得到车辆 2 的配送客户列为 6-3. 车辆 3 的配送客户列为 5-2-8-11, 又由车辆从配送中心出发和最后回到原配送中心. 这里物流中心 2 对应是物流中心 B, 那么该中心的具体调度方案是 3 条路径,即 B-13-14-12-B、B-6-3-B、B-5-2-8-11-B. 依照此方法即可确定各个物流中心的调度方案.

为了在解码后便于得到具体的调度方案,将物流中心编号 $1, 2, \dots, M$ 更改为 $N+1, N+2, \dots, N+M$, 解码后以自然数串表示. 自然数串是以 $N+1, \dots, N+2, \dots, N+3, \dots, N+M, \dots$ 的形式将各个物流中心的配送客户列间隔开,自然数串自左向右首次出现的 $N+1$ 和 $N+2$ 之间的客户编号数列就是物流中心 1 的配送客户列. 以此类推,自然数串自左向右首次出现的 $N+2$ 和 $N+3$ 之间的客户编号数列是物流中心 2 的配送客户列. 自然数串自左向右首次出现的 $N+M$, 该数右边的客户编号数列是物流中心 M 的配送客户列. 自然数串中每个配送中心的

配送客户列又被该配送中心编号数间隔开,间隔开的客户列就对应车辆路线. 例如,对于 $M=3, N=14$, 物流中心 1、2 和 3 就更改为物流中心 15、16 和 17, 按照上述具体解码思想将式(12)表示的个体解码后得的自然数串为 15-4-9-10-1-16-3-14-12-16-6-3-16-5-2-8-11-17-7, 那么该自然数串自左向右首次出现的 15 和 16 之间的客户列为 4-9-10-1, 所以物流中心 1 的车辆路线 15-4-9-10-15. 同样, 可以得到物流中心 2 的车辆路线为 16-3-14-12-16、16-6-3-16、16-5-2-8-11-16, 物流中心 3 的车辆路线 17-7-17. 这样解码后即可得到具体的调度方案.

2.2 杂交变异

依次遍历父代的每一列, 如果两个父代的对应列是不相同的, 则以 0.5 的概率交换两列, 两个父代杂交后产生两个后代. 杂交可能会产生非法后代, 即后代中同一个物流中心所配送的客户顺序号会出现重复、间断的不连贯现象, 这里用修复策略将非法个体变为合法个体. 该修复策略是将同一物流中心所配送的客户按其顺序号(从小到大)依次排列, 其中将重复顺序号所对应的客户进行随机排列, 其余客户排列位置不变. 最后将客户顺序号修正为排列后对应的位置顺序号. 例如, 以式(12)和式(13)作为父代, 除了第 1、4、6、7、9、12 和 13 列相同不交换之外, 其余各列按 0.5 的概率交换. 假设是第 5 列和第 14 列发生了交换, 式(14)是交换列后由式(13)做父代产生的后代, 那么在式(14)表示的个体中, 可以看到物流中心 1 配送客户的顺序号还是连续的, 而物流中心 2 和物流中心 3 所配送的客户顺序号发生了不连续现象. 物流中心 2 配送的客户顺序号从小到大为 1、2、2、3、4、6 的不连贯数字, 物流中心 3 配送的客户顺序号从小到大为 1、3、4 的不连贯数字. 现在对物流中心 2 配送的客户顺序号进行修复, 其中重复顺序号 2 对应的客户是客户 11 和客户 14. 针对顺序号 2 所在位置将客户 11 和客户 14 进行随机排列, 其余客户所在位置不变, 重新排列得到的客户列为 13、11、14、12、6、5 或 13、14、11、12、6、5 两种排法. 假设随机得到的是前者的排列法, 按客户重新排列后对应的位置顺序号修正客户顺序号, 对于物流中心 3 配送的客户顺序号没有出现重复的情况, 就直接按对应的位置顺序号修正客户顺序号, 则得到的后代即为式(15)表示的个体. 依照此方法将杂交后的个体进行修复, 最后即可以得到合法个体.

杂交结束后, 按变异概率随机选取要进行变异的

个体, 在该个体中随机选取属于同一物流中心配送的两个客户并将其顺序号交换, 即随机选取个体中第 1 行数相同的两列进行交换, 从而完成变异. 这样的变异相当是将某物流中心的配送客户列进行重新排列, 所以变异后得到的个体还是可行个体. 例如式(12)是随机选取来进行变异的个体, 在该个体中随机选取属于同一物流中心 1 的客户 1 和客户 4, 将其顺序号交换后, 客户 1 配送顺序号由原来的 4 变成 1, 而客户 4 的配送顺序号由原来的 1 变成 4.

2.3 区域的划分方法

本文的目标函数个数为 2, 这里要最小化两个目标. 按式(16)将每个目标函数转化为 $[0, 1]$ 范围内. 经过这样的变换, 把目标空间变换到第一象限.

$$g_i(x) = \frac{f_i(x) - f_i^*}{f_i^{\max} - f_i^* + \varepsilon}, \quad i=1, 2, \quad (16)$$

其中 x 代表一个个体, $f_i(x)$ 为个体 x 的第 i 个目标函数值, f_i^* 为第 i 个目标的最小值或者是最小值的一个估计, ε 为一个很小的正数, 它是用来防止分母为 0, $f_i^{\max}$ 为所有个体的第 i 个目标的最大值, $g_i(x)$ 为个体 x 的第 i 个目标转化后的函数值, $g_i(x) \in [0, 1]$.

本文用下列方法把目标函数空间分成 S 个子区域: 在单位圆的第一象限中按式(17)和(18)均匀选取 S 个角度和 S 个单位向量.

$$\theta^i = \frac{(2i-1)\pi}{4S}, \quad i=1, 2, \dots, S. \quad (17)$$

$$\mathbf{W}^i = (\cos\theta^i, \sin\theta^i), \quad i=1, 2, \dots, S. \quad (18)$$

将 S 个单位向量 $\mathbf{W}^1, \mathbf{W}^2, \dots, \mathbf{W}^S$ 作为 S 个子区域的中心向量. 种群中的每个个体对应目标函数空间的一个向量, 该向量与哪个中心向量的夹角最小就把该个体归为那个子区域. 夹角的大小可通过计算该向量与每个中心向量的内积来判断.

2.4 极大极小选择算子

在单位圆第一象限中按式(19)和式(20)均匀选取 N 个角度, 产生 N 个权重向量.

$$\theta^i = \frac{(2i-1)\pi}{4N}, \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (19)$$

$$\mathbf{V}^i = \left(\frac{\sqrt{\sin\theta^i \cos\theta^i}}{\cos\theta^i}, \frac{\cos\theta^i}{\sqrt{\sin\theta^i \cos\theta^i}} \right), \quad i=1, 2, \dots, N. \quad (20)$$

在本文中取 $N=S^2$, 把 $\mathbf{V}^1, \mathbf{V}^2, \dots, \mathbf{V}^S$ 分到第 1 个区域, 把 $\mathbf{V}^{S+1}, \mathbf{V}^{S+2}, \dots, \mathbf{V}^{2S}$ 分到第 2 个区域, 依此类推, 最后每个区域都可以分到 S 个权重. 规定每个区域个体数目的上界都为 S , 并假设某个区域的子

种群的个体数目为 S' , 当 S' 大于 S 时, 就要用极大极小策略选择 S 个个体到该区域中. 设 $V^i = (v_1^i, v_2^i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 用 V^i 评价个体 x , 则个体 x 的适应值函数为

$$F(x) = \max\{v_j^i g_j(x) \mid j = 1, 2\}. \quad (21)$$

2.5 基于分区域策略和极大极小策略的协同配送车辆路径算法的主要步骤

步骤 1: 初始化参数. 初始化种群规模 N 、子区域的数目 S 、最大迭代次数 T 、杂交概率 P_c 和变异概率 P_m , 生成 S 个子区域中心向量 $W^1, W^2, \dots, W^S$, 生成 N 个权重向量 $V^i = (v_1^i, v_2^i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 将 N 个权重向量划分到 S 个子区域中.

步骤 2: 初始化种群. 采用本文的设计方案随机产生 $2N$ 个个体, 用上述区域划分法将种群划分到 S 个区域的子种群中. 如果一个区域中的个体数目不超过 S , 则将这个区域内的个体全部赋给该区域的子种群; 如果一个区域中的个体数目超过 S , 则用极大极小选择算子选择 S 个较好的个体进入子种群.

步骤 3: 分别对每个区域的个体进行杂交变异操作. 杂交的两个父代均从属于同一个区域的个

体中选.

步骤 4: 更新种群. 把杂交和变异后产生的后代和当前代所有子区域中的个体划分到各个区域中. 如果一个区域中的个体数目不超过 S , 则将这个区域内的个体全部赋给该区域的子种群; 如果一个区域中的个体数目超过 S , 则用极大极小选择算子选择 S 个较好的个体进入子种群.

步骤 5: 如果 $t \leq T$, $t = t + 1$, 返回步骤 3, 否则输出非劣解.

3 实例和分析

假设系统中有 3 个物流中心 A、B 和 C, 其坐标分别为 $(-28, 52)$ 、 $(60, -28)$ 、 $(-140, -92)$, 分别负责为 14 个客户配送货物, 客户编号分别为 $(1, 2, \dots, 14)$, 中心 A 负责 1, 3, 5, 7 和 11, 中心 B 负责 2, 4, 6, 8, 9, 10, 12 和 13, 中心 C 负责 14, 各物流中心车辆最大载重量 12 t, 调用车辆固定费用 100 元, 平均车速 100 km/h, 单位里程消耗费用 1 元/km,

各客户对货物需求量、允许服务的最早时间和最迟时间的时间窗约束、服务时间及坐标位置等相关信息如表 1 所示.

表 1 客户信息

客户	货物量/t	最早服务时间/h	最迟服务时间/h	服务时间/h	负责配送中心	拥有货物中心	坐标位置(x,y)
1	2.0	6.0	7.5	0.5	1	1,2,3	(20,100)
2	1.5	2.0	4.0	1.0	2	1,2,3	(88,48)
3	3.0	4.0	5.0	3.0	1	1,2	(52,-100)
4	2.5	1.0	3.0	1.0	2	1,2,3	(-72,60)
5	3.5	1.0	3.0	1.0	1	1,2,3	(120,20)
6	1.5	1.0	4.0	2.0	2	1,2	(100,-28)
7	3.0	2.0	3.0	1.5	1	1,2,3	(-80,-100)
8	2.5	3.5	4.5	1.0	2	1,2,3	(40,48)
9	2.0	3.0	4.5	0.6	2	1,2	(-88,92)
10	2.5	4.0	5.0	0.6	2	1,2,3	(-68,180)
11	3.5	3.5	5.5	1.5	1	1,2	(40,12)
12	3.0	5.0	7.0	2.0	2	1,2,3	(28,-60)
13	4.0	2.0	3.0	1.5	2	2	(-92,-28)
14	5.0	3.0	4.0	1.0	3	2,3	(-60,-28)

根据协同与否两种情况分别规划运输调度方案, 即各配送中心在不协同情况下各自独立承担自身的配送任务来规划不协同运输调度方案和各配送中心在协同情况下共享客户、货物等信息资源共同完成所有客户的配送任务来规划协同运输调度方案. 规划运输调度方案使用 Matlab7.0 编写求解 MDCVRPTW 问题的 MOEADWSS 算法的编码方式

采用本文的设计方案, 算法的运行参数设置如下: 初始化种群规模 $N = 100$ 、子区域的数目 $S = 10$ 、最大迭代次数 $T = 200$ 、杂交概率 $P_c = 0.9$ 和变异概率 $P_m = 0.1$. 分别求得不协同运输调度 11 个方案, 协同运输调度 4 个方案, 表 2 和表 3 分别是不协同运输和协同运输的各个方案的目标值, 即各个方案的运输费用和不满意度. 表 4 是协同运输的 4 个具体调度

方案.

式(22)至式(25)表示的4个个体是 Matlab7.0 程序求解协同运输调度得出的一组 Pareto 最优解的实验结果.按照本文的解码方式就可以对应得到表4里4个协同运输调度的具体调度方案.

1 2 2 1 2 2 3 2 1 1 2 2 2 2 (22)
4 7 5 1 6 4 1 8 2 3 9 3 1 2

1 2 2 1 2 2 3 2 1 1 2 2 2 2 (23)
4 8 9 1 7 4 1 5 2 3 6 3 1 2

1 2 2 1 2 2 3 2 1 1 2 2 2 2 (24)
3 5 9 4 4 8 1 6 1 2 7 3 1 2

1 2 2 1 2 2 3 2 1 1 2 2 2 2 (25)
3 5 8 4 4 9 1 6 1 2 7 3 1 2

表2 不协同运输调度方案目标值

方案	运输费用/元	不满意度
1	2 975.71	0.307
2	2 955.07	0.178
3	3 022.60	0.168
4	3 044.74	0.113
5	3 112.27	0.103
6	3 201.28	0.091
7	3 204.98	0.087
8	3 268.80	0.081
9	3 281.23	0.077
10	3 361.51	0.038
11	3 429.04	0.028

表3 协同运输调度方案目标值

方案	运输费用/元	不满意度
1	1 748.56	0.388
2	1 863.18	0.321
3	1 929.62	0.067
4	2 055.53	0

表4 协同运输调度的配送路径

中心	方案1	方案2	方案3	方案4
A	A-4-9-10-1-A	A-4-9-10-1-A	A-9-10-1-A A-4-A	A-9-10-1-A A-4-A
B	B-13-14-12-B B-6-3-B B-5-2-8-11-B	B-13-14-12-B B-6-8-11-B B-5-2-3-B	B-13-14-12-B B-5-2-8-11-B B-6-3-B	B-13-14-12-B B-5-2-8-11-B B-3-B B-6-B
C	C-7-C	C-7-C	C-7-C	C-7-C

从计算结果可以看到:

(1) 从表2和表3的结果比较中看到,协同运输下的方案4在达到不满意度最小值为0的同时得到的运输费用比不协同运输的11个方案的运输费用都要小很多,说明协同运输可以提高服务质量和降低成本.

(2) 表2、表3都可以看到在追求运输费用更低时所付出的代价是不满意度变高,或者说要求不满意度越低时付出的代价是运输费用越高,这些变化规律可以为决策者在做决策时提供有利的决策依据.

(3) 表4是协同配送各个方案的具体配送路径,每一条路径代表一辆车,路径数越多代表发车数越多,各个调度方案路径数不尽相同可以为决策者根据实际情况,如车辆不足、驾驶员不足等选择合适的调度方案.

(4) 在算例中客户8和客户11距离物流中心A最近,从表4中看到在协同运输调度中是由物流中心B配送,在以往将多物流中心问题转化为单物流中心问题的分两阶段化求解算法中是无法实现的.可见,本文在求解算法设计上得到了提升.

4 结论

本文从多目标的角度出发,通过综合考虑运输总费用和客户满意度两个目标,建立了 MDCVRPTW 问题的多目标优化模型.本文根据问题的特点在算法求解过程中构造一种新的编码方式,该编码方式能够有效地产生初始可行解,在构造初始种群和进行个体变异中都能避免产生无效个体,从而加快算法的收敛速度.根据问题的复杂性采用分区域多目标进化算法求解问题.通过实例得出了模型和求解算法的有效性.实验结果表明,多目标优化得到的一组 Pareto 最优解为决策者提供了强有力的决策支持.本文的研究成果可以为物流配送调度人员提供依据,从而实现物流科学化,对物流企业降低物流成本、提高服务质量、增加经济效益有显著意义.

参考文献:

- [1] Dantzig G, Ramser J. The truck dispatching problem [J]. Management Science, 1959(6): 80-91.
- [2] 盛雨俊,周溪召. 带有时间窗的车辆路径问题优化 [J]. 上海海事大学学报, 2007, 28(4): 64-68.
- [3] 魏俊华,王安麟,童毅. 基于需求划分的带软时间窗的路径优化方法 [J]. 公路交通科技, 2005, 22(10): 165-170.
- [4] 李敏,郭强,刘红丽. 多车场多配送中心的物流配送问题

- 研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(8): 202-208.
- [5] 戴树贵, 陈文兰. 一个多物流中心配送模型及其遗传算法[J]. 计算机技术与发展, 2008, 18(2): 46-51.
- [6] 覃运梅. 多源点物流配送车辆调度模型探讨[J]. 物流科技 2010, 33(9): 32-36.
- [7] 谢天保, 雷西玲, 席文玲. 多物流中心协同配送车辆调度模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(29): 203-211.
- [8] Liu Hai-lin, Li Xue-qiang. The multiobjective evolutionary algorithm based on determined weights and sub-regional search [C] // IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC09). Norway: [s. n.], 2009: 1028-1934.
- [9] 李学强. 多目标最优化进化算法[D]. 广东工业大学应用数学学院, 2009.

The Application of Multi-objective Evolutionary Algorithm in Collaborative Vehicle Routing

Xie Gui-qin, Tu Jing-xian

(Faculty of Applied Mathematics, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510520, China)

Abstract: To minimize the total cost of vehicle transport and to satisfy customers, it proposed a new mathematical model for multi-objective optimization of Multi-Depot collaborative vehicle routing with time windows in logistics. For the sake of this multi-objective optimization, a multi-objective evolutionary algorithm, based on decomposition, was adopted. In this algorithm, a new encoding method, which was beneficial to producing feasible individual, was presented. The efficiency of the algorithm was improved due to the perfect encoding. Finally, a test was carried out. The results show that the proposed model can solve effectively the problem of collaborative vehicle routing in logistics.

Key words: collaborative transport; multi-objective optimization; evolutionary algorithm; vehicle routing