

基于矩阵变换的车辆路径问题仿真优化方法^①

胡祥培¹, 李永先^{1,2}, 郭建文¹

(1. 大连理工大学系统工程研究所, 大连 116024; 2. 辽宁师范大学管理学院, 大连 116029)

摘要: 针对车辆路径问题这一求解难题, 提出基于启发式变换的仿真优化原理和求解方法, 建立了基于邻接矩阵的车辆路径问题的数学模型; 利用启发式运行规则对仿真运行的参数进行了分析, 通过矩阵变换改进优化搜索策略并找出最优解或满意解. 算例求解表明, 基于矩阵变换的仿真优化方法具有良好的稳定性和求解效率. 该项研究为求解车辆路径问题这一难题提供了新思路.

关键词: 车辆路径问题; 仿真优化; 邻接矩阵; 矩阵变换; 启发式变换

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1007-9807(2008)04-0067-09

0 引言

车辆路径问题(vehicle routing problems, 简称VRP)是物流管理领域关注的热点和难点问题. 合理地安排车辆、行车路径和出行时间, 以最低成本将货物准时送达客户, 实现物流配送系统高效低成本的运作, 这是物流运营及管理部门致力追求的目标, 也是长期以来困扰学术界的难题之一. 该项研究对于物流企业降低物流成本、提高管理水平具有重要的现实意义; 对于丰富物流管理理论和方法也具有重要的理论价值. 车辆路径问题于1959年由Dantzig和Ramser提出以后, 很快引起了管理学、运筹学、应用数学、物流科学及计算机应用等学科专家学者的高度重视, 并已取得了较大的进展, 其成果已在运输系统、物流配送系统及快递收发系统中得到广泛应用. 然而, 由于车辆路径问题的复杂性(已被证明为NP-hard问题^[1]), 当节点规模较大时, 将很难得到问题的精确解. 尤其是对于电子商务所涉及的城区物流配送系统, 除了考虑成本因素之外, 还要考虑配送时间和环境等方面的因素, 这就使问题的建模和求解变得

更加复杂, 因而对这一难题的研究也就更具学术价值. 目前, 车辆路径问题的求解方法大多采用启发式算法, 但它们的求解结果都不尽如人意. 计算机仿真真是解决复杂系统问题的有效方法, 是管理科学与运筹学领域应用最广泛的技术手段. 仿真技术为复杂物流系统问题提供了技术性和经济性的最佳结合点和直观有效的分析方法. 因此, 本文拟从仿真优化的角度来探讨车辆路径问题的求解, 提出基于启发式变换的仿真优化方法, 为解决这一难题提供了新思路. 它主要涉及启发式算法和仿真优化方法两大方面, 国内外学者在这两方面的主要研究进展如下.

关于启发式算法, Clark和Wright在1964年提出了构造算法^[2], Gillett^[3], Bramel^[4], Renaud^[5]等又提出了两阶段算法. 此后, 高级启发式算法如遗传算法(genetic algorithm), 模拟退火(simulated annealing), 禁忌搜索(tabu search)在求解VRP中得到了广泛的应用, 取得了较好的效果^[6-10]. 宁爱兵等^[11]提出了广泛适用于组合优化问题的竞争决策算法, 并用其通用模型设计了一个求解车辆路径问题的快速求解算法. 这些

① 收稿日期: 2006-06-09; 修订日期: 2007-01-23.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(70725004); 国家自然科学基金资助项目(70571009, 70171040, 70031020); 教育部科学技术研究重点资助项目(03052); 教育部博士点基金资助项目(20010141025); 辽宁省教育厅基金资助项目(2004F020).

作者简介: 胡祥培(1962—), 男, 安徽绩溪人, 博士, 教授. Email: drhxp@dlut.edu.cn

算法局部改进了 VRP 的求解效率,但是也还是存在求解效率不高、建模困难等缺陷,如禁忌搜索算法很难确定一个特定问题适当的禁忌期限;遗传算法的收敛速度比较慢,并且它的解受最初种群随机数的选择、交叉和变异的影响很大;模拟退火算法在邻域搜索中用于概率移动的随机数的选择几乎对最终解不产生影响,但需要比较长的计算时间才能得出具有较高精度的稳定解。

计算机仿真技术是研究复杂系统的有效方法。用仿真语言或者商用的仿真软件能够很容易的建立物流系统的仿真模型。与解析方法相比仿真模型能更加全面地反映实际物流系统的特征。然而仿真模型仅是对问题的直观描述,仿真运行只能提供一定条件下的可行方案,它并不能给出问题的最优解或满意解,所以需要将仿真与优化技术结合起来,以便在仿真环境下不断地改进输出响应,从而可以形成各种仿真优化结果,进而实现系统性能的优化^[12]。目前,国内外一些学者尝试用仿真优化方法来求解物流调度与优化问题,如: Köchel^[13]详细阐述了仿真优化方法的工作机理,并用这种方法解决了一个多运输梯队的仓库问题。Bruzzone 等^[14]设计了使用优化模块的决策支持系统,在这个系统中包含启发式规则,动态数据库和动态过程仿真模块;Fu^[15]提出了简单的库存随机优化模型(一个仓库、线性成本函数、只有一种产品);王迎军等^[16]建立了分销网络成本模型,给出了最优订货量的求解方法,用仿真方法分析了价格参数及订货比例系数对总成本的影响。常发亮等^[17]分析了自动化立体仓库输送系统的若干调度问题,给出了启发式调度规则和优化算法,建立了离散系统的仿真 Petri 网模型,对系统进行了动态优化仿真。然而,现有的仿真优化研究中,仿真与优化是两个独立的模块,仿真过程不能对优化算法的运行提供参数分析等指导优化搜索的功能,优化算法的效率没有得到实质性的提高;并且在仿真过程中的优化策略是固定不变的。如何使仿真与优化搜索彼此相互促进,根据仿真结果来选择优化搜索策略,是仿真优化研究的发展方向。为了提高仿真及求解的效率,改进解的质量,需要将仿真与优化两个关键环节有机融和与交互,对仿真优化方法进一步改进。

本文针对车辆路径问题研究其仿真优化求解

方法。首先,从系统的角度考虑优化算法与仿真模型的关系,给出了基于启发变换式的仿真优化方法的原理。其次,根据基于启发式变换的仿真优化方法的原理,利用基于矩阵变换的仿真优化方法求解车辆路径问题,通过矩阵的分析和变换实现了仿真优化过程中的启发式变换。最后,通过算例求解,对该仿真优化方法如何保持结果优越性方面进行进一步的分析,结果表明,基于启发式变换的仿真优化方法具有良好的稳定性。

1 基于启发式变换的仿真优化方法的原理

传统的仿真优化理论框架包含仿真器和优化器两个基本单元。仿真优化的过程是:对于一个待解决的问题,优化器给出初始的决策方案,送给仿真器运行;仿真器将运行的结果信息返回给优化器,优化器对结果信息进行评价,判断是否满足终止条件,如果是则终止搜索,输出最优解或满意解,否则继续搜索,依次迭代,直到得出最优解或满意解。从这一过程可以看出,传统仿真优化方法的缺陷是仿真器只提供了复杂模型的运行和验证功能,当结果没有满足要求时,现有方法难以对优化搜索策略的改善提供帮助,优化方法的效率没有得到实质性的提高。

为了提高仿真优化方法的效率,需要将仿真优化方法作为解决问题的系统集成方法,从系统的角度研究仿真优化过程中优化算法与仿真模型的关系,使仿真优化方法能够根据仿真运行的参数改善优化搜索策略,提高优化搜索的效率,完成系统的整体目标,即得到优化的物流配送方案。本文的图 1 显示出了基于启发式变换的仿真优化原理。基于启发式变换的仿真优化方法用启发式变换将仿真与优化联系起来,优化单元搜索产生优化的决策方案,将其送给仿真单元运行;仿真单元运行决策方案,并收集方案运行的参数,送给启发式变换单元;启发式变换单元对仿真参数进行分析,依据启发式规则对决策方案进行变换,改进优化搜索策略,使优化单元根据优化策略进行搜索;依次迭代,直到找到问题的最优解或满意解。

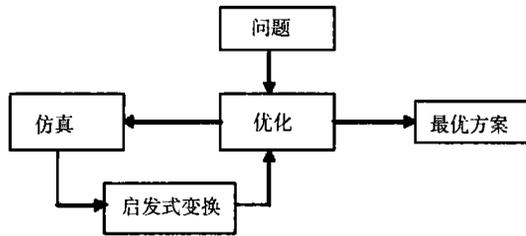


图 1 基于启发式变换的仿真优化原理图

Fig. 1 The principle of simulation optimization based on heuristic transformation

为了在理论上更详尽的刻画基于启发式变换的仿真优化原理,本文给出了这一原理的数学表达形式. 这里用 d 表示决策方案, r 表示仿真结果和参数信息, s 表示优化搜索策略, 则仿真优化的过程可表示为

$$\begin{cases} r = R(d) \\ s = T(r) \\ d' = F(s, r) \\ d = d' \end{cases} \quad (1)$$

其中: R 表示仿真单元对决策向量 d 的一次变换, 产生仿真运行状态信息; T 表示启发式变换单元对仿真状态信息的一次变换, 产生优化策略; F 表示优化单元对优化策略和仿真信息的二次变换. 从而产生新的优化的决策方案, 通过迭代, 最终找到最优解或满意解.

启发式变换单元的结构如图 2 所示. 首先数据集收集仿真运行的状态信息, 将其组织和转换成易于分析的结构, 然后利用启发式运行规则对仿真运行的参数进行分析、变换, 产生优化搜索策略, 以提高优化单元的搜索效率.

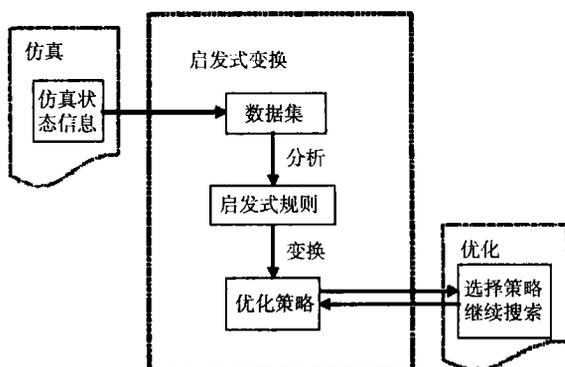


图 2 启发式变换单元的结构

Fig. 2 The scheme of heuristic transformation

2 基于启发式变换的车辆路径问题仿真优化求解方法

利用基于启发式变换的仿真优化理论解决车辆路径问题, 需要统一的数据结构和良好的数学模型来实现仿真优化过程中的启发式变换. 由于矩阵是描述和求解线性方程组最基本和最有用的数学工具, 用矩阵方法来实现启发式变换, 不仅表述简洁、便于进行研究, 而且具有以下特点: 矩阵易于进行变换, 通过一个算子对矩阵进行操作, 就可表示不同的物流配送方案, 从而便于计算机求解; 矩阵便于进行分析, 仿真模块可以通过对参数矩阵进行分析, 利用启发式规则对矩阵实施变换, 从而实现仿真模型与优化算法的交互; 矩阵结构清晰, 与运输成本矩阵和需求向量相对应, 通过简单的矩阵运算就可实现方案的评价; 采用邻接矩阵, 建立车辆路径问题的数学模型, 简便直观, 易于理解和计算机求解. 本文利用邻接矩阵及其分析变换来实现启发式变换, 利用基于启发式变换的仿真优化方法来求解车辆路径问题.

2.1 方案的邻接矩阵表示

物流配送系统中的车辆路径问题是指对一系列客户点, 要求合理安排车辆及其行车路径和出行时间, 在满足一定约束条件的情况下, 把客户需要的货物从物流中心的仓库送到客户, 并达到一定的目标(诸如路程最短、费用最小, 耗费时间尽量少等).

根据车辆路径问题的特点, 利用邻接矩阵表示物流配送方案. 首先考虑只有 1 个中心仓库, $n - 1$ 个客户需求点, 派出一辆车的情形, 如有向图 3a 所示.

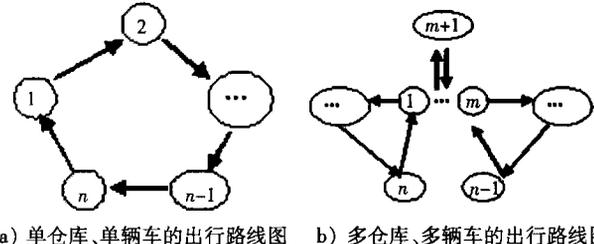


图 3 车辆路径问题的车辆出行路线图

Fig. 3 The map of routes of VRP

图 3a 表示车辆从仓库 1 出发, 依次访问 2,

..., n 客户点后再回到仓库 1 点处. 将此有向图转化为相对应的邻接矩阵(Adjacency matrix)来表示, 构造以下矩阵

$$d = \begin{matrix} & 1 & \cdots & n \\ \begin{matrix} 1 \\ \vdots \\ n \end{matrix} & \begin{pmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{n1} & \cdots & X_{nn} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$X_{ij} \text{ 满足如下约束 } \begin{cases} \sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, n \\ X_{ij} = 1 \text{ 或 } 0, i \neq j \\ X_{ij} = 0, i = j \end{cases} \quad (2)$$

其中: i, j 表示仓库和客户点的编号, 用 $1, 2, \dots, n$ 来表示, 1 表示仓库; X_{ij} 表示车辆是否经过路段 (i, j) , 即从客户点 i 处出发, 直接访问 j 客户点, 若经过则为 1, 否则为 0. 矩阵的每行至多有一个 1, 每列也至多有一个 1. 整个矩阵表示一辆车经过 n 段路, 访问完所有的仓库和客户点, 再回到仓库, 是一个相连接的回路.

下面考虑有 m 个仓库, $n-m$ 个客户需求点, 派出 k 辆车的情形, 如图 3b 所示. 按相同的方式将其转化为对应的邻接矩阵, 则相应的邻接矩阵的约束条件变为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_{ij} = k \\ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{ij} = k \\ \sum_{i=1}^n X_{ij} = 1, j = m, \dots, n \\ \sum_{j=1}^n X_{ij} = 1, i = m, \dots, n \\ X_{ij} = 1 \text{ 或 } 0 \quad i \neq j \\ X_{ij} = 0, i = j \end{cases} \quad (3)$$

在邻接矩阵中, 相连接的点组成一个子矩阵, 每个子矩阵表示如图 3a 所示的一条路线, 即一辆车访问的所有客户及访问这些客户的顺序.

2.2 基于邻接矩阵的车辆路径问题的数学模型

将物流配送方案表示成相应的邻接矩阵以后, 则车辆路径问题的数学模型可表示为

$$\begin{aligned} \min s &= \sum_{i=1}^n C_i D_i \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum_i r_i \leq M \\ r_i = \text{sub}(D) \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $C_i = (c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in})$ 为成本向量; $D_i =$

$$\begin{bmatrix} x_{1i} \\ x_{2i} \\ \vdots \\ x_{ni} \end{bmatrix}$$

为决策变量的向量. 目标函数为运输总成本

最低, 约束条件为满足装载量限制. D 表示所求的邻接矩阵, C 为成本矩阵, $\text{sub}(\cdot)$ 表示矩阵中相连接子矩阵, s 表示运输的总成本, M 表示每辆车的最大装载量, i 表示邻接矩阵中每个相连接子矩阵的节点编号, r_i 表示对应的 i 个节点的需求量. 其中仓库的需求量为 0.

2.3 矩阵的变换

物流配送方案的调整可通过对邻接矩阵进行变换来实现, 矩阵的变换包括初等行列变换、转置. 由于布尔矩阵的一些特殊性质, 还可以对邻接矩阵实施逻辑和、逻辑乘、复合和分解变换.

初等行列变换是最直接和简单的变换, 变换的方法是先进行一次初等行变换, 然后进行相应的初等列变换. 每次行列变换就是调度方案的一次调整. 调整的方法如下

$$d' = P^T d P \quad (5)$$

其中, P 是对标准单位阵实施的初等变换, 为了更加直观的观察邻接矩阵表示的路径信息, 将邻接矩阵经过 n 次初等变换, 使其行和列的节点按照车辆访问的顺序排列起来, 称此时的邻接矩阵为标准形式(如图 4 所示). 图 4 中有 2 个相联通的子矩阵, 表示分别从仓库 1 和仓库 2 出发, 每个子矩阵表示一辆车访问的所有客户.

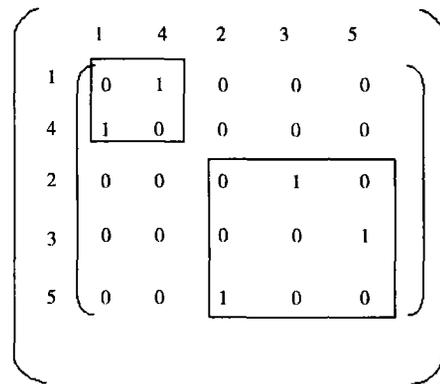


图 4 邻接矩阵标准形式示例

Fig. 4 An example of standard adjacent matrix of routes

车辆按相反的顺序访问客户点可以用矩阵的转置来实现. 通过子矩阵的转置, 可以将访问序列中某一段路的访问顺序颠倒. 由于派出的每辆车

所走过的路线都是一个环形路线,通过计算可达矩阵(eachability matrix),可以找到一辆车访问的所有客户点.由于从仓库出发可以到达所有的客户点,所以可达矩阵的计算不包括仓库节点.可达矩阵的计算过程如下

$$R = I \cup \bar{D} \cup \bar{D}^2 \cup \dots \cup \bar{D}^n = (I \cup \bar{D})^n \quad (6)$$

其中: I 是单位阵; \bar{D} 表示仓库节点行和列所在的元素全为0的邻接矩阵.符号 \cup 表示逻辑和,如果 A 和 B 都是 $n \times n$ 的布尔矩阵,则 $A \cup B = C$,也是一个 $n \times n$ 的布尔矩阵. C 的各元素 c_{ij} 与 A, B 各元素 a_{ij}, b_{ij} 的关系是 $c_{ij} \triangleq a_{ij} \cup b_{ij} \triangleq \max\{a_{ij}, b_{ij}\}$. A 和 B 的逻辑乘 $A \cap B = C$,也是一个 $n \times n$ 的布尔矩阵. C 的各元素 c_{ij} 与 A, B 各元素 a_{ij}, b_{ij} 的关系是 $c_{ij} \triangleq a_{ij} b_{ij} \triangleq \min\{a_{ij}, b_{ij}\}$. A 和 B 的乘积 $AB = D$ 也是 $n \times n$ 布尔矩阵, D 的元素 $d_{ij} \triangleq a_{i1} b_{1j} \cup a_{i2} b_{2j} \cup \dots \cup a_{in} b_{nj} = \bigcup_{k=1}^n a_{ik} b_{kj}$.

令 $\bar{D} = E \cap D, E$ 为与 D 同维的矩阵,其中仓库所在的行和列的元素全为0,其他节点对应的元素全为1.则式(6)表示为

$$R = (E \cap I \cup D)^n \quad (7)$$

它的每个元素 $X_{i,j}$ 表明节点 S_i 能否到达 S_j ,则车辆路径问题满足以下约束

$$RN \leq IM \quad (8)$$

其中: N 为各客户点的需求向量, I 为与 N 同维的单位矩阵.

由公式(8),求总成本最小的车辆路径问题的数学模型(4)可简化为

$$\min s = \sum_{i=1}^n C_i D_i \quad (9)$$

2.4 基于矩阵变换的策略改进方法

初始的物流配送方案需要通过不断地评价、调整,使方案向着目标函数值最低的方向调整,最终得到目标函数值满足要求的解.仿真优化方法通过对初始物流配送方案的评价、调整,得到配送

成本更低的方案.方案的评价用式(9)实现,根据文献[18]中车辆路线的移动规则,方案的调整通过定义以下3种基本的操作实现,分别是:

逆 将路线图中连续访问的一段访问序列的顺序颠倒.

互换 在路线图中选择两个不相邻的节点互换.

插入 取出路线图中的一段路,将其插入到两个连续访问的客户点之间.

通过矩阵的变换分别实现以上3种操作,3种操作与矩阵变换的对应关系如表1所示.

表1 矩阵变换与操作名称对应表

Table 1 The operations of corresponding matrix transformation

操作名称	矩阵变换	操作符
逆操作	矩阵的转置	$T(i, j)$
互换操作	矩阵的行列变换	$P(i, j)$
插入操作	矩阵的初等变换	$S(i, j)$

在现实情况下,运输成本需要考虑每条道路类型,交通流,辅助设施等,因此,运输成本的数据需要计算机仿真获得.在满足约束条件下,以配送方案的运输总成本最少为总目标,对邻接矩阵实施变换.

由式(9)可知,如果物流配送方案的邻接矩阵中所有值为1的客户点元素对应的成本矩阵中元素是所在的行和列中值最低的元素,则此时的物流配送方案是最优化的配送方案.由于约束条件的限制,这种理想的情况很难出现,因此,构建以下启发式规则:矩阵变换的方向是让更多的邻接矩阵中值为1的客户点元素对应的成本矩阵中元素是所在的行和列中值最低的元素.依据此规则,接口模块根据仿真运行产生的成本参数,利用表上作业法进行参数分析,启发产生3种矩阵变换.

优化算法通过矩阵变换改进搜索策略,通过矩阵变换进行搜索的过程如下:

表2 启发式的矩阵变换策略

Table 2 The strategies of heuristic matrix transformation

仿真参数分析	操作符	操作名称
$C(i-1, i) + C(j, j+1) < C(i-1, j) + C(i, j+1)$	$\Rightarrow T(i, j)$	逆操作
$C(i-1, j) + C(j, i+1) < C(i-1, i) + C(i, i+1)$	$\Rightarrow P(i, j)$	互换操作
$C(i, j) + C(i+1, j+1) < C(i+1, i+2) + C(j-2, j-1)$	$\Rightarrow S(i, j)$	插入操作

$$\begin{cases} d' = d^R \\ R = T(i,j) \text{ 或 } P(i,j) \text{ 或 } S(i,j) \end{cases} \quad (10)$$

3 算例

为了进一步研究仿真优化方法求解车辆路径问题的效能,本文应用基于启发式变换的仿真优化方法,对一典型的车辆路径问题设计程序并求解,并用文献[19]所述高级启发式优化算法中的遗传算法对此问题求解,将所得的结果进行了比较。

问题的表述如下:对一个有1个中心仓库和8个需求点的配送系统,各需求点对中心仓库的需求为 $n_i(i=2, \dots, 9)$ (单位为t),中心仓库同时安排许多车辆用于本次配送,每辆车的容量皆为8吨,要求合理安排车辆的行驶路线,使总运输费用最少,即总运输里程最少。配送网络内任意两个需求点之间的距离 $L_{i,j}$ 和需求关系(距离的单位为km)如表3所示。

表3 需求点之间的距离及需求量

Table 3 The data of distances and demands between customers

$L_{i,j}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	6	16	18	1	18	9	13	1
2	6	0	8	19	8	2	14	14	4
3	16	8	0	16	13	13	6	1	7
4	18	19	16	0	16	9	12	14	11
5	1	8	13	16	0	18	9	15	7
6	18	2	13	9	18	0	6	13	10
7	9	14	6	12	9	6	0	6	3
8	13	14	1	14	15	13	6	0	5
9	1	4	7	11	7	10	3	5	0
d_i	0	2	3	1	3	3	2	3	1

为简化计算,将成本矩阵表示成距离矩阵的线性函数:

$$C = a * L + b \quad (11)$$

将 a, b 的值定为1和0,每辆车的出行成本定为50,则仿真参数为

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 56 & 66 & 68 & 51 & 68 & 59 & 63 & 51 \\ 6 & 0 & 8 & 19 & 8 & 2 & 14 & 14 & 4 \\ 16 & 8 & 0 & 16 & 13 & 13 & 6 & 1 & 7 \\ 18 & 19 & 16 & 0 & 16 & 9 & 12 & 14 & 11 \\ 1 & 8 & 13 & 16 & 0 & 18 & 9 & 15 & 7 \\ 18 & 2 & 13 & 9 & 18 & 0 & 6 & 13 & 10 \\ 9 & 14 & 6 & 12 & 9 & 6 & 0 & 6 & 3 \\ 13 & 14 & 1 & 14 & 15 & 13 & 6 & 0 & 5 \\ 1 & 4 & 7 & 11 & 7 & 10 & 3 & 5 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{需求向量为 } N = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ 3 \\ 1 \\ 3 \\ 3 \\ 2 \\ 3 \\ 1 \end{bmatrix}$$

用本文提出的仿真优化方法及文献[16]所述遗传算法对问题分别进行求解,随机运行试验10次,得出的结果如表4所示。

由表4可以看出,对于每一次试验,仿真优化方法的结果都要优于文献[16]中遗传算法的求解结果。同时,仿真优化算法结果的标准差5.07大大低于遗传算法结果的标准差,仿真优化算法的稳定性明显比遗传算法的稳定性高。10次仿真试验中得出的最优化的运输路线为:1→9→8→3→1,1→7→5→1,1→2→6→4→1,试验中最优化的配送成本是227。最优路线的仿真结果如图5所示:

表4 两种方法的比较结果

Table 4 The comparison between two methods

试验次序	文献[16]所示标准遗传算法求解结果	本文所示仿真优化方法求解结果
1	276	229
2	256	236
3	320	239
4	315	230
5	241	235
6	311	237
7	302	241
8	264	227
9	283	228
10	248	229
平均值	281.6	233.1
标准差	29.15	5.07

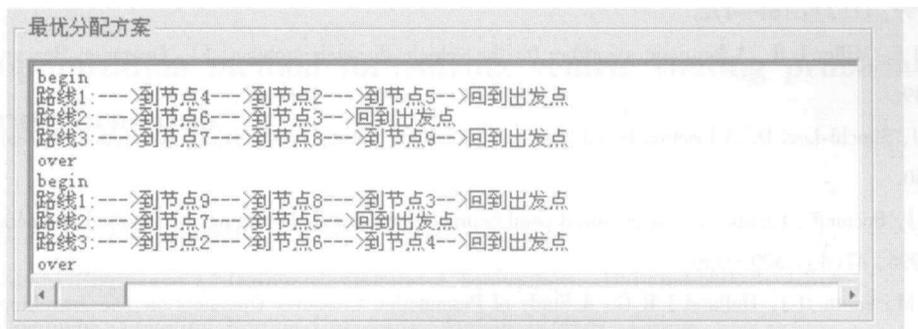


图5 最优路线的仿真结果图

Fig.5 The optimized result

试验中最优化的邻接矩阵为

$$d = \begin{pmatrix} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$

试验中最优化的配送成本为

$$s = \sum_{i=1}^n C_i D_i = 227$$

4 结 论

- 1) 本文针对传统仿真优化方法缺乏仿真方法与优化算法之间接口的缺陷,提出基于启发式变换的仿真优化方法,实现了仿真方法与优化算法的连接与交互,使仿真过程产生有利于优化搜索的信息,以提高优化算法的搜索效率.
- 2) 本文利用矩阵分析和矩阵变换的方法实

现了仿真优化过程中的启发式变换. 利用邻接矩阵表示物流配送方案,通过统一对邻接矩阵进行操作,仿真和优化算法有了统一的操作对象;利用启发式规则对仿真参数进行矩阵分析、对决策方案实施矩阵变换,改进优化搜索策略,从而实现了计算机仿真和启发式优化算法的更好集成. 用邻接矩阵表示车辆路径问题的物流配送方案,与客户点之间的成本矩阵和需求向量相对应,结构清晰,通过简单的矩阵运算就可实现方案的评价,评价选择方便;基于邻接矩阵的车辆路径问题的数学模型简便直观,易于理解和计算;矩阵易于进行变换,通过一个算子对矩阵进行操作,就可表示不同的物流配送方案,从而便于计算机求解. 利用所设计的方法,对一典型的车辆路径问题进行求解验证. 结果证明,基于矩阵变换的仿真优化方法具有很好的稳定性,并且该仿真优化方法的求解结果比单纯的高级启发式优化算法要好.

- 3) 本文提出的基于启发式变换的仿真优化方法,为求解车辆路径问题提供了新思路. 以此为基础,可以进一步研究基于矩阵变换的车辆路径问题的初始化方法、基于矩阵变换的带有时间窗的车辆路径问题的求解方法,为解决车辆路径问题开辟新的研究方向.

参 考 文 献:

[1]李 军, 郭耀煌. 物流配送车辆优化调度理论与方法[M]. 北京: 中国物资出版社, 2001. 1—134.
 Li Jun, Guo Yao-huang. Logistics Distribution Optimal Schedules Theory and Means[M]. Beijing: Chinese Logistics Publishing House, 2001. 1—134. (in Chinese)

[2]James P K, Xu J F. A set-partitioning-based heuristic for the vehicle routing problems[J]. INFORMS Journal on Compu-

- ting, 1999, 11(2): 161—172.
- [3] Gillett B E, Miller L R. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem[J]. *Operation Research*, 1974, 22(2): 340—349.
- [4] Bramel J, Simchi-Levi D. A location based heuristic for general routing problems[J]. *Operations Research*, 1995, 43(4): 649—660.
- [5] Renaud J, Boctor F, Lapotte G. An improved petal heuristic for the vehicle routing[J]. *Journal of Operational Research Society*, 1996, 47(4): 329—336.
- [6] Oliver I M, Smith D J, Holland J R C. A Study of Permutation Crossover Operators on The Travelling Salesman Problem [C]. *Proc. 2nd International Conference on Genetic Algorithms*, Lawrence Erlbaum Associates, 1987. 224—230.
- [7] Ochi L S, Vianna D S. Paralle evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with heterogeneous fleet[J]. *Future Generation Computer Systems*, 1998, 14(5—6): 285—292.
- [8] Osman I H. Meta-strategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem[J]. *Annu Oper Res*, 1993, 41(4): 77—86.
- [9] Xu J F, James P K. A network flow-based tabu search heuristic for the vehicle routing problem[J]. *Transportation Science*, 1996, 30(4): 379—393.
- [10] 张建勇, 李 军, 郭耀煌. 具有模糊预约时间的 VRP 混合遗传算法[J]. *管理科学学报*, 2005, 8(3): 64—71.
Zhang Jianyong, Li Jun, Guo Yaohuang. Hybrid genetic algorithm to vehicle routing problem with fuzzy due-time[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2005, 8(3): 64—71. (in Chinese)
- [11] 宁爱兵, 马 良. 竞争决策算法及其在车辆路径问题中的应用[J]. *管理科学学报*, 2005, 8(6): 10—18.
Ning Aibing, Ma Liang. Competitive decision algorithm and its application to vehicle routing problem[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2005, 8(6): 10—18. (in Chinese)
- [12] 杨湘龙, 王 飞, 冯允成. 仿真优化理论与方法综述[J]. *计算机仿真*, 2000, 17(5): 1—5.
Yang Xianglong, Wang Fei, Feng Yuncheng. The review of simulation optimization theory and techniques[J]. *Computer Simulation*, 2000, 17(5): 1—5. (in Chinese)
- [13] Köchel P. *Solving Logistics Problems Through Simulation and Evolution* [C]. *Slovenia: The 7th International Symposium on Operational Research in Slovenia Podetrtek*, 2003. 24—26.
- [14] Bruzzone A, Orsoni A, Mosca R, *et al.* AI-Based Optimization for Fleet Management in Maritime Logistics [C]. *Proc. of the 2002 Winter Simulation Conference*, San Diego California, IEEE, 2002. 1174—1182.
- [15] Fu M C. Optimization using simulation: A review[J]. *Operations Research*, 1994, 42(2): 199—248.
- [16] 王迎军, 高峻峻. 供应链分销系统优化及仿真[J]. *管理科学学报*, 2002, 5(5): 79—84.
Wang Yingjun, Gao Junjun. Optimization and simulation of distribute systems in a supply chain[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2002, 5(5): 79—84. (in Chinese)
- [17] 常发亮, 刘长有. 自动化立体仓库输送系统调度的优化仿真及其应用研究[J]. *系统仿真学报*, 1998, 10(5): 14—19.
Chang Faliang, Liu Changyou. The study of optimal simulation and its application in vehicle scheduling for automatic space warehouse[J]. *Journal Of System Simulation*, 1998, 10(5): 14—19. (in Chinese)
- [18] 张智星, 孙春在, 水谷英二. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing* [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000. 126—130.
Zhang Zhixing, Sun Chunzai, Shui Gu Ying Er. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing* [M]. Xi'an: Publishing House of Xi'an Jiaotong University, 2000. 126—130. (in Chinese)
- [19] Ross T J. *模糊逻辑及其工程应用* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 91—105.
Timothy J R. *Fuzzy Logic with Engineering Applications* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. 91—105. (in Chinese)

Simulation optimization method for solving vehicle routing problems based on matrix transformation

HU Xiang-pei¹, LI Yong-xian^{1,2}, GUO Jian-wen¹

1. Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. School of Management, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

Abstracts: Focusing on the vehicle routing problems which are difficult to be solved, a principle and a method of simulation optimization with heuristic transformation are presented. A mathematical model of vehicle routing problems based on adjacency matrix is set up. The parameters produced by simulation are analyzed using heuristic rules. The matrix transformation is used to optimize searching strategies, and then the best solutions or ideal solutions are found. A case-study shows that the method of simulation optimization with matrix transformation is efficient and its result has sound stability. This paper provides a new way for solving the vehicle routing problems.

Key words: vehicle routing problems; simulation optimization; adjacency matrix; matrix transformation; heuristic transformation

~~~~~  
(上接第58页)

## Automobile project investment decision model based on serial-step-investment

ZHANG Xi-yong, DING Hui-ping

School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

**Abstract:** Generally speaking, the investment in auto industry is distributed into many steps, which work on each other. The former step is based on the probability of all the following investment, so we can say the investment in auto industry is a serial-step-investment. This paper establishes an investment valuation model based on serial-step-investment and analysis the solution of this model using real option theory, binomial model and stochastic walk theory. Through this automobile project investment decision model based on serial-step-investment, automobile enterprises can make a more accurate and more comprehensive project investment valuation, and then make the valid decision.

**Key word:** investment decision; serial-step-investment; automobile project; real option; binomial model