

文章编号: 1001-0920(2006)11-1284-05

混合粒子群算法求解交通路网中的车辆调度问题

刘芹, 史忠科

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘要: 为使路网中的车辆调度问题更加符合实际交通状况, 提出了改进的车辆调度模型; 针对这个模型, 将粒子群算法和模拟退火算法相结合, 设计了混合粒子群算法求其有效近似解; 最后结合西安市实际交通调查数据, 编程实现混合粒子群算法对模型进行计算与仿真, 仿真结果表明了此方法的有效性

关键词: 车辆调度问题; 混合粒子群算法; 路阻函数

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A

Hybrid Particle Swarm Algorithm for Vehicle Routing Problem in Road Networks

L IU Q in, SH I Zhong-ke

(College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China Correspondent: L IU Q in, Email: liuqin_901@163.com)

Abstract: An improved vehicle routing model is presented to accord with the actual traffic status in road networks. A hybrid particle swarm algorithm combining particle swarm algorithm and simulated annealing algorithm is proposed to solve the vehicle routing problem. Based on the real traffic investigation data of Xi'an City, the model is calculated and simulated through programming. The Simulation result shows the validity of this method.

Key words: Vehicle routing problem; Hybrid particle swarm algorithm; Impedance function

1 引言

车辆调度一直是智能交通运输系统(ITS)研究的热点。随着城市交通日益繁忙, 在交通路网车辆调度中考虑道路交通状况是很有必要的。通常道路交通状况用路权来表示。在车辆调度模型中, 国内学者大多通过定义系数来表示路权^[1], 但这种方法有时不能真实地反映路网交通状况。路阻函数是通过实地调查交通流量和道路通行能力来得到路权, 更加符合实际情况。目前路阻函数中比较有代表性的是美国联邦公路局(FHAW)的路段行程时间函数模型。在解决车辆调度的算法方面, 学者们取得了一定进展: Laporte 用禁忌搜索提高了求解VRP问题的精度^[2]; 张潜等用聚类-改进遗传算法求解运输路径问题^[1]; 蔡延光等用模拟退火和禁忌搜索求解带

时间窗的运输调度问题^[3-5]。

本文建模时运用路阻函数得到车辆行驶时间, 增加了行驶时间最短这个目标函数, 并提出了一种混合粒子群算法。粒子群优化算法是一类很新颖的优化算法, 国内对其在车辆调度问题的求解与仿真很少, 因此研究粒子群算法在车辆调度中的应用是很有意义的。单纯的粒子群算法在解决车辆调度问题时粒子编码比较复杂, 因此在混合粒子群算法中采用粒子群算法来分配每辆车的客户, 用模拟退火求解每辆车完成运输任务的次序, 避免了单纯粒子群算法编码复杂的缺点。

2 车辆调度问题描述及数学模型

2.1 问题描述

在一个货物配送问题中, 仓库和客户位于某一

收稿日期: 2005-08-31; 修回日期: 2005-10-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60134010)

作者简介: 刘芹(1981—), 女, 山东泰安人, 硕士生, 从事智能优化计算的研究; 史忠科(1956—), 男, 陕西岐山人, 教授, 博士生导师, 从事大系统理论、智能控制等研究

交通路网内, 并且位置已知 仓库可以为多个, 但每次仅由一个仓库为运输路线上的客户提供服务 设每个仓库拥有 K 辆车, 容量分别为 $Q_k (k = 1, 2, \dots, K)$, 每一个客户仅由一辆车为其服务 现有 L 个发货点运输任务需要完成, 以 $1, 2, \dots, L$ 表示 t_{ij} 为路段 i 到 j 所用的时间, $i, j \in \{1, 2, \dots, L\}$. 第 i 个发货点的货运量为 $q_i (i = 1, 2, \dots, L)$ ($\max(q_i, \max(Q)_i)$), 完成发货点 i 装货或卸货需要的时间表示为 T_i , 且任务 i 必须在时间窗口 $[ET_i, LT_i]$ 内完成 如果车辆到达发货点 i 的时间早于 ET_i , 则车辆需在 i 处等待; 如果车辆到达时间晚于 LT_i , 任务 i 将被延迟进行

2.2 数学模型

考虑到路网中车辆行驶时间这一因素的影响, 对文献[1] 所提出的优化模型作了改进 路网中行驶路线最短并不意味着成本最低, 实际交通状况也会影响车辆的行驶时间 因此, 需要增加车辆行程时间这个目标函数, 这可通过路段行程时间函数^[6] 得到, 即

$$t = t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{v_{ij}}{c_{ij}} \right)^\beta \right) \quad (1)$$

式(1) 表示路段交通流量与路段运行费用之间的函数关系, 通常用平均行程时间作为路段的运行费用 车辆调度模型如下:

$$\begin{aligned} \min Z = & \sum_{i \in H} \sum_{j \in H} \sum_{k \in V} \left(C_{ij} X_{ijk} d_{ij} + \right. \\ & \left. t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{v_{ij}}{c_{ij}} \right)^\beta \right) \right) + \\ & \sum_{i=1}^N P_E \max(ET_i - s_i, 0) + \\ & \sum_{i=1}^N P_L \max(s_i - LT_i, 0), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{k \in V} X_{ijk} = 1, \quad j \in H, \quad (3)$$

$$\sum_{i \in H} \sum_{j \in H} q_i X_{ijk} \leq Q_k, \quad k \in V, \quad (4)$$

$$\sum_{j \in H} X_{rjk} \leq 1, \quad k \in V, \quad (5)$$

$$X_{ijk} = 0 \text{ or } 1, \quad i, j \in H, \quad k \in V. \quad (6)$$

其中决策变量为 $X_{ijk} (i \in H, j \in H, k \in V)$, 表示第 k 辆车是否从客户 i 到 j ; $H = \{i | i = 1, \dots, N\}$ 表示一系列所需要服务客户的集合; $v = \{v_k | k = 1, \dots, k\}$ 表示 k 辆车可以到达的客户路线; $r (r = 1, \dots, R)$ 表示已知的仓库; C_{ij} 表示从客户 i 到 j 的平均单位运输成本; d_{ij} 表示从客户 i 到 j 的距离; t_0 表示路段交通流量为 0 时的路段行驶时间, v_{ij} 表示路段 i 到 j 的机动车交通量, c_{ij} 表示路段 i 到 j 的实用通行能力, α, β 为

参数; $t_0 \left(1 + \alpha \left(\frac{v_{ij}}{c_{ij}} \right)^\beta \right)$ 是路段 i 到 j 的行程时间; s_i 表示执行车辆到达客户点 i 的时间; ET_i 表示时间窗的车辆最早到达时间; LT_i 表示时间窗的车辆最晚到达时间; P_E 表示在 ET_i 之前到达客户点等待的单位时间成本; P_L 表示在 LT_i 之后到达客户点的单位时间惩罚成本; q_i 表示第 j 个客户所需的货物量; Q_k 表示第 k 辆车的最大容量; X_{rjk} 表示第 k 辆车从仓库 r 为客户 j 提供服务

式(2) 为目标函数, 表示使所有车辆完成任务所需的成本最小; 约束条件(3) 确保每一个客户仅由一辆车为其服务; 约束条件(4) 使路线上行驶的每辆车不超过其容量; 约束条件(5) 满足每一运输车辆的路线仅从一个仓库出发; 约束条件(6) 取整约束

3 混合粒子群算法

这里针对以上车辆调度模型, 提出了混合粒子群算法: 用粒子群算法来分配每辆车的客户; 用模拟退火求解每辆车完成运输任务的次序

3.1 粒子的编码

本文对车辆调度问题采用的编码形式是任务与车辆相对应的形式, 例如有 3 辆车为 8 个客户服务, 则编码方式为:

客户序号: 1 2 3 4 5 6 7 8

粒子编码: 3 2 1 1 2 3 3 2

表示车辆 1 为客户 3, 4 服务; 车辆 2 为客户 2, 5, 8 服务; 车辆 3 为客户 1, 6, 7 服务

3.2 算法描述

客户的分配用粒子群算法, 每个粒子代表一种分配的可能 在迭代过程中粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己 第一个是粒子本身所找到的最优解, 叫做个体极值 $p_{best}[]$; 另一个极值是整个种群目前找到的最优解, 是全局极值 $g_{best}[]$ 在找到这两个最优值时, 粒子根据如下的公式^[7, 8] 来更新自己的速度和新的位置:

$$\begin{aligned} v[] = & w * v[] + c_1 * \text{rand}() * (p_{best}[] - \\ & \text{present}[]) + c_2 * \text{rand}() * \\ & (g_{best}[] - \text{present}[]), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{present}[] = \text{present}[] + v[] \quad (8)$$

其中: $v[]$ 是粒子的速度, $\text{present}[]$ 是当前粒子的位置, $p_{best}[]$ 和 $g_{best}[]$ 如前定义; $\text{rand}()$ 是介于 (0, 1) 之间的随机数; w 为惯性权重; c_1 和 c_2 是学习因子

粒子群算法为每辆车分配完客户后, 用模拟退火算法为每辆车进行客户的排序 在每代粒子群中, 依据每个粒子初始化车辆客户的次序, 这也就是模拟退火算法的初始状态解 在初始解 i 的邻域 S_i 内

产生新解 i , 增量为 $\Delta = F(i) - F(i)$, F 为适应度函数 接受准则采用 METROPOLIS 准则^[9], 对应的转移概率为

$$P_i(i \rightarrow i) = \begin{cases} 1, & F(i) \leq F(i), \\ \exp\left(\frac{F(i) - F(i)}{T}\right), & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

其中 T 为当前温度

冷却进度表中的控制参数衰减函数采用 $t_{m+1} = \gamma * t_m$, 其中 γ 是接近 1 的一个常数, m 为降温的次數 邻域产生采用顺序交换的方式, 例如第 k 辆车的服务客户为 2, 5, 8, 则新解产生的过程如下:

客户: 2, 5, 8 客户: 2, 5, 8 客户: 2, 5, 8
 次序: 1, 2, 3 次序: 2, 3, 1 次序: 3, 1, 2

本文算法的适应度函数等于目标函数值 Z , 混合粒子群算法流程图如图 1 所示

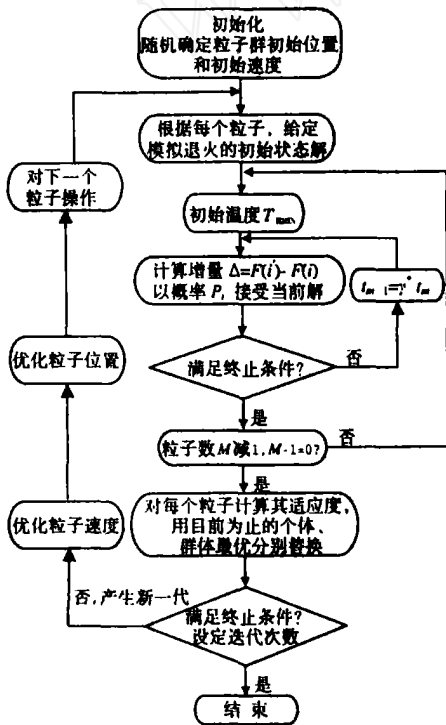


图 1 混合粒子群算法流程图

3.3 参数设置

混合粒子群算法的参数^[10]包括: 粒子数、每一维粒子的最大速度 V_{max} 、学习因子、惯性权重、控制参数 t 的初值 T_{max} 、终值 T_{min} 、衰减系数 γ 、M apkob 链的长度 L 。粒子数一般取 20 ~ 60; V_{max} 决定粒子在一个循环中最大的移动距离, 通常设定为粒子的范围宽度, 如果某一维更新后的速度超过用户设定的 V_{max} , 这一维的速度就被限定为 V_{max} 。例如上面的例子中, 粒子属于 $[-2, 2]$, 那么 V_{max} 的大小就是 4; 学习因子 c_1 和 c_2 通常等于 2; 惯性权重 w 在 0.9 ~ 0.4 之间线性变化, 可以减缓粒子的运动过程, 防止粒子向种群最优靠拢时产生振荡现象; T_{max}, T_{min} , γ 通过多次试验可以确定; L 由分配到每辆车的客户多少决定

4 应用实例分析

根据 2003 年西安市部分交通路网交通调查数据, 将以上数学模型和优化算法应用到西安市交通路网的 3 辆车为 8 个客户服务的车辆调度问题中, 并进行了仿真

仓库中心有 3 辆车, 为 8 个客户进行运输服务。仓库中心位于西安市唐延路, 8 个客户分别位于西北工业大学、钟楼、火车站、西稍门、西安交通大学、大雁塔、西门、小寨; 各个客户的时间窗分别是 $[8: 10, 8: 20]$, $[9: 20, 9: 40]$, $[8: 40, 9: 10]$, $[8: 10, 8: 30]$, $[9: 10, 9: 30]$, $[8: 30, 9: 00]$, $[8: 50, 9: 20]$, $[8: 10, 8: 30]$; 3 辆车的载重量为 8 t, 行驶速度为 50 km, 车辆运输成本 C_{ij} 为 1; 仓库用 0 表示, 客户分别用 1 ~ 8 表示 仓库中心和客户的行驶距离矩阵、客户需求量以及卸货时间, 交通流量矩阵, 通行能力矩阵分别如表 1 ~ 3 所示

仿真中粒子数取为 50, 最大速度取为 2, 惯性权重取为 0.9, 最大迭代次数为 250, T_{max} 取为 10, T_{min} 取为 0.000 01, 衰减系数 γ 为 0.98, 路阻函数中选取参数 $\alpha = 0.15, \beta = 4$; 图 2 和图 3 分别为粒子群迭代 10 代和 250 代的结果, 图 4 和图 5 是粒子群迭代过程

表 1 仓库中心和客户点的行驶距离矩阵、客户需求量以及卸货时间

距离 / km	0	1	2	3	4	5	6	7	需求量 / t	卸货时间 / h
1	6.38								2	0.1
2	12.67	5.06							1.5	0.2
3	20.86	12.28	6.52						4.5	0.1
4	8.54	3.91	5.68	12.31					3	0.3
5	12.82	6.71	4.42	12.06	11.83				1.5	0.2
6	10.28	5.9	5.96	14.39	9.13	6.59			4	0.25
7	10.26	5.42	3.98	10.5	2.8	9.16	13.23		2.5	0.3
8	10.61	4.46	4.5	11.78	6.89	7.53	2.77	8.78	3	0.08

表 2 仓库中心和客户点的交通流量矩阵

流量/(veh/h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	/	1 750	3 800	1 600	1 800	800	3 500	5 000	3 000
1	1 500	/	2 800	2 600	2 500	1 800	2 200	2 000	2 400
2	2 000	1 800	/	1 800	3 000	2 000	2 500	3 900	2 600
3	1 200	2 000	1 800	/	1 200	2 000	2 500	1 800	1 600
4	800	2 500	3 200	2 000	/	1 500	2 400	3 000	2 600
5	800	1 000	2 200	1 900	1 200	/	160	2 000	2 600
6	2 000	2 000	2 700	2 300	1 000	1 200	/	1 000	1 800
7	2 000	2 000	3 200	1 800	2 000	2 000	1 500	/	1 600
8	2 500	2 000	2 800	1 600	1 800	2 000	1 200	1 500	/

表 3 仓库中心和客户点的通行能力矩阵

通行能力/(veh/h)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	/	3 500	4 000	2 000	2 000	1 500	6 000	6 000	6 000
1	3 500	/	3 000	3 000	3 000	2 000	2 500	2 500	2 500
2	4 000	3 000	/	2 000	4 000	3 000	3 000	4 000	3 000
3	2 000	3 000	2 000	/	2 500	2 500	3 000	2 000	2 000
4	2 000	3 000	4 000	2 500	/	3 000	2 500	4 000	2 500
5	1 500	2 500	3 000	2 500	3 000	/	2 000	3 000	3 000
6	6 000	2 500	3 000	3 000	2 500	2 000	/	2 000	2 000
7	6 000	2 500	4 000	2 000	4 000	3 000	2 000	/	2 000
8	6 000	2 500	3 000	2 000	2 500	3 000	2 000	2 000	/

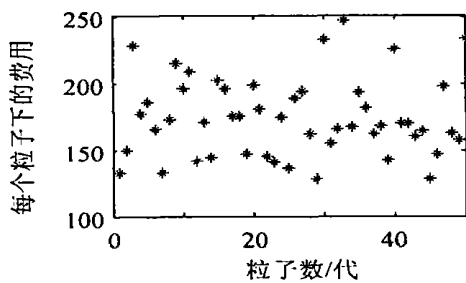


图 2 第 10 代粒子群

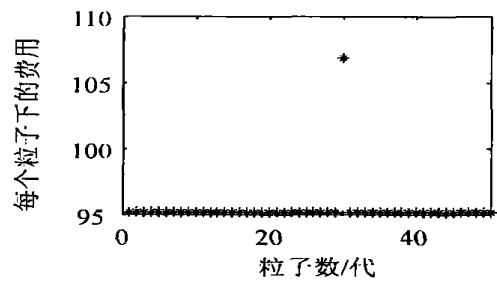


图 3 最后一代粒子群

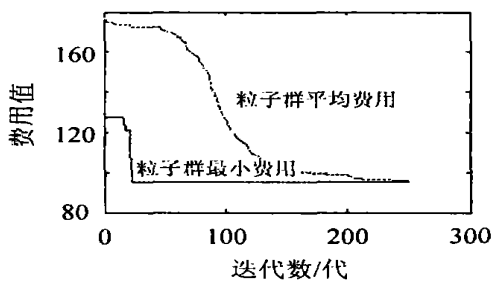


图 4 费用变化图

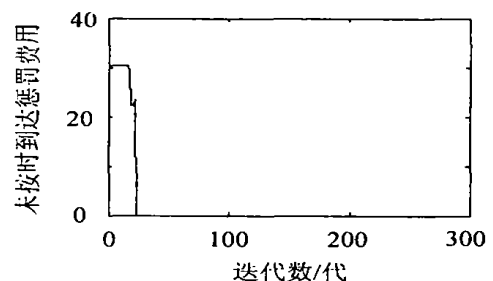


图 5 惩罚费用变化图

中最小费用值、平均费用值以及惩罚费用的变化曲线图

可以看出, 随着代数的增加, 劣质个体被淘汰, 优良个体派生出性能优良的新个体, 其适应值也随之增大, 且分布状态趋于稳定 最小费用值逐渐减小

最后收敛到固定值, 惩罚费用也逐渐达到 0, 说明所搜索到的解是满意解

仿真结果为: 1, 2, 1, 2, 1, 3, 2, 3, 1, 3, 2, 1, 3, 2, 2, 1, 95 12, 0 这表示最小费用为 95 12, 惩罚费用为 0, 路线为:

车辆1: 仓库—西北工业大学—火车站—西安交通大学—仓库;

车辆2: 仓库—西稍门—西门—钟楼—仓库;

车辆3: 仓库—小寨—大雁塔—仓库

5 结 语

本文在文献[1]的基础上改进了交通路网中的车辆调度模型,使车辆调度问题与实际交通状况紧密结合,模型具有一定的现实意义;设计了混合粒子群算法解决车辆调度问题,此算法比单纯的粒子群算法计算简便,应用到西安市路网车辆调度中,取得了较理想的效果。但现实生活中的交通状况是很复杂的,比如考虑交叉口延误时间、突发事件等多种因素下的车辆调度问题将是今后研究的一个方向。

参考文献(References)

- [1] 张潜, 高立群, 胡祥培, 等. 物流配送路径多目标优化的聚类-改进遗传算法[J]. *控制与决策*, 2003, 18(4): 418-422
(Zhang Q, Gao L Q, Hu X P, et al. Research on Multi-objective Vehicle Routing Problem of Optimization Based on Clustering Analysis and Improved Genetic Algorithm [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(4): 418-422.)
- [2] Laporte G. The Vehicle Routing Problem: An Overview of Exact and Approximate Algorithms [J]. *European of Operational Research*, 1992, 59(3): 345-358
- [3] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 带有时间窗的多重运输调度问题的自适应 Tabu Search 算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2000, 20(12): 42-50
(Cai Y G, Qian J X, Sun Y X. Self-adaptive Tabu Search for Multiple Demands Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Windows [J]. *J of Systems Engineering Theory and Practice*, 2000, 20(12): 42-50.)
- [4] 蔡延光, 钱积新, 孙优贤. 多重运输调度问题的模拟退火算法[J]. *系统工程理论与实践*, 1998, 18(10): 11-15
(Cai Y G, Qian J X, Sun Y X. Simulated Annealing for Multiple Demands Vehicle Routing Problems [J]. *J of Systems Engineering Theory and Practice*, 1998, 18(10): 11-15.)
- [5] 郎茂祥. 装卸混合车辆路径问题的模拟退火算法研究[J]. *系统工程学报*, 2005, 20(5): 481-491
(Lang M X. Study on Simulated Annealing Algorithm for Vehicle Routing Problem with Backhauls [J]. *J of Systems Engineering*, 2005, 20(5): 485-491.)
- [6] Papageorgiou M, Bosseille J M, Hajsalem H. Modeling and Real-time Control of Traffic Flow on the Southern Part of Boulevard Périphérique in Paris [J]. *Transportation Research A*, 1990, 24(5): 345-359
- [7] 王岁花, 冯乃勤, 李爱国. 一类新颖的粒子群优化算法[J]. *计算机工程与应用*, 2003, 39(13): 109-134
(Wang S H, Feng N Q, Li A G. A Novel Particle Swarm Optimization Algorithm [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2003, 39(13): 109-134.)
- [8] Venter G, Sobieszczanski-Sobieski J. Particle Swarm Optimization [J]. *AIAA J*, 2003, 41(8): 1583-1589
- [9] 陈华根, 吴健生, 王家林, 等. 模拟退火算法机理研究[J]. *同济大学学报*, 2004, 32(6): 802-805
(Chen H G, Wu J S, Wang J L, et al. Mechanism Study of Simulated Annealing Algorithm [J]. *J of Tongji University*, 2004, 32(6): 802-805.)
- [10] 侯志荣, 吕振肃. 基于 MATLAB 的粒子群优化算法及其应用[J]. *计算机仿真*, 2003, 20(10): 68-70
(Hou Z R, Lu Z S. Particle Swarm Optimization with Application Based on MATLAB [J]. *Computer Simulation*, 2003, 20(10): 68-70.)
- [7] Choi H H. Variable Structure Control of Dynamical Systems with Mismatched Norm-bounded Uncertainties: An LMIA Approach [J]. *Int J of Control*, 2001, 74(13): 1324-1334
- [8] Shyu K K, Tsai Y W, Lai C K. A Dynamic Output Feedback Controllers for Mismatched Uncertain Variable Structure System [J]. *Automatica*, 2001, 37(5): 775-779
- [9] Gouaisbaut F, Dambine M, Richard J P. Robust Control of Delay Systems: A Sliding Mode Control Design via LMII [J]. *System and Control Letters*, 2002, 46(4): 219-230
- [10] Li X Q, Decarlo R A. Robust Sliding Mode Control of Uncertain Time Delay Systems [J]. *Int J of Control*, 2003, 76(13): 1296-1305
- [11] Zheng F, Wang Q G, Lee T H. Output Tracking Control of MIMO Fuzzy Nonlinear Systems Using Variable Structure Control Approach [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2002, 10(6): 686-697
- [12] Mahmoud M S, Mohamed Z. Stabilizing Controllers Using Observers for Uncertain Systems with Delays [J]. *Int J of Systems Science*, 2001, 32(6): 767-773

(上接第1283页)