

基于多目标和声搜索算法的城市 单向交通组织优化研究

董洁霜, 王伟智, 刘巍巍

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 当道路空间占用导致交通拥堵阻断现象发生时,为保障机动车出行通畅,采取单向交通组织优化方法,以路径正反双向途径点数量最小为最优目标,应用多目标和声搜索算法求解双目标模型,进行算例检验和实际应用的性能对比分析,分析结果表明,该方法求得的平衡策略更合理,与当前的一般算法相比,具有明显的优越性.

关键词: 城市交通; 多目标优化; 和声搜索算法; 单向交通优化; 蒙特卡罗模拟; Pareto 前沿
中图分类号: U 121 **文献标志码:** A

Urban One-way Traffic Optimization Based on Multi-objective Harmony Search Approach

DONG Jie-shuang, WANG Wei-zhi, LIU Wei-wei

(Business School, University of Shanghai for Scientific and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: When the road space is taken up to lead traffic jam, the one-way traffic organization method is usually adopted to guarantee a flexible residents' travel. In order to optimizing routes (direct and inverse routes), in the method, a multi-objective harmony search algorithm was used to deal with double target function. Its effectiveness was tested by variable synthetic diffsets and real cases. The analysis indicates the harmony search algorithm can generate more resonable solutions of balancing functions and the method has much more significant advantages compared with the current general algorithms.

Key words: urban traffic; multi-objective optimization; harmony search heuristic; one-way optimization; Monte Carlo simulation; Pareto front

在绿色高效的出行要求下,快速高效的城市路网设计成为当下的研究热点,但是,在有限的经济条件下,不可能同时进行大规模的交通基础设施建设^[1],因此,交通部门往往倾向于对现有的道路网进行优化,期望投入较小的成本,实现交通设施的高效运行.

2006 年 Giridhar 等将启发式算法应用到道路和信号灯设计方面^[2]. 2008 年 Pinninghoff 等用进化算法解决洛杉矶城市道路网优化问题^[3]. 2010 年 Sanchez-Medina 等采用遗传算法解决西班牙某城市交通信号优化问题^[4]. 2011 年 Mesbah 等应用进化算

收稿日期: 2013-06-09

第一作者: 董洁霜(1973-),女,副教授.研究方向:区域规划与交通运输系统规划. E-mail: dongjieshuang@163.com

法求解交通控制优先模型^[5]. 2011年 Sohn 应用多目标优化技术, 在对城市交通的影响度最小的前提下, 解决了机动车与非机动车交通空间分配问题^[6].

2009年史峰等将城市道路分为干道(较宽、双向通行)、支路(较窄、单向通行), 在减少污染、缓解拥堵的前提下, 解决了城市单向交通组织优化问题^[7]. 2010年龙东方等为了避免支路超负荷, 用模拟退火算法代替遗传算法^[8].

本文阐述一种新的智能算法, 用以处理单向交通重组优化问题(ROWTOP), 运用多目标和声搜索算法解决复杂的单向交通重组优化问题, 并在案例中与一般算法进行比较分析.

1 目标函数

对于城市主要道路交通受到严重影响的区域, 单行道组织优化是一种高效的应对措施. 使用有向图 $G(v, \epsilon, s)$ 表示路网, v 代表节点集, ϵ 表示道路集, $s(s \in S)$ 表示方向集, S 表示道路的可通行方向. 本文中道路分为主干路和单行路, 因此, $|S| = 3$, 方向集是由单行路方向子集 s^0 、主干路方向子集 s^t 组成.

有向图中 A, B 表示进入点和离去点, $A, B \in v$, 单向交通重组优化问题得到最优的单行路方向集 s^0 , 使得 $A \rightarrow B$ 的出行时间最短, 本文中最短出行时间将采用 $A \rightarrow B$ 路径中的途经点数量表示.

单向交通重组优化问题的本质是寻找单行道的最优方向子集 s^{0*} , 目标函数为

$$f(A, B, G, s) = \sum_{i=1}^{|R|} p_i I_{A,B}(r_i, s) \quad (1)$$

$$f(B, A, G, s) = \sum_{i=1}^{|R|} p_i I_{B,A}(r_i, s) \quad (2)$$

式中, $I_{A,B}(r_i, s)$ 表示车辆沿路径 r_i 由进入点 A 到离去点 B 所途经的节点数量, $r_i \in R$; p_i 表示车辆选择路径 r_i 的概率.

为了避免死循环, 需要设定车辆到达离去点之前途经点的最大值, 并定义路径 $A \rightarrow B$ (或 $B \rightarrow A$) 单辆机动车的最小跃点数(一辆机动车在该路径通行的途径路段数), 使用 Dijkstra 算法进行求解. 假定 $s = s^t$ (如所有的街道都是双向的, $s^0 = \emptyset$), 可以计算跃点数的下限值 $h_{\min}^+(A, B, G)$, 显然,

$$h_{\min}^+(A, B, G) = h_{\min}^+(B, A, G). \quad (3)$$

$$h_{\min}(A, B, G, s) = \min_{r_i \in R} I_{A,B}(r_i, s) \quad (4)$$

$$h_{\min}(B, A, G, s) = \min_{r_i \in R} I_{B,A}(r_i, s)$$

$$h_{\min}^+(A, B, G) = h_{\min}(A, B, G, s) \Big|_{s=s^t}$$

1.1 目标函数计算

G^+ 表示由 5 个节点和 5 条边组成的有向图, 如图 1 所示, 由进入点 $A = 1$ 至离去点 $B = 5$, 跃点数下限值 $h_{\min}^+(1, 5, G^+, s) = 2$.

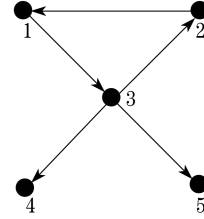


图 1 $f(\cdot)$ 计算图

Fig.1 Calculation of objective function $f(\cdot)$

观察图 1, 可以暂定点 4、点 5 是离去点, 一辆车将由 A 出发, 可能在点 5 离开路网, 也可能在点 4 离开路网. 第一种情况下, 最短路径由点 1 出发途经点 3 直接到点 5, 概率为 $p_0 = p_{12} p_{35}$ (p_{ij} 为从 $i \rightarrow j$ 的概率), 在同样情况下, 经过 k 次循环 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$ 后到达点 5 离开, 其概率为

$$p_k^5 = (p_{13} p_{32} p_{21})^k p_{13} p_{35} \quad (6)$$

在不计损失的情况下, 某点到其相邻点的概率是相同的, $p_{13} = 1, p_{32} = 1/2, p_{21} = 1$.

$$p_k^5 = \left(\frac{1}{3}\right)^k \frac{1}{3} = \left(\frac{1}{3}\right)^{k+1} \quad (7)$$

$$I_{1,5}(r_k, s) = 3k + 2 \quad (8)$$

式中, r_k 表示从图 1 中点 $A = 1$ 经过 k 次循环到点 $B = 5$.

设途经点数量上限 $L = 15$, 因此, $I_{1,5}(r_k, s) = 3k + 2 \leq 15, k \leq 13/3$, 取 $k = 4$, 得

$$I_{1,5}(r_k, s) = \begin{cases} 3k + 2, & k \leq 4 \\ 15, & k > 4 \end{cases} \quad (9)$$

第二种情况是车辆经过 k 次 $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2$ 循环后到达离去点 4, 每条路径的概率为

$$p_k^4 = (p_{13} p_{32} p_{21})^k p_{13} p_{34} \quad (10)$$

由上可得, 到达离去点 $B = 4$ 的概率为

$$p_k^4 = \left(\frac{1}{3}\right)^{k+1} \quad (11)$$

一辆车在图中通行的最小平均途经点数量 $f_{\min}^+(1, 5, G^+, s)$ 可以利用几何级数方法计算.

$$f_{\min}^+(1, 5, G^+, s) = \sum_{k=0}^{\infty} I_{1,5}(r_s, s) p_k^5 + \sum_{k=0}^{\infty} I_{1,4}(r_s, s) p_k^4 = \sum_{k=0}^4 (3k + 2) \left(\frac{1}{3}\right)^{k+1} + \sum_{k=5}^{\infty} 15 \left(\frac{1}{3}\right)^{k+1} + \sum_{k=0}^{\infty} 15 \left(\frac{1}{3}\right)^{k+1} \quad (12)$$

$$f_{\min}^+(1,5,G^+,s) = \frac{2\ 246}{243} \approx 9.24 \quad (13)$$

1.2 目标函数近似计算

为了降低计算的复杂程度,使用蒙特卡罗模拟方法估算函数值, N 辆机动车从点 A 出发选择路径 r_i 到达点 B ,而 p_i 等于车辆数目 N_i 与 $N(N \rightarrow \infty)$ 的比值,即

$$p_i = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{N_i}{N} \quad (14)$$

式中, N 代表从点 A 出发到达点 B 的所有机动车数量; N_i 代表从点 A 出发选择路径 r_i 到达点 B 的机动车数量.

式(1)可以改写为

$$f(A,B,G,s) = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{|R|} \frac{N_i}{N} I_{A,B}(r_i,s) \quad (15)$$

图2表示算例的近似结果, $f_{\min}^+(1,5,G^+,s)$ 表示成了 N 的函数,可以看出,只要 N 足够大,就能使 $f_{\min}^+(1,5,G^+,s)$ 达到收敛.

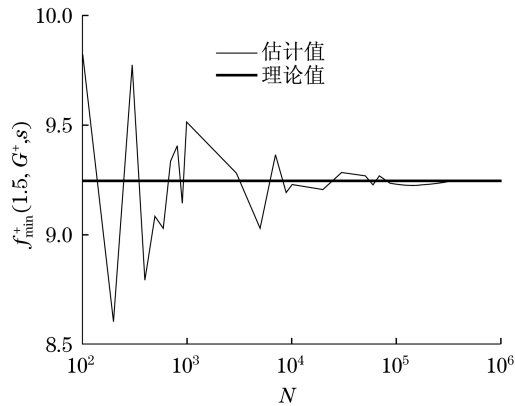


图2 不同机动车数量下的 $f_{\min}^+(1,5,G^+,s)$ 估计值变化图
Fig.2 Example of objective function estimation $f_{\min}^+(1,5,G^+,s)$ using different number of vehicles N

2 多目标和声搜索算法

应用合理的多目标搜索方法能够生成双目标函数的平衡解,本文中选取新的多目标计算方法——和声搜索算法(Harmony Search)^[9-11],简称HS算法.

该算法在候选集合 $\{H(K)\}_{k=1}^K$ 达到最大迭代次数时停止.在单向交通优化体系中,每一个音调代表城市道路的方向,和声记忆为 $H(K) \triangleq \{s_i(k)\}_{i=1}^n$, $k=1,2,\dots,K$, $i=1,2,\dots,n$, $s_i(k)$ 有3个不同的值 $\{1,2,0\}$. $s_i(k)=0$,表示单行道方向(顺向); $s_i(k)=1$,表示单行道方向(反向); $s_i(k)=2$,表示双向街道.

算法可以概括为以下4个步骤:

a. 初始化,过程只在第一次迭代中进行.首先生成和声记忆库 $\{H(k)\}_{k=1}^K$,双向道路的值2,其它单行路值从 $\{0,1\}$ 中随机选取,为避免断路,要求每一个节点至少有一条出路.

b. 创作,对 $s_i(k) \neq 2$ 的音调采取3种不同的概率方式产生新解集,生成新的解集(K 集),概率分别为和声记忆搜寻率(HMCR)、记忆调整率(PAR)、随机选择率(RSR).

c. 在寻求合适的 $f(A,B,G,s)$ 与 $f(B,A,G,s)$ 目标下,每次迭代都会产生优于之前的结果,最重要的是和声记忆中储存的是非支配排序解,同时有助于Pareto最优收敛.首先,音调顺序与其非支配水平相关联(1最好,2次之,等);然后,群聚距离表示与每个目标值最邻近的间距之和,依据群聚距离定义每个元素的顺序,为了覆盖目标总体空间,每个解间必须有一定的间距;最终,和声记忆库中储存经过筛选的最优 K 集^[12].

d. 当达到最大迭代次数 T 时计算停止,第一非支配水平的解集表示Pareto前沿近似结果;如果未达到迭代次数 T ,则会返回步骤b继续计算新的 K 集.

3 案例应用

为了评估多目标和声搜索算法的性能,在一定数量不同规模的ROWTOP算例和实际案例中进行验证性对比分析.

3.1 蒙特卡罗算法比较

为了评估HS算法性能,与蒙特卡罗算法进行对比,蒙特卡罗算法是智能交通优化中较为常用的一种算法.蒙特卡罗算法步骤如下:

a. 首先清空图 G 中的单向边的方向,假设每条边可以是任意唯一方向.

b. 计算式(3),应用Dijkstra算法获得 $A \rightarrow B$ 途经节点数量的最小值.

c. 根据步骤b的输出结果,构造属于 $A \rightarrow B$ 的最优路径的单向边方向集.

d. 计算式(4),再次应用Dijkstra算法获取 $B \rightarrow A$ 的途经节点数量最少的路径,在步骤c中已确定方向的单向边在本步中不参与计算.

e. 根据步骤d的输出结果,构造属于 $B \rightarrow A$ 的最优路径的单向边方向集.

f. 从步骤b开始重复,直到不存在其它 $A \rightarrow B$

(或 $B \rightarrow A$) 的路径.

通过迭代计算得到单向边方向集,从而确定最优路径.在迭代过程中,包含单向边的最优路径在下一次的搜寻过程中将被剔除,因此,这是一种贪婪式的局部最优构建方法(GCA).虽然此方法比较简易,但仍是检验多目标和声算法性能的合理参考算法.GCA 算法既不是随机的,也不是多目标的,然而, $f(\cdot)$ 近似值、 (A, B) 或 (B, A) 方向集的最小跃点数可以用来作为评价标准.

3.2 算例检验

首先用随机生成的有向图 $\{G_i(v, \epsilon, s)\}_{i=1}^4$ 表示不同的 ROWTOP 算例,改变节点数量、边、进入点、离去点进行多次计算,构造网络节点图(SLG),系数 α 和 β 分别设为 100 和 3 能够满足实验需求,表 1 中给出了相关参数参考值.

表 1 多目标 HS 算法相关参数建议值

Tab.1 The suggested parameters utilized for multi-objective HS algorithm

参 数	值
和声记忆搜寻率	0.9
记忆调整率	0.02
随机选择率	0.02
解集	100
最大迭代次数	20

表 2 和表 3 列出了 SLG 算例的结果,算法输出的是单向交通重组优化问题算例的 Pareto 前沿估计结果,得到的每个要素值 $f(A, B, G, s), f(B, A, G, s), h_{\min}(A, B, G, s), h_{\min}(B, A, G, s)$ 是经过 30 次的算法独立运算的估计值,双向平衡策略简称为 ROB,整体 Pareto 最优前沿估计值表示为 ULT.

表 2 GCA 算法与 HS 算法关于 $h_{\min}(\cdot)$ 结果对比表

Tab.2 Statistics for $h_{\min}(\cdot)$ obtained by GCA and HS heuristics

节点	(A, B)	最少途径点	局部最优	和声搜索算法平衡点			和声搜索算法最优前沿估计值		
				最小值	平均值	标准差	最小值	平均值	标准差
10	(3,10)	3	3	3	3	0	3	3.778	0.428
	(10,3)		4	3	3	0	3	3.222	0.427
20	(4,17)	4	4	4	4	0	4	4.167	0.514
	(17,4)		5	4	4	0	4	4.500	0.923
30	(1,28)	6	6	6	6.43	0.568	6	7.886	0.963
	(28,1)		8	6	6.30	0.467	6	6.706	0.719
40	(14,29)	6	6	6	6.03	0.183	6	6.812	1.446
	(29,14)		7	6	6.13	0.346	6	8.467	4.501

表 3 GCA 算法与 HS 算法关于 $f(\cdot)$ 结果对比表

Tab.3 Statistics for $f(\cdot)$ obtained by GCA and HS heuristics

节点	(A, B)	局部最优	和声搜索算法平衡点			和声搜索算法最优前沿估计值		
			最小值	平均值	标准差	最小值	平均值	标准差
10	(3,10)	7.046	3.041	14.363	13.421	3	7.780	4.647
	(10,3)	28.386	3.226	16.771	15.489	3	10.528	4.991
20	(4,17)	18.931	4.808	28.687	30.122	4	30.151	24.701
	(17,4)	28.450	6.535	23.924	21.136	5	8.607	3.781
30	(1,28)	81.260	24.006	67.337	38.731	17.910	56.585	33.800
	(28,1)	123.368	18.027	49.545	39.231	14.321	42.285	33.375
40	(14,29)	181.864	61.871	117.784	45.100	49.157	112.265	52.672
	(29,14)	150.721	33.450	115.838	70.003	20.332	92.092	74.116

表 2 列出了 GCA 算法和 HS 算法的最少途经点 $h_{\min}(\cdot)$ 统计结果,也包括 $h_{\min}^+(\cdot)$ (即在不进行单行限制的情况下 (A, B) 途经点的最小值).GCA 算法寻找正向最短路径过程中途经点更接近于 $h_{\min}^+(\cdot)$ 值,但是,对于逆向 (B, A) 的计算效果却很差.

表 3 中 $f(\cdot)$ 的统计结果能够体现算法的实际性能,因为, $f(\cdot)$ 表示路网中加入交通流的复杂情

况下的计算结果.HS 方法得到的路线使得平均途经点数量尽可能少,虽然在算例中 ROB 和 ULT 统计的 $f(A, B, G, s)$ 平均值可能会比 GCA 算法得到的 $f(A, B, G, s)$ 要大,但 $f(B, A, G, s)$ 的平均值却明显小于 GCA 算法得到的结果.

图 3 表示各算例应用 HS 算法得到的 Pareto 前沿近似结果和有向结构图. d 为距离.

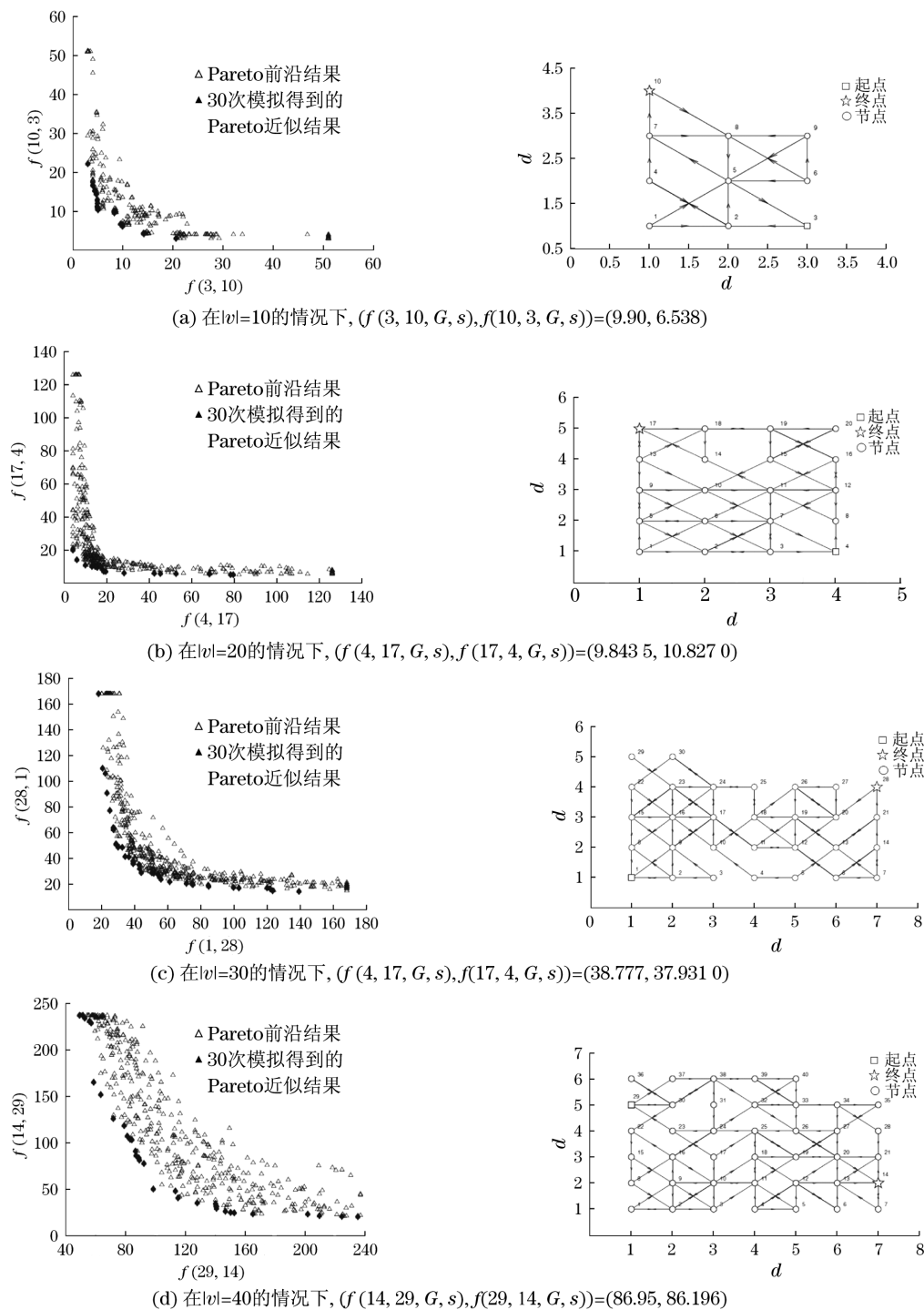


图3 优化结果及有向结构图

Fig.3 Optimization result and graph for the solution

3.3 实例检验

为了验证算法的可行性,现选取某市区为研究范围,每天在早高峰时间,大量的商家在这里进行交易,道路资源的占用,导致了严重的交通矛盾.研究范围内单行支路比较丰富,但是,缺乏有效的单向交通组织策略,实际路网如图4所示(见下页).

在图4中用同心圆点表示城区街道的进入和离

去端点,点划线圈内表示受影响严重的区域.图4中共有119个节点, $|v|=119$.节点1表示来自(到)市南区的进入点(离去点),节点35表示来自(到)市中心的离去点(进入点).图5(见下页)表示经过多目标和声算法得到的双向情况下的 $f(\cdot)$ 最佳平衡值,在该情形下,从点1到点35途经16条线段,从点35到点1经过18条线段,将真实的情况用有向图

来解释,通过式(5)得到的 $h_{\min}^+(\cdot) = 17$,揭示了 HS 算法在寻找最短路径的优异性能.

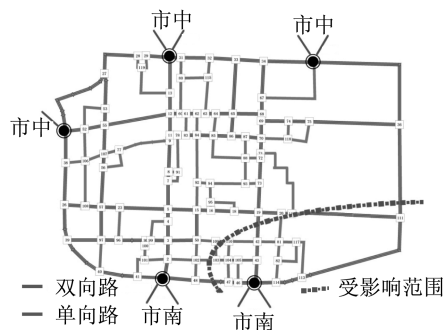


图4 实例路网以及影响范围

Fig.4 Real network and space of influence

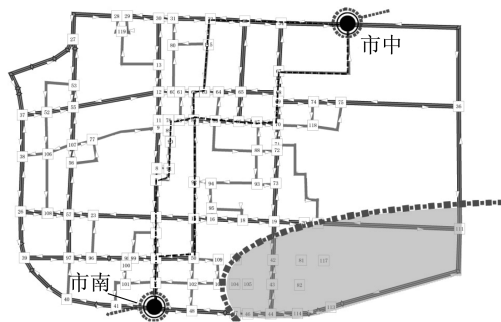


图5 单向交通组织规划图

Fig.5 Programming diagram of one-way traffic organization

图6表示进行30次和声搜索算法后得到的 Pareto 前沿结果.从图6可以看出,产生了较宽包围面,足以说明其平衡性.

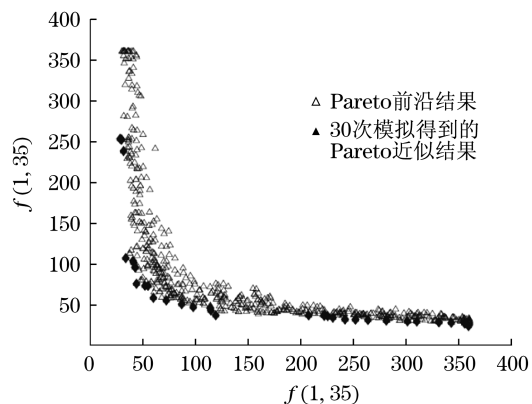


图6 关于 ROWTOP 实例的 Pareto 前沿近似结果

Fig.6 Pareto front approximations of real instance obtained in ROWTOP

4 结论

提出了一种多目标和声搜索的启发式算法 (HS),用以解决城市交通矛盾突发时的单向交通组

织问题,并对该问题进行了求解说明,包括2个目标函数以及如何用蒙特卡罗模拟方法求解.描述多目标和声搜索算法的计算步骤,并与一般算法相比,在不同的算例和实例中验证了 HS 算法的平衡性和高效性.通过计算模拟,证实该方法能够得到近于最优的单行道重组方案,以提高当城市交通冲突发生时路网2节点间的机动车通行性能,减轻部分区域道路阻断对整个地区的通勤影响.

参考文献:

- [1] 董洁霜.港口集疏运系统优化模型[J].上海理工大学学报,2007,29(5):453-456.
- [2] Giridhar A, Kumar P R. Scheduling automated traffic on a network of roads [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(5): 1467-1474.
- [3] Pinninghoff M, Contreras R, Atkinson J. Using genetic algorithms to model road networks [J]. IEEE Computer, 2008, 41(12): 60-67.
- [4] Sanchez-Medina J J, Galan-Moreno M J, Rubio-Royo E. Traffic signal optimization in "La Almozara" district in saragossa under congestion conditions, using genetic algorithms, traffic microsimulation, and cluster computing [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(1): 132-141.
- [5] Mesbah M, Sarvi M, Currie G. Optimization of transit priority in the transportation network using a genetic algorithm [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(3): 908-919.
- [6] Sohn K. Multi-objective optimization of a road diet network design [J]. Transportation Research Part A, 2011, 45(6): 499-511.
- [7] 史峰, 黄恩厚, 陈群, 等. 城市微循环交通网络中单向交通组织优化 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(4): 30-35.
- [8] 龙东方, 史峰, 王英姿. 基于道路负荷与公平性的单向交通组织优化 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6): 109-114.
- [9] Landa-Torres I, Gil-Lopez S, Salcedo-Sanz S, et al. A novel grouping harmony search algorithm for the multiple-type access node location problem [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 39(5): 5262-5270.
- [10] Geem Z W, Kim J H, Loganathan G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search [J]. Simulation, 2001, 76(2): 60-68.
- [11] 刘思远, 柳景青. 一种新的多目标改进和声搜索优化算法 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(34): 27-30.
- [12] Deb K, Pratap A, Agrawal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

(编辑:石 瑛)