

基于改进遗传算法的公交线网优化设计研究

刘好德, 杨晓光

LIU Hao-de, YANG Xiao-guang

同济大学 交通运输工程学院, 上海 200092

School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

E-mail: beuture@163.com

LIU Hao-de, YANG Xiao-guang. Research on transit routes network design based on improved genetic algorithm. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(8): 10-14.

Abstract: The paper researches Transit Network Design problem based on Candidate Route Generation and Transit Routes Optimal Choice which is related to Transit Assignment. The authors focus on the theories and methods of applying an improved genetic algorithm which import the idea of Simulated Annealing Extending to TROC procedure. Test results manifest that this IGA can improve the premature and slow evolution speed phenomenon greatly.

Key words: traffic engineering; Transit Network Design; Transit Route Optimal Choice; improved genetic algorithm; simulated annealing

摘要: 基于候选线路集生成、公交线路优选暨公交客流分配方法, 研究公交线网优化设计问题。重点研究了一种改进遗传算法在公交线路优选过程中的应用理论与方法, 该算法引入适值模拟退火拉伸思想, 研究表明, 该方法能较好地克服标准遗传算法前期进化的早熟和后期进化速度缓慢等现象。

关键词: 交通工程; 公交线网设计; 路线优选; 改进遗传算法; 模拟退火

文章编号: 1002-8331(2007)08-0010-05 **文献标识码:** A **中图分类号:** U492; TP301

1 引言

公共交通是城市社会经济、生活正常运转的基础保障, 是实现城市居住、憩息、工作和交通四大功能的重要元素。优先发展公共交通作为提高交通资源利用效率、缓解交通拥堵的重要手段, 已是世界各国公认的解决大、中城市交通问题的最佳策略。公共汽车交通(简称公交)作为城市公共交通的主体, 承载着城市的主要客流, 公交系统规划一般分为五个阶段: 交通调查与分析、交通需求分析与预测、规划方案制定与调整、公交系统客流分析与评价、公交优先发展保障体系设计。其中公交线网优化设计问题(Transit Route Network Design Problem, TRNDP)作为规划方案制定与调整阶段的主要内容, 自上世纪60年代提出以来^[1], 一直都是科学研究与工程应用中的难点和热点。其主要包括两方面内容: 空间优化和时间优化, 即在满足一系列约束条件的情况下, 寻求一个理想的目标, 以期得到一个最优的公交线路的网络配置和一个与之相关联的最优的发车频率方案。由于求解复杂, 关于TRNDP的研究一般分两步: 先确定网络、再优化发车频率^[1]。本文基于此, 研究公交线网优化设计的模型及其求解算法。

关于公交线网优化设计模型及方法, 一般以乘客出行和运营商两者成本(时间、价值)建立多目标优化函数, 通过分步进行求解^[1-5]。Silman等^[2]同文献[1]一样也将优化过程分为两个阶

段, 不同的是其首先是通过循环的添加和删除线路最终确定线网, 进而优化线路的发车频率; Dubios等^[3]则把BRNDP分解为三个子问题: 道路集选择、线路集选择和发车频率方案确定; Baaj和Mahmassani^[4,5]建立了一套基于人工智能的线网优化解决方案, 其将BRNDP分也为三部分: 一是路径生成算法(Route Generation Algorithm, RGA); 二是线网的分析过程(Transit Route Network Analysis Procedure, TRNAP), 评价线网的同时对公交线路的发车频率进行优化配置; 三是路线改善算法(Route Improvement Algorithm, RIA)。公交线网优化求解方面, Pattnaik等^[6](1998), Jitendra等^[7]分别研究了应用标准遗传算法(Standard Genetic Algorithm, SGA)和并行遗传算法(Parallel Genetic Algorithm, PGA)进行公交线网优化设计; 刘闯、韩印^[8], 胡坚明^[9]分别提出以SGA和蚁群算法进行公交线网优化设计。目前公交线网优化模型由于优化目标明确大同小异, 优化设计方法虽经分解也多依赖于丰富的规划经验, 而求解算法由于基于的优化方法不同, 其适用性也都存在局限。本文基于公交候选线路集生成、公交线路优选, 研究公交线网优化设计求解算法。论文引入模拟退火算法(simulated annealing)的思想, 对SGA进行改进, 并研究其在公交线路优选过程中应用的基本方法。

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.70631002)。

作者简介: 刘好德(1978-), 男, 博士生, 主要从事智能交通运输系统关键理论与技术研究; 杨晓光(1959-), 男, 教授、博导, 主要从事交通信息工程及控制研究。

2 公交线网优化设计方法

2.1 候选线路集生成

公交网络是城市交通网络的子集,由公交站点和站点间路段组成。最终的优化公交线网可视为所有公交首末站之间全部可行公交线路集(全解空间)优选后的子集。通过算法搜索这些可行线路,加上约束条件以及规划师的经验,可得到最小的公交线网优化候选线路集(解空间)。从目前的研究看,有两类方法用于生成公交候选线路。

(1) 面向最短路等的图论方法

公交线路的设计一般以价值费用和出行时间费用最小为目的,为一类广义最短路问题。因此常采用最短路或k-最短路算法作为候选线路集的生成算法。这类方法的优点是简单易用,缺点是没有考虑公交线路实际经行空间的客流情况和通行条件,最短路或k-最短路上未必有足够大的客流密度,或者未必适合公交车辆通行。

(2) 面向客流的启发式方法

这种方法基于有限个节点,进行基于服务客流密度等最大为目标的连接节点搜索,在线路长度等约束条件下产生一系列合理的公交线路作为公交线网优化设计的候选线路集。显然这种算法比前述的最短路相关算法产生的线路能更好的满足客流需求,更趋于理性。

本文重点研究基于改进遗传算法的公交线路优选过程,进而实现公交线网的优化设计,对CRSG方法不展开讨论,后文直接运用k-最短路算法生成公交CRSG进行算法展开研究。

2.2 公交客流分配

公交客流分配主要涉及两项内容:公交出行路径搜索与公交客流分配。本文基于站-站的公交OD数据,进行如下假设:

(1) 出行者总是按直达、1次换乘、2次换乘的优先顺序选择线路,使到达目的地所需的换乘次数最少。

(2) 存在同类出行路径的情况下,出行者不选择次优的路径。

(3) 如果存在多条同类出行线路,以不超过最小出行时间线路时间的一定阈值为准则。

根据上述假设与原则,按公交应提供的服务水平将出行者可能选择的公交路径分为:

(1) I类:直达线路,即“0次换乘+0次长步行”,记为0-T-0-W;

(2) II类:通过一次换乘出行的路径。即“1次原地换乘”和“1次就近换乘”,分别记为1-T-0-W,1-T-1-W;

(3) III类:通过两次换乘出行的路径,“2次换乘”,记为2-T-0-W。

下面以1-T-0-W为例研究公交出行时间的模型表达。对于一个给定的OD对(i,j),令RS、RS_j分别表示所有经过i、j的公交线路,定义如下:

NLR_i ——隶属于经过i站点的线路 $r_i \in RS_i$ 的站点集合;

NLR_j ——隶属于经过j小区的线路 $r_j \in RS_j$ 的站点集合。

令 $T^{1-T-0-W} = NLR_i \cap NLR_j$,如果

$$T^{1-T-0-W} = NLR_i \cap NLR_j = \{n_1, n_2, \dots, n_k\} \neq \Phi \quad (1)$$

则i、j之间存在k条可通过1次换乘完成的公交出行路径,简化图示如图1。

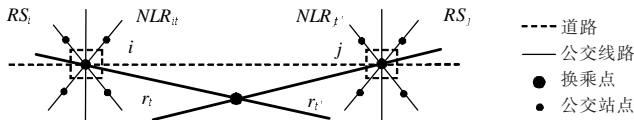


图1 “1次换乘+0次长步行”公交出行路径模式图

令 $T_{Ru(n_i)t_j}^{1-T-0-W}$ 表示i处换乘线路 r_i 至站点 n_i 换乘线路 r_j 至j的1次换乘出行路线。取候车时间为发车间隔的一半,事先定义换乘的惩罚时间值 t_{tr_pnl} ,则每条1-T-0-W公交路径的出行时间:

$$TT_{u(n_i)t_j}^{1-T-0-W} = t_{u,i}^{wait} + t_{u,i,n_i}^{inv} + t_{tr_pnl} + t_{n_i,t_j}^{wait} + t_{n_i,t_j}^{inv} = \frac{60}{2 * f_i} + t_{u,i,n_i}^{inv} + t_{tr_pnl} + \frac{60}{2 * f_j} + t_{n_i,t_j}^{inv} \quad (2)$$

同理可求其它出行路径方式下的公交出行时间表达式。

公交客流分配有非均衡、均衡两类方法。两者的不同在于非均衡类方法一般不考虑公交线路运输能力的限制以及由于拥挤造成的车辆停靠延误。本文不考虑公交运输能力和拥挤影响,不同线路按出行时间反比例分配公交客流。

以往研究就公交线网优化建立了很多模型,本文研究基于优化模型对初始线路集进行优选的过程。以用户出行时间和未满足需求两者费用最小为目标,根据前述的出行时间表达式,建立如下优化模型,考虑算法实现的复杂程度,为说明问题暂列一项约束条件。

$$\begin{aligned} \min &= C_1 * VOT * \sum_{i \in N, j \in N} d_{ij} * t_{ij} + \\ & C_2 * VOD * \left(\sum_{i \in N, j \in N} d_{ij} - \sum_{i \in N, j \in N} d_{ij}^I - \sum_{i \in N, j \in N} d_{ij}^{II} - \sum_{i \in N, j \in N} d_{ij}^{III} \right) \quad (3) \\ \text{s.t.} & D_{\min} \leq D_m \leq D_{\max} \quad r_m \in R \end{aligned}$$

式中, d_{ij} ——OD客流量,其中 d_{ij}^I 等为使用各类出行路径的OD量; t_{ij} ——出行时间,用式(2)原理方式计算; C_1, C_2 ——权重系数; VOD, VOT ——单位时间和单位OD量换算为价值的系数; r_m, R ——m公交线,公交初始线路集; $D_{\min}, D_{\max}, D_{\max}$ ——最短、最长线路长度,最大线路数。

3 改进的遗传算法设计

3.1 遗传算法简介

遗传算法是一类借鉴生物界的进化规律——适者生存、优胜劣汰遗传机制演化而来的随机搜索算法,由美国Michigan大学的J.Holland教授1975年首先提出。标准遗传算法由选择、交叉、变异这三个算子组成^[10]。遗传算法作为一种全局优化搜索算法与其它优化搜索算法相比具有许多独特的性质,目前已成功应用于组合优化、机器学习、信号处理、自适应控制、人工生命等领域。本文所研究的公交线网优化设计是一个典型的组合优化问题,适合应用遗传算法求解。然而,标准遗传算法还存在某些缺陷^[7],如:

(1) SGA通常采用根据适配值的大小来决定该个体是否被复制的选择机制,容易出现种群最优个体被大量繁衍的情况,形成近亲繁殖,造成算法的局部搜索和过早收敛,即早熟。从而导致全局寻优过程失效,特别对于多峰函数容易出现这种现象;

(2)交叉过程中适配值较大的个体除部分基因被遗传外,其个体本身往往已不复存在。这使得优生代的寿命太短,具有杂交优势的种群不能隔代繁衍,限制了算法的求解效率;

(3)SGA 接近最优解时,因随机交叉操作使得解长时间不能收敛,出现误差平分现象。

对于 SGA 有许多改进和功能扩充方法,基本上可分为以下四个步骤:①参数选择与初始化;②种群的适配值计算;③遗传操作产生后代;④中止条件的判断。本文在遗传选择过程引入模拟退火拉伸方法对 SGA 进行改进。

3.2 改进遗传算法设计

下面根据上述 SGA 及其改进的步骤,结合公交线网优化设计问题研究改进的遗传算法。

(1)参数选择和初始化

①编码

首先,将决策变量编码为二进制串。在公交线网优化模型中,变量是各候选线路的编号,属于单参数问题,根据线网规模直接将各条线路编码,然后组合成一个二进制串,即一条染色体 X_i 。精度(小数点后位数 α)与编码长度(二进制串位数 β)之间有如下关系:

$$(x_u - x_l)10^\alpha \leq 2^\beta - 1 \quad (4)$$

其中 u 和 l 分别为变量的上限和下限值。对于染色体数值的解码,有

$$x_i = x_l + \frac{x_u - x_l}{2^\beta - 1} \left(\sum_{j=1}^{\beta} \gamma_j * 2^{j-1} \right) \quad (5)$$

其中 γ_j 为二进制串第 j 位的数值。

②初始种群

在确定初始种群时,首先要确定种群规模(N 条染色体),这一过程相当于在优化解空间中随机选择 N 个点作为初始解,本问题为随机选择组候选线路组合。

③参数选择

确定交叉概率 P_c (即种群中平均有 $N \cdot P_c$ 条染色体进行交叉操作)和变异概率 P_m (即种群中平均有 $N \cdot P_m$ 条染色体发生变异),即公交线路随优化迭代变化。

(2)种群的适配值计算

以式(3)目标函数计算染色体适配值 $f_i (i=1, 2, \dots, N)$,以测定染色体对目标的适应性。

(3)遗传操作产生后代

①选择(Selection)

遗传算法在运行早期个体差异较大,当采用传统的轮盘赌方法时,后代产生的概率和适配值大小成正比。这样会使遗传算法早期优秀个体的后代充斥整个种群,造成早熟现象。而在遗传算法后期,适配值趋于一致,优秀个体在后代中优势不明显,使整个种群进化速度趋于停滞。本文引入 Paul L.Stoffa 提出的适配值模拟退火拉伸方法解决这一问题。该方法实际上是源于另一种启发式搜索算法——模拟退火(Simulated Annealing)算法^[1]。具体作法是:

步骤 1 计算某一代群体中某个染色体被复制产生下一代的概率 P_i :

$$P_i = C * e^{-D^g / T} \sum_{i=1}^N e^{-D^g / T} \quad (6)$$

$$T = T_0 * k^{g-1} \quad (7)$$

式中: P_i ——第 i 个染色体的选择概率;

f_i ——第 i 个染色体的适配值;

N, g ——种群中染色体个数,遗传迭代数序号;

T, T_0 ——当代温度,初始温度;

C, D ——正值的参数;

k ——降温速率,取值 0.9。

步骤 2 计算各染色体的累计概率 q_k :

$$q_k = \sum_{i=1}^k P_i \quad k=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

步骤 3 在 $[0, 1]$ 区间内产生一个均匀分布的随机数 r 。如果 $r \leq q_1$,则选择第一个染色体进行复制;如果 $q_{k-1} < r \leq q_k$,则选择第 r 个染色体。循环 N 次,产生下一代种群。

通过上述方法进行选择操作,当 GA 前期温度较高时,适配值相近的个体产生后代的概率相近;而随着温度的不断下降,适配值相近的个体被选择复制的概率差异放大,从而使优秀的个体优势更为明显。这样可以同时在很大程度上避免 GA 前期早熟和后期进化缓慢等问题。

②交叉(Crossover)

本文采用双亲遗传法。方法为:对于随机从种群中选出的某对染色体,按交叉概率 P_c 随机地在其上选择一个断点,交换双亲上断点的右端,生成新的后代。

③变异(Mutation)

遗传算法实现变异是赋予每个基因一个相对较小的变异概率 P_m 。通过随机模拟决定该基因是否变异("1"变为"0", "0"变为"1")。 P_m 过小使解有一定的局限性,遍历性较差。变异概率较大使得进化的随机性增大,不容易得到稳定的解。因此,变异概率的确定应慎重。

(4)中止条件的判断

本文采用固定代数判断种群是否已经成熟并不再有进化趋势组合作为中止条件,即在达到最大代数前判断连续几代个体平均适配值是否已不变,或变化值小于某个极小的阈值。

3.3 基于 IGA 的公交线网优化设计

基于前面设计的改进遗传算法,求解公交线网优化设计模型的计算步骤如下:

步骤 1 输入公交网络基础数据,用户参数等数据。种群规模 N ,交叉概率 P_c 和变异概率 P_m ,初始温度 T_0 ,遗传代数 I 和遗传收敛阈值 δ ;

步骤 2 运用 k-最短路算法生成可用于选择的公交候选线路集,并对其顺序编号;

步骤 3 将公交候选线路编号转换成二进制串,并根据线网规模组合多条线路编码为一个串,随机产生 N 个染色体(N 组线网方案)组成初始种群;

步骤 4 对 N 个染色体(N 组线网方案)分别进行公交客流分配,按实际分配结果计算第 i 代种群中每个染色体的适配值 $f(X_i)$,平均适配值 \bar{f} 以及 $|\bar{f}_i - \bar{f}_{i-1}|$,并判断是否满足 $|\bar{f}_i - \bar{f}_{i-1}| < \delta$,若

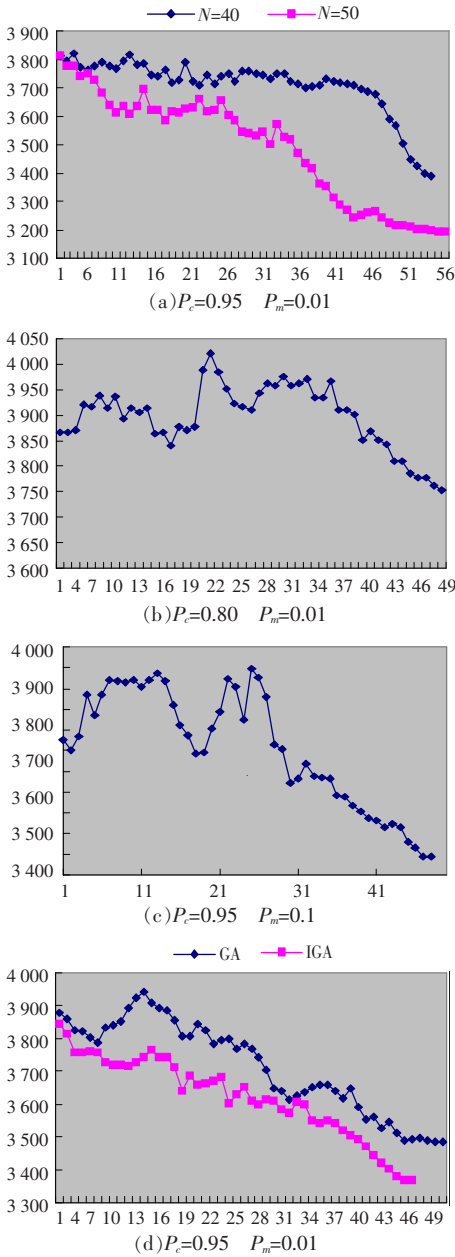


图4 IGA算法测试结果图(X:迭代次数;Y:适配值)

大规模的种群每次迭代比较小规模种群迭代的适配值略优;而较低的交叉概率(图4(b))和略大的变异概率(图4(c))都将增加寻优的不稳定性; T_0 的选取结合参数 D 使种群初次运算的适配率维持在相当的水平。最终取种群规模 N 为50,初始温度 T_0 为100,变异概率为0.01, δ 为0.5。分别利用SGA(不进行模拟退火拉伸)和IGA进行多次仿真。其中SGA算法测试结果部分为早熟解,未达到全局最优;SGA合理的测试结果与IGA算法的收敛图如图4(d)所示。线网优化结果如表2所示。

从图4(d)可看出,改进的遗传算法比SGA在迭代全程表现出较好的收敛速度性能,尤其在进化末期,IGA也保持着相当的适配下降趋势,验证了3.2节对其进行模拟退火拉伸的分析。

表2 线网优化结果

No	线路	路径	k短
1	4	2-3-4-6-7-5	2
2	7	2-8-9-13-14	1
3	11	2-8-9-13-15-16-17-18-22	1
4	19	4-3-8-9-13-14	1
5	26	4-3-8-9-13-15-20-21-24	2
6	45	14-15-16	1
7	46	14-20-19-16	2

5 结论

本文基于候选线路集生成,结合公交客流分配方法优选公交线路进行公交线网优化设计。论文提出了一种改进的遗传算法,并研究了其在公交线路优选过程中应用的基本理论与方法。该算法引入了适值模拟退火拉伸思想,研究及测试结果表明,该方法能较好地克服SGA前期进化早熟和后期进化速度缓慢等问题。

由于论文侧重研究基于线路优选的求解算法,对公交线网优化设计模型未做深入探讨,将在以后的工作中重点对线路搜索与公交线网优化模型展开研究。(收稿日期:2006年12月)

参考文献:

- [1] Lampkin W, Saalmans P D. The design of routes, service frequencies and schedules for a municipal bus undertaking: a case study [J]. Operational Research Quarterly, 1967, 18, :375-397.
- [2] Silman L A, Barzily Z, Passy U. Planning the route system for urban buses [J]. Computers & Operations Research, 1974, 1(2):201-211.
- [3] Dubois D, Bell G. A set of methods in transportation network synthesis and analysis [J]. J. Operational Research Soc, 1979, 30(9):797-808.
- [4] Baaj M H, Mahmassani H S. TRUST: a lisp program for the analysis of transit route configurations [J]. Transportation Research Record, 1990, 1283:125-135.
- [5] Baaj M H, Mahmassani H S. Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks [J]. Transpn Res C, 1995, 3(1):31-50.
- [6] Pattnaik S B, Mohan S, Tom V M. Urban bus transit route network design using genetic algorithm [J]. Journal of Transportation Engineering, 1998, 124(4):368-375.
- [7] Jitendra Agrawal, Mathew, Tom V. Transit route network design using parallel genetic algorithm [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2004, 18(3):248-256.
- [8] 刘闯, 韩印. 基于遗传算法的智能化公交网络优化方法研究 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(34):208-209.
- [9] Hu Jian-ming, Yang Zhao-sheng, Feng Jian. Study on the optimization methods of transit network based on ant algorithm [C]. Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference 2001: IVEC 2001, 2001:215-219.
- [10] Holland J H. Adaption in nature and artificial systems [M]. Michigan: The University of Michigan Press, 1975.
- [11] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.