

基于改进遗传—模拟退火算法的公交排班优化研究^{*}

王庆荣^{1,2}, 袁占亭², 张秋余²

(1. 兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要: 结合公交车辆调度自身的特点, 兼顾公交公司与乘客双方的利益, 建立了公交排班优化模型, 以发车时刻为基因变量进行编码, 对两个相邻的发车间隔之差、最大最小发车时间间隔、乘客的满载率等条件进行约束限制, 提出了基于改进的遗传—模拟退火算法; 对该模型进行优化求解, 克服了传统优化算法的缺陷, 提高了优化设计过程的求解效率。通过仿真实验得到了利用改进的遗传—模拟退火算法进行求解的不均匀发车时刻表。结果表明, 改进的遗传—模拟退火算法能够在公交智能排班优化问题的巨大搜索空间中可靠地找到近似最优解, 大大提高了计算效率。

关键词: 公共交通; 公交调度; 行车时刻表; 遗传—模拟退火算法; 适应度函数

中图分类号: TP301. 6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)07-2461-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.016

Study on transit scheduling optimization based on improved genetic-simulated annealing algorithm

WANG Qing-rong^{1,2}, YUAN Zhan-ting², ZHANG Qiu-yu²

(1. School of Electronic & Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Electrical & Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In combination of the characteristic of public traffic vehicles' scheduling, established the optimization model of public transportation vehicles' scheduling, giving attention to the benefits of passengers and companies. Adopting the coding method using departing time as gene variable, this paper proposed the improved genetic-simulated annealing algorithm by imposing the constraints on the time difference between the two bus headways, the maximum and the minimum of the bus headway, and passenger load rate. It adopted the algorithm to find solution of the model which overcame the advantages of traditional optimization algorithms, improved the solving efficiency. Finally, it obtained the simulation results by using the improved genetic-simulated annealing algorithm for solving the non-uniform grid scheduling. Results show that the improved genetic-simulated annealing algorithm can find the approximate best result in the huge search space of optimization, while greatly increases the computational efficiency.

Key words: public traffic; public traffic vehicles' scheduling; departing scheduling; genetic-simulated annealing algorithm; fitness function

公交排班问题是城市公交调度的核心内容, 是公交调度人员、司乘人员进行工作以及公交车辆正常运行的基本依据, 也是公交企业对社会的承诺。近年来, 国内外相关学者就公交调度问题开展了大量的研究^[1-3], 大多都是基于路径或行程时间最优条件下的运输排班, 重点集中在排班问题的近似算法方面。但由于公交排班是一个受多因素影响的多目标优化问题, 随着公交调度问题规模的扩大以及计算复杂性的增大, 尤其是当对实时性及动态性有要求时, 传统的随机搜索法以及人工神经网络法等具有一定的局限性, 文献[2,3]虽然以一个统计时间段为模型的基本对象, 利用遗传算法进行优化, 但忽略了整个时间段内的数据变化, 同时计算效率比较低。

1 公交排班数学模型的建立

公交排班的目的是确定最优或者近似最优的运营车辆的

发车时刻表。行车时刻表的编制应是在满足客流需求的前提下, 尽量减少不必要的投入。

由于受到数目众多的排班规则的影响, 以及要达到多项指标的均衡, 公交车辆排班问题是一类受多因素影响的多目标规划问题。为了更好地进行排班算法的研究, 本文进行如下假设: a) 各公交车车辆类型一致; b) 公交车按调度时间表准时进站或出站, 不滞留乘客, 车辆保持匀速行驶; c) 各时段以内乘客到站服从均匀分布; d) 以分钟作为最小的时间单位; e) 在同一时段以内, 相邻两车发车时间间隔相等; f) 实行统一票价。

假设 m 为在整个调度周期内发车车次总数; n 为线路的车站总数; t_i 为第 i 车次的始发站发车时间 ($\min$) ($i = 1, 2, \dots, m$); r_j 为第 j 站在调度周期内随时间变化的乘客到达率 ($j = 1, 2, \dots, n$); WT'_j 为所有乘客总的等车时间; w' 为总的等车时间成本 (β 元)。 WT'_{ij} ^[3] 为

收稿日期: 2011-11-24; **修回日期:** 2012-01-16 **基金项目:** 国家教育部人文社科规划项目(11YJAZH132, 11YJCZH170); 甘肃省自然科学基金资助项目(1107RJZA166)

作者简介: 王庆荣(1977-), 女, 宁夏固原人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为城市交通控制及智能交通系统(zhudd003@163.com); 袁占亭(1961-), 男, 陕西扶风人, 教授, 博导, 主要研究方向为城市交通控制及智能交通系统; 张秋余(1966-), 男, 河北辛集人, 研究员, 主要研究方向为城市交通控制及智能交通系统。

$$WT'_{ij} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_j \times \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{2}$$

设某时期一城市平均每分钟的候车换算费用为 ζ , 则一天内乘客总的等车时间成本为

$$w' = \zeta \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_j \times \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{2} \quad (1)$$

设 R' 为公交运营收益; C 为车辆运营的单位可变成本 (元/车·km); L 为线路总的长度 (km); P 为统一的票价 (元/人·次); 公交企业的运营收益为整个收入减去整个运营成本; 则有

$$R' = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{t=t_{i-1}}^{t_i} r_j \times t \times P - C \times L \times m \quad (2)$$

设 α 为乘客等车时间成本系数; β 为公交公司运营收益权系数。根据二次惩罚法, 公交排班优化模型的目标函数为

$$\min z = \alpha \times w' - \beta \times R'$$

$$\text{即} \quad \min z = \alpha \times \left(\zeta \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n r_j \times \frac{(t_i - t_{i-1})^2}{2} - \beta \times \right.$$

$$\left. \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{t=t_{i-1}}^{t_i} r_j \times t \times P - C \times L \times m \right) \right) \quad (3)$$

为了保证运力资源的充分利用, 尽量减少公交车数, 每一辆公交车内的旅客人数不得低于期望满载人数。设 N_0 为车容量 (人/车); ρ_0 为设车平均期望满载率 ($0 < \rho_0 < 1$); $D_j(t)$ 为第 j 站在调度周期内随时间变化的断面通过率, 则平均满载率应满足^[3]

$$\left[\sum_{t=t_{i-1}}^{t_i} \sum_{j=1}^m D_j(t) \right] / m \geq \rho_0 \times N_0 \quad (4)$$

任意相邻两车之间的发车间隔 $\delta = t_i - t_{i-1}$ 应满足最大最小发车间隔约束^[4], 即

$$T_{\min} \leq \delta \leq T_{\max} \quad i = 2, 3, \dots, m \quad (5)$$

其中: $T_{\max}$ 表示相邻两车之间的最大发车间隔 (min); $T_{\min}$ 表示相邻两车之间的最小发车间隔 (min)。

为保证发车时刻的连续性, 任意两个相邻的发车间隔之差不宜太大, 即

$$|(t_{i+1} - t_i) - (t_i - t_{i-1})| \leq \varepsilon \quad i = 2, 3, \dots, m-1 \quad (6)$$

其中, ε 表示两相邻发车间隔之差的限值。

另外, 每辆车对任何站点的服务时间不大于规定的服务时间, 即

$$t_{sj} \geq t_{dj} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (7)$$

2 基于改进 GA-SA 的优化算法设计

2.1 约束条件的处理

根据二次惩罚法的内点法^[5], 在可行域内求得一个可行的初始点, 在求解过程中探索点必须保持在可行域内部。本文采用内点法建立惩罚项, 以调整个体的适应值, 最终得到的目标函数为

$$\begin{aligned} \min f(X) = & \min z + \lambda_1 \sum_{i=2}^m \left\{ \max \left\{ 0, \sum_{t=t_{i-1}}^{t_i} \sum_{j=1}^m D_j(t) - m \times \rho_0 \times N \right\} \right\} + \\ & \lambda_2 \sum_{i=2}^m \left\{ \max \left\{ 0, T_{\min} - (t_i - t_{i-1}) \right\} \right\} + \\ & \lambda_3 \sum_{i=2}^m \left\{ \max \left\{ 0, (t_i - t_{i-1}) - T_{\max} \right\} \right\} + \\ & \lambda_4 \sum_{i=2}^{m-1} \left\{ \max \left\{ 0, |(t_{i+1} - t_i) - (t_i - t_{i-1})| - \varepsilon \right\} \right\} + \end{aligned}$$

$$\lambda_5 \sum_{j=1}^n \left\{ \max \left\{ 0, t_{sj} - t_{dj} \right\} \right\} \quad (8)$$

其中: $\min f(x)$ 是利用惩罚函数后的目标函数值; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5 > 0$ 分别为惩罚函数作用于约束条件的系数, 即惩罚系数。

2.2 优化算法设计

公交排班的目标函数是最小化问题, 为保证染色体的适应度非负, 采用 $F(X) = C_{\max} - f(X)$ 的适应度函数^[6]。其中, $f(X)$ 为个体目标函数, $C_{\max}$ 为同一代群体中所有目标函数的最大值。由于乘客到达车站的分布影响排班优化, 高峰期单位时间内到达各站的乘客数增多, 发车间隔应缩短, 而其他非高峰期的发车间隔应增长。此时, 完全靠随机产生初始群体不能满足实际需要, 应对初始群体编码调整, 即

$$x'_i = x_k \times a^{li-kl} + x_i \times (1 - a^{li-kl}) \quad (9)$$

其中: x'_i 是基因 x_i 经调整后的值; x_k 为收缩中心; a 为收缩系数, $a \in (0, 1)$ 。

为保持群体的多样性、调整局部搜索能力及防止出现局部最优等现象。本文采用均匀变异, 即首先选择产生变异个体 x_i , 然后随机产生变异基因位置作为变异点, 并以设定的变异概率取一均匀分布的随机数 r 来代替原基因。由于是一非均匀发车时刻表, 且以每一时刻作为染色体的基因, 因此染色体中任一基因 x_k 的取值范围为 (x_{k-1}, x_{k+1}) , 则变异后的新基因 x'_k 为

$$x'_k = x_{k-1} + r \times (x_{k+1} - x_{k-1}) \quad (10)$$

改进的 GA-SA 主要包含了选择、交叉、变异和退火操作, 算法过程中依次作用于群体 $P(t)$, 继而产生新一代群体 $P(t+1)$ 。基本算法步骤如下:

a) 确定种群大小 n , 交叉概率 P_c , 变异概率 P_m , 初始温度 T_0 。

b) 初始化种群 P_0 , 随机产生 n 个可行解 $x_i (1 \leq i \leq n)$ 组成初始种群。

c) 选择操作。

d) 交叉操作和模拟退火操作。 p_1, p_2 按交叉概率交叉生成子代 c_1, c_2 , 计算 $f(c_i), f(p_i) (i = 1, 2)$ 并进行模拟退火操作, 若 $f(c_i) > f(p_i)$, 则用 c_i 代替 p_i , 否则以概率 $e^{[(f(c_i) - f(p_i)) / T]}$ 接受 c_i ; 若接受, 则用 c_i 代替 p_i , 否则 p_i 保持不变。

e) 变异操作和模拟退火操作。 p_1, p_2 按变异概率变异生成子代 c_1, c_2 , 计算 c_i, p_i 的适应度 $f(c_i), f(p_i) (i = 1, 2)$ 并进行模拟退火操作, 若 $f(c_i) > f(p_i)$, 则用 c_i 代替 p_i , 否则以概率 $e^{[(f(c_i) - f(p_i)) / T]}$ 接受 c_i ; 若接受, 则用 c_i 代替 p_i , 否则 p_i 保持不变。

f) 降温。 $T = T_0 \times a^K$, a 为一个 $[0, 1]$ 间的常数, K 为迭代次数^[7]。

g) 算法终止条件判断。若满足终止条件, 则输出最优解, 算法结束; 否则转步骤 c)。

3 实例分析及仿真

本文选取兰州市 139 路公交运营线路为例, 不失一般性, 只考虑上行线路, 139 路公交共设 13 个站。根据调查, 兰州市 2010 年下半年城镇单位在岗职工年平均工资为 14 638 元/人,

如果按双休日及法定的节假日来计算,半年大概有62天的休息时间,即有120天在工作,每天平均按工作8小时计算,则平均每分钟的车候换算费用 ζ 为0.254元。以距离首发时刻的时间间隔为发车时刻,一天之内的总班次为 m ,总时间为910 min。 x_1 在这里定义首发时刻为0分钟发车,对应早上6:10点发车, x_m 为第910 min发车,对应21:00。

为了确定交叉概率、变异概率、进化代数等遗传算法参数,进行了大量实验,最终得到如下理想的参数:交叉概率 P_c 为0.95,变异概率 P_m 为0.0005,种群规模为200,遗传代数为600,初始温度 T_0 为6000,降温函数 $T_k = T_{k-1} \times \exp(-w \times k^{\frac{1}{N}})$, k 为进化代数, w 取0.889; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ 分别取1、1.4、2.2、2.1、1.8。线路参数设置表1所示。

表1 线路参数设置

参数	取值	参数	取值
线路总长度 L/km	6.2	车辆满载时的容量 $N_0/\text{人/车}$	65
车速 km/h	20	相邻车辆最大发车间隔 $T_{\max}/\text{min}$	20
一个调度周期内发车 车次总数 $m/\text{次}$	100	相邻车辆最小发车间隔 $T_{\min}/\text{min}$	20
早班发车时刻	6:40	相邻两车发车间隔之差的限制 ε	4
末班发车时刻	21:00	各车平均期望满载率 $\rho_0/\%$	80
票价 $P(\text{元/人} \cdot \text{次})$	1	乘客的等车时间成本系数 α	200
车辆运行的单位可变 成本 $\text{元/车} \cdot \text{km}$	3.5	公交公司的运营收益系数 β	1

最后用MATLAB进行了仿真实验,算法最终收敛到稳定状态。从实验进程可以得知,随着代数的增加,群体中个体平均目标函数值和最佳个体的目标函数值都有明显的收敛趋势,但最优个体的收敛速度要优于个体平均的收敛速度,收敛更快。群体目标平均值和最优个体目标值随进化代数的变化分别如图1、2所示。

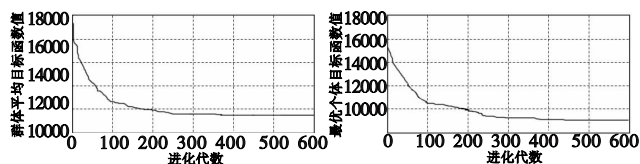


图1 群体目标平均值随进化代数的变化

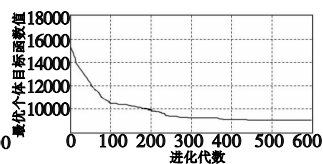


图2 最优个体目标值随进化代数的变化

经过改进的GA-SA得到的最优解如下:

$X[m] = \{0, 15, 27, 37, 47, 53, 59, 65, 70, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 106, 112, 118, 124, 131, 139, 147, 155, 163, 171, 180, 190, 200, 210, 223, 236, 248, 260, 273, 286, 298, 310, 320, 328, 334, 340, 348, 356, 368, 380, 392, 402, 412, 422, 432, 440, 448, 456, 464, 472, 482, 492, 502, 515, 528, 540, 552, 562, 574, 584, 594, 603, 612, 620, 628, 636, 642, 648, 654, 659, 664, 669, 674, 679, 684, 689, 695, 701, 707, 717, 729, 741, 751, 761, 771, 779, 787, 795, 803, 811, 819, 827, 837, 848, 860\}$

从而得到兰州139路公交全天的发车时刻表如下:

6:40 - 6:55 - 7:07 - 7:17 - 7:27 - 7:33 - 7:39 - 7:45 - 7:50 - 7:55 - 8:00 - 8:05 - 8:10 - 8:15 - 8:20 - 8:26 - 8:32 - 8:38 - 8:44 - 8:51 - 8:59 - 9:07 - 9:15 - 9:23 - 9:31 - 9:40 - 9:50 - 10:00 - 10:10 - 10:23 - 10:36 - 10:48 - 11:00 - 11:13 - 11:26 - 11:38 - 11:50 - 12:00 - 12:08 - 12:14 - 12:20 - 12:28 - 12:36 - 12:48 - 13:00 - 13:12 - 13:22 - 13:32 - 13:42 - 13:52 - 14:00 - 14:08 - 14:16 - 14:24 - 14:32 - 14:42 - 14:52 - 15:02 - 15:15 - 15:28 - 15:40 - 15:52 - 16:02

- 16:14 - 16:24 - 16:34 - 16:43 - 16:52 - 17:00 - 17:08 - 17:16 - 17:22 - 17:28 - 17:34 - 17:39 - 17:44 - 17:49 - 17:54 - 17:59 - 18:04 - 18:09 - 18:15 - 18:21 - 18:27 - 18:37 - 18:49 - 19:01 - 19:11 - 19:21 - 19:31 - 19:39 - 19:47 - 19:55 - 20:03 - 20:11 - 20:19 - 20:27 - 20:37 - 20:48 - 21:00。

另外,传统GA、GA-SA和改进的GA-SA算法计算出的全天发车频率分布如图3所示。

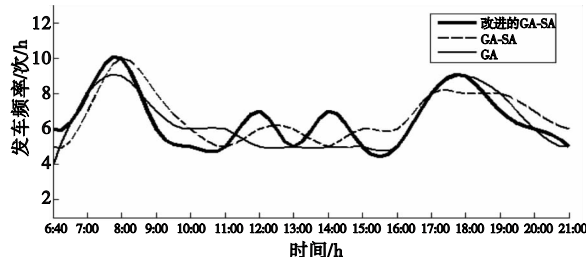


图3 传统GA、GA-SA和改进的GA-SA算法下的全天发车频率分布比较

由图3可见,基于改进的GA-SA算法优化的发车频率形成了比较明显的两个大高峰和两个小高峰,与客流的早晚上下班两个高峰时段以及中午休息小高峰时段相对应,更加符合客流的实际分布,充分体现出了公交公司和乘客的共同利益,进一步说明改进的GA-SA算法具有更高的效率。它更能够可靠地在排班优化问题的巨大搜索空间中找到最优或近似最优解。

4 结束语

综上所述,利用改进的GA-SA应用于公交智能排班具有较好的效果,它更能够可靠地在排班优化问题的巨大搜索空间中最短时间内找到最优或近似最优解,是解决公交调度优化问题的有效方法,同时也表明所建立的公交调度模型是切合实际的、是可行的。但本文在具体运算过程中,对问题进行了许多简化和假设,实际上,候车的乘客人数在某一时间段内不一定服从均匀分布,公交车辆匀速行驶也不符合实际情况等。这一部分的理论和方法还需进一步的分析和研究。

参考文献:

- [1] SONG Sung-hun. Vehicle scheduling problems with time-varying speed [J]. Computers & Industrial Engineering, 1997, 33 (3-4): 853-856.
- [2] UKOVICH P R. Comparison of different solution approaches to the vehicle scheduling problem in a practical case [J]. Computers & Operations Research, 2000, 27 (13): 1249-1269.
- [3] 李跃鹏,安涛,黄继敏,等. 基于遗传算法的公交车辆智能排班研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2003, 3 (1): 41-44.
- [4] ZHOU Kang, TONG Xiao-jun, XU Jin. Closed circle DNA algorithm of change positive-weighted Hamilton circuit problem [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20 (3): 636-642.
- [5] ZHOU Kang, GAO Zun-hai, XU Jin. An algorithm of DNA computing on 0-1 planning problem [J]. Advances in Systems Science and Applications, 2005, 5 (4): 587-593.
- [6] 王琦,孙竹梅. 基于遗传算法的城市交通优化分配[J]. 电力学报, 2009, 24 (2): 113-116.
- [7] 周康,殷燕芳,解智,等. 城市交通优化中基于对偶算法的元胞自动机[J]. 华中科技大学学报, 2010, 38 (1): 50-54.