

基于客流时空分布特性的南宁轨道交通1号线 列车运行图交路优化

韩 嘉

(南宁轨道交通集团有限责任公司,530029,南宁//高级工程师)

摘 要 优化调整列车运行图交路,对于节约运行成本、提升服务质量和运营效率具有重要意义。提出了一种基于模拟退火算法思想的粒子群优化算法用于优化调整列车运行图交路。以乘客出行等待时间最小化为目标函数,构建了列车运行图交路优化模型;设计了基于模拟退火算法思想的粒子群优化算法,用于求解变量全局最优解;以南宁轨道交通1号线为例,对列车时刻表的发车时间、发车间隔等要素进行了优化,并分析了优化后的列车运能和运量的匹配性。结合实例发现,提出的模型与算法能够较好地解决列车运能和运量问题,提高了乘客乘车舒适度。

关键词 城市轨道交通;列车运行图;运行交路;客流时空分布特性

中图分类号 U292.4⁺1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.02.011

Optimization of Nanning Rail Transit Line 1 Train Diagram Routing Based on Passenger Flow Spatiotemporal Distribution Characteristics

HAN Jia

Abstract Optimizing and adjusting train diagram routing is of great significance for saving operation cost, improving services quality and operating efficiency. A PSO (particle swarm optimization) algorithm based on SA (simulated annealing) algorithm is proposed to optimize and to adjust train diagram. Taking the minimization of passenger waiting time as the objective function, an optimization model of train diagram routing is constructed. A PSO algorithm based on SA algorithm is designed to get the global optimal solution of variables. Taking Nanning Rail Transit Line 1 as an example, the departure time, departure interval and other elements of the train timetable are optimized, and the compatibility between the optimized train capacity and the traffic volume is analyzed. It is found through practical case that the proposed model and algorithm can tackle the issues of train capacity and traffic volume well, improving the passenger ride comfort.

Key words urban rail transit; train diagram; operation routing; passenger flow spatiotemporal distribution characteristics

Author's address Nanning Rail Transit Group Co., Ltd., 530029, Nanning, China

0 引言

随着城市轨道交通线网的快速发展,客流时空分布不均衡性日渐明显,部分区段出现列车运量不足或列车拥挤程度过高等问题,利用传统单一交路的平行列车运行图很难较好地给予解决。因此,考虑客流时空分布特性对列车运行图交路进行优化,对于调整运能、优化服务质量具有积极的指导作用。目前,国内外有关列车运行图交路优化的研究较多,大部分都是针对单条线路或全线网优化两个维度展开分析。单条线路优化方面,文献[1]考虑列车运行成本和服务质量两个因素,构建了基于分段线性函数的时刻表优化模型。文献[2]以列车节能为导向,对列车在始发站的出发时间进行了优化。文献[3]考虑乘客旅行时间和列车拥挤度两个因素,根据线路不同区间的客流差异情况提出快慢车开行方案。文献[4]考虑客流时空分布特性和线路列车车底运用两个因素,对单条线路的列车时刻表进行了优化。全线网优化方面,文献[5]考虑末班车的运营要求和乘客出行需求两个因素,构建了线网末班车时刻表优化模型。文献[6-7]考虑线网换乘站乘客换乘等待时间,对首班车的列车时刻表进行了优化,进而结合SA(模拟退火算法)和GA(遗传算法)进行求解。文献[8-9]对不同交通工具之间换乘衔接的等待时间进行了分析,对列车首班车或末班车的时刻表进行了优化。

现有研究大多将减少列车运行成本、换乘衔接等待时间或提升列车节能水平等作为主要因素对列车运行图进行优化,对于降低企业运营成本具有

重要作用。但随着乘客多样化出行需求的增加以及对企业运营服务质量要求的提升,在满足企业运营条件的前提下如何更好地响应乘客出行需求还需开展进一步研究。本文在现有研究基础上,综合考虑线路运营过程中设施设备、列车运行等约束条件,以单条线路的乘客站台总等待时间最小化为优化目标,开展列车运行图交路优化研究,进而满足乘客出行需求和提升企业运输服务质量。

1 列车运行图交路优化方法

1.1 参数含义

列车运行图交路优化方法中各参数的含义见表 1。

表 1 列车运行图交路优化方法中各参数含义	
Tab.1 Meaning of various parameters in train diagram routing optimization method	
参数	含义
S_l	线路 l 上的车站集合
E_l	线路 l 上的区间集合
V_l	线路 l 上的交路种类集合
$\eta_{s,t}$	列车在线系数, $\eta_{s,t}$ 取 0 或 1
$t_{\text{leave},n,s}$	列车 s 在车站 n 的出发时间
$t_{\text{arrive},n,s}$	列车 s 在车站 n 的到站时间
$t_{\text{run},n-1,n,s}$	列车 s 在区间内的运行时间
$t_{\text{stop},n,s}$	列车 s 在车站 n 的停车时间
I_{max}	列车最大追踪间隔时间
I_{min}	列车最小追踪间隔时间
$t_{\text{back},n,s}$	列车 s 所在交路终点站 n 实际的折返时间
$t_{\text{back},n,s,\text{min}}$	列车 s 所在交路终点站 n 规定的最小折返时间
$I_{s,s+1,n}$	相邻列车发到时间间隔
W_t	时刻 t 上、下行线路的列车车底数量
W_0	车辆段最大列车车底总数
$T_{S,v}$	乘客在线路 l 上的车站 S 乘坐交路 v 的等待时间
$Q_{S,v}$	乘客在线路 l 上的车站 S 乘坐交路 v 的客流量

1.2 列车运行图交路优化模型的构建

1.2.1 目标函数

本文针对城市轨道交通线路客流的旅行时间进行优化,考虑列车平均运行速度固定不变,以乘客在站台的总等待时间 Z 最小化为优化目标,综合考虑线路运营过程中列车运行图的约束条件,构建目标函数如下:

$$\min Z = \sum_{v \in V_l} \sum_{S \in S_l} T_{S,v} Q_{S,v} \quad (1)$$

1.2.2 约束条件

1.2.2.1 列车运行时分约束

令 $t_{\text{stop},n}$ 为列车 s 在车站 $S_{l,n}$ 的停站时间,

$t_{\text{run},n,n+1}$ 为车站 $S_{l,n}$ 到 $S_{l,n+1}$ 的运行时间,则列车的运行情况如图 1 所示。

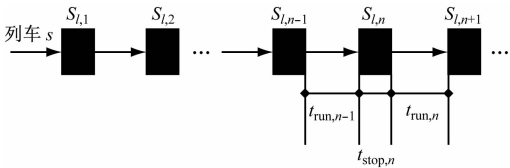


图 1 列车停站时间和区间运行时间
Fig.1 Train stopping time and interval operation time

根据列车 s 在交路中的运行情况,结合图 1 可以推算出列车 s 在各车站的到发时间:

$$t_{\text{arrive},n,s} = \begin{cases} t_{\text{arrive},n,s}, & n = 1 \\ t_{\text{leave},n-1,s} + t_{\text{run},n-1,n,s}, & 1 < n \leq S_l \end{cases} \quad (2)$$

$$t_{\text{leave},n,s} = t_{\text{arrive},n,s} + t_{\text{stop},n,s} \quad (3)$$

1.2.2.2 相邻列车发到时间间隔

为保证列车在线路上运行安全,必须保证相邻列车之间的发到时间间隔。相邻列车行车的发到时间间隔如图 2 所示。

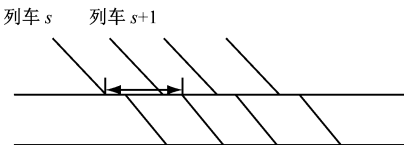


图 2 相邻列车发到时间间隔示意图
Fig.2 Diagram of departure and arrive time interval of adjacent trains

假设列车 $s+1$ 与列车 s 都经过车站 n ,则相邻列车发到时间间隔的约束条件为:

$$I_{s,s+1,n} = t_{\text{arrive},n,s+1} + t_{\text{stop},n,s+1} - t_{\text{arrive},n,s} \quad (4)$$

$$I_{\text{min}} \leq I_{s,s+1,n} \leq I_{\text{max}} \quad (5)$$

1.2.2.3 折返站车底折返时间约束

通常列车车底在到达本次交路终点站后,需在该站折返继续运输客流。因此,列车在到达终点站后需要折返再承担客流运输任务时,需要考虑列车折返时间,即列车到达折返站的时间至折返完毕从始发站站台出发的时间。另外,列车的最小折返时间与实际折返时间的关系为:

设列车 s 在运行交路折返站 n 的接续列车是 $s+1$,则其实际折返时间和最小折返时间约束见式 (6),其关系见图 3。

$$t_{\text{back},n} = t_{\text{arrive},n,s+1} - t_{\text{leave},n,s} \quad (6)$$

$$t_{\text{back},n,s} \geq t_{\text{back},n,s,\text{min}} \quad (7)$$

1.2.2.4 车底数量约束

由于城市轨道交通线路车辆段列车车底的数量有限,因此,同一条线路上、下行线列车车底数量

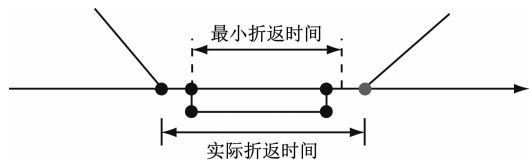


图3 列车最小折返时间与实际折返时间的关系

Fig.3 Relation between train minimum and actual turn-back time

不得大于 W_0 。

假设当前时间为时刻 t ,若同一条线路中上、下行列车在始发站的出发时间与终点站的到达时间内的数量为 W_t ,则上线的列车车底数量和车辆段车底总数之间的关系为:

$$\eta_{s,t} = \begin{cases} 1, & t_{\text{arrive},s,1} \leq t \leq t_{\text{leave},s,n} \\ 0, & t < t_{\text{arrive},s,1}, t > t_{\text{leave},s,n} \end{cases} \quad (8)$$

$$W_t = \sum_{s \in S_l} \eta_{s,t} + \sum_{s \in E_l} \eta_{s,t} \quad (9)$$

$$W_t \leq W_0 \quad (10)$$

1.3 列车运行图交路优化算法设计

考虑到列车运行图交路优化为非线性整数规划问题,且模型涉及的参数和约束条件均较多,在其优化组合过程中需考虑多种因素,并且已经被证明是 NP(非确定性多项式)-Hard 问题。目前,通常采用智能优化算法解决此类问题。智能优化算法具有模拟自然过程、计算速度快、指标精度高、应用面广等特点。本研究通过对列车运行图交路优化问题进行综合分析,拟采用基于 SA 思想的粒子群优化算法。与仅使用其中某一种算法相比较,该算法能够更快地得到全局最优解。另外,相较于蚁群算法或 GA,该算法可以方便地调整变量,便于迭代计算。

本研究通过求解得到线路优化的列车时刻表集合,针对不同的时刻表其均包含列车的到站时间和出发时间。考虑到采用粒子群算法求解容易获得局部最优解,采用 SA 使粒子个体的新解从局部最优向全局最优过渡,进而获得全局最优解。

基于 SA 思想的粒子群优化算法求解步骤如下。

步骤 1:明确粒子群算法粒子数量并产生粒子种群,另外对粒子速度进行初始化。

步骤 2:针对粒子群的适应值进行计算,并对粒子个体和粒子群的局部最优位置以及适应值进行初始化。

步骤 3:对 SA 的初始温度和温度变化率进行初始化。

步骤 4:基于粒子的速度和当前位置,对粒子位置进行更新。

步骤 5:基于更新的位置,计算粒子新的适应值。

步骤 6:判断粒子的适应值是否比粒子个体的极值优越。如是,进行步骤 7;否则,进行步骤 8。

步骤 7:接受粒子新的位置,并对粒子个体的局部最优位置和适应值进行更新。

步骤 8:若 $e^{(-\Delta A/T)} > \xi$ (ΔA 为两个适应值之间的差值, T 为当前温度, ξ 为 0 和 1 之间的随机数),则接受粒子新的位置,反之不接受新的位置。

步骤 9:若接受粒子新的位置,对粒子群的全局最优位置以及适应值进行更新,同时进行降温操作,反之不进行降温。

步骤 10:对粒子的速度进行更新。

步骤 11:判断是否满足设定算法的终止条件,若满足则算法结束,反之执行步骤 4。

1.4 列车运行图交路优化模型与算法的有效性验证

基于 C# 语言利用 Visual Studio 2017 软件,结合 Oracle 数据库进行编程对设计提出的列车运行图交路优化模型与算法进行验证。所使用的电脑处理器为 Inter Core i7,CPU(中央处理器)主频为 1.80 GHz,运行内存为 16 GB。本次验证试验设计的车站数量为 15 个,每个车站等待乘车的乘客数量在 30~200 人次范围内随机生成。列车最大和最小的发到时间间隔分别为 7 min 和 2 min。列车运行图交路优化算法的最大迭代次数设置为 400 次,惯性因子为 0.95,速度约束在 $[-8,8]$ 范围内,温度变化率为 0.97,温度下限是 $1 \times 10^{-8} \text{ } ^\circ\text{C}$,初始温度按初始全局最优适应值的 20% 计算。

根据上述所编程序随机生成的某城市轨道交通线路各车站的等待乘车乘客数量,在不考虑列车拥挤度过高导致乘客无法上车的情况下,计算得出该线路初始总等待时间为 384 254 s。经过所编程序运行迭代发现:在第 1 次至第 80 次之间总等待时间变化趋势明显;各次列车的到发时间均发生调整,使乘客等待时间逐步减少,并在第 110 次迭代时达到最优。经计算该次优化后的总等待时间为 293 769 s,相比优化前减少了 90 485 s,下降比例约 23.55%。

2 案例分析

截至 2021 年底,南宁轨道交通共有 5 条运营线

路,总运营里程为 128 km,车站总数为 104 座。随着近年来新线的不断建成并投入运营,线网客流呈快速增长趋势,客流规模已超出原设计水平,且线路的运能与运量需求矛盾日益突出。

为解决供需之间的不平衡,基于列车运行图交路优化模型和算法,以南宁轨道交通 1 号线(以下简为“1 号线”)客流分布特性为基础,结合各车站具体的客流指标,对线路不同交路时的列车到发时间、发车间隔进行了优化;并基于 Visual Studio 2017 软件,利用 C# 语言和基于 Windows 的用户界面框架,实现优化后的列车运行图可视化呈现。

另外,基于优化后的列车运行图,对 1 号线某个双休日运能与运量的匹配情况进行统计。从图 4 可看出,1 号线全天客流呈逐渐增长趋势,19:00 左右客流达到高峰后逐渐回落,高峰小时为 18:00—19:00,高峰小时断面客流量约 1.3 万人次/h,断面满载率为 108%,总体处于较舒适状态。

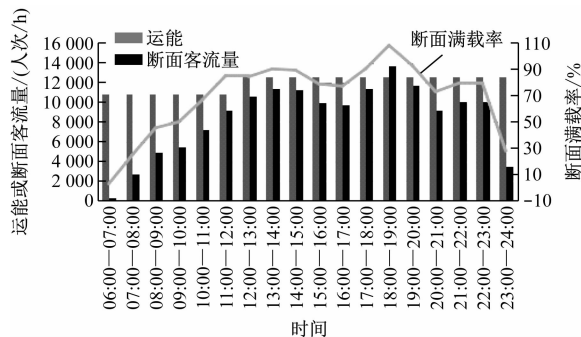


图 4 1 号线非工作日运能与运量匹配图

Fig. 4 Diagram of compatibility between offday traffic capacity and volume of Line 1

可见,优化后的列车运行图较好地满足了乘客的出行需求,且行车组织方案与实际客流特征基本一致,运营方案符合客流出行特点,列车开行方案基本合理。但线网运能在工作日和节假日客流高峰期仍存在不能较好满足客流需求的情况,主要是受限于列车配属不足和检修扣车要求,导致列车运能提高遭遇瓶颈,后续需进一步释放运能,不断满足持续增长的客流需求。

3 结语

本文针对城市轨道交通线路运能和运量间存在的供需矛盾,提出列车运行图交路优化模型,设计基于 SA 思想的粒子群优化算法。以 1 号线为例,根据客流时空分布特性,对列车运行图发车时间、行车间隔等因素进行了优化。通过对现有运输

组织模式进行调整,在满足乘客出行需求的同时,较好地提高了乘客的乘车舒适度。与此同时,本文开展的研究可为其他城市轨道交通线路运营组织方案的优化提供可行性依据和借鉴,有利于缓解运能和运量供需间的矛盾,提升轨道交通线路运营服务质量。

参考文献

- [1] ASSIS W O, MILANI B E A. Generation of optimal schedules for metro lines using model predictive control[J]. Automatica, 2004, 40(8): 1.
- [2] KIM K M, KIM K T, HAN M S. A model and approaches for synchronized energy saving in timetabling[C]//Proceedings of World Congress on Railway Research 2011. Paris: International Railway Research Board, 2011: 22.
- [3] 张琛, 韩宝明, 张琦. 轨道交通机场线快慢车停站方案优化方法[J]. 都市快轨交通, 2015, 28(5): 67.
ZHANG Chen, HAN Baoming, ZHANG Qi. Optimization methods of express and local train skip-stop scheme on airport rail line[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2015, 28(5): 67.
- [4] 姚宇, 朱晓宁, 康柳江, 等. 城市轨道交通列车时刻表与车底运用整合优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(1): 200.
YAO Yu, ZHU Xiaoning, KANG Liujiang, et al. An integrated optimization model of train timetabling and rolling stock scheduling for an urban railway line[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2018, 18(1): 200.
- [5] 徐瑞华, 李璇. 城市轨道交通网络末班车衔接方案的综合优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(10): 1510.
XU Ruihua, LI Xuan. Comprehensive optimization for connection scheme of last trains in urban mass transit network[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2012, 40(10): 1510.
- [6] KANG L, ZHU X. A simulated annealing algorithm for first train transfer problem in urban railway networks[J]. Applied Mathematical Modelling, 2016, 40(1): 419.
- [7] 宋悦, 朱江斌, 孟令云, 等. 城市轨道交通首班车衔接优化研究[J]. 城市交通, 2018, 16(1): 31.
SONG Yue, ZHU Jiangbin, MENG Lingyun, et al. Connection of urban rail transit's first daily service[J]. Urban Transport of China, 2018, 16(1): 31.
- [8] DOU X, MENG Q, GUO X. Bus schedule coordination for the last train service in an intermodal bus-and-train transport network[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 60: 360.
- [9] GUO X, WU J, ZHOU J, et al. First-train timing synchronisation using multi-objective optimisation in urban transit networks[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(11): 3522.

(收稿日期:2022-12-02)