

多模式公交服务模式及时刻表协同优化设计

暨育雄¹, 曹朋亮¹, 刘冰¹, 杨熙宇², 俞山川³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海经纬建筑规划设计研究院股份有限公司 城市交通规划处, 上海 200082; 3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 自动驾驶技术交通运输行业研发中心, 重庆 400067)

摘要: 考虑多模式公交服务模式和时刻表的交互作用, 建立了多模式公交双层优化模型, 上层协同优化多模式公交服务和时刻表, 下层考虑乘客出行选择实现多模式公交的客流分配, 为上层提供输入。针对双层模型求解的复杂性, 设计了相应启发式的求解算法, 采用遗传算法求解上层模型, 应用 Dial 算法求解下层模型。最后, 结合江苏省江阴市 K1 路和上海市 737 路公交客流数据, 对模型的有效性进行验证。结果表明, 协同优化能够有效降低公交运营成本, 提升公交服务水平。

关键词: 公交规划; 多模式公交; 双层优化; 协同优化

中图分类号: U491

文献标志码: A

Coordinated Optimization of Multiple Services and Timetable for Urban Bus

Ji Yuxiong¹, CAO Pengliang¹, LIU Bing¹, YANG Xiuyu², YU Shanchuan³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Urban Transportation Planning Department, Shanghai Worldvision LDG Intelligent Architecture Co. Ltd., Shanghai 200082, China; 3. Research and Development Center of Transportation Industry of Automatic Driving Technology, China Merchants Chongqing Communications Research and Design Institute Co. Ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: Considering the interaction between bus service mode and timetable, this paper proposed a bi-level model to design the schedule of multiple bus services, in which the upper-level jointly optimized the timetable and service modes while the lower-level assigned the passenger trip demand to bus services. Due to the complexity of the bi-level model, it proposed a heuristic algorithm to solve the model efficiently. It used a

genetic algorithm (GA) to solve the upper-level model and applied the Dial algorithm to assign the passenger flow to bus trips. It used the real-world data of No. K1 bus in Jiangyin, Jiangsu and No. 737 bus in Shanghai to validate the effectiveness of the proposed model. The results show that the coordinated design model can decrease bus operational costs and efficiently improve service quality.

Key words: transit planning; multiple services; bi-level optimization; coordinated optimization

公共交通是城市居民的常见出行方式,也是城市客运交通体系中的重要一环。传统公共交通一般采用每一个公交站点均可上下客的全程车服务模式。然而,公交客流在单条线路上常存在断面客流分布不均的现象,大量需求聚集在线路中部分站点之间,而其他站点间的客流量较小。因此,全程车的运营模式会造成低客流路段车辆利用率较低的问题,造成运力浪费。同时,对于长距离出行的乘客,全程车的服务模式中间停站次数多,出行行程时间长,极大地影响了公交的服务质量,降低公交吸引力。

运营者常采用全程车、区间车和大站车等多服务模式组合的方法应对以上问题。区间车是在公交线路上,公交车在某子区间内循环运营,疏解局部公交大客流的服务模式。大站车是在满足公交客流量较大的站点对出行需求的基础上,采用的减少停靠站点、均衡客流、提高运行速度的服务模式。在全程车的基础上,引入上述两种调度手段,可以有效缓解线路客流不均衡的问题,实现精准的供需匹配,提升服务质量,降低运营成本。

收稿日期: 2021-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(71901190, 71671124)

第一作者: 暨育雄(1978—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为公交管理与控制。

E-mail: yxji@tongji.edu.cn

通信作者: 刘冰(1996—),女,博士生,主要研究方向为公交管理与控制。E-mail: bingliu@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

多模式公交的组合调度计划是其发挥客运功能的关键环节。多服务模式组合调度计划包含服务模式(包括站点停靠方案和发车频率)以及各种模式下公交车辆的时刻表。传统的多模式公交优化一般采用多阶段优化,第一阶段确定优化公交线路的服务模式,第二阶段是在上一阶段确定的优化服务模式的基础上,进一步优化设计各服务模式公交时刻表。

最早的多模式公交服务优化可追溯至上世纪80年代,Furth等^[1]通过枚举的方法确定区间车的起始点,同时对区间车和全程车建立了优化模型,以缓解区间客流不均衡的现象。Ceder^[2]除考虑区间车外,还对大站车进行了深入的研究,从一系列可行的大站快车或区间车候选站点集合中,利用逆差函数生成最小车队规划的时刻表方案,并对站点的选择进行了分析探讨。除此之外,相关研究考虑不同优化目标,如乘客出行成本^[3-6]、乘客拥挤程度^[7]、公交企业利润^[8]等展开了系列研究。Yang等^[9]在全程车的基础上,通过设置双层模型考虑乘客分配问题,最优优化区间车设计。上层模型为成本最优求解区间车的起始点以及公交线路最优发车频率,下层模型为公交客流分配问题,考虑乘客根据不同服务模式的公交信息进行出行选择。Moon等^[10]将多模式公交优化问题由单线拓展到多线,对多线路组合下的区间车设计问题展开研究。

公交时刻表作为公交运营的重要部分,其优化设计受到广泛关注。传统公交网络时刻表设计通常以最小化乘客出行成本和公交运营成本为目标,考虑车辆容量、发车间隔、乘务排班等约束,决策每趟公交在网络中停站的到达时刻和出发时刻。刘环宇^[11]探讨了不同公交服务模式组合形式下的公交时刻表形式,选取公交系统3个可靠度作为约束条件,构建基于可靠性的公交时刻表优化设计模型,给出求解算法,优化发车间隔,确定发车时刻表,提高公交可靠性。郑喆等^[12]针对不同种类公交车辆的发车顺序对客流时空耦合分配的影响,以组合调度的发车时刻表和运营时刻表为主要研究对象,以不同车辆容量配比、发车模式及发车间隔为主要影响因素,以乘客乘公交出行时间成本和公交能耗成本的系统总成本为优化目标,建立了带车辆容量限制和发车间隔不等的全程车和大站快车组合时刻表模型。

分阶段的优化方法虽通过问题分解求解简化了问题的复杂度,但优化中未考虑公交服务模式和时刻表之间交互影响的过程,对运营效率的提升效果

有限。因此,本文以最小化公交运营成本与乘客出行成本为目标,考虑多服务模式公交的服务模式和时刻表之间的交互作用,建立协同优化的双层模型。上层模型以既定的乘客分布为输入,优化服务模式和时刻表使得总成本最小,下层模型为考虑乘客舒适度的Logit公交分配模型,刻画乘客在公交时空网络中的出行路径选择,为上层模型提供输入。同时,本文还提供一种改进的遗传算法用于求解协同优化问题。最后,通过实际公交线路的客流和线路数据,验证模型和求解算法。

1 公交线路服务模式及时刻表协同优化问题

1.1 问题描述

高效的多服务模式公交是体现公交运营“以人为本”的关键指标。多服务模式公交服务综合考虑运营成本、候车时间成本和车内感知时间成本的量化过程。多服务模式公交需要同时优化服务模式和时刻表,才能进一步提升公交服务质量,满足不同乘客的多元化出行需求。

由此定位,本文研究的是如何有效地在多服务模式公交优化模型中融入站点停靠方案和时刻表与乘客出行选择之间的交互反馈。本文在乘客OD(起讫点)已知的条件下,建立公交线路服务模式及时刻表协同双层优化模型,其中①上层模型通过最小化总成本优化公交服务模式站点停靠方案和时刻表。服务模式优化是指在不同服务模式(如区间车和大站快车)运营车辆数量一定的条件下,对不同服务模式的站点停靠方案进行优化。时刻表优化是指调整每辆公交车的发车时间和驻站时间。②下层模型基于Logit模型进行乘客分配^[9]。公交服务站点和时刻表调整后,乘客出行路径选择结果同样发生变化,因此公交客流将出现重新分配。客流分配过程中需要针对构建的时空网络,重新评估乘客出行路径费用,同时建立Logit模型并求解。

1.2 变量定义

1.2.1 集合

M : 公交运营模式集合, $M=\{1, 2, 3\}$, 其中1表示全程车, 2表示区间车, 3表示大站快车。

K : 公交车辆集合, $K=\{K_1, K_2, K_3\}$, 其中 K_1 表示全程车公交车辆集合, K_2 表示区间车公交车辆集合, K_3 表示大站快车公交车辆集合; 0为第一辆发车的车辆, k_{\max} 为最后一辆发车的车辆。

N : 公交站点集合, 0 为线路起始站点, n_{\max} 为线路终点。

T : 运营时间集合。

1.2.2 下标

m : 公交运营模式, $m \in M$ 。

k : 公交车辆, $k \in K$ 。

n : 公交站点, $n \in N$ 。

t : 运营时间, $t \in T$ 。

1.2.3 固定参数

c_b : 公交车辆容量。

c_t : 公交车辆单位时间成本。

c_d : 单位距离成本。

δ_1 : 运营成本转换成总成本的系数。

δ_2 : 车内时间成本转换成总成本的系数。

δ_3 : 等候成本转换成总成本的系数。

t_a : 单位乘客下车用时。

t_b : 单位乘客上车用时。

t_s : 公交车辆最大驻站时间。

φ : 公交车辆到站停车和离站启动所用时间。

$R_{n,n+1}$: 站点 n 和 $n+1$ 之间的距离。

$v_{k,n}$: 公交车辆 k 在站点 n 和 $n+1$ 之间的路段行驶速度。

$T(i,j)$: 从站点 i 前往站点 j 的客流量。

f_m : 运营模式 m 公交车辆的服务频率。 c/f_m 表示乘客的平均等待时间, 如果公交车辆均匀到达, 则 $c = 0.5$, 如果车辆到达服从泊松分布, 则 $c = 1^{[13]}$ 。

θ_w : 平均等待时间系数。

θ_l : 平均感受行程时间系数。

σ : 极大正整数。

1.2.4 决策变量

y_n^m : 0-1 变量, 当公交车辆在站点 n 驻站时为 1, 否则为 0。

(s, e) : 区间车站起点和终点组合, 其中 s 为起始站点编号, e 为终点站点编号。

$h_{k,n}$: 整数变量, 公交车辆 k 在站点 n 处的驻站时间。

$w_{k,n}$: 整数变量, 在公交站点 n 等候乘坐公交车辆 k 的乘客数量。

1.2.5 中间变量

$d_{k,n}$: 公交车辆 k 离开站点 n 的时间。

$T_k(i,j)$: 出行 OD 为 (i,j) 且乘坐公交车辆 k 出行的乘客数量。

$U_k(i,j)$: 出行 OD 为 (i,j) 且乘坐公交车辆 k 出

行的乘客的平均感受行程时间。

$L_k(i,j)$: 公交车辆 k 在公交站点 i 和站点 j 之间的载客人数。

$a_{k,n}$: 公交车辆 k 在站点 n 的下车人数。

$b_{k,n}$: 公交车辆 k 在站点 n 的上车人数。

p_k : 车辆运行时间。

q_k : 车辆运行距离。

1.3 优化模型

1.3.1 成本优化模型(上层模型)

成本优化模型从乘客和企业的角度出发, 考虑乘客在公交运营中的成本。模型的规划目标为企业的运营成本 C_0 、乘客的车内感知时间成本 C_1 以及乘客候车时间成本 C_w 总和最小, 目标函数表达式如下:

$$\min (C_0 + C_1 + C_w) \quad (1)$$

$$C_0 = \delta_1 \sum_k (c_t p_k + c_d q_k) \quad (2)$$

$$C_1 = \delta_2 \sum_k \sum_{i,j \in N} T_k(i,j) U_k(i,j) \quad (3)$$

$$C_w = \delta_3 \sum_k \sum_n \sum_t w_{k,n} (d_{k,n} - t) \quad (4)$$

上述模型中变量存在如下约束条件:

$$d_{k,n} = d_{k,n-1} + \frac{R_{n,n+1}}{v_{k,n}} + h_{k,n}, \quad \forall k \in K_1 \cup K_3, n \in N - \{0, n_{\max}\} \quad (5)$$

$$d_{k,n} = d_{k,n-1} + \frac{R_{n,n+1}}{(1 - y_n^m) \sigma v_{k,n} + v_{k,n}} + h_{k,n}, \quad \forall m = 2, k \in K_2, n \in N - \{0, n_{\max}\} \quad (6)$$

$$\varphi y_n^m + t_a a_{k,n} + t_b b_{k,n} \leq h_{k,n} \leq t_s, \quad \forall k \in K, n \in N \quad (7)$$

$$d_{k-1,n} \leq d_{k,n} \leq d_{k+1,n}, \quad \forall k \in K - \{0, k_{\max}\}, n \in N \quad (8)$$

$$0 \leq L_k(i,j) \leq c_b, \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$s \leq n y_n^m \leq e, \quad \forall m = 2, n \in N \quad (10)$$

$$h_{k,n} \leq \sigma y_n^m, \quad \forall m \in M, n \in N, k \in K \quad (11)$$

$$w_{k,i} = \sum_j T_k(i,j), \quad \forall k \in K, i \in N \quad (12)$$

$$y_n^m = 1, \quad \forall m = 1, n \in N \quad (13)$$

约束条件(5)刻画了全程车或大站快车公交车辆离站时间的计算方式; 约束条件(6)表示区间车公交车辆离站时间的计算方式; 约束条件(7)表示公交车辆在站点的驻站时间应满足上下客所需时间, 同时不能超过站点最大停靠时间; 约束条件(8)表示后续车辆离开同一站点的时间不早于前续车辆; 约束条件(9)保证所有公交车辆实际载客人数均不超过

其容量;约束条件(10)保证区间车能够在指定区间内的每个站点停靠;约束条件(11)表示不停靠某站点时,车辆在该站点的驻站时间为0;约束条件(12)表示所有乘客均可被服务;约束条件(13)表示全程车必须在每一站点驻站。

1.3.2 交通分配模型(下层模型)

下层模型根据上层模型优化得到的多模式公交车的站点停靠方案和发车时刻表,基于公交车辆出行时空网络,并为各公交班次进行公交客流OD分配。

公交客流分配模型刻画了乘客在站点的车辆选择行为,模型假定每个乘客在信息化环境下均可获得发车时刻表和实时信息,到达车站的乘客可以通过自身判断选择是否上车或等候后续班次车辆,且每位乘客只能乘坐第一辆或后续到达的公交车辆。从行为科学来看,出行路径选择问题实际上就是一个决策制定问题。为量化出行者的选择行为,需为每条出行路径确定费用。通常乘客会考虑公交线路的候车时间和车内拥挤度选择不同服务模式的公交车辆,该选择行为可通过Logit模型实现。

具体而言,首先建立公交时空网络,将物理节点离散为时空节点,以刻画物理节点在不同时间发生的事件。时空网络包括3种基本要素:①时空网络节点。用于表示公交车辆实际运行的时空状态,各节点包含3个属性,即站点名称、所属线路和运行时间。若经过某站点的线路有 x 条,每条线路有 y 趟次公交车辆,则该站点将被拓展为 xy 个时空节点。②时空网络弧。共包含两种类型,即公交车辆出行弧和乘客出行弧,分别用于描述公交车辆和乘客的出行过程。其中车辆出行弧包括车辆在行驶弧和驻站弧;乘客出行弧包括出行到达或离开公交站点的步行弧、等候公交车的等候时间弧、上下公交车连接弧。③时空路径。在时空网络中,任意OD站点之间的连通的有序时空弧排列为该OD间的时空路径,时空路径一般是由公交车辆出行弧和乘客出行弧组成的。

图1给出了本文所用时空网络示例。乘客从起点出发达到公交物理站点 S ,等候公交车辆 r ,乘客可以选择乘坐公交车辆 r 或等候公交车辆 $r+1$,随后乘车到达公交站点 $S+1$ 。乘客等候时间为乘客乘坐公交车辆离开站点的时间和其到达站点时间之差。公交车辆的运行过程包含了站点间行驶过程和驻站过程,其中行驶时间为到达下一站的时间与离开上一站公交时间之差,驻站时间为公交离站时间与公交到站时间之差,由乘客下车时间和乘客上车

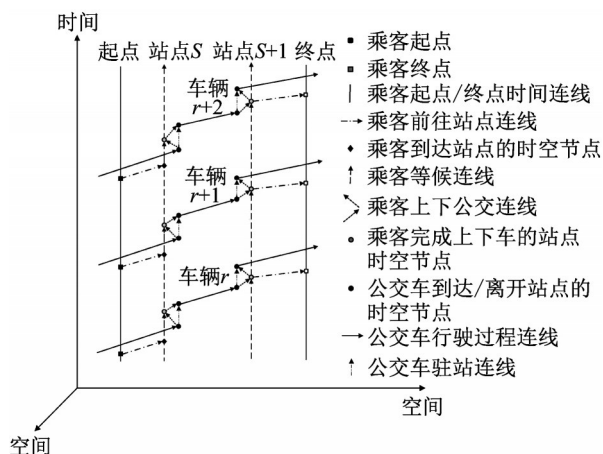


图1 时空网络

Fig. 1 Time-space network

时间组成。

随后,基于构建的时空网络,对乘客出行路径费用进行评估,同时建立Logit离散模型对客流进行分配。城市公交出行路径费用主要由时间、便利性和舒适度等因素组成,其中时间因素主要有乘车时间和等待时间,可定量表示,而舒适度和方便性等因素通常采用定性方法描述^[14]。对此,本文使用马尔科夫链模型刻画乘客在公交车上的随机寻座过程,以乘客出行行程为研究对象,将乘客在各路段上是否有座位作为状态变量。给定乘客在初始站点是否有座位的状态,中间站点的转移概率矩阵描述了乘客在中间站点下车后,可能的状态变化(如从站立到就座)。

通过Logit函数求出目的地为站点 j 的乘客选择上车的数量为

$$T_k(i, j) = T(i, j) \frac{\exp\left(-\left(\theta_w \frac{c}{f_m} + \theta_l U_m(i, j)\right)\right)}{\sum_{k=1}^2 \exp\left(-\left(\theta_w \frac{c}{f_k} + \theta_l U_k(i, j)\right)\right)} \quad (14)$$

式中: $U_k(i, j)$ 反映了公交车内拥挤度对乘客选座行为的影响,该参数是 $T_k(i, j)$ 的函数,需通过在马尔可夫模型中采用递归方式估计寻座概率后求出。

1.4 优化算法

由于双层规划是NP-hard问题,双层规划模型不存在多项式求解算法^[15],因此通常采用启发式算法近似求解,如遗传算法、模拟退火算法和蚁群算法等。其中遗传算法从1975年被提出至今已有近半个世纪的发展,应用成熟且广泛^[16],因此本文基于遗传算法对问题进行求解。与双层模型对应,求解算

法同样为两层结构,分别用于求解上层模型和下层模型。算法上层为遗传算法,用于搜索时刻表和站点停靠方案;下层为交通分配算法,可基于上层结果对公交客流进行分配,随后将分配结果反馈至上层遗传算法,评估结果适应度,随后进行选择、交叉和变异,以产生更优的后代染色体。

1.4.1 上层模型求解

基于上述理论,本文通过以下步骤(如图2)求解公交线路服务模式及时刻表协同优化问题。

步骤1 初始化。初始化多服务模式公交时刻表和站点停靠方案,其中全程车在所有站点均停靠,

区间车仅确定起点 s 和终点 e ,大站快车需确定停靠站点。确定遗传算法的种群规模 N ,令 $g=1$,并随机生成公交时刻表初始方案 $D_{1,n}(n=1,2,\dots,N)$ 。

步骤2 生成初始染色体种群。考虑决策变量的复杂性,将染色体划分为 y_n^m 、 $d_{k,n}$ 和 $h_{k,n}$ 共3个部分,分别用于表示离站时间、驻站时间和站点停靠方案。其中 $d_{k,n}$ 以30 s为单位, $h_{k,n}$ 以10 s为单位, y_n^m 为二进制变量,对于每个站点,0表示不停靠,1表示停靠。

步骤3 设定遗传算法的适应度评估函数以及交叉和变异概率。

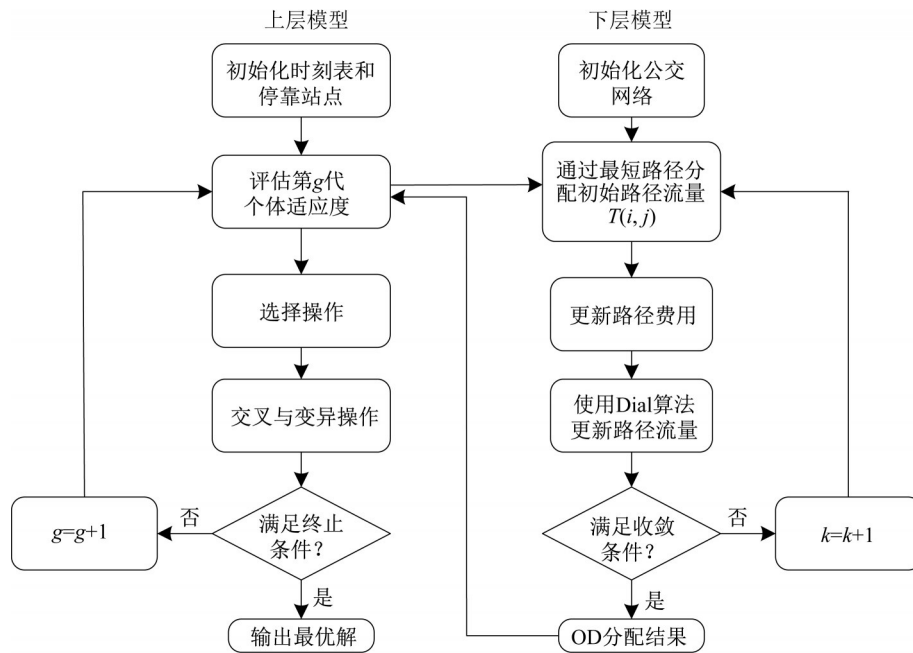


图2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of algorithm

步骤4 计算适应度。基于客流分配结果 $T_{g,n}$,生成所有种群个体 $\{(D_{g,n}, y_{g,n}, T_{g,n})\}$,并计算各个体适应度 $F_{g,n}$ 。

步骤5 选择操作。计算种群中所有个体的遗传概率 $p_{g,n} = F_{g,n} / \sum_{n=1}^N F_{g,n}$,并基于该值随机选择产生后代的个体。

步骤6 交叉和变异操作。按照一定概率对被选中产生后代的个体中的 $D_{g,n}$ 和 $y_{g,n}$ 部分进行交叉和变异操作,得到第 $g+1$ 代新的方案 $\{(D_{g+1,n}, y_{g+1,n})\}$ 。

步骤7 判断算法是否满足终止条件。若不满足,则令 $g=g+1$,执行步骤4至步骤6;若满足,则

终止算法,并输出适应度最好的个体作为最优解。

1.4.2 下层模型求解

运用算法求解步骤如下:

步骤1 根据不同模式公交时刻表,初始化公交网络。

步骤2 对每一个OD对(从 i 站到 j 站),通过最短路径分配生成初始路径流量 $T(i,j)$,令 $k=1$ 。

步骤3 根据最新计算结果更新每一个OD对(从 i 站到 j 站)的路径费用。

步骤4 运行Dial算法^[17]得到新的路径分配流量 $f_{i,j}^n$ 和辅助路径流量 $y_{i,j}^n$ 。

步骤5 对每一个OD对,计算新的路径流量 $f_{i,j}^{n+1}$ 。若更新路径属于原有路径集合,路径流量更

新为 $f_{i,j}^{n+1}(k) = \frac{n}{n+1} f_{i,j}^n$;若更新路径为辅助路径,且不属于原有路径集合,路径流量更新为 $f_{i,j}^{n+1}(k) = \frac{1}{n+1} y_{i,j}^n$;若更新路径为辅助路径,且属于原有路径集合,路径流量更新为 $f_{i,j}^{n+1}(k) = \frac{n}{n+1} f_{i,j}^n + \frac{1}{n+1} y_{i,j}^n$

步骤 6 判断是否满足算法设置的终止条件($g_{ap} \leq \Delta$)。如果不满足,则令 $n=n+1$,重复步骤 2 至步骤 5。如果满足终止条件,则终止算法,将最终的流量分配结果 $f_{i,j}^n$ 传递给上层遗传算法。 g_{ap} 计算方式为

$$g_{ap} = \frac{\sum_i \sum_j \sum_n f_{i,j}^n (t_a^n(f_{i,j}^n) - t_a^{n-1}(f_{i,j}^{n-1}))}{\sum_i \sum_j \sum_n y_{i,j}^n t_a^n(f_{i,j}^n)} \quad (15)$$

2 实例应用

通过两个实例验证所研究的公交服务模式和时刻表协同优化方法的合理性与先进性。实例一为小规模站点线路实验,实例二为大规模站点线路实验。

2.1 实例一

以江苏省江阴市 K1 路公交车途经的 10 个公交站为研究对象,选择早高峰时刻的各站点 OD 数据(见表 1)进行实验。应用本文构建的双层模型,参

考文献[9]对模型参数取值: $c_b=80, c_t=8.4, c_d=0.96, \delta_1=0.75, \delta_2=1.05, \delta_3=1.15, \theta_w=2, \theta_l=1.3$ 。模型设计两个客流周期,对两个客流周期进行公交服务模式和时刻表协同优化。

表 1 公交客流 OD 矩阵(实例一)
Tab. 1 OD matrix of bus passenger(Case 1)

站点	OD 客流/人次									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		600	189	165	64	44	342	605	726	395
2			11	10	4	3	20	35	42	23
3				5	2	1	10	18	22	12
4					0	0	2	4	5	3
5						2	13	24	29	16
6							13	22	27	15
7								12	14	8
8									36	19
9										67
10										

优化得到的公交服务模式如图 3 所示,第一个客流周期的公交服务模式为全程车和大站车的组合,第二个客流周期的公交服务模式为全程车和区间车的组合。其中大站车站点停靠方案为 1—3—5—7—10,区间车站点停靠方案为 4—5—6—7。

表 2 给出了优化后的公交时刻表。由表 2 可知,两个周期共发车 18 辆,第一周期发车 8 辆,其中大站快车 4 辆,此时公交发车间隔约为 16 min;第二周期发车 10 辆,其中区间车 5 辆,此时公交发车间隔约为 12 min。

不同周期客流对应的乘客出行成本和公交运营

表 2 公交线路时刻表优化结果
Tab. 2 Optimized results of bus route schedule

车辆编号		离站时刻									
第一周期	1	7:00	7:05	7:12	7:20	7:28	7:35	7:42	7:47	7:54	8:01
	2	7:08		7:18		7:31		7:44			8:03
	3	7:15	7:20	7:27	7:35	7:43	7:50	7:57	8:03	8:10	8:16
	4	7:24		7:34		7:47		7:59			8:19
	5	7:31	7:36	7:43	7:51	7:59	8:06	8:13	8:20	8:26	8:32
	6	7:40		7:50		8:03		8:15			8:35
	7	7:47	7:52	7:59	8:07	8:15	8:22	8:29	8:36	8:42	8:48
	8	7:55		8:05		8:18		8:30			8:50
第二周期	9	8:04	8:09	8:16	8:24	8:32	8:39	8:46	8:53	8:59	9:05
	10				8:30	8:39	8:46	8:53			
	11	8:16	8:22	8:31	8:36	8:44	8:51	8:58	9:05	9:11	9:17
	12				8:42	8:50	8:58	9:06			
	13	8:29	8:34	8:43	8:49	8:56	9:03	9:10	9:18	9:24	9:29
	14				8:55	9:03	9:10	9:20			
	15	8:41	8:46	8:54	9:01	9:08	9:15	9:22	9:30	9:36	9:41
	16				9:07	9:15	9:24	9:30			
	17	8:54	8:58	9:06	9:13	9:20	9:27	9:34	9:42	9:48	9:53
	18				9:19	9:27	9:36	9:42			

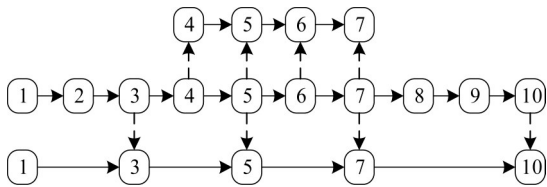


图 3 公交服务模式优化结果示意图

Fig. 3 Optimization results of bus service mode

成本如表 3 所示。

2.2 实例二

传统优化方法多采用多阶段优化的方式,第一阶段确定公交线路服务模式(包括站点停靠方案和发车频率);第二阶段确定优化设计公交时刻表。传统方法简化了问题求解的复杂度,但忽视了公交服

务模式和时刻表的相互影响,无益于提升优化效果。

为证明本文所提出的协同优化方法能够得到比传统分步优化方法更优的运营方案,以上海市 737 路公交为例,进行对比实验。上海市 737 路共有 20 个站点,由真实数据估计得到的客流 OD 矩阵^[9]如表 4 所示,线路发车间隔为 5 min。线路覆盖居民区和商业区,其中站点 10 与站点 15 之间客流较为集中,站点 12 与站点 13 之间的客流量最大。模型同时考虑全程车和大站车两种服务模式。结果如表 5 所示,分阶段优化和协同优化所得大站车站点停靠方案存在差异,而采用协同优化可将总成本降低 136 元·h⁻¹。具体分析可知,采用协同优化后,运营成本

表 3 多服务模式优化结果(实例二)

Tab. 3 Optimization results of multiple mode (Case 2)

周期	模式	站点方案	$C_o/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	$C_w/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	$C_l/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	总成本/ $(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$
一	全程车+大站车	1—3—5—7—10	375	541	1 451	2 367
二	全程车+区间车	4—5—6—7	468	672	1 649	2 789
汇总			843	1 213	3 100	5 156

表 4 公交客流 OD 矩阵

Tab. 4 OD matrix of bus passenger

站点	OD 客流/人次																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		0	0	1	0	6	5	1	5	1	3	8	3	3	1	5	1	3	2	4
2			0	0	0	0	2	1	3	0	0	1	0	1	12	4	0	8	2	0
3				0	0	0	1	7	2	6	3	0	2	0	5	0	2	3	4	0
4					0	0	1	0	0	0	10	7	6	3	2	1	4	2	5	2
5						0	0	1	1	2	5	3	3	0	2	1	1	2	1	0
6							0	5	12	20	23	33	21	16	17	8	9	12	7	1
7								0	5	18	20	16	18	15	18	17	11	6	0	0
8									0	14	22	32	25	18	16	17	14	14	7	9
9										0	5	12	21	15	6	7	12	6	4	0
10											0	0	23	12	8	9	3	2	1	0
11												0	7	8	5	3	2	2	1	1
12													0	4	2	5	3	8	1	2
13														0	9	12	11	7	2	2
14															0	2	9	7	1	1
15																11	4	12	2	2
16																	7	8	7	12
17																		12	2	1
18																			2	0
19																				2
20																				

表 5 分步优化和协同优化结果对比

Tab. 5 Comparison of multi-step optimization and integrated optimization

模型	全程车数量	大站车数量	大站车停靠站点方案	$C_o/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	$C_w/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	$C_l/(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$	总成本/ $(\text{元}\cdot\text{h}^{-1})$
分步优化	12	11	1—5—8—12—16—20	968	684	4 345	5 997
协同优化	12	11	1—5—9—12—17—20	972	657	4 155	5 784

基本不变,但乘客等候成本和车内成本明显降低,说明协同优化可以为乘客提供更多的出行路径和空间,从而降低车内拥挤对乘客的影响。

上述结果体现了两种方法在服务模式和整体结果上存在的差异。图 4 则进一步给出了两种优化方案在时刻表方面存在的差异。如图 4 所示,分步优化(图 4a)所得结果中相邻两车发生串车的次数高于协同优化结果(图 4b)。

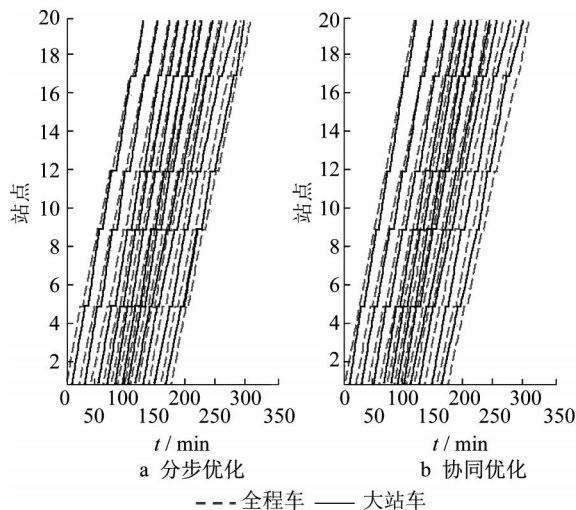


图 4 公交运行时空轨迹对比

Fig. 4 Comparison of bus spatio-temporal trajectories

图 5 展示了分步优化模型 M1 和协同优化模型 M2 的乘客等候时间(EWT, expected waiting time)和车内感受行程时间(PIT, passenger in-vehicle time)密度函数。基于密度函数可计算乘客等候时间和车内感受行程时间的平均值。结果表明,相比

于模型 M1,使用模型 M2 可以将乘客的平均期望等候时间和乘客平均车内感受行程时间分别降低 0.42 min 和 1.12 min。

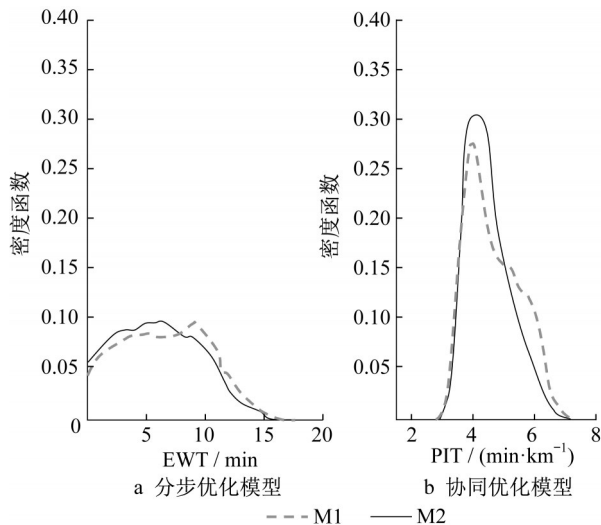


图 5 模型 M1 和 M2 的乘客等候时间和车内感受行程时间概率密度函数

Fig. 5 Time probability density functions of EWT and PIT of M1 and M2

综上可知,两种优化方法所得结果存在差异。为检验两种优化方法在不同客流量情况下的效果,将原始 OD 数量扩大两倍对两种优化方法进行比较。优化结果如表 6 所示,将原 OD 的客流扩大至原客流量的 2 倍后,协同优化所得总成本相比于分步优化减少了 12.5%。由此可见,在客流较大的环境下,公交服务模式和时刻表的协同优化在提升公交系统的服务水平方面具有更大的优势。

表 6 不同规模流量优化结果对比

Tab. 6 Comparison of different OD size results

流量	优化方法	平均等候时间/min	平均车内时间/(min·km ⁻¹)	总成本/(元·h ⁻¹)
原始 OD	分步优化	6.63	4.56	5 997
	协同优化	5.97	4.23	5 784
2 倍 OD	分步优化	7.12	5.36	11 568
	协同优化	6.13	4.51	10 123

3 结论

本文基于实际公交 OD 数据,考虑满足不同周期客流下的乘客出行需求,建立了公交服务模式和时刻表协同优化双层模型,以最小化成本,提出一种改进的遗传算法对问题进行求解。研究结果表明,对比传统分步优化方法,运用协同优化方法的结果

能够较好地满足乘客不同客流周期的出行需求,提供公交运营企业更符合实际的运营计划表,能有效地提高公交的运营效率,均衡公交客流,提高车辆服务质量。

本文提出的公交优化模型,从理论上可以推广到多服务模式公交网络的运营模式和时刻表协同优化,但实际应用需要乘客 OD 矩阵数据作为必要输

入。近年来,随着各地智能交通系统日益完善,如公交自动收费系统等,为乘客客流OD数据估计提供了便捷高效的手段。此外,该模型还考虑了乘客对公交拥挤的感知和路径选择行为,需要通过乘客偏好对模型参数进行调整。

作者贡献声明:

暨育雄:全文内容框架及方法设计,论文撰写。

曹朋亮:数值实验,撰写文章模型、算法和案例部分内容。

刘冰:数值实验,撰写文章摘要、引言、文献综述和结论部分内容。

杨熙宇:编写文章所用程序代码,数值实验。

俞山川:编写文章所用程序代码,数值实验。

参考文献:

- [1] FURTH P G. Short turning on transit routes [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1987, 1108:42.
- [2] CEDER A. Public transit planning and operation: modeling, practice and behavior [M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [3] CHIRAPHADHANAKUL V, BARNHART C. Incremental bus service design: combining limited-stop and local bus services [J]. Public Transport, 2013, 5(1): 53.
- [4] LEIVA C, MUNOZ J C, GIESEN R, *et al.* Design of limited-stop services for an urban bus corridor with capacity constraints [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(10): 1186.
- [5] ULUSOY Y Y, CHIEN I J. Optimal bus service patterns and frequencies considering transfer demand elasticity with genetic algorithm [J]. Transportation Planning and Technology, 2015, 38(4): 409.
- [6] 徐大伟,裴玉龙. 公共交通大站快车调度模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008(4): 580.
XU Dawei, PEI Yulong. Express bus scheduling model and application[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008 (4): 580.
- [7] 杨熙宇,暨育雄. 考虑公交车内拥挤的区间公交优化设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 2(45): 55.
YANG Xiyu, JI Yuxiong. Design of short-turning services for an urban bus corridor considering passengers' congestion [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 2 (45): 55.
- [8] 魏明,陈学武,孙博. 配合大站快车的单线公交组合调度模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015(2): 173.
WEI Ming, CHEN Xuwu, SUN Bo. Multi-objective single line transit mixed scheduling model considering express bus service [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015(2): 173.
- [9] YANG X, JI Y, DU Y, *et al.* Bi-level model for design of transit short-turning service considering bus crowding [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2649(1): 52
- [10] MOON S, CHO S H, KIM D K. Designing multiple short-turn routes to mitigate the crowding on a bus network [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2021:036119812110038.
- [11] 刘环宇. 基于可靠性的公交时刻表优化设计研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
LIU Huanyu. Study on bus timetable optimization based on reliability [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [12] 郑喆,韩印,赵靖. 基于发车和运营时刻表的单线公交组合调度模型[J]. 物流科技, 2017, 40(7): 86.
ZHENG Zhe, HAN Yin, ZHAO Jing. A single line transit mixed scheduling model based on vehicle departure and operation timetable [J]. Logistics Sci-Tech, 2017, 40(7): 86.
- [13] WU J H, FLORIAN M, MARCOTTE P. Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms [J]. Transportation Science, 1994, 28(3): 193.
- [14] 曾鸷,李军,朱晖. 面向换乘行为的城市公交客流分配及应用[J]. 系统管理学报, 2015, 24(1): 22.
ZENG Ying, LI Jun, ZHU Hui. Passengers' transfer behavior-based urban transport flow distribution and its applications [J]. Journal of Systems & Management, 2015, 24(1): 22.
- [15] 钟宇亮,刘诚. 第三方物流选择的双层规划模型及其求解算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(5): 88.
ZHONG Yuliang, LIU Cheng. Bi-level programming of the third-party logistics service providers selection and solution algorithm [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(5): 88.
- [16] 农静,王磊,尹慧琳. 铁路车流径路优化的遗传算法设计[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(1): 76.
NONG Jing, WANG Lei, YIN Huilin. Optimization design of railway car flow routing based on genetic algorithm [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(1): 76.
- [17] NEWELL G F. Dispatching policies for a transportation route [J]. Transportation Science, 1971, 5: 91.