

【交通物流 / Transportation Logistics】

基于优先级拓扑排序的可变线路式公交调度

齐曼, 庞明宝

河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401

摘要: 为提高可变线路式公交的服务水平, 提出基于站点优先级拓扑排序的公交调度方法, 依据出行需求确定有向无环图, 综合到站便捷性、节点度以及乘车和落客需求等因素进行站点优先级标定, 得到唯一的站点需求处理拓扑次序; 建立以公交行驶成本和乘客广义出行成本最少为目标的调度模型, 采用基于拓扑排序的遗传算法优化求解. 以中国天津市385路公交为例进行验证分析, 结果表明, 与传统的调度方法或者按需求进行拓扑排序但不考虑优先级的调度方法相比, 当出行需求水平高于预期时, 本调度方法的公交人均行驶成本分别降低11.87%和6.85%, 人均广义出行成本分别降低9.06%和3.28%, 请求拒绝率降至7.68%. 本研究方法具有更高的出行需求接运比例, 可有效提高可变线路式公交服务质量和盈利水平, 为出行者提供更好的公共交通运输服务.

关键词: 交通运输工程; 公共交通; 可变线路式公交; 车辆调度; 优先级; 拓扑排序

中图分类号: U491

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2023.04435

Flex-route buses scheduling based on priority topological sorting

QI Man and PANG Mingbao

School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China

Abstract: In order to improve the service level of flex-route buses, a scheduling method based on station priority topology sequencing is proposed. According to the travel needs, the directed acyclic graph (DAG) is determined, and the station priority is calibrated based on the convenience of arrival, node degree, demand for boarding, and alighting, etc. The only topological order of station demand processing is obtained finally. A scheduling model aiming at minimizing travel costs of buses and generalized travel costs of passengers is established, which is optimized by genetic algorithm based on topological sorting. Using No. 385 bus in Tianjin city as an example, the results show that compared with the traditional scheduling method and the method with topological sequencing of demand but without considering priority. The travel cost of buses per passenger of our scheduling method is reduced by 11.87% and 6.85% respectively, and the generalized travel cost per passenger is reduced by 9.06% and 3.28% respectively when the travel demand level is higher than expected. This method can effectively improve the service quality and profitability of flex-route buses, and has lower per capita driving cost and per capita generalized travel cost, as well as lower reservation rejection rate.

Key words: transportation engineering; public transit; flex-route buses; scheduling; priority; topological sorting

Received: 2022-07-24; **Accepted:** 2022-09-24; **Online (CNKI):** 2022-11-14

Foundation: National Natural Science Foundation of China (50478088); Tianjin Transportation Science and Technology Development Plan Project (2023-49); Science and Technology Project of Hebei Education Department (ZD2021028)

Corresponding author: Professor PANG Mingbao. E-mail: pmbpgy@hebut.edu.cn

Citation: QI Man, PANG Mingbao. Flex-route buses scheduling based on priority topological sorting [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2023, 40(4): 435-442. (in Chinese)



可变线路式公交在服务基准线路固定站点的同时,可以偏离接运其他需求点^[1],有助于提高出行需求社区的公交服务水平,将其应用于出行需求总量小且时空分布不均的郊区,可解决传统常规公交所面临的“公交上座率低且亏损严重”的困境.目前,可变线路式公交的相关研究主要集中于:

- ① 适用性分析,帮助决策者在给定的服务区域和出行需求水平下确定最优的公交系统^[2-3];
- ② 优化策略,分为公交站点布设优化^[4-5]和固定站点时间窗优化^[6],有助于提升可变线路式公交系统的服务水平;
- ③ 系统调度,根据确定的系统参数和运行策略制定车辆的发车时刻表和运行线路^[7-10].

以上研究多基于可变线路式公交需求稳定、可预测的假设进行,目前,针对不确定性需求的研究包括:

- ① 实时需求的响应,主要通过2阶段车辆调度模型予以处理^[11-12],第1阶段以预约需求为服务对象,第2阶段以实时需求为服务目标,调度模型中较少考虑接运实时需求点对后续其他站点候车和下车乘客行程时间延长的影响;
- ② 实际需求水平偏离预期的处理,研究多针对需求水平高于预期的情况^[13-15],主要从公交行驶成本和乘客广义出行成本最小的角度构建目标函数,服务乘客数量不一定会实现最大化,可能造成一些预约需求较大的临时站点客流流失.

可变线路式公交调度的关键之一是接运站点的确定问题,集合点策略^[14]及 $d-k$ -means 聚类法^[16]等主要针对需求水平在预期范围内,并不完全适用于不确定性需求,尤其在需求较预期水平高的情况下,并非所有临时站点都能得到满足,在实际需求处理时较易忽略站点间的优先级次序.采用优先级指标选择可变线路式公交接运站点是公交调度的可行方法之一^[17],而在考虑优先级的调度问题中,基于优先级进行有向无环图(directed acyclic graph, DAG)拓扑排序能得出唯一的需求处理序列,更适于单线调度问题^[18].若将基于优先级拓扑排序方法用于可变线路式公交接运站点的选择问题时,站点优先级值越高,在拓扑序列中位置越靠前,表示站点越先被系统确定接运.基于此,本研究以可变线路式公交为研究对象,在计划线路调度时,以出行需求起讫点(origin-destination, OD)得出 DAG,综合相应站点的到站便捷性、节点度及乘车和落客需求标定优先级值,得到唯一的临时站点需求处理拓扑次序;若产生实时需求,则以预约时间次序确定

相应的 DAG. 基于站点优先级的拓扑排序,建立以公交行驶成本和乘客广义出行成本加权和最小为目标的调度模型,运用基于拓扑排序的遗传算法(genetic algorithm, GA)求解,并通过实例予以验证分析.

1 基于优先级的站点拓扑排序

可变线路式公交运行线路示意图1. 研究区域二维平面上有若干个公交固定站点,通过互联网和实地调研等方式获取出行者的 OD 位置信息,依据其与固定站点的距离,将数据点划分为固定站点需求和固定站点外需求.找出固定站点外需求所属社区并设置公交临时需求点,站点一般设置于距离社区出入口位置较近的区域,并在合理的步行距离范围内为若干个相邻社区设置合乘临时站点^[19].

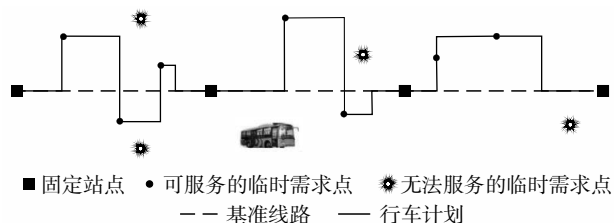


图1 可变线路式公交示意

Fig. 1 Diagram of flex-route transit service. Squares, black dots and circles represent fixed stops, temporary demand points that can be served, and temporary demand points that can not be served, respectively. Dashed line and solid line respectively represent the base route and the planned route.

在服务区域内规划允许公交偏离基准线路连接临时需求点的运营线路.假设系统中共有 N 个临时需求点,其集合表示为 $K = \{\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_N\}$,第 i 个临时需求点属性 $\kappa_i = [s_i, c_i, q_i, d_i]$,其中, s_i 为到站便捷性; c_i 为站点的节点度; q_i 和 d_i 分别为站点的乘车和落客需求量.

为更直观表示站点间的访问次序关系,引入 DAG 表示 1 组需求站点及其之间的访问关系,如图 2.若站点 κ_i 的出行需求必须通过访问 κ_j 才能得到满足,即 κ_i 是 κ_j 的直接前趋节点,记作 $\kappa_i \rightarrow \kappa_j$. DAG 顶点的不唯一导致 DAG 拓扑序列结果的随机性,从而影响可变线路式公交调度规划的最优解性能.因此,基于优先级进行可变线路式公交站点的拓扑排序,使 DAG 推导出的拓扑序列唯一.

DAG 中的顶点表示可变线路式公交需求站点,

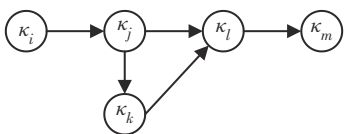


图2 需求站点有向无环图

Fig. 2 Directed acyclic graph of demand points.

边(带箭头的线)表示需求点间的优先关系, 为了更全面反映各站点情况, 确保公交调度公平合理、公交运营利益同时满足尽可能多的出行需求, 选择到站便捷性、节点度、乘车需求及落客需求指标进行站点优先级值标定. 其中, 到站便捷性定义为乘客距离站点的平均步行距离与全线乘客平均步行距离的比值^[5]; 节点度为系统内与节点直接相连的其他节点数量^[20], 为整数. 指标权重对于优先级取值影响很大, 本研究采用熵权法计算各指标权重^[5], 将各项指标的加权和作为最终优先级标定值, 以下通过实例对采用熵权法的权重确定过程加以说明. 已有到站便捷性、节点度、乘车需求及落客需求原始数据, 可扫描论文末页右下角二维码见补充材料表S1. 根据文献[5]方法将表S1数据进行标准化处理, 得到标准化矩阵(见补充材料表S2), 分别计算标准化矩阵中各指标的熵值并确定各指标权重(见补充材料表S3).

根据指标权重和原始数据分别计算各点的优先级标定值, 结果见表1. 图3为基于优先级的临时站点拓扑排序生成过程, 其中, 长方形中的数字表示站点优先级值. 图4为最终排序结果. 在图3(a)中, 存在 κ_1 和 κ_5 两个顶点, 本研究选择 κ_5 作为站点拓扑排序序列的第1个点, 因为其优先级5.15高于 κ_1 的优先级4.29; 将 κ_5 存储到拓扑排序队列的第1位, 并删除DAG中的顶点 κ_5 及其输出边. 在图3(b)中以相同方式选择节点 κ_1 , 并在DAG图中删去 κ_1 及其输出边. 继续执行此过程, 直至所有节点均被访问, 得出图4中最终序列.

表1 站点优先级分配值

Table 1 Site priority assignment value

	κ_1	κ_2	κ_3	κ_4	κ_5	κ_6	κ_7
优先级	4.29	3.17	3.99	5.64	5.15	6.41	3.34

2 模型与算法

2.1 模型假设

对本研究可变线路式公交调度模型做如下假

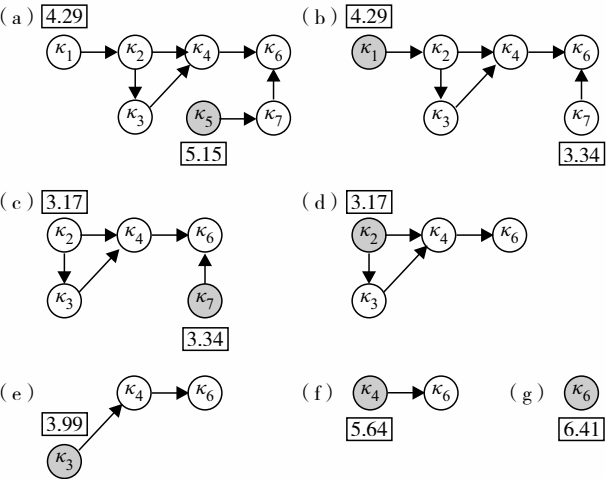


图3 基于优先级的拓扑排序过程 (a)一(g)分别为站点 κ_5 、 κ_1 、 κ_7 、 κ_2 、 κ_3 、 κ_4 及 κ_6 的选择次序

Fig. 3 Priority-based topological sort scheme. (a) to (g) are respectively the selected order of points κ_5 、 κ_1 、 κ_7 、 κ_2 、 κ_3 、 κ_4 and κ_6 .

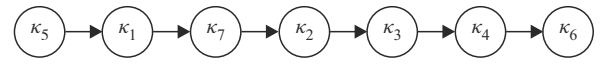


图4 基于优先级的临时站点最终拓扑排序

Fig. 4 Final topology sorting of temporary sites based on priority.

设: ① 已被可变线路式公交调度系统接受的乘客预约需求不会更改或取消; ② 系统内乘客对固定站点的车辆时间表已知, 预约出行时间窗分布在相邻两固定点发车时间窗内; ③ 本运行班次不能接运的出行需求进入下一班次; ④ 不考虑道路状况等客观条件影响, 车辆保持匀速行驶, 严格按照固定站点计划时刻表运行; ⑤ 基于郊区人口总量少、人口密度小的特殊性, 不考虑公交车辆的载客量限制; ⑥ 公交车辆按照方格路网规则行驶, 不逆行, 即沿平面直角坐标系中 x 或 y 方向行驶到达停靠点.

2.2 调度模型

2.2.1 基准线路规划模型

可变线路式公交通过将临时需求点插入基准线路, 满足乘客预约需求; 当系统内无预约需求时, 车辆沿基准线路行驶并按计划在各固定站点停靠和发车. 根据上下车位置, 可变线路式公交的乘客可分为4类: ① 上下车位置均为固定站点; ② 固定站点上车, 临时站点下车; ③ 临时站点上车, 固定站点下车; ④ 上下车位置均为临时站点. 本研究以公交行驶成本和乘客广义出行成本的加权和最小化为目标, 建立基准线路规划模型.

对公交运营成本的核算包括车辆折旧和维修保养等固定成本, 以及随行驶里程增加而变化的车辆油耗成本, 即公交行驶成本. 同一车型的固定成本通常是 1 个固定的估计值^[21], 故可忽略其影响; 行驶成本是影响调度结果的关键因素, 可表示为^[16]

$$C_{\text{op}}^1 = \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} o_{\text{veh}} x_{ij} l_{ij} \quad (1)$$

其中, C_{op}^1 为基准线路的公交行驶成本; C 为所有固定站点的集合; o_{veh} 为公交车辆单位行驶里程运行成本; x_{ij} 为 0-1 变量, 当站点 i 和 j 相邻时, $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$; l_{ij} 为车辆从站点 i 出发到达站点 j 的行驶里程.

在乘客视角下, 公交广义出行成本主要由乘客自身直接付出的票价成本与时间成本构成, 时间成本以候车时间和乘车时间衡量^[22]. 本研究中乘客广义出行成本以乘客候车时间成本、乘客乘车时间成本和乘车费用之和表示, 分别为

$$C_{\text{wait}}^1 = \gamma \sum_{i \in C} \sum_{n \in N_i} x_i (T_i^{\text{arr}} - t_{n(i)}^{\text{p}}) \quad (2)$$

$$C_{\text{ride}}^1 = \gamma \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} u_{ij} x_{ij} (T_j^{\text{arr}} - T_i^{\text{arr}}) \quad (3)$$

$$C_{\text{pay}}^1 = \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} u_{ij} x_{ij} f \quad (4)$$

其中, C_{wait}^1 、 C_{ride}^1 和 C_{pay}^1 分别为基准线路乘客的候车时间成本、乘车时间成本和乘车费用; N_i 为站点 i 的所有乘客集合; x_i 为 0-1 变量, 当车辆经停站点 i 时, $x_i = 1$, 否则 $x_i = 0$; γ 为出行者时间价值系数; T_i^{arr} 为车辆到达固定站点 i 的时间; $t_{n(i)}^{\text{p}}$ 为乘客 n 到达站点 i 的时间; u_{ij} 为站点 i 到站点 j 车上乘客数量; f 为乘客需支付的乘车费用. 因此, 可变线路式公交基准线路规划模型为

$$\min Z_1 = \omega_1 C_{\text{op}}^1 + \omega_2 (C_{\text{wait}}^1 + C_{\text{ride}}^1 + C_{\text{pay}}^1) \quad (5)$$

约束条件为

$$l_{\min} \leq l_{ij} \leq l_{\max}, \forall i, j \in C \quad (6)$$

$$L_{\min} \leq \sum_{i \in C} \sum_{j \in C} x_{ij} l_{ij} \leq L_{\max} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in C} x_{ij} = 1, \forall j \in C \quad (8)$$

$$\sum_{j \in C} x_{ij} = 1, \forall i \in C \quad (9)$$

$$\tau_i - \tau_j + M x_{ij} \leq M - 1, \quad \forall i, j \in C, i \neq j, i \neq 0, j \neq 0 \quad (10)$$

$$\sum_{i, j \in C} x_{ij} (T_j^{\text{arr}} - T_i^{\text{arr}}) \leq T_{\max}, \forall i, j \in C \quad (11)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \forall i \in C \quad (12)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in C \quad (13)$$

其中, Z_1 为基准线路规划目标函数; ω_1 和 ω_2 分别为公交行驶成本和乘客广义出行成本的权重系数; $l_{\min}$ 和 $l_{\max}$ 分别为相邻固定点间的最小和最大距离; $L_{\min}$ 和 $L_{\max}$ 为基准运行线路的最小和最大长度; τ_i 和 τ_j 为固定站点序号; M 为固定站点总数. 其中, 式(6)定义了相邻两固定站点间运行线路长度约束; 式(7)为基准线路长度限制; 式(8)和式(9)表示车辆必经停固定站点且仅经停 1 次; 式(10)表示运行线路为上行或下行方向, 不会迂回; 式(11)为基准线路运行周期不超过最大周期时间限制; 式(12)和式(13)定义了二进制变量.

2.2.2 可变线路式公交调度模型

可变线路式公交调度分为 2 个阶段, 其中, 第 1 阶段处理预约需求, 确定计划运行路径; 第 2 阶段处理实时需求, 调整计划路径. 考虑到实时需求插入可能使其他临时需求点候车乘客的等待时间或下车乘客乘车时间增加, 将系统内其他乘客由于实时需求插入所增加的行程时间成本定义为系统的惩罚时间成本,

$$P_r = s \sum_{i \in K} x_i (q_i + d_i) (t_i - t_i^{\text{p}}) \quad (14)$$

其中, P_r 为实时需求点 r 插入的惩罚时间成本; K 为所有临时需求站点的集合; s 为时间惩罚因子; q_i 和 d_i 分别为站点的乘车和落客需求量; t_i 为车辆到达临时站点 i 的实际时间; t_i^{p} 为车辆到达临时站点 i 的计划时间.

可变线路式公交调度模型以公交行驶成本和乘客广义出行成本以及惩罚时间成本的加权和最小化为目标, 各项成本可表示为

$$C_{\text{op}} = \sum_{i, j \in A} o_{\text{veh}} x_{ij} l_{ij} \quad (15)$$

$$C_{\text{wait}} = \gamma \left[\sum_{i \in K} \sum_{n \in N_i \cup N_A} y_i (t_i^{\text{p}} - t_{n(i)}^{\text{p}}) + \sum_{i \in C} \sum_{n \in N_i} x_i (T_i^{\text{arr}} - t_{n(i)}^{\text{p}}) \right] \quad (16)$$

$$C_{\text{ride}} = \gamma \left[\sum_{i \in K} \sum_{n \in N_i \cup N_A} y_i (t_{n(i)}^{\text{d}} - t_i^{\text{p}}) + \sum_{i \in C} \sum_{n \in N_i \cup N_A} x_i (t_{n(i)}^{\text{d}} - T_i^{\text{arr}}) \right] \quad (17)$$

$$C_{\text{pay}} = \sum_{i, j \in A} u_{ij} x_{ij} f \quad (18)$$

其中, C_{op} 、 C_{wait} 、 C_{ride} 和 C_{pay} 分别为可变线路式公交调度线路的公交行驶成本、乘客的候车时间成本、乘车时间成本和乘车费用; A 为所有站点集合, $A =$

$C \cup K$; N_1 、 N_2 、 N_3 和 N_4 分别为第①至④类乘客的集合; $t_{n(i)}^d$ 为乘客 n 在站点 i 的上车时间; y_i 为0-1变量, 当公交接运临时需求点 i 的需求时, $y_i = 1$, 否则 $y_i = 0$. 因此, 可变线路式公交调度模型为

$$\min Z = \omega_1 C_{op} + \omega_2 (C_{wait} + C_{wait} + C_{pay}) + \omega_3 \sum_{r \in R} \mu_r P_r \quad (19)$$

约束条件为

$$X_r > X_{veh}, \forall r \in R \quad (20)$$

$$l_{\min} \leq l_{ij} \leq l_{\max}, \forall i, j \in A \quad (21)$$

$$L_{\min} \leq \sum_{i, j \in A} x_{ij} l_{ij} \leq L_{\max} \quad (22)$$

$$\frac{l_{ij}}{D_{ij}} \leq \delta_{\max}, \forall i, j \in A \quad (23)$$

$$\sum_{i \in K} \mu_r \leq 1, \forall r \in R \quad (24)$$

$$\sigma_i - \sigma_j + N x_{ij} \leq N - 1, \quad \forall i, j \in K, i \neq j, i \neq 0, j \neq 0 \quad (25)$$

$$y_i = \begin{cases} 0, & \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} \kappa_{i,j} \Delta t_i > t_{id} \\ 1, & \sum_{i \in K} \sum_{j \in K} \kappa_{i,j} \Delta t_i \leq t_{id} \end{cases} \quad (26)$$

$$\sum_{i, j \in C} x_{ij} (T_j^{arr} - T_i^{arr}) \leq T_{\max}, \forall i, j \in C \quad (27)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \forall i \in K \quad (28)$$

$$\mu_r \in \{0, 1\}, \forall r \in R \quad (29)$$

其中, Z 为可变线路式公交调度优化目标函数; ω_3 为惩罚时间成本的权重系数; R 为实时预约需求点的集合; t_{id} 为两固定站点间的空闲时间; Δt_i 表示为了接运临时需求点 i , 公交车辆需要偏移的路径行驶时间; μ_r 为0-1变量, 当实时需求点 r 被访问时, $\mu_r = 1$, 否则 $\mu_r = 0$; $\kappa_{i,j}$ 为0-1变量, 当临时需求点 i 为 j 的直接前趋节点时, $\kappa_{i,j} = 1$, 否则 $\kappa_{i,j} = 0$.

在可变线路式公交调度模型中, 式(20)表示公交车辆不越站; 式(21)为相邻站点间间距约束; 式(22)为线路总长度约束; 式(23)表示线路非直线系数不超过给定的最大值; 式(24)表示同一实时需求点最多被接运1次; 式(25)表示运行线路不迂回; 式(26)为变量取值; 式(27)表示线路运行时间不超出最大周期时间限制; 式(28)和式(29)为变量的取值限制.

2.3 基于拓扑排序方案的遗传算法

为解决调度问题中优先级约束所导致的传统GA运算产生不可行解问题, 运用基于拓扑排序的GA求解可变线路式公交调度模型. 理论上1个DAG中可能存在多个可行序列, 通过标定优先级值

区分站点, 根据给定的优先级数据串导出唯一可行的拓扑序列. 基于优先级的拓扑排序伪代码请扫描论文末页右下角二维码见补充材料图S1.

基于拓扑排序的GA求解步骤如下.

输入 OD需求矩阵、点间距矩阵、松弛时间信息及基于优先级的拓扑序列等.

步骤1 设置GA参数, 包括种群规模MN、最大迭代次数NN、代沟 G 、交叉概率 P_c 及变异概率 P_m .

步骤2 定义适应度函数, 本研究中适应度函数可以表示为目标函数和惩罚函数之和的相反数. 当调度方案违反固定站点的时间表时, 就会产生惩罚, 定义如下:

$$\text{penalty} = \sum \text{sig}(t_d - T) \quad (30)$$

$$\text{sig}(x) = \begin{cases} \alpha x + \beta, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (31)$$

其中, penalty 为惩罚函数, 以 sig 函数值之和表示; sig 函数用于表征调度方案的行车计划对固定站点时刻表的遵守情况; α 用来衡量实际到达时间 t_d 超过计划时间表 T 的程度; β 为固定的惩罚系数, 是一个常数项.

步骤3 初始化迭代计数器 $\text{gen} = 0$, 随机产生初始种群, 根据给出的基于优先级的拓扑排序方案, 编码种群个体.

步骤4 评估第 gen 代种群中个体的适应度值, 若 gen 达到最大迭代次数, 停止运算; 否则, 进入步骤5.

步骤5 选择 $N_{\text{overlap}} = MN(1 - G)$ 个最优个体进入下一代. 选择, 交叉, 变异. $\text{gen} = \text{gen} + 1$, 重复步骤4.

输出 模型结果.

3 实例分析

3.1 线路简介与参数选择

以中国天津市公交385路为例进行案例分析, 线路图见图5. 该线路位于郊区, 沿线有兴达物流园、西青物流园、中北工业园、大学校区和村镇等, 服务乘客主要为物流和工业园的办事人员和少部分工作人员(职工多乘坐班车上下班)、周围村镇居民以及沿线大学师生等, 客流需求总量较小. 线路中站点7与地铁2号线终点站曹庄站重合, 出行者可通过换乘前往市区, 换乘客流主要集中在工

日的上下班时段; 大学师生作为客源的重要组成部分, 在上学时段出行较少; 该线路客流总量少且呈现明显的时空分布特征, 符合可变线路式公交客流特点^[12]. 系统参数设置如下: 服务区域线路长度 12.4 km; 基准线路上设有 7 个固定站点; 根据预期的出行需求, 服务区域内设有可供选择的临时站点 20 个; 车辆平均行驶速度 40 km/h; 公交行驶成本 1.9 元/min; 根据 2021 年天津市人均国民生产总值确定惩罚时间成本 0.36 元/min. 权重系数赋值参考文献^[11,15,23], 设定公交行驶成本权重系数 $\omega_1 = 1.5$; 假定系统内乘客因实时需求插入增加的候车或乘车时间的权重是正常乘车时间权重的 2 倍, 正常候车时间和乘车时间的权重相同, 设定 $\omega_2 = 1.0$, $\omega_3 = 2.0$. GA 参数选取为^[24] $MN = 100$; $NN = 300$; $G = 0.80$; $P_c = 0.40$; $P_m = 0.03$. 计算迭代过程可通过扫描论文末页右下角二维码见补充材料图 S2, 可见, 最优个体的目标函数值在第 290 代后达到最优并保持不变, 选择第 300 代种群中最优个体为最优解.

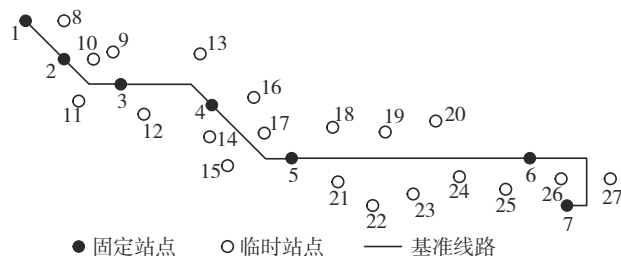


图5 天津市公交385路运行线路

Fig. 5 Route of No. 385 bus of Tianjin. Black dots and circles represent fixed stops and temporary demand points, respectively. Solid line is for base route.

3.2 基于站点优先级拓扑排序的公交调度

根据所选线路在研究时段内的出行预约OD信息, 生成唯一的站点DAG. 同时, 根据站点原始数据集进行优先级值标定, 在DAG基础上生成唯一的站点需求处理拓扑序列, 进行可变线路式公交调度. 以研究时段内上行方向第1时段为例, 出行需求DAG见补充材料中图S3, 相应站点原始数据矩阵和优先级标定值见补充材料中表S4. 由此得到唯一的站点需求处理拓扑序列为 $8 \rightarrow 9 \rightarrow 15 \rightarrow 13 \rightarrow 20 \rightarrow 26 \rightarrow 16 \rightarrow 21 \rightarrow 23 \rightarrow 22 \rightarrow 10 \rightarrow 24$.

当系统产生实时需求时, 以预约时间次序确定拓扑结构, 同样以上行方向第1时段为例予以说明. 系统在 07:32 的上行方向, 收到 3 个拟从站

12 $\rightarrow$ 20 的预约请求; 07:34 收到 2 个拟从站 17 $\rightarrow$ 7 的预约请求; 07:35 收到 3 个拟从站 18 $\rightarrow$ 24 的预约请求, 4 个拟从站 19 $\rightarrow$ 6 的预约请求. 预约时间次序的拓扑结构见补充材料图 S4, 得到站点处理次序 12 $\rightarrow$ 17 $\rightarrow$ 19 $\rightarrow$ 18, 同时调整并动态更新行车计划. 根据基准线路和预期乘客的需求情况, 以站点 1 至 7 为上行方向, 站点 7 至 1 为下行方向, 得到可变线路式公交上下行方向的固定站点发车时刻表见表 2. 分别将乘客在 07:30—10:30 的实际出行需求转化为 DAG 形式, 并将需求处理次序的拓扑序列代入公交调度模型, 公交上下行方向调度时刻表及各班次公交运行线路可通过扫描论文末页右下角二维码见补充材料表 S5 和表 S6.

表2 固定站点调度时刻表

Table 2 Fixed station vehicle schedule

方向	班次	上行站点时刻						
		1	2	3	4	5	6	7
上行	1	07:30	07:35	07:40	07:48	07:55	08:10	08:15
	2	08:10	08:15	08:20	08:25	08:31	08:40	08:45
	3	09:10	09:12	09:15	09:20	09:25	09:35	09:40
方向	班次	下行站点时刻						
		7	6	5	4	3	2	1
下行	1	08:00	08:08	08:22	08:30	08:40	08:45	08:50
	2	09:00	09:05	09:15	09:23	09:28	09:32	09:35
	3	10:00	10:05	10:15	10:19	10:23	10:28	10:30

3.3 对比分析

本研究记预期需求水平为 1.00. 为使对比效果更为清晰, 取 385 路公交高于预期的实际出行数据为高需求水平, 所选出行需求总量为预期水平的 1.35 倍, 需求水平记为 1.35; 同样选取低需求水平下的出行数据, 记为 0.75. 分别在出行需求高于、等于及低于预期时, 对比可变线路式公交在 3 类调度模式下的服务效果, 分别为: ① 传统的可变线路式公交系统; ② 站点拓扑排序但不标定优先级值的系统; ③ 本研究基于优先级拓扑排序的调度系统. 通过公交人均行驶成本、行驶里程、人均广义出行成本、人均乘车时间和预约请求拒绝率等指标对公交服务性能进行对比. 结果见表 3, 可见:

1) 在高需求水平下, 本研究的公交人均行驶成本为 4.38 元, 较其他两种调度方式分别下降 11.87% 和 6.85%; 人均广义出行成本分别下降 9.06% 和 3.28%; 人均乘车时间也相对较短. 在预期需求水平下, 本研究的公交人均行驶成本分别下

降 7.58% 和 4.39%; 人均广义出行成本分别下降 3.40% 和 0.82%。在低需求水平下, 本研究的公交人均行驶成本分别下降 7.55% 和 7.21%; 人均广义出行成本分别下降 1.79% 和 0.90%。可见, 采用本研究方式可在一定程度上降低可变线路式公交的人均行驶成本和乘客广义出行成本, 提高公交系统的盈利能力和服务水平, 这种优越性在高需求水平下更明显。

2) 虽然本研究中公交人均行驶成本低, 但公交运行里程却较其他方式高。这主要是由于本研究中优先级标定综合考虑多方面因素, 某些距离稍远的站点可能会获得更高的优先级, 使得一些偏移距离小的站点处理次序滞后, 甚至因空闲时间限制被放弃接运, 因此, 出现运行里程增大的现象。

3) 在请求拒绝率方面, 当系统内需求较多时, 预约出行需求拒绝率更大不可避免。这是因为固定站点间偏离基准线路的空闲时间有限, 当固定站点以外的需求过多时, 无法调度车辆经过所有的临时需求点。对比结果显示, 在不同需求水平下, 本研究相对其他调度方式的拒绝率均较低, 即预约需求接受率更高, 进一步验证了本研究调度方式的有效性。

表3 服务效果对比

Table 3 Comparison of service effects

调度模式	对比指标	需求水平		
		1.35	1.00	0.75
1	人均行驶成本/元	4.90	5.39	6.41
	运行里程/km	27.30	26.22	25.65
	人均广义出行成本/元	8.31	7.60	6.80
	人均乘车时间/min	17.52	15.55	13.33
	请求拒绝率/%	19.98	6.70	1.53
2	人均行驶成本/元	4.68	5.23	6.39
	运行里程/km	28.11	26.77	25.89
	人均广义出行成本/元	7.87	7.41	6.74
	人均乘车时间/min	16.30	15.03	13.18
	请求拒绝率/%	11.13	3.57	1.09
3	人均行驶成本/元	4.38	5.01	5.96
	运行里程/km	28.77	27.08	26.14
	人均广义出行成本/元	7.62	7.35	6.68
	人均乘车时间/min	15.68	14.87	13.00
	请求拒绝率/%	7.68	2.28	0.80

结 语

本研究提出基于站点优先级拓扑排序的可变线路式公交调度模式, 结合到站便捷性、站点节点

度、乘车需求和落客需求进行相应站点的优先级值标定, 在 DAG 基础上确定唯一的站点需求处理次序拓扑序列。建立以公交行驶成本和乘客广义出行成本加权和最小为目标的调度模型, 运用基于拓扑排序的 GA 求解, 获得最佳调度方案。实例分析结果表明, 基于站点优先级拓扑排序的调度模式具有更低的公交人均行驶成本、广义出行成本及更高的预约接受率, 可有效提高公交服务质量和盈利水平。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50478088); 天津市交通运输科技发展计划资助项目(2023-49); 河北省高等学校科学技术研究资助项目(ZD2021028)
作者简介: 齐曼(1999—), 河北工业大学硕士研究生。研究方向: 智能交通运输系统。E-mail: qm6191339@163.com
引 文: 齐曼, 庞明宝. 基于优先级拓扑排序的可变线路式公交调度[J]. 深圳大学学报理工版, 2023, 40(4): 435-442.

参考文献 / References:

[1] QUADRIFOGLIO L, DESSOUKY M M, ORDONEZ F. Mobility allowance shuttle transit (MAST) services: MIP formulation and strengthening with logic constraints [J]. European Journal of Operational Research, 2008, 185(2): 481-494.

[2] ZHAO J, DESSOUKY M. Service capacity design problems for mobility allowance shuttle transit systems [J]. Transportation Research Part B, 2008, 42(2): 135-146.

[3] QIU F, LI W, HAGHANI A. A methodology for choosing between fixed-route and flex-route policies for transit services [J]. Journal of Advanced Transportation, 2015, 49(3): 496-09.

[4] QIU Feng, LI Wenquan, ZHANG Jian. A dynamic station strategy to improve the performance of flex-route transit services [J]. Transportation Research Part C, 2014, 48: 229-240.

[5] 庞明宝, 张宁, 陈茂林. 基于节点重要度的 MAST 公交站布设评价研究[J]. 河北工业大学学报, 2018, 47(6): 94-99.
PANG Mingbao, ZHANG Ning, CHEN Maolin. Study on evaluation of MAST bus stop layout based on node importance [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2018, 47(6): 94-99. (in Chinese)

[6] CRAINIC T G, ERRICO F, MALUCELLI F, et al. Designing the master schedule for demand-adaptive transit systems [J]. Annals of Operations Research, 2012, 194(1): 151-166.

[7] YANG H, CHERRY C R, ZARETZKI R, et al. A GIS-based method to identify cost-effective routes for rural deviated fixed route transit [J]. Journal of Advanced Transportation, 2016, 50(8): 1770-1784.

- [8] 王正武, 赵振于, 何煦. 多车型 MAST 的调度优化及关键参数分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(2): 85-90.
- WANG Zhengwu, ZHAO Zhenyu, HE Xu. Scheduling optimization and key parameter analysis of multi-class vehicle mobility allowance shuttle transit [J]. Journal of Transportation Science and Engineering, 2018, 34(2): 85-90. (in Chinese)
- [9] MOURAD A, PUCHINGER J, CHU C. A survey of models and algorithms for optimizing shared mobility [J]. Transportation Research Part B, 2019, 123(5): 323-346.
- [10] 邵孜科, 张泉, 王树盛, 等. 可变线路公交车调度算法优化研究[J]. 交通信息与安全, 2018, 36(5): 83-89.
- SHAO Zike, ZHANG Quan, WANG Shusheng, et al. Optimization algorithms for scheduling of flex-route buses [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2018, 36(5): 83-89. (in Chinese)
- [11] 邱丰, 李文权, 沈金星. 可变线路式公交的两阶段车辆调度模型[J]. 东南大学学报自然科学版, 2014, 44(5): 1078-1084.
- QIU Feng, LI Wenquan, SHEN Jinxing. Two-stage model for flex-route transit scheduling [J]. Journal of Southeast University Natural Science Edition, 2014, 44(5): 1078-1084. (in Chinese)
- [12] 庞明宝, 陈茂林, 张宁. 基于 MAST 的智慧公交优化调度研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(1): 143-149.
- PANG Mingbao, CHEN Maolin, ZHANG Ning. Scheduling optimization of intelligent public transport system based on MAST [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(1): 143-149. (in Chinese)
- [13] ZHENG Yue, LI Wenquan, QIU Feng. A slack arrival strategy to promote flex-route transit services [J]. Transportation Research Part C, 2018, 92: 442-455.
- [14] ZHENG Yue, LI Wenquan, QIU Feng, et al. The benefits of introducing meeting points into flex-route transit services [J]. Transportation Research Part C, 2019, 106: 98-112.
- [15] 郑乐, 高良鹏, 沈金星, 等. 可变线路式公交运行服务能力优化策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(9): 107-115.
- ZHENG Yue, GAO Liangpeng, SHEN Jinxing, et al. Operational service capability optimization strategies for flex-route transit service [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(9): 107-115. (in Chinese)
- [16] 胡迪, 靳文舟. 基于站点优化的需求响应公交调度研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2022, 39(2): 209-215.
- HU Di, JIN Wenzhou. Flex-route demand response transit scheduling based on station optimization [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2022, 39(2): 209-215. (in Chinese)
- [17] 徐兵, 谢仕义. 基于站点优先级的公交换乘算法实现[J]. 计算机时代, 2005(7): 16-17.
- XU Bing, XIE Shiyi. Implementation of the bus exchange multiplication algorithm based on site priority [J]. Computer Era, 2005(7): 16-17. (in Chinese)
- [18] 岳林枫. 优先级约束条件下的无线充电任务调度算法[D]. 南京: 南京大学, 2021.
- YUE Linfeng. Scheduling wireless charging tasks with precedence constraints [D]. Nanjing: Nanjing University, 2021. (in Chinese)
- [19] 王瑜琼. 考虑常规线路影响的需求响应式公交协同优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- WANG Yuqiong. Cooperative optimization method of demand responsive transit considering the influence of conventional lines [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021. (in Chinese)
- [20] LIU Jun, XIONG Qingyu, SHI Weiren, et al. Evaluating the importance of nodes in complex networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2016, 452: 209-219.
- [21] DELLOLIO L, IBEAS A, RUISANCHEZ F. Optimizing bus-size and headway in transit networks [J]. Transportation, 2012, 39(2): 449-464.
- [22] 周媛媛. 基于广义出行费用的城市客运交通结构优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- ZHOU Yuanyuan. Research of urban passenger transport structure optimization based on generalized travel costs [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [23] WARDMAN M. Public transport values of time [J]. Transport Policy, 2004, 11(4): 363-377.
- [24] 胡文斌, 韩璞, 孙明. 二进制编码遗传算法中的控制参数选取方法[J]. 计算机仿真, 2015, 3(32): 447-450.
- HU Wenbin, HAN Pu, SUN Ming. Selection method of control parameters in binary-coded genetic algorithm [J]. Computer Simulation, 2015, 3(32): 447-450. (in Chinese)

【中文责编: 方圆; 英文责编: 淡紫】



补充材料