

高悦尔,崔洁,王成,等.基于站点重要度的轨道交通沿线常规公交线路调整[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(6):97-106.
GAO Yue-er, CUI Jie, WANG Cheng, et al. Conventional bus lines adjustment along rail transit based on stop importance degree[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(6): 97-106.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.06.010

基于站点重要度的轨道交通沿线常规 公交线路调整

高悦尔¹, 崔洁², 王成³, 崔紫薇⁴

(1. 华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021; 2. 上海同济城市规划设计研究院有限公司, 上海 200092;
3. 华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021; 4. 中山大学 智能工程学院, 广东 广州 510006)

摘 要:为了避免轨道交通沿线公共交通运输力浪费,需要对轨道交通沿线常规公交线路进行调整。首先,从常规公交与轨道交通共线的空间关系入手,分析常规公交乘客转移到轨道交通可能存在的换乘关系;其次,针对共线段时间效用较低的常规公交线路进行换乘客流特征分析,通过评估待调整常规公交上下行线路的站点重要度,进一步分析共线段站点空间关系以判断常规公交共线段是否保留;最后,通过站点重要度均值和置信度水平确定所研究公交线路端点线路和站点是否为重要线路和站点,并结合端点线路长度确定端点线路是否保留。研究表明:常规公交线路共线段取消后,客流直接转移到轨道交通,减少了轨道交通沿线常规公交的运力浪费,同时为轨道交通运营初期培育客流,促进轨道交通的使用效率;常规公交保留端点线路后,高峰时期客流量在调整后增加了接近 2 倍,新增了换乘客流,说明根据站点重要度判断端点段线路作为轨道交通供给线路的实际意义;根据常规公交线路的客流分布计算站点重要度,并对共线特征下的分段线路重要性进行评价,制定分段调整方案,同时兼顾了轨道交通沿线常规公交线路的共线特征与客流特征,其结果更接近实际需求。该研究可以为轨道交通沿线常规公交线路的调整提供决策依据。

关键词:交通工程;城市交通;公交线路调整;站点重要度;轨道交通;置信度

中图分类号:U491 文献标志码:A 文章编号:1671-8879(2020)06-0097-10

Conventional bus lines adjustment along rail transit based on stop importance degree

GAO Yue-er¹, CUI Jie², WANG Cheng³, CUI Zi-wei⁴

(1. School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China; 2. Shanghai Tongji Urban Planning & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. School of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China; 4. School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: In order to avoid the waste of public transport capacity along the track, it is necessary to adjust the conventional bus lines along the track. First, starting from the spatial relationship between the common public transport and rail transit, the transfer relationship between the

收稿日期:2020-06-15

基金项目:国家自然科学基金项目(52078224);福建省自然科学基金面上项目(2017J01090)

作者简介:高悦尔(1983-),女,副教授,工学博士,E-mail:gaoyueer123@gmail.com。

regular bus passengers and the rail transit was analyzed. Secondly, the characteristics of the passenger flow of the conventional bus lines with low time utility of the common bus segments were analyzed, and further analysis of the station space relationship of common line segments to determine whether the common bus line segment was retained, by evaluating the important station importance degree of the upper and lower bus routes to be adjusted respectively. Finally, whether the bus lines and stations were important lines and stations by means of station importance and confidence level were determined, and whether the end line was reserved by combining the length of the end line was determined. The results show that after the cancellation of the common segment of the conventional bus lines, the passenger flow will be directly transferred to rail transit, which reduces the capacity waste of the conventional bus, cultivates passenger flow for the rail transit at the early stage of operation and promotes the efficiency of the rail transit. The conventional bus endpoint line retain after the adjustment has increased by nearly 2 times during the peak period due to the newly added transfer passenger flow. This also illustrates the practical significance of judging the endpoint line as a rail transit feed line based on the importance of the station. This method calculates the importance of stations based on the passenger flow distribution of conventional bus lines, evaluates the importance of segmented lines under collinear characteristics, and develops segmented adjustment plans. Therefore, the collinear and passenger flow characteristics of the conventional bus lines along the rail transit are taken into account by this method, which can be closer to actual needs. This research can provide a decision-making basis for the adjustment of conventional bus lines along the rail transit. 7 figs, 26 refs.

Key words: traffic engineering; urban traffic; bus line adjustment; stop importance degree; rail transit; confidence level

0 引言

以轨道交通为骨干的公共交通系统被普遍认为是解决城市交通拥堵的主要途径,轨道交通线路走向沿城市公交线路密集的主要客流走廊,其开通后常常吸引沿线常规公交的客流。为避免公共交通运力的浪费,需要对轨道交通开通前沿线常规公交线路进行调整,以整合公共交通资源。

目前,国内外关于轨道交通影响下的常规公交线路研究主要集中在 3 个方面:公交线网的协调优化、接驳线路设计与优化、应急疏散线路设计。国外轨道交通发展较早,形成了较为完善的轨道交通与常规公交协调的理论与方法,关于轨道交通与公交线网的协调优化多关注于多模式公交网络的设计问题^[1-3]。Jin 等通过构建随机规划模型评估轨道交通网络的弹性,进行轨道交通与常规公交网络一体化设计^[1]。Wei 等基于轨道交通与公交的竞争与合作关系,提出一种以乘客出行总成本最小为目标的公交线路优化模型,并使用遗传算法进行模型求解^[2]。Cao 等统计和预测轨道交通开通前后沿线公交线路

的客流量,确定在轨道交通开始运营后,满足公交客运需求量前提下可取消的公交线路,并以大连为例进行实证研究^[3]。Park 等关于接驳线路的优化生成主要通过识别交通需求区域、构建多目标优化模型,通过识别通勤时间内主要的出租车交通集群,确定地铁-公交网络的接驳巴士路线,减少高峰期的交通量^[4-7]。Fan 等研究网格城市中的轨道交通与接驳公交运输网络,以乘客的出行和公交的运营成本最小建立两者的接驳网络模型^[5]。另外,部分学者研究了轨道交通的应急疏散问题^[8-10]。Lu 等针对公交-轨道交通走廊的疏散规划,研究在混合不确定条件下所需的人口疏散和车辆调度方案^[8]。中国轨道交通与常规公交的协调主要集中在两者的共同走廊带平行调整方面。孙杨针对常规公交调整候选线路构建多目标规划模型,调整了常规公交线路的走向和运营参数^[11]。李家斌根据轨道交通与公交线网的布局形式,对比分析了常规公交线路的运能、共线位置关系、线路长度,讨论线路的具体调整措施,包括撤停、延长、截短、运力调整和站点调整等^[12]。袁长伟等依据线网的层次、功能结构、整体规模与公

交线路长度等特性,分别进行取消、缩短、调整线路走向等优化^[13]。关于接驳线路的设计生成与优化调整方面,张思林针对轨道交通沿线接驳线路的生成进行研究,基于候选线路集合的方法,引入 0~1 变量以优化接运公交线路的组合方案,生成接运公交线网,同时以公交乘客的出行成本、公交企业的运营成本和政府的碳排成本最小为目标,调整车辆配置和发车频率^[14]。姚加林等对轨道交通应急情况下,多条应急公交线路的开行方案进行研究,并以乘客的出行时间最短和公交运营费用最低为目标,建立多线路应急公交模型^[15]。

总体来说,关于轨道交通沿线常规公交线路调整,国内外学者多关注轨道交通与常规公交网络的一体化优化,然而轨道交通建设的初始阶段,轨道交通线路单一,如果对常规公交网络进行大幅调整,将会对乘客的出行产生影响。共线空间关系下轨道交通首先吸引共线段常规公交客流,同时产生换乘需求。乘客由于出行空间分布不同对常规公交线路共线段与非共线段的依赖存在差异,因此,本文考虑常规公交与轨道交通的共线特征,同时结合线路站点的客流需求,进行更加符合实际的线路调整。在研究线路的客流分布情况下,引入节点重要度的概念,以此反映线路分段情况下的重要性。节点重要度为网络中反映节点功能强弱、地位大小的指标,其在交通领域的应用主要集中在公交发车时刻表优化^[16]、城市道路网络中关键节点的确定^[17-18]等方面。公共交通网络中,每一个节点即为一个公共交通站点,节点重要度即为站点重要度,不同站点的乘客乘降和换乘量都不同,对网络运输和换乘效率贡献度也不一样。刘志勇等从物理空间考虑常规公交网络的拓扑关系,选取节点的入度、出度、聚类系数、邻近中心性、中介中心性 5 个指标进行站点重要度的确定^[19],但此研究忽略了站点客流量。在常规公交网络中,公交站点客流量的多少将直接影响停靠站点的公交线路数目和线路的发车频率。常规公交站点的客流分为 2 种:以站点为其起始出发点的非换乘客流,此时以公交站点为网络节点的公交网络拓扑为公交站点网络;在站点换乘的客流,此时以公交站点为网络节点的公交网络拓扑为公交换乘网络。黄义选取公交换乘网络作为研究网络,引入节点强度(与该节点相连的边的权值之和)指标和节点换乘客流量指标一起确定公交站点重要度,并基于此进行了区域公交发车时刻表模型的研究^[16]。黎豪通过引入点权和凝聚度的相关概念,结合无权及加权网

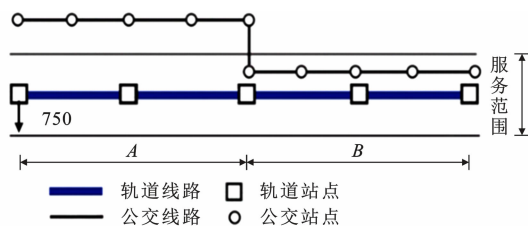
络权值计算公交站点重要度,其中权重由站点之间高峰小时单位时间运送客运量大小确定^[20]。现有研究中站点重要度多用于全局公交网络,较少用于局部公交线网的研究,并且缺少针对考虑不同线路共线关系及客流分布的轨道交通沿线公交线路调整。

综上所述,已有研究中筛选共线段常规公交相对轨道交通效用较低的线路,确定为待调整线路^[21-22],本文依据共线线路的换乘特征,进一步对待调整的常规公交线路提出“分段式”调整原则,主要以轨道交通沿线公交线路的换乘客流为基础计算站点重要度,评价共线段站点的空间关系,端点线路是否重要,并结合接驳线路长度的约束进行调整,以期为轨道交通沿线常规公交线路的调整提供理论和方法,促进轨道交通与常规公交的协调发展。

1 共线线路的空间关系

1.1 共线线路的定义

常规公交与轨道交通共线是指,在同一客流走廊内,常规公交线路走向与轨道交通线路基本相同且在轨道交通线路两侧服务范围内。共线线路的研究范围取决于轨道交通的服务半径,而轨道交通的服务半径受轨道交通站点服务半径的影响,可以理解为轨道交通的直接服务范围,依据住房和城乡建设部及国内外城市实践经验,本文取距离轨道交通 750 m 范围内的常规公交为共线线路^[23]。根据常规公交线路与轨道交通共线部分的不同,共线线路可以被分为完全共线线路、中间共线线路和端点共线线路^[24]。由于轨道交通和常规公交的服务对象不同,一般不存在完全共线线路^[21],因此,本文主要研究端点共线线路与中间共线线路。本文把端点共线线路分为 A、B 两段、中间共线线路分为 A、B、C 三段,其中 B 段均为共线段,A、C 段为端点线路(如图 1 和图 2 所示)。



单位: m

图 1 端点共线线路示意

Fig. 1 Schematic of endpoint collinear line

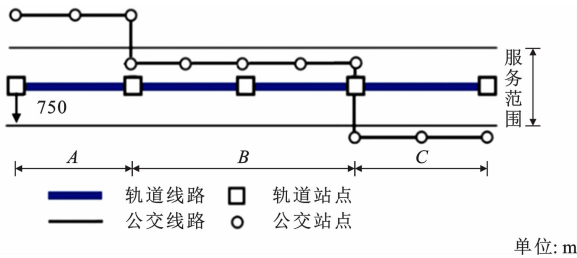


图 2 中间共线线路示意

Fig. 2 Schematic of intermediate collinear line

1.2 共线线路的空间关系

由于常规公交与轨道交通共线时在空间上存在共线通道与换乘折点，端点共线线路与中间共线线路可以抽象描述为“点-线”、“点-线-点”的空间关系，如图 3 和图 4 所示。“点-线”空间模式存在 1 个换乘折点，在折点处会发生 1 次换乘，如 A-B(A 段至 B 段)；“点-线-点”空间模式存在 2 个折点，会同时存在 1 次换乘和 2 次换乘的情况，如 A-B、A-C。

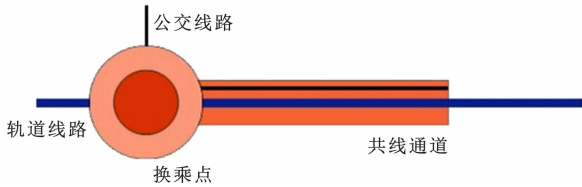


图 3 端点共线线路空间关系概念

Fig. 3 Spatial relationship of endpoint collinear line

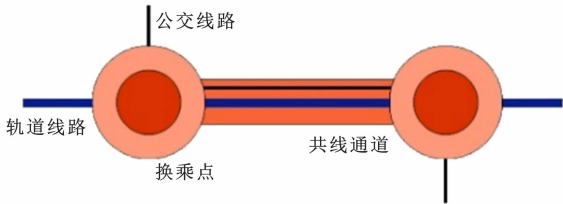


图 4 中间共线线路空间关系概念

Fig. 4 Spatial relationship of intermediate collinear line

2 常规公交共线线路调整影响因素

由于评估常规公交线路站点重要度是以其客流分布为基础，本文通过公交刷卡数据分析待调整常规公交线路的客流 OD 分布特征。

2.1 时段特征

出行 OD 数据具有时间属性，且客流存在高峰小时。轨道交通投入运营后，其与常规公交二者的客流分布在时间上具有一定的叠加性，即轨道交通与常规公交的客流高峰通常是同步的。同时，常规公交在高峰小时的运营压力较大，公交线路的调整必须与高峰小时的客流需求相匹配，以此达到供需平衡^[11]。因此，轨道交通沿线常规公交线路的调

整，应以高峰小时为前提进行研究。另外，平峰时期也存在达到高峰小时客流分布特征的可能，为了提出更贴合实际的调整方案，本文同时考虑平峰时期的客流需求，选择高峰小时与任一平峰时段出行 OD 数据作为有效数据进行评估。

2.2 待转移特征

在“点-线”空间关系下，常规公交线路上 A-B 之间为待转移至轨道交通的客流；在“点-线-点”空间关系下，常规公交线路上 A-C、A-B、B-C 属于待转移至轨道交通的客流。可以发现，待转移至轨道交通客流即为存在换乘的客流，同时覆盖了常规公交线路的共线段与端点线路。即使共线段客流转移至轨道交通，常规公交端点线路依然需要运送这部分客流，因此换乘客流是常规公交线路调整的重要因素。

2.3 换乘方向

从常规公交线路的双向运行特征来看，乘客选择乘坐的方向不同，该方向常规公交线路公交站点所承担的换乘客流量也不同，导致常规公交站点的的重要度评判不同。因此，本文分别对常规公交上下行线路站点重要度进行计算，进而制定常规公交上下行线路的调整原则。

3 常规公交共线线路调整方法

针对轨道交通沿线待调整的常规公交线路，具体调整仍需考虑轨道交通影响下该线路上的客流需求。本文通过常规公交线路的客流分布及换乘特征评估站点重要度，进而评估共线段站点空间关系能否满足客流转移轨道交通的换乘需求、端点线路是否重要，最后再考虑端点线路的接驳长度约束。

3.1 站点重要度

由于不同乘客出行 OD 点的分布不同，导致常规公交线路每个站点的重要度不同。根据上述客流的换乘特征分析，以换乘客流为基础，则某待调整常规公交线路的第 i 个站点的站点重要度可以表示为^[16]

$$I_i = \frac{q_i}{Q} \quad (1)$$

式中： I_i 为待调整常规公交线路的第 i 个站点的站点重要度； q_i 为某常规公交线路在第 i 个站点的上、下车换乘客流量之和； Q 为该公交线路上、下车换乘客流总量。

3.2 站点空间关系

本文提到的站点空间关系指轨道交通与常规公

交共线段二者站点的空间位置关系,即站点间的步行可达距离(不考虑轨道交通车站建筑结构)。常规公交站点在轨道交通站点的可达范围内可使乘客实现便捷换乘,称为便捷换乘站点,通过便捷换乘站点可以评价共线段换乘的便捷程度^[21]。由此可确定某待调整常规公交线路的便捷换乘站点个数占比与便捷换乘站点重要度占比如下所示。

(1)便捷换乘站点个数占比

$$\rho = \frac{k}{K} \quad (2)$$

式中: ρ 为便捷换乘站点个数占比; k 为常规公交共线段(B段)便捷换乘站点个数; K 为常规公交共线段(B段)所有站点个数。

(2)便捷换乘站点重要度占比

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^k I_i}{\sum_{i=1}^K I_i} \quad (3)$$

式中: β 为便捷换乘站点重要度占比。

3.3 重要线路和重要站点

(1)端点线路总体重要度

采用端点线路站点重要度均值 m 代表某待调整常规公交线路的某端点线路重要度

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n I_i}{n} \quad (4)$$

式中: m 为端点线路站点重要度均值; n 为常规公交端点线路(A或C段)的站点总数。

(2)全线总体重要度

采用全线站点重要度的平均值 M 代表全线总体重要度

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N I_i}{N} \quad (5)$$

式中: M 为全线站点重要度的平均值; N 为该常规公交线路的站点总数。

(3)重要线路

通过对高峰时期某待调整常规公交线路端点线路总体重要度与全线总体重要度进行比较,评价该段线路是否是重要线路,若有 $m > M$,则该段线路为重要线路,应考虑予以保留。

(4)非重要线路的重要站点

对于非重要的端点线路,可能会存在单一站点重要度较高。设站点重要度服从正态分布,将非重要端点线路的站点重要度最大值与全线站点重要度

单侧置信区间上限比较,判断该段线路是否存在重要站点。

设置信度为 $1-\alpha$ 的全线站点重要度单侧置信区间上限为 θ ,此时全线站点重要度小于 θ 的概率为 $1-\alpha$,其计算为

$$\theta = M + \frac{\delta}{\sqrt{N}} t_\alpha (N-1) \quad (6)$$

式中: θ 为常全线站点重要度单侧置信区间上限; δ 为全线站点重要度的标准差; t_α 为正态分布参数; α 为置信度水平。

其中,全线站点重要度的标准差 δ 计算为

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_i - M)^2}{N}} \quad (7)$$

将该段线路站点重要度最大值,与全线站点重要度在一定置信度水平下的单侧置信区间上限比较,判断该站点相对于全线是否为重要站点。若有该段线路最大的站点重要度 $I_{\max} > \theta$,则认为该端点线路存在重要站点,应考虑予以保留。

同时,本文考虑平峰时期的客流需求,将平峰时期端点线路站点重要度均值与高峰时期全线站点重要度均值进行比较,评价线路是否为重要线路。

对于平峰时的常规公交端点线路,若满足式(8),则该端点线路为重要线路,应考虑予以保留

$$m' > M \quad (8)$$

式中: m' 为平峰时期常规公交端点线路(A或C段)的站点重要度均值。

若不满足式(8),判断是否满足式(9),若满足则认为该端点线路存在重要站点,该段线路同样重要,应考虑予以保留

$$I'_{\max} > \theta \quad (9)$$

式中: I'_{\max} 为平峰时期该段线路最大的站点重要度。

3.4 端点线路长度

针对上述调整原则下考虑保留的常规公交端点线路,为了集约公共交通资源,仍需满足常规公交开设接驳线路长度的标准^[12],定为

$$l > L \quad (10)$$

式中: l 为常规公交端点线路(A或C段)的线路长度; L 为满足常规公交接驳线路开设的标准线路长度。

3.5 常规公交线路具体调整流程

(1)共线段(B段)调整步骤

通过评价站点空间关系判断共线段是否能满足

大多数乘客转移轨道交通的需求,包括 2 个指标:共线段便捷换乘站点数量占比;便捷换乘站点重要度占比。若 2 个指标均较高,表明该共线段站点能满足大多数换乘乘客转移到轨道交通的需求,则该常规公交共线段考虑取消,反之保留。若共线段保留,

则全线保留,若共线段取消,则进行端点线路评估与调整。
(2)端点线路(A、C 段)调整步骤
高峰时期,常规公交端点线路的调整原则如下,流程如图 5 所示

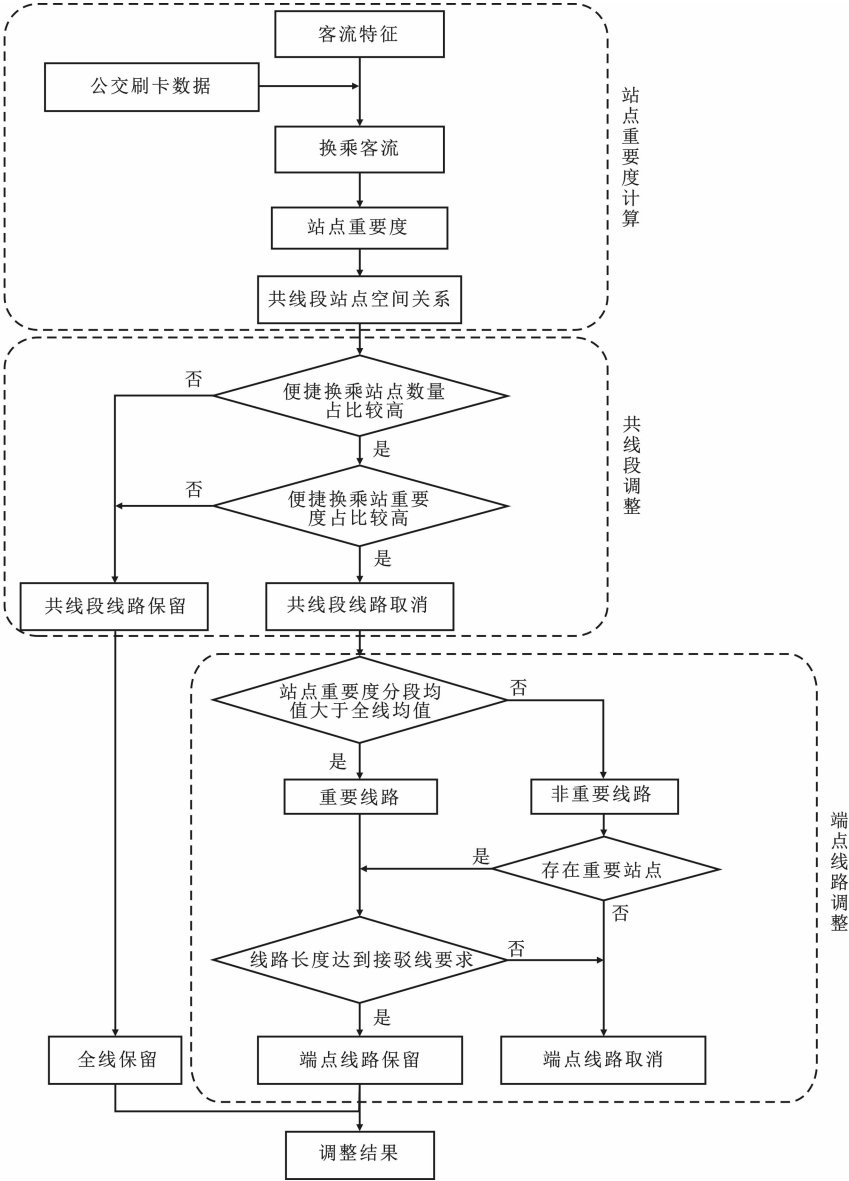


图 5 常规公交共线线路调整流程

Fig. 5 Adjustment flow of conventional bus collinear line

- ①若站点重要度均值高于全线站点重要度均值,则该段线路重要度较高,则考虑保留。
- ②若站点重要度均值低于全线站点重要度均值,则以一定置信度水平判断若存在重要站点,说明该段线路重要度较高,则考虑该段线路保留。
- ③若站点重要度均值低于全线站点重要度均值,以一定置信度水平判断若不存在重要站点,说明该段线路重要度较低,则考虑取消。

平峰时期,若常规公交端点线路存在相对于高峰时期的重要线路或重要站点,考虑保留。若是高峰时期为重要线路,平峰时期不重要,则该段线路高峰时期保留,平峰时期与其他线路合并;若高峰时期因存在重要站点考虑保留的线路,且平峰时期不重要,则该段线路高峰时期跳站(抽疏)运行,平峰时期与其他线路合并。
针对保留的端点线路需要考虑长度的约束,满

足开设接驳线的长度要求,常规公交端点线路的调整原则为:①若端点线路长度低于接驳线的长度要求,则该段线路取消;②若端点线路长度高于接驳线的长度要求,则该段线路继续考虑保留为接驳线。

4 算例分析

4.1 数据说明

为验证本文研究方法的有效性 with 实用性,选取厦门轨道交通 1 号线沿线共线段相比轨道交通效用较低的常规公交线路进行实证研究。该常规公交线路共有 36 个站点(站点编号为 s_1, s_2, \dots, s_{36}),根据其 with 轨道交通 1 号线的空间关系,可将该线路分为 A、B、C 三段,其中 B 段为与轨道交通共线段。获取该常规公交线路 2017 年 11 月工作日共 21 d 的公交刷卡数据 with GPS 数据,分别针对早高峰时间(7:30~8:30) with 选取任一平峰时间(10:00~11:00)进行说明。计算参数设定如下:在 95% 的置信度水平下,通过查表可得 $t_{\alpha}(N-1)$

的值为 1.69;参考赵金宝确定的城市轨道交通换乘站辐射范围,定义轨道交通站点换乘范围 800 m 以内的常规公交站点为便捷换乘站点^[25];参考杨京帅等确定“大多数”为 80%,定义若共线段换乘站点数占共线段站点数 80% 以上,且换乘站点重要度能达到共线段全部站点 80% 以上,则确定共线段站点满足大多数乘客转移到轨道交通的换乘需求^[26];参考该市已开设的公交链接线,取接驳线路长度约束为 3 km。

4.2 实例结果

(1) 站点重要度分布情况

该常规公交线路与轨道交通 1 号线的共线关系属于“点-线-点”换乘 2 次的空间模式。本文以换乘客流为基础,计算各站点的上下车客流来评估站点重要度,得到该常规公交线路高峰 with 平峰期间 A、B、C 段站点重要度分布特征,如图 6 所示。高峰时期站点换乘客流量明显高于平峰时期,且高峰时期波动较大 with 平峰时期较为平稳。

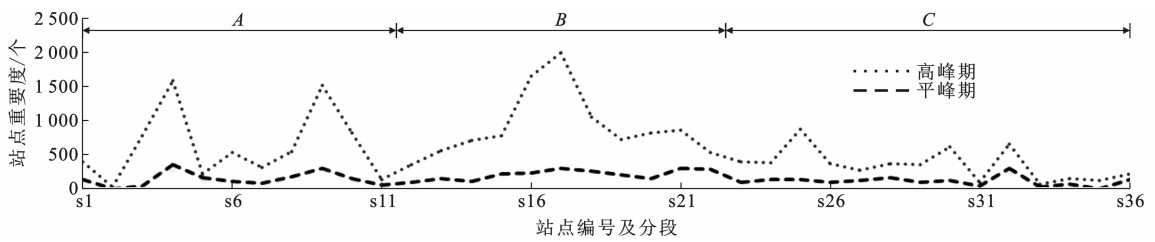


图 6 常规公交线路高峰与平峰换乘客流站点重要度分布
Fig. 6 Importance distributions between peak and flat peak transfer stations of conventional bus lines

(2) 共线段站点空间关系

共线段站点空间关系决定了乘客是否会转移到轨道交通,以轨道交通换乘站辐射范围 800 m 为临界值,对常规公交线路共线段 11 个站点进行评价,确定了 1 个换乘不便的站点,并进一步统计该段线路各站点重要度。结果表明,该段线路中换乘站点数占比 90.91%,说明该线路共线段的站点空间关系可以满足大多数乘客转移到轨道交通的换乘需求,因此取消该常规公交共线线路(B 段),进一步分析该线路的端点线路。

(3) 重要线路和重要站点

对于端点线路 A 段和 C 段,本文以站点重要度均值 with 置信度水平判断端点线路是否重要。从该线路端点线路站点重要度均值 with 全线站点重要度均值比较来看,如图 7 所示,高峰时期 A 段为重要线路,C 段为非重要线路,平峰时期 A、C 段均为非重要线路。

针对高峰时期非重要线路 C 段,进一步评价该

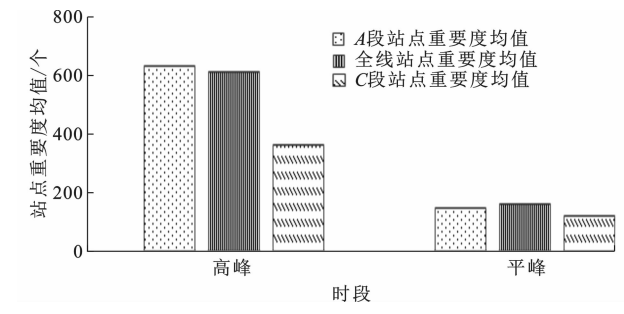


图 7 常规公交线路高峰与平峰 A、C 段站点重要度均值
Fig. 7 Mean values of importance degree of A and C sections in peak and flat peaks of conventional bus lines

段线路是否存在重要站点,采用式(6)、式(7)计算全线站点重要度的标准差 δ ,95% 置信水平的单侧置信区间上限 θ 如下

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{36} (I_i - 611)^2}{36}} = 462.16$$
$$\theta = 611 + \frac{462.16}{6} \times 1.6896 = 741.14$$

全线 95% 置信度水平单侧置信区间上限为 2.96%, 通过该线路 A 段站点重要度进行评价, 可以确定

$$I_{\max} = 880 > 741.14$$

结果表明, 该段线路存在重要站点。同理, 对平峰时期非重要线路 A、C 段是否存在相对于高峰时期的重要站点进行评价, 结果为 A、C 段均不存在重要站点。

综上所述, 高峰时期端点线路 A 段为重要线路, C 段存在重要站点; 平峰时期端点线路 A、C 段均为非重要线路且不存在重要站点。

(4) 端点线路长度

通过计算, 该线路端点线路 A、C 段分别为 7.3、5.6 km, 端点线路的长度均大于接驳线的开设标准 $L=3$ km。

(5) 调整结果

通过上述对与轨道交通 1 号线共线的常规公交线路高峰与平峰时期站点重要度特征、共线段站点空间关系、端点线路是否重要进行评估, 并结合接驳线路长度的约束, 该线路的调整分析如下:

①从共线段站点空间关系来看, B 段便捷换乘站点能承担该段 80% 以上的换乘客流, 基本满足该段客流转移轨道交通的换乘需求, B 段线路取消;

②从端点线路是否重要来看, 高峰时期 A 段为重要线路, 平峰时期为非重要线路且不存在重要站点, 则考虑 A 段线路保留且平峰时期与其他线路合并; C 段高峰时期为非重要线路但存在重要站点, 平峰时期为非重要线路且不存在重要站点, 则考虑 C 段保留且高峰时期跳站运行, 平峰时期与其他线路合并;

③从端点线路长度方面来看, 考虑保留的 A、C 段线路长度能达到开设接驳线的标准, 由此可以判断线路 A、C 段保留。

4.3 结果分析

本文关于端点线路 A 段的调整方案为高峰时期保留, 平峰时期与其他线路合并, 实际线路的调整方案为配合轨道交通 1 号线试运营, 该常规公交线路截短为站点 s1~s11 之间线路, 即保留线路 A 段, 并考虑到机场的客流需求, 延长 2 站至 s13。线路截短后通过实际客流量统计对比发现, 保留的 A 段线路高峰时期客流量在调整后增加了接近 2 倍, 新增了换乘客流, 这说明该端点段线路作为轨道交通供给线路需要保留的必要性, 也进一步

说明该调整方案的合理性。关于端点线路 C 段的调整方案为保留高峰时期跳站运行, 平峰时期与其他线路合并, 考虑同走廊并行线路较多, 实际线路的调整方案为 C 段取消。另外, 本文关于共线段 B 段的调整方案为取消, 与现有实际线路的调整方案一致。取消共线段减少了轨道交通开通后常规公交的运力浪费, 同时为轨道交通运营初期培育客流, 促进轨道交通的使用效率。线路调整后, B 段客流直接转移轨道交通, 提高了大多数人出行的时间效用, 原常规公交乘客转移轨道交通需发生换乘所产生的不便可通过节省的时间效用进行弥补, 若少部分乘客在轨道交通区间出行较短, 不足以提高时间效用, 可采用其他方式代替。

进一步采取已有研究方法对算例进行对比分析, 由于本文算例所选常规公交线路随着轨道交通 1 号线的开通同步进行了调整, 故不存在未调整时与轨道交通同时运营时的线路客流数据, 无法利用部分已有研究方法^[2-3,11], 采用公交与轨道交通同时运营下的客流数据及相关运行特征对比分析。因此, 本文选择考虑公交线路和轨道交通线路的空间关系下, 公交线路的调整结果与本文的调整结果进行对比。根据李家斌的方法首先判断线路的空间关系类型, 确定运能因子、位置关系因子、线路长度因子的影响显著且存在差异^[12]。本文算例线路根据上述因子变量(高峰发车间隔为 5~10 min、共线站数为 10 站、共线比例为 47%、线路长度为 27 km 等)综合判定为以平行线路为主, 运能和客流较大、共线特征明显、线路长度较长的公交主干线, 此类线路的调整方法为局部调整、运力调整, 共线区段或部分区段调出走廊服务于其他次级走廊, 或考虑特定区域特定人群的需求降低运力(缩减发车间隔)在走廊上发挥小站距的优势, 所以按该算例的调整结果为共线区段 B 段调出共线走廊。而本文的调整结果为共线段 B 段取消, A 段保留, C 段高峰时期跳站(抽疏)运行, 平峰时期与其他线路合并。已有研究方法考虑客流仅针对共线区段制定调整措施, 而本文则根据线路的客流分布对共线特征下的各区段进行评价并制定每段调整方案, 更接近实际需求。

5 结 语

(1) 提出轨道交通沿线常规公交线路分段式调整方案。以换乘客流数据为基础计算站点重要度, 评估端点线路是否为重要线路及是否存在重要站

点,为进一步确定轨道交通沿线常规公交线路调整方案提供依据。

(2)以单条轨道交通线为研究对象,进一步对轨道交通沿线的常规公交线路调整进行预判,这与轨道交通发展初期城市轨道交通线路较为单一有关。

(3)首先选取共线段常规公交线路相比轨道交通效用较低的线路,考虑轨道交通沿线常规公交客流分布及换乘特征,评估基于换乘客流的线路是否重要,提出分段式调整的原则,避免了常规公交运力浪费。

(4)未来可针对保留的常规公交共线段是否可以平行调整,端点线路是否可以合并到相关线路,并扩展刷卡数据的时间段,进一步计算线路的客流满载率并优化发车间隔。

参考文献:

References:

- [1] JIN J G, TANG L C, SUN L, et al. Enhancing metro network resilience via localized integration with bus services[J]. *Transportation Research Part E*, 2014, 63 (2): 17-30.
- [2] WEI J, LONG K, GU J, et al. Optimizing bus line based on metro-bus integration [J]. *Sustainability*, 2020, 12(4): 1493.
- [3] CAO Y, YANG Z Z. The adjustment method of bus lines along new subway after operation[J]. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2020, 48 (3): 260-268.
- [4] PARK C, LEE J, SOHN S Y. Recommendation of feeder bus routes using neural network embedding-based optimization[J]. *Transportation Research Part A*, 2019, 126: 329-341.
- [5] FAN W, MEI Y, GU W. Optimal design of intersecting bimodal transit networks in a grid city[J]. *Transportation Research Part B*, 2018, 111: 203-226.
- [6] SUN B, WEI M, YANG C, et al. Personalized and coordinated demand-responsive feeder transit service design: A genetic algorithms approach[J]. *Future Internet*, 2018, 10(7): 1-14.
- [7] DENG L, GAO W, ZHOU W, et al. Optimal design of feeder-bus network related to urban rail line based on transfer system[J]. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, 2013, 96: 2383-2394.
- [8] LU Y, YAN X D, SUN W, et al. A risk-based method for planning of bus-subway corridor evacuation under hybrid uncertainties [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2015, 139: 188-199.
- [9] SUN J, HU H, LIU Z. A bus bridging optimization model for single point operational disruption of urban rail transit[J]. *Advances in Natural and Applied Sciences*, 2017, 11(4): 388-394.
- [10] LIANG J, WU J, QU Y, et al. Robust bus bridging service design under rail transit system disruptions [J]. *Transportation Research Part E*, 2019, 132: 97-116.
- [11] 孙 杨. 城市轨道交通新线投入运营下常规公交线网优化调整方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- SUN Yang. Methodology of bus network optimization and adjustment under the operation of urban new rail transit line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [12] 李家斌. 轨道交通运营初期地面公交线网调整方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- LI Jia-bin. Study on the adjustment method of ground bus line network in the initial stage of rail transit operation[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [13] 袁长伟, 吴群琪, 袁华智, 等. 考虑轨道交通作用效应的城市公交线网优化方法[J]. *公路交通科技*, 2014, 31(8): 119-125.
- YUAN Chang-wei, WU Qun-qi, YUAN Hua-zhi, et al. Optimization of urban public transport network considering rail transit interaction effect [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2014, 31(8): 119-125.
- [14] 张思林. 城市轨道交通接运公交线网规划与运营方案优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- ZHANG Si-lin. Study on optimization method of urban rail transit bus network planning and operation scheme [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [15] 姚加林, 齐 弦. 城轨运营中断条件下公交应急线路开行方案研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15 (7): 1863-1870.
- YAO Jia-lin, QI Xian. Research on bus emergency route plan in the operation interruption of urban rail transit[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2018, 15(7): 1863-1870.
- [16] 黄 义. 考虑站点重要度的区域公交发车时刻表模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- HUANG Yi. Research on the modeling of the regional bus timetable based on the degree of importance of

- the nodes[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [17] 赵诗诗, 卢毅, 郝利烨. 基于节点重要度的城市群城际道路公交线路规划[J]. 公路与汽运, 2018(5): 24-26, 30.
- ZHAO Shi-shi, LU Yi, HAO Li-ye. Bus route planning in intercity road of urban agglomeration based on the importance of nodes[J]. Highways & Automotive Applications, 2018(5): 24-26, 30.
- [18] XU M, WU J, LIU M, et al. Discovery of critical nodes in road networks through mining from vehicle trajectories [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(2): 583-593.
- [19] 刘志勇, 李瑞敏. 北京市公共交通网络系统的鲁棒性研究[J]. 公路工程, 2017, 42(6): 17-23.
- LIU Zhi-yong, LI Rui-min. The robustness research of Beijing public traffic network system [J]. Highway Engineering, 2017, 42(6): 17-23.
- [20] 黎豪. 轨道交通线路影响下的常规公交线网优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- LI Hao. Study on optimization of conventional public transport network under the influence of rail transit line[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [21] CUI J, GAO Y, CHENG J, et al. Study on the selection model of staying adjustment bus lines along rail transit[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020 (3): 1-12.
- [22] 田秀珠, 高悦尔, 王成, 等. 轨道共线段公交发车班次优化[J]. 公路交通科技, 2020, 37(1): 115-121, 130.
- TIAN Xiu-zhu, GAO Yue-er, WANG Cheng, et al. Optimization of bus departure frequency in rail transit common section[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(1): 115-121, 130.
- [23] 陈彦瑾. 常规公交与城市轨道交通并线决策问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- CHEN Yan-jin. Research on parallel problems for bus lines and urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [24] 石慧钰. 新建城市轨道交通沿线公交线路调整方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- SHI Hui-yu. Study on adjustment of conventional bus lines along the new urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [25] 赵金宝. 城市轨道交通站点辐射区基础理论及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- ZHAO Jin-bao. Study of the basic theory and application of catchment area of urban rail transit stations [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [26] 杨京帅, 张殿业. 城市轨道交通车站合理吸引范围研究[J]. 中国铁路, 2008(3): 72-75.
- YANG Jing-shuai, ZHANG Dian-ye. Study on reasonable attraction range of urban rail transit station[J]. Chinese Railways, 2008(3): 72-75.