

车路协同环境下定制公交规划设计与运行效果评价 ——以长沙市通勤定制公交为例

张长隆, 杨晓东, 戴金钢, 瞿仕波, 魏吉敏, 黄达, 曹超波
(长沙智能驾驶研究院, 湖南长沙 410013)

摘要: 定制公交既有研究主要集中于线路的定制规划和需求的定制响应, 然而提升运行效率同样值得关注。车路协同技术在检测精度和传输实时性方面的优势有助于提升定制公交运行效率, 并可定制公交的运行效果评价提供数据来源。首先, 基于互联网位置大数据明确定制公交线路规划的步骤并进行精准选线, 同时基于车路协同技术提出定制公交信号优先系统设计方法。然后, 以车路协同环境下产生的大量交互数据为基础对定制公交运行效果进行评价, 从交通需求承载水平、通勤效率提升水平、乘客出行体验水平以及车路协同服务水平4个评价维度入手, 确定14个评价指标, 并利用层次分析法构建定制公交运行效果的评价方案。最后对长沙市梅溪湖一高新区通勤定制公交进行实例评价, 验证了评价方案的合理性和可参考性。

关键词: 定制公交; 车路协同; 层次分析; 评价指标; 长沙市

Implementation and Evaluation of Customized Buses in a Cellular Vehicle-to-Everything Environment: Taking Customized Commuting Bus in Changsha as an Example

ZHANG Changlong, YANG Xiaodong, DAI Jingang, QU Shibo, WEI Jimin, HUANG Da, CAO Chaobo
(Changsha Intelligent Driving Institute, Changsha Hunan 410013, China)

Abstract: The existing literature on customized bus services mainly concentrated on route planning and tailored responses to specific demands. Nevertheless, enhancing the travel efficiency of customized buses is equally deserving of attention. The advantages of Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X) in detection accuracy and real-time transmission are beneficial for improving the travel efficiency of customized buses, and can provide data sources for evaluating the operation performance of customized buses. Firstly, based on the Internet positioning data, the steps for planning customized bus routes are clearly defined, and a precise route selection philosophy is established. Meanwhile, a methodology for the signal priority system of customized buses is proposed based on C-V2X. Then, with the large amount of interaction data generated in a V2X environment, the operation performance of customized buses is evaluated. The evaluation framework includes four evaluation dimensions, namely the level of travel demand carrying capacity, the level of improvement in commuting efficiency, the level of passenger travel experience, and the level of C-V2X service, and 14 detailed evaluation indicators are determined. Then the Analytical Hierarchy Process (AHP) is utilized to develop an evaluation scheme for performance evaluations. Finally, the example of customized commuting bus line from Meixi Lake to High-Tech Industrial Zone of Changsha is analyzed, and the rationality and applicability of the evaluation scheme were verified.

Keywords: customized buses; Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X); Analytical Hierarchy Process (AHP); evaluation indicators; Changsha

收稿日期: 2023-12-12

作者简介: 张长隆(1976—), 男, 江西弋阳人, 博士, 高级工程师, 车路协同首席科学家, 研究方向为V2X、车联网、协作式ITS, 电子邮箱 zhang.cl@cidi.ai。

通信作者: 杨晓东(1994—), 男, 山西忻州人, 硕士, 工程师, 车路协同算法工程师, 研究方向为智能交通、车路协同、ITS, 电子邮箱 yang.xd@cidi.ai。

0 引言

定制公交是一种根据乘客特定的需求和偏好来定制路线及时间的公共交通方式, 适

用于具有明显出行需求的城市区域, 线路往往具有通勤属性。近年来, 为满足多元化、定制化的大众出行需求, 定制公交作为公共交通运营中的一种新方式, 已在中国部分大

中型城市陆续落地，如北京、天津、济南、哈尔滨、徐州、南京、深圳、长沙等^[1]。

现阶段对定制公交的研究主要集中在需求分析和线路规划方面。曹阳^[2]从需求分析入手，重点分析了定制公交的定时调度和实时调度；邱果^[3]在研究乘客出行特征的基础上，建立出行方式选择模型，并利用双层规划模型实现定制公交的线路设计；柏海航

等^[4]根据弱客流地区的交通特性，在客运和货运需求分析的基础上，构建定制公交车辆动态路径优化模型，实现客货共享定制公交线路的动态规划。

上述研究中通常采用线上及线下问卷调查的方式获取出行需求，其分析结果的准确性依赖于抽样样本的随机性和代表性^[2]。在提升公共汽车运行效率方面，部分研究考虑设置公交专用车道和专用信号灯策略^[5-8]。然而，设置公交专用车道会压缩社会车辆的通行空间，同时定制公交车辆基于感应线圈、地磁或射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)等技术实现到达检测，由于无法获取车辆的实时运行状态和位置，信号机多为被动响应优先，容易造成优先时间的浪费，带来负面的交通影响^[9]。此外，定制公交的运行效果评价缺乏一套针对性的综合方案，难以为后续的定制公交优化和调整提供指导意见。

针对上述问题，可引入互联网大数据技术和车路协同技术实现车路协同环境下定制公交的线路规划与评价。一方面，基于互联网位置大数据可实现精准的出行需求分析，完成定制公交线路和车站规划；另一方面，基于车路协同技术，车辆可与信号控制系统进行低时延、高频率、远距离的实时数据交互^[10-11]，在不设置公交专用车道和专用信号灯的情况下也可实现精准的公交信号优先控制^[12-13]。此外，车路协同环境下，车-路-云实时交互产生的海量数据也为定制公交的运行效果评价提供了基础。

2021年4月，湖南省长沙市梅溪湖一高新区落地应用了两条车路协同环境下的通勤定制公交线路。本文将结合长沙市定制公交案例，研究车路协同环境下定制公交的实现与评价：

1) 基于互联网大数据技术和车路协同技术提出一种车路协同环境下的定制公交实现方法。首先利用互联网位置数据在出行需求分析的基础上实现定制线路规划；然后基于C-V2X通信进行车-路实时数据交互，实现精准的信号优先控制。

2) 基于车路协同环境下的大量交互数据，构建定制公交的运行评价方案。评价方案基于交通需求承载水平、通勤效率提升水平、乘客出行体验水平以及车路协同服务水平4个评价维度构建评价指标体系，并利用层次分析法建立评价模型，最后结合长沙市通勤定制公交案例完成运行效果评估。

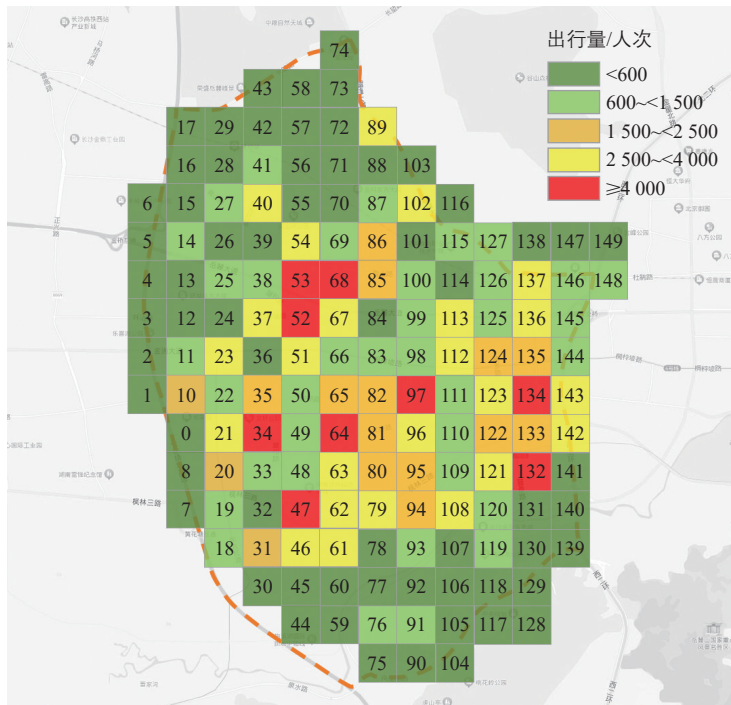


图1 各交通小区高峰时段出行量
Fig.1 The travel volume of each traffic zones during peak hours

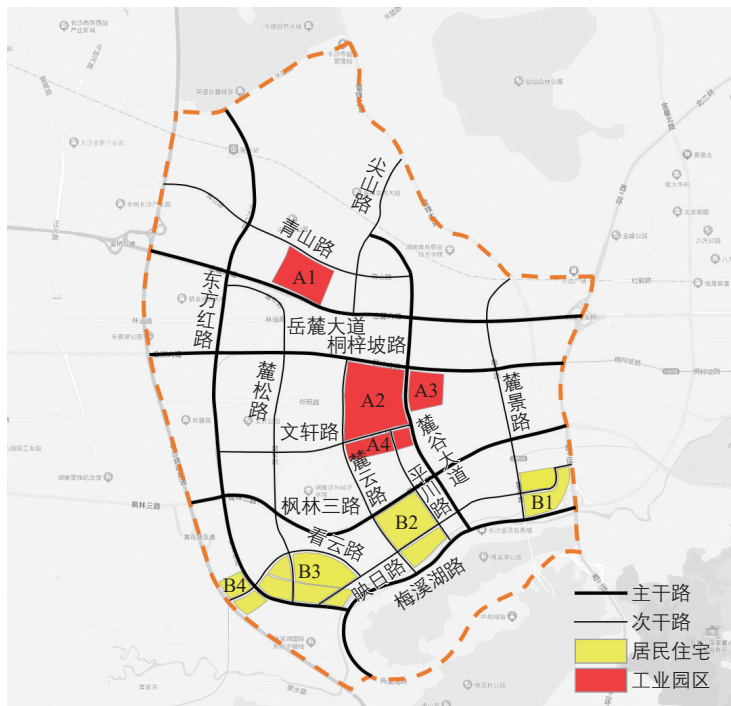


图2 客流集中的地块分布
Fig.2 Distribution of areas with concentrated passenger flow

1 基于OD需求分析的定制公交线路规划

OD需求分析的数据来源为互联网位置大数据。定制公交线路规划的步骤如下：

1) 将研究区域划分为不同的交通小区，并确定每一个交通小区内主要的土地利用类型，如住宅、工业、商业、学校用地等。

2) 根据互联网位置大数据分析各个交通小区的OD出行量和出行分布，有效识别客流集中点。

3) 将客流集中点进行聚类串联形成初步的定制公交线路规划；与交通管理部门、公共汽车运营实体等相关单位沟通，对路线进行优化调整。

4) 根据定制公交沿线客流集中点的分布情况，对现有公共汽车站分布进行调研，确定复合使用现有车站或者新建车站。

长沙市梅溪湖一高新区通勤定制公交案例中，研究范围内划分了149个交通小区，通过分析互联网位置大数据确定了各交通小区高峰时段(7:00—9:00, 16:30—19:00)的出行量(见图1)。结合研究区域内的路网结构和土地利用类型，确定区域内客流较为集中的地块(见图2)。

客流集中地块具有明显的区位特性，其中枫林三路往北主要为工业用地，分布在文轩路、麓谷大道和青山路沿线；枫林三路往南主要为住宅用地，分布在映日路和看云路沿线。通过对客流集中点进行聚类串联得到两条通勤定制公交线路，命名为通勤定制公交东线和西线(见图3)。东线首末站分别为玉兰路南园路口站和信息产业园站，主要途经映日路、平川路、文轩路、麓谷大道和青山路，线路长度约7.7 km，服务通勤人口约3 400人；西线首末站分别为梅溪湖街道办事处站和信息产业园站，主要途经看云路、映日路、平川路、文轩路、麓谷大道和青山路，线路长度为9.2 km，服务通勤人口约7 100人。东线和西线分别设置6个和10个车站，其中4个车站为共用车站，各车站基础情况见表1。通勤定制公交车站均复合使用已有车站，其中仅对平川路文轩路口站(沿平川路南往北方向)的车站位置进行微调。

2 基于车路协同技术的定制公交信号优先系统设计

2.1 系统架构

基于车路协同技术的信号优先系统包含

车端系统和路侧系统两个部分，其中车端系统包含车载单元(On Board Unit, OBU)和客流仪等设备；路侧系统包含路侧单元(Roadside Unit, RSU)、信号机等设备，各关键组件的通信接口和传输内容如图4所示。

2.2 控制流程

1) OBU利用内置高精定位模组和车内客流仪实时获取车辆运动状态(位置、速

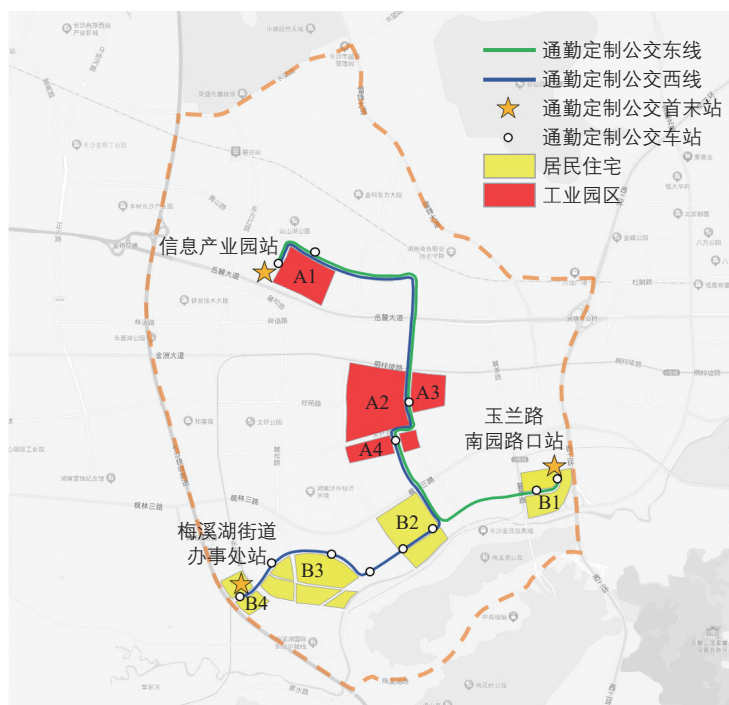


图3 梅溪湖一高新区通勤定制公交线路

Fig.3 Routes of Meixi Lake to High-Tech Industrial Zone customized commuting bus line

表1 梅溪湖一高新区通勤定制公交车站情况

Tab.1 Stops Information on Meixi Lake to High-Tech Industrial Zone customized commuting bus line

车站	所属线路	客流集中地块编号—附近OD点
玉兰路南园路口站	东线	B1—达美D6、大坝咀小区
梅溪湖东地铁公交站	东线	B1—振业城、梅溪湖东地铁站
梅溪湖街道办事处站	西线	B4—嘉顺苑、梅溪鑫苑名家
看云路踏雪路口站	西线	B3—旭辉御府
看云路观花路口站	西线	B3—好莱城、家和苑
梅岭公园站	西线	B3—梅溪四季、梅岭国际
柏家塘小区站	西线	B2—柏家塘小区、金茂悦
映日路平川路口站	西线	B2—浪琴湾小区
平川路文轩路口站	共用	A4—麓谷企业广场
麓谷大道谷苑路口站	共用	A2—中联重科、A3—麓谷信息港
青山路望安路口站	共用	A4—中电软件园
信息产业园站	共用	A4—芯城科技园

度、航向等)和乘客信息,再根据时刻表信息确定车辆是否准点。

2) OBU实时接收RSU广播的道路交叉口拓扑地图信息,完成位置和路径匹配后生成信号优先请求并发送至RSU,优先请求包含身份信息、运动状态、运营状态(如是否准点、载客量)等。

3) RSU利用RS485或RJ45等有线通信方式实现与信号机通信,并获取信号相位实时状态,在收到优先请求后,经过计算将优先指令发送至信号机。

4) 信号机接收优先指令后,基于实时交通状态,选择是否调整配时方案来响应优

先,并将优先执行结果返回至RSU。

5) RSU对外广播优先执行结果和信号相位状态;OBU接收到对应信息后,通过显示设备(如驾驶人屏和乘客屏)向驾乘人员进行提示。

2.3 控制算法

基于车路协同技术的信号优先系统可实现广域的车路信息交互。相比基于固定位置的检测方式,该系统根据定制公交车辆实时状态主动调整信号配时方案,不仅可保证定制公交的优先通行权,同时降低公交信号优先对道路交通运行的负面影响。本文提出一种两阶段信号优先控制算法,算法流程如图5所示。

两阶段信号优先控制为有条件的公交优先,仅为晚点车辆提供信号优先权。其中,晚点车辆是指到达上一车站时刻晚于时刻表允许偏差时间的车辆,允许偏差时间可根据不同地区需求进行设定。在第一阶段控制中,定制公交车辆处于交叉口上游远端位置,通过优化后续信号周期的相位相序和相位时间来预调整信号控制方案。相序方案采用枚举法进行选择,基于选定相序方案,以最小化交叉口总延误为优化目标、各相位放行时间为决策变量建立优化模型,其中车辆到达时间预测、延误计算模型和求解算法可参考文献[13]。在第二阶段控制中,定制公交车辆处于交叉口上游近端位置,车辆的到达时间预测更为准确,因此可基于车辆到达时间预测对信号控制方案进行微调,调整策略包括相位提前启亮和相位绿灯延长。通过两阶段控制,不仅可以提前优化配时降低对道路交通运行的影响,同时可以实时检测定制公交车辆到达时间以实现精准优先。为保证信号控制系统稳定,在一次优先控制中,第一阶段控制方案和第二阶段控制策略均仅计算一次。

2.4 实际应用

在长沙市梅溪湖一高新区通勤定制公交案例中,东线和西线均安排了2辆网联定制公交车辆在高峰时段服务,每辆网联车内部署1台OBU和1台客流仪。两条线路共途经26个信号控制交叉口,部署26台RSU设备,RSU部署点位如图6所示。车载OBU和路侧RSU利用C-V2X进行无线通信,RSU与信号机通过RS485进行有线通信,实现了车与路之间信号优先请求、信号控制状态、

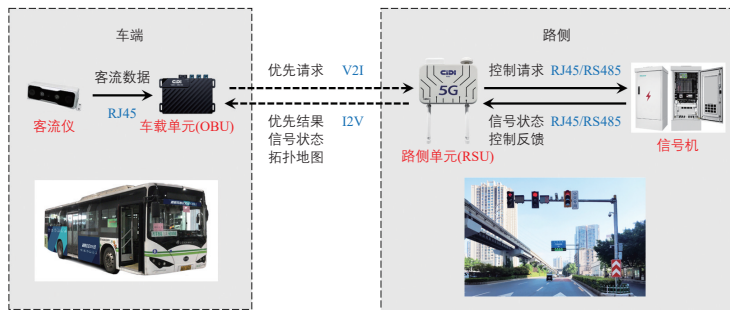


图4 基于车路协同技术的信号优先系统架构

Fig.4 Architecture of signal priority system based on C-V2X

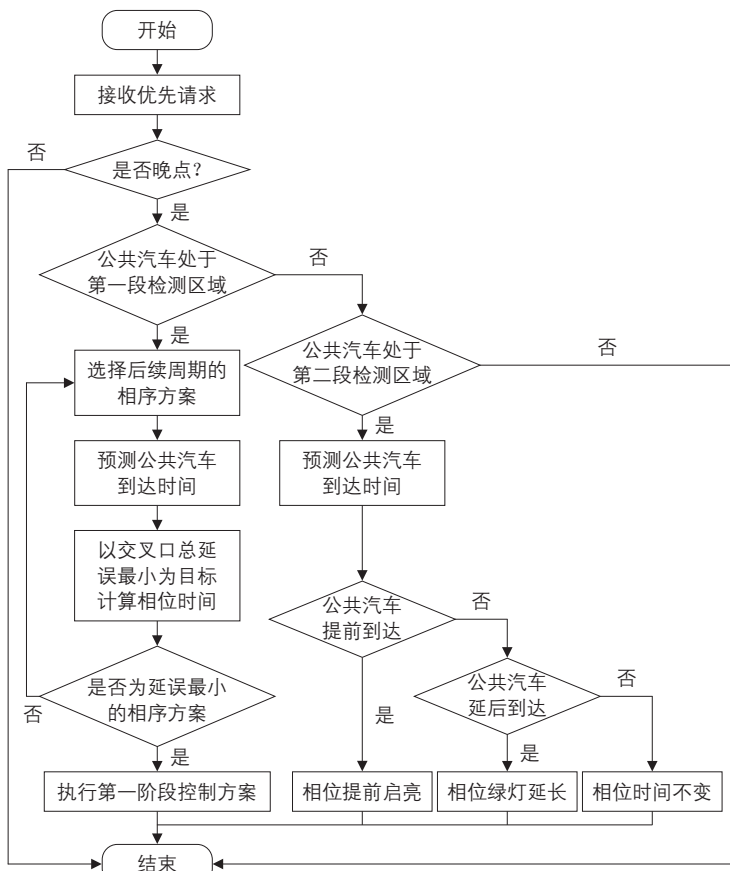


图5 两阶段信号优先控制算法流程图

Fig.5 Flow chart of the two-stage signal priority control algorithm

表2 车路协同环境下定制公交运行效果评价指标体系

Tab.2 Customized bus operation performance evaluation indicators system in a C-V2X environment

评价维度	评价指标	变量符号	变量含义	计算或评价方法
交通需求承载水平	车站服务度	β	车站对交通小区出行的服务程度 ¹⁾	$\beta = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{N}$ 式中： S_i 为交通小区 <i>i</i> 车站服务度，当交通小区服务半径内存在定制公交车站时值为1，否则为0； N 为节点数/个，即公共交通线路服务的交通小区数量
	载客率	α	平均载客人数与核载人数的比值	
	分担率	s	服务区域内定制公交出行量占总出行量的比例	
	交通转化率	r	定制公交出行人群中，由其他交通方式(除公共汽车外)转化来的出行比例	
通勤效率提升水平	行程时间优化率	f	定制公交相对于公共汽车的“站对站”出行时间优化率	$f = \frac{t_b - t_a}{t_b}$ 式中： t_a 为定制公交“站对站”出行的平均通勤时间/min； t_b 为原有公共汽车“站对站”出行的平均通勤时间/min
	行程时间可靠度	e	定制公交各班次起讫点间出行时间的偏离程度	$e = \max\left(0, \frac{t_a - \max(\sigma_a - \epsilon_a, 0)}{t_a}\right)$ 式中： σ_a 为定制公交“站对站”出行的通勤时间标准差； ϵ_a 为定制公交“站对站”出行的通勤时间可容忍时间偏差
	准点率	ω	统计间隔内定制公交车辆准点到达次数与到达总次数的比值	当到达时刻误差小于5 min时，可认为准点到达
	步行距离优化率	p	相比公共汽车，定制公交开通后各交通小区乘客步行距离的减少程度	$p = \frac{\sum_{i=1}^N p_{i,b} - \sum_{i=1}^N p_{i,a}}{\sum_{i=1}^N p_{i,b}}$ 式中： $p_{i,b}$ 为从交通小区 <i>i</i> 出发，乘坐公共汽车到达终点所需的步行距离/m； $p_{i,a}$ 为从交通小区 <i>i</i> 出发，乘坐定制公交到达终点所需的步行距离/m
乘客出行体验水平	智能交互服务	m	乘客可通过车内可视化设备获取实时到站、即将到站、车站换乘以及交叉口信号灯状态等智能交互信息的能力	乘客可在定制公交内获取全部交互信息，评分值为1；可获取部分交互信息，评分值为0.5；无法获取任何交互信息，评分值为0
	出行成本	c	定制公交票价超出区域公共汽车平均票价的程度	未超出时，评分值为1；超出范围≤50%时，评分值为0.8；超出范围>50%~100%时，评分值为0.6；超出范围>100%~200%时，评分值为0.4；超出范围>200%时，评分值为0.2
	信息查询服务	b	乘客可通过手机应用程序查询定制公交车辆位置、停靠车站及车内人数等信息的能力，从而方便乘客主动选择搭乘班次并提前规划行程	可提供全部信息查询服务，评分值为1；可提供部分查询服务，评分值为0.5；无法提供任何查询服务，评分值为0
车路协同服务水平	信号优先申请率	p_r	途经各交叉口时，实际发起信号优先请求频次与应发起频次的比值	
	信号优先服务率	p_s	途经各交叉口时，信号优先请求被正常响应的频次与总请求频次的比值	
	信号优先通过率	p_c	途经各交叉口时，在公交信号优先成功响应情况下，定制公交车辆在优先时间内正常通过的比例	

1) 按照《城市公共交通发展水平评价指标体系》(GB/T 35654—2017)，车站的服务半径不应超过500 m，考虑到定制公交服务对象的特殊性，规定车站的服务半径不应超过300 m。

的上限值。

经归一化处理，每个评价指标的标准化得分均为0~100，有助于实现定制公交运行效果的综合评价。

4 案例分析

以长沙市梅溪湖一高新区通勤定制公交东线和西线为例对上述评价指标和评价方案进行验证。东线和西线在早晚高峰时段运营，每条线路均有2辆运营车辆，每辆车各运行2个班次。选取2021年5月中旬至6月中旬的运行数据对两条线路的运行效果进行评价。

4.1 指标评分

1) 交通需求承载水平。

东线沿途各重点小区300 m步行距离内均设置车站，西线沿途部分小区300 m步行距离内未设置车站，但500 m步行范围内均设置车站。通过对网联定制公交车辆OBU上报的客流数据进行分析发现，6月中旬东线每班次的平均载客量约为75人次·班⁻¹，西线约为85人次·班⁻¹，且通勤定制公交的核载人数为85人。若按高峰时段通勤定制公交出行需求占通勤总人口的70%来计算出行分担率，则东线由其他交通方式转化为通勤定制公交的出行比例约为35%，西线约为33%。

2) 通勤效率提升水平。

OBU上报的位置数据可匹配车辆到达每个车站的时刻，进而计算通勤定制公交“站对站”行程时间。东线从始发站至终点站的平均行程时间为23.2 min，标准差为7.03 min，准点率为88%。西线从始发站至终点站的平均行程时间为29.7 min，标准差为7.14 min，准点率为85%。此外，东线和西线沿途重点小区居民乘坐定制公交到达信息产业园的平均步行距离分别为430 m和436 m。据调查，东线和西线开通前，从起点至终点乘坐公共汽车的平均时间分别为45 min和55 min，沿途重点小区居民乘坐公共汽车到达信息产业园的平均步行距离分别为593 m和692 m。由此计算得到东线和西线的出行时间分别优化了约23 min和28 min。

3) 乘客出行体验水平。

每辆定制公交均部署乘客屏，用于显示车辆当前车站、下一车站、换乘车站、前方

交叉口信号灯状态以及信号优先反馈等信息，可为车内乘客提供丰富的智能交互信息；同时乘客可以利用手机应用程序查询每台车辆的实时位置、停靠车站、车内人数等信息，便于提前规划行程。定制公交票价均为2元，与区域内的公共汽车票价一致。因此，东线和西线本目标层3个评价指标的指标值均为1。

4) 车路协同服务水平。

首先，根据OBU上报的信号优先请求数据和RSU上报的信号优先反馈数据确定通勤定制公交途经各交叉口时的信号优先申请数和信号优先服务数；然后，结合OBU上报的位置数据判断车辆是否在优先时间内顺利驶离交叉口，从而确定优先通过数；最后，将线路途经各交叉口的优先申请、优先服务和优先通过数据进行综合累加，经处理后得到线路信号优先的整体情况(见表5)。

4.2 综合评价

对两条线路各评价指标的指标值进行归一化处理，得到各评价指标的标准化得分(见图7)。基于标准化得分和权重，计算得到各评价指标的权重得分和综合得分(见表6)。由此得到以下结论和改进建议：

表3 目标层判断对比矩阵

Tab.3 Judgment matrix for the target layer

目标层判断对比矩阵	A1	A2	A3	A4
交通需求承载水平(A1)	1	2	5	5
通勤效率提升水平(A2)	1/2	1	5/2	5/2
乘客出行体验水平(A3)	1/5	2/5	1	1
车路协同服务水平(A3)	1/5	2/5	1	1

表4 评价指标权重值分布

Tab.4 Weight of each evaluation indicator

指标名称	符号	指标权重值	指标名称	符号	指标权重值
车站服务度	β	0.221 6	步行距离优化率	p	0.071 8
载客率	α	0.221 6	智能交互服务	m	0.015 0
分担率	s	0.027 7	出行成本	c	0.060 1
交通转化率	r	0.055 4	信息查询服务	b	0.030 1
行程时间优化率	f	0.047 8	信号优先申请率	p_r	0.039 5
行程时间可靠度	e	0.071 8	信号优先服务率	p_s	0.039 5
准点率	ω	0.071 8	信号优先通过率	p_c	0.026 3

表5 梅溪湖—高新区通勤定制公交信号优先整体情况

Tab.5 The transit signal priority performance of Meixi Lake to High-Tech Industrial Zone customized commuting bus line

线路	途经交叉口数/ 个	优先请求总数/ 次	优先服务总数/ 次	优先通过总数/ 次	应请求数/ 次	申请率/ %	服务率/ %	通过率/ %
东线	17	1 106	1 001	920	1 112	99.46	90.51	91.91
西线	21	1 408	1 310	1 213	1 438	97.91	93.04	92.60

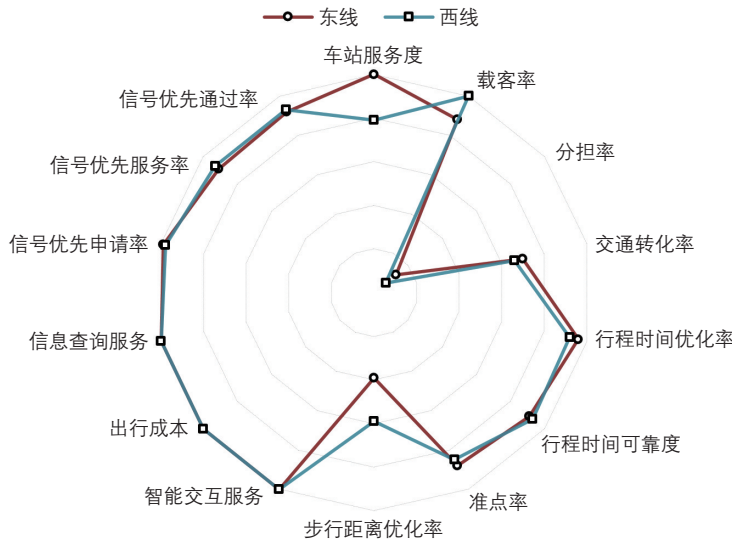


图7 梅溪湖—高新区通勤定制公交指标得分

Fig.7 Indicators score of Meixi Lake to High-Tech Industrial Zone customized commuting bus line

表6 梅溪湖—高新区通勤定制公交综合评价结果

Tab.6 Comprehensive evaluation of Meixi Lake to High-Tech Industrial Zone customized commuting bus line

指标名称	指标权重	东线			西线		
		指标值	标准化得分	权重得分	指标值	标准化得分	权重得分
车站服务度	0.221 6	1.00	100	22.16	0.79	79	17.51
载客率	0.221 6	0.88	88	19.50	1.00	100	22.16
分担率	0.027 7	0.13	13	0.36	0.07	7	0.19
交通转化率	0.055 4	0.35	70	3.88	0.33	66	3.66
行程时间优化率	0.047 8	0.48	96	4.59	0.46	92	4.40
行程时间可靠度	0.071 8	0.91	91	6.53	0.93	93	6.68
准点率	0.071 8	0.88	88	6.32	0.85	85	6.10
步行距离优化率	0.071 8	0.39	39	2.80	0.59	59	4.24
智能交互服务	0.015 0	1.00	100	1.50	1.00	100	1.50
出行成本	0.060 1	1.00	100	6.01	1.00	100	6.01
信息查询服务	0.030 1	1.00	100	3.01	1.00	100	3.01
信号优先申请率	0.039 5	0.99	99	3.91	0.98	98	3.87
信号优先服务率	0.039 5	0.91	91	3.59	0.93	93	3.67
信号优先通过率	0.026 3	0.92	92	2.42	0.93	93	2.45
综合得分			86.58			85.45	

1) 东线和西线的综合得分分别为86.58和85.45，表明两条线路总体运行效果良好；

2) 东线和西线的载客率均较高，标准化得分分别为88和100，表明线路对交通需求的承载较好；但分担率标准化得分较低，分别仅为13和7，说明目前线路班次较少，后期可增加线路发车频次，提高运力。

3) 东线和西线的行程时间优化率标准化得分均较高，分别为96和92，表明通勤定制公交开通后明显提升了通勤效率，不仅体现了线路规划的合理性，还反映了车路协同技术应用对运行效率的提升效果。

4) 东线和西线在出行成本和信息查询服务方面均表现良好，可以为乘客带来很好的出行体验。

5) 东线和西线在车路协同服务方面标准化得分同样较高，信号优先功能表现良好。然而相比信号优先申请率，信号优先服务率和信号优先通过率的标准化得分有所下滑。原因在于通勤定制公交途经的部分路段在高峰时段的交通需求较大，为避免执行信号优先造成负面交通影响，抑制了部分信号优先请求，导致信号优先服务率降低；同时当交通饱和度过高时，通勤定制公交车辆在优先通行中容易受到社会车辆的严重干扰，进而降低了信号优先通过率。因此，在后续优化中应加强对道路交通态势的研判，进一步提升公交信号优先控制的精准性。

5 结束语

本文首先从OD需求分析、公交信号优先等方面描述了车路协同环境下定制公交的规划设计方法；然后针对车路协同环境下定制公交的特性，从不同评价维度制定评价指标，并利用层次分析法构建了评价方案，最后采取长沙市的实际案例验证了评价方法的合理性。

后续研究将考虑引入多源数据来确定更多合理的评价指标，如引入路侧感知技术获取的车辆通过数据计算车辆延误指标，进一

步完善评价方案,从而得到更加全面、客观的定制公交运行效果评价结果。

致谢:

Acknowledgement:

感谢湖南湘江新区管理委员会、长沙市公安局交通警察支队、湖南湘江智能科技创新中心有限公司、青岛海信网络科技股份有限公司、深圳市腾讯计算机系统有限公司、长沙市规划勘测设计研究院等单位在此次研究工作中提供的必要支持。

参考文献:

References:

- [1] 张羽佳, 焦朋朋. 定制公交需求分析: 以西安市为例[J]. 北京建筑大学学报, 2020, 36(1): 67-74.
ZHANG Y J, JIAO P P. Analysis of customized bus demand: taking Xi'an City as an example[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020, 36(1): 67-74.
- [2] 曹阳. 基于出行需求分析的定制公交调度优化方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
CAO Y. Schedule optimization methodology of customized bus based on travel demand analysis[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [3] 邱果. 基于乘客出行方式选择的定制公交线路设计优化方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
QIU G. Research on optimizing design method of customized bus route based on passenger travel mode choice[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [4] 柏海舰, 汪俊, 钟剑锋, 等. 弱客流地区客货共享定制公交路线的动态规划方法[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(8): 63-70.
BAI H J, WANG J, ZHONG J F, et al. Dynamic planning method of customized bus routes for passenger and freight sharing in weak passenger flow areas[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2021, 40(8): 63-70.
- [5] 马万经, 杨晓光. 公交信号优先控制策略研究综述[J]. 城市交通, 2010, 8(6): 70-78.
MA W J, YANG X G. A review of prioritizing signal strategies for bus services[J]. Urban

transport of China, 2010, 8(6): 70-78.

- [6] 孙煦, 陆化普. 公交优先下交叉口配时优化的双层模型与遗传算法[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(6): 859-864.
SUN X, LU H P. Bi-level optimization model of intersection timing about bus priority condition based on genetic algorithm[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(6): 859-864.
- [7] 柳祖鹏, 李克平, 倪颖. 基于绿灯需求度的单点公交信号优先控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 408-414.
LIU Z P, LI K P, NI Y. Isolated transit signal priority control strategy based on demand degree of green[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2013, 41(3): 408-414.
- [8] ABDELGHAFAR H M, AHN K, RAKHA H A. Developing an adaptive connected vehicle transit signal priority control system[C]//2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rhodes, Greece, 2020-09-20-23: Intelligent Transportation Systems.
- [9] HU J, PARK B, PARKANY A E. Transit signal priority with connected vehicle technology [J]. Transportation research record: journal of the transportation research board, 2014, 2418(1): 20-29.
- [10] 李克强, 戴一凡, 李升波, 等. 智能网联汽车(ICV)技术的发展现状及趋势[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(1): 1-14.
LI K Q, DAI Y F, LI S B, et al. State-of-the-art and technical trends of intelligent and connected vehicles[J]. Journal of automotive safety and energy, 2017, 8(1): 1-14.
- [11] CHEN S Z, HU J L, YAN S, et al. LTE-V: a TD-LTE-based V2X solution for future vehicular network[J]. IEEE Internet of things journal, 2017, 3(6): 997-1005.
- [12] 徐辉, 吴建平, 李晋. 基于车路协同的公共汽车主动优先研究[J]. 城市交通, 2023, 21(3): 82-89.
XU H, WU J P, L J. Active transit signal priority strategies based on cellular vehicle to everything[J]. Urban transport of China, 2023, 21(3): 82-89.
- [13] ZHANG C L, YANG X D, WEI J M, et al. Cooperative transit signal priority considering bus stops under adaptive signal control [J]. IEEE access, 2023, 11: 66808-66817.

- [14] 马小毅, 李彩霞, 郑炜. 对城市公交优先发展评价指标的思考[J]. 交通工程, 2017, 17(1): 18-21.
MA X Y, LI C X, ZHENG W. A thinking about evaluating indicator of urban transit development[J]. Journal of transportation engineering, 2017, 17(1): 18-21.
- [15] 龙小强, 苏跃江, 崔昂, 等. 公交优先尴尬下城市公共交通评价指标体系[J]. 交通与运输(学术版), 2018(2): 108-111.
LONG X Q, SU Y H, CUI A, et al. Studies on indicator system of public transportation for large cities in bus priority was faced with the embarrassment[J]. Traffic & transportation, 2018(2): 108-111
- [16] 陈可心. 基于层次分析法的有轨电车运行服务评估体系[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(s1): 112-115.
CHEN K X. Research on the evaluation system of tram operation and service based on AHP[J]. Urban mass transit, 2020, 23(s1): 112-115.

(上接第57页)

- [4] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[A/OL]. (2024-02-29)[2024-06-27]. https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202402/content_6934935.htm.
- [5] 深圳市人民政府. 深圳市城市规划标准与准则(2021年)[S]. 深圳: 深圳市人民政府, 2021: 2-8, 19-53, 89-107.
- [6] 深圳新闻网. 深圳地铁盈利排名第二 秘诀是运用“轨道+物业”的TOD模式[EB/OL]. (2023-12-01)[2024-06-27]. https://www.sznews.com/news/content/mb/2023-12/01/content_30623186.htm.
- [7] 邹兵. 深圳密度分区制度的演进历程解析和启示[J]. 国际城市规划, 2023, 38(2): 15-23.
ZOU B. Analysis and enlightenment of the evolution of Shenzhen density zoning system [J]. Urban planning international, 2023, 38(2): 15-23.
- [8] 深圳市地铁集团有限公司. 深圳市地铁集团有限公司2022年度报告[EB/OL]. (2023-04-28)[2024-06-27]. [https://www.chinamoney.com.cn/dqs/cm-s-notice-query/fileDownload.do?mode=open&contentId=2616132&priority=0&ut=bDJBzoakh%2B/IZyHYtIGqf6IBLWprwjjwje14/bvdmK68AUFujHKgzG7cbsTXF3S0WuPMxawCpw0i5%0ALbL0H533jpXfUVyWD/Ck%2BAts9BnAIKK1LkRWXX0BDuj7PeGThqr21FwJIhPEJOPnIIBTU%2B68INg%2B%0AeOcWru4SiCoo2m4hVvU=%0A&sign=Q/d8solfMh3GOoMI5WmGUaZA1ukiCpO5sMwap9ByMZnt4tsJZeSkX6Wq1v3lRrKsnQLcWdAPun00%0ALsYa5AtcTZpCs2CvuKf8xTKL5](https://www.chinamoney.com.cn/dqs/cm-s-notice-query/fileDownload.do?mode=open&contentId=2616132&priority=0&ut=bDJBzoakh%2B/IZyHYtIGqf6IBLWprwjjwje14/bvdmK68AUFujHKgzG7cbsTXF3S0WuPMxawCpw0i5%0ALbL0H533jpXfUVyWD/Ck%2BAts9BnAIKK1LkRWXX0BDuj7PeGThqr21FwJIhPEJOPnIIBTU%2B68INg%2B%0AeOcWru4SiCoo2m4hVvU=%0A&sign=Q/d8solfMh3GOoMI5WmGUaZA1ukiCpO5sMwap9ByMZnt4tsJZeSkX6Wq1v3lRrKsnQLcWdAPun00%0ALsYa5AtcTZpCs2CvuKf8xTKL5JKkAphGIIEbpsADAhjeg2dCZIBVMUOFd2LaiLvRLJLML9AfJTc/%0A144XV2MvFkyEbuTLsA=%0A)
- [9] 深圳市地铁集团有限公司. 深圳市地铁集团有限公司2023年度报告[EB/OL]. (2024-04-29)[2024-06-27]. <https://www.chinamoney.com.cn/dqs/cm-s-notice-query/fileDownload.do?mode=open&contentId=2863251&priority=0>.
- [10] 朱丹, 刘李红, 荣朝和, 等. 轨道交通TOD推进城市更新的机制保障与实现路径: 以东京二子玉川站再开发为例[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(6): 129-136.
ZHU D, LIU L H, RONG C H, et al. Mechanism guarantee and realization path of urban regeneration promoted by rail transit TOD: a case study of Futako-Tamagawa station in Tokyo[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(6): 129-136.
- [11] 香港铁路有限公司. 港铁公司二零二三年业绩报告[EB/OL]. (2024-03-07)[2024-06-27]. https://www.mtr.com.hk/archive/corporate/ch/investor/annualresult2023/2023AR_chi.pdf.
- [12] 梁飞. 浅析香港地铁发展模式及其启示[J]. 财会学习, 2018(10): 175-176.
- [13] 张天然, 朱春节. 伦敦公共交通可达性分析方法及应用[J]. 城市交通, 2019, 17(1): 70-76.
ZHANG T R, ZHU C J. Method and application of public transport accessibility in London[J]. Urban transport of China, 2019, 17(1): 70-76.