

文章编号: 1674-599X(2022)01-0115-08

基于集对分析的响应型接驳公交服务质量评价

付康林^{1, 2}, 高愿², 姜宁宇², 程向昕²

(1. 湖南华罡规划设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410076; 2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 针对响应型接驳公交服务质量评价研究不足的问题, 设计了一种综合评价方法。通过响应型接驳公交与其他公交模式的比较分析, 并参考其他公交模式系统评价的研究成果, 考虑响应性、方便性、可靠性、高效性、协调性5个因素, 构建了响应型接驳公交服务质量评价的指标体系, 并进行了量化分析。将集对分析引入服务质量评价中, 构建了基于集对分析的服务质量综合评价模型, 其中指标值与评价等级间的关联程度、差异度系数、权重系数分别采用四元联系数、灰色关联法、熵值修正G1法来确定。研究表明: 试验案例验证了评价方法的有效性, 优化目标导致运行方案及其服务质量发生了显著变化, 可为响应型接驳公交的运营管理提供决策依据。

关键词: 响应型接驳公交; 服务质量评价; 集对分析; 灰色关联度; 评价指标体系

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Service quality evaluation of responsive feeder transit based on set pair analysis

FU Kang-lin^{1, 2}, GAO Yuan², JIANG Ning-yu², CHENG Xiang-xin²

(1. Hunan Huagang planning and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410076, Hunan, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In order to solve the problem of service quality evaluation of Responsive Feeder Transit, a comprehensive evaluation method was designed. Through the comparative analysis of Responsive Feeder Transit and other transit modes with referring the comprehensive evaluation results of other transit modes, service quality evaluation index system was built for Responsive Feeder Transit from the five aspects, i.e., responsiveness, convenience, reliability, efficiency and coordination. Set pair analysis was introduced into service quality evaluation, and a comprehensive evaluation model of service quality based on set pair analysis was constructed. The correlation degree, difference coefficient and weight coefficient between index value and evaluation grade were determined by quaternion connection number, grey correlation method and entropy modified G1 method, respectively. The experimental case verified the effectiveness of the evaluation method, and found that the optimization objective leads to significant changes in the operational scheme and its quality of service, which can provide a reference for operation managements of Responsive Feeder Transit.

Keywords: responsive feeder transit; service quality evaluation; set pair analysis; grey correlation degree; evaluation index system

收稿日期: 2021-02-05

基金项目: 湖南省交通科技项目(201920); 国家自然科学基金(51678075)

作者简介: 付康林(1981—), 男, 湖南华罡规划设计研究院有限公司高级工程师。

地面公交按照服务模式可分为两类:固定线路公交 (fixed route transit, 简称为FRT)、需求响应公交 (demand responsive transit, 简称为DRT)。FRT有固定的发车时刻和运行线路等, 通常指常规的公交模式。而DRT根据乘客的出行时间、地点需求、安排车辆发车时刻、行驶路线和停靠站, 具有灵活性和便利性, 其中, 包含机动式辅助客运系统 (mobility allowance shuttle transit, 简称为MAST)^[1]、普通型穿梭巴士^[2]、区域型电话预约公交 (dial-a-ride, 简称为DAR)^[3]、响应型穿梭巴士^[4]、响应型接驳公交 (responsive feeder transit, 简称为RFT)^[5]等运营模式。RFT根据服务区域内乘客的申请, 将乘客接送到地铁等大容量干线公交站, 确定其运行路径、发车时间、停靠点和停靠时间, RFT可有效解决地铁等大容量干线公交出行“最后一公里”难题。近年来, 不少学者对RFT开展了研究, 潘述亮等人^[6]分析了RFT的研究现状和系统构成。Qiu等人^[7]比较分析了灵活公交、半灵活公交、固定公交的服务性能。Chandra等人^[8-9]利用连通指标评价了RFT的服务性能。Quadrifoglio等人^[10-11]分析了乘客时间窗要求对RFT服务性能的影响。Kelly等人^[12]探讨了预约需求和实时需求比例对RFT服务性能的影响。王正武等人^[13-14]构建了多换乘站协调的路径优化模型, 同时接送模式下车路径与发车时间的协调优化模型, 并设计了启发式求解算法。目前, 国内外主要针对RFT的适用性、路径优化与车辆调度、服务性能等进行研究, 缺乏服务质量综合评价的研究。因此, 本研究考虑RFT服务特点, 借鉴其他公交模式系统评价的研究成果, 构建RFT服务质量的评价指标体系, 并基于集对分析进行综合评价。

1 评价指标体系

RFT是一种介于传统常规公交与出租车之间的新兴公共交通模式, 依据乘客出行需求, 灵活调度车辆和路径优化, 实现多人合乘, 具有灵活性、便捷性、舒适性、可靠性、高效性、协调性特点。其中, 灵活性主要体现在预约途径和时间的灵活性、车辆调度和路径的机动性; 便捷性主要体现在“门到门”的服务; 舒适性主要体现在“一人一座”的乘车舒适感; 时间窗的限制保证了

出行时间的可靠性; 智能优化, 提高了座位利用率, 保证了运行的高效性; 换乘时间和地点与接驳需求无缝对接, 保证了接驳的衔接协调性。近年来, 不少学者分析了常规公交、灵活型公交、定制公交等公交模式的特点, 分别构建了综合评价指标体系见表1^[15-21]。

通过分析比较表1的准则层, 考虑到RFT具有灵活性、便捷舒适性、可靠性、高效性、协调性等公交特点, 拟沿用常规公交评价体系的方便性、高效性准则层指标。考虑RFT与灵活性公交、定制公交、网约车共有的预约响应特性, 拟沿用响应性、可靠性准则层指标。另外, 考虑RFT的接驳特性和常规公交与轨道交通服务衔接相类似, 拟增加协调性准则层指标。故本研究确定的准则层包括响应性、方便性、可靠性、高效性、协调性5个方面。其中, 对于响应性方面, RFT与灵活型公交、定制公交、网约车等均具有预约申请乘车特性, 故参考并调整网约车的订单接单耗时、约车成功率指标, 设计平均预约耗时、响应成功率指标, 衡量RFT对乘客预约的应答速度和接收能力。对于方便性方面, 采用灵活型公交的服务跨度指标, 反映RFT的总运营时间, 同时, 增加乘客步行到达停靠站点的用时, 反映乘客乘车的便利性。对于可靠性方面, 因RFT、灵活型公交、网约车等对时间精度要求较高, 故参考灵活型公交的到站准点率、平均等待时间指标, 衡量RFT的时间可靠性。对于高效性方面, 综合灵活型公交、定制公交的评价指标体系, 调整采用与其他交通工具的出行时间差、平均服务率指标, 衡量RFT的运行高效性能。因RFT的接驳需求特性, 故从与轨道交通衔接的服务评价体系中选取换乘时间、运力匹配度、与换乘车次的时间接驳情况, 反映RFT在接驳换乘时间、空间方面的协调性。通过综合分析, 构建的层次结构评价指标体系如图1所示。在图1中, 平均预约耗时 X_1 指乘客从开始预约到系统最终响应需求, 提供乘车班次和信息的预约耗时之和与乘客数的比值。平均响应成功率 X_2 是指在运营期间内预约成功, 并顺利搭乘RFT完成出行的乘客数与所有向系统发出乘车申请的乘客数百分比, 即 $X_2 = \sum_{a=1-m} R_a / \sum_{a=1-m} R^* \times 100\%$, R_a 、 R^* 、 m 分别为第 a 天预约响应型接驳公交成功的乘客数、第 a 天向响应型接驳公交发出乘车申请

的乘客总数、运营天数。服务跨度 X_3 指响应型接驳公交一天内提供服务的小时数。平行步行到站时间 X_4 是指乘客步行到站时间的平均值; 平均到站准点率 X_5 是指车辆准点或提前到站的比例; 平均等待时间 X_6 是指车辆到站时间与乘客期望时间窗的偏差造成乘客等待时长的平均值, 即 $X_6 = \sum \Delta T_i / R$, ΔT_i 、 R 分别为车辆到站时间与第 i 个乘客时间窗的差值、总乘客数。平均出行时间差 X_7 是乘坐RFT的时间与相同起讫点下私家车出行时间的差值。平均服务率 X_8 指单车搭载的乘客数与额定载客量的平均比值。平均换乘时间 X_9 是指乘客换乘所需时间的平均值。与接驳车次匹配度 X_{10} 是指RFT至换乘站时, 满足到达接驳站时间早于乘客后续换乘大运量干线车次出发时间的车辆与所有运营车辆的比值, 即 $X_{10} = H_a / H \times 100\%$,

H_a 、 H 分别为满足到站时间早于规定换乘车次发车时间、运营时间内总运营车辆数。运力匹配度 X_{11} 是指小时换乘需求量与小时换乘供应量的比例。

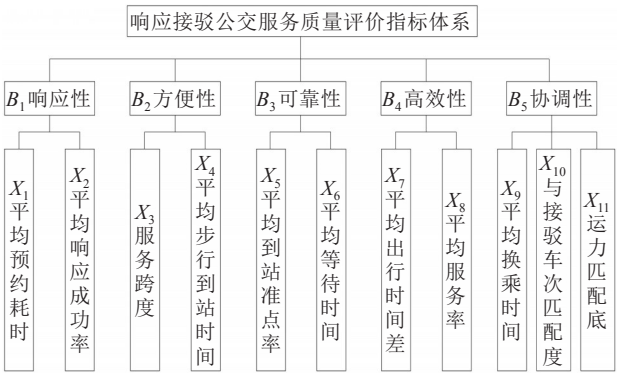


图1 评价指标体系

Fig. 1 Evaluation index system

表1 不同公交模式的典型评价指标

Table 1 Typical evaluation indicators for different bus modes

目标层	准则层	指标层
常规公交 服务质量评价	方便性	平均站距、服务时间、换乘系数、换乘便利性、车辆拥有率
	迅速性	出行时间、车辆运行速度、非直线系数、发车间隔
	准时性	到站准点率、平均候车时间
	舒适性	平峰满载率、高峰满载率、车内环境、司乘人员态度、客流断面不平衡系数
	安全性	车内安全设施、万车事故率、安全间隔行驶里程
灵活型公交 综合评价	乘客感知	响应时间、服务跨度、服务拒绝或遗漏、预约方便度、准时性、出行时间差、安全行驶间隔里程、车辆安全系数、出行费用、满载率、车内环境
	公交运营	公交企业收益比例、车辆完好率
	政府管理	环境污染指数、节约时间效益
定制公交服务 综合评价	线路设置	线路吸引力、线网密度
	设施投入	站点覆盖率、专用道投入率、车辆利用率
	服务水平	运营速度、时间偏移、出发时间满足率、车辆余座率
	运营水平	退订率、短/长周转率、百公里人次、客运周转量
	员工效率	工时有效率、劳动输出率
	社会效益	交通方式转移率、交通方式成本对比率
网约车 服务评价	可靠性	平台可靠性、司机可靠性、车辆可靠性、服务有效可靠率
	响应性	约车成功率、订单接单耗时、乘客等待上车耗时
	安全性	司机驾驶水平、车辆安全设施合格率、乘客信息安全
	舒适性	软件界面简洁方便、司机服务面貌、车辆内部环境
与轨道交通衔接 的服务评价	线网协调	线路共线系数、线路交叉系数
	站点协调	换乘时间、换乘距离、人均换乘面积
	运营协调	运能匹配度、时刻表衔接、票价协调、信息共享

2 基于改进集对分析的综合评价

2.1 集对分析的改进

集对分析 (set pair analysis, 简称为 SPA) 是

学者赵克勤^[22]提出的解决模糊不确定问题的数学理论, 它将研究对象指标集合与评价等级集合组成一个集对, 用联系数表达式来衡量指标与评价等级间的同一、差异、对立联系程度, 从而确定研究对象的评价结果。该方法解决了传统评价方法

在计算过程中忽略因等级区间不确定引起的评价结果不合理的问题,提高了评价结果的真实和客观性。因RFT服务质量的综合评价还在探索研究中,其等级区间存在不确定性,故本研究采用集对分析进行综合评价。

若 A 为评价对象的指标集合, B 为评价标准集合,两集合构成一个集对 $H=(A,B)$,通过同一、差异、对立3个方面描述可得到 A 、 B 的同异反三元联系数表达式^[22]:

$$\mu = a + bi + cj. \quad (1)$$

式中: μ 为联系数; a 、 b 、 c 分别为 A 、 B 的同一度、差异度、对立度,且 $a+b+c=1$ $a,b,c \in [0,1]$; i ($-1 \leq i \leq 1$) 为差异度系数,当 $i \in [0,1)$ 时,差异度向同一度偏移,当 $i=1$ 时,差异度为同一度,当 $i \in (-1,0)$ 时,差异度向对立度偏移,当 $i=-1$ 时,差异度为对立度; j 为对立度系数,一般取值 -1 。

a 、 b 、 c 、 j 是确定性参量,而 i 是不确定性参量,可确定最终综合评价结果, i 值是关键,文献[22]通过 i 值变化规律的分析,给出了顺势取值、计算取值、特殊值等计算方法,但该方法不一定适用RFT问题。因此,根据灰色理论适合研究不确定性问题的特点,拟采用灰色关联度求解差异度系数 i ,弥补集对分析法的局限性,从而构建基于灰色关联度改进集对分析的评价模型,相比于其他方法,能较好解决样本容量小且线性关系不明确而造成难分析的问题。将 a 、 b 、 c 分成 b 、 a 和 b 、 c 两组,利用绝对关联度来分析 b 与 a 、 c 的关联程度,取关联度较大者赋值给 i 。设参考序列为 $X_0(n)$, $n=1,2,\dots,N$, N 为指标个数,比较序列 $X_g(n)$, $g=1,2,\dots,m$, m 为比较序列个数,则绝对关联系数为:

$$\zeta_{og}(n) = \min_g \min_n |X_0(n) - X_g(n)| + \rho \max_g \max_n |X_0(n) - X_g(n)| \left(\left| X_0(n) - X_g(n) \right| + \rho \max_g \max_n |X_0(n) - X_g(n)| \right)^{-1}. \quad (2)$$

式(2)为第 g 个比较序列中指标 n 与参考序列对应指标的关联系数, $\rho(0 < \rho < 1)$ 为分辨系数,一般取 $\rho=0.5$ 。关联系数均值 $rg = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \zeta_{og}(n)$ 。

式(1)的三元联系数表达式比较适合3级评价等级的综合评价,本研究将评价指标评价标准按照I级、II级、III级、IV级4个等级划分,则应

对式中 b_i 项拓展。若评价等级数位 q ,拓展的项数 $p = q - 2$ 。则由式(1)可建立四元联系数表达式,即:

$$\mu = a + b'j + c'k + dl. \quad (3)$$

式中: b' 和 c' 分别为偏同、偏反差异度; d 为对立度,且 $a+b'+c'+d=1$, $a,b',c',d \in [0,1]$ 可理解为RFT评价方案对应评价等级的隶属度; j 、 k 分别为偏同、偏反差异度系数; l 为对立度系数。

j 、 k 由式(2)确定,即 $j = \begin{cases} rb'a & rb'a > rb'c' \\ -rb'c' & rb'c' > rb'a \end{cases}$, $k = \begin{cases} rc'b' & rc'b' > rc'd \\ -rc'd & rc'd > rc'b' \end{cases}$, 其中 r_{ba} 为偏同差异度 b' 与同一度 a 间关联程度,其他类同。

2.2 综合评价

基于改进集对分析RFT服务质量综合评价流程如图2所示。

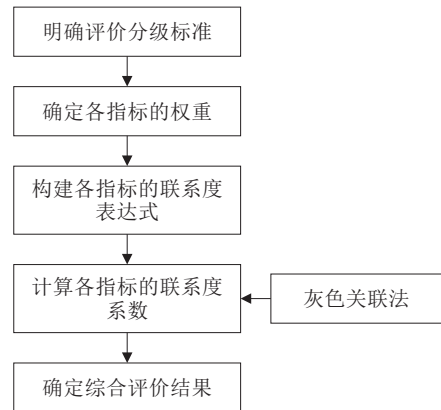


图2 综合评价流程

Fig. 2 Comprehensive evaluation process

图2中,参考《公共交通通行能力和服务质量手册》以及国内外研究成果^[15-21],根据RFT系统特征加以修改,确定服务质量评价等级和各指标评价等级阈值见表2。其中,RFT服务质量评价标准划分成I级、II级、III级、IV级4个等级,分别对应优、良、中、差4个评价结果,按均分原则确定4个等级的数值区间范围分别是 $(0.5,1]$ 、 $(0,0.5]$ 、 $(-0.5,0]$ 、 $[-1,-0.5]$ 。

各指标的权重可采用客观层次的熵值法、主观层次的G1法等确定,采用主客观方法结合,基于熵值修正的G1法确定权重(具体方法略)。评价等级分为4级,则涉及3个边界值,分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 。对于平均预约耗时、平均步行到站时间、平均等待时间、平均出行时间差、平均换乘时间

等成本型指标, 有 $S_1 \leq S_2 \leq S_3$ 。对于其他的效益型指标, 则有 $S_1 \geq S_2 \geq S_3$ 。设 x_n 对应评价等级 q ($q=1,2,3,4$) 的联系度分量为 $u_q(x_n)$, 见表3。确定 $u_q(x_n)$ 后, 则由式(3)得到综合联系度值 $U = \sum_{n=1-N} w_n \mu_q(x_n)$ 。

表2 评价等级划分标准

Table 2 Criteria of grading evaluation

评价等级	X_1/min	$X_2/\%$	X_3/h	X_4/min	$X_5/\%$	X_6/min	X_7/min	$X_8/\%$	X_9/min	$X_{10}/\%$	$X_{11}/\%$
I	<1	≥ 90	≥ 16	≤ 3	≥ 90	≤ 3	<0	≥ 90	≤ 3	≥ 90	≥ 90
II	(1,3]	[85,90)	[12,16)	(3,5]	[85,90)	(3,5]	(0,10]	[80,90)	(3,5]	[85,90)	[80,90)
III	(3,5]	[80,85)	[8,12)	(5,10]	[80,85)	(5,8]	(10,20]	[70,80)	(5,10]	[80,85)	[70,80)
IV	>5	<80	<8	>10	<80	>8	>20	<70	>10	<80	<70

表3 联系度函数分量

Table 3 Components of the relationship function

联系度分量	效益型指标	成本型指标
$u_1(x_n) = \begin{cases} 1 & x_n \geq S_1 \\ \frac{2x_n - S_1 - S_2}{S_1 - S_2} & \frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_n < S_1 \\ 0 & x_n < \frac{S_1 + S_2}{2} \end{cases}$	$x_n \geq S_1$	$x_n \leq S_1$
	$\frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_n < S_1$	$S_1 < x_n \leq \frac{S_1 + S_2}{2}$
	$x_n < \frac{S_1 + S_2}{2}$	$x_n > \frac{S_1 + S_2}{2}$
$u_2(x_n) = \begin{cases} 0 & x_n \geq S_1 \text{ 或 } x_n \leq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ \frac{2S_1 - 2x_n}{S_1 - S_2} & \frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_n < S_1 \\ \frac{2x_n - S_2 - S_3}{S_1 - S_3} & \frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_n < \frac{S_1 + S_2}{2} \end{cases}$	$x_n \geq S_1 \text{ 或 } x_n \leq \frac{S_2 + S_3}{2}$	$x_n \leq S_1 \text{ 或 } x_n \geq \frac{S_2 + S_3}{2}$
	$\frac{S_1 + S_2}{2} \leq x_n < S_1$	$S_1 < x_n \leq \frac{S_1 + S_2}{2}$
	$\frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_n < \frac{S_1 + S_2}{2}$	$\frac{S_1 + S_2}{2} < x_n \leq \frac{S_2 + S_3}{2}$
$u_3(x_n) = \begin{cases} 0 & x_n \geq \frac{S_1 + S_2}{2} \text{ 或 } x_n \leq S_3 \\ \frac{S_1 + S_2 - 2x_n}{S_1 - S_3} & \frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_n < \frac{S_1 + S_2}{2} \\ \frac{2x_n - 2S_3}{S_2 - S_3} & S_3 \leq x_n < \frac{S_2 + S_3}{2} \end{cases}$	$x_n \geq \frac{S_1 + S_2}{2} \text{ 或 } x_n \leq S_3$	$x_n \leq \frac{S_1 + S_2}{2} \text{ 或 } x_n \geq S_3$
	$\frac{S_2 + S_3}{2} \leq x_n < \frac{S_1 + S_2}{2}$	$\frac{S_1 + S_2}{2} < x_n \leq \frac{S_2 + S_3}{2}$
	$S_3 \leq x_n < \frac{S_2 + S_3}{2}$	$\frac{S_2 + S_3}{2} < x_n \leq S_3$
$u_4(x_n) = \begin{cases} 0 & x_n \geq \frac{S_2 + S_3}{2} \\ \frac{S_2 + S_3 - 2x_n}{S_2 - S_3} & S_3 \leq x_n < \frac{S_2 + S_3}{2} \\ 1 & x_n \leq S_3 \end{cases}$	$x_n \geq \frac{S_2 + S_3}{2}$	$x_n \leq \frac{S_2 + S_3}{2}$
	$S_3 \leq x_n < \frac{S_2 + S_3}{2}$	$\frac{S_2 + S_3}{2} < x_n \leq S_3$
	$x_n \leq S_3$	$x_n \geq S_3$

3 案例分析

本研究对文献[23]不同运营目标(利润最大、乘客满意度最大)下的运行方案进行评价:

1) 基本数据及参数见文献[23]。根据文献[23]相关实验数据, 结合指标计算公式, 得到不同运营目标下运行方案服务质量的评价指标值见表4。

2) 确定指标权重。用熵值法中指标信息熵替代G1法中专家人为确定的指标重要度比值, 构造

基于熵值修正G1法的综合赋权方法, 进而计算确定每个指标最终权重, 计算结果见表5。

3) 构造四元联系数表达式。利用表3计算联系度函数分量, 并结合指标权重值, 最终得到运行方案的四元联系数表达式见表6~7。

4) 确定评价结果。根据灰色关联度法, 得到偏同差异度系数 j 和偏反差异度系数 k 值, 分别为0.689、0.522, 再经计算, 确定最终联系数值, 见表8。

表4 不同运行方案的指标值

Table 4 Indicator values for different operation schemes

运行方案	X_1/min	$X_2/\%$	X_3/h	X_4/min	$X_5/\%$	X_6/min	X_7/min	$X_8/\%$	X_9/min	$X_{10}/\%$	$X_{11}/\%$
利润最大	2.6	88	11	5	76	4.8	10.5	92	4.6	83	92
乘客满意度最大	2.1	97	15	3	86	2.4	3.7	81	3.0	87	82

表5 评价指标权重值

Table 5 Weight values of evaluation indexes

准则层	准则层权重	指标层	指标熵值	指标重要度之比	指标权重
B_1 响应性	0.19	X_1	0.901	1.089	0.47
		X_2	0.982	—	0.53
B_2 方便性	0.25	X_3	0.743	1.312	0.43
		X_4	0.975	—	0.57
B_3 可靠性	0.33	X_5	0.995	—	0.55
		X_6	0.823	1.209	0.45
B_4 高效性	0.11	X_7	0.998	—	0.58
		X_8	0.815	1.225	0.42
B_5 协调性	0.12	X_9	0.728	1.368	0.29
		X_{10}	0.996	—	0.38
		X_{11}	0.871	1.143	0.33

表6 利润最大运行方案的四元联系数表达式

Table 6 The quaternion correlation expressions of the operation scheme with maximum profit

运行方案	准则层	联系数表达式	指标层	联系数表达式
利润最大运行方案 $0.106+0.432j+0.280k+0.182l$	B_1	$0.11+0.75j+0.14k+0l$	X_1	$0+0.70j+0.30k+0l$
			X_2	$0.20+0.80j+0k+0l$
	B_2	$0+0.51j+0.49k+0l$	X_3	$0+0.25j+0.75k+0l$
			X_4	$0+0.71j+0.29k+0l$
	B_3	$0+0.31j+0.14k+0.55l$	X_5	$0+0j+0k+1l$
			X_6	$0+0.68j+0.32k+0l$
	B_4	$0.42+0.26j+0.32k+0l$	X_7	$0+0.45j+0.55k+0l$
			X_8	$1+0j+0k+0l$
	B_5	$0.33+0.26j+0.41k+0l$	X_9	$0+0.77j+0.23k+0l$
			X_{10}	$0+0.10j+0.90k+0l$
			X_{11}	$1+0j+0k+0l$

利润最大运行方案、满意度最大运行方案的综合联系数值分别为0.368、0.813，对应服务质量为良、优。对比这两个运行方案综合评价可知：

1) 利润最大运行方案与满意度最大运行方案

相比，除高效性外，其余层面数值均低于满意度最大运行方案。其中，可靠性能联系数最低，质量最差，其余层面服务质量相对较高，但总体数值仍偏低，服务质量为良好。表明：企业在追求利润时，忽略了车辆到站准时性、乘客方便性等问题。

2) 乘客满意度最大运行方案综合评价结果最好，除高效性外，其余4个层面联系数相近，结果较高，表明：服务质量较高，但高效性相对偏低，有必要考虑通过运行不同容量的车辆，以提高平均服务率，提升公交的高效性能。

表7 满意度最大运行方案的四元联系数表达式

Table 7 The quaternion correlation expressions of the operation scheme with maximum satisfaction

运行方案	准则层	联系数表达式	指标层	联系数表达式
满意度最大运行方案 $0.476+0.383j+0.141k+0l$	B_1	$0.53+0.45j+0.02k+0l$	X_1	$0+0.95j+0.05k+0l$
			X_2	$1+0j+0k+0l$
	B_2	$0.57+0.22j+0.21k+0l$	X_3	$0+0.50j+0.50k+0l$
			X_4	$1+0j+0k+0l$
	B_3	$0.55+0.31j+0.14k+0l$	X_5	$1+0j+0k+0l$
			X_6	$0+0.68j+0.32k+0l$
	B_4	$0.15+0.68j+0.17k+0l$	X_7	$0.26+0.74j+0k+0l$
			X_8	$0+0.60j+0.40k+0l$
	B_5	$0.29+0.57j+0.14k+0l$	X_9	$1+0j+0k+0l$
			X_{10}	$0+0.90j+0.10k+0l$
			X_{11}	$0+0.70j+0.30k+0l$

表8 不同运行方案的联系数值

Table 8 The connection values of different operation schemes

层面	利润最大运行方案	满意度最大运行方案
B_1 响应性	0.701	0.849
B_2 方便性	0.607	0.831
B_3 可靠性	0.263	0.837
B_4 高效性	0.766	0.707
B_5 协调性	0.723	0.756
目标层面	0.368	0.813

4 结论

根据RFT的运行特性,比较常规公交、定制公交、灵活性公交、响应公交服务质量综合评价,从响应性、方便性、可靠性、高效性、协调性5个方面出发,构建了RFT服务质量评价指标体系,改进集对分析。基于四元联系度,构建了考虑不确定性服务质量综合评价方法,实验案例验证了评价方法的有效性。后续结合RFT实际案例,进一步完善评价指标体系、精细划分等级区间。

参考文献(References):

- [1] Quadrioglio L, Dessouky M M, Ordóñez F. Mobility allowance shuttle transit (MAST) services: MIP formulation and strengthening with logic constraints[C]// Integration of AI and OR. Techniques in Constraint Programming for Combinatorial Optimization Problems, 2008,185(2):481-494.
- [2] Jung J, Jayakrishnan R, Nam D. High coverage point-to-point transit: Hybrid evolutionary approach to local vehicle routing[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2015,19(6):1882-1891.
- [3] Cordeau J F, Laporte G. The dial-a-ride problem: Models and algorithms[J]. Annals of Operations Research, 2007, 153(1):29-46.
- [4] 李龙骄. 城市新区响应需求公交规划方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013. (LI Long-jiao. Research of demand response transport planning method in new urban district[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [5] Li X G, Quadrioglio L. Feeder transit services: Choosing between fixed and demand responsive policy[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010,18(5):770-780.
- [6] 潘述亮,俞洁,卢小林,等. 灵活型公交服务系统及其研究进展综述[J]. 城市交通,2014,12(2):62-68,58. (PAN Shu-liang, YU Jie, LU Xiao-lin, et al. A review of flexible transit service[J]. Urban Transport of China, 2014,12(2): 62-68,58.(in Chinese))
- [7] Qiu F, Shen J X, Zhang X C, et al. Demi-flexible operating policies to promote the performance of public transit in low-demand areas[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2015,80:215-230.
- [8] Chandra S, Quadrioglio L. A new street connectivity indicator to predict performance for feeder transit services [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013,30:67-80.
- [9] Chandra S, Quadrioglio L. A model for estimating the optimal cycle length of demand responsive feeder transit services[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2013,51:1-16.
- [10] Quadrioglio L, Li X G. A methodology to derive the critical demand density for designing and operating feeder transit services[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2009,43(10):922-935.
- [11] Quadrioglio L, Dessouky M M, Ordóñez F. A simulation study of demand responsive transit system design[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2008,42(4):718-737.
- [12] Kelly R, Ronald N, Wallace M, et al. Exploring the effects of mixed request schemes for demand-responsive feeder services[C]//MODSIM2015, 21st international congress on modelling and simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2015: 1731-1737.
- [13] 王正武,宋名群. 多换乘点响应型接驳公交运行线路的协调优化[J]. 中国公路学报, 2019, 32(9): 164-174. (WANG Zheng-wu, SONG Ming-qun. Coordinated optimization of operation routes for responsive feeder transit systems with multiple transfer points[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019,32(9):164-174. (in Chinese))
- [14] 王正武,陈涛,宋名群. 同时接送模式下响应型接驳公交运行路径与调度的协调优化[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(5): 139-149. (WANG Zheng-wu, CHEN Tao, SONG Ming-qun. Coordinated optimization of operation routes and schedules for responsive feeder transit under simultaneous pick-up and delivery mode[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019,19(5):139-149.(in Chinese))
- [15] 杨颖,赵己周. 基于开放数据的常规公交系统综合评价研究[J]. 交通科学与工程,2020,36(3):94-100. (YANG Ying, ZHAO Ji-zhou. Research on the comprehensive evaluation of public transit system based on open data[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (3):94-100.(in Chinese))

- [16] 句庆玲,龙科军.面向地铁接驳需求的公交服务能力评估[J].公路与汽运,2020(4):17-20,26. (GOU Qing-ling, LONG Ke-jun. Evaluation of public transport service capability for metro connection demand [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(4):17-20,26.(in Chinese))
- [17] 聂红梅,杨联安,杨煜岑,等.基于熵权TOPSIS的城市公交线路发展水平综合评价[J].西北大学学报(自然科学版),2017,47(5):776-782. (NIE Hong-mei, YANG Lian-an, YANG Yu-cen, et al. Comprehensive evaluation of the development level of urban bus lines based on entropy Weight-Topsis[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2017, 47(5): 776-782.(in Chinese))
- [18] 卢小林,张娴,俞洁,等.灵活型定制公交系统综合评价方法研究[J].公路交通科技,2015,32(5):135-140. (LU Xiao-lin, ZHANG Xian, YU Jie, et al. Research of a comprehensive evaluation method for customized flexible transit system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(5): 135-140.(in Chinese))
- [19] 许茂兴.深圳定制公交运营模式优化研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017. (XU Mao-xing. Optimal research on operation mode of customized shuttle bus in Shenzheng[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese))
- [20] 崔庆安,肖甜丽.基于DANP和IPA的网约车服务质量评价研究[J].工业工程与管理,2017,22(6):48-56. (CUI Qing'an, XIAO Tian-li. Evaluating car-hailing service quality based on the DANP and IPA method[J]. Industrial Engineering and Management, 2017, 22(6): 48-56. (in Chinese))
- [21] 郝成,殷勇.基于D-S证据理论的城市轨道交通与常规公交协调综合评价[J].综合运输,2019,41(5):57-62. (HAO Cheng, YIN Yong. Comprehensive coordination evaluation of urban rail transit and conventional transit based on D-S evidence theory[J]. China Transportation Review, 2019,41(5):57-62.(in Chinese))
- [22] 赵克勤.集对分析及其初步应用[M].杭州:浙江科学技术出版社,2000. (ZHAO Ke-qin. Set pair analysis and its prediminary application [M]. Hangzhou: Zhejiang Science & Technology Press, 2000.(in Chinese))
- [23] 王正武,谭笑,高愿,等.多分区响应型接驳公交路径与发车时间的协调优化[J].铁道科学与工程学报,2021,18(5):1316-1324. (WANG Zheng-wu, TAN Xiao, GAO Yuan, et al. Coordinated optimization of route and departure time for multi-partition responsive feeder transit [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021,18(5):1316-1324.(in Chinese))

(上接第114页)

- waves and current[J]. Coastal Engineering, 2014,83:72-81.
- [9] Sumer B M, Fredsøe J. Scour around pile in combined waves and current[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001,127(5):403-411.
- [10] 李寿千,陆永军,左利钦,等.波浪及波流边界层泥沙起动规律[J].水科学进展,2014,25(1):106-114. (LI Shou-qian, LU Yong-jun, ZUO Li-qin, et al. Incipient motion of sediment in wave and combined wave-current boundary layers[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 106-114.(in Chinese))
- [11] 程永舟,杨桥梁,黄筱云,等.斜坡海床上管道位置对其周围冲刷影响试验[J].长沙理工大学(自然科学版),2015,12(1):55-62. (CHENG Yong-zhou, YANG Qiao-liang, HUANG Xiao-yun, et al. Experimental study on scour around submarine pipelines placed at different positions of a sloped seabed[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology(Natural Science), 2015, 12(1): 55-62. (In Chinese))