

基于客流特征的城市轨道交通运能匹配优化： 以昆明地铁 4 号线为例^{*}

钱雅雪¹, 张海珠^{2**}, 肖 茜¹

(1. 昆明铁道职业技术学院 铁路运输学院, 云南 昆明 650208;
2. 云南京建轨道交通投资建设有限公司, 云南 昆明 650000)

[摘 要] 昆明地铁 4 号线是昆明市首条采用 PPP 模式运营的城市轨道交通线路, 提升昆明地铁 4 号线运输能力与客流需求的匹配度, 对提高线路的经济效益和服务质量具有重要意义。以昆明地铁 4 号线 2024 年的客流数据为基础, 分析其运能现状, 基于分析结果提出运输能力优化方案。优化方案包括调整列车运行间隔、列车运行交路多样化等, 并从经济性角度对优化方案进行分析。优化方案在满足客流需求的同时降低企业运营成本, 为具有相似客流特征的轨道交通项目提供了可资借鉴。

[关键词] 城市轨道交通; 客流特征; 运输能力优化; 经济性分析

[中图分类号] U231⁺.92 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1674-5639 (2025) 03-0126-07

DOI: 10.14091/j.cnki.kmxyxb.2025.03.018

截至 2024 年底, 中国大陆地区有 58 个城市开通轨道交通, 运营里程达到 12 160.77 km, 全年累计完成客运量 322.57 亿人次^[1]。随着城市轨道交通进入网络化运营, 客流增长趋于稳定, 部分线路出现运能紧张或运能过剩, 传统的单一交路列车开行模式不能满足复杂多变的客流需求^[2]。结合客流的时空分布特性, 在满足乘客出行的前提下, 调整线路运输能力, 能有效缓解运能浪费, 从而减少运营成本。

地铁运输能力与客流特征的匹配度是确保地铁系统高效运行, 解决城市轨道交通运能浪费难题的关键。围绕上述主题, 国内外学者从调整列车运行间隔、大小交路运行模式以及列车灵活编组等方面开展研究。王磊等^[2]提出基于供需匹配的大小交路开行方案优化建模方法。王树文^[3]结合客流时空分布特性, 建立模型对列车全日行车计划进行优化。许得杰等^[4]以最小化乘客等待时间、车辆走行公里和列车运行时间最小为函数目标, 构建大小交路列车开行方案多目标优化模型。傅佳乐等^[5]用 NSGA-II 算法对城市轨道交通在线灵活编组大小交路的列车开行方案进行优化。

昆明地铁 4 号线自 2020 年开通运营以来, 受公共卫生安全事件影响、城市规划调整, 以及城市常住人口增速放缓等多重因素制约, 实际客流规模与预期目标存在显著差距, 地铁运输能力与客流特征的匹配存在较大偏差, 导致运输资源利用率偏低。优化运输能力和客流需求之间的匹配度是昆明地铁 4 号线当前亟须解决的问题。本文以昆明地铁 4 号线 2024 年的客流数据为基础, 分析昆明地铁 4 号线运能现状, 基于分析结果提出运输能力匹配优化方案, 以此促进轨道交通企业降本增效, 有效缓解运营压力。

1 昆明地铁 4 号线客流特征与运输能力匹配情况

1.1 客流总体情况

根据相关统计^[1]数据, 2024 年昆明地铁 4 号线 (以下简称 4 号线) 客流较 2023 年呈小幅增长。2024 年客运量达到 6 056.77 万人次, 相比 2023 年 5 762.29 万人次环比增长 5.11%, 具体客运量详见图 1。

^{*} [收稿日期] 2025-05-13

[作者简介] 钱雅雪, 女, 云南昭通人, 昆明铁道职业技术学院讲师, 研究方向为城市轨道交通运营。

^{**} [通信作者] 张海珠, 男, 云南昆明人, 云南京建轨道交通投资建设有限公司工程师, 研究方向为城市轨道交通运营, E-mail: zhanghaizhu@yjrt.com.cn。

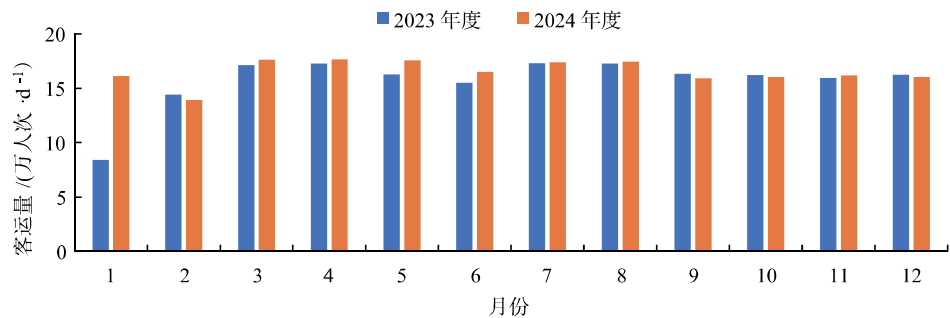


图1 2023—2024年昆明地铁4号线分月客流对比

1.2 客流与运能匹配情况

2024年4号线年度总运能为14 214.36万人次，年度满载率为42.61%，实际客运强度为0.38万人次/km·d，4月客流达到全年峰值，该月客运量为529.98万人次，月运能为1 207.46万人次，月满载率为43.89%，最大断面客流为0.71万人次，最大断面满载率为52.17%，具体情况见表1。

表1 2024年度总体运能参数与实际客流对比

项目	设计运能/万人次	2024 客流情况/万人次	满载率/%	运能富余/%
年度	1 4214.36	6 056.77	42.61	57.39
客流最大月	1 207.46	529.98	43.89	56.11
最大断面	1.35	0.71	52.17	47.83

1.2.1 最大断面满载率分析

通过对4号线工作日与双休日及节假日的客流特征分析发现，工作日最大断面满载率明显高于双休日及节假日。断面满载率特征如图2所示。

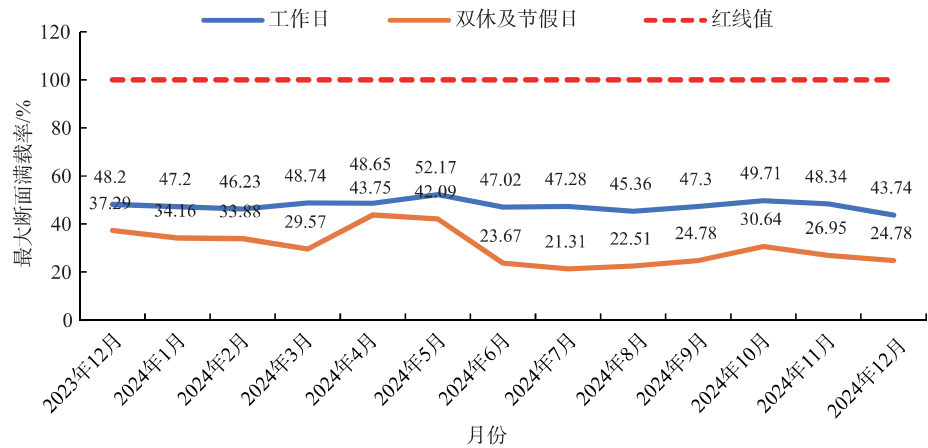


图2 2023年12月—2024年12月最大断面满载率

1.2.2 分时运力分布特征分析

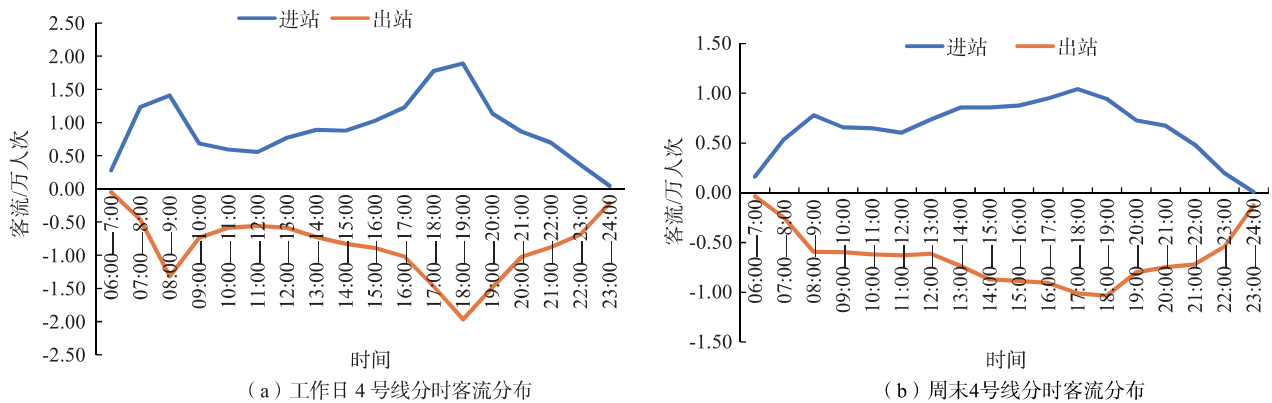
1) 客流分时特征

通过分析昆明地铁4号线客流数据，发现其客流特征呈现高度相似性。为探究这一规律，分别选取2024年4月27日（周六）和4月30日（周二）的客流数据进行详细分析，客流特征具体表现（图3）如下：

工作日：分时客流呈现“双峰型”，早晚高峰明显，高峰客流以通勤客流为主。进站早高峰发生于8：00—9：00时段，进站晚高峰发生于17：00—18：00时段，出站晚高峰发生于18：00—19：00时段。全天最大小时客流出现在晚高峰时段。

双休日：客流整体趋于平缓，全天客流分布较为均衡，无明显高峰特征，平峰时段的客流量较工作

日相应时段更高。最大进站小时客流发生于 17:00—18:00，最大出站小时客流发生于 18:00—19:00。



注：进站人次以正数，出站人次以负数表示。

图 3 2024 年昆明地铁四号线进出站客流分布

2) 运力设置分布与客流分布匹配情况

昆明地铁 4 号线客流特征稳定，变化趋势与运行图的运力分布吻合。实际客流峰值未超出运行图所设定的峰值范围，工作日与双休日的客流及运力分布情况如图 4 所示。

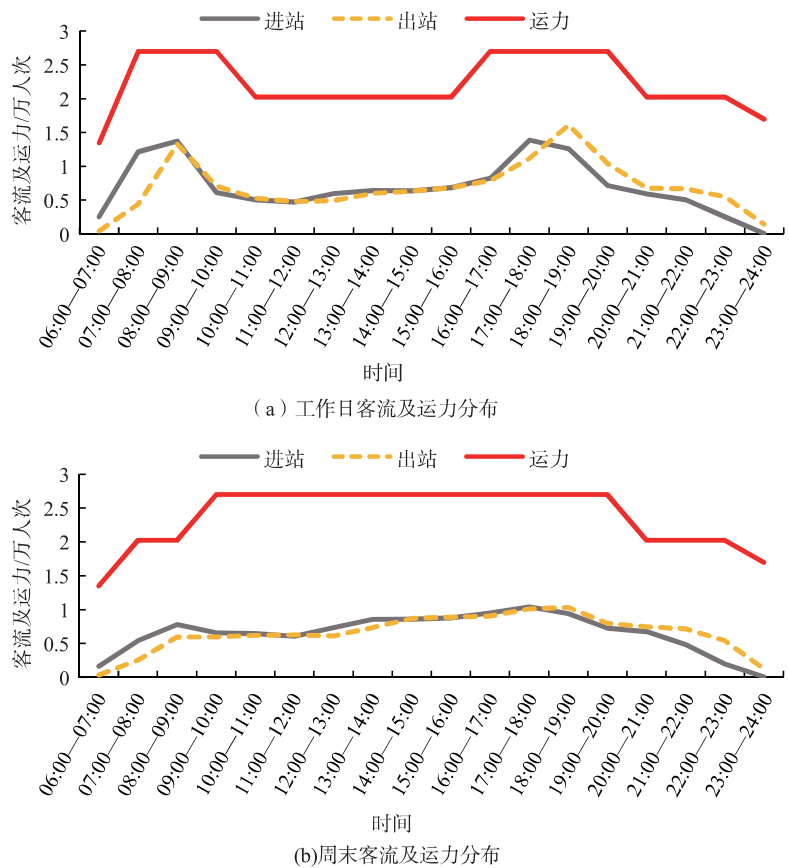


图 4 2024 年执行运行图的运力分布与客流分布对比

1.2.3 列车运行计划关键参数匹配评估

1) 运行交路

根据 4 号线的客流特征、线路条件、站点设置、车辆配置、信号条件、配线设置以及服务水平等多方面因素，4 号线自运营开通以来采用金川路站至昆明南火车站的单一交路运行模式，运行交路见图 5。

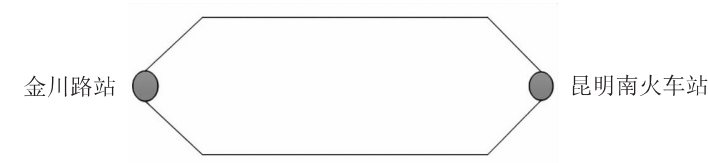
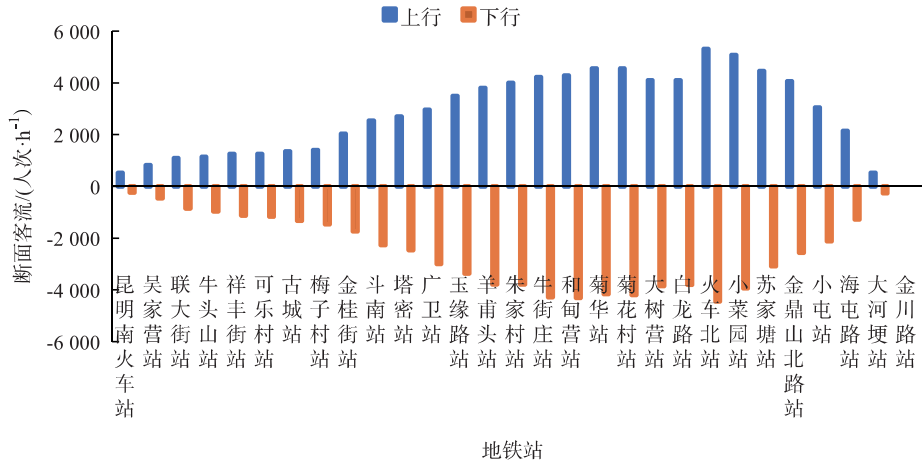


图5 昆明地铁4号线运行交路

2) 断面客流

对2024年4月某一工作日高峰小时客流进行分析，4号线高峰小时出现在晚高峰，且断面客流分布呈“纺锤形”特征。其中，小菜园站至火车北站区间断面客流峰值为0.53万人次/h。从客流空间分布来看，线路北段客流回落点位于海屯路站；南段客流回落点为梅子村站。需特别指出，梅子村站距离终点站昆明南火车站较近，而昆明南火车站作为昆明市重要的铁路客运枢纽，其客运服务需求具有显著的刚性特征。最大高峰小时断面客流特征如图6所示。



注：上行以正数，下行以负数表示。

图6 2024年4号线最大高峰小时断面客流分布

3) 行车间隔

4号线高峰期行车间隔为6 min，平峰期为8 min。该运行间隔设置符合国家及行业相关规定。同时，其最小运行间隔满足信号供应商提供的2 min的技术参数要求，具体见表2。

表2 4号线行车间隔设置

	运营时段	行车间隔/min
工作日	早高峰	7: 30—9: 30
	晚高峰	16: 30—19: 30
	其余时段	8
双休及节假日	高峰时段	9: 30—20: 00
	其余时段	8

1.2.4 分析结果

通过分析昆明地铁4号线2024年运力和客流数据，得出结果如下：

1) 列车运行计划能够满足日常运营需求。

2) 全线运输能力富余，运输供给远超客流需求，列车运行计划的经济性有待提升。从4号线工作日运行图、周末及节假日运行图来看，运能富余超过50%，运输能力供给显著高于客流需求，企业成本管控的经济性不足。

2 运输能力优化方案的比选

城市轨道交通常用的运输能力调整方法有：调整行车间隔、列车灵活编组、列车运行交路多样化、

调整运营时间等。不同方法的优势和劣势如下文所述。

2.1 调整行车间隔

调整行车间隔是城市轨道交通中常用的优化运输组织的方法之一。通过调整运行间隔，改变单位时间内通过的列车数量，从而达到调整运输能力的目的。北京、广州、深圳、上海等客流较大的城市，通常通过减少行车间隔来满足高峰时段的运输需求。对于运能过剩的线路，则通过增大行车间隔来合理调配运能，优化运营成本。

调整列车行车间隔需要综合研判人员、车辆设备、信号系统、供电系统等制约因素是否满足调整条件。同时，减少行车间隔也将增加运营组织难度，如在线路阻塞等应急场景下，列车调整压力增大，易导致列车堆积和客流积压；增大行车间隔则会增加乘客等待时间，降低乘客服务质量，可能会引发社会舆论关注并降低社会效益。

2.2 灵活编组列车

灵活编组列车是通过调整列车编组数量，实现调节单列车载客量的目的。在低运量系统制式（如胶轮导轨系统）中，灵活编组列车的应用更为成熟。对于地铁系统，当客流呈现明显的“驼峰型”特征或在开通初期客流增长缓慢时，可采用灵活编组列车的方法。例如，上海地铁 16 号线采用“3+3”模式；北京地铁 3 号线采用混编 4/8 混跑的运营模式。灵活编组列车的混跑模式需要机电系统、信号系统、车辆系统等关键系统的支持。对于既有线路而言，设备更新改造将涉及较大的成本投入。

2.3 列车运行交路多样化

列车交路往往在地铁设计初期就已经规划完成。目前国内的交路形式主要有单一大交路、环形交路、大小交路（嵌套交路）、衔接交路、组合交路等^[6]。不同交路形式特点对比见表 3。

表 3 不同交路模式对比分析^[6]

交路形式	优点	缺点	适用性
单一交路	运营组织简单；乘客无需换乘	客流空间分布不均衡时会出现运力运量匹配较差的情况	运营初期；全路沿线的客流较为均衡
环形线路	列车无需进行折返作业；运行互不干扰	列车出现故障会对内环运行与外环严重影响整条线路	环形线路
大小交路	客流密集区段发车频率较高；小交路列车周转时间和车底运用数量减少	大交路乘客候车时间增加；折返站设计和运营组织较为复杂	有明显大客流突变点且存在较长的大客流区段
衔接交路	两交路独立运营，互不影响；可缓解中途站断面客流明显落差	易成为线路的运输瓶颈；影响跨区段乘客出行效率	存在多个较长的大客流区段，但大客流区段内部客流差异性较小
组合交路	对客流的适用性较强	交路运营形式复杂；对中间站折返条件和运营组织要求高	客流分布差异性较大

2.4 调整运营时间

对早晚高峰、平峰时段以及运营服务时间进行调整，可实现运能与客流的精准匹配。例如，广州、西安通过优化周五、暑运以及节假日的运营服务时间，来满足不同乘客群体的出行需求。从乘客群体上分析，通勤群体更关注于运营时间的稳定，短期游客及交通枢纽站点的乘客则更希望延长线路运营时间。因此，调整运营时间时，应充分考虑不同客流群体的出行需求特征，以提升运营服务的针对性和有效性。

3 昆明地铁 4 号线的运输能力优化方案选择

空间上，昆明地铁 4 号线的客流分布特征呈现典型的“纺锤形”。时间维度上，工作日客流具有明显的潮汐特征，即早晚高峰时段客流发生时间相对集中，而周末则无明显的客流峰值。节假日（如“五一”劳动节和“十一”国庆节）期间，乘客数量增长主要集中在节前一天，节假日期间客流增长幅度相较节

前放缓。

从线路配置角度分析，4号线未设置避让线，且系统配置不支持快慢车混跑上线。因此，4号线可以采用增加行车间隔、列车灵活编组以及工作日早晚高峰时段实施大小交路嵌套运行的方式优化运输能力。

3.1 调整行车间隔

行车间隔是影响运输能力的关键因素，在相同编组情况下，行车间隔越小，运输能力越大。在满足行业标准行车间隔不低于10 min的要求下，可对工作日、周末及节假日的高平峰时段行车间隔作出调整。调整遵循客流与运能匹配、乘客体验兼顾的原则，调整方式见表4。

3.2 列车灵活编组

随着居民出行需求持续增长、出行波动性不断攀升，客流时空分布不均衡性愈加显著，采用单一交路、单一编组的轨道交通线路在全线路上提供的运能一致，导致首末区段、平峰时期的运能投放与客流需求不匹配，造成运能浪费，核心区段、高峰时期的运能不足的问题^[7]。目前，4号线线上列车执行单一交路、固定编组的运行模式，在工作日平峰时段及周末全天，运能浪费70%以上。可通过灵活编组模式优化运能，采用4/6混编的运行模式，能有效避免运能浪费。

3.3 大小交路嵌套

根据线路断面客流特征和线路配置，昆明地铁4号线早晚高峰时段可采用大小交路嵌套运行模式。即小交路执行金川路站至玉缘路站，大交路执行金川路站至昆明南火车站。共线段小交路行车间隔调整至5 min，非共线段由调整前的6~8 min增加至10 min。

4 运输能力优化方案的经济效益评估

4.1 调整行车间隔经济效益分析

经济性评估主要通过车公里、司机工时等角度开展对比。通过调整4号线工作日、周末及一般节假日的行车间隔，年度可节省846.5万车·km。根据2024年昆明城市轨道交通平均每车公里牵引能耗进行计算^[1]，可减少能耗成本约669.16万元；年度可节省司机工时32 461.25 h。因此调整行车间隔的方案具有较强的经济性。调整前后经济性对比详见表5。

表5 调整前后经济性对比

项目		工作日	周末及一般节假日	重点节假日
天数		250	103	12
日车公里	调整前	73 644.72	80 011.56	80 011.56
	调整后	53 248.31	50 543.208	52 453.78
日司机工时/h	调整前	350	381.25	381.25
	调整后	277.5	242.5	377.5
节省/(车·km·a ⁻¹)		5 099 102.5	3 035 240.256	330 693.4
节省工时/(h·a ⁻¹)		18 125	14 291.25	45

4.2 大小交路嵌套

通过调整工作日早晚高峰交路运行模式，高峰时段采用大小交路嵌套运行，大小交路共线部分断面小时运输能力达到16 200人次/h，高于调整前的设计运输能力；大小交路非共线部分的断面小时运输能力为8 100人次/h，能够满足历史最大断面客流7 100人次/h的需求。调整后，工作日全日载客开行对数从调整前的140对减少至127对（大交路97对，小交路30对），全日车公里数从调整前的73 644.72车·km减少至61 237.45车·km，全年累计减少310.18万车·km，可节省能耗成本约245.2万元。

4.3 其他效益

实施上述调整措施后,可以通过减少车辆车公里数降低车辆磨损,从而降低维修保养频次,能有效减少运营维护成本。在工作日实施大小交路嵌套运行,交路共线部分的运输能力将得到显著提升,可改善通勤乘客的出行体验和舒适度,不仅有助于提升企业品牌形象,还能增加企业的票款收入和广告收益。

5 结束语

昆明地铁 4 号线运输能力与客流特征匹配存在偏差较大的问题,可采用调整行车间隔、列车灵活编组以及工作日早晚高峰时段实施大小交路嵌套运行的方式优化运输能力。

随着昆明地铁 4 号线持续推进客流吸引措施,客流量呈现增长的态势,在后续运营计划制定过程中,应建立运输能力与客流匹配的动态监测机制,实时跟踪客流动态,灵活调整运输能力,实现运能资源的高效利用,达成绿色低碳、经济适用的发展目标。

[参考文献]

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2024 年度统计和分析报告 [R/OL]. (2025-03-28) [2025-05-01]. <https://www.camef.org.cn/xytj/tjxx/660844283682885.shtml>.
- [2] 王磊,李思杰,刘志钢,等. 基于供需匹配的城市轨道交通大小交路开行方案优化 [J]. 铁道运输与经济, 2023, 45 (6): 125-131.
- [3] 王树文. 基于客流时空分布的城市轨道交通线路行车计划优化方案 [J]. 都市快轨交通, 2019, 32 (5): 69-75, 90.
- [4] 许得杰,毛保华,雷莲桂. 城市轨道交通大小交路列车开行方案优化研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (1): 120-126.
- [5] 傅佳乐,文静,徐纪康,等. 基于 NSGA-II 的灵活编组大小交路开行方案优化研究 [J]. 都市快轨交通, 2025, 38 (1): 44-52.
- [6] 武瑶璇. 面向运力运量匹配的城轨复杂多交路列车运行组织优化 [D]. 北京:北京交通大学硕士学位论文, 2023.
- [7] 郭孝洁. 面向运力精准投放的城轨列车多编组开行方案研究 [D]. 南京理工大学硕士学位论文, 2023.

Matching Optimization of Urban Rail Transit Transportation Capacity Based on Passenger Flow Characteristics: A Case Study of Kunming Rail Transit Line 4

QIAN Yaxue¹, ZHANG Haizhu², XIAO Qian¹

(1. School of Railway Transportation, Kunming Railway Vocational And Technical College, Kunming, Yunnan, China 650208;

2. Yunnan Jingjian Rail Transit Investment And Construction Co., Ltd, Kunming Yunnan, China 650000)

Abstract: Kunming Rail Transit Line 4 is the first urban rail transit line in Kunming operated under the PPP model. It is of great significance to enhance the alignment between the transportation capacity of this line and the passenger flow demand, which also holds substantial significance for augmenting economic benefits and elevating service quality. An in-depth analysis of the current transportation capacity status of the line is grounded in the passenger flow data of Kunming Rail Transit Line 4. The optimization scheme includes adjusting the train operation interval and diversifying the train operation routes. From an economic vantage point, a comprehensive analysis of the proposed plan is conducted, evaluating its implications for both operational costs and passengers' travel experiences. This optimization plan meets passenger flow demands while reducing operational costs for the enterprise, offering valuable and instructive insights for other rail transit projects with similar passenger flow characteristics.

Key words: urban rail transit; passenger flow characteristics; transportation capacity optimization; economic analysis

(责任编辑:陈伟超)