

大运量轨道交通对城市道路交通的影响分析

孙 龙¹, 徐洪栋²

[1. 山东远通公路工程集团有限公司, 山东 枣庄 277500; 2. 上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司济南分公司, 山东 济南 250102]

摘 要: 城市轨道交通作为大容量、高速度、集约化的公共交通方式, 对城市道路交通的改善和交通系统的优化升级具有不可替代的作用。通过实地调查, 对比了济南市轨道交通4号线开通前后, 经十路主要交叉口早高峰交通量、信号延误和服务水平的变化, 并以此为基础分析了轨道交通客流量与交叉口延误间的数量关系。通过函数拟合, 建立了二者之间的二次模型。最后, 代入经十路其他几处交叉口的相关数据进行验证, 模型预测结果与实际调查数据间的误差不超过15%, 吻合度较高。

关键词: 轨道交通; 早高峰时段; 客流量; 交叉口延误时间; 函数拟合

中图分类号: U491.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0116-04

Analysis of Impact of High-Capacity Rail Transit on Urban Road Traffic

SUN Long¹, XU Hongdong²

[1. Shandong Yuantong Highway Engineering Group Co., Ltd., Zaozhuang 277500, China; 2. Jinan Branch, Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Jinan 250102, China]

Abstract: As a large-capacity, high-speed and intensive public transportation, the urban rail transit plays an irreplaceable role in improving urban road traffic, and optimizing and upgrading the transportation system. Based on field surveys, the changes in traffic volume in peak morning hours, signal delay and service level at major intersections on Jingshi Road are compared before and after the opening of Jinan Metro Line 4. On this basis, the quantitative relationship between metro passenger flow and intersection delay is analyzed. A quadratic model between the both is established through function fitting. Finally, the relevant data from several other intersections on Jingshi Road are substituted for verification. The error between the model prediction results and the actual survey data is not more than 15%, indicating a high degree of agreement.

Keywords: rail transit; peak morning hours; passenger flow; intersection delay time, function fitting

0 引 言

大运量公共交通线路的运行, 可以有效降低小汽车使用率, 提高居民绿色出行比例, 对城市居民出行结构带来深刻的影响, 同时也会对城市道路交通起到显而易见的改善作用。济南市自2019年建成第一条轨道交通线路以来, 客流持续增长, 居民的轨道交通出行占比不断提高。随着轨道交通4号线等线路的陆续开通运行, 城区内轨道交通基本成网, 轨道交通客运量稳步攀升, 在公共交通出行中的占比已超过20%。随着轨道交通客流的持续增长, 作为4号线和

8号线的主要空间载体的经十路的地面交通状况出现了显著的变化。针对轨道交通客流和经十路地面交通相关指标变化的分析, 对于研究轨道交通-道路交通相互关系具有重要的意义。

1 研究背景

按照汽车保有量增长情况与道路交通和轨道交通建设的关系, 可将我国大部分城市的发展阶段总结如下。2000年前汽车稀缺, 道路供给大于需求, 城市以道路建设为主, 轨道交通仅在少数特大城市(北京、上海等)试点^[1]; 2000—2008年, 私人汽车崛起, 道路供需矛盾初显, 伴随私人汽车崛起, 城市轨道交通从“单条线路”向“线网规划”过渡, 强调“连接核心区、分流主干道”, 与道路拥堵治理初步协同^[2]; 2009—2015年, 汽车爆发式增长, 道路拥堵全面蔓延, 供需矛盾激化^[3]。2016至今, 汽车数量增速放缓但基数

收稿日期: 2026-04-01

作者简介: 孙龙(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 从事道路工程建设管理工作。

通信作者: 徐洪栋(1991—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事交通规划工作。电子信箱: xuhongdong@smedi.com

巨大(2023 年全国私人汽车保有量达 2.69 亿辆),城市公共交通工作重点聚焦构建“轨道交通为骨干、公交为主体、慢行交通为补充”的综合体系^[4]。

1.1 济南市机动车出行数据

济南机动车增长呈现“前期平缓、中期跃升、后期稳健”的阶梯式增长特征。2012—2016 年为稳步增长期,年均增量约 15 万辆^[5]。2018 年起进入快速增长期,2019 年增量高达 55 万辆,创下历史峰值,此后虽受多种因素影响增速有所放缓,但仍保持年均 20 万辆以上的增长规模^[6]。2024 年济南市机动车保有量首次突破 400 万辆大关^[7]。

截至 2025 年 12 月底,济南全市机动车总量达 432.6 万辆,其中全市民用汽车 369.5 万辆,千人汽车保有量达 388 辆,在全国大城市中排名第 5 位,超过北京、武汉、杭州、南京。

根据 2025 年下半年相关数据,济南中心城区范围内(不含南部山区和起步区),早高峰集中在 7:00—9:00 之间,晚高峰集中在 17:00—18:00 之间,高峰时段出行总量约 91 万人次,占全天总出行量 37.25%。早晚高峰期间,私人小汽车出行量占总出行量的 20%。

1.2 济南市轨道交通出行数据

2019 年,轨道交通 1 号线、3 号线开通后,初期客流量较低,全年仅约 570 万人次。2021 年轨道交通 2 号线开通后,客流量有了明显提升,全年客流量达 5 600 万人次。此后,轨道客流量稳步提升,2025 年,全年客流量接近 1.4 亿人次。

目前济南轨道整体客流仍处于新线开通后的培育阶段,但线路间的协同效应已初步显现,轨道交通成网态势明显。全日进出站客流大于 2 万人次的站点主要有换乘站彭家庄站、奥体中心站,2 号线彭家庄站、鲍山站、七里堡站、济泺路站和济南站北站,以及 4 号线历下广场站,见图 1。

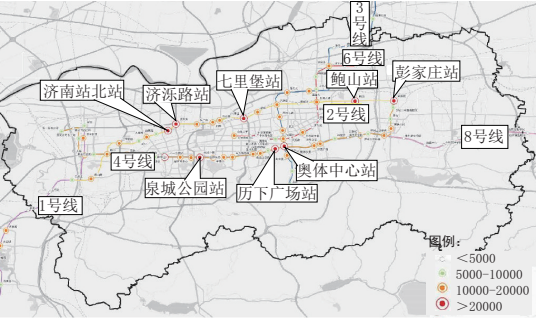


图 1 2025 年底工作日轨道交通站点客流分布

2 经十路地面交通状况分析指标

经十路是济南的东西向交通“主轴”,东接章丘,西连长清,横跨整个城区,全长 90 余 km,道路红线最宽处达 144 m,双向 24 车道,是全国最宽的城市主干道之一^[8]。

由于经十路沿线聚集了大量政府机关、企业、商圈(如奥体中心、CBD)、医院和学校,早晚高峰期间,通勤车流密集^[9]。

2.1 交叉口运行指标选取

以经十路在早高峰期间拥堵较为明显的二环东路—邢村立交桥之间路段和交叉口作为研究对象,选取相关指标表征交叉口和路段的运行状况。

反映交叉口运行情况的指标主要包括延误时间、车辆排队长度、饱和度、绿灯时间利用率等^[10]。采用能较为直观反映驾驶人感受的车辆平均延误时间和车辆平均排队长度来表征交叉口运行情况^[11]。

延误时间的确定以现场实际观测为主,以微观仿真软件 synchro 进行模型计算为辅。

交叉口总延误计算公式为:

$$\bar{d} = N \cdot t_g$$

式中: $\bar{d}$ 为总延误,s; N 为停驶车辆总数,辆; t_g 为观测时间间隔,s,通常取 15 s。每辆车的平均延误计算公式为:

$$\bar{d} = d/N$$

参考《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2012),将信号交叉口服务水平分为以下四级^[12],见表 1。

表 1 信号交叉口服务水平分级

服务水平指标	一级	二级	三级	四级
控制延误/(s·veh ⁻¹)	<30	30~50	50~60	>60
负荷度 V/C	<0.6	0.6~0.8	0.8~0.9	>0.9
排队长度/m	<30	30~80	80~100	>100

2.3 交叉口具体情况分析

经十路在二环东路—邢村立交桥之间共有 7 处较大的信号交叉口,相交道路中除凤山路外,其他相交道路均为主干路。

交叉口渠化情况见表 2。

选取的几处交叉口中,经十路标准段主辅路车道数均为单向 7 车道,渠化后,达到 9 或 10 车道。相交道路标准路段均为单向 3 车道,区划后,达到 4 或 5 车道。

各交叉口信号周期时间基本控制在 220 s,早晚高峰期间,部分路段为经十路直行方向设置绿波交通。

表2 经十路交叉口进口道渠化情况

编号	交叉口名称	经十路进口道渠化情况	相交道路进口道渠化情况
1	经十路-奥体西路	7~10	3~5
2	经十路-奥体东路	7~9	3~3
3	经十路-舜华路	7~9	3~5
4	经十路-凤凰路	7~9	3~5
5	经十路-凤山路	7~9	3~3
6	经十路-凤歧路	7~9	3~4
7	经十路-凤鸣路	7~9	3~5

2.2 轨道交通运行指标选取

关于轨道交通客流指标的选取,首先考虑客流强度。客流强度的计算方式为每天的乘车人数除以运营里程,单位为万人次/km。考虑到这样一种特殊情况:发车班次低但每班次乘坐人员多,这时的客流强度不高,但实际感觉较为拥挤,实际感受与客流量不匹配^[13]。

因此重点考虑线路全线全天客运量、负荷强度、最大断面流量和站点进出站客流量等^[14]。从数据采集的难易程度出发,采用站点进出站客流量表征轨道交通线路的客流强度。

3 数据调查与函数拟合

调查时间:选取2025年6月每周各2个工作日的早高峰为调查时间。

调查地点:经十路东段,西起奥体西路节点,东至邢村立交桥节点,共约9.5 km,选取8处主要信号交叉口(具体名称见表3)。

表3 2025年6月主要交叉口延误时间及服务水平

编号	交叉口名称	平均交通量/(pcu·h ⁻¹)	平均延误时间/s	服务水平
1	经十路-奥体西路	11 310	140	四级
2	经十路-奥体东路	8 566	67	四级
3	经十路-舜华路	8 985	80	四级
4	经十路-凤凰路	10 424	105	四级
5	经十路-凤山路	5 076	157	四级
6	经十路-凤歧路	6 570	48	二级
7	经十路-凤鸣路	11 795	90	四级

表6 轨道交通开通前后相关指标

编号	交叉口	对应轨道交通站点	$x_1/(pcu \cdot h^{-1})$	y_1/s	$x_2/(pcu \cdot h^{-1})$	y_2/s	$Z/(人次 \cdot h^{-1})$
1	经十路-奥体西路	奥体西路	11 310	140	10 316	120	1 675
2	经十路-奥体东路	奥体东路	8 566	67	8 064	63	4 570
3	经十路-舜华路	舜华路	11 764	125	8 985	80	5 191
4	经十路-凤凰路	凤凰路	10 424	105	10 380	101	3 473
5	经十路-凤山路	凤山路	7 862	165	5 076	157	1 058
6	经十路-凤歧路(T口)	凤歧路	7 294	53	6 570	48	879
7	经十路-凤鸣路	凤鸣路	11 795	90	9 440	85	1 648

调查方法:通过相机和无人机拍摄,记录每个信号交叉早高峰期间的平均全转向交通量和信号配时。

延误计算方法:通过交通信号协调及配时设计软件synchro建立各交叉口的微观仿真模型,计算各交叉口的车均延误时间,输入数据为交叉口个进口道实际车道分布情况、各方向实际流量、信号周期和相位,各方向放行的具体时间为该相位下的最优时间,以避免实际配时与客流分布不匹配引起的误差。

选取2026年1月期间每周各2个工作日的早高峰,实地调查高峰小时流量。经初步观察分析,轨道交通开通后,交叉口平均延误有所降低,降低幅度与轨道交通站点客流量呈一定的正相关性,见表4至表6。

表4 2026年1月主要交叉口早高峰延误时间及服务水平

编号	交叉口名称	平均交通量/(pcu·h ⁻¹)	平均延误时间/s	服务水平
1	经十路-奥体西路	10 316	120	四级
2	经十路-奥体东路	8 064	63	四级
3	经十路-舜华路	11 764	151	四级
4	经十路-凤凰路	10 380	101	四级
5	经十路-凤山路	7 862	128	四级
6	经十路-凤歧路(T口)	7 294	45	二级
7	经十路-凤鸣路	9 440	99	四级

表5 2026年1月轨道交通站点日均客流量 单位:人次

编号	车站	进站	出站	总客流量
1	奥体中心	277	1 398	1 675
2	奥体东路	594	3 976	4 570
3	舜泰广场	544	4 647	5 191
4	汉峪金谷	928	2 545	3 473
5	林家庄	818	240	1 058
6	黄金产业园	717	162	879
7	文旅城	1 489	159	1 648

x_1 :轨道交通4号线开通前(2025年6月)交叉口流量,pcu/h;

y_1 :轨道交通4号线开通前(2025年6月)交叉口延误时间,s;

x_2 :轨道交通 4 号线开通后(2026 年 1 月)交叉口流量,pcu/h;

y_2 :轨道交通 4 号线开通后(2026 年 1 月)交叉口延误时间,s;

z :轨道交通站点高峰小时客流量,人次/h。

一般来说,轨道交通站点客流量越大,对道路交通的分担作用越大,线路开通前后交叉口的延误改善作用也越大^[15]。因此,轨道交通站点客流量应与交叉口延误时间呈一定的相关关系。

通过 MATLAB 软件拟合出 $z=f(y_1,y_2)$ 函数关系。为找到 z 与 y_1,y_2 的最优函数关系,分别拟合 3 类典型多变量模型,并从拟合优度(R^2)、预测误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)三个维度评估(见表 7):

表 7 函数拟合结果

模型类型	拟合方程	R^2 (拟合优度)	RMSE(预测误差)	拟合等级
线性模型	$z_1=58.5y_1-74.5y_2+3\ 378.9$	0.36	1 297	一般
交互项模型	$z_2=87y_1+7.6y_2-0.52y_1y_2-1\ 611$	0.49	1 158	良好
二次模型	$z_3=-6\ 255.319\ 4\times y_1+6\ 161.887\ 0\times y_2+64.463\ 9\times y_1^2-89.938\ 1\times y_1y_2+24.895\ 2\times y_2^2+26\ 959.806\ 3$	0.99	55	优秀

线性模型:拟合效果较差,仅能解释 36% 的 z 值变异,预测误差较大(RMSE=1 297),说明 z 与 y_1,y_2 的关系并非简单线性关系。

表 8 站点实际客流量和函数预测结果对比

编号	交叉口	对应轨道交通站点	$x_1/(pcu\cdot h^{-1})$	y_1/s	$x_2/(pcu\cdot h^{-1})$	y_2/s	$Z/(人次\cdot h^{-1})$	实际客流量
1	经十路-山大路	山大路南口	7 594	84	7 208	79	1 665	1 822
2	经十路-浆水泉路	浆水泉路	4 104	93	3 986	88	1 865	1 954
3	经十路-历山路	千佛山	6 587	114	5 977	109	1 821	2 088

经对比函数计算结果和实际统计数据,预测数据与实际情况之间的误差在 5%~15%,吻合度较高。

4 结论及展望

研究在对济南经十路地面道路交通状况分析和轨道交通线路客流量数据统计的基础上,引入多个道路交通状况的评价指标,通过拟合轨道线路开通前后交叉口延误和轨道站点客流量之间的函数模型,提出了轨道站点客流量与交叉口信号延误时间之间存在非线性关系。经对比其他交叉口的模型计算结果和实际测量数据,二者误差可控制在 15% 左右,预测结果较好。研究成果为城市主干路沿线地

交互项模型:加入 $y_1\times y_2$ 交互项后,拟合优度提升至 49%,误差有所降低,但仍无法精准捕捉变量间的复杂关系。

二次模型:拟合优度高($R^2=0.99$),能解释 99% 的 z 值变异;预测误差较小(RMSE=55),远优于其他模型;包含 y_1^2,y_2^2 和 $y_1\times y_2$ 项,能充分捕捉变量间的非线性关系和交互影响。

模型残差分析见图 2。

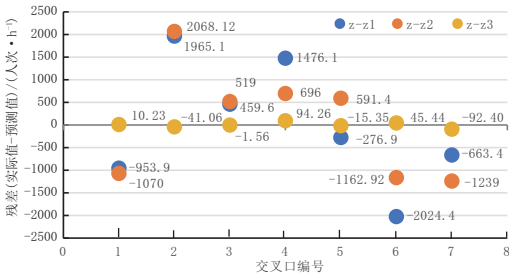


图 2 模型残差分析图

因此,对经十路东段道路和道路下方轨道交通线路而言,轨道交通站点高峰小时客流量与轨道交通开通前后同位置交叉口延误时间之间的关系可以总结为:

$$z=-6\ 255.319\ 4\times y_1+6\ 161.887\ 0\times y_2+64.463\ 9\times y_1^2-89.938\ 1\times y_1y_2+24.895\ 2\times y_2^2+26\ 959.806\ 3$$

为验证函数公式的准确性,选取经十路山大路等 3 处交叉口,输入其对应的轨道站点客流量信息和轨道线路开通前后的交通量延误等数据,对比实际客流量和函数模型预测结果(见表 8)。

铁客流分析提供了理论支撑和实际算例,期望为城市主干路沿线轨道交通的规划、建设和分析轨道对地面交通的改善提供参考。同时,鉴于本次数据分析的样本量较少,对函数关系拟合的普遍性有待提升,下一步将增加样本数量,进一步验证模型的泛化能力,确保在更广泛的 y_1,y_2 范围内仍能保持高精度预测。

参考文献:

[1] 罗伟,方骥德,郭子兴,等.城市地铁站出入口周边道路交叉口交通优化分析——以长沙地铁 3 号线螺丝塘站为例[J].产业与科技论坛,2021,20(2):55-57.
[2] 卞国剑,刘艺,罗建晖.城市地下道路与轨道交通共建研究[J].城市道桥与防洪,2024(10):1-6.

(下转第 133)