

东风大道交叉口设计及路网连通可靠度研究

张金雷^{1,2}, 高涛涛³, 刘小琳¹, 董桃桃¹, 段雨彤¹

1. 重庆外语外事学院, 重庆 401120

2. 重庆交通大学, 重庆 400074

3. 重庆工程学院, 重庆 400056

DOI:10.61369/UAID.2026020042

摘 要 : 以襄阳市东风大道提升改造工程为背景, 针对现状道路中阳光路、富康路及新城路路段存在的瓶颈区问题, 开展了交叉口流量调查与饱和度分析。基于路网连通可靠度理论, 将控制交叉口间的路径转换为串联-并联复合系统, 计算了现状路网的连通可靠度。针对识别出的瓶颈节点, 提出了阳光路交叉口右进右出渠化改造、富康路至新城路路段双向四改六车道、公交站点港湾式改造等优化方案。优化后路网连通可靠度由0.94提升至0.982, 提升幅度约4.5%, 与交通量预测及饱和度分析结果趋势一致。研究表明, 路网连通可靠度分析方法可有效评估交叉口改造工程效果, 为城市道路提升改造工程的方案比选与效果评价提供定量化决策依据。

关 键 词 : 路网连通可靠度; 交叉口优化; 饱和度分析; 交通组织; 瓶颈路段

Design of Dongfeng Road Intersection and Study on Reliability of Network connectivity

Zhang Jinlei^{1,2}, Gao Taotao³, Liu Xiaolin¹, Dong Taotao¹, Duan Yutong¹

1. Chongqing Institute of Foreign Studies, Chongqing 401120

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074

3. Chongqing Institute of Engineering, Chongqing 400056

Abstract : Based on the upgrading and renovation project of Dongfeng Avenue in Xiangyang City, the traffic flow investigation and saturation analysis were carried out for the bottleneck sections of Yangguang Road, Fukang Road and Xincheng Road in the current road network. Based on the theory of road network connectivity reliability, the paths between controlled intersections were transformed into a series-parallel composite system, and the connectivity reliability of the current road network was calculated. For the identified bottleneck nodes, optimization schemes such as right-in-right-out channelization transformation at the Yangguang Road intersection, two-way four-lane to six-lane transformation on the Fukang Road to Xincheng Road section, and transformation of bus stops into bay-type were proposed. After optimization, the connectivity reliability of the road network increased from 0.94 to 0.982, with an increase of approximately 4.5%, which was consistent with the trend of traffic volume prediction and saturation analysis results. The research shows that the analysis method of road network connectivity reliability can effectively evaluate the effect of intersection renovation projects and provide quantitative decision-making basis for the scheme selection and effect evaluation of urban road upgrading and renovation projects.

Keywords : road network connectivity reliability; intersection optimization; saturation analysis; traffic organization; bottleneck sections

引言

随着城市化进程的加速, 交通拥堵已成为制约城市发展的瓶颈。路网连通可靠度作为评估交通系统稳定性的关键指标, 能够从网络拓扑结构和交通运行状态双重维度反映路网的连通性能^[1-2]。近年来, 国内外学者在路网可靠性领域开展了大量研究, 从连通可靠性逐步拓展至出行时间可靠性、通行能力可靠性等多个维度^[3-4]。

在城市道路改造工程中, 如何科学评估改造方案的效果一直是工程实践中的难点。传统的评估方法多依赖于交通量预测和饱和度分

析, 缺乏对路网整体连通性能的定量评价^[5]。基于此, 本文以襄阳市东风大道提升改造工程为依托, 将路网连通可靠度理论应用于交叉口改造方案的评价中, 通过对改造前后路网可靠度的量化对比, 验证改造方案的有效性, 为同类工程提供方法参考和决策依据。

一、项目概况

襄阳高新开发区位于襄阳市东北部, 是经国务院批准设立的国家级高新区。为适应发展要求, 近期对区内部分道路及配套设施进行改造提升。本研究涉及的东风汽车大道位于襄阳市北部高新区内, 为南北向城市主干路, 道路全长7700m, 设计速度50km/h, 红线宽度50m。

片区形成“六横五纵”的干路网络格局, “六横”为: 产业大道、机场路、新明路、新城路、富康大道和钻石大道; “五纵”为米芾路、拓新路、天籁大道、东风汽车大道、奔驰大道。

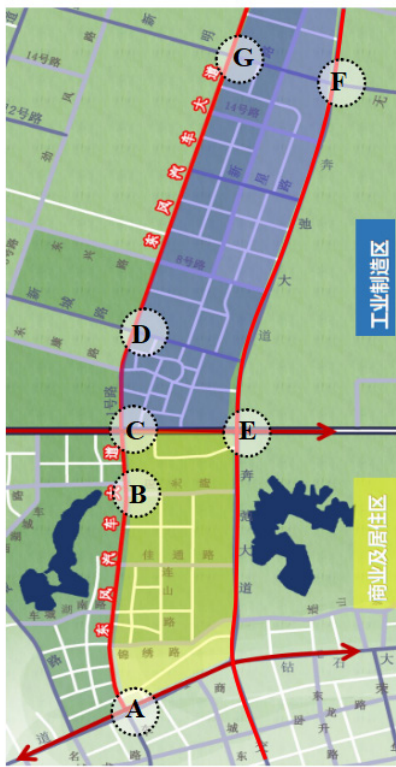


图1 本项目路网结构图

研究范围起于东风大道与钻石大道交叉口, 终于新明路交叉口, 基于路网结构及通行能力分析, 确定A、B、C、D、E、F、G共7个控制交叉口作为关键节点。

二、路网连通可靠度理论基础

(一) 可靠度概念界定

路网连通可靠度是从道路网络拓扑结构角度描述道路网络在随机失效条件下的连通概率, 反映的是路网中任意起讫点之间存在至少一条连通路径的可能性^[6]。现有研究通常将路段或交叉口的运行状态简化为“畅通”和“失效”两种状态, 并基于概率论建立网络可靠度评价模型^[7]。

(二) 基本计算模型

路网系统可分解为串联系统、并联系统和并-串联复合系统三种基本形式^[8]:

1) 串联系统

一个串联系统是由串行连接的N各单元构成的。任何单元的任意一种失效都会导致整个系统失效。

$P(x_i)$ = 第i个单元正在运行的概率

R = 系统的可靠度

假设N个事件独立, 则 $R = P(x_1) P(x_2) P(x_3) \cdots P(x_N)$

2) 并联系统

在一个并联系统中, 单元或组件以并联的方式连接, 一条或某几条通路的失效不影响剩下通路的正常运行。

假设N个事件独立, 则 $R = 1 - (1 - P(x_1)) (1 - P(x_2)) (1 - P(x_3)) \cdots (1 - P(x_N))$

3) 并-串联系统

一个并-串联系统由m条并联通路组成, 每个通路包含n个串行连接的单元, 所有组件都相同且一个单元的可靠度是p, 则整个系统的可靠度为 $R = 1 - (1 - p^n)^m$

(三) 可靠度与饱和度的关系

路段连通可靠度与交通饱和度存在密切关联。侯立文等^[1]的研究表明, 随着饱和度增加, 路段可靠度呈非线性下降趋势。参考相关研究成果^[6,9], 本文结合道路等级和运行状况, 设定主干路非失效概率为0.9, 次干路为0.8, 通行不畅的瓶颈路段为0.7, 以此作为可靠度计算的基础参数。

三、交叉口调查与可靠度评估

(一) 交叉口流量分析

1. 东风大道与阳光路交叉口(B节点)

东风大道与阳光路交叉口流量调查及计算分析, 见图2。

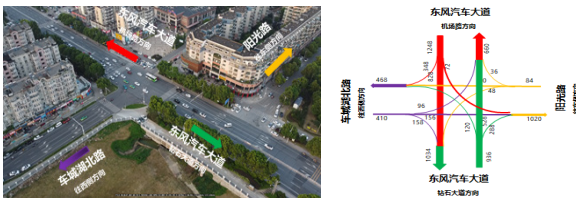


图2 东风大道与阳光路交叉口流量分析

2. 东风大道与富康路交叉口(C节点)

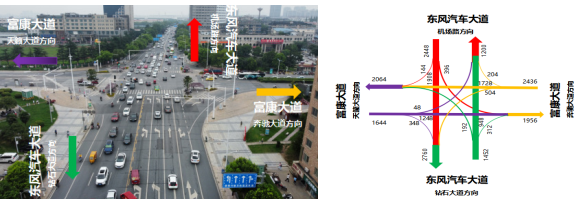


图3 东风大道与富康路交叉口流量分析

根据预测结果,现状道路东风大道 A-C 标准段(钻石大道-富康路)采用双向6车道建设,至2041年服务水平可保证在C级水平,满足设计预期条件及实际使用功能需要,但交叉交通组织需要进行梳理,以避免形成瓶颈区。

3. 富康路-新城路路段(C-D节点)

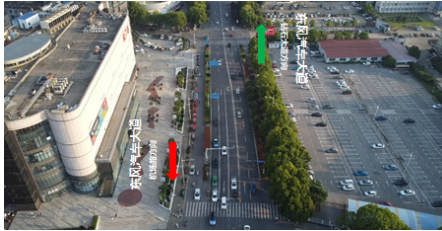


图4 富康路-新城路路段流量分析

该路段现状采用双向4车道,流量分析及饱和度计算如图6和表3所示。预测至远期服务水平将降至F级,不满足使用功能需求。现场调查发现,公交站点为直接式,占用一条行车道,公交车停靠对后续车流造成严重干扰;同时两交叉口间距仅150m,拥堵区高度集中。

(二) 现状可靠度计算

随着道路等级的提高,道路通行能力提高,可以按照主干路、次干路分别估计非失效状态下的概率定义为90%、80%,假定主干路在交叉口通行不畅的情况下非失效状态下的概率定义为70%,详见图5。



图5 现状路段可靠度

基于路网结构及通行能力分析,以控制交叉口作为节点,将节点间路径转换为路网系统,如图6。

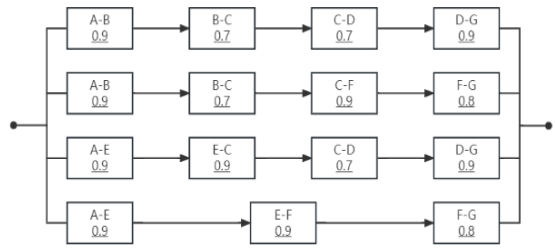


图6 路网连通系统图(改造前)

运用道路连通可靠度计算的方法及公式,计算结果如下。

$$P=1-(1-0.9 \times 0.7 \times 0.7 \times 0.9) \times (1-0.9 \times 0.7 \times 0.9 \times 0.8) \times (1-0.9 \times 0.9 \times 0.7 \times 0.9) \times (1-0.9 \times 0.9 \times 0.8)=0.94$$

从现状的交通数据调查可知,阳光路交叉两道口交叉口过近,仅100米左右,交通组织混乱,车城湖北路与小区道路错位,车城湖北路与阳光路无法直接连通,通行能力低。

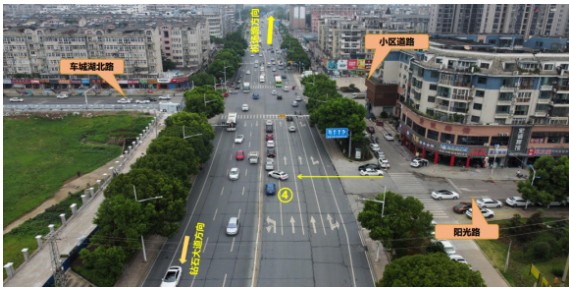


图7 阳光路路口交通现状(改造前)

富康路-新城路路段单向为2车道,公交站点现状为直接式,占用了一个车行道,公交车到站停车对后面车流造成拥堵,同时公交站距离斑马线过近。路段拥堵区过于集中。



图8 富康路至新城路交通现状(改造前)

现状路网连通可靠度为0.940。从定性角度分析,阳光路路口交通组织混乱、富康路-新城路路段公交停靠干扰严重等问题,与可靠度计算中该路段较低的可靠度赋值具有良好的一致性。

四、交叉口优化方案设计

针对上述瓶颈节点，遵循改建道路治理性设计流程^[10]，分别提出如下优化方案。

（一）东风大道与阳光路交叉口（B节点）



图9 东风大道与阳光路交叉口优化设计

将阳光路调整为右进右出路口，并拓宽设置辅路，与主路之间设置隔离栏杆，同时增加专用信号灯控制。

（二）东风大道与富康路交叉口（C节点）



图10 东风大道与富康路交叉口优化设计

富康大道以北标准路段由双向四车道改为双六车道，富康大道以南进口展宽段由四车道改为五车道，道路向西侧拓宽一个车道，根据富康大道快改方案，合理调整交叉口处右转车道的宽度和位置，优化渠化岛的设计。

（三）富康路—新城路路段（C-D节点）

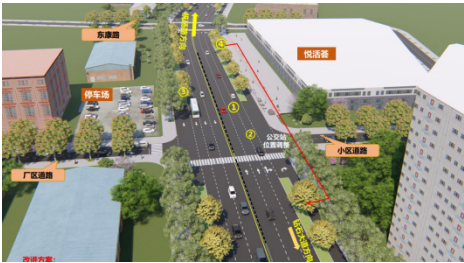


图11 富康路—新城路路段交叉口优化设计

将该路段由双向四车道改造为双向六车道，取消过街斑马线，公交站点由直接式改造为港湾式，并调整站台位置以避免与交叉口功能区重叠。

五、优化后可靠度计算与评价

（一）优化后可靠度计算

上述改造方案实施后，B节点及C-D路段的瓶颈问题得到有效缓解，通行能力显著提升。据此将原瓶颈路段的可靠度由0.7调整至主干路标准的0.9，优化后的可靠度赋值如图12所示。

$$P=1-(1-0.9 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.9) \times (1-0.9 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.8) \times (1-0.9 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.9) \times (1-0.9 \times 0.9 \times 0.8)=0.982$$

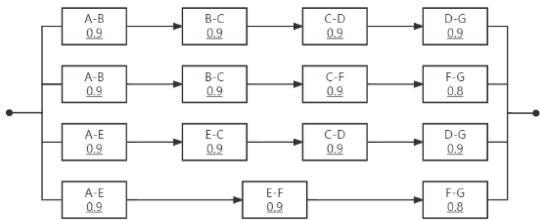


图11 路网连通系统图（改造后）

（二）改造效果对比分析

将改造前后的可靠度及关键指标进行对比，如表1所示。

表1 改造前后关键指标对比			
对比项目	改造前	改造后	变化
可靠度	0.940	0.982	+4.5%
B节点通行状态	瓶颈（可靠度0.7）	正常（可靠度0.9）	提升
C-D路段通行状态	瓶颈（可靠度0.7）	正常（可靠度0.9）	提升
远期饱和度水平	F级（局部）	C级~D级	显著改善

优化后路网连通可靠度由0.940提升至0.982，提升幅度约4.5%。同时，远期交通量预测及饱和度分析结果也显示，改造后瓶颈路段的服务水平由F级提升至C级或D级，与可靠度提升的趋势高度一致。这表明可靠度分析方法能够有效反映交叉口改造

工程对路网连通性能的改善效果。

六、结论

本文基于襄阳市东风大道提升改造工程实践，将路网连通可靠度理论应用于交叉口改造方案的评价中，主要结论如下。

(1) 通过现状流量调查与饱和度分析，识别出 B 节点（阳光路交叉口）、C 节点（富康路交叉口）及 C-D 路段为本项目的瓶颈节点，其通行能力不足是导致路网连通可靠度偏低的主要原因。

(2) 基于路网连通可靠度理论，将控制节点间路径转化为

并-串联复合系统，计算得到现状路网可靠度为 0.940。

(3) 针对瓶颈节点提出右进右出渠化、双向四改六车道、公交站点港湾式改造等优化方案，改造后可靠度提升至 0.982，提升幅度约 4.5%。

(4) 可靠度变化趋势与饱和度分析结果具有良好的一致性，表明路网连通可靠度分析方法可作为城市道路改造工程效果评价的有效定量工具。

研究采用的可靠度模型基于简化的二值状态假设（畅通/失效），未考虑交通流动态变化对路段状态概率的实时影响。未来研究可引入饱和度与可靠度的函数关系，建立动态可靠度评估模型，对路网性能进行更全面的评价。

参考文献

- [1] 侯立文, 蒋馥. 城市交通网络连通可靠度计算研究 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30(1): 42-45.
- [2] 刘灿齐. 交通网络连通可靠性评价方法研究 [J]. 交通运输工程与信息学报, 2008, 6(2): 23-28.
- [3] 陈艳艳, 刘小明, 梁颖. 交通运输网络可靠性研究分析 [J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 134-139.
- [4] Tehrani M, Shafieezadeh A, Golparvar-Fard M. Road networks reliability estimations and optimizations: A bi-directional bottom-up, top-down approach[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 222: 108353.
- [5] 王寅春. 江东路隧道交通组织设计与路网可靠度研究 [J]. 城市道桥与防洪, 2021(6): 10-13.
- [6] 许良. 基于可靠性分析的城市道路交通网络设计问题研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [7] 臧晓东, 等. 道路交通运行可靠性理论及应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [8] Zhang L, Wen H, Lu J, et al. Exploring cascading reliability of multi-modal public transit network based on complex networks[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 221: 108367.
- [9] 胡文娟. 城市隧道交通组织与管理方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [10] 杨晓光, 等. 城市道路交通设计指南 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [11] Piras F, Sottile E, Meloni I, et al. Blending efficiency and resilience in the performance assessment of urban intersections: A novel heuristic informed by literature review[J]. Sustainability, 2024, 16(6): 2450.
- [12] Intersection importance assessment for an operationally resilient urban traffic network: A multi-criteria decision-making-based framework[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2025, 253: 110567.