

基于可靠度的城市道路交通信号配时优化研究

马淑梅¹, 马志芳¹, 童景盛²

(1. 兰州有色冶金设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 城市道路交通是城市运行的血脉, 交通信号配时优化是解决交通拥堵、提高交通效率的重要方法。近几年, 交通可靠度被广泛应用于城市道路交叉口相关研究中, 现有的可靠性研究多采用定义交叉口可靠性指标来评价城市交通系统信号控制设计, 并对存在的问题进行分析优化。描述信号交叉口的指标有行程时间、排队长度、相位清空和服务水平等, 相位清空可靠度研究对于优化交叉口信号配时方案具有一定的重要性。在现有研究理论的基础上, 基于传统的 MAXBAND 绿波带控制模型, 同时结合交叉口可靠度模型进行优化, 建立了基于可靠度的干线协调优化控制模型, 并采用粒子群算法求解。以实际案例为研究对象, 采用 VISSIM 仿真得到平均延误时间和排队长度。研究表明, 基于可靠度的干线协调优化控制模型求解得到的信号配时方案优于传统的 MAXBAND 绿波带控制模型的结果。

关键词: 信号交叉口; 交叉口可靠度; 信号配时; 相位清空可靠度; 粒子群算法

中图分类号: TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)08-0029-05

Research on Timing Optimization of Urban Road Traffic Signals Based on Reliability

MA Shumei¹, MA Zhifang¹, TONG Jingsheng²

(1. Lanzhou Nonferrous Metallurgy Design and Research Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China; 2. Northwest Design and Research Institute of China Municipal Engineering Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: Urban road traffic is the lifeblood of urban operation. The timing optimizing of traffic signals is an important method to solve the traffic congestion and improve the traffic efficiency. In recent years, the traffic reliability has been widely applied in the related research of urban road intersections. The definition of intersection reliability indicators is mainly adopted in the existing reliability research to evaluate the signal control design of urban traffic systems, and analyze and optimize the existing problems. The indicators for describing the signalized intersections include the travel time, queue length, phase clearing and service level, etc. The research on the reliability of phase clearing is of certain importance for optimizing the signal timing scheme of intersections. On the basis of the existing research theory, based on the traditional MAXBAND green wave band control model and combined with the intersection reliability model for optimization, a mainline coordination optimization control model based on reliability is established and solved by using the particle swarm optimization algorithm. Taking an actual case as the research object, the average delay time and queue length are obtained through VISSIM simulation. The research results show that the signal timing scheme obtained by solving the mainline coordination optimization control model based on reliability is superior to the results of the traditional MAXBAND green wave band control model.

Keywords: signalized intersection; intersection reliability; signal timing; phase emptying reliability; particle swarm optimization

0 引言

近几年, 交通拥堵已由大城市向中小城市快速蔓延, 随着城市空间结构不合理情况加深, 交通潮汐

现象愈加明显。解决交通拥堵问题, 并非只能通过城市扩容, 通过优化交叉口信号配时方案、干线协调控制、实现绿波交通等措施, 提升道路通行能力和服务水平, 同样能做到对症下药、解决问题。

交通可靠度被广泛应用于城市道路交叉口的相关研究中。描述信号交叉口的指标有行程时间、排队长度、相位清空^[1]和服务水平等。近期, 基于可靠度信号配时优化的研究颇多。例如: Lo^[2]提出相位

收稿日期: 2024-12-19

基金项目: 甘肃省建设厅重大专项研发课题(JK2024-29); 甘肃省科技厅重点研发计划项目(24YFGA057)

作者简介: 马淑梅(1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事城市道路交通设计工作。

清空可靠度的概念,建立了基于相位清空可靠度的交叉口信号控制优化模型;吕斌等^[3-6]从定量的角度,提出信号交叉口的可靠性优化模型并仿真;于泉^[7]通过实际数据,结合案例,建立交叉口可靠性信号配时模型;郑慧敏^[8-10]考虑服务水平可靠度,建立了单点交叉口信号配时模型;李长光^[11]考虑行程时间可靠度^[12-13],建立了城市网络信号配时优化方案。Ma Wanjing等^[14]以上海市实际交通量为依据,提出一种基于相位间隙可靠度(PCR)的多阶段随机规划,对自适应控制下的协调交叉口的基配时方案和绿色分割调整进行优化;李军^[15]、赖元文等^[16]基于服务可靠性,提出公交乘客可靠度信号配时优化。单交叉口信号配时优化方案研究^[17-19],是干线协调控制^[20-22]和区域协调控制的基础。协调控制根据车辆的行驶速度和相邻交叉口的距离,对相邻交叉口主干线相位绿灯开始时间差进行研究^[23-26]。本文以相位清空可靠度为控制目标,结合单点信号配时优化模型,建立基于可靠度的干线协调优化控制模型。

1 车道清空可靠度

车道清空可靠度指某交叉口的信号配时方案中有 n 个信号相位,在一个相位周期 $i(1, 2, \dots, n)$ 绿灯时间内对应的进口车道 j 上所有车辆能够全部通过交叉口的概率。表达式如下:

$$P_i = P_r(q_{ij}C \leq g_i S_{ij}) \quad (1)$$

式中: C 为周期时长; g_i 为有效绿灯时间; S_{ij} 为饱和流量; q_{ij} 为车辆到达率。

由式(1)得知,相位清空可靠度的大小可用来表示各相位的车流运行状态,也可用于评价各相位信号配时参数是否满足车流通行需求。因此,综合分析交叉口可靠度的大小,可利用相位清空可靠度作为约束指标之一。

2 相位清空可靠度

假设交叉口信号相位方案是由 n 个相位以一定顺序排列组合而成,本文称这种排列组合方式为并联。若第 i 个相位控制 m 条车道,其关键车道的可靠度为 p_i ,该相位清空可靠度为 R 。

第 i 个相位的相位可靠度 P_i 表达式为:

$$\begin{aligned} P_i &= P\{\max\{L_{i1}, L_{i2}, L_{i3}, \dots, L_{ij}\} \geq 0\} \\ &= 1 - P\{\max\{L_{i1}, L_{i2}, L_{i3}, \dots, L_{ij}\} < 0\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 1 - P\{L_{i1} < 0, L_{i2} < 0, \dots, L_{ij} < 0\} \\ &= 1 - \prod_{j=1}^m \{1 - L_{ij}\} \end{aligned} \quad (2)$$

第 i 个相位对应的车道可靠度 L_{ij} 表达式为:

$$L_{ij} = P_r(q_{ij}C \leq g_i S_{ij}) \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)得到相位清空可靠度表达式如式(4)所示:

$$R = 1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_r(q_{ij}C \leq g_i S_{ij})] \quad (4)$$

由于车辆到达具有随机性,式(4)中针对某个交叉口的信号配时方案,可以通过饱和流量 S_{ij} 和车辆到达率 q_{ij} 求得该相位清空可靠度。

某路段出现交通拥堵,其现状信号配时方案已无法满足交通需求,利用式(4)对该交叉口进行优化,即可靠度达到目标要求,可得到当前最优信号配时方案。

因此,在信号配时约束条件下,建立满足相位清空可靠度最大的信号配时优化模型。该模型表达式为:

$$\max R = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_r(q_{ij}C \leq g_i S_{ij})) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^n g_i + L = C \\ g_{\min} \leq g_i \leq g_{\max} \\ C_{\min} \leq C \leq C_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

交叉口的可靠度与服务水平有关,交叉口服务水平等级越高,交叉口的可靠度就越大;反之,交叉口服务水平等级越低,交叉口的可靠度越小。交叉口服务水平与可靠度之间的关系如表1所列。

表1 交叉口服务水平与可靠度之间的关系

服务水平等级	交叉口可靠度
A	$R > 0.95$
B	$0.85 < R \leq 0.95$
C	$0.70 < R \leq 0.85$
D	$0.50 < R \leq 0.70$
E	$0.25 < R \leq 0.50$
F	$R \leq 0.25$

3 基于可靠度的干线协调优化控制模型

本文将相位清空可靠度应用到多个交叉口研究中,建立基于可靠度的干线协调优化控制模型,得到最大的干线绿波带宽度和车辆行驶速度范围。车辆在该速度范围内行驶,均可在绿灯时间段通过路段所有交叉口,提高该路段的道路通行能力。MAXBAND绿波带控制模型^[27-29]原理时空关系如图1所示,相关参数说明如表2所列。

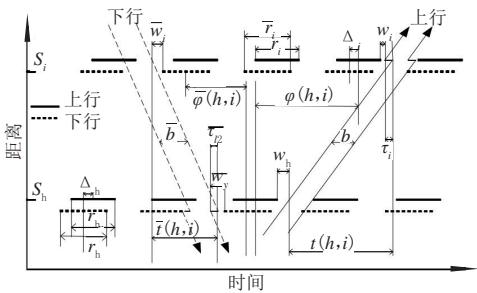


图 1 基本原理时空关系图

表 2 MAXBAND 模型中相关参数说明

$b(\bar{b})$	干线上行(下行)的绿波带宽
S_i	第 i 个信号交叉口
$r_i(\bar{r}_i)$	信号交叉口 S_i 上行(下行)的红灯时间
$w_i(\bar{w}_i)$	信号交叉口 S_i 红灯开始(结束)与绿波带边缘的时间差值
$t(h,i)[\bar{t}(h,i)]$	从信号交叉口 S_h 到信号交叉口 S_i 所用时间
$\phi(h,i)[\bar{\phi}(h,i)]$	绝对相位差
Δi	信号交叉口 S_i 上行(下行)红灯时间中点的差值
$\tau_i(\bar{\tau}_i)$	信号交叉口 S_i 排队车辆在绿灯开始后消散的时间
m_i	周期时长的整数倍
$C_{\max}$	周期最大值
$C_{\min}$	周期最小值
δ	表示频率,等于周期的倒数

在干线协调控制中,将相位清空可靠度 $R \geq R_0$ 作为约束条件之一,将干线上绿波最大作为优化目标,寻求各个交叉口最优信号配时方案。

对传统的 MAXBAND 绿波带控制模型进行优化,建立基于可靠度的干线协调优化控制模型,如式(7)、(8)所示:

$$Z = \max(b + \bar{b}) \tag{7}$$

$$\begin{cases} R = \{1 - \prod_{j=1}^m [1 - P_r(q_j C \leq g_i S_{ij})]\} \geq R_0 \\ b = \bar{b} \\ w_i + b \leq 1 - r_i \\ \bar{w}_i + \bar{b} \leq 1 - \bar{r}_i \\ t(h,i) + \bar{t}(h,i) + \frac{1}{2}(r_h + \bar{r}_h) + (w_h + \bar{w}_h) - \\ \text{s.t.} \quad \frac{1}{2}(r_i + \bar{r}_i) - (w_i + \bar{w}_i) - (\tau_i + \bar{\tau}_i) + \nabla_h - \nabla_i = m_i \\ \frac{d_i}{v_{i\max}} \delta \leq t_i \leq \frac{d_i}{v_{i\min}} \delta \\ \frac{1}{C_{\max}} \leq \delta \leq \frac{1}{C_{\min}} \\ b, \bar{b}, w_i, \bar{w}_i, m_i \geq 0, m_i \in M(i = 1, 2, 3 \dots n) \end{cases} \tag{8}$$

由于车辆到达具有随机性,本文采用粒子群算法,对基于可靠度的干线协调优化控制模型进行求解,并采用 MATLAB、VISSIM 仿真^[30-32],验证其合理

性和适用性。

4 案例仿真及分析

本文算例研究假设 4 个交叉口组成一个基础干线系统,即交叉口 J1、J2、J3、J4。每个交叉口均为单向 3 车道,每条车道宽度为 3.5 m,且各车道通行能力均相等,相邻交叉口的间距分别为 520、460、380 m。东西方向为主路方向,南北方向为支路方向。每个交叉口均采用三相位放行。第一相位为东西进口直行及右转放行相位;第二相位为东西进口左转放行相位;第三相位为南北进口直行、左转及右转放行相位。各交叉口间距均小于 800 m,满足干线协调控制要求。图 2 所示为交叉口仿真渠化图,图 3 所示为 4 个交叉口交通干线模型,图 4 所示为 4 个交叉口相位方案,表 3 所示为 4 个交叉口各方向车流量汇总。

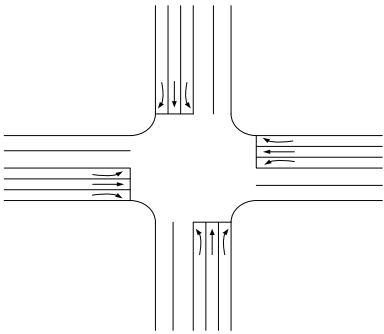


图 2 交叉口仿真渠化示意图

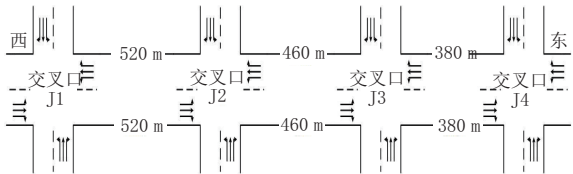


图 3 某路段 4 个交叉口示意图

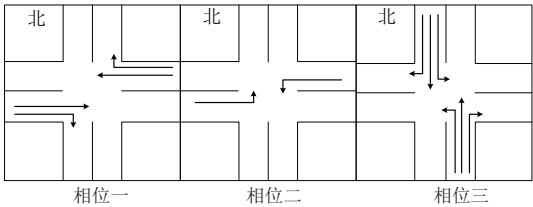


图 4 4 个交叉口相位方案

本文假设研究路段的道路服务水平等级达到 B 级以上,相位清空可靠度 $R_0 \geq 0.85$ 。借助 MATLAB 软件,采用粒子群算法,对基于可靠度的干线协调优化控制模型进行求解,忽略行人及非机动车对交通流的影响,假设周期损失时间为 $L = 9$ s。优化后的信号配时方案如表 4 所列。

根据优化后的信号配时方案,计算得到各交叉口的周期时长为:

表3 4个交叉口各方向车流量汇总					单位:pcu/h
进口方向		J1	J2	J3	J4
东进口	左	275	211	344	267
	直	629	601	648	675
	右	201	203	117	222
西进口	左	314	322	243	243
	直	638	627	646	669
	右	312	244	230	213
北进口	左	202	215	224	171
	直	354	357	311	312
	右	223	324	181	218
南进口	左	223	212	213	175
	直	377	360	356	362
	右	329	321	225	173

表4 优化后信号配时方案					
交叉口	周期时长/s	流量比	相位绿灯时间/s	交叉口延误/(s·pcu ⁻¹)	停车率
J1	120	0.406	53	22.4	0.456
		0.202	26		
		0.213	32		
J2	96	0.398	43	27.5	0.514
		0.178	21		
		0.203	22		
J3	115	0.412	52	30.9	0.524
		0.201	24		
		0.222	26		
J4	103	0.415	50	27.5	0.489
		0.187	19		
		0.199	23		

$C_{J2} = 96\text{ s} < C_{J4} = 103\text{ s} < C_{J3} = 115\text{ s} < C_{J1} = 120\text{ s}$

在多个交叉口信号协调控制中,确定公共周期不仅取决于单点信号配时结果,还要考虑相邻交叉口距离的关系。因此,公共周期需要经过不断试算求得。本文根据优化后的信号配时方案,确定传统的MAXBAND绿波带控制模型的公共周期为120 s。进而对4个交叉口重新配时。计算结果如表5所示。

表5 基于可靠度的干线协调优化控制模型方案				单位:s
交叉口	相位差时长	通过带宽时长	最佳周期时长	
J1	0			
J2	21			
J3	30	31	120	
J4	26			

评价指标	由西向东			由东向西		
	基于可靠度的干线协调优化控制模型	传统的MAXBANDM绿波带控制模型	提高率/%	基于可靠度的干线协调优化控制模型	传统的MAXBANDM绿波带控制模型	提高率/%
平均延误时间	26.5 s	30.7 s	13.7	28.3 s	33.5 s	15.5
平均排队长度	21.4 m	25.3 m	15.4	21.7 m	29.1 m	25.4

采用传统的MAXBAND绿波带控制模型,对上述4个交叉口信号配时方案进行干线协调控制。计算结果如表6所示。

表6 传统MAXBANDM绿波带控制模型				单位:s
交叉口	相位差时长	通过带宽时长	最佳周期时长	
J1	0			
J2	25			
J3	21	27	120	
J4	23			

采用VISSIM仿真干线协调控制,将基于可靠度的干线协调优化控制模型和传统的MAXBAND绿波带控制模型作比较。通过VISSIM仿真得到平均延误时间和排队长度结果,仿真过程如图4、图5所示,将计算结果进行汇总整理得到表7。

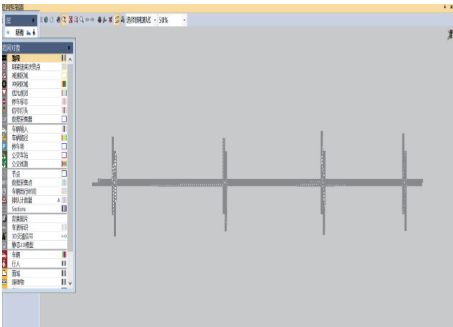


图4 VISSIM仿真图一

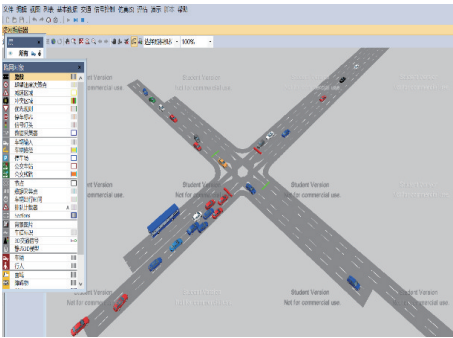


图5 VISSIM仿真图二

采用VISSIM软件仿真,仿真5个信号周期,得到该干线上车辆的平均延误时间和平均排队长度。从表7的结果可以得到,由西向东的干线上,采用基于可靠度的干线协调优化控制模型平均延误时间较少,提高率为13.7%,平均排队长度较短,提高率为15.4%。由东向西的干线上,平均延误提高率为15.5%,平均排队长度提高率为25.4%。

5 结 语

本文在城市交通拥堵日趋严峻的背景下,通过对文献调查和工程实测数据的统计分析和计算,开展基于可靠度的城市道路交通信号配时优化方案研究,借助 VISSIM 仿真软件,通过系统、科学的分析和计算,取得了相应的研究成果,结论如下。

(1)在单点信号交叉口的基础上,对于干线上4个交叉口进行干线协调控制,运用基于可靠度的干线协调优化控制模型进行干线协调优化,得到各交叉口之间的信号配时方案、相位差和绿波带宽。同时,对比传统的 MAXBAND 绿波带控制模型优化后的干线信号配时方案,采用 VISSIM 仿真求解2个模型的平均延误时间和平均排队长度。结果发现,当干线交叉口车流量未达到饱和状态时,采用基于可靠度的干线协调优化控制模型可减少车辆的停车次数和延误时间,提高道路的通行能力。

(2)相较于传统的 MAXBAND 绿波带控制模型,基于可靠度的干线协调优化控制模型虽然提高了道路整体的通行能力,但也存在一定的局限性,此模型仅适用于交通流处于未饱和状态下,且直行、左转和右转车道单独分开,各方向仅有1条直行车道的交叉口道路,对于饱和状态下的交通流及混行车道(直左、直右)的适用性有待进一步研究。

(3)本次研究建立的基于可靠度的干线协调优化控制模型,均采用单目标控制方法进行优化研究。然而在实际生活中,交通系统的随机性大、复杂性高。本次研究中的交通数据样本点较少,未来有待进一步收集、整理大数据样本,并结合实际应用效果优化成果。

参考文献:

- [1] MICHAEL G H, BELL, CASSIR C. Risk-averse User Equilibrium Traffic Assignment: An Application of Game Theory[J]. Transportation Research Part B, 2002, 36(8): 52-46.
- [2] LO H K. A Reliability Framework for Traffic Signal Control[J]. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(2): 250-260.
- [3] 吕斌,牛惠民.信号控制交叉口可靠性建模与仿真[J].交通运输系统工程与信息,2011(6):49-54.
- [4] 吕斌,牛惠民.随机条件下单点交叉口信号配时优化[J].交通运输工程学报,2010,10(6):116-120.
- [5] 马志芳.信号交叉口可靠性优化建模与仿真[D].兰州:兰州交通大学,2021.
- [6] 马志芳,蒋亚丽.信号交叉口可靠度建模[J].青海交通科技,2021,33(1):22-30.
- [7] 于泉,戴帅,任福田.信号交叉口固定配时控制方案可靠度研究[J].北京工业大学学报,2007(10):64-67.
- [8] 郑慧敏,况爱武,段倩倩.信号交叉口车流到达分布实证研究[J].交通科学与工程,2018,34(2):91-95.
- [9] 刘刚,况爱武,郑慧敏.考虑服务水平可靠度的单点交叉口信号配时研究[J].交通科技与经济,2017(2):42-46.
- [10] 郑慧敏.考虑可靠性的交叉口信号控制方法研究[D].长沙:长沙理工大学,2019.
- [11] 李长光.考虑可靠性的城市区域交通信号控制方法研究[D].南京:东南大学,2018.
- [12] 白紫秀,李汝鉴,田一栋,等.道路拥堵水平对公交行程时间可靠度的影响研究[J].北京建筑大学学报,2021,37(4):34-42.
- [13] 郭志勇,王炜.基于行程时间可靠度的区域交通控制系统评价方法[J].东南大学学报(自然科学版),2010,40(4):848-851.
- [14] MA W J, AN K, LO H K. Multi-stage Stochastic Program to Optimize Signal Timings under Coordinated Adaptive Control[J]. Transportation Research Part C, 2016: 72.
- [15] 李军,邓育新,黄柳红.基于服务可靠性的公交到站时刻表编排与评价[J].中山大学学报(自然科学版),2020,59(5):86-94.
- [16] 赖元文,马振鸿.公交乘客可靠度信号配时优化[J].福州大学学报(自然科学版),2021,49(3):428-434.
- [17] 沈正航,许旭阳,王梓豪,等.单交叉口信号配时优化方法效果对比研究[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2023,39(3):378-384.
- [18] 张伟斌,白孜帅,李熙莹.基于轨迹数据的单交叉口信号配时优化方法[J].交通信息与安全,2020,38(4):132-138.
- [19] 徐琛辉,马明辉,王栋.城市道路混合交通流道路交叉口信号配时优化方法[J].农业装备与车辆工程,2021,59(4):106-109.
- [20] 沈国江,陈文峰.方案选择式区域协调控制方法及应用[J].浙江工业大学学报,2016,44(3):237-241.
- [21] 魏勇.城市区域交通信号控制及交通状态分析研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [22] 宋现敏.城市交叉口信号协调控制方法研究[D].长春:吉林大学,2008.
- [23] ZHANG L, WU W M, HUANG X W. A Dynamic Optimization Model for Adjacent Signalized Intersection Control Systems Based on the Stratified Sequencing Method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition), 2016, 10(1): 58-62.
- [24] 唐克双,孔涛,王奋.一种改进的多带宽干线协调控制模型[J].同济大学学报(自然科学版),2022,41(7):1002-1008.
- [25] 宋静静.主干线交通信号协调控制优化研究[J].科技创新与应用浙江工业大学学报,2024,31(36):153-156.
- [26] 王殿海,李凤,宋现敏.干线协调控制中公共周期优化方法研究[J].交通信息与安全,2009,27(5):10-13.
- [27] 卢顺达,程琳.非对称相位相序方式下的双向绿波协调控制图解法的优化[J].公路交通科技,2015(1):95-103.
- [28] 刘光柱.动态双向绿波优化控制研究[D].合肥:中国科学技术大学,2010.
- [29] 刘小明,王力.基于综合绿波带最宽的交叉口信号协调控制优化方法[J].吉林大学(工学版),2013,43(1):62-67.
- [30] 周巧琪.基于 VISSIM 仿真的非常规信号交叉口设计和控制方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2019.
- [31] 高萌悦,马晓旦.基于 VISSIM 仿真的信号交叉口优化研究[J].物流科技,2024,9(5):98-101.
- [32] 陈厚廷,李昊,张麦宣,等.基于 VISSIM 仿真的混行交叉口优化研究[J].湖北工业大学学报,2023,38(2):79-83.