

考虑转弯半径的错位交叉口信号控制方法

包家烁^{1,2,3}, 彭思杰⁴, 谷文雄⁵

- (1. 中交远洲交通科技集团有限公司, 河北 石家庄 050035; 2. 中交远洲(北京)研究院, 北京 100027;
3. 新渡工程咨询(北京)有限公司, 北京 100027; 4. 中国铁路广州局集团有限公司, 广东 广州 510030;
5. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对城市道路错位交叉口几何线形及交通组织的特点, 考虑转弯半径对交叉口车辆运行的影响, 通过 VISSIM 仿真软件建立了错位交叉口几何参数与运行参数的关系模型, 提出了两种适用于错位交叉口的信号控制方案, 并以长沙市曙光南路-劳动中路-曙光中路形成的错位交叉口为研究对象, 通过 VISSIM 软件进行仿真验证与对比分析。研究结果表明: 行驶速度和饱和流率随交叉口转弯半径的增大而增大; 行车延误随交叉口转弯半径的增大而减小; 对于近距离错位交叉口, 对饱和流率进行折减后采用协调控制可以减少车辆的平均延误, 提高交叉口的通行能力和服务水平。

关键词: 错位交叉口; 信号控制; 转弯半径; 交通仿真

中图分类号: U491.54

文献标识码: A

Signal Control Method of Misaligned Intersection Considering Turning Radius

BAO Jiashuo^{1,2,3}, PENG Sijie⁴, GU Wenxiong⁵

- (1. Chinaroads Communications Science & Technology Group Co., Ltd, Shijiazhuang 050035, Hebei, China;
2. Chinaroads Beijing Research Institute, Beijing 100027, China; 3. Xindu Engineering Consulting (Beijing) Co., Ltd, Beijing 100027, China; 4. China Railway Guangzhou Group Co., Ltd, Guangzhou 510030, Guangdong, China;
5. School of Traffic and Transportation of Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, Hunan, China)

Abstract: In view of the characteristics of the geometric alignment and traffic organization of the urban misaligned intersection, considering the influence of the turning radius on the vehicle operation at the intersection, the relationship model between the geometric parameters and the operating parameters of the misaligned intersection is established through the VISSIM simulation software, and two signal control schemes are proposed. After that this paper takes the misaligned intersection formed by Shuguang South Road - Labor Middle Road - Shuguang Middle Road in Changsha as a case study, and the simulation verification and comparative analysis are carried out by VISSIM software. The research results show that: the driving speed and saturation flow rate will increase with the increase of the turning radius; the driving delay will decrease with the increase of the turning radius; for the misaligned intersection, the coordinated control after reducing the saturation flow rate can reduce the average vehicle delay and improve the capacity and service level of the intersection.

Key words: misaligned intersection; signal control; turning radius; traffic simulation

随着我国汽车保有量的迅速增长, 城市交通问题日益凸显, 交叉口是城市交通网络的节点, 制约着整个城市道路网的通行能力, 是城市交通管理的重点和难点。交叉口的形式众多, 错位交

收稿日期: 2022-12-13

作者简介: 包家烁, 中级经济师, 硕士, 研究方向为交通运输规划与管理

基金项目: 长沙理工大学专业学位研究生实践创新与创业能力提升计划项目 (编号: SJCX202111)

叉口是一种比较特殊的平面交叉口,其由两个间隔较近的交叉口组合而成,两个交叉口的间距一般在100~500 m^[1]。由于道路走向、土地利用情况以及一些特殊的社会和历史原因,错位交叉口多位于老旧城区,往往存在几何线形不规则、交通冲突复杂等诸多问题,经常导致交叉口的功能紊乱,产生交通拥堵。

目前对错位交叉口进行优化的思路主要有两种,一是对其进行物理改造,即改变错位交叉口的道路几何线形,把错位交叉口修正为正交的交叉口^[2-3];二是对错位交叉口进行合理的交通组织与信号控制^[4-6]。由于错位交叉口大多数位于老旧城区,通过调整道路线形来改造错位交叉口往往会带来大面积的拆迁,对周边区域交通的正常运行和周边居民的生活造成影响,实施起来较为困难^[7]。因此,从系统最优的角度出发,充分利用现有道路资源,对错位交叉口进行合理的交通组织与信号控制,从而最大限度地提高错位交叉口的通行能力,是改善错位交叉口切实可行的途径,对于提升城市道路网的运行效率具有重要意义。

1 错位交叉口几何参数-运行参数关系模型

几何线形对交叉口的信号控制有着重要影响,不同的错位交叉口往往存在不同的几何线形。为了发现错位交叉口运行的内在规律,利用VISSIM仿真软件建立错位交叉口的几何参数-运行参数关系模型,从而进一步提出适用于错位交叉口的信号控制优化方法。

1.1 转弯半径-行驶速度关系模型

转弯半径是交叉口一个重要的几何参数,影响着转弯车辆的通行效率和行车安全。在剔除异常数据后,在SPSS软件中选取不同的曲线模型对转弯半径和行驶速度进行回归分析,相关系数最高的模型为对数模型,回归曲线如图1和图2所示,左转速度和左转半径、右转速度和右转半径均呈对数函数关系,行驶速度随转弯半径的增大而增大。转弯半径与行驶车速的回归方程如式(1)和式(2)所示,相关系数分别为0.878和0.939。

$$V_l = 12.35 \ln r_L - 13.71 \quad (1)$$

$$V_r = 7.22 \ln r_R + 8.86 \quad (2)$$

式中, V_l 为左转车辆行驶速度 (km/h); V_r 为右转车辆行驶速度 (km/h); r_L 为左转半径 (m); r_R 为右转半径 (m)。

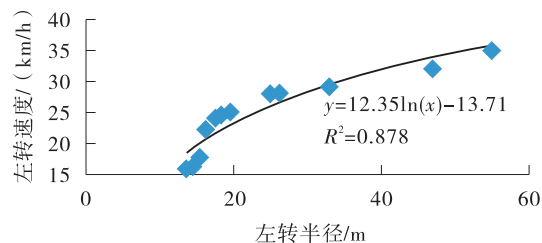


图1 左转速度-左转半径回归曲线

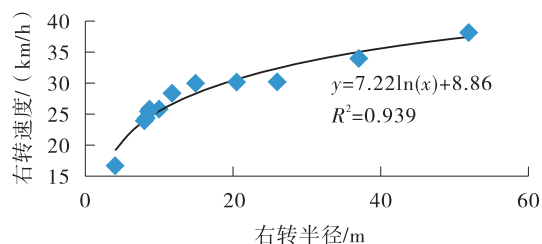


图2 右转速度-右转半径回归曲线

1.2 转弯半径-行车延误关系模型

行车延误是评价交叉口服务水平的重要指标,剔除异常数据后,在SPSS软件中选取不同的曲线模型对转弯半径和行车延误进行回归分析,相关系数最高的模型为幂函数模型,回归曲线如图3和图4所示,行车延误随转弯半径的增大而减小。转弯半径与行车延误的回归方程如式(3)和式(4)所示,相关系数分别为0.706和0.774。

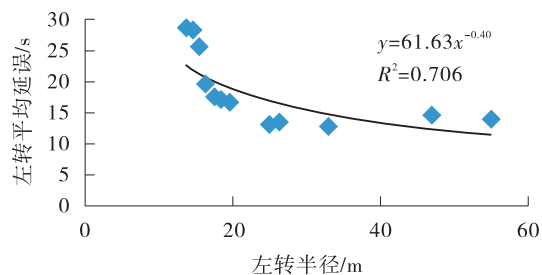


图3 左转延误-左转半径回归曲线

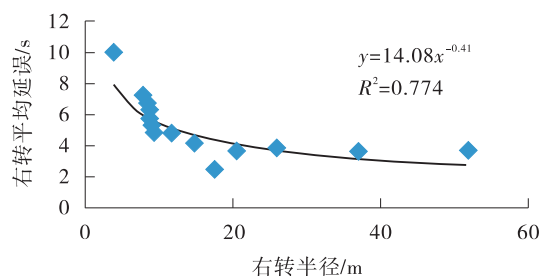


图4 右转延误-右转半径回归曲线

$$d_L = 61.63 r_L^{-0.40} \quad (3)$$

$$d_R = 14.08 r_R^{-0.41} \quad (4)$$

式中, d_L 为左转车辆平均延误 (s); d_R 为

右转车辆平均延误 (s); r_L 为左转半径 (m); r_R 为右转半径 (m)。

1.3 转弯半径 – 饱和流率关系模型

饱和流率是指不考虑绿信比的情况下交叉口某一进口车道组所能通过的最大流量, 是计算信号配时的关键参数。由转弯半径 – 行驶速度关系模型可知, 当交叉口的转弯半径较低时, 由于行驶速度降低, 饱和流率也会相应减小, 故需对左转车道的饱和流率进行修正。在 VISSIM 平台中建立理想条件下不同转弯半径的交叉口模型, 得到不同转弯半径的饱和流率及修正系数, 结果见表 1。得到修正后的饱和流率后, 需要根据交叉口的实际交通状况进一步修正为实际饱和流率^[8]。

表 1 饱和流率修正系数表

转弯半径/m	饱和流率/(pcu/h)	理想饱和流率/(pcu/h)	修正系数
10	1144	1800	0.64
15	1276	1800	0.71
20	1488	1800	0.83
25	1514	1800	0.84
30	1590	1800	0.88
35	1662	1800	0.92
40	1696	1800	0.94

2 错位交叉口信号控制方法

2.1 整体控制

整体控制是将两个错位的交叉口作为一个交叉口来进行信号控制, 在进行整体控制方案设计时, 首先对错位交叉口各进口道不同流向的车辆和行人进行分组和编号, 如图 5 所示。然后进行相位设计, 进行相位设计时应充分考虑错位交叉口的特点, 若采用常规的相位方案, 由于中间路段距离较短且无法得到有效利用, 可能会出现车流回溢的情况, 因此设置组合相位, 从而充分利用中间路段, 使两侧进口车辆与中间路段等待车辆相衔接, 相位设计方案如图 6 所示。

最后确定各相位的信号配时, 采用韦伯斯特方法计算信号配时^[9], 首先计算最佳周期, 然后根据各相位的最大流量比分配绿灯时间, 最佳周期的计算公式如下:

$$C_0 = \frac{1.5L + 5}{1 - Y}$$

(5)

式中, C_0 为最佳周期时长 (s); L 为周期损失时间 (s); Y 为交叉口总流量比。

由于相位设计中存在组合相位, 在分配绿灯时间时应将相位 A、相位 B 和相位 C 作为第一组相位, 将相位 D 作为第二组相位, 首先计算第一

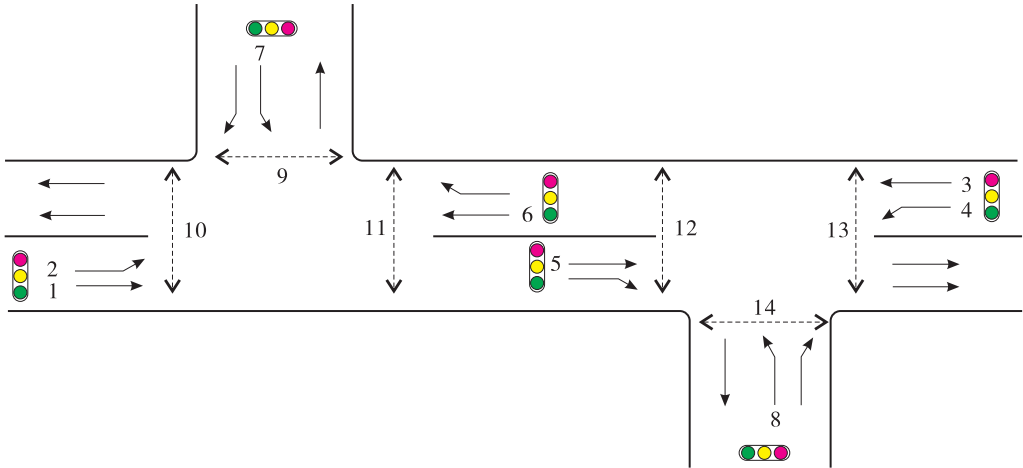


图 5 错位交叉口进口道车流与行人编号

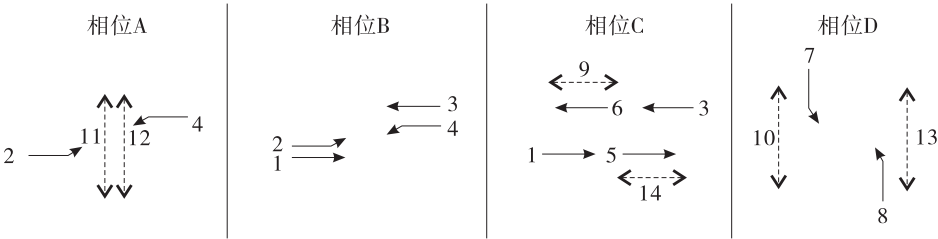


图 6 错位交叉口整体控制相位设计

组相位和第二组相位的有效绿灯时间,然后将第一组相位的有效绿灯时间继续分配给相位 A、相位 B 和相位 C,若第一组相位的关键车流为 2 号和 3 号车流,第二组相位的关键车流为 8 号车流,则分配方式如下:

$$\begin{aligned} G_1 &= (y_2 + y_3) / (y_2 + y_3 + y_8) G_e \\ g_A &= y_4 / (y_2 + y_3) G_1 \\ g_B &= (y_2 - y_4) / (y_2 + y_3) G_1 \\ g_C &= y_3 / (y_2 + y_3) G_1 \\ G_2 &= y_8 / (y_2 + y_3 + y_8) G_e \end{aligned} \quad (6)$$

得到各相位的有效绿灯时间后,再根据式(7)计算得到各相位的显示绿灯时间。

$$g_i = g_{ei} + l_i - A_i \quad (7)$$

式中, g_i 为相位 i 的显示绿灯时间 (s); g_{ei} 为相位 i 的有效绿灯时间 (s); l_i 为相位 i 的损失时间 (s); A_i 为相位 i 的黄灯时间 (s)。

2.2 协调控制

协调控制是将错位交叉口作为两个独立的交叉口进行控制,即先对两个交叉口分别进行信号配时,然后再设置相位差来协调主路方向的车流。初始相位差可根据式(8)来计算,然后绘制时空图不断调整取得最优相位差^[10]。

$$S_{ij} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}} \quad (8)$$

式中, S_{ij} 为 i 交叉口与 j 交叉口的初始相位差 (s); L_{ij} 为 i 交叉口与 j 交叉口之间的间距 (m); V_{ij} 为车辆在 i 交叉口与 j 交叉口之间的速度 (m/s)。对两个独立的交叉口进行信控方案设计时,可以按照常规 T 型交叉口来进行相位设计,信号配时仍采用韦伯斯特方法,取周期时长较大的交叉口的周期作为公共周期。

3 案例分析

3.1 现状分析

长沙市曙光南路-劳动中路-曙光中路所形成的错位交叉口位于长沙市雨花区,其中劳动中路为次干路,曙光南路和曙光中路为支路,交叉口交通组织与渠化现状如图 7 所示。该交叉口目前采用让路控制,次路车辆让行主路车辆。该交叉口位于老城区,附近公交站点和行人较多,通过交叉口的车辆种类主要有小汽车,大型公共汽车和非机动车,交叉口的高峰小时交通量见表 2。由于该交叉口未设信号控制,且晚高峰时段内交通量较大,导致左转车辆和直行车辆冲突严重,

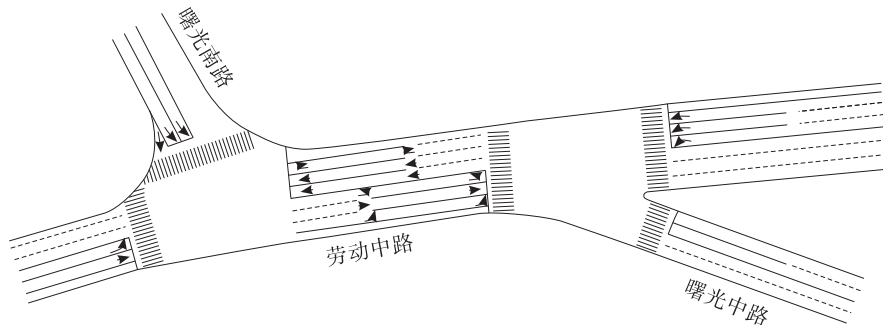


图7 长沙市曙光南路-劳动中路-曙光中路交叉口交通组织与渠化现状

而且晚高峰期间行人和非机动车交通量较多,极易和机动车产生冲突并发生事故。

表2 曙光南路-劳动中路-曙光中路交叉口

进口道	高峰小时交通量				单位: pcu/h
	左转	直行	右转	掉头	
曙光南路	517	—	282	—	
曙光中路	645	—	—	—	
劳动中路北进口	166	1128	—	20	
中间路段(往南)	—	1016	512	—	
劳动中路南进口	556	1025	—	—	
中间路段(往北)	—	1084	421	36	

3.2 渠化设计

在该交叉口进行信号配时之前,首先进行渠化方案设计。该交叉口主线方向上对向直行交通量相当,和北进口相比,南进口只有两条机动车道和一条非机动车道,故优化南进口的车道配置,将南进口的非机动车道改为机非混行车道,改造前后的南进口横断面如图 8 和图 9 所示。



图8 南进口横断面改造前示意图

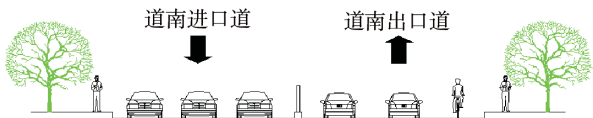


图 9 南进口横断面改造后示意图

3.3 信号配时与仿真分析

采用前文提出的两种信号控制方案对该交叉口进行信号配时, 首先根据转弯半径 - 饱和和流率关系模型对该交叉口进口道的理想饱和和流率进行修正, 然后根据实际条件计算得到各进口道的实际饱和和流率, 计算结果见表 3。

表 3 曙光南路 - 劳动中路 - 曙光中路交叉口进口道车道组饱和和流率

进口道	南进口		北进口		曙光南路	曙光中路
计算参数	左转	直行	左转	直行	左转	左转
理想饱和和流率	1670	1800	1630	1800	1730	1750
车道数	1	2	1	2	2	2
宽度修正系数	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
重型车修正系数	0.99	0.92	1	0.92	0.97	0.97
地区类型系数	1	1	1	1	1	1
右转修正系数	1	1	1	1	1	1
左转修正系数	0.95	1	0.95	1	0.95	0.95
实际饱和和流率	1460	3080	1413	3080	2965	3000

采取整体控制方案时, 根据式 (5) 计算得到交叉口的最佳信号周期为 120 s, 根据式 (6) 和式 (7) 计算得到各相位的显示绿灯时间, 结果见表 4。

表 4 整体控制信号配时参数 单位: s

配时参数	相位 A	相位 B	相位 C	相位 D
周期时长	120	120	120	120
绿灯时长	18	27	43	26
黄灯时长	0	0	3	3
红灯时长	102	93	74	91

采取协调控制方案时, 首先分别对两个交叉口进行相位设计, 相位方案如图 10 所示。同理根据式 (5) 计算得到劳动中路 - 曙光南路交叉口和劳动中路 - 曙光中路交叉口的信号周期分别为 70 s 和 45 s, 故进行协调控制时的公共周期为 70 s, 劳动中路 - 曙光中路交叉口协调方向车流的绿灯时间随之延长, 两个交叉口各相位的信号配时参数见表 5。

根据式 (8) 计算得到两个交叉口的初始相位差为 13 s, 绘制干线时空图反复调整速度和相

交叉口	相位		
	A	B	C
劳动中路-曙光南路	1 → 6 ←	2 ↓ 3 ↗	7 ↘ 8 →
劳动中路-曙光中路	5 → 6 ←	4 ↖ 3 ↗	7 ↘ 8 →

图 10 协调控制相位设计

表 5 协调控制信号配时参数

交叉口	相位	放行车流	周期时长/s	绿灯时长/s	黄灯时长/s	红灯时长/s
劳动中路 - 曙光南路	A	1, 6	70	24	3	43
	B	2	70	22	3	45
	C	7	70	15	3	52
劳动中路 - 曙光中路	A	3, 5	70	31	3	36
	B	4	70	15	3	52
	C	8	70	15	3	52

位差, 直到两个方向获得最大绿波带宽度, 如图 11 所示。为了获得最优的协调控制效果, 将劳动中路 - 曙光中路交叉口的 B、C 相位合并为一个相位, 保持交叉口周期时长不变, 将多余绿灯时间分配给主路车流。此时相位差为 20 s, 绿波带宽度为 24 s, 是周期时长的 34%。

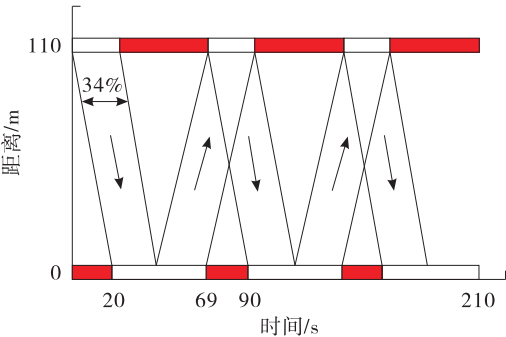


图 11 曙光南路 - 劳动中路 - 曙光中路交叉口干线时空图

在 VISSIM 仿真软件中建立曙光南路 - 劳动中路 - 曙光中路交叉口模型, 对两种信号控制方案进行仿真分析, 仿真运行结果见表 6。根据仿真结果, 协调控制方案下直行车辆延误和左转车辆延误均低于整体控制, 整体控制下车辆的平均控制延误为 44.9 s, 服务水平为 D 级; 协调控制下车辆的平均控制延误为 33.6 s, 服务水平为 C 级, 且通行能力更大。因此对于近距离错位交叉口采用协调控制方案可以取得更好的控制效果。整体控制仿真运行图和协调控制仿真运行图分别见图 12 和图 13。

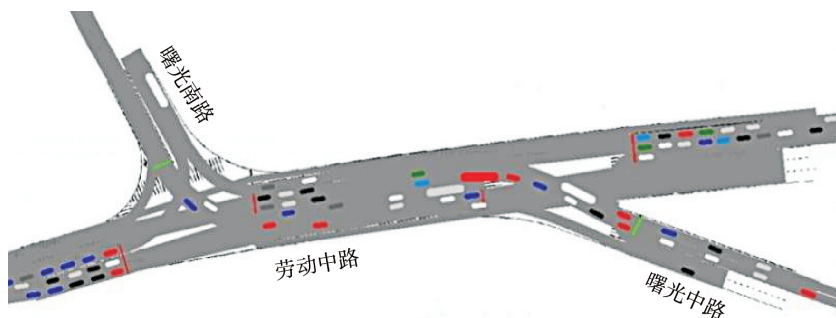


图12 整体控制仿真运行图

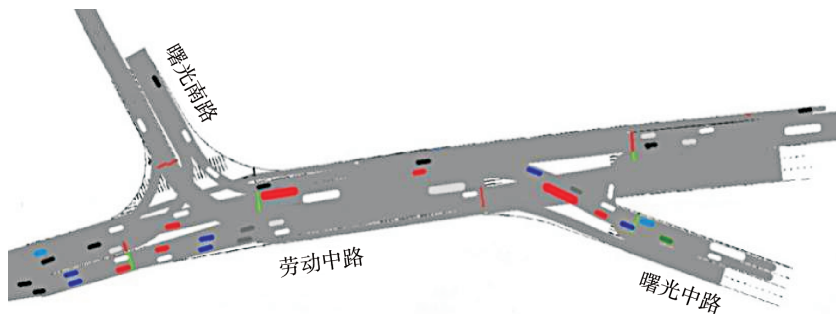


图13 协调控制仿真运行图

表6 仿真运行结果

控制方案	直行 延误/s	左转 延误/s	平均 延误/s	通行能力/ (pcu/h)	服务水平
整体控制	39.0	46.5	44.9	3522	D
协调控制	30.3	40.5	33.6	3870	C

4 结语

本文考虑转弯半径的影响,利用 VISSIM 仿真软件建立了错位交叉口几何参数-运行参数的关系模型,进一步提出了两种适用于错位交叉口的信号控制方案,最后选取长沙市曙光南路-劳动中路-曙光中路交叉口作为案例进行分析以及仿真验证,研究得出如下结论:①交叉口的转弯半径会影响行驶速度和饱和流率,在进行信号配时参数计算时,应根据转弯半径对左转车道的饱和流率进行修正;②对于近距离错位交叉口,采取协调控制方案可以减少交叉口车辆的平均延误,提高交叉口的通行能力和服务水平;③当错位交叉口中间路段的长度过小不宜采取协调控制时,可以采用整体控制方案,亦能取得比常规信号控制方案好的效果。

参考文献:

- [1]王鹏飞,薛艺,李政,等.基于 Synchro-VISSIM 系统的畸形交叉口改善及评价方法[J].河北科技师范学院学报,2013,27(3):64-71.
- [2]杨永红,刘宁.城市错位交叉口交通改善措施研究——以赣州河套老城区为例[J].城市道桥与防洪,2021(10):32-36,10-11.
- [3]曹旭东,刘鹏鹏,郑鹏,等.近距离错位交叉口的新型交通渠化方法[J].交通标准化,2014,42(19):7-12.
- [4]王婧,吴炼,何杰.城市错位交叉口信号控制方案优化研究[J].交通信息与安全,2012,30(3):20-24.
- [5]胡楠,范英飞,贾志绚.T型错位交叉口的精细化交通组织[J].太原科技大学学报,2022,43(5):453-458.
- [6]何春光,刘小勇,孙亮,等.城市道路错位交叉口信号协调控制方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2013,32(6):1224-1227.
- [7]卢贵忠,马晶晶.平面畸形交叉口交通组织的优化思路[J].交通与运输,2017,33(2):23-24.
- [8]任福田.道路通行能力分析[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [9]王炜.交通工程学[M].南京:东南大学出版社,2000.
- [10]吴兵.交通管理与控制[M].北京:人民交通出版社,2005.