

文章编号: 2095-2163(2020)04-0225-06

中图分类号: U412.1+2

文献标志码: A

基于安全-效率的城市道路交叉口信号优化评价

胡 荣¹, 陈相宇², 陈昀喆¹

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 浙江海洋大学 港航与交通运输工程学院, 浙江 316022)

摘要: 交通安全已成为城市道路交通亟待解决的重要问题之一。针对以往信号交叉口优化评价指标存在的问题, 本文兼顾交叉口的交通安全和通行效率, 利用交通冲突技术和 Webster 优化方法, 结合多种微观交通仿真软件, 提出了一种安全-效率多目标的交叉口信号控制优化方法。运用 VISSIM 微观仿真和 SSAM 软件, 从通行效率和安全性等级角度进行交叉口信号评价与优化。实验结果表明, 该优化方法使交叉口通行效率提高 26.4%, 安全性提高 22.3%。

关键词: 交通安全; 道路交叉口; 微观仿真; SSAM; 评价与优化

Optimization and Evaluation of Urban Road Intersection Signal Based on Safety and Efficiency

HU Rong¹, CHEN Xiangyu², CHEN Yunzhe¹

(1 Management Institute, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China;

2 School of Port and Transportation Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhejiang, 316022, China)

[Abstract] Traffic safety has become one of the most important issues in urban road traffic. Aiming at the single evaluation index of the previous signalized intersection optimization, this paper took into account the traffic safety and traffic efficiency at the intersection by using the traffic conflict technology and Webster optimization method. Combining with a variety of microscopic traffic simulation software, this paper proposed a multi-objective intersection signal control optimization method based on safety and efficiency. With the empirical inference of the intersection of Xuehai road of Xianlin avenue, we evaluated and optimized the intersection signal from the perspective of traffic efficiency and safety level in the software of VISSIM microsimulation and SSAM. The experimental results show that the optimization method can effectively improve the traffic efficiency of intersections by 26.4% and improve the safety by 22.3%.

[Key words] Traffic safety; Road intersections; Micro simulation; SSAM; Evaluation and optimization

0 引言

随着我国经济快速增长和居民生活水平的提高, 各类交通工具数量成倍增加, 城市道路交通拥堵问题变得愈加严重, 导致交通事故频频发生。据《道路安全全球现状报告 2018》数据统计, 2018 年全球死于交通事故的人数多达 135 万, 平均每 23 s 就有一人死于交通事故, 国际交通安全形势严峻。作为城市道路网络的重要节点, 道路交叉口每天汇入和流出了大量的交通流, 其通行效率和安全性直接关系到城市整个道路交通系统的畅通程度。由不同流向交通冲突和大量交通流导致的交叉口事故和延误会制约整个城市道路网的通行能力^[1]。因此, 从道路交叉口角度进行交通优化设计是提升交通通行效率、提高城市交通路网安全性、避免交通事故发生以及减少交通冲突的重要手段。

当前, 提高交叉口的安全性等级和通行效率的

措施主要分为两类: 基于空间的交叉口优化法和基于时间的交叉口优化法。基于空间的交叉口优化方法以渠化交通和修建立交等方式为主, 而基于时间的交叉口优化方法则主要以交叉口信号配时优化为主。针对交叉口信号配时优化方法, 国内外不少学者主要从提高交叉口通行效率、减少交叉口延误时间、缩短交叉口最大排队长度等方面做了研究。周亚平等^[2]针对交叉口运行低效问题, 建立了基于线性规划模型的优化信号灯配时方法, 经优化交叉口对连续流交叉口和上游信号交叉口通行能力提升显著, 分别提高了 77% 和 89%。刘伟等^[3]以通行能力最大和延误最小为目标, 利用 NSGA-II 双目标优化算法优化信号配时, 使交叉口控制效率效果显著。王春娥等^[4]以延误、最大排队长度、平均停车次数等多指标综合评估单点交叉口最优信号模型, 对比单一指标信号模型结果发现, 采用多个指标评价交

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目(XJ2019145)。

作者简介: 胡 荣(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 交通运输规划。

通讯作者: 胡 荣 Email: hurong950813@163.com

收稿日期: 2020-01-05

叉口,更适于获取交叉口最优信号周期。刘小明等^[5]以平均延误和平均停车次数为指标,利用 MFD 控制优化模型进行全局优化和动态调整,对过饱和区域交通运行效率方面改善显著。郭建钢^[6]等以延误和停车次数为指标,应用 Synchro 仿真软件建立干道信号协调控制系统,使交叉口、路段、路网三方面早晚高峰运行效果大幅度提升。常云涛等^[7]以车均延误和排队长度为指标,提出了连续流交叉口信号配时优化模型和最优相位差模型,结合案例,证实该优化模型对降低车辆延误、改善交通通行能力有突出贡献。

综上所述,已有研究多以机动车通行效率最大化、延误时间最短、最大排队长度为目标优化交叉口信号控制,极少能综合考虑交叉口交通安全问题对

信号控制进行优化。为此,本文结合 VISSIM 软件和基于安全模型 SSAM 软件,以延误、最大排队长度、单位小时最大排队长度、安全性等级等多指标为目标,提出了一种基于交通冲突技术、考虑交通安全性等级的信号交叉口优化方法,并以南京市仙林大道学海路交叉口为例,利用该方法定量比较优化前后的交叉口通行效率和安全状况,探讨本研究提出的信号交叉口优化方法对交叉口通行效率和安全性的提升效果。

1 评价优化方法

本文综合考虑交通安全及通行效率,结合 VISSIM 和 SSAM 软件,先后对交叉口进行模拟仿真、仿真分析、安全性等级评价、基于 webster 模型的仿真优化。研究思路如图 1 所示。

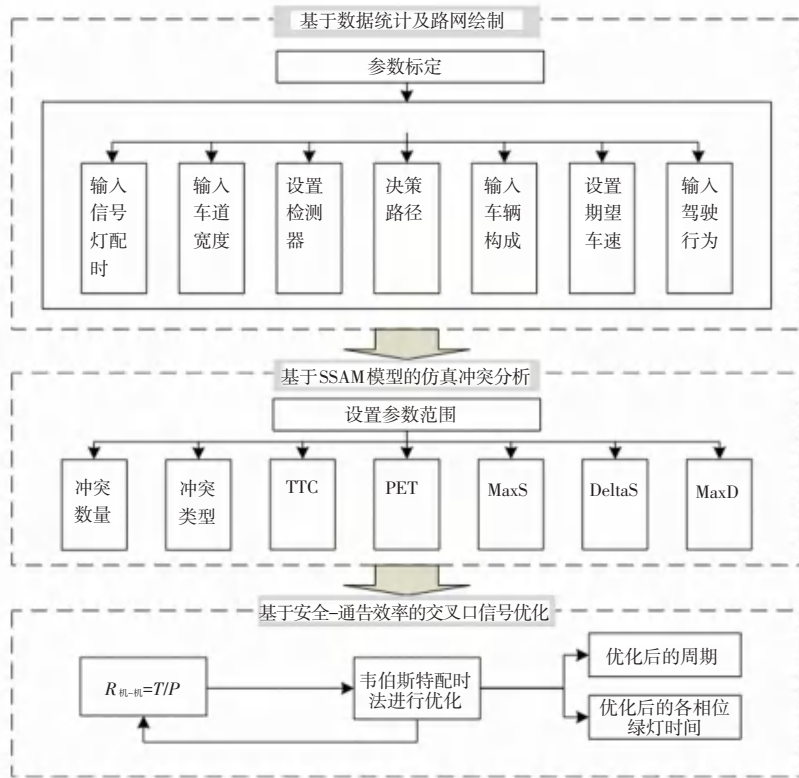


图 1 思路流程图

Fig. 1 Thought flow chart

1.1 基于 VISSIM 的交叉口模拟仿真

VISSIM 是一种基于时间间隔和驾驶行为离散随机模型的微观交通流仿真系统,由德国 PTV 公司开发而成。相较于 PARAMICS、AIMSUN、CUBE、EMME 等微观交通仿真软件,VISSIM 在识别严重冲突、模拟道路车辆运行轨迹等方面精度更为灵敏、应用更为成熟、操作更为便捷,被广泛用于实际道路二

维或三维的交通状况模拟和参数获取等方面。因此,本文采用 VISSIM 实现对交叉口现状的模拟仿真,获取交叉口交通流特性及基础设施参数等信息。首先,针对当前交叉口交通现状进行路网绘制,标定车辆属性和构成、路径决策、驾驶行为、车道宽度、各相位信号配时等参数。之后,在交叉口各出口道的出口处,设置数据检测器和排队计数器,分别对单位

时间内通过车辆数量和排队长度进行检测,在各进口道的起点处设置行程时间检测器,对延误和行程时间检测。通过软件对交叉口基础特征和交通状况进行仿真再现,并获取交叉口各进口机动车道的最大排队长度、延误、单位小时内通过车辆数以及包含车辆速度及加速度的 TRJ 轨迹文件。

1.2 基于 SSAM 模型的仿真冲突分析

安全间接分析模型(SSAM)是一种基于网络的冲突识别分析模型,由美国联邦公路局研发,主要用于获取轨迹文件中车辆的距离冲突发生时间(TTC)、前车通过某个位置与后车通过同一位置的时间差(PET)、后车在冲突过程避险的初始减速度(DR)、冲突车辆的最大速度(MaxS)和冲突车辆间最大相对速度(DeltaS)等分析指标。不同于传统人工观测法和录像观测法^[8]。该交通仿真分析模型在数据获取和数据分析方面优势突出,具体包括:①数据获取渠道不受外界自然条件影响,不需要大量的人力物力,获取成本较低;②获取的冲突数据不受观测人员的主观影响,数据更为真实客观;③模型在数据处理方面更为便捷,能快速获取大量交通流的基础特征参数。

基于 SSAM 模型的仿真冲突原理示意如图 2 所示。在此以左转车 A 和直行车 B 之间的交叉冲突为例进行阐述。图中, t_i 表示随着仿真步长增加的连续仿真时刻, $i = 1, 2, 3, \dots$; $x_j(t_i)$ 表示 t_i 时刻车辆 j 实际运行位置, $j = A, B, \dots$ 。进行仿真冲突分析时,默认设定 $TTC \in [0, 1.5]s$, $PET \in [0, 5]s$ 。首先,将 VISSIM 仿真输出的轨迹文件投影到可以覆盖整个仿真轨迹的网格上,以单位时间步长分析轨迹文件,计算车辆 A 保持减速前的车速在 TTC 临界值时间内可运行的距离 S_1 , 以及第一个单位时间步长内两车实际距离 S_2 。若 $S_2 < S_1$, 则令 S_1 为 S_1 与 S_2 之差, 令 S_2 为下一个单位步长内两车实际距离, 直到有轨迹段满足 $S_2 \geq S_1$ 为止。同样,采用该方法对车辆 B 行驶轨迹进行处理,观测两车轨迹段是否有重合。若有重合,且 $TTC < 1.5s$ 时,则判定两车发生交通冲突,反之,则没有交通冲突^[9]。随后,根据两车车头之间的夹角(又称冲突角度)与冲突发生位置,确定冲突类型。若冲突车辆始终同行驶于一条道路,且冲突角度在 $0^\circ \sim 30^\circ$, 则视该冲突为追尾冲突;若同路段冲突车辆发生在变换车道位置,且冲突角度在 $30^\circ \sim 80^\circ$, 则视为变道冲突;若冲突车辆处于交叉口发生变换路段,冲突且角度在 $80^\circ \sim 180^\circ$ 之间,则认定为交叉冲突。

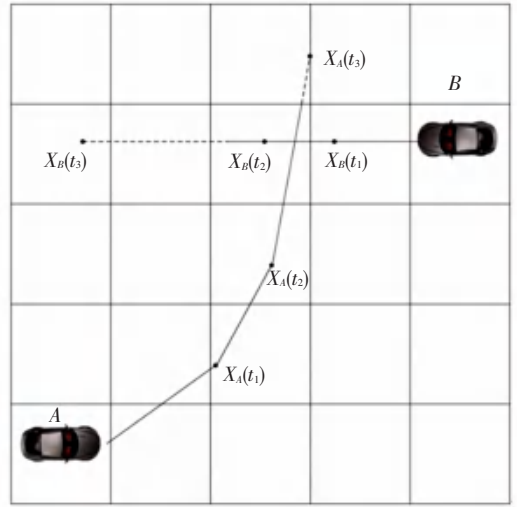


图 2 冲突模型示意图

Fig. 2 Conflict model diagram

1.3 基于安全—通行效率的交叉口信号评价优化

综合考虑交叉口安全性和通行效率,先后对交叉口进行评价。针对安全性和通行效率不高的交叉口,利用信号配时优化模型进行信号控制优化,对比信号优化方案前后交叉口安全性等级和通行效率指标,综合判定信号优化方案优劣,循环往复测试确定最终信号交叉口信号配时优化方案。其中,交叉口安全等级主要基于机动车间冲突率和《交通安全城市分级评价标准》确定。交叉口的安全等级主要取决于大流量机动车背景下的各流向机动车间冲突为主,具体机动车冲突率计算公式如下:

$$R_{\text{机-机}} = \frac{T}{P} \quad (1)$$

式中, $R_{\text{机-机}}$ 为机动车与机动车之间的交通冲突率; T 为交叉口单位小时内机动车之间的交通冲突数; P 为参与对象机动车与机动车当量交通量。《交通安全城市分级评价标准》是参照江苏省大量实地调查、交通冲突率评价以及交通安全相关资料而设定的,其中, $R \leq 0.01$ 代表交叉口安全等级为“特别安全”; $0.01 < R \leq 0.02$ 代表交叉口安全等级为“安全”; $0.02 < R \leq 0.03$ 代表交叉口安全等级为“安全边缘”; $R > 0.03$ 代表交叉口安全等级为“不安全”^[10]。

对于安全级别不高的交叉口,研究将兼顾交叉口安全性和通行效率,利用 Webster 模型对交叉口信号配时进行优化。Webster 模型最早由 Webster 和 Cobbe 提出,以车辆延误时间最小为目标,优化交叉口单点信号控制配时,该方法理论简洁、易懂且计算简单,被广泛应用于我国各大城市交

叉口固定周期信号配时优化中^[11]。Webster 延误模型为:

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65 \left(\frac{c}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} x^{2+5\lambda}. \quad (2)$$

式中, d 表示每辆车的平均延误(s); C 为周期时长(s); λ 表示绿信比; x 表示饱和度(有效周期时长与总周期的比值); q 表示流量(s)。通过延误模型推导并计算交叉口的最佳信号周期、信号总损失时间、总有效绿灯时间、各相位有效绿灯时间、各相位绿信比,同时检验行人过街时间是否符合要求,得出优化后的信号配时。

2 案例分析

本文以南京栖霞区仙林大道与学海路实地为例,进行交叉口信号优化案例分析。交叉口由东西向主干道仙林大道和南北向次干道学海路交叉而成,属于典型的十字路口,两向道路均设有中央绿化分隔带,交叉口具体几何特征如图3所示。该交叉口是衔接仙林副城与南京主城的重要通道节点,其通行效率和安全程度对城市城郊走廊早晚交通流畅通与否有重要作用。此外,交叉口毗邻仙林中心地铁站,且周边用地多样,集聚了大量的住宅、商业、学校和医院等。由此可见,该交叉口周边存有潜在

的大流量交通和复杂交通状况,存在一定交通安全隐患。因此,有必要对该交叉口进行安全性评价与信号控制优化。

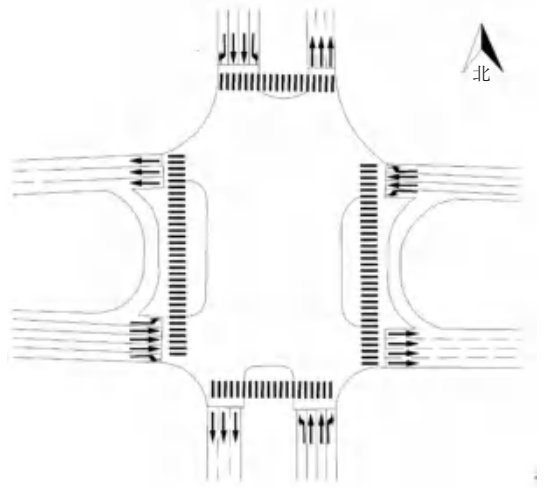


图3 仙林大道和学海路交叉口几何平面图

Fig. 3 Plane graph of the intersection of Xianlin Avenue and Xuehai Road

2.1 交叉口交通基础特征

基于交叉口工作日晚高峰(18:00—19:00)交通实测数据,获取交叉口各流向、各类型车辆交通流统计结果,如表1所示。

表1 仙林大道和学海路交叉口晚高峰单位小时交通量(辆/h)

Tab. 1 Traffic volume per hour at the intersection of Xianlin avenue and Xuehai road at evening peak (pcu/h)

位置	左					直					右				
	小	大	中	公交	当量 ^a	小	大	中	公交	当量 ^a	小	大	中	公交	当量 ^a
东进口	50	3	2	0	56	559	4	35	14	664	109	0	4	2	121
南进口	49	0	3	0	54	128	16	3	12	209	72	1	2	0	78
西进口	95	0	0	0	95	658	0	6	9	694	65	0	0	0	65
北进口	133	2	0	0	138	139	38	0	10	321	74	5	4	2	99

注:当量为单位小时标准车辆数(pcu/h)

根据 GB50220-95《城市道路交通规划设计规范》,对观测车辆分类。表中,小型车对应于小汽车,中型车分为面包车和小货车,大型车为大货车,公交车即为常规公交车,而当量交通为基于不同车辆类型计算得出的当量交通统计值。表中,晚高峰时段东西向交通干线流量明显多于南北流向道路流量。对比东西向不同类型车辆数,发现晚高峰期间东进口的大、中型车辆多于西进口车辆数,说明晚高峰有较多大、小货车被许可从郊区流向主城。而西进口小型车数明显多于东进口车辆数,说明晚高峰小汽车流以主城流出向郊区流入为主,呈现一定潮

汐性特征。对比南北向不同类型直行车流,发现南北向小型车辆数量差异不大,北进口整体车辆数量多于南进口,可解释为晚高峰期间部分在北进口的大型商场和娱乐场所活动及工作的人群返程所致。

此外,由实测信号周期调查可知,该交叉口信号控制为四相位定时相位,分别为东西直行、东西左转、南北直行、南北左转。其中,右转车辆不受信号灯控制。相位如图4所示,配时方案如图5所示。东西直行相位绿灯时间为50s,东西左转相位绿灯时间为29s,南北直行相位绿灯时间为35s,南北左转相位绿灯时间为20s,整个信号周期时长为

150 s, 黄灯时间 3 s, 全红时间为 4 s。

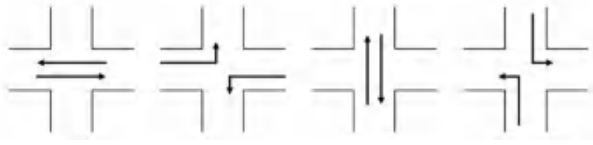


图 4 交叉口各相位图

Fig. 4 Phase diagrams of intersections

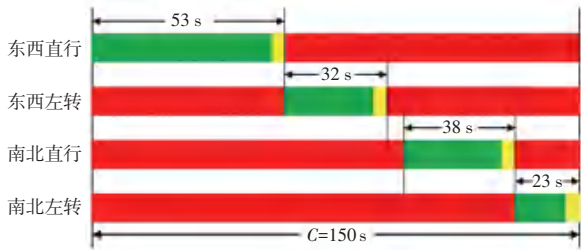


图 5 交叉口信号配时方案

Fig. 5 Intersection signal timing scheme

2.2 基于 SSAM 的安全性仿真分析与评价

为分析仙林大道学海路交叉口安全状况, 研究参照上述调查数据, 进行 VISSIM 软件仿真和基于 SSAM 软件的交叉口安全等级评价。为确保仿真数据的随机性和可靠性, 模拟仿真设定 5 次, 单次仿真周期设为 3 600 s, 利用 VISSIM 仿真软件记录并获取与实际交叉口交通基础特征与道路实际车辆行驶特征相符合的轨迹数据。随后, 在 SSAM 软件中导入轨迹文件进行仿真冲突分析, 获取当前交叉口各类型冲突的仿真平均值。其中, 基于仿真的交叉冲突平均为 7, 追尾冲突平均为 60, 变道冲突平均为 27, 总冲突平均为 94。从以上数据可以看出, 交叉口交叉冲突所占比例很少, 主要以追尾冲突和变道冲突为主, 线冲突所占的比重比点冲突高^[12]。从交叉口运行情况和数据分析情况可以看出, 由信号配时不合理引起的交叉口冲突较多。由于交叉口信号周期为 150 s, 信号灯利用效率不高, 高峰周期最佳信号周期不宜超过 120s^[13], 且该交叉口平均停车

延误为 38.4 s。根据美国《道路通行能力手册》, 该信号交叉口服务水平等级为 D, 对应于延误范围 25.1~40.0 s。随后, 根据机动车与机动车冲突率模型, 计算机-机冲突率为:

$$R_{机-机} = \frac{T}{P} = \frac{94}{(425 + 910 + 385 + 818)} = \frac{94}{2538} = 0.037 .$$

对照《交通安全城市分级评价标准》可知, 当前交叉口安全等级为四级——“不安全状态”(R > 0.03)。因此, 有必要针对该交叉口进行信号配时优化设计。

2.3 基于安全-效率的信号交叉口优化

根据上述 Webster 信号配时公式, 可以得出优化后的实际信号周期时长, 各相位绿灯时长, 重新绘制各相位信号配时, 如图 6 所示。由于该交叉口地形比较特殊, 人行横道部分位于绿化道上。因此, 该交叉口的机动车绿灯通行时间只需要考虑行人穿越单向车道的的时间。将优化后的信号周期带入 VISSIM 中仿真, 重复以上步骤, 直至优化后的交叉口既能保证交叉口通行效率, 也能保证交叉口的安全性。表 2 和表 3 分别为, 优化前后的交叉口通行效率参数、交叉口冲突数、安全等级以及服务水平。

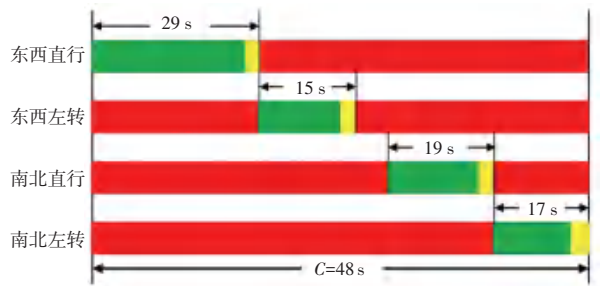


图 6 优化后的信号配时

Fig. 6 Optimized signal timing

表 2 优化前后的交叉口通行效率对比

Tab. 2 Comparison of traffic efficiency at intersections before and after optimization

进口道	单位小时通过车辆数			延误			最大排队长度		
	现状	W 优化	改善情况	现状	W 优化	改善情况	现状	W 优化	改善情况
东	819	834	1.8%	36.4	23.4	36%	59	68	15%
北	427	430	0.7%	41.7	24.3	42%	110.8	38.4	65%
西	786	794	1%	38.0	21.4	44%	59	40.3	32%
南	369	370	0.2%	37.3	24.8	34%	40.1	36.5	9%
全部	2404	2428	1.1%	38.4	23.5	39%	110.8	68	39%

表3 优化前后对比分析

Tab. 3 Comparative analysis before and after optimization

对比项	交叉冲突	追尾冲突	变道冲突	总和	改善情况	安全等级	服务水平等级	综合优化情况
现状	7	60	27	94	—	不安全	D	—
优化后	0	64	9	73	22.3%	安全边缘	C	25.4%

由表2仿真优化前后的对比结果可知,现状交叉口信号配时的确存在浪费情况。基于安全--通行效率的 Webster 信号配时优化方案,对仙林大道学海路交叉口通行效率的提升有显著效果。从延误改善情况来看,各进口的延误改善都很明显,平均延误改善高达39%。从最大排队长度改善情况来看,从北进口的最大排队长度降低最明显,降低了65%,而东进口最大排队长度改善情况不是很好,因为东进口的车辆数较多而绿灯通行时间缩短。从单位小时通过车辆数来看,各进口道和整个交叉口通过车辆数增加,增加幅度不明显。由平均单位小时通过车辆数、延误和最大排队长度3个指标,得出交叉口通行效率优化了26.4%,从冲突数和安全等级来看,整个交叉口的冲突数减少了22.3%,安全等级从不安全上升到安全边缘,服务水平等级由D上升到C,综合优化了25.4%。整个交叉口的通行效率和安全等级得到了大幅度提升。

3 结束语

本文以仙林大道学海路交叉口为例,摒弃以往只考虑通行效率指标对交叉口的评价方法,提出了一种基于交通冲突技术的对信号交叉口效率和安全综合评价优化方案,得出以下结论:

(1) 交叉口优化采取 Webster 信号配时方法,利用 VISSIM 仿真软件,结合 SSAM 安全分析模型,对优化前后的交叉口进行通行效率 and 安全性综合分析。结果表明,优化后的交叉口单位小时通过车辆数、延误、最大排队长度、安全等级、服务水平都得到明显改善。说明该优化方法对交叉口通行效率和安全等级方面有所提升,在提高交叉口的通行效率的同时要综合考虑安全性。

(2) 本文只是针对某单点信号交叉口固定时间

段进行交通数据采集、仿真研究及评价优化。在今后的研究中,可以采集不同时段数据,设计适合高峰和平峰的信号配时,结合干线协调控制,对交叉口通行效率和安全等级进行更加深入研究。

参考文献

- [1] 施雯. 西安市南二环不同类型交叉口通行效率与安全性分析[J]. 汽车实用技术, 2018(4): 177-179.
- [2] 周亚平, 陈凤权, 王永. 基于两种非传统交叉口通行能力的综合优化模型[J]. 公路交通科技, 2016, 33(4): 134-141.
- [3] 刘伟, 谢忠金, 陈科全. 基于 NSGA II 算法的逆向可变车道信号配时优化[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(6): 92-97.
- [4] 王春娥, 周磊. 单点交叉口最优信号周期模型研究[J]. 交通信息与安全, 2014(3): 53-56.
- [5] 刘小明, 唐少虎, 朱风华, 陈兆盟. 基于 MFD 的城市区域过饱和和交通信号优化控制[J]. 自动化学报, 2017, 43(7): 1220-1233.
- [6] 郭建钢, 林文燧, 陈必太, 等. 基于 Synchro 的厦门市白鹭洲路信号协调控制的优化设计[J]. 华东交通大学学报, 2013(3): 50-54.
- [7] 常云涛, 王奕彤. 连续流交叉口信号配时优化模型[J]. 公路交通科技, 2018.
- [8] 汪莹, 黄新. 交叉口交通安全评价方法回顾与分析[J]. 森林工程, 2013, 29(2): 90-92.
- [9] 周嗣恩, 李克平, 孙剑, 等. 道路交叉口冲突仿真分析[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(5): 32-37.
- [10] 张学亮, 邓卫, 郭唐仪. 基于冲突率的交叉口交通安全评价方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2007(1): 85-90.
- [11] 宋仲仲, 林立. 基于区域协调控制的信号配时优化与仿真[J]. 计算机应用, 2018, 38(S2): 313-316+320.
- [12] 黄飞. 基于 SSAM 的间接交通安全评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
- [13] 金勇, 姚荣涵. 单点交叉口固定信号配时优化模型[J]. 大连交通大学学报, 2011, 32(6): 30-35.
- [14] 江泽浩, 潘飞, 汪涛, 等. 信号控制交叉口机动车绿灯间隔——安全可靠性曲线簇[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18(5): 71-78.
- [15] 罗慧敏, 郑亮. 基于效率-安全评价的近距离错位交叉口信控优化[J]. 交通信息与安全, 2018(1): 65-73.