

基于多元数据的校园周边交叉口Synchro信号优化研究

王 健, 齐 蕊, 刘华龙, 徐振博, 史宇昊, 武青青

山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年11月19日; 录用日期: 2025年1月1日; 发布日期: 2025年1月10日

摘 要

随着校园周边交通量的增加, 交叉口的交通拥堵问题愈发严重, 对行人和车辆的通行造成了较大困扰。为有效提高交叉口的通行效率, 减少交通延误与排队长度, 本文基于多元数据, 利用Synchro交通仿真系统对校园周边的海棠路与丁香路交叉口进行了信号优化研究。通过对现状交通流量数据的收集与分析, 建立交叉口的仿真模型, 评估现有信号配时方案的不足之处。基于流量/容量比率(V/C ratio)、控制延误(Control Delay)和服务水平(LOS)等关键指标, 对信号配时方案进行了调整与优化。优化后的信号配时方案显著降低了高峰期的排队长度, 改善了各交通流向的通行效率, 并提高了整体的服务水平。结果表明: 燃料消耗由155升降低至105升, 减少了约32%, 优化效果明显; 停车次数从1359次/小时减少至1121次/小时, 降低了约17.5%; 总延误时间从549.2秒缩短至520.1秒, 减少了约5.3%; 交叉口的总体服务水平由E提升为D。研究表明, 基于多元数据的Synchro信号优化对缓解校园周边交叉口的交通拥堵、提高通行效率和道路安全具有重要作用。

关键词

交通仿真, Synchro, 交通工程, 信号配时优化

Synchro Signal Optimization Study for Campus Surrounding Intersections Based on Multi-Source Data

Jian Wang, Rui Qi, Hualong Liu, Zhenbo Xu, Yuhao Shi, Qingqing Wu

School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

Received: Nov. 19th, 2024; accepted: Jan. 1st, 2025; published: Jan. 10th, 2025

文章引用: 王健, 齐蕊, 刘华龙, 徐振博, 史宇昊, 武青青. 基于多元数据的校园周边交叉口 Synchro 信号优化研究[J]. 交通技术, 2025, 14(1): 17-27. DOI: 10.12677/ojtt.2025.141003

Abstract

With the increasing traffic volume around campuses, congestion at intersections has become more severe, causing significant challenges for pedestrians and vehicles. To effectively improve the efficiency of intersection traffic flow and reduce delays and queue lengths, this study conducts a signal optimization analysis for the intersection of Haitang Road and Dingxiang Road near a campus, using the Synchro traffic simulation system and multi-source data. By collecting and analyzing the existing traffic flow data, a simulation model of the intersection was established to evaluate the shortcomings of the current signal timing plan. Based on key indicators such as volume-to-capacity ratio (V/C ratio), control delay, and level of service (LOS), adjustments and optimizations were made to the signal timing. The optimized signal timing plan significantly reduced queue lengths during peak hours, improved traffic flow efficiency across all directions, and enhanced the overall level of service. Results showed that fuel consumption was reduced from 155 liters to 105 liters, a decrease of approximately 32%; the number of stops decreased from 1359 stops/hour to 1121 stops/hour, reducing by about 17.5%; and total delay time was reduced from 549.2 seconds to 520.1 seconds, a decrease of approximately 5.3%. The overall level of service of the intersection was improved from E to D. The study indicates that Synchro signal optimization based on multi-source data plays a crucial role in alleviating congestion, enhancing traffic efficiency, and improving road safety at campus-area intersections.

Keywords

Traffic Simulation, Synchro, Traffic Engineering, Signal Timing Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着城市交通压力的不断增加,尤其在校园周边区域,交通流量波动显著,早晚高峰期常出现拥堵,影响交通安全与通行效率。交叉口作为城市道路网络的关键节点,其信号控制对整体交通运行至关重要。Synchro 系统作为一种先进的信号优化工具,基于实际交通流量数据进行信号配时的仿真与优化,通过优化校园周边交叉口的信号配时,能够有效减少交通延误、提升通行效率、缓解高峰压力。

多项研究表明,优化信号控制可显著提升交通效率。叶圳等[1]利用 Synchro 系统优化深圳龙岗区单点交叉口,减少总延误 19.05%,燃油消耗降低 12.52%,服务水平提升;王安格等[2]通过 VISSIM 仿真减少区域行程时间 17%,总延误降低 35%;姬利娜等[3]基于实地调研数据和 VISSIM 仿真,优化设计降低延误、排队长度和停车次数;刘澜等[4]通过双向信号协调联动控制减少延误和燃油消耗;雷馥鸣等[5]提出优化交叉口信号的交通组织策略,显著缓解拥堵;姜安培等[6]结合遗传算法与仿真模拟的双层模型优化方案与路径,在北京三里屯区域提高了路网运行效率。新兴技术在交通效率提升方面展现出巨大潜力。Cheng R 等[7]通过 YOLOX 和 LSTM 模型结合蛇形优化,减少延误 23.34%;Fu T 等[8]基于 GCN 和 TCN 模型的多交叉口预测,改善信号协调,提升主干道和区域网络效率;Huang 等[9]提出 FeSTGCN 模型用于自适应信号控制下的流量预测,为信号优化提供了新思路;Wang H 等[10]基于深度 Q 学习优化信号控制,延误减少 22%。智能网联环境与浮动车数据也为信号优化提供了重要支持。沈国栋等[11]提出基于网联环境的速度引导与信号协同优化方法,显著减少延误;宋浪等[12]提出平行流交叉口的车道控制与信号

配时组合优化方案,提高通行能力达 70.51%;杨伟等[13]基于浮动车数据优化干线信号,显著提升交叉口效率;邢淋丽等[14]提出改善学校周边接送模式和停车布局的方案,缓解高峰拥堵;张鹏等[15]提出货车车速与信号配时协同优化,减少油耗 29.9%、停车次数 71.4%,提高通行效率。这些优化措施在提升通行效率、减少延误和节能减排方面效果显著。

校园区域交通流量波动大,且行人和非机动车较多,对信号控制提出了更高要求。本文将基于 Synchro 系统,结合校园周边的交通流量、信号配时、环境因素等多元数据,对交叉口信号进行优化,提升通行效率,减少延误,为其他类似区域的信号优化提供参考。

2. 基础数据调查

本文以海棠路(南北向)与丁香路(东西向)的信号交叉口为研究对象,交叉口位置图平面图(见图 1)。

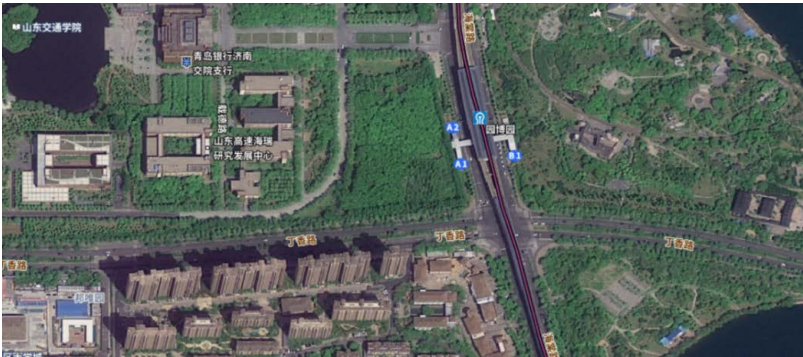


Figure 1. Plan view of the intersection of Dingxiang Road and Haitang Road
图 1. 丁香路与海棠路平面图

2.1. 交通流量数据调查

采用人工计数的方法,对校园周边的海棠路与丁香路交叉口流量进行统计调查,并将所调查各个进口道大型车、中型车、小型车三种车型通过车辆换算系数进行换算,进而将交叉口流量进行标准化。丁香路与海棠路交叉口交通数据调查(见表 1)。

Table 1. Traffic volume of motor vehicles at the intersection of Dingxiang Road and Haitang Road during morning peak (Unit: pcu/h)

表 1. 丁香路与海棠路交叉口机动车早高峰流量表(单位: pcu/h)

出入口	东出口	西出口	南出口	北出口	进口总流量
东进口	/	510	84	47	642
西进口	615	/	105	57	777
南进口	37	111	/	64	213
北进口	24	47	88	/	159
出口总流量	676	669	277	169	1790

2.2. 交叉口信号控制调查

目前根据调查,海棠路与丁香路交叉口的信号相位为 4 相位,周期为 180 s。各相位之间黄灯时间间隔均为 3 s,无全红时间,具体相位时间(见图 2)。

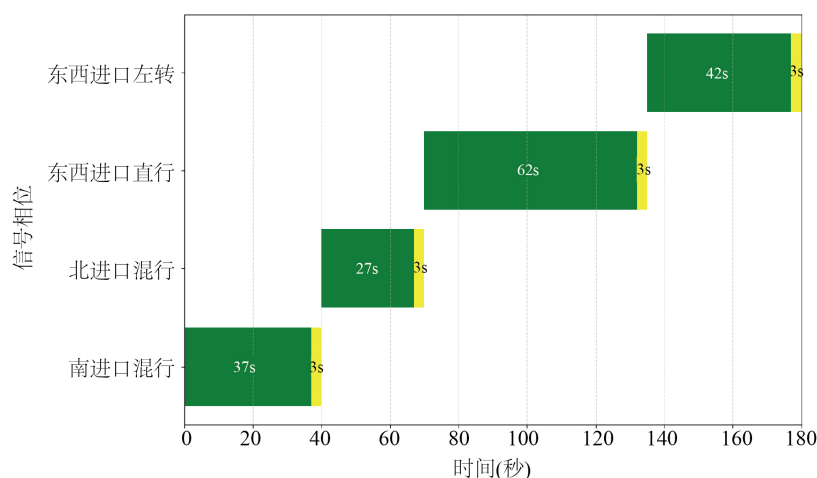


Figure 2. Current signal phasing diagram of Haitang road and Dingxiang road
图 2. 海棠路与丁香路信号相位现状图

3. 仿真模型分析

本文主要利用 Synchro 系统分析优化信号周期和相位的方法,以评价信号优化方案的优劣。系统操作简单,对硬件要求不高,适用于多种信号类型的交叉口,特别适合于交通信号配时的优化。

3.1. 信号配时优化模型

单点交叉口的信号周期优化主要包括调整周期长度和相位,以满足不同车道组的流量需求。首先,系统计算并比较信号周期是否能满足 90%、70% 或 50% 的车道组交通流量。如果周期无法满足最高需求,则逐步增加周期长度,直到达到最佳信号周期。优化过程中,系统还考虑交通事故、车队长度等因素,以确保最终选择的信号周期使得车辆延误最小。其计算模型如下:

$$P = \frac{D \times 1 + S_t \times 10 + Q_t \times 100}{3600} \quad (1)$$

式中: P 为性能指标; D 为延误; S_t 为车辆在交叉口停止线内停车的次数; Q_t 为受影响的车辆数。

为了确保交叉口的行人安全, Synchro 系统在满足最大自然周期的基础上,为每个相位增加行人过街绿灯时间,并确保每个相位的最低绿灯时间能够满足行人安全通过的需求。其计算模型如下:

$$t_p = 7 + \frac{L_p}{V_p} - I \quad (2)$$

式中: t_p 为行人过街时间; L_p 为过街道长度; V_p 为行人过街的平均速度,取值为 1.2 m/s; I 为绿灯间隔时间。

3.2. 交叉口延误模型

Synchro 系统采用了美国通行能力手册中的交叉口延误模型,并引入了一种更复杂的百分比延误方法 (Percentile Delay Method, PDM), PDM 的计算方法为:

$$D = \frac{\sum_{i=10}^{90} V_{D_i}}{\left(\sum_{i=10}^{90} V_i \right) \times C / 3600} \quad (3)$$

式中 V_{D_i} 为第 i 中百分比情形下每个周期的车辆延误(其中, i 的取值为 10%、30%、50%、70%、90%); V_i 为第 i 个百分比点对应的调整车流量; C 为信号周期。

交叉口每个周期的车辆延误计算方法为:

$$V_{D_i} = \frac{v_i \times (C - Y - G)^2}{2(1 - v_i/s)} \quad (4)$$

式中 V_{D_i} 为百分比情形 i 时交叉口每个周期的车辆延误; v_i 为百分比情形为 i 时车流量; C 为信号周期; Y 为黄灯时间; G 为绿灯时间; s 为饱和流率。

交叉口每个周期内的百分比调整车流量通过以下公式进行计算:

$$v_i = v + \left[z_i \times \sqrt{v \times C/3600} \right] \times \frac{C}{3600} \quad (5)$$

式中, Z_i 表示在不同百分比(10%, 30%, 50%, 70%, 90%)情况下的取值, 具体数值分别为-1.28, -0.52, 0, 0.52, 1.28。

3.3. 服务水平模型

服务水平是基于控制延误来进行评估的, 控制延误通常计算为停车延误的 1.3 倍。为了计算服务水平, 我们可以使用以下公式:

$$\text{控制延误} = 1.3 \times \text{停车延误} \quad (6)$$

假设控制延误为 T , 根据延误时间 T 的值, 可以通过下面的关系来确定相应的服务水平(LOS):

$$\text{服务水平} = \begin{cases} A & \text{if } T < 10 \text{ s} \\ B & \text{if } 10 \leq T < 20 \text{ s} \\ C & \text{if } 20 \leq T < 35 \text{ s} \\ D & \text{if } 35 \leq T < 55 \text{ s} \\ E & \text{if } 55 \leq T < 80 \text{ s} \\ F & \text{if } T \geq 80 \text{ s} \end{cases} \quad (7)$$

式中, A 表示车流畅通, 无延误或几乎无延误; B 表示车流稳定, 稍有延误; C 表示车流稳定, 有延误; D 表示车流不太稳定, 延误明显; E 表示车流不稳定, 延误严重; F 表示拥堵严重。

3.4. 燃料消耗与尾气排放模型

3.4.1. 燃料消耗模型

Synchro 中, 燃料消耗的计算公式为:

$$F_j = 4.546 \times \left[\frac{TT_j}{1.609} \times K_1 + \frac{d_j}{3600} \times 0.7329 + \frac{3600 \times h_j}{C_0} \times K_2 \right] \quad (8)$$

$$K_1 = (0.075283 - 0.0015892) \times \frac{V_j}{1.609} + 0.000015066 \times \left(\frac{V_j}{1.069} \right)^2 \quad (9)$$

$$K_2 = 0.0000061411 \times \left(\frac{V_j}{1069} \right)^2 \quad (10)$$

式中, F_j 表示流向 j 的平均油耗; TT_j 表示流向 j 的平均行驶距离; V_j 表示流向 j 平均速度; d_j 表示流

向 j 车辆的平均延误时间； h_j 表示流向 j 车辆的平均停车次数。

3.4.2. 尾气排放量计算模型

尾气排放与燃料的消耗紧密相关，计算公式为：

一氧化氮：

$$\text{CO} = F_i \times 69.9 \text{ g/gal(g)} \tag{11}$$

氮氢化物：

$$\text{NO}_x = F_i \times 13.6 \text{ g/gal(g)} \tag{12}$$

挥发性氧化物：

$$\text{VOC} = F_i \times 16.2 \text{ g/gal(g)} \tag{13}$$

式中， F 为燃料消耗。

4. 仿真分析

本章利用 Synchro 系统对海棠路与丁香路交叉口的现状信号配时方案进行仿真分析，输入详细的交通数据以评估其在通行效率、延误、排队长度、燃料消耗和尾气排放等方面的表现；同时，在优化仿真中通过调整信号相位方案，分析优化后的流量分配、车辆等待时间及环境影响等变化情况。

4.1. 现状仿真分析

4.1.1. 现状关键指标仿真分析

本文将海棠路与丁香路交叉口的详细数据输入 Synchro 系统，以模拟当前信号配时方案下的交叉口运行情况。通过仿真分析，获取了交叉口各进口道的关键交通指标，包括总延误、流量与容量比率(V/C Ratio)、停车次数、50%排队长度、95%排队长度以及服务水平(Level of Service, LOS)等数据，现状仿真的关键指标详细数据(见表 2)。

Table 2. Key performance indicators of current simulation

表 2. 现状仿真关键指标数据

进口	方向	总延误(秒)	V/C	停车次数 (辆/小时)	50%排队长度 (米)	95%排队长度 (米)	服务水平
东进口	左转	56.1	0.15	46	18.9	33.7	F
	直行	102.2	1.04	543	271.6	353	
西进口	左转	57.5	0.22	67	57.5	46.4	E
	直行	69.7	0.86	460	69.7	260.7	
南进口	左转	67.2	0.1	19	67.2	19.6	C
	直行	62	0.25	73	62	50.1	
北进口	左转	76	0.45	101	76	66.3	D
	直行	58.5	0.1	50	58.5	19.7	
总计		549.2	3.17	1359	681.4	849.5	E

由表 2 可知，海棠路与丁香路作为大学城的主要交叉口之一，交通压力承载量较大。交叉口的最大的车流量与通行能力的比值(V/C)为 1.04，东进口的服务水平达到了 F 的等级，说明了该路段在高峰期出现了严重的交通拥堵，而且东进口与西进口的停车次数、50%排队长度以及 95%排队长度都远远高于其他进口道，说明现状的信号配时已不适用，导致这些进口道上的车辆排队时间过长、停车次数频繁，进而加剧了交通拥堵；表明信号配时方案可能需要进行优化调整，以实现各进口道之间更均衡的交通流分配，改善整体交通流动性。

4.1.2. 现状燃料消耗与尾气排放仿真分析

利用 Synchro 系统对海棠路与丁香路交叉口的交通流量进行仿真分析时，不仅关注了交通延误和排队长度等指标，还对交叉口的燃油消耗与尾气排放情况进行了研究。通过仿真模拟，获取了各进口道在不同交通状态下的燃油消耗、CO 排放量、NO_x 排放量以及 VOC 排放量，详细数据(见表 3)。

Table 3. Data on fuel consumption and exhaust emissions
表 3. 燃油消耗、尾气排放相关数据

进口	方向	燃料消耗(升)	CO 排放量 (克/每小时)	NO _x 排放量 (克/小时)	VOC 排放量 (克/小时)
东进口	左转	5	83	16	19
	直行	71	1321	257	306
西进口	左转	7	127	25	29
	直行	48	883	172	205
南进口	左转	2	38	7	9
	直行	7	133	26	31
北进口	左转	10	190	37	44
	直行	5	90	17	21
总计		155	2865	557	664

现状交叉口的燃料消耗与尾气排放数据显示，直行车辆的燃料消耗和排放量普遍高于左转车辆，特别是在北进口和东进口处，这可能是由于直行车辆受阻较多或行驶距离较长所致。为减少整体燃料消耗和尾气排放，可以通过优化交通信号控制，减少车辆等待时间，提高车流通行效率。

4.2. 优化后的仿真分析

通过 synchro 系统的相位优化，得到了新的相位，这样的调整通过增加相位数量和细化控制，实现了更均衡的流量分配，确保了各方向的通行需求，同时减少了车辆等待时间，优化了交叉口的整体通行效率。周期为 180 s。各相位之间黄灯时间间隔均为 3 s，无全红时间，具体相位绿灯时间(见图 3)。

4.2.1. 优化后的关键指标仿真分析

在本研究中，我们利用该系统强大的交通仿真与优化功能，对交叉口的信号相位方案进行了优化调整。我们重点针对交叉口的信号周期、相位时间和相位顺序进行了调整，以便更加合理地分配各进口道的通行权重，从而缓解高峰期的交通拥堵问题。结果显示交叉口的总体服务水平由 F 级提升至 D 级，表明通过优化后的信号配时，交叉口的通行效率得到了显著改善，优化后仿真关键指标数据(见表 4)。

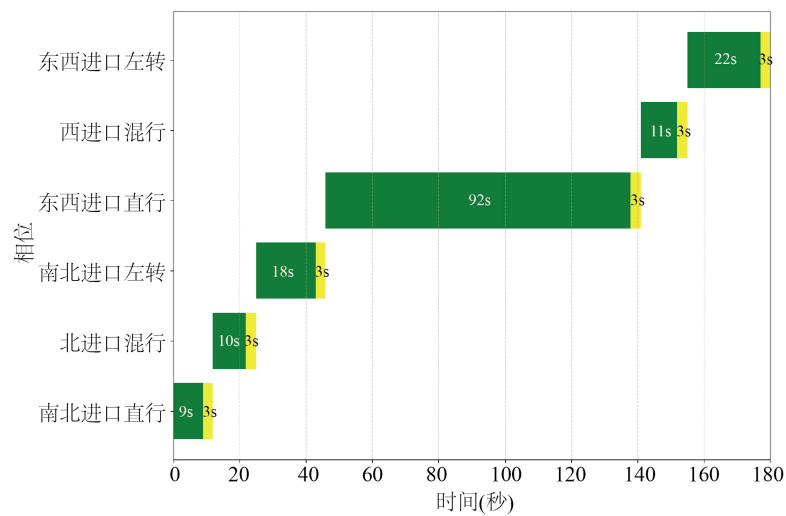


Figure 3. Optimized green signal phasing diagram of Haitang Road and Dingxiang Road

图 3. 海棠路与丁香路信号相位绿灯优化图

Table 4. Key performance indicators of post-optimization simulation

表 4. 优化后仿真关键指标数据

进口	方向	总延误(秒)	V/C	停车次数 (辆/小时)	50%排队长度 (米)	95%排队长度 (米)	服务水平
东进口	左转	61.3	0.18	47	19.7	35.3	C
	直行	31.4	0.65	387	157.4	199.3	
西进口	左转	81.4	0.44	77	32.4	53.4	D
	直行	39.7	0.63	349	143.7	183.8	
南进口	左转	57.7	0.07	19	8.4	19.1	D
	直行	82.9	0.46	81	34.2	55.5	
北进口	左转	76	0.45	101	42.5	66.3	E
	直行	89.7	0.4	60	43.7	23.7	
总计		520.1	3.28	1121	482	636.4	D

4.2.2. 优化后的燃料消耗与尾气排放仿真分析

在对交叉口信号优化后，我们利用 Synchro 系统对优化后的交叉口进行了仿真评估。本次仿真还关注到了优化后的信号配时方案对燃油消耗和尾气排放的影响，通过对各进口道不同交通流向的数据进行分析，获得了优化后交叉口的燃油消耗量、CO 排放量、NO_x 排放量和 VOC 排放量等关键指标。详细优化后的燃油消耗与尾气排放相关数据(见表 5)。

Table 5. Optimized fuel consumption and exhaust emission data

表 5. 优化后的燃油消耗、尾气排放相关数据

进口	方向	燃料消耗(升)	CO 排放量 (克/每小时)	NO _x 排放量 (克/小时)	VOC 排放量 (克/小时)
东进口	左转	5	88	17	20
	直行	32	596	116	138

续表

西进口	左转	9	158	31	37
	直行	31	576	112	133
南进口	左转	2	37	7	8
	直行	9	158	31	37
北进口	左转	10	190	37	44
	直行	7	123	24	28
总计		105	1926	375	445

4.3. 优化前后对比分析

4.3.1. 优化前后关键指标对比

通过 Synchro 系统对交叉口优化前后的关键交通指标进行了全面对比分析。通过对比仿真结果，可以清楚地看到优化方案在提升交叉口通行效率、减少交通延误等方面的具体改善情况，下面为关键指标优化前后的对比图(见图 4)。

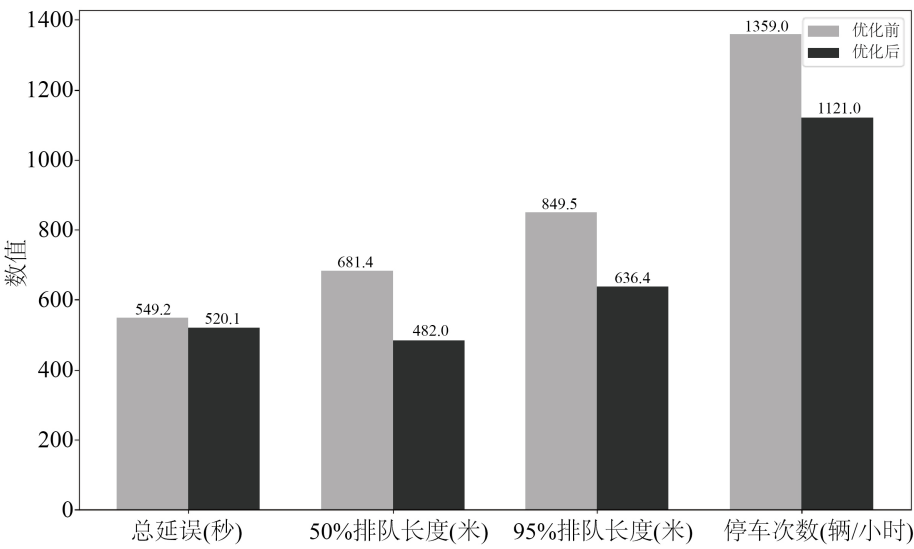


Figure 4. Comparison of key indicators before and after optimization
图 4. 关键指标优化前后对比图

从交叉口优化前后关键指标对比图可以看出，优化后的各项交通指标均显著改善。总延误时间从 549.2 秒缩短至 520.1 秒，减少了约 5.3%。停车次数从 1359 次/小时减少至 1121 次/小时，降低了约 17.5%。排队长度方面，50%排队长度从 681.4 米降低至 482 米，减少了约 29.3%，95%排队长度从 849.5 米缩短至 636.4 米，降低了约 25%。整体而言，优化措施有效提升了交叉口的通行效率，显著缓解了交通拥堵。

4.3.2. 优化前后燃料消耗、尾气排放数据对比

通过输入优化前后的交通流量和信号配时方案，系统对燃油消耗量、CO 排放量、NO_x 排放量以及 VOC 排放量等关键环境指标进行了计算和评估。数据直观地反映出优化方案对能耗和环境污染的改善效果，为进一步分析优化策略提供了可靠依据。下图(见图 5)展示了燃料消耗与尾气排放的优化前后对比情

况，清晰呈现了优化后在节能减排方面的提升。

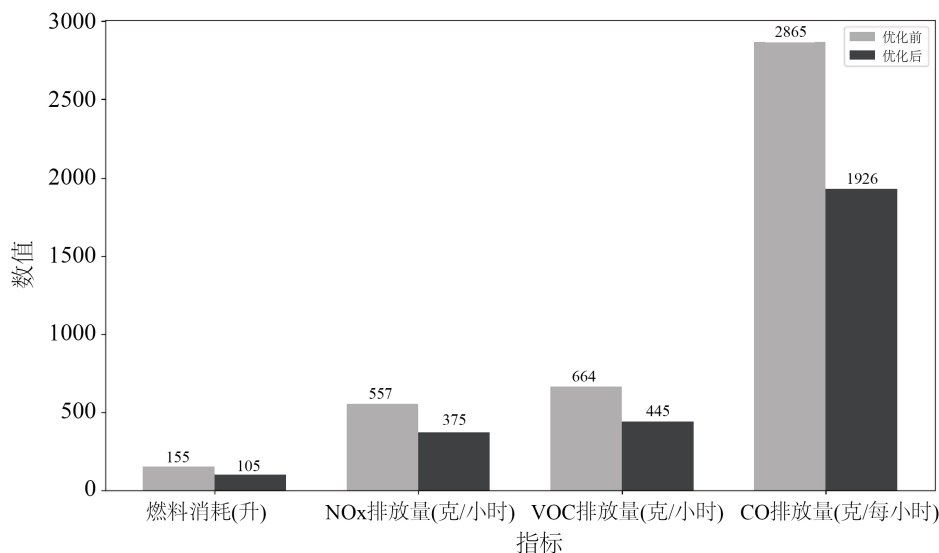


Figure 5. Comparison of fuel consumption and exhaust emissions before and after optimization

图 5. 燃料消耗与尾气排放的优化前后对比图

由图中可以看到，相位优化后，燃料消耗由 155 升降低至 105 升，减少了约 32%，优化效果明显，燃料利用效率得到了提升，车辆耗油量大幅下降；NO_x 排放量(氮氧化物)由 557 克/小时减少到 375 克/小时，减少了约 33%，有效地降低了空气污染；VOC 排放量(挥发性有机化合物)由 664 克/小时，优化为 445 克/小时，减少了约 33%；CO 排放量(一氧化碳)，从 2865 克/每小时减少到 1926 克/每小时，减少了约 33%；优化后不但显著减少了燃料消耗，而且大幅度降低了 NO_x、VOC 和 CO 的排放量，可以看出相位优化在提升能效和减少排放方面取得了显著效果。

5. 结语

本文基于多元数据，利用 Synchro 系统对校园周边海棠路与丁香路交叉口的交通信号进行了优化研究。通过对交通流量、信号配时、环境因素等多维数据的整合与分析，建立了仿真模型，并对信号配时方案进行了调整与优化。优化后的结果表明，交叉口的交通拥堵状况得到显著缓解，总延误时间、排队长度及燃料消耗均有显著下降，服务水平从 E 级提升至 D 级。

参考文献

- [1] 叶圳. 基于 Synchro 系统的单点交叉口交通信号优化[J]. 交通与运输, 2023, 39(5): 100-104.
- [2] 王安格, 邓明君, 蒋雪晴, 曹杨柳. 基于 VISSIM 的区域交通组织优化设计——以新余市渝水区劳动路与青年路交叉口及其附近区域为例[J]. 河北科技师范学院学报, 2021, 35(4): 69-78.
- [3] 姬利娜, 晏永廷, 晏子. 城市道路平面交叉口交通组织优化设计[J]. 交通工程, 2022, 22(1): 60-66.
- [4] 刘澜, 封宗荣. 基于 Synchro 仿真的城市干道交通信号协调控制优化[J]. 公路交通科技, 2022, 39(3): 167-175.
- [5] 雷馥鸣. 城市道路交叉口交通组织优化设计[J]. 智能建筑与智慧城市, 2022(1): 145-147.
- [6] 姜安培, 吴海俊, 赵慧. 基于双层模型与仿真的区域交通组织优化研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(6): 1008-1012.
- [7] Cheng, R., Qiao, Z., Li, J. and Huang, J. (2023) Traffic Signal Timing Optimization Model Based on Video Surveillance Data and Snake Optimization Algorithm. *Sensors*, **23**, Article 5157. <https://doi.org/10.3390/s23115157>

-
- [8] Fu, T., Wang, L., Garg, S., Hossain, M.S., Yu, Q. and Hu, H. (2024) Adaptive Signal Light Timing for Regional Traffic Optimization Based on Graph Convolutional Network Empowered Traffic Forecasting. *Information Fusion*, **103**, Article ID: 102072. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102072>
- [9] Huang, H., Chen, Z., Li, B., Ma, Q. and He, H. (2024) FeSTGCN: A Frequency-Enhanced Spatio-Temporal Graph Convolutional Network for Traffic Flow Prediction under Adaptive Signal Timing. *Applied Intelligence*, **54**, 4848-4864. <https://doi.org/10.1007/s10489-024-05401-5>
- [10] Wang, H., Yuan, Y., Yang, X.T., Zhao, T. and Liu, Y. (2022) Deep Q Learning-Based Traffic Signal Control Algorithms: Model Development and Evaluation with Field Data. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, **27**, 314-334. <https://doi.org/10.1080/15472450.2021.2023016>
- [11] 沈国栋, 龙光, 杨伟, 等. 交叉口网联车速度与信号协同优化控制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(10): 70-78, 89.
- [12] 宋浪, 王健, 杨璐, 等. 平行流交叉口车道控制与信号配时组合优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(8): 1647-1658.
- [13] 杨伟, 沈国栋, 龙光, 等. 基于浮动车轨迹数据的干线信号协调配时优化[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2024, 49(1): 132-146.
- [14] 邢淋丽, 彭艳梅. 学校周边交通拥堵治理研究——以南京市为例[J]. 交通工程, 2024, 24(10): 32-36.
- [15] 张鹏, 顾云翔, 孙超, 等. 基于最小油耗的货车车速与信号配时协同优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(2): 84-91, 99.