

2-15-2024

Bus Traffic Strategy Based on Immune Theory in Network Environment

Cao Li

School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; Anhui Provincial Engineering Laboratory on Information Fusion and Control of Intelligent Robot (Anhui Normal University), Wuhu 241002, China, licao1102@163.com

Rui Zheng

School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; Anhui Provincial Engineering Laboratory on Information Fusion and Control of Intelligent Robot (Anhui Normal University), Wuhu 241002, China, zrwx0609@ahnu.edu.cn

Xiaolu Ma

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China

Ziqiong Ding

School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; Anhui Provincial Engineering Laboratory on Information Fusion and Control of Intelligent Robot (Anhui Normal University), Wuhu 241002, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Bus Traffic Strategy Based on Immune Theory in Network Environment

Abstract

Abstract: In V2X network environment, the bus system can obtain dynamic global information and the bus traffic strategy is carried out based on the road scene between adjacent bus stops. The mathematical model of bus rapid traffic is constructed with the difference of green time ratio as the main parameter. A hybrid genetic operator is proposed on the basis of the combination of genetic algorithm and immune theory, the design of affinity, the selection of excellent antibodies. A bus traffic strategy based on immune theory is proposed on the basis of the improvement of adaptive crossover and mutation probability. The simulation results show that compared with the fixed phase duration, the running, waiting, and parking times can be significantly reduced by using the genetic algorithm and immune theory. Compared with the genetic algorithms for traffic strategy, the change of the green time ratio of traffic strategy based on the immune theory is reduced by about 8.8% on average, and the convergence speed is increased by about 26.8% on average. The improved strategy can reduce the risk of falling into local optimum, which can realize the rapid traffic of the bus and improve the operation efficiency.

Keywords

V2X, bus system, traffic strategy, immune theory, hybrid genetic operator

Authors

Cao Li, Rui Zheng, Xiaolu Ma, Ziqiong Ding, Junyi Zhong, Sheng Zhang, and Jingjing Qi

Recommended Citation

Li Cao, Zheng Rui, Ma Xiaolu, et al. Bus Traffic Strategy Based on Immune Theory in Network Environment[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 449-462.

网联环境中基于免疫思想的公交通行策略

李操^{1,2}, 郑睿^{1,2*}, 马小陆³, 丁梓琼^{1,2}, 仲俊屹^{1,2}, 张升^{1,2}, 齐晶晶⁴

(1. 安徽师范大学 物理与电子信息学院, 安徽 芜湖 241002; 2. 安徽省智能机器人信息融合与控制工程实验室(安徽师范大学), 安徽 芜湖 241002; 3. 安徽工业大学 电气与信息工程学院, 安徽 马鞍山 243000; 4. 安徽达尔智能控制系统股份有限公司, 安徽 芜湖 241002)

摘要: 在V2X网联环境中, 公交系统能够获取全局的动态信息, 以相邻公交车站之间的道路为场景开展网联公交的通行策略研究。以绿信比之差为主要参数, 构建公交快速通行的数学模型; 遗传算法与免疫思想相结合, 设计亲和度, 选取优秀抗体, 提出一种混合遗传算子; 改进自适应交叉、变异概率, 提出一种基于免疫思想的公交通行策略。仿真结果表明: 对比固定相位时长, 采用遗传算法和基于免疫思想的通行策略均可较大程度地减少公交车的运行时间、等待时间和停车次数等重要指标; 对比遗传算法的通行策略, 基于免疫思想的通行策略绿信比变化降低了约8.8%, 收敛速度提升了约26.8%, 改进的策略减少了陷入局部最优的风险, 能实现网联公交的快速通行, 提升公交系统的运行效率。

关键词: V2X; 公交系统; 通行策略; 免疫思想; 混合遗传算子

中图分类号: TP18 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)02-0449-14

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-1133

引用格式: 李操, 郑睿, 马小陆, 等. 网联环境中基于免疫思想的公交通行策略[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(2): 449-462.

Reference format: Li Cao, Zheng Rui, Ma Xiaolu, et al. Bus Traffic Strategy Based on Immune Theory in Network Environment[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(2): 449-462.

Bus Traffic Strategy Based on Immune Theory in Network Environment

Li Cao^{1,2}, Zheng Rui^{1,2*}, Ma Xiaolu³, Ding Ziqiong^{1,2}, Zhong Junyi^{1,2}, Zhang Sheng^{1,2}, Qi Jingjing⁴

(1. School of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China; 2. Anhui Provincial Engineering Laboratory on Information Fusion and Control of Intelligent Robot (Anhui Normal University), Wuhu 241002, China; 3. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243000, China; 4. Anhui Dar Intelligent Control System Co. Ltd, Wuhu 241002, China)

Abstract: In V2X network environment, the bus system can obtain dynamic global information and the bus traffic strategy is carried out based on the road scene between adjacent bus stops. The mathematical model of bus rapid traffic is constructed with the difference of green time ratio as the main parameter. A hybrid genetic operator is proposed on the basis of the combination of genetic algorithm and immune theory, the design of affinity, the selection of excellent antibodies. A bus traffic strategy based on immune theory is proposed on the basis of the improvement of adaptive crossover and mutation probability. The simulation results show that compared with the fixed phase duration, the running, waiting, and parking times can be significantly reduced by using the genetic algorithm and immune theory. Compared with the genetic algorithms for traffic strategy, the change of the green time ratio of traffic strategy based on the immune theory is reduced by about 8.8% on average, and the convergence speed is increased by about 26.8% on average. The improved strategy can reduce the risk of falling into local optimum, which can

收稿日期: 2022-09-25 修回日期: 2022-11-15

基金项目: 安徽省科技重大专项(202003a05020028); 安徽省重点研究与开发计划(202004a0502001); 安徽省自然科学基金(1908085MF216); 安徽省高校优秀青年支持计划(gxyq202002)

第一作者: 李操(1997-), 男, 硕士生, 研究方向为车联网与智能优化。E-mail: licao1102@163.com

通讯作者: 郑睿(1980-), 男, 教授, 博士, 研究方向为机器人控制技术、智能网联技术。E-mail: zrxw0609@ahnu.edu.cn

realize the rapid traffic of the bus and improve the operation efficiency.

Keywords: V2X; bus system; traffic strategy; immune theory; hybrid genetic operator

0 引言

在国家提倡优先发展公共交通、构建通畅交通网络的背景下,推进公交优先发展战略有利于城市交通可持续发展,使得网联公交具有更广阔的发展前景^[1-2]。当前,V2X技术逐渐成熟,由此所构建的网联环境使得信息交互更加全面,能及时处理突发情况,适用于城市道路中的网联公交系统^[3-4]。

为了实现公交的快速通行,提升运行效率,需要开展针对性研究。文献[5]提出 SMINP (stochastic mixed-integer nonlinear program) 模型作为实时 TSP(transit signal priority)控制系统的核心组件,考虑公交车站停留和路口排队,在单路口下公交车延误得到显著改善。文献[6]分析了各种公交检测技术的进展,包括环形线圈、GPS 检测、视频检测和 RFID(radio frequency identification)技术等,并对应用环境展开分析。文献[7]提出一种路口到下游公交车站的短期预测模型,通过视频收集交通信息,可以很好的预测公交行驶时间,为实时控制策略提供基础。文献[8]采用遗传算法优化不同交通拥挤程度下单路口的公交优先信号配时,改善乘客出行,减少路段排队。文献[9]构建公交信号优化模型,运用遗传算法对模型求解,对交叉口的可靠性进行分析优化。总体来说,现有的研究主要是通过视频、感应线圈和射频等技术获取路口信息的,其研究针对单路口开展,所提出的设置专用车道、信号管控和综合待行区等方法,提升了公交车的运行效率^[10-11]。上述研究同时也表明,遗传算法在公交快速通行问题上起到了很好的优化效果。

在网联环境中,公交系统不仅可获取当前行驶路口的信息,还能实时获取将要行驶路口的信息。为推动公交优先策略,越来越多的城市对公

交线路的制定及设施设置更加的完善,公交优化方案更具有针对性^[12],对公交专用车道的运用也更加合理,很多示范城市的公交专用道网络已覆盖近一半的中心城区路网,即使高峰期时段公交车到达路口的行驶时间也可以预测^[13]。考虑到公交车与红绿灯等信息可以通过网联平台实时获取,相邻公交车站之间的路程不长,公交车的运行时间可以估算,本文选择相邻公交车站之间的道路为研究场景。该场景中可能不止一个路口,学术界已针对存在的多路口情况开展了相关研究,较常见的公交优先算法有绿灯延长、红灯截断和插入相位等^[14],其大多实施在检测点距离路口较近的场景,短时间内实行该算法可能会影响下一个路口的通行,并不一定会减少多路口场景下的公交通行时间^[15],所以,需开展车站间多路口场景的公交快速通行策略研究,进一步提高其运行效率。文献[16]引入公交专用相位的设置方法,实现了多路口下公交的绿波通行,提高了公交车的运行效率。文献[17]提出一种公交信号优先模型,在公交专用道上对多个交叉口实施最佳优先策略,减少了公交的延误时间。上述研究取得了一定的效果,但研究的多路口并未限制在相邻的公交车站之间。

以多路口环境为研究场景,首先需要构建网联公交在多路口环境中的数学模型。文献[18]以最小排队长度为指标,建立信号优化协调控制模型,最终找到合适的绿信比。文献[19]通过对绿信比和相位时间的多轮优化,提升了交叉口整体的通行效率。文献[20]根据视频排队长度,对绿信比进行小步调整,实现绿灯时长与各进口排队长度的协调,降低了交叉口的延误和拥堵。通过上述针对单路口环境的研究可知,绿信比的动态变化可直接影响车辆的通行,但较大程度更改绿信比可能也会妨碍道路交通,因此,绿信比是所构建数学

模型中的重要参数。

以多路口环境为场景开展研究, 相比单路口和双路口数据复杂程度更大, 所面临的数学模型的非线性程度更高, 导致在采用传统参数配置的遗传算法优化时, 容易陷入局部最优。免疫思想具有免疫记忆、个体多样性和鲁棒性等特性, 相比遗传算法只考虑个体适应度值、没有个体多样性调节, 免疫思想将亲和度和个体浓度作为综合评价标准, 具有促进或者抑制抗体产生的机制, 使种群多样性得到了提升, 免疫思想中特有的免疫记忆机制, 也使得抗原的应答速度得到提升^[21-22]。因此, 当数学模型复杂程度较高时, 为了避免遗传算法陷入局部最优, 将遗传算法与免疫思想相结合。文献[23]利用免疫与遗传相结合的方式, 包含免疫算法记忆与调节功能, 有效防止了种群早熟和陷入局部最优的问题, 优化了算法的效率。文献[24]把人工免疫机制与遗传算法结合, 并加入线性自适应交叉、变异概率, 提高了遗传进化过程中种群的多样性, 并验证了其有效性和效率。文献[25]在引入免疫算法的同时, 采用自适应交叉与变异算子, 提高了最优解的质量、算法速度和稳定性。文献[26]通过使用多种交叉算子, 并设计不同的选择概率, 用轮盘赌法选择交叉手段, 调节算法搜索能力。通过上述研究可知, 这种结合使算法的求解速度和效率均得到了改善, 因此, 需根据多路口环境提出一种免疫算法, 适应复杂的数据和非线性的数学模型, 减少算法陷入局部最优的风险, 并提高算法的计算效率。

针对上述问题, 本文以优化绿信比为目的构建数学模型, 确保公交可在多路口优先通行的同时, 尽可能少地影响其他车辆; 对模型求解时, 在遗传算法的基础上, 加入免疫思想, 提出一种改进算法, 使网联环境中相邻两站之间道路的公交能快速通行。

1 网联公交快速通行数学模型的构建

1.1 相邻公交车站之间多路口的场景

V2X技术的应用, 使得相邻公交车站之间的多路口快速通行策略成为可能。

图1为相邻公交车站之间含有3个路口的道路示意图, 每个路口都具有多相位的交通信号灯, 在距离第1个路口前 L_1 处设置公交决策点, 道路中黑色箭头方向代表着各路口的可通行方向。

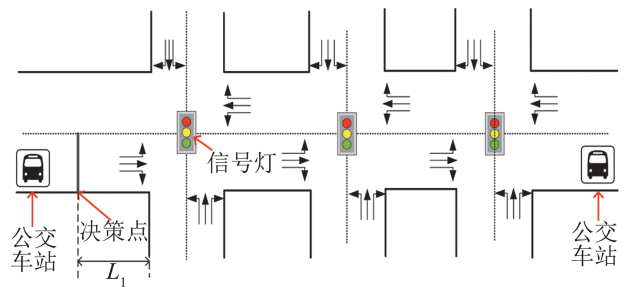


图1 多路口示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multiple intersections

在规定各路口信号灯相位顺序时, 实时根据公交车在各路口的通行方向设定, 公交车在第 N 个路口的通行方向为该路口信号灯的相位1(若公交车通行方向为东西直行, 则该路口信号灯东西直行方向为相位1; 若公交车通行方向为南北进口方向左转, 则该路口信号灯南北进口左转方向为相位1), 其余相位按照交通顺序依次定义。

在确定各路口相位顺序后, 第 N 个路口的有效绿灯时长按照交通顺序定义为 $g_i^{N,x}$, 且 $i \leq n$, i 表示信号灯所在的相位, x 表示信号灯是否进行配时, 取值为0或1, n 表示第 N 个路口信号灯的相位数量。在网联环境中, 系统可以实时获取到各路口的信号灯相位时长, 根据到达决策点时公交在各路口的通行情况, 决策信号灯是否重新配时。若路口信号灯按照原先配时不变, 此时 x 取值为0; 若公交不可通行该路口, 采用重新配时, 此时 x 取值为1。

1.2 目标函数的推导

网联公交的提出要求公交车能够快速、安全

地通过多路口，提高公交车的运行效率。为了达到上述目的，需要依靠 V2X 技术，实时改变交通信号灯的相位时长。令 $S(g_i^{N,x})$ 表示第 N 个路口的各相位绿信比(有效绿灯时间与周期的比值)差的绝对值总和：

$$S(g_i^{N,x}) = \sum_{i=1}^n |\lambda_i^{N,0} - \lambda_i^{N,1}| \quad (1)$$

式中： $\lambda_i^{N,0}$ 为第 N 个路口原信号配时第 i 个相位的绿信比，其中， $\lambda_i^{N,0} = g_i^{N,0}/C_N^0$ ， C_N^0 表示原信号配时第 N 个路口的信号周期； $\lambda_i^{N,1}$ 为第 N 个路口信号配时后第 i 个相位的绿信比，其中， $\lambda_i^{N,1} = g_i^{N,1}/C_N^1$ ， C_N^1 表示信号配时后第 N 个路口的信号周期； n 为路口相位数量。

为了尽可能减小由于网联公交快速通行对他车带来的影响，采用多个路口配时前后绿信比差的绝对值总和作为目标函数：

$$F(g) = \sum_{N=1}^m S(g_i^{N,x}) \quad (2)$$

本文考虑相邻车站之间的多路口公交快速通行策略，运用 V2X 技术实时获取道路信息、车辆位置和速度等信息，构建多路口绿信比优化模型。

1.3 快速通行策略

为保证公交车到达各个路口时尽可能快速通行，需要提取 V2X 传输的各项实时数据，通过配置有 V2X 设备的信号机适当改变各相位时长，使其通行方向的路口信号灯为绿灯，提出如图 2 所示的快速通行策略。

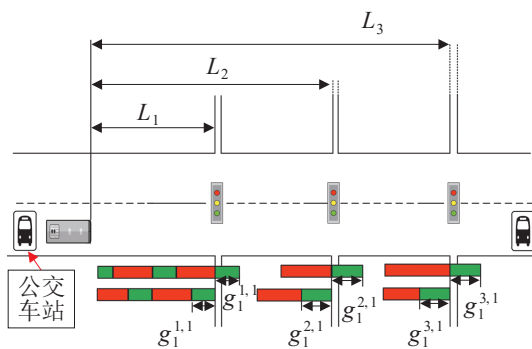


图 2 公交通行策略
Fig. 2 Traffic strategy

图 2 中 L_1 、 L_2 和 L_3 分别表示在决策点时公交车距离各路口的距离， $g_1^{1,1}$ 、 $g_2^{2,1}$ 和 $g_3^{3,1}$ 分别表示各路口重新配时后的有效绿灯时长。

在通行策略中，需在决策点处判断公交车在各路口的通行情况，若不能通过时，对该路口下信号灯重新配时，每个路口配时后的有效绿灯时长与周期需要相互制约，以实现公交快速通行多个路口，则第 N 个路口有效绿灯时长应满足：

$$L_N/v - g_{X_r}^{N,0} - \sum_{i=X+1}^n (g_i^{N,1} + l_i^N) - \lfloor L_N/vC_N^1 \rfloor \cdot C_N^1 \leq g_1^{N,1} \quad (3)$$

$$L_N/v - g_{X_r}^{N,0} - \sum_{i=X+1}^n (g_i^{N,1} + l_i^N) - \lfloor L_N/vC_N^1 \rfloor \cdot C_N^1 \geq 0 \quad (4)$$

式中： L_N 为决策点与第 N 个交叉口的距离； v 为公交车行驶时的平均速度； $g_{X_r}^{N,0}$ 为配时前第 N 个路口当前相位 X 的剩余时长， $X=1,2,\dots,n-1$ ； $g_i^{N,1}$ 为第 N 个路口配时后的有效绿灯时间； C_N^1 为配时后第 N 个路口的周期时长； l_i^N 为第 N 个路口各相位的损失时间； $\lfloor L_N/vC_N^1 \rfloor$ 为对 L_N/vC_N^1 向下取整。

当公交车处于决策点时，到达第 N 个路口的时间为 $t_i = L_N/v$ 。配时前，当前相位 X 的剩余时长为 $g_{X_r}^{N,0}$ ，对后续的相位时长进行分配，分配时间包含从相位 X 到达相位 n 的相位时长项 $\sum_{i=X+1}^n (g_i^{N,1} + l_i^N)$ ，可能包含周期项 $\lfloor L_N/vC_N^1 \rfloor \cdot C_N^1$ 。若要使公交车能够快速通行，配时应满足公交车到达各路口时，信号灯剩余相位时长处于 $(0, g_1^{N,1}]$ 范围内。

若在决策点时，当前相位 $X=n$ ，则 $\sum_{i=X+1}^n (g_i^{N,1} + l_i^N)$

存在于 $\lfloor L_N/vC_N^1 \rfloor \cdot C_N^1$ 中，式(3)(4)变换为

$$L_N/v - g_{X_r}^{N,0} - \lfloor L_N/vC_N^1 \rfloor \cdot C_N^1 \leq g_1^{N,1} \quad (5)$$

$$L_N/v - g_{X_r}^{N,0} - \lfloor L_N/vC_N^1 \rfloor \cdot C_N^1 \geq 0 \quad (6)$$

有效绿灯时长、周期时长和平均速度应满足以下约束：

(1) 最小有效绿灯时长和周期约束

过短的绿灯时间可能会影响其他车道的车辆

通行, 为了保证各车道车辆的安全通行, 需要制定一个最小有效绿灯时间 g_{\min} , 使 $g_i^{N,1} \geq g_{\min}$, 过大或过小的周期对道路交通都有负面影响, 实际周期的长短最好不超过 $200 \text{ s}^{[27]}$ 。本文设最小周期时长为 C_{\min} , 最大周期时长为 C_{\max} , 且周期时长由各相位有效绿灯时长和损失时间构成。

(2) 公交车辆速度

在城市道路中公交车辆的速度一般在 $25 \sim 50 \text{ km/h}$, 不会超过 $60 \text{ km/h}^{[28]}$ 。

1.4 数学模型的构建

为保证公交可以快速通过多个路口, 在式(3)~(6)及其他附属约束范围内找出使得公交通行的最优解, 构建全局公交通行策略模型。对 $\min F(g)$, $g \in \Omega$ 求解最优值, $g = (g_{1,1}^{1,1}, g_{2,2}^{1,1}, \dots, g_{n,i}^{1,1}, \dots, g_{1,n \times (m-1)+1}^{m,1}, \dots, g_{n,m \times n}^{m,1})$ 为 $m \times n$ 维决策变量, 决策变量可行解空间为 Ω 。综上公交车优先通行的模型为

$$\min F(g) = \sum_{N=1}^m S(g_i^{N,x}) \quad (7)$$

2 基于免疫思想的通行策略

多路口之间存在相互耦合, 大大增加了多路口场景数据的复杂性。为了减小针对数学模型的求解陷入局部最优的风险, 基于免疫的思想, 提出改进算法, 同时提高求解的效率。

2.1 初始种群的产生

对算法的目标函数与约束进行定义, 式(3)~(6)及其附属约束作为抗原并进行输入。把各路口信号灯时长作为抗体, 进行实数编码, 并产生种群数量为 M 的初始种群, 且均满足相关约束。

2.2 亲和度的设计与优秀抗体的选取

亲和度大小是免疫细胞与抗原结合的强度, 根据所输入的抗原, 把目标函数的倒数作为亲和度函数, 亲和度函数为

$$A = \frac{1}{F(g)} \quad (8)$$

由式(8)可知, 亲和度越大, 则个体应尽量保留。将数量为 M 的初始种群进行抗体亲和度的计算, 按照亲和度进行降序排列, 加入免疫思想中特有的免疫记忆, 采取存储优良抗体策略, 取前 μ 个抗体存入记忆库, 避免被筛选, 提升应答速度。

免疫思想中抗体浓度可以评价出种群多样性水平, 抗体浓度过高表明量相似的抗体较多, 全局优化能力变弱。为避免存在大量相似抗体, 对未存入记忆库的 $M - \mu$ 个抗体计算抗体间的距离。若两抗体为 $H_a = (k_{1,1}^{1,1}, k_{2,2}^{1,1}, \dots, k_{n,i}^{1,1}, \dots, k_{1,n \times (m-1)+1}^{m,1}, \dots, k_{n,m \times n}^{m,1})$ 和 $H_b = (q_{1,1}^{1,1}, q_{2,2}^{1,1}, \dots, q_{n,j}^{1,1}, \dots, q_{1,n \times (m-1)+1}^{m,1}, \dots, q_{n,m \times n}^{m,1})$, 抗体间的欧式距离为

$$d(H_a, H_b) = \sqrt{\sum_{\varepsilon=1}^{m \times n} (H_a^\varepsilon - H_b^\varepsilon)^2} \quad (9)$$

式中: ε 为抗体编码的第 ε 维。 $d(H_a, H_b) = 0$ 表示两抗体一致。

计算两抗体的相似度:

$$S(H_a, H_b) = \begin{cases} 1, & d(H_a, H_b) < T \\ 0, & d(H_a, H_b) > T \end{cases} \quad (10)$$

式中: T 为相似度阈值。

根据相似度, 计算抗体的浓度:

$$C_v(H_a) = \frac{1}{M - \mu} \sum_{b=1}^{M - \mu} S(H_a, H_b) \quad (11)$$

式中: $M - \mu$ 为种群中剩余的抗体数; H_b 为剩余抗体中的第 b 个抗体。

根据免疫学思想, 为保证种群的多样性, 避免算法未成熟收敛, 保留亲和度较大的抗体、抑制高浓度和促进低浓度抗体, 由期望繁殖概率决定抗体的优良水平^[29]:

$$P = \alpha \frac{A(H_a)}{\sum_{a=1}^{M - \mu} A(H_a)} + (1 - \alpha) \frac{C_v(H_a)}{\sum_{a=1}^{M - \mu} C_v(H_a)} \quad (12)$$

式中: α 为小于 1 的常数。

对剩余抗体由繁殖概率进行降序排列, 取前 σ 个抗体和之前的 μ 个抗体共同形成记忆库, 则记忆库容量 $B = \mu + \sigma$, 同时取前 K 个抗体形成父代群体。以上完成了对一代抗体的保留和筛选。

2.3 混合遗传算子的提出

网联公交系统需具有很好的实时性，由于快速通行模型约束性强，若采用单一遗传算子，其子代会存在不满足约束条件，重新进行遗传操作而影响系统实时性。为此提出混合式遗传算子，设 X_p 和 Y_p 为2个父代抗体：

$$X_p = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (13)$$

$$Y_p = [y_1, y_2, \dots, y_n] \quad (14)$$

式中： x_n 、 y_n 为父代基因。

利用混合交叉算子同时产生2个子代，利用中间重组算子，得到子代基因：

$$x_{i_{c_1}} = y_i + \phi(x_i - y_i), \phi \in (0, 1) \quad (15)$$

$$y_{i_{c_1}} = x_i + \phi(y_i - x_i), \phi \in (0, 1) \quad (16)$$

利用模拟二进制交叉算子SBX(simulated binary crossover)，得到子代基因：

$$x_{i_{c_2}} = 0.5(1 + \zeta)x_i + 0.5(1 - \zeta)y_i \quad (17)$$

$$y_{i_{c_2}} = 0.5(1 - \zeta)x_i + 0.5(1 + \zeta)y_i \quad (18)$$

$$\zeta = \begin{cases} (2w)^{\frac{1}{\delta+1}}, & w \leq 0.5 \\ \left(\frac{1}{2(1-w)}\right)^{\frac{1}{\delta+1}}, & w > 0.5 \end{cases} \quad (19)$$

式中： ζ 为分布函数； δ 取值 $2^{[30]}$ ； $w \in [0, 1]$ 。

若2种交叉方式子代都满足约束，则对这2种方式的子代进行亲和度计算，取亲和度大的个体作为子代；若只有1种交叉方式满足约束，则采用该交叉方式。上述交叉方式，既可提升种群的多样性与质量，又可提升算法计算效率。若2种交叉方式都不满足约束，取

$$x_{i_c} = y_{i_c} = y_i + \phi(x_i - y_i) \quad (20)$$

$$\phi = \frac{\max(A(X), A(Y))}{A(X) + A(Y)} \quad (21)$$

采用该种交叉方式，亲和度较大的父代权重更高，其在权重更高的父代附近产生子代，子代多样性较差，但可产生合理的子代，减少出现交叉不可行的现象。

变异采用非均匀变异，其前期可搜索范围大，后续阶段不会逃离当前解的邻域而获取较优个体，

得到子代基因：

$$x_{k_c} = \begin{cases} x_k + \Delta(i, u_{\max}^k - x_k), & 0 \leq \rho \leq 0.5 \\ x_k - \Delta(i, x_k - u_{\min}^k), & 0.5 < \rho \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中：随机数 $r \in (0, 1)$ ； u_{\max}^k 和 u_{\min}^k 为变异点的上下界； $\Delta(i, *) = * \cdot (1 - r^{(1-i/G)^b})$ ， $\Delta(i, *)$ 可生成 $[0, *]$ 的随机数； i 为实时迭代次数； G 为总迭代次数； b 取 $5^{[31]}$ 。

2.4 自适应交叉、变异概率的改进

在完成抗体筛选后，再根据抗体的期望繁殖概率对抗体群进行选择、交叉与变异操作。

为了进一步提高种群的多样性和算法的收敛速度，Srinivas等^[32]提出线性的改变交叉、变异概率，但采用线性的交叉、变异概率求解模型时，由于多路口数据的复杂性，也存在陷入局部最优的风险。为确保快速收敛，使曲线的倾斜程度根据种群整体适应度水平被提高，这样不仅可以使种群快速收敛，满足系统实时性的要求，而且还可以保证最小和平均适应度附近个体的交叉、变异概率趋势不变，改进后公式为

$$p_c = \begin{cases} \frac{p_{c,\max} - p_{c,\min}}{A\left(2\left(\frac{f_{\text{avg}} - f}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}\right)^{\frac{f_{\text{avg}}}{f_{\min}}} - 1\right)} + p_{c,\min}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ p_{c,\min}, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (23)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{p_{m,\max} - p_{m,\min}}{A\left(2\left(\frac{f_{\text{avg}} - f}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}\right)^{\frac{f_{\text{avg}}}{f_{\min}}} - 1\right)} + p_{m,\min}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ p_{m,\min}, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (24)$$

为更能体现优化的实时性，在分子中引入最大迭代次数和当前迭代次数相关参数，使种群整体的交叉、变异率随着代数的增加而适当减少，对分子项加入代数因素，改进后公式为

$$p_c = \begin{cases} \frac{(p_{c,\max} - p_{c,\min})(1 - i/G)}{A\left(2\left(\frac{f_{\text{avg}} - f}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}\right)^{\frac{f_{\text{avg}}}{f_{\min}}} - 1\right)} + p_{c,\min}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ p_{c,\min}, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (25)$$

$$p_m = \begin{cases} \frac{(p_{m,\max} - p_{m,\min})(1 - i/G)}{A\left(2\left(\frac{f_{\text{avg}} - f}{f_{\text{avg}} - f_{\min}}\right)^{\frac{f_{\text{avg}}}{f_{\min}}} - 1\right)} + p_{m,\min}, & f \leq f_{\text{avg}} \\ p_{m,\min}, & f > f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (26)$$

式中: i 为当前迭代次数; G 为最大迭代次数; f_{avg} 为适应度平均值; f_{min} 为适应度最小值; f 为适应度值; A 为常数。

考虑代数的变化来动态调整交叉、变异概率, 使初期的全局搜索提高, 随着代数增加, 局部搜索能力增强, 并且 f_{avg} 与 f_{min} 接近时, 曲线的倾斜程度也会变大, 大部分个体的交叉、变异率提高, 减少陷入局部最优的风险。

2.5 算法流程

根据上述研究, 在网联环境中实施公交车快速通行策略, 求解以绿信比差的绝对值为目标函数的优化问题具体步骤如下。

step 1: 构建多路口场景地图, 设置公交车参数、道路信息参数和信号灯信息, 初始化种群大小、记忆库数量、最大迭代次数等算法相关参数。

step 2: 计算亲和度函数并进行降序排序, 取前 μ 个抗体存入记忆库, 避免浓度过高而被筛除。

step 3: 对上述剩余抗体运用欧氏距离记录各抗体之间的距离, 进而计算抗体浓度, 以繁殖概率为指标进行降序排列, 取前 σ 个抗体存入记忆库, 取排序后的前 K 个抗体构成父代种群。

step 4: 父代种群进行选择、交叉和变异操作, 再与记忆库中 $B = \mu + \sigma$ 个抗体相结合, 共同构成新的种群。

step 5: 继续执行 step 2~4, 直至迭代次数达到 G 。

step 6: 迭代结束后, 输出算法最优解, 并作用于信号灯。

3 仿真和分析

3.1 应用方案

基于 V2X 的网联环境中公交通行策略的实现方案如图 3 所示。

图 3 场景为相邻公交车站之间的一条城市道路, 标识 1、2、3 为道路中的交叉口, 标识 A 为一辆装有 V2X 系统车载设备的公交车辆, 标识 B1、B2、B3 为各交叉口装配有 V2X 设备的信号机系统, 标识 C 为云服务器, 用于接受信号机信息并作用优化算法, 用于接收和下发信息, 标识 D 为 Web 端大屏, 用于实时展示道路和车辆信息。

在图 3 所示的通行策略中, 基于 V2X 的网联乘用车已经在多个城市开展道路示范, 所以该快速通行策略具有可行性。

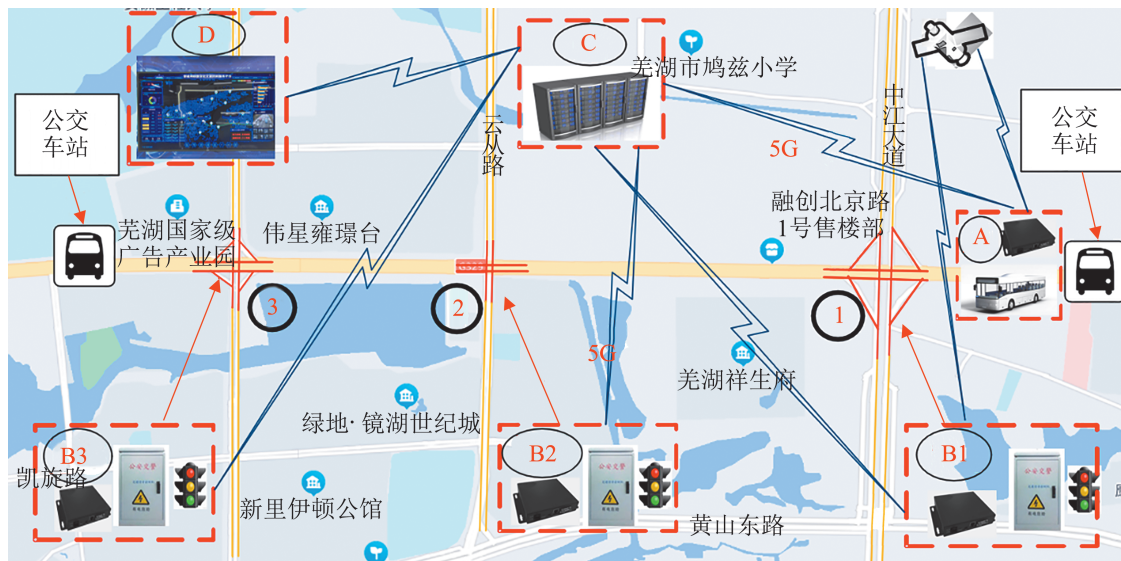


图3 基于V2X网联环境中公交通行策略实现方案

Fig. 3 Implementation scheme of bus traffic strategy based on V2X networking environment

3.2 实验参数

根据上述的实现方案开展仿真实验，为了使仿真与实际贴近，V2X参数和信号机参数使用课题组所研发设备的实际参数。

(1) V2X参数

设备与设备之间的通信在5 850~5 925 MHz频段，设备与公交车辆之间支持高、低速CAN通信，设备内部模块间采用TCP协议的Socket通信。公交车辆通过V2X系统实时获取道路环境信息和信号灯信息，同时服务器平台获取公交车辆速度、位置和路口信号灯等信息。课题组研发的V2X设备如图4所示。



图4 V2X设备实物图
Fig. 4 Physical view of V2X device

(2) 信号机参数

课题组已研发如图5所示信号机。该信号机采用双层控制，具有信号灯驱动、故障检测、相位切换、获取路况信息、车检感应和V2X通信等功能。该信号机由于V2X技术的加入，实现了信号机与车辆以及其他路侧设备之间的信息交互。图中标号1为流量控制板，标号2~6为灯控板，标号7为核心控制板。

(3) 环境参数

三路口场景设置为由西向东全长2 200 m的城市道路，途中设置3个具有4个相位的交叉路口，公交通行方向皆为向东直行，并在 $L_1=750$ m处设置公交决策点，在道路上随机生成车流量，实施

公交快速通行策略。为保证数据的真实和实用性，观察并记录本地多个交叉口红绿灯情况，作用于SUMO(simulation of urban mobility)中的路口信号灯，并通过仿真得到优化数据。



图5 信号机实物图
Fig. 5 Physical drawing of annunciator

当道路设置为三路口时，选取2组交通灯相位进行仿真研究：一组是当公交车到达决策点时，三路口的交通灯相位为2、1和2，第1个路口信号灯为相位2，第2个路口信号灯相位为1，第3个路口信号灯相位为2；另一组是交通灯相位为4、2和4。

(4) 免疫参数

本文提出基于免疫思想的通行策略中，种群数量 $M=110$ ，父代种群数 $K=100$ ，相似度阈值 $T=0.9$ ，多样性评价系数 $\alpha=0.95$ ，记忆库容量 $B=10$ ，其中， $\mu=3$ ， $\sigma=7$ ，种群最大迭代次数 $G=100$ ，自适应交叉、变异概率式中的系数 $A=9.903\ 438$ ，自适应交叉、变异概率最小和最大值为分别为 $P_{c,\min}=0.2$ 、 $P_{c,\max}=0.9$ 、 $P_{m,\min}=0.01$ 、 $P_{m,\max}=0.1$ 。

(5) 遗传参数

为了对比基于免疫思想的通行策略，针对相同的问题，采用遗传算法的通行策略。因此，设

置通用的遗传参数: 种群数量 $M=110$, 最大迭代次数 $G=100$, 采用线性的交叉、变异概率, 且最小和最大值分别为 $P_{c,\min}=0.2$ 、 $P_{c,\max}=0.9$ 、 $P_{m,\min}=0.01$ 、 $P_{m,\max}=0.1$ 。

(6) 两种通行策略的约束参数

在满足式(3)~(6)的同时, 根据所观察信号灯的相位时长, 且为防止周期过长, 最大和最小周期选取 $C_{\max}=150\text{ s}$, $C_{\min}=80\text{ s}$ ^[33], 损失时间 $l_i^N=1\text{ s}$, 取最小有效绿灯时间 $g_{\min}=15\text{ s}$ ^[27], 为保证公交车速在安全速度内, 取平均车速 $v=40\text{ km/h}$ 。

(7) 优化目标

以城市道路为应用场景, 以公交车通过多路口前后绿信比绝对值之差的总和为优化目标。

对上述应用方案开展仿真实验, 仿真平台采用SUMO仿真软件, 对双路口和三路口进行仿真

操作并进行数据分析。

3.3 相邻两站之间存在三路口情况

根据设置的参数, 在固定相位时长、遗传算法的通行策略和基于免疫思想的通行策略3种情况下, 开展针对双路口的仿真与分析, 得到公交车通过路口瞬间的情况, 如图6所示。

三路口情况下, 利用遗传算法的通行策略和基于免疫思想的通行策略, 公交车的通行时间相比于固定相位时长也大大减少, 且在2种相位情况下, 基于免疫思想的通行策略相比固定相位时长公交通行时间分别减少约125.9 s和115.2 s。比较2种通行策略, 公交车的通行时间存在较小差异。在公交车快速通行路口的基础上, 使前后绿信比的变化尽可能小, 提出自适应交叉、变异概率, 如图7~8所示。

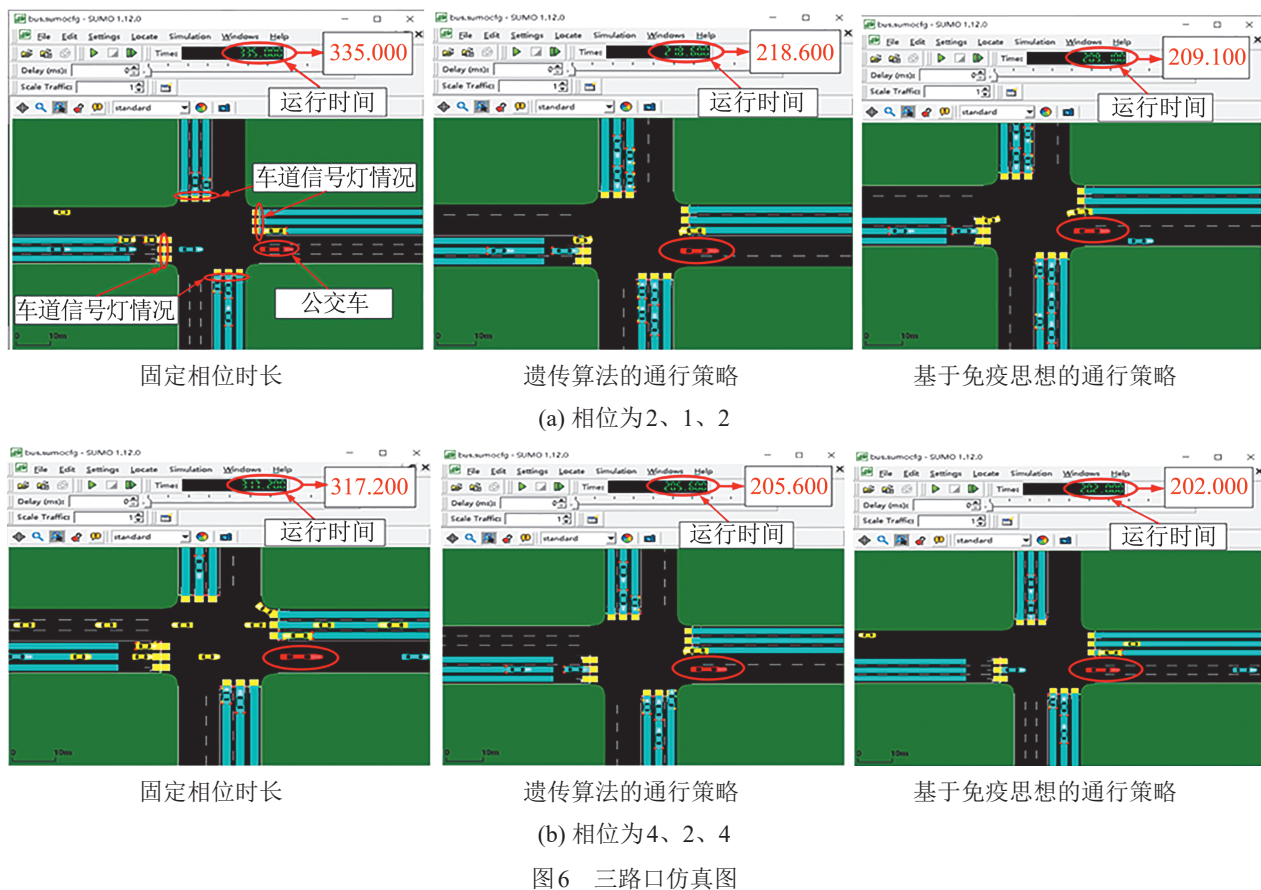


Fig. 6 Simulation diagram of three intersections

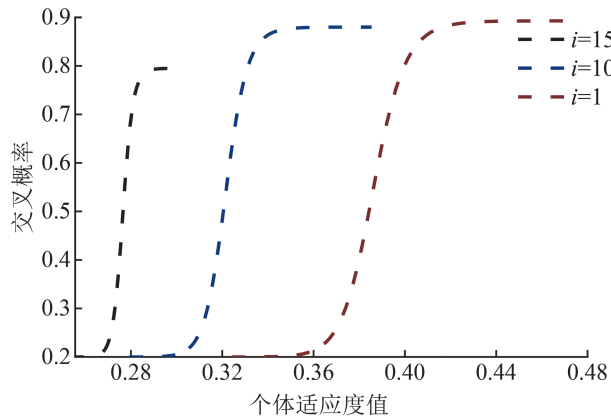


图7 自适应交叉曲线图
Fig. 7 Adaptive crossover curve

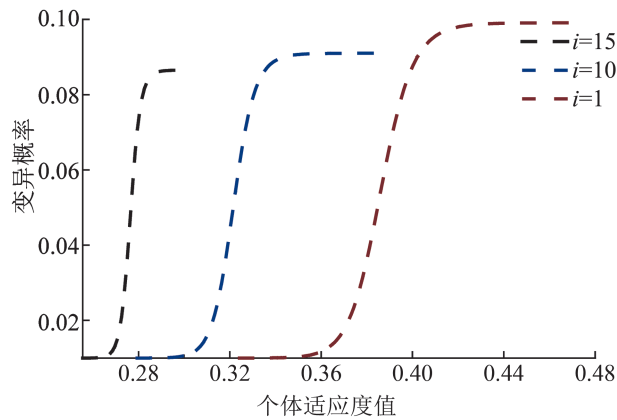


图8 自适应变异曲线图
Fig. 8 Adaptive variation curve

图7~8为决策点相位为2、1、2，种群当前代数 i 为1、10、15时的交叉、变异曲线图，个体交叉、变异概率随个体适应度值动态调整。在某一代中， f_{avg} 与 f_{min} 的比值影响曲线整体的倾斜程度，增加了这一代种群的交叉、变异概率；且随着迭代次数的增加， f_{avg} 和 f_{min} 也越来越接近，则曲线也将越来越倾斜，使得种群大部分个体交叉、变异概率都变大；随着代数增加，种群最大交叉、变异概率也得到降低，动态调整了全局和局部搜索能力。当相位为4、2、4时，交叉、变异概率曲线与图7~8类似。

2种通行策略下迭代次数与适应度值关系的曲线如图9~10所示。

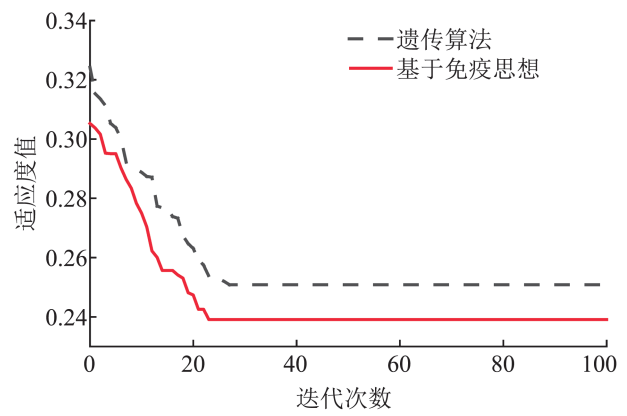


图9 相位2、1、2迭代曲线图
Fig. 9 Phase 2、1、2 iteration curve

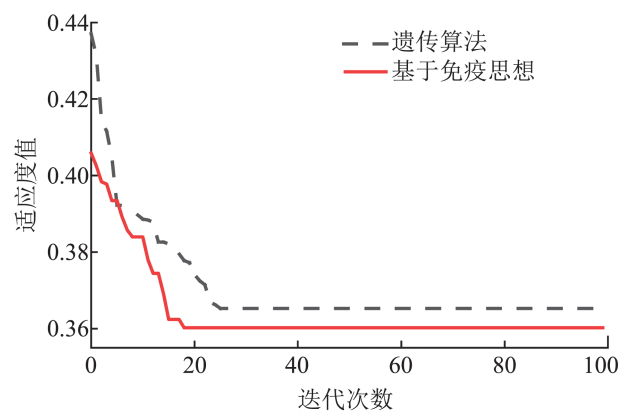


图10 相位4、2、4迭代曲线图
Fig. 10 Phase 4、2、4 iteration curve

由图9可知，黑色曲线在第27代达到最优值，红色曲线在第23代曲线达到最优值，且绿信比绝对值之差的最优值降低了约4.6%，收敛速度提升了约14.8%；图10中黑色曲线在第25代曲线达到了最优值，红色曲线在第18代曲线达到最优值，且绿信比绝对值差最优值降低了约1.4%，收敛速度提升了约28%。由此再一次验证了本文所提出基于免疫思想的通行策略具备有效性与高效性。

为进一步验证通行策略的有效性，运用仿真平台对三路口下多种相位情况下开展多次实验，并记录公交车的通行时间、停车次数、路口等待时长、取整前的目标函数最优值与迭代次数等各项重要数据的平均值，如表1所示。

表1 三路口仿真优化结果
Table 1 Simulation and optimization results of three intersections

方法	决策点 相位	原相位时长/s	配时后相位时长	通行时间/s	停车 次数	路口等待 总时长/s	绿信比差的 绝对值总和	迭代 次数
固定相位时长	(1, 4, 1)	(20, 20, 30, 20) (30, 25, 30, 25) (28, 25, 28, 25)		241.4	2	29.1		
遗传算法的 通行策略	(1, 4, 1)	(20, 20, 30, 20) (30, 25, 30, 25) (28, 25, 28, 25)	(39, 18, 18, 17) (30, 20, 25, 18) (25, 21, 24, 20)	211.3	2	3.5	0.737	38
基于免疫思想 的通行策略	(1, 4, 1)	(20, 20, 30, 20) (30, 25, 30, 25) (28, 25, 28, 25)	(38, 17, 18, 17) (30, 24, 29, 24) (25, 21, 24, 23)	216.8	1	1.2	0.675	29
固定相位时长	(2, 1, 2)	(30, 25, 40, 25) (35, 20, 30, 25) (28, 25, 28, 25)		335.0	3	127.0		
遗传算法的 通行策略	(2, 1, 2)	(30, 25, 40, 25) (35, 20, 30, 25) (28, 25, 28, 25)	(21, 20, 27, 23) (33, 29, 37, 27) (29, 20, 30, 22)	218.6	2	6.1	0.284	31
基于免疫思想 的通行策略	(2, 1, 2)	(30, 25, 40, 25) (35, 20, 30, 25) (28, 25, 28, 25)	(25, 21, 29, 21) (30, 28, 39, 26) (33, 24, 29, 24)	209.1	2	4.4	0.247	24
固定相位时长	(4, 2, 4)	(30, 35, 30, 35) (35, 25, 35, 25) (28, 20, 28, 20)		333.6	1	91.9		
遗传算法的 通行策略	(4, 2, 4)	(30, 35, 30, 35) (35, 25, 35, 25) (28, 20, 28, 20)	(42, 30, 31, 37) (40, 27, 40, 39) (20, 20, 21, 21)	210.7	0	1.8	0.384	38
基于免疫思想 的通行策略	(4, 2, 4)	(30, 35, 30, 35) (35, 25, 35, 25) (28, 20, 28, 20)	(39, 29, 35, 39) (42, 27, 34, 36) (21, 21, 21, 21)	202.0	0	0	0.377	24

表1中决策点相位表示公交车到达决策点时各路口当前所处的相位, 括号中每一项代表各路口所处相位; 原相位时长指各路口原本固定的相位时长; 配时后相位时长指实时更新后满足公交通行策略的信号灯时长; 通行时间、停车次数和路口等待时间分别在SUMO中通过TraCI(traffic control interface)接口获取; 绿信比差的绝对值总和为曲线收敛时的最优值; 迭代次数表示曲线收敛时的代数。

由表1可知, 三路口的情况下, 相比于遗传算法的通行策略, 基于免疫思想的通行策略在各种情况下的平均最优值分别降低了约8.4%、13%

和1.8%, 且平均收敛速度提升了约23.7%、22.5%和36.8%。

由于相邻车站间也存在着单路口或者双路口的情况, 为验证本算法的有效性, 对单路口和双路口开展多次实验, 并记录公交车的通行时间、停车次数、路口等待时长、取整前的目标函数最优值与迭代次数等各项重要数据的平均值, 如表2所示。

由表2可知, 在单路口或者双路口情况下, 基于免疫思想的通行策略在各种情况下的平均最优值分别降低了约12.5%、4.8%和12.3%, 且平均收敛速度提升了约21.7%、25.0%和31.0%。

表 2 单和双路口仿真优化结果
Table 2 Simulation and optimization results of single and double intersection

方法	决策点 相位	原相位时长/s	配时后相位时长	通行 时间/s	停车 次数	路口等待 总时长/s	绿信比差的 绝对值总和	迭代 次数
固定相位时长	(3)	(20, 25, 20, 30)		149.7	1	71.8		
遗传算法的通行策略	(3)	(20, 25, 20, 30)	(23, 29, 24, 34)	75.5	0	0	0.016	23
基于免疫思想的通行策略	(3)	(20, 25, 20, 30)	(23, 27, 22, 33)	75.5	0	0	0.014	18
固定相位时长	(3, 3)	(25, 20, 25, 20) (35, 30, 25, 30)		203.8	1	61.9		
遗传算法的 通行策略	(3, 3)	(25, 20, 25, 20) (35, 30, 25, 30)	(31, 25, 29, 26) (26, 20, 27, 20)	151.7	1	3.4	0.062	36
基于免疫思想的通行策略	(3, 3)	(25, 20, 25, 20) (35, 30, 25, 30)	(29, 24, 29, 25) (24, 21, 24, 21)	150.1	1	1.9	0.059	27
固定相位时长	(4, 1)	(35, 30, 35, 35) (30, 26, 28, 20)		286.8	2	143.7		
遗传算法的 通行策略	(4, 1)	(35, 30, 35, 35) (30, 26, 28, 20)	(40, 34, 38, 35) (36, 31, 35, 35)	147.1	0	0	0.057	29
基于免疫思想的通行策略	(4, 1)	(35, 30, 35, 35) (30, 26, 28, 20)	(39, 33, 37, 35) (35, 30, 34, 34)	147.1	0	0	0.050	20

4 结论

网联技术在不断改善，并逐渐步入人们生活之中。网联公交合理地快速通行，促进网联与公交的结合，是当前网联平台发展的趋向，对人们生活有着重要的意义。本文运用基于免疫思想的通行策略，减少在网联环境中求解多路口环境时算法陷入局部最优的风险，提高算法的求解效率，减少公交车在多路口环境下的停车次数与运行时间，验证了通行策略的可行性和有效性，为公交网联平台的构建提供了理论思路。后续的工作还需增加考虑其他车辆因素的影响，完善场景分析，进一步提升相关优化方法的可靠性。

参考文献:

- [1] 徐猛, 刘涛, 钟绍鹏, 等. 城市智慧公交研究综述与展望[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(2): 91-108.
Xu Meng, Liu Tao, Zhong Shaopeng, et al. Urban Smart Public Transport Studies: A Review and Prospect[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(2): 91-108.
- [2] Liu Zicheng, Wu Naiqi, Gao Kaizhou. Urban Traffic Light Control Considering Capacity Difference Between Public Bus and Private Vehicles[J]. IEEE Access, 2021, 9: 142664-142680.
- [3] Khabaz Sehla, Thi Mai Trang Nguyen, Guy Pujolle, et al. Resource Allocation Modes in C-V2X: from LTE-V2X to 5G-V2X[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9 (11): 8291-8314.
- [4] Lü Yuqi, Wang Yunting, Liu Xiaoyong, et al. Research on Performance Testing for Urban Scenario Based on Terminal Equipment of LTE-V2X Vehicle Network[C]// 2018 14th IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2018: 993-996.
- [5] Zeng Xiaosi, Zhang Yunlong, Balke K N, et al. A Real-time Transit Signal Priority Control Model Considering Stochastic Bus Arrival Time[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(4): 1657-1666.
- [6] 凌利, 左宸, 崔嘉齐, 等. 公交车辆检测技术研究进展[J]. 现代电子技术, 2012, 35(21): 127-131.
Ling Li, Zuo Chen, Cui Jiaqi, et al. Review of Development of Detection Techniques for Public Transport Vehicles[J]. Modern Electronics Technique, 2012, 35(21): 127-131.
- [7] Zhang Hu, Liang Shidong, Han Yin, et al. A Prediction Model for Bus Arrival Time at Bus Stop Considering Signal Control and Surrounding Traffic Flow[J]. IEEE Access, 2020, 8: 127672-127681.
- [8] 李曙光, 魏靖雅, 折胜军. 考虑物理排队的自适应公交优先信号设置[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37

- (1): 93-99, 126.
Li Shuguang, Wei Jingya, She Shengjun. Adaptive Bus Priority Signal Control Considering Physical Queues[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2017, 37(1): 93-99, 126.
- [9] 乔文鑫, 王锭. 基于交叉口可靠性的公交优先信号配时优化模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17(2): 54-59, 67.
Qiao Wenxin, Wang Ding. A Transit Signal Priority Optimizing Model Based on Reliability[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(2): 54-59, 67.
- [10] 窦慧丽, 马万经, 王国华. 基于公交优先的单点交叉口车道信号协同配置模型[J]. 公路交通科技, 2019, 36(11): 75-82.
Dou Huili, Ma Wanjing, Wang Guohua. An Integrated Lane-marking and Signal Timing Model for Isolated Intersection Based on Transit Priority[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(11): 75-82.
- [11] 邓明君, 陈佳, 姚宇. 基于公交优先与综合待行区的交叉口信号控制研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(8): 36-44.
Deng Mingjun, Chen Jia, Yao Yu. Intersection Signal Control Based on Bus Priority and Comprehensive Approach Area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2020, 39(8): 36-44.
- [12] 李竹薇, 金江凯, 卢佳诚. 经济发达地区中小城市城乡公交优先发展研究[J]. 江苏科技信息, 2022, 39(1): 66-68.
Li Zhuwei, Jin Jiangkai, Lu Jiacheng. Research on the Priority Development of Urban and Rural Public Transport in Small and Medium-sized Cities in Economically Developed Areas[J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2022, 39(1): 66-68.
- [13] 俞山川, 王少飞, 江维维. 重庆主城区公交专用道运行保障措施探析[J]. 重庆交通大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 43-49.
Yu Shanchuan, Wang Shaofei, Jiang Weiwei. Research of Operation Support for Bus Lane in Metropolitan Area of Chongqing[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2021, 21(3): 43-49.
- [14] 闫常鑫, 谢覃禹, 郭劲松. 智能网联公交信号优先技术决策前评价[J]. 交通科技与经济, 2022, 24(1): 48-56.
Yan Changxin, Xie Tanyu, Guo Jinsong. Evaluation of the Intelligent and Connected Bus Signal Priority Technology Before Decision Making[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2022, 24(1): 48-56.
- [15] Ma Wanjing, Ni Wei, Head L, et al. Effective Coordinated Optimization Model for Transit Priority Control Under Arterial Progression[J]. Transportation Research Record, 2013, 2366(1): 71-83.
- [16] 杨震, 王炜, 陈淑燕, 等. 干线公交绿波通行控制中公交专用相位的设置方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(4): 854-858.
Yang Zhen, Wang Wei, Chen Shuyan, et al. Setting Methods of Bus Exclusive Phase in Bus Green-wave Control of Urban Arterial[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2014, 44(4): 854-858.
- [17] Long Tien Truong, Graham Currie, Mark Wallace, et al. Coordinated Transit Signal Priority Model Considering Stochastic Bus Arrival Time[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(4): 1269-1277.
- [18] Tang Minan, Wang Qianqian, Zhang Kaiyue, et al. Signal Coordination Control of Intersection Adjacent to Main Road Based on Hybrid Automata[C]//2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2021: 6657-6662.
- [19] 卢凯, 林观荣, 林永杰, 等. 考虑车流通行需求的交叉口绿信比分配模型[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2019, 49(3): 603-610.
Lu Kai, Lin Guanrong, Lin Yongjie, et al. Intersection Split Allocation Model Considering Traffic Flow Demand[J]. Journal of Southeast University(Natural Science Edition), 2019, 49(3): 603-610.
- [20] 吴益源, 连培昆, 郭建钢, 等. 基于视频排队长度管理的小步增减绿信比优化方法[J]. 计算机应用, 2020, 40(6): 1842-1849.
Wu Yiyuan, Lian Peikun, Guo Jiangang, et al. Optimization Method of Incremental Split Selection Based on Video Queue Length Management[J]. Journal of Computer Applications, 2020, 40(6): 1842-1849.
- [21] 石荣, 刘江. 干扰资源分配问题的智能优化应用研究综述[J]. 电光与控制, 2019, 26(10): 54-61.
Shi Rong, Liu Jiang. Application of Intelligent Optimization Methods in Jamming Resource Allocation: A Review[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(10): 54-61.
- [22] 蒋亚平, 张安康, 黎星. 人工免疫系统的研究进展与展望[J]. 信息安全与通信保密, 2021(2): 83-92.
Jiang Yaping, Zhang Ankang, Li Xing. Research Progress and Prospect of Artificial Immune System[J]. Information Security and Communications Privacy, 2021(2): 83-92.
- [23] Wang Yingchen, Geng Xiaoxiao, Zhang Fan, et al. An

- Immune Genetic Algorithm for Multi-echelon Inventory Cost Control of IOT Based Supply Chains[J]. IEEE Access, 2018, 6: 8547-8555.
- [24] Ren Huizhi, Xu Han, Sun Shenshen. Immune Genetic Algorithm for Multi-objective Flexible Job-shop Scheduling Problem[C]//2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 2167-2171.
- [25] Xu Xiaoxian, Xu Pengying, Wang Yan, et al. Intelligent Design of Reconfigurable Microstrip Antenna Based on Adaptive Immune Annealing Algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-14.
- [26] 耿焕同, 孙家清, 贾婷婷. 基于自适应启动策略的混合交叉动态约束多目标优化算法[J]. 模式识别与人工智能, 2015, 28(5): 411-421.
Geng Huantong, Sun Jiaqing, Jia Tingting. A Mixture Crossover Dynamic Constrained Multi-objective Evolutionary Algorithm Based on Self-adaptive Start-up Strategy[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2015, 28(5): 411-421.
- [27] 曾松林, 余立建, 郭翠玲. 基于粒子群的城市交通信号两级模糊控制[J]. 交通科技与经济, 2013, 15(2): 88-92.
Zeng Songlin, Yu Lijian, Guo Cuiling. Two-stage Fuzzy Control for Urban Traffic Signals Based on Particle Swarm Optimization[J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2013, 15(2): 88-92.
- [28] 张雅楠, 唐阳山, 田国红, 等. 基于Python数据处理的不安全驾驶行为研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 381-383, 388.
Zhang Yanan, Tang Yangshan, Tian Guohong, et al. Study of Unsafe Driving Behaviors Based on Data Treating with Python[J]. Journal of Liaoning University of Technology(Natural Science Edition), 2019, 39(6): 381-383, 388.
- [29] 李睿雪, 马良, 刘勇. 基于改进免疫算法的容量限制工厂选址仿真[J]. 计算机仿真, 2021, 38(12): 401-405.
Li Ruixue, Ma Liang, Liu Yong. A New Immune Genetic Algorithm for Capacitated Plant Location Problem[J]. Computer Simulation, 2021, 38(12): 401-405.
- [30] Lin Jingjie, Huang S C, Jiao M K. An Evolutionary Multiobjective Carpool Algorithm Using Set-based Operator Based on Simulated Binary Crossover[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(9): 3432-3442.
- [31] Souheila Khalfi, Giovanni Iacca, Amer Draa. On the Use of Single Non-uniform Mutation in Lightweight Metaheuristics[J]. Soft Computing, 2022, 26(5): 2259-2275.
- [32] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-667.
- [33] 周帅. 城市道路交通信号控制策略的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2020, 43(7): 232-233.