

基于遗传算法的信号灯时长优化：从模型构建到智能调控的革新

马兆洋 林鑫 杨琛 刘德智 姜臣
烟台职业学院, 中国·山东 烟台 264670

摘要: 针对城市交通信号灯配时的全局优化与动态适应问题, 论文提出基于遗传算法的智能调控方法。分析传统轮询控制模型的静态预设缺陷, 利用 K-means++ 算法划分高峰/低谷时段, 构建遗传算法模型实现配时方案的动态优化。通过染色体编码绿灯时长, 以车流平均速度最大化为目标设计适应度函数, 经选择、交叉、变异等操作完成全局搜索。VISSIM 仿真验证表明, 该方法有效提升路网通行效率。研究还探讨了与强化学习融合、多目标优化等拓展方向, 为智能交通信号控制提供数据驱动的理论支撑。

关键词: 遗传算法; 信号灯配时; 动态优化; 交通仿真

Theoretical Analysis on Signal Light Duration Optimization Based on Genetic Algorithm: From Model Construction to Paradigm Innovation in Intelligent Regulation

Zhaoyang Ma Xin Lin Chen Yang Dezhi Liu Chen Jiang
Yantai Vocational College, Yantai, Shandong, 264670, China

Abstract: Aiming at the global optimization and dynamic adaptation of urban traffic signal timing, this paper presents an intelligent regulation method based on genetic algorithms (GA). By analyzing the static presupposition defects of traditional polling control models, the study employs the K-means++ algorithm to classify traffic flow into peak and off-peak periods, addressing the adaptation problem of time-varying traffic characteristics. A GA model is constructed to dynamically optimize signal timing schemes: green light durations are encoded as gene sequences in chromosomes, a fitness function is designed to maximize the average traffic flow speed, and global search is realized through evolutionary operations such as selection, crossover, and mutation. VISSIM simulation results show that this method effectively improves the traffic efficiency of road networks. The research further discusses expansion directions, including integration with reinforcement learning, multi-objective optimization, and edge computing deployment, providing a data-driven theoretical support for intelligent traffic signal control to alleviate urban congestion and promote the development of smart transportation systems.

Keywords: genetic algorithm; traffic signal timing; dynamic optimization; traffic simulation

0 前言

随着全球城市化进程加速, 机动车保有量呈指数级增长。据国际交通论坛 (ITF) 2024 年报告, 全球主要城市平均通勤延误时间较 2010 年增长 37%, 其中交叉口区域的通行效率低下是核心瓶颈。信号灯作为交通流调控的关键节点, 其配时方案直接影响路网通行能力——不合理的信号时长分配会导致车辆排队溢出、绿波带失效, 甚至引发区域性拥堵。传统单点优化方法 (如 Webster 公式) 仅关注单个路口的延误最小化, 忽视了相邻路口间的动态关联, 难以应对多路口协同调控需求。因此, 构建能够兼顾全局效率与动态适应的信号优化模型, 成为破解城市交通困局的核心课题。

1 信号控制理论的演进脉络

经典理论阶段: 以 Webster 模型为代表, 基于车流到达

率和饱和流量, 通过公式: $C_i = \frac{1.5 \times T_{loss} + 5}{1 - Y_i}$

其中, T_{loss} 为损失时间, Y_i 为车流量比, 计算单路口最优周期, 奠定了信号配时的理论基础, 但局限于独立路口优化。

协调控制阶段: 绿波带、干线协调等策略通过固定相位差实现多路口联动, 轮询控制模型进一步引入多服务器调度思想, 通过动态分配各相位服务时间 (绿灯时长) 降低系统总延误。然而, 这类方法依赖预设的流量模式, 难以适应实时变化的交通流。

智能优化阶段: 随着机器学习与智能算法的发展, 遗传算法、强化学习等技术被引入信号控制, 通过数据驱动的方式实现配时方案的自适应调整, 标志着信号控制从“规则驱动”向“数据智能驱动”的范式转变。

2 轮询控制模型的理论框架与内在局限

2.1 轮询控制模型的核心架构

轮询控制 (Polling Control) 起源于通信系统中的多址接入技术, 其核心思想是通过周期性“轮询”各相位, 动态分配服务时间。在交通信号控制中, 模型构建步骤如下:

系统变量定义与相位划分。

相位定义: 将交叉口划分为 4 个基本相位 (东—西直行 / 左转、南—北直行 / 左转), 记为 $je\{1,2,3,4\}$ 第 i 个路口第 j 相位的车流量 $Q_{ij}(t)$ (辆 / 秒)。

2.2 轮询控制模型的局限性分析

静态预设的适配瓶颈: 模型依赖历史流量数据预设调整规则, 无法实时响应突发流量波动 (如交通事故、大型活动引发的短时流量激增)。

局部最优陷阱: 优化过程基于梯度信息, 易陷入局部极小值, 尤其在多路口强耦合场景下 (如相邻路口相位差敏感), 难以实现全局最优。

多目标平衡缺失: 仅以延误时间为单一指标, 忽略了车流平均速度、碳排放等综合效益, 且未考虑不同时段 (高峰 / 低谷) 的流量特征差异。

绿灯时长: T_{ij} 表示第 i 个路口第 j 相位的绿灯时长, 初始值为 T_0 (通常设为固定值, 如 35 秒), 最小绿灯时长 $T_{\min}=10$ 秒 (保障行人安全)。

周期时间: $T_c = \sum_{j=1}^4 (T_{ij} + r_j)$, 其中, r_j 为第 j 相位的红灯和黄灯时长和。

优化目标与数学模型:

目标函数: 以“最小化车辆平均延误时间”为优化目标, 延误时间模型基于经典的 Webster 延误公式, 简化为:

$$D = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 \frac{Q_{ij}(t)(T_c - T_{ij})}{2(1 - y_{ij})}$$

其中, $y_{ij} = \frac{Q_{ij}(t)T_{ij}}{S_{ij}}$ 为流量比, S_{ij} 为饱和流量。

约束条件:

$$\begin{cases} T_{\min} < T_{ij} < T_{\max} \\ T_c < T_{c\max} \end{cases} \text{ (最大周期为 180 秒)}$$

动态调整机制:

通过梯度下降法或启发式算法迭代调整 T_{ij} , 使总延误 D 最小化。例如, 当某相位车流量增加时, 自动延长绿灯时长, 减少排队积压; 反之则缩短, 避免绿灯时间浪费。

3 遗传算法的理论革新: 从静态预设到动态进化

3.1 遗传算法的适配性优势

遗传算法通过模拟自然选择的“进化—筛选—迭代”机制, 为信号优化提供了全新解决方案, 其核心优势包括:

全局搜索能力: 突破单路口优化局限, 同时处理多个路口的配时变量, 通过交叉、变异等操作探索解空间, 避免

局部最优。

数据驱动适应: 无需预设固定规则, 直接从实时流量数据中学习模式特征, 自动生成个性化配时方案, 适应复杂时变场景。

鲁棒性优化: 通过种群多样性维持, 在流量波动、路口关联变化等不确定因素下, 仍能保持稳定的优化效果。

3.2 核心理论模块与技术路径

时段划分的预处理: 利用 K-means++ 等聚类算法, 将交通流按流量特征划分为高峰 / 低谷等不同时段 (如划分为 2 类)。通过肘部法则等方法确定最优聚类数, 使不同时段的配时方案更具针对性——高峰期侧重提升通行能力, 低谷期侧重减少延误, 从源头解决时变适配问题。

解空间编码与进化操作:

染色体编码: 将每个路口的绿灯时长编码为染色体基因, 形成完整配时方案, 直接对应解空间中的一个可行解。

适应度函数: 以“最大化车流平均速度”为核心目标, 通过综合考虑车辆延误、行驶时间等因素, 设计适应度评估机制, 引导算法向高效解进化。

进化算子: 通过选择 (筛选优质方案)、交叉 (融合不同方案优势)、变异 (引入随机扰动探索新解) 等操作, 实现种群的迭代优化, 逐步逼近全局最优解。

3.3 与传统方法的理论对比

遗传算法打破了轮询控制的“预设规则 + 局部调整”模式, 建立了“数据输入—自主学习—动态输出”的闭环:

控制逻辑: 从“规则驱动”变为“数据驱动”, 通过实时数据训练持续优化配时策略。

优化维度: 从单路口独立优化升级为多路口协同优化, 考虑路网级流量分配与相位关联。

适应机制: 从固定周期调整进化为实时动态适配, 能够快速响应交通流的瞬时变化

4 仿真验证的理论价值与方法论意义

4.1 仿真技术的核心作用

利用 VISSIM 等微观交通仿真软件, 构建虚拟路网环境, 验证遗传算法的有效性, 其理论价值体现在:

虚实映射验证: 通过模拟真实道路几何结构、车流特征及驾驶行为, 将理论模型映射到实际场景, 检验算法在复杂条件下的鲁棒性。

多指标量化评估: 以车辆延误、平均速度、排队长度等为核心指标, 量化对比优化前后的效果, 建立理论模型与工程实践之间的评估桥梁。

迭代优化支撑: 通过仿真结果反馈, 调整算法参数 (如交叉概率、变异幅度), 形成“建模—仿真—优化”的闭环, 提升理论模型的工程适用性。

4.2 仿真验证的关键逻辑

路网建模: 还原实际道路布局, 设定车道数、转向比例、

路口间距等参数,确保仿真场景的真实性。

数据输入: 导入聚类划分的时段流量数据,模拟不同时段的交通需求,测试算法在典型场景下的表现。

结果解读: 通过对比优化前后的关键指标,验证遗传算法在减少延误、提升速度等方面的优势,为实际应用提供数据支撑。

5 理论拓展与未来研究方向

5.1 多学科融合的优化路径

与强化学习结合: 构建“分层控制”框架——上层通过强化学习确定干线协调的全局周期与相位差,下层利用遗传算法优化各路口的局部配时,实现宏观协调与微观精细的结合。

多目标优化扩展: 将碳排放、能源消耗等环境指标纳入适应度函数,通过帕累托最优解集,平衡通行效率与可持续发展目标,推动绿色交通信号控制理论发展。

5.2 智能交通系统中的应用延伸

边缘计算部署: 针对智能交通的实时性需求,将遗传算法轻量化部署于边缘节点,实现本地数据处理与配时优化,减少中心节点计算压力,提升响应速度。

车路协同融合: 结合车联网(V2X)技术,实时获取车辆位置、速度等动态数据,动态调整信号灯配时,构建“人一车一路一信号”协同的智能调控系统。

5.3 理论研究的边界与挑战

当前研究尚未充分考虑行人过街优先级、特殊车辆(如救护车)优先通行等复杂约束,未来需引入博弈论、多主体建模等方法,构建更具普适性的信号控制理论。同时,算法的计算效率(如大规模路网下的优化耗时)仍需进一步提升,

以满足实时控制场景的需求。

6 结论: 智能算法驱动的交通控制新范式

基于遗传算法的信号灯优化理论,通过数据驱动的动态进化机制,有效解决了传统控制模型的静态适配不足与局部优化缺陷。其核心价值在于构建了“数据感知—智能决策—仿真验证”的完整技术链条,为城市交通信号控制提供了从理论到实践的系统化解决方案。随着智能算法与交通工程的深度融合,未来研究需进一步突破复杂约束建模、实时性优化等瓶颈,推动交通控制从“局部智能”向“全局智慧”演进,为缓解城市交通拥堵、构建可持续交通系统奠定理论基础。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国汽车工程学术研究综述·2017[J].中国公路学报,2017,30(6):1-197.
- [2] 雷舒宇,张宇,康浩,等.2024年中国城市交通规划年会观点集萃[J].城市交通,2024,22(6):110-119+127.
- [3] 彭靖峰.基于大数据技术的城市交通系统拥堵治理策略研究[J].运输经理世界,2024(29):58-60.
- [4] 李勇,王华,雷雯婷,等.基于K-means++算法的日负荷曲线聚类分析[J].四川电力技术,2024,47(6):56-60+107.
- [5] 寇倩兰.基于多服务器和重传机制的轮询控制系统研究[D].昆明:云南大学,2022.
- [6] 谭海婷,蓝天钰,曹夏丽.基于Vissim仿真的多路交叉口交通组织优化研究[J].西部交通科技,2024(8):167-170.

作者简介: 马兆洋(2004-),男,中国山东人,从事学习汽车检测与维修技术研究。