

基于智能信号协调控制模型的交通数字化治理的实践

文 / 马文轩 广州市市政工程设计研究总院有限公司

摘要：传统交通治理手段诊断不细、控制不智、决策不足等短板，无法满足城市交通治理需求。通过大数据分析，融合数字技术和道路基础设施，搭建数字孪生底座，优化信号控制，重构道路服务水平，推进城市治理体系和治理能力，提供全新数字化路径。

关键词：信控优化；数字孪生；协调控制

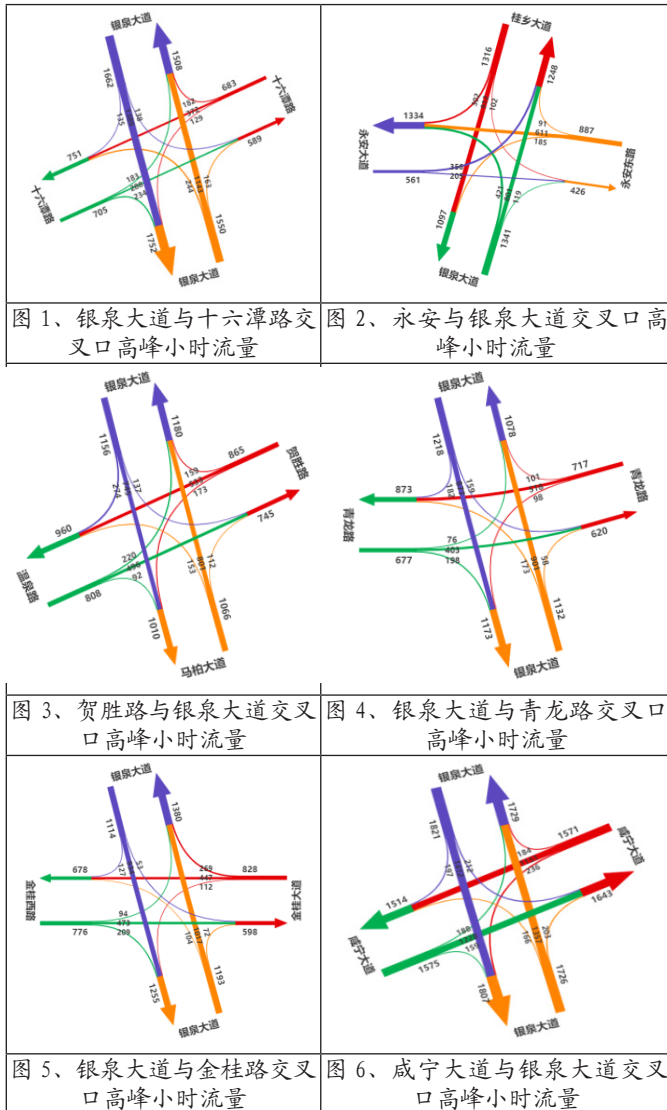
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.21.108

引言

城市化进程加速与机动车保有量激增，交通拥堵制约城市可持续发展的核心瓶颈。人工智能、车联网及5G通信技术的突破，智能信号协调控制模型正推动交通治理向全域协同、实时响应、数据驱动的数字化范式转型，破解城市交通困局。

一、项目背景

咸宁市机动车保有量快速增长，交通供需矛盾显著，交通“堵点”制约发展。咸宁银泉大道作为南北重要交通干道，沿线为居住、商业及行政办公，承担大量交通需求。银泉大道全长6.5公里，10个信控路口，通行速度较低、路口车辆流量超饱和，高峰小时流量见图1~6。



二、研究思路

解决银泉大道交通问题，通过优化交通组织，智能信号协调控制手段，思路如下：

(一) 基础数据准备

统计路口车道、转向流量、绿信比、饱和度等。

(二) 子区划分

1) 流量关联系数

流量关键系数交叉口 i 到交叉口 j 关联流量与下游交叉口关联进口道流量比值。

$$CORRELATION_FLOW_{i \rightarrow j} = \frac{FLOW_{i \rightarrow j}}{ARM_FLOW_{je}}$$

2) 饱和度关联系数

$$CORRELATION_SAT_{ij} = \max_{i,j} \{SAT_DIFFENCE_{ij} - SAT_DIFFENCE_{ij}\}$$

$$SAT_DIFFENCE_{ij} = |SAT_i - SAT_j|$$

3) 信号周期关联系数

$$CORRELATION_CYCLE_{ij} = 2 \times \min \left\{ \left| \frac{3}{2} - \frac{\max(CYCLE_i, CYCLE_j)}{\min(CYCLE_i, CYCLE_j)} \right|, 0.5 \right\}$$

4) 路段长度关联系数

两个相邻交叉口超过800米，交通离散控制效果差，当距离小于200m，划分在一起。

$$CORRELATION_LENGTH_{ij} = \begin{cases} 1, & LENGTH_{ij} < 200 \\ \frac{800 - LENGTH_{ij}}{600}, & 200 \leq LENGTH_{ij} < 800 \\ 0, & 800 \leq LENGTH_{ij} \end{cases}$$

$$\frac{800 - LENGTH_{ij}}{600}, 200 \leq LENGTH_{ij} < 800$$

$$800 \leq LENGTH_{ij}$$

5) 交叉口间关联系数

$$CORRELATION_{ij} = CORRELATION_{ji} = CORRELATION_FLOW_{ij} \times CORRELATION_SAT_{ij} \times CORRELATION_SAT_{ij} \times CORRELATION_CYCLE_{ij} \times CORRELATION_LENGTH_{ij}$$

2. 路网模块度求解

1) 邻接矩阵

DJACENT_MAT为路网的邻接矩阵，矩阵的规模为N×N，N表示研究范围内的路口个数，矩阵中的元素为a_{ij}，表示相邻两个交叉口间的关联度。

$$a_{ij} = \begin{cases} CORRELATION_{ij}, & \text{交叉口}i\text{与交叉口}j\text{有边连接} \\ 0 & \text{交叉口}i\text{与交叉口}j\text{无边连接} \end{cases}$$

2) 关联度之和

$$TOTAL_ADJACENT = \frac{\sum_{i,j} CORRELATION_{ij}}{2}$$

4) 过程矩阵

$$PROCESS_MAT = DJACENT_MAT - \frac{repmat(EXTERNAL_MAT, (1, N)) \cdot repmat(EXTERNAL_MAT^T, (N, 1))}{2 \times TOTAL_ADJACENT}$$

5) 模块度求解

$$MODULARITY = \frac{Tr(SUBAREA_MAT^T \times PROCESS_MAT \times SUBAREA_MAT)}{2 \times TOTAL_ADJACENT}$$

3. 子区划分计算

采用社区图论算法 (FAST-NEWMAN), 区域模块度最高为目标对路网进行子区划分。

(三) 协调相位判别

根据车辆轨迹叠加, 等效流量最大的原则选取关键路径, 结合路口车道功能、相位、上下游关系等计算子区内路口的协调相位。

1. 子区内路径生成

每个子区, 优先遍历算法 DFS 子区内各节点出发不重复, 基于 3 个条件进行筛选:

条件 1: 路径上的交叉口数量在小于子区交叉口数量;

条件 2: 路径上所有相邻交叉口间距关联度均大于 0, 即间距小于 1000 米;

条件 3: 路径上所有相邻交叉口关联度均大于 0.2。

2. 关键路径识别

图遍历路径计算所有路径的流量之和。

$$PATH_FLOW = \sum FLOW_i$$

计算路径等效流量 EQUIVALENT_FLOW:

$$EQUIVALENT_FLOW = PATH_CROSS_NUM \times PATH_FLOW$$

3. 协调相位生成

结合路口车道功能、相位、上下游关系等计算叠加流量最多方向对应的相位。

(四) 单点优化

计算路口优化周期时长 $CYCLE_TIME$ 、绿信比 $PHASE_SPLIT$ 、时间 $GREEN_TIME$ 等。

(五) 协调优化

采用 multiband 算法进行求解, 得到各路口协调相位相位差。

1. 协调控制基础参数

1) 公共周期

子区内各路口周期时长的最大值作为子区的公共周期时长 $PUBLIC_CYCLE$ 。

2) 双周期判别

路口周期与公共周期的比值是否小于 0.6, 若小于该路口需设置为双周期, 否则不设置。

3) 路口划分子区矩阵

$EXTERNAL_MAT$ 交叉口与其它交叉口关联之合的矩阵, 矩阵规模 $N \times 1$, 矩阵元素为 k_i 。

$$k_i = \sum_j CORRELATION_{ij}$$

3) 绿灯时长调整

根据子区内各个路口的周期长度 $CYCLE_TIME_i$ 与公共周期的差值调整各个流向绿灯时长, 若路口为双周期路口则与 $PUBLIC_CYCLE/2$ 比较。

4) 排队消散时间计算

从雷达数据读取各车道的排队长度 $Queue_length$, 平均排队长度 $\bar{Queue_length}$, 计算:

$$\bar{Queue_length}_i = \frac{\sum_{i=1}^m Queue_length_i}{m} \quad i = 1, 2, \dots, m$$

路口 $i+1$ 正向协调相位排队消散时间 τ_{i+1} 和路口 i 反向协调相位的排队消散时间 $\bar{\tau}_i$:

$$\tau_{i+1} = \frac{\bar{Queue_length}_{i+1} / l}{SA_{i+1}} + t_d$$

$$\bar{\tau}_i = \frac{\bar{Queue_length}_i / l}{SA_i} + t_d$$

5) 速度参数标定

两个路口间速度最小最大值等于路段长度除以两个路口间行驶时间最大最小值, 最小最大行驶时间取两个路口间 20% 位及 28% 位行程时间。

$$SPEED_{ij}^{20\%} = \frac{LENGTH_{ij}}{TRAVEL_TIME_{ij}^{28\%}}$$

$$SPEED_{ij}^{28\%} = \frac{LENGTH_{ij}}{TRAVEL_TIME_{ij}^{20\%}}$$

基于行程车速上、下限阈值判别: 当 $SPEED_{B,D}^{20\%} > 10$ 时, 保留 $SPEED_{B,D}^{20\%}$ 取值, 当不满足时, 将 $SPEED_{B,D}^{20\%}$

取值置 10; 当 $SPEED_{B,D}^{28\%} < 15$ 时, 保留 $SPEED_{B,D}^{28\%}$ 取值, 当不满足时, 将 $SPEED_{B,D}^{28\%}$ 取值置 15。

6) 双向协调比例计算

$$k_i = \frac{\bar{FLOW}_i}{FLOW_i}$$

(1) 绿波协调优化模型建立

1) 目标函数建立

$$maxB = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (a_i(b_i^+ + b_i^-) + \bar{a}_i(\bar{b}_i^+ + \bar{b}_i^-))$$

$$\begin{cases} a_i = \frac{FLOW_i}{SA_i * 3600} \\ \bar{a}_i = \frac{FLOW_i}{\bar{SA}_i * 3600} \end{cases}$$

2) 约束条件建立

保证正向和反向交通量较大的一侧获得更多带宽，建立以下约束：

$$(1 - k_i)(\bar{b}_i^+ + \bar{b}_i^-) \geq (1 - k_i)k_i(b_i^+ + b_i^-) \quad i = 1, \dots, n - 1$$

正向和反向相位差与绿波带宽之间的约束为：

$$b_i^+ \leq w_i \leq (1 - r_i) - b_i^- \quad i = 1, \dots, n - 1$$

$$b_i^+ + \tau_{i+1} \leq w_{i+1} + \tau_{i+1} \leq (1 - r_{i+1}) - b_i^- \quad i = 1, \dots, n - 1$$

$$\bar{b}_i^+ \leq \bar{w}_i - \bar{\tau}_i \leq (1 - \bar{r}_i) - \bar{b}_i^- - \bar{\tau}_i \quad i = 1, \dots, n - 1$$

$$\bar{b}_i^+ \leq \bar{w}_{i+1} \leq (1 - \bar{r}_{i+1}) - \bar{b}_i^- \quad i = 1, \dots, n - 1$$

$$(1/2)b_i^+ \leq b_i^- \leq 2b_i^+$$

$$(1/2)\bar{b}_i^+ \leq \bar{b}_i^- \leq 2\bar{b}_i^+$$

$$(w_i + \bar{w}_i) - (w_{i+1} + \bar{w}_{i+1}) + (t_i + \bar{t}_i) + \frac{r_i + \bar{r}_i}{2} - \frac{r_{i+1} + \bar{r}_{i+1}}{2} - (\bar{t}_i + \tau_{i+1})$$

$$= \begin{cases} (m_{i,i+1} + 2)C_j, & i = j \\ (2m_{i,i+1} + 1)C_j, & i = j + 1 \\ m_{i,i+1}C_i, & others \end{cases}$$

式中：j 路口为双周期路口

$$w_1 - b_1^+ = 0$$

$$\bar{w}_n + b_{n-1}^- = (PUBLIC_CYCLE/2 - \bar{r}_n)$$

$$= 1, 2, \dots, n - 1$$

模型整体约束如下：

$$b_i^+, b_i^-, \bar{b}_i^+, \bar{b}_i^-, w_i, \bar{w}_i, t_i, \bar{t}_i \geq 0, m_i \in int \quad i = 1, 2, \dots, n$$

2. 协调参数求解及计算

Multiband 对各路口协调相位相位差、绿波带宽度参数的计算，有效保证整体协调效果。

三、技术方案

搭建含外场采集、指标计算、方案推演、信号调控在内新一代的智能信号协调控制系统。

(1) 智慧路口：智慧路口以边缘计算单位微核心，融合雷达、视频、信号等多维感知设备和业务数据，

(2) 数字孪生底座：以数字孪生技术为核心，以源数据融合、实时指标计算，依托路网结构关系和实时交通指标，实现对未来时间内交通指标发展趋势的推演，决策提供新方式。

(3) 信控优化：基于数字孪生底座输出的交通计算指标，对交通流的实时感知，实现对交通信号问题的全天候主动发现，针对路口、通道多层次自动生成相应的优化方案，实现路口的单点 / 干线信号智能优化，全面

提高区域交通信号控制设施信息化、科技化、智能化程度，有效提升区域路网通行效率和服务水平。

(4) 网联联控：建设平台，规范智能化信号机标准，提高信号机智能化水平，确保跨系统对接，建立信号统一管控平台、实现对辖区内所有信号机的可调可控提供标准及保障。

四、应用成效

通过智能协调控制，对银泉大道设置双向绿波，划分三个子区，前后交通运行效能对比：

表 1 干线指标情况

走向	对象	平均行程速度 (km/h)	平均延误 (s)
南向北	优化前	25.55	186
	优化后	27.48	170
北向南	优化前	26.69	178
	优化后	27.95	171

主要结论：平均车速提升 4.5%，~ 7.6%，延误降低 5.3% ~ 13.8%。

表 2 子区指标情况

子区	走向	对象	平均行程速度 (km/h)	平均延误 (s)
子区 1	南向北 (金桂路—永安大道)	优化前	30.64	66
		优化后	31.8	60
	北向南 (永安大道—金桂路)	优化前	32.47	53
		优化后	29.67	58
子区 2	南向北 (咸宁大道—十六潭路)	优化前	31.3	53
		优化后	31.83	52
	北向南 (十六潭路—咸宁大道)	优化前	24.3	78
		优化后	25.1	73
子区 3	南向北 (温泉路—邮电路)	优化前	26.1	72
		优化后	27.89	68
	北向南 (邮电路—温泉路)	优化前	28.9	64
		优化后	30.3	65
南向北 (温泉路—邮电路)	优化前	21.7	56	
	优化后	23.2	46	
北向南 (邮电路—温泉路)	优化前	26.47	38	
	优化后	22.5	52	
南向北 (温泉路—邮电路)	优化前	26	45	
	优化后	26	45	

结语

发挥数据优势资源，构建高精度动静对象时空一体化数字孪生底座，支持“单车→车道→进口→路口→干线”5级实时交通运行监测，提高交通“全息感知+协同联动+动态优化+精准调控”智能化管理能力，缓解城区交通拥堵，提升城市环境品质。

参考文献

[1] 《Deep Reinforcement Learning for Intelligent Transportation Systems: A Survey》IEEE 智能交通系统汇刊 2022 年 1 月。
 [2] 《一种可信数据空间下的交通流量优化模型》上海第二工业大学，2025 年 8 月。
 [3] 《5G-Advanced 通感融合空口技术方案增强研究报告》IMT-2020 (5G) 推进组通信感知融合任务组发布，2025 年 8 月。

作者简介：马文轩（1971 年 10 月），汉，男，广东广州人，本科，市政工程设计高级工程师，研究方向为市政道路、交通工程设计。