

# 多源异构数据融合驱动的城市交通网络动态车道管理策略构建

凌伯天 付凌峰 刘燕 闫安

中国城市规划设计研究院, 中国·北京 100037

**摘要:** 城市交通拥堵持续加剧与管理智能化需求迅速提升的背景下, 现有车道资源静态配置难以应对动态变化的交通流特性, 而传统调控方法在实时性、精度和响应能力方面存在明显不足。为了解决这一问题, 论文构建融合建模、状态预测与控制策略一体化机制, 实现城市交通网络下的动态车道自适应调控, 进而提升系统通行效率与调度鲁棒性。

**关键词:** 多源异构数据融合; 交通状态感知; 时空预测建模; 动态车道管理; 智能交通控制

## Construction of Dynamic Lane Management Strategy for Urban Traffic Network Driven by Multi-source Heterogeneous Data Fusion

Botian Ling Lingfeng Fu Yan Liu An Yan

China Academy of Urban Planning & Design, Beijing, 100037, China

**Abstract:** Against the backdrop of the continuous intensification of urban traffic congestion and the rapid increase in the demand for intelligent management, the static allocation of existing lane resources is difficult to cope with the dynamic characteristics of traffic flow, and traditional regulation methods have obvious deficiencies in terms of real-time performance, accuracy, and response capability. To address this issue, this paper constructs an integrated mechanism of fusion modeling, state prediction, and control strategy to achieve dynamic lane adaptive regulation in urban traffic networks, thereby enhancing the system's traffic efficiency and dispatching robustness.

**Keywords:** multi-source heterogeneous data fusion; traffic state perception; spatiotemporal prediction modeling; dynamic lane management; intelligent traffic control

### 0 前言

城市道路交通负荷持续增长和交通需求高度动态化的背景下, 传统依赖固定配置与单一数据源的车道管理策略, 逐渐难以满足复杂多变的出行行为特征, 进而导致交通系统对精细化、实时性与可预测性的管理手段提出更高要求。多源异构交通数据涵盖浮动车定位、感应线圈检测、摄像头监控与信号灯状态等多类型动态信息, 具备丰富的时空特征与高频率采集能力, 为实现动态感知和精准调控提供了数据基础。基于此, 论文围绕数据融合、状态建模与策略执行构建统一的技术链条, 以提升车道资源配置效率与交通运行整体性能。

### 1 多源异构交通数据融合与状态感知机制

#### 1.1 异构交通数据采集模型与统一语义表达方式

城市交通运行环境中, 采集模型构建过程需将各类数据源进行接入协议标准化处理, 形成可集成的感知网络架构, 进而使统一的数据结构封装形式完成原始信息的标准化对接。针对不同源数据的语义差异, 需要建立跨模态的语义对齐机制, 包括统一空间参考系、时间戳格式、事件标签体系及道路拓扑映射规则, 使所有原始数据在结构维度与语义

层面具备融合基础, 进而构建面向交通控制系统的数据支撑基础架构, 实现从数据采集到控制响应之间的信息流闭环, 以提升后续建模环节的数据一致性与可解释性。

#### 1.2 多维特征融合方法与时空一致性处理机制

多源异构数据在采集完成后, 需进行多维特征融合处理, 以构建统一的高维交通状态表征向量。特征融合过程涉及不同来源之间的维度重组与量纲统一, 需处理采样频率不一致、空间覆盖不重叠及观测属性差异等问题。时间维度的对齐需基于统一的时间基准, 实现离散时间序列的重采样操作, 空间维度则需依托道路网拓扑结构, 将各类数据映射至统一的道路单元模型上, 进而构建“路段—时段—指标”三维结构体, 作为特征融合的空间框架。在此基础上, 采用多尺度嵌套编码方法对不同来源的特征向量进行联合表达。融合特征矩阵定义为:

$$F_t = [f_t^1, f_t^2, \dots, f_t^I] \in \mathbb{R}^{T \times D}$$

其中,  $f_t^i$  为第  $i$  个数据源在  $t$  时间上的特征,  $T$  为采样时间窗口长度,  $D$  为总特征维度。该公式可将不同模式下的交通状态信息统一映射至时空特征空间中。此外, 针对部分数据源存在缺失或延迟等问题, 采用基于图结构的插值方法与状态估计模型进行补充, 使多源特征在时间轴上保持

动态连续性,在空间轴上具备分层一致性,进而结合位置编码与道路连接图,生成拓扑增强特征张量,以捕捉道路网络中关键路段之间的传播关联与结构依赖关系。最终,构建具备语义一致性与时空对齐能力的融合特征集合,为后续状态识别与预测建模提供稳定的高质量输入。

### 1.3 交通状态感知指标构建与实时提取流程

交通状态感知指标体系作为连接数据输入与控制决策的中间层,须具备对交通运行特征的完整表达能力与实时可提取特性。在多源异构数据基础上构建状态感知指标,应覆盖宏观、中观与微观三个层次的交通表现形态。宏观层面可提取单位道路内的平均流量、平均速度与密度,作为整体运行效率的刻画指标;中观层面指标包括排队长度、通行时间、拥堵持续时间与车道占用率等,用于反映特定时段或路段的局部运行波动;微观层面则聚焦单车行为,如车辆加减速频率、跟驰距离变化等,反映个体动态交互行为的统计特征。这些指标需以多源融合特征为基础,经由状态映射函数统一提取。具体可表示为:

$$S_t = \phi(F_t, G) = \{s_t^1, s_t^2, \dots, s_t^m\}$$

其中,  $F_t$  为融合特征集合,  $G$  为道路拓扑图结构,  $\phi$  为状态映射函数,  $S_t^m$  为第  $m$  类感知指标在  $t$  时间的值。该函数在运行过程中需满足实时性与高通量要求。实现过程中还需引入流处理引擎与边缘计算节点,以完成指标计算任务分发与状态缓存机制,进而降低系统响应延迟并提升状态指标对交通流变化的动态追踪能力。实时提取流程包括数据采集缓冲、特征融合缓存、指标生成计算与状态更新推送四个模块,各模块须具备容错机制与任务动态调度能力,以适应大规模、复杂结构交通网络下的高频状态更新需求,进而实现面向动态车道调控的状态输入支撑机制。

## 2 面向调控的状态预测建模方法

### 2.1 时空流量预测模型构建与图结构建模方法

城市交通系统作为一个复杂的动态时空网络,其流量演化过程受路网拓扑结构、交通控制状态、出行行为模式和历史运行状态等多重因素的共同影响。基于此,构建能融合空间结构特征与时间序列变化规律的预测模型,是实现动态车道调控策略的前提条件。模型建构过程中,应将城市交通网络抽象为带属性的有向图:

$$G = (V, E, A)$$

其中,  $V$  为道路节点集合,  $E$  为边集合,  $A$  为邻接矩阵,边上附带的权重表示道路之间的连接关系及其传输强度。在此基础上,利用图卷积网络(GCN)捕捉节点间的结构性依赖,依靠堆叠多层图卷积操作,进而结合归一化拉普拉斯矩阵与激活函数设计可实现非线性传输模式的自适应表达。时间维度采用门控循环单元(GRU)进行序列建模,以提取不同时间步长下的历史趋势变化规律。整体建模结构采用图时空网络(ST-GCN)框架构建联合预测体系,输入为多

源融合特征矩阵:

$$X \in \mathbb{R}^{T \times N \times D}$$

其中,  $T$  为时间窗口长度,  $N$  为节点数,  $D$  为特征维度。输出为未来若干时间步内的交通指标预测值  $\hat{Y} \in \mathbb{R}^{T' \times N}$ ,模型形式表达如下:

$$\hat{Y} = f_{ST-GCN}(X, A)$$

其中,  $f_{ST-GCN}$  为图结构与时序结构耦合的预测函数。模型训练采用滑动时间窗口机制,在每一时刻将历史序列与当前结构作为输入,最小化预测输出与真实观测值之间的损失函数,以保证预测的数值稳定性与误差鲁棒性。此外,为提升模型对非平稳变化的适应能力,可在图结构层引入动态邻接矩阵构建机制,使边权随交通状态动态调整,在高流量耦合区域提升权重,以实现拓扑响应能力增强,进而更好地反映交通流在时空网络中的传播特征。

### 2.2 预测输出与关键调控参数映射关系建立

城市交通运行环境中,交通状态预测结果转化为动态车道调控中的控制变量,需在模型层面构建状态变量与策略参数之间的映射机制,使预测输出具备直接的策略驱动力。交通预测模型输出的结果通常包含未来若干时刻内的路段通行能力、饱和度水平、平均速度与排队长度等指标,这些状态描述需要映射为决策算法中的目标函数输入与约束变量,包括待分配车道数量、调整方向、执行时机及调控周期等参数集合,形成从状态感知到策略执行的决策闭环。为增强可解释性与可控性,需在映射过程中引入显式规则,尤其是当某路段预测车速低于阈值且流量超过上限时,触发特定方向的车道转换行为,进而形成包含多因子条件的分段控制逻辑函数。

### 2.3 状态预测对控制精度与响应延迟的影响量化

状态预测模型作为动态车道管理控制链路中的前端模块,预测结果对最终控制策略的执行精度与系统响应时效具有直接影响。基于此,需构建评估机制对预测误差在控制层的传导特性进行定量分析,明确预测不确定性对策略质量的影响程度。设交通状态预测误差为  $e_t = \hat{s}_t - s_t$ ,调控输出为:

$$r_t = \gamma \left( \psi(\hat{s}_t) \right)$$

其中,  $\gamma$  为控制执行函数,  $\psi$  为预测控制映射函数,理想状态下的控制响应为  $r_t^* = \gamma \left( \psi(s_t) \right)$ ,则控制偏差可定义为:

$$\Delta r_t = r_t - r_t^*$$

并在此基础上引入控制偏差率  $\bar{\eta}_t = \frac{\|\Delta r_t\|}{\|r_t^*\|}$ ,用于量化误差传导程度。此外,还需考虑预测提前量与控制执行延迟对最终调控效果的影响,进而分析不同预测窗口长度下的最优策略反应时间区间,建立预测时延—调控时效映射函数,以保证控制策略在执行窗口内具有足够的前瞻性而不导致过度提前控制失效。对于实时性要求较高的高速路段,预测结果需提前调控至少一个控制周期(如15分钟),而在城区

干道中可适当缩短提前量,以避免不必要的切换动作。

### 3 城市交通网络中的动态车道控制策略

#### 3.1 车道资源调控边界建模与约束条件定义

在城市交通网络中实施动态车道控制策略的核心前提是明确车道资源可调控的边界条件及多维约束体系,保证策略输出在物理结构、交通规则和运行安全等层面具有可行性与合法性。在空间结构层面,道路网络中每一目标路段的车道数、上下游连接关系、交叉口信号控制策略以及专用车道分布情况,构成了车道调控的空间边界约束,一旦目标车道存在与公交车道、非机动车道或应急通道重叠的结构条件,在任意时刻的变更权限将受到制度性限制。时间尺度上,车道配置的最小保持周期与变更间隔时间是避免系统不稳定切换行为的关键约束。实际应用中,设定调控周期不小于一个信号周期或车流稳定更新周期,尤其是在高峰期限定变道频率不得高于每 15 分钟一次,以避免频繁干扰交通流稳定演化过程。控制策略执行边界上,还需考虑多类型车辆的通行优先权、交通法规中的变道权限规定以及信号配时策略与车道方向绑定关系,以保证动态调整行为不冲突于既有控制体系。建模过程中,定义调控变量  $x_i^t$  表示在  $t$  时刻路段  $i$  分配的可变车道数量,定义可调配置集合:

$$C_i \subseteq \{0, 1, \dots, L_i\}$$

其中,  $L_i$  为该路段最大可配置车道数,需满足如下约束:

$$x_i^t \in C_i, \quad |x_i^{t+1} - x_i^t| \leq \delta_i, \quad \forall i \in \mathcal{N}$$

其中,  $\delta_i$  为该路段单位时间内最大允许变更车道数量,  $\mathcal{N}$  为参与动态调控的路段集合。策略集成应用过程中,还需考虑控制边界的上下游一致性约束,即若某一车道在下游路段被设定为固定通行方向,使上游路段配置满足流向连续性,进而避免策略执行后出现方向冲突或交通瓶颈反弹问题。

#### 3.2 基于预测结果的实时控制算法与策略执行逻辑

基于交通状态预测结果驱动的实时车道控制策略需建立以最小化交通拥堵成本或最大化系统运行效率为目标的动态调控算法框架,并构建与城市道路运行逻辑一致的策略执行机制,在时效性、稳健性与可落地性之间取得平衡。控制算法构建中,以预测模型输出的未来路段通行能力、饱和度水平、车流密度、平均延误时间等指标作为输入变量,定义优化目标函数为整个目标区域内的车辆平均延误最小或

单位时间通行车辆数最大,结合各路段的控制变量与可调边界构建约束优化问题。目标函数表达为:

$$\min_{x_t} \sum_{i \in \mathcal{N}} w_i \cdot D_i(x_t)$$

其中,  $x_t$  为当前调控变量集合,  $D_i(x_t)$  为在当前车道配置下  $i$  路段的延误估计函数,  $w_i$  为不同路段的优先权重,用以调整关键路段的响应敏感度。控制算法可采用模型预测控制 (MPC) 策略,在每一个调控周期内根据状态预测结果、历史控制行为及当前边界条件联合进行滚动优化决策,以强化策略的前瞻性与系统稳定性。策略执行逻辑需构建基于交通运行周期与信号配时周期同步的决策周期机制,在每个时间片段内完成状态感知、策略计算与指令下发三个核心步骤,进而避免因频繁策略刷新导致执行失效或指令拥塞。决策流程中,引入动态过滤机制以阻断策略抖动,当连续两个时段的预测状态变化量低于控制阈值时,冻结当前配置,进而保障系统在状态微扰下的稳定运行,并避免过度调控造成交通流扰动放大。策略分发过程中,需构建与信号控制系统、诱导发布系统、车道指示设施的集成通道,将执行结果回流至控制中心以更新系统状态,进而保障车道切换指令的空间有效传达与驾驶员可视感知,以提升下一轮决策的环境一致性。

### 4 结语

论文围绕城市交通运行动态化与调控智能化的核心需求,构建了基于多源异构数据融合的动态车道管理策略机制,有效提升复杂交通场景下的道路通行效率与运行稳定性。未来研究可进一步引入车联网协同控制机制与跨区域协同调度框架,提升策略在大规模交通网络中的自适应能力与协同调控水平。

#### 参考文献:

- [1] 潘俊铨,阮浩德,徐可,等.一种基于多源异构空间规划数据的融合方法[J].测绘通报,2025(1):127-132.
- [2] 白雅琴,王荣,韩建衡,等.燃煤发电厂多源异构数据物联网平台设计与开发[J].电力设备管理,2024(24):162-164.
- [3] 刘法友.多源异构数据在水利监测信息化中的应用——以松子坑水库为例[J].水上安全,2024(24):184-186.

作者简介:凌伯天(1998-),男,中国北京人,本科,助理工程师,从事交通规划、交通模型、大数据分析等研究。