

# 基于结构化视频数据的交叉口评估及 问题自动化诊断

李君羨<sup>1</sup>, 童文聪<sup>2</sup>, 沈宙彪<sup>3</sup>, 吴志周<sup>1</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海凌通交通科技有限公司, 上海 200092;  
3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 为提高视频数据用于交叉口运行评估的处理效率并实现交叉口问题实时诊断, 提出了一种使用结构化视频数据、以车头时距为主要分析对象的方法。首先利用流量曲线可复现性快速查找高峰时段; 然后仅基于车头时距曲线实现视频数据与信控方案的同步比对, 并提出了从信号控制方案和车道两方面进行交叉口效率综合评估方法; 最后以动态时间规整和灰色聚类方法, 由实际数据识别出车道车头时距曲线的 5 种类型, 并提出了相应的问题及优化方案, 可用于低效车道及相位的问题诊断。

**关键词:** 交通管理与控制; 交叉口; 自动化; 视频数据; 评估  
**中图分类号:** U121 **文献标志码:** A

## Intersection Evaluation and Automatic Problem Diagnosis Based on Structured Video Data

LI Junxian<sup>1</sup>, TONG Wencong<sup>2</sup>, SHEN Zhoubiao<sup>3</sup>,  
WU Zhizhou<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Xiantong Traffic Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** To improve the processing efficiency of video data used in intersection operation evaluation and to realize real-time diagnosis of intersection problems, a structured video-data based method is proposed, with headway as the primary analysis object. First, an algorithm based on the reproducibility of the flow curve is

presented to search for the peak period. Then, the headway curve is used to realize the synchronous comparison of video data and signal control schemes. A comprehensive evaluation method of intersection efficiency is proposed from two aspects of signal control scheme and lane. Finally, the dynamic time warping and the grey clustering method are utilized to identify five types of lane headway curves based on actual data, with the corresponding problems and optimization schemes listed. The method provides a solution for problem diagnosing of inefficient lane and phase.

**Key words:** traffic management and control; intersection; automatic; video data; evaluation

城市交通通畅与交叉口高效运行高度相关, 评价交叉口运行效率、识别其低效运行致因, 对调整管控对策、避免拥堵有重大意义。交叉口运行情况可通过排队长度、停车次数、延误等微观参数表征。

Budi 等<sup>[1]</sup>证明了道路通行能力手册算法相对仿真在评估上述参数方面有一定优势; 高云峰等<sup>[2]</sup>基于仿真提出了停车延误及次数、排队车辆数等指标与信控方案关系的动态迭代估计方法; Shatnawi 等<sup>[3]</sup>基于特定的检测器布局提出车辆延误自动检测算法, 并以仿真验证。上述基于理论建模的方法涉及大量参数标定工作, 对数据条件要求苛刻, 且以仿真作为验证手段可靠性不足, 实际应用受限。

数据驱动的交通运行检测方法可克服上述问题, 智能交通设备的广泛布设为此类方法提供了条

收稿日期: 2019-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(61773288)

第一作者: 李君羨(1987—), 女, 高级工程师, 博士生, 主要研究方向为智能交通、交通数据分析。

E-mail: jocelyn\_li@126.com

通信作者: 吴志周(1975—), 男, 研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为智能交通系统。

E-mail: wuzhizhou@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

件。Chen等<sup>[4]</sup>基于浮动车数据提出了交通网格模型,标定交叉口各向延误总和、平均行驶速度等以表征交叉口运行状态;SeJoon等<sup>[5]</sup>基于蓝牙数据估计车辆行程时间实现交叉口运行评价;Almohanna<sup>[6]</sup>基于可自动定位和乘客计数的公共交通工具提出了估计平均延误以及排队长度的方法,可标定低效交叉口;刘磊等<sup>[7]</sup>以低频定点检测器采集流量、占有率、速度,结合交叉口离线信号配时方案,以路段平均行程速度为标签变量,提出了基于分类回归树模型的交叉口状态估计方法。

对比上述数据,视频数据信息量大、可溯源,随着图像识别技术发展与终端产品成本下降,城市核心区域交叉口视频采集设备覆盖率达到较高水平<sup>[8]</sup>,引起国内外学者的注意。张惠玲等<sup>[9]</sup>提出了基于视频双截面的交叉口延误检测方法;Zheng等<sup>[10]</sup>采用视频图像处理配合特定系统提出观测排队长度和延误的方法,以仿真验证了方法可靠性;郑来等<sup>[11]</sup>基于计算机视觉构建信号交叉口排队车辆静态间距测算模型;曹倩霞等<sup>[12]</sup>提出了一种融合背景差分、块级帧间差分等视频图像处理技术的方法以检测排队车辆,进而获得延误、停车次数等参数,能较好地满足交叉口运行性能评价需要。以上研究都实现了利用视频数据获取交叉口运行关键指标并可关联交叉口效率评价,但对视频设备布设条件或图像分析处理技术依赖较强,应用于多交叉口大规模路网对算力要求高,实时性难以保证;环境变化可能影响图像清晰度导致算法精度下降;仅可检测参数,但仍完全依赖人工判断低效运行的原因,缺乏对信号控制方案调整的实时支持。

针对上述局限性,考虑车头时距对交叉口运行水平评价的效用<sup>[13-14]</sup>,提出一种基于结构化视频数据、以车头时距为主要观察对象的交叉口车道级运行效率分析方法。过程完全基于数值计算与统计,运算速度快,即使未与智能信号控制子系统联网,也可实时查找路网中的低效车道并实现指标与信控方案的同步比对,分析低效原因,进而支持包括信控方案实时优化调整在内的应对策略。

## 1 数据及预处理

收集某城市27km<sup>2</sup>核心区域内下列数据:第1组包括2017年6月2日37个交叉口电子警察视频数据;第2组包括同年6月2日至6月8日某2个交叉口电子警察视频数据。

上述视频数据为原始视频图像经过处理后的结构化数据,内容为细化到车道级颗粒度的过车记录,每条记录包含的属性及其数据类型如图1。

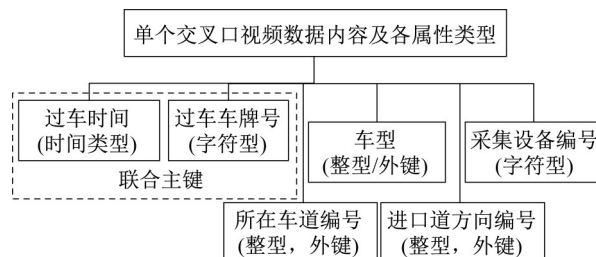


图1 视频数据属性及其类型

Fig. 1 Data types of attributes of video data

设备未完整采集上述所有信息时会标记缺失属性,图2为某设备24h过车车牌漏检数-时刻分布,该数据可以用于支持智能设施运行检测,也可作为后续做车牌属性相关分析如外地车标记、车型组合等时的扩样依据。

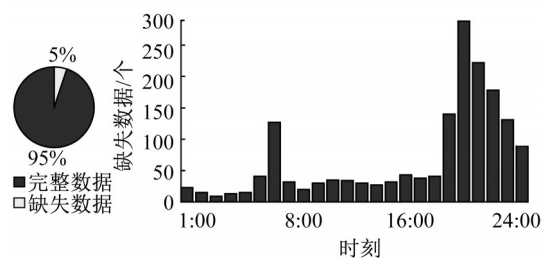


图2 车牌漏检情况分析

Fig. 2 Analysis of undetected plate records

原始数据存在同一车道连续2条数据过车时间完全一致的情况(此类异常占本次数据比例小于0.1%),为设备上传记录前对未成功获取过车时间的记录,以邻近前一条过车数据时间戳补全导致,应及时修正:对非高峰时段采用前后2次正确记录的时间戳对异常数据做线性插值补全;而高峰期间此类异常对后续计算影响较大,故对整段高峰数据剔除不用。

合理假设城市道路交叉口展宽段不存在车辆临时变道行为,则各车道过车数据无交叉重复。对经过上述清洗过程的数据,按车道对交叉口过车数据分组并按时间排序,以第2条过车数据开始,对其过车时间逐条做向前差分记作新列,为该条过车数据的车头时距属性。为方便后续分析,对该属性向下取整。

进一步处理过程中可能观察到其他异常,如单

位时间流量急剧下降又迅速恢复、全日流量曲线严重震荡且多日交通完全不具可复现性等如图 3,应及时剔除。

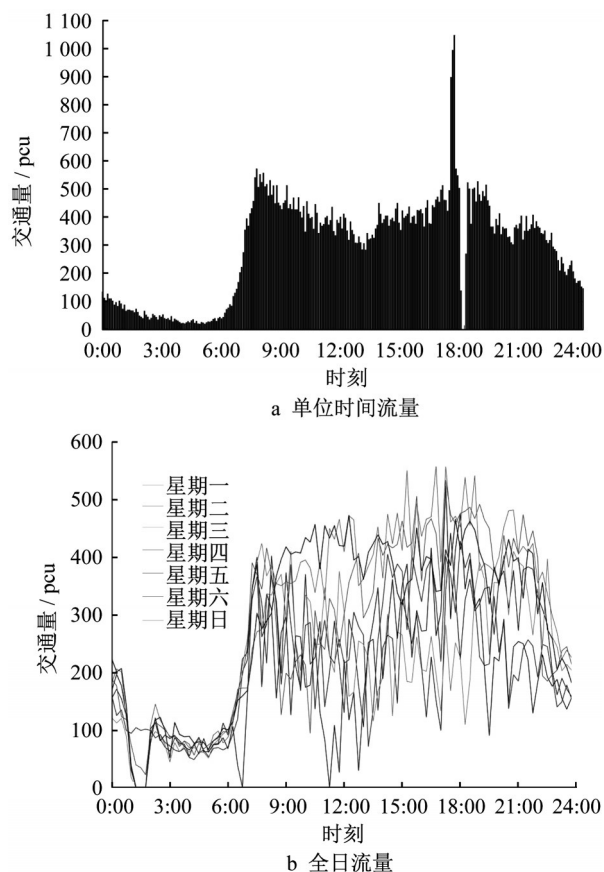


图 3 分析过程异常数据示例

Fig. 3 Example of abnormal data found in analysis

经上述处理并做全面性、一致性评价后,第 1 组共有 5 个交叉口数据各向数据完整、准确,另外有 4 个交叉口虽缺失 1 到 2 个方向的数据,但获取到的数据完整性较好,予以保留;第 2 组仅第 1 个交叉口满足要求,下文单口分析方法说明均以其(下称示例交叉口)作为示例,其交通设计如图 4,各向车道由内向外从 1 开始依次编号。

## 2 高峰时段查找

交叉口运行效率分析一般以高峰小时为对象,需基于数据查找各交叉口高峰时段作为分析基础。

以特定颗粒度分时统计各交叉口日流量,形成交叉口流量-时刻序列并进一步查找流量最大时段,示例交叉口连续多日对比高峰小时分布如图 5。

可见虽然同一交叉口每日最大流量存在差别,

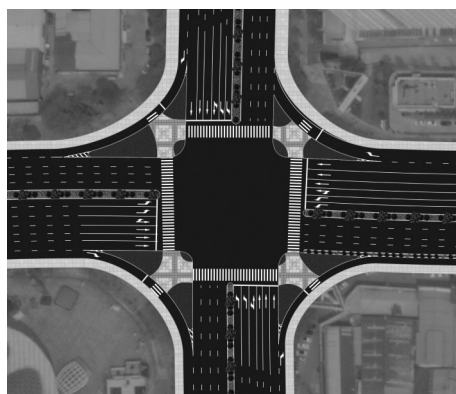


图 4 示例交叉口交通工程示意图

Fig. 4 Traffic design of example intersection

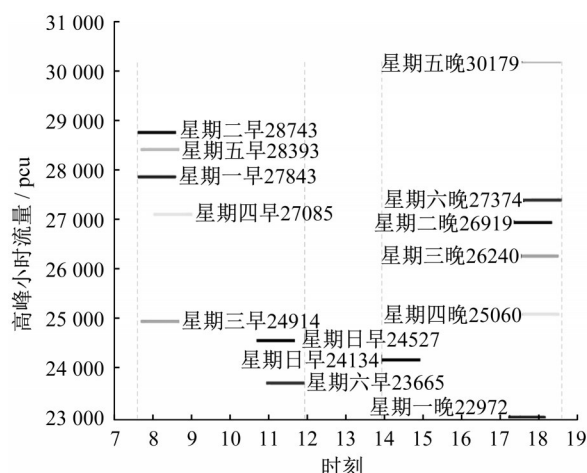


图 5 示例交叉口连续 7 日高峰小时对比

Fig. 5 Comparison of peak-hour at example intersection for 7 consecutive days

但性质近似的日期其高峰时段相近。可考察流量曲线的可重现性以简化高峰时段查找工作。借鉴向量间相似性系数<sup>[15]</sup>概念,并做最大归一化计算归一化相似性系数  $s_{ab}$ 。

$$s_{ab} = \frac{\text{Cov}(f_a, f_b) \cdot D(f_a)}{\text{Cov}(f_a, f_a) \cdot \sqrt{D(f_a)D(f_b)}} \quad (1)$$

式中,  $f_a$  和  $f_b$  表示要比较的向量,  $\text{Cov}(f_a, f_b)$  为两者协方差,  $D(f)$  为向量方差。本研究中向量即指定交叉口两日流量-时刻序列分别对应的向量。

计算示例交叉口一星期每日流量-时刻序列两两间归一化相似性系数,构成矩阵并绘制热力图如图 6。

该交叉口工作日相似性较高,可统一标定高峰时段;2 个休息日与工作日整体差异较大,且彼此也存在差别,需分别分析。对各交叉口单独分析时可以此方法基于历史数据充分利用流量分布相似性,节约高峰小时查找工作量。提取出的高峰时段数据

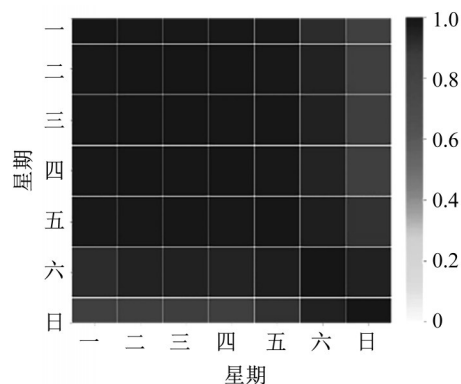


图6 示例交叉口日流量曲线相似性系数热力图

Fig. 6 Heat map of normalized similarity coefficients of daily flow at example intersection

是后续视频与信控数据同步关联的基础。

### 3 视频与信控数据的同步关联

提供视频数据的电子警察和高低位视频设备分属智能交通管控系统中的违法监测和视频监视子系统,与信号控制子系统间无时间轴信息同步关系;后者多依赖于配套的地感线圈、地磁等数据作为配时优化依据,此类设备难以采集车牌、交通违章、行人干扰、交通事件以及不同交叉口之间的交通流分布与扩散关系等信息,应用于交叉口效率问题诊断及原因排查受到限制,而视频数据在上述参数检测方面占据优势<sup>[16]</sup>,可为信控方案精细化调整提供多维信息,实现视频数据和信号控制方案同步关联。

#### 3.1 分析条件

管控方案优化需求集中在高峰小时,提取前文查找出的高峰时段数据作为分析对象。为排除干扰,剔除不受信控约束的车道数据。

#### 3.2 信控周期识别

连续过车时,车道车头时距序列为连续的较小值;发生拥堵、绿灯空放和红灯期间则会出现较大车头时距。其中,拥堵和绿灯空放时车辆通过体现出随机性,大车头时距值不稳定;由红灯导致的大车头时距则呈现一定周期性,且数值远大于一般情况。据此可仅基于车头时距数值识别交叉口该时段内信控周期时长,原理如图7。

汇集同一时段交叉口各受控车道的车头时距,并根据交叉口流量规模估计周期时长下限值,取该下限值以上的所有车头时距值并聚类,分离出大车头时距中的周期时长数据。为排除嵌套相位、未饱和和车道、提前停止过车等影响,令所有受控车道均参

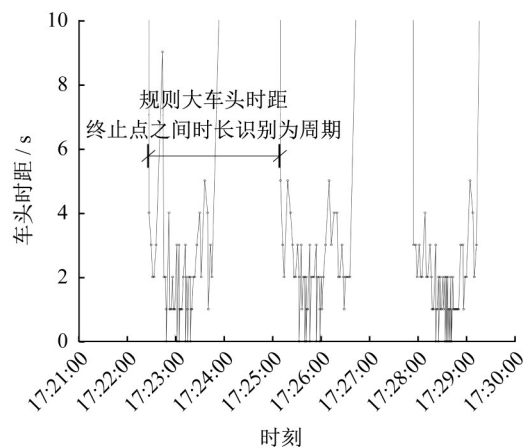


图7 基于车头时距曲线识别周期方法原理

Fig. 7 Principle illustration of recognizing cycle by headways

与识别,以其中的最大稳定值作为最终周期时长。

示例交叉口星期日均流量为 $81\ 753\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$ ,估计周期下限为60s,采用K-means算法对车头时距时间序列聚类,如图8。

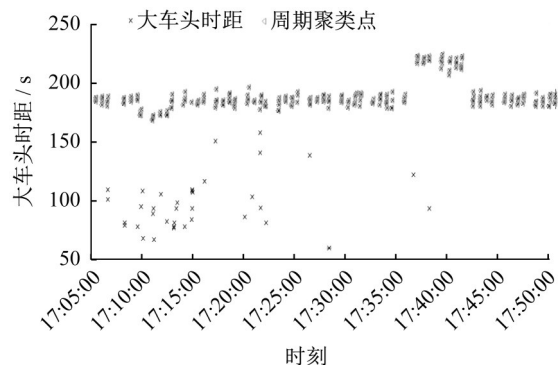


图8 大车头时距聚类分析

Fig. 8 Clustering illustration of high headways

分别取聚类数 $k=2, 3, 4$ 考察效果, $k=2$ 时不能排除异常大值,效果较差; $k$ 取3或4时效果近似,最终确定聚类参数 $k=3$ 用于识别周期。将识别出的周期数据按时间顺序排列,设定容许变化阈值,自动实现周期分段,整理示例交叉口周期时长 $T$ 结果如表1。

表1 示例交叉口高峰时段周期分析结果

Tab. 1 Cycles in peak hours at example intersection

| 时段                | $T/s$ |
|-------------------|-------|
| 17:10:00—17:12:57 | 177   |
| 17:12:57—17:38:35 | 192   |
| 17:38:36—17:42:18 | 222   |
| 17:42:19—17:50:00 | 192   |

### 3.3 相位分离与相序查找

确定周期后,可提取高峰时段各车道车头时距曲线,并以进口道方向分组分析。根据上述分段周期时长,取示例交叉口 6 月 2 日 17:20—17:30 数据进一步分析,如图 9。

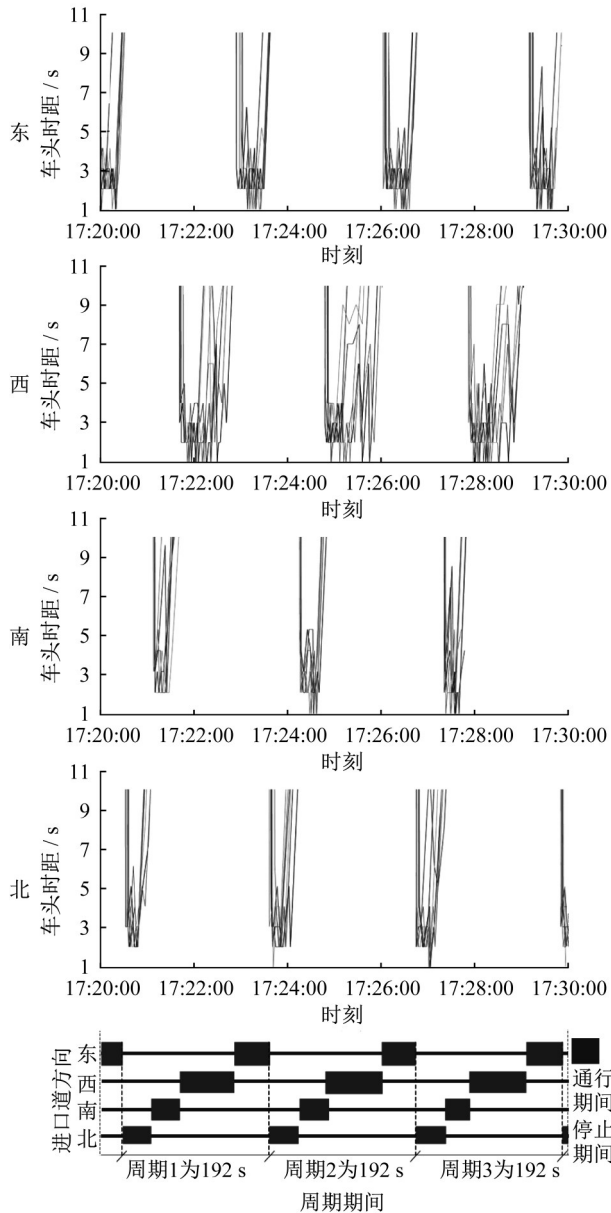


图 9 各向车头时距曲线图及信控方案对应关系

Fig. 9 Headways of all directions and signal control schemes

各车道车头时距曲线由高值回落后的第 1 个车头时距是该车道绿灯放行后第 1 个排队车辆经过视频检测区域留下的记录,代表绿灯启亮时间;此后密集的小车头时距代表绿灯期间车辆连续通过;车头时距陡然上升至高值且一段时间内不再回落代表本车道本周期停止通行。相邻相位体现为各车道连续

小车头时距曲线的搭接,即某一方向停止放行,下一相位开始放行。

图 9 中示例交叉口所有车道受控,各向车道小车头时距独立成簇、各自起始时间一致,可见为单口放行方案;同方向各车道车头时距陡升点及绿灯末期波动程度不相同,均有左转 2 根车道先于直行车道停止过车,由于是单口放行,可推测左转车道在优先清空排队,直行车道饱和度更高。根据曲线搭接关系,交叉口按东—北—南—西—东进口的顺序放行,各相位绿灯时间由小车头时距带宽观测。与实际方案对比如表 2。

表 2 识别相位时长与实际对比结果

Tab. 2 Comparison of recognized phase duration and actual value

| 放行进口方向 | 推测相位时长/s | 实际相位时长/s | 相对误差/% |
|--------|----------|----------|--------|
| 东      | 47       | 47       | 0      |
| 西      | 70       | 70       | 0      |
| 南      | 32       | 33       | 3.1    |
| 北      | 43       | 42       | 2.3    |

实际操作中可查找各个车道的大车头时距并标记其起终点位置,从而实现相位切分。基于视频数据提取的车头时距推断交叉口信控方案周期时长及相位相序信息,可实现交叉口运行参数和信控方案的对照关联,是特定信控方案下交叉口效率分析与问题诊断的基础。

## 4 交叉口效率分析与问题诊断

基于上述关联结果,可进一步从信控方案低效相位识别和交叉口低效车道识别 2 个方面诊断交叉口低效致因,以便分别从时间、空间资源角度对提升交叉口服务水平提出建议。

### 4.1 信控方案效率分析及低效相位查找

根据实时识别的交叉口信控方案及相应各进口道方向、各车道的分车型流量,可计算车道  $i$  在第  $j$  周期归一化平均通行效率系数(简称效率系数)  $\bar{E}_{ij}$ 。

$$\bar{E}_{ij} = \frac{E_{ij}}{\max\{E\}} = \frac{V_{ij}}{G_{ij} \cdot \max\{E\}} \quad (2)$$

式中,  $V_{ij}$  为由过车车型换算得到的车道  $i$  在第  $j$  周期通过的标准车当量流量,pcu;  $G_{ij}$  为车道  $i$  在第  $j$  周期分配的绿灯时长, s; 算式除以  $\max\{E\}$  表示将计算结果做最大归一化。在实际应用时,也可用其他时间颗粒度(如 15min)各车道总流量替代  $V_{ij}$  统一计算,用于车道相对效率对比。综合比较同一相位各

车道效率系数统计参数可反映如下问题:

(1)均值。代表该相位绿灯时间综合利用水平,高值代表接近饱和。

(2)方差和极差。代表该相位通行车道饱和水平的接近程度,低值代表各车道饱和水平接近,如同均值较高,说明该相位效率较高。

以示例交叉口6月2日17:00—17:15为例,基于其结构化视频数据集计分向分车道流量如图10。

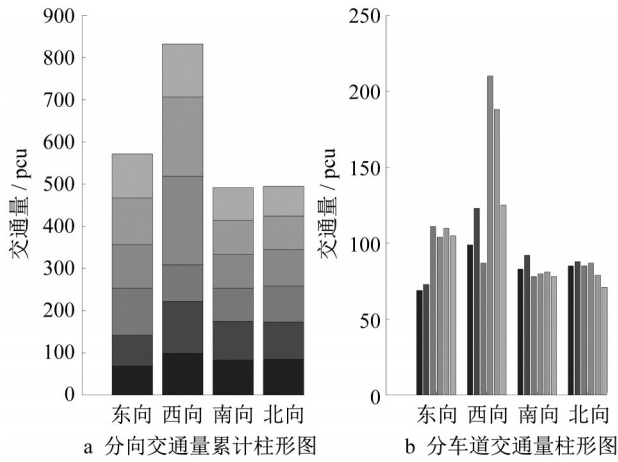


图10 示例交叉口高峰时段分车道流量统计

Fig. 10 Lane volume in peak hours at example intersection

结合前文分析,该时段信控采用单口放行配时方案,所以按方向将车道分组计算效率统计值等同于按照相位计算。计算15min各车道效率系数及相位统计值如表3。表中相位1、4、3、2分别对应东西、南、北进口。

表3 示例交叉口车道效率系数

Tab. 3 Lane efficiency coefficients at example intersection

| 车道编号 | 相位1  | 相位4  | 相位3  | 相位2  |
|------|------|------|------|------|
| 1    | 0.49 | 0.47 | 0.86 | 0.67 |
| 2    | 0.52 | 0.59 | 0.96 | 0.70 |
| 3    | 0.79 | 0.41 | 0.81 | 0.67 |
| 4    | 0.74 | 1.00 | 0.83 | 0.69 |
| 5    | 0.71 | 0.90 | 0.84 | 0.63 |
| 6    | 0.74 | 0.60 | 0.81 | 0.56 |
| 相位均值 | 0.66 | 0.66 | 0.85 | 0.65 |
| 相位方差 | 0.13 | 0.24 | 0.05 | 0.05 |
| 相位极差 | 0.30 | 0.59 | 0.15 | 0.13 |

可见,相位2、3各车道效率相近,效率均衡较好,其中相位2最大值水平相对其他相位较低;相位1、4各车道效率不均衡情况较严重,其中相位4左转车道相对直行空放情况明显,相位1存在同样问题且综合效率较低。

#### 4.2 车道效率分析及低效车道查找

针对高峰小时,对应不同配时方案分割时间窗,提取其中各车道车头时距展开分析:分区间统计不同车头时距出现频率,并求解各区间k车头时距和占总时长的比例 $P_k$ 。

$$P_k = \frac{\sum_{i=0}^{C_k} h_i}{T} \quad (3)$$

其中 $C_k$ 为隶属该区间的车头时距个数; $h_i$ 为该区间第*i*个车头时距; $s$ ;  $T$ 为统计时长,  $s$ 。

短车头时距频数、时长比例占优代表该车道车流连续通行;中、高车头时距(红灯除外)频数、时长比例占优说明绿灯时间未得到充分利用;红灯时长比例间接反映了该车道分配时间资源情况。

图11统计6月2日示例交叉口2条车道17:00—8:00车头时距分布情况并计算各区间 $P_k$ 值。按上

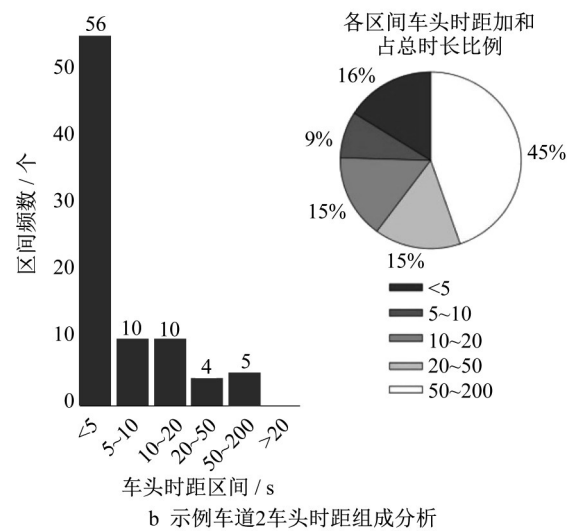
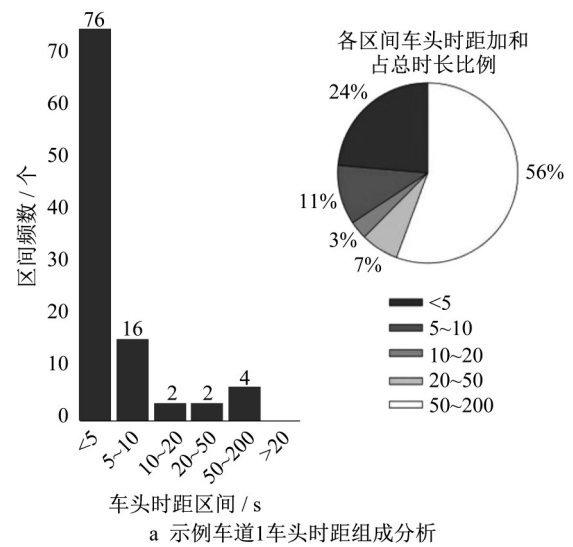


图11 单个车道车头时距组成分析

Fig. 11 Composition analysis of lane headways

述分析,无论从小车头时距区间频数占比还是占总时长比例,均显示图11a的通行效率更高,而图11b虽然分配到更多绿灯时间,但因存在干扰导致车辆不能连续通过或存在绿灯空放等,浪费了时间资源。

可针对指定区域内所有车道展开分析,按日进行车道通行效率排名,对筛分出的低效车道,可结合车头时距形态分析其低效原因。

### 4.3 车头时距形态聚类及特征分析

#### 4.3.1 车头时距形态含义

选择示例交叉口2个受控车道,截取其高峰时段时间窗观察各自车头时距曲线如图12。图12a车流通过相对连续性好、车头时距稳定,各绿灯末期均体现车头时距值略有增加,显示车队平稳清空;图12b各周期全程数据相对不稳定,过车数量相对少,且后期有较大震荡,可能存在同时放行其他流向干扰或绿灯浪费。

不同车头时距分布形态可体现车道通行效率并解释其低效原因,也能揭示交叉口的时间空间资源的浪费问题。据此,将各车道绿灯期间的车头时距

曲线聚类,可快速识别区域内的低效车道并结合交叉口功能、交通工程设计、信号控制方案及所在交叉口区位等诊断其问题成因。

#### 4.3.2 车头时距形态聚类

为快速将最新近出现的车头时距序列分类,需预先建立一个基本的分类库,再从中选择典型曲线用于实时比对。由于各受控车道每个周期至少产生一个数据样本,车道时距曲线不存在数据稀疏问题,基本分类模型训练效率可以保证。

因各车道绿灯时长不同,且绿灯期间过车数量也存在差异,不同车道的车头时距曲线关键点彼此不对应,上述问题可转化为基于趋势的时间序列相似性度量及聚类问题。考虑连续小车头时距曲线关键点较少、阈值相似,采用动态时间规整(dynamic time warping,  $D_{TW}$ )算法计算曲线相似度,步骤如下:

(1)提取高峰期间各车道2次红灯之间车头时距时间序列,记为 $h_{ij}$ ;其中 $i$ 为车道编号, $j$ 为该序列对应的周期编号,构成序列集合 $H$ ,设其中包含 $N$ 个序列。

(2)选择 $H$ 中2个序列,记作 $h_x$ 和 $h_y$ ,设其序列长度分别为 $|X|$ 和 $|Y|$ ,构造代价矩阵 $D$ ,以 $D(|X|,|Y|)$ 表示2个序列之间最终规整代价最小路径距离。基于 $D_{TW}$ 边界条件、连续性、单调性等基本约束,有

$$D_{TW}(h_x, h_y) = D(|X|, |Y|) = \min \left\{ \sqrt{\sum_{k=1}^K \omega_k / K} \right\} \quad (4)$$

$$(\max(|X|, |Y|) \leq K \leq |X| + |Y| - 1)$$

其中 $K$ 为规整路径的元素数, $\omega_k$ 为当前规整路径中第 $k$ 个元素,其对应 $D(i_k, j_k)$ 元素为

$$D(i_k, j_k) = D_{ist}(i_k, j_k) + \min \{ D(i_k - 1, j_k), D(i_k, j_k - 1), D(i_k - 1, j_k - 1) \} \quad (5)$$

其中, $D_{ist}(i_k, j_k)$ 为 $h_x$ 第 $i_k$ 个点和 $h_y$ 第 $j_k$ 个元素的距离。本聚类问题不存在唯一的参考数列,不必通过差异距离矩阵分析曲线彼此相似性,绝对关联度矩阵即可表征。按照上述步骤可计算出 $H$ 中任意2个序列的规整代价最小路径距离,并构造最小路径距离矩阵 $M_r$ , $M_r$ 为对称矩阵, $M_r(m, n)$ 代表第 $m$ 和第 $n$ 个序列的规整代价最小路径距离。

以图13所示3个车道高峰时段车头时距曲线为例,其中各包含2个周期,共构成6个车头时距时间序列。以其中3、4这2段曲线为例进行时间规整过程如图14所示。

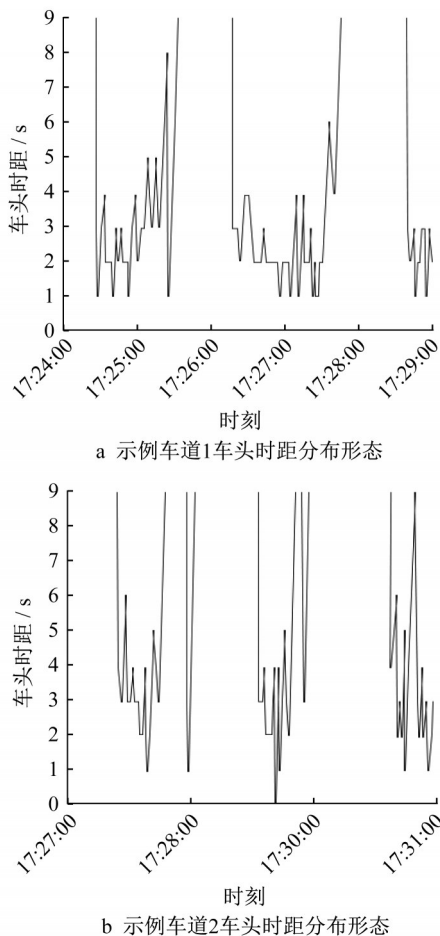


图12 单个车道车头时距分布形态

Fig. 12 Shape analysis of lane headways

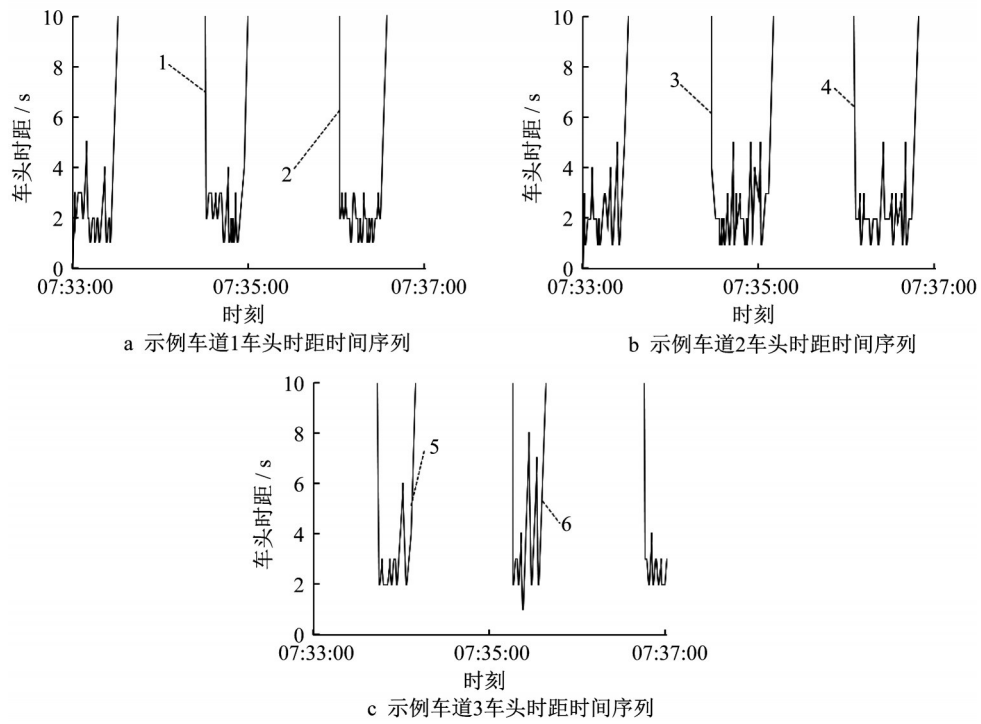


图13 用于比较的车头时距序列示例

Fig. 13 Example headway-series to be used for comparison

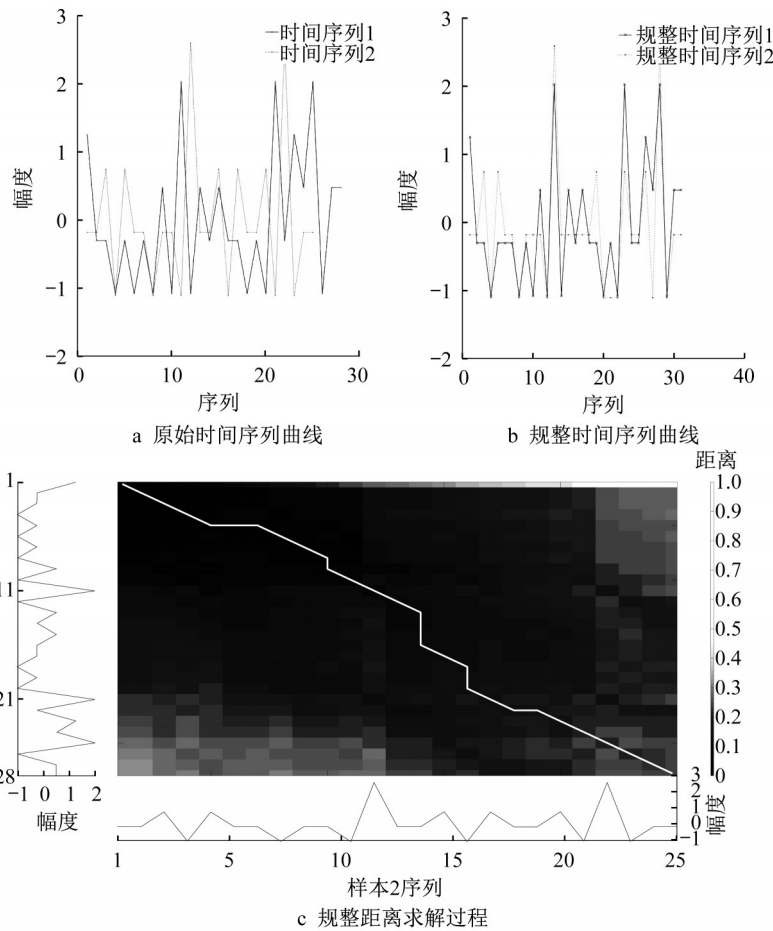


图14 2条示例曲线时间规整及距离求解

Fig. 14 DTW and distance of 2 example curves



按上述过程对示例序列两两进行时间规整,计算  $M_r$ ,如表 4。

表 4 示例车头时距曲线最小路径距离矩阵

Tab. 4 Matrix of minimum path distances of example headway-series

| 序号 | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 0     | 17.98 | 17.83 | 15.64 | 12.34 | 11.90 |
| 2  | 17.98 | 0     | 22.80 | 18.56 | 20.44 | 19.93 |
| 3  | 17.83 | 22.80 | 0     | 16.10 | 17.02 | 16.06 |
| 4  | 15.64 | 18.56 | 16.10 | 0     | 14.32 | 14.38 |
| 5  | 12.34 | 20.44 | 17.02 | 14.32 | 0     | 5.24  |
| 6  | 11.90 | 19.93 | 16.06 | 14.38 | 5.24  | 0     |

基于二元数组  $(H, M_r)$ ,以  $H$  中某元素  $h$  为顶点构造最小树并绘制谱系图。采用灰色聚类思想<sup>[17]</sup>,通过设定不同聚类门限值  $T_r \in (0, \max \{M_r\})$ ,对关联系数大于  $T_r$  的部分剪枝,可得到一个不连通的树,其连通的分枝构成了在  $T_r$  水平上的聚类。流程如图 15。

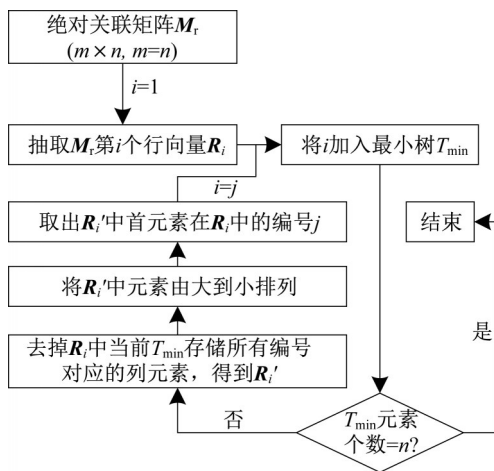
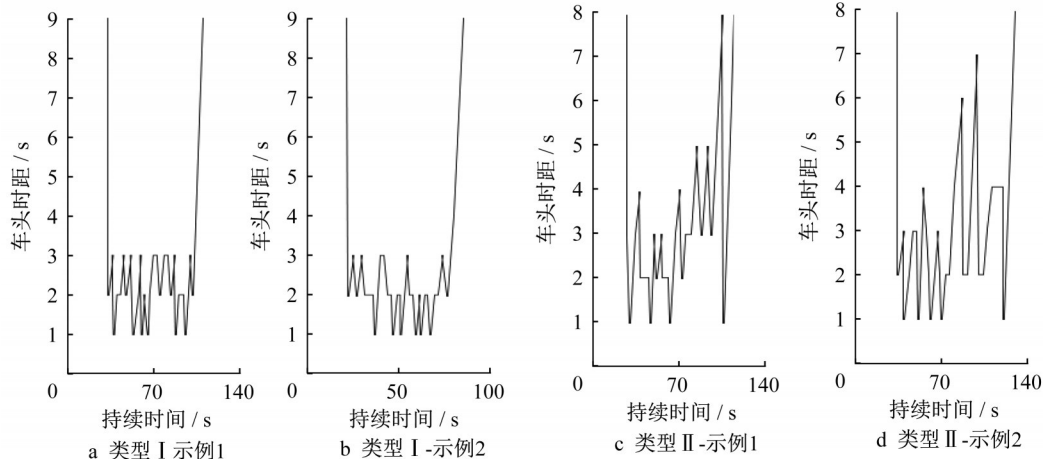


图 15 基于灰色聚类的车头时距曲线聚类流程

Fig.15 Flowchart of clustering of headway curve based on grey clustering



在算法执行过程中,  $T_r$  的取值将影响分类结果,考虑流量数列可能存在不规则波动区段、关注重点时间段的不同,根据  $M_r$  元素的取值范围适当选择  $T_r$ ,从而实现不同水平上的车头时距曲线聚类。以上述 6 个车头时距曲线为例,聚类过程如图 16。

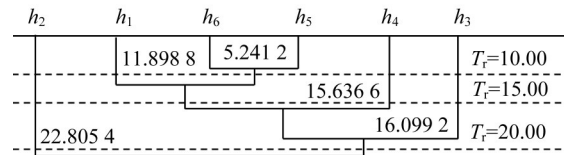


图 16 示例车头时距曲线聚类过程

Fig. 16 Processing of clustering of example headway curves

还可通过控制较大  $T_r$  值查找离散点,即将车头时距曲线趋势独特、无法合理聚类的车道进行单独分析,这类离散点通常与特殊原因导致低效、交通事故、交叉口死锁、设备完全失灵有关,可精准判断设备异常、特殊事件。

考虑对应绿灯时长本身就是车道交通特征的一部分,为提高计算速度和聚类精度,可初步按照绿灯时长区间分类,并对子类分别采用动态时间规整方法;如有绿灯时长差距较大的对比情况,可对较长绿灯序列用强制执行局部性约束方法对动态时间规整进行提升,加快运算速度。

### 4.3.3 车头时距曲线特征分析及诊断

本次综合 5 个数据完整性较好、饱和度较大的交叉口所有受控车道数据,以车头时距 12s 作为连续通行判定阈值,截取早高峰 30min 时段内连续通行的完整车头时距序列计 216 条,按上述算法,取  $T_r = 15$ ,有效将其中 171 个序列分为 5 种类型,综合其曲线特性分别命名,典型示例曲线如图 17。

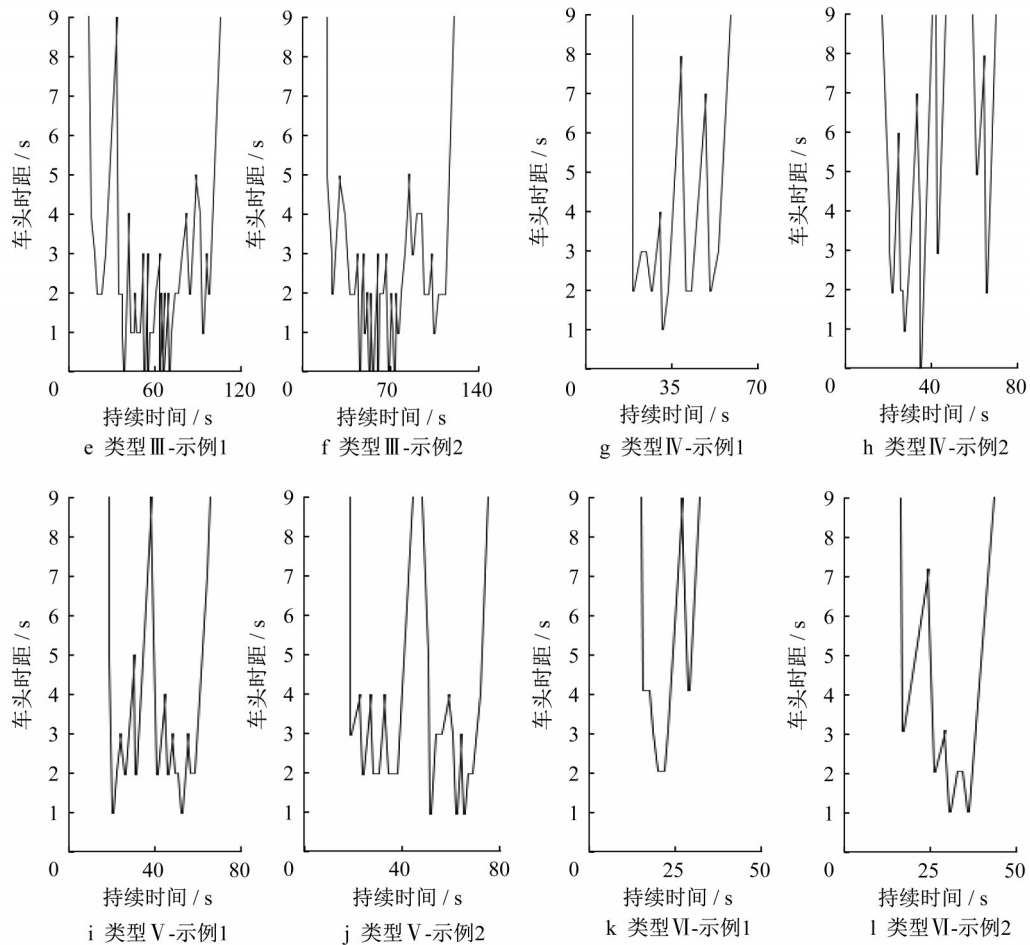


图 17 车头时距分布形态类型举例

Fig. 17 Shape types of headway curves and examples

需要在线对新产生的车头时距曲线  $h_n$  聚类时, 可将其与各类型典型曲线求解规整代价最小路径距离, 选择满足  $T_r$  限制且距离最小的一组作为类别。

对于已识别出的分类, 可基于交通工程理论, 结合实际情况, 总结可采取的优化措施如表 5。

表 5 不同车头时距分布交叉口对应管控方案优化建议

Tab. 5 Suggestions on optimization control and management of intersections with different types of headway curve

| 类型              | 特征   | 优化建议  |
|-----------------|--|---|
| I. 密集过车型        | 车头时距曲线均匀波动且维持在较小值水平; 常见于车辆连续、稳定通过的车道, 较理想。   | 需实时对比绿灯期间过车数与计算通行能力的关系, 如过车数明显大于通行能力, 可能由绿灯时间不足车辆抢行导致, 随时间推移可能引发排队甚至拥堵, 此时应增加绿灯时间。                  |
| II. 初期稳定后期震荡型   | 绿灯初期以连续小车头时距为主, 后期明显增大, 过车减少直至绿灯结束; 是本次分析中出现频次最高的一组。常见于红灯期间有一定排队但绿灯期间可充分疏散, 且绿灯时间过长的车道。                          | 结合绿灯末期大车头时距通过车辆的数量判断绿灯时间低效通行的程度, 如果所在交叉口饱和度较高, 可对比同相位其他车道表现考虑减少绿灯时间。                                |
| III. 初后期震荡中期密集型 | 车头时距在绿灯初期及后期均不稳定, 但中间部分显示车头时距连续较小值; 常见于通行需求大, 在红灯期间形成排队, 但绿灯初期受到明显干扰的车道, 可能是绿间隔不足导致前序相位交叉口未清空或慢行交通流与本车道机动车流存在冲突。 | 根据前序相位为本相位的搭接情况及同相位其他车道与本车道的关系判断原因, 进而选择调整绿间隔、调整慢行交通与机动车交通的关系如对冲突行人绿灯早闭或分离与本向车流冲突但同相位放行的其他流向到不同相位等。 |

续表5

| 类型                | 特征   | 优化建议  |
|-------------------|--|---|
| IV. 全程震荡型         | 过车数量较小且车头时距非常不稳定、反复出现大车头时距直至绿灯结束,需分情况讨论。情况一:未达饱和状态,通行能力剩余,红灯期间未形成明显排队,则分配绿灯时间过长;情况二:所在交叉口拥堵或有其他严重干扰,车辆通行受阻导致过车稀疏及排队。 | 此类车道需要引起注意,结合道路通行状态进一步区分,情况一:可对比同相位其他车道表现,考虑减少绿灯时间;情况二:需采取措施疏散交通并引导上游交叉口车辆选择替代通道。情况二高频出现的车道需针对性改善交通工程设计或管控方案。 |
| V. 中期震荡<br>初后期密集型 | 绿灯初期、后期以连续小车头时距为主,中间相对始末有明显的大车头时距,显示整条序列曲线被打断为连续的2个部分;常见于红灯期间形成排队,但能在绿灯初期充分疏散,疏散后上游交叉口放行车辆到达并再次连续通过。                 | 可考虑车道对应相位与上游控制方案的协调,尽量充分利用绿灯时间,当本车道非主要流向或交通量较少时,可考虑减少绿灯时间。  |
| VI. 其他未聚类曲线       | 在设定聚类门限值无法成功聚类的曲线。   | 此类曲线可能对应城市道路特殊交通事件,比如交通事故、排队溢出等,需引起特别注意,可面向管理人员发出告警,由人工判断并标记并加入数据池,用于丰富车头时距曲线类型,不断提升系统自动化分析能力。                |

## 5 结语

以结构化视频数据为基础,提出通过分析信控交叉口车头时距特性评价交叉口效率的方法,并可用于车道级分析低效问题的致因。数据形式简单、对算力要求低,可用于同时用于实时在线交叉口评价及历史情况分析。

(1) 提出交叉口流量-时刻曲线复现性评估方法,并在此基础上实现单个交叉口高峰小时查找。

(2) 提出视频数据同步实时信号控制方案的方法,作为高峰时段交叉口各车道运行效率对应信控方案分析及问题诊断基础。

(3) 结合信控方案及过车数据,引入各周期归一化平均通行效率系数,实现信号控制方案合理性初步判断并进一步提出车道效率分析及低效车道查找方法。

(4) 基于动态时间规整和灰色聚类方法,由真实车头时距曲线聚类得到5类典型的周期绿灯期间车头时距曲线,分析其特征及问题,作为实时车头时距曲线聚类基础,便于快速诊断交叉口问题。

本文所述方法有较强适用性,也可用于平峰期间的结构化视频数据处理,基于车头时距曲线类型进行管控方案优化。但本文采用的数据质量不稳定,在完整性和准确性方面均有欠缺,随着视频设备的普及率和质量提升可逐渐改善,比如视频设备尤其是电子警察如能将视频识别到的信号灯灯色信息记录为结构化数据,参与上述分析可大幅提升分析效率;在聚类过程中,连续通行车头时距阈值及 $T_r$ 的取值有一定主观因素,且与所在城市相关,目前数据仅来源于一个城市,故未研究其与已有车头时距曲

线的统计关系;另外,本次采用数据中无完整的2个乃至多个连续交叉口数据,未开展交叉口数据关联分析工作。未来可进一步利用视频数据分析实现车辆轨迹、相邻交叉口交通特征关联分析;此外,其他监测手段的数据融合也可提升视频数据分析效率及准确性。

## 参考文献:

- [1] YULIANTO B, Setiono, BANI S, *et al.* Analysis of signalized intersection performance using IHCM 1997 method and PTV vistro software [J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 195: 04012.
- [2] 高云峰,徐立鸿,汪涛,等. 交叉口信号控制方案评价指标动态估计模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(6): 837.  
GAO Yunfeng, XU Lihong, WANG Tao, *et al.* Dynamic estimation model on performance indexes of signalized intersection [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(6): 837.
- [3] IBRAHEM S, YI Ping, IBRAHIM K. Automated intersection delay estimation using the input - output principle and turning movement data [J]. International Journal of Transportation Science and Technology, 2018, 7: 137.
- [4] CHEN Deqi, YAN Xuedong, LIU Feng, *et al.* Evaluating and diagnosing road intersection operation performance using floating car data[J]. Sensor, 2019, 19(10): 2256.
- [5] PARK S, SAEEDI A, KIM D. Measuring intersection performance from Bluetooth-based data utilized for travel time data collection [j]. Journal of Transportation Engineering, 2016, 142(5): 04016014.
- [6] IBRAHIM A. Application of transit avl/apc data for network wide monitoring of the performance of signalized intersections [D]. Vancouver: University of Waterloo, 2014.
- [7] 刘磊,唐克双,董可然. 基于决策树模型的信号控制交叉口交

- 通状态估计[J]. 公路交通科技, 2019, 36(9): 93.
- LIU Lei, TANG Keshuang, DONG Keran. Estimation of traffic state at signalized intersection based on Decision Tree model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(9): 93.
- [8] 中国智能交通协会. 中国智能交通行业发展年鉴(2016)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
- China Intelligent Transportation Systems Association. Development yearbook of intelligent transportation industry in China (2016) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [9] 张惠玲, 李克平, 钱红波. 基于视频双截面的信号控制交叉口延误检测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 1013.
- ZHANG Huiling, LI Keping, QIAN Hongbo. Signal control intersection delay detecting based on video double section [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(7): 1013.
- [10] ZHENG Jianyang, MA Xiaolei, WU YaoJan, *et al.* Measuring signalized intersection performance in real-time with traffic sensors [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning and Operations, 2013, 17(4): 304.
- [11] 郑来, 陈永胜, 孙金玮. 基于计算机视觉的信号交叉口排队车辆静态间距研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(2): 95.
- ZHENG Lai, CHEN Yongsheng, SUN Jinwei. Study on static spacing of queuing vehicles at signalized intersection based on computer vision [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(2): 95.
- [12] 曹倩霞, 罗大庸, 王正武. 城市信号交叉口交通运行评价参数视频检测[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(6): 60.
- CAO Qianxia, LUO Dayong, WANG Zhengwu. Detection of traffic operation evaluation parameters based on video at urban signalized intersections [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(6): 60.
- [13] 苏岳龙, 魏铮, 姚丹亚, 等. 混合交通状态下交叉口排队机动车流启动车头时距研究和应用[J]. 公路交通科技, 2008, 25(7): 113.
- SU Yuelong, WEI Zheng, YAO Danya, *et al.* Model of lost up time and headway of queuing motor vehicles under mixed traffic condition [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(7): 113.
- [14] 赵星, 任刚. 信号交叉口车头时距特性分析[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(1): 103.
- ZHAO Xing, REN Gang. Analysis of vehicle headway characters at a signalized intersection [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2010, 8(1): 103.
- [15] 段征宇. 基于动态交通信息的车辆路径优化[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
- DUAN Zhengyu. Vehicle routing optimization based on dynamic traffic information [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.
- [16] 唐克双, 孙剑. 基于多源数据融合的城市道路交通控制与管理[M]. 上海: 同济大学出版社, 2015.
- TANG Keshuang, SUN Jian. Urban road and traffic control and management based on multisource data [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015.
- [17] 张丽娟, 凌建明, 祝云琪. 基于灰色模糊聚类法的路网路面使用性能评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 252.
- ZHANG Lijuan, LING Jianming, ZHU Yunqi. Gray and fuzzy clustering method applying to network level pavement performance assessment [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2010, 38(2): 252.