

通行效率评价体系研究及杭州应用实践

沈明江, 刘丰军, 朱慧, 朱潇赢

(浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 本文在充分考虑杭州市城市交通流特性的基础上, 提出了一种机动车通行效率评价方法, 包含路段通行效率评价和交叉口通行效率评价两类。其中, 路段通行效率通过单位时间网络交通流中所有车辆行驶的总里程来表征, 交叉口通行效率通过延误和排队强度来表征, 上述指标主要面向交通管理者提供决策支持信息。最后, 以杭州市主城区重点区域(含16个交叉口, 约50条路段)为例, 计算相关路段及交叉口通行效率, 并分析该区域交通运行规律及交通管控方向。

关键词: 通行效率; 拥堵指数; 评价; 路段; 交叉口

中图分类号: U49

文献标识码: B

随着经济的发展及机动车保有量的增加, 交通拥堵已成为困扰国内外大中城市的主要问题。杭州受其“景城合一, 向心聚合, 平面低速, 江河阻隔”交通特性的影响, 供需矛盾日益尖锐。目前, 杭州市的治堵工作重点主要集中在完善治堵措施方面, 而对于如何量化各种措施的实施效果, 目前尚未形成统一标准, 更无法量化考核管理者的管理水平。因此, 如何系统的建立道路运行效率评价指标体系, 客观、公正的评价管理者管理水平及管理措施效果, 逐渐成为杭州市交管部门亟需解决的难题之一。

本研究在充分考虑杭州市城市交通流特性的基础上, 对城市路网通行效率进行深入研究, 提出了一种机动车通行效率评价方法, 面向交通管理者提供决策支持信息, 从而更快地采取较合理的交通管控措施, 改善交通状况。

1 通行效率评价指标的选取

1.1 指标的选取

(1) 通行效率评价指标分层

城市道路可分为路段和交叉口2个层次, 不同层次, 车辆所处的交通环境和道路环境不同, 通行效率也差异较大, 因此从空间维度上来说评价机动车通行效率应分为路段通行效率和交叉口通行效率两类。

(2) 路段通行效率评价指标的选取

在实际路网中, 相对于孤立交叉口和单条路段而言, 包含多个交叉口和路段单元的长路段更为宏观, 因此这里的路段选取的是包含交叉口的长路段。路段通行效率通行效率表征单位时间内交通网络传送了多少车辆以及每辆车走了多少距离。对于交通管理者而言, 效率不仅仅意味着高速度, 而且是将路网的运输能

力发挥出来。因此本文以综合运输效能的指标来表征路段的通行效率。

(3) 交叉口通行效率评价指标的选取

对交叉口而言, 通行效率一方面应充分体现交通出行者的个体利益, 使其延误时间和停车率最小; 另一方面, 要兼顾不同节点交通流之间的相互影响, 防止路段排队上溯现象的发生, 提高整个系统的输送能力, 提升道路交通设施的综合利用效能。基于上述分析, 交叉口的通行效率评价指标用车均延误时间和交叉口排队强度来表征。

1.2 路段通行效率评价指标——综合运输效能

路段综合运输效能是指单位时间网络交通流或长路段(含多个交叉口)中所有车辆行驶的总里程, 用来衡量单位时间内路网/路段能够实现输送的能力。

(1) 综合运输效能的引入

假设车辆 j 代表 t 时刻行驶在某条路段上的任意一辆车辆, 在某一较短的时间范围内(用 Δt 表示), 车辆 i 的走行距离为:

$$P_j = \int_t^{t+\Delta t} v_j(t) \cdot dt \quad (1)$$

在 Δt 可以认为路段内部的行驶车辆数保持不变, 若 Δt 足够小, 则所有车辆在 $(t, t + \Delta t)$ 时段内的速度波动很小, 可以认为车辆匀速运动, 且速度用 v 来表示, 则有:

$$P = \frac{\sum_{j=1}^n \int_t^{t+\Delta t} v_j(t) dt}{\Delta t} = \frac{\sum_{j=1}^n \Delta t \cdot v_j(t)}{\Delta t} \cdot \frac{n}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n v_j(t)}{n} \cdot n = n \cdot v \quad (2)$$

式中: P 为单位时间内长路段内所有车辆行驶的总里

作者简介: 沈明江(1969-)男, 浙江嘉兴人, 高级工程师, 从事交通管理、交通规划、市政设计等方面的设计研究。

程 μ ; $v_j(t)$ 为 t 时刻车辆 j 的点速度 μ/s ; n 为 Δt 时间段内路段交通流中运行车辆数; v 为 Δt 时间段内路段上所有运行车辆的行程速度。

(2) 综合运输效能测算方法

在实际路网中,由于各路段的长度和车道数不同,同时路网上交通流的分布不均衡,这要求在计算路网的综合运输效能时对不同道路条件的路段进行分别计算,考虑到交叉口对车辆行程速度的影响,计算中采用路段单元(由路段和相邻下游交叉口组成)而非路段的平均行程速度进行计算,设长路段包含 n 个路段单元,则单位时间内长路段的综合运输效能表达式为:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot l_i}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (3)$$

$$P_i = n_i \cdot v_i \quad (4)$$

式中: P_i 为第 i 个路段单元的运输效能; n_i 为单位时间内第 i 个路段单元通过的车辆数, veh; v_i 为第 i 个路段单元车辆的平均行程速度, km/h; l_i 为第 i 个路段单元的长度, μ 。

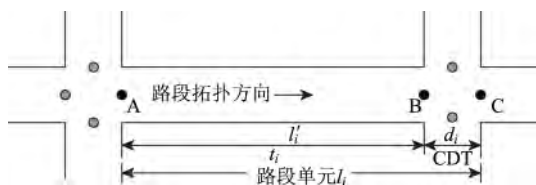


图1 路段单元示意图

1.3 交叉口通行效率表征指标——排队强度和延误

交叉口通行效率评价指标可用排队强度和车均延误时间表征。

(1) 排队强度

排队强度是指排队长度与路段长度的比值。其取值范围为 $[0, 1]$, 反映了排队上溯潜在风险的大小。

① 排队长度

排队长度是指在交通间断点(交叉口、事故发生点等)处排队车辆占有的路段长度。常用的排队长度有初始排队长度、最大排队长度、排队最远点长度等。

初始排队长度: 本周周期红灯开始时由于上周周期车辆没有完全释放而形成的排队。考虑有无初始排队两种情况, 即第一个周期红灯启亮时无初始排队车辆, 第二个周期红灯启亮时有初始排队车辆。第一个周期交叉口信号变为红灯后, 车辆继续到达, 开始形成排队, 考虑交通波时, 车队在红灯影响下形成停车波, 其方向与车流行驶方向相反, 绿灯启亮后, 排队车辆开始启动, 逐渐形成起动波, 其传播方向亦与车流行驶方向相反, 当起动波波阵面与停车波波阵面相遇时, 排队车辆

完全消散, 排队达到最远点, 绿灯结束时, 有车辆滞留, 形成第二个周期的初始排队。第二个周期交叉口信号变为红灯后, 车辆排队形成过程与第一个周期相同。

最大排队长度: 排队最远点相对停车线距离大于最大排队长度, 只有使得每个周期内排队最远点相对停车线位置的距离小于路段长度, 本路段的交通流运行才不会影响上游交叉口。

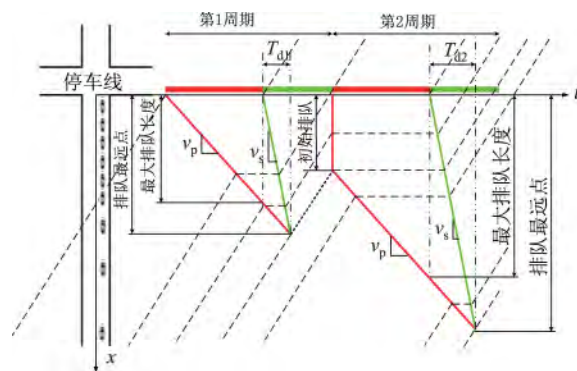


图2 初始排队长度、最大排队长度、排队最远点长度示意图

② 排队强度的引入

排队长度是一个绝对量, 不同路段在相同排队长度下发生排队上溯现象的潜在风险还与路段长度密切相关, 即路段长度越短其潜在风险越大。基于此, 本文提出排队强度概念, 并将其定义为排队长度与路段长度的比值。排队强度存在明确界限, 其取值范围为 $[0, 1]$ 。该指标取值的大小与排队上溯潜在风险存在正相关关系, 且其值为 1 时表示必然发生排队上溯。其计算公式如下:

$$Li = \frac{L_m}{l} \quad (5)$$

$$L_m = \max(L_l, L_t, L_r) \quad (6)$$

式中: L 为交叉口进口道的排队强度, 无量纲; L_m 为某一进口道的排队长度, μ ; l 为该进口道对应的上游路段长度, μ ; L_l 、 L_t 、 L_r 为分别代表进口道左转、直行、右转车流的排队长度, μ ;

而每一股转向车流的排队长度由下式得出:

$$L_{far} = v_s \cdot \frac{L_0 + v_p t_r}{v_s - v_p} \quad (7)$$

$$L_0 = \frac{cq - gs}{k_j} \cdot \frac{T}{C} \quad (8)$$

式中: v_s 为起动波波速, μ/s ; v_p 为停车波波速, μ/s ; t_r 为每周期的红灯时长, s ; L_0 为初始排队长度为, μ ; T 为交叉口进口道的上游到达率大于该进口道通行能力的持续时间; c 为交叉口运行的周期时长, s ; q 为为某车道车辆的平均到达率, pcu/s; g 为车道周期内的绿灯时

间 s ; s 为交叉口进口道饱和流率 pcu/s ;

交叉口的排队强度为该交叉口各进口道排队强度的加权平均值,其表达式如下:

$$LI = \sum \varphi \cdot Li \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{Li}{\sum Li} \quad (10)$$

式中 φ 为权重,为进口道排队强度对交叉口排队强度之和的贡献率。

(2) 交叉口平均延误时间

① 基本含义

平均延误时间是指进入交叉口的所有车辆的延误时间平均值,反映交通流在交叉口受阻状况。

② 延误时间测算方法

车道组交通流的延误时间估计采用过渡函数模型。该模型以饱和度为依据划分为未饱和和过饱和 2 部分。针对相位 i 相应车流的车辆平均延误时间为:

$$D_i = \begin{cases} \frac{c(1-g/c)^2}{2(1-q/S)} + \frac{N_0}{C} & \chi < 1 \\ \frac{r}{2} + \frac{N_0}{C} & \chi \geq 1 \end{cases} \quad (11)$$

其中 N_0 是过饱和排队车辆数,其估计方法如下:

$$N_0 = \begin{cases} \frac{Ct}{4} \left[(\chi - 1) + \sqrt{(\chi - 1)^2 + \frac{12(\chi - \chi_0)}{Ct}} \right] & \chi > \chi_0 \\ 0 & \chi \leq \chi_0 \end{cases} \quad (12)$$

$$C_i = S_i \cdot \frac{g_i}{c} \quad (13)$$

$$\chi_0 = 0.67 + \frac{S \cdot g_e}{600} \quad (14)$$

式中: D_i 为第 i 相位的车辆平均延误时间 s ; c 为信号周期 s ; q_i 为该相位进口方向交通量 veh/s ; g_i 为该相位在信号周期内的绿灯时间 s ; S 为饱和流量,为常量, pcu/s ; χ 为饱和度 q/C ; C_i 为该进口方向的通过能力, veh/s ; t 为观测时间长度 s ;

则 交叉口平均延误时间 CDT 为:

$$CDT = \sum D_i \cdot q_i / \sum q_i \quad (15)$$

2 杭州市初步应用实践

2.1 路段通行效率应用拓展分析

(1) 应用 1: 明确长路段交通功能定位。

城市交通规划虽明确定义了各道路等级,然而受历史原因、城市用地等多方面影响,各道路实际发挥的功能不同。以保俶路(文三路-省府路)北向南方向为例,早晚单车道通行效率均达到 1.2 万辆·公里以上

(12695 辆·公里、13557 辆·公里),虽定义为次干道,但在高峰时段的运输效能已超过调研区域的多数主干道单车道运输效能。建议在下步交通管理中,通过沿线出入口禁左、合并部分斑马线的方式强化交通走廊功能,发挥其干道交通优势。

(2) 应用 2: 比较平行道路综合运输效能,打造横向或纵向交通主通道。以学院路、教工路、保俶路、湖墅南路四条南北向道路为例,学院路与湖墅南路沿线主要为住宅、商业、办公用地,沿线出入口众多,通行效率不高,教工路、保俶路道路条件较好,通行效率较高。建议未来进一步强化教工路、保俶路交通功能,打造南北向主要交通通道。

(3) 应用 3: 为区域交通诱导提供参考依据

结合计算的路段通行效率饱和度绘制路网通行效率示意图,标定区域内每条道路相关参数,提出未来交通诱导方向。远期形成考核平台后,能够实现道路通行效率实时播报。



图 3 高峰时段区域道路通行效率饱和度示意图

2.2 路口通行效率应用拓展分析

(1) 应用 1: 路口排队强度情况及区域性特点分析

区域特征: 调研的 16 个路口,早高峰排队始终接近饱和水平的有 4 个,即文二/学院、文三/教工、环北/莫干、体育/环西;晚高峰始终接近饱和水平的有 3 个,即文二/学院、文三/学院、文三/教工。

时段特征: 早、晚高峰差异性较为显著。

早高峰: 城西、黄龙区域交通主流向均往市中心方向,西面的通勤交通流在运河、西湖间的蜂腰位置汇聚,继续往东后在核心区进行重组和疏散,除文三路为东向西单行线外,所选区域其他路口的热点具有明显的向心趋势。

晚高峰: 曙光路由于实施了潮汐车道,东向西的排队情况甚于西向东,说明该段潮汐车道与该区域的交通流特性相吻合,发挥了提升主流向通行能力的作用。位于蜂腰处的市府岗周边,受路网布局限制,相邻路口距离较近,高峰各进口道排队较易出现饱和。

(2) 应用 2: 单个路口通行效率应用分析

① 总结路口运行特征

以文一/教工路口为例,早高峰,文一/教工路口的北进口较为活跃,其排队在一小时内 2 次到达峰值,周期约为 20min,且具有明显的震荡特征。随时间推移,路口运行由高峰前的稳态逐渐向不稳定演变,排队呈累加趋势,消散时间逐渐延长;晚高峰,文一/教工路口的南进口较为活跃,其排队情况在调查的一个小时内完成了 2 个完整的“累加—消散—累加”周期,且时间间隔同样为 20min。

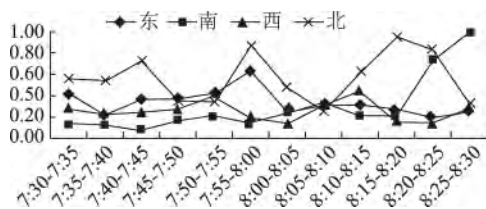


图4 文一/教工路口早高峰各方向排队情况

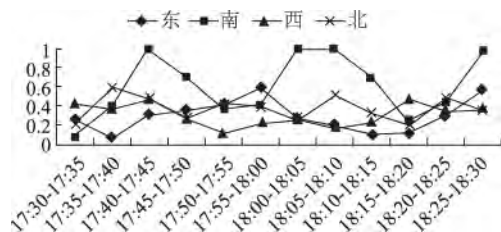


图5 文一/教工路口晚高峰各方向排队情况

② 优化信号配时

以文一/教工路口早高峰为例,该路口早高峰期间的主流向为北进口,其余 3 个方向在 7:30 至 8:30 的时段内运行情况较为稳定,但接近 8:30 南进口压力开始增加。考虑到南、北进口存在相位共享,可在相关时间节点到来前,适当调整路口信号配时,适当增加南进口绿信比。在东、西向排队长度可接受的前提下,提升单位时间内南、北方向的通行效率。

③ 可变车道精细化管理

目前,杭州部分路口为应对交通量分布随时间变化呈现不同的趋势,设置可变车道,灵活调控进口道的分配方式。通过对进口道排队强度理论值的推算,可在一定程度上提供所需的参考和依据:在明确路口拥堵情况较为严重的进口方向后,可通过对其各方向进口道的流量进行统计,推算出其大致的排队趋势,进而研究该进口方向压力的主要来源及演变情况,为进口道车道排布、设置可变车道的必要性、可变车道实施方案的效果评估等提供参考。

④ 路口通行效率关联性

以教工路为例,晚高峰期间,教工路沿线的文一、

文三路口南向北排队情况较为严重,排队强度和最大排队长度均为最高;位于两个路口之间的文二路情况则相对较好,考虑与其信号配时有关;两侧的天目山路口、余杭塘路口的情况则明显好于文一—文三段,说明教工路沿线晚高峰的交通压力主要集中在该段。从路网特征来看,文一路东侧接德胜高架,文二、文三则为单行线,教工路这 3 个节点所承担的周转功能较强,这也可以说明教工路晚高峰南往北方向的拥堵,有很大一部分是源自于进出沿线相交干道的周转车辆。

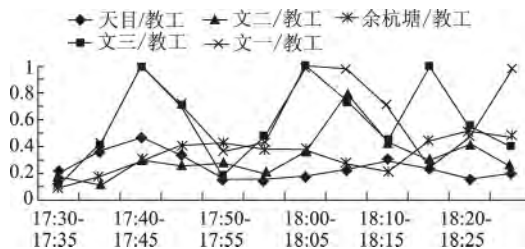


图6 教工路沿线路口晚高峰南向北排队强度情况

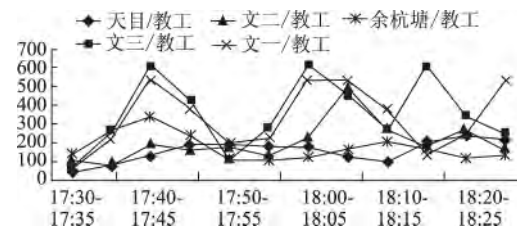


图7 教工路沿线路口晚高峰南向北最大排队长度情况

3 结语

通行效率评价体系作为评价杭州现状交通管理水平的方法,从路段和交叉口着手,分别提出了相应的表征指标,为交通状态判别、交通组织管理提供决策支持。随着杭州市智能交通建设的不断推进,获取相对精细、精确和全面的交通数据已成为可能,下一步应不断完善本评价指标,并结合杭州现有交通辅助决策系统开发通行效率评价体系模块,进一步为交通组织管理提供技术支持。

参考文献:

- [1] 郑淑鉴,杨敬锋.国内外交通拥堵评价指标计算方法研究.公路与汽运,总第160期:57-61.
- [2] 龙建成.城市道路交通拥堵传播规律及消散控制策略研究.北京:北京交通大学,2009.
- [3] 防止短连交叉溢流的单点信号配时优化.系统工程理论与实践,2014(1):147-151.
- [4] 交通瓶颈影响下两路口联动控制策略研究.武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012(2):29-33.
- [5] 吴兵.交通管理与控制.北京:人民交通出版社,2015.
- [6] 王殿海.交通流理论.北京:人民交通出版社,2002.
- [7] 李江.交通工程学.北京:人民交通出版社,2002.