

文章编号:1005-0523(2014)06-0034-06

基于有序加权平均算子的信号交叉口通行能力优化算法

吴中¹, 邢桂先¹, 方昭², 苏治北¹

(1.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098;2.河北工程大学土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 分析国内现有的3种典型的信号交叉口通行能力计算方法,阐述有序加权平均算子理论及其赋权方法,以信号交叉口的通行能力为决策因子,建立了一种信号交叉口通行能力优化算法。通过对南京市某一信号交叉口进行实际调查并进行通行能力计算,结果表明:经有序加权平均算子理论综合加权优化后的信号交叉口通行能力与传统计算方法相比,具有更高的精度。

关键词: 信号交叉口通行能力;有序加权平均算子;客观赋权法

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

交通拥挤已成为人类社会面临的一大难题,尤其在人口众多的国家,表现更为严重。道路通行能力低是造成交通拥挤的重要原因之一,提高道路通行能力不仅可以缓解城市道路拥堵问题,还可增大公路网的连通度^[1]等。提高城市道路通行能力首先要对交叉口通行能力的计算进行研究,有关专家学者通过考虑交通流特征及其他影响因素,不断地探讨更加符合实际的通行能力计算方法,我国研究人员也不断地提出新方法。对国内现有的3种典型信号交叉口通行能力计算方法进行分析,通过有序加权平均算子(OWA)理论,以最佳信号交叉口通行能力为决策因子,建立了一种信号交叉口通行能力计算改进方法。该方法的主要内容:根据OWA算子的定义,将3种传统的信号交叉口通行能力计算结果按从大到小顺序排列,基于均值相似度的客观赋权法进行组合加权计算,得到基于OWA算子的信号交叉口通行能力优化算法。通过以南京市某交叉口为例,通过对其进行实地调查,验证了优化算法的正确性及合理性。

1 信号交叉口通行能力计算方法

现有通行能力计算方法有很多种,其中应用最为广泛的有以下4种:饱和流率法^[2]、《城市道路设计规范》中介绍的方法(简称城市道路设计规范)、停车线法及冲突点法^[3],由于饱和流率法是美国研究学者依据本国交通流特点研发的,考虑的影响因素及依托原理与我国大不相同,在此仅对符合我国交通流特征及各影响因素的城市道路设计规范、停车线法及冲突点进行分析。

1.1 城市道路设计规范

该方法为中国《城市道路设计规范》(CJJ37-90)中对信号控制交叉口的设计通行能力所规定的计算方法^[4]。

1) 一直行车道的通行能力计算公式

$$C_s = \frac{3600}{T} \left(\frac{t_g - t_0}{t_i} + 1 \right) \varphi \quad (1)$$

式中: C_s 为一直行车道的通行能力,pcu·h⁻¹; T 为信号周期,s; t_g 为一个周期内的绿灯时长,s; t_0 为绿灯亮后的

收稿日期:2014-09-15

作者简介:吴中(1964—),男,教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理、交通运输信息与控制、交通安全。

第1辆车启动并通过停车线的时间,一般取为2.3 s; t_i 为直行或右转车通过停车线所用平均时间,s,考虑到我国混合交通现象较为普遍, t_i 值按表1取; φ 为折减系数,可选用0.9。

2) 一直右车道的通行能力计算公式:

$$C_{sr} = C_s \quad (2)$$

式中: C_{sr} 为一条直右车道的通行能力, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

3) 进口设有专左与专右车道时进口道的通行能力计算公式

$$C_{elr} = \sum C_s / (1 - \beta_l - \beta_r) \quad (3)$$

式中: C_s 为直行车道的通行能力之和; β_l 、 β_r 分别为左转车与右转车占进口道车辆数的比例。

4) 进口设有专左车道而未设专右车道时通行能力计算公式

$$C_{el} = (\sum C_s + C_{sr}) / (1 - \beta_l) \quad (4)$$

式中: C_{el} 为设有专左车道但未设专右车道时,进口道的通行能力; C_s 为直行车道通行能力之和; C_{sr} 为直右车道的通行能力,单位均为 $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.2 停车线法

该方法是由北京市政设计院提出的,它以进口道的停车线为基准面,以车辆通过该断面判断为已通过交叉口^[5]。

1) 一直行车道通行能力计算公式

$$C_s = \frac{3600}{T_c} \times \frac{t_g - t_{\text{损}}}{t_i} \quad (5)$$

式中: C_s 为一直行车道的通行能力, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; T_c 为信号周期; t_g 为一个周期内的绿灯时长,s; $t_{\text{损}}$ 为一个周期内绿灯损失时间,一般取2.3 s, t_i 为前后两辆车通过停车线平均时间间隔,取值参见表1。

表1 混合车队下 t_i 取值

Tab.1 t_i values under mixed vehicle team

间隔	2:8	3:7	4:6	5:5	6:4	7:3	8:2
t_i/s	2.65	2.96	3.12	3.26	3.30	3.34	3.42

2) 一右转专用道通行能力计算公式

$$C_r = \frac{3600}{t_r} \quad (6)$$

式中: C_r 为一条右转车道的通行能力; t_r 为前后两辆右转车辆连续驶过停车线断面的时间间隔,据观测当大车:小车为1:1时,均值为4.5 s,纯为小汽车时均值为3~3.6 s,当无行人及自行车阻碍情况下,一右转专用道通行能力为1 000~1 200 $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$,但实际上,由于行人及自行车对其影响变化较大,应视具体情况进行分析。

3) 一左转专用道通行能力计算公式:

当交叉口设有左转专用相位时,一左转专用道通行能力为

$$C_l = \frac{3600}{T_c} \times \frac{t_l - \frac{v_l}{2\alpha}}{t_0} \quad (7)$$

式中: C_l 为一左转专用道通行能力, $\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1}$; t_l 为一个信号周期内左转时长,s; v_l 为左转车行车速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; α 为平均起动加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,其中小车取0.6~0.7 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,中型车取0.5~0.6 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,大型车取0.4~0.5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; t_0 为左转车连续通过交叉口的平均车头时距,s。

4) 一直右车道通行能力计算公式:

$$C_{sr} = C_s (1 - \frac{\beta_r}{2}) k \quad (8)$$

式中: β_r 为直右车道中右转车所占比例; k 为折减系数,可取0.7~0.9。

1.3 冲突点法

该方法是由同济大学研究学者通过对信号交叉口的实际运行状态分析而提出来的,认为只要车辆通过冲突点即通过了交叉口,其中考虑到了混合交通的特点。在灯色时间都已配定好的定时信号灯情况下,各向车辆通过交叉口一个冲突点的各类间隔时间总和为^[6]

$$G = t_{lh} + (n_{10} - 1)h_1 + \tau_2 + \sum_{s=1}^{g+1} (n_s - 1)h_1 + \sum_{g=1}^g (n_1 - 1) + g\tau - t_{st} \quad (9)$$

式中: n_s, n_1 分别为紧接运行通过冲突点的直行车,左转车辆数,pcu; n_{10} 为绿灯初期通过的左转车辆数,pcu; t_{lh}, t_{st} 分别为左转头车,直行尾车从停车线行驶到冲突点所需时间,s; h_1 为一条车流紧接运行通过冲突点时的安全车头时距,m; $\tau = \tau_1 + \tau_2$ 为直行车流中能穿越左转车的“可穿越空档”时间长, τ_1 为前档, τ_2 为后档; G 为绿灯时间,s; g 为直行车流中一个绿灯时长内出现“可穿越空档”的次数。

车辆通过一个冲突点的通行能力计算公式

$$n = \frac{G - \alpha_m - \beta}{h_m} + m \quad (10)$$

式中: n 为各进口道通行能力,具体取 n_N, n_S, n_W, n_E ; m 是进口道直行车道的车道数; α_m 为 m 条直行车道时,因穿越空挡而损失的时间,s; β 为有、无专左车道时的得失时间,s; h_m 为 m 条并排直行车流紧接行驶通过冲突点时的安全车头时距,s。

整个交叉口一个周期的通行能力计算公式

$$\sum n = n_N + n_S + n_E + n_W + \sum n_{右} \quad (11)$$

式中: $\sum n_{右}$ 为通过右转专用车道的右转车实际到达数或者设计到达数。

整个交叉口一个小时的通行能力 C 为

$$C = \frac{3600}{T_c} \sum n \quad (12)$$

2 有序加权平均算子

由于上述3种信号交叉口通行能力计算方法在不同属性上的表现好坏不一,很少某一种方案就是绝对的最优选择,所以对所有方案在决策因子上的表现进行综合评价是非常有必要的。有序加权平均(Order Weighted Averaging, OWA)算子是由Yager^[7]于1988年提出的,可用来对之前已知的、离散的方案集合进行决策,即研究已知方案的评价选择问题。文中正是基于这一思路,利用OWA算子对传统的3种信号交叉口通行能力计算结果进行综合加权处理,从而得到最优结果。OWA算子定义如下:

有序加权平均算子是一个 n 元函数 f ^[8]

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \sum_{j=1}^n w_j b_j \quad (13)$$

其中: $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 是与 f 相关的加权向量, $w \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$; b_j 是一组参数数据 $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ 中第 j 大元素,此时称 f 是 n 维有序加权平均算子。

要正确有效地利用OWA算子,其过程中包括两种重要的基本属性信息:权重系数及参数信息。首先把参数信息按从大到小的顺序进行排列之后,并对其赋予最合理恰当的权值,此权值对决策者要达到的估计目标非常重要,所以在OWA算子的研究过程中最为关键的一步即是确定各个参数信息的权重系数,一般情况下,分为主观赋权法及客观赋权法两大类^[9]。主观赋权法亦称专家赋权法,是通过某种方法综合各位专家对各参数信息给出的权重进行赋权,有时也可以是决策者根据以往的经验,直接对参数信息进行赋权。此方法反映的主要是决策者的个人意向,灵活性非常大,不同的决策者会给出不同的权值,使得估算结果差异性较大。客观赋权法则是利用原有的一些属性值通过数学方法来确定其权重,一般可通过建

立数模来获得,所得结果对决策者的主观判断不存在依赖性,更能客观地反映真实情况,在现实中应用较为广泛。考虑到主观赋权法计算结果往往会因决策者波动较大,在本文信号交叉口通行能力优化算法中,选择运用Xu提出的基于均值相似度的客观权重计算方法^[10]来确定权重系数,具体计算方法如下

$$s(b_i, \mu) = 1 - \frac{|b_i - \mu|}{\sum_{h=1}^n |b_h - \mu|} \quad (14)$$

式中: $s(b_i, \mu)$ 为 b_i 与均值 μ 的相似度,其中 $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_i$ 。

OWA算子权重为

$$w_i = \frac{s(b_i, \mu)}{\sum_{j=1}^n s(b_j, \mu)}, \because \sum_{j=1}^n s(b_j, \mu) = \sum_{j=1}^n s(\alpha_j, \mu), \therefore w_i = \frac{s(\alpha_i, \mu)}{\sum_{j=1}^n s(\alpha_j, \mu)} \quad (15)$$

得OWA算子的组合加权值为

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) = \frac{\sum_{i=1}^n s(b_i, \mu) b_i}{\sum_{j=1}^n s(b_j, \mu)} = \frac{\sum_{i=1}^n s(\alpha_i, \mu) \alpha_i}{\sum_{j=1}^n s(\alpha_j, \mu)} \quad (16)$$

3 算例分析

以南京市某交叉口为例,分别运用城市道路设计规范、停车线法及冲突点法进行信号交叉口通行能力计算,并将计算结果作为参数信息按从大到小的顺序重新排序,然后运用Xu等提出的基于平均值相似度的客观赋权法来对各个通行能力结果进行赋权,得出综合加权处理的信号交叉口通行能力计算方法。

3.1 基础数据

经实地调查,得知该交叉口几何平面图如图1;该交叉口为固定周期、三相位信号控制,具体相位及配时如图2,3所示;此次调查时间为晚高峰时段(17:30~18:30),各车道车辆换算成小汽车交通量后见表2。

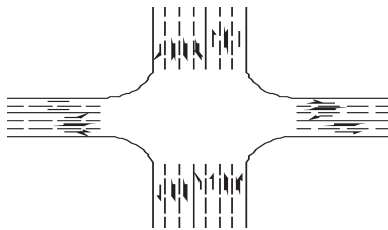


图1 交叉口几何平面图

Fig.1 Intersection geometric figure

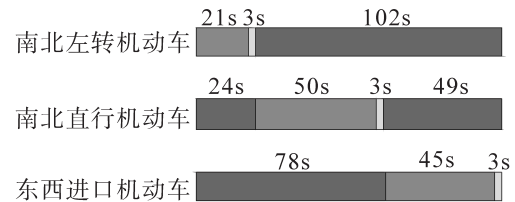


图2 交叉口信号配时图

Fig.2 Intersection diagram of signal timing

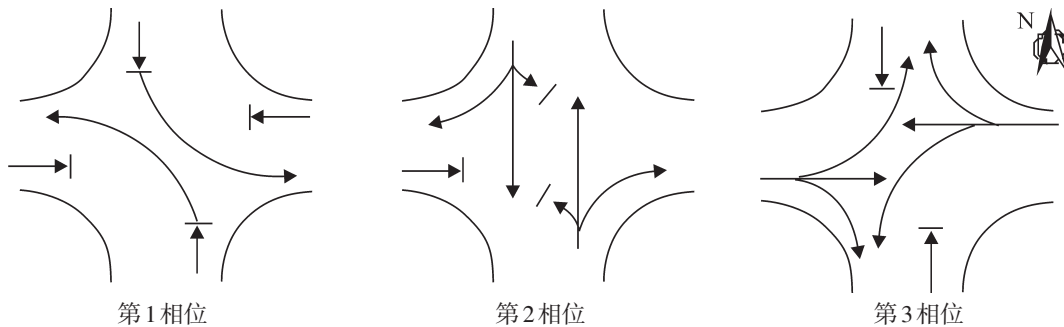


图3 交叉口相位方案图

Fig.3 Intersection schematic diagram of phase scheme

表2 交通流量调查数据表
Tab.2 Traffic survey data tables

高峰小时交通量	东进口			西进口			南进口			北进口		
	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转	左转	直行	右转
分流量/(pcu·h ⁻¹)	98	334	147	83	378	107	112	789	225	127	685	181
流量总计/(pcu·h ⁻¹)	579			568			1 126			993		

3.2 通行能力计算分析

基于上文对国内3种典型信号交叉口通行能力的分析,对该信号交叉口进行通行能力计算,计算结果为:城市道路设计规范4 899 pcu·h⁻¹,停车线法5 608 pcu·h⁻¹,冲突点法5 466 pcu·h⁻¹。

基于OWA算子理论建立该信号控制交叉口通行能力的优化算法模型为

$$f(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = \sum_{j=1}^3 w_j b_j$$

其中: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为上述通行能力计算结果,按照有序加权平均算子的定义将3个决策值按从大到小的顺序进行排列,得 $b_1=5 608, b_2=5 466, b_3=4 899$,并采用Xu提出的基于均值相似度的客观赋权法对各通行能力进行权重系数的计算如下

$$\mu = \frac{1}{3}(5 608 + 5 466 + 4 899) = 5 324$$

根据公式可求得

$$s(b_1, \mu) = 0.666 3, s(b_2, \mu) = 0.833 1, s(b_3, \mu) = 0.500 6$$

$$w_1 = 0.333 2, w_2 = 0.416 5, w_3 = 0.250 3$$

$$\therefore f(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3) = 5 608 \times 0.333 2 + 5 466 \times 0.416 5 + 4 899 \times 0.250 3 = 5 365 \text{ pcu} \cdot \text{h}^{-1}$$

通过利用Xu提出来的基于平均值相似度客观赋权法进行计算,得该交叉口基于OWA算子的最佳通行能力为5 365 pcu·h⁻¹。为了验证基于OWA算子通行能力计算方法的正确性,对该交叉口进行了通行能力的实际观测,测得实际通行能力为5 180 pcu·h⁻¹,饱和度为 $(579+568+1 126+993)/5 180=0.61$,考虑到该交叉口实际运行情况较为复杂,且受非机动车、行人影响较大,其实际饱和度略高于实测值。将运用各种方法计算所得的交叉口通行能力值与实测值进行比较及误差分析见表3。

表3 4种算法与实测值比较

Tab.3 Comparison of four algorithms with measured values

参数	城市道路设计规范	停车线法	冲突点法	OWA算子优化算法	实测结果
通行能力/(pcu·h ⁻¹)	4 899	5 608	5 466	5 365	5 180
计算误差/%	-5.4	8.3	5.5	3.6	—

由表3可知:城市道路规范与冲突点法的计算结果大体相当,存在一定误差,停车线法误差最大,说明现有的信号交叉口通行能力计算方法精度较差,往往只能得到相对最优解,需要对其进行改进。通过有序加权平均算子的客观赋权法对3种计算方法进行优化后,计算得通行能力值与实测结果最为接近,计算精度非常之高,从而验证了该方法的合理性与正确性。

4 结论

在国内3种典型信号交叉口通行能力计算模型的基础上,将有序加权平均算子理论应用到信号交叉口通行能力计算当中,通过对通行能力这一决策因子进行客观赋权处理,建立了基于OWA算子的信号交叉口通行能力计算优化算法,并通过南京市某一信号交叉口进行实例分析,得如下结论:

1) 当信号交叉口饱和度在0.7附近波动时,在现有对信号交叉口通行能力计算方法中,城市道路规范与

冲突点法计算结果差异性较小,停车线法的计算结果往往高于前两种方法,且与实际测量结果相差较大;

2) 经OWA算子理论并以Xu提出来的客观赋权法对通行能力结果进行综合加权处理后,所得信号交叉口通行能力较其他3种方案更加符合实际观测值,计算结果具有更高的精度;

3) 在对通行能力决策因子进行权重系数赋值时,仅考虑了客观赋权法,但实际上,对于进行交叉口通行能力计算的研究人员而言确实存在个体差异性,为了能更好地阐述OWA算子理论在信号交叉口通行能力计算方面的应用,还应继续对主观赋值法进行后续研究。

参考文献:

- [1] 邸振,查伟雄,宋晖颖.基于通行能力的公路网连通度研究[J].华东交通大学学报,2009,26(4):49-52.
- [2] TRANSPORTATION RESEARCH BOARD.HCM2010:Highway capacity manual[M].Washington DC:Transportation Research Board, 2010:232-238.
- [3] 陈宽民,严宝杰,任福田.道路通行能力分析[M].北京:人民交通出版社,2003:201-205.
- [4] 王文辉.基于浮动车的道路交通状态评估中信息融合应用研究[D].北京,北京交通大学,2008.
- [5] 袁晶矜,袁振洲.信号交叉口通行能力计算方法的比较分析[J].公路交通技术,2006,10(5):123-128.
- [6] 杨开春,段胜军,许迅雷.城市道路交叉口通行能力的分析与应用[J].西安文理学院学报,2005,8(4):19-23.
- [7] YAGER R R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making[J].IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1988,18(1): 183-190.
- [8] 王子龙.基于有序加权平均算子的交叉口信号配时优化研究[D].北京,北京交通大学,2012.
- [9] 彭建,徐猛,高自友.基于有序加权平均算子的公交线路OD矩阵估计[J].管理科学学报,2013,16(1):36-41.
- [10] XU Z S, DA Q L. The uncertain OWA operators[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2002,17(6): 569-575.

Signal Intersection Capacity Optimizing Algorithm Based on Ordered Weighted Averaging Operator

Wu Zhong¹, Xing Guixian¹, Fang Zhao², Su Zhibei¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. college of Civil Engineering, Hebei university of engineering, Handan 056038, China)

Abstract: By analyzing the existing three typical signal intersection capacity calculation methods in China, expounding the ordered weighted averaging operator theory and the empowerment approach, this study established an optimizing model which took signal intersection capacity as the decision-making factors to calculate the capacity. Through investigating a signal intersection in Nanjing and calculating the capacity, it shows that the capacity which was optimized by the ordered weighted averaging operator has a higher accuracy than the traditional calculation methods.

Key words: signal intersection traffic capacity; ordered weighted averaging operator; objective weighted method