

基于大数据的单点交通信号配时优化策略研究^{*}

罗云辉¹, 李林¹, 靳文舟²

(1.深圳市城市交通规划设计研究中心, 广东 深圳 518021; 2.华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对传统信号路口配时优化中存在的问题识别困难、缺乏理论指导和优化效果不佳等问题, 基于智能交通大数据发展背景, 针对路口单点信号配时构建信号配时评估及优化体系。通过融合视频、地图导航、信号配时等多源交通数据建立基于导航数据的延误计算模型, 综合考虑饱和度和延误指标, 建立信号配时合理性评估矩阵, 同时采用改进最优分割法对时段表进行优化, 在此基础上, 利用 Webster 配时优化理论对配时不合理时段的周期和绿信比参数进行优化; 深圳某路口的应用结果表明, 基于大数据的单点交通信号配时优化策略的应用效果较好, 可为城市信号配时优化提供参考。

关键词: 城市交通; 单点信号配时; 大数据; 优化策略; 深圳

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2017)04-0022-06

1 路口交通信号配时现状分析

随着城市建设的加速, 信号控制路口数量不断增加, 交通流空间分布和交通总量变化加快, 路口交通呈现多样化、随机性特征, 造成交通拥堵不断加剧。为科学推进城市交通信号管控, 2016 年公安部交管局下发《推进城市道路交通信号灯配时智能化工作方案》, 期望通过排查整改配时不合理等问题提升交叉口的通行效率。目前各地交通信号管控的主要特点:

(1) 路口数量过多, 仅依靠交警自身力量难以科学管控。包括深圳、广州、惠州、重庆在内的众多城市均采用信号配时服务社会化方式, 通过引入专门的信号配时服务团队解决人力资源短缺的问题。

(2) 采用粗放式管理, 过度依赖人力, 配时问题识别困难。各地一般通过路口巡查或视频巡查发现路口信号配时问题, 需耗费大量人力和时间, 路口一天只运行几套方案。

(3) 信号优化缺乏理论指导, 调整效果不佳。各地信号管控水平较低, 信号配时优化基本停留在根据交通流量对相位时间进行简单加减上, 对时段及周期基本不进行优化, 导致调整次数频繁、调整效果不佳。

(4) 信号控制仍以单点定周期多时段信号控制方式为主, 路口通行效率较低。各地信号管控时段

划分不合理, 控制时段少, 方案单一, 造成路口资源浪费和交通拥堵。

综上, 目前各地路口管控方式简单、管控效率不高, 需建立更完善的路口评估和优化体系, 实现路口信号配时的科学管理, 提高路口运行效率。

2 信号配时优化策略

随着交通设施的完善, 交通数据源不断丰富, 微波、线圈、视频、地磁等检测设备能连续检测交通流量等数据。互联网数据具有连续性好和精确度高的特点, 是较好的抽样数据, 可用来计算速度和延误等指标。在交通大数据背景下, 将路口、互联网数据和信号配时数据相结合, 可对信号配时方案合理性进行评估, 进而优化配时方案。

进行信号配时优化时首先需采集交通状态信息, 这是路口信号配时评估和方案优化的前提。该文采用多源的交通信息, 利用视频检测器和配时信息计算路口及相位流量、饱和度等指标, 利用地图导航 GPS 数据计算路口延误时间, 利用路口周期、有效红灯时间计算路口饱和和延误时间。在数据采集的基础上, 通过构建路口饱和度和延误的评价矩阵, 对路口配时合理性进行评估, 同时利用改进的最优分割法对时段表进行优化, 进而利用 Webster 周期优化理论对配时不合理时段的周期和绿信比进行优化 (见图 1)。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473122); 深圳市国资委自主创新奖励扶持项目

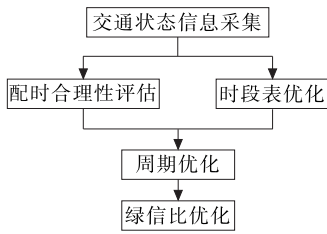


图1 信号配时优化技术路线

2.1 配时合理性综合评估

美国《通行能力手册》(HCM手册)采用路口延误指标评估信号配时是否合理。然而路口的交通越饱和,其周期一般会越大,延误时间和停车次数也会相应提升,不同路口的基本特性、交通特性不同,使用相同的延误和停车指标进行评估不合理。为使评价结果具有普适性,应综合考虑延误和饱和度指标。根据文献[2],将路口饱和度分为高($V/C \geq 1$)、中($0.8 \leq V/C < 1$)、低($V/C < 0.8$)三类;针对车流量是否在一个周期内清空,将延误分为高、低两类,延误高时车辆需2个及以上的周期才能清空,延误低时一个周期内可清空排队车辆。

当进口道刚好饱和,即车流量能一次性排清时,设 r 为相位有效红灯时间,则车辆延误为 $r/2$,路口车辆平均延误 d_0 可由式(1)计算。用周期和绿信比表示有效红灯时间[见式(2)],将式(2)代入式(1),得到式(3)。

$$d_0 = \frac{\sum_{i=1}^n q_i \frac{r_i}{2}}{Q} \quad (1)$$

$$r_i = C(1 - \lambda_i) \quad (2)$$

$$d_0 = \frac{C}{2Q} \sum_{i=1}^n q_i (1 - \lambda_i) \quad (3)$$

式中: q_i 为第 i 相位的交通流量; r_i 为第 i 相位的有效红灯时间; n 为相位数量; Q 为路口总流量; C 为信号周期; λ_i 为第 i 相位的绿信比。

对于车辆实际延误时间,采用传统手段难以获取连续数据,随着互联网的发展,交通大数据不断丰富,互联网导航数据具有时间粒度小、精度高、数据连续性好等特点,十分适合路口延误计算。利用地图导航数据构建路口延误时间计算模型,自由流时段设为0:00—6:00。如图2所示,假设一辆车由西往东直行通过路口,即沿路径 AB 行驶,自由流通行时间为 T_{s0} ,正常通过时间为 T_s ,则直行车辆的延误时间为 d_s ,左转车辆的延误时间为 d_l [见式(4)、式(5)],一段时间内路口的平均延误为路口各方向

直行、左转车辆延误时间的加权平均值[见式(6)]。

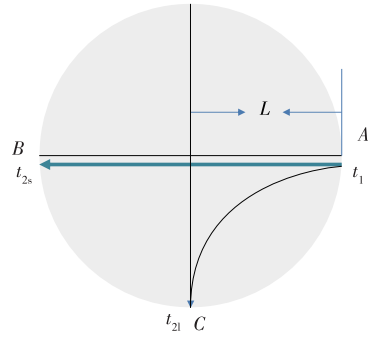


图2 导航数据计算延误示意图

$$d_s = T_s - T_{s0} = (t_{2s} - t_1) - (t_{2s0} - t_{10}) \quad (4)$$

$$d_l = T_l - T_{l0} = (t_{2l} - t_1) - (t_{2l0} - t_{10}) \quad (5)$$

$$d = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^k q_i d_i \quad (6)$$

式中: d_s 和 d_l 分别表示直行、左转车辆通过路口的延误时间; T_s 和 T_l 分别表示直行、左转车辆正常时间通过路口的时间; T_{s0} 和 T_{l0} 分别表示直行、左转车辆自由流时间通过路口的时间; t_{2s} 和 t_{2l} 分别表示正常时间直行、左转车辆到路口出口的時刻; t_{2s0} 和 t_{2l0} 分别表示自由流时间直行、左转车辆到路口出口的時刻; t_1 和 t_{10} 分别表示车辆在正常时间、自由流时间到达车辆进口的時刻; d 表示统计时段内路口总延误; Q 表示统计时段内通过路口的总流量; k 表示路口东、西、南、北进口的左转和直行的数量,与路口形状有关; q_i 表示统计时段内路口各进口第 i 个转向的流量, i 可取东、西、南、北进口的左转和直行共8个方向; d_i 表示统计时段内第 i 个转向的延误时间。

构建表1所示路口配时合理性评价矩阵评估路口配时方案的合理性。由表1可知:当路口饱和度为中等或以下级别时,周期一般较小,由于延误时间与周期大小基本成正比例线性关系,延误也会较小,若延误仍然处在高等级状态,则说明信号配时欠合理;当饱和度处于低等级时,延误也应较低,如果延误处于高水平,则说明信号配时存在较大问题。

表1 配时合理性评价矩阵

延误	饱和度		
	高 ($V/C \geq 1$)	中 ($0.8 \leq V/C < 1$)	低 ($V/C < 0.8$)
高($d > d_0$)	合理	欠合理	不合理
低($d \leq d_0$)	合理	合理	合理

2.2 时段表评估

时段表的科学划分直接决定路口的整体控制效益,如果划分不合理,将导致整个时段内出现绿灯空放或拥堵等问题。在多时段信号配时中,时段表的划分是信号周期及绿信比配置的先决条件,具有重要战略意义。目前主要依据经验对时段表进行模糊划分,将一天划分为早晚高峰、平峰、夜间等时段,实践表明,这种简单的方式控制效果较差,需采用更合理的划分方法。可依据交通需求进行划分,充分考虑时段间、时段内的交通差异性,确保时段间的差异性最大、时段内的差异最小。交通需求作为有序的时间序列,表征时间方向上的运行轨迹,且具有随机性,其时段划分可采用 FISHER 的最优分割法,交通需求可用交通流量表征,采用单元最优分割法对时段表进行划分。

根据单元最优分割法原理,假设共有 N 个待分割变量 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$, 将其分割为 z 组, 每组有 n_i 个元素, 分别为 $(x_{11}, x_{12}, x_{13}, \dots, x_{1n_1}), (x_{21}, x_{22}, x_{23}, \dots, x_{2n_2}), \dots, (x_{z1}, x_{z2}, x_{z3}, \dots, x_{zn_z})$, 设元素总平均值为 m , 段间方差为 B , 段内方差总和为 W , 则各参数的计算公式如下:

$$N = \sum_{i=1}^z n_i \quad (7)$$

$$m = \bar{x} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z \bar{x}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^z x_i \sum_{j=1}^{n_j} x_{ij} \quad (8)$$

$$B = \frac{1}{z-1} \left[\sum_{i=1}^z n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \right] \quad (9)$$

$$W = \frac{1}{N-z} \left[\sum_{i=1}^z \sum_{j=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \right] \quad (10)$$

传统最优分割法的目标函数是 $\min W$, 忽略了段间方差 B , 不合理。在此同时考虑段内方差和段间方差, 对目标函数 R 加以改进:

$$\max R = \max [(B-W)/B] \quad (11)$$

由目标函数可知: $R=0 \sim 1$, 段间方差 B 越大, 段内方差总和 W 越小, 目标值 R 越接近 1, 分割效果越好。

2.3 周期/绿信比评估

在时段优化的基础上, 结合配时合理性评估结果, 对存在问题的时段进行信号周期和绿信比方案优化。在定周期控制中, 目前对周期和绿信比进行优化的方法主要有英国的 Webster 法、澳大利亚的 ARI 法及中国的停车线法和冲突点法, 其中 Webster 法最成熟, 使用也最普遍。根据该方法, 最佳周期长度 C_0 的计算公式如下:

$$C_0 = \frac{1.5L+5}{1-Y} \quad (12)$$

$$Y = \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{S_i} \quad (13)$$

$$G_e = C_0 - L \quad (14)$$

$$g_{ei} = G_e \frac{y_i}{Y} \quad (15)$$

式中: L 为总损失时间; Y 为交叉口交通流量比; y_i 为第 i 相位临界车道的交通流量比; G_e 为有效绿灯时间; G_{ei} 为第 i 相位的有效绿灯时间。

3 案例分析

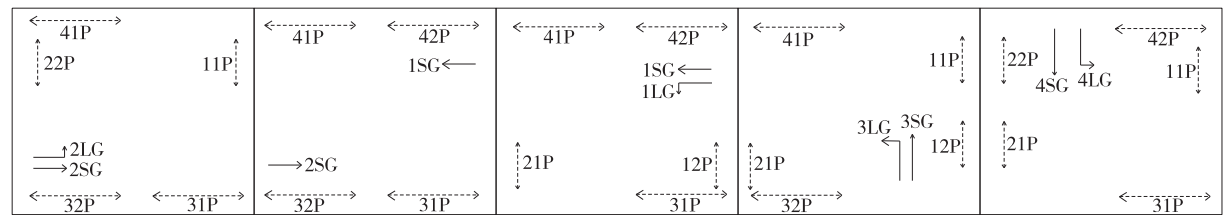
以深圳某路口为例进行分析。该路口为标准的十字形交叉口, 除右转车道外(均作渠化), 东、西、南进口均为四车道, 北进口为三车道。各进口最内侧车道为左转车道, 其余车道为直行车道。

3.1 路口配时合理性评估

该路口各相位黄灯时长为 3 s, 全红灯时长为 2 s, 各相位损失时长为 5 s。路口时段及运行方案见表 2, 相位阶段见图 3。

表 2 路口时段划分及运行方案

时段 编号	时间	周期/ s	相位 1 有效 绿灯时间/s	相位 2 有效 绿灯时间/s	相位 3 有效 绿灯时间/s	相位 4 有效 绿灯时间/s	相位 5 有效 绿灯时间/s
1	0:00	110	17	17	17	17	17
2	6:00	144	19	31	23	23	23
3	8:00	160	21	31	26	26	31
4	10:00	144	19	31	23	23	23
5	12:00	168	19	31	41	26	26
6	16:00	167	21	26	38	26	31
7	20:00	144	19	31	23	23	23
8	22:00	110	17	17	17	17	17



虚线代表行人绿灯处于放行状态,行人二次过街,所以分成两段;实线代表机动车绿灯处于放行状态;箭头表示当前相位时刻绿灯放行的交通流向;41P 为北方向第一次过街行人绿灯放行;22P 为西方向第二次过街行人绿灯放行;11P 为东方向第一次过街行人绿灯放行;2LG 为西方向左转绿灯放行;2SG 为西方向直行绿灯放行;32P 为南方向第二次过街行人绿灯放行;31P 为南方向第一次过街行人绿灯放行;42P 为北方向第二次过街行人绿灯放行;1SG 为东方向直行绿灯放行;1LG 为东方向左转绿灯放行;21P 为西方向第一次过街行人绿灯放行;12P 为东方向第二次过街行人绿灯放行;3LG 为南方向左转绿灯放行;3SG 为南方向直行绿灯放行;4SG 为北方向直行绿灯放行;4LG 为北方向左转绿灯放行。

图 3 路口相位阶段

利用视频数据,统计路口各相位流量,计算得到到各时段路口延误时间,同时计算饱和状态下的延误时间(见图 4)。利用地图导航数据,计算得

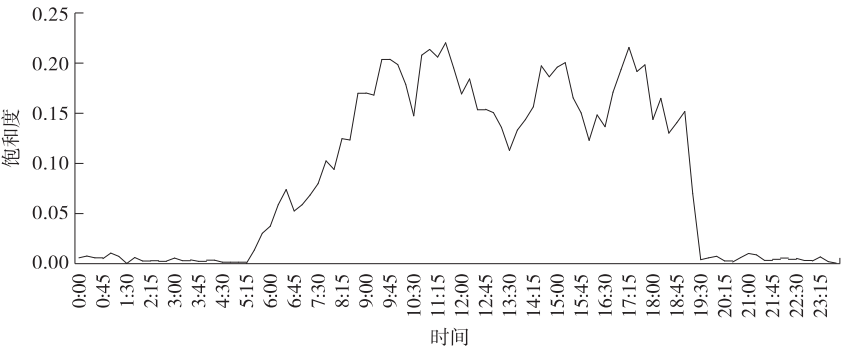


图 4 路口饱和度

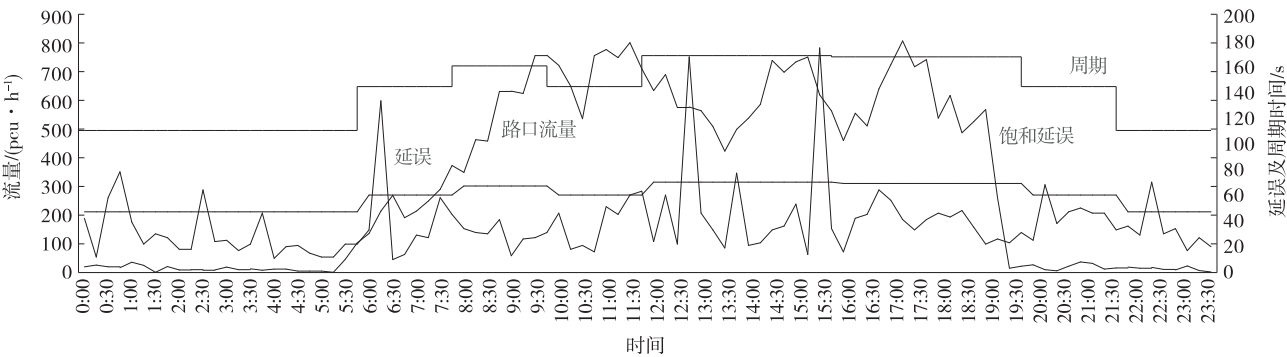


图 5 路口延误

由图 5 可知:6:45—7:00、12:45—13:00、15:30—15:45 时段的延误明显大于饱和延误值,其中 6:45—7:00 对应原始时段表(见表 2)中的第 2 个时段,12:45—13:00、15:30—15:45 对应原始时段表中的第 5 个时段,可以认为这两个时段的信号配时存在不合理现象,优先针对其进行优化。

3.2 路口时段优化

利用 24 h 路口监控视频统计路口流量,由于

19:00—6:00 时段光线较差,视频统计流量数据精度不足,该时段不作优化。为了保持路口运行方案相对平稳,时段不宜划分太多,根据经验,限定每个时段持续时间不小于 1 h,平均 2~3 h 划分为一个时段较合理。据此将 6:00—19:00 划分为 5 个时段。根据最优分割法原理,元素个数 N 为 52 个,分段个数 z 为 5,将各段的流量数据代入公式计算得到最优分割结果(见表 3 和图 6)。

表 3 最优分割法计算参数

时段	时间	元素个数/个	流量平均值/ (pcu·h ⁻¹)	$n_i(\bar{x}_i - \bar{x})^2 /$ (pcu·h ⁻¹) ²	$\sum_{j=1}^{n_j} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 /$ (pcu·h ⁻¹) ²
时段 1	6:00—8:15	9	253.89	865 734.82	5 728.11
时段 2	8:15—10:45	10	622.90	34 646.81	11 857.21
时段 3	10:45—13:45	12	647.08	82 757.41	14 098.27
时段 4	13:45—16:15	10	618.70	29 878.84	11 306.23
时段 5	16:15—19:00	11	624.00	39 549.25	11 966.60
总计	6:00—19:00	52	564.04	—	—

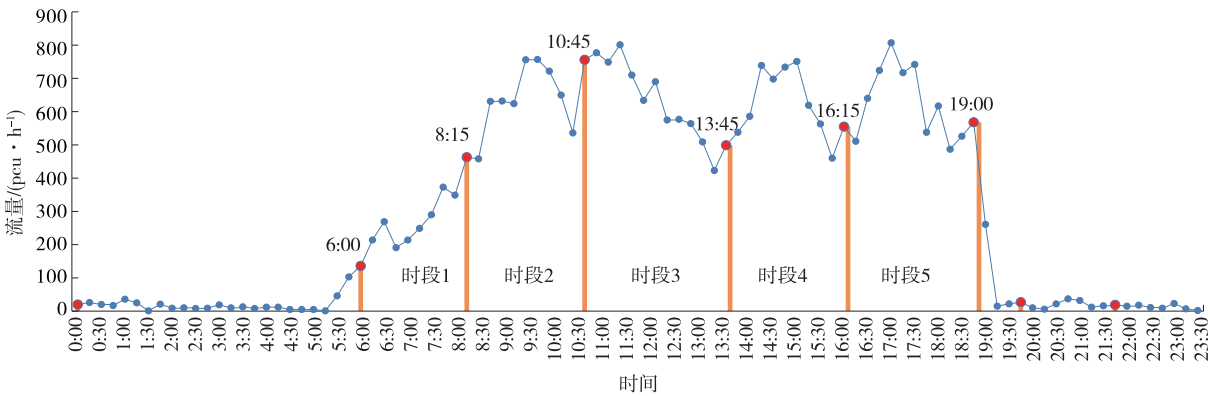


图 6 时段优化结果

根据表 3,得样本总平均数 m 为 564.04 pcu/h, 计算段内方差 W 为 263 141.8 (pcu/h)²,段间方差 B 为 1 169.29 (pcu/h)²,目标函数 R 为 0.995 556, 基本接近 1,说明效果很好。根据优化结果,优化后比原来多了一个时段。

3.3 路口周期和绿信比优化

各进口道饱和流率为 1 600 pcu/h,根据视频数据计算 10:45—13:45 时段内的小时平均流量和饱和度,结果见表 4。

计算得 Y 为 0.55,每相位全红灯时间为 2 s,黄灯时间为 3 s,认为前损失时间和后损失时间等于黄灯时间,故总损失时间为 25 s,代入最佳周期计算公式得周佳周期为 94 s。从实际情况出发,为保证延误最小,周期一般在最佳周期的 0.75~1.5 倍范围内变动,考虑到视频检测流量会造成流量稍微偏少,适当增大周期,取 1.2 倍,得到调整后的周期为 113 s。根据各相位饱和度,计算得到相应绿信比。根据计算结果,第 4 相位只有 2 s 有效绿灯时间,不能满足该相位下 4 条车道需设置 14 s 行人过街最小安全绿灯时间的要求,该相位需单独增加 12 s,周期进一步调整为 125 s。相比原始设置的 144 s 减少 19 s

表 4 相位饱和度优化结果

相位	流向	流量/ (pcu·h ⁻¹)	饱和度
相位 1	西直行	318	0.07
(西进口直左)	西左转	142	0.09
相位 2	西直行	519	0.11
(东西进口对放)	东直行	347	0.07
相位 3	东直行	257	0.05
(东进口直左)	东左转	282	0.18
相位 4	南直行	63	0.01
(南进口直左)	南左转	13	0.01
相位 5	北直行	521	0.16
(北进口直左)	北左转	127	0.08

时间,延误会相应降低,控制效率将得到提升。各相位有效绿灯时间见表 5。

4 结语

针对目前各地单点定周期多时段信号控制的实际需求,该文通过融合视频、互联网导航和信号配时数据,构建了路口信号配时合理性评估体系并提出了优化控制策略,以主动识别配时问题,有针对性地

表5 各相位有效绿灯时间优化结果

相位	有效绿灯时间/s	绿信比
相位1	15	0.12
相位2	17	0.14
相位3	28	0.22
相位4	14	0.11
相位5	26	0.21
合计	100	

对路口控制时段表、周期和绿信比等参数进行优化。实例应用表明该优化策略能满足各城市大多数路口的管控需求,实用性较好。但对于高饱和度路口,由于 Webster 法应用的局限性,部分配时参数需进一步优化。未来随着管控需求的提高,将利用交通大数据对单点自适应和协调控制策略进行研究。

参考文献:

- [1] Transportation Research Board. Highway capacity manual (2000)[S].
- [2] 全永燊. 城市交通控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [3] 何宁, 杨涛, 李朝阳, 等. 信号交叉口延误及排队长度的实证研究和应用[J]. 公路交通科技, 2002, 19(5).
- [4] 祁宏生, 王殿海, 陈松. 基于综合饱和度的单点信号控制方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(2).
- [5] 刘东波, 代磊磊, 李娅, 等. 基于信号周期计算的交叉口管控时段划分[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, 43(6).
- [6] 杨国新. 单一交叉口多时段信号配时方法的研究[D].

哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.

- [7] 冯树民, 杨国新, 陈洪仁. 信号控制交叉口多时段划分方法[A]. 2008 年国际交通技术创新与应用大会暨国际交通基础设施建设与养护技术大会论文集[C]. 2008.
- [8] 王力扬, 周钰严. 交叉口相位及信号配时优化[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(12).
- [9] 安艳召, 成卫, 陈显光. 基于佳点集协同进化粒子群的信号配时优化[J]. 公路与汽运, 2015(4).
- [10] 李成利, 张先贞, 陈柯. 单点信号交叉口配时优化理论与方法[J]. 公路与汽运, 2014(6).
- [11] 王秋平, 谭学龙, 张生瑞. 城市单点交叉口信号配时优化[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2).
- [12] 孙超, 徐建闽. 基于 Synchro 的单点交叉口信号配时优化研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(11).
- [13] 韩立波. 基于排放分析的单点信号交叉口配时优化仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [14] 郭学庆. 单点交叉口信号灯优化配时研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2006, 36(6).
- [15] 顾佳磊, 韩印, 姚佼. 基于 Synchro 与 VISSIM 混合仿真的单点交叉口信号配时优化方法研究[J]. 森林工程, 2014, 30(4).
- [16] 常超凡. 基于 Synchro 系统的典型信号交叉口配时优化研究[J]. 北京交通大学学报, 2004, 28(6).
- [17] 何佳佳. 基于蚁群算法的交通信号配时优化[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.

收稿日期: 2017-04-11

(上接第 21 页)

- [5] 姜平, 石琴, 陈无畏, 等. 基于 Elman 型回归神经网络的公交客流预测[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2008, 31(3).
- [6] 冯树民, 李晓冬. 公交客流生成预测的神经网络模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(1).
- [7] 邹文杰, 孙静怡, 胡立伟, 等. 在公交客流分布预测中重力模型的参数标定及其应用研究[J]. 交通与计算机, 2006, 24(2).
- [8] 王庆荣, 张秋余. 基于随机灰色蚁群神经网络的近期公交客流预测[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(6).
- [9] 刘凯, 李文权, 赵锦焕. 短时公交客流小波预测方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(2).
- [10] 邓浒楠, 朱信山, 张琼, 等. 基于多核最小二乘支持向量机的短期公交客流预测[J]. 交通运输工程与信息学报, 2012, 10(2).

- [11] 温惠英, 王晓巍, 荣利利, 等. 基于模糊神经网络的公交客流时段预测[J]. 微计算机信息, 2009(12).
- [12] 刘伟娜, 霍利民, 张立国. 贝叶斯网络精确推理算法的研究[J]. 微计算机信息, 2006(9).
- [13] 戴娟莉, 宋奇文. 基于多因素的交通指数回归分析短时预测研究[J]. 公路与汽运, 2015(3).
- [14] 盛春阳, 张元. 基于贝叶斯网络模型的交通状态预测[J]. 公路与汽运, 2008(1).
- [15] 晋君. 城市轨道交通路网运营客流模式演变机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [16] 张春辉, 宋瑞, 孙杨. 基于卡尔曼滤波的公交站点短时客流预测[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(4).
- [17] 黄佳, 张宁. 基于贝叶斯网络的机场客流换乘研究[J]. 工业工程, 2009(3).

收稿日期: 2016-12-26