

基于通行能力系数优化的道路交叉口 单点动态控制研究^{*}

朱海峰, 刘畅, 刘彦斌, 温熙华, 韦学武

(中电海康集团研究院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 为提升城市交叉口在动态交通条件下的通行效率, 提出一种单点控制方法。首先依据交叉口及相邻上下游路口信息计算真实交通需求及相关时长约束, 并依据交通需求进行相序选择, 依据过车信息更新饱和车头时距及饱和流量; 然后结合相关约束构建模型求解路口通行能力系数, 依据通行能力系数区分不同交通状态, 并依据所取的状态采用相应策略进行信号控制; 最后通过仿真实验和真实应用对该方法的有效性进行验证。

关键词: 城市交通; 交叉口; 信号优化; 通行能力系数; 单点控制; 动态仿真

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2019)05-0029-06

交通信号控制是交叉口必不可少的管控措施, 合理的信号配时方案不仅能分配各向车流的通行权, 还能提高交叉口运行效率。多年来, 信号控制方法逐渐从定时控制、感应控制发展到自适应控制, 优化目标也由单目标向多目标转变。随着优化模型的复杂化, 遗传算法、粒子群算法等智能控制算法被改进并应用于信号配时方案的求解。张萌萌等提出单点定时信号配时的多目标优化模型, 以交叉口通行能力最大、车辆平均延误最小、交叉口停车次数最少为优化目标对配时方案进行优化。唐德华等针对典型十字交叉口、四相位信号控制建立过饱和条件下以平均车辆延误最小、通行能力最大、平均车辆排队长度最小为目标函数的多目标信号优化控制模型。李明伟等以车辆延误和停车次数最小、通行能力最大为目标, 建立基于 CCPSO 算法的交叉口信号配时模型。安艳召等以排队长度、延误时间和溢流发生率为优化目标构建信号优化模型, 并使用 NSGA-Ⅱ 算法进行求解。陈娟等采用多目标超体积评价算法求解多目标信号配时模型, 获得配时方案集, 并针对不确定性区间多属性决策问题提出主客观信息偏差最小法, 通过建立优化模型处理主客观不确定性需求, 确定配时方案。王力等以信号周期与相位延误和通行能力之间的关系为切入点, 分别对欠饱和、临界饱和及过饱和 3 种交通状态的信号控制周期影响下相位延误和相位通行能力的梯度变化进行分析, 构建二者的相近函数, 并以此为优化目标, 采

用遗传算法求解信号周期。上述研究大多从优化目标和求解算法上展开, 算法只考虑被优化交叉口的流量变化, 未结合上下游交叉口的相关信息; 采用固定相序, 仅对绿灯时长和周期进行优化, 优化方案不灵活; 优化模型和算法复杂, 理论上可行, 但不利于工程应用; 未针对动态交通状态变化作相应及时调整。该文通过建模求解通行能力系数, 依据通行能力系数对交通状态进行分类, 针对不同状态分别制定优化策略, 实现动态交通条件下的单点控制。

1 交通需求及相关约束

交叉口信号控制不仅需考虑交叉口本身, 还需兼顾相邻上下游路口的情况。上游对本路口的影响表现为对本路口的交通需求大小。交通需求可近似表示为本路口的通过流量与绿灯结束时剩余排队折算流量的和。很多单点自适应算法不能很好地分配绿灯时长, 原因之一是基于原不合理配时下的通过流量进行时间分配未能结合交通需求考虑排队的因素。相位 i 的交通需求 q_i 按下式计算:

$$q_i = \frac{Q_i + l_i / l_h}{c} \times 3\,600 \quad (1)$$

式中: Q_i 为相位 i 的通过车辆数; l_i 为绿灯结束排队长度; l_h 为饱和车头间距; c 为交叉口周期时长。

下游对本路口的影响表现为下游路口是否能承受本路口的最大放行量, 即本路口以最大绿灯时间放行时, 是否会造成下游路口的拥堵或溢出。可依

^{*} 基金项目: 工信部 2016 年工业转型升级(中国制造 2025)项目(0714-EMTC02-5737/5)

据下游路口的最大排队长度及下游路段长度得出下游路段容量,进而得到本路口相关相位的最大放行绿灯时长,公式如下:

$$g_i^{\max} < \frac{(L_m - l_n)t_s \alpha}{l_h} \quad (2)$$

式中: g_i^{\max} 为本路口相位 i 的最大绿灯时间; L_m 为下游相邻路段的长度; l_n 为下游路口的最大排队长度; t_s 为饱和车头时距;因为车队在行进过程中速度会发生变化,为简化过程,设置调节系数 α ,其值依据实际情况和数据分析进行设置。

采用美国电器制造商协会 NEMA 标准的配时方式,最小绿灯时长约束、最大绿灯时长约束、最小周期时长约束、最大周期时长约束及屏障时长约束分别见式(3)~(7)。

$$g_i \geq g_i^{\min} \quad (3)$$

$$g_i \leq g_i^{\max} \quad (4)$$

$$c \geq c_{\min} \quad (5)$$

$$c \leq c_{\max} \quad (6)$$

$$B_{mj} = B_{kj} \quad (7)$$

式中: g_i 为交叉口第 i 个相位的绿灯时长; g_i^{\min} 为第 i 个相位的最小绿灯时长,设置原则为保障行人和非机动车最小通行时间; c_{\min} 为最小周期时长; c_{\max} 为最大周期时长; B_{mj} 为在环 m 中屏障 j 的绿灯时间、黄灯时间及红灯时间累加之和。

同一屏障内约束 g_i 、 g_{i+1} 属于同一屏障,若 $q_i \geq q_{i+1}$,则有式(8),否则有式(9)。

$$g_i \geq g_{i+1} \quad (8)$$

$$g_i < g_{i+1} \quad (9)$$

周期时长约束为:

$$c = \sum B_j \quad (10)$$

式中:周期 c 为屏障时长之和。

2 相序变换

交叉口相位见图 1。一般情况下,按照 NEMA 的配时规则,单交叉口在各时段内采用相应固定相序就可满足需求。因为在 NEMA 规则下,同一套相序本身就存在丰富的变化(见图 2)。以东西方向举例,在时间分配不同时,会有以下 3 种组合效果:1) 西左直、东左直、南左直、北左直;2) 西左直、东西直、东左直、南左直、北左直;3) 西左直、东西左、东左直、南左直、北左直。

但有时也会存在一些特殊情况,固定相序并不能满足需要(见图 3)。在图 3 所示相序放行下,若

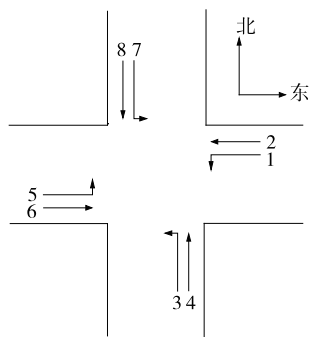


图 1 交叉口相位示意图

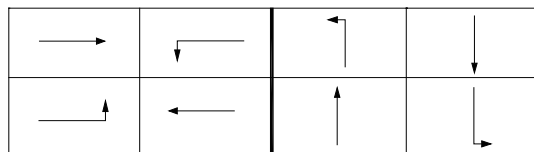


图 2 双环八相位示意图

东西向左转流量很小、东西直行速度较慢,该相序可提高通行效率,减少路口整体延误。但交通流是不断变化的,即使在同一时段内也可能出现完全不同的情况。有左转专用车道和左转灯时,检测到一个周期内左转排队车辆达到 3 辆或更多时,应进行相序自动调整(见图 4)。

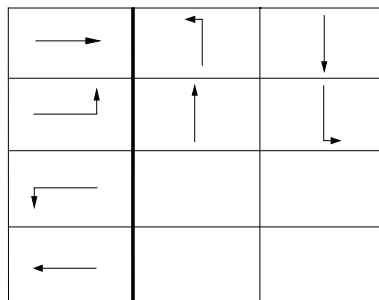


图 3 东西向左直同时放行

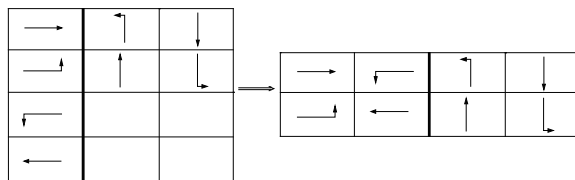


图 4 相位变换

另外,若对向左转周期平均到达量相近,可采用双向左转专用相位;否则宜采用单向左转相位。

3 饱和车头时距及饱和流量更新

一般情况下可通过历史数据分析得出各相位饱和流量。常见设置为:直行饱和流量 1 500~1 900

veh/h,左转饱和流量 1 200~1 800 veh/h,相同时段内基本稳定。在有流量检测器的情况下,绿灯刚启亮有 5 辆或更多排队车辆时,通过多个周期(减少因波动产生的误差)的采集可获取较准确的饱和流量及饱和车头时距。方法如下:绿灯刚启亮时,从第二辆车刚过停车线时开始计数,刚开始的几辆车一般是以饱和车头时距通过停车线,在车头时距未发生离散前结束计数,用多个周期内统计到的时间除以统计车辆数得到饱和车头时距 t_s ,饱和流量 $S = 3\,600/t_s$,更新饱和流量值。

4 通行能力系数建模

通行能力系数是与路口通行能力相关的约束,采用这一目标进行方案优化,效果尤为令人满意。优化准则见式(11),且满足流量均衡约束[见式(12)]。

$$f = \max \mu \quad (11)$$

$$g_i - \mu \frac{q_i}{\rho_i s_i} c \geq 0 \quad (12)$$

式中: μ 为交叉口通行能力系数; ρ_i 、 s_i 分别为交叉口第 i 相位的容忍饱和度和饱和流量。

$\mu > 1$,表示交叉口的通行能力存在余量,即有绿灯空放现象; $\mu < 1$,表示交叉口存在通行能力不足,即在绿灯期间所到达的车辆不能全部通过交叉口,存在排队现象; $\mu = 1$,表示交叉口通行能力刚好满足所到达车辆全部通过交叉口。

ρ_i 值一般由交通工程师估计,针对不同交通流采用不同的值,最常用的值为 0.9。允许出现较长排队时,其值可大于 0.9;若要消除排队,则其值应小于 0.9。也可结合道路等级或人工经验等进行设置,调节控制力度,实施可控性强。

以上优化目标结合约束,通过 CMOA-BDC 求解整数解。

5 优化策略

以通行能力最大化作为优化目标适用于交叉口高饱和度情况,交叉口处于低饱和状况时,若仍以通行能力最大化作为优化目标,则计算所得绿灯时间及周期时间会偏大,导致其他方向的延误增大,甚至造成交通拥挤。以交叉口延误最小为优化目标,则一般采用的传统延误模型只适用于低饱和度情况,而经过改进的模型一般又过于复杂,不利于求解。

为此,提出以下优化策略:计算通行能力系数

μ ,若 $\mu > 1$,道路交叉口处于非饱和状态,以通行系数最大计算结果下的感应控制作为优化策略,适应车辆随机到达特性,使车辆在停车线前尽可能少停车,达到减小延误、车流通畅的效果;若道路交叉口处于饱和或过饱和状态,则直接以通行系数最大、流量均衡作为主要优化目标的求解结果进行交叉口控制(见图 5)。

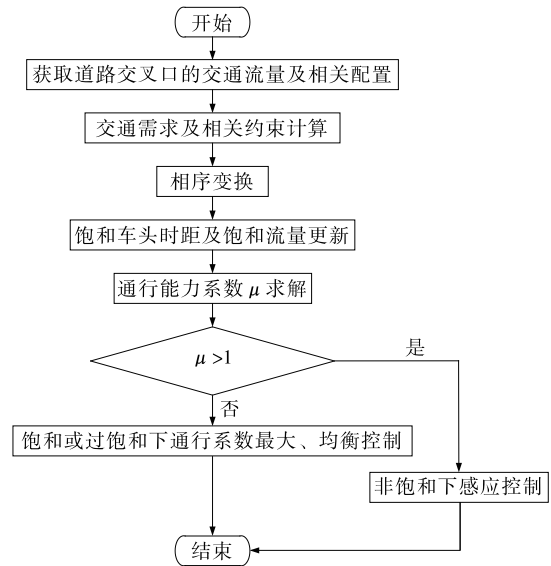


图 5 单点控制流程

6 非饱和状态感应控制

在保障行人和非机动车最小通行时间 g_i^{\min} 的前提下,动态调整绿灯放行时长。当检测器检测到当前放行方向无车(车道占有率 $\sigma = 0$)或车辆离散较大(绿灯开启后车头时距 $t' \geq 2t_s$)时,当前放行相位切换为红灯,下一个放行相位切换为绿灯;当检测器检测到绿灯即将结束,即 $t_{\text{remain}} \leq t_s$ 车辆仍未放完, $\sigma \neq 0$,增加相应相位的时间 $\Delta t = t_s$,直至 $\sigma = 0$ 或车辆离散较大或达到最大绿灯时间 g_i^{\max} 时,切换至下一相位(见图 6)。

7 算例分析

7.1 交叉口信息

选用浙江桐乡市茅盾路与公园路交叉口进行算法验证。该交叉口原配时方案见表 1,相序见图 7,各转向流量见图 8(每 5 min 为一个时间点,1 d 共 288 个时间点)。

按上述优化方法生成平峰和早晚高峰时段 3 套方案(见表 2)。

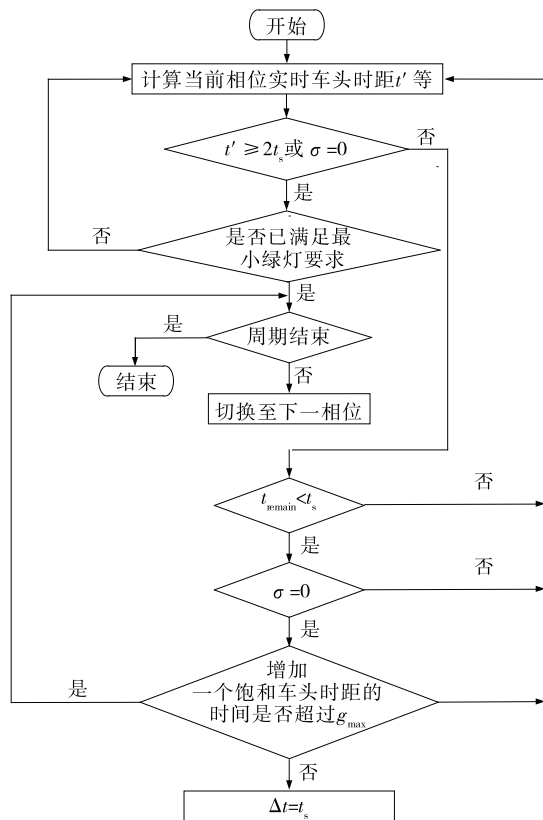


图6 感应控制流程

表1 原方案时间分配

时段	相位	转向	绿灯时 长/s	黄灯时 长/s	红灯时 长/s
00:00—23:59	6	西直	30	3	1
	1	东左	20	3	1
	12	北直左	25	3	1
	2	东直	30	3	1
	5	西左	20	3	1
	10	南直左	25	3	1

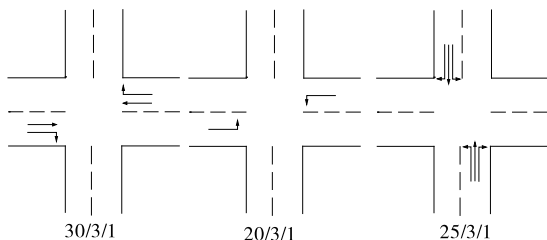


图7 原方案相序(单位:s)

7.2 仿真对比

在 VISSIM4.3 软件中输入初始交通需求、配时方案等交通参数,对原配时方案和新配时方案进行仿真分析对比,验证上述优化算法的有效性。各时段仿真时长均为 3 600 s。仿真结果见表 3~6。

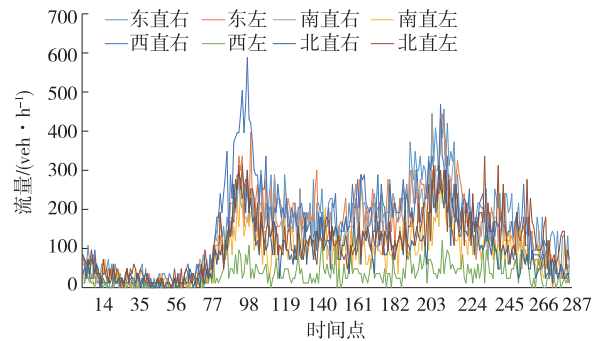


图8 原方案各转向流量

表2 新方案时间分配

时段	相位	转向	绿灯时 长/s	黄灯时 长/s	红灯时 长/s
00:00—07:00	6	西直	24	3	1
	1	东左	16	3	1
	12	北直左	24	3	1
8:30—16:15 (平峰)	2	东直	24	3	1
	5	西左	16	3	1
	10	南直左	24	3	1
	6	西直	38	3	1
	1	东左	16	3	1
	12	北直左	24	3	1
7:00—8:30 (早高峰)	2	东直	38	3	1
	5	西左	16	3	1
	10	南直左	24	3	1
16:15—18:35 (晚高峰)	6	西直	28	3	1
	1	东左	23	3	1
	12	北直左	27	3	1
	2	东直	35	3	1
	5	西左	16	3	1
	10	南直左	27	3	1

表3 配时方案优化前后交叉口流量Q仿真结果对比

时段	时长/s	Q _{优化前} / (veh·h ⁻¹)	Q _{优化后} / (veh·h ⁻¹)	差值 / (veh·h ⁻¹)	相差百 分比/%
平峰	3 600	867	871	4	0.46
早高峰	3 600	1 878	1 888	10	0.53
晚高峰	3 600	2 359	2 369	10	0.42

表4 配时方案优化前后交叉口平均排队长度L

仿真结果对比

时段	时长/s	L _{优化前} /m	L _{优化后} /m	差值/m	相差百分比/%
平峰	3 600	3.929	2.928	-1.001	-25.48
早高峰	3 600	10.278	10.141	-0.137	-1.35
晚高峰	3 600	15.140	13.577	-1.563	-10.32

表 5 配时方案优化前后交叉口最大排队长度 L_{\max} 仿真结果对比

时段	时长/ s	L_{\max} 优化前/ m	L_{\max} 优化后/ m	差值/ m	相差百 分比/%
平峰	3 600	27.448	25.988	-1.460	-5.62
早高峰	3 600	65.020	58.161	-6.858	-10.55
晚高峰	3 600	71.420	71.637	0.217	0.30

表 6 配时方案优化前后交叉口延误 D 仿真结果对比

时段	时长/s	D 优化前/ s	D 优化后/ s	差值/s	相差百 分比/%
平峰	3 600	18.619	17.290	-1.329	-7.14
早高峰	3 600	23.671	21.521	-2.149	-9.08
晚高峰	3 600	26.800	24.707	-2.094	-7.81

从表 3~6 可看出:在加载相同流量甚至流量略有增加的情况下,配时方案优化后,交叉口延误、平均排队长度、最大排队长度均得到明显改善。

7.3 真实应用对比

选取不同星期中星期三(2018-06-20 和 2018-06-27,分别对应配时方案优化前和优化后),分别进行优化前后配时方案控制,采集该交叉口的流量、平均延误、最大排队长度等指标,结果见图 9、表 7、图 10、表 8、图 11、表 9。

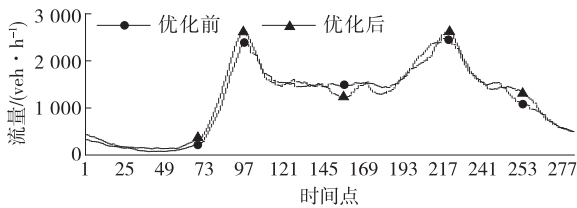


图 9 配时方案优化前后交叉口流量对比

表 7 配时方案优化前后交叉口流量 Q 对比

起始时刻	结束时刻	Q 优化前/ (veh·h ⁻¹)	Q 优化后/ (veh·h ⁻¹)	差值/ (veh·h ⁻¹)	相差百 分比/%
7:04	8:04	1 962	2 312	350	17.84
7:29	8:29	2 406	2 615	209	8.69
16:14	17:14	2 323	2 106	-217	-9.34
16:44	17:44	2 431	2 486	55	2.26
17:14	18:14	2 416	2 596	180	7.45
17:44	18:44	2 056	2 135	79	3.84
18:44	19:44	1 548	1 508	-40	-2.58
19:44	20:44	1 407	1 435	28	1.99
20:44	21:44	1 063	1 248	185	17.40
21:44	22:44	740	789	49	6.62
22:44	23:44	530	515	-15	-2.83

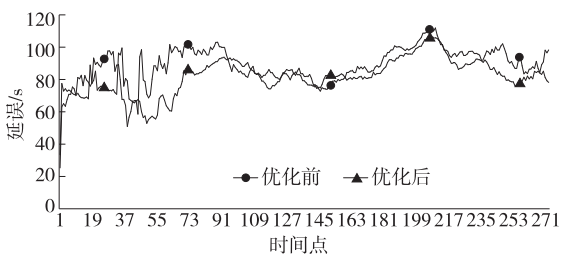


图 10 配时方案优化前后交叉口延误对比

表 8 配时方案优化前后交叉口延误 D 对比

起始时刻	结束时刻	D 优化前/ s	D 优化后/ s	差值/s	相差百 分比/%
7:04	8:04	100.04	88.67	-11.37	-11.37
7:29	8:29	100.30	92.90	-7.40	-7.38
16:14	17:14	97.88	96.12	-1.76	-1.80
16:44	17:44	101.11	99.16	-1.95	-1.93
17:14	18:14	109.20	104.96	-4.24	-3.88
17:44	18:44	107.48	105.37	-2.11	-1.96
18:44	19:44	95.63	86.22	-9.41	-9.84
19:44	20:44	95.06	92.14	-2.92	-3.07
20:44	21:44	100.75	82.79	-17.96	-17.83
21:44	22:44	88.45	79.07	-9.38	-10.60
22:44	23:44	90.92	85.14	-5.78	-6.36

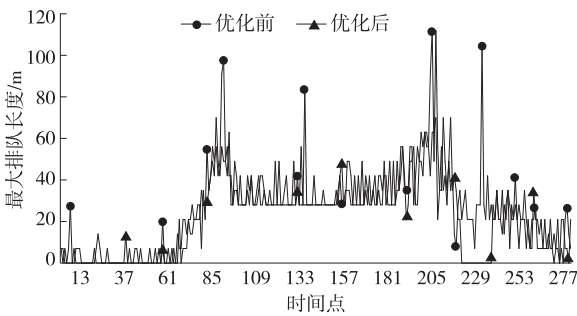


图 11 配时方案优化前后交叉口最大排队长度对比

表 9 配时方案优化前后交叉口最大排队长度 L_{\max} 对比

起始时刻	结束时刻	D 优化前/ m	D 优化后/ m	差值/m	相差百 分比/%
7:09	8:09	49	42	-7	-14.29
7:29	8:29	56	42	-14	-25.00
8:04	9:04	42	28	-14	-33.33
10:59	11:59	84	28	-56	-66.67
16:39	17:39	91	42	-49	-53.85
16:44	17:44	112	63	-49	-43.75
19:59	20:59	28	14	-14	-50.00

从图 9~11、表 7~9 可看出:1) 配时方案优化前后交叉口的流量变化趋势基本一致,可排除流量

对交叉口运行情况的影响;从流量总量上看,优化后流量比优化前高 4.5%。2) 优化后,早晚高峰时段及夜间交叉口平均延误明显减少。3) 优化后,交叉口最大排队长度明显减小。在相同流量甚至流量略有增加的情况下,优化后延误、最大排队长度均得到明显改善。

8 结论

(1) 基于上下游相关信息构建交叉口相关输入和约束,并相应调整相序及参数值,能更好地适应实际情况的变化。

(2) 通过通行能力系数区分交叉口运行状态,并针对不同状态制定相应信号控制策略,能避免因模型复杂导致的求解难度增加,同时均衡考虑控制方案的稳定性和灵活性,可依据经验、道路权重等对各相位设置不同的容忍饱和度和调节控制力度,实施可控性强。

参考文献:

- [1] 李珣,刘瑶,周健,等.基于改进遗传算法的交通信号配时优化模型[J].工业仪表与自动化装置,2017(4).
 - [2] 李悦,郝宇,刘洪涛.基于优化算法的城市相邻两交叉口信号配时[J].自动化仪表,2016,37(8).
 - [3] 张萌萌,贾磊,邹难.单点定时信号配时的多目标优化模型[J].计算机工程,2011,37(6).
 - [4] 唐德华,许伦辉,林泉.过饱和信号交叉口的多目标控制模型[J].科学技术与工程,2009,9(19).
 - [5] 李明伟,康海贵,周鹏飞.基于混沌云粒子群算法的交叉口信号智能配时优化[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2013,37(1).
 - [6] 安艳召,成卫,袁满荣.基于 NSGA-II 算法的单点过饱和交叉口信号控制[J].武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2015,39(4).
 - [7] 陈娟,耿俊杰,贾明星.交叉口车流多目标运行效率决策研究[J].计算机仿真,2016,33(4).
 - [8] 王力,张立立,李敏,等.考虑延误与通行能力的交叉口信号周期优化[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2018,37(4).
 - [9] National Electrical Manufacturers Association. Traffic controller assemblies with NTCIP requirements, ver. 02.06[S].
 - [10] 朱海峰,刘畅,温熙华,等.均衡流量和饱和度的交通瓶颈控制[J].控制理论与应用,2019,36(5).
 - [11] 张永忠,张福生,刘小明,等.城市交通信号优化控制[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
 - [12] 耿焕同,朱海峰,张茜,等.均衡分布性与收敛性的协同进化多目标优化算法[J].控制与决策,2013,28(1).
 - [13] 金勇.平面交叉口转弯车流交通组织优化方法研究[D].长春:吉林大学,2006.
 - [14] 钱萍,邓建华.连续流交叉口左转车道交通适用条件研究[J].交通科技与经济,2018,20(5).
 - [15] 贺文彪.不同相位条件下交叉口通行能力调查与分析[D].哈尔滨:东北林业大学,2013.
 - [16] 杜学艳.基于遗传算法的 OD 矩阵推算和混合交通信号相位优化研究[D].杭州:浙江大学,2006.
 - [17] 何兆成,招玉华,赵建明,等.基于状态判别的单点交叉口信号配时优化方法[J].公路交通科技,2010,27(7).
 - [18] 王威,王秋平.基于遗传算法的城市单点交叉口信号控制研究[A].第四届全国土木工程研究生学术论坛论文集[C].2012.
- 收稿日期:2018-12-17
-
- *****
- (上接第 28 页)
- nsportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 75.
- [11] Hareesh Bahuleyan, Lelitha Devi Vanajakshi. Arterial path-level travel-time estimation using machine-learning techniques[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(3).
 - [12] Barger H. Evaluation of a cellular phone-based system for measurements of traffic speeds and travel times: a case study from israel[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2007, 15(6).
 - [13] 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).
 - [14] 刘好德,杜荣华,王勇.基于 FCD 的城市道路交通状态信息服务系统设计与实现[J].公路与汽运,2011(5).
 - [15] 陈贵霞.基于浮动车辆数据的高速公路交通流状态估计方法研究[D].北京:北京交通大学,2018.
 - [16] 王昊,杨万波.速度梯度模型的高速公路交通流状态估计方法[J].哈尔滨工业大学学报,2015,47(9).
 - [17] 罗赞文,吴志坚,韩曾晋.高速公路交通流宏观模型的一种分类辨识算法[J].清华大学学报:自然科学版,2001,41(7).
- 收稿日期:2018-11-27