

交通物联网中基于改进 Webster 方法的单点信号配时研究

马琳, 陈复扬, 姜斌

(南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对交通物联网中单点定时信号配时问题, 将微观层面分析法和宏观层面分析法相结合, 提出了一种基于改进 Webster 方法的配时方案。以饱和度和信控延误为优化目标, 建立单点的平均延误模型; 针对无信号控制和有信号控制的单交叉口分别建立博弈模型和冲突模型, 并进行冲突分析; 基于改进 Webster 方法, 额外考虑了机动车通过单点所需最短时间, 提出了单点信号配时三步优化方案以减少延误。仿真结果证明了所提方案的有效性。

关键词: Webster; 单交叉口; 信号配时; 冲突分析

中图分类号: TP273

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00073

Research on timing method for single intersection in transportation Internet of things based on improved Webster algorithm

MA Lin, CHEN Fuyang, JIANG Bin

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China

Abstract: Aiming at the timing signal problem of single intersection, a timing method based on the improved Webster algorithm in transportation Internet of things was proposed by combining the micro level analysis method with the macro level analysis method. In order to optimize the saturation and signal control delay, the average delay model was established. The game model and the conflict model were established with non-signal control and signal control. And the conflict analysis was carried out to illustrate that the optimal signal timing could coordinate the conflicting traffic flow. Based on the improved Webster algorithm, the shortest time required for the motor vehicle to pass the single intersection was additionally considered and a three-step optimization method for timing method at single intersection was proposed to reduce the traffic delay to ensure that the vehicle could pass effectively. The simulation results illustrate the effectiveness of the proposed solution.

Key words: Webster, single intersection, signal timing, conflict analysis

1 引言

物联网技术在交通行业中的应用是集成交通信息的数据采集、传输、处理的综合体系^[1-2], 虽然物联网技术在智能交通方面已经取得了一定成绩, 但在道路资源有限的情况下, 城市交通拥堵现象仍然严重^[3], 减小城市道路网中平面交叉口的交通延

误是解决城市道路交通拥堵问题的关键。周堂等^[4-5]提出通过物联网技术实现交通需求者与供给者之间的信息交互, 通过估计短时交通流状况, 执行相应的交通流管理策略, 保证道路交通流有序、高效地运行。欧阳红静^[6]将物联网领域的嵌入式等相关技术与智能交通控制系统相结合, 并利用模糊控制方法实现稳定、高效、有序的智能交通控制。

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61473146)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.61473146)

单点信号优化配时的优化方法是智能交通控制研究的热点问题, Lee^[7]研究了基于统计数据的宏观层面分析法和基于冲突机理的微观层面分析法; 使用 Synchro 系统, 以延误、停车次数和排队长度 3 项性能指标构成的综合优化指标为目标函数从而减小交通延误^[8-9]; 针对排队车辆在一个绿灯相位内不能完全消散的情况, 提供了一种新的单交叉口延误模型的建立方法^[10]; 针对交通模型建立难度大的问题, 采用系统辨识方法建立交叉口的交通流传递函数模型以实现性能优化^[11]; 基于模型参考自适应控制建立了一种城市交叉口网络模型^[12]; 针对信号寻优方法, 陈复扬^[13]提出了一种基于爬山算法的交叉口信号寻优方法; 针对精度问题, 设计不同交织区交通运行的组合条件实现对模型预测精度的提升^[14]。但上述方法在建立车辆平均延误模型时忽略了信控延误指标的影响, 在信号配时方案上没有充分考虑机动车通过交叉口所需的时间等。

基于以上讨论, 本文首先考虑如何针对单点建立更有效的平均延误模型; 其次, 在交通物联网的基础上, 考虑如何针对单点设计信号配时方案以确保车辆的有效通行。本文的主要工作如下。

- 1) 将饱和度和信控延误作为优化目标, 针对单交叉口优化建立车辆平均延误模型。
- 2) 引入博弈模型和冲突模型, 分别对无信号控制和有信号控制的单交叉口进行冲突分析。
- 3) 在原有最短绿灯时间的基础上, 充分考虑机动车通过单点所需时间, 改进 Webster 方法并提出了三步优化方案。

2 问题描述

针对四相位单交叉口, 引入平均延误模型。延误模型涉及的性能指标包括两部分, 即交叉口饱和度和平均信号控制延误。前者在空间上反映交叉口的拥挤程度, 后者在时间上反映车辆在交叉口的受阻程度。

第 i 条进口车道的饱和度可表示为

$$x_i = \frac{q_i}{CAP_i} \quad (1)$$

其中, q_i 表示第 i 条进口车道的实际交通量, 单位为 pcu/h; CAP_i 则表示第 i 条进口车道的通行能力, 单位为 pcu/h, 计算如下

$$CAP_i = \lambda_i S_i \quad (2)$$

则可定义第 k 个进口车道的饱和度 x_k 为

$$x_k = \frac{\sum_i x_i q_i}{\sum_i q_i} \quad (3)$$

其中, x_i 为进口车道中各车道饱和度, q_i 为各自实际交通量。

类似地, 整个交叉口的饱和度 x 可定义为

$$x = \frac{\sum_k x_k q_k}{\sum_k q_k} \quad (4)$$

第 i 条进口车道的信控延误可表示为

$$\begin{cases} d_i = d_{i1} + d_{i2} \\ d_{i1} = 0.5C \frac{(1 - \lambda_i)^2}{1 - \lambda_i \cdot \min\{1, x_i\}} \\ d_{i2} = 900T \left[(x_i - 1) + \sqrt{(x_i - 1)^2 + \frac{8ex_i}{T \cdot CAP_i}} \right] \end{cases} \quad (5)$$

其中, d_i 为第 i 条进口车道每车的平均信控延误; d_{i1} 表示均匀延误, 即车流均匀到达所产生的延误; d_{i2} 表示随机附加延误, 即车辆随机到达并引起超饱和和周期所产生的附加延误, 三者的单位均为 s; T 表示分析时段的持续时长, e 为单交叉口信号控制类型校正系数。

第 k 个进口车道的平均延误可表示为

$$d_k = \frac{\sum_i d_i q_i}{\sum_i q_i} \quad (6)$$

3 交通信号配时优化方案

首先引入博弈模型和冲突模型并分别对其进行冲突分析, 证明合理的信号配时能够协调相互冲突的车流。改进原有 Webster 方法中的最短绿灯时间, 提高车辆的通行能力。最后详细阐述了信号配时算法, 以降低交叉口的平均延误。

3.1 博弈模型

基于经典博弈论^[15], 建立无控制交叉口两机动车之间的博弈模型, 如表 1 所示。

表 1 两机动车博弈模型

机动车 A	机动车 B	
	冒进	礼让
冒进	$-a, -a$	$b, -b$
礼让	$-b, b$	$-b, -b$

其中, a 表示平均一次事故给一方带来的效用损失, b 表示平均一次礼让给一方带来的效用损失, 并且

a 远大于 b 。

针对一个共有 n 个成员的社会，其福利函数如下

$$W(u_1, \dots, u_n) = \sum_{i=1}^n \beta_i u_i \quad (7)$$

其中， u_i 是社会中第 i 个成员的效用函数； $\beta_i > 0$ 为第 i 个成员的效用函数加权系数。

考虑两机动车在博弈中的对等地位，两者效用函数的变动对社会福利的影响程度相同，则机动车 A 、 B 的一次交通冲突给社会福利带来的影响可表示为

$$\Delta W = \beta(\Delta u_A + \Delta u_B) \quad (8)$$

考察该博弈的混合策略纳什均衡，设机动车 A 冒进的概率为 p ，礼让的概率为 $1-p$ ；机动车 B 冒进的概率为 q ，礼让的概率为 $1-q$ 。则社会福利增量的期望为

$$E(\Delta W^*) = E(\beta \Delta u_A^*) + E(\beta \Delta u_B^*) = -2\beta b \quad (9)$$

其中， p^* 为机动车 A 恰当的冒进概率，当 $p = p^*$ 时，无论机动车 B 选择冒进还是礼让，其期望收益相同； q^* 为机动车 B 恰当的冒进概率，当 $q = q^*$ 时，无论机动车 A 选择冒进还是礼让，其期望收益相同。

因此，信号协调控制可使交通冲突化解，博弈的混合策略纳什均衡转化为纯策略纳什均衡，博弈的均衡点落在纯策略纳什均衡点处，社会福利损失为零。

3.2 冲突模型

交叉口交通冲突涉及的 3 个局中人分别为机动车 A 、机动车 B 和信号灯。机动车 A 、 B 各有 3 个可选措施：接受信号管制、不接受信号管制且冒进、不接受信号管制但礼让；信号只有一种策略，即合理分配交叉口的通行权利。

由排列组合理论分析化简后，得到如表 2 所示 9 种交通冲突的可行局势。

表 2 中，“1”表示局中人选择该项措施，“0”

表示局中人放弃该措施；按照表 2 自上而下的顺序，二进制代码的各位权值逐渐升高，则表 2 内 9 个二进制向量可依次转换为对应的十进制代码。由于“信号”这一局中人的决策对冲突局势不产生实质影响，冲突模型中的局中人简化为机动车 A 、机动车 B 。

当默认信号的控制策略合理得当，并且冲突双方均愿意接受信号的管制协调时，机动车 A 、 B 的局势偏好向量为

$$\begin{aligned} \text{机动车 } A: & 5 > 1 > 9 > 6 > 2 > 4 > 8 > 0 > 10 \\ \text{机动车 } B: & 5 > 4 > 6 > 9 > 8 > 1 > 2 > 0 > 10 \end{aligned} \quad (10)$$

当 A 、 B 两机动车中至少有一方认为信号控制策略不合理且倾向于不接受管制时，机动车 A 、 B 新的局势偏好向量如下。

当两机动车有且仅有一方（设为机动车 B ）倾向于不接受管制时，则有

$$\begin{aligned} \text{机动车 } A: & 5 > 1 > 9 > 6 > 2 > 4 > 8 > 0 > 10 \\ \text{机动车 } B: & 9 > 8 > 1 > 2 > 5 > 4 > 6 > 0 > 10 \end{aligned} \quad (11)$$

当两机动车均倾向于不接受管制时，则有

$$\begin{aligned} \text{机动车 } A: & 6 > 2 > 4 > 8 > 5 > 1 > 9 > 0 > 10 \\ \text{机动车 } B: & 9 > 8 > 1 > 2 > 5 > 4 > 6 > 0 > 10 \end{aligned} \quad (12)$$

该冲突模型的现实结局以更大概率稳定在局势 2 或者局势 8，即两机动车均不接受管制，其中一方冒进，另一方礼让。因此，当信号的配时设计合理时， A 、 B 两机动车冲突的最终结局稳定在纯策略的纳什均衡点。

3.3 最短绿灯时间

对 Webster 方法中最短绿灯时间进行改进，结合 A 、 B 冲突分析的结论，考虑各流向机动车通过交叉口的必要通行时间，确保各相绿灯时间大于机动车的必要通行时间。若该交叉口设有人行横道线，则同时考虑行人过街的影响，确保最短绿灯时间大于行人过街所需最短时间。

表 2 交通冲突的可行局势

局中人	可选措施	可行局势									
机动车 A	接受管制	0	1	0	0	1	0	0	1	0	
	不接受管制且冒进	0	0	1	0	0	1	0	0	1	
机动车 B	接受管制	0	0	0	1	1	1	0	0	0	
	不接受管制且冒进	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
可行局势的十进制代码		0	1	2	4	5	6	8	9	10	

经典 Webster 方法中,最短绿灯时间的计算方法为

$$g_{\min} = 7 + t_{p\min} - I \quad (13)$$

其中, I 为绿灯间隔时间。

行人过街所需最短时间 $t_{p\min}$ 可表示为

$$t_{p\min} = \frac{s_p}{v_p} \quad (14)$$

其中, s_p 为街道长度, v_p 为过街速度。

考虑车辆通过交叉口所需的必要时间为

$$t_{v\min} = \frac{v_{c\max}}{a} + \frac{s_c - \frac{v_{c\max}^2}{2a}}{v_{c\max}} = \frac{s_c}{v_{c\max}} + \frac{v_{c\max}}{2a} \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可得,车辆的最小必要通行时间由两部分组成:以该路段允许的最大速度通过交叉口所需时间,即匀速通行时间 $\frac{s_c}{v_{c\max}}$; 机动车从停车等待状态匀加速至最大通行速度所需时间,即加速延误时间 $\frac{v_{c\max}}{2a}$ 。

基于经典 Webster 方法的最短绿灯时间的计算,充分考虑最短绿灯时间需要同时满足车辆有效通行和行人安全过街的需求,因此改进后的最短绿灯时间可表示为

$$g_{\min} = \max \{7 + t_{p\min} - I, t_{v\min} + L_s\} \quad (16)$$

其中, L_s 为起动损失时间。

3.4 基于 Webster 方法的信号配时算法

经典的 Webster 模型中城市交叉口的周期时长 C 可表示为

$$C = \frac{1.5L + 5}{1 - Y} \quad (17)$$

其中, L 为周期总损失时间, Y 为各相位的最大流量比之和。

步骤 1 首先进行数据收集,确定多段式信号配时的时段划分,从而确定各配时时段内各进口车道、各流向的设计交通量 q_{mn} 。

$$q_{dmn} = \frac{Q_{mn}}{(\text{PHF})_{mn}} \quad (18)$$

其中, q_{dmn} 表示配时时段中,进口车道 m 、流向 n 的设计交通量,单位为 pcu/h; Q_{mn} 为配时时段中,进口车道 m 、流向 n 的高峰小时交通量,单位为 pcu/h; $(\text{PHF})_{mn}$ 为配时时段中,进口车道 m 、流向 n 的高峰小时系数。

步骤 2 在绿灯间隔时间和信号总损失时间已知的情况下,对各进口车道和信号相位进行设计,并计算各相位最大设计流量比总和 Y 。

$$Y = \sum_{i=1}^j \max \{y_i, y'_i, \dots\} = \sum_{i=1}^j \max \left\{ \left(\frac{q_d}{S} \right)_i, \left(\frac{q_d}{S} \right)'_i, \dots \right\} \quad (19)$$

其中, y_i, y'_i, \dots 为第 i 相对应的放行车道的流量比; q_d 为设计交通量,单位为 pcu/h; S 为设计饱和流量,单位为 pcu/h。

步骤 3 若各相位最大设计流量比总和 $Y \leq 0.9$,则计算 Webster 最佳信号周期时长 C ; 若各相位最大设计流量比总和 $Y > 0.9$,则跳回步骤 1。

L 为信号总损失时间,其计算式为

$$L = \sum_{i=1}^k (L_s + I - W)_i \quad (20)$$

其中, W 表示黄灯时长; k 表示一个周期内的绿灯间隔数。

步骤 4 计算总有效绿灯时间、各相有效绿灯时间、各相绿信比及显示绿灯时间。若各相绿灯时间大于最短绿灯时间,则计算信控延误 d ; 否则跳回步骤 2。

第 i 相的有效绿灯时间为

$$g_{ei} = G_e \frac{\max \{y_i, y'_i, \dots\}}{Y} \quad (21)$$

第 i 相的绿灯显示时间为

$$g_i = g_{ei} - A + L_s \quad (22)$$

步骤 5 通过信控延误 d 所在的区间范围验证单交叉口的通行能力是否满足要求,若满足要求,则算法结束; 否则跳回步骤 1。

4 仿真实验

以广州市天河区天河北路(东、西向)与天河东路(南、北向)的十字路口为研究对象,该路口的 4 个进口车道均有渠化的右转专用车道(转弯半径大于 15 m),每条车道宽度均在 3~3.5 m,选取 $(\text{PHF})_{mn} = 0.75$, $T = 0.25$ s, $e = 0.5$ 。基于物联网获取交叉口高峰时段各流向流量如表 3 所示,并通过交通物联网获取该仿真路段时刻的车辆信息。该交叉口采用四相位定时信号控制方案,信号周期时长为 130 s,各相位之间的黄灯时间为 3 s,全红灯时间为 1 s。

利用 Webster 方法提供的计算方法，计算在现行信号灯配时方案控制下交叉口的饱和度与平均信控延误。根据计算结果可知，交叉口的饱和度为 0.89，虽然低于饱和度的实用限值 0.9，但安全裕度仅有 0.01，且该交叉口的平均信控延误为 67.49 s，车辆在交叉口受阻滞的时间较长。基于该交叉口的机动车流量、道路现状以及信号灯现行配时方案等统计数据，将优化方案分成 3 个部分，信号相位方案和路口几何示意图分别如图 1 和图 2 所示。

表 3 交叉口高峰时段各流向流量

进口车道		$Q_{mi}/(\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1})$	HV
西进口	直行	851	5%
	左转	551	
	右转	300	
东进口	直行	737	5%
	左转	391	
	右转	247	
北进口	直行	531	7%
	左转	259	
	右转	351	
南进口	直行	357	6%
	左转	453	
	右转	300	

1) 近期优化方案

对路口信号灯的配时方案进行优化，同时在道路中央设置行人过街安全岛。首先，进行信号灯的相位方案设计，且假设 4 个进口车道的右转车道均具有常绿右转相位。此外，东进口左转车道的流量比 0.341 2 与西进口左转车道的流量比 0.238 9 差距较大，考虑东进口直行车道流量比 0.301 8 与左转车道流量比 0.341 2 差距相对较小，将相位调整为先西进口直行车流和左转车流一起放行，再东进口直行车流和左转车流一起放行，得到相位近期优化方案如图 1(a)所示。

计算得到优化后单交叉口参数如表 4 所示，在优化配时方案下，交叉口饱和度由 0.89 下降到 0.79，改善效果明显；但信控延误由 67.49 s 上升到 68.14 s，恶化程度很小。交叉口各局部之间的交通效益水平差距得到一定程度的缩小；在信控延误增加不明显的情况下，饱和度降低，有效地缓解了路口的拥堵情况。

2) 中期优化方案

在近期优化方案的基础上，开展小规模的道路

施工改造工作，提高路口的交通效益水平。为控制施工规模，只对东进口的一条车道作改造：将东进口东行车道中紧邻双实线的一条车道改造为西行左转车道，东进口的左转车道从一条增加至两条，改造后的路口几何示意图如图 2(b)所示。在此基础上，即路口信号灯相位方案不变（如图 1(b)所示）的情况下，基于 Webster 方法进行信号灯配时方案优化设计。

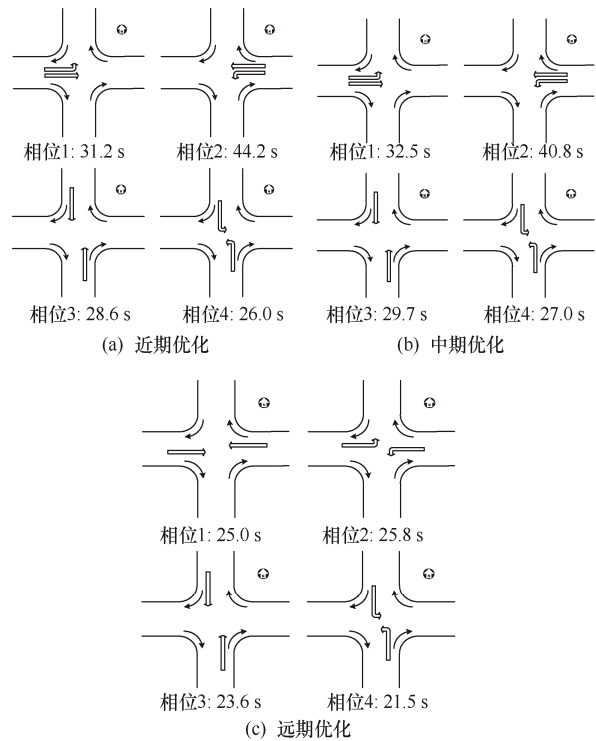


图 1 信号相位方案

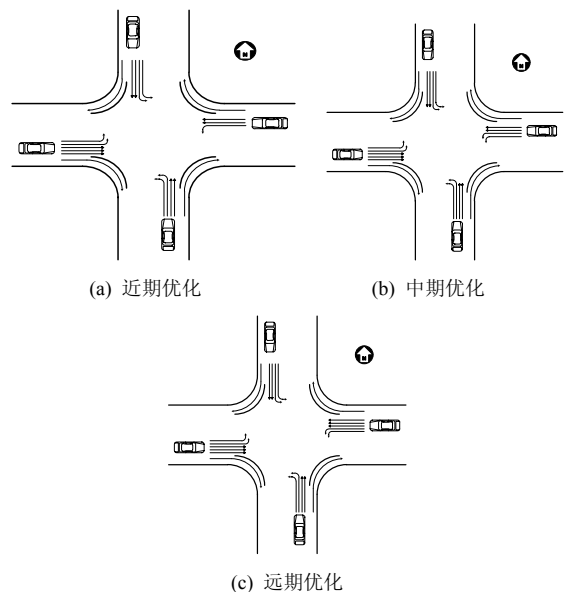


图 2 路口几何示意图

饱和度由 0.79 下降至 0.74, 信控延误由 68.14 s 下降至 61.72 s, 中期优化方案同时实现了两个优化指标, 克服了近期优化方案的缺陷, 取得了良好效果。

3) 远期优化方案

在近期、中期优化方案中, 流量比总和 Y 均大于 0.9, 无法满足式(8)的使用条件, 信号周期时长问题未得到进一步优化。因此开展较大规模的交叉口道路扩能改造工程, 将流量比总和 Y 降低至 0.9 以下, 以便对信号灯配时方案进行进一步的优化, 最终实现较大幅度地改善交叉口的饱和度与信控延误。

将该交叉口的东进口右转专用车道向外迁移, 在原右转专用车道处新建一条直行专用车道, 东进口直行车道由两条增加至三条, 道路几何条件在扩能改造后与西进口相同。改造后的新相位方案如图 1(c)所示, 远期优化后的路口几何条件如图 2(c)所示。另外, 考虑为过街行人修建人行天桥或地下通道以实现人车分离, 同时考虑将过街行人分流至该交叉口以外的区域。在路口车道完成上述改造后, 再基于 Webster 方法进行信号灯配时方案优化设计。

优化后单交叉口参数如表 4 所示, 由表 4 可知, 加入第三部分的优化方案后, 流量比总和 $Y=0.8853 < 0.9$, 由式(8)求得最佳信号周期时长 $C=95.9$ s。饱和度由 0.74 下降至 0.70, 信控延误则由 61.72 s 下降至 43.85 s, 两项指标均得到优化, 尤其是信控延误得到大幅度改善。

实行优化方案后, 各相时间减去全红灯时间 1 s 等于各相绿灯时间, 其值均大于最短绿灯时间, 3 部分优化方案的依次实施能大幅度改善交叉口的饱和度和信控延误两项指标, 有效缓解交叉口的交通阻塞。

5 结束语

本文针对单交叉口提出了一种基于改进 Webster 方法的定时信号配时方案, 首先引入以饱

和度和信控延误为优化目标的平均延误模型。通过对博弈模型和冲突模型进行冲突分析, 在原有最短绿灯时间的基础上, 额外考虑机动车通过单交叉口所需最短时间这一约束, 使得各相绿灯时间更合理, 确保了车辆有效通行和行人安全过街。基于改进的 Webster 方法, 针对不同时期的单交叉口, 通过交通物联网获取有关仿真路口的高峰车辆流量以及原有信号配时等数据, 设计了定时信号配时三步优化方案, 根据仿真结果, 大幅度降低了交叉口的饱和度及平均延误, 验证了所提方案的合理性。

参考文献:

- [1] 熊建芳. 浅谈物联网在智能交通中的应用[J]. 智能计算机与应用, 2018, 8(6):177-179.
XIONG J F. Application of Internet of things in intelligent transportation[J]. Intelligent Computer and Applications, 2018, 8(6):177-179.
- [2] 叶剑. 智能交通系统架构中物联网技术的应用[J]. 科技创新与应用, 2018(21):175-176.
YE J. Application of Internet of things technology in intelligent transportation system architecture[J]. Technology Innovation and Application, 2018(21):175-176.
- [3] MIRHELI A, HAJIBABAI L, HAJBABAIE A. Development of a signal-head-free intersection control logic in a fully connected and autonomous vehicle environment[J]. Transportation Research Part C, 2018(92):412-425.
- [4] 周堂. 物联网背景下城市交通拥堵事前疏导研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
ZHOU T. Research on urban traffic congestion preventive guidance under the background of Internet of things[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [5] 马庆禄, 斯海林, 郭建伟. 物联网环境下城市交通区域联动的云控制策略[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(9):2711-2714.
MA Q L, SI H L, GUO J W. Cloud computing strategy of coordinated control in urban region traffic things networking[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(9):2711-2714.
- [6] 欧阳红静. 物联网与智能交通控制系统[J]. 科技资讯, 2013(20):15-16.
OUYANG H J. Internet of things and intelligent transportation control system[J]. Science & Technology Information, 2013(20):15-16.
- [7] LEE J, ABDEL-ATY M, JIANG X. Development of zone system for macro-level traffic safety analysis[J]. Journal of Transport Geography, 2014(38):13-21.
- [8] ALMEIDA J, COSTA C, SILVA F N D. A framework for conflict

表 4 优化后单交叉口参数

阶段	流量比总和 Y	相位 1/2/3/4/s	最短绿灯时间 g_{min}/s	优化效果		服务水平
				饱和度	控制延误/s	
现阶段	1.169 5	30.0/35.0/35.0/30.0	31.0	0.89	67.49	E
近期	0.995 4	31.2/44.2/28.6/26.0	18.5	0.79	68.14	E
中期	0.956 0	32.5/40.8/29.7/27.0	18.5	0.74	61.72	E
远期	0.885 3	25.0/25.8/23.6/21.5	7.9	0.70	43.85	D

analysis in spatial planning for tourism[J]. *Tourism Management Perspectives*, 2017(24):94-106.

- [9] YANG X, ZHAO J, MA W, et al. A survey of research on calculation methods of signal control intersection capacity[J]. *China Journal of Highways*, 2014, 27(5):148-157.
- [10] 陈复扬, 闫啸岳, 姜斌. 过饱和状态下道路单交叉口的延误模型建立[J]. *物联网学报*, 2017, 1(3):40-46.
CHEN F Y, YAN X Y, JIANG B. Research on the delay model of single intersection in the oversaturated state[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2017, 1(3):40-46.
- [11] WU W. Application of synchro in the teaching of traffic management and control experiment[J]. *Experimental Technology and Management*, 2016, 33(8):137-140.
- [12] CHEN F, WANG L, JIANG B, et al. A novel hybrid petri net model for urban intersection and its application in signal control strategy[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, 351(8):4357-4380.
- [13] CHEN F, WANG L, JIANG B, et al. An arterial traffic signal control system based on a novel intersections model and improved hill climbing algorithm[J]. *Cognitive Computation*, 2015, 7(4):1-13.
- [14] YANG Q, ZHAO X, ZHENG L, et al. Signal timing method for roundabout based on model predictive control[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Edition)*, 2018, 52(1):117-124.
- [15] ZHANG L, HUANG X, WU W. Traffic conflict analysis of non-signal intersection[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition)*, 2015, 34(3):105-111.

[作者简介]



马琳(1995-), 女, 南京航空航天大学自动化学院硕士生, 主要研究方向为物联网与交通控制。



陈复扬(1967-), 男, 南京航空航天大学自动化学院教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网控制及自愈合控制。



姜斌(1966-), 男, 南京航空航天大学自动化学院教授、博士生导师, 主要研究方向为故障诊断与容错控制。