



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104282162 A

(43) 申请公布日 2015. 01. 14

(21) 申请号 201410513799. 4

(22) 申请日 2014. 09. 29

(71) 申请人 同济大学

地址 200092 上海市杨浦区四平路 1239 号

(72) 发明人 唐克双 孔涛 李克平

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限公司 31225

代理人 宣慧兰

(51) Int. Cl.

G08G 1/08 (2006. 01)

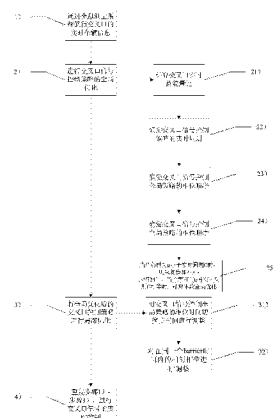
权利要求书3页 说明书11页 附图6页

(54) 发明名称

一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法,包括以下步骤:1) 通过全息测量系统获得交叉口的实时车辆信息;2) 根据获得交叉口的实时车辆信息,基于 NEMA 双环相位结构,按照设定的时间间隔对交叉口信号控制策略进行全局优化;3) 在所述设定时间间隔内,进行交叉口控制策略进行局部优化;4) 重复步骤 1)-步骤 3),进行交叉口信号的实时控制。与现有技术相比,本发明具有实时性高、降低延误效果好、方法先进等优点。



1. 一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

1) 通过全息测量系统获得交叉口的实时车辆信息;

2) 根据获得交叉口的实时车辆信息,基于 NEMA 双环相位结构,按照设定的时间间隔对交叉口信号控制策略进行全局优化;

3) 在所述设定时间间隔内,进行交叉口控制策略进行局部优化;

4) 重复步骤 1)–步骤 3),进行交叉口信号的实时控制。

2. 根据权利要求 1 所述的一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法,其特征在于,所述的步骤 2) 具体包括以下步骤:

21) 计算交叉口实时总流量比 Y , Y 的计算式为:

$$Y = \sum_{j=1}^h \max[y_j, y'_j, \dots]$$

其中, Y 为组成周期的全部信号各相位中流量比 y_j 或预测流量比 y'_j 之和, j 为一个周期内的相位数, h 为 NEMA 双环相位结构包含的相位数;

22) 确定交叉口信号控制策略的实时周期 C ,

当实时流量比 Y 小于分界点 0.75 时, C 的计算式为:

$$C = 120 + 60 \times \frac{Y - 0.75}{1 - 0.75}$$

当实时流量比 Y 大于分界点 0.75 且小于 0.9 时, C 取值为 120;

23) 计算实时饱和指数 x' 和各相位时长 g ,按照 x' 从大到小的顺序来确定交叉口信号控制全局策略的相位顺序,计算式为:

$$x' = \frac{N_0}{g \times s}$$

$$g = (C - L) \times \frac{y}{Y}$$

其中, L 为损失时间,包括启动损失时间、黄灯时长和绿灯间隔时间, y 为相位流量比, N_0 为当前相位进口道前停止排队的车辆数, g 为各相位时长, s 为交叉口的饱和流率;

24) 根据预测流量比 y' ,调整各相位时长 g ,预测流量比 y' 计算式为:

$$y' = \frac{n_t}{s \times C}$$

各相位时长 g 的计算式为:

$$g = (C - L) \times \frac{y'}{Y}$$

其中, n_t 为预测的绿灯结束时刻的到达车辆数;

25) 判断实时周期 C 是否结束,若为否,则重复步骤 21)–步骤 24),若为是,则结束本次全局优化。

3. 根据权利要求 2 所述的一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法,其特征在于,所述的步骤 23) 中预测的绿灯结束时刻的到达车辆数 n_t 的计算方法包括以下步骤:

231) 计算当前相位车辆的实时到达率 q , q 取最近 10 分钟内统计车辆数的平均值;

$$q = \frac{\sum_{k=1}^{10} n_k}{600}$$

其中, n_k 为每分钟的统计车辆数;

232) 获取停止线上游 150m 处的车辆行驶到停车线所需时间 t_{150m} :

$$t_{150m} = 150/v$$

其中, v 为交叉口的设计速度;

233) 计算预测绿灯结束时刻的到达车辆数 n_t , n_t 的计算式为:

$$n_t = \begin{cases} N_0 + \sum_{i=1}^m \delta_i & t < t_{150m} \\ N_0 + m + q(t - t_{150m}) & t > t_{150m} \end{cases}$$

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \frac{s_i}{v} < t \\ 0 & \frac{s_i}{v} > t \end{cases}$$

其中, s_i 为第 i 辆车到停止线的距离, δ_i 为中间变量, m 为从停止线到停止线上游 150m 处运行车辆的数量。

4. 根据权利要求 1 所述的一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法, 其特征在于, 所述的步骤 3) 具体包括以下步骤:

31) 对交叉口信号控制全局策略的相位滚动切换时间 barrier 进行调整;

32) 对在同一个 barrier 时间内的冲突的相邻相位进行调整。

5. 根据权利要求 3 所述的一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法, 其特征在于, 所述的步骤 31) 中具体包括以下步骤:

311) 计算当前相位预测的饱和度 x , 按照双环相位结构, 根据实时饱和指数从大到小来确定相位顺序, 当前相位预测的饱和度 x 计算式为:

$$x = \frac{n_r}{g_r \times s}$$

其中, n_r 为当前时刻滞留车辆数和到绿灯结束时刻的到达车辆数之和, g_r 为当前时刻剩余的绿灯时间;

312) 确定一个 barrier 时间内相邻的冲突相位间的调整量为: barrier 的调整步距为 $(-4, 0, 4)$, 各相位的调整步距为 $(-4, -2, 0, 2, 4)$;

调整方法为: 如果在 1 个 barrier 时间内的一对相邻的冲突相位的饱和度均大于 1, 则 barrier 调整度为 +4, 如果 1 个 barrier 时间内的一对相邻的冲突相位的饱和度均小于 0.8, 则 barrier 调整 -4, 否则不调整 barrier。对于 1 个 barrier 时间内的另外一对冲突的相邻相位做相同处理, 如果两者对 barrier 的调整量不一致, 取较大值。

6. 根据权利要求 3 所述的一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法, 其特征在于, 所述的步骤 32) 中具体包括以下步骤:

321) 计算当前时刻到一个周期结束时的延误时间 delay, 当当前时刻 t_0 为相位红灯时

刻且当 t_k 小于 t_3 时, 延误时间 delay 的计算式为:

$$\begin{aligned}
 \text{delay} &= \sum_i (t_i^{\text{depart}} - t_i^{\text{arrive}}) = \sum_i t_i^{\text{depart}} - \sum_i t_i^{\text{arrive}} \\
 \sum_i t_i^{\text{depart}} &= \sum_{t_2 < t_i < t_k} t_i^{\text{depart}} + \sum_{t_k < t_i < t_3} t_i^{\text{depart}} + \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{\text{depart}} \\
 \sum_{t_2 < t_i < t_k} t_i^{\text{depart}} &= \frac{t_2 + t_k}{2} \times (t_k - t_2) \times s \\
 \sum_{t_k < t_i < t_3} t_i^{\text{depart}} &= \frac{t_3 + t_k}{2} \times (t_3 - t_k) \times q \\
 \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{\text{depart}} &= C \times (C - t_3) \times q \\
 \sum_i t_i^{\text{arrive}} &= \sum_{t_0} t_i^{\text{arrive}} + \sum_{t_0 < t_i < t_1} t_i^{\text{arrive}} + \sum_{t_1 < t_i < C} t_i^{\text{arrive}} \\
 \sum_{t_0} t_i^{\text{arrive}} &= t_0 \times N_0 \\
 \sum_{t_0 < t_i < t_1} t_i^{\text{arrive}} &= \sum_i \frac{s_i}{v} \\
 \sum_{t_1 < t_i < C} t_i^{\text{arrive}} &= \frac{t_1 + C}{2} \times (C - t_1) \times q \\
 t_k &= \frac{N_0 + m + s t_2 - q t_1}{s - q}
 \end{aligned}$$

其中, t_i^{depart} 为等待车辆离开时间之和, t_i^{arrive} 为车辆的到达时间之和, i 的取值范围为 1-3, t_1 为 150m 处车辆到达停止线的时刻, t_2 为绿灯开始时刻, t_3 为绿灯结束时刻, C 为周期结束时刻, t_k 为饱和流率与自由达到流率的分界点时刻;

当 t_k 大于 t_3 时, t_i^{depart} 的计算式为:

$$\begin{aligned}
 \sum_i t_i^{\text{depart}} &= \sum_{t_2 < t_i < t_3} t_i^{\text{depart}} + \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{\text{depart}} \\
 \sum_{t_2 < t_i < t_3} t_i^{\text{depart}} &= \frac{t_2 + t_3}{2} \times (t_3 - t_2) \times s \\
 \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{\text{depart}} &= C \times [N_0 + m + (C - t_1) \times q - (t_3 - t_2) \times s]
 \end{aligned}$$

当前时间 t_0 为相位绿灯时刻时, 根据定向逐步试探的方法获得 t_k 的时间点, 离开车辆按照饱和和流量计算, 从当前时刻开始, 当离开车辆数首次大于达到车辆数的时刻即为 t_k , 然后根据上述步骤计算延误时间 delay ;

322) 以延误时间最小作为目标函数, 对在同一个 barrier 时间内的冲突的相邻相位进行调整。

一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及交通控制领域,尤其是涉及一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法。

背景技术

[0002] 交叉口的运行效率很大程度上决定了城市道路交通系统的整体运行效率,其控制和管理的效率直接影响城市交通环境质量以及机动车能源消耗。

[0003] 在自适应控制策略中,根据相位决策依据的不同,将自适应控制策略分为 3 类:(1) 基于模型的控制策略;(2) 基于规则的控制策略;(3) 基于规则和优化模型的混合控制策略。常用的自适应控制系统主要有美国的 OPAC 和 RHODES 系统,法国的 PROLYN 系统,意大利的 SPOY/UTOPIA 系统。RHODES 是一个实时自适应区域交通控制系统,测试表明该系统对半拥挤的交通网络比较有效。RHODES 以相位可控化、有效绿波带和预测算法为核心技术,能够使延误和停车次数最小。PROLYN(Dynamic Programming) 系统是一种实时交通控制系统,是一个分布式系统,系统中的每个路口都要在滑动时间窗上求解一个向前动态规划问题以获得最优控制方案;SPOT/UTOPIA 是分布式实时交通控制系统,设计目标是同时改善私人 and 公共运输效率,由 SPOT(本地)和 UTOPIA(区域)两部分组成,其中,SPOT 是一个小型的分布式交通控制系统,在每个交通控制器上使用微观模型完成本地最优化工作即使总费用函数最小;它可以独立工作,单个 SPOT 系统最多管理 6 个路口。UTOPIA 是一个面控软件,可协调组织多个 SPOT 系统(作为子区)以组成区域控制系统;它使用基于历史数据的宏观交通模型来优化控制策略,每个子区使用相同的周期长度。

[0004] 总结国内外自适应控制的研究,目前单点自适应控制主要存在以下问题:

[0005] (1) 信息的可靠性有待提高

[0006] 通过线圈检测来进行数据的采集,受布设位置的限制,检测器只能采集定点车辆信息,采集到的信息本身就不全面,同时还要考虑检测误差。

[0007] (2) 对相位结构的研究不够

[0008] 很少对相位结构进行优化,而是假设相位结构固定的条件下进行控制。对于不冲突的车流,采用同启同断的方式,视为同一个相位处理,即单环控制的形式。而实际中,对于直左分离的交叉口,常常要求进行相位搭接,即双环结构。

[0009] (3) 检测数据没有被充分利用

[0010] 早期自适应控制受线圈检测器检测能力的影响,仅以流量数据来计算控制方案,而近年来基于新型检测手段的控制,虽然能检测到充足的信息,但是由于简化模型加快运算速度,大多只采用集计的数据进行模型计算。

[0011] (4) 参数设置依赖交通工程师的经验

[0012] 涉及到的参数,大多需要根据实际路口的调查情况,由交通工程师来事先确定,一方面降低了策略对实时交通状况反应的灵敏程度,另一方面增加了实际应用中的工作量。

发明内容

[0013] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种实时性高、降低延误效果好、方法先进的基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法。

[0014] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现：

[0015] 一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法，包括以下步骤：

[0016] 1) 通过全息测量系统获得交叉口的实时车辆信息；

[0017] 2) 根据获得交叉口的实时车辆信息，基于 NEMA 双环相位结构，按照设定的时间间隔对交叉口信号控制策略进行全局优化；

[0018] 3) 在所述设定时间间隔内，进行交叉口控制策略进行局部优化；

[0019] 4) 重复步骤 1) - 步骤 3)，进行交叉口信号的实时控制。

[0020] 所述的步骤 2) 具体包括以下步骤：

[0021] 21) 计算交叉口实时总流量比 Y ， Y 的计算式为：

$$[0022] \quad Y = \sum_{j=1}^h \max[y_j, y'_j, \dots]$$

[0023] 其中， Y 为组成周期的全部信号各相位中流量比 y_j 或预测流量比 y'_j 之和， j 为一个周期内的相位数， h 为 NEMA 双环相位结构包含的相位数；

[0024] 22) 确定交叉口信号控制策略的实时周期 C ，

[0025] 当实时流量比 Y 小于分界点 0.75 时， C 的计算式为：

$$[0026] \quad C = 120 + 60 \times \frac{Y - 0.75}{1 - 0.75}$$

[0027] 当实时流量比 Y 大于分界点 0.75 且小于 0.9 时， C 取值为 120；

[0028] 23) 计算实时饱和指数 x' 和各相位时长 g ，按照 x' 从大到小的顺序来确定交叉口信号控制全局策略的相位顺序，计算式为：

$$[0029] \quad x' = \frac{N_0}{g \times s}$$

$$[0030] \quad g = (C - L) \times \frac{y}{Y}$$

[0031] 其中， L 为损失时间，包括启动损失时间、黄灯时长和绿灯间隔时间， y 为相位流量比， N_0 为当前相位进口道前停止排队的车辆数， g 为各相位时长， s 为交叉口的饱和流率；

[0032] 24) 根据预测流量比 y' ，调整各相位时长 g ，预测流量比 y' 计算式为：

$$[0033] \quad y' = \frac{n_t}{s \times C}$$

[0034] 各相位时长 g 的计算式为：

$$[0035] \quad g = (C - L) \times \frac{y'}{Y}$$

[0036] 其中， n_t 为预测的绿灯结束时刻的到达车辆数；

[0037] 25) 判断实时周期 C 是否结束，若为否，则重复步骤 21) - 步骤 24)，若为是，则结束本次全局优化。

[0038] 所述的步骤 23) 中预测的绿灯结束时刻的到达车辆数 n_t 的计算方法包括以下步

骤：

[0039] 231) 计算当前相位车辆的实时到达率 q , q 取最近 10 分钟内统计车辆数的平均值：

$$[0040] \quad q = \frac{\sum_{k=1}^{10} n_k}{600}$$

[0041] 其中, n_k 为每分钟的统计车辆数；

[0042] 232) 获取停止线上游 150m 处的车辆行驶到停车线所需时间 t_{150m} ：

$$[0043] \quad t_{150m} = 150/v$$

[0044] 其中, v 为交叉口的设计速度；

[0045] 233) 计算预测绿灯结束时刻的到达车辆数 n_t , n_t 的计算式为：

$$[0046] \quad n_t = \begin{cases} N_0 + \sum_{i=1}^m \delta_i & t < t_{150m} \\ N_0 + m + q(t - t_{150m}) & t > t_{150m} \end{cases}$$

$$[0047] \quad \delta_i = \begin{cases} 1 & \frac{s_i}{v} < t \\ 0 & \frac{s_i}{v} > t \end{cases}$$

[0048] 其中, s_i 为第 i 辆车到停止线的距离, δ_i 为中间变量, m 为从停止线到停止线上游 150m 处运行车辆的数量。

[0049] 所述的步骤 3) 具体包括以下步骤：

[0050] 31) 对交叉口信号控制全局策略的相位滚动切换时间 barrier 进行调整；

[0051] 32) 对在同一个 barrier 时间内的冲突的相邻相位进行调整。

[0052] 所述的步骤 31) 中具体包括以下步骤：

[0053] 311) 计算当前相位预测的饱和度 x , 按照双环相位结构, 根据实时饱和指数从大到小来确定相位顺序, 当前相位预测的饱和度 x 计算式为：

$$[0054] \quad x = \frac{n_r}{g_r \times s}$$

[0055] 其中, n_r 为当前时刻滞留车辆数和到绿灯结束时刻的到达车辆数之和, g_r 为当前时刻剩余的绿灯时间；

[0056] 312) 确定一个 barrier 时间内相邻的冲突相位间的调整量为: barrier 的调整步距为 $(-4, 0, 4)$, 各相位的调整步距为 $(-4, -2, 0, 2, 4)$ ；

[0057] 调整方法为: 如果在 1 个 barrier 时间内的一对相邻的冲突相位的饱和度均大于 1, 则 barrier 调整度为 +4, 如果 1 个 barrier 时间内的一对相邻的冲突相位的饱和度均小于 0.8, 则 barrier 调整 -4, 否则不调整 barrier。对于 1 个 barrier 时间内的另外一对冲突的相邻相位做相同处理, 如果两者对 barrier 的调整量不一致, 取较大值。

[0058] 所述的步骤 32) 中具体包括以下步骤：

[0059] 321) 计算当前时刻到一个周期结束时的延误时间 delay, 当当前时刻 t_0 为相位红灯时刻且当 t_k 小于 t_3 时, 延误时间 delay 的计算式为：

$$[0060] \quad delay = \sum_i (t_i^{depart} - t_i^{arrive}) = \sum_i t_i^{depart} - \sum_i t_i^{arrive}$$

$$[0061] \quad \sum_i t_i^{depart} = \sum_{t_2 < t_i < t_k} t_i^{depart} + \sum_{t_k < t_i < t_3} t_i^{depart} + \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{depart}$$

$$[0062] \quad \sum_{t_2 < t_i < t_k} t_i^{depart} = \frac{t_2 + t_k}{2} \times (t_k - t_2) \times s$$

$$[0063] \quad \sum_{t_k < t_i < t_3} t_i^{depart} = \frac{t_3 + t_k}{2} \times (t_3 - t_k) \times q$$

$$[0064] \quad \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{depart} = C \times (C - t_3) \times q$$

$$[0065] \quad \sum_i t_i^{arrive} = \sum_{t_0} t_i^{arrive} + \sum_{t_0 < t_i < t_1} t_i^{arrive} + \sum_{t_1 < t_i < C} t_i^{arrive}$$

$$[0066] \quad \sum_{t_0} t_i^{arrive} = t_0 \times N_0$$

$$[0067] \quad \sum_{t_0 < t_i < t_1} t_i^{arrive} = \sum_i \frac{s_i}{v}$$

$$[0068] \quad \sum_{t_1 < t_i < C} t_i^{arrive} = \frac{t_1 + C}{2} \times (C - t_1) \times q$$

$$[0069] \quad t_k = \frac{N_0 + m + s t_2 - q t_1}{s - q}$$

[0070] 其中, t_i^{depart} 为等待车辆离开时间之和, t_i^{arrive} 为车辆的到达时间之和, i 的取值范围为 1-3, t_1 为 150m 处车辆到达停止线的时刻, t_2 为绿灯开始时刻, t_3 为绿灯结束时刻, C 为周期结束时刻, t_k 为饱和流率与自由达到流率的分界点时刻;

[0071] 当 t_k 大于 t_3 时, t_i^{depart} 的计算式为:

$$[0072] \quad \sum_i t_i^{depart} = \sum_{t_2 < t_i < t_3} t_i^{depart} + \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{depart}$$

$$[0073] \quad \sum_{t_2 < t_i < t_3} t_i^{depart} = \frac{t_2 + t_3}{2} \times (t_3 - t_2) \times s$$

$$[0074] \quad \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{depart} = C \times [N_0 + m + (C - t_1) \times q - (t_3 - t_2) \times s]$$

[0075] 当当前时间 t_0 为相位绿灯时刻时, 根据定向逐步试探的方法获得 t_k 的时间点, 离开车辆按照饱和和流量计算, 从当前时刻开始, 当离开车辆数首次大于达到车辆数的时刻即为 t_k , 然后根据上述步骤计算延误时间 $delay$;

[0076] 322) 以延误时间最小作为目标函数, 对在同一个 barrier 时间内的冲突的相邻相位进行调整。

[0077] 与现有技术相比, 本发明具有以下优点:

[0078] 一、实时性高, 采用全息检测, 具有信息实时获取、决策实时判断、参数动态调整等特点。

[0079] 二、降低延误效果好, 通过车辆延误计算得到的最小延误策略来控制相位, 能够有

效降低交叉口延误。

[0080] 三、方法先进,本发明通过全局滚动优化辅以局部优化的策略自动进行交叉口信号的实时优化。

附图说明

[0081] 图 1 为全局滚动优化示意图。

[0082] 图 2 为局部滚动优化图。

[0083] 图 3 为红灯相位车辆累积到达离开曲线图。

[0084] 图 4 为绿灯相位车辆累积到达离开曲线。

[0085] 图 5 为周期 - 流量比图。

[0086] 图 6 为小步距调整示意图。

[0087] 图 7 为相位时长调整关系图。

[0088] 图 8 为相位时长调整与车辆累计关系图。

[0089] 图 9 为本发明的延误效果图。

[0090] 图 10 为本发明的实时优化流程图。

[0091] 图 11 为本发明的方法流程图。

具体实施方式

[0092] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细说明。

[0093] 实施例：

[0094] 本发明的目标是开发一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法,以优化现有交叉口自适应控制方法,降低交叉口延误,提高交叉口效率,减缓拥堵。

[0095] 本控制策略建立在 NEMA 双环相位结构基础上,根据双环结构的主次路相位通过 barrier 进行隔离这一特征,选择周期开始时刻、barrier 时刻和周期结束时刻作为关键时刻,如图 1 所示,在关键时刻进行全局滚动优化。双环结构中,barrier 一侧为主路方向的相位,另一侧为次路方向的相位,并且两侧的相位结构形式上是相同的,因此一个周期中任何一侧都可以作为周期开始后首先执行的一方。在全局滚动优化中,优化整个周期的信号配时方案,而只执行 barrier 左侧部分的方案,在 barrier 时刻开始新的滚动优化。优化后 barrier 时刻成为新的方案的周期开始时刻,原来右侧的相位作为新方案的开始相位,已经执行过的相位成为新方案中 barrier 右侧的相位,如图 2 所示,而在全局滚动优化的间隔期间,每 10s 进行一次局部滚动优化,局部滚动优化时间点如图 2 中 a、b、c 所示。实时滚动优化的对象及流程如图 10 所示。

[0096] 一种基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制方法,包括以下步骤：

[0097] 1) 通过全息测量系统获得交叉口的实时车辆信息；

[0098] 2) 根据获得交叉口的实时车辆信息,基于 NEMA 双环相位结构,按照设定的时间间隔对交叉口信号控制策略进行全局优化；

[0099] 3) 在所述设定时间间隔内,进行交叉口控制策略进行局部优化；

[0100] 4) 重复步骤 1) - 步骤 3),进行交叉口信号的实时控制。

[0101] 所述的步骤 2) 具体包括以下步骤：

[0102] 21) 计算交叉口实时总流量比 Y , Y 的计算式为:

$$[0103] \quad Y = \sum_{j=1}^h \max[y_j, y'_j, \dots]$$

[0104] 其中, Y 为组成周期的全部信号各相位中流量比 y_j 或预测流量比 y'_j 之和, j 为一个周期内的相位数, h 为 NEMA 双环相位结构包含的相位数;

[0105] 22) 确定交叉口信号控制策略的实时周期 C ,

[0106] 当实时流量比 Y 小于分界点 0.75 时, C 的计算式为:

$$[0107] \quad C = 120 + 60 \times \frac{Y - 0.75}{1 - 0.75}$$

[0108] 当实时流量比 Y 大于分界点 0.75 且小于 0.9 时, C 取值为 120;

[0109] 23) 计算实时饱和指数 x' 和各相位时长 g , 按照 x' 从大到小的顺序来确定交叉口信号控制全局策略的相位顺序, 计算式为:

$$[0110] \quad x' = \frac{N_0}{g \times s}$$

$$[0111] \quad g = (C - L) \times \frac{y}{Y}$$

[0112] 其中, L 为损失时间, 包括启动损失时间、黄灯时长和绿灯间隔时间, y 为相位流量比, N_0 为当前相位进口道前停止排队的车辆数, g 为各相位时长, s 为交叉口的饱和流率;

[0113] 24) 根据预测流量比 y' , 调整各相位时长 g , 预测流量比 y' 计算式为:

$$[0114] \quad y' = \frac{n_t}{s \times C}$$

[0115] 各相位时长 g 的计算式为:

$$[0116] \quad g = (C - L) \times \frac{y'}{Y}$$

[0117] 其中, n_t 为预测的绿灯结束时刻的到达车辆数;

[0118] 25) 判断实时周期 C 是否结束, 若为否, 则重复步骤 21) - 步骤 24), 若为是, 则结束本次全局优化。

[0119] 所述的步骤 23) 中预测的绿灯结束时刻的到达车辆数 n_t 的计算方法包括以下步骤:

[0120] 步骤 3) 具体包括以下步骤:

[0121] 步骤 23) 中预测的绿灯结束时刻的到达车辆数 n_t 的计算方法包括以下步骤:

[0122] 231) 计算当前相位车辆的实时到达率 q , q 取最近 10 分钟内统计车辆数的平均值:

$$[0123] \quad q = \frac{\sum_{k=1}^{10} n_k}{600}$$

[0124] 其中, n_k 为每分钟的统计车辆数;

[0125] 232) 获取停止线上游 150m 处的车辆行驶到停车线所需时间 t_{150m} :

$$[0126] \quad t_{150m} = 150/v$$

[0127] 其中, v 为交叉口的设计速度;

[0128] 233) 计算预测绿灯结束时刻的到达车辆数 n_t , n_t 的计算式为:

$$[0129] \quad n_t = \begin{cases} N_0 + \sum_{i=1}^m \delta_i & t < t_{150m} \\ N_0 + m + q(t - t_{150m}) & t > t_{150m} \end{cases}$$

$$[0130] \quad \delta_i = \begin{cases} 1 & \frac{s_i}{v} < t \\ 0 & \frac{s_i}{v} > t \end{cases}$$

[0131] 其中, s_i 为第 i 辆车到停止线的距离, δ_i 为中间变量, m 为从停止线到停止线上游 150m 处运行车辆的数量。

[0132] 31) 对交叉口信号控制全局策略的相位时间切换点时间 barrier 进行调整;

[0133] 32) 对在同一个 barrier 时间内的相邻相位进行调整。

[0134] 步骤 31) 中具体包括以下步骤:

[0135] 311) 计算当前相位预测的饱和度 x , 按照双环相位结构, 根据实时饱和指数从大到小来确定相位顺序, 当前相位预测的饱和度 x 计算式为:

$$[0136] \quad x = \frac{n_r}{g_r \times s}$$

[0137] 其中, n_r 为当前时刻滞留车辆数和到绿灯结束时刻的到达车辆数之和, g_r 为当前时刻剩余的绿灯时间;

[0138] 确定相位顺序时, 初步用 barrier 时间时刻的到达车辆数计算了各相位的绿灯时长, 然而这个计算并没有考虑到实时检测到的车辆对相位时长的影响。

[0139] 因此在相位顺序确定的情况下, 还需要对各相位的绿灯时长进行进一步计算。利用预测流量比, 重新进行各相位绿灯时间的分配。分配以后, 检查是否满足最大绿灯和最小绿灯时间的约束, 并做适当调整。即在调整 barrier 时间之前, 首先要检验备选策略是否满足最大绿灯时间和最小绿灯时间约束, 如果不满足则将该备选方案排除掉。如果某相位已经开始执行绿灯, 则最大绿灯和最小绿灯要做相应的校正, 将已经走掉的绿灯时间计算在最小和最大绿灯时间之内。

[0140] 312) 确定一个 barrier 时间内相邻的冲突相位间的调整量为: barrier 的调整步距为 $(-4, 0, 4)$, 如图 6 所示, 各相位的调整步距为 $(-4, -2, 0, 2, 4)$;

[0141] 调整方法为: 如果在 1 个 barrier 时间内的一对相邻的冲突相位的饱和度均大于 1, 则 barrier 调整度为 +4, 如果 1 个 barrier 时间内的一对相邻的冲突相位的饱和度均小于 0.8, 则 barrier 调整 -4, 否则不调整 barrier。对于 1 个 barrier 时间内的另外一对冲突的相邻相位做相同处理, 如果两者对 barrier 的调整量不一致, 取较大值。步骤 32) 中具体包括以下步骤:

[0142] 321) 延误是评价一个控制策略好坏的重要参数, 在大多数自适应控制策略中, 控制目的就是实现延误的最小化。在定时控制中, 有多种延误计算模型, 比如延误三角形法, 累积到达离开曲线法, HCM 延误模型等。然而, 在实时控制策略中, 要计算一个实时的方案产生的车辆延误并不容易。一个周期中涉及到的车辆可能是上一周期到达本周期离开, 也

有可能是本周期到达下周期离开,因此原有的累积到达离开曲线模型无法直接来描述延误大小,下面对累积到达离开曲线法进行一定程度上的修改,假设 0 时刻为周期开始时刻, t_0 为当前时刻,某红灯相位的车辆累积到达离开曲线如图 3 所示。

[0143] 计算当前时刻到一个周期结束时的延误时间 delay ,当当前时刻 t_0 为相位红灯时刻且当 t_k 小于 t_3 时,延误时间 delay 的计算式为:

$$[0144] \quad \text{delay} = \sum_i (t_i^{\text{depart}} - t_i^{\text{arrive}}) = \sum_i t_i^{\text{depart}} - \sum_i t_i^{\text{arrive}}$$

$$[0145] \quad \sum_i t_i^{\text{depart}} = \sum_{t_2 < t_i < t_k} t_i^{\text{depart}} + \sum_{t_k < t_i < t_3} t_i^{\text{depart}} + \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{\text{depart}}$$

$$[0146] \quad \sum_{t_2 < t_i < t_k} t_i^{\text{depart}} = \frac{t_2 + t_k}{2} \times (t_k - t_2) \times s$$

$$[0147] \quad \sum_{t_k < t_i < t_3} t_i^{\text{depart}} = \frac{t_3 + t_k}{2} \times (t_3 - t_k) \times q$$

$$[0148] \quad \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{\text{depart}} = C \times (C - t_3) \times q$$

$$[0149] \quad \sum_i t_i^{\text{arrive}} = \sum_{t_0} t_i^{\text{arrive}} + \sum_{t_0 < t_i < t_1} t_i^{\text{arrive}} + \sum_{t_1 < t_i < C} t_i^{\text{arrive}}$$

$$[0150] \quad \sum_{t_0} t_i^{\text{arrive}} = t_0 \times N_0$$

$$[0151] \quad \sum_{t_0 < t_i < t_1} t_i^{\text{arrive}} = \sum_i \frac{s_i}{v}$$

$$[0152] \quad \sum_{t_1 < t_i < C} t_i^{\text{arrive}} = \frac{t_1 + C}{2} \times (C - t_1) \times q$$

$$[0153] \quad t_k = \frac{N_0 + m + s t_2 - q t_1}{s - q}$$

[0154] 其中, t_i^{depart} 为等待车辆离开时间之和, t_i^{arrive} 为车辆的到达时间之和, i 的取值范围为 1-3, t_1 为 150m 处车辆到达停止线的时刻, t_2 为绿灯开始时刻, t_3 为绿灯结束时刻, C 为周期结束时刻, t_k 为饱和流率与自由达到流率的分界点时刻;

[0155] 当 t_k 大于 t_3 时, t_i^{depart} 的计算式为:

$$[0156] \quad \sum_i t_i^{\text{depart}} = \sum_{t_2 < t_i < t_3} t_i^{\text{depart}} + \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{\text{depart}}$$

$$[0157] \quad \sum_{t_2 < t_i < t_3} t_i^{\text{depart}} = \frac{t_2 + t_3}{2} \times (t_3 - t_2) \times s$$

$$[0158] \quad \sum_{t_3 < t_i < C} t_i^{\text{depart}} = C \times [N_0 + m + (C - t_1) \times q - (t_3 - t_2) \times s]$$

[0159] 当当前时间 t_0 为相位绿灯时刻时,根据定向逐步试探的方法获得 t_k 的时间点,离开车辆按照饱和和流量计算,从当前时刻开始,当离开车辆数首次大于达到车辆数的时刻即为 t_k ,然后根据上述步骤计算延误时间 delay ;

[0160] 如果当前相位是绿灯相位,则车辆累计到达离开曲线如图 4 所示。此时计算延误

时同样要分情况讨论。如果当前时刻没有停止排队的车辆数,则不存在图中黄色区域部分,计算延误时只需考虑绿灯结束后到达车辆产生的延误,即图中红色区域。如果此时存在没有消散掉的排队,则需要计算消散结束时刻 t_k ,与前面计算不同的是, t_k 点有可能小于 t_1 时刻,由于 t_0 到 t_1 时刻之间累积曲线由检测车辆位置决定,无法用函数式表达,因而 t_k 难以用解析公式计算。这里采用定向逐步试探的方法寻找 t_k 时间点,离开车辆按照饱和流量计算,从当前时刻开始,一旦出现离开车辆数大于达到车辆数,则说明此时为排队消散结束时刻。

[0161] 322) 以延误最小的策略作为最终局部滚动优化调整策略。

[0162] 该基于实时车辆轨迹的交叉口自适应信号控制模型的建立方法包括如下步骤:

[0163] 1) 建立仿真模型

[0164] 为了验证本文算法的控制效果,选择上海郊区的曹安公路嘉松北路交叉口作为研究对象,交叉口示意图如图 7 所示。采用德国 PTV 公司的 VISSIM5.4 微观仿真软件建立仿真模型,对控制算法进行仿真分析,如图 8 所示。

[0165] 为使仿真更具一般性,能够代表普通城市交叉口,将仿真模型中交叉口限速设置为 50km/h,车辆期望速度正态分布在 48km/h ~ 58km/h 的区间内,车辆组成以小汽车为主,大巴比例设为 5%,并非实际路口调查的速度分布和车辆组成。

[0166] 为了检验算法在不同流量下的控制效果,本次仿真试验测试在 4 个不同流量条件下的仿真结果,分别为低流量,中流量,高流量和多时段情况。其中前 3 个场景对应的各进口道流量及交叉口饱和度情况如表 1 所示,仿真时间为 3600s。场景 4 是模拟早高峰流量从低到高再到低的变化过程,共分为 8 个时段,时长 9400s,对应的时段及饱和度情况如表 2 所示。仿真时,对每种流量情况分别采用 42、52 和 62 三个随机种子进行仿真,以三次仿真的平均延误来评价算法的控制效果。

[0167] 根据实验交叉口的几何尺寸,考虑行人安全过街所需时间,将南北向直行相位的最小绿灯时间设置为 25s,最大绿灯时间 60s,东西向直行相位最小绿灯时间设置为 20s,最大绿灯时间 60s,各左转相位最小绿灯时间为 10s,最大绿灯时间 40s。

[0168] 表 1 场景 1-3 流量及饱和度 (veh/h)

[0169]

进口道	场景 1	场景 2	场景 3	表 2 场景 4
东进口	1400	1800	2000	
西进口	1400	1800	2000	
南进口	850	1000	1200	
北进口	850	1000	1200	
交叉口饱和度	0.65	0.80	0.95	

[0170] 中各时段饱和度情况

[0171]

时段	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6	时段 7	时段 8
时长	1000	1000	1800	1600	1000	1000	1000	1000
饱和度	0.50	0.65	0.80	0.88	0.95	0.88	0.80	0.65

[0172] 另外,选择 Extend NEMA 两种感应控制策略作为对比方案。

[0173] 2) 在线工具开发

[0174] 为了实现本文中的控制算法,通过 C# 编程语言编制算法程序。程序主要包含 3 个部分:轨迹提取、控制策略和评价输出。各部分的具体功能如下:

[0175] (1) 轨迹提取。通过 VISSIM 的 COM 接口获取路网中每个车辆的信息,判断车辆是否在检测范围内。如果车辆在检测内,则记录该车的速度以及位置信息,并对车辆进行分流向统计。根据车辆速度判断车辆是排队状态还是行驶状态,从而计算某一流向的排队车辆数。

[0176] (2) 控制策略。根据前文中的控制逻辑编制算法,生成实时信号控制方案,并将控制方案转化成各个信号灯头 (SignalHead) 对应的状态信息 (红、黄、绿),通过 COM 接口返回给 VISSIM 中的信号控制机。

[0177] (3) 评价输出。记录仿真中的周期时长、周期数、各相位绿灯时长、相位顺序等信息,生成日志文件。

[0178] 3) 仿真结果

[0179] (1) 周期时长

[0180] 分别对 4 种流量场景进行仿真,统计在各种场景下 Extend NEMA、本发明的控制策略的产生的周期。2 种控制策略的平均周期时长如表 3 所示。

[0181] 表 3 控制策略平均周期时长对比 (单位:s)

[0182]

饱和度	0.65	0.80	0.95	多时段
Extend NEMA	99	113	130	114
本发明	98	104	130	113
差异	-1.0%	-8.0%	0%	-0.9%

[0183] (2) 延误

[0184] 图 9 为 Extend NEMA、本发明的控制策略在不同场景下仿真得出的交叉口延误情况。

[0185] 4) 仿真结果分析

[0186] 从周期时变图和平均周期对比可以看出以下情况:

[0187] 1) 2 种控制策略的周期时长均随着流量的增大而增大。

[0188] 2) 2 种控制策略中,本发明的控制策略周期波动小于 Extend NEMA 策略。

[0189] 3) 在各种场景下,本发明的控制策略的周期时长低于 Extend NEMA 策略。

[0190] 出现以上 3 种情况的原因分析如下:

[0191] 1) 情况 1 说明 2 种控制策略均能对流量的变化做出反应,流量的增加促使各相位时长和周期的增加,从而提高交叉口的通行能力。

[0192] 2) 情况 2 说明本发明的控制策略能够从总体上把握周期时长,这是因为其制定方案步骤是按照周期、相位顺序和绿信比的顺序来进行的。计算周期时利用最近十分钟的达到率进行计算,并根据实时数据调增,上一周期的达到流量会影响到本周期是时长。

[0193] 3) 出现情况 3 是因为本发明的控制策略实时更新检测数据,充分利用了实时检测

的信息,因而方案更为精确,效果更好。

[0194] 表 4 为本发明的控制策略和 Extend NEMA 的延误数据对比。从图 9 和表 4 可以看出基于模型的自适应控制在中低流量下效果不明显,在高流量情况下能够减少 15%以上的延误。

[0195] 表 4 本发明的控制策略与 Extend NEMA 策略延误对比

[0196]

饱和度	0.65	0.80	0.95	多时段
Extend NEMA	33	40	63	45
本发明	33	40	53	41
差异	0%	0%	-15.9%	-8.9%

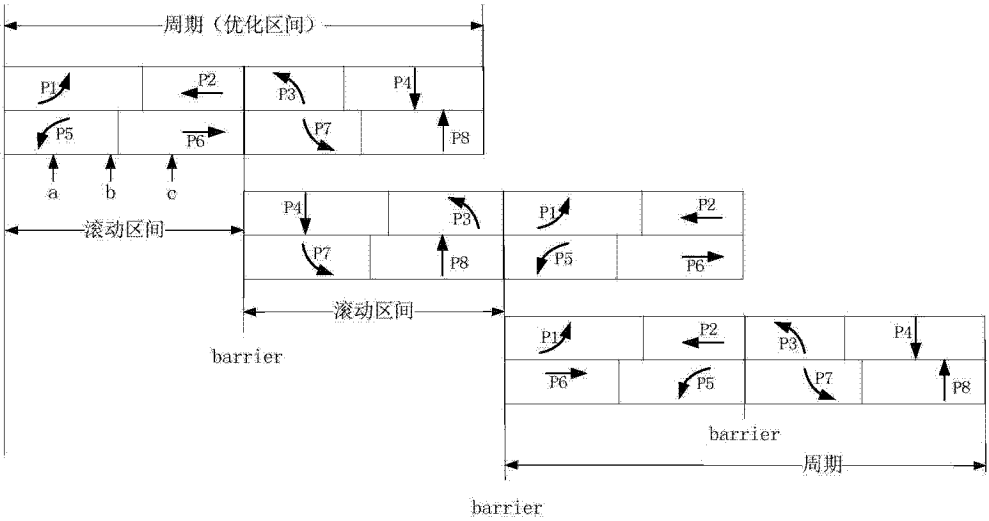


图 1

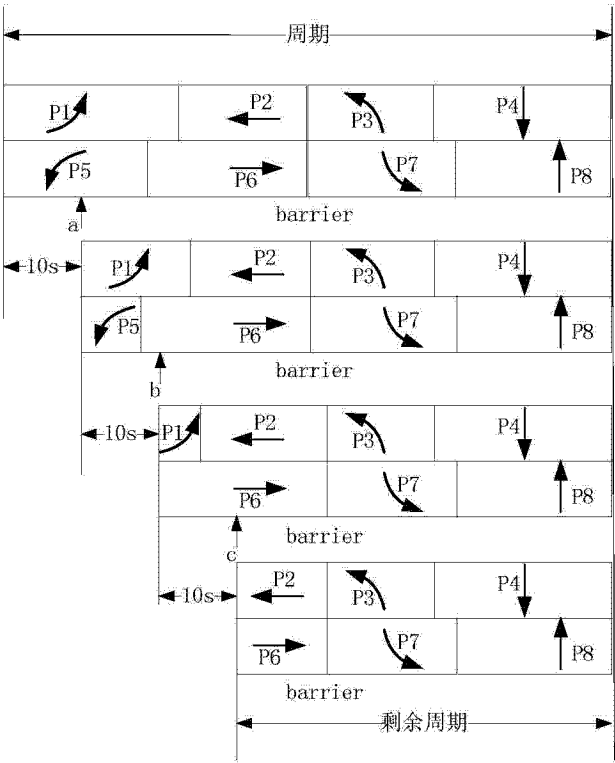


图 2

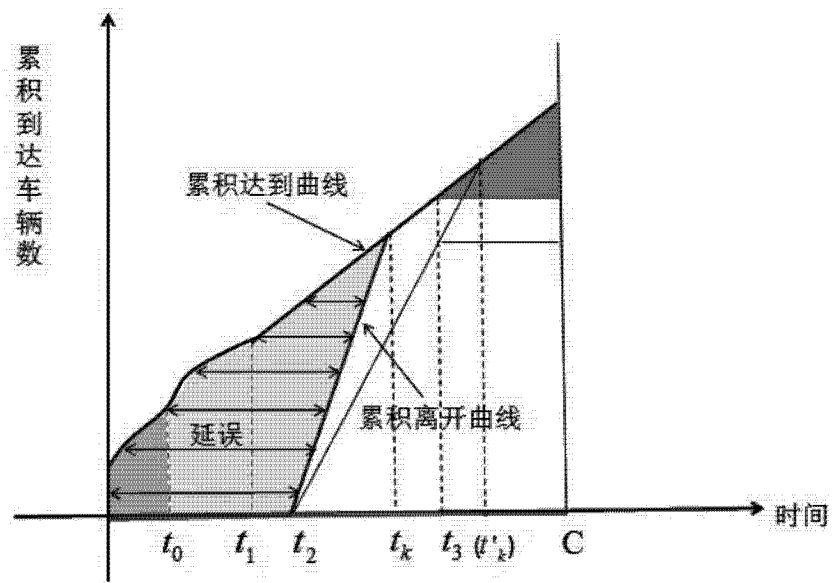


图 3

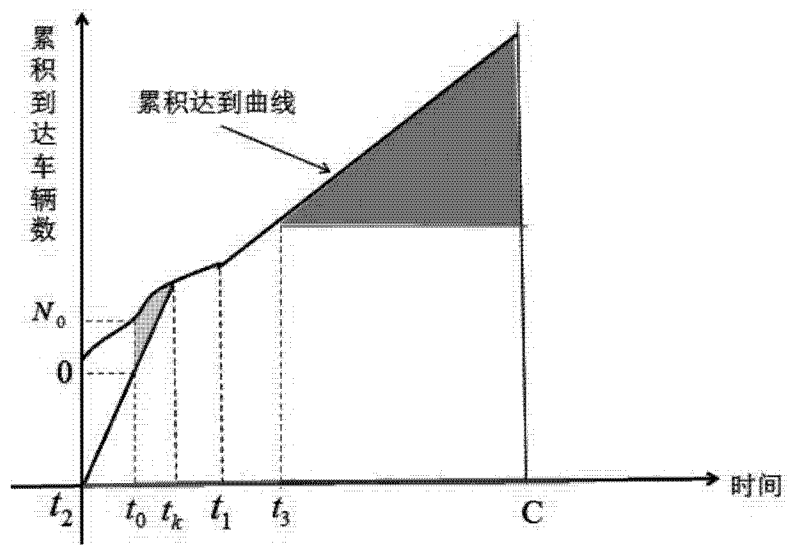


图 4

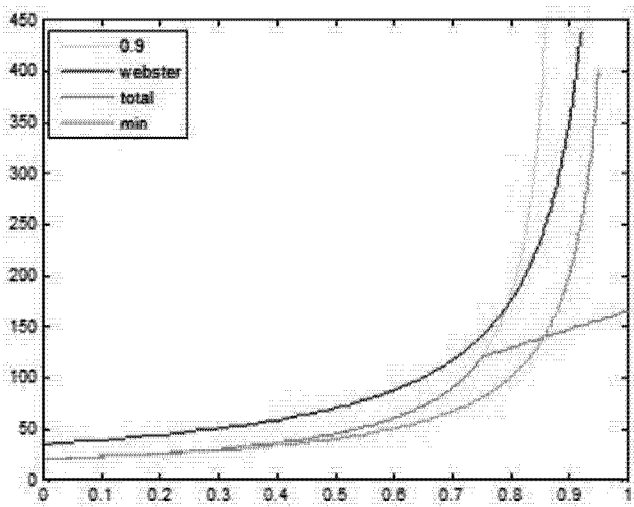


图 5

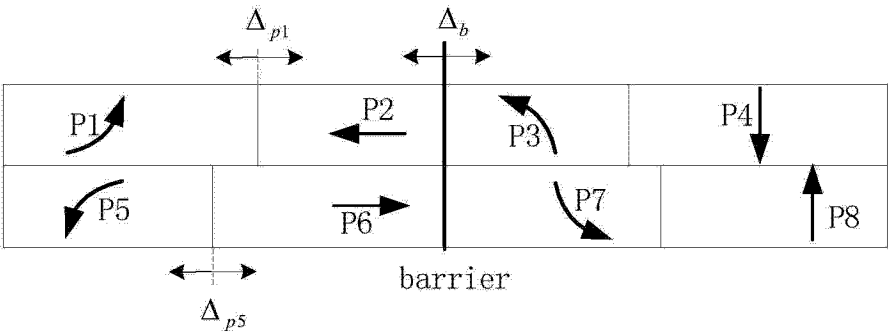


图 6

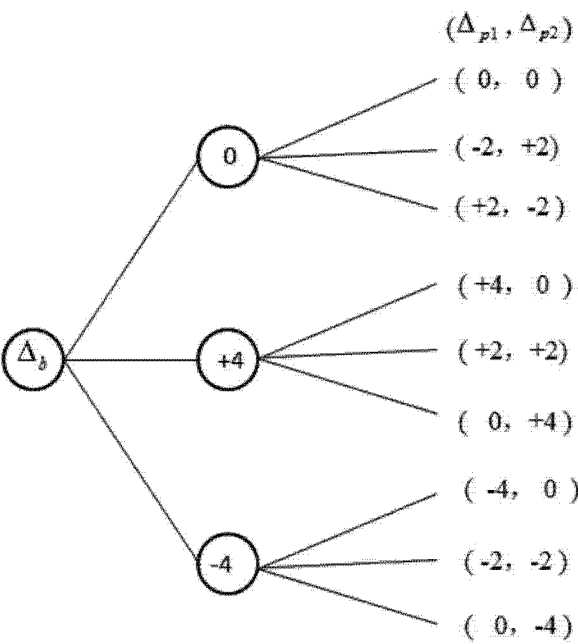


图 7

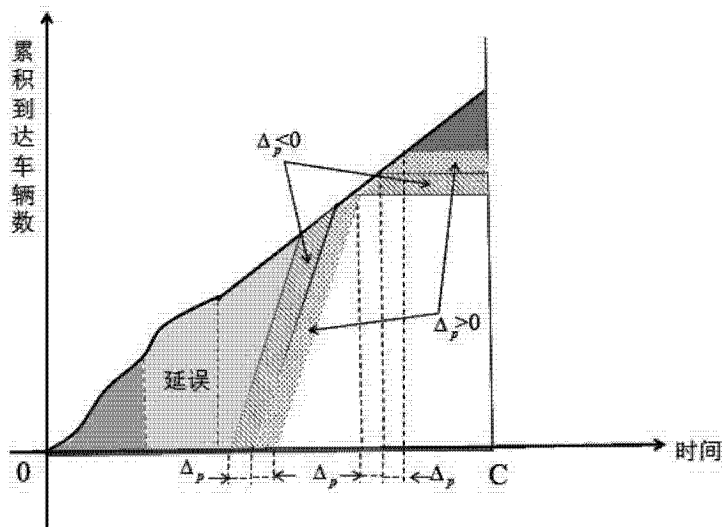


图 8

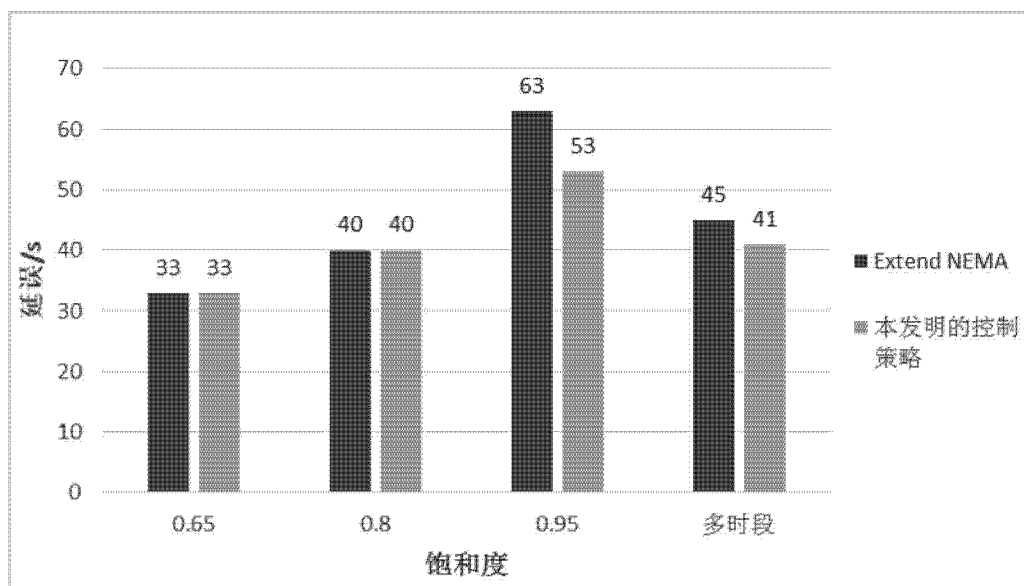


图 9

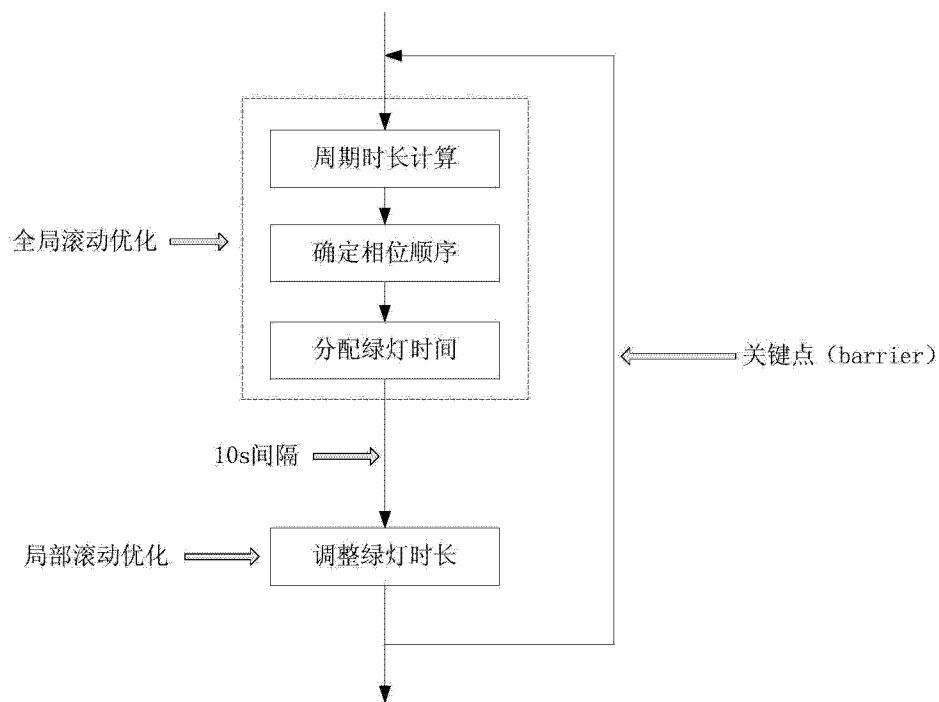


图 10

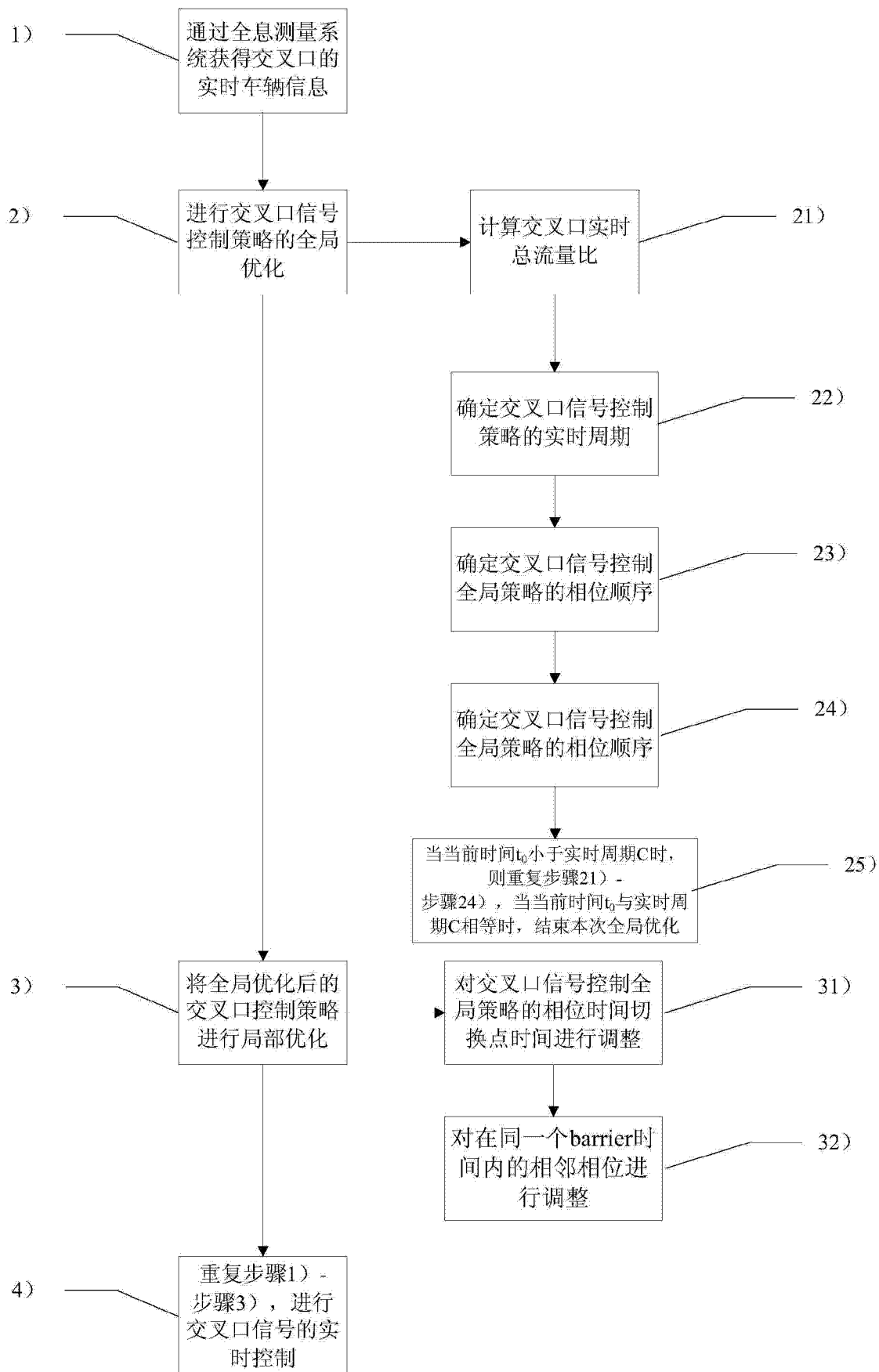


图 11