

考虑瞬时停车延误的信号灯闭环控制策略研究

冉启武, 杨建国, 王兆安, 王忠民
(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出一种基于瞬时停车延误的孤立交叉口信号灯闭环控制策略. 以交叉口瞬时停车延误总量作为控制参量, 其值达到阈值时实时切换交叉口信号灯状态, 把信号灯绿灯信号分配给需求最高的道路, 不再有信号灯周期的概念. 在车流量 400~800 辆/h 变化的情况下, 进行了传统的 Webster 周期控制和新策略控制仿真对比实验. 仿真结果表明: 新策略控制条件下, 车辆平均通行时间明显小于传统控制策略, 在 800 辆/h 的流量下, 仅为传统策略的 44%; 该策略对控制阈值不敏感, 当流量为 800 辆/h 时, 车辆平均通行时间最大相对误差仅为 11%; 该策略获得的多组平均通行时间具有较小的方差, 当流量为 800 辆/h 时方差仅为 0.895 s.

关键词: 瞬时停车延误; 孤立交叉口; 信号灯; 闭环控制

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)02-0011-06

Closed-Loop Signal Control Strategy Considering Instantaneous Stopped Delay

RAN Qiwu, YANG Jianguo, WANG Zhao'an, WANG Zhongmin
(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For instantaneous stopped delay, a closed-loop signal control strategy is proposed. The total instantaneous stopped delay at an intersection is taken as the control parameter to realize real-time switch of the traffic light status when the amount reaches the threshold, and green light signal is adaptively distributed to the most designed lane instead of the regular traffic signal cycle. When the traffic flow in a lane changes from 400/h to 800/h, a comparatively simulation is conducted following the proposed strategy against the Webster control strategy. Under the direction of the proposed strategy, there is an obvious cut-down of the average passing time for all cars in the lane, and for a traffic flow of 800/h, the average passing time is spent for only 44% of that under the traditional strategy. The proposed control strategy is insensitive to the control threshold, and the obtained maximum relative error of the average passing time reaches only 11%. The minor variance among multiple data of average passing time gets to 0.895 s for a traffic flow of 800/h in a lane at the intersection.

Keywords: instantaneous stopped delay; isolated intersection; traffic signal; closed-loop control

合理地设置交叉口信号灯, 可以有效地提高交叉口的通行能力, 减少城市道路拥堵. 微观上, 交通系统是随机系统; 宏观上, 流量却保持统计学规律. 传统的信号灯控制方法就是利用了宏观统计学规

律, 假设在某个时间段内某车道的流量保持在一个区间内, 利用 Webster 优化策略, 计算获取交叉口信号灯最佳周期和绿信比^[1-3], 并据此实施信号灯周期和绿信比, 以达到此情况下的最优通行效率. 这种

实施了几十年的控制策略总体上是有效的,但是实际交通系统不是一成不变的,以下情况会导致现行的控制策略长期或者短瞬失效.

(1)宏观流量的缓慢变化.随着城市发展,宏观起迄点规律变化,车辆保有量增加,交叉口各方向流量发生缓慢的变化,这就要求交通管理部门频繁实施采样调查,以给出最新的配时方案,目前的交通灯管理难以适应这种变化.

(2)宏观流量的突变.城市道路建设和维护、交通管制、交通事故、局部拥堵等意外事件,都会引起流量的突然变化.

(3)微观流量的变化.交叉口车辆到达规律一般为移位负指数分布,但是受各种因素影响,在短暂的时间区间内,会发生车流量的突然减少或者增加.

在这些情况下,现行信号灯配时策略就表现出僵化的特点:①对宏观车流量的变化来不及做出反应,常常以A流量下的最优策略,实施着对B流量的配时控制;②对微观车辆到达规律完全没有反应,导致绿灯方向无通行车辆、红灯方向车辆排队很长的现象.

为了使交叉口信号灯能够实施基于实时状态的控制,在最合适的时刻,给出合理的切换方案.文献[4]完成了基于视频的车辆瞬时停车延误检测,获得了本文所述控制方法需要的关键控制参量瞬时停车延误.本文依此提出了基于瞬时停车延误的交叉口信号灯闭环控制策略,并利用仿真软件,在多种交通流量状态下,对本文提出的控制策略和传统控制策略进行了比对仿真实验.

1 基于瞬时停车延误(ISD)的闭环控制

1.1 参量定义及测量方法

ISD是某个瞬时、某个停止车辆当前停止状态已经持续的时间^[4].对运动车辆而言,ISD为0. ISD总量是指一个区域中所有车辆ISD的和,根据应用不同,可以分为单向ISD总量(东为 ISD_E 、南为 ISD_S 、西为 ISD_W 、北为 ISD_N),双向ISD总量(东西为 ISD_{WE} ,南北为 ISD_{NS}),交叉口ISD总量(4个入口为 ISD_{ALL})等3种不同的定义. ISD描述的是车辆已经发生的停车等待时间,其值客观反映了该车对放行的渴求程度. ISD总量描述当前时刻指定车辆群ISD的和,客观反映当前车辆群对放行的渴求程度.

文献[5]实现了在连续视频流中逐帧地在两帧时间间隔内,测量在一条道路摄像头拍摄范围中所

有车辆的ISD总量. ISD总量的测量过程如下.

(1)求出相同纵轴坐标道路与背景上对应像素点的颜色距离,当相邻连续4个以上像素点颜色距离都超过设定阈值时,认定这几个连续像素点所在道路位置存在一辆车,并且以颜色距离最大的像素点位置为车辆位置.

(2)确定连续的101帧图像上检测区域内的所有车辆,标记车辆位置.把第1帧上确定的车辆位置与其后面100帧图像上的每一帧车辆位置进行比对,如果其中第20、40、60、80、100帧图像的位置变化都小于4个像素,就认定车辆处于静止状态,反之认定车辆运动,ISD瞬变为0.

(3)每个车辆绑定一个ISD计数器,如果判定此车辆处于静止状态,计数器加1,对检测区的所有车辆都这样处理,完成后把所有的计数器值求和再乘以0.04 s,就得到这一帧图像的ISD总量.

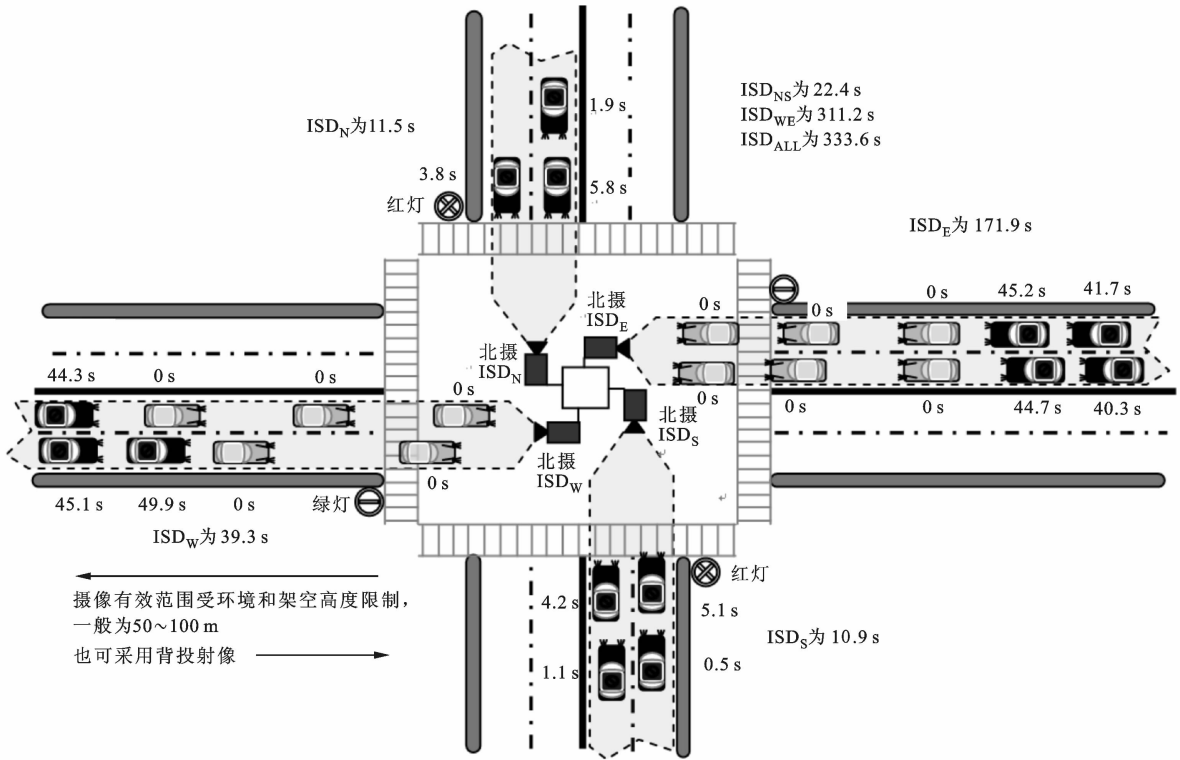
在实际控制中,摄像头的安装确实有很大的难度,但这不是技术上的难度.摄像头的安装可以用两种方案:其一可以在交叉口停车线道边架设立柱、横杆安装我们需求高度的摄像头;其二利用路口现有的摄像头,调整视角,然后间隔到摄像头取景范围后连续安装多个摄像头,都可以实现ISD检测.我们已经实现有一定高度时摄像头检测ISD,受限于拍摄条件,我们仅仅对一条道路逆着车辆行驶方向拍摄,完成了道路ISD总量的检测^[6].后期使用多个安装在停车线高空的摄像设备,利用本方法就可以完成对道路所有入口车道的ISD总量检测.

1.2 基于ISD总量的闭环控制架构及控制策略

如图1所示,通过4个架空摄像头和图像采集设备,可以在连续视频流中实时检测东、南、西、北4个方向入口车道车辆的ISD总量,南向ISD总量和北向ISD总量合并即为南北ISD总量,同理得到东西ISD总量以及交叉口ISD总量.

目前在恶劣天气、夜晚等极端光照条件下,摄像设备不能实现ISD检测,在实际应用时实施基于ISD的闭环自适应控制策略与传统定时控制策略并行控制的方法,避免出现受天气影响而出现的信号灯失控.

本文在实际交叉口模型的基础上构建了仿真平台,并在仿真平台上实施控制策略.开始仿真后,计算机每个仿真步长(0.1s)计算一次南北ISD总量和东西ISD总量以及交叉口的ISD总量,实现基于ISD闭环控制的流程如图2所示.以ISD总量积累来衡量入口车道排队车辆对通行的渴求程度,当达



深色为停止车辆；浅色为运动车辆；车辆附近数字为单车 ISD
图 1 基于 ISD 闭环控制的交叉口信号灯示意图

到阈值 A 时,信号灯状态切换并保持最少 10 s (防止绿灯信号道路车辆不能及时驶离交汇区,而导致 ISD 下降速度与 ISD 积累速度接近,造成控制紊乱),被放行车辆起动后的 ISD 总量开始迅速下降(对道路的渴求程度降低).经过一段时间后,ISD 总量又会上升,控制器将等待下一次 ISD 积累到达阈值 A ,重复切换.信号灯状态切换与 ISD 总量检测对孤立交叉口形成了一个闭环系统,调节的结果必然形成一个对交叉口所有车辆延误的动态平衡,最终使通过车辆的延误维持在一个固定值,从而提高车辆平均通行时间.

考虑道路在某一方向车辆少(如只有一辆车)时,其 ISD 积累很慢,不能及时达到阈值 A ,此时软件进一步衡量两个方向的 ISD 总量上升斜率的差值,当其差值到达阈值 B 时,切换一次信号灯.

2 实验与分析

2.1 实验环境及评价指标

2.1.1 实验环境 XJTUSIM 是课题组利用 VisualC++ 开发的一款城市交通微观仿真系统,用于对城市路网中单个交叉口的交通运行状况进行仿真研

究^[7].用户通过软件输入接口设定仿真交叉口的类型,道路尺寸,仿真参与者类型(车辆、自行车和行人)及其发出位置、流量,信号灯控制模式及其周期、绿信比配时等参数.仿真平台中车辆以 Agent 智能的建模思想进行车辆模型的设计.按照传统的 Pipes 跟驰模型赋予机动车跟驰前车,以及红灯停、绿灯行和在交叉口内的简单避让行为能力.通过仿真软件的输出接口,可以获得每车道有效运行车辆(从发车器发出到驶出交叉口的车辆)总数、车辆通行总时间及车辆平均通行时间、信号灯每个周期交叉口通过的有效车辆数、非固定周期控制条件下信号灯的每种状态时长等关键数据.

通过仿真软件中设置的虚拟传感器,监测每一辆车的运行状态,如果车辆在检测区域停止,车辆上绑定的 ISD 计数器开始计数获得每辆车一个仿真步长(0.1 s)的 ISD 数值,所有的计数器把数值传给各个 ISD 总量计数器,就得到南北 ISD 总量和东西 ISD 总量以及交叉口的 ISD 总量.然后仿真平台把所有 ISD 总量数值传给信号灯控制模块,信号灯控制模块进入基于 ISD 的闭环自适应控制的流程,如果 ISD 总量达到条件,信号灯进入切换程序.

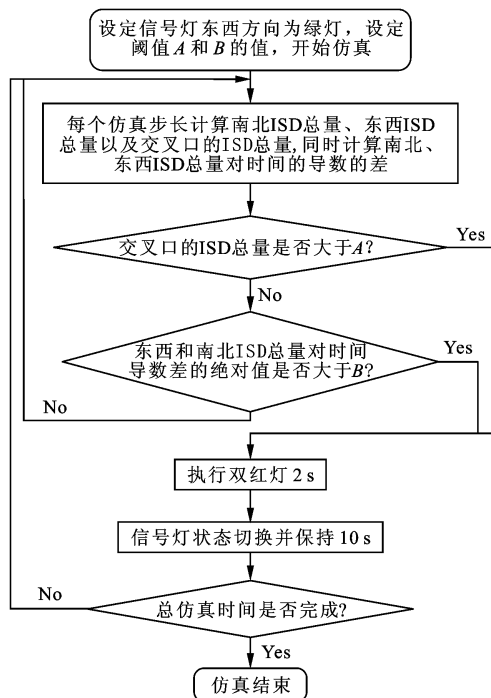


图2 信号灯基于 ISD 的闭环控制流程图

本文选取西安市咸宁路-兴庆路十字交叉口为仿真原型,测量后获取道路参数为:东、南、西、北4个方向均为双向4车道,总宽度为16 m,交汇区东西方向、南北方向宽度均为50 m;交叉口一共有8个入口车道,入口车道长200 m,每个车道都有一个独立的发车器,可以通过调整发车器参数,独立设置每个车道车辆的速度分布、加速度分布、车头时距分布以及左转和右转车辆比率;交叉口信号灯为两相位信号灯。

2.1.2 控制效果的评价指标 为了说明交叉口信号灯控制策略的效果,以车辆平均通行时间为评价指标。车辆由进入仿真区域开始计时,直到车辆驶出交叉口(即车辆消失)止,为一辆有效完成通行的车辆,其运行时间就是该车的通行时间。车辆平均通行时间是仿真时间内所有有效完成通行的车辆的平均运行时间。

2.2 实验方法

使用同样的仿真外部条件(相同的流量和发车模型),分别采用两种控制方案实施仿真平台中信号灯的切换,统计交叉口车辆平均通行时间,通过与 Webster 控制策略比对,验证基于 ISD 的闭环控制策略的控制效果。在 Webster 控制策略实验中,无需修改仿真软件,而在 ISD 控制策略中,需要在软件中取消信号灯周期,采用基于 ISD 的闭环控制策

略来实施控制。

两种控制策略实施的方法分别如下。

(1) Webster 控制策略实施方法。Webster 控制策略是以车辆延误时间最小为目标来计算信号灯配时的方法^[3],其最佳周期计算公式如下

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

式中: C_0 是最佳周期; T 为总损失时间; Y 为交叉口流量比,文献^[3]中详述其值。为保证延误最小,通常在实际运用时周期在 $0.75C_0 \sim 1.5C_0$ 范围调节。

交叉口实测流量分为高峰时段(12:00~13:30,18:00~20:00)和非高峰时段(9:00~11:00,15:00~17:30),折合成小车当量,高峰时段为每车道 736~776 辆/h,非高峰时期为 415~458 辆/h,再考虑实际交叉口道路宽度与几何特征,计算得到每车道饱和流量在 680~720 辆/h,因此仿真模型中发车器车辆流量由 400~800 辆/h、步长为 100 辆/h 调节。根据实际交叉口车道宽度、数量和交叉口入口车道流量比,由式(1)计算出确定流量所对应的最佳周期,由于各车道流量一致,绿信比为 0.5。然后,根据计算周期和绿信比设置仿真平台上信号灯相应参数,在每个流量的每个周期内仿真 10 次,获得 10 个样点。

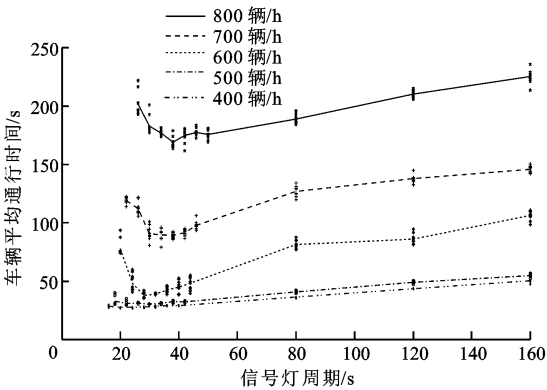
(2) 基于 ISD 的闭环控制策略实施方法。仿真时发车器车辆流量仍然由 400~800 辆/h、步长为 100 辆/h 调节。按照 1.2 节中所述的基于 ISD 的闭环控制策略实施步骤,仿真时每个仿真步长(0.1 s)计算一次南北 ISD 总量、东西 ISD 总量以及交叉口 ISD 总量。对每种车流量仿真时,交叉口 ISD 总量阈值选取为 100、150、200、250、300、350 s,如果其数值达到信号灯切换条件,信号灯先转换为双向红灯并维持 2 s 时间,然后信号灯实施切换改变两个方向的信号灯状态。对每个流量、每种阈值条件仿真 10 次,获得 10 个样点。

2.3 实验结果

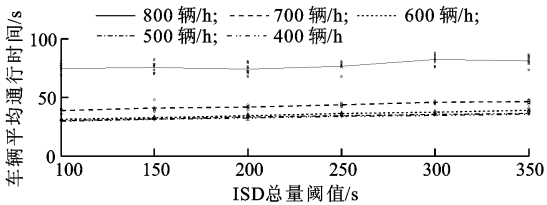
Webster 控制策略实验仿真 5 种流量变化,每个流量下选择最优周期及其附近共 10 种周期,每次仿真时间设定为 1 800 s(机器实际耗时大约 1.2 h),获得一个平均通行时间,以此作为一个样点。实验时 10 台 PC 机同时工作,获得 500 个样点,如图 3a 所示。

ISD 控制策略实验仿真同样的 5 种流量变化,每个流量下都选择 100、150、200、250、300、350 s,共计 6 种控制阈值作为 A 阈值(B 阈值恒定),每个阈

值下重复 10 次实验,每次仿真时间也设定为 1 800 s(机器实际耗时大约 1 h),获得一个平均通行时间,形成 300 个样点,如图 3b 所示.



(a)Webster 控制



(b)基于 ISD 的闭环控制

图 3 Webster 控制与基于 ISD 的闭环控制条件下
车辆平均通行时间对比

为了更加明确数据关系,对原始数据进行了统计计算.

表 1 不同流量条件下两种控制策略的统计计算结果

每车道车 流量/辆·h ⁻¹	车辆平均通行时间/s			最大相对误差/%		最优组 10 次样点方差/s	
	Webster 控制	ISD 控制	两策略通行 时间的比值	Webster 控制	ISD 控制	Webster 控制	ISD 控制
400	27.28	29.80	1.09	82.9	19.9	0.266	0.283
500	30.98	30.44	0.98	78.9	19.5	2.136	0.684
600	37.49	31.12	0.83	182.9	25.4	2.438	0.327
700	88.95	39.78	0.45	63.8	18.8	2.273	0.856
800	169.23	74.58	0.44	33.1	11.0	4.830	0.895

3 结束语

本文提出一种交叉口信号灯的基于 ISD 的闭环控制策略.本控制方略与 Webster 控制策略仿真结果比对表明,利用本控制策略能够大幅度缩短车辆通过交叉口的平均通行时间,降低控制策略对控制参量的敏感程度.但是,新控制策略还存在一些

(1)每种流量下两种控制策略得到的最小通行时间相除得到一个比值,以描述两种控制策略之间的最小值比.此值越小,说明 ISD(基于 ISD 的闭环控制策略)控制越优.

(2)以每种流量下不同控制参量形成的通行时间最大值与最小值之间的最大相对误差,描述两种控制策略受控制参量影响的敏感程度.

(3)以每种流量下最优控制时 10 次实验样点的方差描述控制效果.由于每次实验的发车模型具有随机性,导致实际发出的车辆规律次次不同(但仍遵循固定的车头时距分布),10 次样点方差越小,说明控制效果对车辆的随机到达越不敏感.

由图 3 和表 1 中两种控制策略数据结果,可以得到如下结论:

(1)在 400 辆/h 流量下,缩小率略大于 1,其余情况下,缩小率均小于 1.在 700 辆/h 流量时,缩小率已达 0.45,说明此时新控制策略带来的通行时间是传统策略的 0.45 倍.

(2)基于 ISD 的闭环控制策略的最大相对误差明显减小.这表现在传统控制策略通行时间随控制参量变化的曲线(见图 3a)具有明显的谷值,而图 3b 近似为一组横线.这说明新策略对控制参量的敏感度下降,将给实用中选择控制参量带来好处.

(3)基于 ISD 的闭环控制策略最优组 10 次样点方差明显减小,说明新策略对车辆到达的随机性不敏感.

问题:

(1)摄像机架空位置以及可摄区间问题、摄像头除尘问题;

(2)在实际应用时,受行人和非机动车以及交通事故影响,绿灯放行车辆不能及时驶离交叉口时,ISD 积累上升速度始终大于下降速度,有可能发生控制崩溃,控制算法稳定性需要后期进一步研究.

参考文献:

- [1] 李世武,王云鹏,付建萍,等. 基于车辆排放的城市道路交叉口信号灯配时优化仿真[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(6): 1268-1272.
- LI Shiwu, WANG Yunpeng, FU Jianping, et al. Signal timing optimization on the urban road intersection based on vehicle emissions[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(6): 1268-1272.
- [2] SCHMÖCKER J D, AHUJA S, BELL M G H. Multi-objective signal control of urban junctions: framework and a London case study[J]. Transportation Research: Part C, 2008, 16: 454-470.
- [3] 吴兵,李晔. 交通管理与控制[M]. 4版. 北京:人民交通出版社, 2009: 150-174.
- [4] 冉启武,杨建国,王兆安,等. 基于视频的车辆瞬时停车延误检测[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(6): 692-696.
- RAN Qiwu, YANG Jianguo, WANG Zhao'an, et al. Instantaneous stop delay detection based on video[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(6): 692-696.
- [5] 段崇修. 基于DSP的瞬时停车延误检测系统[D]. 西安:西安交通大学, 2008.
- [6] RAN Qiwu, YANG Jianguo. Measurement of instantaneous stopped delay at intersections used image processing technology[C]// 2011 3rd International Conference on Computer Engineering and Applications. Singapore: International Association of Computer Science & Information Technology Press Singapore Office, 2011: 80-84.
- [7] 肖永剑. 基于受阻期望行为的机动车驾驶行为模型研究[D]. 西安:西安交通大学, 2010.

(编辑 杜秀杰)