

The Optimal Timing Plan of Traffic Signal Based on Vehicle Detection*

Xinlu Liu, Kangjia Zhao, Shuyan Chen

Southeast University, Nanjing

Email: liuxinlululu@gmail.com, 419900562@qq.com, chenshuyan@seu.edu.cn

Received: Jan. 14th, 2013; revised: Feb. 1st, 2013; accepted: Feb. 12th, 2013

Abstract: This paper illustrates an optimal timing plan for a specific intersection, the volumes of whose approaches vary largely and have periodic changes. The purpose of the plan is to enhance the information exchange between vehicles and traffic signals, and use the real-time signal plan with regarding to the different conditions of the arrivals, in order to increase the efficiency of the operation and reduce the energy consumption. To test the practical utility and feasibility of the plan, the paper offers the data from the experiment of a representative intersection, during which we do the reconnaissance and simulation by VISSIM, and programming with java.

Keywords: Periodicity of Traffic Volumes; Timing Plan of Traffic Signal; Vehicle Detection; The Efficiency of Traffic Operation

基于车辆感知的信号交叉口配时优化*

刘心露, 赵康嘉, 陈淑燕

东南大学, 南京

Email: liuxinlululu@gmail.com, 419900562@qq.com, chenshuyan@seu.edu.cn

收稿日期: 2013年1月14日; 修回日期: 2013年2月1日; 录用日期: 2013年2月12日

摘要: 文章针对具有明显潮汐性、进口道之间流量悬殊信号交叉口在各个状态下的信号配时方案进行优化。通过车辆感知技术, 实现车辆与交通信号系统之间的信息交换, 将交叉口的流量分情况讨论, 针对不同的车辆到达情况采用实时的信号灯配时, 以提高通行效率, 节能环保。此外, 利用 java 语言验证了逻辑上的可行性, 利用 VISSIM 仿真模拟分析典型案例后, 证明了方案及模型的精度和控制效果。

关键词: 交通潮汐性; 实时信号配时; 车辆感知; 通行效率

1. 引言

随着经济的发展和城市化水平的提高, 城市交通问题日益突出。对城市交叉路口交通实施合理优化控制, 有利于缓解日趋紧张的交通拥挤问题, 提高交通效益。城市交通信号控制的核心在于各相位有效绿灯

时间的分配, 而信号设置合理与否直接影响运行效率, 乃至整个路网功能的发挥。

单点交叉口交通信号控制是城市交通控制的基础, 交叉口信号控制系统通过在时间上隔离不同方向的车流, 控制车流运行秩序, 并获得最大的交通安全; 其通行效率用通行能力、延误及停车次数三项指标来衡量; 信号控制系统为道路使用者提供必要的情报,

*基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助(2012AA112304)。

帮助他们有效地使用交通设施。目前, 研究者们利用智能优化算法实现延误、通行能力等多目标优化, 基于多目标优化的自适应交通信号控制引起研究者极大关注。

万绪军^[1]等建立了新的交通信号控制理论, 引入了新的优化指标 PI 值以实现交叉路口的信号配时能对实时变化的交通流做出及时反应。但是此理论并未进行仿真模拟验证, 且只适用于交通流变化频率较高和拥挤现象频繁的交叉口, 不具有广泛的可行性。李晓娜^[2]等根据路口饱和度将路口车流到达划分为高饱和、低饱和两种状态, 建立各状态下的控制模型, 仿真实验证明其优于目标函数唯一的自适应控制, 但其对于路口交通状态过于划分简单、且各状态均采用 Webster^[3]的延误、停车次数等计算公式, 不能较好反应路口的实际交通状况和控制目标。何兆成^[4]等则针对典型的多车道十字交叉口的交通流分布, 提出基于状态划分的交通信号控制方法, 采用路口交通流量和占有率将路口交通流的到达划分为四种状态, 并研究了各状态下的交通流特性、控制目标及目标下延误、停车次数等性能指标的选取, 建立了各状态下的动态控制模型, 但其模型仅适用于于流量大的多车道路口。

遗传算法^[5]作为一种智能优化方法, 在实际自适应信号优化问题中得到广泛应用。国内的学者在 Michalewicz^[6]的研究基础上探究了不同的函数策略来处理信号优化问题, 但还未解决完成各种函数之间的实验验证比较。如杨锦冬、杨东援^[7]利用灰色控制理论研究后提出信号周期与到达率、停车率、排队长度和相位关键车流量等因素灰关联度的 YD 模型; 这说明以往信号配时中不仅要以延误最小为目标, 停车率最小(或排队车辆数最少)也应该作为一个优化目标; 而王伟平^[8]除了考虑以上两个优化目标外, 还以饱和度为约束条件采用逼近算法得到交叉口的周期时长。Bullock^[9], 徐勋倩^[10]等以交叉口延误最小、停车次数最少和通行能力最大为控制目标, 建立动态配时模型, 利用遗传算法、群体智能算法等实现并用于控制单个路口, 模拟仿真实验证明上述方法均优化定时控制, 但其控制目标函数在一天内保持不变, 导致目标函数在某些交通流状态下并不是合适的, 影响交叉口的整体效益。

不少国内外专家学者利用模糊控制技术在城市路口信号控制上已经取得了一定的研究成果。Favilla^[11]提出了具有自适应策略的城市路口模糊控制方法, 可以根据实际交通状况, 使用模糊自适应策略来调整模糊控制器的隶属度函数, 优化模糊控制器的性能; Kim 提出了分级式的城市路口模糊控制方法^[12], 可以根据车流量的变化选择不同的模糊控制规则, 并将遗传算法引入了城市路口信号的模糊控制^[13], 实现了模糊控制器参数的实时性全局优化。然而值得引起注意的是, 模糊控制在交通流量较低, 路口处于未饱和状态时, 其控制效果可能不错, 但是当交通流量较高, 路口处于饱和状态、存在大量排队车辆时, 模糊控制的控制效果可能就会很不理想。

此外, 目前国外已经成熟的信号配时优化系统有: 基于爬山法优化的 TRANSYT 系统^[14], 基于遗传算法优化的 Cabal^[15]系统。还有一些信号配时仿真优化软件系统, 如 VISSIM 系统、TSIS 系统、Synchro 系统等, 但这些系统并没有很好的与实时交通信息相结合, 只能在已知信息下实现最优化。然而, 现代大、中城市中的厂区、大学城、居住用地与市区的枢纽路段等的交叉口多具有如下特征: 交通量的潮汐性较明显, 并且交叉口多由等级不同的路段构成(其组合多为快速路与主干道或主干道与次干道), 因此这些交叉口非常适合利用车辆感知手段进行实时配时优化, 而上述的研究并没有在此方向进行详细考虑。

因此, 需要针对这类特征鲜明的路口进行研究, 以解决运行效率低下、能源消耗和空气污染问题。在高峰期, 信号控制提高了这些交叉口的通行效率, 但是在空闲时段, 由于信号灯不能做出相应调整, 增加了过往车辆不必要的停车次数, 造成时间延误。另外, 由于交叉路段交通量不均衡, 这些次干道出口通常交通量不大, 固定周期的信号灯会造成主干道车辆的不必要等候以及驾驶员闯红灯行为的增加。在这种情况下, 信号灯没有起到帮助驾驶员有效使用交通设施的作用。本优化方案则以实时采集的路上交通流数据为基础, 以交叉口各相位各进口道上的车辆平均延误最小为目标, 优化参数为信号周期时长及各个相位绿灯的时间, 通过确定信号周期、最优化相位绿灯时间, 使得控制周期内路口的车辆平均延误最小。

2. 信号配时优化模型

2.1. 模型简介

优化模型的目的是使交叉口在高峰状态和平峰状态使用不同的信号周期状态，使得高峰状态的主、次干路通畅；平峰状态主要保证主干路通行时间，次干路根据车辆感知分配到通行时间。出于典型性和方便性的考虑，模型选择了南京市诚信大道上的一个交叉口作为基础数据来源。

如图 1, M11, M12, M21, M22, S11, S12, S21, S22, 为车辆感应装置，每经过一辆车，计数增加一次。

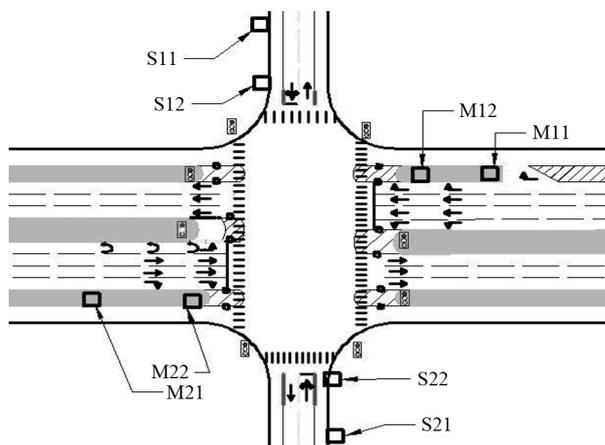


Figure 1. The intersection of Chengxin Av. and Yinhua St.
图 1. 南京市诚信大道与殷华街交叉口

2.2. 变量说明

变量名	解释	变量名	解释
相位 1	简称 $p1$, 主干道直行, 总时间为 t_1	M_1	主干道 1 实时车辆数, $m_{11} - m_{12}$ 大于 0 时取 $ m_{11} - m_{12} $, $m_{11} - m_{12}$ 小于等于 0 时取 0
相位 2	简称 $p2$, 主干道左转, 总时间为 t_2	M_2	主干道 2 实时车辆数, $m_{21} - m_{22}$ 大于 0 时取 $ m_{21} - m_{22} $, $m_{21} - m_{22}$ 小于等于 0 时取 0
相位 3	普通状态时的相位, 简称 $p3$, 次干道直行, 总时间为 t_3	m_{ij}	主干道 i 实时进入 ($j = 1$ 时), 或离开 ($j = 2$ 时) 车辆数
相位 4	普通状态时的相位, 简称 $p4$, 次干道左转, 总时间为 t_4	s_{ij}	次干道 i 实时进入 ($j = 1$ 时), 或离开 ($j = 2$ 时) 车辆数
相位 5	自适应状态时的相位, 简称 $p5$, 次干道通行, 总时间为 t_5	t'_3	$= \max[S_1, S_2] * t_{per} + t_3$, 自适应周期中的相位 3 时长, 其中 t_{per} 、 t_4 为常量, 由相关公式求得
t'	计时器数值, 在自适应状态下, 相位 1 开始的同时开始计时	A_s	常量, 切换的临界车辆数, 由相关公式求得
t	时间函数, 使用 24 小时制, 表示一天的时间点(如 13:24)	S_1	支路 1 实时车辆数, 其值为 $s_{11} - s_{12}$
t_0	黄灯时间	S_2	支路 2 实时车辆数, 其值为 $s_{21} - s_{22}$
$L1$	判断变量, 其值为 1 或 0; $L1 = [(T_1 <= t <= T_2) / (T_3 <= t <= T_4)] \& \& (\max[S_1, S_2] < A_s)$	$L3$	判断变量, 其值为 1 或 0; $L3 = S_1 / S_2$
$L2$	判断变量, 其值为 1 或 0; $L2 = [(T_1 <= t <= T_4) / (T_2 <= t <= T_3)] \& \& (\max[S_1, S_2] >= A_s)$	$L4$	判断变量, 其值为 1 或 0; $L4 = (M_1 = 0) \& \& (M_2 = 0)$

T_1, T_2, T_3, T_4 为一天中的次干路低峰时段控制时间点, 由实际路段的全天统计数据(每 15 分钟检测一次)得到, 取全部数据的后四分位点。这样使模型具有较强的实用性, 避免普通状态与自适应状态之间在车辆数在临界数附近波动时切换过于频繁。

2.3. 算法

在普通状态运行时, 每次 $p2$ 或 $p3$ 结束后检测是否满足切换状态的条件(此处为判断变量 $L1$), 一旦满足, 则将本相位运行完毕后切换至自适应状态。

自适应状态时, 若主干道无车则分成两种情况考虑: 1) 支路有车, 则立即切换至 $p5$; 2) 支路无车继续原相位; 若主干道有车, 也分成两种情况考虑: 1) 支路有车, 则运行完本相位后切换至 $p5$; 2) 支路无车继续原相位。

在自适应状态运行时, 每次 $p2$ 或 $p5$ 结束后检测是否满足切换状态的条件(此处为判断变量 $L2$), 一旦满足, 则将本相位运行完毕后切换至普通状态。

每次状态切换后总是先从 $p1$ 开始。

据此得出了逻辑流程图(图 2)。

由于信号灯是一种循环系统, 上述流程运行结束后应自动重新开始新的一次循环。

算法设计完成后, 利用 JAVA 语言编写此套程序, 由配时单元控制程序、相位转换函数、信号灯输出单

峰、低峰时间点。

3. 仿真模拟验证

为了评价该自适应配时算法的使用效果，笔者利用 VISSIM 微观仿真软件对其进行了仿真测试，仿真画面如图 3 所示。仿真选取的路口为研究目标所设定的主路与次路相交：南北向主路有 4 条进口道，其中左转专用道 1 条、直行车道 2 条、右转专用道 1 条，车道宽度 3.25 m，出口道 4 条，车道宽度 3.5 m；东西向次路进口道展宽为 3 车道，设左转专用道 1 条，直行车道 1 条，直右车道 2 条，车道宽度 3.0 m，出口道两条，车道宽度 3.25 m。主路交通流量较大，且白天流量较为均衡；次路交通流量较少，车辆到达随机性较大。输入交通量数据后，首先对该交通量条件下的固定配时方案进行仿真评价，得出交叉口的延误情况。之后，使用自适应配时算法的配时方案进行仿真，得出其相应延误情况。

表 1 是固定配时方案和自适应配时中 3 个时间段的仿真结果对比。

从表 1 可以看出，在自适应配时状态下，其延误相比固定配时方案有所降低，特别是主路延误的减少符合了该自适应配时算法设计的目标。相应的，该算法的设计初衷是通过减少在支路无车时主路不必要的停车时间，所以，为了进一步验证该算法的有效性，对主路车辆的停车时间进行了评价，结果如表 2 所示。

自适应配时算法中在支路无车时，主路采用常绿控制，只有在支路有车时才响应分配绿灯时间，所以，该控制方案下主路通行能力应该有所提高。笔者就此进行了仿真评价，得出相同仿真时段流量结果如下表 3 所示：



Figure 3. Picture of simulation by VISSIM
图 3. 仿真模拟的画面

Table 1. Delay
表 1. 延误(单位 s)

	固定配时	自适应状态 1	自适应状态 2	自适应状态 3
交叉口总延误	14.2	13.1	12.3	10.6
主路延误	22.7	19.8	19.1	15.3

Table 2. Stopping time
表 2. 停车时间(单位 s)

	固定配时	自适应状态 1	自适应状态 2	自适应状态 3
主路停车时间	14.1	11.2	10.8	7.1

Table 3. Number of vehicles
表 3. 通过车辆数(单位 pcu)

	固定配时	自适应状态 1	自适应状态 2	自适应状态 3
主路通过车辆	48	64	57	60

以上仿真评价结果表明，该自适应配时算法基本满足设计初衷，相较于固定配时方案，有效的减少了主路车辆在通过交叉口时的延误和停车时间，同时提高了交叉口的通行能力，较好的解决了主次路交通流量严重不平衡引起的信控交叉口时间资源浪费问题。

4. 交叉口车辆感知系统构建

传统的自适应信号控制系统大多依赖于感应线圈、视频监控器等传感器获得当前路口的车流数据。由于这两种设备的功能比较单一，投入数量大，成本高。同时，感应线圈^[16]会因长期的压迫，路面沉陷剪切及路面渗水等问题而报废，视频监控器在如大雾和其他极端恶劣天气下而产生误差，因此，都不是理想的选择。

本项目对车辆感知系统的要求是能够获得即将进入交叉口车辆的数量、速度、加速度，驾驶员对车辆感知系统的要求是操作简便，不影响安全驾驶。同时，还要满足行驶速度与感知系统的感应能力相匹配，硬件设施成本和使用成本经济合算的要求。

在“物联网”背景^[17]下提出的新的自动识别技术使得改进自适应信号控制系统的信息获取手段成为可能，如射频识别(RFID)装置、红外感应器、全球定位系统、激光扫描等种种装置。目前已初步投入使用的 RFID^[18]技术主要包括 RFID 电子车牌、远距离 RFID

读卡器、通信网络、数据库平台、中央管理系统服务器。其基本构成是：在每辆车上安装一张 RFID 卡，在信号交叉口的各进口道安装 RFID 读卡器以识别通过车辆，获取道路交通流信息。这个方案可以满足自适应式信号控制系统的要求，及时准确的获取信息，并且正在中国逐步推广中，较有前景。

ZigBee^[19]则是一种新兴的短距离、低复杂度、低功耗、低数据速率、低成本的无线网络技术。物理层采用直接序列展频技术，媒体存取控制层方面，有较高兼容性，主要用于近距离无线连接。Zigbee 的优势除了安全灵活，网络容量多达 65000 个设备以外，最大的优势在于成本底以及使用功耗低，在低功耗待机模式下，两节普通 5 号电池可使用 6~24 个月，此外其延时极短，典型搜索设备时延为 30 ms，安全性高。

以上这些都可以作为本方案的硬件设备。

概括地说，基于车辆感知的信号交叉配时优化是车联网系统中的一部分，本优化方案的信号控制系统包括车载设备和地面设备。车载设备包括：1) 车载信号感应和处理系统，用于感应车辆的行驶状态；2) 车载信号发生系统，用于向交叉口地面感应装置发送车辆信息。地面设备包括：1) 信号接收系统，接收进入交叉口范围内的车辆发出的信息；2) 信号处理与配时系统，该系统对接收到的信息进行分析、计算。驾驶员驾驶汽车进入交叉口感应区域后，地面装置记录下当前进口道车辆数量，该信息传送置地面控制系统中，预设的控制算法在输入车辆数据后进行配时计算，得出下一相位的控制方案。

5. 结束语

提出了一种基于车辆感应的针对主次路交叉口的信号配时优化方案，顺应未来智能交通体系的发展方向。笔者给出了自适应信号灯的控制算法，并利用 JAVA 语言开发出信号配时和信号显示的控制程序，最后结合 VISSM 仿真验证了该方案的合理性和有效性。优化方案针对交通流的空间不平衡、潮汐等特性，采取自适应控制和固定配时方案兼有的混合控制方案。在交通量较低时，方案可以减少主干道车辆的不必要停车；在交通量较大时，能够疏解交叉口交通压

力。

但方案的使用范围有一定的局限性，没有考虑行人和非机动车的那个参与。因此，可以考虑在算法层面上进一步改进，使之在更广范围内适用，并配合车联网的车载传感装置提供的实时交通流信息，完成信息交换。

参考文献 (References)

- [1] 万绪军, 陆化普. 实时自适应交通信号控制优化理论模型[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(4): 60-66.
- [2] 李晓娜. 单交叉口自适应控制方法的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [3] 杨佩昆. 交通管理与控制[M]. 北京: 人民交通出版社, 1995.
- [4] 何兆成, 杨文臣, 梁诗, 余锡伟, 洪波. 城市单交叉路口交通信号实时优化控制与仿真[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(33): 239.
- [5] 陈小锋, 史忠科. 自适应惩罚策略及其在交通信号优化中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(26): 5-7.
- [6] Z. Michalewicz. A survey of constraint handling techniques in evolutionary computation methods. In: J. McDonnell, Ed., Proceedings of the 4th Annual Conference on Evolutionary Programming, 1995: 135-155.
- [7] 杨锦冬, 杨冬援. 城市信号控制交叉口信号周期时长优化模型[J]. 同济大学学报, 2001, 29(7): 789-794.
- [8] 王伟平. 城市平面交叉口交通信号控制优化方法的研究[D]. 济南: 山东科技大学, 2004.
- [9] D. T. Bullock. Traffic signal systems addressing diverse technologies and complex user needs, A3A18. Washington DC: Committee on Traffic Signal Systems, 1999.
- [10] 徐勋倩, 黄卫. 单路口交通信号多相位实时控制模型及其算法[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 413-416.
- [11] J. Favilla. Fuzzy traffic control. Adaptive strategies. Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1993, 1: 506-511.
- [12] J. Kim. A fuzzy logic control simulator for adaptive traffic management. Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 1997, 3: 1519-1524.
- [13] J. Kim. Genetic algorithm approach to generate rules and membership functions of fuzzy traffic controller. Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, 2001, 1: 525-528.
- [14] R. A. Vincent, A. I Mitchell and D. I. Robertson. User guide to TRANSYT version 8. Transport and Road Research Laboratory, Research Report LR666, 1980.
- [15] S. J. Clement, J. M. Anderson. Traffic signal timing determination: The cabal model. 2nd IEE International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications, Glasgow, 1997.
- [16] 陈思, 吴建平. 一种基于 GPS/GPRS 的智能交通信号控制系统[J]. 中国科技信息, 2006, 7: 142-143.
- [17] M. Markus, M. B. Tomas. The internet of vehicles or the second generation of telematic services. ERCIM News, 2009, 77: 43-45.
- [18] 陈丽芳, 刘渊. 基于 RFID 技术的城市交通信号优化控制[J]. 计算机工程与科学, 2011, 33(6): 178-181.
- [19] 郑琛, 曹斌. ZigBee 技术在智能交通系统中的应用研究[J]. 通信技术, 2012, 45(5): 86-88.