

文章编号: 1005- 8893 (2006) 02- 0044- 05

基于虚坡模型的交叉口交通流的解耦方法¹

薛国新¹, 顾怀忠²

(1. 江苏工业学院 计算机科学与工程系, 江苏 常州 213164; 2. 南京公安局 公安交通科研所, 江苏 南京 210000)

摘要: 交叉口交通流的模型是进行红绿灯优化管理仿真模拟的基础。传统的方法仍有其不足之处, 主要表现在对统计手段有较大的依赖性。为此, 提出了一种基于虚坡模型的解耦方法, 它将路口的红灯黄灯效应应用假想路障代替, 将一个方向上的车流对另一个方向上车流的影响用另一个假想的宽度变化的路障代替, 而假想路障则在虚坡模型中表示为速度为零的车辆。由此, 交叉口两个方向上的交通流被表示为两条独立道路上的交通流, 用虚坡模型算出每一方向上各车的行驶规律, 并求出折合行驶延误时间。调整信号灯切换时间令总体延误时间为最小, 就能得到最佳的信号灯管理方案。通过对一个大规模问题的试算, 得到了有用的结果, 表明可用虚坡模型通过仿真手段对交通管理问题进行直接研究。

关键词: 虚坡; 交通流; 信号灯; 超车; 跟车

中图分类号: O 362

文献标识码: A

Imaginary Slop Model Based Decoupling Method Proposed for Crossing Traffic Flows

XUE Guo- xin¹, GU Huai- zhong²

(1. Department of Computer Science and Technology, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213164, China; 2. Nanjing Public Security and Transportation Research Institute, Nanjing Public Security Bureau, Nanjing 210000, China)

Abstract: The calculation of crossing traffic flows is a basic problem in the simulation of traffic light (signal light) management. The traditional methods still have their shortcomings. One of them is that they depend on statistical methodologies to a great extent. Based on the imaginary/virtual slop model, a decoupling method for crossing traffic flows was proposed. It used an imaginary road block to simulate the effect caused by the red lights and the yellow lights. And another imagined road block was introduced to express the effect of the traffic flow in one direction on the traffic flow in another direction. The width of the latter was thought to be changing. Both of the two imaginary road blocks were expressed as additional imaginary vehicles of zero speeds. And the calculation of the two crossing traffic flows was decoupled to the calculation of two independent traffic flows. Further the imaginary slop model was applied to determine the running process of the vehicles. In this way the total delayed time of all vehicles was found. Regulating the on- off time of the traffic lights to minimize the total delayed time of the vehicles, an optimal management arrangement of the traffic lights was found. The proposed method was applied to a problem of large scale and useful results were produced. It showed that traffic

¹ 收稿日期: 2006- 03- 27

基金项目: 江苏省社会发展基金项目 (BS2000100)

作者简介: 薛国新 (1962-), 男, 江苏武进人, 研究员, 《计算机仿真》编委, 主要研究方向为仿真和图像处理及交通管理等。

management problems could be simulated directly with the imaginary slop model.

Key words: imaginary slop; traffic flow; traffic lights; overtaking; car flowing

正确的路口交通流模型是进行有效的交通流信号灯优化管理仿真计算的关键。与单个道路相比, 由于两个相互垂直的方向上车辆行驶的相互制约作用, 以及车辆在路口的停顿作用会波及离开路口很远的车辆, 故与单个道路上的车辆行驶问题相比, 路口交通流的仿真问题本质上更为复杂。

人们较多地利用了元胞自动机模型研究了交叉路口的交通流问题^[1~4]。元胞自动机模型在空间上和时间上都是离散的^[5~8], 而实际司机的驾驶速度变化过程是一分段连续函数; 元胞自动机需将道路划分为一系列单元格, 各单元格长度统一。事实上各车辆的长度并不统一, 故元胞自动机模型仍包含较大的主观因素。基于流体力学的方法在分析交叉口的交通流方面得到一定的成功应用^[9, 10]。但由于车辆存在超车过程, 而流体的局部质点速度相同, 故使用流体力学的方法仍有其局限性。自适应控制方法在交叉口交通流建模中也得到了应用, 但这类模型很大程度属于一种灰箱模型^[11~19]。另外, 人们还考虑了基于地理信息管理系统交叉路口交通管理方案^[20]。但并不能总保证有足够的地理管理信息数据可用。

上述各种传统模型的一个共同不足处在于它们较多地依赖于统计手段。而实际的交通流样本采集工作费时费力。并且其样本一般无可重复性。一种情况下的交通流很难再现。这给进行信号灯时间设置的优化试验带来了困难。此外, 传统模型对于如何将两个相互交错的方向上的交通流计算进行解耦, 也未给予足够重视。

由于车辆的行驶过程是分阶段地不断的向指定目标逼近的过程, 固支梁挠曲线模型^[21~24]中的车速渐近变化规律揭示了这一最为本质的特征。此外, 固支梁挠度曲线模型中的平均速度恰好与匀加速模型中的平均速度相同^[21], 为其推广应用带来了方便。源于固支梁挠度曲线模型的虚坡模型^[25, 26] (俗称假想尾巴模型) 由于能将道路宽度、车辆宽度以及车辆速度以极其简洁的形式有机地结合在一起, 故既能定性反映交通流的趋势, 又能执行有效的定量计算。值得对其作系统的研究。

为此, 提出将信号灯以及一个方向上车队对另一个方向上车队的作用看作临时路障产生的效应, 将路口交通流过程分解为两条独立道路上的车辆行

驶过程, 并用源于固支梁挠度曲线模型的虚坡模型对其进行优化模拟计算。

1 交叉口假想路障的设置

将红灯黄灯效应和一个方向上车队对另一个方向上车队的影响均用临时假想路障代替。为简化起见, 假定所有通过路口车辆不拐弯。将路口两个相互垂直的方向, 一者称为东西方向, 一者称为南北方向。进一步, 假定两个方向上的道路均为单行线, 东西向车辆由西向东开, 南北向车辆由南向北开, 两个方向上的车辆在交叉口处行驶可能会产生冲突。设信号灯按照固定的时间间隔进行切换。东西向车队中处于路口中央的车辆对南北向车辆的行驶可能会产生影响, 南北向车队中处于路口中央的车辆对东西向的车辆行驶也会产生影响。它们的影响与红灯和黄灯的影响一起, 对车辆在路口的通过构成延迟作用。

将任一方向上的红灯状态和黄灯状态统一标记为 0, 而将绿灯状态标记为 1, 并各用一个二维数组 $g(i)$ 存放之。以 $i=0$ 表示东西方向, 以 $i=1$ 表示南北方向。例如, 当 $g(0)=0$, 表示东西方向红灯亮; 当 $g(0)=1$ 时, 表示东西方向绿灯亮。

需要注意的是, 在实际情形中, 当东西方向红灯亮时, 南北方向未必绿灯亮, 这时南北方向仍可能处于黄灯状态, 即 $g(0)=0$ 时并不一定意味着 $g(1)$ 就一定等于 1, 反之亦然。但为使问题处理方便起见, 仍假定 $g(0)$ 与 $g(1)$ 两者中一者为 0 时另一者即为 1, 而这里所说的黄灯效应则被归并到模型中。

考虑东西向道上的车辆。假定 $g(0)$ 本来是 1, 即东西向车辆处于通行状态, 南北向车辆处于停止状态。若 $g(0)=1$, 则东西方向上的车辆均染上绿色。而当 $g(0)$ 于时刻 t_0 由 1 变为 0 时, 规定凡是能以绝对值低于某指定的 a_c 的加速度减速而停在西侧路口界线以内者染上红色, 而其余车辆均染上绿色。对于红色车辆, 好比西侧路口界线处停有一车, 其长度为零, 而宽度为道路宽度。这里的 a_c 值和假想的长度为零的车辆 (即路障) 即反映了东西向上的黄灯效应。

对南北方向上的车辆用类似的方法进行着色。

若 $g(1) = 1$, 则南北方向上的车辆均染上绿色。若 $g(1)$ 本来是 1, 南北向车辆处于通行状态, 东西向车辆处于停止状态, 而 $g(1)$ 于时刻 t_1 由 1 变为 0。规定凡是能以绝对值低于 a_c 的加速度减速而停在南侧路口界线以内者染上红色, 其余车辆均染上绿色。对于红色车辆, 好比南侧路口界线处停有一车, 其长度为零, 而宽度为道路宽度。这里的 a_c 值和假想的长度为零的车辆 (即路障) 即反映了南北向上的黄灯效应。

将东西向车队和南北向车队中车辆总数分别记为 n_0 和 n_1 , 每一车辆用一两位数车号表示, 东西向各车的车号顺次为 00, 01, ..., $0(n_0 - 1)$, 而南北向各车的车号顺次为 10, 11, ..., $1(n_1 - 1)$ 。

在东西向车队中加入一个附加车辆, 其两位数车号为 $0n_0$ 。该车的最大速度为零, 而宽度处于变化状态, 其值为南北方向路口中央地带内最后一辆车后端到北侧路口界线的距离。若南北方向于路口中央地带内无车辆, 则 $0n_0$ 号车的宽度取为零。

在东西方向上, 当 $g(0) = 0$ 时, 再加上另一辆车号为 $0(n_0 + 1)$ 的车, 其宽度为道路宽度, 最大速度为零, 它只对路口西侧的红色车辆有限制作用, 而对于路口西侧的绿色车辆, $0(n_0 + 1)$ 号车视作不存在。 $0(n_0 + 1)$ 号车用于表示东西向的黄灯效应。

$0n_0$ 车和 $0(n_0 + 1)$ 车均分别被染上绿色和红色。前者的位置为路口正中央, 而后的位置与西侧路口界线重合。

在南北方向车队中加入一个附加车辆, 其两位数车号为 $1n_1$ 。该车的最大速度为零, 而宽度处于变化状态, 其值为东西方向路口中央地带内最后一辆车后端到东侧路口界线的距离。若东西方向于路口中央地带内无车辆, 则 $1n_1$ 号车的宽度取为零。

同样, 对于南北向车辆, 引入车号为 $1(n_1 + 1)$ 的车辆。它的作用与东西向上的 $0(n_0 + 1)$ 号车的作用相似, 体现南北向的黄灯效应。

$1n_1$ 车和 $1(n_1 + 1)$ 车均分别被染上绿色和红色。

对东西方向车辆按其位置进行排序。这时, 为正确体现 $0(n_0 + 1)$ 车的作用, 采用如下的特殊排序规则: 对任意两个车辆, 若颜色一为红色, 另一为绿色, 则认为红色车辆序号较绿色车辆序号为小; 对于颜色相同的两个车辆, 认为位置较西者有较小的序号。

同样, 对于南北方向车辆也按其位置进行排序。这时, 为正确体现 $1(n_1 + 1)$ 号车的作用, 采用如下的特殊排序规则: 对任意两个车辆, 若颜色一为红色, 另一为绿色, 则认为红色车辆序号较绿色车辆序号为小; 对于颜色相同的两个车辆, 认为位置较南者有较小的序号。

源于固支梁挠度曲线模型^[21~24]得到的虚坡模型^[25, 26]计算东西向车队中各车辆的行驶位置。在模型中考虑各车横向位置的计算。对于每一辆车, 主要考虑其紧邻的前方车辆的虚坡 (虚拟尾梁) 的限速作用。每一车辆的虚坡根部宽度计入其偏离道路右侧的距离。

类似地, 用虚坡模型计算南北向车队中各车辆的行驶位置。

至此, 已考虑了信号灯对车队的作用, 也考虑了两个不同方向上的车队的相互影响。原问题已被解耦为两条独立道路上车辆行驶的仿真计算。

当 $g(0)$ 于时刻 t_0 由 1 突然变为 0 时, 究竟哪些车辆不能以绝对值低于 a_c 的加速度减速而停在西侧路口界线以内呢? 为简单起见, 用匀减速模型进行计算。设这时东西向车队西路段上某车辆的速度为 v_i , 它到西侧路口界线的距离为 s_i , 若以加速度 a_c 作匀减速运动, 则当它停下后, 距原来位置 $\frac{v_i^2}{2a_c}$, 显然若 $\frac{v_i^2}{2a_c} \leq s_i$, 则那种车可被认为能在西侧路口界线以内停下, 因而可染以红色, 否则应染以绿色。

东西向行驶的编号为 00 至 $0(n_0 - 1)$ 车辆的染色规则如下: 如果东西向红灯亮, 或者绿灯亮的时间未到 3 s, 则规定路口西侧满足条件 $\frac{v_i^2}{2a_c} \leq s_i$ 者均染以红色, 其余车辆染以绿色; 若东西向绿灯亮, 且者绿灯亮的时间超过 3 s, 则编号为 00 至 $0(n_0 - 1)$ 的车辆均被染以绿色。

这里的 3 s 是一个黄灯时间裕度值, 表示在东西方向由红灯变为绿灯后, 东西方向路口西侧车辆若再继续等上 3 s, 则不至于和南北方向的车辆发生碰撞。实际取用的黄灯时间裕度值可在一定范围内变化。

当南北方向上的车辆在紧挨路口的地方发生堵车时, 东西方向车辆亦不会和南北方向车辆发生碰撞, 原因是在东西方向车队中加入了 $0(n_0 + 1)$ 号车, 它用于考虑南北方向车辆对驶上路口中央地带东西方向车辆的约束作用。对南北方向车辆采用

相似于东西方向车辆的染色规则进行染色。

2 实 例

设有两条纵横交错的道路，它们的方向分别为东西方向和南北方向，每个方向道路上各有 1 200 辆轿车，各车辆的宽度均为 2.2 m，道路宽度为 5.5 m。每个方向上各车辆的初始速度均为零。它们的初始位置为

$$\text{place}[i] = 200 + 50(i + 1 - 1\,200) \text{ (m)},$$
$$0 \leq i \leq 1\,199$$

它们的最大速度分别是 $100 + 30\sin\left(\frac{\pi i}{10}\right)$ km/h, $0 \leq i \leq 1\,199$ 。两条道路交汇于距各自方向上的参考原点东 286 m 和南 286 m 处。令东西方向的每次绿灯时间和红灯时间分别为 $t_{\text{long}S}$ 和 $t_{\text{short}S}$ 。并且保持这种红绿灯时间不变，以 $t_{\text{long}} + t_{\text{short}}$ 为周期重复红绿灯的切换过程。而南北方向上的信号灯状态与东西方向的相反。

当 $g(0)$ 于时刻 t_0 由 1 突然变为 0 时，设这时东西向车队西路段上某车辆的速度为 v_i ，它到西路口界线的距离为 s_i ，若此车能以加速度 a_c 作匀减速运动及时停于路口西侧，则它停下后距原来位置 $\frac{v_i^2}{2a_c}$ ，且 $\frac{v_i^2}{2a_c} \leq s_i$ ；故作如下规定，若 $\frac{v_i^2}{2a_c} \leq s_i$ ，则那种车可被认为能在西路口界线以内停下，因而可染以红色，否则应染以绿色。

设定实际中黄灯显示的时间为 3.5 s。对东西向车队，若 $g(0) = 0$ ，或者 $g(0)$ 由 0 转为 1 的时间不到 3.5 s，则规定路口西侧满足条件 $\frac{v_i^2}{2a_c} \leq s_i$ 者均染以红色，其余车辆染以绿色；若东西向绿灯亮，且绿灯亮的时间超过 3.5 s，则编号为 00 至 $0(n_0 - 1)$ 的车辆均被染以绿色。

取 $a_c = 15 \text{ m/s}^2$ 。经计算可以得到各轿车的实时速度，由此得到自 60 s 至 390 s 的时间范围内所有车辆的耽搁的有效行驶时间与经历时间的比值的平均值。每个车辆耽搁的有效行驶时间定义为在指定时间段内其所走实际路程与其以最大速度匀速行驶所应走路程的差值被最大速度去除所得之值。令 t_{long} 和 t_{short} 取相等值，并分别取值 20, 22, 24, ..., 50，将对应的计算结果列于表 1。

由表 1 可见，当 $t_{\text{long}} = t_{\text{short}} = 25 \text{ s}$ 时，在时间段 60 s 至 390 s 范围内车辆所耽搁的总的有效行驶

时间最少。因此， $t_{\text{long}} = t_{\text{short}} = 25 \text{ s}$ 代表了上述条件下一种较为合理的红绿灯切换方案。

表 1 车辆所耽搁的有效行驶时间与经历时间的比值

Table 1 The ration of the total delayed running time to the passed time of the vehicles

t_{long} (每周期内 东西向绿灯时间)	t_{short} (每周期内 东西向红灯时间)	车辆耽搁的有效行驶时间 / 经历的时间 (平均值)
/ s	/ s	
20	20	0.295
22	22	0.283
23	23	0.285
24	24	0.288
25	25	0.276
26	20	0.297
27	27	0.284
28	23	0.286
30	20	0.286
35	30	0.296
26	26	0.280
28	28	0.287
30	30	0.292
32	32	0.293
34	34	0.294
36	36	0.300
38	38	0.292
40	40	0.296
42	42	0.293
44	44	0.285
46	46	0.301
48	48	0.304
50	50	0.293

3 结 论

由于采取了解耦的计算方法，在有信号灯管理的情况下，两条纵横交错道路上的车辆行驶计算被分解为等效的两个独立道路上车辆行驶的计算。原问题得到了较大的简化。

在以上实例中，红绿灯切换时间在各周期中都相同。可以进一步根据两个方向上车辆在路口附近分布情况，对红绿灯切换时间进行动态调整。当红绿灯切换时间作动态调整时，可望使车辆耽搁的有效行驶时间更低。显然，当红绿灯切换时间作动态调整时，上述有关方法仍旧适用。

对于所考虑的具有 2 400 辆车的实例，每个时间步仅耗时 1 s 以下。故可通过试算直接比较不同红绿灯切换时间条件下车辆所耽搁的有效行驶时间。因此，虚坡模型不仅适用于仅有少数车辆的情形，也适用于大规模问题，它是使用计算机模拟手段直接研究交通管理问题的有力工具。

参考文献:

- [1] 顾国庆, 许伯铭, 汪秉宏, 等. 随机化交通灯的二维元胞自动机交通模型 [J]. 应用数学和力学, 1998, 19 (9): 753–758.
- [2] 张昆, 顾国庆. 路口通行规则的元胞自动机模拟 [J]. 上海理工大学学报, 1998, 20 (3): 203–206.
- [3] 李洪, 张薇, 顾国庆, 等. 具有交警的二维元胞自动机交通流模型 [J]. 交通与计算机, 2004, 22 (3): 11–13.
- [4] 谭惠丽, 张超英, 刘慕仁, 等. 主干道十字交叉路口交通流研究 [J]. 广西师范大学学报 (自然科学版), 2003, 21 (4): 5–9.
- [5] Nagatani T. Kinetic Clustering and Jamming Transitions in a Car-Following Model for Bus Route [J]. Physica A, 2000, 287 (1–2): 302–312.
- [6] Nagel K, Wagner P, Woesler R. Still Flowing: Approaches to Traffic Flow and Traffic Jam Modeling [J]. Operations Research, 2003, 51 (5): 681–710.
- [7] Roters L, Usadel K D, Lubeck S. Critical Behavior of a Traffic Flow Model [J]. Physical Review E, 1999, 59 (3): 2 672–2 676.
- [8] Tzila Shamir. How Should an Autonomous Vehicle Overtake a Slower Moving Vehicle: Design and Analysis of an Optimal Trajectory [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49 (4): 607–610.
- [9] 张鹏, 刘儒勋. 交通流问题的有限元分析与模拟 [J]. 计算物理, 2003, 20 (2): 130–136.
- [10] 戴世强, 雷丽, 董力耘. 高架路匝道附近的交叉口交通流分析 [J]. 力学学报, 2003, 35 (5): 513–518.
- [11] 朱胜华, 胡福乔, 施鹏飞. 平面交叉路口交通信号控制策略研究 [J]. 计算机工程与应用, 2003, 39 (26): 211–214.
- [12] 王正, 刘安. 平交路口多相位自适应控制的实时 OD 递算模型 [J]. 同济大学学报, 1998, 26 (2): 172–175.
- [13] 陈群, 晏克非. 基于遗传算法的城市交叉口实时信号控制研究 [J]. 交通与计算机, 2005, 23 (1): 15–18.
- [14] 焦朋朋, 陆化普, 刘颖, 等. 基于交叉路口的动态 OD 反推模型与算法研究 [J]. 土木工程学报, 2004, 37 (9): 100–103.
- [15] 王新伟, 王成道. 交叉路口车辆流模型及其交通信号灯的控制策略 [J]. 上海铁道大学学报 (综合版), 2000, 21 (6): 93–98.
- [16] 黄辉先, 史忠科. 城市单交叉路口交通流实时遗传算法优化控制 [J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21 (3): 102–106.
- [17] 承向军, 杨肇夏. 一种分布式交通信号控制方法及仿真实现 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (8): 1970–1973, 1976.
- [18] 谭国贤, 翁小雄, 姚树申, 等. 城市交叉路口的短时交通流建模预测 [J]. 交通与计算机, 2005, 23 (1): 26–30.
- [19] 韩凤春, 刘东, 曹金璇, 等. 城市交叉口混合交通流特性及提高通行能力对策研究 [J]. 中国人民公安大学学报 (自然科学版), 2004, 10 (2): 93–96.
- [20] 石建军, 奚武武. 在地理信息系统中建立路口仿真模型 [J]. 公路交通科技, 2003, 20 (5): 100–103.
- [21] 薛国新, 顾怀中. 用固支梁挠度曲线模拟高速路基本超车过程 [J]. 力学与实践, 2003, 25 (6): 31–32.
- [22] 薛国新, 顾怀中. 高速公路交通流问题的分段固支梁挠度曲线模型 [J]. 系统仿真学报, 2003, 15 (12): 1 796–1 798.
- [23] Guoxin Xue, Hongyuan Liu, Zhenghua Ma, et al. Simulation on Moving Vehicles on a Highway by Segmental Fixed-end-Beam Model [A]. Wang Shunsheng, Lu Qin. Proceeding of the 9th Joint International Computer Conference, JICC 2003 [C]. Zhuhai: Zhuhai Publishing House, 2003. 34–39.
- [24] Guoxin Xue, Zhenghua Ma, Huaizhong Gu. Simulation the Basic Overtaking Process of a Highway with the Deflection Curve of a Fixed-end-beam [A]. Wang Shunsheng, Lu Qin. Proceeding of the 9th Joint International Computer Conference, JICC 2003 [C]. Zhuhai: Zhuhai Publishing House, 2003. 308–310.
- [25] 薛国新. 高速路超车过程的推广固支梁挠度曲线模型 [J]. 江苏工业学院学报, 2005, 17 (2): 7–8.
- [26] 薛国新. 一种新的一维无格子超车跟车仿真模型 [J]. 计算机仿真, 2005, 22 (12): 227–229.