

文章编号: 1671-1637(2008)01-0089-08

# 路段平均行程时间估计方法

张和生<sup>1,2</sup>, 张毅<sup>3</sup>, 胡东成<sup>3</sup>

(1 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044; 3 清华大学 自动化系, 北京 100084)

**摘要:** 为了有效利用线圈检测数据, 精确估计路段平均行程时间, 提出了一种路段平均行程时间估计方法。将路段平均行程时间分为平均行驶时间、平均排队时间和平均通过路口时间三部分。考虑线圈埋设的特点, 通过估计平均行驶速度得到平均行驶时间。用分段时齐 Poisson 过程描述车辆驶入路段过程和驶离过程, 用 Markov 排队模型描述车辆排队过程, 用生灭过程描述排队车辆数, 得到车辆排队模型, 计算了路段有、无初始排队的平均排队时间。基于选取与路口相关的饱和流率和平均车长, 计算了平均通过路口时间。计算结果表明: 平均行程时间估计值与实测值的误差小于 12%, 说明路段平均行程时间估计方法可行。

**关键词:** 智能交通系统; 平均行程时间; 线圈数据; Markov 排队模型; Poisson 过程

**中图分类号:** U491.1 **文献标识码:** A

## Estimation method of average travel time for road sections

Zhang He-sheng<sup>1,2</sup>, Zhang Yi<sup>3</sup>, Hu Dong-cheng<sup>3</sup>

(1 School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2 State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University,

Beijing 100044, China; 3 Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In order to availably utilize loop data and estimate the average travel time of road sections accurately and quickly, an estimation method of average travel time was proposed. Average travel time was divided into average running time, average queue delay and average crossing intersection time. Average running time was calculated by using average speed based on taking account of the installation type differences of loops. Piece-wise time homogeneous Poisson process was used to describe the arrival and departure processes of vehicles, Markov model was used to describe the queue process of vehicles, birth and death process was used to model vehicles' number in queue, and two kinds of average queue times with initial queue and no initial queue were computed. Average crossing intersection time was computed based on average vehicle length and saturation volume rate at intersection. Computation result shows that the relative error between the measure value and computation value of average travel time is less than 12%, so the method is feasible. 1 tab, 9 figs, 14 refs.

**Key words:** intelligent transportation systems; average travel time; loop data; Markov queue model; Poisson process

**Author resume:** Zhang He-sheng(1970-), male, PhD, associate professor, +86-10-51684052, hszhang@bjtu.edu.cn.

收稿日期: 2007-07-28

基金项目: 国家 863 计划项目(2006AA11Z231); 国家 973 计划项目(2006CB705506); 国家自然科学基金项目(60374059); 轨道交通控制与安全国家重点实验室开放课题项目(SKI2007K011); 北京交通大学科技发展基金项目(DQJ05007)

作者简介: 张和生(1970-), 男, 河北隆尧人, 北京交通大学副教授, 工学博士, 从事检测技术、控制工程与信息处理研究。

## 0 引 言

路段平均行程时间是反映路段交通状态的重要指标,是进行交通控制和交通诱导的基础<sup>[1]</sup>,在先进的出行者信息系统 ATIS(advanced traveler information system)和先进的交通管理系统 ATMS(advanced traffic management system)中有广泛应用。

常用的路段平均行程时间估计方法大多直接采用线圈检测数据,包括历史趋势法<sup>[2]</sup>、神经网络法<sup>[3]</sup>、卡尔曼滤波法<sup>[4]</sup>、统计法<sup>[5]</sup>、二次函数型以及综合估计法<sup>[6]</sup>等。线圈数据的优点是能够反映进入路段的所有车辆的状态,从统计角度看样本数量充足。然而线圈数据是截面数据,路段平均行程时间则是反映路段区间的交通参数,因此,直接从线圈的截面数据估计区间参数需要有效的方法。

城市交通系统是涉及人、车、路的复杂动态系统<sup>[6]</sup>。交通信号配时和路口物理特性等因素对于路段行程时间有一定影响,因此,在时变交通系统中准确估计路段行程时间需要考虑多种影响路段行程时间的因素<sup>[7]</sup>。

本文针对有信号灯控制的交通路网,主要研究短期行程时间估计问题,考虑了信号灯配时变化和交叉口饱和和流率的差异对路段行程时间的影响,采用分段时齐 Poisson 过程描述车辆驶入路段过程和驶离路口过程,采用 Markov 排队模型描述车辆在路段排队过程,采用北京 SCOOT(split, cycle and offset optimization technique)系统线圈检测数据对北京实际路段的行程时间进行估计,并与出租车 GPS 数据得到的路段行程时间进行比较,证明估计方法的有效性。

## 1 路段平均行程时间估计

### 1.1 路段平均行程时间组成

对于有信号控制的城市路网主干道,路段平均行程时间由三部分构成:在路段上的平均行驶时间、在路口的平均排队时间与通过下游路口的平均通过时间。其中,排队时间是重要的时变参数,对准确估计路段平均行程时间影响较大。文献[8]指出:排队时间由确定部分和随机部分构成,当进行较长时间的行程时间估计时(5~30 min),随机成分是整个排队时间的主要部分,不可忽略;当进行短期行程时间估计时(1~5 min),由于能够估计平均排队长度和车辆延误,随机成分可以忽略。

考虑实际交通系统检测数据特点,如北京

SCOOT 系统,把实时线圈检测数据整合为 5 min 一个时段来估计路段平均行程时间,为表示方便,用变量  $k$  表示  $[t_k, t_{k+1}]$  ( $k=1, 2, \dots, 288$ ) 时段。路段在第  $k$  时段估计的所有车辆平均行程时间为

$$T_L(k) = T_R(k) + T_Q(k) + T_P(k) \quad (1)$$

式中:  $T_R(k)$  为所有车辆的路段平均行驶时间;  $T_Q(k)$  为所有车辆的平均排队延误时间;  $T_P(k)$  为所有车辆通过路口的平均时间。

### 1.2 路段平均行驶时间估计

#### 1.2.1 路段平均行驶时间估计

通常,路段平均行驶时间指车辆进入路段行驶到下游路口排队队尾的时间,在图 1 中为通过  $AB$  段的平均时间。考虑到排队车辆在绿灯期间,以饱和和流率驶离路口,因此,在平均行程时间估计中,车辆行驶时间是从路段检测器至停车线的距离(图 1 中  $AC$  段)除以平均行驶速度,而路段中排队和其他延误时间全部归算到排队延误时间中。

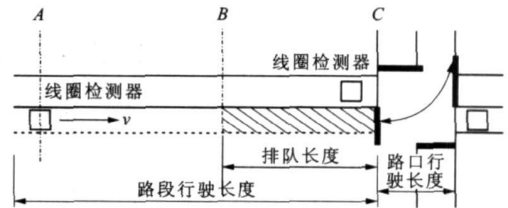


图 1 路段

Fig. 1 Road sections

$T_R(k)$  为路段长度  $L$  与路段平均行驶速度  $\bar{v}_s(k)$  之比,即

$$T_R(k) = \frac{L}{\bar{v}_s(k)} \quad (2)$$

这样,路段平均行驶时间估计转化为路段平均行驶速度  $\bar{v}_s(k)$  的估计。

#### 1.2.2 通过路口平均时间估计

$T_P(k)$  为路口长度  $L_l$  除以饱和流率与车长,即

$$T_P(k) = \frac{L_l}{\mu_k \bar{l}_k} \quad (3)$$

式中:  $\bar{l}_k$  为第  $k$  时段平均通过路口车辆的平均车长;  $\mu$  为车辆通过路口的饱和流率。不同路口由于物理参数不同,饱和流率有所差异<sup>[9]</sup>。

#### 1.2.3 平均排队时间估计

排队时间估计的基础是车辆排队模型,而模型选择对估计精度影响较大。本文采用 Markov 排队模型描述车辆进入路段与驶离路段的过程,在此基础上通过求排队模型的稳态解来进行排队时间估计。

## 2 基于线圈数据估计行驶速度

### 2.1 线圈埋设方式

从线圈数据估计行驶速度需要知道线圈埋设方式,北京 SCOOT 系统中线圈埋设在上游路口出口且为单线圈检测方式,见图 1。

### 2.2 平均行驶速度估计

采用单线圈估计平均行驶速度就是利用线圈检测的流量、占有率与平均车长等数据估计路段平均行驶速度,其基本关系为

$$O_k = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{N_k} \frac{l_j}{v_{sj}} \quad (4)$$

式中:  $O_k$  为第  $k$  时段道路时间占有率;  $T$  为该时段时间/5min;  $N_k$  第  $k$  时段通过线圈的全部车辆数;  $l_j$  为第  $j$  辆车的有效车长(线圈长度和车辆长度之和);  $v_{sj}$  为第  $j$  辆车穿越线圈速度。

由于实际进入路段车辆的差异和其他随机因素,式(4)并没有在实际当中得到应用。在实际交通工程中,实用的是 Athol 等人提出的忽略相邻采样间隔内车长影响的常量  $g$  因子算法<sup>[10]</sup>

$$\bar{v}_s(k) = \frac{N_k}{O_k g T} \quad (5)$$

式中:  $g$  为常量因子,在华盛顿运输部(WSDOT)开发的旅行者信息系统中,  $g$  取为 2.40,在 Chicago 交通系统中心,  $g$  取为 1.90<sup>[11]</sup>。

常量  $g$  因子算法尽管简单,但也存在  $g$  因子误差问题。Wang 等提出将常量  $g$  因子看成采样间隔内平均车长的函数<sup>[12]</sup>,即  $g$  因子与平均车长互为倒数。将式(4)改写为

$$O_k = \frac{1}{T} \bar{l}_k \sum_{j=1}^{N_k} \frac{1}{v_{sj}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得平均行驶速度为

$$\bar{v}_s(k) = N_k \left\langle \sum_{j=1}^{N_k} \frac{1}{v_{sj}} \right\rangle = \frac{N_k \bar{l}_k}{T O_k} \quad (7)$$

不同城市路网的车辆差异较大,在取平均车长时,需要根据不同路网的特点进行选择。

## 3 路段排队时间估计

### 3.1 理论模型

#### 3.1.1 车辆在路段的排队分析

从排队论的角度将车辆作为“顾客”,路口信号灯作为“服务台”,车辆进入路段过程是输入过程,车辆在路段排队等待遵守排队规则,车辆驶出口口过程是信号灯服务过程。在建立路段排队估计模型

时,需要分析驶入车辆和驶出车辆的运行特点以及车辆在路段排队和等待通过的特点,包括车辆驶入路段的方式及其时间分布、车辆排队的特点和车辆驶离的方式及其时间分布。

由于北京市直行、左转、右转车道划分明确,可认为每辆车进入路段时都不改变车道,车辆进入路段是间隔顺序到达,每辆车到达路段相互独立,线圈检测到的车道车流量就是进入路段排队的车流量,车辆进入路段的时间间隔与时间段有关。从整体上看,进入路段车辆数是非时齐(非平稳)随机过程,可用非时齐 Poisson 过程进行描述。

在正常情况下,车辆在路段行驶时不更换车道,车辆进入排队系统后一定是等待绿灯放行,且驶出车道的顺序是先到先出方式。由于路段长度限制,路段排队是有限的,设路段排队最大容量为  $m$ ,由路段长度和平均车长决定

$$m = \frac{\bar{l}}{l} \quad (8)$$

式中:  $\bar{l}$  为平均车长。

尽管每个路段有多个车道,但每个车道排队由一个信号灯相位进行控制,因此,可认为每个车道排队对应一个服务台。车辆驶出路段是有间隔顺序的,其驶出时间则是随机的。考虑到在任何时间,驾驶员都想以最快速度驶离路段的排队,因此,可认为车辆以饱和流率在绿灯时间内驶离路口。通过以上分析,对路段排队时间的估计可采用 Markov 排队模型  $M/M/1/m/\infty$  描述。

#### 3.1.2 车辆到达和驶离时间分布

车辆到达路段的过程服从强度为  $\lambda(k)$  的非时齐 Poisson 过程,  $\lambda(k)$  是第  $k$  时段内车辆到达率,即在该时段单位时间内平均到达的车辆数。车辆相继到达的时间间隔服从均值为  $1/\lambda(k)$  的负指数分布,其证明过程参阅文献[13]。车辆驶离路段也是非时齐 Poisson 流,服从强度为  $\mu(k)$  非时齐 Poisson 过程,  $\mu(k)$  为第  $k$  时段车辆驶离路段的平均驶离率(单位时间内车辆驶离排队的平均数)。由于车辆仅在绿灯期间驶离路段,因此,  $\mu(k)$  计算式为

$$\mu(k) = \bar{g}'(k) \mu \quad (9)$$

式中:  $\bar{g}'(k)$  为该时段内平均绿信比。

#### 3.1.3 排队车辆数的变化过程

进入路段车辆数和驶出路段车辆数都可用 Poisson 过程描述,则路段排队车辆数是生灭过程。设  $t = t_k$  时,路段上有  $n$  ( $n < m$ ) 辆车在排队,  $[t_k, t_{k+1}]$  时段内若  $t$  充分小,则路段排队车辆数的

变化有 3 种可能:  $n \rightarrow n+1$ ,  $n \rightarrow n$ ,  $n \rightarrow n-1$ , 则排队车辆数变化概率为

$$\begin{cases} P_{n,n+1}(t) = \lambda(k)t + o(t) \\ P_{n,n-1}(t) = \mu(k)t + o(t) \\ P_{n,n}(t) = 1 - [\lambda(k) + \mu(k)]t + o(t) \\ \sum_{|n-i| \geq 2} P_{n,i}(t) = o(t) \end{cases} \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} \left[ \frac{o(t)}{t} \right] = 0$$

在  $t_k + t$  时刻路段中有  $n$  辆车的概率为

$$P_n(t_k + t) = P_n(t_k)[1 - \lambda(k)t - \mu(k)t] + P_{n+1}(t_k)\mu(k)t + P_{n-1}(t_k)\lambda(k)t + o(t) \quad (11)$$

整理并使  $t \rightarrow 0$ , 得到  $P_n(t)$  的微分方程为

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -P_n(t)[\lambda(k) + \mu(k)] + P_{n+1}(t)\mu(k) + P_{n-1}(t)\lambda(k) \quad (12)$$

解式(12)时需要初始条件, 由于  $t = t_k$  时, 路段上排队车辆不一定为 0, 所以考虑路段排队车辆数由 0 到  $n$  的变化过程时, 引入记号  $\lambda_n$  和  $\mu_n$  表示车辆排队数为  $n$  时, 对应车辆到达排队的平均到达率和驶离排队的平均驶离率。此时将式(12)推广为在任意时刻路段车辆排队数为  $n$  的概率微分方程为

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = -(\lambda_n + \mu_n)P_n(t) + \mu_{n+1}P_{n+1}(t) + \lambda_{n-1}P_{n-1}(t) \quad (13)$$

$n$  为 0 时可得

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_0 P_0(t) + \mu_1 P_1(t) \quad (14)$$

路段排队数不超过路段最大容量, 即

$$\sum_{n=1}^m \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n} < C \quad (15)$$

式中:  $C$  为根据路段长度和车辆平均长度确定的常数。因为车辆在路段排队数的极限分布存在, 所以

$$P_0 = \left[ 1 + \sum_{n=1}^m \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n} \right]^{-1} \quad (16)$$

$$P_n = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n} P_0 \quad (17)$$

$$C_n = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n} \quad (18)$$

$$C_0 = 1$$

则式(16)、(17)变为

$$P_0 = 1 \bigg/ \sum_{n=0}^m C_n \quad (19)$$

$$P_n = C_n P_0 \quad (20)$$

### 3.2 $M/M/1/m/\infty$ 排队时间

采用 Markov 排队模型  $M/M/1/m/\infty$  描述路段排队情况, 车辆输入过程为到达率  $\lambda(k)$  非时齐 Poisson 分布, 车辆驶离时间为驶离率  $\mu(k)$  负指数分布, 单服务台。实际计算过程中由于仅有 5 min 线圈检测数据和相应的信号灯配时数据, 因此, 在第  $k$  时段内, 取  $\lambda(k)$  为该时段的平均到达(驶入)率

$$\lambda(k) = \frac{Q_k}{t_{k+1} - t_k} \quad (21)$$

$$t_{k+1} - t_k = 5 \text{ min}$$

式中:  $Q_k$  为车流量。

取  $\mu(k)$  为该时段的平均绿灯时间与饱和流率的乘积, 即

$$\mu(k) = \frac{\sum g(k)}{t_{k+1} - t_k} \quad (22)$$

式中:  $\sum g(k)$  为该时段绿灯时间总和。

由于到达率和驶离率均取一个采样时段的平均值, 则路段排队由非时齐 Poisson 分布变为分段时齐 Poisson 分布。具体计算路段排队时, 分为两种情况: 路段初始无排队和路段初始有排队。

#### 3.2.1 路段初始无排队

当路段初始无排队时, 路段一般能够容纳该时段的驶入车流, 使用  $M/M/1/m/\infty/\infty$  排队模型。引入表示单位时间车辆到达率和驶离率比值的函数  $\rho(k)$  为

$$\rho(k) = \frac{\lambda(k)}{\mu(k)} \quad (23)$$

此时, 排队系统是典型生灭过程, 利用式(16)、(17)得

$$P_0 = 1 \bigg/ \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n(k) = 1 - \rho(k) \quad (24)$$

$$P_n = \rho^n(k) P_0 = [1 - \rho(k)] \rho^n(k) \quad (25)$$

则可计算路段平均车辆数, 期望值记为  $L_s(k)$

$$L_s(k) = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=1}^{\infty} n [1 - \rho(k)] \rho^n(k) = \frac{\rho(k)}{1 - \rho(k)} = \frac{\lambda(k)}{\mu(k) - \lambda(k)} \quad (26)$$

路段中等待驶出车辆的平均数(排队长度均值)的期望值为

$$L_q(k) = \sum_{n=0}^{\infty} (n-1) P_n = \sum_{n=1}^{\infty} n P_n - \sum_{n=1}^{\infty} P_n = \frac{\rho^2(k)}{1 - \rho(k)} = \frac{\lambda^2(k)}{\mu(k)[\mu(k) - \lambda(k)]} \quad (27)$$

车辆在路段中停留时间的期望值为

$$T_s(k) = \frac{L_s(k)}{\lambda(k)} = \frac{1}{\mu(k) - \lambda(k)} \quad (28)$$

车辆在路段中排队等待时间的期望值为

$$T_q(k) = \frac{L_q(k)}{\lambda(k)} = \frac{\lambda(k)}{\mu(k)[\mu(k) - \lambda(k)]} \quad (29)$$

### 3.2.2 路段初始有排队

当路段初始排队长为  $L_q^{k-1}$  时, 可以利用平均车长计算初始排队车辆数, 即

$$m_0(k) = L_q^{k-1} \quad (30)$$

路段可容纳车辆数变为

$$m_1(k) = m - m_0(k)$$

因此, 使用  $M/M/m_1(k)/\infty/\infty$  排队模型, 此时排队系统也是典型生灭过程, 利用式(16)、(17)得

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{m_1(k)} \rho^n(k)} = \frac{1 - \rho(k)}{1 - \rho^{m_1(k)+1}(k)} \quad (31)$$

$$P_n = \rho^n(k) P_0 = \rho^n(k) \frac{1 - \rho(k)}{1 - \rho^{m_1(k)+1}(k)} \quad (n \leq m_1(k)) \quad (32)$$

则可计算路段平均车辆数, 其期望值为

$$L_s(k) = \sum_{n=0}^{m_1(k)} n P_n = \frac{\rho(k)}{1 - \rho(k)} - \frac{[m_1(k) + 1] \rho^{m_1(k)+1}(k)}{1 - \rho^{m_1(k)+1}(k)} \quad (33)$$

在通常的  $M/M/m_1(k)/\infty/\infty$  排队模型计算中, 考虑到容量限制, 会有一些车辆不能进入该路段, 所以通常要计算有效驶入率。将 SCOOT 检测线圈安装在路段上游, 因而其检测数据就是有效驶入率, 可得路段中等待驶出车辆的平均数(排队长均值)的期望值为

$$L_q(k) = L_s(k) - \frac{\lambda(k)}{\mu(k)} = \frac{\rho^2(k)}{1 - \rho(k)} - \frac{[m_1(k) + 1] \rho^{m_1(k)+1}(k)}{1 - \rho^{m_1(k)+1}(k)} \quad (34)$$

车辆在路段中停留时间的期望值为

$$T_s(k) = \frac{L_s(k)}{\lambda(k)} \quad (35)$$

车辆在路段中排队等待时间的期望值为

$$T_q(k) = \frac{L_q(k)}{\lambda(k)} \quad (36)$$

## 4 实例分析

选择北京 SCOOT 系统的 RSK 控制子区的府右街南口至南长街 2 条路段进行行驶速度估计, 见图 2,

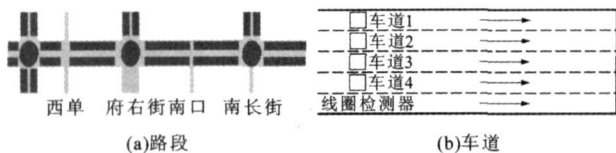


图2 选择路段

Fig. 2 Selected links

图 2(a) 为所选路段, 图 2(b) 为所选路段的车道结构。

估算数据来自北京 SCOOT 系统, 验证数据来自北京市出租车 GPS 系统数据。SCOOT 系统数据采集时间为 2005 年 12 月 26 日, GPS 数据采集时间为 2005 年 12 月 26 日 6:30~9:30。

### 4.1 路段平均行驶速度和排队时间

估计平均行驶时间需根据具体情况设定相关参数, 特别是车辆平均长度。北京 SCOOT 系统检测范围是二环路以内, 由于进入二环的车辆大多为小汽车和客车, 其车辆长度的分布比较均匀。在实际交通工程中, 选取 5.5 m 作为车辆长度平均值, 加上 2.0 m 的检测线圈长度, 平均有效车长为 7.5 m。使用式(7)计算平均行驶速度, 图 3 为府右街南口至南长街路段 6:30~21:30 路段平均行驶速度计算结果。

根据文献[9]有关

饱和流率和车道关系的

建议值, 四车道路段

路口饱和流率为

$1900 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$ 。

文献[9]中对长安街

路口计算排队长度时

采用饱和流率为

$1750 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$ 。

在本文计算中, 采用饱

和流率为  $1800 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$ ,

每 5 min 为

$150 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$ 。根据一天中车流量的规律,

从晚 10:00 到早 6:30 时段, 由于车流量不大, 可按

无车辆排队计算排队时间, 从早 6:30 开始, 采用有

初始排队的计算方法, 第  $k-1$  时段需要利用第  $k$  时

段的计算结果。

根据式(21)结合该时段车流量计算车辆到达

率, 根据式(22)结合信号配时(计算南长街路口配

时, 每个时段取平均绿信比)计算车辆驶离率。从

6:30 开始, 采用有初始排队的计算公式进行计算。

如在顺序计算过程中, 某时段排队时间大于信号灯

东西方向绿灯时间, 则

排队时间减去信号灯

东西方向绿灯时间, 再

加入下一个时段的排

队时间。根据这样的

计算方法计算出的从

早 6:30~9:30 时段的

车辆排队时间/s, 见图

4。

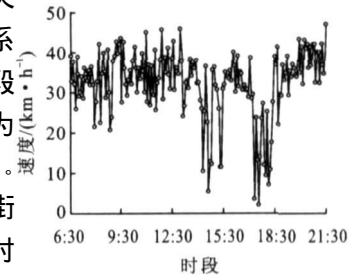


图3 平均行驶速度

Fig. 3 Average travel speed

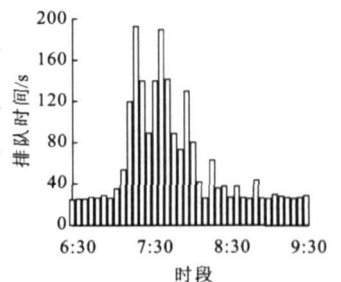


图4 平均排队时间

Fig. 4 Average queueing time

4.2 路段平均行程时间

在路段平均行驶速度和路段平均排队时间基础上计算路段行程时间,此时式(1)变为

$$T_L(k) = T_R(k) + T_Q(k) + T_P(k) = \frac{L}{v_s(k)} + \frac{L_q(k)}{\lambda(k)} + \frac{L_l}{\mu_l} \quad (37)$$

南长街路口长度取为 19 m, 饱和流率取为 1 800 veh · (h · lane)<sup>-1</sup>, 通过路口速度为 2.5 m · s<sup>-1</sup>, 通过路口时间为 7.6 s, 府右街南口至南长街路段 2005 年 12 月 26 日上午 6:30~9:35 的路段平均行驶时间、排队时间、通过路口时间与平均行程时间计算结果见表 1。

对于路段行程时间估计结果,采用出租车 GPS 数据计算的 5 min 平均行程时间进行验证。由于目前已经装车的 GPS 接收器数量和通信的问题,每个时段可用于路段行程时间估计的有效 GPS 数据较少。但由于 GPS 数据反映了车辆在路段的全部行驶过程,用它可以作为从线圈的截面数据估计路段区间的平均行程时间的参照。特别是在车流量早高峰时段,由于车辆运行“流”的特性明显,即使样本数较少,也能反映车辆总体的运行情况。

在 GPS 数据量较小的情况下,利用样本中位数估计该时段进入该路段的全部车辆的平均行程时间,见图 5。同时可计算出 GPS 数据估算的置信度,具体处理方法见文献[13-14]。

从图 5 可以看出,线圈数据和 GPS 数据估计路段平均行程时间有一定差别,但差异值不大(最大相对误差小于 8%)。从 GPS 数据估算的结果可以推断,本文从线圈估计平均行程时间的方法是合理的,能够表示车辆在某一路段的平均行程时间。

另外,利用本文方法还对北京闹市口、西单、府右街、南长街、新文化街、西绒线、长椿街、宣武门、和平门、供电局等路口间的路段平均行程时间进行了估算,与出租车 GPS 数据进行对比,误差不大(最大相对误差小于 12%),说明本文方法在计算交通物理路段行程时间上是可行的。

表 1 计算结果

Tab. 1 Computation result

时段	行驶时间/s	排队时间/s	通过路口时间/s	平均行程时间/s
6:30~6:35	66 92	24 55	7.6	99 07
6:35~6:40	79 90	25 22	7.6	112 72
6:40~6:45	69 60	25 45	7.6	102 65
6:45~6:50	81 56	27 14	7.6	116 30
6:50~6:55	100 98	26 12	7.6	134 70
6:55~7:00	67 39	28 82	7.6	103 81
7:00~7:05	90 00	26 38	7.6	123 98
7:05~7:10	87 00	35 00	7.6	129 60
7:10~7:15	77 03	53 33	7.6	137 96
7:15~7:20	91 58	120 00	7.6	219 18
7:20~7:25	72 50	193 00	7.6	273 10
7:25~7:30	75 40	140 00	7.6	223 00
7:30~7:35	79 65	88 82	7.6	176 07
7:35~7:40	73 67	140 00	7.6	221 27
7:40~7:45	82 08	190 00	7.6	279 68
7:45~7:50	71 58	141 54	7.6	220 72
7:50~7:55	81 96	88 33	7.6	177 89
7:55~8:00	122 01	33 04	7.6	162 65
8:00~8:05	94 39	130 00	7.6	231 99
8:05~8:10	80 13	80 34	7.6	168 07
8:10~8:15	62 14	41 43	7.6	111 17
8:15~8:20	116 52	26 12	7.6	150 24
8:20~8:25	75 46	62 86	7.6	145 92
8:25~8:30	65 76	35 79	7.6	109 15
8:30~8:35	74 15	37 65	7.6	119 40
8:35~8:40	91 21	26 98	7.6	125 79
8:40~8:45	64 26	37 65	7.6	109 51
8:45~8:50	87 00	26 67	7.6	121 27
8:50~8:55	126 55	25 83	7.6	159 98
8:55~9:00	109 89	43 08	7.6	160 57
9:00~9:05	69 05	26 02	7.6	102 67
9:05~9:10	66 92	25 71	7.6	100 23
9:10~9:15	61 27	30 17	7.6	99 04
9:15~9:20	65 91	28 33	7.6	101 84
9:20~9:25	62 14	26 90	7.6	96 64
9:25~9:30	60 00	26 19	7.6	93 79
9:30~9:35	94 91	26 82	7.6	129 33

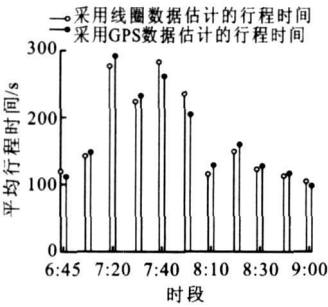


图5 平均行程时间比较  
Fig.5 Comparison of average travel times

4.3 路段排队时间估计的进一步讨论

4.3.1 流量对排队时间的影响

比较府右街南口至南长街路段 5 min 内进入路段车流量与平均排队时间,见图 6。可以看出,车流

量较小时,平均排队时间与驶入路段车辆数有近似正比关系;当驶入路段车流量达到一定值后,如  $100 \text{ veh} \cdot (5\text{min})^{-1}$ ,排队等待时间增加幅度较大,约为半个信号周期(南长街路口信号周期在  $100 \sim 130 \text{ s}$ 间变化,相位仅有东西和南北两相),排队等待时间峰值时间比车流量峰值时间长。

#### 4.3.2 初始排队对排队时间的影响

由于某时段驶入车辆较多时,会有一些车辆由于排队等待时间过长而对下一个时段的车辆排队造成影响,因而初始排队使路段排队时间峰值被延长,见图7。

#### 4.3.3 不同饱和和流率对排队时间的影响

在车辆到达率和信号灯绿信比不变的情况下,不同饱和和流率决定了车辆的驶离率。图8为在饱和流率为  $1800 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$ 和饱和流率为  $1900 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$ 时路段的排队时间。在车流量不大时,计算的结果是接近的;当车流量较大时大于  $100 \text{ veh} \cdot (5\text{min})^{-1}$ ,两者计算结果差异较大。从出租车GPS数据可知,采用饱和流率为  $1800 \text{ veh} \cdot (\text{h} \cdot \text{lane})^{-1}$ 的计算结果符合实际排队时间。

#### 4.3.4 影响分析

从以上讨论可以看出,路段平均排队时间与车流量、初始排队和饱和流率有密切关系。另外,在时间计算中,还用到了南长街路口配时,可见信号配时也对排队时间有影响。

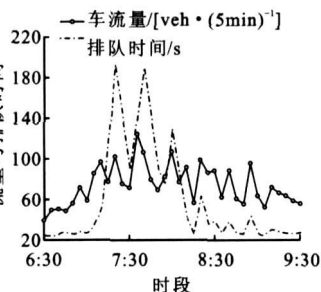


图6 车流量与平均排队时间

Fig. 6 Flow volume and average travel time

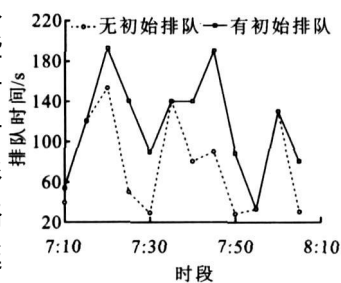


图7 初始排队对排队时间的影响

Fig. 7 Influence of initial queue on average travel time

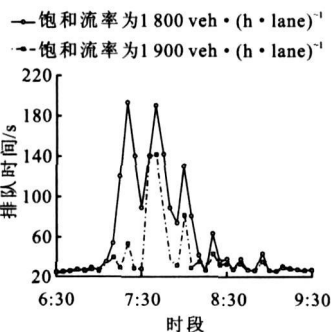


图8 不同饱和流率下平均排队时间比较

Fig. 8 Comparison of average queueing times under different saturation flow rates

#### 4.3.5 平均排队时间和平均行程时间比较

采用线圈估计平均排队时间和平均行程时间比较见图9。从中可以看出,在车流量较大时段,平均排队时间和平均行程时间变化趋势相似,说明路段车流量较大时,排队时间成为车辆通过路段的主要时间;车流量较小时,平均排队时间和平均行程时间变化趋势有所差异,但数值不大。

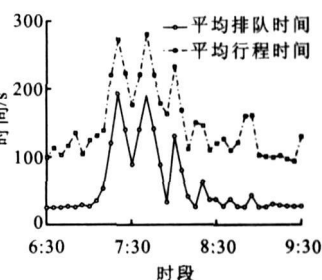


图9 平均排队时间和平均行程时间比较

Fig. 9 Comparison of average queueing time and average travel time

## 5 结语

由于环形线圈仅能够检测路段截面的交通状态,路段平均行程时间为路段区间参数,因此,只能从线圈检测数据中估计路段平均行程时间。为获得准确的估计结果,将平均行程时间分为平均行驶时间、平均排队时间、平均通过路口时间3部分,考虑信号配时、路段下游路口物理参数、初始排队等因素对估计路段行程时间的影响,能够有效利用线圈检测数据得到路段平均行程时间的显示表达式。

由路段平均行程时间计算结果与出租车GPS数据估算的路段平均行程时间相比较可以看出:本文方法在计算动态路段平均行程时间时,能够获得比较准确的结果,并可以用到区域交通状态分析、交通控制和交通诱导系统中。

但本文估算所用参数是基于北京城市路网特点,在计算其他城市路网路段行程时间时,还需要经过试算,以确定饱和流率与通过车辆平均长度等物理参数。另外在用Markov排队模型描述车辆排队仅用了其稳态解,估计行驶速度时有些简化,这些是今后需要继续研究的内容。

## 参考文献:

### References:

- [1] 杨兆升. 关于智能运输系统的关键理论-综合路段行程时间预测的研究[J]. 交通运输工程学报, 2001, 1(1): 65-67.  
Yang Zhao-sheng. Study on the synthetic link travel time prediction model of key theory of ITS[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(1): 65-67. (in Chinese)
- [2] Chien S I, Kuchipudi C M. Dynamic travel time prediction

- with real-time and historic data[ J ]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(6): 608-616.
- [ 3 ] Dharia A, Adeli H. Neural network model for rapid forecasting of freeway link travel time[ J ]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2003, 16(7/8): 607-613.
- [ 4 ] 朱 中, 杨兆升. 基于卡尔曼滤波理论的实时行程时间预测模型[ J ]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(9): 74-78.  
Zhu Zhong, Yang Zhao-sheng. A real-time travel time estimation model based on BP neural network[ J ]. Systems Engineering—Theory & Practice, 1999, 19(9): 74-78. (in Chinese)
- [ 5 ] Dailey D J. Travel-time estimation using cross-correlation techniques[ J ]. Transportation Research Part B, 1993, 27(2): 97-107.
- [ 6 ] 徐 猛, 史忠科. 基于二次函数型路段行程时间模型描述的交通输出流特性[ J ]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 77-81.  
Xu Meng, Shi Zhong-ke. Behavior of traffic outflows under description of quadratic link travel time model[ J ]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 77-81. (in Chinese)
- [ 7 ] Nam D H, Drew D R. Traffic dynamics: method for estimating freeway travel times in real time from flow measurements[ J ]. Journal of Transportation Engineering, 1996, 122(3): 185-191.
- [ 8 ] Ran B, Rouphail N M, Tarko A, et al. Towards a class of link travel time functions for dynamic assignment models on signalized networks[ J ]. Transportation Research Part B, 1997, 31(4): 277-290.
- [ 9 ] 荣 建, 何 民, 陈春妹. 信号交叉口排队长度动态计算方法研究[ J ]. 中国公路学报, 2002, 15(3): 101-103.  
Rong Jian, He Min, Chen Chun-mei. Dynamic model of calculating queue length at signalized intersection[ J ]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(3): 101-103. (in Chinese)
- [ 10 ] Athol P. Interdependence of certain operational characteristics within a moving traffic stream[ J ]. Highway Research Record, 1965, 72: 58-87.
- [ 11 ] Dailey D J. A statistical algorithm for estimating speed from single loop volume and occupancy measurements[ J ]. Transportation Research Part B, 1999, 33(5): 313-322.
- [ 12 ] Wang Yin-hai, Nihan N L. Can single-loop detectors do the work of dual-loop detectors? [ J ]. Journal of Transportation Engineering, 2003, 129(2): 169-176.
- [ 13 ] 张和生, 张 毅, 温慧敏, 等. 利用 GPS 数据估计路段的平均行程时间[ J ]. 吉林大学学报: 工学版, 2007, 37(3): 533-537.  
Zhang He-sheng, Zhang Yi, Wen Hui-min, et al. Estimation approaches of average link travel time using GPS data[ J ]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(3): 533-537. (in Chinese)
- [ 14 ] 张和生. 基于多源数据的交通状态分析方法研究[ D ]. 北京: 清华大学, 2006.

(上接第 88 页)

- [ 13 ] 俞礼军, 严 海, 严宝杰. 最大熵原理在交通流统计分布模型中的应用[ J ]. 交通运输工程学报, 2001, 1(3): 91-94.  
Yu Li-jun, Yan Hai, Yan Bao-jie. Maximum entropy method and its application in probability density function of traffic flow[ J ]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2001, 1(3): 91-94. (in Chinese)
- [ 14 ] Greenwood J A, Landwehr J M, Matalas N C. Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form[ J ]. Water Resources Research, 1979, 15(5): 49-54.
- [ 15 ] Pandey M D. Direct estimation of quantile functions using the maximum entropy principle[ J ]. Structural Safety, 2000, 22(1): 61-79.
- [ 16 ] Shore H. Simple approximations for the inverse cumulative function, the density function and the loss integral of the normal distribution[ J ]. Applied Statistics, 1982, 31(2): 108-114.
- [ 17 ] Hosking J R M, Wallis J R. Regional Frequency Analysis[ M ]. UK: Cambridge University Press, 1997.
- [ 18 ] Hosking J R M. Parameter and quantile estimation for the generalized Pareto distribution[ J ]. Technometrics, 1987, 29(3): 39-49.
- [ 19 ] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics I[ J ]. Physical Review, 1957, 106(4): 620-630.
- [ 20 ] Jaynes E T. Information theory and statistical mechanics II[ J ]. Physical Review, 1957, 108(2): 171-190.
- [ 21 ] Kadane J B. A moment problem for order statistics[ J ]. The Annals of Mathematical Statistics, 1971, 42(2): 45-51.
- [ 22 ] Mallows C L. Bounds on distribution functions in terms of expectations of order statistics[ J ]. The Annals of Probability, 1973, 1(2): 297-303.
- [ 23 ] Shannon C E. A mathematical theory of communication[ J ]. Bell System Technology Journal, 1948, 27(4): 379-423.
- [ 24 ] Shore J E, Johnson R W. Axiomatic derivation of the principle of maximum entropy and the principle of minimum cross-entropy[ J ]. IEEE Transact Information Theory, 1980, 26(1): 26-37.
- [ 25 ] Wu N. The Maximum Entropy Method[ M ]. Berlin: Springer-Verlag, 1997.