

文章编号:1671-1637(2013)02-0120-07

城市快速路车辆检测器数据质量评价与控制方法

李琦¹, 姜桂艳^{1,2}

(1. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130012; 2. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:为了提高车辆检测器数据的准确性,设计了城市快速路车辆检测器数据质量评价与控制方法,提出了一种综合考虑单一地点与流量守恒定律的数据质量评价与控制流程。通过分析路段上下游检测截面的流量累积曲线特性,设计了基于流量累积曲线的数据质量评价方法。以路网所有检测截面累积流量调整值与观测值差的平方和最小为目标函数,以流量累积曲线的特性为约束条件,设计了基于最优化技术的数据质量控制方法。采用某特大城市快速路实测数据对本文方法进行了验证和对比分析。验证结果表明:当引入误差分别为0.025、0.050、0.075、0.100时,采用评价与控制方法的计算结果的平均绝对百分比误差分别为2.40%、3.83%、5.70%、8.26%,评价正确率在97%以上,明显优于其他对比方法。

关键词:交通信息采集;车辆检测器;数据质量评价与控制;流量守恒定律;最优化技术

中图分类号:U491.116

文献标志码:A

Quality evaluation and control method of vehicle detector data on urban expressway

LI Qi¹, JIANG Gui-yan^{1,2}

(1. School of Traffic, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;

2. School of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of vehicle detector data, a quality evaluation and control method of vehicle detector data on urban expressway was proposed. A data quality evaluation and control process was proposed by comprehensive considering a single location and the law of flow conservation. A data quality evaluation method based on flow cumulative curves was proposed by analyzing the characteristics of the flow cumulative curves of upstream and downstream detected sections. With the objective function that the square sum of the difference between the adjusted and the observed flow cumulative value of vehicles for all detected sections in the road network was minimum, and with the restriction condition of the characteristics of flow cumulative curves, a data quality control method based on the optimization techniques was proposed. The evaluation and control method was verified and compared by using the data collected from inductive loop detectors on a megacity urban expressway. Verified result indicates that when the introduced errors are 0.025, 0.050, 0.075, and 0.100, the mean absolute percentage errors computed by the method are 2.40%, 3.83%, 5.70% and 8.26% respectively, and its accuracy is more than 97%, so the method has better precision than comparison methods.

收稿日期:2012-11-23

基金项目:国家自然科学基金项目(51278257);高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110061110034);浙江省自然科学基金项目(LY12F01013)

作者简介:李琦(1985-),男,山东枣庄人,吉林大学工学博士研究生,从事交通信息采集、处理与应用研究。

导师简介:姜桂艳(1964-),女,黑龙江鸡西人,吉林大学教授,工学博士。

1 tab, 9 figs, 14 refs.

Key words: traffic information collection; vehicle detector; data quality evaluation and control; law of flow conservation; optimization technique

Author resumes: LI Qi(1985-), male, doctoral student, +86-431-85095505, liqi19851211@126.com; JIANG Gui-yan(1964-), female, professor, PhD, +86-431-85095505, jianggy@jlu.edu.cn.

0 引言

车辆检测器是指能够感知车辆存在和通过信息的交通传感器,主要包括磁频、波频、视频3种类型。随着智能交通系统的迅速发展,越来越多的道路上安装了车辆检测器,其采集的信息是交通信号配时、交通监控以及交通规划与管理的重要基础^[1]。但是,由于受到检测系统故障、驾驶人违章行驶和不良检测环境等因素的影响,车辆检测器所采集的数据通常不能直接应用于各交通模型^[2],因此,对车辆检测器采集到的交通参数数据进行质量评价与控制显得尤为重要。

流量守恒定律是车流运行应遵守的基本原则之一,但当车辆检测器出现计数偏差时,极有可能会出现问题违背流量守恒定律的现象。在交通拥挤状态识别等对路段截面流量数据精度要求不是很高的应用中,这种偏差可能不会产生大的影响,但对于以路段截面流量数据为基本变量的应用,如OD估计、路段行程时间估计^[3]以及交通信号控制^[4]等交通模型中,这种偏差则会导致比较严重的后果。

Nam等最先研究了流量守恒定律的评价与控制问题,提出利用调整因子法调整下游检测截面的流量数据以满足流量守恒定律^[3],但该方法在选择检测截面时过于主观,而且当连续几个检测截面出现车辆计数偏差时,会产生较大的误差传递;Zuylen等指出了满足流量守恒定律的必要性^[5-7],但没有研究具体的评价与控制方法;Vanajakshi等以相邻检测截面累积流量数据差的平方和最小为目标函数,建立了流量守恒定律优化模型^[8],但当某一检测器流量计数偏差较大时,会出现所有检测截面优化后的累积流量相等的情况,使得控制效果较差。另外,以上研究均没有考虑单一地点的车辆检测器数据质量评价与控制。

针对上述问题,本文在提出车辆检测器数据质量评价与控制流程的基础上,设计相应的流量守恒定律评价与控制方法,并采用实测数据进行验证与对比分析。

1 数据质量评价与控制流程

通常情况下,车辆检测器主要提供流量、速度以及占有率等数据,其中:流量为单位时间内通过道路某一地点的实际车辆数;速度为通过某一地点的所有车辆速度的算术平均值;占有率为检测器被车辆占用时间的总和与观测时间的比值。

单一地点车辆检测器出现数据故障的原因可分为两大类:一类由检测器或传输线路故障引起,通常表现为数据丢失或失真;另一类是由道路中的突发交通事件等对交通状况的干扰引起,表现为交通流的异常波动。根据故障数据的表现,可以分为丢失数据、错误数据与异常交通状况数据3种类型,其中:丢失数据是指特定时间间隔内无法获得全部或部分交通参数数据的情况;错误数据是指在特定时间间隔中发生了不符合常理突变的交通参数数据;异常交通状况数据是由交通事件导致的长期偏离正常状态下交通参数数据变化趋势的数据。在通常情况下,由检测器或传输线路故障引起的数据故障比较容易识别的,而对由交通事件等引起的数据故障的识别相对比较困难。

目前,针对单一地点车辆检测器数据的质量评价与控制研究已较为成熟^[9-13],常用的方法包括阈值法、历史趋势法、移动平均法等。尽管单一地点车辆检测器数据质量评价与控制能够识别出大量的故障数据并进行相应的修复,但当车辆检测器多计或少计的车辆数被视为合理数据时,仍极有可能出现违背流量守恒定律的现象,因此,本文提出了车辆检测器数据质量评价与控制流程,首先对单一地点车辆检测器进行数据质量评价与控制,然后综合考虑一组检测截面,进行流量守恒定律的评价与控制,见图1。

2 基于流量累积曲线的数据质量评价方法

2.1 流量守恒定律

Lighthill等1955年首次提出流量守恒定律的概念,指在特定时间间隔内进入与离开某路段的车辆数之差应等于路段上行驶车辆数的变化,即车辆

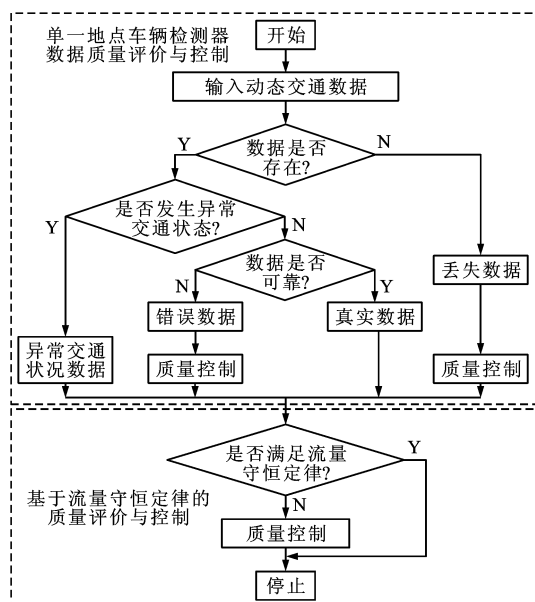


图1 评价与控制流程

Fig. 1 Evaluation and control process

不能凭空产生或消失^[3]。

图2为流量守恒定律示意图,其中: t 时刻上游检测截面 x_1 的流率为 $q(1,t)$;下游检测截面 x_2 的流率为 $q(2,t)$; x_1 与 x_2 之间的路段长度为 d ; $n(t)$ 为 t 时刻该路段上的行驶车辆数; $k(t)$ 为 t 时刻该路段的车流密度。

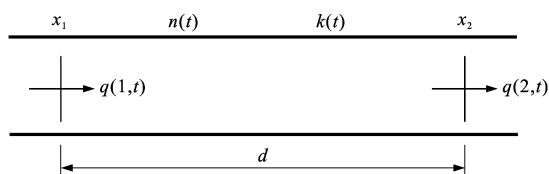


图2 流量守恒定律

Fig. 2 Law of flow conservation

由流量守恒定律可推导出

$$[q - (q + dq)]dt = [k - (k - dk)]dd \quad (1)$$

式中: q 为检测截面交通流率; k 为车流密度。

利用交通流3个参数的规律,可进一步简化为

$$\frac{dk}{dt} + \frac{dq}{dd} = 0 \quad (2)$$

2.2 流量守恒定律评价方法

在实际工况中,准确获取路段上的行驶车辆数几乎不可能,因此,本文提出了基于流量累积曲线的评价方法。分别对路段上下游检测截面流量数据进行累加,并绘制曲线,则流量累积曲线应具有整数、非负、非下降等特性。令 $Q(1,t_n)$ 、 $Q(2,t_n)$ 分别为 n 个时刻($t_l, l=1, 2, \dots, n$)进入或离开路段的累积流量,则有

$$Q(1,t_n) = \Delta t \sum_{l=1}^n q(1,t_l) \quad (3)$$

$$Q(2,t_n) = \Delta t \sum_{l=1}^n q(2,t_l) \quad (4)$$

式中: Δt 为数据采样时间间隔。

依据流量守恒定律,可得

$$\begin{cases} Q(1,t_n) \geq Q(2,t_n) \\ Q(1,t_n) - Q(2,t_n) \leq n_{jam} \end{cases} \quad (5)$$

式中: n_{jam} 为阻塞密度下所对应的路段所能承载的最大行驶车辆数。

综上所述,以路段上下游检测截面的流量累积曲线为基础,违反流量守恒定律共有2种情况:第1种为 $Q(2,t_n)$ 大于 $Q(1,t_n)$,即车辆凭空产生;第2种为 $Q(1,t_n)$ 与 $Q(2,t_n)$ 之差大于 n_{jam} ,即车辆凭空消失。上游或下游检测截面车辆检测器数据故障都有可能产生这两种偏差。

基于以上分析,将式(5)作为评价车辆检测器数据是否遵守流量守恒定律的标准,当上下游检测截面累积流量数据不能同时满足式(5)时,视为违反流量守恒定律。

3 基于最优化技术的数据质量控制方法

3.1 最优化问题描述

当有 I 个检测截面的路网被识别出违反了流量守恒定律时,质量控制的目标是调整流量值,使路网在任意时刻都满足流量守恒定律,因此,应综合考虑 I 个检测截面。本文提出以累积流量调整值与观测值差的平方和最小为目标函数,以流量累积曲线的特性为约束条件,提出如下最优化控制问题

$$Z_I = \min \sum_{i=1}^{I-1} [Q_y(i,t) - Q(i,t)]^2 \quad (6)$$

$$\text{s. t. } Q_y(i,t) - Q_y(i+1,t) \geq 0$$

$$Q_y(i,t) - Q_y(i+1,t) \leq n_{jam}$$

$$Q_y(i,t) - Q_y(i,t-1) \geq 0$$

式中: Z_I 为包括 I 个检测截面的路网满足流量守恒定律的目标函数; $Q(i,t)$ 为第 i 个检测截面 t 时刻的累积流量观测值; $Q_y(i,t)$ 为累积流量调整值。

3.2 最优化问题求解

广义简约梯度(Generalized Reduced Gradient, GRG)法具有良好的收敛性与鲁棒性,是非线性规划算法中最有效的算法之一^[14]。GRG法不仅适用于解决非线性约束与非线性目标函数问题,还适用于解决线性约束与线性目标函数问题,一般步骤如下。

Step 1: 基于等式约束确定基变量与非基变量。

Step 2: 计算简约梯度。

Step 3: 计算非基变量在目标函数中的搜索方向, 并进行相应的调整。

Step 4: 调整基变量, 以满足约束条件。

为了叙述方便, 以包括连续3个检测截面的路段为例, 分析GRG方法的求解过程。流量守恒最优问题描述如下

$$Z_3 = \min \left\{ [Q_y(1, t) - Q(1, t)]^2 + [Q_y(2, t) - Q(2, t)]^2 + [Q_y(3, t) - Q(3, t)]^2 \right\} \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \quad \begin{cases} Q_y(1, t) - Q_y(2, t) \geq 0 \\ Q_y(2, t) - Q_y(3, t) \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} Q_y(1, t) - Q_y(2, t) \leq n_{\text{jam}} \\ Q_y(2, t) - Q_y(3, t) \leq n_{\text{jam}} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} Q_y(1, t) - Q_y(1, t-1) \geq 0 \\ Q_y(2, t) - Q_y(2, t-1) \geq 0 \\ Q_y(3, t) - Q_y(3, t-1) \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

将式(8)~(10)的不等式约束转换为等式约束

$$\begin{cases} Q_y(1, t) - Q_y(2, t) - \theta_1 = 0 \\ Q_y(2, t) - Q_y(3, t) - \theta_2 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} Q_y(1, t) - Q_y(2, t) + \theta_3 = n_{\text{jam}} \\ Q_y(2, t) - Q_y(3, t) + \theta_4 = n_{\text{jam}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} Q_y(1, t) - Q_y(1, t-1) - \theta_5 = 0 \\ Q_y(2, t) - Q_y(2, t-1) - \theta_6 = 0 \\ Q_y(3, t) - Q_y(3, t-1) - \theta_7 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\theta_1 \sim \theta_7$ 为松弛变量。

式(11)~(13)中共包含6个初始变量 $Q_y(1, t)$ 、 $Q_y(2, t)$ 、 $Q_y(3, t)$ 、 $Q_y(1, t-1)$ 、 $Q_y(2, t-1)$ 、 $Q_y(3, t-1)$, 7个松弛变量 $\theta_1 \sim \theta_7$ 。将初始变量视为非基变量 \mathbf{D} , 松弛变量视为基变量 \mathbf{P} , 利用GRG法得

$$\min F(\mathbf{X}) = \min F(\mathbf{D}, \mathbf{P})^T \quad (14)$$

$$\text{s. t.} \quad h_m(\mathbf{X}) = 0 \quad (15)$$

式中: $F(\mathbf{X})$ 为目标函数, \mathbf{X} 为设计变量的列向量; $h_m(\mathbf{X})$ 为等式约束, $m=1, 2, \dots, M$ 。

简约梯度 G_R 为

$$G_R = \frac{dF(\mathbf{X})}{d\mathbf{D}} \quad (16)$$

搜索方向 \mathbf{S} 为

$$\mathbf{S} = -\mathbf{G}_R \quad (17)$$

利用搜索方向与最优步长, 调整基变量, 以满足约束条件。

3.3 流量守恒定律控制方法

利用GRG法优化违反流量守恒定律的检测截

面累积流量数据之后, 流量数据的控制方法为

$$q_y(i, t) = Q_y(i, t) - Q_y(i, t-1) \quad (18)$$

式中: $q_y(i, t)$ 为第 i 个检测截面 t 时刻的交通流率调整值。

速度为特定时间段内的平均信息, 流量数据出现计数偏差对其影响并不明显, 因此, 不对速度数据进行修复。

从占有率的定义可知, 当流量出现计数错误时, 占有率会随之出现相应的偏差, 因此, 为了对占有率数据进行控制, 本文提出了单车平均占有率的概念, 并将其定义为占有率与车辆数的比值。占有率数据的控制方法为

$$o_y(i, t) = \bar{o}(i, t) q_y(i, t) \quad (19)$$

式中: $o_y(i, t)$ 为第 i 个检测截面 t 时刻单车占有率的调整值; $\bar{o}(i, t)$ 为第 i 个检测截面 t 时刻的单车平均占有率。

4 检测结果分析

4.1 试验背景

验证数据来源于某特大城市快速路感应线圈检测器, 采样时间为2008年9月1日到2008年10月31日间连续5个周一, 采集的交通参数数据包括流量、速度、占有率, 分析时间尺度为5 min。试验区域为快速路上a、b两条路段, 总长均约为800 m, 均为4车道。路段a包括A、B、C连续3个检测截面, 无进出口匝道; 路段b包括D、E两个检测截面, 有一个进口匝道与一个出口匝道。连续2个主线检测截面之间的路段称为自然路段, 见图3。

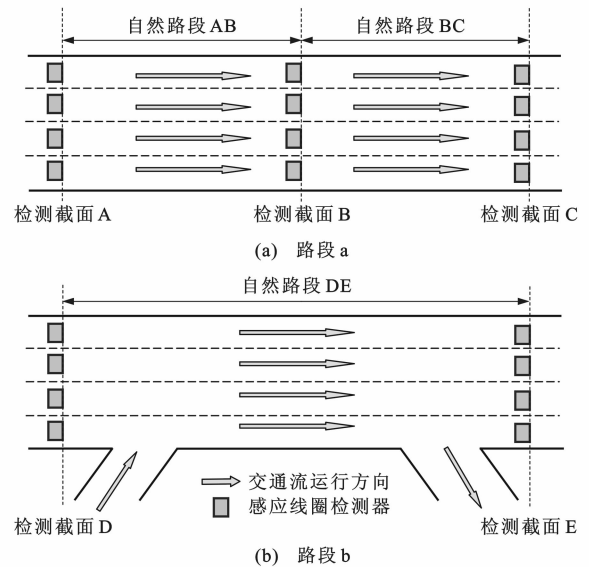


图3 试验路段

Fig. 3 Test sections

4.2 效果分析

《公路工程技术标准》(JTG B01—2003)中规定车长不大于 6 m 的车辆为小型车,当路段上行驶的车辆均为小型车时,则在阻塞密度下该路段所能承载的行驶车辆数达到最大值,因此,针对本文研究对象,确定路段 a、b 阻塞密度下自然路段所能承载的最大行驶车辆数 n_{jam} 分别为 266、532 veh。

4.2.1 路段 a

图 4 为 2008 年 9 月 1 日 0:00~24:00 时路段 a 上 3 个检测截面的流量,可以看出,检测截面 C 的流量曲线偏离检测截面 A、B 的幅度较大。利用本文质量评价方法,发现检测截面组 C 从凌晨 1 点开始出现违反流量守恒定律的现象。图 5 为经过最优化控制后的路段 a 流量,可发现,检测截面 C 流量数据故障已被有效修复,全天累积流量已满足流量守恒定律。

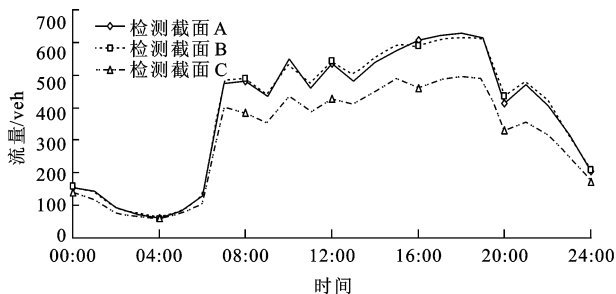


图 4 路段 a 流量

Fig. 4 Flow of section a

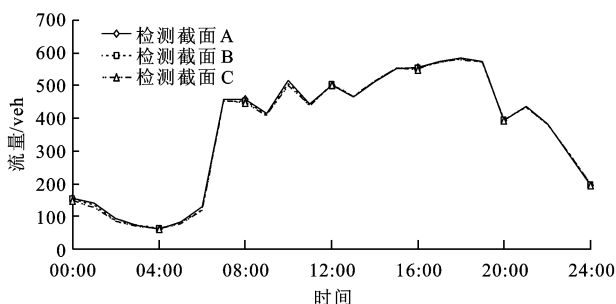


图 5 最优化控制后的路段 a 流量

Fig. 5 Flow of section a after optimization

为了更为清晰地体现本文设计方法的应用效果,进一步针对 01:00~02:00 时段进行分析,结果见图 6、7。图 6 中检测截面 B 在此时段的累积流量大于检测截面 A,而检测截面 B、C 的累积流量差过大,即同时违反了流量守恒定律的 2 个条件:任意时刻上游检测截面的累积流量应不小于下游检测截面的累积流量;上下游检测截面的累积流量差不能大于阻塞密度下所对应的路段所能承载的最大车辆数。图 7 中经过最优化控制后,该检测截面组累积

流量在分析时段内已满足流量守恒定律。

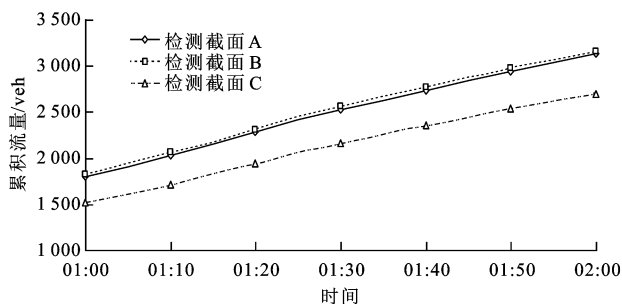


图 6 路段 a 流量累积曲线

Fig. 6 Flow cumulative curves of section a

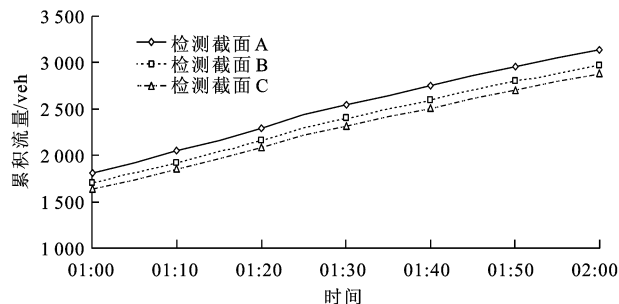


图 7 最优化控制后的路段 a 流量累积曲线

Fig. 7 Flow cumulative curves of section a after optimization

4.2.2 路段 b

路段 b 中间有进出匝道,因此在进行流量守恒定律评价时,应将检测截面 D 与进口匝道的组合流量作为进入路段的流量,将检测截面 E 与出口匝道的组合流量作为离开路段的流量。

对路段 b 进行流量守恒定律评价,发现在采样时间内并没有出现违反流量守恒定律的现象。为了验证路段 b 的试验效果,对 2008 年 9 月 15 日 08:30~10:30 时段离开路段 b 流量人工添加干扰,然后利用本文方法进行流量守恒定律控制,结果分别见图 8、9。

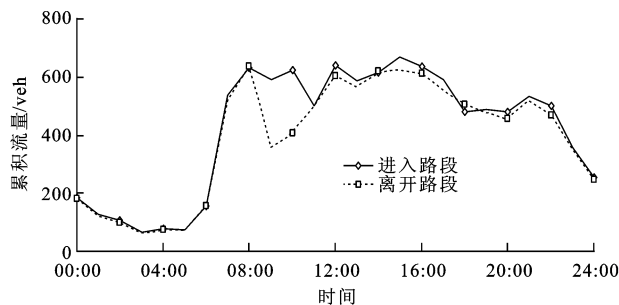


图 8 添加干扰后的路段 b 流量

Fig. 8 Flow of section b after using interference

对比图 8、9 可发现,08:30~10:30 时段离开路段 b 的流量已得到修复,该检测截面组在此时段内已满足流量守恒定律。

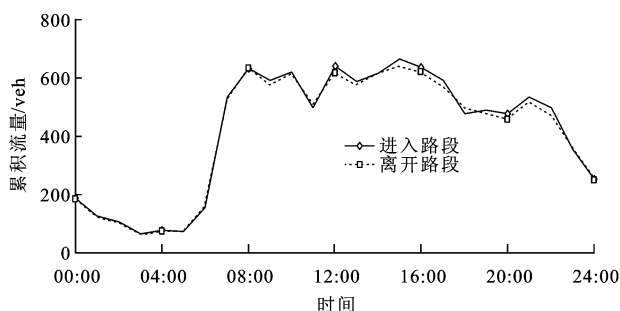


图9 最优控制后的路段b流量

Fig. 9 Flow of section b after optimization

4.3 对比验证

4.3.1 流量守恒定律评价方法验证分析

路段上行驶车辆数的变化可视为一种交通变量,假设该变量正常时间序列数据具有近似于正态分布的概率分布,则根据正态分布的“68-95-99.7法则”,约99.7%的正常数据分布在距离平均值有3个标准差之内的范围,因此,在无法准确获取路段上行驶车辆数的前提下,为了验证本文评价方法,将超出前述范围的路段上行驶车辆数的变化数据近似为故障数据,即违反了流量守恒定律。

经统计,试验区域采样时间内共有327条数据违反了流量守恒定律,本文方法的评价正确率在97%以上。

4.3.2 流量守恒定律控制方法对比分析

Nam等在进行路段平均行程时间估计建模时,提出了一种基于调整因子的流量守恒定律控制方法^[3],其默认违反流量守恒定律的情况是由以往经常出现车辆计数偏差的检测截面所导致的,当某一对检测截面违反流量守恒定律时,将以往经常出现车辆计数偏差的检测截面视为下游检测截面,然后利用调整因子调整其流量数据,调整因子的计算公式为每30 min进入自然路段与离开该路段的流率比。Vanajakshi等以相邻检测截面累积流量数据差的平方和最小为目标函数建立了流量守恒定律优化模型,具体约束条件见文献^[8]。本文将文献^[3]、^[8]中的方法作为对比方法,以验证本文控制方法的有效性。

经过流量守恒定律评价方法验证,2008年9月8日在06:00~09:00时段采集的路段a交通参数数据符合流量守恒定律,以其作为对比分析的数据基础。为了比较上述2种方法的应用效果,以该时段3个检测截面采集的交通参数数据为实测值,然后利用MATLAB中的RAND函数同时对检测截面B、C的流量和占有率添加干扰,引入误差范围为

0.025~0.100,步长为0.025。分别利用本文方法、文献^[3]、^[8]方法对其进行数据质量控制,并计算检测截面B、C交通参数数据的平均绝对百分比误差 E ,计算公式如下

$$E = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{100 |b_{aj} - b_{yj}|}{b_{aj}} \quad (21)$$

式中: N 为分析时段采样间隔的个数; b_{aj} 为第 j 个采样间隔的交通参数真值; b_{yj} 为第 j 个采样间隔经过最优控制的交通参数修复值。

文献^[3]、^[8]中并没有设计相应的占有率数据的控制方法,在分析时将采用与本文相同的方法。利用本文占有率数据的控制方法,占有率数据的平均绝对百分比误差 E_0 计算为

$$E_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{100 |o_{aj} - \bar{o}_j q_{yj}|}{o_{aj}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \frac{100 |q_{aj} - q_{yj}|}{q_{aj}} \quad (22)$$

流量与占有率数据具有相同的平均绝对百分比误差,3种方法的平均绝对百分比误差结果见表1。由表1中可以看出:随着引入误差的提高,不论是检测截面B还是C,3种方法的平均绝对百分比误差均呈现增加的趋势;在相同的引入误差下,不论是检测截面B还是C,本文方法的平均绝对百分比误差均明显优于文献^[3]、^[8]方法,说明了本文方法的有效性。

表1 平均绝对误差比较

Tab. 1 Comparison of mean absolute errors

方法	引入误差	MAPE/%		
		检测截面 B	检测截面 C	路段 a
本文方法	0.025	1.58	3.23	2.40
文献[3]方法		2.96	8.26	5.61
文献[8]方法		2.12	6.54	4.36
本文方法	0.050	3.12	4.53	3.83
文献[3]方法		6.19	11.81	9.02
文献[8]方法		5.38	8.94	7.89
本文方法	0.075	5.13	6.32	5.70
文献[3]方法		9.58	16.09	12.83
文献[8]方法		7.43	13.57	10.72
本文方法	0.100	7.64	8.87	8.26
文献[3]方法		13.32	20.26	16.79
文献[8]方法		11.18	17.71	13.35

5 结 语

本文提出了一种综合考虑单个地点与流量守恒

定律的车辆检测器数据质量评价与控制流程,以流量累积曲线的特性为基础提出了一种数据质量评价方法,并以最优化技术为手段提出了一种数据质量控制方法,最后采用某特大城市快速路实测数据进行了实例验证与对比分析。结果表明本文方法的平均绝对百分比误差明显优于对比方法。

参考文献:

References:

- [1] 姜桂艳,李继伟,张春勤.城市主干路拥挤路段基于地点交通参数的行程速度估计[J].吉林大学学报:工学版,2010,40(5):1203-1208.
JIANG Gui-yan, LI Ji-wei, ZHANG Chun-qin. Travel speed estimation for congested arterial road segment based on spot traffic parameters[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2010, 40(5): 1203-1208. (in Chinese)
- [2] 姜桂艳,牛世峰,李红伟.动态交通数据质量评价方法研究[J].北京工业大学学报,2011,37(8):1190-1195.
JIANG Gui-yan, NIU Shi-feng, LI Hong-wei. Evaluation algorithm of dynamic traffic data quality[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(8): 1190-1195. (in Chinese)
- [3] NAM D H, DREW D R. Traffic dynamic: method for estimating freeway travel times in real time from flow measurements[J]. Journal of Transportation Engineering, 1996, 122(3): 185-191.
- [4] 卢凯,徐建闽,郑淑鉴,等.交通信号协调控制方案过渡优化算法[J].交通运输工程学报,2012,12(6):97-103.
LU Kai, XU Jian-min, ZHENG Shu-jian, et al. Optimization algorithm of coordinated control scheme transition of traffic signal[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(6): 97-103. (in Chinese)
- [5] ZUYLEN H J, BRANSTON D M. Consistent link flow estimation from counts[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1982, 16(6): 473-476.
- [6] CASSIDY M J. Bivariate relations in nearly stationary highway traffic[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1998, 32(1): 49-59.
- [7] ZHAO M, GARRICK N W, ACHENIE L E K. Data reconciliation-based traffic count analysis system[J]. Transportation Research Record, 1998(1625): 12-17.
- [8] VANAJAKSHI L, RILETT L R. Loop detector data diagnostics based on conservation-of-vehicles principle[J]. Transportation Research Record, 2004(1870): 162-169.
- [9] 裴玉龙,马骥.实时交通数据的筛选与恢复研究[J].土木工程学报,2003,36(7):78-83.
PEI Yu-long, MA Ji. Real-time traffic data screening and reconstruction[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(7): 78-83. (in Chinese)
- [10] CLEGHORN D, HALL F L, GARBUIO D. Improved data screening techniques for freeway traffic management systems[J]. Transportation Research Record, 1991(1320): 17-23.
- [11] NIHAN N L. Aid to determining freeway metering rates and detecting loop errors[J]. Journal of Transportation Engineering, 1997, 123(6): 454-458.
- [12] CHEN C, KWON J, RICE J, et al. Detecting errors and imputing missing data for single-loop surveillance systems[J]. Transportation Research Record, 2003(1855): 160-167.
- [13] NGUYEN L H, SCHERER W T. Imputation techniques to account for missing data in support of intelligent transportation systems applications[R]. Charlottesville: University of Virginia, 2003.
- [14] 马伟标,王红岩,芮强.基于广义简约梯度算法的履带车辆模型参数修正[J].系统仿真学报,2012,24(4):774-779.
MA Wei-biao, WANG Hong-yan, RUI Qiang. Research on model updating for tracked vehicle dynamic model based on generalized reduced gradient method[J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(4): 774-779. (in Chinese)