

快速道路交通运行状况实时分析及短期预测的动态交通仿真模型研究

The Research on Dynamic Traffic Simulation Model about Expressway Traffic Real-Time Analysis and Short-Term Forecasting

周溪召 智路平

快速道路交通运行状况实时分析及短期预测的动态交通仿真模型研究

【摘要】 本文以上海延安高架快速路为典型研究对象,建立有效的动态仿真模型对快速道路交通运行状况进行实时分析及短期预测。研究以延安高架路各匝道口为出行起讫点,以滚动式动态 OD 预测法生成动态 OD 矩阵;将生成的 OD 分配到路网上,形成对道路交通运行状况的实时模拟,及路径走行时间的短期预测。将生成的实时及预测数据导入 AIMSUN 快速路交通运行状况实时模型进行仿真模拟,通过反复校核,最终生成能够实时准确进行分析预测的仿真模型。

【关键词】 快速路 实时分析 短期预测 仿真

Abstract: It is a research paper about the expressway traffic real-time analysis and short-term forecasting which uses Shanghai Yan'an overhead road as the typical research object. The aim is to generate an effective dynamic simulation model. Firstly, we mark the all ramps of Yan'an overhead road as the travel OD points, and get corresponding OD matrixes and coil data as the research-based data. Secondly, we form dynamic OD matrix by rolling dynamically OD prediction. Thirdly, we assign the OD to the road networks. Then, we can get real time simulation about the road traffic running conditions, and short-term forecast about the path travel time between certain OD pairs. To get a visualized model, we import the generated real-time and forecasting data into AIMSUN,

which is professional traffic simulation software. We repeatedly check the procedure and model parameters, and finally get a well simulation model which can help us to analysis and forecast expressway traffic operational status correctly.

Keywords: expressway, real-time analysis, short-term forecasting, dynamic traffic simulation

1 引言

城市快速路是建于城市内部的一种高速道路,具有单向多车道、中央设分隔带、全部立体交叉、保证连续行驶且通行能力大的特点。

作为解决快速道路交通拥挤的重要手段,对快速路交通运行状况的实时分析和短期预测的研究受到了交通专家日益广泛的关注。快速路交通运行状况的实时分析和短期预测的研究建立在对交通流实时以及未来分布形态正确分析的基础之上,这一分析需要利用一定的动态交通需求预测模型,而动态 OD 矩阵则是此类模型的基本输入数据,它将直接影响到实时分析的准确性和短期预测的有效性。作为静态 OD 预测理论的延伸,利用实时采集的路段流量及相关信息推求未来各个时段内 OD 交通量的动态 OD 预测理论在近 20 年内得到了众多研究者的关注。^[1-3]

目前,城市快速路信息化已经做得比较完善,可以实时显示主要路段的交通运行状态和道路施工封闭等信息,但是在智能交通系统中,必须给出准确的实际行程时间等诱导信息来合理分配交通流,影响出行者的判断,以达到整个交通系统的顺畅和成本的最小化。因此路段行程时间预测成为了交通流诱导系统和交通控制系统的重要研究内容。目前,国内通常提到的行程时间预测模型有时间序列模型、非参数回归方法、加权移动平均法等,均是从

作者:周溪召,上海海事大学经济管理学院副院长,教授博导
智路平,上海海事大学经济管理学院工程师

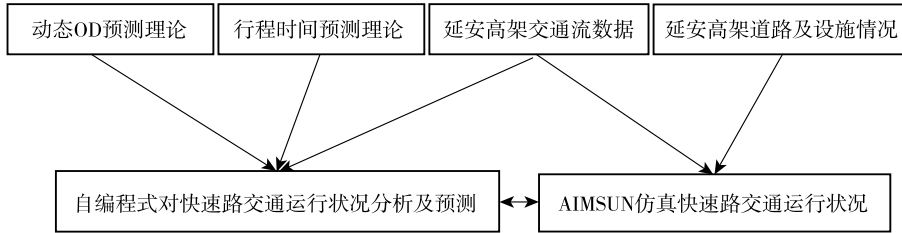


图1 研究技术路线

统计的角度来预测时间的，并没有考虑交通流参数的时变性。^[4-6]

基于此背景，如何将动态 OD 预测与行程时间预测结合起来，并形象化地进行模拟，以期为快速路交通运行状况的研究提供依据，成为了本文研究的要点。

本文对快速路交通运行状况实时分析及短期预测的研究，以延安高架快速路主干及其 17 个上下匝道为研究典型对象，基于包括高峰时刻 3 小时匝道 OD、一日线圈数据以及路段基本信息在内的基础数据，自编软件对交通运行状况进行实时处理及短期预测，运用 AIMSUN 交通仿真软件对快速路交通运行状况进行实时模拟。通过自编软件程序，进行精确的交通运行状况实时数据处理，迅捷地做出短期交通流预测，特别是对定向交通出行时间进行合理预测；AIMSUN 仿真软件能够对研究对象的交通运行状况进行实时模拟，并统计出相应的分布规律以便于进一步的分析处理；将自编程序预测出的短期交通流录入 AIMSUN 进行预测仿真，形成未来短期内的仿真模型。将自编软件程序与 AIMSUN 有机的进行配合使用，通过自编软件程序进行方法上的指导，通过 AIMSUN 仿真软件对自编程序的运算结果进行形象化的直观展示。

具体而言，以延安高架路各匝道口为出行起讫点，将各起讫点 OD 矩阵及线圈数据作为研究基础数据，一方面以动态 OD 预测法生成动态 OD 矩阵，用动态交通分配法将生成的 OD 分配到路网上，形成对道路交通运行状况的实时模拟、对某 OD 对之间路段走行时间的短期预测；另一方面将获取的详细的延安高架快速路道路及设施资料用软件进行场景再现，详细设置、调整道路运行参数进行仿真模拟直至模拟出与线圈数据相符的情境，形成仿真模型。利用模型给出延安高架道路运行统计分析图表，分析其交通运行分布规律，将自主开发程序生成 OD 矩阵录入仿真模型，模拟预测区段交通流状况，辅助交通指挥控制决策。

2 预测方法

本文关于快速道路交通运行状况实时分析和短期预测

的关键要点主要集中在动态 OD 预测方法研究、行程时间预测方法研究及 AIMSUN 软件仿真模型建立上。

2.1 滚动式 (Rolling Horizon) 动态 OD 预测

根据实际交通数据统计出以 10 分钟为单位共 3 小时的 18 个初始 OD 矩阵，并用拉格朗日插值公式进行滚动预测^[7]，公式如下：

$$b_{ij}(t) = \sum_{q=1}^n \frac{\prod_{k=1, k \neq q}^n (t-t_k)}{\prod_{k=1, k \neq q}^n (t_q-t_k)} b_{ij}(t_q) \quad (2.1)$$

t ——要预测的时刻；

t_k, t_q ——进行滚动插值用到的时刻；

$\frac{\prod_{k=1, k \neq q}^n (t-t_k)}{\prod_{k=1, k \neq q}^n (t_q-t_k)}$ ——第 t_k 时刻对应的插值系数；

$b_{ij}(t_q)$ —— t_q 时段的起讫点 $i-j$ 的交通量。

在滚动过程中，将最近一个时段的观测值代入公式进行下一时段的预测。

2.2 连续动态网络承载行程时间预测

定义：

$f_k^{rs}(t)$ ：在时刻 t ，从起点 r 到讫点 s 在路径 k 上用户的流率；

$c_k^{rs}(t)$ ：在时刻 t 出发，从起点 r 到讫点 s 在路径 k 上用户经历的出行间；

$U_a(t)$ ：总计累计进入路段 a 的车辆数；

$V_a(t)$ ：总计累计离开路段 a 的车辆数；

$X_a(t)$ ：时刻 t 路段 a 上的车辆数；

$\tau_a(t)$ ：时刻 t 进入流段 a 的流量在路段 a 上的出行时间；

$u_{ka}^{rs}(t)$ ：用户在时刻 t 从起点 r 到讫点 s 的路径 k 上进入路段 a 的进入率；

$v_{ka}^{rs}(t)$ ：用户在时刻 t 从起点 r 到讫点 s 的路径 k 上离开路段 a 的离开率；

$U_{ka}^{rs}(t)$ ：用户至时刻 t 从起点 r 到讫点 s 的路径 k 上进入路段 a 的车辆累计数；

$V_{ak}^{rs}(t)$ ：用户至时刻 t 从起点 r 到讫点 s 的路径 k 上离

开路段 a 的车辆累计数;

$X_{ak}^{rs}(t)$: 用户在时刻 t 从起点 r 到讫点 s 的路径 k 上路段 a 的车辆数。

路段动态方程:

$$\frac{X_{ak}^{rs}(t)}{dt} = U_{ak}^{rs}(t) - v_{ka}^{rs}(t) \quad \forall r, s \quad \forall k \in K_{rs} \quad \forall a \quad (2.2)$$

流守恒方程:

$$a) \text{ 对于起点: } U_{ak}^{rs}(t) = f_k^{rs}(t) \quad (2.3)$$

这里 a 是路径 k 的第一条路段;

b) 路径 k 上两个连续路段 a 和 a' 间的流守恒方程是:

$$U_{ak}^{rs}(t) = v_{a'k}^{rs}(t) \quad \text{这里 } a \text{ 是在 } a' \text{ 之后。}$$

流传播方程:

$$V_{ak}^{rs}(t) = \int_{w \in W} U_{ak}^{rs}(w) dw \quad (2.4)$$

这里

$$W = \{w: w + \tau_a(w) \leq t\}$$

边界条件:

$$U_{ak}^{rs}(0) = 0, V_{ak}^{rs}(0) = 0, X_{ak}^{rs}(0) = 0, \quad \forall (r, s), \quad \forall k \in K_{rs} \quad (2.5)$$

算法如下:

步骤一 初始化

① 设定系统时间 T , 包括车流进入时间段和要预测的时间段的长度。时间间隔定为 1 分钟;

② 调用函数 createLink () 读取基本属性数据文件建立路段, 及调用函数 createOD () 生成并存储动态 OD 需求量;

③ 在零时刻 $t=0$ 根据公式 (2.5) 对相关变量置空, 同时计算并存储在自由流条件下的路段阻抗值和路径的行程时间。

步骤二 计算路段实际阻抗

① 调用动态网络加载函数 DNLprocess () 得到路段动态存量; 该模块求解了离散化后的方程组 (2.2-2.4), 得到了当前时刻下的路段各变量的值, 并存储到数组中;

② 调用路段业绩函数 linktraveltime (int a, int k) 计算出路段行程时间。

步骤三 预测路径动态行程时间

调用函数 pathtraveltime (int origin, int desti, int k) 得到路径实际行程时间。

步骤四 结束标准

If $t > T$ then 程序终止, 输出结果; Else $t++$ 返回 Step2。

2.3 AIMSUN 仿真模型构建方法研究

交通仿真是运用现代计算机技术模拟现实交通系统建

立计算模型的过程, 是设计、分析和评价交通方案的重要技术方法。交通仿真能反映实际交通系统的特性, 分析交通系统在各种设定条件下的可能行为, 以寻求现实交通问题的最优解, 评价运输设施各类设计方案的效果。现今应用较为广泛的该类软件有 SimTraffic、CorSim、VisSim、Paramics、AIMSUN、MITSim 和 TransModeler 7 种。从交通设施表达及通信能力、车辆行为模型和其他扩展功能 3 个方面对上述 7 种微观交通仿真系统的性能进行评价和比较, 结合本研究选取对象延安高架快速路, 在考虑了以上各软件的优劣之后, 发现: AIMSUN 中定义了不同的车辆类型, 可以对车辆设定期望速度, 定义了 zone1 和 zone2 的概念来模拟变换车道机转弯的情况, 通过 Data Translator 模块实现检测器数据的直接传输和解析、跟车、换道、间距接受模型采用比较精细的模型, 本身具有匝道控制功能, 公交优先模块可以实现大型公交车的行驶尤其是在停车点的停车现象模拟, 提供了动态交通分配功能, 所以选择 AIMSUN 作为对延安高架快速路进行微观仿真模拟的基础平台。

在获取基础资料的前提下, 模型构建按照以下步骤进行:

① 导入背景图 (本次研究以甲方提供 EMME 导出图作为背景路网底图)。

② 绘制仿真路段, 各路段车道数以实际为准。

③ 绘制节点, 以实际交叉口车行规则为准。

④ 设置路段类型, 定义道路参数 (包括转向、专用道、障碍)。本研究中将主干道速度限制设为 80km/h, 单车道通行能力为 1500veh/h, 匝道速度限制设为 40km/h, 单车道通行能力为 700veh/h。

⑤ 输入交通状态 (进口流量, 路口转弯百分比), 以甲方提供 OD 矩阵为准。

⑥ 型心点定义。本研究根据甲方提供资料, 以各匝道为源端, 共设置 17 个型心节点。

⑦ 制定信号计划, 以实际交通控制信号为准。

⑧ 定义交通需求, 并对交通需求进行预仿真, 初步校验模型正确性。

⑨ 建立主控计划, 并预仿真。

⑩ 设置检测器, 附加动态标签以直观显示交通运行状态。

⑪ 导入仿真结果图表, 进行交通运行状况规则分析。

⑫ 绘制仿真 3D 模型。

⑬ 设置摄像头录出动态模型视频。

3 研究过程

3.1 数据收集及预处理

研究数据是 2009 年 3 月 20 日及 5 月 20 日两天的 24

小时线圈监测数据,由上海市城市综合交通规划研究所提供。对于出现线圈监测数据丢失的点,将和研究的当天相似的另外一天此点的数据补充进来。

对于部分数据误差较大的情况,参考比照两天的线圈同时段的数据,发现两天的实际线圈监测数据都明显比3小时OD数据小,并且这两天数据很接近,所以认为实际线圈数据是有效的,出现这样的误差的原因主要是OD数据和线圈数据时间上的不一致。

3.2 数据分析及程序处理过程

首先整理出3个小时内每10min为一单位的17个上下匝道的流入流出量,然后调用transcad软件的frator模块计算出每10min的OD需求矩阵。接着把这些基本的OD需求矩阵输入到自编程序中运算,采用滚动式方法预测出短期(1小时)的OD需求,调用网络加载算法把基本的和预测的OD需求分配到道路上,最后通过行程时间计算模块得出最终的结果。

使用福莱特法来对原始数据进行加工。模型公式为:

$$f_F(F_{O_i}^m, F_{D_j}^m) = F_{O_i}^m \cdot F_{D_j}^m \cdot \left(\frac{L_i + L_j}{2} \right)$$

$$L_i = \frac{O_i^m}{\sum_j q_{ij}^m F_{D_j}^m}, L_j = \frac{D_j^m}{\sum_i q_{ij}^m F_{O_i}^m}$$

式中 L_i —— i 小区的位置系数;
 L_j —— j 小区的位置系数;

$f_F(F_{O_i}^m, F_{D_j}^m)$ ——第 m 次迭代小区 i 到小区 j 之间交通量的增长系数;

q_{ij}^m ——第 m 次迭代小区 i 到小区 j 之间交通量;

$F_{O_i}^m$ ——第 m 次迭代 i 小区的产生增长率;

$F_{D_j}^m$ ——第 m 次迭代 j 小区的吸引增长率;

O_i^m ——第 m 次迭代小区 i 的交通产生量;

D_j^m ——第 m 次迭代小区 j 的交通吸引量。

3.3 阻抗标定

使用一个改进速—密关系模型来描述连续流交通的路段出行时间。速—密关系被表示为如下:

$$v_a(t) = v_a^{\min} + (v_a^{\max} - v_a^{\min}) \left[1 - \left(\frac{k_a(t)}{k_{aj}} \right)^\alpha \right]^\beta$$

这里:

$v_a(t)$ ——在时刻 t 路段 a 的速度;

$k_a(t)$ ——在时刻 t 路段 a 的密度;

v_a^{\min}, v_a^{\max} ——最小速度和自由流出行速度;

$k_{aj}(t)$ ——阻塞密度;

α, β ——模型参数。

3.4 自编程序结果分析

程序可对未来短期内(以1小时为例)的交通运行状况进行预测,表1给出任意OD对间的行程时间。

10:00 任意OD对间的行程时间(单位:分钟)

表1

OD	t	OD	t	OD	t	OD	t
1-2	0.70	1-15	22.00	2-13	19.20	3-12	15.03
1-3	3.29	1-16	22.48	2-14	20.28	3-13	16.75
1-4	4.13	1-17	23.12	2-15	21.30	3-14	17.83
1-5	6.05	2-3	2.60	2-16	21.79	3-15	18.85
1-5	6.69	2-4	3.44	2-17	22.43	3-16	19.34
1-7	7.33	2-5	5.36	3-4	0.84	3-17	19.98
1-8	8.20	2-6	6.00	3-5	2.77	4-5	1.95
1-9	10.02	2-7	6.64	3-6	3.41	4-6	2.59
1-10	11.70	2-8	7.51	3-7	4.05	4-7	3.23
1-11	16.38	2-9	9.32	3-8	4.94	4-8	4.13
1-12	18.21	2-10	11.01	3-9	6.79	4-9	5.98
1-13	19.90	2-11	15.69	3-10	8.52	4-10	7.72
1-14	20.98	2-12	17.52	3-11	13.20	4-11	12.40

续表

OD	t	OD	t	OD	t	OD	t
4-12	14.23	6-10	5.15	8-12	10.14	11-12	1.83
4-13	15.95	6-11	9.83	8-13	11.88	11-13	3.52
4-14	17.03	6-12	11.66	8-14	12.96	11-14	4.60
4-15	18.05	6-13	13.39	8-15	13.98	11-15	5.62
4-16	18.54	6-14	14.47	8-16	14.47	11-16	6.11
4-17	19.18	6-15	15.49	8-17	15.11	11-17	6.74
5-6	0.65	6-16	15.99	9-10	1.77	12-13	1.67
5-7	1.30	6-17	16.63	9-11	6.45	12-14	2.75
5-8	2.20	7-8	0.89	9-12	8.28	12-15	3.77
5-9	4.05	7-9	2.76	9-13	10.03	12-16	4.26
5-10	5.79	7-10	4.51	9-14	11.11	12-17	4.89
5-11	10.47	7-11	9.19	9-15	12.13	13-14	1.08
5-12	12.30	7-12	11.02	9-16	12.61	13-15	2.10
5-13	14.03	7-13	12.75	9-17	13.25	13-16	2.58
5-14	15.11	7-14	13.83	10-11	4.68	13-17	3.21
5-15	16.13	7-15	14.85	10-12	6.51	14-15	1.02
5-16	16.62	7-16	15.34	10-13	8.24	14-16	1.50
5-17	17.26	7-17	15.98	10-14	9.32	14-17	2.13
6-7	0.66	8-9	1.87	10-15	10.34	15-16	0.48
6-8	1.55	8-10	3.63	10-16	10.83	15-17	1.11
6-9	3.40	8-11	8.31	10-17	11.47	16-17	0.63

注：实际预测结果为1小时，此处给出一个样本，本表的时间10:00。

3.5 仿真模型结果分析

在本研究中，我们根据已有的路网基本信息，建立起了基本的路网，然后在该路网的基础上，定义车辆类型及各类型车辆的OD需求，建立交通系统进而进行仿真。图2显示了AIMSUN中建立的延安高架路网情况。

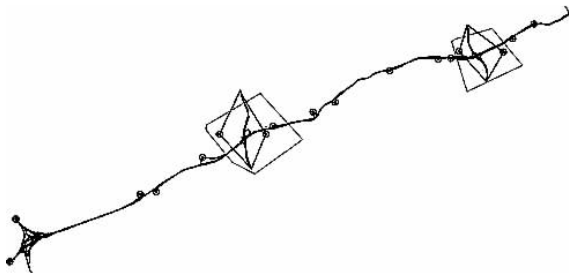


图2 延安高架基本路网

路网中的道路有两种类型：高速路（Freeway）和匝道（On-off Ramp）。其中高速路的最大速度设定为80km/h，单车道通行能力为1500veh/h。匝道的最大速度设定为40km/h，单车道通行能力为700veh/h。

高架上有大、中、小三种类型车辆，在AIMSUN系统中我们使用van、truck、car三种类型的车辆也对应上面的三种车。根据给定的线圈数据发现三类车中，小型车占了很大比例，而大中型车则占了很小的比例，因此，我们设定高架上大：中：小型车的比例近似为0.05：0.1：0.85。

在此系统中，主要研究了高架上17个上下匝道的交通流的情况，7:00~10:00中3个小时的总17个匝道的OD，7:00~10:00中3个小时的根据前面给出的各种车辆类型的比例结合匝道总的OD分布表得到的van、truck、car三种类型车的OD分布情况。在仿真方案中使用的交通需求就是根据该OD分布情况建立的。

除 OD 分布外, 车辆的行为模式也极大的影响分配的结果, 为了使仿真效果更优, 设定出路网的流量延误函数, 采用系统带的标准 VDF 为

$$0.5 \times \text{LinkLength} (S) \times \max ((15 \times 31.35 \times 0.985^{4.7 \times ((\text{Linkvolume} (S) + \text{LinkAddVolume} (S)) / \text{LinkCapacity} (S)) - 0.985} + 1 + 5.5 \times 0.985^{5.7}), (1 + 5.5 \times ((\text{Linkvolume} (S) + \text{LinkAddVolume} (S)) / \text{LinkCapacity} (S))^{5.7})).$$

车辆选择路径时根据的是二项式模型, 为了更好的显示出行时间的变化效果, 我们设定每过一分钟就重新选择一次路径, 这样就可以很好的展示出随着路网上车辆数量的变化, 所带来的路阻函数的变化, 进而使得车辆的出行时间发生了变化。

因为我们主要是对 7:00~10:00 时间段的交通状况进行的仿真, 对于之前的交通并未进行仿真, 为了体现仿真开始之前路网上的交通量, 我们设定了 10 分钟的预热时间, 这样 7:00 仿真开始时, 路网中就有了之前的背景流量, 就能更好地贴近实际。

导入自编程中产生的 4 小时 OD 进行仿真, 将生成的实时仿真的三小时内各观测点车辆数及预测仿真的一小时各观测点车辆数, 与实际的线圈统计的真实值做比对 (图 3、图 4):

从下图可以看出: 忽略由于原始给定数据中部分数据

OD 与线圈统计值之间明显的不一致导致的部分观测点仿真数据与真实数据的差异 (仿真模型依据原始 OD 生成), 在绝大多数观测点, 仿真数据与真实数据的差异在可接受范围内, 故我们认可模型整体上的有效性。

仿真模型能够给出路段上包括路段延误时间图、路段负荷率图、路段最大排队长度图、路段出行距离图、路段停车次数图、路段出行时间图、路段车流密度图、路段流量图、路段车流速度图等诸多的统计数据, 根据这些路况图, 就可以很方便的了解到路上的交通状况, 据此管理者就可以及时预测路段可能出行的状况, 制定相应的交通管理政策, 采取有效的交通管理措施。

4 结论

通过上述研究分析过程, 我们可以清晰的看到我们找到一种比较有效、快捷的对快速路动态交通运行状况进行实时及短期预测的方法。那就是利用现在比较容易获得的线圈数据及初始静态 OD, 一方面进行使用课题组开发出的动态交通预测软件, 生成实时及未来短期内的动态交通状态数据, 特别是对路径行走时间的预测方面更是本软件的一大特色; 另一方面, 使用在微观仿真模拟方面颇具优势的 AIMSUN 对研究对象进行动态仿真, 修改仿真模型直

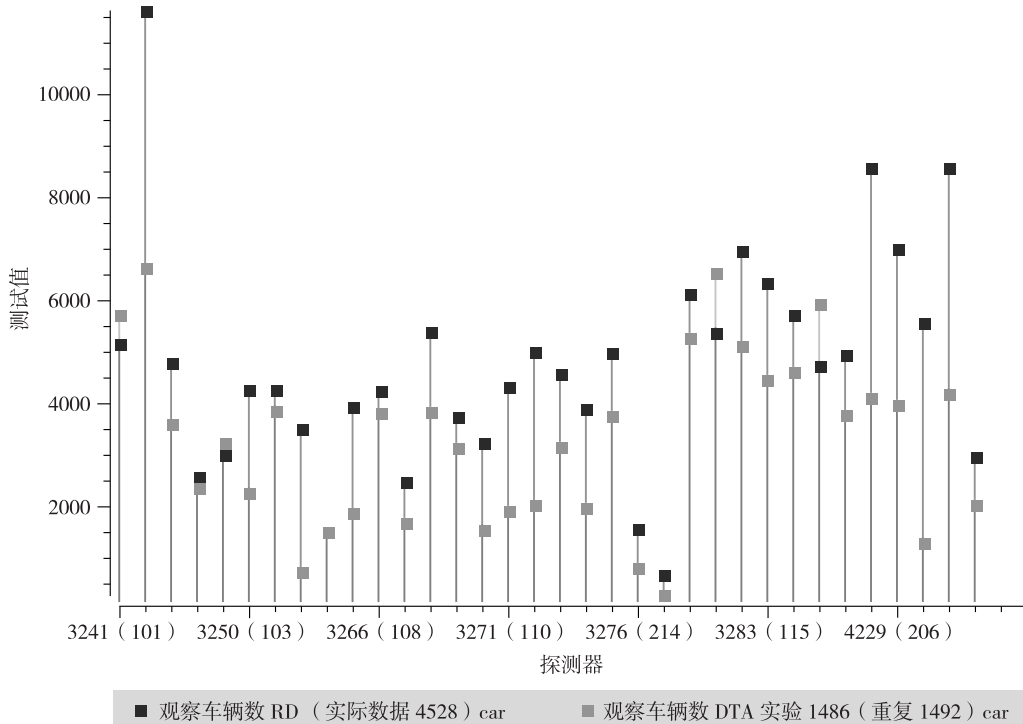


图 3 仿真的 3 个小时内匝道上小汽车观测值与实际值比较图

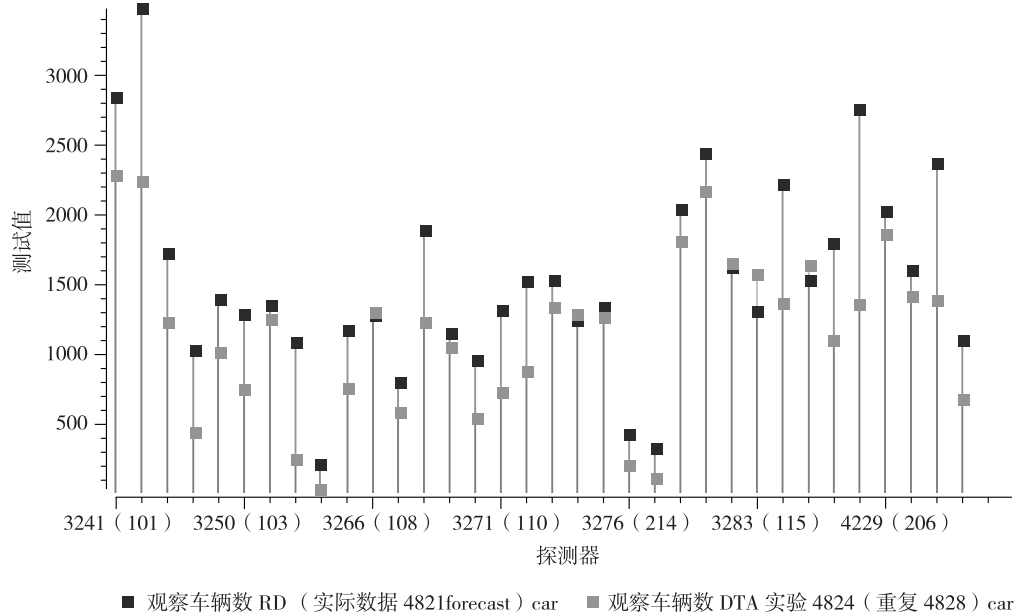


图4 预测的1个小时内匝道上小汽车观测值与实际值比较图

至仿真数据与线圈数据高度拟合，完成仿真模型的构建，利用仿真模型可明确的对研究对象的整体交通状况、路径交通状况、路段交通状况，以及非常态交通状况进行统计分析，以便于管理部门制定相应的交通管理政策。

更进一步，我们可以将自主开发软件的预测数据使用AIMSUN进行微观仿真，这样可以提前获得更加直观的交通运行状况，做到形象化、对象化地事前分析事后现象，这将极大的有利于管理部门提前采取措施防止恶性交通事件的发生。将预测信息公布，更有利于出行者自动采取行动规避高峰时刻、选择畅通路线，做到安全出行。

参考文献

[1] Ramachandran Balakrishna. Dynamic Origin-Destination Trip Table Esti-

mation for Transportation Planning (ppt), 2007.

- [2] 郝光, 岳辉, 王翠红, 马倩玉. 动态OD矩阵推算模型及算法应用[J]. 铁道运输与经济, 2006, 29(1).
- [3] 王梯. 基于预测信息的动态OD矩阵估计[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.
- [4] 赵莉, 李峰. 动态交通分配模型[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2007, 30(3).
- [5] 陆化普, 黄海军主编. 交通规划理论研究前沿[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [6] 苏日娜. 基于转移模型的OD算法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [7] 刘学军, 林勇, 李树彬, 李建新. 智能交通中动态OD矩阵估计研究概况[J]. 山东科学, 2007, 20(4).