

面向交通微观仿真的道路网络模型

唐代旻¹, 李 响², 赵子辉³

(1. 南京师范大学人力资源处, 江苏 南京 210023)

(2. 华东师范大学地理科学学院, 上海 200241)

(3. 北华航天工业学院计算机与遥感信息技术学院, 河北 廊坊 065000)

[摘要] 交通微观仿真以单个车辆为研究对象, 模拟交通行为特征, 当将此类仿真应用于较大的道路网络中时, 需要快速构建有效的道路网络模型。根据微观仿真的特点, 相应的道路网络模型需要能够以车道为最小表达粒度, 包含多层次网络要素, 并能准确反映各层次拓扑特征。而已有模型在此方面仍有需要改进之处, 为此, 本文在现有基于车道的网络模型基础之上, 发展了一个面向交通微观仿真的道路网络模型, 并将此模型应用于一个微观交通仿真原型系统中, 验证了本模型的可行性。

[关键词] 交通地理信息系统, 道路网络模型, 交通仿真, 层次模型, 微观

[中图分类号] U491.2 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2016)04-0038-06

Microscopic Traffic Simulation Oriented Road Network Data Model

Tang Daimin¹, Li Xiang², Zhao Zihui³

(1. Human Resource Office, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

(2. School of Geography Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

(3. School of Computer Science and Remote Sensing, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: Microscopic traffic simulation focuses on simulating the traffic flow behaviors of individual vehicles. It is required to quickly build an effective road network model when such simulation is applied to a comparatively large network. According to the characteristics of microscopic traffic simulation, the road network model must be capable of taking lanes as the minimum simulation units, containing multi-level network elements, and representing the topological relationships among these elements accurately. Therefore, as the existing models are still in need of improvement, this article aims to develop a road network model for microscopic traffic simulation and examine the feasibility of the proposed model by implementing it into a microscopic traffic simulation prototype system.

Key words: GIS-T, road network model, traffic simulation, hierarchical model, microscopic

交通仿真是计算机仿真技术在交通工程领域的应用, 是指用系统仿真技术来研究交通行为, 它是一门对交通运动随时间和空间的变化进行跟踪描述的技术。它不仅可以成功地用于传统交通系统中的交通分析和规划^[1], 而且可以有效地进行智能交通系统(Intelligent Transportation Systems, ITS)的效果评价^[2]。随着中国大中城市不断发展, 复杂而细致的道路和交通规则也应运而生。如何尽可能详细并真实的描述道路特征对微观交通仿真、交通流预测研究显得尤为重要。交通网络的建模与表达一直是交通地理信息系统研究领域的一个热点问题^[3-4]。根据交通仿真模型对交通系统描述的细节程度的不同, 可分为微观交通仿真、中观交通仿真和宏观交通仿真, 它们对交通流的描述分别是以单个车辆、若干车辆构成的队列和速度-流-密度关系等一些集聚性的宏观模型为基本单元。此外, 根据研究对象的不同, 还可以分为交叉口仿真、区段仿真和网络仿真等^[1]。

微观交通仿真以单个车辆为研究对象, 分析其驾驶行为以及在交通流中的作用。以往由于受到计算能力的限制, 微观交通仿真的研究区往往局限于个别交叉口、单个路段或较小的区段。而随着计算机技术

收稿日期: 2016-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金(41271441).

通讯联系人: 唐代旻, 助理研究员, 研究方向: 交通地理信息系统, 微观仿真. E-mail: dtang@njjnu.edu.cn

的飞速发展,面向网络的微观交通仿真成为目前交通工程领域的研究热点之一,如何构建面向微观交通仿真的道路网络模型成为一个主要的研究问题。

至今为止,研究者已经提出了多种道路网络模型。按其组织结构不同可以分为基于平面线性参照系统道路网络模型、基于非平面特征的道路网络模型、基于车道的道路网络模型。线性参考系统模型是一种将路段作为弧段,通过结点相连接,以结点和弧段构成道路网络的模型。其代表性模型有 Adams 和 Koncz 等人提出的 NCHPR 模型^[5-6],Dueker 提出的 GIS-T Enterprise 模型等^[7]。基于特征的道路网络模型同样由弧段和结点构成,一般不在道路中段产生新的结点,保持了交通特征的几何完整性,使地理编码更加有效。同时,该模型将整条道路作为存储对象,避免了非拓扑结构的产生,更真实地表现道路网络。基于车道的模型是以道路上的车道为基本表达对象所建立的道路网络模型,如 Malaikrisanachalee 和 Adams 提出的基于车道的道路网络模型^[8],Li 和 Lin 提出的 CRNM 模型^[9-10]等。

本文研究的道路网络模型用于微观交通仿真,需要完整表达出道路的细节信息与丰富的交通属性信息,同时结构相对简单灵活,便于维护和应用。现有的道路网络模型中,基于线性参考系统的道路网络模型往往建立过程比较复杂,注重于道路间的拓扑分析,不利于定位微观交通仿真中的单个车辆对象,难以实际实施并用于微观交通仿真,因此选择基于车道的道路网络模型来进行交通仿真是比较适合的。基于道路特征的道路网络模型同样为弧段-结点结构的道路网络模型,同一条道路以一条弧段进行存储,缺失部分道路网络几何特征,如道路交叉口等,并不适用于交通仿真。然而现有基于车道的道路网络模型对于车道往往具有不同的指代,大多描述的是综合车道的概念^[11],而非现实道路中的车辆可通过的最小单元,同时车道拓扑描述复杂,交通规则与车道自动拓扑建立的有机融合大多仍然停留在概念上^[12]。以上提出的各种道路网络模型对道路层次的划分和细节的描述还显不足,往往不能提供道路的车道条数,车道方向,道路之间的连接关系等详细信息,限制了其在交通微观仿真领域的应用。因此,本文对现有道路网络模型进行了改进,提出了一种基于地理空间数据库及车道的道路网络模型用于微观交通仿真。这里所涉及的“车道”对应于现实世界中利用交通标志线分割的单个行车通道。

1 道路网络模型

1.1 概念模型

本文提出的道路网络模型具有多层次特征,其中分为用于构建道路结构的几何模型与属性数据两部分,几何数据模型包含道路中心线、行车道、车道及交叉口等多个道路网络要素。道路中心线来自于城市测绘的成果数据,其中每条道路称为一个路段,其属性数据用于表示道路路段的特征信息,包括了空间位置、交通方向特征、各交通方向上的车道数量等信息,是整个模型的基础数据来源。通过对路段的特征信息提取,生成行车道。行车道为平行于道路中心线且包含了同一条方向多条车道的聚合道路。车道作为道路网络模型的基本单位,具有不同的道路转向规则信息,在道路的交叉口处按转向规则进行连接,从而建立整个区域的道路网络。

1.2 道路网络模型结构

根据概念模型,整个道路网络模型包括了道路中心线、行车道、车道和道路交叉口 4 个部分,车道与交叉口之间通过连接结点相连接。整个道路网络结构如图 1 所示。

1.3 数据模型

1.3.1 道路中心线

城市测绘中,一般以道路的中间线来抽象表示实际道路,所以将替代实际道路的道路中间线数据称为道路中心线。道路中心线将一条道路划分为两个不同的行驶方向,具有隔离带的作用,其由不同的路段构成,具有道路编号、名称、道路长度、道路方向等信息,一般以数字线化图(DLG)的形式进行存储。对于该模型,道路中心线数据是整个道路网络的基础数据来源。

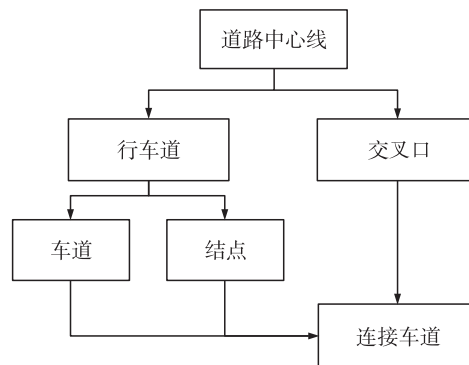


图 1 道路网络模型层次结构图

Fig. 1 Hierarchical data structure of road data model

1.3.2 行车道

行车道由道路中心线数据生成,用于表示完整的道路结构中某一方向上的所有车道构成的综合道路。通过道路中心线生成的行车道,包括了沿道路中心线方向和与道路中心线方向相反的两条单向行车道。行车道包括道路编号、道路起点和终点、道路名称、道路方向标志、所含车道数量等信息。

1.3.3 车道

车道表示行车道中一条供单一纵列车辆行驶的道路。一条行车道一般包含多条车道,每条车道可以具有不同的转向类型,包括直行车道、左转车道、右转车道和掉头车道。车道之间相互关联,包含拓扑信息。车道属性包括车道起始位置、终止位置、车道编号、道路名称、道路类型、最高速度、道路方向、转向类型、左车道编号、右车道编号等信息。此外,每条车道的起始位置和终止位置各包含一个表示车道连接关系的道路结点。

1.3.4 结点

道路结点位于每条车道的两个端点,用于表示车道的开始位置和终止位置,表明该条车道行驶方向。同时,道路结点还用于道路交叉口中不同车道的相互连接,以构成整个交通道路网络。其属性包括了结点编号、坐标位置、所属车道编号、车道通行方向指示、所属车道转向类型等属性特征。

1.3.5 道路交叉口

交叉口是两条或两条以上道路的交汇处,用于连通相交道路包含的所有车道。交叉口通过生成多条连接车道将交叉口内相应的车道进行连接,建立完整的道路拓扑关系。交叉口的属性信息包括交叉口编号、交叉口名称、交叉口位置、所含行车道数量、连接弧段道路数量、道路结点数量、车道相连结点编号和连接路段编号等。

1.3.6 交叉口连接车道

交叉口连接车道是在道路交叉口内将与交叉口相连的不同车道进行连接的弧段道路。根据车道的不同转向类型和道路结点包含的连接信息,连接车道的连接方向与连接关系也不尽相同。

1.4 道路网络模型建立方法

初始道路中心线数据以路段为单位进行存储,每条路段包括了道路的名称、路段编号等信息。一条线段记录表示一条实际路段的道路中心线,路段之间为道路的交叉口部分,道路在交叉口处相连。

获取一条路段,将路段两个端点作为路段两端交叉口的中心点。缩短路段两端一定的长度作为道路交叉口的部分,建立道路交叉口基础模型。此时道路交叉口仅包含连接道路的名称、编号、交叉口中心坐标等初始信息。

本文中,交通仿真建立于以车道为最小单元的道路模型中,车道包含完整的道路信息和拓扑关系,行车道为某一同侧方向上所有车道的总合构成的综合道路。因此,在实际的道路网络中无需实际建立行车道的几何特征,可以只建立逻辑模型和行车道的属性数据。行车道建立完成后,在道路中心线的两侧生成与道路中心线平行并有一定偏移量的线段,用于表示车道。车道可以为多个点段组成的曲线道路。当一条车道生成完毕后,在车道两端生成结点,并将道路结点存入相应交叉口,用于表示车道的交通流方向,转向类型。

生成下条路段时,应先查找下条路段的端点是否和已经生成的道路交叉口的中心坐标相同。若相同,则无需生成新的交叉口,直接建立该路段的道路行车道与车道;若不相同,则应先建立新的交叉口后再建立行车道与车道。直到初始道路数据中所有路段都生成完毕后,根据结点所代表的车道的道路方向和转向类型,在交叉口内生成不同的连接弧段,将不同的车道连接起来,最后生成一个完整的道路交通网络。下图中,图2为道路网络中道路要素结构图,表达了道路网络模型各个要素之间的层次与关系。图3表示道路网络生成后交叉口处的道路图。

微观交通仿真需要建立在拓扑关系完善、道路连接关系正确的网络中,对道路网络中各条道路的连通性有较高要求。因此,需要对初步建立的道路网络道路连接状况、道路行驶方向、交叉口连接关系等指标进行校验,保证道路网络的正确完整性。校验包括了网络几何特征完整性、属性数据完整性和逻辑拓扑关系的完整性3个部分。几何特征完整性校验包括:车道是否存在交叉,是否正确连接,有无被隔断等。属性数据完整性校验包括了对道路网络中所有特征要素属性数据的校验,包括了车道间隔距离、行车道编号、

车道数量、道路建立方向、交叉口范围、连接车道长度等。拓扑关系完整性校验是对道路网络中生成要素之间连接状态的检查,以确保车道之间的无缝连接和道路网络的连通性。包括了行车道所含车道的基本信息、车道所属交叉口数据、是否含有同向相邻车道数据、交叉口是否包含车道数据、结点数据是否完整等。

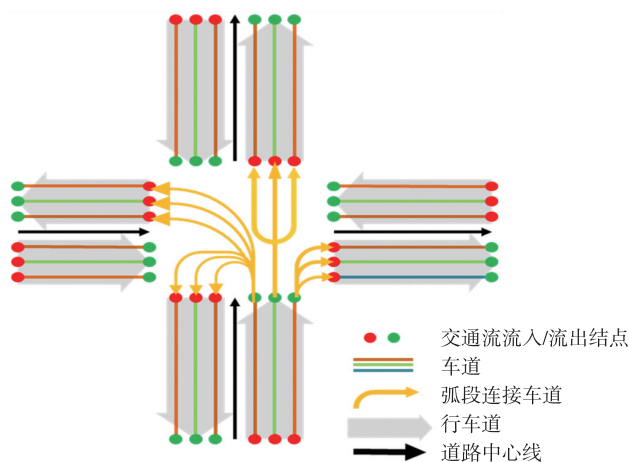


图2 道路要素结构图

Fig. 2 Structure of road features

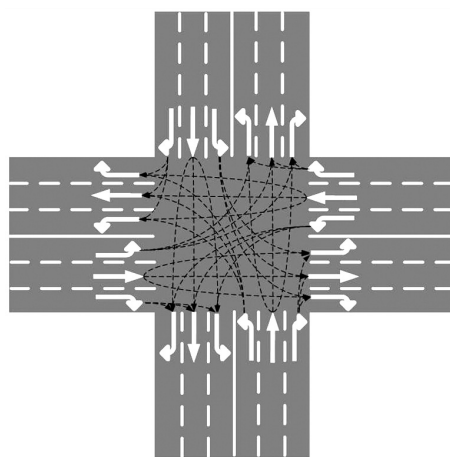


图3 包含车道的交叉口

Fig. 3 Intersection and lanes

2 微观交通仿真原型系统

上文提出的交通网络模型,可以广泛地应用于微观交通仿真领域,如基于车道的交通导航、建立针对交通流的仿真模拟等。本文在此道路网络模型基础上,结合车辆跟驰模型,建立了一个面向单个车辆的交通仿真平台原型系统。

2.1 IDM 模型^[13]

本文建立的交通仿真系统的车辆仿真模型使用了 Martin 等人提出的 IDM 模型^[13]。IDM 模型是一种车辆跟驰模型,车辆某一时刻的行驶状态由车辆位置、速度和其在车道中的排序位置决定,车辆加速或减速由它与车道中前车的距离和各自的速度所决定。车辆的加速度(dv/dt)根据车辆当前速度、与前车距离和与前车接近时的速度差来决定。

IDM 跟驰模型包含以下参数:理想状态下的速度 v_0 、与前车相距的理想间隔时间 T 、加速度 a 、减速度 b 、最小间隔距离 s_0 、加速度变化 δ 。具体公式如下:

$$\frac{dv}{dt} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$s^* = s_0 + \left(vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right) \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可以看出,车辆速度受加速作用和减速作用影响。车辆加速分为在无前车影响下的理想加速度 $a = [1 - (v/v_0)^\delta]$ 和受前车影响下的加速运动。在不受其他车辆约束的情况下,车辆的加速度从初始值逐渐降至零,当加速度为零时,车辆达到理想的速度 v_0 。受前车影响时,减速作用通过对车辆理想间距 s^* 和与前车实际间距 s 的比较来确定,当车间距不断接近 s^* 时,加速度逐渐降低至接近零,不再继续加速。同时,在稳定的车流中, s^* 是随着前车的速度动态变化的,当接近比自身车速慢的车辆时, s^* 增大;当前车速度较快时, s^* 则减小。所以,当车辆接近理想速度、与前车间距减小、接近前车时与前车的速度差较大时,车辆进行减速。

IDM 跟驰模型中的每个车辆都可具有不同的行驶参数,如:

- (1) 卡车具有较低的 v_0 、 a 、 b ;
- (2) 谨慎驾驶的车辆具有较高的理想间隔时间 T ;
- (3) 激进的驾驶风格具有较高的 v_0 、 a 、 b ,同时具有较低的理想间隔时间 T 。

2.2 微观交通仿真平台原型系统

本文结合 Visual Studio 开发平台,利用 C#语言开发了基于上述道路网络模型和 IDM 模型的交通仿真平台的原型系统. 图 4 为系统平台运行界面.

在此平台上,按照上述道路网络模型的建立方法,建立整个道路网络. 交叉路口与部分区域的道路网络如图 5、图 6 所示.

本系统的数据是美国孟菲斯市的部分道路中心线数据,来自美国 ESRI 公司网站,以地理空间数据形式进行存储. 初始数据中一条记录代表一条道路中心线,道路中心线在交叉口处进行连接. 按照道路网络模型建立的方法,建立模型. 加载道路中心线数据,其次根据路段的属性,生成双向行车道、车道和交叉口,在道路交叉口将各个车道相连接,建立整个区域内的道路网络. 图 5 表示了某个交叉路口和道路连接情况,图 6 为部分区域内交通道路网络. 建立此系统主要是实现在该模型上进行微观交通仿真,以验证交通网络模型在交通仿真领域的可行性,所以对于交通网络模型部分进行了简化. 简化后的道路网络中,每条行车道包含一条车道,每条车道在交叉口处与所有的进入交叉口的车道相连接,最终建立整个交通道路网络.

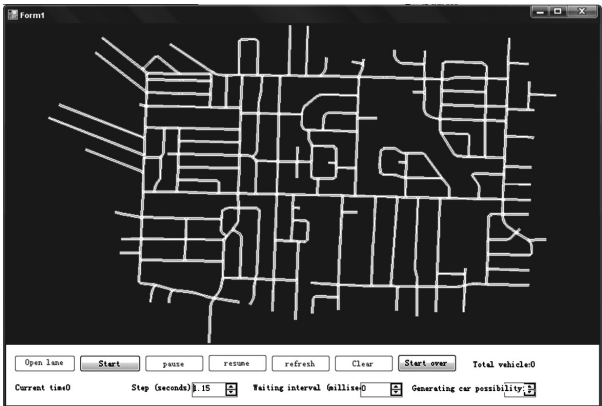


图 4 微观交通仿真平台界面
Fig. 4 Interface of the developed prototype

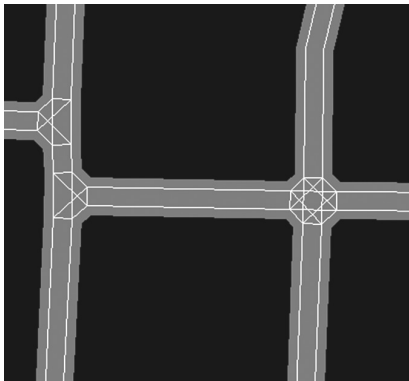


图 5 道路交叉口
Fig. 5 Intersection

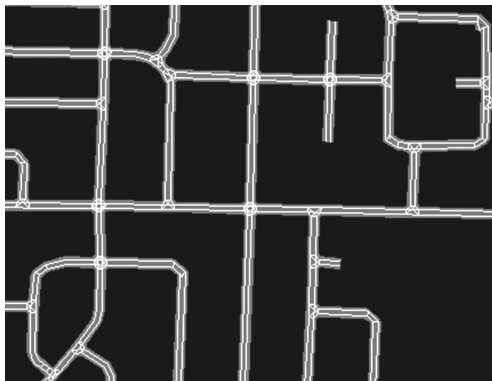


图 6 部分区域内的道路网络
Fig. 6 Part of road network

在此网络基础上,引入 IDM 跟驰模型进行道路网络中的交通模拟. 小型车辆以小长方形表示,大型车辆由较大的长方形表示. 按照 IDM 模型,不同的车辆具有不同的加速度,由不同的路口进入道路网络,沿该道路模型中的车道行驶. 当行驶到交叉路口时,减速并选择交叉路口中与该车道相连的一条道路继续行驶. 当多辆车同时到达一个交叉口时,车辆开始排队等待,依次遵照先到先通行的规则,按顺序通过交叉路口.

通过此模拟平台可以看出,在不同的车流量的情况下,哪些交叉口容易发生拥堵的状况. 从而可以按照微观仿真的结果在现实生活中采取不同的方法,包括交通诱导或重新规划周边道路等等,以达到优化交通的目的.

本文开发的微观交通仿真平台原型系统验证了本文提出的交通道路网络模型在交通仿真研究中是可行的. 面向交通仿真的道路网络模型对于真实世界的道路层次细节有较为完善的表达,因此可以用

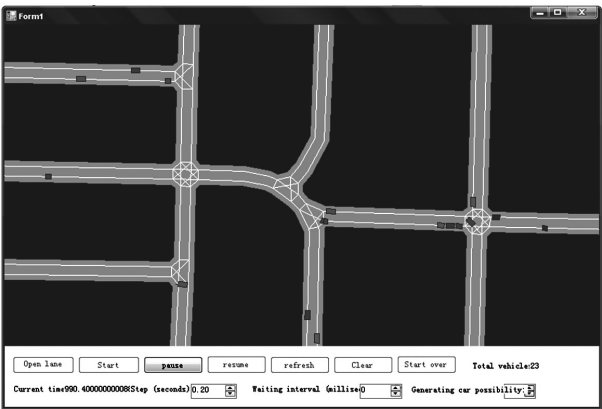


图 7 基于道路网络模型的微观交通仿真
Fig. 7 Traffic simulation based on road network model

于多种交通仿真的研究,应用前景广泛.其不仅可以应用在城市交通流的模拟中,还可以作为三维实景导航、基于车道细节的车辆导航等多种交通领域的道路网络模型.

3 结语

3.1 结论

本文基于现有的研究成果,并针对已有的道路网络模型在交通仿真研究上的不足,发展并提出了一种面向交通仿真的道路网络拓扑模型.该模型利用已有的道路中心线数据,实现了基于车道-行车道-路网的快速建模过程.克服了已有道路网络模型对道路表达不够完善,难以实际应用等弱点,并将其用于交通微观仿真之中.与此同时,该模型结构灵活,可以根据不同类型的原始数据、不同的交通网络建模要求,调整模型中的车道、交叉口等要素,改变模型结构,以满足不同的面向交通仿真的研究.

3.2 未来展望

在今后的工作中,作者将继续深入细化道路网络模型,完善路网模型的功能,实现如车道分流与合并、路口与交通枢纽区域内车道更加复杂的拓扑连接、引入道路交通信号控制技术等.在路网模型的可视化方面,结合我国实际道路网络情况,将道路网络中的各层次要素更真实地展现于微观交通仿真系统.

[参考文献]

- [1] MATTI P. Simulation of traffic systems—an overview[J]. Journal of geographic information and decision analysis, 1999, 3(1):1-8.
- [2] YANG Q. A Simulation laboratory for evaluation of dynamic traffic management systems[D]. Massachusetts institute of technology, 1997.
- [3] Goodchild M F. GIS and transportation: status and challenges[J]. Geoinformatica, 2000, 4(2):127-139.
- [4] 石建军,许国华,何民,等. 交通地理信息系统数据模型的研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(3):318-322.
- [5] ADAMS T M, KONCZ N A, VONDEROHE A P. Guide-lines for the implementation of multimodal transportation location referencing systems[M]. Washington D C: National Academy Press, 2001.
- [6] KONCZ N, ADAMS T M. A data model for multi-dimensional transportation location referencing systems[J]. Urisurisa, 2002, 14(2):27-41.
- [7] DUEKER K J, BUTLER J A. GIS-T enterprise data model with suggested implementation choices[J]. Journal of the urban and regional information systems association, 1998, 10(1):12-36.
- [8] MALAIKRISANACHALEE S, ADAMS T M. Lane-based network for transportation network flow analysis and inventory management[J]. Transportation research board, 2005(1 935):101-110.
- [9] LI X, LIN H. A trajectory-oriented carriageway-based road network data model, Part 1: background [J]. Geo-spatial information science, 2006, 9(1):65-70.
- [10] LI X, LIN H. A trajectory-oriented, carriageway-based road network data model, Part 2: methodology[J]. Geo-spatial information science, 2006, 9(2):112-117.
- [11] 朱庆,李渊. 道路网络模型研究综述[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2007, 32(6):472-476.
- [12] FOHL P, CURTIN K M, GOODCHILD M F, et al. A Non-Planar, Lane-Based Navigable Data Model for ITS[C]//The 7th International Symposium on Spatial Data Handling, Delft, 1996.
- [13] MARTIN T, ANSGAR H, DIRK H. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations[J]. Physical review E 62, 2000:1 805-1 824.
- [14] 左小清,李清泉,谢智颖. 基于车道的道路数据模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2004, 24(2):73-76.
- [15] 商蕾,陆化普. 城市微观交通仿真系统及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1):221-224.
- [16] 宋厚冰,蔡远利. 交通系统计算机仿真研究综述[J]. 计算机仿真, 2004, 21(3):101-104.
- [17] 李清泉,左小清,谢智颖. GIS-T 线性数据模型研究现状与趋势[J]. 地理与地理信息科学, 2004, 20(3):31-35.

[责任编辑:陆炳新]