

城市复杂道路网络 T-GIS 数据模型

孙伟伟¹, 刘春^{1,2}, 林航飞³, 谢思铭¹

(1. 同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092; 2. 现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学 交通工程系, 上海 201804)

摘要: 针对现代城市复杂交通网络现状, 提出以交通地理信息系统(transportation-geographic information system, T-GIS)数据模型来描述、城市复杂道路网络的复杂特性。首先以复杂网络理论验证城市道路网络的复杂特性, 其次从道路网络综合描述属性表达和网络数据逻辑关系 3 个方面构建城市复杂道路网络 T-GIS 数据模型。实践证明, 本 T-GIS 模型具有很好的应用效果, 很好表达道路网络空间信息及复杂逻辑关系, 为道路拥堵和路径诱导及城市道路网络演化研究提供所需数据, 且具有较好的推广价值。

关键词: 复杂网络; 城市复杂道路网络; 交通地理信息系统(T-GIS)数据模型

中图分类号: P282

文献标识码: A

T-GIS Data Model for Urban Complex Road Network

SUN Weiwei¹, LIU Chun^{1,2}, LIN Hangfei³, XIE Siming¹

(1. Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Advanced Engineering Survey of SBSM, Shanghai 200092, China; 3. Department of Traffic Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: According to the complex situation of modern urban transportation network, a new T-GIS data model for urban complex road network (UCRN) was established to describe its complex characteristics. First, the complex network theory was introduced to validate the complexity of road network. Then on the basis of three aspects such as the comprehensive description of UCRN, the attribute expression, and the internal logical relationship of UCRN, T-GIS data model was constructed. Finally, T-GIS data model proved to be effective in applications, and clearly represented spatial information and internal logic relations of UCRN. The study provides desired data for road congestion and traffic flow

analysis, route induction and road network evolution.

Key words: complex network; urban complex road network; T-GIS data model

城市道路网络的复杂性不仅表现为包含非常细致复杂的交通要素, 如路段、道路交叉口及交通设施等, 而且具有复杂的拓扑结构和动力学特征, 如交叉口不停地产生和转移流量、交通阻塞的形成与传播及消散等具有复杂的动态特性^[1]。更重要的是, 网络拓扑对道路网络上的流量分布及其他动力学过程具有巨大影响, 尤其网络规模及拓扑结构是交通拥堵的重要原因。T-GIS(transportation-geographic information system)基于传统 GIS 技术, 能够表达城市道路网络中各类信息及拓扑关系并处理网络实体的时空变化信息。T-GIS 数据模型最初采用线性参考体系和动态分段技术表达道路要素, 如文献[2]的 NCHRP 线性参考模型、文献[3]的 Dueker 和 Buter 的 Enterprise T-GIS 数据模型等。在导航应用基础上, 文献[4]提出导航 T-GIS 数据模型, 文献[5]提出基于车道的城市道路网络 T-GIS 数据模型。近年来, 随着时态 GIS 概念引入交通领域, 文献[6]通过添加交通特征的时空描述提出面向交通管理的时空 T-GIS 数据模型, 文献[7]基于面向对象方法和统一建模语言模型, 提出满足城市交通事故管理的 T-GIS 数据模型, 文献[8]基于面向对象的方法提出多尺度多模式的 T-GIS 数据模型。当前城市道路网络 T-GIS 数据模型的对比如表 1。由表 1 可见, 虽然城市道路网络 T-GIS 数据模型已有一些研究成果, 但存在两大问题: ①只针对单一特

收稿日期: 2010-06-29

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目(10ZZ25); 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室经费资助(200914); 现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室开放基金(TJES1010)

第一作者: 孙伟伟(1985—), 男, 博士生, 主要研究方向为 T-GIS 理论及工程应用、高光谱影像流形学习降维。E-mail: sw8525@gmail.com

通讯作者: 刘春(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为 GIS 理论及方法、LIDAR 数据处理及特征提取、高光谱影像降维机载激光扫描、GIS 属性不确定性。E-mail: liuchun@tongji.edu.cn

定功能,不能满足城市复杂道路网络的多功能需求,如路网结构完善及流量分析研究等;②交通要素描述不细致,不能满足复杂交通要素的建模需求,如交通信号灯配时等.

表 1 城市道路网络 T-GIS 模型对比
Tab. 1 Comparison of urban road network T-GIS data model

T-GIS 模型	特性	优点	局限性
LRS 模型	以基准为中心的线性参照系统及动态分段模型	理论稳固	应用不灵活,仅能满足简单道路要素建模
Enterprise T-GIS 模型	以事件为中心的线性参照系统及动态分段模型	理论稳固,支持更多的非交通特征数据	仅能满足简单道路网络要素建模
导航 T-GIS 数据模型	面向车道的非平面的弧段-节点数据模型,同时保留动态分段技术	非平面特征表达,面向导航应用,逻辑关系表达精细复杂	仅针对单一应用,网络分析效率低,交通要素描述不够细致
面向车道的 T-GIS 数据模型	以方向车道作为建模单位,改进导航数据模型	准确描述车道属性信息,提高网络分析效率并保证导航质量	针对单一导航应用,不能够满足交通拥堵和流量分析等需求
面向交通管理的时空 T-GIS 数据模型	附加时空特征的线性参照系统及动态分段模型	扩展动态分段理论,表达交通特征更加丰富	交通要素描述不够细致,仅针对简单交通管理,不支持交通规划及路网完善等功能
城市交通事故管理 T-GIS 数据模型	基于 UNETRANS 模型和 UML 建模语言	实现简单,可以在 ArcGIS 中实现	不支持时态数据描述和操作,无法表达时间拓扑关系
多尺度多模式 T-GIS 数据模型	基于面向对象方法,将交通网络划分为多种模式	能够表达不同交通模式的数据及拓扑结构	要素表达不够细致,仅满足交通管理应用

因此,本文从研究城市道路网络复杂性出发,引入复杂网络理论,根据城市道路网络复杂特性对城市道路 T-GIS 数据要求,采用面向对象的建模方法,在实体描述和数据逻辑关系表达 2 个方面构建城市复杂道路网络 T-GIS 数据模型,为交通规划和管理部门提供科学理论指导.

1 城市道路网络复杂性与 T-GIS 数据模型

大量的真实网络不同于规则网络或随机网络却具有统计特征称为复杂网络^[9]. 城市道路网络复杂性的大量研究表明,城市道路是一个复杂的网络结合体,是多重交通功能的承载体,是混合型的复杂网络^[10]. 城市道路抽象为复杂网络有 2 种方法:原始法和对偶法^[11]. 对偶法将道路视为网络节点、交叉口视为网络的边. 而原始法基于 GIS 理念,拓扑表达简单直接,将交叉口视为网络节点、路段视为连接边,通过实际距离进行网络拓扑分析. 因此,通常利用原始法将城市交通网络抽象为复杂网络,并利用 T-GIS 数据模型进行描述.

城市道路网络还具有不同于抽象网络的空间拓

扑性质,如节点具有明确地理空间位置;边是实体连接,具有明确意义;节点连接需要一定成本;节点连接边的数目受物理空间的限制等^[12]. 城市道路网络的复杂特性,首先要求 T-GIS 数据模型细致表达网络实体对象及空间信息,并描述网络内部复杂拓扑关系;其次,能够提供完备的城市交通动力学研究数据,包括道路流量、车速和道路等级等,以分析网络结构对道路网络流量、费用及阻塞的影响,进而为缓解交通拥堵和完善道路网络结构等提供有效的交通控制服务.

2 城市复杂道路网络综合描述

城市道路包括路段和节点两大实体要素. 道路在 T-GIS 模型中有描述和计算两大作用.

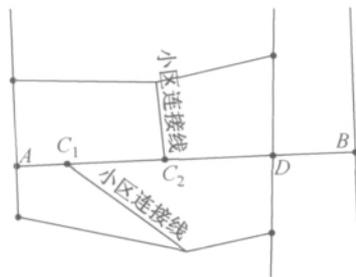
2.1 节点描述

节点是道路中断的分界点,由 3 种方式产生:①道路交叉口;②道路起始和终止点;③交通小区出入口点. 现实道路(图 1a)与其他道路相交, D 为交叉口节点, A, B 为起始和终止节点(图 1b), C_1 和 C_2 为交通小区出入口节点. 节点具有表达和计算双重作用,其描述采用 3 个层次(表 2),数据层(level-0)、抽象

层(level-1)和综合层(level-2). 数据层描述节点图形信息;抽象层存储交叉口节点;综合层描述抽象层中交叉口的转向、渠化和信号配时信息,常规的 T-GIS 节点描述没有该层.



a 现实道路 Google 影像



b 道路节点表达

图 1 实际道路及其交通地理信息系统表达

Fig.1 Real road and its expression in T-GIS

(1) 交叉口转向. 交叉口转向描述车辆的转向规则,与路径诱导、交通流量分配等研究密切相关. 交叉口转向通过“起始节点-交叉口节点-终止节点”描述,分为左转、直行、右转和掉头 4 种. 图 2 中,节点 D-A-E 为左转,节点 D-A-B 为直行, D-A-C 为右转, D-A-D 为掉头.

(2) 交叉口渠化和信号配时. 交叉口渠化是微观的转向表达,以车道为基础描述对象,表达进口车道与出口车道之间的转入、转出关系,对流量统计、转向延误分析等有重要作用. 渠化通过起始路段、起始车道、终止车道和终止路段联合表达. 图 3 的交叉口 A 中,路段 L_1 的车道 1 右转到 L_2 的 1 车道, L_1 的 2 车道右转到 L_2 的 2 车道. 信号配时指交叉口的信号灯配制方案,其表达与交叉口和车道转向关联,通过渠化及信号配时方案共同表达.

表 2 节点信息的分层描述

Tab.2 Stratified description of node information

层次	内容
level-0	描述各类节点图形信息
level-1	从数据层中抽象出,描述交叉口节点
level-2	存储交叉口转向、渠化关系和信号配时信息,用于计算

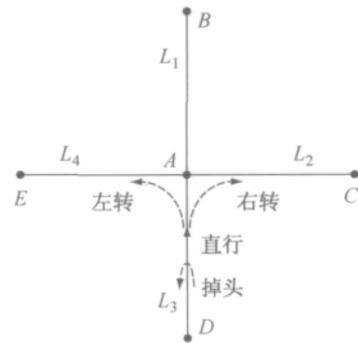


图 2 交叉口转向表达

Fig.2 Turning expression of intersection

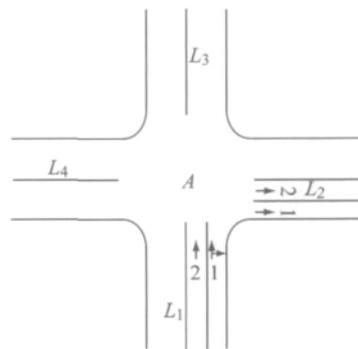


图 3 交叉口渠化表达

Fig.3 Channelization expression of intersection

2.2 路段描述

路段是 2 个节点间的道路,相邻路段间相互独立. 路段具有图形表达和计算 2 种作用,因此描述采用 3 个层次(表 3),车道层(1-0)、数据层(1-1)和合并层(1-2). 车道层描述路段车道类型和编号;数据层存储路段图形;合并层用于路段车速计算及道路统计,而常规 T-GIS 的没有该层. 路段通常采用道路中心线表示,而特殊路段,如桥隧和高架桥、立交和高架路以及匝道等,其表达与常规路段不同.

表 3 路段信息的分层描述

Tab.3 Stratified description of link information

层次	内容
1-0	描述路段车道信息,用以计算
1-1	存储路段图形,描述路段图形信息
1-2	按照路名、等级等原则将路段合并得到,用于计算

(1) 桥隧和高架桥. 桥隧和高架桥与其他路段立体相交(图 4a),产生的节点不会同时连接上下层道路. 采用双线表达,将桥隧或高架桥分为正反方向 2 个路段,使用各自中心线表达. 由于 2 个节点间仅允许 1 条路段,所以将桥隧或高架桥打断,各形成 2 条路段(图 4b).



图 4 高架桥及其交通地理信息系统图形表达

Fig. 4 Elevated bridge and its expression in T-GIS

(2) 匝道和高架。高架是相对于地面路的快速路(图 5a)。将高架路分为正反方向 2 个路段,使用各自中心线表达。高架下地面路采用中心线表达,匝道以道路中心线描述(图 5b)。

2.3 道路网络数据的属性描述

城市道路网络复杂性要求 T-GIS 模型提供交通动力学研究的各项数据,以分析道路网络对交通流量及费用和道路阻塞的影响及道路网络的演化特性。城市道路网络各项属性数据依附于节点和路段。

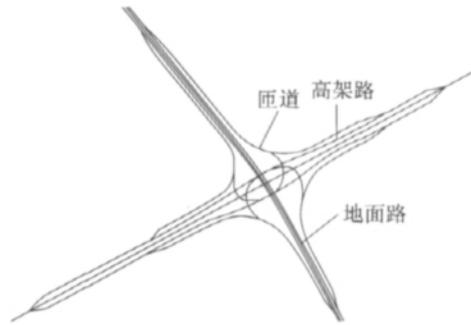
(1) 节点属性。常规 T-GIS 节点属性仅考虑其几何位置或名称,忽略其作为城市复杂道路网络要素的特殊作用。节点既是网络连接点,又是流量产生、转移及交通堵塞的关键部位。节点具有很多属性。由于篇幅有限,仅列出部分属性(表 4)。

(2) 路段属性。路段属性能够完整描述道路实体,又为交通流量分配和路径诱导等研究提供数据,这不同于常规 T-GIS 模型。路段具有很多属性,如长度和名称、断面形式、通行能力等。由于篇幅有限,

表 5 仅列出部分属性。



a 匝道和高架 Google 影像



b 匝道和高架图形表达

图 5 匝道和高架及其 T-GIS 图形表达

Fig. 5 Ramp and elevated road with their expressions in T-GIS

表 4 节点部分属性

Tab. 4 Part attribute for node

编号	属性内容	编号	属性内容
1	节点编号	5	是否是形心点
2	节点名称	6	节点类型
3	x 坐标	7	交叉口控制类型
4	y 坐标	8	交叉口信号周期

表 5 路段部分属性

Tab. 5 Part attribute for link

编号	属性内容	编号	属性内容	编号	属性内容	编号	属性内容	编号	属性内容
1	路段编号	7	起始节点编号	13	路段宽度	19	车道数	25	路段延误函数
2	路段名称	8	终止节点编号	14	机动车道宽度	20	红线宽度	26	单车道通行能力
3	路段等级	9	是否双向	15	非机动车道宽度	21	路段类型	27	路段分隔类型
4	路段等级代码	10	交通系统集	16	人行道宽度	22	路段计划类型	28	断面形式类型
5	起始节点名称	11	建设类型	17	机非分隔带宽度	23	路段通行能力	29	是否通行
6	终止节点名称	12	路段长度	18	中央隔离带宽度	24	路段设计车速	30	管理类型

3 城市复杂道路网络数据逻辑关系

城市道路网络 T-GIS 模型一方面描述实体的图形和属性,另一方面需要准确表达内部复杂

逻辑关系,满足城市交通动力学研究及网络演化的计算需求,如图 6,其中,PK 是网络实体信息表达的主键标识,FK 是与其他信息表相关联的字段标识。路段描述分为 3 层,车道、路段和路段类型。路段和节点为城市道路网络的实体要素,其他信息如交叉

口转向和渠化等都与两者密切相关. 节点通过节点、交叉口节点、交叉口转向、渠化及信号配时 3 层联合表达. 路段通过起始路段和终止路段编号与节点关联; 交叉口节点通过节点编号与节点关联. 交叉口渠化、车道和交叉口节点相互关联, 共同描述交叉口车

道转向; 交叉口节点和转向相互关联, 共同描述转向规则; 信号配时与转向、交叉口节点及信号控制相关, 通过信号控制、信号控制关联节点、信号组、信号控制关联车道渠化及交叉口共同描述. 通过以上要素复杂逻辑关系全面描述城市道路网络复杂特性.

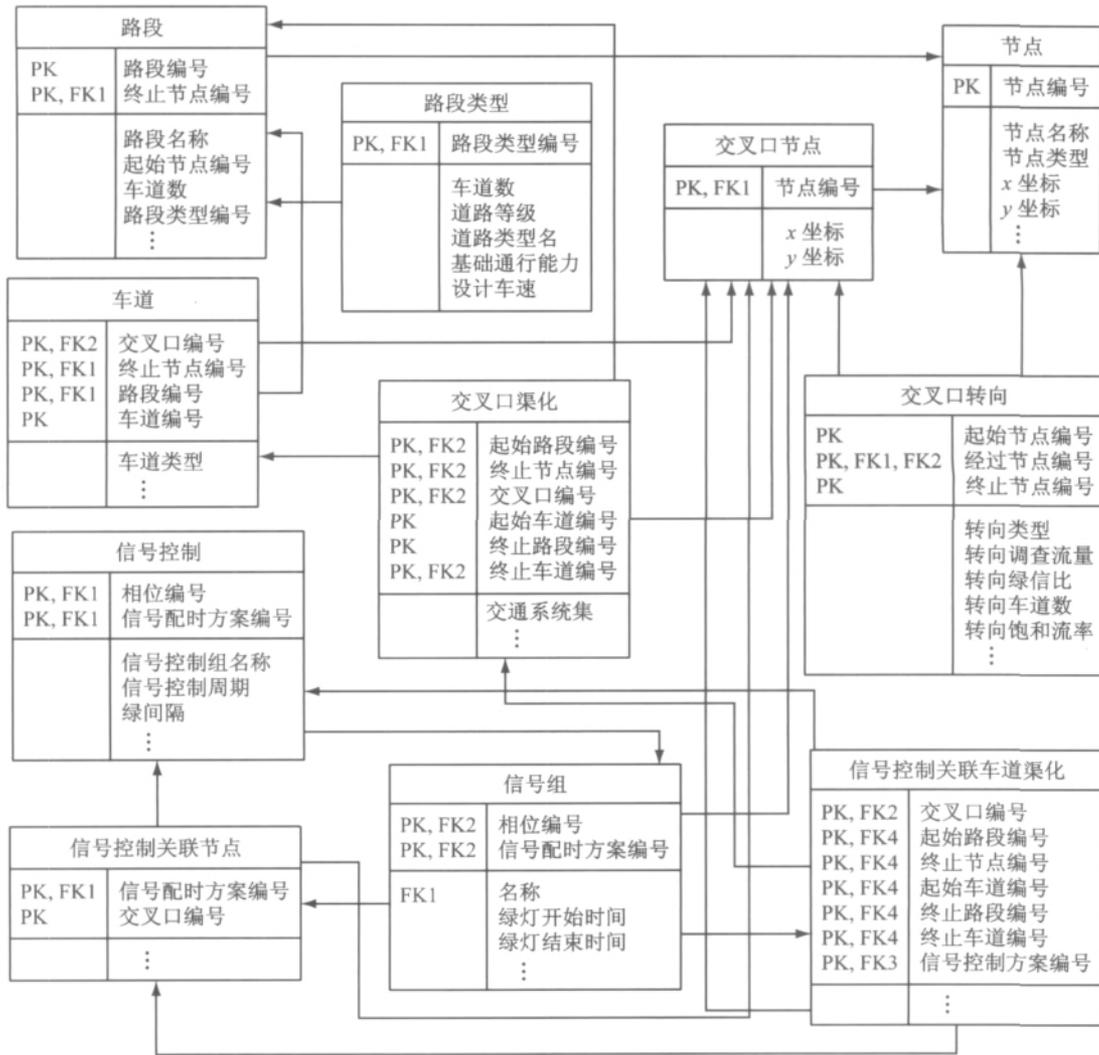


图 6 城市道路网络数据逻辑关系

Fig. 6 Logical relationship of urban road network data

4 城市复杂道路网络 T-GIS 模型应用

城市复杂道路网络 T-GIS 数据模型已成功应用于某城市信息化建设项目中, 为交通仿真和路况发布提供标准化数据.

城市复杂道路网络 T-GIS 数据包含路段和节点及其动力学数据属性, 如交叉口延误、路段通行能力等, 而且能够表达网络内部复杂的逻辑关系,

如交叉口转向、交叉口渠化及信号配时. 将 T-GIS 数据导入智能交通仿真软件 VISUM 中, 实现宏观仿真模型运算(图 7). 同时利用交叉口转向、渠化和信号配时数据模拟细部道路的车辆运行及路段拥堵状况, 为解决交通拥堵提供支持. 另一方面, 城市复杂道路网络 T-GIS 数据表达网络内部的时空拓扑关系, 用于实时交通诱导服务. T-GIS 数据实时采集出租车全球卫星定位 (global positioning system, GPS) 信号, 利用车速匹配算法估算路段速度, 通过地图匹配和 WebGIS 技术, 实现路况信息

的实时发布.在此基础上,通过最短路径计算,获取当前路况下的最佳出行方案,避开拥堵路段,方便市民出行(图8).



图7 应用于智能交通仿真

Fig.7 The application to intelligent traffic simulation



图8 应用于实时路况发布服务

Fig.8 The application to real-time traffic release service

对比现有的城市道路网络 T-GIS 数据模型,如 LRS 模型及多时态多模式 T-GIS 模型等,城市复杂道路网络 T-GIS 数据模型更符合道路网络内部复杂特性需求,能够更好辅助解决城市交通中的矛盾.

5 结语

现有城市道路网络 T-GIS 数据模型难以满足复杂交通网络的多功能需求.本文提出基于复杂网络的城市道路网络 T-GIS 数据模型框架,首先细致描述城市道路网络实体要素,然后给出实体对象的部分属性,最后从数据库的角度详细描述内部的复杂逻辑关系.相比单一功能的 T-GIS 数据模型,文中所提的 T-GIS 模型在实践中取得了很好的应用效果,能够协助交通动力学研究及实时交通诱导服务,具有很好的应用推广价值.

致谢:本文工作得到同济大学土木工程学院光华创新团队和杭州市智能交通信息平台(一期)示范工程项目的支持,并感谢杭州市交通研究中心工作人员的协助和建设性意见.

参考文献:

- [1] 吴建军.城市交通网络拓扑结构复杂性研究[D].北京:北京交通大学交通运输学院,2008.
WU Jianjun. Study on complexity of urban traffic network topology structure [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, School of Traffic and Transportation, 2008.
- [2] Vonderche P A, Chou C, Sun F, et al. A Generic Data Model for Linear Referencing System in NCHRP Research Result Digest[R]. Washington D C: Transportation Research Board, 1997, 10-35.
- [3] Dueker K J, Butler J. A T-GIS enterprise data model with suggested implementation choices[J]. URISA Journal, 1998, 10(1): 12-36.
- [4] Fohl P, Curtin K M, Goodchild M F, et al. A nonplanar lane-based navigable data model for ITS[C]//Seventh International Symposium on Spatial Data Handling. Delft: [s. n], 1996, 17-29.
- [5] 左小清,李清泉.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.
ZUO Xiaoqing, LI Qingquan. Road data model based on lane [J]. Journal of Changpan University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 73.
- [6] Guo B, Kurt C E. Towards temporal dynamic segmentation [J]. GeoInformatica, 2004, 8(3): 265.
- [7] Guo P, Sun Y L, Sun. Study on urban traffic incident GIS-T data mode [C]//2008 International Workshop on Education Technology and Training and 2008 International Workshop on Geosciences and Remote Sensing. Shanghai: [s. n], 2009: 149-152.
- [8] Chen S, Tan J, Christophe Claramunt, et al. Multi-scale and multi-modal GIS-T data model [J]. Journal of Transport Geography, 2011, 19(1): 147-161.
- [9] 陈菁菁.基于复杂网络的城市轨道交通网络可靠性研究[J].都市快轨交通,2010,23(2): 18.
CHEN Jingjing. Study on the reliability of urban rail transit network based on complex network [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2010, 23(2): 18.
- [10] 汪小帆,李翔,陈关荣.复杂网络理论及其应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
WANG Xiaofan, LI Xiang, CHEN Guanrong. Complex network theory and its application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [11] 吴建军,李树彬.基于复杂网络的城市交通系统复杂性概述[J].山东科学,2009,22(4): 68.
WU Jianjun, LI Shubin. Overview of the complexity of urban transportation system based on complex network [J]. Shandong Science, 2009, 22(4): 68.
- [12] 赵月,杜文,陈爽.复杂网络理论在城市交通网络分析中的应用[J].城市交通,2009,7(1): 57.
ZHAO Yue, DU Wen, CHEN Shuang. The application of complex network theory in urban transportation network analysis [J]. Urban Transportation, 2009, 7(1): 57.