

面向交通安全管控的高速公路 基础路网模型及其应用*

张学强, 黄敏, 张汉林, 钮中铭

(中山大学工学院//广东省智能交通系统重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 从满足高速公路交通安全互联网联控对路网模型的精细化需求角度分析了路网建模的要点, 提出了一种适合高速公路路网数据表达、操作的高速公路基础路网数据模型。该模型基于分层拓扑组织路网要素, 以里程碑号作为路网建模划分的最小粒度, 同时包含车道信息, 可根据不同需求组合为抽象路网。模型包含有向路段、有向路段结点、有向子路段、有向子路段结点、车道、车道连接器六个部分, 能够细致的描述高速公路路网拓扑结构。选取沈海高速与沪陕高速共用路段区域路网作为试验区域, 建立了基于该模型的高速公路路网数据库, 并将模型应用于高速公路突发事件处理, 实例表明该模型有利于迅速响应高速公路网络的突发事件, 满足高速公路交通安全互联网联控相关应用对路网模型的需求。

关键词: 高速公路; 路网拓扑; 数据模型

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2016)06-0092-06

Research of expressway network model for traffic safety management and its application

ZHANG Xueqiang, HUANG Min, ZHANG Hanlin, NIU Zhongming

(School of Engineering//Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transportation System,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In order to satisfy the function demand of expressway traffic safety networked joint control, an expressway road network model is proposed, which is suitable for data presentation and operation. The model is constructed based on hierarchical topology network elements with landmark as a minimum size of the road network model partitions. The lanes are described precisely, and road network modeling units could be combined into abstract network according to different traffic demands. The model is composed by 6 parts including arc, arcnode, segment, segmentnode, lane and laneconnector, which could be used to describe the highway road network topology carefully. This model is tested in the emergency response of expressway by using the common section of Shen Hai expressway and Shanghai-Shanxi expressway as a testing section, the result shows the model could satisfy traffic safety management demands effectively.

Key words: expressway; highway network topology; data model

高速公路交通安全互联网联控技术作为高速公路安全管理研究的一个重要方向, 受到众多学者的关注。在同一平台实现高速公路路网交通运行信息及

突发交通事件的实时展示、多尺度风险分析研判、路警联动指挥调度等功能就要求高速公路路网模型要有足够的精细程度来满足不同应用对路网的需求。

* 收稿日期: 2016-05-10

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAG01B04)

作者简介: 张学强(1990年生), 男; 研究方向: 路网数据模型; 通讯作者: 黄敏; E-mail: huangm7@mail.sysu.edu.cn

求。因此，研究合理的高速公路路网模型是建立该平台的基础和前提。然而，目前的路网数据模型大多是根据城市道路建立的^[1-10]，针对高速公路路网模型的研究较少。虽然高速公路网络与城市道路网络在形式上有许多共同点，但在路网拓扑结构、交通流特性和交通控制方式等方面仍有着自身的行为特点^[11]。已有的高速公路路网数据模型中，齐莹菲等^[12]提出基于交通流特性的路网模型，利用不同类别的接合要素和边要素描述路网结构，能较好的支持高速公路路网交通流信息，但由于缺少分层组织信息，车道段间的拓扑连通关系过度冗余，不利于对路网数据进行操作。陈雨人等^[13]提出包含立交匝道信息的高速公路网络结构，采用二层拓扑结构体系，提升了路网搜索速度，但模型高度简化，缺少车道和方向信息，难以满足目前应用对模型精度的需求。因此，本文提出了一种适合高速公路交通网络数据表达与操作的高速公路交通网络数据模型，以满足高速公路交通安全网联联控对路网模型的精细化需求。

1 高速公路交通特征需求分析

实现多个部门对高速公路进行网联联控管理，要求路网结构对路网的描述在尽可能接近真实情况的同时还满足不同应用对路网精度、拓扑和几何条件的需求。其中，多尺度交通安全风险研判从重点车辆、路段以及路网三个尺度对交通运行安全风险因素进行分析识别，要求路网数据模型能准确表述路网几何特征及拓扑结构的描述，如道路的位置、物理连通关系、车道数、长度、宽度、曲率等，能够描述路网关键节点，如匝道出入口、收费站等；大范围交通流干预控制针对高速公路节假日、重大突发事件以及恶劣天气条件下交通流特点研究路网交通流组织技术，要求路网数据模型支持记录天气情况及其评估参数，并以高速公路出入口及里程桩号作为其控制点，表述上下游车道和相邻车道的拓扑连通关系；路警联动联控研究高速公路路网警力资源定位与行迹分析、路警联动联控等技术，要求路网模型能记录车辆动态坐标及其时空分布，支持多层次的线性参考，为警用车辆提供高精度的路网定位信息。

总结不同应用中路网描述的特点，高速公路路网模型需满足以下要求：

- 1) 建立路网基本建模单元，精确描述路网几何特征及物理拓扑结构。
- 2) 提升路网表达精度，支持多尺度线性参考

和路网高精度定位。

- 3) 准确表述车道及车道间拓扑连通关系，优化拓扑结构，方便路网数据操作。

2 高速公路基础路网数据模型

传统城市道路路网模型中使用路段及其交叉口结点作为路网的基础建模单元，通过交叉口结点记录相邻路段的拓扑连通关系。然而与城市公路基础路网不同，高速公路为双向独立的封闭式道路，不具备传统城市路网中交叉口等传统特征，所以在模型物理层面上，选择以无横向干扰的有向路段及其结点作为路网的基础建模单元，使用图论中的图来表示，即 $G_g = (V, A)$ ， $A = \{a_i = (v_k, v_l) \mid v_k, v_l \in V\}$ ，其中， A 为有向路段， $a_i = (v_k, v_l)$ 表示从有向路段结点 v_k 到 v_l 的有向弧段。此外，高速公路联网联控管理应用需要建立以高速公路桩号为控制点的高精度路网模型，故在有向路段 A 基础上，建立以桩号为结点的有向子路段 S ， $S = \{s_i = (w_k, w_l) \mid w_k, w_l \in V \cup W\}$ ，其中 $s_i = (w_k, w_l)$ 表示从有向子路段结点 w_k 到 w_l 的有向弧段， $W = \{w_i\}$ 是有向子路段结点集。为了能够准确关联路网监控设备并记录道路交通流特征，在有向子路段 S 基础上描述车道要素， $L_a = \{\text{lane}_i\}$ ，并建立车道连接器 C_{L_a} ， $C_{L_a} = \{c_i = (\text{lane}_f, \text{lane}_e) \mid \text{lane}_f, \text{lane}_e \in L_a\}$ ， $c_i (\text{lane}_f, \text{lane}_e)$ 表示 c_i 是从起始车道 lane_f 到终止车道 lane_e 的连通关系。

基于上述理论，模型的第 1 层为有向路段层，由高速公路路网基本建模单元组合而成，包含有向路段 (Arc) 和有向路段结点 (Node) 两个要素。高速公路为封闭式道路，仅在匝道起终点处存在横向干扰，以每条高速公路存在横向干扰的位置作为有向路段的结点，并分为高速公路路网内部结点与高速公路与其他道路连接结点。

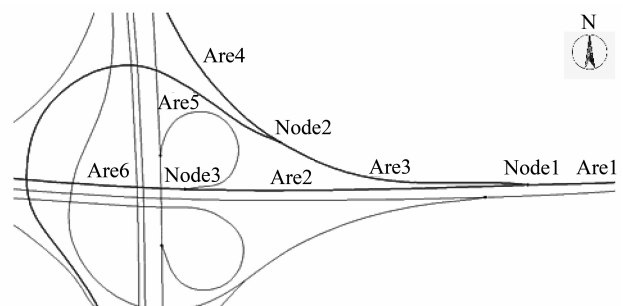


图 1 高速公路基础路网的有向路段 (Arc) 层示意图
Fig. 1 Schematic of Arc layer in expressway network model

每个结点包含了通过此结点所有路段的连通关系，反映了实际高速公路路网中的拓扑连通关系。相邻结点间的路段即为一个高速公路路网基本建模单元，建模单元的内部为单向车流，且无横向干扰。如图 1 中所示由东向西方向的高速公路为例，Node1 与 Node2 为存在横向干扰的匝道起终点，两

结点之间的路段 Arc3 即为一个有向路段，其起始结点为 Node1，终止结点为 Node2，同时 Node2 作为一个连接结点，包含两组连通关系：起始有向路段 Arc3 与终止有向路段 Arc4，以及起始有向路段 Arc3 与终止有向路段 Arc5。

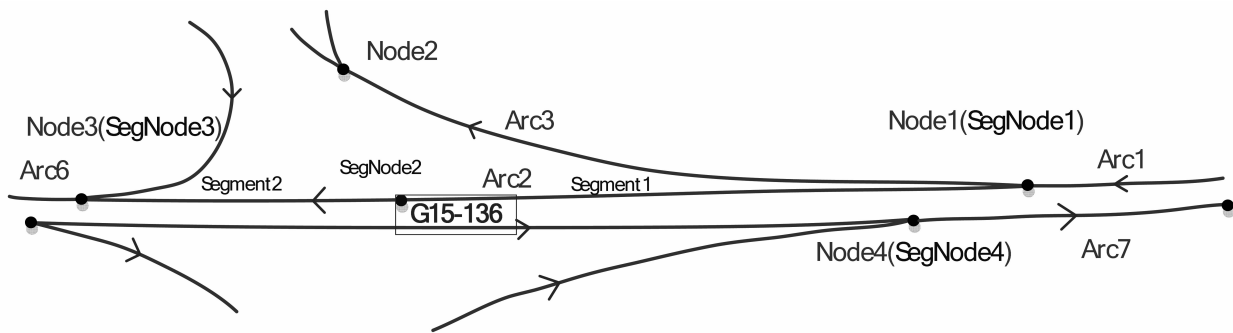


图 2 高速公路基础路网有向子路段 (Segment) 层示意图
Fig. 2 Schematic of Segment layer in expressway network model

模型的第 2 层为有向子路段层，是对高速公路有向路段的细化描述。为满足多尺度交通安全风险研判系统和交通流干预控制系统的需求，实现高速公路快速定位，在每个建模单元的内部，以整数桩号位置 (Landmark) 作为有向子路段结点 (Seg-

Note) 对有向路段进行打断，形成若干有向子路段 (Segment)。以图 2 为例，Arc2 中存在整数桩号 G15 - 136，故在整数桩号处打断形成 SegNode2 结点，此结点将 Arc2 分为 Segment1 与 Segment2 两个有向子路段。

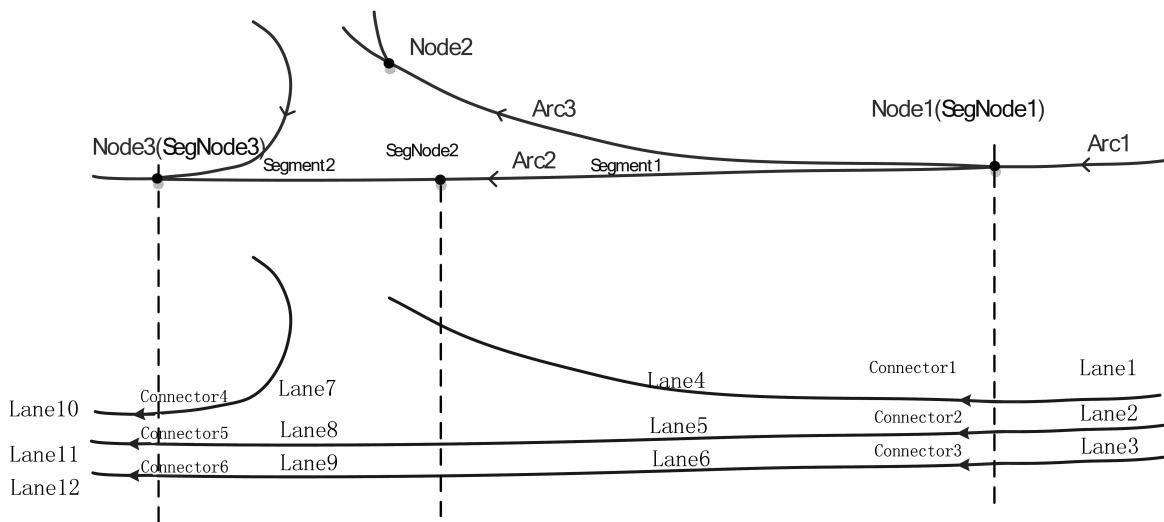


图 3 高速公路基础路网车道、车道连接器示意图
Fig. 3 Schematic of lane and laneconnector in expressway network model

模型的第 3 层是车道层，车道是对有向子路段的细致化描述，是高速公路车辆运行的基本单元，同时也是交通信息采集和发布的最基本单元，其中，前后车道通过车道连接器描述其连通关系。虽

然每一对相邻有向子路段间均存在车道连通情况，但高速里程长，有向子路段基数巨大，过多的车道连接器不利于路网数据操作，且同一个有向路段内部无横向干扰，故模型中默认同一个有向路段内部

的前后车道是连通的，仅在在有向路段节点处的前后车道设置车道连接器，防止了拓扑连通关系过度冗余，保障了高速公路路网的搜索效率。如图 3 所示的有向路段 Arc2 内部车道 lane5、lane6 到下游车道 lane8、lane9 默认情况先均为连通可达的；而在有向路段结点 Node1 和 Node3 处，存在车道连接器，分别表示 lane1 到 lane4、lane2 到 lane5、lane7 到 lane10 是连通可达的。图 4 为高速公路基础路网 ORM (Object Role Modeling) 图。

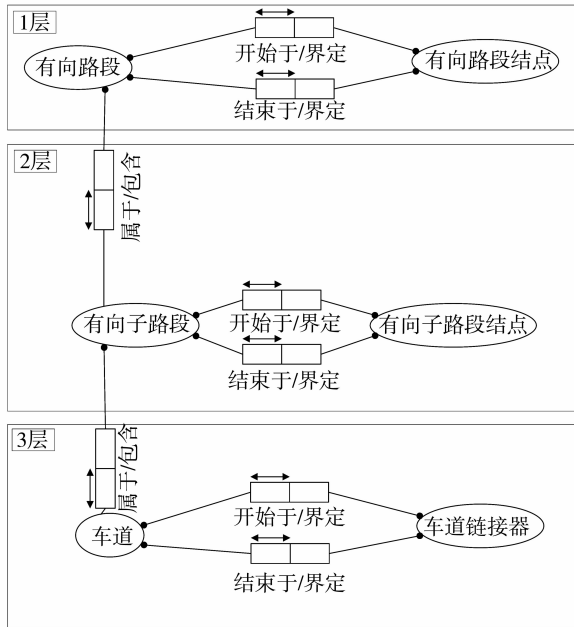


图 4 高速公路基础路网的 ORM 图

Fig. 4 ORM diagram of Expressway basic road network

3 模型在高速公路突发事件处理中的应用示例

高速公路突发事件处理是高速公路交通安全管控中最为重要和常见的情况，本文以此为应用背景，选取沈海高速 (G15) 与沪陕高速 (G40) 共用路段区域路网作为试验区域，基于本文提出的高速公路基础路网数据模型，在 ArcGIS 平台上建立其路网数据库，如图 5 所示。

高速公路上发生突发事件后，首先，由报警中心接收到突发事件相关信息 $E < landmark, drc, res >$ ，其中 landmark 表示事件发生位置里程桩号，drc 表示线路方向 (取 0 或 1，drc = 0 表示起点 - 终点方向，drc = 1 表示终点 - 起点方向)，res 表示救援状态 (取 0 或 1，res = 0 表示未获得救援派遣，res = 1 表示已获得救援派遣)。报警中心通过事件信息定位突发事件发生位置。同时，指挥中心通过巡逻车辆 GPS 信息实时监控巡逻车辆位置，最后，指挥中心在收到突发事件定位信息后，搜索路网中 fastest 能到达距离事件发生点的巡逻车辆，派遣其前往事件发生位置并为其提供指引路线。图 6 为突发事件处理的路网操作算法流程图。其中，警用巡逻车辆定位利用点线匹配和点序列配相结合的自适应匹配方法将车辆 GPS 信息匹配至有向子路段^[14]，如图 7 所示。图 8 为搜索结果和巡逻车辆路线。

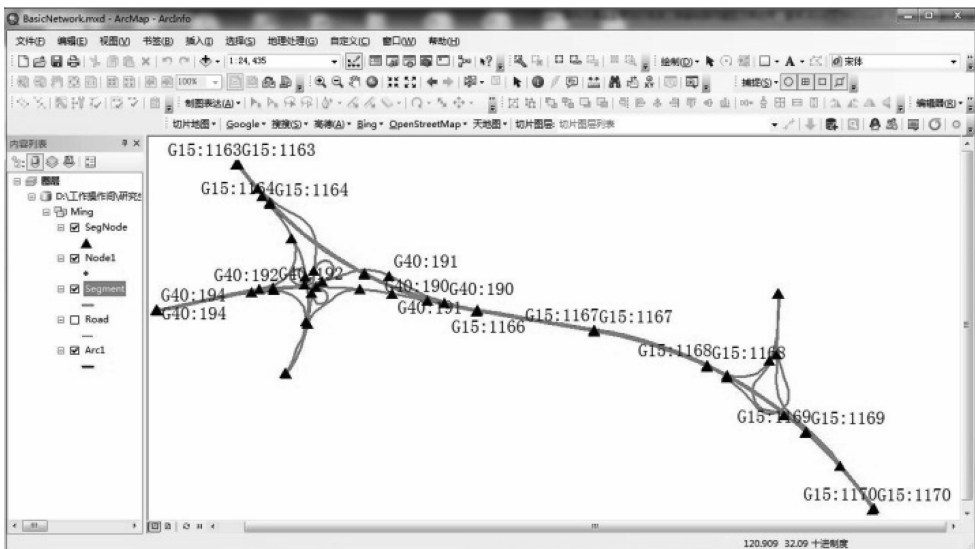


图 5 沈海高速与沪陕高速共用路段基础路网

Fig. 5 Expressway road network in the testing section

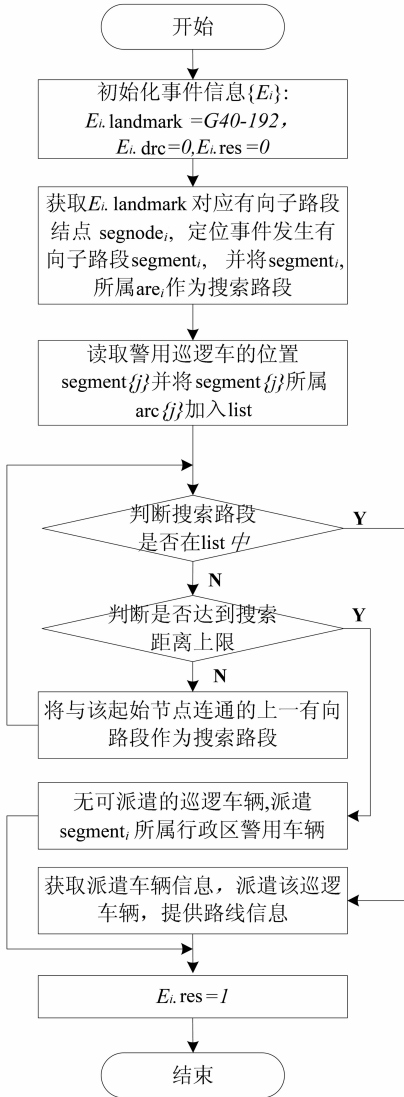


图 6 突发事件处理的路网操作算法流程图
 Fig. 6 Algorithm flow chat of road network operation in emergency situation

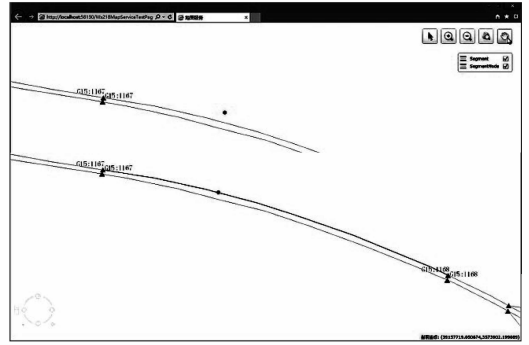


图 7 警用巡逻车辆 GPS 信息地图匹配
 Fig. 7 Map matching of police patrol vehicle

4 结 语

通过分析高速公路交通安全互联网联控中各类相关应用对路网模型的需求, 提出了一种适合高速公路路网数据表达、操作的高速公路基础路网数据模型。该模型基于分层拓扑组织路网要素, 并且优化了拓扑结构减少冗余的操作数据, 以里程桩号作为路网建模划分的最小粒度, 提升了路网精细化程度, 同时包含车道信息, 能够细致的描述高速公路路网拓扑结构。通过选取沈海高速与沪陕高速共用路段区域路网作为试验区域, 建立了基于该模型的高速公路路网数据库, 并以高速公路突发事件处理为应用背景, 实现了针对高速公路突发事件的快速响应, 表明本模型有利于迅速响应高速公路网络的突发事件。满足高速公路交通安全互联网联控相关应用对路网模型的需求。目前, 该路网模型已经在国家科技支撑计划课题: 高速公路交通安全互联网联控关键技术研发及系统集成中得到应用, 有助于推动高速公路网络风险研判、跨区域交通流干预、路警联动指挥调度等交通安全管控应用的进一步发展。

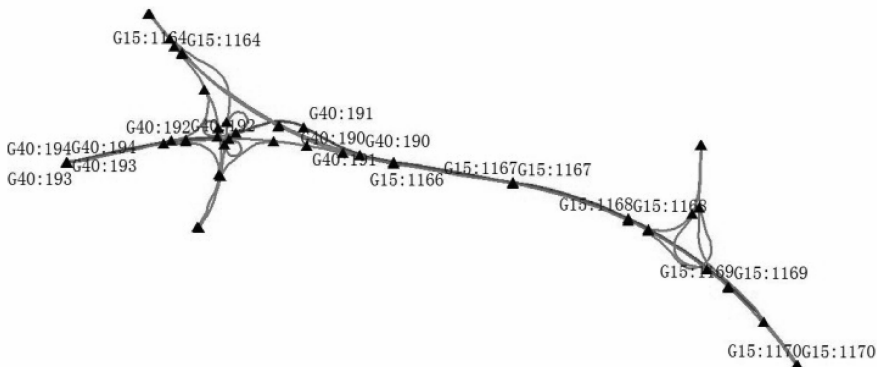


图 8 搜索结果和巡逻车辆救援路线
 Fig. 8 Search results and patrol vehicle rescue route

3 结 语

文中虽然没有一般性地讨论强非线性振荡电路(1)周期振荡的存在性、唯一性和稳定性等定性理论的基本问题,但对具体给定的电路,前二者由式(16)、(17)联立的非线性代数方程组实根的数目确定;后者可由本法与数值积分法相结合解决。具体做法是,以本法给出的近似解作为数值积分法的初值,由数值积分法描出的相轨线走向直接判别解答的稳定性。本法集强非线性电路的定性分析和定量计算于一身,对电路分析具有良好的理论意义实用价值。

致谢:衷心感谢导师余顺争教授和李宁教授对本工作的悉心指导。

参考文献:

- [1] 邱关源. 现代电路理论[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [2] 罗晓华, 罗诗裕. 三束储存与电子同步运动的动力学稳定性[J]. 中国科学(物理学, 力学和天文学), 2014, 44(2): 169-175.
- [3] 袁常顺, 王俊, 孙进平, 等. 一种幅度信息辅助多伯努利滤波算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 464-471.
- [4] 王金华, 向红军, 赵育林. 一类非线性分数阶差分方程

边值问题的存在性及 Ulam 稳定性[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(2): 1-6.

- [5] 黄偲, 余顺争. 非线性 RLC 电路的新解法及数值仿真[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(3): 83-88.
- [6] 蔡烁, 邝继顺, 刘铁桥, 等. 基于伯努利分布的逻辑电路可靠度计算方法[J]. 电子学报, 2015, 43(11): 2292-2297.
- [7] 张俊, 罗大庸, 孙妙平. 一种基于时滞区间不均分方法的变时延网络控制系统的新稳定性条件[J]. 电子学报, 2016, 44(1): 54-59.
- [8] GIAOURIS D, BANERJEE S, IMRAYED O, et al. Complex interaction between tori and onset of three-frequency quasi-periodicity in a current mode controlled Boost converter [J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2012, 59(1): 207-214.
- [9] YESOOHA V, KAVIPRIYA R, JOSHN T S, et al. Analysis of chaos and bifurcation in DC-DC converter using matlab[C]// International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies. Nagercoil: IEEE, 2013: 481-487.
- [10] RATHEEA A, PARTHASARATHY H. Perturbation-based stochastic modeling of nonlinear circuits [J]. Circuits Systems Signal Process, 2012, 32(1): 123-141.
- [11] FINGER L, UHLMANN H. Effective computation of the poincare MAP for the analysis of nonlinear dynamic circuits/systems using Runge-Kutta triples [J]. Journal of Circuits System & Computers, 2011, 4(1): 93-98.

(上接第 96 页)

参考文献:

- [1] 陆锋, 周成虎. 基于特征的城市交通网络非平面数据模型[J]. 测绘学报, 2000, 29(4): 334-341.
- [2] XIAO K H, CHEN J H, XIAO D Q. A non-planar data model for road networks based on GIS-T [C]// Proc SPIE Int Soc Opt Eng USA; SPIE, 2008, 7144: 71442S.
- [3] 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.
- [4] 黄敏, 余志, 张小兰, 等. 一种道路方向的存储数据模型[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2006, 45(4): 121-123.
- [5] 聂佩林, 余志, 何兆成. 基于 MapInfo 电子地图的 Paramics 仿真基础路网构建[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 214-217.
- [6] 沙志仁, 余志, 黄敏, 等. 面向指路标志系统的非平面交通路网模型[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(6): 442-445.
- [7] ZHU W, JIANG G. A new extended Arc-Node data model of dynamic segmentation technology in urban GIS-T [C]// Wri World Congress on Software Engineering. IEEE Computer Society, 2009: 208-212.

- [8] 黄敏, 张旭, 李尔达. 基于车道级基础路网的微观交通仿真数据建模与应用研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2015, 54(2): 8-13.
- [9] 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.
- [10] SHA Z R, HUANG M, WU H B. A conceptual multi-level data model for road networks [C]// 2012 Fifth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Zhangjiajie, China: ICICTA, 2012: 712-715.
- [11] 郭军杰, 闫茂德, 陈荫三. 高速公路网异构 GIS-T 信息共享的本体模型[J]. 交通运输工程学报, 2011(1): 107-113.
- [12] 齐莹菲, 柳为民, 郭忠印. 基于交通流特性的高速公路交通网络建模与应用[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(23): 244-248.
- [13] 陈雨人, 陈少军. 包含立交匝道信息的高速公路网络复杂拓扑结构[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 230-237.
- [14] 何兆成, 褚俊飞, 庄立, 等. 基于浮动车数据的隧道路段在线地图匹配方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(2): 74-79.