

# 震后城市道路阻断模型

王兴举<sup>1,2</sup>, 西小鸣<sup>1,2</sup>, 高桂凤<sup>1,2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 交通运输学院, 石家庄 050043;  
2. 石家庄铁道大学 河北省交通安全与控制实验室, 石家庄 050043)

**摘要:**以空间遥感技术获得的路网信息为基础,以模糊数学为理论,划分道路阻塞点模糊阻断状态、路段模糊阻断状态,进而构筑路网的模糊阻断状态,提出模糊的阻断状态连通度和连通可靠度的概念,建立数学模型,研究计算方法,并以此对震后路网各种交通手段的连通可靠性进行评价,通过6节点、8路段、29个堵塞点的网络实例验证模型,结果表明完全阻断、行人可通过、自行车可通过、人力营运车可通过、私人汽车可通过、大型车辆可通过和完全畅通各个状态的连通可靠度分别为1、1、1、0.636、0.171、0和0。

**关键词:**模糊理论;道路阻断模型;交通网络;连通度

中图分类号: U 121

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)04-0581-05

## Post-seismic Blocked Model of Urban Roads

WANG Xing-ju<sup>1,2</sup>, XI Xiao-ming<sup>1,2</sup>, GAO Gui-feng<sup>1,2</sup>

(1. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;  
2. Traffic Safety and Control Laboratory of Hebei Province, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** Based on fuzzy theories, a novel fuzzy blocked model of urban traffic networks is proposed under considering networks data by space remote sensing, which is applied to evaluate the reliability of traffic networks for traffic modal depending on the connectivity. In addition, a solution algorithm is described. A case of urban traffic networks, in which 6 nodes, 8 links, and 29 collapse points are given to demonstrate the model. Results show that connectivity reliabilities of complete blocked, pedestrian crossing, bicycle crossing, manpower car crossing, private car crossing, heavy vehicle crossing, and complete unblocked states are 1, 1, 1, 0.636, 0.171, 0, and 0, respectively.

**Key words:** Fuzzy theories; blocked model of roads; traffic networks; connectivity

在震后城市生命线系统中,道路交通是最重要的系统。其他一切生命线系统(包括电力、水供应、通信网络等)的恢复完全依赖于交通系统提供的服务,其恢复速度在很大程度上取决于交通基础设施所能提供的保障能力。同时,人民生命财产、国家利益的震后快速抢险及救援行动的效率和效果也与道路系统的畅通与否关系密切。20世纪20年代,网络可靠性理论在生命线系统研究中得到广泛应用,交通网络的可靠性研究始于20世纪90年代,由日本

的若林等<sup>[1-2]</sup>提出,陈艳艳等<sup>[3]</sup>和刘勇等<sup>[4]</sup>也进行了震后网络的研究。由于城市路网连通可靠度应用二值法,对一般现实网络运营评价不太适合,但对地震等灾害发生后的极端条件下的路网运行状态,其评价或预测结果还是可满足的。阪神大地震之后,日本研究者以震后实际数据资料为依据,对震后交通生命线的阻断进行了大量的研究。塚口等<sup>[5]</sup>以道路宽度为研究对象,按其类别对道路破坏的状况进行分析。小谷等<sup>[6]</sup>考虑了地震信息、建筑物特征及

收稿日期: 2011-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008201); 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目。

作者简介: 王兴举(1978—),男,博士,副教授,主要从事应急交通、智能交通方面的研究, E-mail: xingjuwang@gmail.com.

地区性特征等影响要素,对道路破坏状况进行了要因分析及影响性分析.家田等<sup>[7]</sup>对道路破坏状况判断模型进行了发展.他们的共同特点是以既有地震造成的道路破坏状况数据为基础,结合航空图片,分析对象区域内各道路的幅员遮盖率、道路的障碍物宽度及步行道路宽度等因素,计算出残留道路尺寸,并与其他数据相结合构筑数据库,导入GIS中并整合道路网络系统,构建综合的道路状况数据库,但并没有进行道路阻断状态和路网阻断状态分类及其各个网络连通可靠性计算.

为了迅速恢复完全交通网络系统,确保道路系统的畅通,本研究以空间遥感技术获得的路网信息为前提,以模糊数学为理论基础,划分道路阻塞点模糊阻断状态、路段模糊阻断状态,进而构筑路网的模糊阻断状态,提出模糊的阻断状态连通度和连通可靠度的概念,建立数学模型,研究计算方法和震后路网评价,并通过实例验证阻断模型.

## 1 震后城市道路易损性分析

对国内外大量历史震害的分析研究表明,城市内部震后的路段单元通行性主要由三方面的因素决定:1)沿街建筑物的倒塌情况;2)避难人群、车辆等干扰因素;3)道路本身的损坏状况.近年来,国内外震害及“5·12”汶川地震震害调查充分说明,沿街建筑物的倒塌状况是影响城市内震后路段单元通行性的最主要因素.宋建学等<sup>[8]</sup>在建筑物倒塌瓦砾量分布模型基础上建立了建筑物倒塌瓦砾阻塞量预测模型,杜鹏<sup>[9]</sup>、姜淑珍等<sup>[10]</sup>分别讨论了建筑物倒塌瓦砾堆积问题.利用空间遥感技术、航空图像、摄影测量技术等高度图像处理技术可获得道路的障碍物宽度及步行道路宽度等道路状态信息.遥感数据在应急救援阶段发挥的重要作用,为抗震救灾的部署与决策及后期的灾民安置提供了不可或缺的信息支持.雷添杰等<sup>[11]</sup>、王丽涛等<sup>[12]</sup>、邵芸等<sup>[13]</sup>分别探讨了遥感技术在防灾领域中的应用.地理信息系统支持下遥感的人工解译方法是地震应急阶段适用的方法,通过遥感的人工解译可获得建筑物倒塌、道路剩余宽度和路网阻断等详细信息.李斌等<sup>[14]</sup>、Nesrin等<sup>[15]</sup>、Martinez等<sup>[16]</sup>分别对应急交通进行了研究.在对城市交通网络进行抗震能力评价的基础上,根据不同任务的救援要求,可进行各应急方案的模拟仿真,制定最优路径,并且可作为分析城市交通系统抗震薄弱环节的有效方法.

## 2 模糊阻断模型

### 2.1 堵塞点阻断模糊集

把每段城市道路建筑物倒塌造成的每个堵塞点看成一个阻断模糊集 $A(u_i)$ ,把道路阻断状态分为完全阻断 $u_1$ 、行人可通过 $u_2$ 、自行车可通过 $u_3$ 、人力营运车可通过 $u_4$ 、私人小汽车可通过 $u_5$ 、大型车辆可通过 $u_6$ 和完全畅通 $u_7$ ,相对应的状态可通行需利用道路剩余宽度阈值最小值为 $c$ 和最大值为 $d$ ,即为 $c_1, d_1, c_2, d_2, c_3, d_3, c_4, d_4, c_5, d_5, c_6, d_6, c_7$ 和 $d_7$ ,则阻断模糊集隶属函数为

$$A(u_i) = \max \left( \min \left( \frac{x - c_i}{d_i - c_i}, 1 \right), 0 \right) \quad (1)$$

式中 $x$ 为堵塞点最小道路剩余宽度.

### 2.2 路段阻断堵塞模糊集

根据城市道路交叉点把城市路网分为若干路段,每个路段由 $z$ 个堵塞点 $A_k$ 组成,则 $L$ 表示为 $L =$

$$\left\{ \bigcap_{k=1}^z A_k, A_k \in L_j \right\}.$$

### 2.3 城市交通网络阻断模糊集

城市交通网络由路段(link)和节点(node)组成.城市交通网络的拓扑结构用关联矩阵表示,路径与路段关联矩阵描述了路径与路段之间的包含关系,简称为路径矩阵.对于道路阻断状态模糊论域 $U$ 中阻断状态 $u_i$ 的第 $f$ 条路径 $R_f(u_i)$ 的路段 $k$ ,有

$$R_{fk}(u_i) = \begin{cases} L_k(u_i) & L_k \in R_f \\ 0 & L_k \notin R_f \end{cases} \quad (2)$$

在节点 $p$ 与节点 $q$ 之间有 $m$ 条路径和 $n$ 个路段的城市交通网络 $G$ 中,路径矩阵 $\Delta_{pq}(u_i)$ 为

$$\Delta_{pq}(u_i) = \sum_{f=1}^m \sum_{k=1}^n R_{fk}(u_i) \quad (3)$$

则交通网络 $G$ 中,任意节点 $p$ 和 $q$ 的城市交通网络道路阻断模糊集可表示为

$$G_{pq} = \sum_{i=1}^7 \Delta_{pq}(u_i) \quad (4)$$

### 2.4 震后城市交通网络阻断状态连通性

城市交通网络中,如果从节点 $p$ 到节点 $q$ 之间至少包含1条路径相连,称之为连通.定义城市交通网络阻断状态 $u_i$ 的连通度为 $\lambda(u_i)$ ,且 $\lambda(u_i) \in [0, 1]$ ,用来表示城市路网阻断状态连通性.道路阻断状态模糊论域 $U$ 中,取任意阻断状态 $u_i$ ,对路段阻断状态模糊集 $L(u_i)$ 进行 $\lambda(u_i)$ 水平截集,得到路网阻断状态集 $L_\lambda(u_i)$ ,进而得到路径矩阵 $R_\lambda(u_i)$ 和城市交通网络 $G_\lambda$ .定义 $W(u_i)$ 为阻断状态 $u_i$ 的城

市交通网络  $G$  连通可靠度,  $W_\lambda(u_i)$  为阻断状态  $u_i$  连通度为  $\lambda(u_i)$  时城市交通网络  $G$  的连通可靠度.  $W_\lambda(u_i)$  中存在  $n$  个路段的第  $f$  条路径  $R_f(u_i)$ , 其阻断连通可靠度定义为

$$W_{\lambda f}(u_i) = \bigcap_{j=1}^n L_{\lambda j}(u_i) \quad L_k \in R_f \quad (5)$$

则城市交通网络  $G$  的阻断连通可靠度表示为

$$W_\lambda(u_i) = \bigcup_{f=1}^m W_{\lambda f}(u_i) \quad (6)$$

式(5)代入式(6)中可得

$$W_\lambda(u_i) = \bigcup_{f=1}^m \left( \bigcap_{j=1}^n L_{\lambda j}(u_i) \right)_f \quad L_k \in R_f \quad (7)$$

式(7)表示为阻断状态  $u_i$  的城市路网  $G$  的连通可靠度.

对于阻断状态  $u_i$ , 当  $\lambda(u_i)$  取值由 1 逐渐减小而趋向 0 时, 相应的城市路网  $G$  的连通可靠度  $W_\lambda(u_i)$  逐渐向外扩散, 从而得到一系列普通的城市路网连通可靠度  $W_\lambda(u_i)$ ; 当取连通度  $\lambda(u_i) = 1$  时, 称  $W_1(u_i)$  为阻断状态  $u_i$  的完全连通可靠度; 当取连通度  $\lambda(u_i) \rightarrow 0$  时, 称  $W_{\lambda \rightarrow 0}(u_i)$  为阻断状态  $u_i$  的临界阻断连通可靠度; 当  $\lambda(u_i) \in (0, 1)$  时,  $W_\lambda(u_i)$  为从  $W_1(u_i)$  扩散的  $W(u_i)$  子集.

### 2.5 连通可靠性计算方法

因为  $W(u_i)$  为正规模糊集且  $\lambda(u_i) \in [0, 1]$ , 则存在  $W_1(u_i) \subseteq W_\lambda(u_i) \subseteq W_{\lambda \rightarrow 0}(u_i)$ . 当  $W_1(u_i) = 1$  时(阻断状态  $u_i$  连通度为 1 时, 路网完全畅通), 存在  $W_\lambda(u_i) = W_{\lambda \rightarrow 0}(u_i) = 1$  (对于阻断状态  $u_i$ , 连通度为值域范围内任意值时完全畅通), 路网连通可靠度  $W(u_i)$  不依赖于连通度  $\lambda(u_i)$ , 阻断状态  $u_i$  下的城市交通网络完全畅通; 当  $W_{\lambda \rightarrow 0}(u_i) = 0$  时(阻断状态  $u_i$  连通度趋近于 0 时, 路网完全阻断), 存在  $W_1(u_i) = W_\lambda(u_i) = 0$  (对于阻断状态  $u_i$ , 连通度为值域范围内任意值时完全阻断), 路网连通可靠度  $W(u_i)$  不依赖于连通度  $\lambda(u_i)$ , 阻断状态  $u_i$  下的城市交通网络完全阻断.

如图 1 所示, 由上述研究可得连通可靠性计算方法步骤如下:

- 1) 确定道路阻断状态论域  $U$ , 并初始化起讫点  $p, q$  和道路阻断状态参数  $i = 1$ ;
- 2) 计算堵塞点阻断模糊集  $A(u_i)$ 、路段阻断模糊集  $L(u_i)$ ;
- 3) 构建路径与路段关联矩阵  $\Delta_{pq}(u_i)$ ;
- 4) 选取连通度为  $\lambda(u_i) = 1$ , 并计算连通可靠性  $W_1(u_i)$ ;
- 5) 如果  $W_1(u_i) = 1$ , 则  $W(u_i) = W_1(u_i)$ ;
- 6) 如果  $W_1(u_i) \neq 1$ , 则选取连通度为  $\lambda(u_i) =$

0.01, 并计算连通可靠性  $W_{0.01}(u_i)$ ;

7) 如果  $W_{0.01}(u_i) = 0$ , 则  $W(u_i) = W_{0.01}(u_i) = 0$ ;

8) 如果  $W_{0.01}(u_i) > 0$ , 判断道路阻断状态参数  $i$  是否达到状态数 7 ( $i < 7$ ), 满足条件则令  $i = i + 1$ , 返回 2), 计算下一个状态, 否则计算结束.

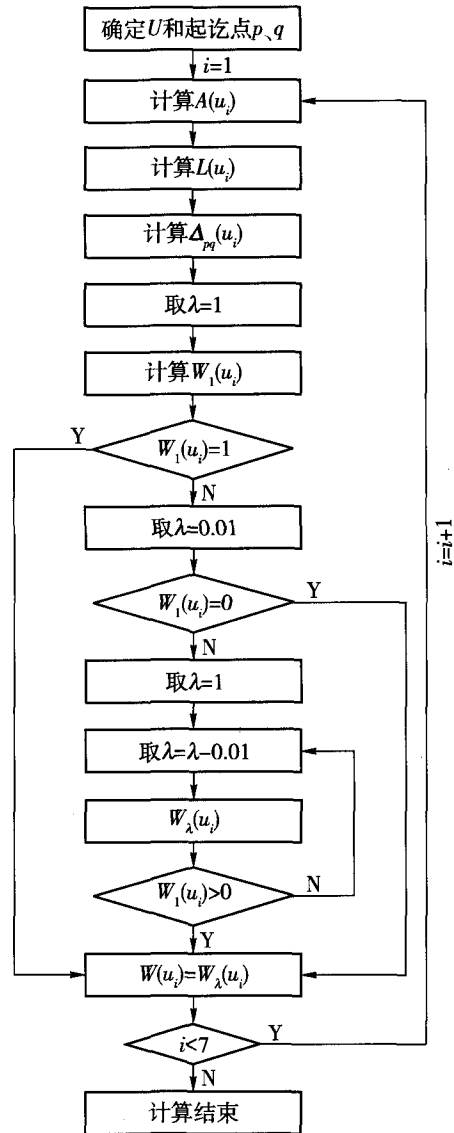


图 1 连通可靠性计算流程图

Fig. 1 Algorithm of connectivity reliability

### 3 算例

如图 2 所示, 本研究选取石家庄市和平西路、中华北大街、水源路、兴凯路和泰华街抽象而成的 6 节点、8 路段和起讫点间 8 条路径的城市路网为实例, 并假设震后 29 个堵塞点.

表 1 为网路图堵塞点道路最小剩余距离数据; 表 2 为道路阻断状态参数, 根据阻断模糊集隶属函

数方程式(1)计算可得各个路段阻断状态,经计算  $W(u_3) = 1, W(u_4) = 0.636, W(u_5) = 0.171,$   
 路网各个状态的连通可靠度为  $W(u_1) = 1, W(u_2) = 1, W(u_6) = 0$  和  $W(u_7) = 0.$

表1 路段阻断状态表  
 Table1 State of road blocked

路段	堵塞点	堵塞点道路最小剩余宽度 X/m	路段	堵塞点	堵塞点道路最小剩余宽度 X/m
L <sub>1</sub>	A <sub>1</sub> <sup>1</sup>	3.0	L <sub>5</sub>	A <sub>5</sub> <sup>1</sup>	5.2
	A <sub>1</sub> <sup>2</sup>	2.7		A <sub>5</sub> <sup>2</sup>	3.3
	A <sub>1</sub> <sup>3</sup>	3.2		A <sub>5</sub> <sup>3</sup>	1.8
		A <sub>5</sub> <sup>4</sup>		2.7	
L <sub>2</sub>	A <sub>2</sub> <sup>1</sup>	3.6	L <sub>6</sub>	A <sub>6</sub> <sup>1</sup>	3.8
	A <sub>2</sub> <sup>2</sup>	2.8		A <sub>6</sub> <sup>2</sup>	2.2
	A <sub>2</sub> <sup>3</sup>	2.9		A <sub>6</sub> <sup>3</sup>	2.3
	A <sub>2</sub> <sup>4</sup>	3.1		A <sub>6</sub> <sup>4</sup>	4.7
L <sub>3</sub>	A <sub>3</sub> <sup>1</sup>	2.0	L <sub>7</sub>	A <sub>7</sub> <sup>1</sup>	2.55
	A <sub>3</sub> <sup>2</sup>	4.3		A <sub>7</sub> <sup>2</sup>	4.0
	A <sub>3</sub> <sup>3</sup>	1.9		A <sub>7</sub> <sup>3</sup>	3.4
L <sub>4</sub>	A <sub>4</sub> <sup>1</sup>	3.5	L <sub>8</sub>	A <sub>8</sub> <sup>1</sup>	3.5
	A <sub>4</sub> <sup>2</sup>	2.1		A <sub>8</sub> <sup>2</sup>	4.9
	A <sub>4</sub> <sup>3</sup>	3.7		A <sub>8</sub> <sup>3</sup>	3.9
	A <sub>4</sub> <sup>4</sup>	2.6		A <sub>8</sub> <sup>4</sup>	5.4

表2 单车道阻断情况分析  
 Table 2 Analysis of single lane blocked

阻断状态	u <sub>1</sub>		u <sub>2</sub>		u <sub>3</sub>		u <sub>4</sub>		u <sub>5</sub>		u <sub>6</sub>		u <sub>7</sub>	
参数	c <sub>1</sub>	d <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	d <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	d <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	d <sub>4</sub>	c <sub>5</sub>	d <sub>5</sub>	c <sub>6</sub>	d <sub>6</sub>	c <sub>7</sub>	d <sub>7</sub>
界限距离/m	0	0.40	0.45	0.85	0.80	1.60	1.40	2.50	1.80	3.55	2.50	4.25	4.25	4.30

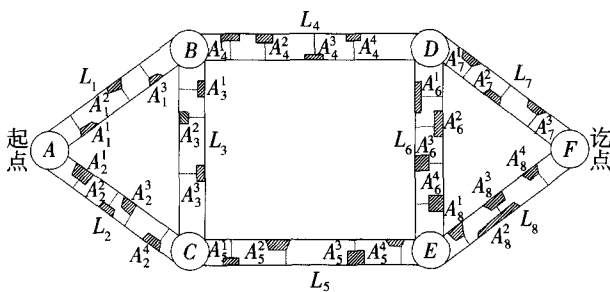


图2 路网结构图

Fig.2 Structure of urban traffic networks

4 结论

1) 提出了模糊的阻断状态连通度和连通可靠度的概念、数学模型和计算方法,并以此对震后进行路网各种交通手段的连通可靠性进行评价;

2) 通过6节点、8路段、29个堵塞点的城市网路实例验证模型,结果  $u_1, u_2, \dots, u_7$  各个状态的连通可靠度分别为 1、1、0.636、0.171、0 和 0,进而证

明该模型对震后路网评价的有效性;

3) 震后路网复杂,考虑余震等道路阻断相关因素,结合现场反馈信息,预测路网阻断状况,动态震后评价是关键问题,这些问题尚待进一步研究.

参考文献:

[1] 若林拓史, 飯田恭敬. 道路信頼性解析法の開発とラフラインネットワークへの適用性の検討[G]//日本土木学会. 土木計画学研究・講演集, 1990: 915-922.  
 [2] 若林拓史, 飯田恭敬. ネットワーク限定手法による道路網の信頼性解析[J]. 交通工学, 1991, 26(5): 9-18.  
 WAKABAYASHI Hiroshi, IIDA Yasunori. Reliability analysis of road network system by network excerpt technique [J]. Traffic Engineering, 1991, 26(5): 9-18. (in Japanese)  
 [3] 陈艳艳, 宋建民. 基于畅通可靠性分析的城市道路改扩建优化决策[J]. 北京工业大学学报, 2000, 26(4): 43-46.

- CHEN Yan-yan, SONG Jian-min. Based on the reliability analysis of smooth road renovation and expansion of urban optimization [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2000, 26(4): 43-46. (in Chinese)
- [4] 刘勇, 项莉, 谢军, 等. 城市路网可靠性计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(3): 95-99.  
LIU Yong, XIANG Li, XIE Jun, et al. Reliability computation method of urban road network [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(3): 95-99. (in Chinese)
- [5] 塚口博司, 戸谷哲男, 中辻清惠. 阪神・淡路大震災における道路の被害状況と発生直後の自動車流動状況[G]//日本土木学会. 土木計画学研究・講演集, 1995: 847-850.
- [6] 小谷通泰, 前野達也, 伊藤美由紀. 震災による地区道路網の閉塞状況に関する分析[G]//交通工学研究会. 交通工学研究発表会論文報告集, 1996: 89-92.
- [7] 家田仁, 上西周子, 猪股隆行, 等. 阪神・淡路大震災における「街路閉塞現象」に着目した街路網の機能的障害とその影響[G]//土木学会論文集, 1997(576): 69-82.
- [8] 宋建学, 李杰. 震后城市交通系统连通性模拟[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(1): 73-78.  
SONG Jian-xue, LI Jie. Simulation on accessibility of post-earthquake urban transportation system [J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(1): 73-78. (in Chinese)
- [9] 杜鹏. 交通系统震害预测中瓦砾堆积问题的改进[J]. 世界地震工程, 2007, 23(1): 161-164.  
DU Peng. Improvement for the calculating method of debris piling problem in the earthquake damage forecasting of the transportation system [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2007, 23(1): 161-164. (in Chinese)
- [10] 姜淑珍, 包峰. 道路系统易损性分析[J]. 公路, 2006, 11: 106-108.  
JIANG Shu-zhen, BAO Feng. Vulnerability analysis of road system [J]. Highway, 2006, 11: 106-108. (in Chinese)
- [11] 雷添杰, 李长春, 何孝莹. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(1): 178-183.
- LEI Tian-jie, LI Chang-chun, HE Xiao-ying. Application of aerial remote sensing of pilotless aircraft to disaster emergency rescue [J]. Journal of Natural Disasters, 2011, 20(1): 178-183. (in Chinese)
- [12] 王丽涛, 王世新, 周艺, 等. 青海玉树地震灾情遥感应急监测分析[J]. 遥感学报, 2010, 14(5): 1053-1066.  
WANG Li-tao, WANG Shi-xin, ZHOU Yi, et al. Urgent monitoring and analysis on Yushu earthquake using remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(5): 1053-1066. (in Chinese)
- [13] 邵芸, 宫华泽, 王世昂, 等. 多源雷达遥感数据汶川地震灾情应急监测与评价[J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 865-870.  
SHAO Yun, GONG Hua-ze, WANG Shi-ang, et al. Multi-source SAR remote sensing data for rapid response to Wenchuan earthquake damage assessment [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(6): 865-870. (in Chinese)
- [14] 李斌, 谢秉磊, 徐键, 等. 基于连通可靠性的自然灾害后应急阶段路网重建研究[J]. 交通与计算机, 2008, 26(6): 108-112.  
LI Bin, XIE Bing-lei, XU Jian, et al. Transportation network reconstruction for natural disasters in emergency phase based on connectivity reliability [J]. Computer and Communications, 2008, 26(6): 108-112. (in Chinese)
- [15] NESRIN B, MEREDITH W, ANNE K. A GIS-based emergency response system for transportation networks [J]. Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Monograph, 2003(25): 926-935.
- [16] MARTINEZ F J, TOH C K, CARLOS C J, et al. Emergency services in future intelligent transportation systems based on vehicular communication networks [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2010, 2(2): 6-20.

(责任编辑 吕小红)