

陈越平,城市避震救灾最优体系模型仿真[J].地震工程学报,2018,40(5):1105-1110.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1105
CHEN Yueping.Model Simulation of the Optimal System for Urban Earthquake Disaster Relief[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(5):1105-1110.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1105

城市避震救灾最优体系模型仿真

陈越平

(西安科技大学艺术学院,陕西 西安 710054)

摘要:传统 GIS 空间分析模型进行城市避震救灾疏散方案规划时,未考虑疏散路径的当量长度,获取的避震救灾模型疏散效率较低。采用通行难度系数、次生灾害干扰系数、桥梁阻碍系数获取避震救灾疏散路径当量长度;通过目标函数获取避震救灾疏散路径当量长度的最小值,同时考虑避难场所的容纳量要求、清空避难场所固有人员、疏散距离小于避难场所的服务半径 3 个约束条件,设计新的城市避震救灾疏散最优模型。实验结果表明,新的城市避震救灾疏散最优模型能够给出精确的疏散路径与方案,高效率地完成城市避震救灾疏散任务。

关键词:避震救灾;疏散路径;当量长度;道路阻塞;次生灾害;最优模型

中图分类号: TU984.116

文献标志码:A

文章编号: 1000-0844(2018)05-1105-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.05.1105

Model Simulation of the Optimal System for Urban Earthquake Disaster Relief

CHEN Yueping

(College of Arts, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: When the traditional GIS spatial analysis model is used to plan an urban earthquake evacuation scheme, the equivalent length of the evacuation path is not taken into account, and the evacuation efficiency of the obtained model is relatively low. Therefore, a new optimal evacuation model for urban earthquake disaster mitigation and relief has been designed. The equivalent length of the evacuation path was obtained by using the difficulty coefficient of passage, interference coefficient of secondary disaster, coefficient of bridge obstruction, and minimum equivalent length of evacuation path, all of which were obtained by objective function. Simultaneously, the new model accounted for the capacity requirement of the shelter, the emptying of personnel from the shelter, and the evacuation distance being less than the radius of service of the shelter. The experimental results showed that the new optimal model can give an accurate evacuation path and scheme, and efficiently accomplish the evacuation task of urban earthquake disaster mitigation and relief.

收稿日期:2017-08-20

基金项目:陕西省教育厅研究项目:西安市避灾空间体系及优化设计研究(17JK0477);西安科技大学培育项目:基于城镇化建设的避灾空间模式研究(2014080)

作者简介:陈越平(1978—),男,陕西长武人,硕士,讲师,研究方向为城市景观及风景园林理论及实践。E-mail:cyp1214@163.com。

Keywords: earthquake disaster relief; equivalent length; road congestion; secondary disasters; bridge damage; model

0 引言

近年来,我国地震灾害频发,相比乡村地区,城市中的地震危害不容小觑。由于城市中高大建筑群密集、桥梁分布广,一旦发生地震灾害会导致交通阻塞,为避震救灾工作的开展增加难度,造成严重的生命财产损失^[1],因此寻求一种快速有效的避震救灾最优体系模型,对于确保人们群众的生命财产安全具有重要作用。

以往针对城市避震救灾疏散模型的研究有:刘刚等^[2]设计考虑用地吸引度的避震疏散场所选择模型,基于震后用地的吸引度情况规划避震救灾疏散路径,但其没有考虑疏散路径的长度问题,疏散过程漫长;王熹徽等^[3]在研究网络解构及结构优化的基础上设计救灾模型,充分考虑了救灾路线的网络问题,但忽略了次生灾害产生的道路阻塞问题,存在局限性;王杨和范植华^[4]对地震救援演练仿真系统进行研究,能够真实地呈现出城市避震救灾的仿真情况,但实现仿真过程的效率较低、疏散效果不理想。

针对上述问题,本文设计新的城市避震救灾疏散最优模型,根据通行难度系数、次生灾害干扰系数、桥梁阻碍系数获取避震救灾疏散路径当量长度,计算疏散路径的最小值^[5],构建城市避震救灾最优疏散模型。

1 城市避震救灾疏散最优体系模型仿真

1.1 避震救灾疏散路径当量长度获取

避震救灾过程中,当疏散场地与人员位置一定时,疏散距离的远近直接影响疏散模型的优劣。直线长度与路径长度是研究避震救灾疏散模型疏散距离的主要因素^[6],通过对两种长度的分析,本文采用的疏散距离为避震救灾疏散路径的当量长度。

给出3个系数 k 、 ω_1 、 ω_2 ,其中 k 表示通行难度系数、 ω_1 表示次生灾害影响系数、 ω_2 表示桥梁阻碍系数。接着对系数获取方法及其对避震救灾疏散模型影响进行描述。

1.1.1 通行难度系数

城市避震救灾疏散路径的通行难易程度系数用 k 描述,计算方法用公式(1)描述:

$$k = v_1/v_2 \quad (1)$$

式中:路段上全部车辆、行人的正常行驶速度用 v_1 表示;疏散路段上全部车辆、行人的行驶速度用 v_2 表示。疏散过程中,路段的宽度、破坏情况、路旁建筑物的毁坏状况都会干扰通行难度系数的大小。

建筑物毁坏状况、建筑物的高度以及路段的可使用宽度都是判断震后建筑物对路段干扰情况的重要因素,针对建筑物越低、路宽越大的路段对道路阻塞情况干扰越小的规律,用街道调和比来描述震后路段阻塞状况^[7]。街道调和比的计算方法如公式(2)所示:

$$S_i = \frac{H_i}{D_i} \quad (2)$$

式中:道路 i 的街道调和比用 S_i 描述,道路 i 两旁建筑物的高度均值用 H_i 描述,道路 i 的可使用宽度用 D_i 描述。本文将疏散路段宽度归纳为3个区间:小于8 m、8~15 m、大于15 m。建筑物的毁坏状况严重干扰了疏散路段的畅通性,说明两者的比值较大;建筑物的毁坏状况未导致疏散路段的严重阻塞,说明两者的比值较小^[8]。

避震救灾疏散过程中道路被阻塞的几率用阻断曝光量描述,路段两旁建筑物的数量直接决定了阻断曝光量的大小,因为建筑物的数量与建筑物倒塌数量几率成正比,获取的道路阻塞风险就越大^[9]。疏散路段阻断曝光量的计算方法如下:

$$E_i = k_i \times L_i \quad (3)$$

式中:路段 i 的阻断曝光量用 E_i 描述,路段 i 的建筑物密度用 k_i 描述,路段 i 的长度用 L_i 描述。

通过公式(2)(3)获取建筑物毁坏情况阻塞路段的风险值用公式(4)描述:

$$R_i = S_i \times E_i \quad (4)$$

通过上述街道调和比、阻断曝光量以及建筑物毁坏情况阻塞路段的风险值的计算能够获取疏散路段的破坏程度与建筑物阻塞道路的程度,根据两种因素的严重程度实施打分^[10];通行难度系数 k 通过3个系数的分数相加得到。

1.1.2 次生灾害干扰系数

城市避震救灾疏散路径的次生灾害干扰系数用 ω_1 描述,地震等灾害爆发后会伴随众多次生灾害其后果不可轻视,次生灾害源距离疏散路段的远近决

定了对其危害程度,距离越远危害越小^[11]。火灾、有毒气体泄露都是地震后伴随的次生灾害,一般情况下次生灾害源距离疏散路径 2 km 以上属于轻度危害区域,个别敏感的人在完全静止中有感,室内少数人在静止中有感,悬挂物轻微摆动,划分等级为 I 级;0.5 ~ 2 km 属于中等危害区域,室内大多数人和室外少数人有震感,悬挂物摆动不稳器皿作响,划分等级为 II 级;距离 0.5 km 以内属于严重危害区域,门窗作响,墙壁表面出现裂纹,人站立不稳,家畜外逃,器皿翻落,简陋棚舍损坏,陡坎滑坡,划分等级为 III 级;严重时房屋轻微损坏,牌坊、烟囱损坏,地表出现裂缝及喷沙冒水,房屋多有损坏,少数破坏路基塌方,地下管道破裂,这时划分等级为 IV 级。详细的区域划分应按照次生灾害源的等级来划分。表 1 描述了次生灾害影响系数 ω_1 的取值方法,主要是通过分析次生灾

表 1 次生灾害干扰系数 ω_1 取值Table 1 Values of secondary disasters interference coefficient ω_1

距离/km	次生灾害等级			
	I	II	III	IV
≤0.5	1.2	1.1	1	0.9
0.5~2	1.1	1	0.9	0.9
>2	1	0.9	0.9	0.9

表 3 城市桥梁毁坏程度等级及 ω_2 取值Table 3 Damage degree of urban bridges and values of ω_2

毁坏程度等级	性能水准	桥梁状态	基本功能情况	ω_2
一级	完好	桥梁无损,能够正常使用	震中震后基本功能不受影响	1.0
二级	基本完好	轻度损坏,无需维修可使用	震中震后功能基本保持	1.2
三级	轻度毁坏	稍作修理即可使用	未干扰桥梁基本功能	1.4
四级	中度毁坏	经过大量维修操作才可以正常使用,尚未倒塌	干扰桥梁基本功能	1.7
五级	高度毁坏	严重倒塌,难以修复	无任何有价值功能	∞

长度 $L = k\omega_1\omega_2 l$ 。则设置避震救灾疏散路径的当量长度用公式(5)描述:

$$L = \sum_{i=1}^n k_i \omega_{1i} \omega_{2i} l_i \quad (5)$$

式中: i 为避震救灾疏散路段,取值范围为 $1 \sim n$, i 路段的通行难易程度系数用 k_i 描述, i 路段的次生灾害干扰系数用 ω_{1i} 描述, i 路段的桥梁阻碍系数用 ω_{2i} 描述, i 路段的实际长度用 l_i 描述。

1.2 城市避震救灾疏散模型的设计

根据获取的通行难度系数、次生灾害干扰系数、桥梁阻碍系数获取避震救灾疏散路径当量长度,计算疏散路径最小值^[5],最终构建城市避震救灾最优疏散模型。

(1) 设置从灾害发生地点 i 疏散到避难场所 j 的总人数用决策变量 X_{ij} 描述。

害等级、路段与次生灾害源的距离来确定^[12]。

1.1.3 桥梁阻碍系数

城市避震救灾疏散路径的桥梁阻碍系数用 ω_2 表示,主要描述了桥梁的毁坏程度对疏散路段的干扰,桥梁的毁坏程度直接影响桥梁阻碍系数的大小^[13]。表 2 描述了不同类型高架桥的重要等级。

表 3 描述了地震灾害爆发后桥梁的毁坏程度等级,主要依据可使用的程度来划分。

根据桥梁重要等级的划分情况、地震灾害爆发后桥梁的毁坏程度判断桥梁毁坏对疏散路段的阻塞情况,并对 ω_2 进行取值^[14],如表 3 所示。

1.1.4 当量长度计算

根据通行难易程度系数、次生灾害干扰系数、桥梁阻碍系数,结合实际路段的长度,获取某地的当量

表 2 城市中不同重要性高架桥分类

Table 2 Classification of viaducts with different importance in the city

重要性等级	路线等级	设计基准期 / 年	桥梁阻碍系数
一级	位于快速路	95	0.25
二级	位于主干道	75	0.19
三级	位于次干道	45	0.15
四级	位于支路上	25	0.11

(2) 用目标函数 $\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_{ij} X_{ij}$ 表示避震救灾疏散路径的最短当量长度。

(3) 考虑 3 个约束条件^[15]。第一,避震救灾场所 i 的人员容纳状况应满足 $\sum_{j=1}^m X_{ij} \leq A_i$ 的条件,避震救灾场所 i 可容纳的人员总数用 A_i 表示;第二,清空避震救灾场所 i 的全部人员,则 $\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq B_j$,避震救灾中需疏散的全部人数用 B_j 描述,疏散场所的数量用 n 描述;第三,疏散距离同避震救灾场所 i 的服务范围的关系, $L \geq L_{ij} \geq 0$,避震救灾场所 i 的服务半径用 L 描述,居民到疏散场所的当量长度用 L_{ij} 描述。当发生地震次生灾害时,正确的疏散指挥是避免和减少人员伤亡的关键,而选择合理的逃生路线又是正确指挥的前提,避震救灾场人员数量与

当量长度之间存在这样的关系表示为:

$$B_j = nX_{ij} \cdot L_{ij} \quad (6)$$

根据以上构建的城市避震救灾疏散最优体系模型,能够找到最优的疏散路线,最高效率地实现避震救灾居民疏散工作。

2 实验分析

2.1 实验数据

为验证本文设计的城市避震救灾疏散最优体系模型的有效性,采用本文模型对青岛市市北区展开城市避震救灾疏散仿真实验,引用遗传优化方法计算结果。实验所需3类数据包括:避震疏散人员总数与分布情况;震后次生灾害分、路段旁建筑毁坏状况以及交通路段分布情况;不同避难场所的地理分布、面积大小情况。

2.2 数据处理

(1)用点状图层表示避震疏散场所,原来的疏散场地用固定疏散场地入口表示。

(2)将实验使用的青岛市交通网络分布数据、固定避震疏散场所分布数据以及紧急避震疏散场所分布数据输入到实验数据库中。

(3)采用拓扑规则构建全面的城市网络规划,令紧急避震场所、固定避震场所以及各种路段交叉口结点等重要元素全部体现出来。

(4)根据以上步骤给出的紧急、固定避震场所和城市交通分布情况构建几何网络。

2.3 当量长度计算

根据当量长度计算公式、青岛市市北区固定避震疏散场所与紧急避震疏散场所路径状况获取避震疏散路径的当量长度,结果用表4描述。

表4 避震疏散路径当量长度

Table 4 Equivalent length of evacuation route

	1	2	3	4	...	30
A	3 804.6			...	2 401.5	
B	3 220.1			...		
C	2 405.2	3 301.2		...		
D	2 304.2		2 508.2	...		
E				...		
F	1 520			...	1 862.2	
G		2 612.2		...	3 031.7	
H	3 103.8			...	3 630.2	
I	3 009.8			...		
J				...		
K	2 471			...		

表4中,固定避震疏散场所用A,B,C…K来描述,紧急避震疏散场所用1,2,3…30描述,固定避震

疏散场所到紧急避震疏散场所的当量长度用表格中的数字描述,空格表示未展开疏散行动。

2.4 遗传优化方法求解流程

(1)染色体编码与适应函数。采用二进制数编码进行求解,用一个8位二进制0/1串描述紧急避震场所到固定避震场所的未知人数,同时任意生成N个群体,这些群体由不同个体构成。适应函数用公式(7)描述:

$$S = \begin{cases} S_0 - L_{\min}, & L_{\min} < S_0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中:预先设置一个较大常数用 S_0 描述,青岛市市北区疏散路线总当量长度用 L_{\min} 描述。

(2)遗传操作。采用生殖、交叉、变异方法实现染色体的遗传操作。

(3)设定控制参数。设定 $N=300$ 为群体规模, $P_c=0.25$ 表示交叉概率, $P_m=0.01$ 表示变异概率。

2.5 城市避震救灾疏散仿真实验结果分析

实验获取的青岛市市北区避震救灾疏散人数用表5描述。

表5 避震救灾疏散人数

Table 5 Evacuation crowd during earthquake disaster relief

	1	2	3	4	...	30
A	0	0	0	0	...	0
B	0	381	0	0	...	0
C	0	0	0	0	...	0
D	0	0	0	0	...	0
E	0	0	0	297	...	0
F	0	0	0	0	...	383
G	0	0	411	0	...	0
H	0	0	0	0	...	0
I	422	0	0	0	...	0
J	0	0	0	0	...	0
K	0	0	0	0	...	0

表5中,固定避震疏散场所用A,B,C…K来描述,紧急避震疏散场所用1,2,3…30描述,固定避震疏散场所到紧急避震疏散场所的疏散人数用表格内数字描述,0表示未展开疏散行动。

将避震救灾疏散路径的相关数据、遗传优化方法求解结果输入到GIS中,获取青岛市市北区部分避震救灾疏散可视化模型用图1描述。

图1中,紧急避震疏散场所用1,2,3…30数字与柱状图描述,柱状图高度越高说明容纳的人数越多;固定避震疏散场所用英文字母与不同颜色的圆形描述;图中柱状图与圆形图的颜色一致说明这两个场所之间进行了人员疏散,以固定避震场所A与紧急避震场所22为例,22号场所的居民全部疏散

到 A 场所中;图中不同的网络路径起到关键性作用,根据不同道路的节点情况制定符合实际情况的疏散路线,例如,图中的加粗路径表示固定场所 I 到紧急场所 5 的疏散路线。采用本文模型获取的实验结果能够清晰展示出详细的避震救灾疏散路径,提供详细的疏散方案,并有效完成疏散任务。根据上述模型图中的疏散路线,将刘刚等^[2]模型与本文模型进行对比,对比结果如表 6 所示。

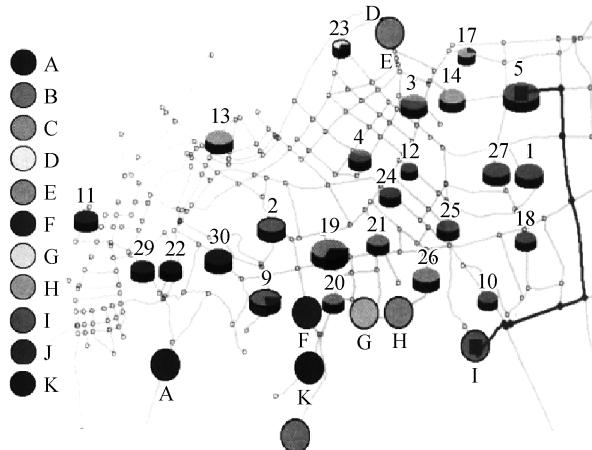


图 1 青岛市市北区部分避震救灾疏散可视化模型

Fig.1 Visualization mode for part evacuation in Shibei district, Qingdao city

由表 6 可知,刘刚等^[2]模型中,6 个场所的疏散人群均少于本文模型中的疏散人群,本文模型能较好的完成疏散任务。实验结果表明,本文模型在城市地震灾难疏散中,疏散人数较多。

2.6 城市避震救灾疏散效率实验结果分析

为验证本文模型进行城市避震救灾疏散的效率优势,同时采用 GIS 空间分析模型重复上述实验步骤,将两种模型获取的实验结果制表 7。

分析表 7 能够看出,本文模型在运算次数、避震救灾疏散耗时的时间、人员排队等待时间等 3 个方面都较 GIS 空间分析模型具有优势。实验结果表

表 6 刘刚等^[2]模型与本文模型疏散人群对比

Table 6 Comparison between evacuation crowd of models proposed by LIU Gang, et al^[2] and this paper

	刘刚等 ^[2] 模型	本文模型
场地一	12	25
场地二	18	35
场地三	26	40
场地四	28	49
场地五	35	56
场地六	46	65
总计	165	270

表 7 两种模型进行避震疏散的效率对比

Table 7 Efficiency comparison between two models for earthquake evacuation

	GIS 空间分析模型	本文模型
运算次数/次	29	21
总疏散时间/s	2 862	2 300
人员排队延迟等待时间/s	601	486

明,本文模型具有效率优势。

3 结论

通过对通行难度系数、次生灾害干扰系数、桥梁阻碍系数进行详细介绍与计算,描述了震后倒塌建筑群、坍塌桥梁以及次生灾害对道路通行状况的影响,根据 3 个系数与当量长度的计算公式获取避震救灾疏散路径当量长度;通过目标函数获取避震救灾疏散路径当量长度的最小值,同时获取准确的避难场所容纳量、清空避难场全部人员、避难场所位置的确定要符合疏散距离小于避难场所的服务半径,在这 3 个约束条件下,设计新的城市避震救灾疏散最优模型。最后利用青岛市市北区的道路分布情况展开实验研究,采用遗传优化方法对模型求解,将避震救灾疏散路径的相关数据、求解结果输入到 GIS 系统内,获取青岛市市北区部分避震救灾疏散可视化模型图,清晰的呈现出城市避震救灾疏散路径分布状况;与 GIS 空间分析模型进行疏散效率对比,本文模型具有效率优势。

参考文献(References)

- [1] 郭安宁,李鑫,白雪见,等.2016 年 1 月 21 日青海门源 6.4 级地震及相关参数[J].地震工程学报,2016,38(1):150-158.
GUO Anning, LI Xin, BAI Xuejian, et al. The Menyuan, Qinghai M_S6.4 Earthquake on 21 January 2016 and Its Related Parameters[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38 (1): 150-158.
- [2] 刘刚,王威,马东辉,等.考虑用地吸引度的避震疏散场所选择模型[J].中国安全科学学报,2016,26(12):169-174.
LIU Gang, WANG Wei, MA Donghui, et al. A Model for Locating Emergency Shelters Considering Attraction Degree of Land[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(12): 169-174.
- [3] 王熹微,李峰,梁樑.救灾物资供应网络解构及结构优化模型[J].中国管理科学,2017,25(1):139-150.
WANG Xihui, LI Feng, LIANG Liang. The Deconstruction of a Relief Material Supply Network and Corresponding Structure Optimization Model[J]. Chinese Journal of Management Science, 2017, 25(1): 139-150.
- [4] 王杨,范植华.地震救援演练仿真系统的研究[J].计算机仿真,

- 2013,30(1):404-408.
- WANG Yang, FAN Zhihua. Research on Earthquake Rescue Drilling Simulation System[J]. Computer Simulation, 2013, 30 (1):404-408.
- [5] Bing L, Yaoguang Q, Jiyun D. Time-history Simulation of Civil Architecture Earthquake Disaster Relief-based on the Three-dimensional Dynamic Finite Element Method[J]. Frattura Ed Integrità Strutturale, 2014, 8(30):526-536.
- [6] 曹彦波,李兆隆,李永强,等.云南地震应急快速评估模型本地化集成研究[J].地震研究,2015,38(1):148-154.
CAO Yanbo, LI Zhaolong, LI Yongqiang, et al. Research on the Localization Integration of Yunnan Earthquake Emergency Rapid Assessment Model [J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(1):148-154.
- [7] 袁道阳,杨青云,雷中生,等.四川北部地区三次中强历史地震补充考证[J].地震工程学报,2016,38(2):226-235.
YUAN Daoyang, YANG Qingyun, LEI Zhongsheng, et al. Additional Textual Criticism of Three Moderate-strong Historical Earthquakes in the Northern Region of Sichuan Province[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(2):226-235.
- [8] 史莹,费文君,王丹宁,等.综合公园避震减灾适宜性评价方法分析[J].西北林学院学报,2014,29(3):215-220.
SHI Ying, FEI Wenjun, WANG Danning, et al. Methods and Analysis of Suitability Evaluation of Earthquake Resistance and Hazardous Reduction of Comprehensive Park[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3):215-220.
- [9] 陈国建.南通地区输电线路风灾倒塔分析与防范对策[J].电力工程技术,2012,31(2):18-21.
CHEN Guojian. Analysis and Countermeasures of Nantong Area Electric Transmission Line and Tower Falling Caused by Wind Damage[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(2):18-21.
- [10] 吴建超,郑水明,李恒,等.2014年3月30日湖北省秭归M4.7地震房屋震害特征分析[J].地震工程学报,2016,38(4):669-672.
WU Jianchao, ZHENG Shuming, LI Heng, et al. Building Damage Characteristics during the Zigui, Hubei M4.7 Earthquake on March 30, 2014[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(4):669-672.
- [11] 王飞,苏经宇,王志涛,等.城市综合承灾力评价的AAFSAPPE模型[J].建筑科学,2014,30(3):29-32.
WANG Fei, SU Jingyu, WANG Zhitao, et al. Evaluate of City's Comprehensive Disaster Bearing Capacity Based on AAFSA-PPE Model[J]. Building Science, 2014, 30(3):29-32.
- [12] Üstün A K, Barbarosoglu G. Performance Evaluation of Turkish Disaster Relief Management System in 1999 Earthquakes Using Data Envelopment Analysis [J]. Natural Hazards, 2015, 75(2):1977-1996.
- [13] 刘自凤,苏有锦,王宝善,等.宾川主动源地震波走时变化分析方法研究[J].地震研究,2015,38(4):591-597.
LIU Zifén, SU Youjin, WANG Baoshan, et al. Study on Analysis Method of Travel Time Variations of Seismic Wave of Active Source in Binchuan [J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(4):591-597.
- [14] 魏文晖,罗丹,张迪.基于BP神经网络的城市地震次生火灾起火率研究[J].武汉理工大学学报,2014,36(10):99-104.
WEI Wenhui, LUO Dan, ZHANG Di. Frequency of Urban Post-earthquake Fire Based on BP Neural Network[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(10):99-104.
- [15] 王洲鹏,王彦宾,张献兵.表层沉积物特性对地震地面运动的影响研究[J].地震工程学报,2016,38(1):120-128.
WANG Zhoupeng, WANG Yanbin, ZHANG Xianbing. Study of the Effect of Surface Sediment Characteristics on Earthquake Ground Motion [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38(1):120-128.