基于 GIS 的爆炸灾害数值模拟与应急损失评估*

李天祺[1]，赵振东[2]，余世舟[2]

（1. 江南大学 环境与土木工程学院，江苏 无锡 214122；2. 中国地震局工程力学研究所，黑龙江 哈尔滨 150080）

摘 要：采用冲击波伤害-破坏准则，确定爆炸引起的人员伤害区域和建筑物破坏区域模型。结合 GIS 软件平台，编制爆炸灾害数值模拟程序，可以在 GIS 中以图形的形式给出设定条件下人员伤害区域及建筑物破坏区域的范围。并根据区域内的人员分布和建筑物造价、财产，给出定量的人员伤亡和经济损失应急评估，从而有效指导防灾减灾工作的进行。

关键词：GIS；爆炸；数值模拟；应急损失评估

中图分类号：X928.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－811X(2010)03－0096－04

爆炸是一种危害性极大的灾害形式，其产生的冲击波和热辐射会造成人员伤亡和建筑物的破坏[1]。特别是象加油站、石油液化气储配站等位于城市中的易燃易爆危险源[2]，处于人员和建筑设施相对集中密集的区域，一旦发生爆炸，会造成惨重的人员伤亡和巨大的经济损失[3]。这就需要我们加强危险源的日常管理，同时还应对爆炸可能造成的危害进行评估，来指导防灾减灾工作的进行。其中的每一过程和环节都与空间的地理要素密切相关，如灾害造成破坏区域的范围、灾害发生地的社会经济易损性及抗灾能力、人员分布、灾害评估、灾害应急救助措施及预案等。因而以地理信息系统为平台进行相应研究，已成为综合防灾的重要工具和手段，建立在具有强大空间分析功能的地理信息系统上的减灾系统，将在防灾减灾中发挥快速、准确的辅助决策作用[4]。

地理信息系统是建立在统一地理坐标基础上的空间信息系统，它利用地学模型来进行管理[5]。基于 GIS 的爆炸灾害数值模拟可以直观地给出灾害危害区域的范围，在此基础上，可以计算出相应的人员伤亡与财产损失情况，有助于对灾害危险源的日常管理并可在灾时提供应急救灾决策的依据。

1 分析模型

1.1 基本理论

爆炸可以产生多种破坏效应，如辐射、一次破片作用等。冲击波是最危险、破坏力最强、破坏区域最大的破坏效应。影响冲击波破坏效应的主要因素有：①冲击波的性质，如超压、持续时间、冲量等；②目标物特征，如人的年龄、性别、体重、身体素质，建筑物的高度、结构类型、建筑材料等；③冲击波与目标物的相互作用方式。常见的冲击波伤害-破坏准则有：超压准则、冲量准则、压力-冲量准则[6]。本文采用超压准则。

表 1 和表 2 分别给出了建筑物破坏和人员伤亡的超压准则。

表 1 建筑物破坏的超压准则

超压/kPa	建筑物破坏程度
10～20	建筑物部分破坏
20～30	城市大建筑物有显著破坏
60～70	钢骨架和轻型钢混建筑物破坏
100	除抗震设防的钢混建筑物其他建筑物均被破坏
150～200	抗震设防的建筑物破坏或严重破坏
200～300	钢架桥移位

表 2 人员伤亡的超压准则

超压/kPa	人员损伤程度
20～30	轻微挫伤
30～50	中等损伤：听觉器官损伤，内脏轻度出血，骨折等
50～100	严重：内脏严重损伤，可引起死亡
100	严重：可能大部分死亡

1.2 人员伤亡区域模型

人员的伤害分区有 3 个等级：死亡区的外径为圆周处因冲击波作用导致肺出血而死亡的概率为

* 收稿日期：2010－03－04
基金项目：江南大学青年基金(2009LQN15)
作者简介：李天祺(1979－)，男，辽宁丹东人，博士，副教授，研究方向为城市防灾减灾. E-mail：ltq_tiger15@126.com

0.5 的半径；重伤区外径为圆周处因冲击波作用耳膜破裂的概率为 0.5 的半径；轻伤区的外径为圆周处因冲击波作用耳膜破裂的概率为 0.01 的半径。

死亡区：

$$R_{0.5}=13.6(E/1\ 000)^{0.37}, \tag{1}$$

式中：$R_{0.5}$为死亡区半径(m)；E 为爆源总能量(kJ)。

重伤区：

$$R^3=P_0(\Delta P-1)(0.156\ 7E), \tag{2}$$

式中：R^3 为重伤区半径(m)；$P_0=5\ 000$ Pa；$\Delta P=44\ 000$ Pa。

轻伤区：数学模型同重伤区模型，其中$\Delta P=17\ 000$ Pa。

1.3　建筑物破坏区域模型

把建筑物的破坏分为 5 个等级，各区域外径由下式决定：

$$R_i=(K_iW_{TNT}^{1/3})/[1+(3\ 175/W_{TNT})^2]^{1/6}, \tag{3}$$

式中：R_i 为不同破坏等级区域半径(m)；K_i 为破坏常数，由表 3 确定；W_{TNT}为爆源处 TNT 当量(kg)。

表 3　建筑物破坏等级划分

破坏区等级	常数 K_i	破坏状况
1	56	房屋经维修可居住，天井瓷砖、瓦管有不同程度破坏，隔墙木结构要加固
2	28	建筑物受到一定程度破坏，隔墙木结构要加固
3	9.6	房屋不能再居住，房基部分或全部破坏，外墙 1～2 个面部分破损，承重墙损失严重
4	5.6	砖砌房外表 50%～70% 损坏，墙壁下部危险
5	3.8	所有建筑物全部破坏

2　应急损失评估

2.1　基本假定

在损失评估中应用了以下假定：

(1)事故的伤害或破坏效用是各向同性的，伤害和破坏区域是以单元中心为圆心，以伤害或破坏半径为半径的圆形区域。在伤害和破坏区域内无障碍物。

(2)在伤害区内人员全部被伤害；在伤害区外人员均不被伤害。

(3)在破坏区内财产全部损失，区外财产毫无损失。

(4)事故发生使正常生产、生活和经营受到影响，由此而引起的间接损失不予考虑。

(5)不考虑各种预防措施对计算模型的影响。

2.2　伤亡人数评估

(1)死亡人数计算：

$$N_1=3.14\rho_1R_{0.5}^2, \tag{4}$$

式中：ρ_1 为死亡区平均人员密度(人/m^2)；$R_{0.5}$为死亡区半径(m)。

(2)重伤人数计算：

$$N_2=3.14\rho_2(Rd_{0.5}^2-R_{0.5}^2), \tag{5}$$

式中：ρ_2 为重伤区平均人员密度(人/m^2)；$Rd_{0.5}$为重伤区外径(m)。

(3)轻伤人数计算：

$$N_3=3.14\rho_3(Rd_{0.01}^2-Rd_{0.5}^2), \tag{6}$$

式中：ρ_3 为轻伤区平均人员密度(人/m^2)；$Rd_{0.01}$为重伤区外径(m)。

2.3　财产损失评估

(1)财产损失计算

事故直接财产损失 C(万元)计算如下：

$$C=3.14R_4^2\rho_4, \tag{7}$$

式中：ρ_4 为破坏区平均财产密度(万元/m^2)。

(2)损失工作日数的计算

由于人员伤亡而损失的工作日数 N(d)为：

$$N=6\ 000N_1+3\ 000N_2+105N_3, \tag{8}$$

式中：6 000、3 000、105 分别为死亡、重伤和轻伤一人折合成的损失工作日数。

(3)事故总后果的计算

如果把人员伤亡换算成财产损失，则可用总财产损失 S(万元)来表示事故的严重度。

$$S=C+Nb/6\ 000, \tag{9}$$

式中：b 为死亡一人损失的价值，建议取值 20 万元。

3　GIS 下的应用

3.1　程序流程

本文中的数值模拟是在 ArcView8.1 平台上进行的。GIS 具有很强的对复杂的地理系统进行空间定位和过程动态分析能力，但数值计算能力相对较差[7]。这里通过用 VC ++ 编写的 DLL 动态扩展程序，对数值模型进行计算，返回的数据再在 GIS 下完成图形数据的分析和显示，从而提高了程序的整体运行速度。在数值模拟的图形显示中，把数值模拟图形以新的图层给出，设置成半透明状态，从而更容易确定模拟图形的相对位置，对新生成图层中的不同图形用颜色加以区分。程序流程如图 1 所示。

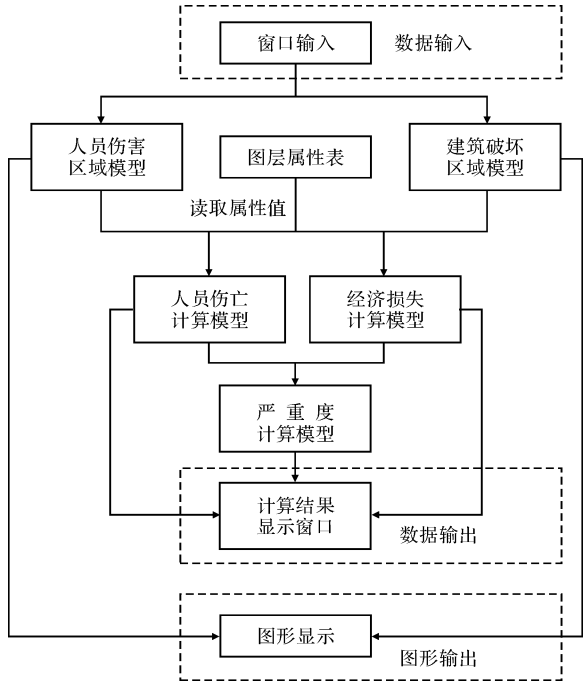

图 1 爆炸模拟程序流程图

3.2 参数输入

进行爆炸模拟时，首先需要确定两个参数，分别为爆源能量和环境压力。环境压力是指爆源周围的大气压，一般为标准大气压；爆源能量是指爆源的总能量，这里要求的单位为吨(TNT)。TNT 爆热与爆源能量的换算关系为：1(kg)TNT 爆热相当于 4 520 kJ 爆源能量。

3.3 结果显示

图 2、图 3 分别显示爆源为 60tTNT 爆炸对建筑物的破坏分区和对人员的伤害分区。破坏分区共有 5 个等级；人员的伤害分区有 3 个等级。在图中，人员的伤害区域和建筑物的破坏区域均以半透明的方式显示，可以清楚地了解到各区域覆盖的建筑和设备。

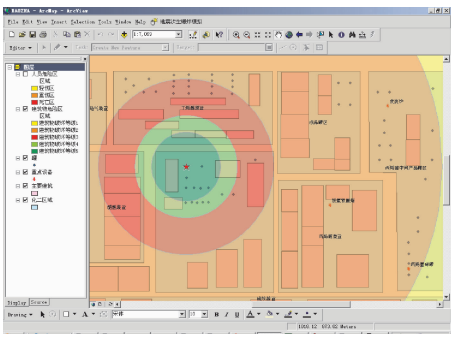

图 2 建筑物破坏区域范围

在人员的伤害区域和建筑物的破坏区域显示完成后，将给出计算结果的显示窗口，如图 4 所示。图中给出了各区域的覆盖面积、图形半径、人员伤亡人数、财产损失值和事故严重度的计算结果。计算过程前需要调查确定区域内人员和财产的分布数值，这里假定人员分布密度为 0.01 人/m^2，财产分布密度为 0.1 万元/ m^2。

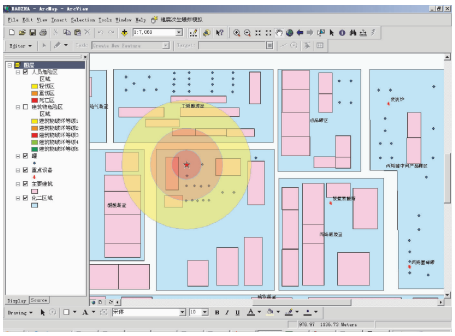

图 3 人员伤亡区域范围

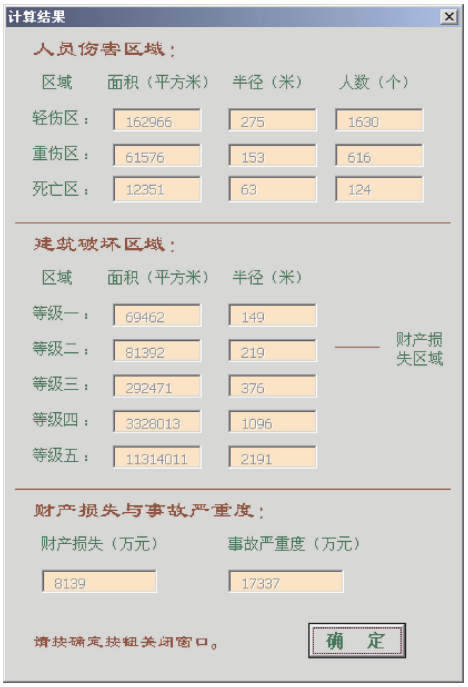

图 4 损失计算结果

4 结语

本文基于 GIS，对爆炸造成的人员伤亡和建筑物破坏区域进行了数值模拟，并对灾害造成的后果进行了应急评估。利用 GIS 的空间分析功能，能够直观的给出灾害造成危害的区域范围，有助于加强对于危险源的日常管理，也为决策者提供了应急救灾辅助决策的科学依据[8]。

灾害模拟中使用的数学模型都有一些假定的条件，多为理想状态，模拟的结果与实际情况会有一定的差距，但作为参考依据，总体上把握灾情的结果和变化是具有一定应用价值的。

参考文献：

[1] 崔辉，徐志胜，宋文华．人工燃气爆炸与中毒事故危害定量比较分析[J]．灾害学，2008，23(4)：96－100.

[2] 崔辉，徐志胜，宋文华，等．有毒气体危害区域划分之临界浓度研究[J]．灾害学，2008，23(3)：80－84.

[3] 骆正山，王小完．基于天然气泄漏的危害性分析及应用[J]．灾害学，2009，24(1)：97－100.

[4] 余世舟，赵振东，钟江荣．基于 GIS 的地震次生灾害数值模拟[J]．自然灾害学报，2003，12(4)：100－105.

[5] 陈如桂，杨林生，王五一．GIS 在卫生与健康领域的应用探索——中国鼠疫医学地理信息系统的设计与建立[J]．地理科学进展，1999，18(4)：368－372.

[6] 惠君明．炸药爆炸理论[M]．南京：江苏科学出版社，1996.

[7] 张孟威．环境问题的数学解法及计算机应用[M]．北京：中国环境科学出版社，1989.

[8] 赵振东，钟江荣，余世舟，等．大庆市东风新村和开发区地震灾害预测与信息管理系统[J]．东北地震研究，2007，23(3)：10－16.

GIS-based Numerical Simulation and Emergency Loss Evaluation of Explosion Disasters

Li Tianqi[1], Zhao Zhendong[2] and Yu Shizhou[2]

(1. *Jiangnan University*, *Wuxi* 214122, *China*; 2. *Institute of Engineering Mechanics*, *CEA*, *Harbin* 150080, *China*)

Abstract: Models for areas of casualties and destructive buildings after explosion are determined by using the law of harm and destruction of shock waves. Based on GIS, numerical simulation programs of the explosion disaster are compiled. In setting the conditions, the dangerous area of casualties and distribution area of destructive buildings are given by the graphics form in GIS. Emergency evaluation of quantitative casualties and economic loss is given in accordance with the distribution of persons, building costs and the number of property in the area. Disaster prevention and reduction can therefore be effectively carried out.

Key words: GIS; explosion; numerical simulation; emergency loss evaluation

(上接第 95 页)

Study on Relative People Vulnerability of City Emergencies

Zhang Yongling

(*School of Emergency Management*, *Henan Polytechnic University*, *Jiaozuo* 454000, *China*)

Abstract: A new method of analyzing relative people vulnerability of city emergencies is designed based on the experience orthogonal function (EOF) method and the model of relative people vulnerability judgment. Taking Jiaozuo City as an example, the city is divided into 8 risk regions and 20 factors which influence the people vulnerability of the city emergencies are chosen. Firstly, the judgment matrix is constructed by comparative influence of each factor in 8 risk regions, and then the matrix of relative people vulnerability is constructed by the eigenvectors of the judgment matrix. Finally, the characteristics of people relative vulnerability are studied by the EOF method, and the region difference among influencing factors of emergencies are analyzed. In addition, combination and variety between influencing factors and risk regions are discussed. A new method to study vulnerability is provided. Besides, the method gives a scientific way to deal with the people vulnerability.

Key words: city; emergencies; people; vulnerability; public safety; Jiaozuo city in Henan province