

# WebGIS 在非重气云扩散模拟中的应用<sup>\*</sup>

陈国华<sup>1</sup> 张静<sup>1</sup> 张晖<sup>2</sup> 颜伟文<sup>2</sup> 陈清光<sup>2</sup>

(1.华南理工大学 2.广东省安全科学技术研究所)

陈国华等. WebGIS 在非重气云扩散模拟中的应用. 天然气工业, 2006, 26(10): 140-143.

**摘要** 将计算机技术、网络技术和地理信息系统技术相结合, 建立了一套基于 Internet 的 B/S 模式网络地理信息系统(WebGIS), 利用该系统根据非重气云扩散的高斯(Gaussian)模型对瞬时泄漏和连续泄漏两种事故类型的气体扩散情况进行了图形模拟。模拟结果通过在电子地图上绘制出气体浓度等值线的方式, 可视化显示出发生泄漏事故后泄漏源周围的气体浓度分布状况及其对周围环境的影响情况。通过工程实例验证了系统的可行性并展示了系统的运行效果。该系统通过将地理信息系统与气体扩散的模拟模型相结合, 形象、直观地模拟出危险非重气体泄漏后的影响范围, 为非重气体的日常管理、事前预测和事故时的应急指挥等提供了专业化的信息支持。

**关键词** 地理信息系统 气云 扩散 模拟 高斯模型 瞬时泄漏 连续泄漏

易燃、易爆、有毒的危险气体或液化气体一旦发生泄漏, 若没有得到及时处理, 就会形成气云随风飘散, 成为“移动的危险源”, 给周围地区带来极大的安全隐患。而且由于气云的扩散受气象条件的影响较大, 所以其扩散的趋势和浓度分布情况具有很强的不确定性。目前虽已有较为可靠的数学公式可以对气云的扩散情况进行数值模拟, 但其结果不够直观, 缺乏可视性。这给危险气体泄漏扩散事故的应急救援造成了极大的困难。

地理信息系统(Geographic Information System, 简称 GIS)作为表达地理信息的有力工具, 为可视化模拟气云的扩散情况, 判断气云的覆盖区域等提供了重要的途径。WebGIS 则是基于互联网的 GIS 系统, 是将 GIS 与 Internet 相结合的成果。基于 B/S 模式的 WebGIS 可以使整个互联网内经过授权的用户只需通过浏览器就可以查看气云扩散的模拟情况, 扩大了系统的共享范围, 使参与事故应急联动的各部门都可以及时掌握气云的扩散信息。

笔者在此主要讨论如何应用 WebGIS 技术, 结合非重气云团扩散的高斯公式, 对非重气云扩散进行模拟的技术方法, 并应用此方法建立了非重气云扩散模拟系统。该系统通过在电子地图上绘制出气体浓度等值线的方式, 直观地反映出气云扩散时泄漏源周围区域的浓度分布状况, 从而为非重气体的

日常管理和事故的应急救援指挥等提供信息支持。

## 一、WebGIS 平台的四层结构体系

WebGIS 作为非重气云团扩散数值模拟和效果展示的主要平台, 与传统的 GIS 技术相比, 具有: 访问范围广、平台独立、大幅度降低系统成本和维护、升级方便等特点<sup>[1]</sup>。为实现并较好地融合 GIS 图形显示、非重气云扩散数学表达式计算和网络传输这 3 项功能, 共同完成基于 Internet 的 B/S 模式非重气云团的扩散模拟。笔者采用 MapXtreme Java(以下简称 MXTJ)作为地图服务器, Java 为基础语言, Linux 为服务器操作系统, 建立了 WebGIS 平台。该平台由以下 4 层结构组成。

(1) 客户层(Client Tier): 以 Jsp 和 html 界面的形式, 将用户输入的模拟所需参数传递到服务器, 同时将气云扩散的模拟结果显示给用户。

(2) Web 服务器层(Web Top Server Tier): 负责处理用户的请求, 实现客户层和地图服务器层的信息传递。

(3) 地图服务器层(Web GIS Server Tier): 使用 Java 技术开发 Java Servlet 程序, 该 Servlet 程序是系统的核心部分, 主要实现应用高斯公式对气云的扩散情况进行数值模拟以及与 MXTJ 地图服务器联合实现将数值模拟结果转化为图形的功能。

<sup>\*</sup> 本文受到广东省科技攻关项目(编号: 2003B30903)资助。

作者简介: 陈国华, 教授。地址: (510640) 广东省广州市华南理工大学工控学院安全工程研究所。电话: (020) 87114740。  
E-mail: mmghchen@scut.edu.cn

(4)数据库层(Database Tier):选用与MXTJ组件兼容性强且数据上传方便的 Oracle 9i 空间数据库,存储用于电子地图显示的图层文件及其他各种数据。

## 二、非重气云团扩散模拟的实现

### 1. 非重气云扩散模拟的数学模型

根据气云密度与空气密度的相对大小,将气云分为重气云、中性气云和轻气云3类。轻气云和中性气云统称为非重气云<sup>[2]</sup>。而泄漏事故也分为瞬时泄漏和连续泄漏两种类型<sup>[3]</sup>。瞬时泄漏采用高斯烟团模型模拟<sup>[3]</sup>,取泄漏源为坐标原点, $x$ 轴指向风向, $y$ 轴表示在水平面内与风向垂直的方向, $z$ 轴则指向与水平面垂直的方向,见式(1)<sup>[5]</sup>。

$$c(x, y) = \frac{Q}{(2\pi)^{2/3} \alpha_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{(x-ut)^2}{2\alpha_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{2H^2}{\sigma_z^2}\right] \quad (1)$$

式中: $\alpha_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 分别表示用浓度偏差表示的 $x$ 、 $y$ 和 $z$ 轴上的扩散系数,需根据大气稳定度选择参数计算得到; $H$ 表示泄漏源的高度,m; $u$ 表示平均风速,m/s; $t$ 表示泄漏时间大气稳定度,s,它由10 m高度上的风速、白天的太阳辐射或夜间的云量等参数决定,随着气象条件稳定性的增加。其中的大气稳定度分为A~F级<sup>[3]</sup>(有关大气稳定度的选取和 $\alpha_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 的计算可查阅文献<sup>[3]</sup>)。

连续泄漏采用高斯烟羽模型模拟,同样在上述坐标系中,其表达式见式(2)<sup>[4-5]</sup>。

$$c(x, y) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} - \frac{2H^2}{\sigma_z^2}\right) \quad (2)$$

式中: $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 和 $H$ 的意义同式(1); $u$ 表示泄漏高度的平均风速,m/s; $Q$ 表示泄漏源的强度,kg/s。

为实现上述高斯公式的计算机化,先要将高斯烟团公式[式(1)]和高斯烟羽公式[式(2)]变形,化成以 $x$ 为变量、 $y$ 为未知数的形式[式(3)和式(4)],再编制成相应的计算机程序。

$$y = \pm \sqrt{-\frac{(x-ut)^2}{\alpha_x^2} - \frac{4H^2}{\sigma_z^2} - 2\ln\left(\frac{c(2\pi)^{3/2} \alpha_x \sigma_y \sigma_z}{Q}\right)} \times \alpha_x \quad (3)$$

$$y = \pm \sqrt{-\frac{4H^2}{\sigma_z^2} - 2\ln\left(\frac{c(2\pi u \sigma_y \sigma_z)}{Q}\right)} \times \alpha_x \quad (4)$$

### 2. 非重气云团扩散模拟

模拟非重气云团的扩散情况时,首先由用户在图1所示的Jsp界面输入事故参数、气象参数和需要模拟的气体浓度值(最多可输入3个气体浓度值),

图1 气体扩散模拟参数输入界面示意图

并选择事故单位。系统将上述参数传递到Servlet程序,程序根据用户选择的泄漏类型选取合适的高斯公式进行气云扩散的数值计算,并依据风向情况和所选用电子地图的比例绘制出气体浓度等值线,最后将绘制好的电子地图嵌入到html页面中输出到用户界面。

#### (1) 瞬时泄漏气云扩散模拟流程

瞬时泄漏的气云扩散模拟分为以下7个步骤。

1)首先根据大气稳定度等级,选择出 $\alpha_x$ 、 $\sigma_y$ 和 $\sigma_z$ 的系数(见文献<sup>[3]</sup>表4-14),列出其关于 $x$ 的计算表达式。

2)以泄漏源为原点,正东方向为 $x$ 轴,正北方向为 $y$ 轴建立坐标系。沿 $x$ 轴取1 m为步长(此距离既便于计算机编程,又不至因步长过大而使模拟曲线的准确度降低),逐步计算出每个 $x$ 所对应的 $y$ 值。即先令 $x$ 值为1,应用式(3)计算出 $y$ 值(暂只取正值,舍弃负值),同时将 $x$ 和计算得到的 $y$ 分别存入长度为 $M$ 的数组 $X[]$ 和 $Y[]$ 的首位。再将 $x$ 加1,计算出新的 $y$ 值,如此循环 $N$ 次(为保证浓度曲线的完整性, $N$ 的取值不宜过小,且应满足 $N \leq M$ ),可得到 $N$ 组 $(x_i, y_i)$ ( $i=0, 1, 2, \dots, N-1$ ),将所有得到的 $N$ 组 $(x_i, y_i)$ 按顺序存入数组 $X[]$ 和 $Y[]$ 中。

3)由式(3)可见,当 $x$ 值过小或过大时,都可能出现 $y$ 值无实数解的情况,其物理意义为:气体泄漏后,受气象条件的影响沿下风向扩散,气体将飘离泄漏源,用图形表示即为气体的浓度曲线可能距离泄漏源有一定的距离,在这个距离之内的 $x$ 值所对应的 $y$ 值均无实数解;同时,由于气体的扩散也是有一定范围的,即气体浓度等值线表现为封闭的曲线,故当 $x$ 值大于曲线所在范围时,其所对应的 $y$ 值也无实数解。所以在步骤2)中得到 $N$ 组 $(x_i, y_i)$ 后,还需逐个判断每个点是否落在气体浓度曲线上,即判断其 $Y[i]$ 值是否大于零。若 $Y[i] > 0$ ,则该点为浓度

等值点,可进入下一步计算,否则舍弃该点。

4)由于步骤 2)中建立的坐标系是以正东方向为  $x$  轴,可能与用户输入的实际风向情况不符,所以需要将步骤 2)的坐标系旋转到以实际风向为  $x$  轴的方向上。系统首先将用户输入的风向转化成以正东为 0 度的风向角度  $\theta$ ,然后将  $X[i]$ 、 $Y[i]$  中的值按式(5)转换为按风向调整后的浓度等值点坐标值 ( $\Delta x_i$ ,  $\Delta y_i$ )。

$$\begin{cases} \Delta x_i = X[i]\cos\theta - Y[i]\sin\theta \\ \Delta y_i = X[i]\sin\theta + Y[i]\cos\theta \end{cases} \quad (5)$$

$$(i=0, 1, \dots, n-1)$$

式中: $\Delta x_i$  表示在  $x$  轴方向上第  $i$  个浓度等值点与泄漏源间的距离; $\Delta y_i$  表示在  $y$  轴方向上第  $i$  个浓度等值点与泄漏源间的距离。

5)又由于步骤 2)中建立的坐标系将泄漏源看作是坐标原点,而实际上泄漏源在电子地图上是有其位置坐标的,同时电子地图与实际地理坐标也是有一定比例关系的。所以还需按式(6)完成两个坐标系之间的坐标值转换,然后在电子地图上以 ( $x_i'$ ,  $y_i'$ )为坐标绘制出气体浓度等值点。

$$\begin{cases} x_i' = x + \Delta x_i/p \\ y_i' = y + \Delta y_i/p \end{cases} \quad (6)$$

$$(i=0, 1, \dots, n-1)$$

式中: $x'$ 表示第  $i$  个浓度等值点在电子地图坐标系中的  $x$  坐标值; $y'$ 表示第  $i$  个浓度等值点在电子地图坐标系中的  $y$  坐标值; $x$  表示泄漏源在电子地图坐标系中的  $x$  坐标值; $y$  表示泄漏源在电子地图坐标系中的  $y$  坐标值; $p$  表示电子地图与实际距离的比例系数。

6)再由式(3)可见,若  $y$  可得到实数解,则其解为一对相反数,其物理意义表现为关于  $x$  轴对称的一对浓度等值点。但在步骤 2)中,舍弃了负值,故步骤 5)完成后,只绘制出了  $x$  轴以上部分的浓度等值点,而  $x$  轴以下部分等值点的计算,还需利用步骤 2)中舍弃的  $Y[i]$  负值,再应用式(5)和式(6)求出这部分浓度等值点的坐标值,并同样绘制在电子地图上。最后用直线将每两个相邻的点连接起来,就形成了气体浓度等值线。

7)最后将所有绘制的点和线添加到临时图层,再将该临时图层添加到电子地图上并通过 B/S 模式网络组件输出到客户端显示。

## (2) 连续泄漏气云扩散模拟流程

图 2 所示为非重气云扩散模拟流程图。

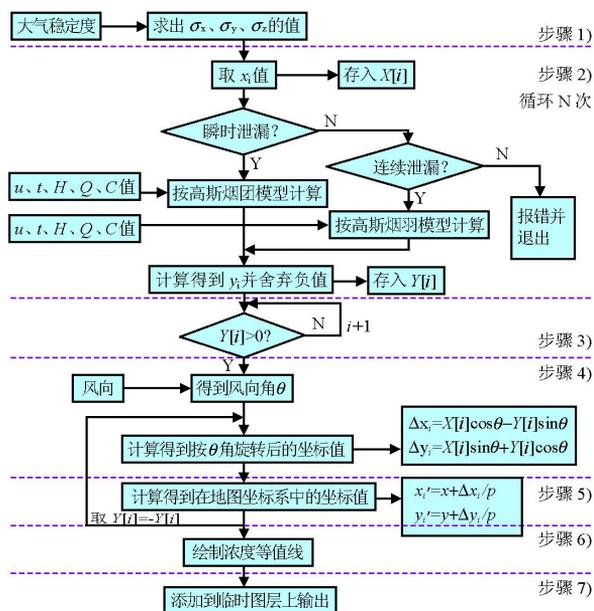


图 2 非重气云扩散模拟流程图

连续泄漏气云的扩散模拟需应用高斯烟羽模型 [见式(4)]求得与  $x$  值相对应的  $y$  值,其他步骤与瞬时泄漏模拟过程相似。

## 三、实 例

以某企业甲烷储罐为泄漏源加以说明。甲烷为极度易燃气体,比空气轻,属非重气,与空气混和能形成爆炸性混和物,蒸气可引起头晕或窒息,爆炸上、下限分别为  $99.4 \text{ g/m}^3$  和  $35.126 \text{ g/m}^3$ ,且当空气中甲烷浓度超过  $165.69 \text{ g/m}^3$  时可引起头痛、头晕、乏力等症状,若不及时脱离可致窒息死亡<sup>[6-7]</sup>。

假设该企业发生了甲烷气体瞬时泄漏事故且事故参数如下:平均风速为  $1 \text{ m/s}$ ,泄漏源高度为  $2 \text{ m}$ ,物料泄漏量为  $451350 \text{ kg}$  ( $1000 \text{ m}^3$  储罐),大气稳定度为 A 级,风向为西南方向,现模拟泄漏事故发生  $60 \text{ s}$  后,浓度为  $35.126 \text{ g/m}^3$ 、 $99.4 \text{ g/m}^3$  和  $165.69 \text{ g/m}^3$  的气体轮廓线如图 3 所示。



图 3 某企业瞬时泄漏事故后气体浓度分布曲线图

假设该企业发生甲烷气体连续泄漏事故且参数

如下:平均风速为  $1 \text{ m/s}$ , 泄漏源高度为  $1 \text{ m}$ , 物料泄漏源强度为  $1 \text{ kg/s}$ , 大气稳定性为 A 级, 风向为西南方向, 同样模拟浓度为  $35.126 \text{ g/m}^3$ 、 $99.4 \text{ g/m}^3$  和  $165.69 \text{ g/m}^3$  的气体轮廓线如图 4 所示。



图 4 某企业连续泄漏事故后气体浓度分布曲线图  
 两图中曲线颜色由内而外依次为蓝色、绿色和红色，五角星表示泄漏源

由图 3、4 可见, 图中红色与绿色曲线之间区域为气体爆炸浓度范围, 发生事故后应严禁烟火, 并严格限制该区域的人员和车辆出入。绿色曲线范围内为爆炸极限浓度以上区域, 极易因气体燃烧而引发大规模火灾, 在事故发生后应进行严格管制, 同时在进行区域规划时, 该区域应尽量避免布置易燃易爆物质的库区或罐区。虽然甲烷对人体无毒, 但当其浓度超过  $165.69 \text{ g/m}^3$  (即蓝色曲线范围内) 时可使人生产生不良反应, 所以事故发生后, 该区域内人员应立即撤离, 抢险和消防人员则采取相应的防护措施。

#### 四、结论与展望

本文讨论了应用 WebGIS 技术对非重气云团扩散进行模拟的方法, 并应用该方法建立了非重气云团扩散模拟系统, 该系统具有以下特点。

(1) 应用 WebGIS 技术实现了可视化模拟非重气云团的扩散, 将数学模型的计算结果通过图形方式表达出来。同时 GIS 的电子地图多级放大功能,

可以从多个比例查看气云扩散的覆盖区域, 满足了不同的使用需求。基于互联网的发布平台, 也极大地扩大了信息的共享范围。

(2) 应用已得到普遍认可的专业模型直观地模拟出了气云扩散时不同浓度下的覆盖区域, 不仅具有较高的准确性, 而且为危险非重气体的扩散判断与影响评估提供了有效的手段, 给非重气体生产和储存企业的日常管理带来了方便, 也为事故时的应急救援及抢险等提供了有力的工具。

(3) 随着对气体泄漏扩散模拟理论方法研究的深入和计算机三维技术的发展, 非重气云团的数值模拟可以在此平台的基础上进行扩展, 从而进一步提高模拟的准确度和真实性。

#### 参 考 文 献

- [1] 洪智勇, 董傲霜. 基于 MapXtreme/Java 技术的 WebGIS 研究与开发[J]. 沈阳工业学院院报, 2003, 22(3): 45-48.
- [2] 宇德明. 易燃、易爆、有毒危险品储运过程定量风险评价[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000.
- [3] 刘诗飞, 詹予忠. 重大危险源辨识及危害后果分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 张瑞华, 陈国华, 张文海. 油库储罐泄漏危险程度定量模拟评价应用研究[J]. 油气储运, 2004, 23(10): 4-7.
- [5] 潘旭海. 事故性泄漏动力学过程的理论与实验研究[D]. 南京工业大学学位论文, 2004.
- [6] 俞志明. 新编危险物品安全手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [7] 姚玉英, 黄凤廉, 等. 化工原理[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1995.
- [8] 李又绿, 姚安林, 李永杰. 天然气管道泄漏扩散模型研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(8): 102-104.

(收稿日期 2006-06-25 编辑 居维清)