

典型化工过程灾害性事故的模拟分析系统*

王志荣 蒋军成 王三明

(南京工业大学安全工程研究所)

王志荣等. 典型化工过程灾害性事故的模拟分析系统. 天然气工业, 2004; 24(5): 123~126

摘 要 火灾、爆炸和有毒有害物质泄漏是化学工业和石油化学工业生产中的重大灾害性事故。化工生产和储运过程涉及到大量易燃易爆、有毒有害物质,一旦物质或能量的正常运行状态遭到破坏,发生火灾、爆炸或泄漏,便会导致灾难性的后果。因此,加强化工过程灾害性事故的预防与控制对于安全生产具有重要的意义。事故后果模拟分析是进行灾害防治的基础,模拟分析的结果能够给化工企业防灾救灾和安全设计提供重要参考。为此围绕典型化工过程,建立了化工过程灾害模拟分析的事故模型和数学模型,在此基础上,结合面向对象技术、数据库技术和人工智能技术研究开发了典型化工过程灾害性事故模拟分析系统。该模拟分析系统能够动态模拟危险介质泄漏扩散、火灾、爆炸灾害过程,并根据灾害类型和危险介质的特性分析模拟计算结果,划定灾害事故影响区域,还可以根据灾害模拟分析模型精确计算各种参数,如危险介质泄漏扩散后随时间在空间的浓度分布、热辐射通量及爆炸冲击波在空间的分布等。

主题词 化学工业 石油化学工业 火灾 爆炸 泄漏 事故 化工过程灾害 模拟 分析 系统

灾害事故模拟分析是通过采用合理的数学模型对所确定的危险单元或系统进行事故过程模拟,对事故所造成的危害影响则选用相应的伤害模型进行危害评价,并以动画、图形、图表、文字、声音等途径对事故的影响区域、人员伤亡、财产损失情况进行描述^[1~2]。

灾害性事故模拟分析模型

灾害性事故模拟分析模型是该项研究的核心和基础,是通过对国内外大量事故案例的统计分析和归纳总结^[3~5]形成事故模型,并在此基础上建立模拟分析的数学模型^[6~8]。

1. 事故模型

化工过程灾害性事故的主要形态是泄漏、火灾和爆炸三大类。事故模型能对事故形态、发展趋势和可能后果进行描述。

事故形态决定了导致事故发生可能的原因和可能导致事故后果。文献[9]论述了 VCE 和 BLEVE 事故的机理、破坏形式以及后果模拟分析。该软件系统中泄漏事故的基本形态考虑了气体泄漏、液体泄漏和气液两相流泄漏,火灾事故包括喷射

火灾和池火灾,爆炸事故主要有 VCE、BLEVE、凝聚相爆炸和压力容器爆炸 4 种工业爆炸事故模式。

2. 数学模型

化工过程灾害模拟分析数学模型是根据事故模型和事故假设建立起来的。这些模型包括:池火灾模型、喷射火灾模型、蒸气云爆炸模型、沸腾液体扩展蒸气爆炸模型、凝聚相爆炸模型、泄漏速度模型和重气扩散模型^[6,8,10~14]等。这些模型参考了国内外有关标准规范,并为大量模拟试验数据所验证。

3. 事故模拟

事故模拟是在事故模型分析的基础上选择数学模型,并根据事故现场的情况(包括气象条件、装置设备的尺寸大小、储存条件等)和有关危险物质的物性参数,利用计算机模拟并输出模拟结果的过程。

事故状态下危险介质的状态(泄漏扩散速率、浓度随时间在空间的分布、液池液体蒸发速率、扩散影响区域等)、各种伤害半径(轻伤半径、重伤半径、死亡半径和财产损失半径)、人员伤亡(轻伤、重伤、死亡人数)、财产损失(财产损失半径、直接财产损失、间接财产损失、总财产损失)、热辐射通量空间分布、爆炸超压空间分布等目标值构成了灾害模拟分析指

* 本成果受到国家自然科学基金项目(No. 29936110)和江苏省青年科学基金项目(BQ98029)资助。

作者简介:王志荣,1977 年生,博士研究生;主要从事化工过程及装置爆炸灾害模拟分析与防治技术研究。地址:(210009)江苏省南京市南京工业大学。电话:(025)83587421。E-mail:zhirongwang@etang.com

标体系。

软件系统总体结构与功能设计

1. C/S 结构设计

考虑到软件系统的实际使用情况,本系统的构架模式采用客户机/服务器两层模式(C/S模式,图1),即化工过程灾害模拟分析功能由客户端的前台程序完成,而数据库的存储、查询等维护功能则由数据库的服务器来完成。

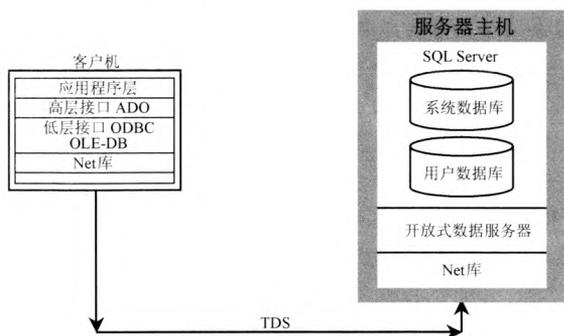


图1 软件系统 C/S 结构图

2. 功能设计及总体结构

据软件系统功能的要求,并结合工程应用实际研究开发了典型化工过程灾害性事故模拟分析系统,并采用C/S结构设计^[15],总体结构框架如图2所示,系统由人机交互界面、数据库系统、模拟分析系统和在线帮助系统组成。

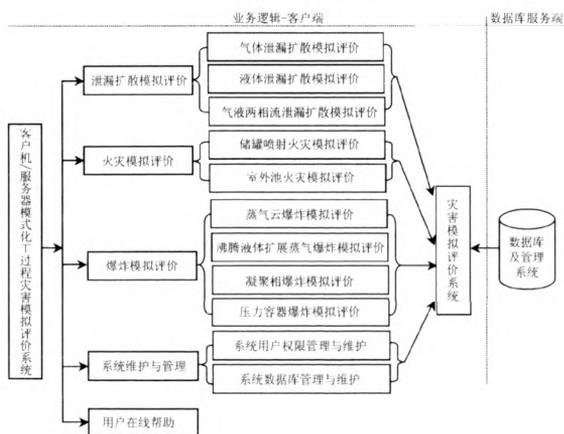


图2 系统总体结构与功能设计示意图

(1) 人机交互界面

人机交互界面是用户与系统的人机接口。在系统设计时采用了目前比较流行的Windows界面风格,使用菜单驱动模式,包括固定式菜单、下拉式菜

单、弹出式菜单等。所有用户人机界面均采用标准Windows图形窗口界面、菜单和按钮,所有操作可通过键盘和鼠标来完成,且每一步操作均有动态用户提示,用户使用操作方便、快速。

(2) 数据库系统

数据库系统是灾害性事故模拟分析的依据和基础,该系统的后台物性数据库采用大型关系数据库SQL Server构建^[16],保证了系统数据库部分的数据量和安全性不断发展的需要,以及数据库管理维护的方便性和数据库易于移植性的需要,使系统数据库能轻易的和其他数据库系统(如Oracle、Sybase、Visual FoxPro、Excess)进行数据共享,并利用人工神经网络技术计算非标准状况下危险介质的物性参数,供模拟分析模块调用。危险品物性数据库用于存放灾害模拟分析所需的物性参数,主要包括危险介质的密度、闪点、爆炸极限、蒸气压、沸点、燃烧热等。

(3) 模拟分析系统

模拟分析系统是软件系统的核心部分。该系统能够对化工过程灾害性事故进行模拟计算,并对灾害性事故后果严重度进行分析,给出模拟分析结果。主要功能包括:①危险介质泄漏扩散、火灾、爆炸灾害过程的动态模拟;②根据灾害类型和危险介质的特性分析模拟计算结果,划定灾害事故影响区域;③根据灾害模拟分析模型精确计算各种参数,如危险介质泄漏扩散后随时间在空间的浓度分布、热辐射通量及爆炸冲击波在空间的分布等;④模拟分析结果能给事故应急救援和救灾决策提供依据。

(4) 在线帮助系统

在线帮助系统主要包括用户管理、软件使用方法以及使用过程中可能遇到问题的解决方法。为方便用户使用,在线帮助系统还包括用户使用手册和软件技术手册。

软件系统的开发

软件系统的编程环境是C++Builder 5.0,硬件配置为PC586以上机型、32 M以上内存、320 M以上硬盘。在系统的开发过程中,采用面向对象程序设计方法,使用鼠标及菜单驱动技术进行设计。数据库系统采用SQL Server 2000进行开发。数据库与软件功能模块采用ADO或ODBC数据源进行连接。在软件的功能模块设计中,考虑到程序的可移植性、可扩展性和可维护性,采用可视化组件设计方法^[17],各功能模块既有独立性,又相互联系。模拟分

析主窗口包括参数输入区、模拟分析功能区及评价结果输出区：①参数输入区包括评价模型的选择，装置设备的特性参数、环境参数等；②模拟分析功能区包括模型演示，模拟分析，打印输出以及在线帮助；③评价结果输出区主要有文本形式、图形格式和报表格式 3 种输出方式。

应用实例

针对某化工公司建设工程项目应用该软件系统进行了模拟分析，确定了管道输送、反应和罐区储存这 3 个单元进行评价。3 个单元均涉及到丙烯腈。丙烯腈是易燃易爆有毒有害且易挥发的液体，泄漏后形成液池，在点火源作用下发生池火灾；挥发的丙烯腈蒸气在空气中极易与空气混合形成蒸气云，遇引燃源发生蒸气云爆炸。选择了管道孔洞和储罐孔洞 2 种泄漏形式，管道孔洞和储罐孔洞的泄漏当量直径分别为 0.02 m 和 0.05 m，储罐孔洞离液面 15 m，并假设泄漏发生 5 分钟后就已经被发现并堵上，且泄漏处周围不存在任何防液堤，进行了泄漏扩散、池火灾和蒸气云爆炸模拟分析。有关丙烯腈模拟分析所需要的参数见表 1。

表 1 模拟分析中丙烯腈理化参数、装置参数和气象条件表

理化参数		装置参数		气象条件	
密度	810 kg/m ³	管道直径	120 mm	平均气温	15.4 °C
分子量	53.06	存储温度	15 °C	最高气温	40.9 °C
燃烧热	1757.7 kJ/mol	存储质量	194400 kg	平均风速	2.52 m/s
蒸发热	389 kJ/kg	储罐容量	10000 m ³	主导风向	夏季 SE, 冬季 NE
空气中最高允许浓度	2 mg/m ³ (0.9 ppm)	储罐个数	1 个	太阳辐射程度	中等

图 3 是丙烯腈储罐泄漏后丙烯腈蒸气在环境中

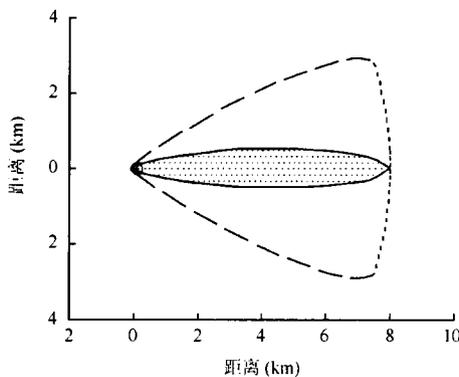


图 3 丙烯腈储罐泄漏时的浓度分布图

的浓度分布(阴影区域表示浓度高于空气中允许最大浓度),图 4 是丙烯腈储罐发生泄漏后下风向 50 m 处的浓度变化图(图中未标记实线表示预测点的浓度值,LOC 线表示空气中允许最大浓度,虚线表示如果预测点处存在封闭的建筑物时其房间内部的浓度值)。

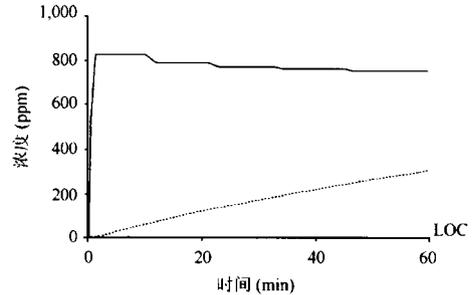


图 4 丙烯腈发生泄漏后下风向 50 m 处的浓度变化图

模拟分析采用最大危险性原则,假设有大量丙烯腈发生泄漏,形成液池,发生连续蒸发扩散。达到稳定状态后,地面附近浓度分布情况见本期彩插图版 8 和图版 9。图中绿色代表安全区域(浓度低于空气中最高允许浓度),黄色、桔红色和红色代表危险区域(浓度高于空气中允许最高浓度,且浓度值分别低于 10 倍、100 倍和 1000 倍空气中允许最高浓度值)。

对于少量的瞬间泄漏,模拟分析中假设泄漏量分别是 0.2 m³ 和 0.5 m³,其在空气中的浓度分布见彩插图版 10 和图版 11。从模拟结果可以看出,由于丙烯腈在空气中的最高允许浓度很小,只有 0.9 ppm,故即使少量的泄漏也会导致较大面积的浓度超标区域。

表 2 是丙烯腈不同泄漏情况下所引发池火灾和蒸气云爆炸的伤害半径。该模拟分析结果以表格的形式表示了丙烯腈储罐发生泄漏导致池火灾或蒸气云爆炸事故后果的严重度,包括各种伤害半径(轻伤

表 2 不同情况下所引发池火灾和蒸气云爆炸的伤害半径

泄漏形式	伤害半径	池火灾 (m)	蒸气云爆炸 (m)
管道孔洞 泄漏	财产损失半径	50	70
	死亡半径	106	10
	重伤半径	144	30
	轻伤半径	287	59
储罐孔洞 泄漏	财产损失半径	79	95
	死亡半径	159	15
	重伤半径	214	41
	轻伤半径	420	80

半径、重伤半径、死亡半径、财产损失半径)、池火灾热辐射通量在空间的分布、蒸气云爆炸超压在空间的分布。

结 束 语

笔者在此研究分析了化工过程灾害性事故模型,建立了相应的数学模型,结合计算机技术开发了典型化工过程灾害性事故模拟分析软件系统,该软件系统可用于化工过程灾害性事故后果模拟分析,可以预演事故的发生过程及事故后果的影响范围,从而能更加形象直观地认识所评价单元或系统的危险及危害性,为设计人员、管理人员和企业、政府职能部门的高层决策者提供了客观依据,给化工企业防救灾、安全设计和企业劳动安全卫生预评价也提供了重要参考。

但系统目前还存在着模型复杂性和参数不确定性等问题。系统的进一步完善可考虑采用各种合理的方法确定参数,如用统计分析方法、构造模糊集进行确定等。此外,该软件系统是采用C/S模式构建的,在当前计算机网络技术高速发展的今天,可考虑采用面向对象技术和计算机网络技术相结合开发B/S结构模式的分布式模拟分析系统。

参 考 文 献

- 1 王三明,蒋军成,贾曦.化工过程防灾决策支持系统研究与实现.中国安全科学学报,2001;11:74~79
- 2 潘旭海,蒋军成.模拟分析方法及其在安全与环境评价中的应用.工业安全与环保,2001;27(9):27~31
- 3 王志荣,蒋军成.典型化工装置爆炸事故模式及预防研究.工业安全与环保,2002;28(1):20~24
- 4 潘旭海,蒋军成.重(特)大泄漏事故统计分析及其事故模式研究.化学工业与工程,2002;19(3):248~252
- 5 Wang Zhirong, Jiang Juncheng. Computation Methods of

- Explosion Temperature and Pressure of Combustible Gases. Progress in Safety Science and Technology, Beijing: Chemical Industry Press, 2002; 1276~1280
- 6 Daniel A Crowl, Joseph F Louvar. Chemical Process Safety Fundamentals with Application. New Jersey: Prentice Hall, 1990
- 7 Pan Xuhai, Jiang Juncheng, Wang Zhirong *et al.* Numerical Analysis of Diffusion Process of Flammable and Toxic Gases Discharging Accident. Progress in Safety Science and Technology, Beijing: Chemical Industry Press, 2000: 297~301
- 8 王三明,蒋军成,姜慧.液化石油气罐区灾害模拟分析及预防.南京化工大学学报,2001;(6):32~37
- 9 王三明.化工过程爆炸灾害模拟分析及防灾决策支持系统研究(学位论文).南京工业大学,2002
- 10 宇德明.重大危险源的评价及火灾爆炸事故严重度的若干研究(学位论文).北京理工大学,1997
- 11 潘旭海,蒋军成.化学危险性气体泄漏扩散模拟及其影响因素.南京化工大学学报,2001;23(1):19~22
- 12 潘旭海,蒋军成.危险性物质泄漏事故扩散过程模拟分析.劳动保护科学技术,2001;21(3):44~46
- 13 Pan Xuhai, Jiang Juncheng. Numerical Simulation Research on Instantaneous Release Dispersion of Heavy Gases. 2nd Asia Pacific Symposium on Safety, Kyoto, Japan, Session T7~1
- 14 王志荣,蒋军成.液化石油气罐区火灾危险性定量评价.化工进展,2002;21(8):607~610
- 15 刘智深等.C/S软件中远程过程调用的实现机制.见:软件工程进展.北京:清华大学出版社,1996
- 16 杨继平,吴华.SQL Server 2000 自学教程.北京:清华大学出版社,2000
- 17 刘滨.C++ Builder 4 高级编程实例精解.北京:国防工业出版社,2000

(收稿日期 2003-06-24 编辑 居维清)