

高斯烟羽模型扩散面积的算法研究

肖建明, 陈国华, 张瑞华

(华南理工大学工业装备与控制工程学院安全工程研究所, 广东, 广州, 510640)

摘要: 高斯烟羽模型在研究非重气云扩散方面应用越来越广泛,但是计算高斯烟羽模型扩散面积却没有特别精确有效的方法。因此对高斯烟羽模型计算扩散面积提出一种合理、科学的算法显得十分必要。本文提出了一种计算高斯烟羽模型扩散面积的算法,并介绍了该算法的理论基础和思路实现。应用该算法于工程实例中,并对结果进行验证,表明该算法方便、精确、便于应用,是计算高斯烟羽模型扩散面积的一种行之有效的算法。

关键词: 高斯烟羽模型; 扩散面积; 算法研究

中图分类号: X5; TP31

文献标识码: A

文章编号: 1001-4160(2006)06-559-564

The algorithm study for the dispersion area of Gaussian plume model

Xiao Jianming, Chen Guohua and Zhang Ruihua

(Institute of Safety Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, Guangdong, China)

Abstract: The application of Gaussian model has been becoming more and more widely on the study of the neutral gas cloud dispersion, but there is not an especial, precise and effective method for calculating the dispersion area by using Gaussian plume model. So it is necessary to put forward a reasonable and scientific algorithm for calculation the dispersion area. An algorithm for the dispersion area calculation area of Gaussian plume model is put forward in the paper. The shape of the dispersion area of Gaussian plume model is considered to ellipse in the algorithm. The length of x axis and y axis is calculated in the algorithm using iterative method. Finally, the dispersion area of Gaussian plume model is educed in the algorithm. Applicating the algorithm to the dispersion of gasoline, and then comparing the result of computer calculation to manual calculation result, it is validated that poisoning or blasting consistence lower limit and manual calculating consistence relative error range from 0.30% to 1.01%. The error can be accepted on engineering. It is shown that the algorithm is a convenient, precise, available and effective with help of the engineering and validation.

Key words: Gaussian plume model, dispersion area, algorithm study

Xiao JM, Chen GH and Zhang RH. The algorithm study for the dispersion area of Gaussian plume model. *Computers and Applied Chemistry*, 2006, 23(6):559-564.

1 引言

有毒或易燃易爆危险物质,一旦发生泄漏事故,将对周围环境和人员造成巨大危害。大量的易挥发、易燃性物质迅速释放到大气中,会形成气云并逐渐扩散。对于易燃易爆物质假如气云在尚未稀释到低于燃烧下限前被引燃,就可能发生气云爆炸或闪火,并引起大范围的破坏;对于有毒物质,在扩散范围内蒸气云团的浓度稀释至安全浓度前能引起中毒。许多国家已经发生了严重的泄漏事故,引起了中毒、火灾和爆炸。1989年美国德克萨斯石油化工厂发生的异丁烷泄漏事故,造成爆炸灾害,损失高达7.3亿美元^[1]。1997年,北京东方化工厂“6.27”事故,由于操作工在卸油时开错了阀门,将本应卸入B

罐的轻柴油错误地卸入已装满石脑油的A罐中,导致大量的石脑油冒顶溢出,并挥发成可燃性气体,遇明火引起爆炸,造成8人死亡,燃烧区域达6万多平方米的悲剧^[1]。特别是1984年12月印度博帕尔联合碳化物公司所属农药厂有毒气体泄漏造成2000多人死亡,5万人失明,20多万人被迫转移,引起世界各国的震惊^[1]。1984年11月9日发生在墨西哥城装有3000t丙烷的储罐发生爆炸(其中确认泄漏形成蒸气爆炸有4起,并由此引发连锁化学爆炸),死亡人数达100人,伤7000人^[2]。虽然人们对有害气体意外泄漏所造成的重大灾害十分重视,但缺乏足够且有效的数据进行风险评估。由于高斯烟羽模型被广泛应用于泄漏引起的中毒或爆炸后果分

收稿日期: 2005-12-10; 修回日期: 2006-02-28

基金资助: 广东省科技攻关项目(2001C32201)

作者简介: 肖建明(1981—),男,硕士,安全工程及技术专业. E-mail: jimmy-xiao@163.com

析,但是在计算高斯烟羽模型扩散面积没有特别精确有效的方法。因此对高斯烟羽模型计算扩散浓度面积提出一种合理、科学的算法显得十分必要。

应用高斯烟羽模型计算中毒或爆炸面积时,多用手工取值代入法^[3,4],这种方法虽然算法简单、编程实现容易,但在编写程序之前要预测初始取值的范围,当预测的初始值不是很合理就得不到计算结果。由此导致了这种方法计算结果不是很稳定,而且比较粗糙、不精确、随机性大,当方程有几个根就可能会出错,另外准确预测初始值的范围也是很困难。

本文以高斯烟羽模型为基础,研究计算易燃易爆和有毒气体在爆炸下限或中毒危害浓度范围内的面积,对此提出了一种计算高斯烟羽模型扩散面积的新型算法,介绍了该算法的理论基础、实现思路,给出了编制算法程序,并结合工程实例应用,通过对结果进行验证表明此种算法实现方便,计算结果准确,适合工程应用,从而为预测爆炸或中毒造成的后果提供科学依据。

2 高斯烟羽模型扩散面积的算法

2.1 算法的理论基础

气体扩散的模型有多种,其中高斯模型较为成熟,适用于中性气体的点源扩散,计算结果与实验值能较好吻合,在国内外得到广泛的应用,美国环境保护协会(EPA)所采用的许多标准都是用高斯模型为基础而制定的。高斯模型包括烟羽模型(plume model)和烟团模型(puff model),其中烟羽模型适用于连续点源的扩散,而烟团模型适用于瞬间泄漏的扩散(即对突发性瞬时泄漏或泄漏时间小于扩散时间的泄漏)^[5-7]。烟羽模型是模拟泄漏到大气中的污染物沿下风向扩散浓度分布最广泛的模型,该模型适用于蒸气扩散及液体转变为蒸气扩散。假定烟羽水平风方向和垂直方向上的污染物浓度符合高斯分布,其基本方程组如下^[8]:

$$C(x, y, z) = (q_s / 2\pi u \sigma_x \sigma_z) \exp(-y^2 / 2\sigma_y^2) \{ \exp[-(z - H_s)^2 / 2\sigma_z^2] + \exp[-(z + H_s)^2 / 2\sigma_z^2] \} \quad (1)$$

$$\sigma_x = K(z_0) a x^b \quad (2)$$

$$\sigma_y = K(z_0) 10^p x^q \quad (3)$$

$$K(z_0) = (10z_0)^{0.533x - 0.22} \quad (4)$$

$$z_0 = 0.041h \quad (5)$$

式中, C 为泄漏物质离地面某高度处的蒸气浓度, mg/m^3 ; u 为平均风速, m/s ; H_s 为泄漏源的有效

高度, m ; t 为扩散持续时间, s ; σ_x 、 σ_y 、 σ_z 为分别是 x 、 y 、 z 方向上的扩散系数, m ; x 为下风向距离, m ; y 为横风向距离, m ; z 为距地面高度, m ; z_0 为粗糙长度,是扩散表面层(地面)的特征参数, m ; h 为罐高(包括基座), m ; 参数 a 、 b 、 p 、 q 是环境影响参数,按环境稳定等级取不同的值。环境稳定等级可按风速的大小划分为A~F 6个等级,其中A级稳定性最弱,F级最稳定。 W 表示不同稳定等级所对应的取值,即当稳定等级为A时, $W=1$,稳定等级为B时, $W=2$,以此类推。通过式(6)~式(9)算出环境影响参数 a 、 b 、 p 、 q ^[8]:

$$a = 0.306 - 0.0302W \quad (6)$$

$$b = 0.940 - 0.044W \quad (7)$$

$$p = -0.097 - 0.185W \quad (8)$$

$$q = 0.89 \quad (9)$$

也可根据文献[8],选取 a 、 b 、 p 、 q 的近似值。

根据式(1)~式(9),当知道泄漏物质离地面某高度处的气体中毒或爆炸浓度下限(C)时,如果想利用式(1)求解该浓度对应的高斯烟羽模型扩散面积,就必须求出下风向距离(x)和横风向距离(y)。直接利用式(1)~式(9)求解显然不行,因为它有两个变量 x (下风向距离)和 y (横风向距离)。因此有必要探求新的求解思路。

2.2 算法的实现思路

应用高斯烟羽模型计算扩散浓度面积之前,首先要分析确定它的扩散图形形状,根据高斯烟羽模型扩散的一般规律,可以近似地把它看成为椭圆^[4](见图1)。因此求解高斯烟羽模型扩散面积之前先要求出扩散形成的云团下风向距离(x 轴)和横风向距离(y 轴)。

根据式(1)~式(9)可知,在浓度 C 表达式里只有2个未知数,下风向距离(x 轴)和横风向距离(y 轴)。中毒或爆炸浓度下限 C 为已知,只要令 $y=0$,此时,浓度 C 表达式(1)中只有直接或间接与 x 有关的未知数,这样就可以求出云团下风向距离 x 。现在问题是怎样求解云团横风向距离 y 。如果取 $x/2$ 的值代入式(1)~式(9)中求出云团横风向距离 y ,这样做存在两点不足:①要写出以云团横风向距离 y 为函数浓度 C 为自变量的表达式很困难。②即使求解出来了,这样的横风向距离太粗糙,不精确。因为云团的最高点不一定是在 $x/2$ 点处,而是可能在它附近区间内(3.2节表2中的数据证明了这一点),所以有必要探求其它的求解途径。

综合以上分析,提出如下求解思路,并通过 Del-

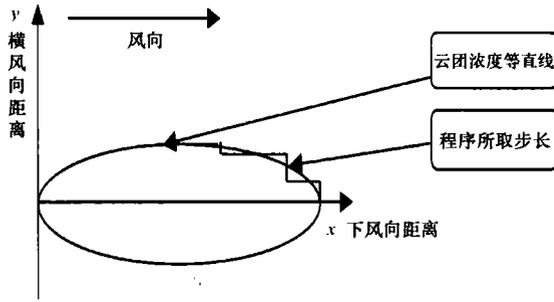


Fig. 1 The chart for selecting of program parameter value.

图1 程序取值示意图

phi 编程实现。

(1) 求解扩散形成的云团的下风向距离, 程序流程图如图 2 所示。

① 给 x 赋初值为 100 000 m (为了保证开始浓度充分小, 所以要 x 初值充分大), 令 y 为零;

② 将 x 值减一个定值 0.5 m (步长), 然后把减了定值的 x 值代入式(1), 计算此点的浓度 C ;

③ 将此点的浓度 C 与中毒或爆炸浓度下限 $C_{(临)}$ 比较, 如果前者比后者小则重复步骤②, 否则执行步骤④;

④ 将下风向距离 x 值保存, 因为这点的浓度已经达到了中毒或爆炸浓度下限;

⑤ 运行结束;

(2) 已知 x (下风向距离) 求 y (横风向距离)

由于高斯烟羽模型扩散浓度是随着下风向距离的增加而减小, 所以云团内浓度 C_1 比云团外浓度 C_2 高。由此作为判据求解步骤如下, 程序流程图如图 3, 程序取值思路图如图 1。

① 令 y 为零, 令 x 为步骤①中求出的下风向距离;

② 判断下风向距离 x 是否大于 0 (用来防止下风向距离 x 值取负数或零), 是则执行步骤③, 否则执行步骤①;

③ 将横风向距离 y 加一个定值 0.5 m (步长), 计算出这点的浓度 C_1 并令 i (循环计数值) 为零 (为了提取出横风向距离最大时下风向距离而设的一个计数值);

④ 将浓度 C_1 和中毒或爆炸浓度下限 $C_{(临)}$ 进行比较。如果前者大于后者则执行步骤③, 否则执行步骤⑤;

⑤ 判断 i (循环计数值) 是否为 0 (用来判断是否将此时的下风向距离保存到临时存放下风向距离 x_1 变量中), 是则执行步骤⑥。否则执行步骤⑦;

⑥ 将此时的下风向距离 x 保存到 x_1 (临时保存

下风向距离 x);

⑦ 判断 i (循环计数值) 是否为 10 (以循环次数是否为 10 来判断临时下风向距离是否是云团最高点的下风向距离), 是则执行步骤⑧, 否则执行步骤⑨;

⑧ 将 x_1 保存到 x_2 中 (将临时存放下风向距离 x_1 变量中的值保存到最终存放下风向距离 x_2 变量中);

⑨ 将 x 减一个定值 0.5 (步长), 计算这点的浓度 C_1 , 将 i 加 1;

⑩ 比较浓度 C_1 和中毒或爆炸浓度下限 $C_{(临)}$ 的大小, 如果前者大于后者则执行步骤②, 否则执行步骤⑤;

⑪ 将此时的 y 值保存起来;

⑫ 结束程序。

(3) 通过步骤①和步骤②中分别求解, 现在得出了下风向距离 x 和横风向距离 y 的值, 然后根据椭圆的面积公式 $S = \pi \times x \times y$ 得出中毒或爆炸浓度下限面积。

2.3 算法的软件实现

Delphi 是 Borland 公司推出的可视化开发平台, 它是一种面向对象的高级编程语言。综合 Delphi 的各种优点并以 2.1 节和 2.2 节为基础, 结合 Pascal 语言的特点编写程序流程图如图 2 图 3。

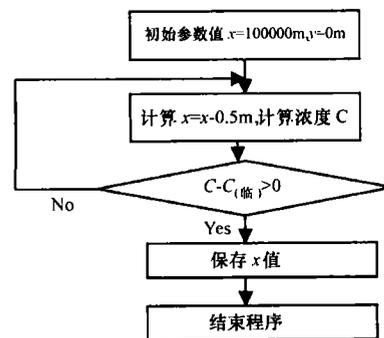
Fig. 2 Flow diagram of calculating downwind distance from source (x).图2 计算下风向距离 x 程序流程图

图 2 中 x 表示下风向距离, y 表示横风向距离, C 表示此点的浓度, $x = 100\ 000\text{ m}$ 是给 x 赋的初始值, $y = 0\text{ m}$ 是给 y 赋的初始值, 0.5 m 是程序所取的步长, 当步长取的太大计算结果误差将变大, 经后面的绝对误差和相对误差验证取 0.5 m 为步长是合理的。 $C_{(临)}$ 表示中毒或爆炸浓度下限。

图 3 中 $y = 0\text{ m}$ 表示给横风向距离变量赋初值, x 所赋的初值为图 2 所求的 x 值 (下风向距离), C_1 表示此点的浓度, 0.5 m 是程序所取的步长, 当所取

的步长过大得到的结果误差将变大,经后面的验证取 0.5 m 为步长是合理的, $C_{(临)}$ 表示中毒或爆炸浓度下限, $x > 0$ m 表示下风向距离不能取负数或零(下风向距离方向沿着风向所以只能为正数), i 是一个循环计数值, x_1 是临时存放这点的下风向距离的变量, x_2 是最终存放横风向取最大值时下风向距离的变量。

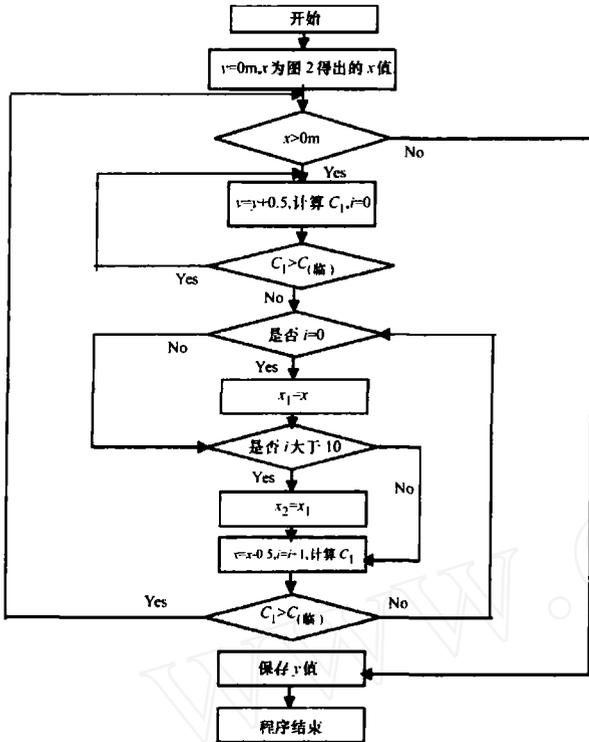


Fig. 3 Flow diagram of calculating horizontal distance from the plume centre (y).

图3 计算横风向距离 y 程序流程图

3 工程应用

3.1 程序输入参数界面和计算结果图

现在以计算汽油泄漏工程为例,应用高斯烟羽模型扩散面积的算法来计算汽油泄漏后达到爆炸极限面积和健康危害极限面积的大小,输入界面如图4。

Q_m 为蒸发速率, 63.703 kg/s; U 为平均风速, 2 m/s; H 为罐高(包底座) 12 m; H_r 为泄漏源有效高度 1.2 m; 环境稳定等级取 D 级; $C_{(爆炸浓度下限)}$ 为泄漏物质在地面的爆炸浓度下限 61 546.8 mg/m³; $C_{(健康浓度下限)}$ 为泄漏物质在地面的健康浓度下限 10 000 mg/m³。利用软件程序计算结果为(图5)。

爆炸极限下风向距离(x轴)大小为:69 m; 爆炸极限横风向距离(y半轴)大小为:19.5 m; 爆炸



Fig. 4 The figure of the interface for parameters input of model.

图4 模型参数输入界面图

面积的大小为:2 113.44 m²; 健康危害下风向距离(x轴)大小为:161 m; 健康危害横风向距离(y半轴)大小为:422 m; 健康危害面积的大小为:53 359.94 m²;

用 Delphi 自带的绘图工具^[9]画出爆炸下限和健康危害面积图形如图6。

爆炸极限下风向距离	69	m
爆炸极限横风向距离	19.5	m
爆炸极限的面积	2113.44412	m ²
健康危害下风向距离	161	m
健康危害横风向距离	422	m
健康危害面积	53359.94025	m ²

Fig. 5 The calculating result figure of gasoline consistence area.

图5 汽油浓度面积计算结果图

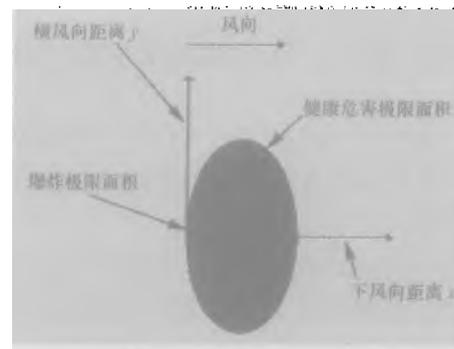


Fig. 6 The figure of gasoline dispersion consistence area.

图6 汽油扩散浓度面积图形

3.2 对比分析

以 2.1 节、2.2 节和 2.3 节为基础编制软件并结合 3.1 节输入参数试算一些数据,将下风向距离、横风向距离、横风向距离最大的点时下风向距离计算结果进行分析。除此之外将得到的下风向距离和横风向距离直接代入式(1) - 式(9)计算(手工计

算),然后分别用得到的浓度和已知的中毒或爆炸浓度下限进行比较并分析结果。

已知数据如下:蒸发速率:63.703 kg/s;平均风速:2 m/s;罐高(包底座):12 m;泄漏源有效高度:1.2 m;环境稳定等级取D级

当中毒或爆炸浓度下限已知的情況下利用软件算出的下风向距离、横风向距离和最高点时下风向距离如表1所示。

表1 下风向距离、横风向距离和最高点时下风向距离对比表

Table 1 Comparing of downwind distance from source, horizontal distance from the plume centre and downwind distance of source.

Poisoning or blasting consistence (mg/m ³)	Downwind distance from source (m)	Horizontal distance from the plume centre (m)	Downwind distance of zenith from source (m)
60 000	71	41	42
65 000	67	39	41
70 000	64	37	41
75 000	61	36	38
80 000	58	35	35
85 000	56	34	32

从表1可以得出当所取的已知浓度逐渐增大的时候,下风向距离、横风向距离和横风向距离最大点的下风向距离都逐渐增大。还可得出当取横风向距离最大的点时,下风向距离并不是在下风向距离中点上,也就是说下风向距离中点并不是横风向距离最大的点。根据表1数据可以得出横风向距离最大时下风向距离落在下风向距离中点右边。

将中毒或爆炸浓度下限和手工计算浓度进行比较,结果如表2所示

表2 中毒或爆炸浓度下限和手工计算浓度结果对比表

Table 2 Comparing between poisoning or blasting consistence lower limit and manual calculating results.

I	II	III	IV	V	VI	VII
60 000	60 254.1	254.1	0.42%	60 228.7	228.0	0.37%
65 000	65 456.2	456.2	0.69%	65 669.3	669.0	1.01%
70 000	70 275.7	275.7	0.39%	70 484.3	484.3	0.68%
75 000	75 443.8	443.8	0.58%	75 518.2	518.2	0.68%
80 000	80 243.5	243.5	0.30%	80 434.2	434.2	0.53%
85 000	85 567.8	567.8	0.66%	85 290.2	290.2	0.34%

说明: I:中毒或爆炸下限浓度(mg/m³), II:下风向距离最大点浓度(手工计算结果)(mg/m³), III:中毒或爆炸浓度与下风向距离最大浓度误差绝对值(mg/m³), IV:中毒或爆炸浓度与下风向距离最大点浓度误差相对值, V:横风向距离最大点浓度(手工计算结果)(mg/m³), VI:中毒或爆炸浓度下限和横风向距离最大点浓度误差绝对值(mg/m³), VII:中毒或爆炸浓度下限和横风向距离最大点浓度误差相对值。

通过表2可以得出中毒或爆炸浓度下限和手工计算所求浓度还是存在误差,对误差数值进行分析,

计算得出它的误差相对值范围为0.30%~1.01%,可以认为这种算法的误差工程上是可以接受的。

4 结论

本文提出了一种计算高斯烟羽模型扩散面积的算法,介绍了该算法的理论基础、实现思路,给出了编制算法的程序,并结合工程实例应用,通过对结果进行验证表明此种算法实现方便,计算结果准确,适合工程应用。利用该算法大大提高了高斯烟羽模型在工程应用中计算扩散浓度面积的速度和精度,有效地解决了计算易燃易爆和有毒气体在中毒或爆炸浓度下限危害浓度范围内面积的问题,从而为预测中毒或爆炸造成后果提供准确有效的数据,大大缩短灾害后果评估时间、提高灾害后果评估精度,对预防、减少人员伤亡和财产损失产生了积极影响。该算法只适用高斯烟羽模型,其它高斯模型扩散浓度面积的算法有待进一步研究。

符号说明

- C 物质离地面某高度处的蒸气浓度,mg/m³;
- u 平均风速,m/s;
- H₁ 泄漏源的有效高度,m;
- t 扩散持续时间,s;
- σ_x x方向上的扩散系数,m;
- σ_y y方向上的扩散系数,m;
- σ_z z方向上扩散系数,m;
- x 下风向距离,m;
- y 横风向距离,m;
- z 距地面高度,m;
- Z₀ 粗糙长度,扩散表面层(地面)特征参数,m;
- h 罐高(包括基座),m;
- a,b,p,q 环境影响参数(按环境稳定等级取不同的值);
- A,B,C,D,E,F 环境稳定等级;
- W 不同稳定等级所对应的取值;
- y 横风向距离;
- x 下风向距离;
- C_(临) 中毒或爆炸浓度下限;
- C_i 此点的中毒或爆炸浓度;
- i 循环计数值;
- x₁ 临时存放这点的下风向距离的变量;
- x₂ 最终存放这点的下风向距离变量;
- S 中毒或爆炸浓度下限面积;
- Q_m 蒸发速率;
- U 平均风速;
- H 罐高(包底座);

- H , 泄漏源有效高度;
 $C_{(爆炸浓度下限)}$ 泄漏物质在地面爆炸浓度下限;
 $C_{(健康浓度下限)}$ 泄漏物质在地面健康浓度下限。

References

- Pan Xuhai, Jiang Chengjun. The simulation analysis of dispersion process for dangerous substance leak accident. *Labor Protection Science Technology*, 2001, (3):44-46.
- Wang Mingzheng. Liquefy petrol gas tank fire and its prevention. *Safety*, 1991, (3):47-48.
- Rao Guoning, Chen Wanghua, Hu Yiting, Peng Jinhua and Liu Ronghai. The study of dangerous quantitative analysis for liquefy ammonia Gas Leak. *Journal Of Safety And Environment*, 2004, 4:165-167.
- Zhang Ruihua and Chen Guohua, et al. The applied study of the quantitative simulation evaluation for dangerous degree of the oil tank leaking dispersion process. *OGST*, 2004, 23(10):4-7.
- Pan Xuhai and Jiang Juncheng. Simulated evaluation method and its application in safety and environment assessment. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2001, 27(9):27-31.
- Pan Xuhai and Jiang Juncheng. Research on discharging dispersion of chemical dangerous gases and its influence factor. *Journal of Nanjing University Of Chemical Technology*, 2001, 23(1):19-22.
- Ding Xinwei, Wang Shulan, Xu Guoqing. An review of studies on the discharging dispersion of flammable and toxic gases. *Chemical Industry And Engineering*, 1999, 16(2):118-12.
- Spijkerboer HP, Beniers JE and Jaspers D, et al. Ability of the gaussian plume model to predict and describe spore dispersal over a potato crop. *Ecological Modeling*, 2002, 155(1):1-18.
- Chen Yanhuang. Delphi6 Quite Study. Beijing: China Railroad Publishing Company, 2002,(2).

附中文参考文献

- 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, (3):44-46.
- 王铭珍. 液化石油气储罐火灾及其预防. *安全*, 1991, (3):47-48.
- 饶国宁, 陈网桦, 胡毅亭, 彭金华, 刘荣海. 液氨泄漏事故危险性的定量分析研究. *安全与环境学报*, 2004, 4(sup):165-167.
- 张瑞华, 陈国华, 张文海, 潘游, 颜伟文, 陈清光. 油库储罐泄漏危险程度定量模拟评价应用研究. *油气储运*, 2004, 23(10):4-7.
- 潘旭海, 蒋军成. 模拟评价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.
- 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.
- 丁信伟, 王淑兰, 徐国庆. 可燃及毒性气体泄漏扩散研究综述. *化学工业与工程*, 1999, 16(2):118-122.
- (美) H. P 斯皮可博尔, J. E. 博尼尔, D. 简斯珀. 高斯烟羽模型在预测和描绘马铃薯农作物孢子分布情况的应用研究. *生态学建模*, 2002, 155(1):1-18.
- 陈灿煌. Delphi 6 彻底研究. 北京:中国铁道出版社, 2002,(2).