

文章编号:1001-5078(2007)07-0637-04

基于高斯扩散模式的污染气体云团红外光谱实时仿真

熊 伟,方勇华

(中国科学院安徽光学精密机械研究所,安徽 合肥 230031)

摘 要:建立了基于高斯扩散模式的污染气体云团光谱实时仿真的方法,通过这种方法进行了实时仿真,并与实测数据进行了比较。研究了高斯扩散模式和均匀分布模式两种模型,并对基于两种模型的仿真光谱进行了比较,指出了均匀分布模式的不足。文中建立的污染气体云团光谱实时仿真方法对污染气体泄漏的识别判断有着很重要的意义。

关键词:红外光谱;高斯扩散模式;污染气体;实时仿真

中图分类号:X502;TP391.9

文献标识码:A

Pollutant Gas Cloud Spectrum Real-time Simulation Based on Gauss Dispersion Mode

XIONG Wei, FANG Yong-hua

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Researching pollutant gas cloud infrared spectrum simulation, and using simulate spectra to research how to recognize pollutant gas, were current common technique, but the real-time simulation had not been developed yet. In the article a method of pollutant gas cloud spectrum real-time simulation based on Gauss diffusion mode was founded. With this method, the real-time simulation was processed. The simulated spectra were compared with the measured data, which got good results. Gauss diffusion mode was compared with equality mode, pointed the disadvantage of equality mode. The method of pollutant gas cloud spectrum real-time simulation was very important to the recognition of the pollutant gas leakage.

Key words: infrared spectrum; Gauss diffusion mode; pollutant gas, real-time simulation

1 引 言

近年来,由于各种原因泄漏的污染气体对人类生活环境的严重破坏越来越引起环境保护及其他有关部门的重视。对污染气体进行防治,首先面临的问题就是如何识别污染气体云团是否存在。这一领域的主流技术,即采用被动红外探测方式进行测量、并运用统计模式识别技术进行污染气体的识别,现在已经取得了很大的进展^[1-4]。但另一方面,统计模式识别技术的运用要求有大量实测的污染气体云团红外光谱以及各种背景、干扰物红外光谱作为训练的基础,这给这项技术的推广增加了难度,因为仅仅通过若干次的开放场测试很难获得在各种条件下的污染气体云团红外光谱,而由于污染气体的危害

性,也不可能进行大量的开放场试验。目前较为常用的方法是通过红外光谱仿真技术来生成大量的污染气体云团仿真光谱,利用仿真光谱来进行污染气体识别的研究^[5]。

在传统的仿真中,假设污染气体云团是均匀分布的,如需实时仿真,对每一时刻都必须设定参数。而实际上,云团有其本身的扩散规律,如果对污染气体扩散规律进行深入研究,可以在设定初始条件的情况下,就可以得到随时间和空间的分布规律。根

作者简介:熊 伟(1975-),男,现为中科院安徽光机所研究生,主要从事傅里叶变换红外遥感探测研究。E-mail:wxiong@aiofm.ac.cn

收稿日期:2006-12-12

据污染气体云团扩散的实际情况,云团分布采用高斯扩散模式是比较合适的^[6-8]。本文的目的是研究基于高斯扩散模式的污染气体云团红外光谱实时仿真,并与实测结果进行验证,同时比较分析采用高斯模式与均匀分布模式的仿真光谱的差异。

2 理论模型

2.1 基于高斯瞬时点源扩散模式的云团扩散模型

高斯扩散模式一般适用于较小尺度的扩散问题。而污染气体的扩散大多在几百米至几公里之间,高斯扩散模式可以适用。

如果污染气体云团的产生是由一次事故诸如管道的短时泄漏产生的,那么我们就可以把扩散过程近似看成是一个瞬时点源扩散问题,可以采用高斯瞬时点源扩散模式来模拟污染气体扩散的过程。

首先我们要进行坐标系的定义。从红外探测的角度考虑这个问题,很容易将红外光谱辐射计的视场中轴线设为 y 轴,而与 y 轴垂直的水平方向设为 x 轴,垂直于地面的方向设为 z 轴。对于坐标原点的选择,考虑以后计算的方便,应该选择为 y 轴与泄漏发生点所在的视场平面的交叉点。坐标系的情况如图1所示。

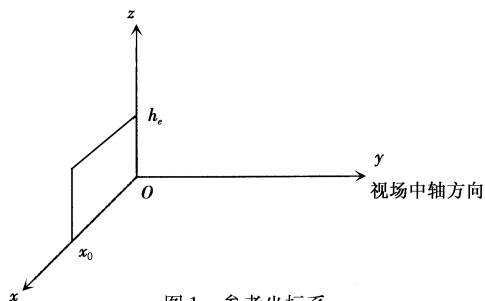


图1 参考坐标系

Fig. 1 the reference frame

假设风是水平方向的,分为 x 轴和 y 轴两个分量,可以得到采用高斯瞬时点源扩散模式的云团浓度:

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - x_0 - \int_0^t u_x(t) dt)^2}{\sigma_x^2(t)} + \frac{y^2}{\sigma_y^2(t)} \right) \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(z - h_e)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right] + \exp \left[-\frac{(z + h_e)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right] \right\} \quad (1)$$

式中, x_0 为泄漏点在 x 方向的投影; h_e 为泄漏点到地面的高度。

如果能够确定扩散系数 $\sigma_x(t)$, $\sigma_y(t)$, $\sigma_z(t)$, 我们就能容易地进行云团扩散的仿真。我们假设在某个方向上扩散系数随时间的变化速率与浓度梯度

成正比。为简化起见,设 $x_0 = 0$, $u_x(t) = 0$, 只考虑 x 方向的扩散, $\sigma_x(t)$ 随时间的变化率与 $x = \sigma_x(t)$ 处的浓度梯度成正比:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial t} \propto \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=\sigma_x} \quad (2)$$

$$\text{而 } \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{Q}{(2\pi)^{1/2} \sigma_x} \exp \left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2} \right) \cdot \left(-\frac{x}{\sigma_x^2} \right) \quad (3)$$

我们可得到下面的方程:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial t} = \frac{K}{\sigma_x^2} \quad (4)$$

式中, K 为任意常数。解此方程,可以得到:

$$\sigma_x^3 = at + b \quad (5)$$

其中, a 和 b 为常数。有足够的理由认为 y 方向与 x 方向完全相同:

$$\sigma_y^3 = at + b \quad (6)$$

对 z 方向,如果我们假设 $h_e = 0$, 且不考虑重力影响(认为污染气体与空气密度基本相等),也能够得到同样的结论:

$$\sigma_z^3 = a_z t + b_z \quad (7)$$

其中, a_z 和 b_z 为常数,考虑到垂直方向与水平方向的差异,可能与 a 和 b 不相等。

得到了各个方向上扩散参数随时间变化的规律值后,我们只需要对一些常数项进行设置,就可以完整地模拟毒剂云团的扩散,得知每一时刻空间各点的浓度分布。进而得到整个视场平面的浓度程长积分分布 $cl(x, z, t)$ (污染气体云团的浓度程长积,即在视场轴方向上污染气体云团的浓度与污染气体云团的厚度的乘积,下同)。

对于 $cl(x, z, t)$ 分布,实际上相当于云团浓度分布在视场中轴线即 y 方向上的积分:

$$cl(x, z, t) = \frac{Q}{2\pi \sigma_x \sigma_z} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{(x - x_0 - \int_0^t u_x(t) dt)^2}{\sigma_x^2(t)} \right) \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(z - h_e)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right] + \exp \left[-\frac{(z + h_e)^2}{2\sigma_z^2(t)} \right] \right\} \quad (8)$$

2.2 基于高斯瞬时点源扩散模式的云团光谱实时仿真

在整个视场平面中,每一点都对最终入射到探测器的辐射量有一份贡献。可以认为对于视场平面 S_0 上的某一个面元 ΔS 来说,若其最终入射到的探测器上的辐亮度为 L , 该面元对入射到探测器上的平均辐亮度的贡献为 $L \cdot \Delta S / S_0$ 。

对于某一污染气体,假定已知视场平面内的 cl

值分布,那么探测器接收到的来自某一点对平均辐射亮度的贡献为:

$$\Delta L(\nu) = \frac{\Delta S}{S_0} [1 - \tau_a(\nu)] B(T_a, \nu) + \frac{\Delta S}{S_0} \{ [1 - \tau_t(\nu)] \tau_a(\nu) B(T_a, \nu) + \tau_t(\nu) \tau_a(\nu) L_b(\nu) \} \quad (9)$$

式中, $L_b(\nu)$ 为在污染气体云团之前的光谱辐射亮度 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{cm}^{-1}$); $\tau_a(\nu)$ 为云团到探测器之间的大气透过率; T_a 为云团到探测器之间的大气温度 (K); $B(T_a, \nu)$ 为在 T_a 温度下的黑体光谱辐射亮度 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{Sr} \cdot \text{cm}^{-1}$); $\tau(\nu)$ 为云团在 (x, z) 点的透过率, 有:

$$\tau_t(\nu) = \ell^{-\alpha(\nu)cl(x, z)} \quad (10)$$

可以计算出视场平面每一点对差谱的贡献:

$$\Delta [L(\nu) - L_0(\nu)] = \frac{\Delta S}{S_0} [1 - \ell^{-\alpha(\nu)cl(x, z)}] \cdot [B(T_a, \nu) - L_0(\nu)] \quad (11)$$

只要计算视场平面每一点对差谱贡献的积分, 就能得到基于高斯扩散模式的云团仿真光谱。

$$L(\nu) - L_0(\nu) = \frac{1}{S_0} \cdot \iint_{S_0} [1 - \ell^{-\alpha(\nu)cl(x, z)}] [B(T_a, \nu) - L_0(\nu)] dx dz \quad (12)$$

如果再加上时间变量, 就得到光谱的实时仿真:

$$L(\nu, t) - L_0(\nu) = \frac{1}{S_0} \cdot \iint_{S_0} [1 - \ell^{-\alpha(\nu)cl(x, z, t)}] [B(T_a, \nu) - L_0(\nu)] dx dz \quad (13)$$

2.3 均匀分布模式的云团光谱仿真

均匀分布模式的云团光谱仿真可以看作是高斯扩散模式的云团光谱仿真的特例情况。即在视场平面内, 每一点的 cl 值均为整个视场平面内的平均值 $\bar{cl}$, 按照式 (13), 就得到:

$$L(\nu, t) - L_0(\nu) = [1 - \ell^{-\alpha(\nu)\bar{cl}}] [B(T_a, \nu) - L_0(\nu)] \quad (14)$$

3 结果与分析

3.1 基于高斯模式的云团 cl 分布

图 2 显示了云团某一时刻 cl 分布的仿真结果, 由图可以看出, 按照正态分布模型, 云团在整个视场平面内的 cl 值分布是不均匀的。在云团的中心点 ($x = 10\text{m}, z = 5\text{m}$), 云团的 cl 值接近 $1000\text{mg}/\text{m}^2$, 而在视场边缘处, cl 值只能达到 $10\text{mg}/\text{m}^2$ 甚至更小,

在视场边缘处和泄漏源处, cl 值的差异很大。

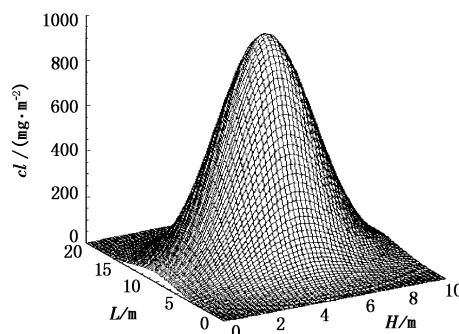


Fig. 2 the cl distribution of a cloud

3.2 光谱实时仿真与实验验证

为验证这一方法的正确性与可行性, 我们利用德国布鲁克公司的 VECTOR33 型红外光谱仪测量了一组氨气的扩散光谱与仿真光谱进行了对比。实验中以砖墙为背景, 光谱仪与砖墙之间的距离为 100m , 喷洒点距墙 20m 。氨气采用高压喷洒装置在仪器与砖墙之间喷洒 3s 约 50mL 氨水分析纯, 这一过程可近似看作是瞬时点源扩散。为简便起见, 实验在无风的条件下进行。

图 3 给出了实际测量中得到的氨气信号由小到大再随着氨气云团消散导致信号逐渐变小的过程以及根据高斯瞬时扩散模型仿真计算的光谱。为得到和实测信号接近的仿真光谱, 可以通过调节仿真计算中的几个相关参数来实现^[9]。

可以看出仿真结果与实测数据有着较高的符合程度, 特别是在特征峰位置吻合得很好。这说明利用高斯扩散模型, 进行适当的参数设置, 所得到的浓度及 cl 值分布与实际情况是基本一致的, 也证明了基于高斯扩散模式的污染气体云团光谱实时仿真方法是完全可以进行较为精细的实时仿真的。

3.3 高斯模式与均匀分布模式仿真光谱比较

与高斯扩散模式类似, 根据均匀扩散模式, 利用式 (14) 可以计算出给定温差、目标云团 cl 值条件下的仿真光谱。图 4 显示了给定相同参数 (温差、 cl 值) 条件下, 利用两种不同模型计算出的 DMMP 仿真光谱。

从图 4 可以看出, 两者在非特征峰位置几乎完全一致。但是在特征峰位置, 有着非常大的差异。按均匀分布模式做出的仿真谱, 其特征峰幅值比按照高斯模式做出的仿真谱要大得多。出现这种情况的原因是: 在均匀分布模式中, cl 值不大, 未达到饱和, 透过率与 cl 值之间近似是一种线性关系; 而在高斯模式中, 局部的 cl 值较大, 已经接近吸收饱和, 此时透过率与 cl 值之间无法保持近似的线性关系,

就好像损失了一部分 cl 值,因此导致特征峰缩小。显然,采用高斯模式的仿真更接近于实际情况。

光谱实时仿真的方法,通过这种方法进行了实时仿真,并与实测数据进行了比较,达到了良好的效果。

研究了高斯扩散模式和均匀分布模式仿真光谱之间的比较,指出了均匀分布模式的不足。本文建立的污染气体云团光谱实时仿真方法对污染气体泄漏的识别判断有着很重要的意义。

参考文献:

- [1] Andreas Beil, Rainer Daum. Remote sensing of atmospheric pollution by passive FT-IR spectrometry [J]. SPIE 1998, 3493: 32-43.
- [2] Spankuch D, Guldner J, Schulz E. Estimation of the amount of tropospheric ozone in a cloudy sky by ground-based Fourier transform infrared emission spectroscopy. Appl. Opt., 1998;37:3133-3142.
- [3] Love S P, Goff F, Schmidt S C, et al. Passive infrared spectroscopic remote sensing of volcanic gases: ground-based studies at White Island and Ruapehu, New Zealand, and Popocatepetl, Mexico. Geophys Monogr, 2000, 116: 117-138.
- [4] 熊伟, 方勇华, 等. 变化背景下的污染气体遥感探测[J]. 激光与红外, 2006, 36(5): 361-364.
- [5] Larry Grim, Thomas C Gruber, Jr. Generation of synthetic remote FTIR interferograms[C]. SPIE, 1995, 2366: 224-232.
- [6] The Beijing Environment Protection Science Researching Institute. The booklet of atmosphere pollution prevention [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1987: 401-423. (in Chinese)
- [7] The National Environment Protection Bureau, The Chinese Environment Science Researching Institute. The booklet of the control method of city atmosphere pollution gross [M]. Beijing: The Chinese Environment Science Press, 1991: 171-182. (in Chinese)
- [8] Jiang WeiMei. Air pollution meteorology [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2003, 52-85. (in Chinese)
- [9] Huang Ye, Fang Yonghua, et al. Simulation for infrared spectra of pollutant gas and parameters setting[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(6): 61-64. (in Chinese)

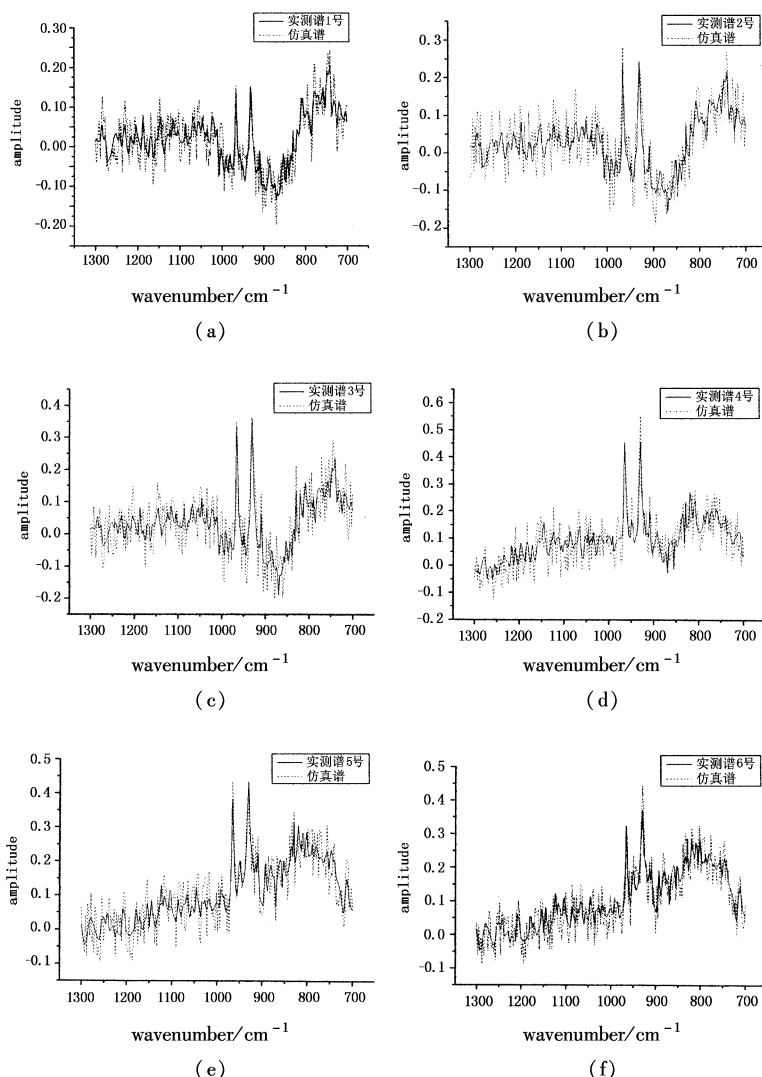


Fig.3 the comparison between the simulated spectra and the measured spectra and equality mode

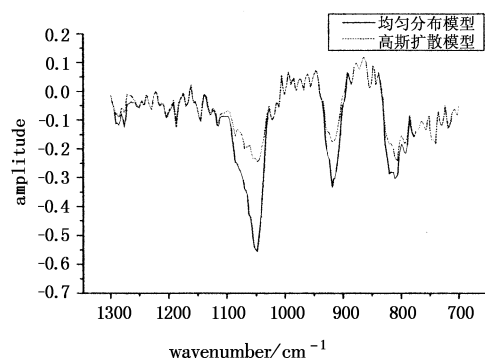


Fig.4 the comparison of the simulate spectrum with gauss mode

4 结 语

本文建立了基于高斯扩散模式的污染气体云团