

CNIC-01435
CIRP-0030

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGY REPORT

连云港核电厂 SF_6 示踪实验研究

STUDY ON SF_6 TRACE EXPERIMENT IN
LIANYUNGANG NUCLEAR POWER PLANT
(In Chinese)



中国核情报中心
原子能出版社

China Nuclear Information Centre
Atomic Energy Press

图书在版编目 (CIP) 数据

中国核科技报告 CNIC-01435, CIRP-0030: 连云港核电厂 SF₆ 示踪实验研究/胡二邦等著. —北京: 原子能出版社, 2000.1

ISBN 7-5022-2132-8

I. 中... II. 胡... III. 核技术-研究报告-中国 IV. TL-2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 73398 号

©原子能出版社, 1999

原子能出版社出版发行

责任编辑: 李曼莉

社址: 北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码: 100037

中国核科技报告编辑部排版

核科学技术情报研究所印刷

开本 787×1092 mm 1/16 印张 2 字数 49 千字

2000 年 1 月北京第一版 2000 年 1 月北京第一次印刷

印数: 1—150

定价: 5.00 元



胡二邦：研究员，中国辐射防护研究院环境科学所所长。中国环境评价学会常务副主任，中国大气环境学会副主任，中国环境评价学会环境风险专业委员会主任，国家环保局核环境专家技术委员会成员。享受政府特殊津贴，被授予部级“有突出贡献的中青年专家”称号。作为主持人完成的科研项目中，获国家级科技进步三等奖一项，部级二等奖三项，部级三等奖三项，在国内外杂志及学术会议上发表论文 70 余篇，1964 年毕业于清华大学工程物理系。

Hu Erbang: Professor, director of Environmental Science Institute, China Institute for Radiation Protection; executive deputy president of Chinese Association for Environment Assessment (CAEA); deputy president of Chinese Association for Atmospheric Environment (CAAE); director of Speciality Committee of Environment Risk, CAEA; Member of Specialist Committee for Nuclear Environment, NEPA. Enjoy special government allowance and being granted the Ministry-level Outstanding Young and Middle-aged Specialist, CNNC. Win some prizes for progress of science and technology of third class at national-level, second and third class at ministry-level respectively in these research projects which he took charge of. More than 70 papers were published in international or domestic journals and symposiums. Graduated from Department of Engineering Physics, Tsinghua University in 1964.

连云港核电厂 SF_6 示踪实验研究

胡二邦 闫江雨 张永义 温联中
(中国辐射防护研究院, 山西太原, 030006)

摘 要

描述了 1997 年 8 月在连云港核电厂厂址复杂地形上为求取复杂地形烟羽轨迹和扩散参数而成功进行的 10 次 SF_6 示踪实验。 SF_6 从 100 m 高气象铁塔顶部释放; 取样点采用居民区面源与可能的弧线布点相结合的方法; 每次采取约 50 个样品; 分析采用气相色谱-电子捕获检测 (GC-ECD) 方法; 天气分类若按 P-G 方法, C, D 类天气各 5 次, 若按 $\Delta T-U$ 方法分类, 10 次全为 D 类天气; 采用最小二乘法求解每次示踪实验的扩散参数; 并对取样时间对扩散参数的影响作了实验测定。

Study on SF₆ Trace Experiment in Lianyungang Nuclear Power Plant

(In Chinese)

HU Erbang YAN Jiangyu ZHANG Yongyi WEN Lianzhong
(China Institute for Radiation Protection, Taiyuan, Shanxi, 030006)

ABSTRACT

10 times SF₆ trace experiments were successfully performed in August 1997 on a very complex terrain of Lianyungang Nuclear Power Plant in order to obtain plume trajectory and diffusion parameters. SF₆ is released from the top of a tower of 100 m. The sample points are arranged not only on the sample lines but also on the areas near residences. About 50 samples are obtained in each SF₆ trace experiment. The samples of SF₆ are analysed by the GC-ECD method. The weather stability is 5 times C and D stabilities respectively if using P-G method or 10 times D stabilities if using $\Delta T-U$ method. A least-square method is adopted to obtain the diffusion parameters from diffusion equation. Meanwhile the effect on the diffusion parameters from sampling time is measured based on the above SF₆ trace experiments.

概 述

为了求得连云港核电厂厂址复杂地形的扩散参数,项目组决定采用 SF_6 示踪试验方法,在经过三个多月的前期准备后,于 1997 年 8 月 4 日进入现场,开始了现场准备工作。成立了 SF_6 现场实验指挥部,下设 SF_6 释放组、采样组、样品分析组、通讯联络组、气象数据组、交通组,总人员约 90 人。为保证取样的及时、准确,特请解放军官兵担任取样任务。1997 年 8 月 7、8 日对全体人员进行有关取样及仪器操作的培训,9、10 两日进行布点,11 日进行全面的质量检验,12 日至 18 日抢在台风来临之前连续进行了 10 次示踪实验,获得了较满意的结果。

1 SF_6 示踪实验概况

1.1 布点方案

连云港镇山丘众多,地形起伏不定(见图 1)。后云台山横亘于镇中央,最高海拔在 600 m 以上,东西最长约 11~12 km,南北最宽约 6~7 km,其它小山丘海拔也多在 250 m 以上。

考虑到辐射防护主要是保护周围的居民,故决定采用居民区面源布点与可能的弧线布点相结合,最终采用最小二乘法求解扩散参数的方案。具体作法如下:

首先确定关心区域,然后划分采样区,进行分区布点。分区情况如下:扒山头至人板桥闸与宿城水库间的山谷划分为 A 区,主要关心宿城乡的浓度分布和主导风向向下风向的近距离扩散因子;黄崖经白果树、云山乡至平山的公路划为 B 区,主要关注云山乡;杨沟经济开发区、平山、连云区至陶庵办事处的环山公路设为 C 区;连云港车站附近区域划分为 D 区,关心污染源对车站居民点的影响;E 区设在高公岛乡,主要监测海陆交界面的污染物扩散情况;西大堤至东西连岛设为 F 区,关心旅游区及东西连岛的浓度分布;同时在后云台山布设一个 G 区,观测污染物越山扩散的情况。由图 1 可以看出,释放点东面的大面积海域,不适合布点采样,也不属关心区域,因此不布设采样点。

其次根据离源的远近及采样条件确定采样点数目和具体位置。A 区:在宿城乡布设了 $A_1 \sim A_5$ 五个采样点, $A_6 \sim A_9$ 设在宿城至大板桥闸的公路上, $A_{10} \sim A_{16}$ 设在船山及原农科站附近,扒山头上在实验前布设了 $A_{17} \sim A_{22}$ 七个采样点。B 区在实验前布设了 $B_1 \sim B_6$ 六个采样点。C 区一共布置了 $C_1 \sim C_{15}$ 15 个点,两点间约相隔 500~800 m。D 区有 $D_1 \sim D_9$ 九个采样点。E 区布设了 $E_1 \sim E_7$ 七个采样点。F 区有 $F_1 \sim F_9$ 共九个采样点。G 区由于条件所限只布设了 $G_1 \sim G_4$ 四个采样点。

在实验中根据实际情况对采样点布点方案作了修正。1997 年 8 月 12 日首次实验后,由于扒山头上的 A_{17} 点设在两面均有较高山岩的中间,为了考察山岩对 SF_6 扩散的影响即将 A_{17} 点等距离划分为 $A_{17a} \sim A_{17c}$ 三个采样点。8 月 14 日(6:00~6:45)实验后,为考察 NE, ENE 风向对扩散实验的影响,在扒山头增设了 $A_{23} \sim A_{25}$ 三个点,其次扩大了 B 区的范围,在杨沟至小板桥公路上增设 $B_7 \sim B_{14}$ 八个采样点,同时在大板桥闸至烧香河闸紧急布置了八个采样点,由于采样人员为原 $C_8 \sim C_{15}$ 采样人员,故编号为 $C_8' \sim C_{15}'$ 。 A_{10} 点由于处于山凹中,实验中未采用。

采样点布置情况及具体位置见图 1。

1.2 释放

释放是在 100 m 高的气象铁塔 90 m 高塔台上进行的, 用人工方法把大约含 50 kg SF_6 的钢瓶吊到 90 m 塔台, 然后调节流量以符合均匀释放条件。每次释放时间大约在 40 分钟至 1 小时, 释放总量通过释放前后的钢瓶称重确定。表 1 给出每次释放的日期、持续时间及释放量, 同时还给出了实验期间 100 m 高度上的实测风速、风向及分别由 $\Delta T-U$ 方法及 P-G 方法获得的天气稳定度类型。

1.3 采样

由于采样人员有限(大约 50 名), 不可能所有布设的采样点同时采样。实验中只能根据每次实验的风向确定具体的采样点和采样人员。各次实验具体的采样点见表 2。

在实验中虽然租用了 35 台对讲机, 但由于地形条件限制, 大部分采样区不能利用对讲机通讯, 因此, 只能根据每次释放前 10~20 min 内的铁塔风速数据估算出各采样点的开始采样时间, 并以最快速度分发给采样人员。

每次释放采样三或四次, 采样 10 min, 两次采样间间隔 5 min。1997 年 8 月 12 日、8 月 13 日每次释放采样四次, 8 月 13 日以后每次释放采样三次。

1.4 样品分析

分析采用气相色谱-电子捕获检测(GC-ECD)方法。仪器为日本岛津气相色谱仪 GC-7A, 配有岛津 C-E1B 微处理器及岛津 R-112 记录仪各一台。分析方法的最低定量限为 5×10^{-11} mol/mol ($\text{SF}_6/\text{空气}$), 标准曲线线性范围为 $5 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-8}$ mol/mol ($\text{SF}_6/\text{空气}$), 样品测定结果均落在线性范围以内。受气象条件和 SF_6 释放影响, 实验室周围环境 SF_6 本底波动较大。1997 年 8 月 12 日 9 时、13 日 8 时、14 日 6 时的样品分别以实验室周围空气中 SF_6 本底作为空白值, 从样品实测值中扣除。从 14 日下午 18 时的实验开始, 为了充分了解 SF_6 的累积情况, 在所有的采样点中选择性地选取一些点(如 8 月 15 日为 $B_3, C_2, C_6, A_1, A_8, A_{14}$)在每次释放前 10~15 min 内采集本底样品, 以采样点本底样品的平均值作为空白值从样品实测值中扣除。分析采用的标准气为国家一级标准物质 GBW-279, 所用的仪器经过北京市计量检测所检定。

2 实验结果与初步分析

2.1 扩散因子及烟羽轨迹

扩散因子定义为释放每单位活性气载核素在下风向某处造成的气载核素浓度, 量纲为 $\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$ 。根据定义, 示踪实验给出的扩散因子 $(C/Q)_{i,j}(x, y, 0)$ 可由下式估算:

$$(C/Q)_{i,j}(x, y, 0) = \frac{C_{i,j}(x, y, 0)}{Q_i} \quad (1)$$

式中 $(C/Q)_{i,j}(x, y, 0)$ 表示第 i 次示踪实验中某取样位置 $(x, y, 0)$ 相应于第 j 次采样的扩散因子 ($\text{s} \cdot \text{m}^{-3}$); $C_{i,j}(x, y, 0)$ 表示第 i 次示踪实验中, 某取样点 $(x, y, 0)$ 第 j 次采样的 SF_6 实测浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); Q_i 表示第 i 次示踪实验中 SF_6 的释放速率即源强 ($\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$)。表 3 给出全部实验中各采样点的扩散因子的最大值、平均值、标准差及样本数。

计算结果表明：①各采样点扩散因子最大值的分布范围为 $2.57 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ 即 $2.6 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ ；而扩散因子平均值的分布范围为 $5.16 \times 10^{-6} \sim 0.4 \times 10^{-7} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ 即 $5.16 \times 10^{-6} \sim 4.0 \times 10^{-8} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ ；分布范围跨度分别约为 3 个数量级和 2 个数量级。②扩散因子的最大值 $2.57 \times 10^{-5} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ 出现在第四次示踪实验 1997 年 8 月 14 日 18:20~19:25) A_{18} 采样点的第一次采样样品， A_{18} 位于铁塔 WSW 方向约 1 km 处，当时的风向为 ENE，风速为 6.20 m/s，天气类型为 D 类。对于 100 m 的释放高度，大体上可以推断 A_{18} 点的位置在最大落地浓度点附近，其值基本上反应了最大落地浓度。③最大平均扩散因子出现在刮 ENE 风时。④在仅有的一次刮 SE 风的实验中(8 月 16 日 17:00~17:52)，发现含 SF_6 的气流明显地越过后云台山山顶的 G_2 ， G_3 ， G_4 各采样点，到达连云港镇的 D_1 ， D_2 ， D_3 和更远的位于西大堤的 F_1 ， F_2 各采样点，部分气流下洗到达 D_{10} 采样点。 G_2 ， G_3 ， G_4 各点的最大扩散因子分别为 2.99×10^{-6} ， 2.84×10^{-6} 和 $2.22 \times 10^{-6} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ ，位于连云港镇的 D_1 ， D_2 ， D_3 各点的最大扩散因子分别为 2.71×10^{-7} ， 1.15×10^{-6} 和 $3.16 \times 10^{-7} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这表明，在刮偏南风的情况下，在考虑位于山顶和连云港镇居民的安全时，最大扩散因子至少应分别不低于 $2.99 \times 10^{-6} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.15 \times 10^{-6} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ 。⑤实验中发现在特殊天气条件下 SF_6 烟羽有明显下洗现象发生。在 8 月 18 日(9:20~10:03)的示踪实验中，发现 A_{13} ， A_{14} 和 A_{17} 二采样点的扩散因子大大高于周围各点的扩散因子，它们的值分别为 1.58×10^{-5} ， 1.30×10^{-5} 和 $1.06 \times 10^{-5} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ 。这表明含 SF_6 烟羽在越过扒山头峰顶处的 A_{17} 点后立即向位于山脚下的 A_{13} ， A_{14} 位置下洗。因此不能用通常的高斯烟羽公式拟合。下洗现象的发生表明对船山风景区的居民有可能造成较大的危害，故在事故应急中应考虑下洗的影响。⑥实验中也发现 SF_6 烟羽的绕流现象。在 8 月 12 日(9:00~9:55)和 8 月 16 日(8:00~8:40)两次示踪实验中都出现了 SF_6 中的一部分基本上沿风向迁移，一部分烟羽则贴着山脚向西绕流，因而出现宿城乡几个采样点出现较高的扩散因子。⑦对于最为关注的几个居民区，如宿城乡(A_1 至 A_5 采样点)其最大扩散因子不低于 $3.74 \times 10^{-6} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ ；云台乡和连云港经济开发区(B_5 ， C_2 ， C_3 ， C_4 诸采样点)的最大扩散因子不应低于 $6.15 \times 10^{-7} \text{ s} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

图 2 和图 3 分别给出了 8 月 12 日和 8 月 16 日两次 SF_6 示踪实验的烟羽轨迹。

2.2 扩散参数

2.2.1 扩散参数估算方法

平坦地形连续高架点源示踪扩散实验横向扩散参数的计算一般先利用标准差公式求取单个取样弧线的扩散参数 σ_y ，然后再拟合扩散曲线 $\sigma_y = f(x)$ 。由于现场实验不能采用扇形弧线布点法，而运用了分区布点，因此扩散参数的计算需采用最小二乘法进行计算机拟合。

2.2.1.1 最小二乘法

假定示踪实验的扩散条件服从高斯扩散模式，则由高斯连续点源扩散模式：

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{He^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (2)$$

导出高架连续点源的地面浓度公式为：

$$C(x, y, 0; He) = \frac{Q}{\pi\bar{u}\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{He^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (3)$$

式中, $C(x, y, 0; \text{He})$ 表示源强为 Q (mg/s)、有效源高为 He (m) 的源在下风向地面任一点 (x, y) (m) 处造成的浓度 (mg/m^3); $\bar{u}$ 为源高处的平均风速 (mg/s); σ_y, σ_z 分别是横向和垂向的扩散参数 (m)。

假定 σ_y, σ_z 与下风向距离 x (m) 存在如下的幂函数关系:

$$\sigma_y = p_y x^{q_y} \quad \sigma_z = p_z x^{q_z} \quad (4)$$

式中 p_y, q_y, p_z, q_z 可看作常数。则地面浓度公式可以表示为:

$$C(x, y, 0; \text{He}) = \frac{Q}{\pi \bar{u} (p_y x^{q_y}) (p_z x^{q_z})} \exp\left[-\left(\frac{y^2}{2(p_y x^{q_y})^2} + \frac{\text{He}^2}{2(p_z x^{q_z})^2}\right)\right] \quad (5)$$

这样, 只要确定常数 p_y, q_y, p_z, q_z , 即可给出 σ_y 和 σ_z 。

p_y, q_y, p_z, q_z 的确定可以利用最小二乘法。即, 使地面浓度的计算值 C_i [$C_i = C(x_i, y_i, 0; \text{He})$] 与实测值 C_{mi} 之差的平方和 S 最小, S 由下式表示:

$$S = \sum_{i=1}^N [C_i - C_{mi}]^2 \quad (6)$$

式中, N 为一次示踪实验所有采样点中采集到样品的点的总数。

实验中的样品采集方法属于不等精度测量, 为了权衡各种数据的不同精度, 引入标志测量精度的权数 g 作为处理数据时不同数据相对重要程度的指标。则 S 可表示为:

$$S = \sum_{i=1}^N g_i [C_i - C_{mi}]^2 \quad (7)$$

式中, g_i 为每个采样点的权数。权数的确定方法有多种, 为方便起见, g_i 取为:

$$g_i = C_{mi} / C_{m, \max} \quad (8)$$

式中, $C_{m, \max}$ 为本次实验中所有取得样品的采样点中的最大浓度测量值。

2.2.1.2 非线性方程组的解法

(1) 高斯牛顿法

在数据处理过程中, 首先利用高斯牛顿法进行了计算。

式 (7) 是参数 p_y, q_y, p_z, q_z 的非线性方程组, 不能直接利用求解线性方程组的方法解析出参数值。因此, 可把非线性参数的函数按泰勒级数展开近似化成线性参数的函数形式, 然后再按线性参数的估值方法进行。

设有非线性函数 $y = f(x; a)$ [应用到高斯扩散模式即 $y = C(x, y, 0; \text{He}; p_y, q_y, p_z, q_z)$], 给定参数的一组初值 $a_0 = (a_{10}, a_{20}, \dots, a_{m0})$, 则把函数 $y = f(x; a)$ 在 a_0 处作泰勒级数展开, 保留一次幂而略去高阶项得到:

$$y_i = f(x_i; a_0) + \left(\frac{\partial f}{\partial a_1}\right)_0 \delta_1^{(1)} + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial a_m}\right)_0 \delta_m^{(1)} \quad (9)$$

则非线性函数就化为诸参数的增量 $\delta_j^{(1)}, j = 1, 2, \dots, m$ 的线性函数了。只要求出合适的 $\delta_j^{(1)}$ 就可以确定各参数的值。将式 (9) 代入最小二乘法公式:

$$R = \sum_i g_i [y_i - f(x_i; a)]^2$$

的极值条件

$$\frac{\partial R}{\partial a_j} = 0 \quad j=1, 2, \dots, m$$

中, 可以得到下式:

$$\sum_{j=1}^m \delta_j^{(1)} \sum_{i=1}^n \omega_i \frac{\partial f(x_i)}{\partial a_j} \frac{\partial f(x_i)}{\partial a_k} = \sum_{i=1}^n \omega_i \frac{\partial f(x_i)}{\partial a_k} [y_i - f(x_i; a_0)] \quad k=1, 2, \dots, m \quad (10)$$

写成矩阵形式是:

$$(F^T G_Y F) \delta^{(1)} = F^T G_Y (Y - Y_0)$$

其解是

$$\delta^{(1)} = (F^T W_Y F)^{-1} F^T W_Y (Y - Y_0)$$

这里各个矩阵的定义为:

$$Y_0 = \begin{bmatrix} f(x_1; a_0) \\ f(x_2; a_0) \\ \vdots \\ f(x_n; a_0) \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1m} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_{n1} & f_{n2} & \cdots & f_{nm} \end{bmatrix} \quad G_Y = \begin{bmatrix} G_1 & & & \\ & G_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & G_n \end{bmatrix}$$

其中:

$$f_{ij} = \left(\frac{\partial f}{\partial a_j} \right)_{x=x_i}^0 \quad j=1, 2, \dots, m$$

把增量 $\delta_j^{(1)}$ 加到原来的初值 a_{j0} 上, 就得到参数的一次迭代结果 a_{j1} 。如此将 a_{j1} 代替 a_{j0} , 在一定的条件控制下, 就可完成迭代过程, 求出合适的参数值。

由于本方法采用矩阵形式, 可以直接求取 $n \times m$ 阶矩阵, 因此对于有四个参数 ($m=4$), n ($n \geq 4$) 次样品的示踪实验, 从理论上讲简单可行。但是, 在实际的处理过程中发现, 由于本方法中利用了对矩阵求逆的求解过程, 对初值的要求很高。稍不合适的初值, 求逆过程不能实现, 迭代即无法进行; 另外, 受地形因素的影响, 实测的数据并非完全的正态分布, 也增加了数据处理的难度。这里列出本方法的主要目的是提供一种参考, 实际的数据处理选用了梯度法。

(2) 梯度法求解非线性方程组

计算机语言常用算法程序中有关求解非线性方程的方法有多种 (但一般都要求方程组个数和参数个数相同), 通过选择和试用, 认为梯度法比较简便, 基本可以满足数据的处理要求, 且不需求解逆阵, 对初值的要求也不高, 因此所有数据的处理即选用了本方法。

A. 方法说明 (程序算法)

本方法的原理与高斯牛顿法相同, 即首先把非线性方程组线性化, 再按线性方程求解。

设非线性方程组为

$$f_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

定义目标函数为:

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n f_i^2$$

则梯度法的计算过程如下。

I. 选定一组初值

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

II. 计算目标函数值

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n f_i^2$$

III. 若 $F < \varepsilon$, 则 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 即为方程组的一组实根, 过程结束。

IV. 计算目标函数在 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 点的偏导数

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = 2 \sum_{j=1}^n f_j \cdot \frac{\partial f_j}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

然后再计算

$$D = \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial F}{\partial x_j} \right)^2$$

V. 计算

$$x_i - \lambda \frac{\partial F}{\partial x_i} \Rightarrow x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

其中 $\lambda = \frac{F}{D}$ 。

从 II 开始重复计算, 直至满足精度要求为止。

B. 函数构造

由上述说明可知, 梯度法要求方程组的个数与所求参数的个数相同。实际情况是有 n 个采样点 (每次实验 n 值均有所不同), 求 4 个参数 p_y, q_y, p_z, q_z , 所以不能直接利用该方法进行求解。为了符合梯度法的求解条件, 需要构造一个只包含四个方程的方程组。

由最小二乘法公式[式 (7)]

$$S = \sum_{i=1}^n g_i [C_i - C_m]^2$$

可知, 其极值条件为对四个参数的偏导数为 0, 即:

$$\frac{\partial S}{\partial a_j} = 0 \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (12)$$

这里 $a_j (j = 1, 2, 3, 4)$ 分别表示四个参数 p_y, q_y, p_z, q_z 。令非线性方程组为

$$f_i = f_i(a_1, a_2, a_3, a_4) = \frac{\partial S}{\partial a_i}, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (13)$$

即构造出了所需的四个方程 (式 14)。由于 S 是所有采集到样品的点的实测值与计算值差的平方和, 因此所构造的方程实际上是从 n 个采样点实测值中, 求解参数 p_y, q_y, p_z, q_z , 这样通过迭代就可直接求出一组扩散实验的扩散参数表达式。

$$\begin{aligned}
f_1 &= \sum_{i=1}^n 2g_i \left\{ \frac{Q}{\pi \bar{u} p_y p_z x_i (q_y + q_z)} \exp \left[- \left(\frac{y_i^2}{2(p_y x_i q_y)^2} + \frac{\text{He}^2}{2(p_z x_i q_z)^2} \right) \right] - C_{mi} \right\}^2 \cdot \\
&\quad \left[\frac{x_i (-3q_y - q_z) y_i^2}{p_y^3} - \frac{x_i (-q_y - q_z)}{p_y} \right] \\
f_2 &= \sum_{i=1}^n 2g_i \left\{ \frac{Q}{\pi \bar{u} p_y p_z x_i (q_y + q_z)} \exp \left[- \left(\frac{y_i^2}{2(p_y x_i q_y)^2} + \frac{\text{He}^2}{2(p_z x_i q_z)^2} \right) \right] - C_{mi} \right\}^2 \cdot \\
&\quad \left[\frac{x_i (-3q_y - q_z) y_i^2 \log(x_i)}{p_y^2} - x_i (-q_y - q_z) \log(x_i) \right] \\
f_3 &= \sum_{i=1}^n 2g_i \left\{ \frac{Q}{\pi \bar{u} p_y p_z x_i (q_y + q_z)} \exp \left[- \left(\frac{y_i^2}{2(p_y x_i q_y)^2} + \frac{\text{He}^2}{2(p_z x_i q_z)^2} \right) \right] - C_{mi} \right\}^2 \cdot \\
&\quad \left[\frac{\text{He}^2 x_i (-q_y - 3q_z)}{p_z^3} - \frac{x_i (-q_y - q_z)}{p_z} \right] \\
f_4 &= \sum_{i=1}^n 2g_i \left\{ \frac{Q}{\pi \bar{u} p_y p_z x_i (q_y + q_z)} \exp \left[- \left(\frac{y_i^2}{2(p_y x_i q_y)^2} + \frac{\text{He}^2}{2(p_z x_i q_z)^2} \right) \right] - C_{mi} \right\}^2 \cdot \\
&\quad \left[\frac{x_i (-3q_y - 3q_z) \text{He}^2 \log(x_i)}{p_z^2} - x_i (-q_y - q_z) \log(x_i) \right]
\end{aligned} \tag{14}$$

C. 精度 ε 的确定

通过分析数据,发现样品实测值数值比较小,一般在 $\times 10^{-3}$ 左右。由于源强 Q 与计算值是线性函数关系,为方便计算,令实测值 $C_{mi} = C_{mi} \times 10^3$, $Q = Q \times 10^3$ 。这样处理后,通过试算,认为一般令 $\varepsilon < 10^3$ 即可满足精度要求。

D. 迭代控制条件

在方法说明中,迭代过程是否继续是通过 $F = \sum_{i=1}^n f_i^2 < \text{精度}\varepsilon$ 来控制的。其中 F 的实际含义即最小二乘法的必要条件。在构造方程组(14)以后, F 的值不再是计算值与实测值差的平方和 S ,而是 S 偏导以后的平方。因此,这时精度 ε 的大小并不能直接反映拟合值的精确程度。注意到这一变化后,在程序中专门增加了一个变量 F' ,令 $F' = S$ 。经过计算,发现 ε 的值在 10^5 以上时, F' 的值与 F 的变化范围都比较大,而且它们的变化趋势呈正相关,说明这时用 ε 作为控制条件比较合适。当 ε 的值在 10^5 以下时 F' 的变化范围逐渐缩小, F 的变化范围相对仍较大。此时若仍以 ε 来控制迭代过程,则迭代过程就需要一定的时间来完成。为减少迭代过程,可以用如下条件来控制。令 F'_{m-1} 为第 $m-1$ 次迭代的 F' 值, F'_m 为第 m 次迭代的 F' 值,当

$$\left| \sqrt{\frac{F'_m}{n}} - \sqrt{\frac{F'_{m-1}}{n}} \right| < \delta \tag{15}$$

时, 迭代过程完成。这里 n 为采集到样品的点的总数, $F_m' = S = \sum_{i=1}^n g_i [C_i - C_m]^2$, 则

$\sqrt{\frac{F_m'}{n}}$ 即实测值与计算值的标准差, δ 为预先确定的控制条件。式 (15) 的意义即当两次

迭代过程标准差的差值绝对值小于某一值 δ 时, 认为计算值已满足处理要求, 跳出循环, 迭代过程结束。一般取 $\delta < 0.01 \sim 0.1$, 由于实测数据的分布比较复杂, 特殊情况下, δ 的取值范围可以适当放大。因此计算机程序的迭代过程由以下条件联合控制:

I. 精度 ε

II. 标准差的差值 δ

III. 另外, 如果初值选取不当, 可能出现数学错误导致程序崩溃, 因此计算程序还增加了一些出错处理来终止程序运行。

E. 初值的选取

初值选取不好, 迭代过程较慢, 甚至没有结果。另外由于非线性方程组线性化的过程中, 忽略了泰勒级数的高次项, 因此一次迭代对非线性参数的估计值不一定是最好结果, 需不断改变初值, 用迭代法反复运算直到得到较好结果为止。所以初值的合适与否非常重要, 但由于没有固定的选取方法, 需积累一定的处理经验。一般选取的初值其计算结果应当与轴线实测值相差不超过一个数量级, 所以在程序中首先屏幕打印计算结果, 通过与实测值的比较, 认为初值选取合适, 就开始迭代, 如不合适, 重新输入初值计算。

2.2.1.3 有效源高及烟轴高度的修正方法

(1) 释放源在铁塔顶部 90 m 处, 铁塔基座离当地地面约高 25 m, 故取释放源有效源高为 115 m。源高处的平均风速取铁塔 70 m 与 98 m 处风速的内差结果。

(2) 采样点的布点方案中, 为了研究山体对烟羽的影响及释放物质爬越山体的情况, 分别在扒山头和后云台山布置了若干采样点, 这些点均在地面高度以上。当烟羽扩散到这些点时, 与地面采样点不同, 其地面浓度的计算需采用修正后的烟轴高度。参考国家标准及其它资料, 确定在计算中采用如下的修正方法。

I. 当排放源下风向某处山体上采样点 (如位于扒山头上的 A_{17a} , A_{17b} , A_{17c} , $A_{17} \sim A_{25}$) 的高度 H_t 低于有效源高 H_e 时, 烟羽烟轴的高度取其实际高差 ($H_e - H_t$), 即其地面浓度按下式取值:

$$C(x, y, 0; H_e) = \frac{Q}{\pi \bar{u}(p_y x^{q_y})(p_z x^{q_z})} \exp \left[- \left(\frac{y^2}{2(p_y x^{q_y})^2} + \frac{(H_e - H_t)^2}{2(p_z x^{q_z})^2} \right) \right] \quad (16)$$

II. 当排放源下风向某处山体上采样点 (如位于后云台山上的 $G_1 \sim G_4$ 点) 的高度 H_t 高于有效源高 H_e 时, 则假定该处烟轴与地面的高度差等于 $H_e/2$ 。即其地面浓度按下式取值:

$$C(x, y, 0; H_e) = \frac{Q}{\pi \bar{u}(p_y x^{q_y})(p_z x^{q_z})} \exp \left[- \left(\frac{y^2}{2(p_y x^{q_y})^2} + \frac{(H_e/2)^2}{2(p_z x^{q_z})^2} \right) \right] \quad (17)$$

III. 烟羽绕山或越山以后, 地面高度上的采样点 (如 $A_1 \sim A_9$, $A_{11} \sim A_{16}$, $B_1 \sim B_{14}$, $C_1 \sim C_{15}$, $C_8' \sim C_{15}'$, $D_1 \sim D_{10}$, $E_1 \sim E_7$, $F_1 \sim F_9$) 浓度仍按式 (5) 计算。

2.2.1.4 烟羽轨迹的修正

连云港镇不但地形复杂,而且实验区处于海陆交界面,释放物的扩散同时受到梯度风和海陆风的影响。根据实验期间铁塔观测的气象数据,本地一般白天多吹偏东风,即海风影响较大,夜晚多吹偏西风,即陆风影响显著。比较铁塔不同层次的风向,发现两个高度的风向差一个方位的情况也比较多,说明近地面层的风向方位分布比较复杂。另外,铁塔 98 m 处的风向是正点前 10 min 的统计结果,只代表一种主导趋势。每次 SF_6 示踪实验一般耗时均在半小时以上,最远的采样点在释放源下风向 10 km 以外,在如此长的时间和距离内,风向难免发生一些摆动。这样如果用高斯模式按 98 m 处的风向计算扩散参数,结果(尤其是轴线浓度)与实际情况会有较大的差距,在数据处理时,通过修正轴线(即风向)获得了较满意的结果。

高斯大气扩散模式以主导风向的下风向为 x 轴,结果是地面轴线浓度比轴线外其它点的浓度大。烟羽轨迹的修正就利用了这一特性。具体的修正方法如下。

- 首先分析下风向的实测值,列出与轴线垂向距离比较接近的点中的最大值。
- 若某点的最大值比较突出,其它相邻点均相对较小时,烟羽轨迹经过此点。
- 若与出现最大值的点相邻的一点或几点的值与最大值相差不大时,认为烟羽轨迹从最大值与相邻点的中部经过,但偏向于最大值点。轴线偏向最大值点的距离应据差值的大小和经验决定。

—— 烟羽轨迹的修正尽量使轴线方向在一定距离内保持不变,不因为其它实测浓度的大小而故意改变轴线方向,造成比较弯曲的轨迹。

—— 烟羽在轨迹改变时,示意图上都是在某点直接变向,实际应当是有一定曲率的曲线。

由试验结果可知,在所观测到的 E, ENE 风向中,除 1997 年 8 月 14 日 18 时的两次轨迹与原风向 ENE 差一个方位(基本为 E)外,其它的烟羽轨迹在 3 km 以外一般都大致保持了所观测风向的方位。在 3 km 以内,情况比较复杂。从地图上可以看到,烟羽翻过扒山头后,轨迹一般向大板桥闸方向偏移。分析其原因可能如下:

扒山头直接毗邻海湾,由于海风风速一般可达 5~6 m/s,故可经扒山头、船山沿山体吹向宿城方向;大板桥闸一带离海湾有一定距离,因此海风到达此处时强度被削弱了。宿城乡与大板桥闸、扒山头一线形成的半封闭山谷中,白天太阳辐射使山壁受热,暖空气沿山坡上爬,形成上坡风,谷外冷空气向谷内流进补气,形成低层谷风。地形风与海风互相作用极易形成横向局部环流,且扒山头附近海风影响较大,烟羽轴线偏向宿城方向,大板桥闸附近海风影响较小,烟羽轴线偏离宿城方向。3 km 以后,烟羽开始摆脱局地气流的影响,轴线逐渐由梯度风控制。

16 日 17 时 SE 向的三条轨迹在到达云台山前基本与主导风向保持一致,越过山顶后,受地形风的影响,轨迹稍向东偏移,但随后梯度风逐渐控制了扩散方向。

2.2.2 同一稳定度下的扩散参数的计算

(1) 对系数 p_y, p_z 按几何平均法取其均值,即

$$\bar{p}_y = \left(\prod_{i=1}^N p_{yi} \right)^{1/N} \quad \bar{p}_z = \left(\prod_{i=1}^N p_{zi} \right)^{1/N} \quad (18)$$

式中, N 为同一稳定度条件下的实验总数, p_{yi} , p_{zi} 为第 i 次实验的 p_y , p_z 估算值, $\bar{p}_y$, $\bar{p}_z$ 即为整个现场实验期间同一稳定度条件下的扩散参数的系数。

(2) 对幂指数 q_y , q_z 按算术平均法取其均值, 即

$$\bar{q}_y = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_{yi} \quad \bar{q}_z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_{zi} \quad (19)$$

式中, q_{yi} , q_{zi} 为第 i 次实验的 q_y , q_z 估算值, $\bar{q}_y$, $\bar{q}_z$ 即为整个现场实验期间同一稳定度条件下的扩散参数的幂指数。因此实验期间同一稳定度下的扩散参数为:

$$\bar{\sigma}_y = \bar{p}_y x^{\bar{q}_y} \quad \bar{\sigma}_z = \bar{p}_z x^{\bar{q}_z} \quad (20)$$

2.2.3 计算结果及初步分析

为了探讨采样时间对扩散参数的影响, 第一步我们先对 SF_6 示踪实验中每次采样 (采样时间 10 min) 进行了拟合。作为示例, 表 4~9 给出其中二次 SF_6 示踪实验 (1997 年 8 月 13 日与 8 月 16 日) 各三次采样的拟合结果。拟合中发现 8 月 12 日示踪实验中, SF_6 烟羽明显地分成两支, 一支继续沿风向迁移, 另一支绕山迁移至宿城乡各采样点。因此计算中采用双轴处理, 根据采样点的浓度数据, 两轴线的源强各取 $\frac{1}{2}Q$ 。根据 SF_6 示踪实验中每次采样的扩散参数系数 p_{yi} , p_{zi} 及幂指数 q_{yi} , q_{zi} 拟合结果, 应用式 (19)、(20) 获得了相应于采样时间为 10 min 扩散参数的系数与幂指数, 其结果列于表 10。第二步我们对每次 SF_6 示踪实验即对每次示踪实验中的三次或四次采样样品浓度平均值 (因此, 可视为取样时间为 40 min) 进行了拟合, 表 11~18 给出了它们的拟合结果, 与上同述, 根据此拟合结果获得了相应于取样时间为 40 min 的中性天气条件下最终的扩散参数的系数 p_{yi} , p_{zi} 及幂指数 q_{yi} , q_{zi} , 其值列于表 19。

图 4、5 和图 6、7 分别给出由示踪实验获得的扩散参数与 P-G 扩散曲线及 BNL (布鲁克海文) 扩散曲线的比较。

由图 4、5 可见, 实验获得的 D 类 σ_y 曲线与 P-G 曲线的 C 类扩散曲线几乎相吻合, 而实验获得的 D 类 σ_z 曲线, 在近距离 (小于 1 km) 介乎 P-G 曲线的 B、C 类之间, 在 1 km 以远距离则介于 P-G 曲线的 C、D 类之间, 但靠近 C 类曲线。这是因为 P-G 曲线适用于平坦地形, 而连云港地区属于复杂地形, 其扩散参数理应高于 P-G 扩散参数。

由图 6、7 可见, 实验获得的 D 类 σ_y 和 σ_z 曲线都介于 BNL 曲线的 C、D 类之间, 但 σ_y 在 1 km 以远更靠近 BNL 的 C 类曲线, 而 σ_z 则靠近 BNL 的 D 类曲线。

表 20 是应用上述推荐的 D 类扩散参数 (表 19 中的均值) 计算的若干关心点 (宿城乡的 A_1 至 A_5 ; 船山的 A_{14} 至 A_{16} ; 云山乡的 B_5 ; 连云港经济开发区的 C_1 至 C_6 ; 西大堤的 F_1 , F_2 ; 后云台山顶的 G_1 至 G_4 各采样点) 的浓度值与实测浓度平均值的比较。由表可见, 计算值与实测值之比的变化范围为 0.45 至 4.66, 其中计算值与实测值之比在 0.5 至 3.0 之间的频率为 80%, 在 0.5 至 2.0 之间的频率为 40%, 在 1.0 至 2.0 之间的频率为 30%; 高估的频率为 85%, 高估倍数在 4 倍之内; 低估频率为 15%。从辐射防护的角度考虑, 希望计算值略高于实测值, 即略偏保守为好, 因此, 上述比较表明, 计算值与实测值的比值范围是可以接受的, 符合程度是比较好的。

2.2.4 浓度随取样时间增加的稀释作用

不同的采样时间内, SF_6 浓度的分布范围不同, 获得的扩散参数也不同, 但两者之间可以用时间稀释指数 d 来相互转换。

时间稀释指数 d 可由下述经验公式求得:

$$\frac{C_{\tau_1}}{C_{\tau_2}} = \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^d \quad (21)$$

式中: τ_1 , τ_2 分别代表短取样时间和长取样时间。

由大气扩散公式可知, 烟云中心浓度和最大地面浓度都随采样时间增加而减少, 并有如下关系:

$$\frac{C_{\tau_1}}{C_{\tau_2}} = \frac{(\sigma_y \sigma_z)_{\tau_2}}{(\sigma_y \sigma_z)_{\tau_1}} \quad (22)$$

一般当取样时间超过几分钟后, σ_z 趋于常数, 所以上式可简化为:

$$\frac{C_{\tau_1}}{C_{\tau_2}} = \frac{\sigma_{y\tau_2}}{\sigma_{y\tau_1}} \quad (23)$$

即:

$$\frac{\sigma_{y\tau_2}}{\sigma_{y\tau_1}} = \left(\frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^d \quad (24)$$

由 SF_6 实验所获得的不同采样时间 D 类稳定度下的大气扩散参数如下:

采样时间为 10 min 的大气扩散参数:

$$\sigma_y = 0.593x^{0.704} \quad \sigma_z = 0.236x^{0.869}$$

采样时间为 40 min 的大气扩散参数:

$$\sigma_y = 0.266x^{0.861} \quad \sigma_z = 0.331x^{0.760}$$

据 σ_z 计算得到的采样时间为 10 min 的地面轴线最大浓度点的出现距离为 833 m, 采样时间为 40 min 的地面轴线最大浓度点的出现距离为 1400 m, 说明当采样时间在 10~40 min 时, 地面轴线最大浓度的出现距离大约在 1 km 左右。为方便计算, 在式 (24) 中, x 取为 1000 m, τ_1 取为 10 min, τ_2 取为 40 min。

据此计算的每次释放的时间稀释指数及据不同采样时间的扩散参数均值计算的时间稀释指数的结果见表 21。由表可见, 由不同取样时间的大气扩散参数均值计算的 d 值约为 1/5, 此值与《气象学与原子能》一书的推荐值相等。而每次释放的时间稀释指数的均值约为 1/4。由于在计算中对每次释放的地面浓度点的出现距离均取为 1000 m, 因此时间稀释指数的计算结果并非足够精确; 而且由于有些采样时间为 10 min 的实测数据未作拟合, 对时间稀释指数的均值也有所影响, 所以认为据不同取样时间的大气扩散参数均值计算的时间稀释指数, 即 $d = 1/5$ 基本上代表了连云港地区大气扩散中浓度随时间的稀释作用的特征。

3 小 结

(1) 1997年8月在连云港核电厂厂址进行了10次 SF_6 示踪实验,释放是在100 m气象铁塔的90 m塔台上进行的;布点采用居民区面源布点与尽可能的弧线布点相结合的方案;每次示踪实验采样三或四次;每次采样10 min,间隔5 min;分析采用气相色谱仪。

(2) 实验中发现 SF_6 有可能绕过后云台山顶,也发现下洗及部分烟羽的绕流现象,这可能造成船山村与宿城乡附近居民受到较大的污染。

(3) 实验中单次采样扩散因子最大值为 $2.57 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$,其分布范围为 $4.0 \times 10^{-8} \sim 2.57 \times 10^{-5} \text{ s/m}^3$ 。

(4) 应用最小二乘法由 SF_6 示踪实验数据获得D类稳定度的扩散参数如下:

$$\sigma_y = 0.266x^{0.861} \quad \sigma_z = 0.331x^{0.760}$$

应用此扩散参数计算了若干关心点浓度并与 SF_6 实测浓度相比较发现,两者比值范围在0.45至4.66之间,在0.5至2.0之间的频率为40%,可以接受。

(5) 分别利用10 min采样的实测浓度及40 min采样的实测浓度均值估算了浓度随取样时间增加的稀释作用,求得时间稀释指数如下:

$$\frac{\sigma_{yr_2}}{\sigma_{yr_1}} = \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^{0.2}$$

即 d 值约为1/5。