

Research and Application of Locating Algorithm about Laser Remote Sensing of Natural Gas Leakage

Shuai Zhang, Wenqing Liu, Yujun Zhang, Ruifeng Kan, Jun Ruan, Yongjun Li,
Zhenyu Xu, Yuanyuan Tang, Yiben Cui, Jianguo Liu

Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences; Key Lab of Environment Optics & Technology, CAS, Hefei
Email: zhangshuai@aiofm.ac.cn

Received: Mar. 24th, 2011; revised: Mar. 29th, 2011; accepted: Apr. 10th, 2011.

Abstract: The natural gas pipeline leakage detection is significant in terms of security, environmental protection and security of state property. However, the leak detection is difficult, because of the pipeline's covering many areas, operating conditions and complicated environment. Quantitative remote sensing of natural gas leakage and location research, with laser absorption spectroscopy, will be faster, safer, more accurate and intelligent. This article focuses on locating algorithm for laser remote sensing of natural gas leakage in the case of non-cooperative target. Leakage locating, the direction of gas diffusion and total leakage were obtained through the simulation experiments. Relative error, dropped from 55.89% to 7.41% by a total leakage simulation of trace methane. The results of leak location and gas diffusion direction are consistent with the actual's by moving least square method and image segmentation through the dynamic leakage simulations. Locating algorithm is feasible by analyzing the experimental simulation of the natural gas leakage, and it will become a new diagnostic method.

Keywords: Laser Remote Sensing; Moving Least Square Method; Image Segmentation; Locating Algorithm

激光遥测天然气泄漏定位算法研究及应用

张 帅, 刘文清, 张玉钧, 阚瑞峰, 阮 俊, 李勇军, 许振宇, 汤媛媛, 崔益本, 刘建国

中国科学院安徽光学精密机械研究所; 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 合肥

Email: zhangshuai@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2011年3月24日; 修回日期: 2011年3月29日; 录用日期: 2011年4月10日

摘 要:天然气管道泄漏检测对人员安全、环境保护以及国家财产安全等方面具有重要的意义。但是, 由于管线跨越地域广阔, 操作工况以及环境情况复杂, 致使管线的泄漏检测存在困难。采用激光吸收光谱技术对天然气泄漏进行了定量遥测与定位研究, 具有快捷、准确、智能及安全等特点。本文重点介绍了在无合作目标背景下激光遥测天然气泄漏定位算法研究。实验模拟了激光移动遥测天然气泄漏定位、泄漏扩散方向判别及泄漏总量获取等, 在低浓度遥测时总量获取的误差从 55.89% 降到 7.41%, 在动态模拟泄漏中, 通过移动最小二乘法曲面拟合滤波与图像区域分割可以准确获得泄漏源的位置, 以及判别的气体扩散方向与实际基本吻合。结果验证本文的泄漏定位算法适合天然气泄漏的遥测定位, 为天然气泄漏检测提供一种新的诊断方法。

关键词: 激光遥测; 移动最小二乘法; 图像分割技术; 定位算法

1. 引言

随着管道的增多, 管道运行时间的增长, 管壁受到冲刷腐蚀及人为破坏等原因, 管道泄漏事故频发

生, 给人民的生命财产安全造成了巨大的威胁^[1]。尤其管道泄漏后, 不仅造成经济上的损失, 而且会污染环境, 甚至引起火灾和爆炸。我国目前已建成油气管道 400 多条, 其中很多管线已经接近或者超过 20 年,

有的甚至处于超龄服役阶段,因此油气管道泄漏事故时有发生。据统计,我国管道事故发生率比发达国家要高很多倍,其中人为打孔破坏管道的事故占很大的比例。

利用可调谐半导体激光吸收光谱技术可以定性、定量地获得测量空间天然气含量^[2,3],利用遥测装置,获得遥测范围的天然气含量,有利于对泄漏故障的及时处理。通过激光遥测天然气泄漏检测仪能够实现二维空间的扫描,获取泄漏源的二维浓度场分布,采用组合判别消除遥测泄漏奇异点,利用移动最小二乘法拟合浓度场分布曲面^[4],通过图像区域分割^[5]分析天然气泄漏信息,主要信息:泄漏源的定位,泄漏总量的获取,泄漏源的扩散方向等。

2. 激光遥测甲烷原理

可调谐半导体激光吸收光谱技术基于 Beer-Lambert 定律,通过半导体激光器快速扫描与高频调制结合锁相放大技术实现快速高灵敏的气体在线监测,用锁相放大器对其进行解调,可以得到吸收信号的一次谐波、二次谐波信号^[6,7],一次谐波信号的中心是经过零点的,幅度调制对其影响比较大,常作为光强的指示值,而二次谐波信号的中心正好在其峰值上,而且与气体产生的吸收强度成正比,因此在遥测应用中普遍使用 $2f/1f$ 的归一化信号进行甲烷在线测量^[7]。本文所用的气体分析仪选用中心波长为 1653 nm 的 DFB 激光器,采用 1 kHz 的高频锯齿改变注入电流实现波长扫描一根完整的甲烷吸收线,以及采用 200 kHz 的正弦信号对激光波长进行调制结合噪声对消电路^[8]实现高灵敏移动遥测天然气泄漏,系统检测灵敏度达到 50 ppm·m。系统采用收发同轴基于菲涅耳透镜的发望远镜,操作轻便,易于小型化。

搭建了一种移动在线式遥测定位实验平台,原理图如图 1 所示。采用了小型手动旋转云台,利用小角度快速摆动方式实现二维空间的遥测扫描,扫描的目标背景是一栋楼的一面墙壁,在墙壁上划出来一大块矩形区域,同时把这个矩形区域等份划分成 100 个小矩形网格,每个网格面积为 $0.25\text{ m} \times 0.25\text{ m}$,让激光沿着每一个网格进行逐点扫描,因半导体激光遥测距离的限制,试验中激光收发望远镜和墙壁的距离为 30 米,产生光斑的直径为 0.2 m。激光收发望远镜固定在手动移动平台上,激光通过准直器,遥测到对面的墙壁,通过手动调节望远镜的角度,首先进行第一排的

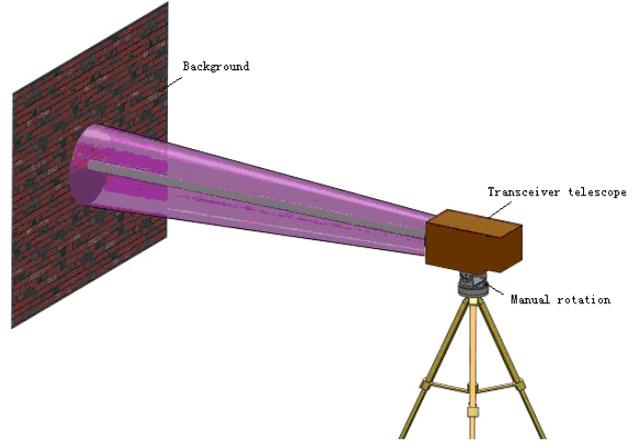


Figure 1. Diagram of moving remote locating
图 1. 移动遥测定位原理图

网格扫描,再逐行进行扫描,产生“Z”的方式扫描整个区域,移动扫描频率为 1 Hz。望远镜接收到的回波信号经过微弱光电接收器进行接收,进行电流电压转换、放大,通过噪声对消后解调,得到所需的谐波信号,软件采集处理,通过反演得到遥测的二维浓度矩阵,再利用移动最小二乘拟合算法对浓度场曲面拟合滤波,曲面积分获得遥测总量,通过图像区域分割进行定位泄漏源及扩散方向判别等。

3. 泄漏定位算法

3.1. 泄漏筛选算法

遥测的浓度数据是二维的离散数据可以用一个矩阵来表示如式 1 所表达,每个元素代表每次遥测的浓度值,矩阵的 m 行和 n 列中的每个元素的右下角分别代表扫描空间的 X 轴和 Y 轴上的坐标,如: a_{ij} 称为二维空间一次测量的天然气浓度,即: X 轴坐标为 i , Y 轴坐标为 j 位置点处和遥测望远镜之间的天然气平均含量。通过图 1 中的实验装置,获得二维浓度矩阵,天然气泄漏的定位问题就变成了一个具有一定物理意义的数学问题研究。

$$C = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

第一次元素组合判别,对转换后的二维浓度矩阵中浓度值临域组合筛选确定整体遥测范围是否有泄漏存在。判别公式如式 2 所示:

$$\sum_{i=0, j=0}^{C_{m \times n}^x} a_{ij} \geq C_{0x} \quad (2)$$

组合步骤如下:

第一步, 在浓度矩阵中选择 1 个元素进行判别, 筛选出大于阈值的浓度点;

第二步, 若在第一步没有筛选出泄漏点, 不代表没有泄漏存在, 根据第一步筛选的浓度点, 邻域方式进行组合, 在矩阵的行与列各选择 2 个元素进行组合, 此时组合元素个数为 5, 再降低阈值进行筛选;

第三步, 若还没有筛选出泄漏点, 按照第二步, 继续扩大组合元素进行筛选。

对上面筛选出来的可疑泄漏元素再次进行组合, 组合处理的思想是筛选检测奇异值, 进一步增加筛选元素的可信度。首先对元素 a_{ij} 进行重新组合, 主要在组合中进行插值处理, 以元素 a_{ij} 为中心, 行向上左右各加 n 个元素, 列向上各加 n 个元素半径为激光遥测扫描浓度间距, 在浓度矩阵中表现为添加如下几个元素: 行为: a_{i-nj} 、 \dots 、 a_{i+nj} , 列为: a_{ij-n} 、 \dots 、 a_{ij+n} 总共有 $4n+1$ 个元素; 对组合中的元素进行开方乘积处理, 判别公式对所有求积元素开 $4n+1$ 次方根进行判别如 3 所示, 满足这个条件即为通过筛选, 符合泄漏离散元素, 不满足时即可认定为奇异值, 判断为此处无泄漏。当 a_{ij} 处在浓度矩阵边缘时, 程序中对需要添加的元素可能不存在, 需对这个不存在的元素个数进行统计记为 τ , 在求积时设置为 1, 开 $4n+1$ 次方根时就变为开 $4n+1-\tau$ 次方根。

$$\sqrt[4n+1]{\prod_{\substack{i-n \\ j-n}}^{\substack{i+n \\ j+n}} a_{ij}} < K a_{ij} \quad (3)$$

其中, n 值需要根据仪器的性能进行选取, 如果仪器性能不可靠时 n 值尽可能大, 在仪器性能可靠时 n 值一般为 1, 2 即可, K 为经验值。

3.2. 移动最小二乘法拟合浓度场分布曲面

移动曲面拟合法是一种局部逼近的方法。其基本思想是在每个待定点处, 利用其周围数据点的值, 按一定规则移动地建立多个拟合曲面, 该点在这多个拟合曲面上函数值的加权平均值即为所求待定点的函数值。移动最小二乘法拟合浓度场分布曲面具体过程如下:

(I) 确定局部浓度场拟合子域的大小 S , 子域一般

选择方形或圆形;

(2) 在每个待定点 p 处, 确定所有包含点 p 且大小为 S 的局部拟合子域 $\Omega_i (i=1, 2, \dots, n)$, 以及各子域中的数据点 $x_j (j=1, 2, \dots, n)$;

(3) 在每个局部拟合子域 $\Omega_i (i=1, 2, \dots, n)$, 选择适当的浓度场拟合曲面:

$$f_i(x, y) = p^T(x, y) A_i \quad (4)$$

且 $P^T(x, y) = [P_1(x, y), P_2(x, y), \dots, P_m(x, y)]$, $A_i = [a_1, a_2, \dots, a_m]^T$, a_i 为待定系数, 此时, $P^T(x, y)$ 不要求是完备的多项式基函数, 则 n 个浓度数据点的对应误差方程为 ($j=1, 2, \dots, n$):

$$v_j = p^T(x_j, y_j) A_i - z_j \quad (5)$$

可矩阵表示:

$$v = P A_i - z \quad (6)$$

其中, $v^T = [v_1, v_2, \dots, v_n]$, $z^T = [z_1, z_2, \dots, z_n]$,

$$P = \begin{bmatrix} p_1(x_1, y_1) & p_2(x_1, y_1) & \dots & p_m(x_1, y_1) \\ p_1(x_2, y_2) & p_2(x_2, y_2) & \dots & p_m(x_2, y_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ p_1(x_n, y_n) & p_2(x_n, y_n) & \dots & p_m(x_n, y_n) \end{bmatrix}$$

根据移动最小二乘法理论, 拟合曲面的系数的解为:

$$A_i = (P^T P)^{-1} P^T z \quad (7)$$

(4) 综合待定点 p 处 N 个浓度场拟合曲面的信息, 进行优化处理, 取点 p 在 N 个拟合曲面上的函数值的加权平均值为点 p 的浓度场函数, 即:

$$C(x_p, y_p) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i f_i(x_p, y_p)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (8)$$

其中 w_i 是对每个浓度场拟合子域赋予的权值。

3.3. 图像分割技术

对于天然气泄漏信息的获取, 主要是泄漏定位以及泄漏扩散方向的判别, 通过前面的处理, 获得了浓度场曲面, 但为了获取重要泄漏信息, 引入浓度场曲面的区域分割。图像分割的目的是理解图像的内容, 提取出我们感兴趣的对象。图像分割按照具体的应用要求和具体图像的内容将图像分割成一块块区域。图像分割是模式识别和图像分析的预处理阶段。通常图像分割采用聚类方法, 假设图像中组成我们需求目标的像素具有某些相似的特征, 如相同的灰度值、相同

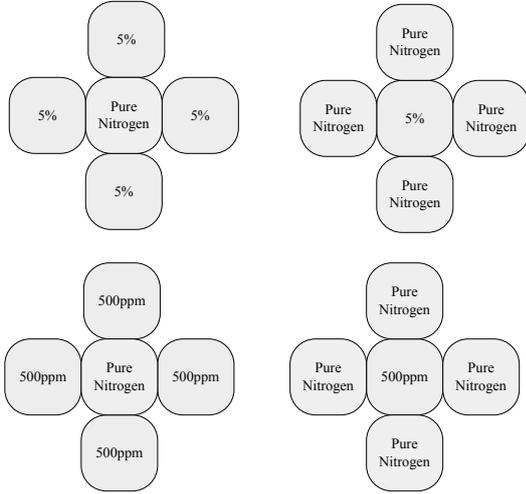


Figure 2. Airbag combination
图 2. 气袋组合方式

的颜色等。

采用分水岭图像区域分割，把图像看成 3-D 地形的表示，即 2-D 的地基（对应图像空间）加上第 3 维的高度（对应图像灰度）。

区域分割处后，根据 8 式，可以计算区域局部浓度场子域内的极值点应满足以下 9 方程组，通过非线性方程组的求解可求出一系列子域内的极值点坐标位置即遥测泄漏极值点位置，最后比较判别确定泄漏源位置。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial C(x_p, y_p)}{\partial x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \frac{\partial f_i(x_p, y_p)}{\partial x}}{\sum_{i=1}^n w_i} = 0 \\ \frac{\partial C(x_p, y_p)}{\partial y} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \frac{\partial f_i(x_p, y_p)}{\partial y}}{\sum_{i=1}^n w_i} = 0 \end{array} \right. \quad (9)$$

4. 实验结果与分析

4.1. 实验一奇异值筛选判别

在 100 个网格中放置 5 个气袋，每个气袋覆盖 1 个网格，位置是在一起，且采用不同的组合方式进行布局如图 2 所示，其中：气袋冲入 5% 的甲烷标气，气袋冲入低浓度 500 ppm 的甲烷标气，气袋冲入氮气，利用手动旋转台对大矩形区域进行分层扫描，逐点扫描 100 次，获得固定气袋的甲烷浓度二维矩阵。实验验证泄漏奇异值筛选的判别效果。

邻域组合方式的情形下，扫描后获得浓度场分布后，经过求极值，其中选取 $x = 3$ 时获得浓度矩阵中可疑元素为： a_{45} 、 a_{54} 、 a_{55} 、 a_{56} 、 a_{65} ，但是实际遥测得到 $a_{55} = 1.82$ ，是模拟的一个奇异值，主要验证奇异值的判别的效果通过判别中三大步进行判别。首先对元素 a_{45} 、 a_{54} 、 a_{55} 、 a_{56} 、 a_{65} 分别进行组合，是在组合中进行插值处理，我们首先选取 $n = 1$ ，所以需要插值的元素为 $4n + 1 = 5$ 。

当选取 $n = 1$ 时，计算判别式 $\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{i+1} a_{ij}} < K a_{ij}$ ，其中

a_{ij} 分别为 a_{45} 、 a_{54} 、 a_{55} 、 a_{56} 、 a_{65} 。当选取不同的 K 值时，对判别的结果有很大影响，也就是说， K 过高或者过低都会改变判别结果，在实际情况没有模拟的影响大。主要是在实际情况下，奇异值的数量比较少，而且，奇异值是在大量有用的浓度数据中存在的，通过判别式 3，计算时， K 的影响就比较小。

图 3 是实际测量后的浓度场曲面，与图 4 是筛选奇异值处理后的浓度场曲面，从这两幅图中，可以看出以上消除奇异值算法对于奇异值消除效果，对判别出来是奇异值的情况，这个元素的值估值表示为：

$$\bar{a}_{ij} = \left(\sum_{j=n}^{j+n} \sum_{i=n}^{i+n} a_{ij} - a_{ij} \right) / \left[(2n+1)^2 - 1 \right] \quad (10)$$

4.2. 实验二泄漏总量拟合实验

在 100 个网格中心位置处放置一个固定的气袋，让气袋覆盖了 4 个小网格，且气袋内冲入不同浓度的甲烷标气，利用手动旋转台对大矩形区域进行分层扫描，逐点扫描 100 次，获得固定气袋内甲烷浓度二维空间浓度矩阵，其中有 100 个元素，通过移动最小二乘法拟合浓度场曲面，获取气袋总量，并实验结果与真实气袋甲烷浓度进行误差分析。

采用移动最小二乘法拟合浓度场空间曲面，对原始反演的浓度值进行滤波，图 5 是未经处理的浓度场曲面，通过曲面直观看出，在高浓度甲烷测量时，背景干扰对泄漏定位的影响比较小，直到测量气袋的甲浓度为 2000 ppm 时，开始无法消除背景测量的干扰，即泄漏浓度奇异值开始产生，特别是低浓度气体泄漏时，通过直接测量的浓度场分布根本无法定位泄漏。采用上面的判别处理，再利用移动最小二乘法拟合浓度场分布曲面，如图 6 所示，可以看出，在 2000

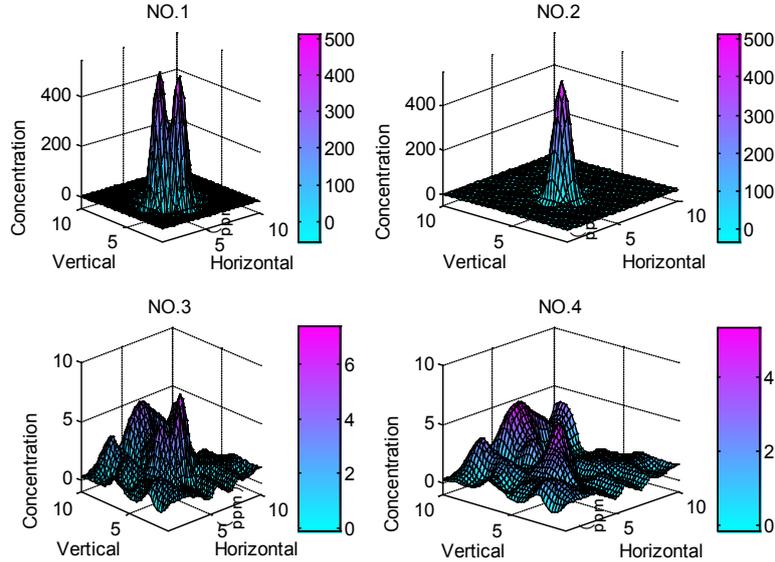


Figure 3. The concentration distribution of four groups
图 3. 四组浓度场的测量值

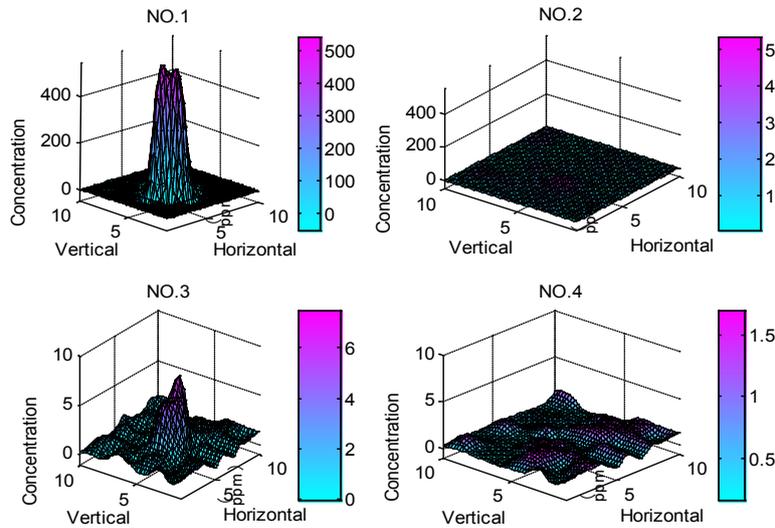


Figure 4. The results of elimination the singular value
图 4. 筛选判别后的结果

ppm 低浓度气袋遥测扫描时,完全可以判别定位泄漏,甚至在更低浓度遥测定位时,也能很好的抑制背景噪声的干扰,但是无法彻底的消除,这时可能会产生泄漏定位的误报,需要提高检测仪的监测灵敏度来实现微弱泄漏遥测。

在浓度场分布曲面获取后,采用体积分的方式,如 11 式所示,获取整个浓度场的气体浓度,对于泄漏浓度总量的准确获取我们需要进行背景甲烷浓度的扣除。

$$C_V = \bar{C} \times V = \left(\frac{\iiint C(x,y) dx dy}{S} - C_0 \right) \times V \quad (11)$$

其中, C_V : 以体积为单位的气体浓度, C_0 : 空气背景甲烷浓度,一般设置为 1.7 ppm, $C(x,y)$: 就是泄漏浓度场空间曲面, S : 激光扫描目标背景的面积, V : 整个激光扫描空间的体积。

通过分析直接测量结果及处理后相对真实值的相对误差,如图 7 所示,在低浓度遥测时,总量获取误差从 55.89%降低到 7.41%,浓度越低时,定位算法处理后在总量获取上相对误差明显降低,说明我们采用的移动最小二乘法进行浓度场曲面拟合的泄漏定位算法对微量泄漏有一定的判别能力。

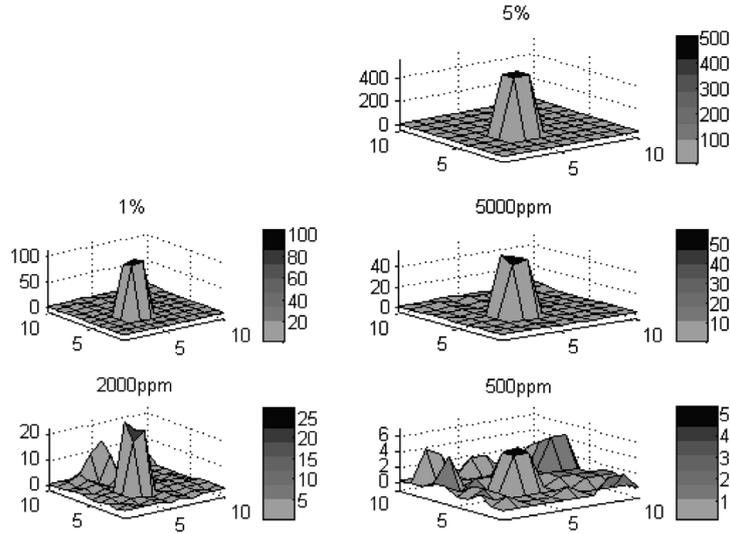


Figure 5. The spatial distribution of raw-concentration
图 5. 未处理的浓度场空间分布曲面

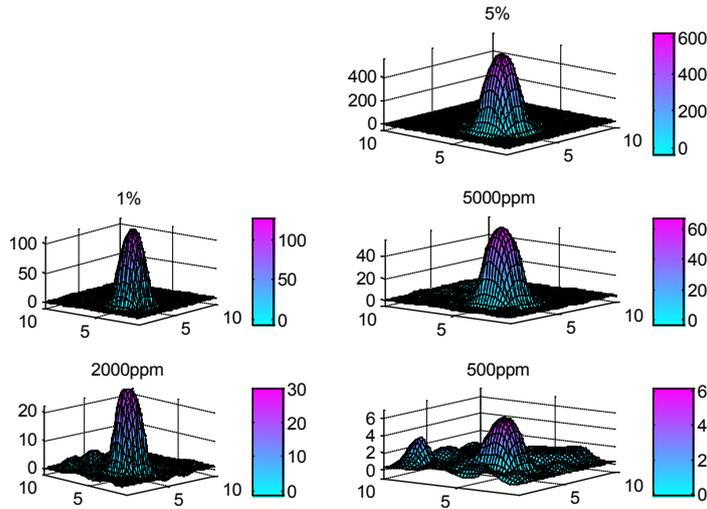


Figure 6. The spatial distribution of filtered-concentration
图 6. 滤波处理的浓度场空间分布曲面

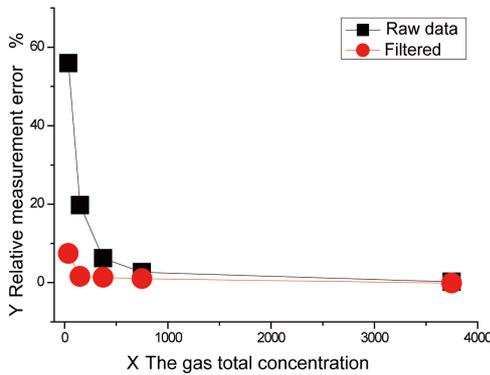


Figure 7. The comparison of relative error between the raw data and filtered
图 7. 相对误差比较结果

4.3. 实验三泄漏扩散方向判别

在 100 个网格中放置一个大气袋,覆盖 4 个网格,其中冲入 100%的甲烷标气,在气袋中心位置处开一个小气孔,模拟天然气管道泄漏,利用手动旋转台对大矩形区域进行分层扫描,逐点扫描 100 次,获得天然气泄漏的甲烷浓度二维空间矩阵。利用数据预处理进行筛选,采用移动最小二乘法拟合动态浓度场分布,本实验验证图像区域分割定位泄漏源,并进行扩散方向判别的效果。

实验研究浓度场曲面重构后浓度场数据区域分割

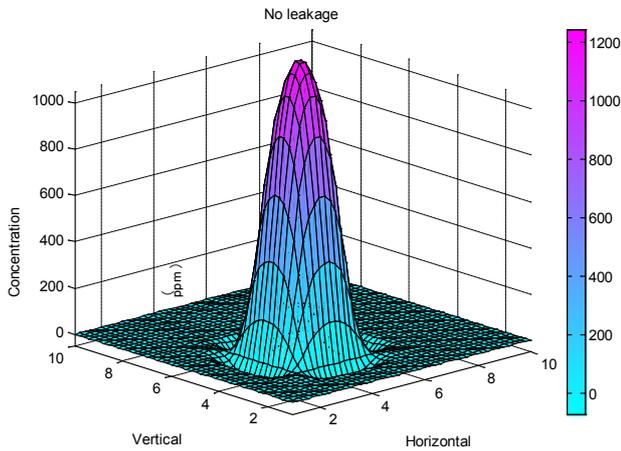


Figure 8. Spatial distribution of concentration before leakage
图 8. 泄漏前浓度场空间分布曲面

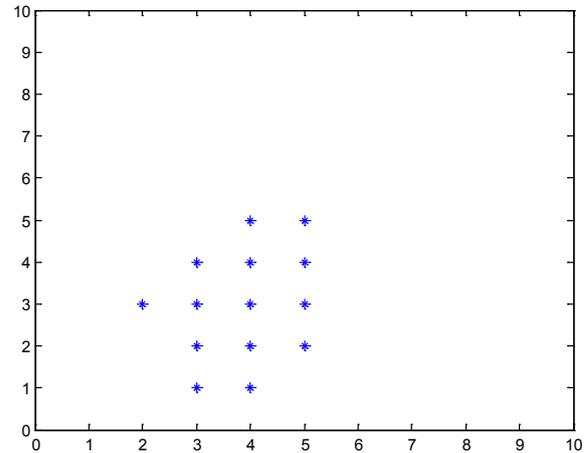


Figure 11. Extreme points within the sub-region
图 11. 子区域内的极值点

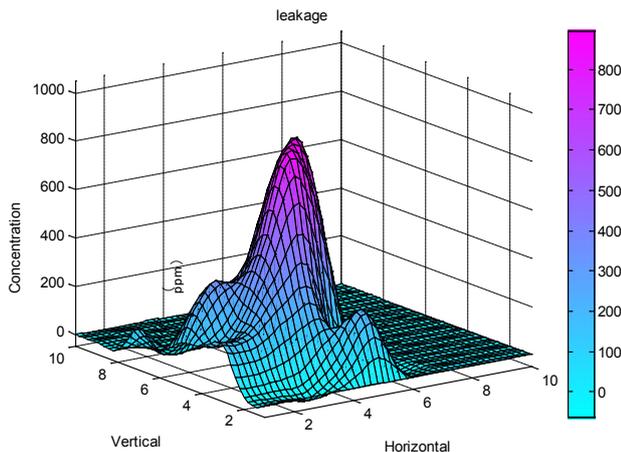


Figure 9. Spatial distribution of concentration during leakage
图 9. 泄漏中浓度场空间分布曲面

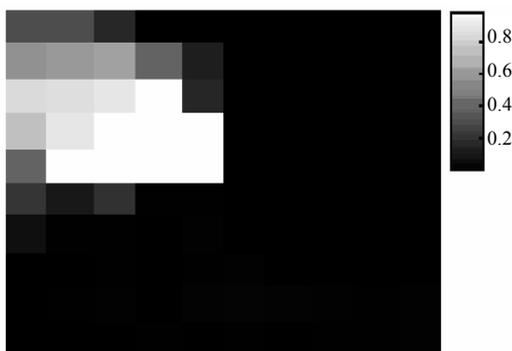


Figure 10. The figure of segmentation during leakage
图 10. 泄漏中的浓度区域分割图

定位泄漏, 并进行扩散方向判别, 确定泄漏源的风向。图 8 是还未发生气体扩散时目标背景浓度场分布曲面, 图 9 是发生扩散后某一时刻遥测到的浓度场分布曲面。

通过区域分割处理后, 如图 10 所示, 浓度值比较大的位置处相对灰度值也比较大, 通过该分割图可以大致判断气体泄漏的位置和扩散方向。为了精确定位, 利用公式 9 计算得到如图 11 所示。最后比较定位泄漏坐标为(4,3), 浓度值为 847 ppm, 根据子区域极值坐标分布情况, 判定为由(4,3)→(3,1)方向扩散, 根据坐标位置判定方向是东西方向偏南 20°, 而实际的方向为东南偏西 50°, 方向判别结果和实际偏差 20°, 与实际基本吻合。

5. 结论

本文介绍移动遥测天然气泄漏系统中的泄漏定位算法。泄漏浓度场拟合重构前, 浓度数据的预处理提出了组合判别, 确定泄漏浓度元素, 通过再次组合判别消除奇异值, 最后利用移动最小二乘法进行浓度场空间曲面拟合重构, 通过曲面积分获取泄漏总量, 减少泄漏总量获取的相对误差, 利用曲面分割处理技术对扫描浓度数据特征进行分析, 可以准确的定位泄漏源, 同时判别的泄漏气体扩散方向与实际基本吻合。实验结果验证了本文所介绍的泄漏定位算法比较适合激光移动遥测天然气泄漏定位、泄漏扩散方向判别及泄漏总量获取。

6. 致谢

感谢国家高技术研究发展技术(863 计划)项目的支持, 项目名称: 长输天然气管线泄漏机载激光监测关键技术研究(No.2008AA06Z208)。

参考文献 (References)

- [1] 王大庆, 高惠临. 天然气管线泄漏扩散及危害区域分析[J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 120-122.
- [2] B. van Well, S. Murray, J. Hodgkinson, et al. An open-path, hand-held laser system for the detection of methane gas. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(6).
- [3] S. Zhang, W. Q. Liu, Y. J. Zhang, et al. Gas Leakage monitoring with scanned-wavelength direct absorption spectroscopy *Chin. Chinese Optics Letters*, 2010, 8(5): 443-446.
- [4] 刘福保, 李卫国. 散乱数据曲面拟合的局部加权最小二乘插值方法及权函数的选择讨论[J]. *数学理论与应用*, 2009, 29(1): 113-117.
- [5] 张晶. 基于局部和全局灰度拟合的图像分割算法[J]. *科技信息*, 2010, 35: 860-862.
- [6] T. Iseki, H. Tai, K. Kimura. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, 11: 594-602.
- [7] X. M. Gao, H. Fan, T. Huang, et al. Natural gas pipeline leak detector based on NIR diode laser absorption spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A*, 2006, 65(1): 133-138.
- [8] X. Zhu, D. T. Cassidy. Electronic subtractor for trace-gas detection with InGaAsP diode lasers. *Applied Optics*, 1995, 34(36): 8303-8308.