

工程硕士学位论文

基于 MATLAB 的液化气体源强反算研究

骆 蓓

哈尔滨理工大学

2015 年 3 月

国内图书分类号: X928.5

工程硕士学位论文

# 基于 MATLAB 的液化气体源强反算研究

硕 士 研 究 生: 骆 蓓

导 师: 蒋永清

申请学位级别: 工程硕士

学 科、专 业: 安全工程

所 在 单 位: 测控技术与通信工程学院

答 辩 日 期: 2015 年 3 月

授予学位单位: 哈尔滨理工大学

Classified Index: X928.5

Dissertation for the Master Degree in Engineering

# **The Inverse Study of the Liquefied Gas Source Intensity Based on the MATLAB**

<b>Candidate:</b>	Luo Bei
<b>Supervisor:</b>	Jiang Yongqing
<b>Academic Degree Applied for:</b>	Master of Engineering
<b>Specialty:</b>	Safety Engineering
<b>Date of Oral Examination:</b>	March, 2015
<b>University:</b>	Harbin University of Science and Technology

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于 MATLAB 的液化气体源强反算研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：骆蓓

日期：

2015 年 3 月 15 日

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文使用授权书

《基于 MATLAB 的液化气体源强反算研究》系本人在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨理工大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨理工大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门提交论文和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨理工大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于

保密 ☐，在 年解密后适用授权书。

不保密 ☒。

(请在以上相应方框内打√)

作者签名：骆蓓

日期：

2015 年 3 月 15 日

导师签名：蒋永清

日期：

2015 年 3 月 15 日

# 基于 MATLAB 的液化气体源强反算研究

## 摘 要

近几十年，化工行业在我国如春笋般迅猛发展，液化气体能源是化工生产中所要用到的燃料、原材料或是加工辅料，它的使用、需求及运输量也再逐年递增。但由于意外导致泄漏的事故时有发生，而类似事故具突发性强，扩散迅速等特点，一旦发生就有可能导致大量的人员中毒或伤亡，造成重大的财产损失。因此，在应急救援过程中，快速获得泄漏源强度和位置信息，准确划分泄漏气体的影响区域，能够在最大程度上减少损失。受影响区域范围的划分，可根据扩散模型(本文采用高斯扩散模型)结合泄漏源强度、气象环境参数等确定出下风向泄漏气体的浓度。因此，快速确定泄漏源强度的是事故应急救援的基础。为此，本文针对液化气体泄漏时泄漏源强反算研究进行了如下工作：

1. 以高斯烟羽扩散模型为理论基础，对不同假设条件下的的液化气体(液氯)泄漏正向泄漏扩散进行了数值模拟。

2. 针对液化气体连续泄漏的特点，选择液氯储罐连续泄漏为例，构建泄漏源强反算并对模型进行求解。利用高斯模型得到气体浓度的计算值，与对应位置处监测器监测到的浓度值间的一定关系作为目标函数。结合单纯形搜索算法使目标函数最优化，确定泄漏气体源强和具体位置信息。

3. 以编程功能强大的 MATLAB 软件为基础，结合 GUI 进行界面设计，根据测量数据与模型公式中的参数估算出源强值，实现基于高斯模型为正向扩散模型的单纯形搜索算法源强反算，并分析在监测数据存在测量误差时，算法的可行性。

本文以液化气体为研究对象，应用 MATLAB 软件对泄漏扩散进行了正向模拟并结合单纯形搜索算法编程实现源强的反算，研究结论作为液化气体泄漏事故的源强反算理论基础，同时也为液化气体泄漏的事故预测和应急救援提供支持。

**关键词** 液化气体；泄漏源；源强反算

# **The Inverse Study of the Liquefied Gas Source Intensity Based on the MATLAB**

## **Abstract**

In recent decades, the chemical industry in rapid development of China such as bamboo shoots, Liquefied gas energy is fuel, raw materials or ingredients in chemical industry, the use, demand and transportation volume of it also increase year by year. But leakage accidents due to the occasionally often occurred, and similar accidents with characteristics of a sudden strong, rapid proliferation. If happend, they would cause a large number of personnel poisoning or death, significant property damage. Therefore, in emergency rescue process, getting the leakage source intensity and location information quickly, dividing the influence of regional of gas leakage exactly, can reduce the loss in the greatest extent. The division of range of the affected area, according to the diffusion model (using the Gauss diffusion model) combining the leakage source intensity, the meteorological environment parameter to determine the concentration of wind gas leakage. Therefore, in this paper, the research work for the leakage of liquefied gas leakage source inversion problem for is as follows:

1. In the Gauss plume diffusion model as the theoretical basis, execute numerical simulation of the liquefied gas under different hypothesis (Liquid chlorine) the leakage of leakage and diffusion of the forward numerical simulation.

2. According to the characteristics of continuous leakage of liquefied gas, choicing the liquid chlorine storage tank continuous leakage as an example, constructioning the leakage source inversion problem and solving the model. Using the Gauss model to obtain the calculation of gas concentration value, and getting a objective function by a certain relationship between concentration at the corresponding position of the monitor. Using simplex search algorithm for

the optimization objective function, determination of gas leakage source intensity and location specific information.

3. By programming the powerful MATLAB software as the foundation, using the GUI for interface design, according to the measurement data and model parameters in the formula to estimate the source intensity value, realization source intensity Back-calculation based on the Gauss model for Simplex search algorithm positive diffusion model, and analyze the existing measurement error in the monitoring data, the feasibility of the algorithm.

This paper uses liquefied gas as the research object, Application of MATLAB software on the leakage and diffusion of forward simulation and combining the simplex implementation source intensity inverse algorithm programming search, the research conclusion as liquefied gas leakage accident source intensity inverse theory basis, but also for the leakage of liquefied gas accident forecasting and emergency rescue support.

**Keywords** Liquefied gas, Leak source, Back-calculation

# 目 录

摘    要.....	I
Abstract .....	II
 第 1 章 绪    论.....	 1
1.1 研究的背景及研究意义.....	1
1.1.1 本文研究的课题背景.....	1
1.1.2 本文研究的课题意义.....	2
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 液化气体泄漏扩散模型研究现状.....	3
1.2.2 泄漏源强反算研究现状.....	5
1.3 本文的主要研究内容.....	6
第 2 章 源强反算的基本理论和方法.....	7
2.1 液化气体泄漏的特点.....	7
2.2 气体的扩散理论和模型.....	7
2.2.1 扩散影响因素.....	8
2.2.2 气体扩散的高斯模型.....	9
2.3 泄漏源强反算方法.....	12
2.3.1 基于概率模型反算方法.....	13
2.3.2 基于优化模型的反算方法.....	15
2.3.3 不同源强反算方法的讨论.....	22
2.4 本章小结.....	23
第 3 章 液化气体泄漏源强反算模拟.....	24
3.1 液化气体泄漏正向扩散模拟及分析.....	24
3.1.1 正向扩散模型的建立.....	24
3.1.2 典型条件下正向模拟结果及分析.....	25
3.2 液化气体泄漏源强反算模型的构建及求解.....	28
3.2.1 反算模型的建立.....	28
3.2.2 反算模型的求解.....	28
3.2.3 监测点的选取.....	31
3.3 本章小结.....	33



第 4 章 源强反算算法实现应用及结果分析 .....	34
4.1 MATLAB 软件实现反算问题 .....	34
4.1.1 主界面设计 .....	34
4.1.2 单纯形搜索算法反算源强模块界面设计 .....	35
4.2 具体应用及结果分析 .....	37
4.2.1 液化气体连续泄漏的源强及位置反算案例分析 .....	37
4.2.2 液化气体连续泄漏的源强及位置反算数据影响分析 .....	40
4.3 本章小结 .....	42
结论及展望 .....	43
参考文献 .....	45
攻读学位期间发表的学术论文 .....	49
致 谢 .....	50

## 第1章 绪 论

### 1.1 研究的背景及研究意义

#### 1.1.1 本文研究的课题背景

《危险化学品安全管理条例》第一章第三条中指出“本条例所称危险化学品，是指具有毒害、腐蚀、爆炸、燃烧、助燃等性质，对人体、设施、环境具有危害的剧毒化学品和其他化学品”。

近年来，化工行业在我国如春笋般迅猛发展，液化气体能源是化工生产中所要用到的燃料、原材料或是加工辅料，它的使用、需求及运输量也再逐年递增。在25℃、101kPa条件下，存在的液化气体能源有液化天然气、石油气；液氯、液氨；液氧、液氮、液氩，液化二氧化碳气体等，而这些物质均属于危险化学品<sup>[1]</sup>。由于通常气体液化后体积会变成原来的几千分之一，为了便于贮藏和运输，通常对这些气体介质(如氨气、氯气等)进行加压液化处理。在生产、运输、储存、销售、使用过程中，任一环节发生意外，比如设备存在问题、机器老化、人失误、生产管理不当亦或是不可避免的一些气象环境因素可能会导致液化气体泄漏，而这些气体尤其是毒性强的介质有可能会被释放到大气中去，泄漏下风向如果没有及时疏散或者未采取有效防护措施的人员会发生中毒。

同时社会中存在大量的液化气体能源，经常发生易燃易爆毒性强的介质泄漏的事故，危害性也在不断增强。在泄漏发生后，泄漏气体的影响区域不能够准确划分，没有及时获取疏散距离等，很容易导致危险区域内人员错过最佳的救援时机，给抢险救援工作带来极大的困难。因此，能否及时有效地确定泄漏点的源强和位置，很大程度上影响着应急救援的效率<sup>[2-3]</sup>。例如：2013年8月31日，发生在位于上海市宝山城市工业园区内(丰翔路1258号)的上海翁牌冷藏实业有限公司发生液氨泄漏事故，对于泄漏点强度及位置，应急救援人员在4小时后才得以确认，事故共造成15死25伤。直接原因是液氨管道发生破坏，导致泄漏发生。同时在事故发生后，泄漏源位置和强度未能及时确认，在救援过程中，求援不力也是导致损失严重的原因。又如，2005年3月29日18时50分，发生在京沪高速上的一起重大交通事故，一辆运输液氯的储罐车在江苏淮安段大

概一百千米位置处爆胎致使多辆车发生连环相撞，造成储罐内液氯大量泄漏，在应急救援中，工作人员无法及时获得有效的泄漏源位置和强度等信息，导致受影响的范围无法确定，只能紧急疏散群众15000余人<sup>[4]</sup>。此次事故共造成28名村民中毒死亡，350人住院治疗，270人留院观察。

在处理诸如此类突发性液化气体泄漏事故中，首先要解决的是应急疏散人员和转移重要财产。目前，我国在参照其他国家的先进经验的基础上，建立了一系列相对比较完善的应急管理组织体系，将主要职能集中到某一特定的部门，在处理突发事件(如液化气体泄漏等)的应对过程中，协调好各部门之间的关系，联合应对，同时建立好分级管理体制<sup>[5-7]</sup>，在各职能部门的工作中，将应对突发事件(如液化气体泄漏等)的应急工作重点强调以及执行。但是在应对突发事件(如液化气体泄漏等)的应急工作时，对于疏散距离的确定却没有进行详细的说明<sup>[8]</sup>。在类似事故的救援过程中，由于没有准确的疏散距离，决策部门在确定影响区域，下达救援命令时，很多时候是根据部门统计的数据或者以往的经验决定。但是这种救援方法有很多弊端，不容易准确地判断事故的影响范围，受危害的区域或是变小或是夸大。若影响范围判断的不够大时，导致大量的人员中毒和经济损失；而判断夸大时，则在救援的紧急情况下，消耗一些本不用的人力财力物力，造成社会资源的浪费。所以，在应对突发性液化气体泄漏事故的应急工作中，当前亟待解决的问题是如何确定应急疏散范围，而确定泄漏源的源强信息是解决此问题的关键。

### 1.1.2 本文研究的课题意义

本文针对液化气体泄漏的源强反算研究。主要包括气体的扩散模型以及泄漏源源强的反算。如何在液化气体泄漏事故中快速准确的判断影响范围的关键是气体的扩散模型。气象数据(如风向、风速、大气湍流、大气稳定度等)以及准确的源强信息等需要在模型的应用中确定。而在诸如此类泄漏事故发生后进行应急救援时，如何在不确定泄漏强度或是泄漏速率的情况下确定是我们需要解决的首要问题。下风向的浓度数据需要通过设置或者模拟传感器来检测，检测结果进行反向求解源强信息可确定受影响区域的浓度和范围。

确定泄漏源位置和强度是液化气体泄漏事故应急救援的基石，开展这一领域的研究将具有其重要性和紧迫性。面对突发的液化气体能源泄漏事件，尤其是毒性强介质的泄漏，实时准确的获取泄漏源具体位置和强度是解决此类问题的关键。突发情况以及信息缺失的有限条件是液化气体能源泄漏事件存在的普

遍问题，然而在泄漏源信息都是未知的条件下，相关部门需要在最短的时间内进行决策，进而确定泄漏的影响范围，划出相应的应急疏散区域和安全距离。所有这些无不依赖于泄漏源位置和强度。在突发情况下的液化气体泄漏的源强反算研究是本文的主要研究内容，其结果可为应急响应预案提供依据，使应急求援速度大大提高，人员伤亡和财产损失可以降至最低。

## 1.2 国内外研究现状

当液化气体发生泄漏事故时，对周围居民、环境将构成重大威胁。这就要求应急求援部门及时确定泄漏扩散后中毒伤害范围，及时提供求援避险路线，而这些都需要依靠泄漏源源强大小及位置信息的确定。

在研究液化气体能源泄漏事故反算研究中包括气体扩散(正向模拟)和泄漏源源强的确定(反向计算)两部分。在正向模拟中气体扩散模型选择不适合，影响泄漏区域确定的准确度；在反向计算中反算方法选择有误不适合模拟情况，影响应急工作中，救援方案的编制。因此，研究这两部分非常有必要。

### 1.2.1 液化气体泄漏扩散模型研究现状

目前，国内外专家学者对液化气体泄漏扩散模型的研究主要体现在两方面：数学模型研究和计算机仿真模拟。

#### 1. 基于数学模型研究

数学模型是一种在发生泄漏事故中气体扩散研究的重要方法，因为具有耗时少、使用成本小、风险较小而且实现程度高等优点，得到广泛的应用。根据气体性质可将模型分为非重气扩散模型和重气扩散模型。非重气扩散表现在泄漏气体的密度或者扩散时与空气中其他气体混合后的混合气体的密度。这两部分密度与空气的密度误差较小时，一些物理作用(如重力、浮力)可忽略不计，空气湍流成为主要的影响因素，高斯模型是最经典和最常用的非重气扩散模型，主要分为高斯烟羽模型和高斯烟团模型，在高斯模型的基础上，国内外专家学者在实际应用中，对非重气扩散模型进行了改进，不断建立新的模型；而重气扩散表现在泄漏时那两部分的密度与空气密度之间误差很大，唯象模型、箱及相似模型以及Three-dimensional流体动力模型是主要的代表模型<sup>[9]</sup>。

在数学模型研究这一领域中，国外的专家学者起步较早，可追溯到二十世纪七、八十年代，在此期间他们提出大量的气体扩散模型，基本上不断地以大规模大量的实验作为依据。而且可根据这些模型的各自优缺点，应用到不同的

实际情况下。例如：国外学者HN S等人<sup>[10]</sup>对几种气体扩散模型和应用范围进行了总结分析，其中箱及相似模型(包括单箱和多箱模型)是基于质量守恒的，它的优点是简化了气象信息，更好的表现粒子的物理、化学性质，而且对气溶胶动力学能够进行很好的处理。当然也存在着一定的局限性，它仅在初始条件设定后，开始模拟箱体的泄漏情况。没有详细考虑导致泄漏的其他因素(如浓度等)的影响。因此，不适合应用到浓度因素容易受风速、风场等特定环境里。高斯烟团模型应用在短时间内的点源泄漏的扩散，高斯烟羽模型应用在连续的点源泄漏的扩散中，高斯模型的使用条件是假设大气均匀，可用于模拟中小尺度上的扩散现象，但是大规模大量的泄漏中模拟气体扩散情况不适用。

国内专家学者在这一领域的研究比国外起步晚，主要根据一些经验和数学积分为基础进行研究计算。例如大连理工大学的丁信伟等人<sup>[11]</sup>对可燃毒性气体泄漏的几种扩散模型进行分析，孙莉等人<sup>[12]</sup>又在此研究基础上归纳总结了高斯模型、BM、FEM3、Sutton等这些模型的特点及各自应用范围。如表1-1所示。

表1-1 比较扩散模型

Table1-1 Comparison of diffusion model

扩散模型名称		应用类型	范围	计算量	难易程度	精度
高斯 模型	烟团	非重气	大规模、瞬时泄漏	较少	较易	较差
	烟羽	非重气	大规模、连续泄漏	较少	较易	较差
BM		非重气或重气	大规模、连续泄漏	较少	较易	一般
FEM3		重气	不受任何限制	大	一般	较好
Sutton		非重气	大规模、连续泄漏	较少	较易	较差

在上述几种气体扩散模型中，因为高斯模型具有随机性强、运算简单、实用性强等特点，加之在一些特定的环境中发生泄漏事故的，完善或改进初始高斯扩散模型后就能模拟气体扩散等诸多问题。所以，国内外学者在实际应用中利用高斯扩散模型或者其改进的扩散模型来模拟液化气体泄漏扩散较为广泛。

## 2. 计算机仿真模拟研究方面

气体泄漏扩散的计算机模拟仿真分为静态离线模拟仿真和动态模拟仿真两大类。其中静态离线仿真模拟里初始参数的输入是由手工操作的，在安全评价中，能够作为定性定量分析的理论基础，但由于其缺乏一定的时效性，很少用于；但是动态仿真模拟弥补了这一缺点，它时效性强且计算及时，适应于应急

救援。针对发生泄漏事故后，气体扩散的事故后果，国内专家学者做了一系列的研究，尤其在有毒气体泄漏后，模拟气体的扩散范围方向上，而且也有了一定的研究成果<sup>[13]</sup>。

钟江荣等人利用C程序语言开发了毒气扩散浓度空间分布的计算程序，由于GIS在进一步编程开发有一定的限制，模拟实现把外部语言动态链接到GIS系统中去，为有毒物质类的重大危险源管理提供了一定的依据，同时也为城市、工业园区或是企业在地震发生情况下发生泄漏后，应急求援过程中提供了有效的手段<sup>[14]</sup>。

邓金华等人使用具有强大数学计算功能和图像处理功能的MATLAB软件，分析危险性化学气体在发生泄漏时，气体的扩散规律，影响范围，并结合高斯烟羽扩散模型进行模拟分析，其结果可作为应急人员在预测空气质量方面的基础<sup>[15]</sup>。

张明广等人在研究HCN泄漏事故中，应用了高斯烟羽扩散模进行分析，模拟了泄漏的HCN气体的扩散情况，得出下风向浓度曲线图，并开发了一系统软件，用于分析HCN等危险性化学气体泄漏的扩散研究，在某城市的应急求援系统中得到验证<sup>[16]</sup>。

将数学模型研究和计算机仿真模拟研究应用到泄漏气体的扩散分析中，预测泄漏浓度为反向计算源强提供理论基础。

### 1.2.2 泄漏源强反算研究现状

在泄漏气体扩散事故模拟中，使用数学模型或计算机仿真手段确定泄漏信息已经相当完善。泄漏源强的具体参数(泄漏源强度大小和具体位置)在已知情况下，气体扩散的影响范围能够较为准确的进行划定。但是，在发生泄漏事故的实际现场，却很难获取这些参数的具体信息。那么，在进行应急救援决策时，就要借助工具监测事故现场泄漏气体的浓度等信息，同时选择合适的反算方法，建立模型，进而模拟出泄漏源的具体信息，再对泄漏事故后果进行具体分析<sup>[17]</sup>。

多年来，国内外学者对泄漏源的反算研究进行了不懈的努力和探索，并取得了一定的成果。在获取泄漏源源强大小及位置信息的反算方法中，通过扩散机理是否已知分为两种方法。

一是已知泄漏气体的扩散机理，它主要是利用设置的传感器或模拟在下风向的监测浓度去反算泄漏源的强度，是在假设通过传感器监测到的各点浓度等

由泄漏源源强大小及位置等信息共同作用的结果，是可以进行直接叠加的，泄漏气体在空气中经过扩散、传输以及化学转化途中，运用传感器监测到的浓度和泄漏源信息之间的关系，从而利用最优化或者次优化的方法对泄漏源反算。当然，也可以通过运算气体扩散模型得出计算浓度，或是利用设置在下风向处传感器监测到的浓度，获得泄漏源的源强及位置具体的信息<sup>[18]</sup>。例如：**Rao**等人总结了源强反算方法，将其归纳为向前模型和向后模型两种方法。向前模型方法是通过数据的多次传输，气体扩散模型的多次执行，经过多次迭代计算，运用Bayes等方法分析模拟出的浓度值与传感器监测到的实际浓度值之间的差异，目的是在不断缩小他们的浓度差。而向后方法是结合传感器接收到的泄漏源信息直接进行逆向计算。是将气体扩散模型与逆向传输数据相结合<sup>[19]</sup>。

二是对于那些未知泄漏气体的扩散机理，则通常采取人工智能的方法对选取的反算模型进行不断的训练和优化，在整个过程中，使反算模型具有更高的准确度和更好的适应性，这种算法能够依靠自身性能推算出泄漏源信息，不管泄漏事故中的有毒气体在何种扩散机理下。例如：**Thomson** 等人将退火模拟算法和模式搜索算法运用到反算中，分别求解源强信息。在运用模式搜索算法时，加入遗传算法，利用其强大的全局搜索能力加快迭代次数，快速获得源强最优解<sup>[20]</sup>。**Allen** 等人利用遗传算法优化气象数据，获取泄漏源信息<sup>[21]</sup>；张九凤等利用粒子群算法进行优化以确定源强<sup>[22-23]</sup>。

### 1.3 本文的主要研究内容

本文的研究主要通过分析、调研文献资料和仿真模拟实现，以液化气体连续泄漏为研究对象，主要包括以下内容：

1. 针对气体泄漏的特点，分析了泄漏气体的扩散模型，分析并总结各种源强反算方法的优缺点及适用条件、适用范围等，为快速准确确定泄漏源强度和位置，做出恰当的应急决策奠定基础。

2. 以液氯储罐连续泄漏为例，模拟不同假设条件下的液化气体(液氯)泄漏扩散情况。利用高斯模型得到气体浓度的计算值，与对应位置处监测器监测到的浓度值间的相对误差作为目标函数。利用单纯形搜索算法使目标函数最优化，确定泄漏气体源强和具体位置信息。

3. 以编程功能强大的MATLAB软件为基础，结合GUI进行界面设计，运用单纯形搜索算法进行源强问题的求解，实现基于高斯模型为正向扩散模型的源强反算，并分析在监测数据存在测量误差时，算法的可行性。

## 第2章 源强反算的基本理论和方法

### 2.1 液化气体泄漏的特点

#### 1. 不确定性，扩散速度快。

液化气体能源泄漏事故具有很强的突发性，很多时候是突然发生泄漏事故的，发生前无征兆。泄漏气体扩散后或与空气中的其他气体发生化学作用，迅速蔓延起来，短时间内可扩散至很远距离。这类事故具有突发性和不确定性，发生事故无法进行准确的预测，所以在发生泄漏事故后，应急救援就显得尤为重要。

#### 2. 毒害性。

大多数的液化气体不是有毒就是易燃易爆，一旦发生泄漏，这些有毒气体，就有可能与人体皮肤进行接触或者被吸入体内，与人体内一些化学物质如蛋白质、氨基酸、酶等发生化学反应，造成体内的细胞结构破坏，很容易影响细胞的正常新陈代谢，造成正常功能破坏或者部分丧失，致使人体中毒。在应急救援过程中要求工作人员快速获得准确的源强信息，尤其是在抑制毒性强的介质快速扩散时，避免造成损失更大时，要求应急人员快速及时地进行抢险工作，制定相对有效的救援措施。

#### 3. 受影响范围大

液化气体能源一般加压以液态形式存储，泄漏后会形成体积巨大的气体量，扩散后影响危害范围相当的大，如果没有及时进行应急疏散，下风向的无防护人员可能会受到不同程度下毒性的伤害，具有很高的致死和致残率，甚至会导致更加恶劣社会影响。

### 2.2 气体的扩散理论和模型

为了实现对泄漏源源强的定位，需要研究泄漏气体扩散的理论知识和在大气中运动的特点，总结其扩散时的相关规律。依据这些规律，选择合适的方法，从而确定液化气体泄漏源的准确信息。

液化气体泄漏时，模拟气体扩散规律及其影响范围的总体流程图如图 2-1 所示。



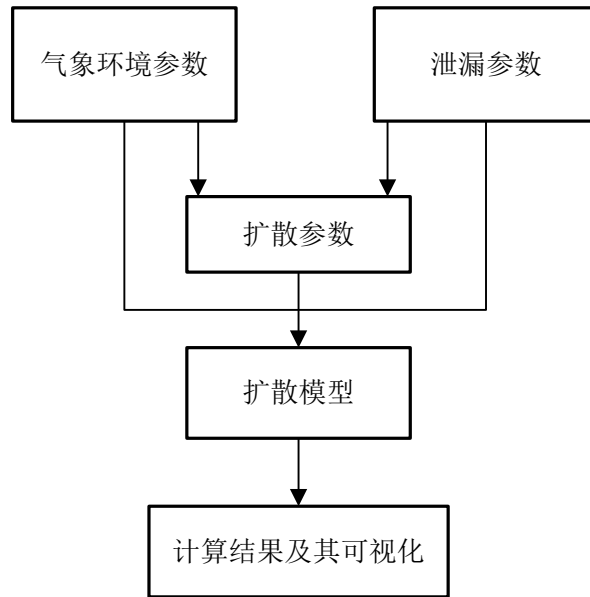


图 2-1 泄漏扩散影响范围的总体结构

Fig. 2-1 The overall structure of influence scope of leakage and diffusion

### 2.2.1 扩散影响因素

#### 1. 气象条件

气象条件是泄漏气体的扩散主要因素，如大气湍流运动、风向和风速、大气稳定度等。同时这些因素也是影响扩散模型的重要参数条件。

大气的湍流运动直接影响泄漏气体在空气中扩散的快慢。湍流运动越强，泄漏气体在空气中旋转的也越强，越容易被稀释。反之，则不易于泄漏气体的扩散<sup>[24]</sup>。

在实际的泄漏事故中，风向一定会影响的泄漏气体扩散方向，当然，风速的大小在很大程度上也影响着泄漏气体扩散的速度。当无风时，泄漏气体以泄漏源为中心向四周慢慢扩散，当风速增加到 1~6m/s 时，泄漏气体扩散的速度也在增大，受影响的区域也再不断变大，风速若再继续变大，地表面上泄漏气体的浓度就会很少。风向、风速一旦发生任一变化，构建反算模型及其求解就会收到很大影响。所以，在模型的构建和求解中，假设气象参数如风速恒定风向是水平的。

大气稳定度影响着空气在垂直方向上的对流程度，也影响着泄漏气体在空气中的扩散情况。大气越稳定，泄漏的气体会在地面附近扩散，不易扩散到高

空,相反,大气越不稳定,泄漏气体越容易扩散,向高空稀释。所以,在模型的构建和求解中,需要根据模拟所选的研究对象相关情况,选择相应的大气稳定度<sup>[25]</sup>。

## 2. 地形条件

地形条件比较复杂,会增大泄漏气体的扩散难度。泄漏气体在山谷、丘陵、高原等不同地貌条件下进行扩散,结果会有明显的不同。地表上的树木、河流、湿地、建筑群等也会对气体产生反射或是吸附等作用,导致泄漏气体的扩散作用有差别;同理,在城市中有大量的建筑群存在,泄漏气体也很难扩散开来。除此之外,泄漏源位置、气体密度等也是影响气体扩散以及建立模型过程的重要因素。

### 2.2.2 气体扩散的高斯模型

目前,国内外专家学者在泄漏气体的扩散模型中做了很多研究,在实际的泄漏事故中,有很多气体扩散模型得到了很好的验证。而高斯模型由于其计算结果与实验数值能较好吻合、加之模型简单成熟,运算量小等特点,得到了广泛的应用。而根据泄漏源不同,高斯烟羽模型用于连续的气体泄漏事故,而高斯烟团模型用于瞬时泄漏的气体事故。

#### 1. 高斯模型适用条件

高斯扩散模型的种类很多,且各自都有其适用的范围和专门的领域。但在选择高斯扩散模型时,前提的使用条件相同。如下所示<sup>[26]</sup>:

- (1) 在模型的使用中需要地形平坦开阔、以地质均匀为最好,各影响参数不由时间而发生变化;
- (2) 此模型适用于小尺度的扩散模拟及其分析,以不超过 10-20km 为最佳;
- (3) 在扩散范围中气体的流动稳定且平直,风速、风向等气象因素无显著变化;
- (4) 在液化气体泄漏扩散时,泄漏的气体不会与空气中其他气体混合或是发生任何化学反应,在扩散范围中也不会发生降水或者空气沉降等衰减的作用影响;
- (5) 泄漏气体扩散时与大气的运动趋势相同,不会发生任何相对运动,沿着地表面附近扩散时,不会发生任何吸附作用,会全部反射;
- (6) 地面假设水平,以地面点源或高架点源为坐标原点,设置坐标系。

## 2. 高斯扩散模型公式

在边界没有限制的空间中建立如图 2-2 所示的三维坐标系，坐标原点 0 处为泄漏点源  $Q$ ，风向沿  $x$  轴正向。

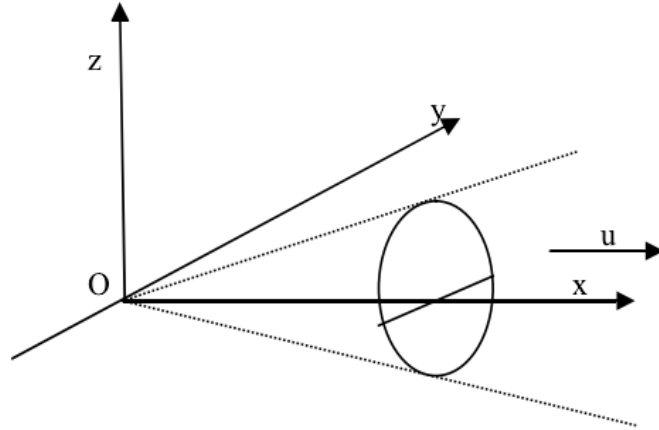


图 2-2 液化气体泄漏点源的扩散示意图

Fig. 2-2 Schematic diagram of liquefied gas leak point source diffusion

将气流的截面视为椭圆。定义短轴长  $2b$ ，长轴长  $2a$ ，则浓度为<sup>[27]</sup>：

$$c = \frac{Q}{\pi u a(x) b(x)} \quad (2-1)$$

式中， $a(x)$ ， $b(x)$  是长轴、短轴方向上的扩散范围； $ua(x)b(x)$  反映的是大气运动的扩散水平。

气体扩散流动的坐标图如图 2-3 所示。

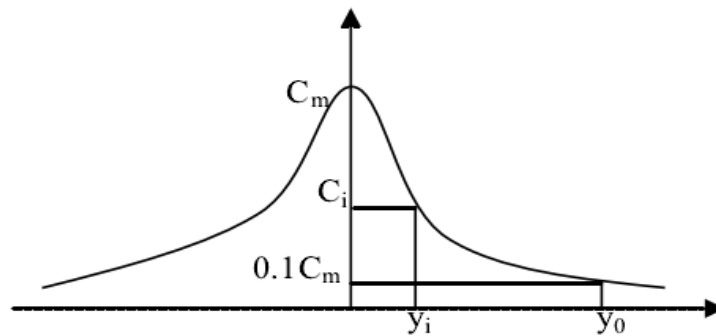


图 2-3 扩散流动的坐标图

Fig. 2-3 Diffusion flow graph

从图 2-3 可以发现泄漏气体浓度沿着  $y$  轴扩散的，与正态分布符合。泄漏气体的扩散浓度函数为：

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(y-u)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-2)$$

式中， $\sigma$  为标准偏差； $u$  为不确定的参数。

扩散是沿  $y$  轴方向与  $z$  轴方向的正太分布，若随机变量在  $y$  轴方向上与  $z$  轴方向上是相对独立的， $y$  轴方向上的与  $z$  轴方向上的的正态分布的函数乘积为扩散沿着  $x$  轴方向上的密度分布，如图 2-4 为点源连续扩散示意图<sup>[28]</sup>。

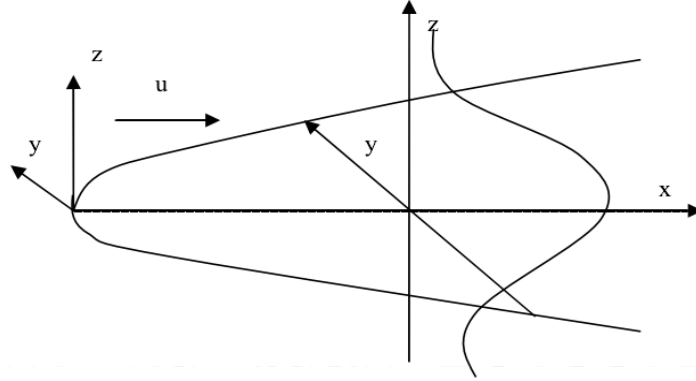


图 2-4 点源连续扩散示意图

Fig. 2-4 Schematic diagram of continuous point source diffusion

则点源扩散下风向的密度函数为：

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

式中， $C(x, y, z, H)$  为泄漏气体在  $(x, y, z)$  点处的质量浓度， $\text{mg}/\text{m}^3$ ； $Q$  为源强，是单位时间内点源泄漏的气体量， $\text{g}/\text{s}$ ； $u$  为风速， $\text{m}/\text{s}$ ； $x, y, z$  为预测点坐标， $\text{m}$ ； $H$  为有效源高， $\text{m}$ ； $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别为  $x, y, z$  方向上的扩散参数， $\text{m}$ 。

扩散参数可表示为<sup>[29]</sup>：

$$\sigma_x = \gamma_1 x^{\alpha_1}, \sigma_y = \gamma_2 x^{\alpha_2}, \sigma_z = \gamma_3 x^{\alpha_3} \quad (2-4)$$

高斯扩散模型中根据风速、日照强度等将大气稳定度分为六个等级，在式 (2-4) 中的参数  $\gamma_1, \gamma_2$  和  $\alpha_1, \alpha_2$  可从相应的大气稳定度与扩散参数<sup>[30]</sup>相应的关系表中查得。

以下几个计算公式，是由式(2-3)推导得出的，表示在不同条件下的气体扩散模式。

(1) 连续泄漏时，地表附近处的点源浓度的计算公式。

令式(2-3)中  $z=0$ ，得到地面浓度公式为：

$$C(x, y, 0, H) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2-5)$$

(2) 连续点源在地面轴线处的浓度计算公式。

以  $x$  轴为对称的地面浓度，在  $x$  轴线上取到最大值，会逐渐向  $y$  轴方向上减小，由公式(2-5)中令  $y=0$  时，得到公式：

$$C(x, 0, 0, H) = \frac{Q}{\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (2-6)$$

(3) 连续点源在地面扩散的高斯计算公式。

由公式(2-3)中取  $H=0$  得到地面源浓度的计算公式：

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{z^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \quad (2-5)$$

(4) 高架点源的地面最大浓度计算公式。

$$C_{\max} = \frac{q}{\pi u H^2 e} * \frac{\sigma_z}{\sigma_y} \quad (2-6)$$

$$\frac{\sigma_z}{x} = x_{c_{\max}} = \frac{H}{\sqrt{2}} \quad (2-7)$$

## 2.3 泄漏源强反算方法

在液化气体泄漏事故中，实时准确的确定泄漏源具体位置和强度大小能为应急救援过程中决策制定和确定紧急疏散距离打下夯实的基础。

根据算法自身的特点，可将现有的源强反算方法分成两类：基于概率统计理论方法和基于优化理论方法。基于优化理论方法包含三种算法：分别是直接优化、间接优化和智能优化方法。基于概率统计理论方法主要是根据大气扩散模型或计算机模型对泄漏源进行定量分析，从而反算出泄漏源的位置和强度等具体信息。而优化理论方法是根据气体扩散规律建立泄漏源与实际监测数据之

间的关系，选择优化方法进行不断地调整得出最优解，进而反算出泄漏源的位置和强度等具体信息。

张建文<sup>[31]</sup>等人将现有的主要研究方法归纳总结，如图 2-5 所示。

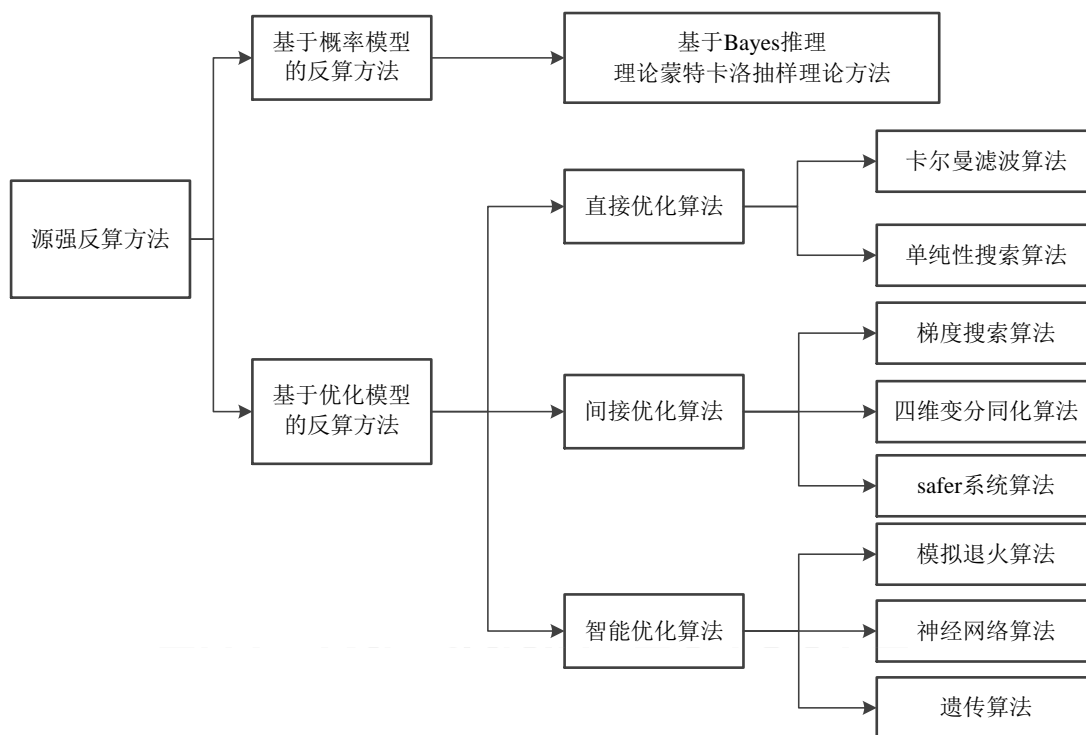


图 2-5 源强的主要反算方法

Fig. 2-5 Main methods of source intensity inversion

### 2.3.1 基于概率模型反算方法

基于概率模型反算方法中的代表算法贝叶斯推理反算方法是在基于 Bayes 基础进行误差计算，模拟出的浓度值与传感器监测到的实际浓度值之间的差异。后验概率被假定为需要的先验分布参数，并结合所获得的观测数据的参数的分布，并通过 MC 采样(Monte Carlo 方法)或 MCMC(Markov chain Monte Carlo)方法来获得参数的估计，但是结果不是一个单一的解，构成量化解结果的不确定性。倾向于改进研究方法，比如引入一些伴随方程或是添加动态实时反演计算。

在源强反算中，概率模型反算方法基于贝叶斯推理为基础，其公式为<sup>[28]</sup>：

$$P(Q|C) = \frac{P(C|Q) \cdot P(Q)}{P(C)} \propto P(Q|C) \cdot P(Q) \quad (2-8)$$

在公式(2-8)中,  $Q$  为泄漏源的参数值, 是反算过程中的多维未知变量;  $C$  为设置的传感器监测到的数据;  $P(Q)$  为泄漏源参数项中的先验分布, 是根据已知信息进行的判定;  $P(C|Q)$  为监测数据模拟的概率密度函数, 它是未知参数与实际监测到的浓度数据进行拟合得到的似然函数;  $P(Q|C)$  为泄漏源参数值的后验概率密度函数, 在泄漏源参数值  $Q$  的后验密度函数分布后, 对其参数进行充分的估计, 同时考虑到在气体扩散的正向模拟与设置在下风向的传感器中的性质的误差, 进而实现泄漏源位置与泄漏源强的反算<sup>[32]</sup>。

因为正向模拟的计算量比较大, 如果源参数项  $Q$  是多维未知变量时, 整个参数空间进行多维积分计算后验分布是十分困难的。故通常采用 MCMC 抽样方法, 通过合理的构造转移概率, 直接产生一组分布概率为后验概率的随机抽样点, 这些抽样点构成一条 Markov 链, 其收敛后的静态分布即为所需的后验分布。

基于贝叶斯推理的 MCMC 实现的具体流程如图 2-6 所示。

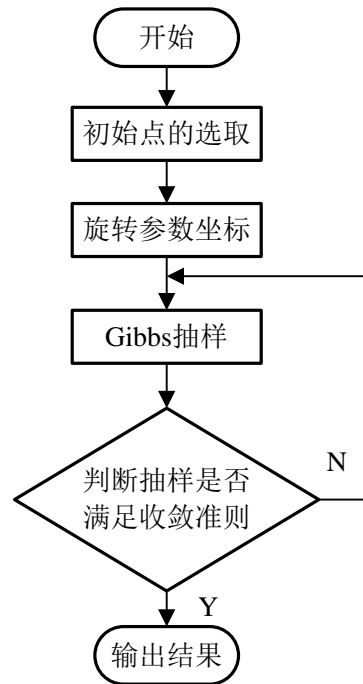


图 2-6 基于贝叶斯推理的 MCMC 实现过程

Fig. 2-6 Implementation process Based on Bayes-MCMC

清华大学工程物理系公共安全研究中心的郭少冬，张辉<sup>[34-35]</sup>等人将基于 Bayes 推断理论的 MCMC(Markov Chain Monte Carlo)抽样方法，分别应用到了室内污染物扩散源的反演及室外有毒气体泄漏源的识别定位问题当中，这两次研究都是通过对浓度场的伴随方程进行数值求解，并结合室内或者城市中分布的传感器测量气象或者扩散数据，建立似然函数，代入气体扩散模型中计算。在应用于室内污染物扩散源的反演中的结果表明，对污染物的位置、强度的后验概率计算，反演结果与真实的污染源参数吻合；在应用于室外有毒气体泄漏源的识别定位中的结果同样表明，反演结果与真实的泄漏源参数吻合。同时在两次应用中都讨论了传感器测量误差的概率分布对反演结果的影响。得到：误差概率会显著影响计算效果，概率分布越平坦，污染源或泄漏源反算信息的不确定度越大。

### 2.3.2 基于优化模型的反算方法

优化方法的宗旨是：将算法中的参数等转化到求解目标函数的最优化问题上来，同时不断以某种方式或手段对算法中的参数进行优化求解，将其最优值并代入目标函数，达到源强的反算。

下面对直接最优化算法的代表算法单纯形搜索算法，间接最优化算法的代表性算法 safer 系统反算法，智能算法中遗传算法和神经网络算法反算法及遗传算法改进的神经网络算法进行详细的描述和介绍。

1. 单纯形搜索算法 国外学者 R.Mead 和 J.A.Nelder<sup>[36]</sup>在 1965 年第一次提到单纯形搜索算法。它是一种无约束的直接最优化算法。在求解非线性多元性函数及无约束最小化极值等问题中效率非常高，且行之有效。

建立单纯形是算法首先要解决的问题，也是整个算法的核心内容。那所谓的单纯形就是指在  $n$  维的空间内构建的凸多面体，这个凸多面体具有  $n+1$  个顶点。在定维空间  $E^n$  中建立好一个单纯形，然后求出  $n+1$  个顶点上的函数值，使之逼近极小点，在最高点也就是顶点的值称为最大函数值，而最低点也就是谷点的值称为最小函数值。在确定好顶点值后，将数值代入到所要求解的目标函数中，确定出最高点和最低点的函数值，然后再通过扩展、反射、压缩等方法，可只使用其中一种方法也可多种方法同时使用，求出最好或者次好的一个点的函数值，将最高点的值取代，建立起新的单纯形。

单纯形搜索算法流程如图 2-7 所示。



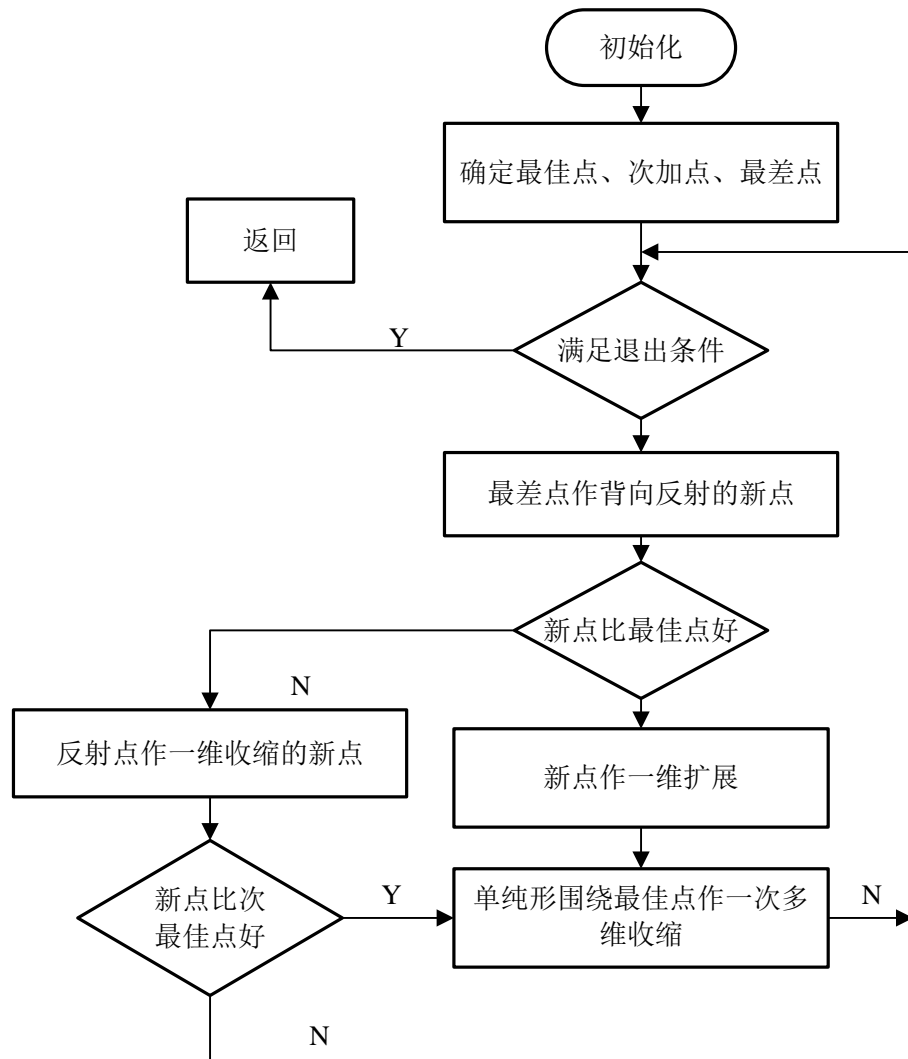


图 2-7 单纯形算法流程图

Fig. 2-7 Simplex algorithm flow chart

基于单纯形搜索算法反算源强具体内容在第三章中详细介绍。

2. 基于 safer 系统方法反算源强 基于 safer 系统方法<sup>[37]</sup>是用一种比较系统的方法计算泄漏源信息，它主要利用设置传感器收集泄漏附近的浓度信息。在泄漏点下风向处安装移动式的探测设备(如探测车、探测机器人等)或是设置固定的浓度传感器。这些监测装置主要用于收集泄漏点附近的实时定位和记录时间对应的泄漏浓度，然后再结合当时的气象数据(如风速、风向等)，这些数据将被上传到计算机网络中心系统地进行分析处理<sup>[38]</sup>。

利用 safer 系统反算源强的基本流程如图 2-8 所示。

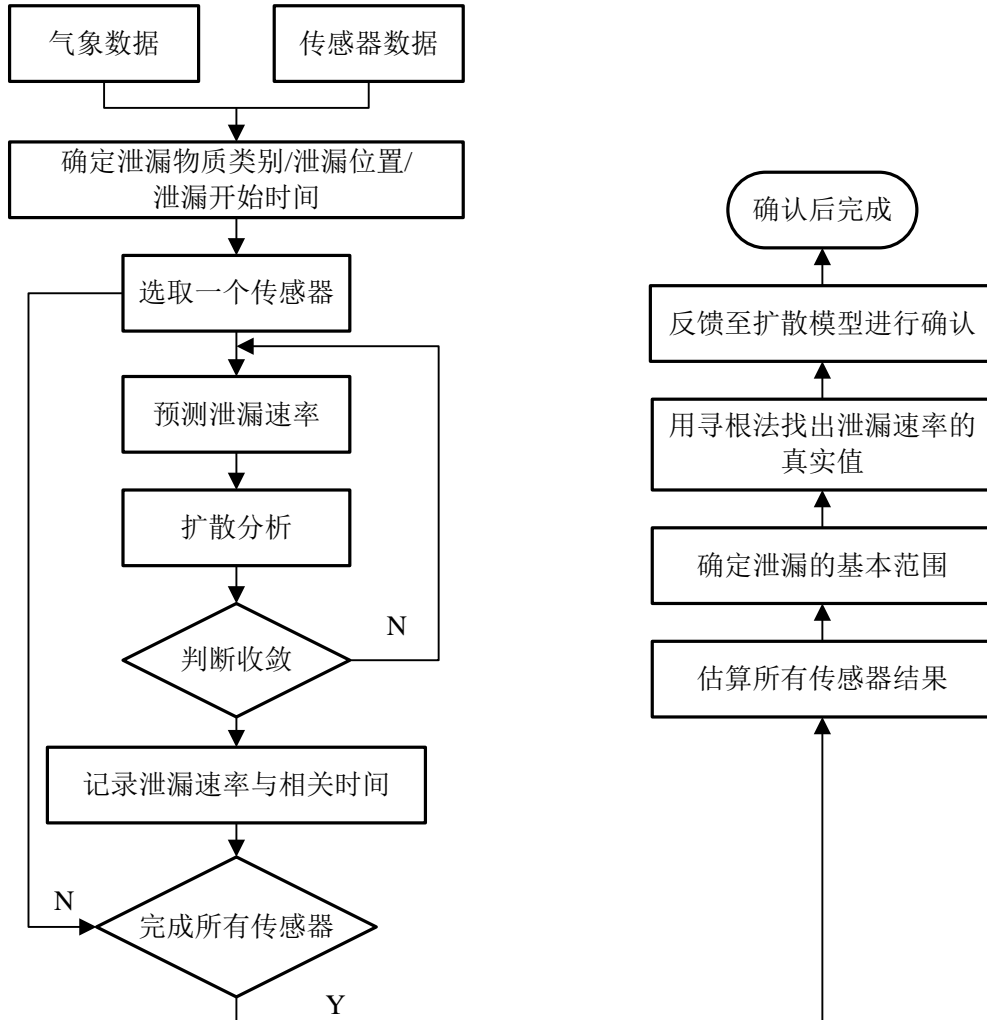


图 2-8 safer 系统方法反算源强流程图

Fig. 2-8 Flow chart of source intensity inversion based on safer system method

运用 safer 系统方法反算源强，具体过程如下：

(1) 系统将计算设置的传感器收集来的泄漏气体浓度信息和当时的气象数据，对泄漏气体的泄漏时间和位置进行初步确定。

(2) 假定一系列的源强值，系统会基于泄漏时间和位置的估算信息，结合相应的气体扩散模型计算出的浓度，若其中传感器收集的数据与计算出的数据误差较小，这说明这个值就是相对正确的源强值，若误差比较大，则还需要继续计算，直到相对正确的源强值计算出来。

(3) 这样就建立了泄漏气体源强信息的基本范围, 接着通过假定定位, 以及牛顿-拉夫逊法寻根(root-finding)方法来计算源强信息(泄漏速率、泄漏量等)的真实值, 得出相应的时间关系, 同时对确认和核实的源强值进行相应计算, 再一步步反馈至选择的气体扩散模型中, 直至完成整个确认泄漏源的计算过程。

**3. 基于遗传算法反算源强** 遗传算法是由 Holland 于 70 年代初由提出, 是一种受自然生物进化适者生存的规律启发的仿生算法。遗传算法具有不用在过程中求导、不用限定函数的连续性、概率优化、全局收敛性、不依赖于初始值、它可以处理多维参数以及不限于内在的隐含并行性等优点。在反算研究中得到了广泛的应用, 在遗传算法中, 首先随机产生一些种群参数作为初始参数, 再通过不断地选择操作、相互交叉操作、或者种群变异操作等, 在某种特定的概率下对各个种群个体一步步地进行优化<sup>[39]</sup>。

运用遗传算法进行源强反算, 具体步骤如下:

(1) 进行初始化操作。需要反算源强的参数有泄漏气体的强度  $Q$ , 设置的初始位置  $x_0, y_0, z_0$ ; 在每个种群中都有一个  $(Q, x_0, y_0, z_0)$ , 这样进行搜索优化成多维参数模式。要确定二进制编码中各个参数的变化波动及影响范围。就需要在源强大小和具体位置处用数字进行实时编码, 这样就会少了很多限制, 使编码过程得到了简化, 同时也减少了解码步骤。但是在实际应用中, 设定各个参数的变化波动及影响范围时, 往往是通过操作者的主观意识或者前人的经验进行操作, 来达到每个种群个体的初始化。

(2) 选择合适的气体扩散模型, 在第一步中产生的初始化种群与实时的气象参数数据相结合, 代入模型中, 得到各监测点的计算浓度, 并与实际监测浓度作对比, 确定出目标函数。

(3) 确定每个种群个体的适应值。通过最优化方法找到最小的目标函数值。用遗传算法反算源强过程中, 若种群个体适应值较大, 很容易传递至下一代的种群; 当目标函数值变小时, 适应值反而会变大, 监测的真实浓度与计算出的浓度之间的误差则会随之变小, 该适应值与目标函数成反比, 得到(2-9):

$$f(Q, x_0, y_0) = \frac{1}{\|C_{measure} - C_{calculation}\|^p} \quad (2-9)$$

(4) 种群个体进行适应值的大小排序, 然后相互交叉操作其中适应值较好的种群个体。也可以进行多点交叉操作, 这样很容易把种群的个体基因化为  $(Q|x_0|y_0|z_0)$ , 不断进行基因位置的交换, 交叉后产生新的种群个体。进而通过

优胜劣汰的方法选择种群个体。

(5) 不断更新种群个体，在满足了迭代的停止标准后为止。选择其中适应值最大的种群个体，在源强反算中，使其成为最优解参数的输出值。

国内学者陈军明等人<sup>[40]</sup>将遗传算法应用到了气象学领域，通过点源扩散浓度的反演排放，建立监测浓度和源强信息的连续，把遗传算法加入进多点源扩散模型中去，成功实现从控制点源浓度的反演泄漏点源源强，为空气中的污染物的总量控制、预报系统以及应急响应工作提供基础依据。

利用遗传算法反算源强的基本流程如图 2-9 所示。

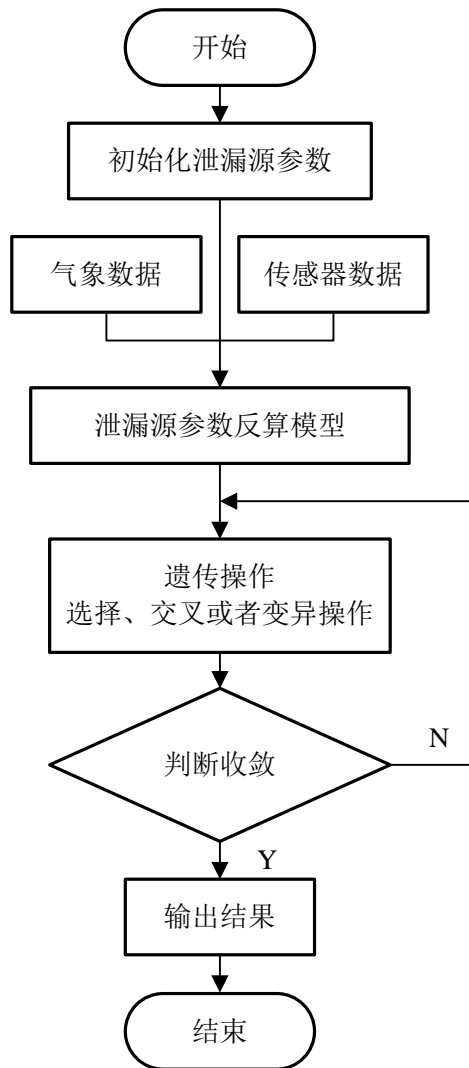


图 2-9 遗传算法反算源强流程图

Fig. 2-9 Genetic algorithm back-calculation of the intensity of source flowchart

4. **基于神经网络算法反算源强** 人工神经网络是指由大量的神经元构成的非线性系统，它在一定程度和层次上模仿人脑神经系统的信息处理、存储及检索功能，因而具有自学习、记忆和计算等能力<sup>[41]</sup>。

人工神经网络众多算法里，前馈神经网络(也成 BP 算法)具有简单的结构、方便训练及使用等特点，成为至今为止应用最广泛的神经网络。它的结构由输入层、隐藏层和输出层三部分组成，隐藏层可以为单层也可以为多层。图 2-10 所表示的是一个三层的前馈神经网络结构图，从图中可以看到这个网络输入层和输出层各有三个节点，隐藏层有四个节点。这些节点就是神经元。权重的差异是通过神经元之间线条的长短来具体体现<sup>[42]</sup>。

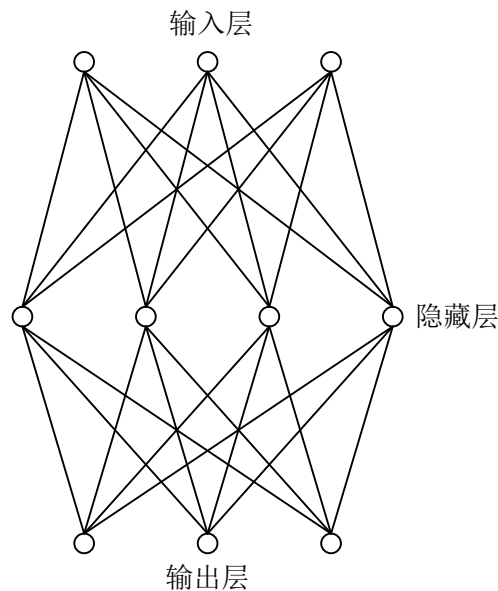


图 2-10 神经网络的结构图

Fig. 2-10 Structure of neural networks

**BP 神经网络进行训练一般分为两个步骤：**

首先从输入层开始，对各层神经元的输入值和输出值进行计算，计算到输出层时停止；然后从输出层开始，对各层神经元及输出的误差进行计算，计算到输入层为止。这样的步骤调节了各层神经元的闭值和每层的权重，最终可以得到接近最优值的输出值。

利用神经网络算法的反算源强分成训练阶段和应用阶段两部分，具体的流程图如图 2-11 所示。

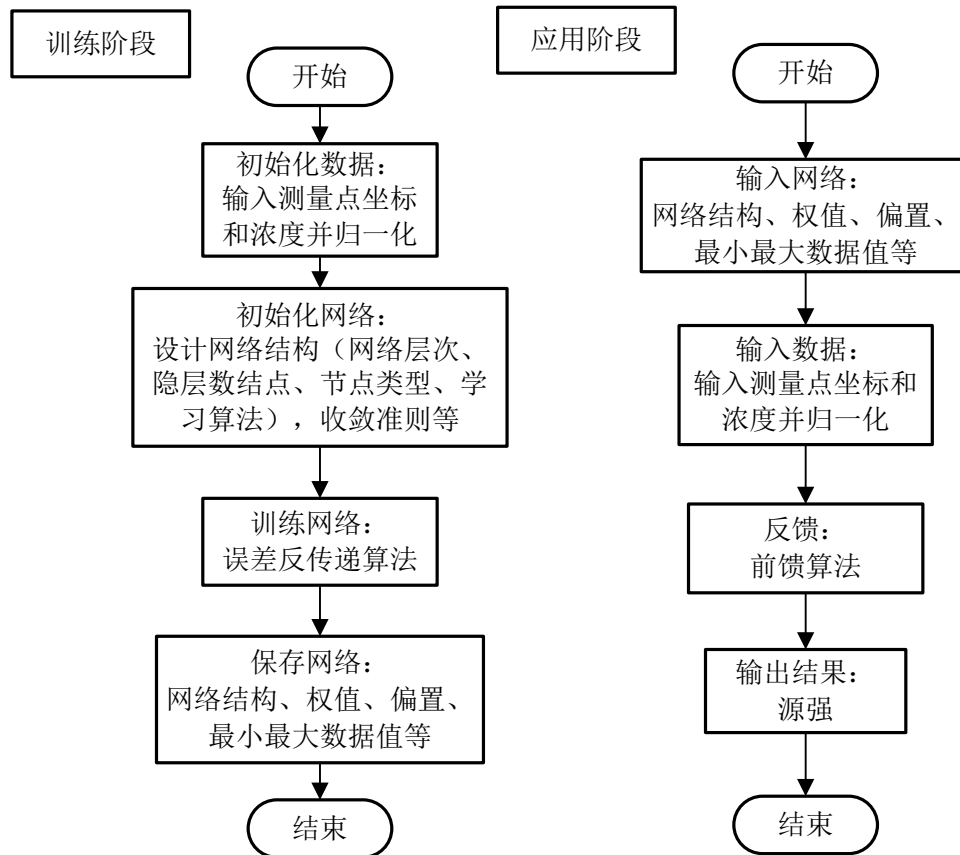


图 2-11 神经网络反算源强流程图

Fig. 2-11 Flow chart of neural network back-calculation of the intensity of source

中国安全生产科学研究院的关磊等人<sup>[43]</sup>泄漏的储罐区选择人工神经网络算法在研究了泄漏源源强的反算，作者建立的神经网络是基于 BP 算法的多层感知器(MLP)结构，在储罐区对泄漏源进行了实时定位，在现场布置了优化的传感器阵列，同时结合计算机模拟仿真手段获得泄漏点浓度场并对建立的神经网络不断进行训练，得到了成功的验证，分析各隐层节神经元、权值以及阈值取值范围与学习因素等对神经网络的性能影响。

**5. 基于遗传算法改进的神经网络算法反算源强** 人工神经网络算法具有流程简单，思路清晰等优势。但也存在很多不足，比如收敛的速度慢，这是因为在寻优过程中，人工神经网络算法的一些参数如权值等在训练中被设置在了多维的空间内，需要花费大量时间进行搜索，得到的最小值会是局部的<sup>[44]</sup>。而遗传算法具有全局搜索能力强、对问题的种类有很强的鲁棒性等优点。正好弥补

了人工神经网络算法的不足，在很多领域的应用中，将遗传算法与神经网络算法巧妙地联合起来，在一个较大的空间内找到最优权值和偏置参数，再利用适当的人工神经网络算法进行优化<sup>[45]</sup>。实验表明，结合遗传算法对神经网络算法进行训练，有助于神经网络收敛到具有较好性能的权重参数。利用遗传算法改进的神经网络算法训练流程图如图 2-12 所示。

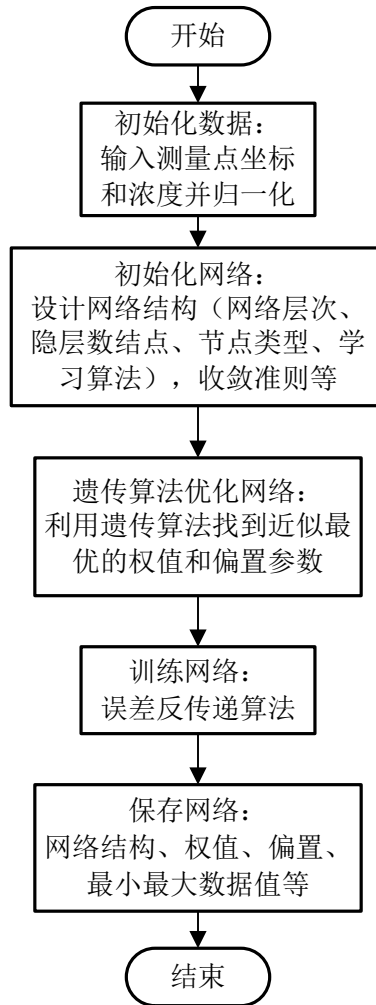


图 2-12 基于遗传算法改进的神经网络训练流程图

Fig. 2-12 Flow chart of neural network back-calculation based on genetic algorithm to improve

### 2.3.3 不同源强反算方法的讨论

在应对突发泄漏事故的应急工作中，可通过多种反算方法进行泄漏源的定

位，例如在上节介绍的源强反算方法，当然针对不同的泄漏事故特点，算法具有一定的适用条件和适用范围，在实际应用中，也会存在一定缺点和局限性。

概率模型反算方法是在基于 Bayes 基础进行误差计算，模拟出的浓度值与传感器监测到的实际浓度值之间的差异，需要事先统计大量的数据，各个参数还需提前设定好其先验分布。可用于长期监测，不适用于应急管理；

单纯形搜索算法是一种无约束的直接最优化算法。在求解非线性多元性函数及无约束最小化极值等问题中效率非常高，且行之有效。适合变量在多维条件下的优化问题；

基于 safer 算法反算源强的步骤较多，而且操作也比较繁琐。算法中虽然有如何进行源强定位的步骤流程，但过于简单，要是应用到实际的应急救援过程中，必须与其他反算方法相结合；

遗传算法具有不用在过程中求导、不用限定函数的连续性、概率优化、全局收敛性、不依赖于初始值、源强准确性高等优点。实际应急救援过程反算源强，遗传算法速度能到应对救援响应的要求，但在探索新空间时，它的能力有限，目标函数的最优解始终在局部范围内；

神经网络算法无需已知泄漏的扩散机理，无需假设源强与浓度之间的数学关系式，只需针对训练数据学习二者之间的关联关系；训练阶段需要测量大量实际数据，同时需要一定时间来累计数据；训练完成后，反算源强无需搜索，只是计算，速度较快。但却难以利用一般的多项式来模拟源强与距离、风速等泄漏事故中存在的较为复杂的关系。用遗传算法优化神经网络改进变化不大。

## 2.4 本章小结

本章分析了在液化气体源强反算要解决的一些基础性问题，液化气体泄漏的特点、泄漏气体的扩散模型、源强的反算方法，理清了研究问题。主要内容小结如下：

1. 总结了液化气体泄漏的特点；
2. 介绍气体扩散的影响因素包括气象条件、地形条件及泄漏源位置等，并对泄漏源反算研究中常用的高斯模型进行具体介绍；
3. 介绍了几种源强反算方法，具体介绍了基于 Bayes 方法反算源强方法，单纯形搜索算法、safer 算法、遗传算法、人工神经网络算法以及遗传算法改进的人工神经网络算法进行泄漏源定位的过程，并总结了各种源强反算方法的优缺点及适用条件、适用范围等。



## 第3章 液化气体泄漏源强反算模拟

本论文研究源强反算问题，条件限定为单一泄漏源。对于液化气体泄漏扩散的源强反算过程分为气体扩散分析(正向模拟)和泄漏源源强的确定(反向计算)两部分。选择高斯扩散模型进行正向模拟，反向计算转化成求解最优化问题。

### 3.1 液化气体泄漏正向扩散模拟及分析

#### 3.1.1 正向扩散模型的建立

为了表现泄漏气体的扩散规律，在整个扩散途中，将泄漏气体看做流体的运动。在源强反算研究中，通常简化模型来方便计算，高斯模型就是实际应用中最为常见的简化模型。而 Pasquill-Gifford 模型是最常见的一种高斯扩散模型。在本节的研究中选择高斯扩散模型，模拟泄漏影响区域和下风向的气体浓度。

假设泄漏源位于坐标 $(x_0, y_0, z_0)$ 处，风向仅沿 $x$ 轴正向。假设已知气体扩散机理，根据 Pasquill-Gifford 扩散模型，连续泄漏时各点源烟羽的浓度为：

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \left( \frac{y-y_0}{\sigma_y} \right)^2 + \left( \frac{z-z_0}{\sigma_z} \right)^2 \right) \right\} \quad (3-1)$$

式中， $C(x, y, z)$ 为扩散范围内点 $(x, y, z)$ 在 $t$ 时浓度， $\text{mg}/\text{m}^3$ ； $Q$ 为泄漏源源强， $\text{g}/\text{s}$ ； $u$ 为风速， $\text{m}/\text{s}$ ； $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为 $x, y, z$ 方向扩散参数， $\text{m}$ 。

正如第二章介绍高斯模型中的描述，根据不同的大气稳定度情况分类，对应计算得出 $x, y, z$ 相应的扩散系数<sup>[46]</sup>。如表 3-1 所示。

表 3-1 高斯烟羽扩散模型扩散系数方程

Table 3-1 Gaussian plume dispersion model diffusivity equation

稳定度等级	$\sigma_y$ (m)	$\sigma_z$ (m)
农村环境		
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$

续表(3-1)

D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
E-F	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1}$
城市环境		
A-B	$0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1+0.0001x)^{-1/2}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1+0.0003x)^{-1/2}$
E-F	$0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0015x)^{-1/2}$

在正向模拟过程中，选择一个大气稳定度，在表(3-1)找到相应的的气体扩散函数，然后算出在不同位置处的扩散系数，依次代到高斯烟羽扩散模型中就能得到这些位置的气体扩散浓度，为源强反算工作提供必要的的数据支持。

### 3.1.2 典型条件下正向模拟结果及分析

液氯化学名称液态氯，黄绿色，沸点-34.6℃，熔点-103℃，常压下为气体，有剧烈刺激和腐蚀作用，人体吸入后会中毒，易于其它物质发生物理化学反应。尤其液氯是我国化学事故发生率最多的危险化学用品之一。所以下文以液氯储罐连续泄漏事故为例，采用高斯烟羽模型的气体扩散算法，利用MATLAB 软件模拟液氯连续泄漏扩散情况<sup>[47]</sup>。

假设某化工企业内一液氯储罐由于某种原因导致罐体出现裂缝发生泄漏。

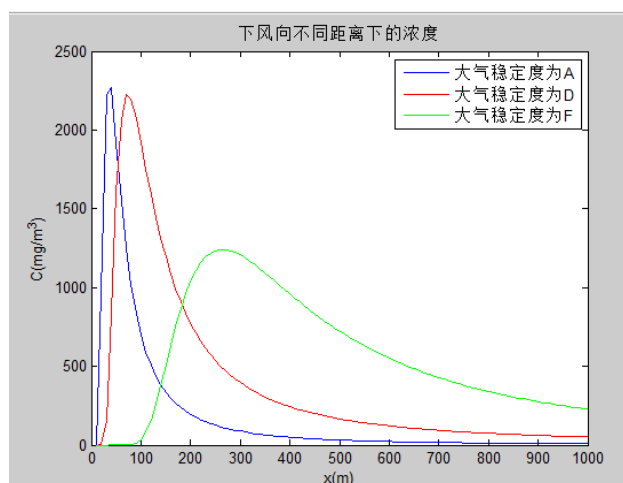


图 3-1 大气稳定度不同的浓度曲线图

Fig. 3-1 Different concentrations of atmospheric stability graph

假设一：发生连续泄漏，泄漏源强(泄漏速率)为  $1 \times 10^3 \text{g/s}$ ，有效源高  $H$  为 6m，距地面高度为 2.6m，风速为 2.5m/s，地面粗糙度取值为 0.5m(下风向为分散的树林)，取不同的大气稳定度，分别取 A，D，F，下风向不同距离下的浓度的变化曲线如图 3-1 所示。

由图 3-1 可知，随着大气稳定度的不断增加(从 A 至 F)，泄漏气体浓度降低，扩散程度趋缓，不易于泄漏气体扩散。

假设二：发生连续泄漏，泄漏源强(泄漏速率)为  $1 \times 10^3 \text{g/s}$ ，有效源高  $H$  为 6m，距地面高度为 2.6m，地面粗糙度取值为 0.5m(下风向为分散的树林)，大气稳定度取 D，取不同的风速，分别取 1.5m/s，2.5m/s，3.5m/s，4.5m/s，5.5m/s，下风向不同距离下的浓度变化的曲线如图 3-2 所示。

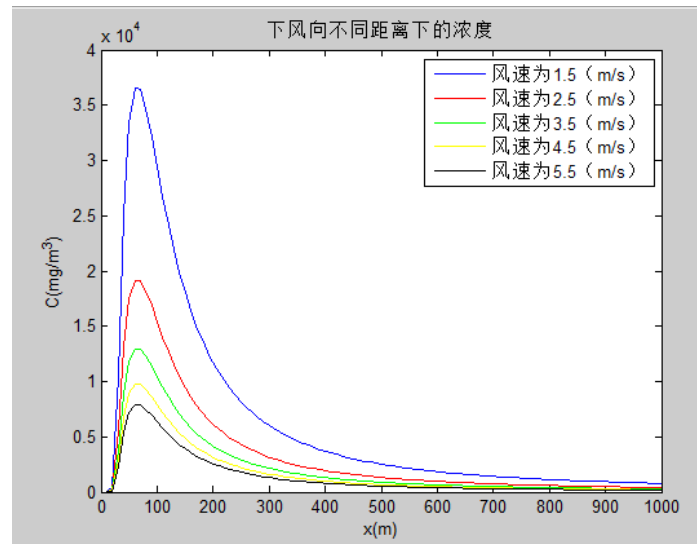


图 3-2 风速不同的浓度曲线图

Fig. 3-2 Different concentrations of wind speed graph

由图 3-2 可知，随着风速的不断f增加，有利于泄漏气体浓度的降低，扩散程度增加，泄漏气体更容易进行扩散。

假设三：发生连续泄漏，假设有效源高  $H$  为 6m，距地面高度为 2.6m，风速为 2.5m/s，地面粗糙度取 0.5m，大气稳定度取 D，泄漏源强(泄漏速率)取不同值，分别取  $1 \times 10^3 \text{g/s}$ ， $3 \times 10^3 \text{g/s}$ ， $5 \times 10^3 \text{g/s}$ ， $7 \times 10^6 \text{g/s}$ ，下风向不同距离下浓度变化的曲线如图 3-3 所示。

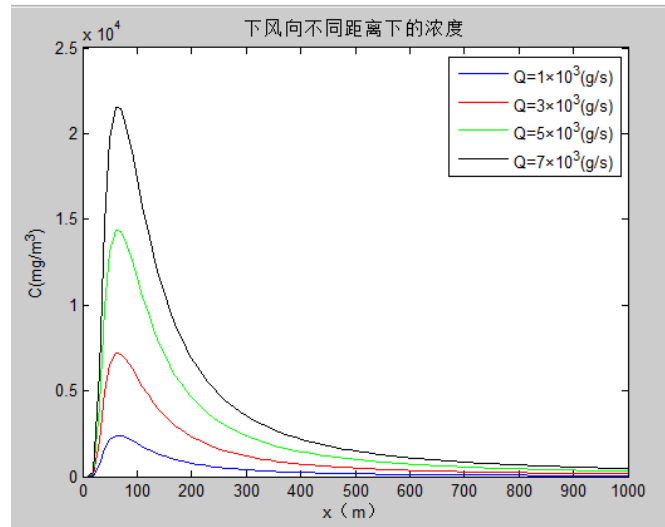


图 3-3 泄漏速率变化的浓度距离曲线图

Fig. 3-3 Leakage rate of change of the concentration of the distance graph

由图 3-3 可知，随着泄漏速率的降低，扩散程度趋缓，危害区域减小。

假设四：发生连续泄漏，泄漏源强(泄漏速率)为  $1 \times 10^3 \text{ g/s}$ ，有效源高  $H$  为 6m，距地面高度 2.6m，风速 2.5m/s，地面粗糙度取值 0.5m(下风向为分散的树林)，大气稳定度 D，质量浓度取  $[3000 \ 300 \ 190 \ 90 \ 18 \ 1.5 \ 1] \text{ mg/m}^3$  的位置构成一系列高斯曲线，得到液氯从泄漏开始到 3600s 后的扩散影响范围的浓度曲线。具体如图 3-4 所示。

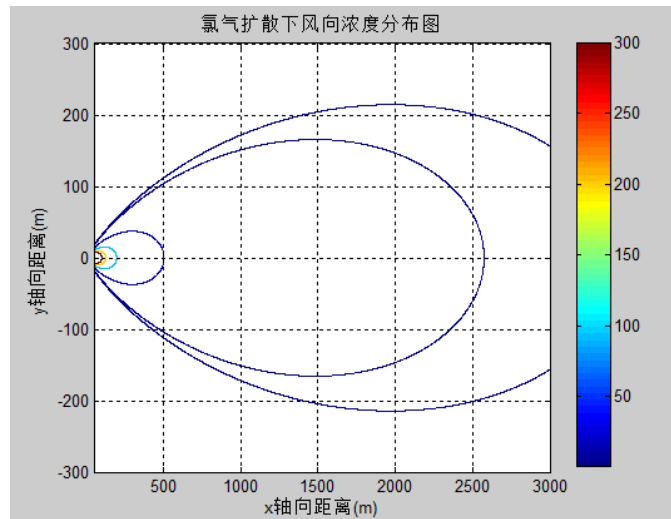


图 3-4 氯气扩散浓度分布图

Fig. 3-4 Chlorine concentration diffusion profile

根据图 3-4，利用 MATLAB 软件中的功能可以方便的求出下风向质量浓度  $C$  的各点的具体位置。参照氯气对人体的急性毒性标准，区域的划分是：液氯浓度为  $300\text{mg/m}^3$  及以上的区域为死亡区，人体健康将严重受损，会危及生命；液氯浓度为  $90\sim 190\text{mg/m}^3$  的之间为重伤区，这时人的身体就会出现不同症状，人体健康会严重受损；当液氯浓度在  $1.5\sim 90\text{mg/m}^3$  的之间为轻伤区，对人体造成一定的伤害；液氯浓度为  $1\sim 1.5\text{mg/m}^3$  的区域为受影响区；液氯浓度为  $1\text{mg/m}^3$  以下的区域为安全区，不会对人体造成伤害。

### 3.2 液化气体泄漏源强反算模型的构建及求解

#### 3.2.1 反算模型的建立

假设在泄漏源下风向不同位置处，放置了  $n$  个监测器。监测泄漏的液化气体浓度值。 $C_{calculation}^i$  表示为正向扩散模型(本研究中选择高斯模型)在第  $i(i=1,2,3,\dots,n)$  个位置处泄漏的液化气体浓度的计算值。 $C_{measure}^i$  表示为对应位置处监测器监测到的浓度值。 $f$  为目标函数，它是  $C_{calculation}^i$  与  $C_{measure}^i$  之间误差的平方和，可表示为：

$$\min f(Q_0, x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^n (C_{measure}^i - C_{calculation}^i)^2 \quad (3-2)$$

其中  $C_{calculation}^i$  由(3-1)式得出，代入(3-2)式得到

$$\min f(Q_0, x_0, y_0, z_0) = \sum_{i=1}^n \left( C_{measure}^i - \frac{Q_0}{\pi \sigma_{y_i} \sigma_{z_i} u} \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \left( \frac{y_i - y_0}{\sigma_{y_i}} \right)^2 + \left( \frac{z_i - z_0}{\sigma_{z_i}} \right)^2 \right) \right) \right)^2 \quad (3-3)$$

所以，将泄漏源源强大小及位置信息的确定等转化成计算式(3-3)中的最优化问题。然后使用 MTALB 软件进行编程，使液化气体泄漏扩散的源强反算得以实现。

#### 3.2.2 反算模型的求解

本文锁定液化气体泄漏为研究对象，以某化工园区一液氯储罐连续泄漏为例进行反算研究，由于储罐存储量的限制，液化气体的存储在可衡量的范围内，这样就不需要与别的算法结合建立混合算法去反算源强信息，本文选择直接优化算法中的单纯形搜索算法进行源强反算。

下面是单纯形搜索算法反算源强的具体的思路：

1. 在给定的初始单纯形中，将函数值  $f(x_i^k)(i=1,2,\dots,n)$ ，按照从小到大的次序排列，使  $f(x_i^k)$  满足(3-4)式：

$$f(x_1^{(k)}) \leq f(x_2^{(k)}) \cdots \leq f(x_n^{(k)}) \quad (3-4)$$

式中， $n$  表示空间维数， $k$  表示需要迭代的次数， $f(\frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_j)$  表示形心处的函数值。

2. 找出目标函数的下降的方向，主要根据扩展、反射、压缩等方法确定出函数值的大小。

3. 已知  $f(x_i^k)$  的下降方向后，随机得出新的参数值，将参数对应的目标函数值分别进行计算，对这两组函数值进行比较得出误差，得出新函数的下降方向；不断重复搜索。

反射、压缩、扩展因子分别为  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ，操作为：

$$x_r^{(k)} = x_{n+1}^{(k)} + \alpha(x_{n+1}^{(k)} - x_n^{(k)}) \quad (3-5)$$

$$x_c^{(k)} = x_{n+1}^{(k)} + \beta(x_h^{(k)} - x_{n+1}^{(k)}) \quad (3-6)$$

$$x_e^{(k)} = x_{n+1}^{(k)} + \gamma(x_n^{(k)} + x_{n+1}^{(k)}) \quad (3-7)$$

$$\text{其中：} \quad f(x_h^{(k)}) = \min \{f(x_{n+1}^{(k)}), f(x_r^{(k)})\} \quad (3-8)$$

4. 单纯形算法的终止准则，即当满足(3-11)式时停止计算。

$$\left\{ \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n [f(x_j^{(k)}) - f(x_{n+1}^{(k)})]^2 \right\}^{1/2} \leq \varepsilon \quad (3-9)$$

当满足单纯形算法的终止准则，泄漏源源强大小及位置信息就会输出，也就是所求解的最优解。

本文将单纯形搜索算法用于连续泄漏的源强及位置反算模型中，具体算法步骤如下：

① 初始化。

选取初始单纯形  $\{(Q, x, y, z)^1, (Q, x, y, z)^2 \cdots (Q, x, y, z)^n\}$ ，其中  $k=0$ ，误差系数  $\varepsilon > 1$ ，反射系数  $\alpha > 1$ ，压缩系数  $\beta \in (0,1)$ ，扩展系数  $\gamma > 1$ 。

② 排序。

将函数值  $f(x_i^k)(i=1,2,\dots,n)$ ，按照从小到大的次序排列，使满足式(3-4)。

③ 计算单纯形形心  $\frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_j$  及函数值  $f(\frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} x_j)$ 。

$$\text{令 } (Q, x, y, z)^n = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^n (Q, x, y, z)^j,$$

如果  $\left( \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n \{f[(Q, x, y, z)^n] - f[(Q, x, y, z)^{n+1}]\}^2 \right)^{1/2} \leq \varepsilon$ ，则迭代停止，输出

最优值，即  $(Q, x, y, z)^1$ ，否则继续计算。

④ 计算反射操作。

$$\text{计算 } (Q, x, y, z)^{n+2} = (Q, x, y, z)^{n+1} + \alpha((Q, x, y, z)^{n+1} - (Q, x, y, z)^n),$$

如果  $f((Q, x, y, z)^{n+2}) < f((Q, x, y, z)^0)$ ，则继续步骤⑤，

如果  $f((Q, x, y, z)^{n+2}) < f((Q, x, y, z)^{n-1})$ ，则继续步骤⑥，

如果  $f((Q, x, y, z)^{n+2}) \geq f((Q, x, y, z)^{n-1})$ ，则继续步骤⑦，

⑤ 计算扩展操作。

$$\text{计算 } (Q, x, y, z)^{n+3} = (Q, x, y, z)^{n+1} + \gamma((Q, x, y, z)^{n+2} - (Q, x, y, z)^{n+1}),$$

$$\text{令 } (Q, x, y, z)^n = (Q, x, y, z)^{n+3},$$

如果  $f((Q, x, y, z)^{n+3}) < f((Q, x, y, z)^0)$ ，则回到步骤②重新计算，否则继续步骤⑥。

⑥ 令  $(Q, x, y, z)^n = (Q, x, y, z)^{n+2}$ ，返回到步骤②重新计算。

⑦ 计算压缩操作。

$$(Q, x, y, z)^n = \{(Q, x, y, z)^i | f[(Q, x, y, z)^i] = (f[(Q, x, y, z)^n], f[(Q, x, y, z)^{n+2}])\}$$

$$\text{计算 } (Q, x, y, z)^{n+4} = (Q, x, y, z)^{n+1} + \beta((Q, x, y, z)^n - (Q, x, y, z)^{n+1}),$$

令  $(Q, x, y, z)^n = (Q, x, y, z)^{n+4}$ , 如果  $f((Q, x, y, z)^{n+4}) > f((Q, x, y, z)^0)$ , 则算法终止, 否则返回到步骤②继续计算。

### 3.2.3 监测点的选取

在液化气体泄漏源强反算过程中, 监测到的浓度数据对反算结果起很大的作用。如监测点选取不当, 可能会导致反算结果错误或者误差较大。模拟发生突发性泄漏事故后, 应急救援过程, 建立如图 3-5 所示的直角坐标系, 假设原点是“应急指挥中心”,  $x$  轴正向为风向, 泄漏气体沿着下风向扩散运动。而此时的泄漏源信息未知的, 可能在图中 I、II、III、IV 象限任一位置处, 正确放置监测器将影响到数据监测的准确度和有效性, 会对泄漏源的反算结果的正确性产生巨大的影响。

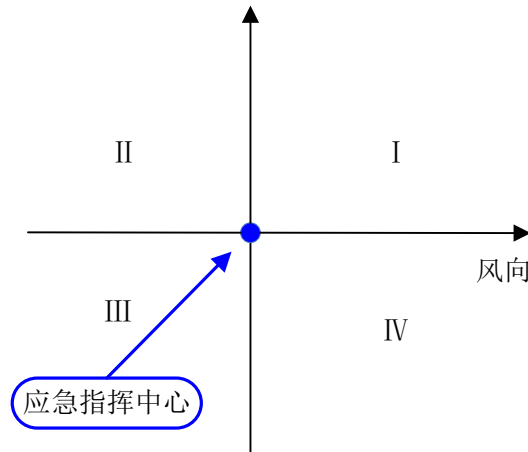


图 3-5 未知源分布示意

Fig. 3-5 Schematic diagram of unknown source distribution

当泄漏源位于 I、IV 象限内, 泄漏气体沿着下风向进行扩散运动, 当泄漏源位于 II、III 象限时, 监测器监测到的信息对结果没有任何作用和影响; 而在 I、IV 象限内监测器测到的信息发生部分失效时, 泄漏源强大小和具体位置等信息将很难反算出。

下面假设泄漏源位于 I 区(如图 3-6 所示), 以上节 3.2.3 中假设 4 为例, 假设泄漏源位置位于  $(x, y)$  处, 泄漏气体源强(泄漏速率)为  $1 \times 10^3 \text{ g/s}$ , 考虑位置在



$(x, x+x_0) \times (y+y_0, y-y_0)$  区域内, 在泄漏源的下风向处,  $x$  为水平距离,  $y$  为纵向距离, 模拟氯气的浓度。在上节图 3-4 中表明: 在  $x$  轴向距离中, 随着气体运动, 泄漏气体的扩散浓度减小; 在  $y$  轴向距离中, 泄漏气体随着距离的增大而减小。所以, 监测器应该放置在  $x$  轴正向上下处, 这样就能够监测到详细的泄漏信息, 给下一步的源强反算中提供数据支持。

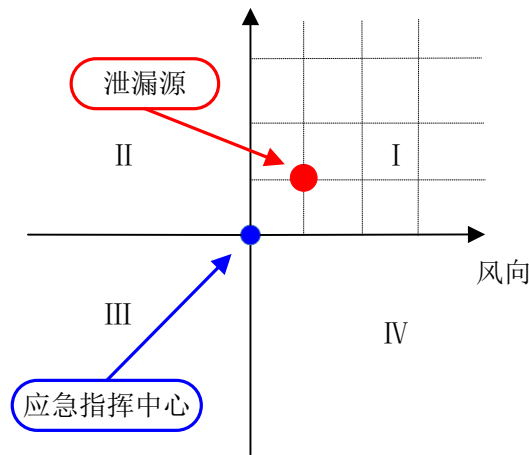


图 3-6 泄漏源在 I 区分布图

Fig. 3-6 The district map of leak source in the first distribution

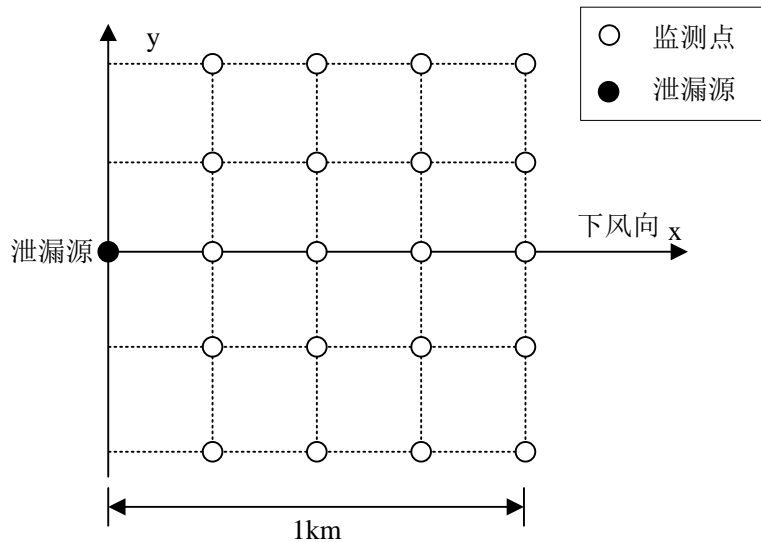


图 3-7 监测点网格设置图

Fig. 3-7 Setting the grid monitoring points chart

在实际泄漏事故的应急救援过程中,监测手段会受到诸多因素如风速、风向等的影响。实际能够监测到有效数据的只有为数不多的几个监测点。监测到有效数据会随着距离的增大而变小。在很短的时间内结束,严重影响反算结果的准确性。当然就不能应用到实际的突发性液化气体泄漏事故应急工作中,当放置监测器的监测点网格在 $4\times 5$ 及其以上,这样能够监测到足够的数据,供反向模型中计算。最终反算出的源强信息准确度也就会越高。

在下一章反算的具体实现中,泄漏气体的扩散影响范围内,将均匀设置监测器用于监测数据。建立坐标系如图 3-7 所示,原点为泄漏源,泄漏气体沿  $x$  轴正向扩散,  $x$  轴正向上下区域内各网格点位置安置监测器。可利用公式(3-1)生成各监测点上的测量浓度。在图 3-7 网格中泄漏气体浓度的监测将需要  $4\times 5=20$  个传感器来模拟实现。

### 3.3 本章小结

本章首先建立了液化气体泄漏事故正向扩散模型,以液氯储罐连续泄漏为例,通过 MATLAB 软件模拟泄漏扩散情况,同时系统地分析了模拟结果。通过对不同条件下时下风向浓度曲线对比得出:

1. 液化气体(液氯)泄漏受大气稳定度的影响。随着大气稳定度的增加(由 A 至 F),泄漏浓度降低,程度趋缓,泄漏气体不易于扩散。
2. 液化气体(液氯)泄漏受风速影响。风速依次取 1.5m/s, 2.5m/s, 3.5m/s, 4.5m/s, 5.5m/s, 随着风速的增加,有利于泄漏气体浓度的降低,泄漏气体更易进行扩散。
3. 液化气体(液氯)泄漏受源强(泄漏速率)的影响。源强(泄漏速率)依次取  $1\times 10^3\text{g/s}$ ,  $3\times 10^3\text{g/s}$ ,  $5\times 10^3\text{g/s}$ ,  $7\times 10^3\text{g/s}$ 。随着泄漏速率的降低,泄漏气体浓度影响程度危害区域逐渐减小。

其次,对液化气体泄漏源强反算模型进行了构建和求解。对于液氯储罐连续泄漏建立反向模型,构建目标函数,将反算问题转化成求解目标函数最优解的问题。其目标函数为利用高斯模型得到气体浓度的计算值,与对应位置处监测器监测到的浓度值间的相对误差和。同时分析了监测点的设置位置,及本文案例中监测点的设置。

## 第4章 源强反算算法实现应用及结果分析

在实际泄漏事故中，确定液化气体泄漏源强大小及具体位置非常不容易，有各种误差存在，比如模型误差、测量数据误差等，需要选择正确的扩散模型减少误差。本章中选择计算公式简单易编程实现的高斯模型作为正向扩散模型，并将其引入到源强反算问题中。将 MATLAB 软件中的 GUI 界面运用到源强反算研究中，运用单纯形搜索算法进行源强问题的求解，编程实现基于单纯形搜索算法的源强反算。

### 4.1 MATLAB 软件实现反算问题

MATLAB 是 Math Works 公司设计的一款数学软件，主要用于语言编程和数值计算方面，在数学科技类应用软件中首屈一指。MATLAB 能够进行数据处理、绘制函数图像、矩阵运算、算法实现、与其他编程语言连接、创建用户界面等，主要应用于控制设计、工程计算、图像处理、信号处理、信号检测等众多领域。

在 MATLAB 语言中提供了图形用户界面的设计功能，用户可自行设计别具风格的人机交互界面，以显示各种计算信息、图形以及声音等，通过建立友好的图形用户界面而使计算进行的更为方便快捷<sup>[48]</sup>。

MATLAB 中的图形用户界面 GUI(Graph User Interface)<sup>[49]</sup>是指由窗口、菜单、图标、光标、按键、对话框和文本等各种图形对象组成的用户界面，在该界面内，用户可以根据界面提示完成整个过程，却不必要了解过程内部是如何工作的。

本文采用编程功能强大的 MATLAB 软件结合其中具有界面设计友好的 GUI 界面，设计出友好的，利于操作的人机交互界面，使计算结果实现图形化、表格化等功能。实现基于单纯形搜索算法的源强反算过程。

#### 4.1.1 主界面设计

图 4-1 是登录界面，在此界面，用户需要输入账号、密码等信息。输入完成点击确认按钮就可以进入图 4-2 所示的主界面。这一模块上有菜单栏。用户可根据自己的需要，在菜单栏中进行选择，比如需要了解此界面的功能可点击

帮助选项，需要查看单纯形搜索算法的具体步骤和流程图，或是其它源强算法简介，只需点击菜单栏中相应显示按钮，就会进入对应的窗体界面。

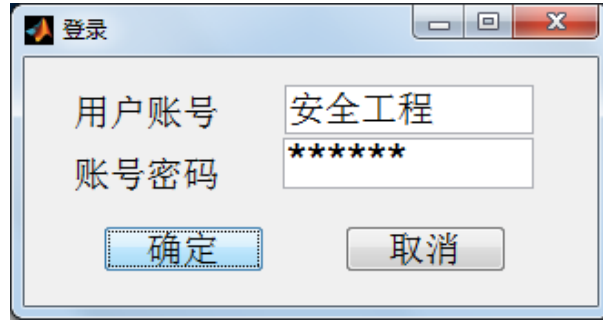


图 4-1 登录界面图

Fig. 4-1 Login screen map



图 4-2 主界面图

Fig. 4-2 Main interface

#### 4.1.2 单纯形搜索算法反算源强模块界面设计

这一界面设计是以高斯模型为正向扩散模型的源强反算模块。如图 4-3 所示，单纯形搜索算法反算源强模块中分为五部分：

1. 气象环境参数的选择。

需要输入泄漏时的具体气象环境参数包括风速，风向，温度，云量，大气稳定度的选择等。

2. 泄漏参数的选择。

需要输入包括高斯模型的一些参数，包括泄漏气体，有效源高，泄漏类型的选择等。

3. 监测点设置。

输入所设置用来监测浓度的传感器的位置坐标；其中输入的横纵坐标个数要相等，竖直坐标  $z$  为 0；

4. 单纯形搜索算法所需要的参数设置。

包括反射系数  $\alpha$ ，压缩系数  $\beta$ ，扩展系数  $\gamma$  以及计算精度  $\varepsilon$ ；

5. 输出结果。

图 4-3 以高斯模型为正向扩散模型的单纯形搜索算法源强反算界面

Fig. 4-3 Gaussian model for positive diffusion model simplex search algorithm

Source intensity inversion interface

## 4.2 具体应用及结果分析

### 4.2.1 液化气体连续泄漏的源强及位置反算案例分析

以液氯储罐连续泄漏为例。假设一储罐密封 30t 液氯，由于某种原因导致泄漏，源强真实值为  $Q_0=12000\text{g/s}$ ，大约 2400s 后泄漏完成，符合连续泄漏的时间要求；平均风速 2.1m/s，风向沿  $x$  轴正方向，大气稳定度为 D，根据 Pasquill-Gifford 烟羽扩散模型(3-1)式，模拟出连续泄漏下风向处各监测点的氯气扩散浓度。取其中 8 个有效监测点浓度如表 4-1 所示。

表 4-1 各监测点连续泄漏的氯气扩散浓度

Table 4-1 Each monitoring point continuous leakage of chlorine concentration diffusion

序号	监测点位置 $(x_i, y_i, z_i)$ (m)	$C_{\text{calculation}}^i$ (g/m <sup>3</sup> )
1	(400,10,0)	0.2312
2	(400,-10,0)	0.2247
3	(800,10,0)	0.2054
4	(800,-10,0)	0.2273
5	(400,20,0)	0.2165
6	(400,-20,0)	0.2216
7	(800,20,0)	0.1846
8	(800,-20,0)	0.1932

进入源强反算系统，点击进入单纯形搜索算法源强反算源强界面。依次在气象环境参数的选择模块中输入风向 E、风速 2.1m/s、温度取 25℃、大气稳定度选择 D，选择农村环境。

在泄漏参数的选择模块中有效源高取 0，通过下拉菜单找到氯气，并选择泄漏类型为连续泄漏；

在算法选择模块输入单纯性模式搜索算法各参数的具体数值；其中令  $\alpha = 2$ ， $\beta = 0.5$ ， $\gamma = 3$ ， $\varepsilon = 1$ 。

在监测点设置模块输入横纵坐标量  $x=(400,400,800,800,400,400,800,800)$ ， $y=(10,-10,10,-10,20,-20,20,-20)$ ，点击监测点设置按钮后。最后点击计算按钮。

最后反算信息将会显示结果模块，在如图 4-4 所示。



图 4-4 基于单纯形搜索算法源强反算结果

Fig. 4-4 Results of source intensity inversion based on simplex search algorithm

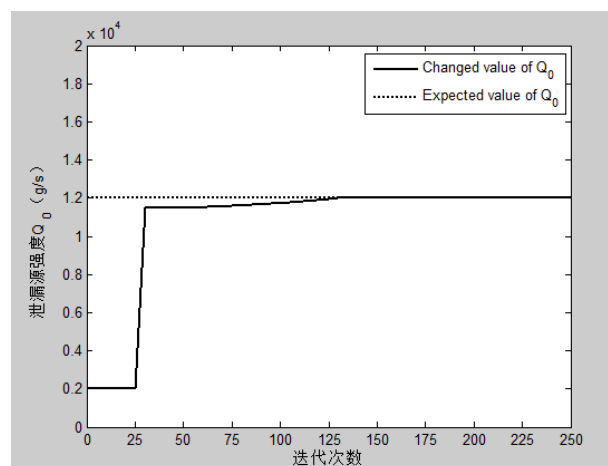
对单纯形搜索算法中的目标函数优化。各参数反算结果如表 4-2 所示。

表 4-2 单纯形搜索算法反算结果

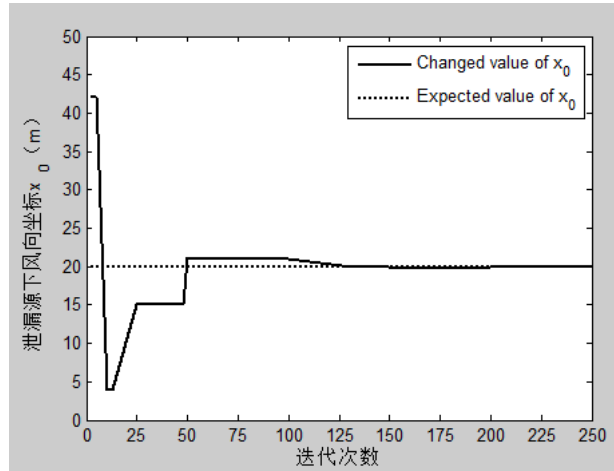
Table 4-2 Inverse results of simplex search algorithm

变量	期望值	反算结果	相对误差
$Q_0(g/s)$	12000	12001.67	1.3917e-04
$x_0(m)$	20	20	0
$y_0(m)$	25	25	0

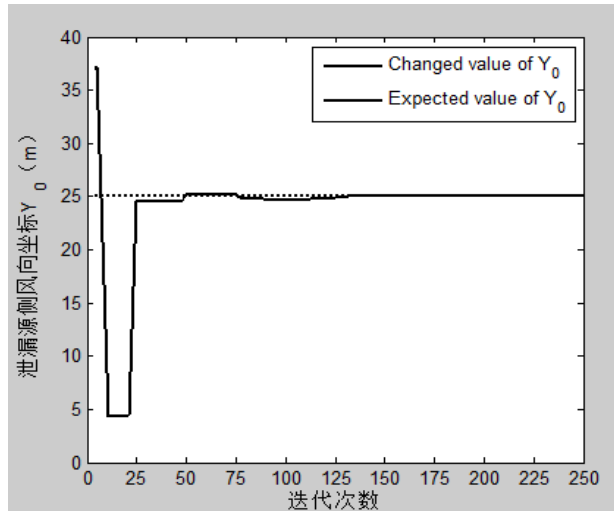
发生连续泄漏，利用单纯形搜索算法反算源强各参数的寻优过程，如图 4-5 所示。



(a)



(b)



(c)

图 4-5 反算变量  $Q_0, x_0, y_0$  的寻优过程图

Fig. 4-5 Inverse variable of  $Q_0, x_0, y_0$  optimization process diagram

表 4-2 中可以得出：源强的反算结果为 12001.67g/s，相对误差为 1.3917e-04。而位置变量反算结果与期望值一致。表示利用单纯性模式搜索算法反算源强的反算结果与实际泄漏源的源强和位置误差很小。从图 4-4 利用单纯形搜索算法对液化气体(液氯)储罐连续泄漏进行反算可以得出迭代次数为 132，所用时间为 2614s。图 4-5 表示液氯连续泄漏时，源强  $Q_0$  在  $(x_0, y_0)$  位置处的寻优过程，进一步验证了图 4-4 中的结果。

通过分析案例表明单纯形搜索算法能够应用于液化气体泄漏的源强反算研



究中去, 源强大小及具体位置等信息及时准确地反算出来, 适应于液化气体泄漏事故的应急管理工作。

#### 4.2.2 液化气体连续泄漏的源强及位置反算数据影响分析

##### 1. 初始值对结果的影响

在上节案例分析中, 初始值是按照  $Q_0 = 0 \text{ g/s}$ ,  $x = 0 \text{ m}$ ,  $y = 0 \text{ m}$  进行模拟分析的, 并没有考虑初始值对结果的影响。

现假设在初始  $Q_0$  值分别为  $15000 \text{ g/s}$  (大于真实值),  $12001 \text{ g/s}$  (趋近于真实值),  $10000 \text{ g/s}$  (小于真实值) 的情况下, 计算结果如图 4-6 所示。

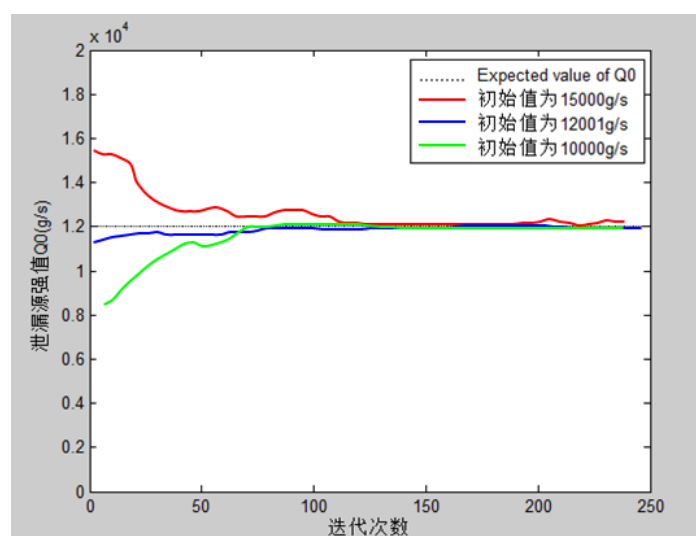


图 4-6 不同源强初始值下的计算结果

Fig. 4-6 The results of default different sources intensities

从图 4-6 中可知: 源强反算结果不受初始值的影响, 也就是说任一取初始值在经过一定的迭代次数就会趋近目标函数的最优解。所以, 基于单纯形模式搜索算法反算源强不依赖于初始值的大小, 在模拟过程中可从正反两个方向随意选取初始值。

##### 2. 测量误差对结果的影响

监测数据本身的误差影响泄漏源反算结果的正确性。在上节案例分析中在监测点监测到的源强值均为真实的源强值, 误差百分比为 0%, 也就是在无测量误差的情况下获得的。但在实际测量中会有监测设备误差或者人为误差, 不可避免会出现测量误差。

现在监测数据中加入一定的误差百分比，测量误差百分比分别取 5%，10%，15%，20%，30%，40%，50%，60%时，源强计算结果及其相对误差如表 4-3 所示。

表 4-3 误差对结果的影响

Table 4-3 data errors affect the results of Inverse

测量误差百分比(%)	$Q_0$ (g/s)	相对误差
0	12001.6700	0
5	12005.2804	0.003
10	12050.8734	0.021
15	12054.0065	0.035
20	12491.8561	0.098
30	13204.4502	0.130
40	13853.3173	0.294
50	13547.3529	0.371
60	10764.8102	0.436

从表 4-3 中可知，当监测数据无误差，也就是说测量误差百分比为 0% 时，反算的源强值几乎接近真实源强值；当监测数据存在测量误差时，测量误差百分比在 5%到 20%之间，反算的源强值也能够接近真实源强值，相对误差也较小，但是测量误差百分比一旦超过 20%，反算的源强值与真实源强值相差较大。相对误差也再增大。

计算结果迭代收敛情况如图 4-7 所示。

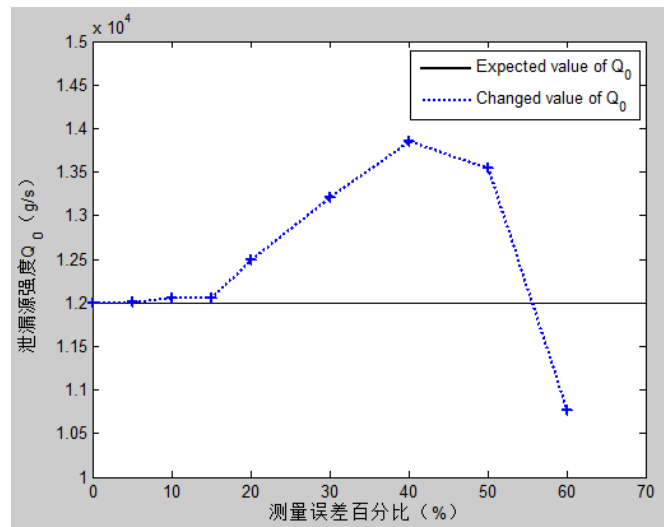


图 4-7 不同测量误差下的计算结果

Fig. 4-7 The results of different measurement error

从图 4-7 中可知：误差越小，测量的越准确，最优解越接近真实的源强值。进一步说明了在存在较小的误差情况下，单纯形搜索算法仍然可以较为准确的反算出泄漏源强和位置等具体信息。

### 4.3 本章小结

本章通过以编程功能强大的 MATLAB 软件为基础，结合 GUI 进行界面设计，实现基于高斯模型为正向扩散模型的单纯形搜索算法源强反算算法，其界面良好，方便操作，可根据测量数据与模型公式中的参数估算出源强值。

通过案例分析表明了将单纯形搜索算法应用于液化气体泄漏源强反算研究的可行性，它能够能快速准确的获得泄漏源强度和位置信息，能为确定泄漏气体的影响区域进行准确划分提供理论基础，可适应于液化气体泄漏时应急救援工作中。

## 结论及展望

液化气体泄漏事故发生后，能够快速准确的获得泄漏源强度和位置信息，为确定泄漏气体的影响区域进行准确划分提供理论基础，是液化气体泄漏时应急救援工作所要解决的关键性问题。本文锁定液化气体泄漏为研究对象，以某化工园区一液氯储罐连续泄漏为例进行反算研究。调研现有气体扩散模型和源强反算方法，通过高斯烟羽扩散模型与单纯形搜索算法反算模型相结合，通过最优化方法实现对液化气体泄漏源强的反算。

主要研究工作和研究成果主要有以下三个方面：

1. 本文在分析液化气体泄漏特点的基础上，选择常用的高斯模型进行了具体介绍，并对不同假设条件下的液化气体(液氯)泄漏的正向扩散进行了数值模拟；介绍了几种现有的泄漏源强反算方法，并分析总结了各自的原理并讨论各自的优缺点。并针对本文的研究对象，选择直接优化方法中的单纯形搜索算法对液化气体泄漏进行了反算模型的建立及求解。

2. 针对液化气体连续泄漏，以编程功能强大的 MATLAB 软件为基础，结合 GUI 进行界面设计，实现基于高斯模型为正向扩散模型的单纯形搜索算法源强反算算法，其界面良好，方便操作。本文的案例中经过 132 次迭代得到最优解；利用单纯形搜索算法对液化气体(液氯)储罐连续泄漏进行反算，得到的泄漏源强反算结果为 12001.67g/s，相对误差为 1.3917e-04。表示反算结果与实际泄漏源的源强和位置误差很小，表明单纯形搜索算法应用于源强及位置反算研究的可行性。

3. 分析在存在测量误差的情况下，算法的准确性，分析结果表明在 20% 的误差限内，反算结果仍能够接近于真实值，说明基于单纯形搜索算法的源强反算算法能够快速准确的获得泄漏源强度和位置信息，能为确定泄漏气体的影响区域进行准确划分提供理论基础，可适应于液化气体泄漏时应急救援工作中。

本文主要研究了液化气体泄漏时源强的反算，通过 MATLAB 软件编程，GUI 设计基于高斯模型的单纯形搜索算法反算界面，其可用于应急救援工作。但泄漏气体的扩散和源强的反算都涉及了诸多问题，需要在以后的研究中解决。

1. 本文中对单纯形搜索算法反算源强进行了模拟分析，并通过实例验证，但是在模拟中使用的数据不一定使用于发生泄漏事故后实际的应急救援工

作中，在未来的反算算法的实际应用研究中，需要考虑有气象、地形等诸多因素的影响。

2. 在研究液化气体泄漏扩散时，有些属于重气范畴中，本文选择了高斯扩散模型进行正向扩散模拟，没有分析在存在重力的作用下的影响。一定程度上限制了结果的准确性。合理的对重气扩散进行建模有待进一步的研究。

3. 本文选择 **MATLAB** 软件中 **GUI** 进行界面设计，大多数参数都要手动输入进去，而且时效性稍微差了些，在以后的研究中可结合 **GIS** 等软件，不断更新系统。

## 参考文献

- [1] 宋元宁, 郝银贵, 张新法. 浅谈液化气体的危险和有害因素辨识, 中国职业安全健康协会 2013 年学术年会论文集[C]. 2013, 12:13-14.
- [2] 张磊, 阮桢. 100 起危险化学品泄漏事故统计分析及其消防对策[J]. 消防科学与技术, 2014, 6(3):2-4.
- [3] 赵江平, 田海啸, 张浩. 氯气泄漏事故区域应急疏散研究—以西安某化工厂氯气储罐为例[J]. 中国安全科学学报, 2014, 3(1): 3-5.
- [4] 王晶晶, 姜传胜, 邓云峰. "3.29"液氨泄漏事故的疏散通知过程调查研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 21(3): 2-5.
- [5] ROBERTI D R, ANFOSSID, CAMPOSVEHO H F. Estimation of emission rate from pollutant source[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Inverse Problem in Engineering. Theory and Practice, Cambridge, UK, 2005: 11-15th.
- [6] 邹逸江. 国外应急管理体系的发展现状及经验启示[J]. 灾害学, 2008, 23: 96-101.
- [7] 洪伟. 基于网络体系的应急管理机制研究[J]. 计算技术, 2009, 2(6): 55-57.
- [8] 席煜宸. 煤矿应急管理体系建设探讨[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20: 159-164.
- [9] 杨红敏. 中国危险化学品事故统计分析与对策研究[D]. 沈阳: 辽宁师范大学, 2012, 12(3): 135-137.
- [10] HOLMES N S.A review of dispersion modeling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(30): 5902-5928.
- [11] 丁信伟, 王淑兰, 徐国庆. 可燃及毒性气体泄漏扩散研究综述[J]. 化学工业与工程, 1999, 16(2): 118-122.
- [12] 孙莉, 赵颖. 危险化学品泄漏扩散模型的研究现状分析与比较[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21: 37-42.
- [13] 袁雄军, 毕海普, 周宁. 危险化学品泄漏事故演化机理研究[J]. 工业安全与环保, 2014, 7: 15-22.
- [14] 钟江荣, 赵振东. 基于 GIS 的毒气泄漏和扩散模拟及其影响评估[J]. 自

- 然灾害学报, 2003, 12(4): 206-209.
- [15] 邓金华, 沈贤明, 张保平. MATLAB 在化学危险性气体扩散模拟分析中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2005, 1(5): 94-56.
- [16] 张明广, 蒋军成, 潘旭海. 基于 GIS 的重大危险源风险管理辅助决策系统[J]. 天然气工业, 2007, 27(7): 115-119.
- [17] 任彬彬, 李竞, 冀铮. 毒气泄漏事故监测预警系统的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(5): 52-55.
- [18] 解淑艳, 王瑞斌, 李建军. 现代环境空气质量检测网络构想[J]. 环境与可持续发展, 2012, 37(4): 26-31.
- [19] RAO K S. Source estimation methods for atmospheric dispersion[J]. Atmospheric Environment, 2007, 21(41): 6964-6973.
- [20] THOMSON L C, GIBSON G. An improved algorithm for Locating a gas source Using inverse methods[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(6): 1128-1134.
- [21] ALLEN C T, YOUNG G S, HAUPT S E. Improving Pollutant Source Characterization by Optimizing Meteorological Data with a Genetic Algorithm[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(11): 2283-2289.
- [22] 张九凤, 姜春明, 王正. 粒子群优化算法在源强反算问题中的应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20: 123-128.
- [23] 张九凤. 基于监测数据的源强反算算法研究及应用[D]. 中国石油大学, 2011.
- [24] 张江华, 赵来军, 吴勤. 危险化学品泄漏扩散研究探讨[J]. 中国安全生产科学学报, 2007, 3: 8-11.
- [25] 孙志宽. 高斯烟羽扩散模型再研究[J]. 环境与可持续发展, 2013, 2(5): 5-7.
- [26] HAUPT S E, Young G S, ALLEN C T. A Genetic Algorithm Method to Assimilate Sensor Data for a Toxic Contaminant Release[J]. Journal of computers, 2007, 2(6): 185-193.
- [27] 关世均, 王学峰. 连续点源泄漏事故的数学模型研究[J]. 消防科学与技术, 2004, 23(4): 313-316.
- [28] CROWL D A, LOUVAR J F. Chemical process safety: fundamentals with applications[M]. New Jersey: Prentice Hall PTR, 2002, 17(5): 275-287.
- [29] GIFFORD F A. Turbulent diffusion-typing schemes: A review[J]. Nuclear

- Safety, 1976, 17(1): 368-386.
- [30] GIFFORD F A. Use of routine meteorological observations for estimating atmospheric dispersion[J]. Nuclear Safety, 1961, 2(1): 47-51.
- [31] 张建文, 刘茜, 魏利军. 危险化学品泄漏事故泄漏源强反算方法比较研究[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(2): 165-171.
- [32] T.F.ZHANG, Q.CHEN. Identification of contaminant sources in enclosed environments by inverse CFD modeling[J].Indoor Air, 2007, 5(3): 78-81.
- [33] ANDREW KEATS, EUGENE YEE, FUE-SANG LIEN. Bayesian inference for source determination with application to a complex urban environment[J]. Atmospheric Environment, 2006, 8(3): 54-65.
- [34] 郭少东, 杨锐, 苏国锋. 基于伴随方程和 MCMC 方法的室内污染源反演模型研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 3(4): 11-17.
- [35] 郭少东, 杨锐, 翁文国. 基于 MCMC 方法的城区有毒气体扩散源反演[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 3(5): 3-9.
- [36] NELDER J A, MEAD R. A simplex method for function minimization [J]. Computer Journal, 1965, 7: 308-313.
- [37] ERNEST. J. GILLBERT, SHAHRYAR KHAJEHNAJAFI. Estimation of toxic substance release [P]. USA Patent, US 6772071 B2, 2004, 9(35): 139-145.
- [38] 陈增强. 危险化学品泄漏源的定位研究[D]. 北京化工大学, 2013.
- [39] 王立国, 魏芳洁. 结合遗传算法和蚁群算法的高光谱图像波段选择[J]. 中国图像图形学报, 2013, 4(2): 65-72.
- [40] 陈军明, 徐大海, 朱蓉. 遗传算法在点源扩散浓度反演排放源强中的应用[J]. 气象, 2002, 7(2): 51-55.
- [41] 徐昕, 贺汉根. 神经网络增加学习的梯度算法研究[J]. 计算机学报, 2003, 3(2): 34-36.
- [42] 周志华. 神经网络及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [43] 关磊, 魏利军, 吴宗之. 基于人工神经网络的储罐区泄漏源实时定位技术初步研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 5(4): 23-33.
- [44] 郑小平, 陈增强. 模式搜索算法在毒气泄漏中的源强反算[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(5): 29-34.
- [45] 刘茜. 化学事故应急响应的大气源强反算源强[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.
- [46] DANIEL A C. Chemical Process safety fundamentals with applications-second



- edition[M]. 北京：化学工业出版社，2006, 2(5): 110-117.
- [47] 袁发林. 液氯储罐泄漏的预防和紧急处理[M]. 化工安全与环境，2008.
- [48] 宗节保，段柳云，李昕. 基于 MATLAB GUI 软件制作方法的研究与实现[J]. 电子设计工程，2010，12(7): 65-70.
- [49] 兰红，田进，李淑芝. 基于 MATLAB GUI 的图像处理平台设计[J]. 江西理工大学学报，2014，2(03): 29-34.

## 攻读学位期间发表的学术论文

Bei Luo. Numerical simulation of Leakage and Diffusion of Liquid Ammonia Tank [C]. 2014 4rd Instrumentation Measurement, Computer, Communication and Control, 2014, 1(1):21-22.

## 致 谢

时光飞逝，转眼间两年半的研究生生涯已接近尾声，至此论文完成之时，特别向哈尔滨理工大学测控技术与通信工程学院所有的老师和同学们表示由衷的感谢！

感谢我的导师蒋永清教授，在攻读硕士学位期间，蒋老师给予了很多帮助和关怀，感谢蒋老师对本人的论文从选题到撰写完成期间的帮助和鼓励，他严谨的教学态度、丰富的理论实践知识和一丝不苟的育人精神都深深影响着我，使我受益匪浅。

感谢周真老师、牛滨老师、殷金英老师、马德仲老师、敖红光老师等老师在学业上给予我的帮助，感谢 D204 的各位同学在生活学习上给予我的帮助，感谢 210 寝室的各位室友在生活上对我的帮助！

最后，感谢在百忙之中抽身评审论文和参加答辩的各位评委们！