

基于气体扩散模型的天然气泄漏场景下无人机自主飞行控制算法研究

温凯^{1*}, 王伟¹, 谢宜峰², 韩旭¹

1 中国石油大学(北京)城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249

2 深圳市大疆创新科技有限公司, 深圳 518108

* 通信作者, kewin1983@126.com

收稿日期: 2020-07-04

国家重点研发计划(项目编号 2017YFC0805800)资助

摘要 随着天然气在我国能源的比重中占比越来越大, 天然气的配套设施也越来越多, 因此对于应急设备的需求也越来越高。当发生天然气泄漏事故时, 传统的检测方法不仅存在着安全隐患, 而且检测结果也用于事后分析, 并没有实时反馈现场结果的方案。针对于以上问题, 本研究利用无人机的优势来弥补传统检测方法的安全性差的缺陷和时效性差的缺陷, 再基于高斯烟羽气体扩散模型, 结合已知参数, 可以计算得到泄漏现场的实时浓度分布, 最后利用自主飞行算法控制无人机沿现场危险浓度面进行飞行, 完成浓度测绘或者其他现场测绘任务。研究还从多个影响因素角度来分析各个影响因素对于模型结果中气体浓度分布的影响, 并进行了结果比较。另外还引入了随机误差来模拟真实情况下的气体扩散分布。本研究中无人机自主飞行算法部分提出了一种“边飞边算”的构想, 该构想将气体扩散模型与自主飞行算法相结合, 利用实时计算浓度分布数据来为无人机的飞行提供依据, 实现无人机在飞行检测的同时, 进行气体分布的更新和飞行路线的优化。气体扩散模型部分利用无人机实时测量的浓度点来更新浓度分布, 高斯气体扩散模型计算的初始结果总是存在一定的系统误差, 本研究利用实时浓度点来更新浓度分布可以得到最真实的浓度分布情况, 这样无人机自主飞行算法才能根据最新浓度分布来进行飞行路线的规划, 得到最有效的飞行路线, 实现最有效的自主飞行。最后, 本研究经过仿真测试, 基于气体扩散模型的无人机自主飞行算法在仿真环境中能够实现沿危险浓度面飞行的任务, 完成指定的危险浓度面测绘任务, 对于现场事故指导有着一定的现实意义。

关键词 无人机; 气体泄漏; 高斯烟羽模型; 路径规划; 自主检测

UAV autonomous flight control in natural gas leakage scenarios based on a gas diffusion model

WEN Kai¹, WANG Wei¹, XIE Yifeng², HAN Xu¹

1 Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Transmission and Distribution Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 Shenzhen DJI Innovation Technology Co., Ltd., Shenzhen 518108, China

引用格式: 温凯, 王伟, 谢宜峰, 韩旭. 基于气体扩散模型的天然气泄漏场景下无人机自主飞行控制算法研究. 石油科学通报, 2021, 04: 614-625
WEN Kai, WANG Wei, XIE Yifeng, HAN Xu. UAV autonomous flight control in natural gas leakage scenarios based on a gas diffusion model. Petroleum Science Bulletin, 2021, 04: 614-625. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.043

Abstract As natural gas accounts for an increasing proportion of energy resources, there are more and more natural gas supporting facilities, so the demand for emergency equipment is also increasing. When a natural gas leakage accident occurs, the traditional detection methods not only have potential safety hazards, but the detection results are also used for post-mortem analysis, and there is no real-time feedback of on-site results. In response to the above important problems, drones were used to compensate for the poor safety and timeliness of traditional detection methods in this paper. Based on the Gaussian plume gas diffusion model, the real-time leakage site can be calculated by concentration distribution, and the autonomous flight algorithm was used to control the drone to fly along the on-site dangerous concentration surface to complete concentration surveying and mapping or other on-site surveying and mapping tasks. The research also analyzed the influence of each influencing factor on the gas concentration distribution in the model and compared the results. In addition, random errors were introduced to simulate the gas diffusion distribution under real conditions. In this research, the autonomous flight algorithm of UAVs puts forward a concept of "calculating while flying", which uses real-time calculation of the gas diffusion model to guide the flight of the UAVs. The gas distribution will be updated and the flight route will be optimized while the UAV is still in flight. The gas diffusion model part uses the concentration points measured in real time by drones to correct the error of initial results calculated by the Gaussian gas diffusion model. Finally, the UAV autonomous flight control proposed in this paper was verified in an experimental case. The UAV autonomous flight algorithm based on the gas diffusion model can realize the task of flying along the dangerous concentration surface, and complete the specified dangerous concentration surface surveying and mapping task, which is very significant for on-site accident guidance.

Keywords UAV, gas leakage, Gaussian model, path planning, autonomous detection

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.043

0 研究背景

当今长输油气管道已成为油气资源输送的主要方式,天然气作为易燃、易爆、有毒气体,一旦输气管道本身受到外力破坏发生破裂或泄漏,极易引起火灾及爆炸,因此对于管道的安全性监测与及时的事故处理显得尤为重要。当前对于气体泄漏场景,多为现场人员采用仪器检测然后根据模拟软件进行现场的气体分布模拟,这样往往存在时效性和安全性的问题。

而目前无人机市场正在不断膨胀,无人机能够搭载多种设备,包括气体检测器和高清相机等,无人机的路径规划、自主飞行的功能也备受关注,无人机的自身的优势使其在各个行业均有应用^[1],而在油气行业的应用却多为空白,将来在油气行业可能会有很大的前景和应用空间来发挥无人机的优势,比如可进行泄漏现场的自主检测等工作,获取泄漏现场的信息,提高管道泄漏分布检测和事故处理的效率和安全性^[2]。

目前国外无人机的行业应用较为普遍,特别是在数据采集和自主飞行方面的专业应用。在国外,利用无人机进行行业应用的已形成趋势,Belbachir等人提出了一种森林火灾无人机^[3],实现对森林着火源的确定。此团队利用基于温度概率模型的决策策略进行飞行任务改进,进而估计森林火灾的发生距离,然后无

人机根据地理信息进行轨迹优化。最终依靠两层递进式自主决策跟踪系统提供的轨迹,确定着火源;BAM联邦材料研究所与AirRobot GmbH公司开发出了一种气体检测无人机^[4],用于毒气检测和多种气体泄漏检测,其原理是利用无人机测量数据确定风矢量的情况,以供烟羽流跟踪从而确定泄露源,可以减少传感器的数量。另外该研究又把无人机所得到的视频数据、飞行控制数据、GPS坐标和气体传感器数据相结合,配合搜索算法,能够为有害气体源的自寻提供数据库。Somaiich等人提出了一种基于地理信息系统GIS、三维建模和飞行约束的无人机轨迹规划综合框架^[5]。该方法能够利用能见度、风险和风向图生成无人机飞行的最佳航点路线,通过遗传算法或蚁群算法,将获得的路径点反馈给轨迹规划算法,从而确定无人机的最佳轨迹。

对于泄漏现场的气体扩散研究通常依靠固定传感器采集数据然后依靠扩散模型进行在线计算。泄漏现场的气体分布需要用到气体扩散模型来模拟,对于气体扩散泄漏分布的研究已经是一个很成熟的领域,目前常用的模型包括:(1)高斯模型。一般来说高斯模型分为两种,高斯烟羽模型和高斯烟团模型^[6]。烟羽模型一般是计算连续点源扩散的场景,而烟团模型适用于短时间的泄漏。(2)箱模型和相似模型。箱模型常用于计算重气云团的高度、直径等特征,适用于大规模的泄漏计算,不过计算量较小,

只适用于简单扩散的危险评价,因此外延性较差。(3)浅层模型。浅层理论的原理是通过简化重气扩散的控制方程来描述其物理过程,浅层模型相对于箱模型和相似模型来说弥补了不足更加的准确,但总体来说也没有很成熟。(4)UDM模型。UDM模型是一种复合式的模型^[7],适用的情况包括喷射模型、重气扩散、被动两相扩散的模拟。目前该模型相对较为成熟。(5)FEM3模型。FEM3模型基于经验模型三维有限元模型,在大量实验的基础上得出的,偏向于重性气体的计算适用范围局限性较大,计算较为复杂,应用不是很广泛^[8]。

而在无人机的自主路径规划飞行方面,需要无人机自身具有强大的决策能力,依靠路径规划算法完成既定的任务。目前路径规划算法种类多样,因为各种算法都存在一定的优缺点,所以各种路径算法都有应用,无人机路径规划常用的算法有改进蚁群算法、A*算法和遗传算法等。无人机自身的定位系统与路径规划算法结合,可实现自动巡航、自动避障、传输管道坐标等功能,对沿途拍摄大量素材,建立管道附近的三维模型,依靠算法功能,无人机能在山峰、峡谷等地理环境中寻找到最优的路径。并且不同环境和应用场景,所选用的路径规范算法也不尽相同。

本研究所设计的泄漏现场无人机自主飞行控制算法所要实现的功能是对泄漏现场的气体浓度分布进行测绘,沿临界危险浓度面飞行后确定警戒范围。本文的自主飞行算法与气体泄漏扩散模型相辅相成,气体扩散模型的实时测算为飞行提供坐标数据库,无人机实际飞行到坐标点利用气体传感器测量实际浓度帮助气体扩散模型优化浓度分布计算结果,两部分相互耦合共同作用,完成整个无人机自主控制飞行过程。本研究设计能够提高实际检测的全面性、准确性和时效性,为事故现场争取了宝贵时间,有着重要意义。同时解决了无人机难以利用集成软件数据和现场人员实际检测的低数字化程度数据的问题。

1 气体扩散模型研究

本文选用的气体扩散模型为高斯烟羽模型,利用高斯烟羽模型进行气体泄漏现场的浓度分布计算,该模型计算的空间内浓度与坐标的关系,作为无人机自主控制飞行、沿某特定浓度面飞行的数据库。自主飞行控制算法利用数据库的浓度坐标数据,不断计算无人机飞行坐标,从而实现无人机的自主飞行。

1.1 气体扩散模型理论计算部分

高斯烟羽模型适合较为开阔且平坦的地区、大气条件均一的扩散情况和连续点源式的扩散,很多高架烟囱排放污染物沿下风向扩散的浓度分布多用此模型,而这与管道泄漏有着极大的相似,因此本研究选定高斯烟羽模型进行管道气体的泄漏模拟仿真。

在使用高斯烟羽模型模拟时,需要满足的假设包括:

- 风速的大小和方向不随时间和空间发生变化,保持稳定状态;
- 泄露源的源强一定,能够持续均匀的释放气体;
- 不考虑重力的影响;
- 泄露后的扩散区域不随时间发生变化,保持稳定。

高斯烟羽模型的要求是大气稳定度、扩散流速度、扩散点高度、风向和风速等条件不随时间发生改变,所利用的公式为:

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

其中: $C(x, y, z)$: 下风向 (x, y, z) 处的气体质量浓度 (mg/m^3); Q : 泄漏源强度 (mg/s); H : 代表泄漏点有效源高 (m); μ : 代表风速 (m/s); σ_y, σ_z : y, z 方向上的无量纲气体扩散系数。

(1) 泄漏点有效源高

泄漏气体形成的气云在变成水平形状的时候,气云中心距离地面会有一定的高度,这一泄漏烟云的抬升高度加上几何架高度就是泄漏源的有效高度。计算公式为:

$$H = H_s + \Delta H$$

其中:

H_s : 为泄漏点的几何高度;

ΔH : 为烟云抬升高度,影响的因素主要有泄漏点流速、角度、温度、压力、泄漏口径、环境温度和大气稳定度。

根据实验结果,泄漏源抬升高度的计算公式为:

$$\Delta H = 2.4 V_s d / \mu$$

其中:

V_s : 气体流速 (m/s);

d : 为泄漏口径 (m);

μ : 为风速(m/s)。

即, 扩散点源的坐标为(0, 0, H)。

(2) 扩散系数

利用高斯公式进行计算气体分布, 除确定有效源高之外, 还需确定的是气体扩散系数。影响其数值的参数为大气稳定度。

大气稳定度的确定一般采用的是Pasquill方法, 将气象条件分为6类, 每一类对应不同扩散系数的计算方法。另外, 太阳辐射等级数、空中云量、地面风速等都是大气稳定度的影响因素, 确定方法参见表1和表2。

扩散系数除了与大气稳定度有关之外, 还与下风向的距离对应, 其关系见表3。

(3) 气体扩散模拟结果

利用上述理论计算公式, 结合MATLAB进行仿真计算得到图1为某等浓度面的分布图, 图2中展示的是等浓度面的登高面上气体等浓度分布图, 等浓度点分布连续且平滑, 模拟效果较好。

1.2 泄漏分布影响因素分析

高斯模型中对气体扩散分布作用最大的参数就是风速和扩散系数, 而扩散系数又需要考虑到热辐射和

表1 气体扩散模型分类

Table 1 Model classification of gas diffusion

天空云层情况	15°<日照角度<35°	35°<日照角度<60°	日照角>60°
天空云量为4/8, 或高空有薄云	弱	中等	强
天空云量为5/8~7/8, 云层高度为2134~4877 m	弱	弱	中等
天空云量为5/8~7/8, 云层高度<2134 m	弱	弱	弱

表2 气体扩散模型分类

Table 2 Model classification of gas diffusion

地面风速/(m/s)	白天光照			夜间条件	
	强	中等	弱	或低空云量为4/8	天空云量为3/8
<2	A	A-B	B	E	F
2~3	A-B	B	C	E	F
3~4	B	B-C	C	D	E
4~6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

其中: 地面风速的定义是距地面10 m高度处10 min内的平均风速; 云量是指当地天空的云层覆盖率; 太阳高度角指当地时间和纬度下太阳光线与地平线之间的夹角。

表3 气体扩散模型分类

Table 3 Model classification of gas diffusion

大气稳定度	σ_y	σ_z
A	$0.22x / (1 + 0.0001x)^{0.5}$	0.2x
B	$0.16x / (1 + 0.0001x)^{0.5}$	0.12x
C	$0.11x / (1 + 0.0001x)^{0.5}$	$0.08x / (1 + 0.0002x)^{0.5}$
D	$0.08x / (1 + 0.0001x)^{0.5}$	$0.06x / (1 + 0.0015x)^{0.5}$
E	$0.06x / (1 + 0.0001x)^{0.5}$	$0.03x / (1 + 0.0003x)$
F	$0.04x / (1 + 0.0001x)^{0.5}$	$0.016x / (1 + 0.0003x)$

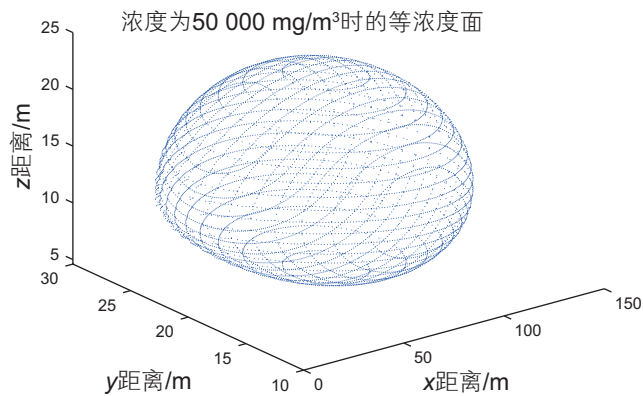


图1 气体扩散等浓度面
Fig. 1 Gas diffusion isoconcentration surface

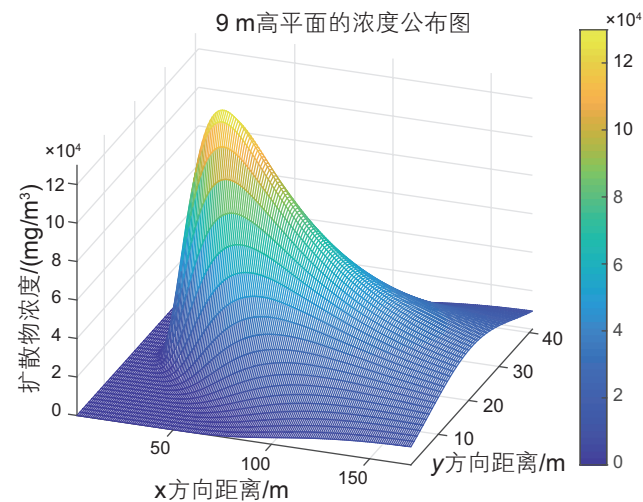


图2 某一海拔高度下气体浓度分布
Fig. 2 Gas concentration distribution at a certain altitude

昼夜的影响, 实际环境下不同位置的扩散系数和风速都是不一定是均等的, 因此接下来将从这3个因素方面单独考虑对于气体扩散的影响^[9]。

(1) 风速对于扩散的影响

风在气体扩散中起作用的主要机理就是加剧气体的紊流扩散和热交换, 加剧气体间的传热, 从而使扩散范围变大, 因此在水平方向平流输送时, 风起到主导作用。

图3显示了不同风速下的气体扩散模拟结果。当风速逐渐增大时, 气体的椭球分布图更为矮瘦, 气体扩散面积增大, 扩散距离迅速增大。风速增大, 水平扩散距离急速增大, 两者呈正相关的变化关系。当风速继续增大时, 理论上能够出现泄漏面积无限小, 泄漏气体浓度无限高的危险风速, 因此需要加强监测, 避免风速过大与气体泄漏情况同时出现进而发生危险。

(2) 昼夜更替对扩散的影响

昼夜的变化往往会引起一些环境参数的变化, 包括环境温度、大气稳定度的变化, 进而影响气体的泄漏范围。在Pasquill方法中将各种参数的变化考虑在了一起, 最后根据不同的大气等级从而确定扩散系数, 利用扩散系数进行整体表达。

从图4和图5中可以看出, 白昼的扩散相对于夜晚的扩散范围更大, 这也说明温度更高, 大气稳定性更高, 泄漏范围也就越大。白昼时, 由于接受大量的太阳辐射, 地面温度很高, 近地面的气体温度增大, 密度减小, 因此存在密度差。密度差存在, 不同高度的气体层就会发生对流扰动扩散, 影响区域就会变大,

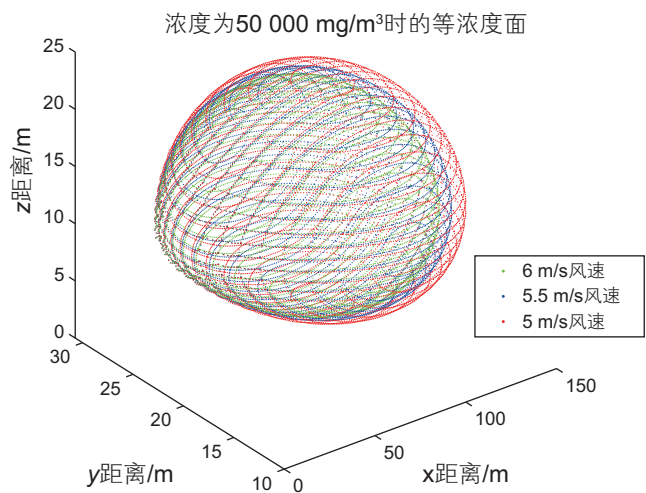


图3 不同风速下的同一等浓度面分布
Fig. 3 The distribution of the same concentration surface at different wind speeds

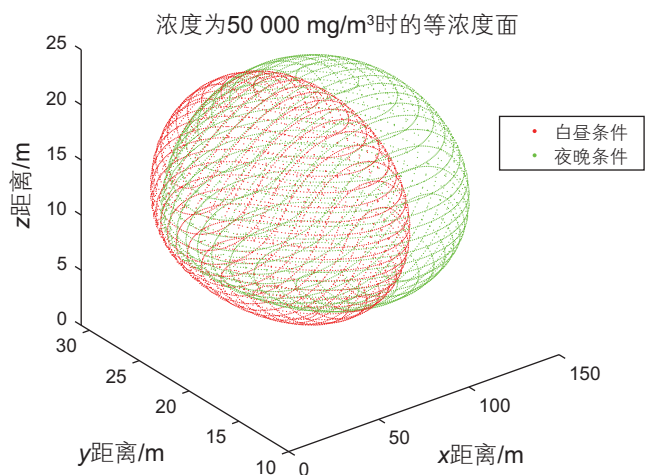


图4 白昼和夜晚条件下的同一等浓度面分布
Fig. 4 The distribution of the same concentration surface under day and night conditions

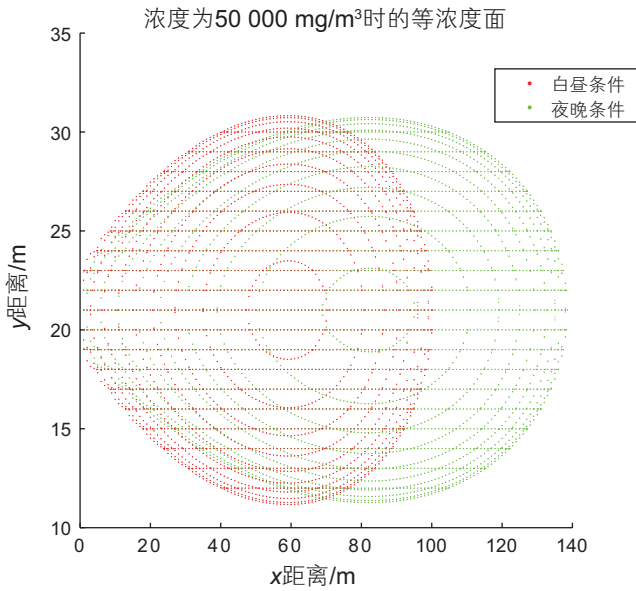


图 5 沿水平截面气体扩散范围
Fig. 5 gas diffusion range along horizontal cross section

气体不会聚集使得某一区域气体浓度过大。而在夜间，由于存在逆温现象，地表温度有可能会低于空气温度，从而泄漏气体不容易扩散。虽然事故的影响范围小，但容易使泄漏气体形成高浓度区域，达到爆炸极限。所以夜间泄漏是更危险的情况，这也就更需要及时做好应急工作。

(3) 热辐射对气体泄漏的影响

保持其他的条件因素不变，考虑白昼时某一风速条件下，将热辐射强度设为弱辐射、中等辐射和强辐射 3 种情况，然后研究气体扩散范围。

由图 6 和图 7 分析可知，热辐射逐渐变弱，由强辐射变为弱辐射的过程中，气体的扩散范围逐渐减小，

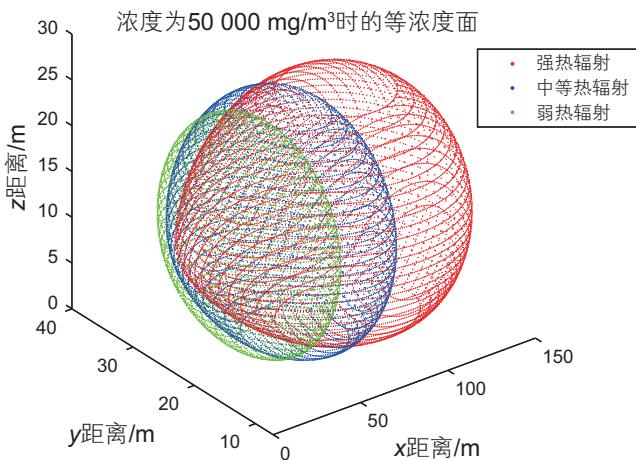


图 6 不同条件下的同一等浓度面分布
Fig. 6 The distribution of the same isoconcentration surface under different conditions

热辐射和扩散范围也大致呈正相关的相关关系。辐射越强，范围越大，辐射越弱，范围越小。在弱热辐射的情况下，大气稳定度较强，气体不容易扩散，存在着逆温层，因此，近地面的气体浓度增大，气体聚集浓度增大，增加了出现危险的可能性，使得弱辐射条件下泄漏危害更大。

1.3 考虑扰动因素的实际气体分布

在实际环境的气体扩散中，不同地方的风速往往会有不同，会在一定范围内波动，这就使得实际气体浓度分布与理想的气体浓度分布存在偏差。地面粗糙度的影响主要也体现在气体扩散区域不同地方地面覆盖物也存在很大的差别，地面粗糙度会影响地面对空气的热量辐射，进而影响空气的温度场分布，使得气体的对流作用不同，进而影响气体分布。最后在浓度场中由于各个因素的影响，不同高度大气稳定度可能不一样，不同坐标处的大气稳定度也就不尽相同，气体分布也就不能依赖某单一大气稳定度下的扩散系数进行计算。

考虑到实际环境扰动因素较多，为了将泄漏情况模拟的更加真实，将高斯烟羽模型加入随机误差项：

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

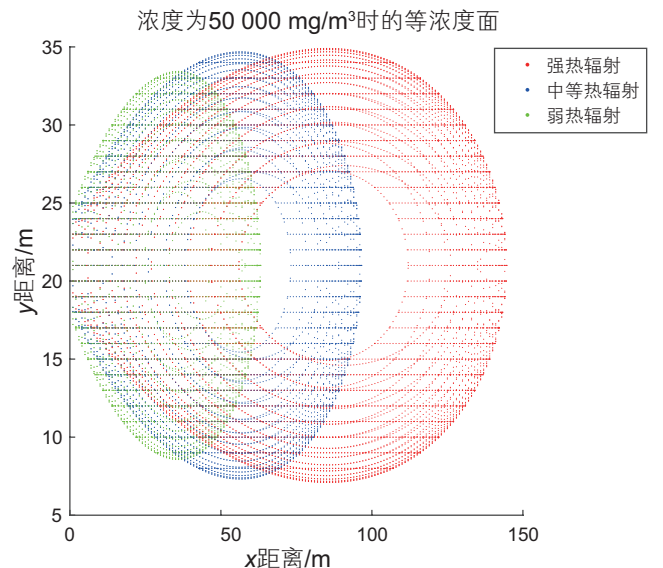


图 7 沿水平截面气体扩散范围
Fig. 7 gas diffusion range along horizontal cross section

$$R(x, y, z) = \sum_i^{x,y,z} i S_i F_i$$

其中： S_i 是误差参数，表示误差与坐标值的正比关系；

$$F_i = rand(0,1);$$

应用公式编程，在MATLAB中模拟结果见图8和图9。

考虑了3个方向上的随机误差共同影响后，其浓度面分布如图8所示，效果与只考虑x方向上的影响类似。图9显示的是在不同高度上浓度沿xy坐标的分布状态，很明显可已看出理想情况下浓度分布为平滑连续的曲面，而在误差模型下气体浓度分布凸起严重平面粗糙，这种结果真实的反应出天然气泄漏事故的扩散。

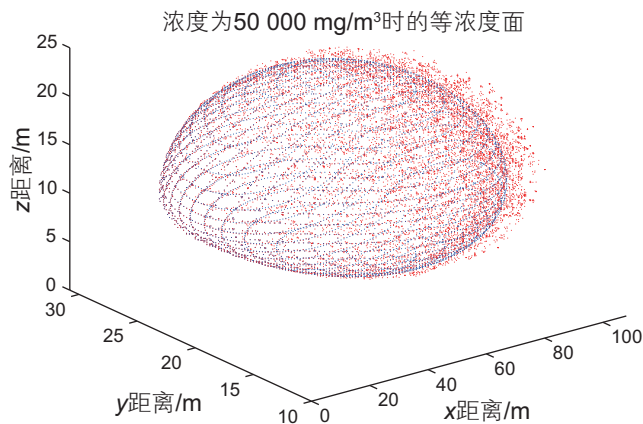


图8 考虑三个方向随机误差的浓度点
Fig. 8 Consider the concentration points of the random error in all three directions

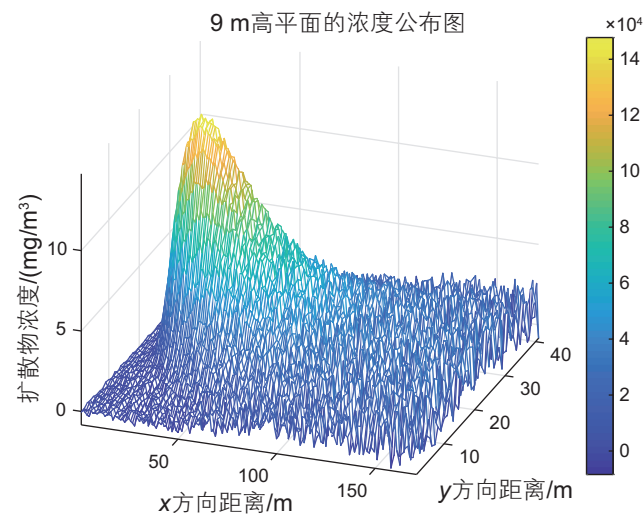


图9 某一海拔高度下气体浓度分布
Fig. 9 Gas concentration distribution at a certain altitude

2 无人机自主飞行算法研究

无人机的自主飞行需要明确自身的飞行任务和飞行方式，本研究所针对的无人机飞行任务为无人机沿为沿等浓度面飞行进行泄漏空间的气体浓度探测。飞行方式是无人机在线计算飞行坐标点，从而实现连续坐标点间的移动，完成无人机的自主飞行。但是连续坐标点的移动不仅需要知道危险等浓度面上各个坐标，也需要在等浓度面上连接成线，实现绕等浓度面飞行。高斯模型根据输入参数进行浓度面的计算，得到浓度值与坐标值的对应关系，高斯模型提供了浓度数据库以后，无人机自主飞行算法进行数据的提取利用数据库中的坐标数据完成下一飞行坐标的计算，无人机在任何坐标点处都是属于对于下一飞行点未知的情况，因此只能通过采取对于附近空间点筛选的方法，选择附近处于同一等浓度面上的坐标点作为下一飞行坐标点的坐标，这也是自主飞行算法的计算飞行坐标的核心，飞行坐标点连续不断的获取，进而完成整个飞行^[10]。

无人机自主飞行算法的研究主要分为两部分，基于实际气体模型的自主飞行算法和优化的基于实际气体模型的自主飞行算法，区别在于前者所基于的气体模型是不变的，是根据飞行开始前的参数输入完成的扩散分布的计算，而且作为无人机的飞行坐标数据库指导无人机飞行的效果也十分的一般。而后者加入优化的想法，将最新的测量数据与气体模型进行结合，能够根据新的测量值来更新气体扩散模型，然后使得飞行坐标数据库更加准确，指导无人机飞行效果也更好。

2.1 基于实际气体模型的无人机自主飞行检测算法

飞行算法的整体思路如图10所示，无人机首先需要到达泄漏场地的指定点init_back点，该指定点可以是某一等浓度面的某一点，之后按照一种特定的无人机行进规则计算下一点坐标new_front点，然后front点移动到new_front点，back点移动到front点。根据经验，front一般不会在等浓度面上，因此需要计算按照特定方法计算出front周围浓度值最接近等浓度面的点的坐标来作为front点的修正，修正后的front为飞行的下一坐标点。无人机一直按照此循环飞行，直到满足飞行抛出条件，飞行结束的条件时电池的电量限制或者无人机现坐标点的浓度值cnt与浓度场的差值大于1000 ppm时，飞行结束。

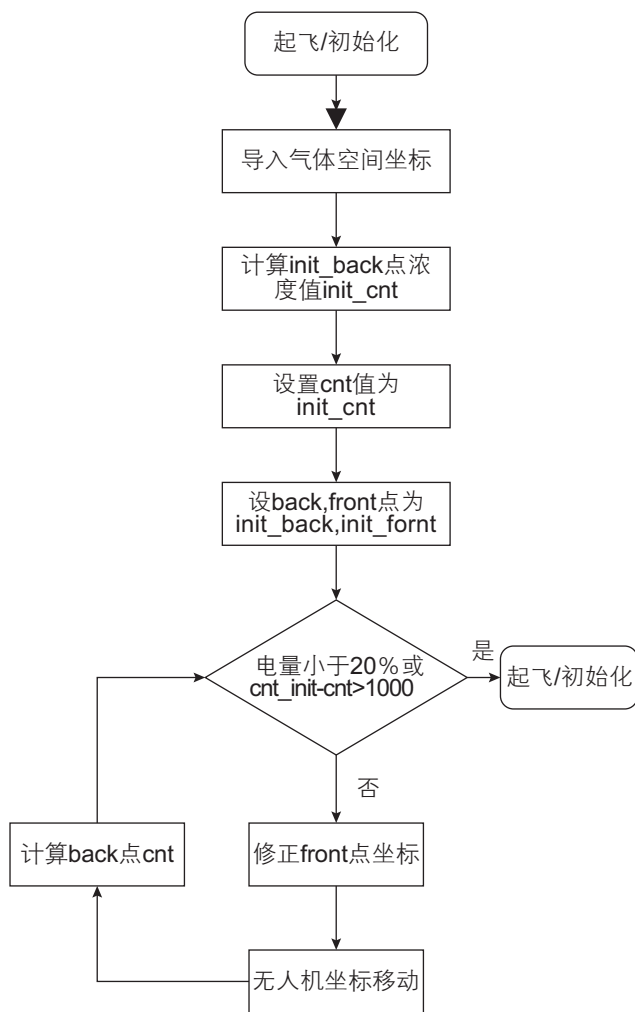


图 10 无人机自主飞行流程图
Fig. 10 Flow chart of autonomous flight of UAV

飞行算法的重点包括两部分，一部分是初始化初始点的位置，另一部分对 front 点的修正。

(1) 初始点的获取

无人机自主飞行算法初始化的意义在于确定无人机飞行到达的等浓度面上的初始坐标 init_back 点 GPS 坐标，然后采用路径微分的方式计算 init_front 点坐标，将这两点的坐标作为初始算法输入值(如图 11 所示)。路径微分是将无人机沿 y 方形和 z 方向各行进一小段，这里模拟测试时分别采用了 0.02 m 和 0.618 m，这一小段相对于整个飞行路径十分的微小，取值是多次模拟测试得到的，它能够决定无人机飞行的时间和精确程度。取值越小，飞行时间越长，轨迹越密集和精确。

(2) 飞行坐标点的修正

front 点的修正是自主飞行算法的核心。依据仿真经验和飞行的独特方式，计算的下一点 front 坐标很大

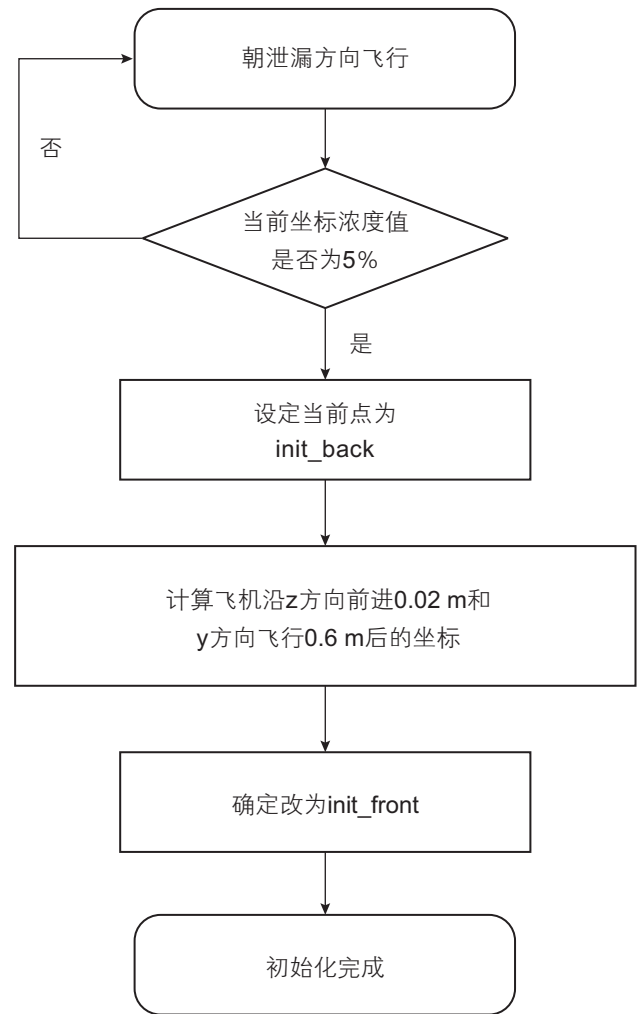


图 11 初始化流程图
Fig. 11 Flowchart of initialization

概率不在等浓度面上，因此需要对 front 点进行修正，从而实现沿等浓度面测绘的目的。无人机的大致绕飞方式为螺旋上升飞行的方式，在此种无人机飞行方式下，无人机实测某点浓度如果小于(大于)设定等浓度面的浓度值，由高斯烟羽模型浓度分布图可知，浓度小的浓度包裹浓度大的浓度面，因此该点所处的等浓度面在设定等浓度面的外侧(里侧)，需要将坐标点向里(外)修正^[11]。

修正的基本思路是将 back 点作为圆心，back 与 front 间的距离作为半径画圆，此圆与等浓度椭圆面必定会有交点，此交点就是修正后的坐标。具体为：以 (x_1, y_1, z_1) 为坐标的 back 点为圆心，计算 front 点 (x_2, y_2, z_2) 与 back 点的距离 R，在 $z=z_2$ 的平面上沿逆(顺)时针画一个 1/4 的圆弧。圆弧设置 360 个采样点，每个采样点间角度为 $\pi/720$ 。采样点中与期望浓度值差值最小的就是修正点，如果差值为零，那就说明他已经降落

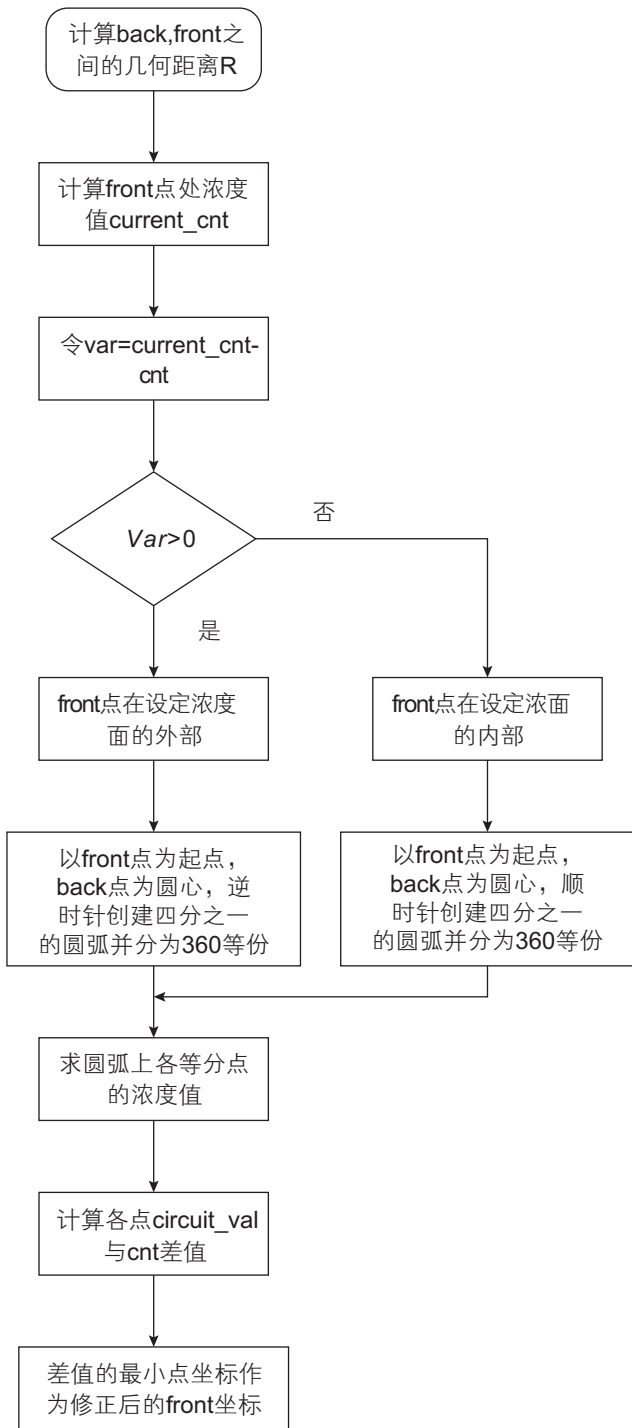


图 12 修正算法流程图
Fig. 12 Flowchart of rectification algorithm

在设定浓度面上，将该点作为修正后的 front 点，流程图见图 12。

(3) 仿真飞行结果展示

从图 13、14 中可以看出，加入随机误差后，高斯烟羽模型在远离扩散源点的位置处，浓度等值面起伏不定，梯度方向没有规律性，一些等值面之间

甚至不相互连接，无人机的飞行效果并不是很理想，图 13 中出现一条圆弧上可能出现多个与浓度等值面相交的点，从而导致 front 点不知道应该“降落”在哪个点的问题，图 14 中的错误原因是 1/4 圆弧上的点有可能没有与等浓度面值相等的点，修正点只选择圆弧上差值最小的点，使得无人机无法探测到圆弧外的点，导致无人机的轨迹计算过于片面化的问题。总之，误差气体模型作为飞行坐标的数据库得到的飞行路径还需要优化。

2.2 优化后的无人机自主飞行检测算法

(1) 引入修正参数后的边飞边算

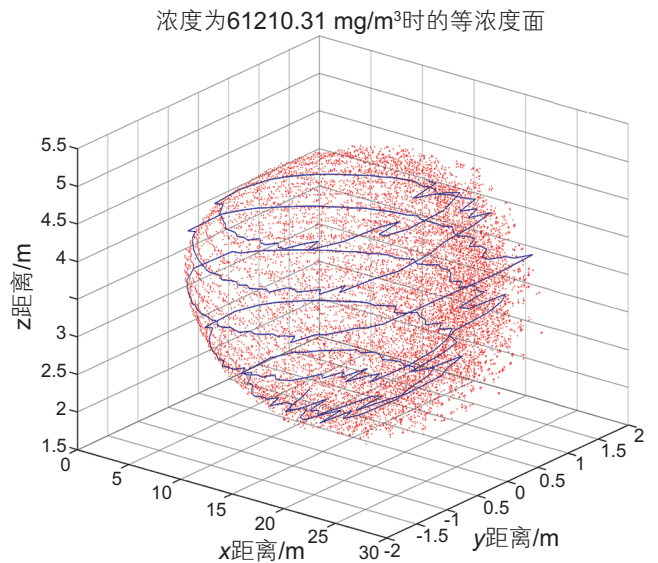


图 13 常见飞行错误 (1)
Fig. 13 Common flight errors (1)

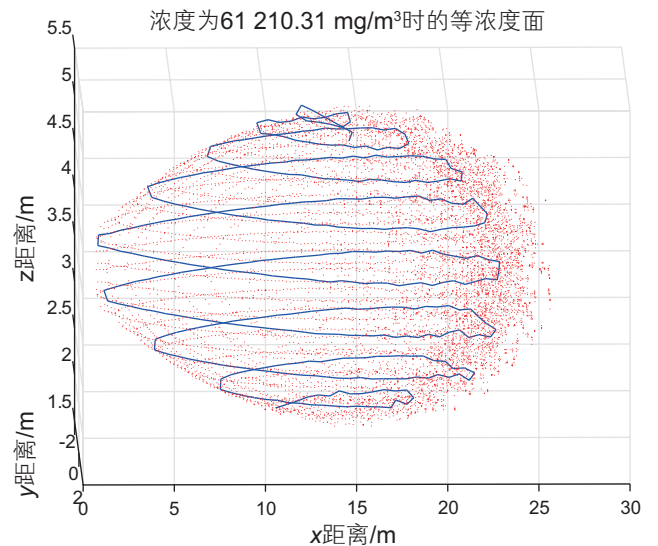


图 14 常见飞行错误 (2)
Fig. 14 Common flight errors (2)

首先，加入误差的气体模型计算得到的等浓度面坐标不成连续椭球状，这就使得在修正 front 坐标时出现问题的可能性增加，而每种问题出现的机理也存在着不同。

而理想情况下的气体扩散模型的仿真结果规律性较强，浓度场均匀，利用理想气体模型来实现飞行算法，观察其规律然后再考虑基于误差模型的飞行算法的改进。

飞行结果如图 15 所示，无人机实现平滑连续的沿等浓度面飞行。这也为解决基于误差气体模型飞行的错误提供了思路：将误差气体模型再转化成理想气体模型。这里基于的思路是某一点与其附近等浓度值的点必定处于某一扩散系数决定的理想等浓度面上，这就将求 1/4 圆弧与误差气体模型交点过程，转化成与修正的理想模型求交点的过程，在不同坐标点处对应了不同的理想气体模型，修正后的理想气体模型取决于某坐标点处实测值与上一修正理想模型计算值的同一点的差值，这就实现了根据在线测量数据进行无人机路径的自主更新实现飞行，实现了无人机的“边飞边算”，不依赖于单一气体理想模型^[12]。

更新后的算法流程如图 16，其中体现“边飞边算”的流程为修正参数的选取，修正参数决定了对气体误差模型修正的准确性和合理性，而修正参数的选取是一个经验性的过程，修正参数选取的合适与否直接决定飞机的飞行效果。这里利用机器学习模型，模拟测试得到了大量的数据，根据 front 点与理想气体模型的差值得到与修正参数的对应关系，进而能够更加科学的进行气体模型的模拟。而对于每一次计算出的前后修正参数差值，我们需要对它们进行一次求绝对

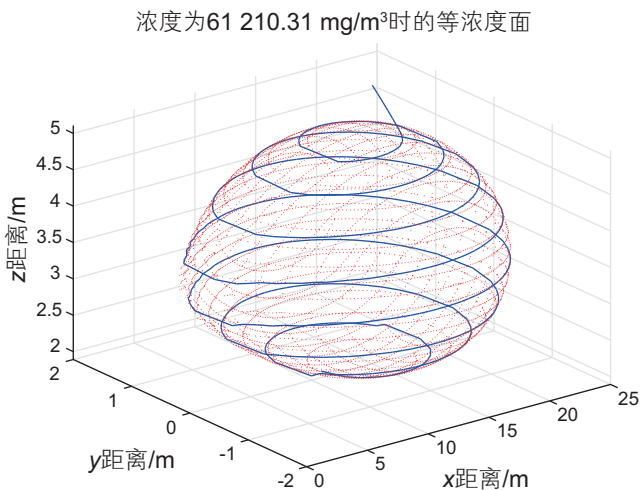


图 15 基于理想气体模型的飞行效果图
Fig. 15 Flight renderings based on ideal gas model

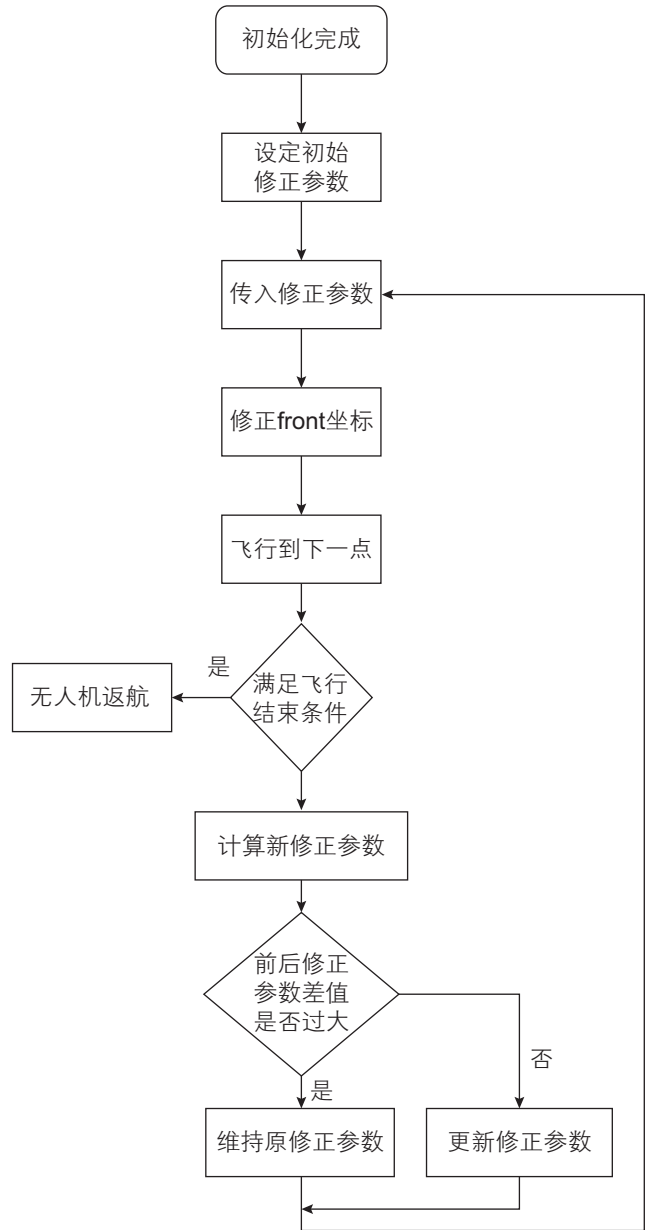


图 16 “边飞边算”算法流程图
Fig. 16 Algorithm flow chart of “fly while calculating”

值运算，设定当某个方向的绝对差值大于 1000 时，训练模型在该位置前后点的误差过大，此时的更新的修正参数不值得信赖，应该舍弃这次更新，维持之前的修正参数；当小于 1000 时，表明根据模型预测的修正参数有效，取之前所有 steps 的修正参数的均值，作为更新后的修正参数，修正下一个理想高斯烟羽模型。最后更新 front 点，根据调整后的理想气体浓度场修正 front 点的位置。

(2) 模拟仿真结果

如图 17，可以看到基于“边飞边算”的无人机已经很好地沿着考虑误差的气体泄漏场中的等值面飞行，

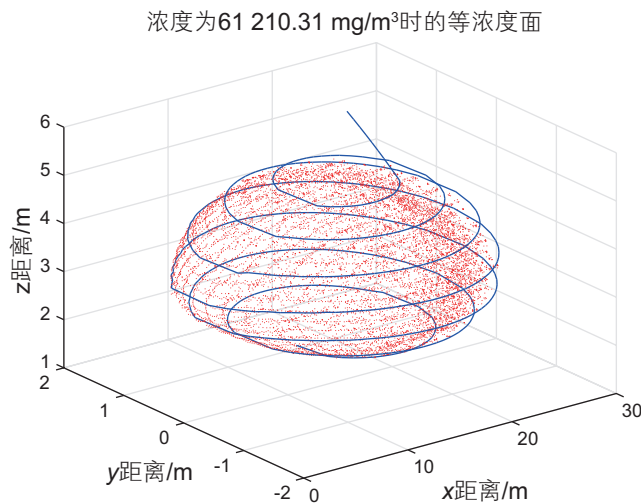


图 17 “边飞边算”飞行效果图
Fig. 17 Algorithm flow chart of “fly while calculating”

飞行轨迹比较平滑，所描绘的轮廓比较完整地包含了所有等值面，解决了之前算法导致的无人机断飞、倒飞、偏离航线等问题。总的来说，误差模型使得最初理想气体模型更接近于实际环境的浓度值，但不利于飞机飞行，而再将误差模型转化随坐标点变化的理想气体模型，使得仿真过程既没有影响浓度计算的准确性，也减小了飞行的压力，使得飞机能够达到很好的飞行效果。

3 总结与结论

本文将天然气管道泄漏事故场景作为应用场景，设计了无人机基于实际气体模型的自主检测飞行算法，不仅可以解决泄漏现场快速获取泄漏场多坐标

信息的问题，获取的信息还方便处理和利用，而且无人机自主飞行测绘的警戒面可帮助现场进行应急疏散和消防工作。本文在软件部分包括建立气体模型、设计自主飞行算法和气体模型与飞行算法的耦合应用。文中气体模型是基于高斯模型进行模拟，从不同的环境影响因素角度分析对实际气体浓度分布的影响，并且引入了随机误差来模拟真实情况下的气体扩散分布。然后基于气体模型，设计无人机的自主测绘飞行算法，使得无人机能够沿某一特定等浓度面飞行，实现对于气体泄漏的测绘。根据这一等浓度面我们能划分出气体的爆炸浓度范围，便于泄漏事故现场开展消防和疏散工作，对于泄漏现场的工作指导有着深刻的意义。

参考文献

- [1] 王琰, 王秀玲, 王丽. 无人机电力应急救援系统的研究[J]. 信息技术与信息化, 2018(01): 135-137. [WANG Y, WANG X L, WANG L. Research on UAV electric disaster emergency response system[J]. Information Technology and Informatization, 2018(01): 135-137.]
- [2] 居涛. 危险场所事故灾害无人机侦检技术应用研究[D]. 华南理工大学, 2017. [JU T. Research on the application of drone detection technology for accidents and disasters in hazardous locations [D]. South China University of Technology, 2017.]
- [3] BELBACHIR A, ESCARENO J, RUBIO E, et al. Preliminary results on UAV-based forest fire localization based on decisional navigation[C]// Workshop on Research. IEEE, 2015.
- [4] WANG J W, GUO Y. Leaderless cooperative control of robotic sensor networks for monitoring dynamic pollutant plumes[J]. Control Theory & Applications, 2019, 13(16): 2670-2680.
- [5] MCAREE O, AITKEN J M, VERES S M. A model based design framework for safety verification of a semi-autonomous inspection drone[C]// Ukacc International Conference on Control. IEEE, 2016.
- [6] 卢宏玉. 长输天然气管道泄漏检测技术[J]. 化工管理, 2018(10):97. [LU H Y. Long-distance natural gas pipeline leakage detection technology[J]. Chemical Management, 2018(10): 97.]
- [7] 马吉. 天然气高压管道泄漏扩散检测及其应用研究[D]. 华北科技学院, 2018. [MA J. Leakage and diffusion detection of natural gas

- high-pressure pipeline and its application research[D]. North China Institute of Science and Technology, 2018.]
- [8] 马莹莹. AERMOD模型在危险废物泄漏事故应急评估中的应用[D]. 安徽工业大学, 2016. [MA Y Y. Application of AERMOD model in emergency assessment of hazardous waste leakage accidents[D]. Anhui University of Technology, 2016.]
- [9] 邓云峰. 有毒气体泄漏场景模拟与区域疏散分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2014,10(06): 12-19. [DENG Y F. Scenario simulation of toxic gas leakage and analysis of regional evacuation[J]. China Work Safety Science and Technology, 2014,10(06): 12-19.]
- [10] WANG J W, GUO Y, FAHAD M, BINGHAM B. Dynamic plume tracking by cooperative robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019,24(2): 609-620
- [11] REGGENTE M, LILIENTHAL A J. Using local wind information for gas distribution mapping in outdoor environments with a mobile robot[C]// Sensors 2009. IEEE, 2010.
- [12] BING L, QING H M, JIA Y W, et al. Three-dimensional gas distribution mapping with a micro-drone[C]// Control Conference. IEEE, 2015.

(编辑 马桂霞)