

“煤矿智能化技术及应用”专题

【编者按】2020年2月25日,国家八部委联合下发了《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》,吹响了向煤矿智能化进军的冲锋号。煤矿智能化是煤炭工业高质量发展的核心技术支撑,将人工智能、工业物联网、云计算、大数据、机器人、智能装备等与现代煤炭开发利用深度融合,形成全面感知、实时互联、分析决策、自主学习、动态预测、协同控制的智能系统,实现煤矿开拓、采掘、运输、通风、安全保障等过程的智能化运行。煤矿智能化已成为世界煤炭科技发展的重要方向,更是我国煤炭科技研究的热点。为推动煤矿智能化技术与煤炭产业融合发展,提升煤矿智能化水平,促进煤炭行业高质量发展,本刊组织策划了“煤矿智能化技术及应用”专题,本专题报道的内容涉及煤矿机器人智能化、智能监测与预警、采煤机智能化、运输系统智能化、通风系统智能化、供电系统智能化等方面。在此特别感谢西安科技大学马宏伟教授对本专题组稿工作的支持!衷心感谢各位专家学者在百忙中为本专题撰稿。

文章编号:1671-251X(2020)06-0017-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.17598

煤矿巡检机器人巷道气体环境智能检测系统设计

聂珍^{1,2}, 马宏伟^{1,2}

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室, 陕西 西安 710054)



扫码移动阅读

摘要:目前井下危险气体巡检机器人大多采用升降机构或固定探头的方式进行气体环境感知,对机器人的行驶灵活性产生了影响,且受机器人本体结构的限制,大多数巡检机器人只能检测到传感器安装范围内的局部气体环境信息,缺乏针对巷道任意截面空间内的气体浓度检测。针对以上问题,设计了一种基于气体扩散模型的煤矿巡检机器人巷道气体环境智能检测系统。该系统以气体扩散理论为基础,结合煤矿巷道气体环境特点,引入巷道壁帮围岩、风速、气体扩散系数对煤矿巷道气体扩散模型的影响,采用虚拟像源法和遗传算法优化BP神经网络智能算法建立了巷道气体扩散优化模型。通过传感器检测系统获取巡检机器人在行进过程中任意点的气体浓度等环境信息,代入气体扩散优化模型求解最优气体扩散系数,通过输入巷道某点坐标位置,可计算求解相应点的气体浓度分布情况,随着巡检机器人的移动,可获取其路径中不同巷道截面上气体浓度分布数据。实验结果表明,该系统能够解算出符合检测误差要求的巷道任意截面上任意点的气体浓度,并实现动态实时检测;克服了传统煤矿巷道气体检测方法的局限性。利用巡检机器人取代人工巡检作业,为煤矿井下气体智能检测提供了一种新思路与新方法。

关键词:煤矿巡检机器人; 气体环境信息检测; 智能检测; 动态检测; 气体扩散模型; 高斯烟羽模型
中图分类号:TD67 文献标志码:A

Design of intelligent detection system of gas environment in
roadway of coal mine inspection robot

NIE Zhen^{1,2}, MA Hongwei^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment
Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, China)

Abstract: At present, most underground gas inspection robots use lifting mechanism or fixed probe to sense gas environment, which influences robot's driving flexibility, and due to the limitation of robot body

收稿日期:2020-04-30;修回日期:2020-06-09;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(50674075);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTCL01-02)。

作者简介:聂珍(1984—),女,湖北天门人,工程师,博士研究生,研究方向为智能检测与控制,E-mail:niezhen@xust.edu.cn。

引用格式:聂珍,马宏伟.煤矿巡检机器人巷道气体环境智能检测系统设计[J].工矿自动化,2020,46(6):17-22.

NIE Zhen, MA Hongwei. Design of intelligent detection system of gas environment in roadway of coal mine inspection robot[J].
Industry and Mine Automation, 2020, 46(6): 17-22.

mechanism, most inspection robots can only detect local gas environment information within sensors installation range, and lack of gas concentration detection in any cross-sectional space of the roadway. In view of the above problems, an intelligent detection system of gas environment in roadway of coal mine inspection robot based on gas diffusion model was designed. The system is based on theory of gas diffusion, combined with gas environment characteristics of coal mine roadways, and introduces influence of wall rock, wind speed and gas diffusion coefficient on gas diffusion model, and establishes a gas diffusion optimization model in roadway by using virtual image source method and BP neural network intelligent algorithm optimized by genetic algorithm. The environmental information such as gas concentration at any point of the inspection robot in the moving process is obtained by the sensor detection system, and the gas diffusion optimization model is substituted to solve the optimal gas diffusion coefficient. The gas concentration distribution at the corresponding point can be calculated and solved by inputting the coordinate position of a certain point in the roadway. With movement of the robot, the gas concentration distribution data on different coal mine roadway sections under its displacement path can be obtained. The experimental results show that the system can calculate gas concentration at any point on any cross-section of the roadway that meets the detection error requirements, and achieve dynamic real-time detection; it overcomes limitations of traditional coal mine roadway gas detection methods. Using inspection robots to replace the manual inspection of coal mine gas can provide a new idea and method for intelligent detection of gas in coal mines.

Key words: coal mine inspection robot; gas environment information detection; intelligent detection; dynamic detection; gas diffusion model; Gaussian plume model

0 引言

为保证煤矿安全生产,煤矿企业一般采用人工巡检和在线监控相结合的日常安全巡检方式对煤矿瓦斯等危险气体环境信息进行监测。人工巡检劳动强度大、巡检效率低,在线监测方式投入成本高、维护效率低、覆盖面积小^[1]。在目前智能化矿山建设和以人为本的大环境下,煤矿日常安全巡检工作是实现矿山“数字化、信息化、无人化”建设目标的薄弱环节。研发井下危险气体巡检机器人,使其具备复杂巷道自主行走、定位、气体浓度等环境感知、数据处理与预警及人机交互等功能,能替代人工巡检,是实现煤矿智能化的重要研究方向。

在国外,V. Gomathi 等^[2]设计了一种基于无线传感器网络(WSN)的自适应煤矿救援机器人,通过气体和温度传感器感知煤矿救援机器人当前位置的环境信息,但检测数据具有一定的片面性。N. L. Husni 等^[3-4]设计了一种多传感器气体巡检机器人,以气体浓度作为模糊逻辑的输入,通过模糊算法控制巡检机器人行驶路径,能直观描述气体扩散路径,但只局限于机器人传感器安装高度。Fan Han 等^[5]开发了一种使用电子鼻的探测机器人在线气体传感系统,用于在恶劣环境中检测有害气体,以支持消防队应急救援,但系统不能全面准确

反映当前气体的分布状况。

在国内,薛春荣^[6]设计了一种小型轻量化本安型探测机器人气体采样系统,通过升降装置带动导气管,使采样高度达到 1.5 m,但该升降装置限制了机器人行走的灵活性。秦玉鑫^[7]设计了一种沿煤矿工字钢轨道运行的煤矿灾害信息探测机器人系统,使用矿用 CD10 多参数气体测定器,能实现对煤矿探测机器人运行轨迹上多种气体进行实时监测,但其灵活性受限,投入成本高。张海波等^[8]设计了一种煤矿井下瓦斯智能巡检机器人系统,选用 X-am5000 气体检测仪实时监测环境气体信息,但其检测位置受限于检测仪的安装位置。张树生等^[9]设计了一种煤矿综采工作面巡检机器人,采用多参数气体传感器模块集成设计,通过升降机构,实时监测综采工作面现场环境中甲烷等气体浓度信息,但其使用环境适应性及机器人灵活性有待提高。

综上所述,目前井下危险气体巡检机器人大多数采用升降机构或固定探头的方式进行气体环境感知,对机器人的行驶灵活性产生了影响,且受机器人本体结构的限制,大多数巡检机器人只能检测到传感器安装范围内的局部气体环境信息,缺乏针对巷道任意截面空间内的气体浓度检测。针对以上问题,本文设计了一种基于气体扩散模型的煤矿巡检机器人气体环境智能检测系统。该系统在保证机器

人行灵活、信号检测可靠性的前提下,以气体扩散理论为基础,结合煤矿巷道气体环境特点,引入巷道壁帮围岩、风速、气体扩散系数对气体扩散模型的影响,采用虚拟像源法和遗传算法优化BP神经网络智能算法建立气体扩散优化模型,机器人在行进过程中可检测到巷道任意截面任意点的气体浓度等环境信息,从而实现用煤矿巡检机器人逐步取代人工巡检作业,为煤矿井下气体智能检测提供了新思路与新方法。

1 系统设计

1.1 系统总体框架

煤矿巡检机器人巷道气体环境智能检测系统由硬件系统和信息处理软件组成,系统架构如图1所示。硬件系统主要完成气体环境信息的采集、降噪滤波处理,并将处理后的数据传送给信息处理软件;信息处理软件主要完成气体扩散优化模型的建立和巷道截面气体浓度分布的计算。

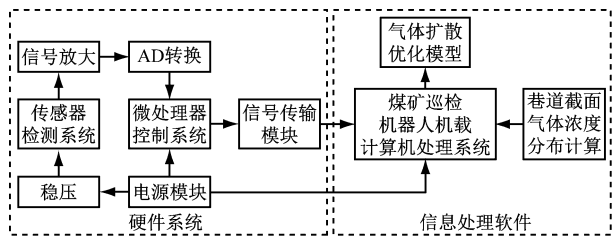


图1 煤矿巡检机器人巷道气体环境智能检测系统架构
Fig.1 Structure of gas environment intelligent detection system in roadway of coal mine inspection robot

1.2 硬件系统组成

硬件系统由微处理器控制系统、传感器检测系统、电源模块、信号传输模块等组成。传感器检测系统用于采集瓦斯、一氧化碳、氧气、硫化氢等气体信息,以及温湿度、风速等相关环境参数。微处理器控制系统主要负责信息的预处理与传送。传感器输出信号经放大、AD转换后送入微处理器,采用均值滤波等数据处理方法进行信号降噪滤波处理,得到可靠的环境信息序列,通过信号传输模块传送至巡检机器人机载计算机处理系统。

1.3 信息处理软件

巷道气体扩散模型的建立与优化是信息处理软件的核心,由巡检机器人机载计算机实现,其包括气体扩散模型优化、巷道截面气体分布计算等。

在已知巷道结构具体参数基础上,根据虚拟像源法建立煤矿巷道气体扩散模型。巡检机器人通过传感器检测系统获取多组当前环境初始信息,代入

气体扩散模型进行气体扩散系数反向求解,得出多组扩散系数并对其进行神经网络训练,以计算得出煤矿巷道内实际条件下扩散系数方程对应的常数值,从而获取实际煤矿巷道截面上的气体扩散系数,确定当前煤矿巷道气体扩散优化模型。建立巷道气体扩散优化模型后,通过输入巷道某点坐标位置,可计算求解相应点的气体浓度。根据煤矿安全监测要求,确定巷道截面监测点的坐标信息,代入优化模型进行计算,能得到煤矿巡检机器人当前位置处煤矿巷道截面气体浓度分布数据。随着煤矿巡检机器人的移动,可获取其路径中不同巷道截面上气体浓度分布数据。

2 巷道气体扩散优化模型构建

2.1 气体扩散理论

气体扩散现象是气体分子热运动产生的。目前处理气体扩散问题主要有梯度输送理论和湍流统计理论。梯度输送理论是按分子扩散的非克定律形式类比而建立起来的,认为扩散速度与浓度成正比。湍流统计理论认为气体分子湍流运动的随机性导致其在空间分布上符合正态分布。湍流扩散速度比分子扩散速度快得多,而在风流主方向上风速远大于湍流的脉动速度,故在有明显风流条件下平流输送扩散作用是主要的,该特点在井下巷道中表现得尤为明显。

运用湍流统计理论的气体扩散模型有高斯模型、BM模型、Sutton模型和FEM3模型等,模型的选用取决于气体性质与扩散时间的长短。高斯烟羽模型适用于轻气体或与空气密度相差不多的气体的连续扩散,可用于研究井下巷道瓦斯、一氧化碳的扩散规律^[10-11]。

2.2 巷道气体扩散优化模型

巷道气体扩散优化模型采用高斯烟羽模型对瓦斯、一氧化碳的扩散规律进行研究。在无界空间环境下,高斯烟羽模型为

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

式中: C 为气体扩散浓度,%; x,y,z 为气体扩散路径上的某点坐标,m; Q 为气体泄出量, m^3/s ; u 为 x 方向上的风流速度, m/s ; σ_y,σ_z 分别为 y,z 方向上的瓦斯气体扩散系数。

受煤矿巷道围岩限制,烟羽的扩散是有界的^[12-13]。假设理想情况下巷道边界对气体无吸附

作用,气体在垂直与水平方向上分别与底板、顶板、巷道侧壁发生碰撞反射作用,将底板、顶板、两侧巷道壁看作为镜面,使巷道边界的气体被完全反射回巷道。采用虚拟像源法对其进行处理,实源扩散到巷道壁被反射到巷道空间 P 点的部分,相当于关于巷道壁与实源对称点存在一个虚拟像源扩散到 P 点,此时 P 点的浓度值等于实源扩散值与虚拟像源扩散值之和,原理如图 2 所示。图中, H 为巷道高度, m 。

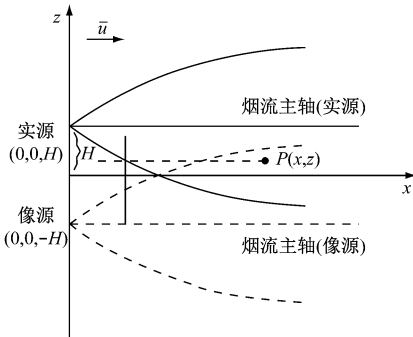


图 2 高斯烟羽模型像源法修正原理

Fig. 2 Correction principle of image source method of Gaussian plume model

在高斯烟羽模型中,气体扩散系数的大小与大气稳定度、温度、风速以及离开泄漏源的距离等因素有关^[14-16]。研究大气环境扩散时,一般采用 GB/T 3840—1991《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》中有关参数和公式的选取原则来确定扩散系数^[17]。对于煤矿井下巷道而言,风速和风向基本稳定,通过检测煤矿巷道气体信息,采用遗传算法优化 BP 神经网络智能算法对气体扩散系数进行寻优,实现对高斯烟羽模型的优化,具体流程如图 3 所示。

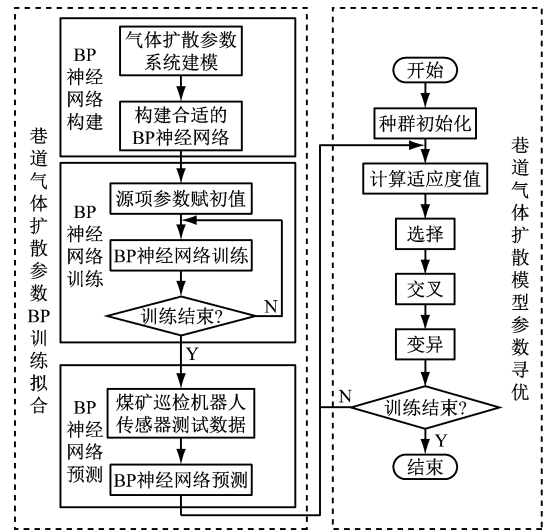


图 3 气体扩散系数寻优流程

Fig. 3 Flow of gas diffusion coefficient optimization

3 巷道气体环境信息检测策略

利用煤矿巡检机器人(图 4)进行煤矿巷道气体相关信息的检测与处理,气体环境信息检测传感器安装在巡检机器人顶部,该机器人能实现同步定位和地图重构功能,能准确提供当前位置、障碍物信息等。



图 4 煤矿巡检机器人

Fig. 4 Coal mine inspection robot

煤矿巡检机器人移动过程中,根据设定的采样间隔,采集某一时刻所处截面气体传感器位置对应点的气体浓度值以及风速、温度等信息,并进行降噪处理,输出当前采样点气体浓度等信息,赋为源项初值进行扩散系数寻优,从而建立当前巷道气体扩散优化模型,此时,输入当前截面任意点坐标信息即可求解对应点的气体浓度值,具体流程如图 5 所示。

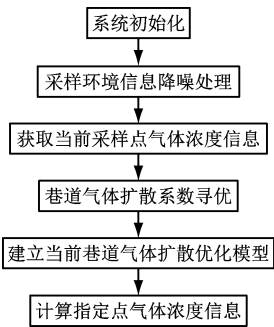


图 5 煤矿巡检机器人巷道气体环境信息检测流程

Fig. 5 Flow of roadway gas environment information detection of coal mine inspection robot

4 系统实验验证

对某矿井巷道瓦斯浓度进行检测,选取 $4\text{ m} \times 3\text{ m}$ 矩形巷道为实验巷道,其风量为 $1\,900\text{ m}^3/\text{min}$,温度范围为 $30\sim 32\text{ }^\circ\text{C}$ 。采用右手定则建立坐标系,设定泄漏源位置在回采工作面与回风巷交叉的顶板中间位置,以泄漏源投影到底板为坐标原点,下风向为 x 轴方向,坐标设置如图 6 所示。

巡检机器人自回风巷风门以内 100 m 处向工

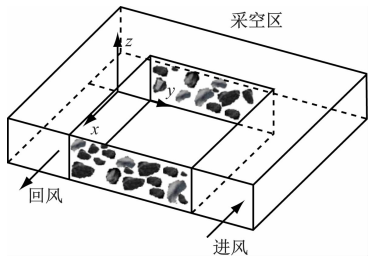


图 6 坐标系

Fig. 6 Coordinate system

表 1 部分巡检机器人采样点及人工巡检信息、系统模型计算值

Table 1 Sampling points of some inspection robots and manual inspection information, calculated values of system models

巡检机器人采 样点坐标/m	巡检机器人采 样点浓度值/%	人工巡检点 坐标/m	人工巡检点 实测值/%	人工巡检点系统 模型计算值/%	绝对误差/%
20,-1.5,0.7	0.32	20,-0.8,1.5	0.33	0.426 3	0.096 3
30,-1.5,0.7	0.31	30,-0.8,1.5	0.33	0.422 6	0.092 6
40,-1.5,0.7	0.31	40,-0.8,1.5	0.33	0.418 8	0.088 8
50,-1.5,0.7	0.31	50,-0.8,1.5	0.32	0.414 6	0.094 6
60,-1.4,0.7	0.30	60,-0.8,1.5	0.32	0.410 2	0.090 2
70,-1.4,0.7	0.30	70,-0.8,1.5	0.32	0.405 6	0.085 6
80,-1.3,0.7	0.31	80,-0.8,1.5	0.32	0.400 8	0.080 8
90,-1.4,0.7	0.30	90,-0.8,1.5	0.32	0.395 7	0.075 7
100,-1.3,0.7	0.29	100,-0.8,1.5	0.32	0.390 5	0.070 5

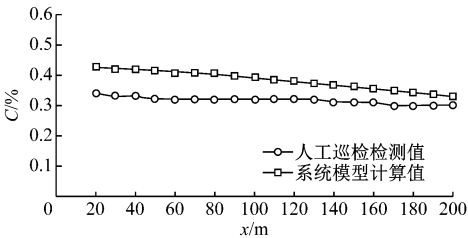


图 7 系统模型计算值与人工巡检检测值对比

Fig. 7 Comparison between calculated value of the system model and manual inspection value

由表 1 可以明显看出,当采样点接近工作面时,巡检机器人气体环境智能检测系统的计算值与人工巡检检测值的绝对误差显著增大,最大达到 0.096 3%,但小于 0.1%,基本满足《煤矿安全规程》对巷道瓦斯浓度检测的误差要求,表明采用基于气体扩散优化模型的煤矿巡检机器人实现煤矿井下气体环境信息智能检测是可行的。由图 7 可知,煤矿巡检机器人巷道气体环境智能检测系统计算值与人工巡检检测值的变化曲线基本一致,巡检机器人的气体计算值曲线更为平滑,说明采用该系统可较为准确地计算出煤矿巷道截面上任意点的气体浓度。

5 结语

针对现有煤矿巡检机器人气体环境信息检测的

作面方向行驶,运行速度控制在 0.4 m/s 左右,每隔 10 m 为一个采样点,连续多次采样,并对采集的信息进行降噪滤波处理。同时,通过人工巡检在相同巷道截面获取距离巷帮 1.2 m、底板 1.5 m 位置的瓦斯浓度信息。部分巡检机器人采样点信息、人工巡检信息、人工巡检点的系统模型计算值见表 1。系统模型计算值与人工巡检检测值对比如图 7 所示。

局限性,集成气体扩散理论及机器人技术,设计了基于气体扩散模型的煤矿巡检机器人巷道气体环境智能检测系统。该系统基于高斯烟羽模型建立了煤矿巡检机器人巷道气体扩散优化模型,将当前截面任意点坐标信息输入到气体扩散优化模型,可求解对应巷道截面气体浓度分布规律,实现了煤矿巡检机器人在移动过程中可检测任意截面任意点的气体环境信息。实验结果表明,该系统克服了传统煤矿巷道气体检测方法的局限性,能够解算出符合检测误差要求的任意截面上任意点的气体浓度,并实现动态实时检测,为煤矿井下气体智能检测提供了一种新思路与新方法。

参考文献(References):

[1] 阙建立. 智能矿山平台建设与实现[J]. 工矿自动化, 2018,44(4):90-94.
QUE Jianli. Construction and implementation of platform for intelligent mine[J]. Industry and Mine Automation, 2018,44(4):90-94.

[2] GOMATHI V,SOWMYA A S,AVUDAIAMMAL P S, et al. Design of an adaptive coal mine rescue robot using wireless sensor networks[C]// Foundation of Computer Science (FCS), 2015.

[3] HUSNI N L, HANDAYANI A S, NURMAINI S,

- et al. Odor localization using gas sensor for mobile robot [C]// IEEE International Conference on Electrical Engineering, 2017.
- [4] HUSNI N L, SILVIA A, NURMAINI S, et al. Optimal gas sensors arrangement in odor searching robot [C]// IEEE International Conference on Electrical Engineering & Computer Science, 2018.
- [5] HAN Fan, HERNANDEZ BENNETTS V, SCHAFFERNICHT E, et al. Towards gas discrimination and mapping in emergency response scenarios using a mobile robot with an electronic nose [J]. *Sensors*, 2019, 19(3):685.
- [6] 薛春荣. 本安探测机器人气体采样及处理系统研究 [D]. 北京:煤炭科学研究总院, 2014.
- XUE Chunrong. Research on gas sampling and processing system from intrinsic safety and survey robot in mine [D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014.
- [7] 秦玉鑫. 煤矿灾害信息探测机器人的设计与实现 [J]. *煤矿机械*, 2015, 36(1):18-21.
- QIN Yuxin. Design and realization of coal mine disasters information exploration robot [J]. *Coal Mine Machinery*, 2015, 36(1):18-21.
- [8] 张海波, 茹瑞鹏, 张静. 煤矿井下瓦斯智能巡检机器人系统的研究与设计 [J]. *中国煤炭*, 2019, 45(4):77-81.
- ZHANG Haibo, RU Ruipeng, ZHANG Jing. Research and design of intelligent patrol robotic system for gas of underground mine [J]. *China Coal*, 2019, 45(4):77-81.
- [9] 张树生, 马静雅, 岑强, 等. 煤矿综采工作面巡检机器人系统研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(10):136-140.
- ZHANG Shusheng, MA Jingya, CEN Qiang, et al. Research on inspection robot system for fully-mechanized mining face in coal mine [J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(10):136-140.
- [10] 刘永立, 陈海波. 矿井瓦斯爆炸毒害气体传播规律 [J]. *煤炭学报*, 2009, 34(6):788-791.
- LIU Yongli, CHEN Haibo. Poison gases propagation rules of methane explosion in coal mine [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(6):788-791.
- [11] 贾智伟, 景国勋, 张强. 瓦斯爆炸事故有毒气体扩散及危险区域分析 [J]. *中国安全科学学报*, 2007(1):91-95.
- JIA Zhiwei, JING Guoxun, ZHANG Qiang. Analysis on the diffusion of toxic gases from gas explosion and the determination of risk area [J]. *China Safety Science Journal*, 2007(1):91-95.
- [12] 谢雪凌, 郑霞忠. 融合环境因素的有限空间毒气扩散危害程度分析 [J]. *人民长江*, 2018, 49(8):78-82.
- XIE Xueling, ZHENG Xiazhong. Influence of environmental factors on poison gas diffusion in limited space [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(8):78-82.
- [13] SÁNCHEZ-SOSA J E, CASTILLO-MIXCÓATL J, BELTRÁN-PÉREZ G, et al. An application of the Gaussian plume model to localization of an indoor gas source with a mobile robot [J]. *Sensors*, 2018, 18(12):4375-4391.
- [14] LIU X, GODBOLE A, LU C, et al. Optimization of dispersion parameters of Gaussian plume model for CO₂ dispersion [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(22):18288-18299.
- [15] 王丹, 赵江平, 刘冬华, 等. 基于高斯模型的液氨储罐泄漏扩散仿真分析 [J]. *环境工程*, 2016, 34(7):140-144.
- WANG Dan, ZHAO Jiangping, LIU Donghua, et al. Simulation of liquid ammonia storage tank leakage diffusion based on Gaussian model [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(7):140-144.
- [16] 李世威, 王建强, 曾俊伟. 一种改进的放射性气体扩散高斯预估模型算法 [J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(1):123-126.
- LI Shiwei, WANG Jianqiang, ZENG Junwei. Improved Gaussian estimate model algorithm for radioactive gas diffusion [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(1):123-126.
- [17] GB/T 3840—1991《制定地方大气污染物排放标准的技术方法》[S].
- GB/T 3840-1991 Technical methods for making local emission standards of air pollutants [S].