

室内危险气体巡检机器人

左军, 孙伟, 赵畅, 纪锦, 曾豪霆, 王煜¹

(南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 随着现代化工业不断发展, 在生产过程中使用危险气体或者其它气体加工的工厂一直存在着气体泄露危险, 一些重特大事故屡见不鲜, 安全生产问题应值得重视。为了降低工厂危险气体泄漏风险, 需要实现对工厂的危险气体泄漏进行检测, 本文设计了一款部署了高精度自研气体检测装置的室内导航智能巡检机器人, 在机器人上面搭载了自主研发的高精度气体浓度传感器实现危险气体检测, 实现传统的固定气体浓度检测仪的功能, 利用室内导航技术实现自主运行, 能够开展危险气体自主巡检作业, 此外还采用了一种浓度热力图的方式, 实现最直观地气体浓度平面分布监控。最后, 通过实验验证了巡检机器人在不同环境下进行巡检作业的可行性, 为工厂及室内等环境的危险气体巡检作业提供新的智能解决方案。

关键词: 气体浓度传感器; 气体检测; 自主巡检

A patrol robot for indoor dangerous gas inspection

Zuo Jun, Sun Wei, Zhao Chang, Ji Jin, Zeng Haoting, Wang Yu

(Nanjing University of Information Science and Technology)

Abstract: With the continuous development of modern industry, there has always been a risk of gas leakage in factories that use dangerous gases or other gases for processing in the production process. Some serious and serious accidents are common, and safety in production should be paid attention to. In order to reduce the risk of dangerous gas leakage in the factory, it is necessary to detect the dangerous gas leakage in the factory. In this paper, an indoor navigation intelligent inspection robot deployed with a high-precision self-developed gas detection device is designed. The robot is equipped with a self-developed high-precision gas concentration sensor to detect dangerous gas, realize the function of traditional fixed gas concentration detector, and use indoor navigation technology to achieve autonomous operation, It is able to carry out independent patrol inspection of hazardous gas, in addition, it also adopts a concentration thermodynamic diagram to

第一作者信息: (左军, 男, 硕士, 电子信息, zuo_jun@163.com)

通讯作者信息: (孙伟, 男, 教授, 无人平台视觉导航与控制, sunw0125@163.com)

realize the most intuitive monitoring of gas concentration plane distribution. Finally, the feasibility of patrol inspection robot in different environments is verified through experiments, which provides a new intelligent solution for hazardous gas patrol inspection in factories and indoor environments.

Keywords: Gas concentration sensor; Gas detection; Self inspection

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

随着现代化工业不断发展,传统制造工厂、化工厂的安全生产问题依旧值得重视。在生产过程中使用危险气体或者其它气体加工的工厂一直存在气体泄露危险,一些重特大事故屡见不鲜,对生命和财产造成了重大毁灭。例如,天津滨海新区 812 事件,造成 165 人遇难,8 人失踪,798 人受伤。还有河北盛华化工 1128 重大爆燃事故,造成 24 人死亡,20 余人重伤。

究其以上事故主要原因有:1)危险气体管道覆盖范围大,可能泄露的位置多,一旦泄露不容易被检测到;2)即使发现泄露,也难以快速获得其确切位置;3)目前采用人工定时、定点抽检,缺乏全天候全自主的巡检装备。设计一款高效、精准且智能的气体浓度检测装置是有必要的。

1.2 应用价值

目前市面上也有很多不同类型的气体浓度检测设备。一种是传统的固定式气体浓度检测仪,例如,基于电化学传感器的多组分气体浓度检测仪实现对一氧化碳、氢气、氧气和可燃性气体(甲烷)的浓度进行实时检测和监控报警^[1]。利用红外吸收检测原理,结合现代检测设备和数据处理方法设计的甲烷气体浓度检测仪^[2]。这种检测仪需要安装在场景中,结构单一,无法完成巡检作业,且存在很大盲区。另外一种为滑轨可移动式机器人,例如,针对煤电厂设计的 U 型轨道巡检机器人,可根据人工巡检经验设置机器人巡检参数并开展巡检作业^[3]。这种机器人能沿着预先铺设的轨道运行,进而开展巡检工作,但是轨道的铺设、维护成本高、而且检修困难。我们将轮式移动机器人^[4]和气体浓度传感器进行结合,设计了一款室内危险气体巡检机器人。该机器人可以在工厂环境下自主开展巡检工作,并且可以实现远程气体浓度平面分布监控。利用我们所设计的室内危险气体巡检机器人部署到工厂中,在工厂里开展巡检工作,既可以避免人员伤亡和财产损失,又可以解决上述固定式和滑轨式气体浓度检测

装置所暴露的严重缺点。

2 创新点与优势

2.1 创新点

本文第一个创新点在于我们采用了一种新的数据监测方式——气体浓度热力图。如图 2-1 所示，目前市面上几乎所有的气体浓度监测设备回传的数据都是以数字形式或者波形图形式呈现在人们的屏幕上，普通数字数据无法记录气体浓度变化的情况，波形图虽能记录历史的气体浓度变化情况，但单个波形图又无法给出不同区域的气体浓度信息。所以我们使用了一种热力图的方法来显示出气体浓度数值，气体浓度热力图可以在环境的整个平面上显示出各个区域上浓度数字，通过气体浓度热力图可以很直观地监测环境中的气体浓度水平及其变换。

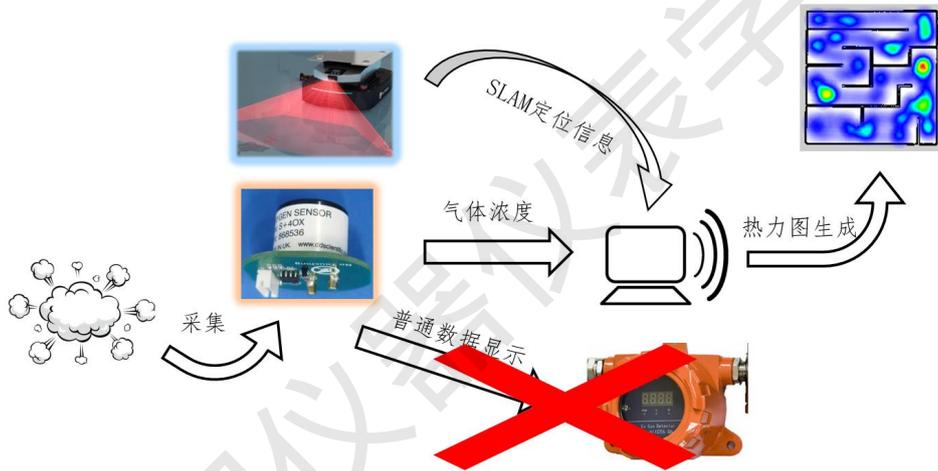


图 2-1 气体浓度热力图生成

本文第二个创新点在于自主设计了一种高精度气体浓度检测装置，在一定程度上降低了市面上的大部分气体浓度检测仪的检测误差，将检测误差缩小到了 0.1%，检测精度是其他检测仪的数 10 倍以上，远高于市面其他检测仪，满足于有毒有害气体的高精度检测任务。其次考虑到了巡检机器人的经济性和实用性，本作品设计的气体浓度检测装置对传感器连接部位采取模块化设计，如图 2-2 所示，机器人身上的接口对传感器是向下兼容的。这样的设计具有适用性广，节约成本的优点。

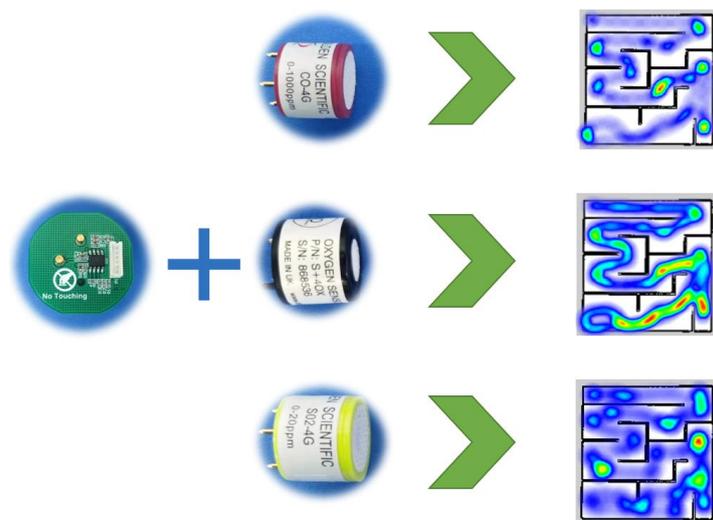


图 2-2 气体浓度检测装置模块化设计

本文第三个创新点在于机器人的高度自主性。本文设计的机器人安装了激光雷达、IMU、里程计等多个传感器，结合了 SLAM 室内导航算法^[5]和路径规划算法^[6]，使得机器人拥有完全自主运行的高度智能。将机器人应用在巡检环境中，它可以脱离人为控制，自主规划合理的巡检路径进行全区域巡检，且可以在巡检作业时根据周围环境进行实时自主避障^[7]。高度自主性大大提高机器人在作业时的安全性。

2.2 优势

本文设计的室内危险气体巡检机器人共有三大主要功能：自主导航、气体监测、气体浓度热力图，如图 2-3 所示。该机器人结合了智能机器人技术和气体浓度传感器技术，可以在即使无人看守的情况下也能自主完成气体浓度巡检任务，在这种情况下一旦发生气体泄漏情况机器人会立刻发出警报，并将泄漏位置发送到监控室，高效的完成抢修工作和人员疏散工作。在这些优势作用下，可以很大程度避免由气体泄漏所导致的灾难的发生，不仅保障了人员生命安全，又避免财产损失。此外相比较于传统气体检测装置，该机器人具有易部署，低成本，高效率等优势。

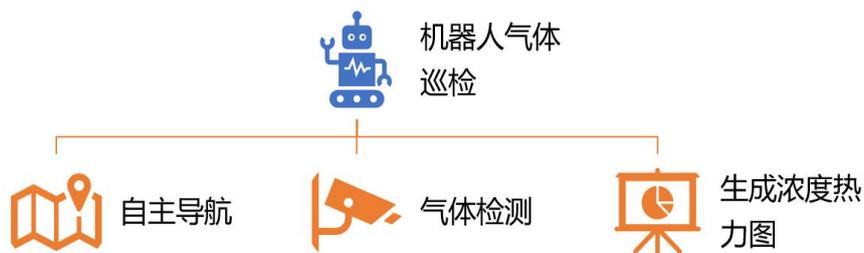


图 2-3 巡检机器人总体任务

3 实现方案简介

3.1 设计原理

上文有提到机器人的三大主要功能：自主导航、气体监测、气体浓度热力图。首先要实现自主导航则需要机器人的计算机上部署 SLAM 算法以及路径规划算法，其次要求在这台计算机上还需完成浓度热力图的生成任务，所以对于机器人的机载计算机的算力和线程等性能需要进行一定的考量。最后机器人的主线任务是气体检测，因此首先需要设计出满足精度要求的传感器模块，另外还需要设计出机器人的单片机系统，完成传感器的数据采集任务以及机器人的运动控制任务。

基于这个原理，我们将机器人分为上层系统和下层系统，机器人的硬件系统框图如图 3-1 所示。上层系统由 Nvidia Jetson NX 机载计算机为核心，配合激光雷达、IMU 等传感器完成导航算法、路径规划以及浓度热力图生成等任务。下层系统由 STM32F429 的 MCU 为核心，完成机器人的速度、方向控制等任务，并配合气体浓度传感器构成的气体检测装置电路，完成气体浓度数据检测任务。

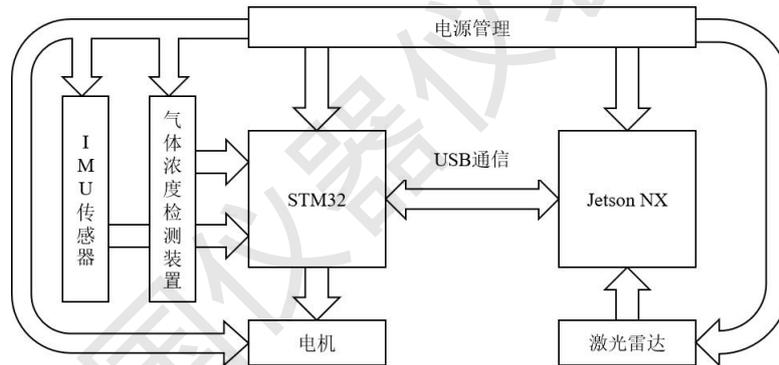


图 3-1 硬件系统框图

3.2 设计方法

3.2.1 上层系统设计

在上层系统的硬件上，本文选用 Nvidia Jetson NX 微型计算机作为核心，选用思岚科技的 RPLIDAR A2 激光雷达作为环境扫描传感器、选用 MPU6050 作为 IMU 传感器。计算机可以直接通过 USB 端口读取激光雷达的数据，IMU 数据是从通过下层系统的 MCU 进行采集，因此计算机会通过 USB 端口与下层系统的单片机进行通信，单片机会不断地将采集到的 IMU 数据发送给计算机。

在上层系统的软件上，计算机中部署了 Cartographer 算法^[8]、Dijkstra 算法^[9]以及 DWA 算法^[10]。其中，Cartographer 算法谷歌提出的基于图优化的 SLAM 算法，在硬件条件有限的

情况下可以实现机器人的位姿估计以及高精度地图的构建。Dijkstra 算法是一种全局路径规划算法，可以在建立好的栅格地图中实现最优全局路径的规划。DWA 是一种局部路径规划算法，可以在机器人运行过程中不断的更新机器人的局部路径，实现局部避障效果。

上层系统框图如图 3-2 所示，最终实现了机器人的导航与定位、环境扫描等功能。

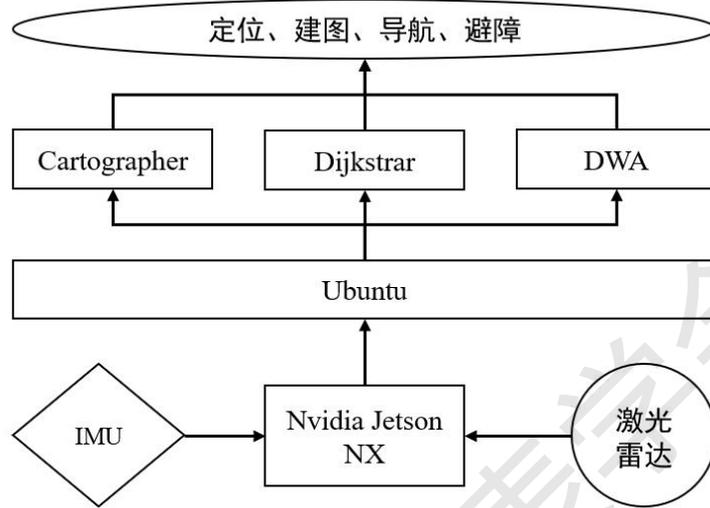


图 3-2 上层系统框图

3.2.1 下层系统设计

下层系统的主体是一块自主设计的控制板，以 STM32F429 单片机作为核心，该控制板集成了电源管理模块、电机驱动模块、通讯模块、气体检测模块等功能模块。其中电源管理模块负责为机器人所有设备提供合适的工作电源；电机驱动模块主体是以一个全桥电机驱动电路，单片机可以通过 PWM 控制电机的转速；通讯模块负责为下层系统提供一个与上层系统的数据交换的接口，通过它可以给上层系统传输传感器数据，也可以接收上层系统的运动指令；气体检测模块是机器人的主要功能模块，单片机可以采集气体传感器的数据，实现气体检测功能。

在下层系统的软件上，主要基于 FreeRTOS，在其应用层上创建运动控制、IMU 数据采集、气体浓度检测等任务程序。其中运动控制任务程序分为方向控制和速度控制，根据接收的运动指令，利用 PID 算法控制电机转速实现运动控制；IMU 数据采集任务程序主要是通过 IIC 协议读取 MPU6050 传感器输出的数值，并解算出加速度和角速度数据，最后打包发送到上层系统的计算机；气体浓度检测任务程序主要是通过 ADC 采集气体检测模块的输出电压，并解算成气体浓度数值，最后打包发送到上层系统的计算机。

下层系统框图如图 3-3 所示，最终实现了机器人气体浓度检测、传感器数据传输、运动控制等功能。

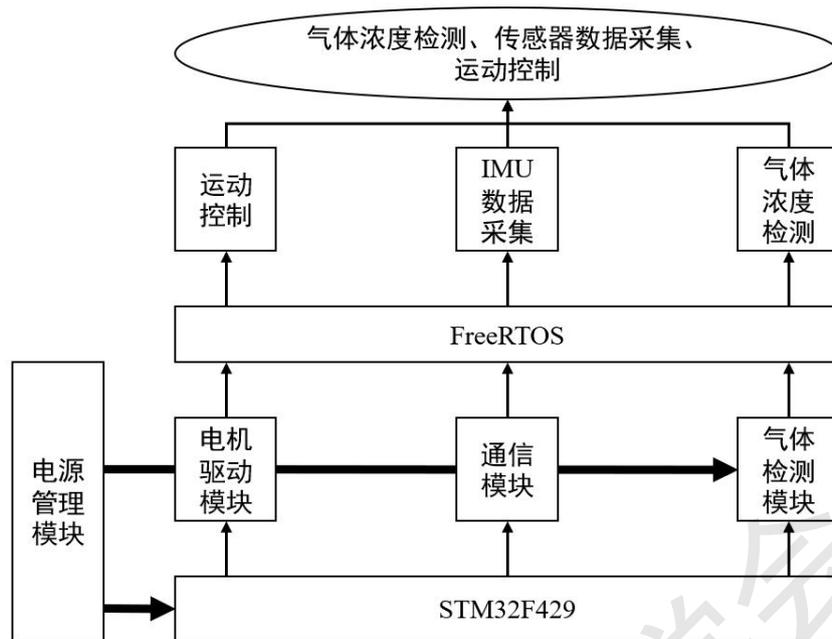


图 3-3 下层系统框图

3.2.3 气体检测模块设计

气体检测模块是本文所设计的巡检机器人的核心模块，是实现机器人可以在化工厂、仓库等带有危险气体的环境下进行气体巡检作业的关键所在。

气体检测模块的主体是电化学气体浓度传感器^[11]。电化学传感器采用的是电化学原理，可以将被测气体经过化学反应并产生与气体浓度成正比的电信号，并通过电极输出。由于电化学传感器产生的电信号是十分微弱的，所以需要设计出适合传感器的电信号放大电路，将传感器产生的微弱电信号经过运算放大器放大并滤除多余的白噪声，得到稳定的电信号从模块的输出端输出，而后单片机可以通过 ADC 电路采集电信号的数值，并解算成实际的气体浓度数值，实现气体浓度检测功能。气体检测模块电路图如图 3-4 所示，实物图如图 3-5 所示。

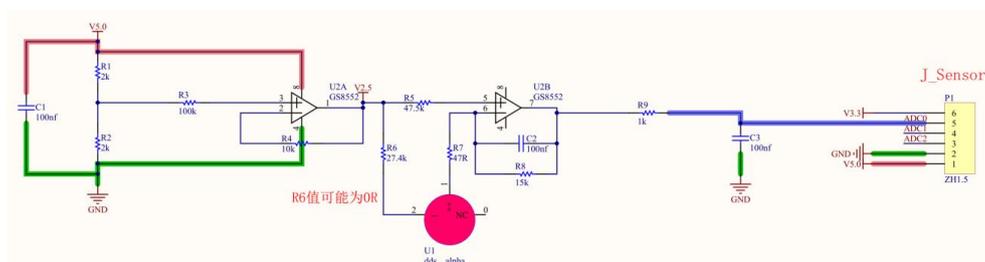


图 3-4 气体检测模块电路原理图



图 3-5 自研气体检测模块实物图

3.3 实验验证过程

3.3.1 实验平台

本文采用一款自主设计制作的智能轮式气体巡检机器人作为实验平台，机器人上搭载了激光雷达、IMU 以及自研的气体浓度检测装置，如图 3-6 所示。



图 3-6 气体巡检机器人整体图

3.3.2 气体浓度检测模块测试

我们首先对我们自研的气体浓度检测模块进行了检测精度测试，我们拿来了市面某一种常用的高精度一氧化碳气体浓度检测仪，将我们自主研制的气体浓度检测模块与其放入同一个充入了一定浓度的一氧化碳密封容器中，并记录了两种检测装置的检测数据，并生成了波形，如图 3-7 所示。经过对比发现，我们自研的气体检测模块的检测数据具有非常高的稳定性和检测精度。

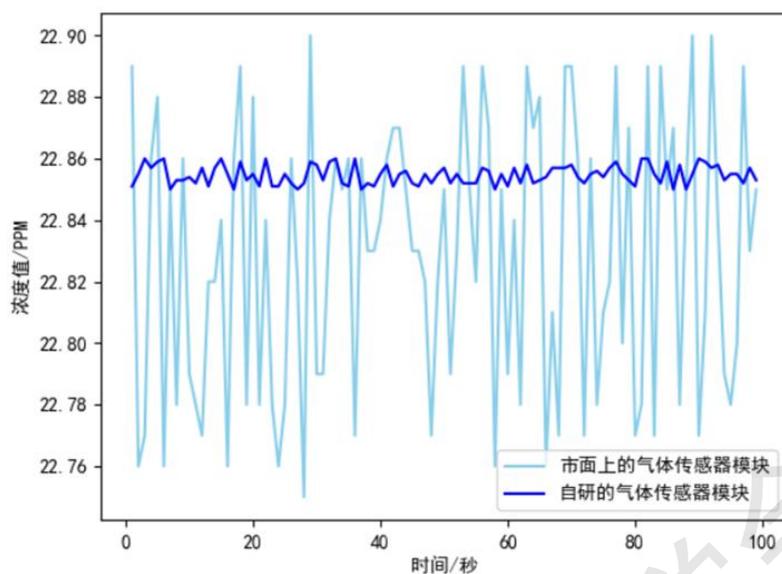


图 3-7 自研气体浓度检测模块与市面气体浓度检测装置 CO 气体检测精度对比

3.3.3 小范围场景测试

我们在室内搭建了一个小范围测试场景，让机器人运行在我们的这个小范围场景中，对机器人的自主性和气体巡检功能进行了测试。机器人事先会通过遥控方式在小场景中运行一遍，建图算法会建立一个完整的小范围场景地图，之后机器人可以通过建立好的地图进行路径规划，自主在小范围场景中运行。建图以及路径规划实验结果如图 3-8 所示。

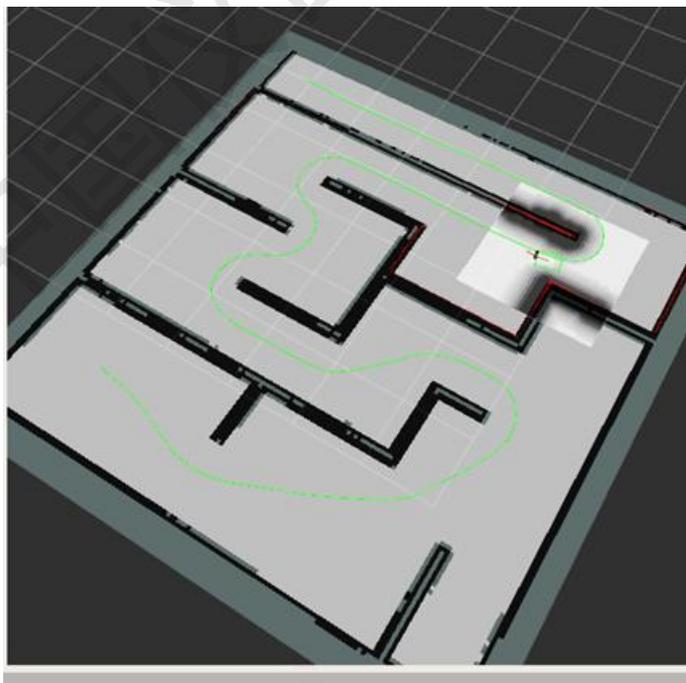


图 3-8 自动驾驶效果图

通过以上实验证明机器人拥有良好的定位能力以及避障能力。后续我们在场景中部分区

域放置了一些一氧化碳气体源，由此利用我们的机器人在自主导航过程中去检测一氧化碳气体浓度数据，并产生最终的一氧化碳浓度热力图。如图 3-9 所示，是实验的浓度热力图。

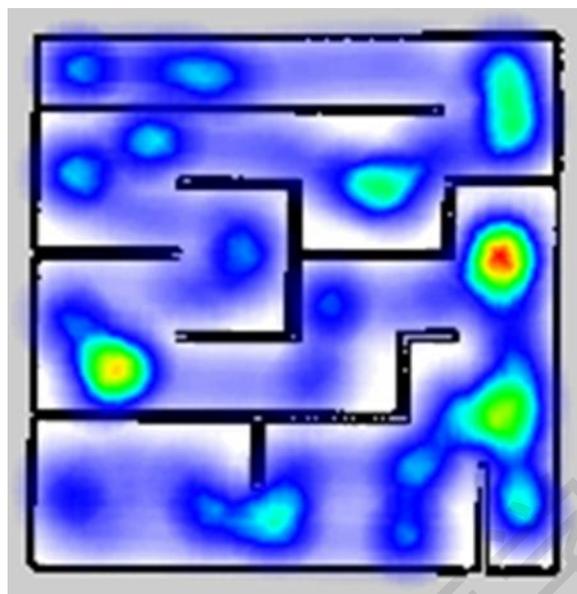


图 3-9 小范围场景的气体浓度热力图

由实验结果图可知，在放置气体源的地方气体浓度较高，热力图会在该地方呈现较深的红色，其余地方地体浓度较低，会呈现不同程度的蓝色或者不显色。

3.3.4 大范围场景测试

我们在一个工厂中的一处大范围场景中对机器人的自主性和气体巡检功能进行了测试。实验过程与小范围场景测试过程大致一样，首先我们通过遥控机器人建立了完整的大范围场景地图，之后让机器人自主地在场景内来回运行，并且我们依然在场景不同区域内放置了几个一氧化碳气体源，由机器人在自主导航过程中去检测一氧化碳气体浓度数据，并产生最终的一氧化碳浓度热力图。如图 3-10 所示，是大范围场景下实验产生的气体浓度热力图。

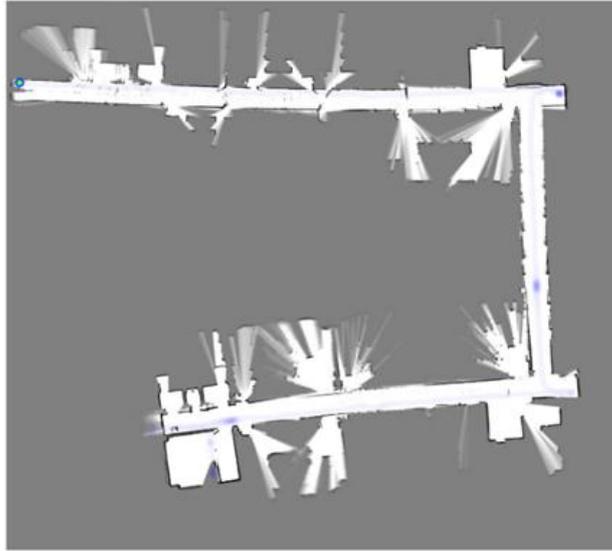


图 3-10 大范围场景的气体浓度热力图

由实验结果图可知，由于在大范围场景下气体扩散速度快，且放置气体源的地方较少，所以气体源位置气体会快速扩散，浓度降低，热力图会在该地方呈现蓝色，其余地方气体浓度基本为零，所以不显色。

参考文献:

- [1] 王秋花. 基于电化学传感器的多组分气体浓度检测仪[D].西安理工大学,2010.
- [2] 郭晓满,戴景民.红外甲烷气体浓度检测仪设计[J].自动化技术与应用,2016,35(01):94-97.
- [3] 马振涛,涂鸿,姜楠.发电厂输煤系统巡检机器人研制与应用[J].黑龙江电力,2019,41(02):169-173+178.DOI:10.13625/j.cnki.hljep.2019.02.016.
- [4] 朱磊磊,陈军.轮式移动机器人研究综述[J].机床与液压,2009,37(08):242-247.
- [5] 毛军,付浩,褚超群,何晓峰,陈昶昊.惯性/视觉/激光雷达 SLAM 技术综述[J].导航定位与授时,2022,9(04):17-30.DOI:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.04.003.
- [6] 李晓旭,马兴录,王先鹏.移动机器人路径规划算法综述[J].计算机测量与控制,2022,30(07):9-19.DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2022.07.002.
- [7] 杜奕,郭达,张新锋.智能车避障路径规划方法研究[J].交通节能与环保,2016,12(03):17-22.
- [8] 崔志,石秀敏,李勇,王玮,刘朝华.Cartographer 2D SLAM 算法室内建图分析[J].电子世界,2020(11):27-29.DOI:10.19353/j.cnki.dzsj.2020.11.007.
- [9] 乐阳,龚健雅.Dijkstra 最短路径算法的一种高效率实现[J].武汉测绘科技大学学报,1999(03):209-212.

- [10] 卞永明,季鹏成,周怡和,杨濛.基于改进型 DWA 的移动机器人避障路径规划[J].中国工程机械学报,2021,19(01):44-49.DOI:10.15999/j.cnki.311926.2021.01.008.
- [11] 周安.电化学气体传感器工作电路的设计[J].首都师范大学学报(自然科学版),1997(S1):136-139.DOI:10.19789/j.1004-9398.1997.s1.030.

中国仪器仪表学会