

分类号: TP242.2

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2210120170



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 工业机器人正压防爆系统设计
与实验研究

论 文 作 者 储徐烽

校 内 导 师 方明 副教授

校 外 导 师 蒋立军 高级工程师

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 工业机器人

论文提交日期: 2024 年 5 月 30 日

分类号：TP242.2

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2210120170

工业机器人正压防爆系统设计与实验研究

DESIGN AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF POSITIVE PRESSURE EXPLOSION-PROOF SYSTEM FOR INDUSTRIAL ROBOT

学生姓名：_____储徐烽_____

校内导师：_____方明 副教授_____

校外导师：_____蒋立军 高级工程师_____

专业学位类别：_____机械_____

研究方向：_____工业机器人_____

论文答辩日期：_____2024 年 5 月 24 日_____

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：储徐烽

日期：2024 年 5 月 30 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：储徐烽

指导教师签名：

日期：2024 年 5 月 30 日

日期：2024 年 5 月 30 日

工业机器人正压防爆系统设计与实验研究

摘 要

近年来工业机器人广泛地运用于打磨、焊接、搬运、喷涂等工业领域，能够有效改善产品质量，提高生产效率。当工业机器人应用于喷涂作业或其他危险作业环境时，若其内部的电气元件产生的火花、静电、高温等危险源接触到油漆挥发出的易燃易爆气体，将会带来安全风险。针对上述问题，本论文采用正压型防爆方法，对工业机器人防爆系统进行设计与优化，主要工作如下：

（1）对防爆原理及基本理论进行分析，根据爆炸产生的原因、国家标准对爆炸性场所的分类、各种防爆型式的特点及适用场合，并结合工业机器人的结构特性以及工作环境，选择工业机器人的防爆型式为正压型。

（2）根据流场理论，提出一种周期性脉冲进气的清扫换气方法，并建立流场仿真模型，运用 FLUENT 软件对防爆工业机器人清扫换气过程进行有限元仿真模拟，对比分析脉冲进气的周期和振幅对清扫换气效率的影响。根据分析得出，当周期相同时，脉冲进气的振幅越大，清扫换气效率越高；当振幅相同时，脉冲进气的周期越小，清扫换气效率越高。

（3）基于周期性脉冲进气对防爆工业机器人清扫换气效率的影响，设计了工业机器人正压防爆系统，具体包括正压防爆气路系统设计和控制系统设计。根据设计方案，完成核心部件的选型，绘制出电气原理图，并设计软件人机交互界面，有效的实现了工业机器人高效清扫换气功能以及正压维持功能。

（4）搭建实验平台，对有限元仿真结果和设计的正压防爆系统进行实验研究。通过对比实验数据和仿真结果，验证有限元仿真分析的有效性。

此外，通过对正压补偿、安全阀泄压、故障报警功能的实验研究，验证正压防爆系统的安全可靠性。

经过本文的研究，工业机器人正压防爆相关技术得到进一步发展，为实际的工程应用提供了指导，同时后续的研究工作提供了经验和参考。

关键词：工业机器人，正压型防爆，流体仿真，脉冲换气，系统设计

DESIGN AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF POSITIVE PRESSURE EXPLOSION-PROOF SYSTEM FOR INDUSTRIAL ROBOT

ABSTRACT

In recent years industrial robots are widely used in grinding, welding, handling, spraying and other industrial fields, which can effectively improve product quality and productivity. When industrial robots are used in painting operations or other hazardous work environments, they pose a safety risk if the sparks, static electricity, high temperatures and other hazardous sources generated by their internal electrical components come into contact with flammable and explosive gases emitted by the paint. Aiming at the above problems, this thesis adopts the positive pressure type explosion-proof method to design and optimize the explosion-proof system of industrial robots, and the main work is as follows:

(1) The explosion-proof principle and basic theory of analysis, according to the cause of the explosion, the national standards on the classification of explosive places, the characteristics of various explosion-proof type and applicable occasions, and combined with the structural characteristics of industrial robots and the working environment, to determine the explosion-proof type of industrial robots for the positive-pressure type.

(2) According to the flow field theory, a periodic pulse air intake cleaning and ventilation method is proposed, and a flow field simulation model is established to simulate the finite element simulation of the explosion-proof industrial robot cleaning and ventilation process using FLUENT software to compare and analyze the effects of the period and amplitude of the pulse air intake

on the efficiency of the cleaning and ventilation. According to the analysis, when the period is the same, the larger the amplitude of the pulse inlet, the higher the efficiency of scavenging and ventilation; when the amplitude is the same, the smaller the period of the pulse inlet, the higher the efficiency of scavenging and ventilation.

(3) Based on the impact of periodic pulse air intake on the efficiency of explosion-proof industrial robot cleaning and air exchange, a positive-pressure explosion-proof system for industrial robots was designed, specifically including the design of the positive-pressure explosion-proof air circuit system and the design of the control system. According to the design scheme, complete the selection of core components, draw the electrical schematic diagram, and design the software human-computer interaction interface, which effectively realizes the efficient cleaning and ventilation function of the industrial robot as well as the positive pressure maintenance function.

(4) An experimental platform was set up to conduct experimental studies on the finite element simulation results and the designed positive-pressure explosion-proof system. The accuracy of the finite element simulation analysis is verified by comparing the experimental data and simulation results. In addition, the safety and reliability of the positive-pressure explosion-proof system is verified through experimental studies of positive-pressure compensation, safety valve pressure relief, and fault alarm functions.

After the research of this thesis, the positive pressure explosion-proof related technology of industrial robots has been further developed to provide guidance for practical engineering applications, while the subsequent research work provides experience and reference.

KEY WORDS: industrial robotics, positive pressure explosion-proof, fluid simulation, pulse ventilation, system design

目 录

摘 要	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题的研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 防爆机器人应用领域研究现状	1
1.2.2 防爆技术研究现状	2
1.2.3 CFD 仿真技术研究现状.....	8
1.3 课题来源	9
1.4 主要研究内容	10
第 2 章 工业机器人防爆基本理论.....	11
2.1 防爆理论基础	11
2.1.1 爆炸的产生原因	11
2.1.2 爆炸性场所分类	11
2.1.3 基本防爆型式	12
2.2 工业机器人防爆技术分析	15
2.2.1 工业机器人防爆类型分析	15
2.2.2 正压防爆工业机器人的结构分析	16
2.3 正压防爆流场建模理论基础	17
2.3.1 流场基本模型	17
2.3.2 多组分流场模型	18
2.3.3 湍流模型	19
2.4 本章小结	19
第 3 章 正压防爆工业机器人高效清扫换气方法研究.....	20
3.1 清扫换气过程流场仿真模型的建立	20
3.1.1 几何模型简化	20

3.1.2 模型的网格划分	21
3.2 清扫换气过程仿真求解	22
3.2.1 求解器选择	22
3.2.2 求解算法选择	22
3.2.3 边界条件	22
3.3 仿真结果分析	24
3.3.1 恒定压力进气与脉冲进气的换气效果对比分析.....	24
3.3.2 脉冲进气的振幅变化对换气效果的影响	26
3.3.3 脉冲进气的周期变化对换气效果的影响	29
3.4 本章小结	32
第 4 章 工业机器人正压防爆系统设计	33
4.1 正压防爆系统总体方案设计	33
4.1.1 需求分析	33
4.1.2 系统总体框架	33
4.2 正压防爆气路系统设计	34
4.3 正压防爆控制系统设计	35
4.3.1 控制系统硬件设计	35
4.3.2 控制系统核心部件选型	36
4.3.3 控制系统电路设计	39
4.3.4 控制系统软件设计	43
4.4 正压防爆系统的工作流程	46
4.5 本章小结	48
第 5 章 工业机器人正压防爆系统实验研究	49
5.1 实验平台搭建	49
5.2 清扫换气系统性能实验	51
5.3 正压维持系统性能实验	53
5.3.1 正压补偿实验	53
5.3.2 安全阀泄压实验	54
5.3.3 故障报警实验	55

5.4 本章小结 55

第 6 章 总结与展望..... 56

6.1 总结..... 56

6.2 展望..... 57

参考文献 58

攻读学位期间取得的科研成果..... 64

致谢 65

第 1 章 绪论

1.1 课题的研究背景与意义

工业机器人作为近代自动控制领域中出现的一项新兴技术,逐渐成为现代制造业中的重要组成部分。工业机器人能够有效地改善产品质量,并提高生产效率,有助于加快实现工业生产自动化的速度^[1-2]。作为工业机器人领域的重要成员,喷涂机器人将表面喷涂技术和工业机器人相结合,主要用于产品表面的喷漆作业,在汽车车身涂装、家具表面喷漆等领域有着非常广泛的应用^[3]。

由于喷涂机器人的工作环境通常是密闭的喷涂房间,油漆挥发含有苯、二甲苯等爆炸性气体,根据国标 GB3836.14-2014 中对易燃易爆区域等级的划分,喷涂工作间属于爆炸性危险场所 1 区^[4]。在喷涂机器人工作过程中,若内部电气元件产生火花或腔体内未及时散发出去的热量导致温度升高,从而点燃挥发的可燃性气体引起爆炸,严重影响设备和人员安全。因此,进行喷涂机器人防爆设计,提高喷涂过程中的安全性,具有非常重要的意义。

本课题针对工业机器人正压防爆系统中清扫换气及正压维持的技术难点,研究机器人正压腔体内的气体流场、压力安全监控系统等关键技术,以实现防爆工业机器人高效的清扫换气功能以及安全可靠的正压维持功能,为实际的工程应用提供参考。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 防爆机器人应用领域研究现状

防爆机器人作为一种专用机器人,具有在易燃易爆环境中工作的能力,在石油化工、矿业、危险品处理等领域得到广泛应用与发展。20 世纪 70 年代,英国的 Morfax 生产的“MK7”和“MK8”两款机器人在战役的排雷任务中得到实战检验,标志着防爆机器人领域正式开始研究和交流^[5]。此后美国等国家陆续开展了针对石油化工行业的防爆机器人研究^[6,7],日本将防爆机器人引入喷涂工艺领域^[8]和消防救援领域^[9]。近年来,随着技术的进步,防爆机器人逐渐实现了自主导航、物体识别和任务执行等功能,国外开始将防爆机器人引入矿山行业和各种工业领域,用于地质勘探、矿井救援、危险物品搬运等任务^[10-12]。

我国对于防爆机器人的研究相对发达国家起步较晚，但发展迅速并取得显著成果。1987 年华东工学院研制出我国第一台防爆机器人^[13]，能够应用于危险炸药的搬运，为火工化工的安全生产提供了保障。21 世纪初，中国开始将防爆机器人应用于矿山行业^[14,15]，用于矿井勘探、巷道施工和危险品处理等任务。同时在公安和消防领域也引入了防爆机器人^[16,17]，通过遥控操控，防爆机器人能够有效地对爆炸物进行检测和拆除，并可用于火场探测、救援人员搜寻和火灾扑灭等任务，对于保护公安和消防人员的生命安全具有非常重要的作用。近些年，国防科工局落实了“机械化换人、自动化减人”的相关政策，防爆机器人在兵器、军工领域的应用不断增多，在火工品搬运、弹药装备等工作过程中应用自动化和智能化技术，降低安全事故的发生并保障产品质量^[18]。此外，国内的防爆机器人在石化、喷涂、危险物品处理、环境监测等领域也有着广泛的应用^[19-22]。

综上所述，国内外对防爆机器人在各领域的应用进行了广泛的研究和实践。随着相关技术的不断进步和创新，防爆机器人在各种领域的应用将会有更加广阔的发展前景。

1.2.2 防爆技术研究现状

防爆技术是确保工业设备在易燃易爆环境中安全运行的关键，国内外对防爆技术的相关研究持续深入，以提高防爆工业设备的安全性。防爆设计一般采用本安型、隔爆型和正压型等型式^[23-30]，近年来国内外学者对防爆技术进行了各方面的研究。马向阳研究设计的矿用本安电源^[31]，如图 1-1 所示，该设计选用了矿用隔爆箱，将蓄电池组、电源板分层安装在箱体内部。此外，在 STM32 的基础上设计了双重过压过流保护电路，有效的缩短了系统保护响应时间，提高电路传输效率，稳定电压输出，使矿用电源可实现本质安全和可靠的供电，为煤矿机器人的电源防爆提供了较好的研究基础。

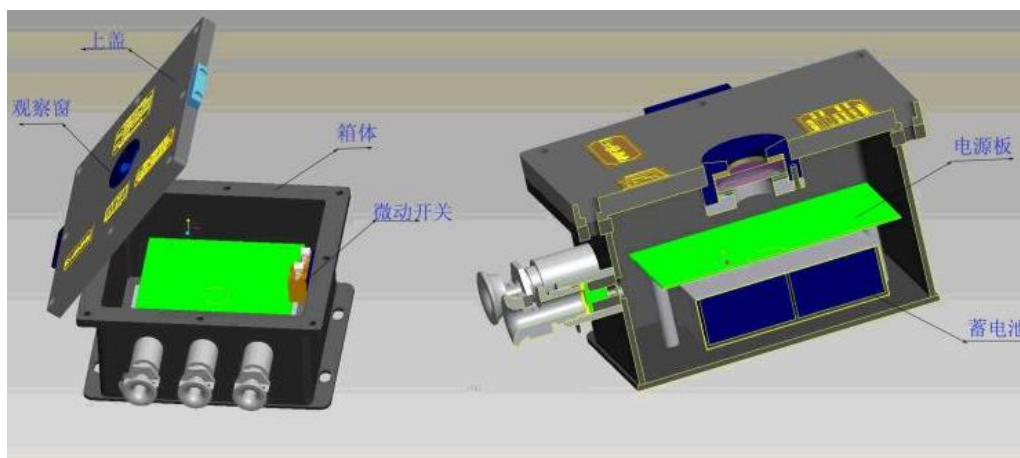


图 1-1 矿用隔爆箱

中国矿业大学的李雨潭等人对如图 1-2 所示的煤矿救援机器人的隔爆箱体进行了轻量化设计^[32,33]，首先对等厚壁板受均布载荷问题进行分析，在满足隔爆箱体强度要求的前提下，对加强筋的数量和厚度进行了优化改进。其次，设计了接线腔结构，并将其安装在电气设备腔的后方。最后，设计了线缆引入装置和隔爆接合面等隔爆装置以及其他应安装在隔爆箱体中的特有结构。

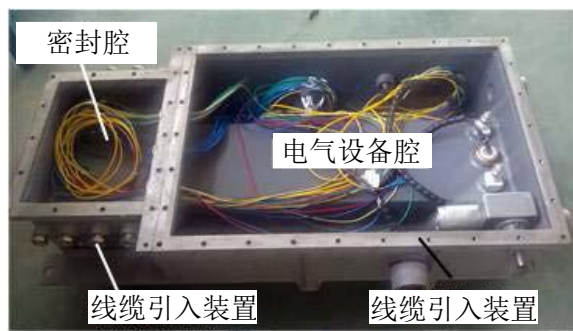


图 1-2 煤矿救援机器人的隔爆箱体

北京理工大学研究设计的矿井救援机器人^[34,35]如图 1-3 所示，该款机器人采用隔爆型防爆设计，将控制器、电机等可能会产生火花、静电的电气元件安装在具有隔爆性能的箱体内部，并基于温度、风速和气体浓度的实时数据采集，配置有风速传感器和多参数检测器，解决了预测煤矿救援机器人前方巷道气体浓度的问题，对保证矿井救援机器人执行勘探搜救任务具有重要意义。



图 1-3 矿井救援机器人

MSHA 研制的 V2 矿井救援机器人^[36]配有照明装置、监控摄像、爆炸性气体检测器、导航系统等装备，如图 1-4 所示，该款机器人选用了整体隔爆与局部隔爆相结合的防爆型式。在机器人主箱体内安装有重要电气设备，因此对整个主箱体实施了隔爆型防爆措施，并且对驱动电机和机械臂部分进行局部隔爆设计，进一步提高了机器人的防爆性能。



图 1-4 矿井救援机器人

与其他防爆型式相比，正压型防爆结构简单，对设备的材料强度要求低，在煤矿、油漆、石油等存在爆炸性气体和粉尘的危险场所，正压型防爆的应用越来越广泛^[37-41]。聂勇刚针对关节型喷涂机器人设计的正压通风型防爆系统^[42]，如图 1-5 所示，该系统由机器人腔体、PLC 控制器、正压和流量检测系统、减压阀、导管、防爆电磁阀和节流阀等组成。在机器人防爆系统运行时，PLC 控制器能够识别机器人腔体内的正压和流量信号，从而控制各电磁阀的通断状态，以实现防爆系统的换气和维持正压功能，保证机器人能够正常工作。

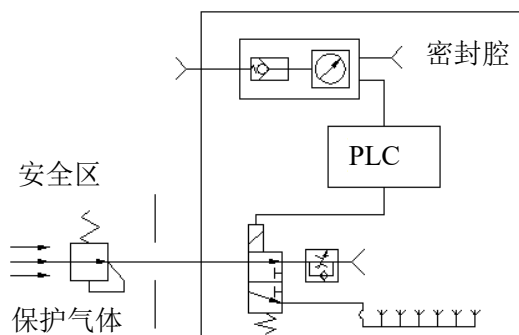


图 1-5 正压通风型防爆系统

张宏强设计的喷涂机器人正压通风多重保护型防爆系统^[43]，如图 1-6 所示，该防爆方案对机器人本体、防爆控制系统及扫气进行优化设计，将电磁阀 YV_1 和 YV_2 串联，当两个电磁阀均打开时，正压气体才能进入机器人腔体内部，保证了若有一个电磁阀发生故障，不会无限向腔体内充入气体。该防爆系统有效解决了工程应用中由于电器元件故障造成的防爆失效问题，提高了机器人工作过程中的安全性。

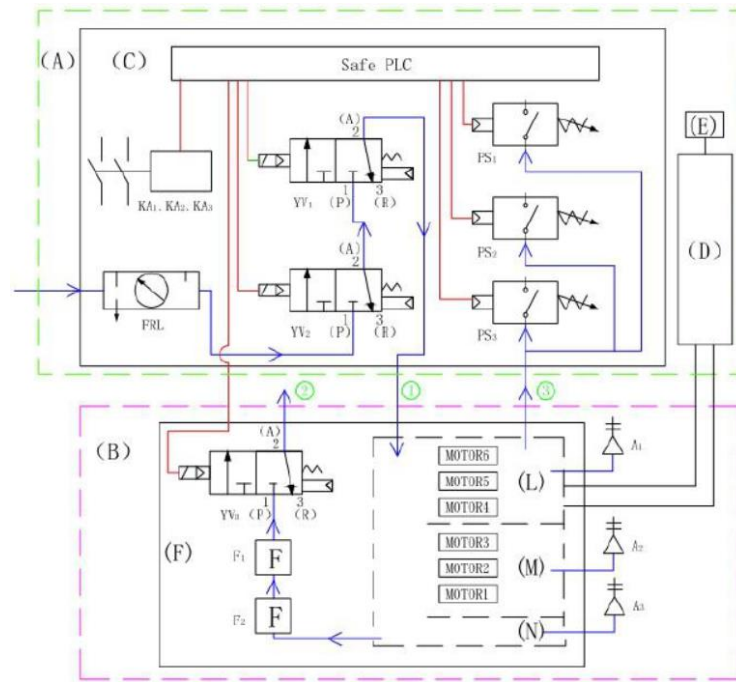


图 1-6 正压通风多重保护型防爆系统

中国矿业大学程健研究设计的矿井救援机器人^[44]，根据机器人的功能和运动特性，选择了正压型防爆，并设计了机器人主箱体的防爆壳体以及箱体内部的防爆系统。如图 1-7 所示，该研究对矿井救援机器人的防爆外壳采用了轻量化设计，并根据气体多组分运输理论，对防爆主箱体进行了清扫换气仿真分析，从而分析防爆壳体内存在的吹扫不利点位置，通过对进气管道的分布进行优化，减少吹扫不利区域，提高清扫换气效率。

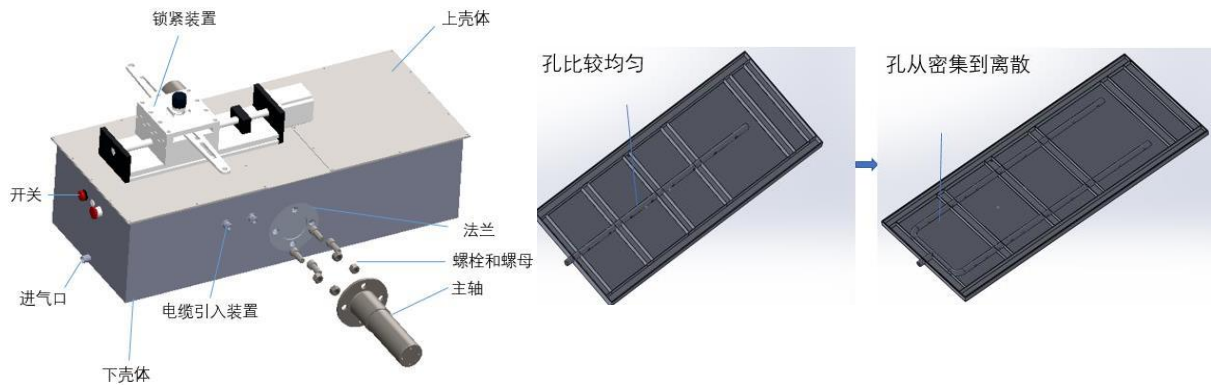


图 1-7 矿井救援机器人主箱体及进气管道分布图

Rong X 等人为了减轻煤矿探测机器人的重量，选用了正压型防爆设计^[45]，如图 1-8 所示，机器人箱体内的正压防爆系统由正压外壳、高压气罐、电磁阀、压力传感器、控制器等组成。在机器人进入爆炸性气体环境之前，使用安全气体置换正压外壳内原有

的空气，然后压力传感器将采集到的内外压强差反馈给控制器，控制器通过控制各个电磁阀的通断，使得防爆外壳内的气压始终保持在安全范围内。

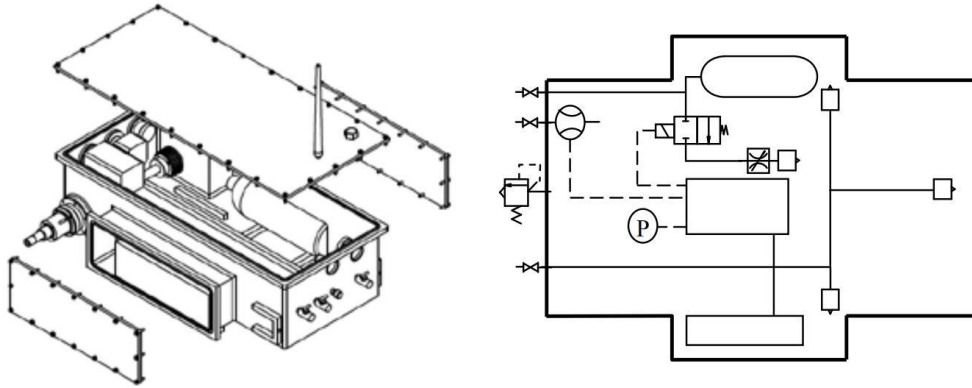


图 1-8 煤矿探测机器人外壳及防爆系统示意图

PIAP 和 EMAG 联合研制的煤矿救援机器人平台 MPI^[46]如图 1-9 所示，PIAP 设计了平台的机械组件，包括防爆外壳、管架、本安型电子元件等，并选择合适的车轮（轮辋和轮胎）、无刷直流电机、角螺旋齿轮单元和制动器的驱动块。EMAG 开发了电子和可编程的电子组件，包括测量系统、视觉系统、传输系统、通信控制器、电机控制器、电池和特定组件的外壳，以及用于测量、控制、通信和存档的软件。该机煤矿救援机器人带有的正压防爆外壳能够有效的实现防护作用，提高机器人救援过程中的安全可靠。

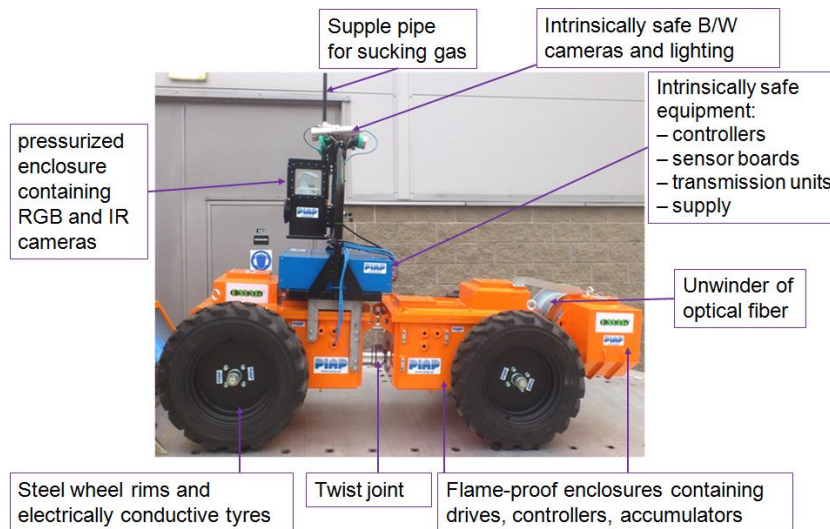


图 1-9 MPI 煤矿救援机器人

张文设计的 15MW 正压型电机^[47]如图 1-10 所示，其密封结构和正压吹扫系统控制均符合国家标准对正压型防爆电机的规定。正压型电机的端盖和机座的接合面、电机的端盖和轴承的接合面等位置均设计为密封结构，以确保电机泄漏量不超过供气系统的补

偿量,从而使电机内部的气体压力始终高于外部环境的气体压力,时刻保证电机处于正压状态。



图 1-10 15MW 正压型电机

李清玲针对石化企业的在线分析小屋进行了防爆安全设计^[48],根据爆炸性危险区域的划分和在线分析系统的复杂程度,合理的设计了防爆分析小屋,并选择了正压通风型防爆装置。如图 1-11 所示,利用 PLC 控制器结合烟雾监测、氧气含量监测、有毒气体监测、可燃性气体监测和正压监测等传感器装置,并将防爆风机启动和指示灯报警作为信号响应,通过编写并调试软件程序,实现对整个分析小屋的安全监测。

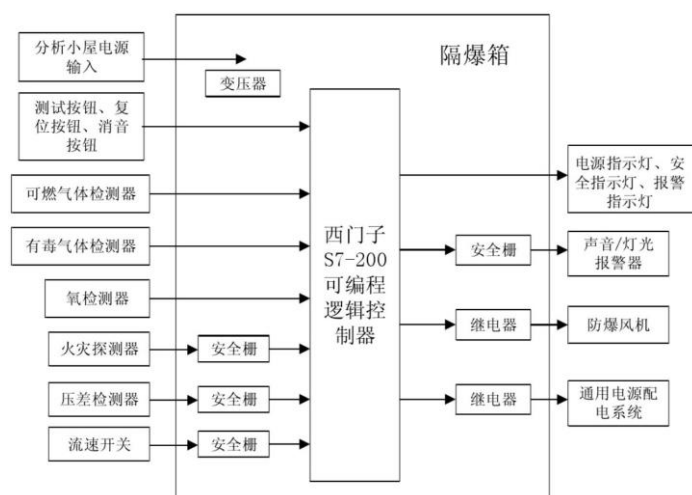


图 1-11 正压防爆控制系统组成

范东英等人基于 STC 单片机设计的正压防爆控制系统^[49]主要由正压箱体、电磁阀、微差压变送器、正压防爆控制器等组件构成,如图 1-12 所示,微差压变送器可实现对信号的远程传送,正压防爆控制器可对正压箱体内的压力实时监测与分析,使箱内保持正压状态,从而避免爆炸性气体进入,保证箱体内的安全性。

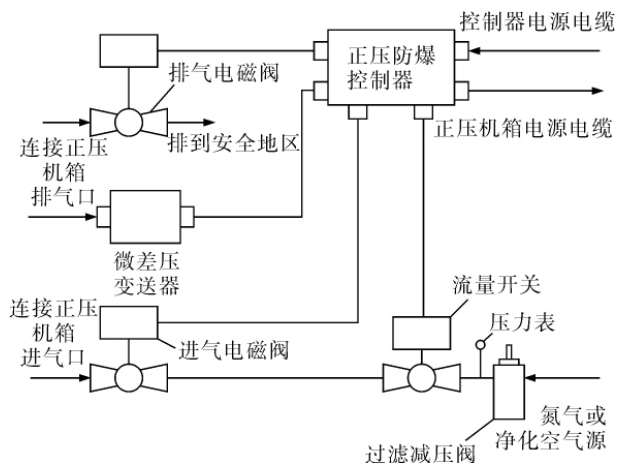


图 1-12 正压防爆控制系统

LIU W 等人引入多组分流场理论对正压防爆电机进行了分析^[50]。如图 1-13 所示，根据正压防爆电机的基本防爆原理和吹扫通风过程仿真的关键问题，建立了电机的防爆有限元模型，采用多组分流场理论对电机的吹扫通风过程进行了仿真和分析。通过观察各部位的瞬态浓度从而了解电机内是否存在吹扫死角，然后提出一种改变进气管的优化方案，提高了吹扫效率和电机的安全性能。



图 1-13 正压防爆电机

1.2.3 CFD 仿真技术研究现状

CFD 仿真，即计算流体动力学仿真，是指利用计算机模拟和数值计算的方法，对流体在不同流动条件下的运动进行模拟和分析。20 世纪 30 年代，英国学者 Thom 使用手摇计算机对二维粘性流体的偏微分方程进行数值求解，标志着 CFD 仿真技术的诞生^[51]。此后其他学者相继投入数值仿真模拟技术研究，CFD 仿真技术得到逐步发展。Matsuoka

H.等人^[52]将湍流分为两组,即只对扩散起作用的较小湍流和只对团聚中心位移起作用的较大湍流,并构建湍流扩散理论,获得与 Batchelor 相似理论所预测的相同结果。Ng KH 等人^[53]利用湍流模型计算了靠近墙壁的二维、稳定、不可压缩、湍流、流体动力边界层,该模型将湍流剪应力与湍流局部能量的平方根、湍流长度尺度、梯度时间平均速度三者的乘积联系起来,成功预测了表现出多种流向压力分布的边界层。Fan Y 等人^[54]使用 CFD 仿真软件对桑拿房内的气流进行了深入的研究,发现进气口的位置对桑拿房内的气流和温度分布有很大影响,为桑拿房的设计提供参考。Naung S W 等人^[55]使用 CFD 仿真分析了流动不稳定性对风力涡轮机转子空气动力学和气动弹性的影响,采用高效的非线性频域求解方法来模拟谐波扰动,从而对风力涡轮机进行分析。并选择了一台试验风力涡轮机进行空气动力和空气力学分析,从而对所使用的方法进行验证。

CFD 仿真技术发展迅速,在我国的应用领域也日益广泛。田红旗等人^[56]对高速列车周围的湍流强度进行了分析,通过对流场分布规律的研究,提出了八种类型的流动区域,为改进车身结构,降低列车阻力奠定基础。徐川等人^[57]利用 CFD 仿真软件对天然气在复杂地形下的泄露扩散情况进行模拟分析,并且对仿真模型的有效性进行了实验验证。重庆大学的田雪^[58]通过 CFD 仿真模拟,分析了脉动送风对室内气流速度与温度分布的影响,并具体分析脉动送风的周期和速度对热舒适的影响,为室内通风设计提供指导。由于定风速送风形成的稳定流场会造成室内污染气体堆积,刘岩等人^[59]采用了周期性动态送风方法,并通过 CFD 仿真分析发现动态送风的周期和振幅对通风效率的影响规律。

综上所述,防爆工业机器人的安全性高、技术集成性强、应用范围广泛,在特定领域成为不可或缺的工具。作为广泛应用于工业机器人行业的防爆技术,正压型防爆能够有效地将可燃性物质与点燃源隔离,减少爆炸的风险,且工作原理简单,维护成本较低,具有重大的应用前景。然而目前的相关研究主要对防爆机器人的结构或正压防爆系统进行设计与优化,虽然取得了很多成果,但对于分析正压腔体内部流场,提高正压防爆系统清扫换气效率的研究相对较少。

1.3 课题来源

本课题来源于安徽省重点研究与开发计划项目《基于正压补偿方法的工业机器人防爆关键技术及标准化研究》(项目编号:202104h04020015)。

1.4 主要研究内容

本文以工业机器人正压防爆系统作为研究对象,在现有工业机器人机械结构和防爆技术的基础上,对机器人正压腔体内的气体流场进行了仿真分析,并对正压防爆系统进行了优化设计,搭建实验平台进行实验验证,保证正压防爆功能的安全可靠性。主要研究内容如下:

(1) 对防爆基本理论进行分析,综合对比本安型、隔爆型、正压型等各种防爆型式的特点及其适用场景,并根据工业机器人的结构特点及工作环境,选择正压型作为工业机器人的防爆型式。然后通过流场分析理论,基于流体运动的基本定律,对机器人腔体内的流场进行建模描述。

(2) 根据流场理论,使用 FLUENT 软件对防爆工业机器人清扫换气过程进行有限元仿真分析,通过对速度云图和浓度云图的分析,从而了解正压腔体内是否存在吹扫不利点。使用周期性脉冲进气代替恒压进气,对比分析脉冲进气的周期变化和振幅变化对清扫换气效率的影响。

(3) 基于周期性脉冲进气对工业机器人清扫换气效率的影响,设计工业机器人正压防爆系统,具体包括正压防爆气路系统设计和控制系统设计,有效实现清扫换气功能以及正压维持功能,保证机器人工作过程中的安全性。

(4) 搭建实验平台,对有限元仿真结果和设计的正压防爆系统进行实验研究,通过对比实验数据和仿真结果,验证有限元仿真分析的有效性。另外,通过对正压补偿、安全阀泄压、故障报警功能的实验研究,验证正压防爆系统的安全可靠性。

第2章 工业机器人防爆基本理论

当工业机器人应用于喷涂作业或其他危险作业环境时,若其内部电气元件产生的火花、静电、高温等危险源接触到油漆挥发出的易燃易爆气体,将会带来安全风险,因此需要对此类工业机器人进行防爆设计。本章对防爆相关技术进行分析,并结合工业机器人的结构特点及工作环境,选择合适的防爆措施。

2.1 防爆理论基础

2.1.1 爆炸的产生原因

爆炸是一种极其迅速的能量释放过程,在这一段过程中,空间内的物质经过物理或化学变化,迅速释放其内部所含有的能量,从而转变为光、热量或机械功等形态^[60]。以喷涂机器人为例,在喷涂机器人的工作环境中,主要分析由易燃易爆气体或粉尘与空气所形成的爆炸性混合物而引发的爆炸^[61]。此种类型的爆炸必须同时具备三个要素:

- (1) 爆炸性物质: 从油漆中挥发出的含有苯、二甲苯等可燃性气体以及粉尘;
- (2) 助燃剂: 空气中含有的氧气;
- (3) 点燃源: 机器人内部电气元件在工作过程中产生的电火花,以及电机产生的热量没有及时散出致使其表面温度过高。

2.1.2 爆炸性场所分类

爆炸性场所分类是对可能存在爆炸性气体环境的场所进行评估并分类的一种方法,有利于正确选择并安装合适的电气设备,以保证设备能够安全使用。在含有可燃性物质的实际场所,无法确保爆炸性气体永远不会产生,并且也无法保证设备一直不会产生点燃源。因此,如果在出现爆炸性气体环境可能性很高的场所,必须提高设备的安全性能,降低产生点燃源的可能性。若能够减少爆炸性气体环境的出现几率,便可采用安全性能要求不是十分严格的设备。我国国家标准 GB/T 3836.5-2021 根据爆炸性气体环境出现的频率和持续时长,把爆炸性场所分为0区、1区和2区^[62]。

- (1) 0区: 爆炸性气体环境长期或频繁存在的区域。
- (2) 1区: 设备正常运行时,爆炸性气体环境有可能出现的区域。
- (3) 2区: 设备正常运行时,爆炸性气体环境不可能出现,即使偶尔出现,也仅是

短时间存在的区域。

2.1.3 基本防爆型式

爆炸性物质、助燃剂和点燃源三个要素缺少任何一个都不能产生爆炸，故只需采取适当的方法使得产生爆炸的三个要素无法同时具备，就能够有效防止爆炸的产生。现有的防爆技术以此原理为基础，研发出多种工业设备防爆方法，包括充砂型“q”、油浸型“o”、浇封型“m”、“n”型、本质安全型“i”、增安型“e”、隔爆型“d”和正压型“p”等^[63-66]。各防爆型式及其原理如图 2-1 所示。

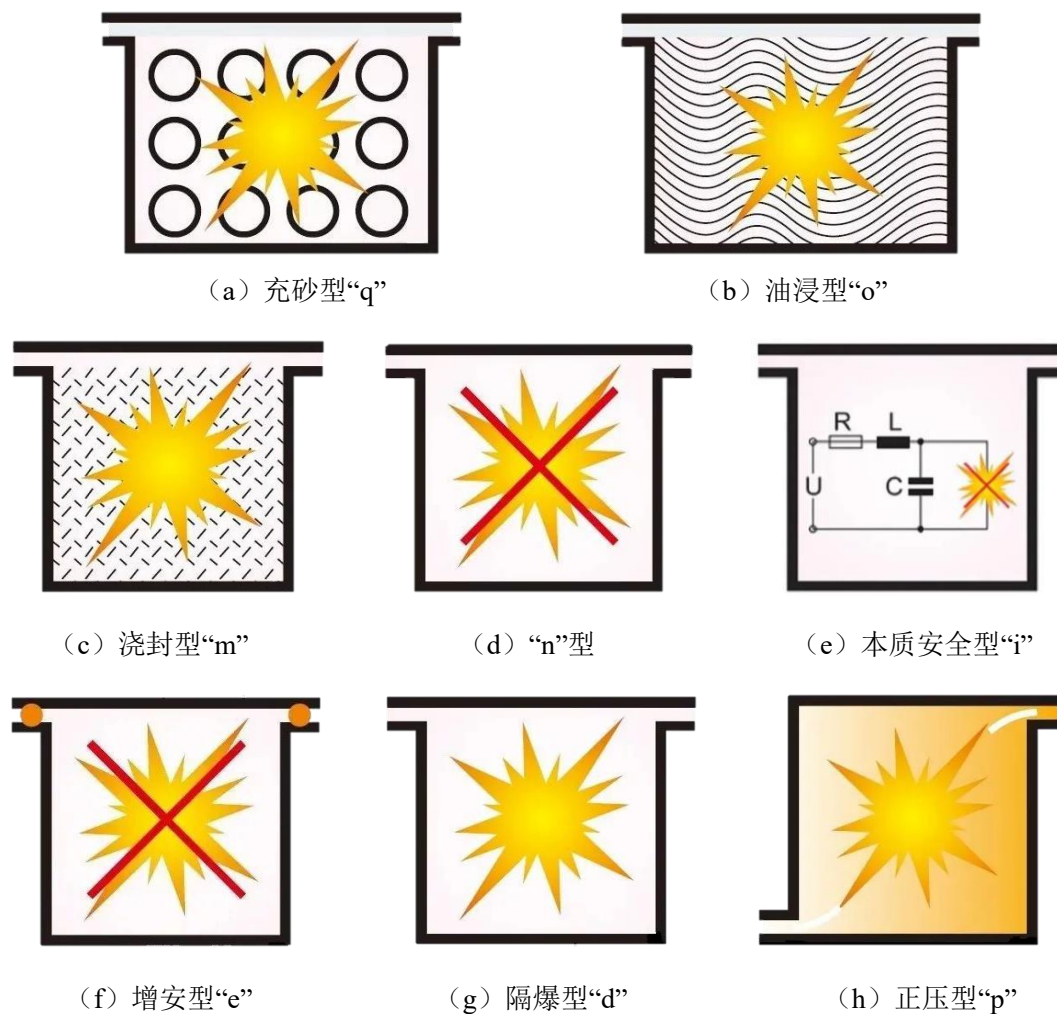


图 2-1 防爆型式原理图

(1) 充砂型“q”

充砂型防爆是将砂砾或其他特有性质的粉末材料填充到防爆壳体内部，以确保在规定的工件环境和使用条件下，壳体内产生的电火花或高温均无法点燃附近的爆炸性混合物。充砂型防爆并无法阻挡爆炸性气体进入设备内部，但由于填充材料将电气元件埋入

一定深度，并且填充材料的颗粒很小，颗粒的间隙也很小，即使设备内部的爆炸性气体被引燃，燃烧火焰也会在经过填充材料之间的空隙时熄灭，无法引发爆炸。但充砂型防爆设计在大功率的设备中并不适用，若电气设备的功率过大，电火花或高温可能会影响防爆外壳内的填充材料性质，甚至导致材料的熔融，从而失去防爆功能。

充砂型防爆一般运用于 1 区和 2 区危险场所，由于填充材料的特有性质，充砂型防爆设备仅适用于特定的安装场合，例如防爆设备内的元件和重载牵引电池组。

（2）油浸型“o”

油浸型防爆是指使用保护液将电气设备或其部件完全浸没，以防止设备引燃液面上方或设备外壳周围的爆炸性气体。在油浸型防爆中常用的保护液体一般为矿物油，但这种类型的油类不适用于煤矿中的设备。此外，保护液不得对设备外壳以及浸泡在其中的电气元件性能造成不良影响。

油浸型防爆通常运用于 1 区和 2 区危险场所，主要用于冷却、固定安装的开关、控制器等。

（3）浇封型“m”

浇封型防爆是一种将可能引起爆炸的电火花或危险高温的电气部件完全封装在浇封剂（复合物）中的措施，以确保它们在运行过程中不会引发爆炸。使用浇封型防爆的部件不应在爆炸性环境中单独运行，必须与使用该部件的防爆电气设备配合才能安全应用于爆炸性环境中。

浇封型防爆通常运用于 1 区和 2 区危险场所，常用的浇封型防爆设备或浇封型部件主要有蓄电池、电机和变压器绕组、电缆接头、电压互感器、熔断器等。

（4）“n”型

“n”型防爆总体是保证设备在正常运行工况和规定的异常情况下运行时不应该产生操作火花、电弧或危险温度，即使产生了火花、电弧或危险温度，在自身的保护措施作用下也不能够点燃它周围的爆炸性气体环境。

“n”型防爆仅适用于 2 区危险场所，安全程度相对较低。“n”型电气设备分为两种，一种是在正常工作状态下不会产生电火花、电弧或高温的设备，如灯具、变压器等；另一种是在正常工作过程中也可能会产生电火花或电弧的设备，如继电器、开关等，而对于这些设备需要实施密封或限能等防护措施。

（5）本质安全型“i”

本质安全型防爆是通过限制电路中的电流和电压，使得回路中产生的电火花和热量限制在无法点燃的水平，在正常工作或制定的故障状态下，任何指定的爆炸性混合物都无法被点燃。本质安全型防爆的结构简单，体积小，质量轻，具有较低的运行成本和维护成本。但其安全性相对较低，容易受到外界环境（如高温、高压、腐蚀等）的干扰，容易发生故障，不适用于大功率设备。此外，本安型防爆的防护等级较低，不能运用于较高腐蚀性和磨损性的场所。

本质安全型防爆分为 ia 和 ib 两个等级，ia 等级可用于 0 区、1 区和 2 区危险场所，ib 等级可用于 1 区和 2 区危险场所。本质安全型防爆主要用于仪器、仪表、传感器和控制器等设备的防爆。

（6）增安型“e”

增安型防爆主要针对在正常工作状态下不会引发电火花或电弧的电气设备，通过采取一系列额外的安全措施，以降低设备内部和外部部件的温度，并防止电火花和电弧的产生，从而减少爆炸的风险。采取的安全措施包括降低或控制工作温度、确保电气连接的稳定性，增强绝缘效果和提高设备外壳的防护等级，以提高设备运行过程中的安全性和可靠性。

增安型防爆主要运用于 2 区危险场所，部分种类也可适用于 1 区。例如装备适当保护装置的增安型低压异步电动机和接线盒等设备。

（7）隔爆型“d”

隔爆型防爆将可能引发电火花、电弧或高温的零部件均安装在特制的隔爆外壳中，该隔爆外壳有效地隔离了设备内部空间和外部环境。隔爆外壳设计有一定的间隙，当爆炸性气体混合物进入外壳内，电气元件可能会引燃气体从而发生爆炸，此时隔爆外壳能够承受由此产生的爆炸压力而不受损坏。此外，外壳的间隙设计有助于冷却火焰、减缓火焰传播速度或打断加速链，防止火焰或危险的燃烧产物传播到外部环境中，避免点燃外部的爆炸性气体，实现隔爆效果。隔爆型防爆能够有效隔离爆炸源，避免爆炸的传播扩大，安全性高，适用于高爆炸风险的场所。但其对零件的机械强度要求高，体积较大，质量较重，不易于移动和安装，并且设备维护和检修的难度较大。

隔爆型防爆在 0 区危险场所不适用，通常运用于 1 区或 2 区危险场所。例如隔爆型

电机、隔爆型灯具等。

(8) 正压型“p”

正压型防爆通过向设备壳体内注入一定压力的纯净空气或惰性气体，维持壳体内部压力高于外部环境，阻隔爆炸性气体进入壳体，防止点燃源与爆炸性气体接触，实现防爆的效果。正压型防爆分为正压通风和正压补偿两种类型，正压通风型通过不断向正压外壳内注入压力和流量均高于外部环境的纯净空气或惰性气体，确保持续的保护性气体流动，从而防止爆炸性气体侵入正压外壳内部。正压补偿型则通过封闭正压外壳上的排气口，并向外壳内充入一定压力的纯净空气或惰性气体，同时对气密性导致的压力损失进行充气补偿，确保外壳内部持续维持正压状态。两种方法都要求在设备启动之前使用保护性气体对正压外壳内进行清扫换气，带走壳体内部非正压状态时存在的爆炸性气体。

正压型防爆可以用于 1 区和 2 区危险场所，目前大部分电气设备的外壳箱体均采用正压型防爆。

2.2 工业机器人防爆技术分析

2.2.1 工业机器人防爆类型分析

工业机器人要求质量轻、体积小、运动灵活，并且机器人本体中安装有较多的电器元件，如驱动器、电机、传感器等。本文以喷涂机器人为研究对象，通过对比以上多种防爆型式，正压型防爆安全性高，能够防止爆炸性气体、粉尘等物质的进入，从而有效地避免爆炸的发生，适用于具有较高爆炸风险的场所。并且正压型防爆设计简单，对防爆外壳机械强度的要求不高，能够减轻壳体的质量，提高设备的工作效率。此外，正压型防爆的智能化程度高，采用多种传感器和智能控制系统，可以实时监测设备的运行状态和环境参数，及时发现并排除潜在的安全隐患。因此本文中工业机器人的防爆型式选用正压型防爆。

正压防爆包含两种型式：正压通风型和正压补偿型。“正压通风型”不断向正压外壳内注入压力和流量均高于外部环境的纯净空气或惰性气体，确保持续的保护性气体流动，从而防止爆炸性气体侵入正压外壳内部。“正压补偿型”是通过封闭正压外壳上的排气口，并向外壳内充入一定压力的纯净空气或惰性气体，同时对气密性导致的压力损失进行充气补偿，确保外壳内部持续维持正压状态。对于这两种正压防爆型式，其工作流程主要分为两个阶段：首先是清扫换气阶段，其次是正压维持阶段。清扫换气阶段是在机器人

启动之前，向正压腔体内充入保护性气体（洁净空气或惰性气体），将正压腔体内的爆炸性气体排出，使爆炸性气体的浓度降低到安全值以下。清扫换气结束后，机器人控制系统通电，进入正压维持阶段，在机器人运行过程中需要向正压腔体内通入少量保护性气体，保持腔体内的压力高于外界环境，防止爆炸性气体进入机器人腔体内，从而达到防爆的效果。

正压通风型和正压补偿型在工业领域都有着较为广泛的应用，例如矿业使用的防爆电气设备、石油化工有限公司使用的正压外壳等。两种方法各有其优缺点，正压通风型通过向正压腔体内提供一定压力和流量的保护性气体，可有效阻止爆炸性物质的进入，并将潜在的危险物排出，具有很高的安全性，但为了维持正压状态，需要连续不断向设备内充入保护性气体，因此会有一定的能耗成本。正压补偿型只需间断地向正压腔体内补充一定压力和流量的保护性气体，内部的压力监测装置会持续监测腔体内的压力大小，通过系统控制供气的通断以保证腔体内的压力始终高于外界环境，其运行成本较低，正压补偿型应用范围有限，通常适用于小型设备或工作区域，并且需要根据具体情况进行精确的设计和控制。

通过调研国内外机器人生产商制造的各类工业机器人发现，应用于喷涂工艺的工业机器人大多都是基于正压补偿型防爆原理。正压补偿型防爆具有安全性较高、节能环保、智能化和易维护等特点，随着工业生产对安全性和环保要求的不断提高，正压补偿型防爆在喷涂机器人领域得到广泛应用。

2.2.2 正压防爆工业机器人的结构分析

以某款喷涂机器人为研究对象，如图 2-2 所示，机器人机械本体主要由底座部分、转座部分、大臂部分、工艺臂部分、手腕部分等部件组成。机械本体关节由伺服电机驱动，各关节相互配合以实现机器人末端在空间中的位置和姿态调整。正压防爆结构是由多个大小不同的腔体构成，各腔体之间由管道连接（管道隐藏在各个轴之间），进气口设置在底座的侧面，出气口设置在工艺臂末端腔体的侧面。

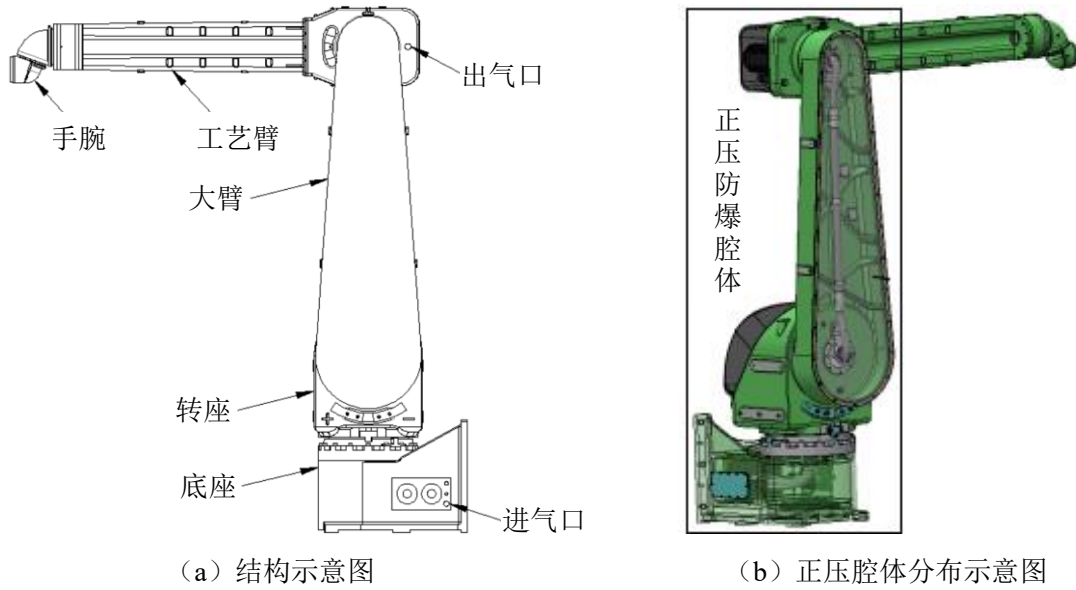


图 2-2 正压型防爆工业机器人示意图

2.3 正压防爆流场建模理论基础

2.3.1 流场基本模型

当正压型防爆工业机器人进行清扫换气时，正压腔体内的流场分布会直接影响其换气质量与换气效率，因此需要对流场分布进行建模描述。气体流动应遵循物质量守恒、动量守恒和能量守恒的基本物理定律^[67-70]：

(1) 质量守恒定律

任何流动问题都必须遵循质量守恒定律，即流体微元体在单位时间内增加的质量等于该时间段内流入微元体内的净质量，基于该定律，可以得出：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2-1)$$

式中， u 、 v 、 w 为 x 、 y 、 z 方向上的速度分量， t 为时间， ρ 为密度。

(2) 动量守恒定律

动量守恒定律也是流动系统需要遵守的一个基本定律，即微元体内流体的动量随时间的变化率等于作用在该微元体上所有外力的总和。这一定律是牛顿第二定律在流体动力学中的应用，基于该定律，可以得出：

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{cases} \quad (2-2)$$

式中, τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 为粘性应力 τ 沿 x 、 y 、 z 方向的分量; F_x 、 F_y 、 F_z 为流体单元体上的体积力, p 为流体单元体上的压力。

(3) 能量守恒定律

能量守恒定律是涉及热交换的流动系统必须遵循的基本定律,即微元体内能量的增长率等于流入微元体的净热流量与作用在微元体上的体积力和表面力所做的功之和。该定律是热力学第一定律在流体动力学中的应用,基于该定律,可以得出:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k}{c_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \quad (2-3)$$

式中, k 为流体的传热系数; S_T 为粘性耗散项; T 为温度; c_p 为比热容。

2.3.2 多组分流场模型

本文中使用纯净空气清扫防爆机器人正压腔体内的爆炸性气体(选用氦气代替),清扫换气过程中的流场域由多种气体组分构成,因此选用流体多组分传输模型,通过将不同流体的物性参数进行线性组合,得到组合后的流体物性参数取决于各组分流体的物性参数及其质量分率,即满足组分守恒定律^[71]:

$$\begin{cases} \alpha_f = \sum_{i=1}^n Y_i \alpha_i \\ \beta_f = \sum_{i=1}^n Y_i \beta_i \\ \sum_{i=1}^n Y_i = 1 \end{cases} \quad (2-4)$$

式中, n 为组分数, Y_i 为各组分流体的质量分率; α_i 为各组分流体的密度; α_f 为整体密度; β_i 为各组分流体的动力粘度; β_f 为整体动力粘度; 其中组分数 $n=3$ (氧气、氮气、氦气); 氧气、氮气和氦气的密度分别取 1.43kg/m^3 、 1.25kg/m^3 、 0.179kg/m^3 ; 其动

力粘度分别取 $2.06 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 、 $1.78 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 、 $1.89 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 。

2.3.3 湍流模型

流体的流动状态分为层流和湍流。流体在低速运动时呈现有序的分层状态，各流体层之间无混合，这种流动状态为层流；流动速度增大，各流体层之间会产生干扰，流场中形成众多微小漩涡，层流结构被扰乱，流体运动变得不规则，并伴有垂直于流道轴线方向的分速度，这种流动状态为湍流。通常用雷诺数（Re）来判断流体的流动状态，当 $Re \leq 2300$ 时流动状态为层流，当 $Re > 2300$ 时流动状态为湍流^[72]。雷诺数的表达式如下：

$$Re = \rho v d / \beta \quad (2-5)$$

式中， β 为流体的动力粘性系数； d 为特征长度； v 为特征流动速度； ρ 为流体的密度。

实际工程应用中空气的流动一般都属于湍流流动，本文所研究的正压型防爆机器人腔体内的气体流动路径错综复杂，会频繁发生气体的分流和汇流，因此属于湍流流动。在计算流体动力学（CFD）中，常用的湍流模型主要有 $k-\omega$ 模型、 $k-\varepsilon$ 模型等^[73]，其中 $k-\varepsilon$ 模型具有较高的稳定性，经济性和计算精度，适用于高雷诺数湍流，其计算收敛性和准确性都非常符合工程计算的要求，故本文选择采用标准 $k-\varepsilon$ 模型，方程式表达如下：

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{cases} \quad (2-6)$$

式中， k 为湍流脉冲动能； u_i 为 i 方向速度； x_i 、 x_j 为笛卡尔坐标系方向； μ 为动力粘度； ε 为湍流脉冲动能耗散率； μ_t 为湍流粘度，可以表示为 k 和 ε 的函数，即 $\mu_t = \rho G_\mu \varepsilon^2 / k$ ； G_b 为浮升力引起的湍动能生成项； G_k 为平均速度梯度引起的湍动能生成项； σ_k 、 σ_ε 分别为湍流脉冲动能和湍流脉冲动能耗散率对应的普朗特数，分别取 1.0、1.3； $G_{1\varepsilon}$ 、 $G_{2\varepsilon}$ 、 $G_{3\varepsilon}$ 为经验系数，分别取 1.44、1.92、1.44。

2.4 本章小结

本章首先基于防爆基本理论，详细分析了国家标准对爆炸性场所的分类和各种防爆型式的特点及其适用场所。然后根据工业机器人的结构特点及工作环境，确定喷涂机器人适合选用正压补偿型的防爆设计。最后通过流场理论分析，基于流体运动的基本定律，对机器人腔体内的流场进行了建模描述。

第3章 正压防爆工业机器人高效清扫换气方法研究

正压防爆工业机器人在清扫换气过程中采用恒定压力进气，腔体内会形成稳定流场，对角落区域的气体扰动不足，造成清扫换气效率低下。本章根据流场分析理论，使用 FLUENT 软件对防爆工业机器人正压腔体内的清扫换气过程进行有限元仿真，并使用周期性脉冲进气代替恒压进气，对比分析脉冲进气的周期变化和振幅变化对清扫换气效率的影响。

3.1 清扫换气过程流场仿真模型的建立

3.1.1 几何模型简化

本文选择一款正压型防爆工业机器人为研究对象，其基本参数如表 3-1 所示。该款机器人正压腔体容积为 0.1764m^3 ，其进气口设置在底座的侧面，内径为 16mm，出气口设置在工艺臂末端腔体的侧面，内径为 10mm，正压型防爆机器人结构示意图如图 3-1 所示。

运用 FLUENT 软件对清扫换气过程进行仿真模拟^[74,75]。虽然工业机器人腔体内部安装有驱动电机、电磁阀、传感器等，这些组件构成了正压腔体内部的复杂空间，但分析清扫换气过程只与机器人正压腔体内部的气流有关，所以在建立物理模型时，常会忽略那些对仿真效果影响较小的物体，对模型进行简化，如图 3-2 所示。

表 3-1 正压型防爆机器人的基本参数

基本参数	数值
额定电压	380V
额定功率	8KW
额定频率	50Hz
防护等级	IP 65
防爆等级	Ex ib mb Px IIC T4 Gb
工作半径	2900mm
密封腔容积量	0.1764m^3

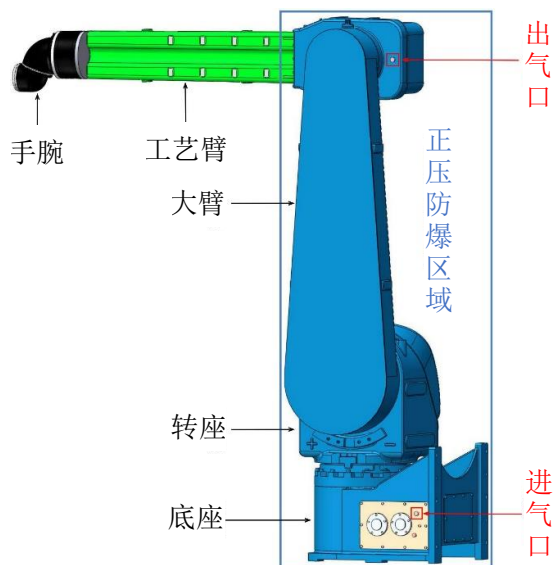


图 3-1 正压型防爆机器人结构示意图

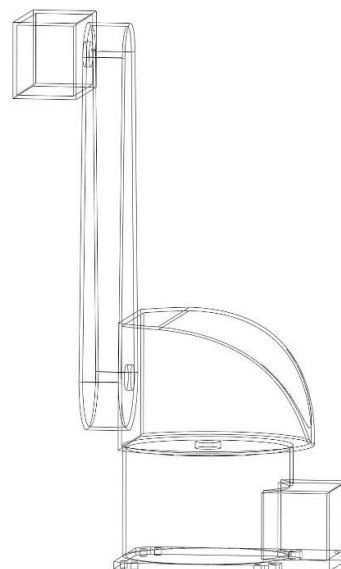


图 3-2 仿真简化模型

3.1.2 模型的网格划分

工业机器人在清扫换气时，清洁空气由进气口通入机器人腔体内，将腔体内的污浊气体从出气口排出，流场主要存在于进气口与出气口之间的机器人腔体内部，故选择此部分作为流场域，并划分网格。由于网格的划分对计算速度和计算结果的收敛性有着很大的影响，喷涂机器人尺寸较大，若划分网格过小，迭代花费的时间会很长，若划分网格过大又会降低计算的精度^[76]。因此在进行网格划分时，需要综合考虑计算精度和计算速度，经过多次反复尝试，最后将网格划分为 100 万个。划分后的网格如图 3-3 所示。

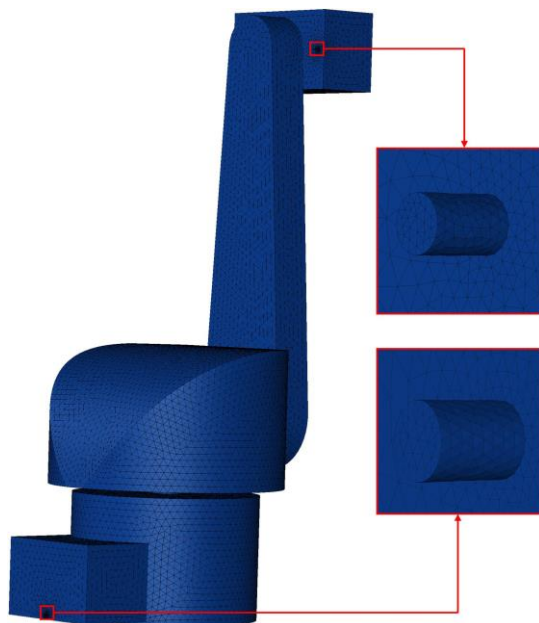


图 3-3 流场域网格

3.2 清扫换气过程仿真求解

3.2.1 求解器选择

在 FLUENT 仿真研究领域，常用的求解器分为压力基求解器和密度基求解器。压力基求解器首先通过动量方程计算速度场，然后再利用压力方程对速度场进行修正以符合连续性要求，其中压力方程由连续性方程和动量方程计算得出，使流场同时满足质量守恒与动量守恒，该求解器可适用于低速运动和不可压缩流体场景。密度基求解器直接对 Navier-Stokes 方程的瞬态形式进行求解，将稳态问题转化为时间推进的瞬态问题，从初始条件开始逐步推进直至获得稳定解，该求解器可适用于高速运动和可压缩流体场景^[77,78]。在本章中，对多种气体在机器人正压腔体内的流动情况进行仿真模拟，需要采用 VOF（Volume of Fluid）模型，因此选择压力基求解器。

3.2.2 求解算法选择

在压力基求解器中，常见的求解算法包括 SIMPLE、SIMPLEC 和 PISO 算法。其中 SIMPLE 算法广泛应用于工程中的流场计算，该算法首先通过动量方程来求解速度场，然后再利用速度场求解连续性方程来实现对压力场的修正。SIMPLEC 算法是在 SIMPLE 算法基础上的进一步提升，在面通量中引入了修正函数，以解决压力-速度耦合方法难以获得解的问题，并提高了收敛的速度。SIMPLE 和 SIMPLEC 算法的不足在于每次压力修正后，速度和相关通量可能不满足动量平衡，因此必须多次反复迭代计算直至达到平衡状态。PISO 算法通过引入领域校正和偏度校正两个指标，在每次迭代步中都对动量和网格畸变进行修正，以解决在求解压力校正方程后，每次迭代中压强场和动量方程存在较大偏差，导致速度及其相关通量无法满足动量平衡的问题^[79,80]。尽管 PISO 算法的计算量较大，但由于其在每次迭代中能够提供更加精确的压强场，从而加快了计算收敛速度。由于本文的仿真模拟涉及瞬态流场分析，并且为了加快计算速度，故选用 PISO 算法。

3.2.3 边界条件

（1）根据防爆标准 GB/T 3836.5-2021，清扫换气仿真选用氦气代替爆炸性气体。（防爆试验常用氦气来代替密度小于空气的爆炸性气体，因为氦气为惰性气体，稳定性好，安全性高）。

（2）通过进气口向机器人正压腔体内充入纯净空气（由 21%的氧气和 79%的氮气

组成), 采用压力入口和压力出口。

(3) 机器人正压腔体内部氦气的初始浓度百分比设置为 75%, 仿真计算结束条件为机器人腔体中各个区域的氦气浓度百分比不能高于 1%。

(4) 清扫换气仿真共设置了 6 种进气方法, 方法 1 作为参照方法, 其进气压力恒定为 0.05MPa。为分析脉冲进气振幅对换气效果的影响, 设置方法 2、方法 3 和方法 4, 其脉冲进气周期均为 2s, 振幅分别为 0.05MPa、0.03MPa 和 0.01MPa。为分析脉冲进气周期对换气效果的影响, 设置方法 2、方法 5 和方法 6, 其脉冲进气振幅均为 0.05MPa, 周期分别为 2s、6s 和 10s^[58,59]。图 3-4 为各换气方法下进气压力随时间的变化情况。

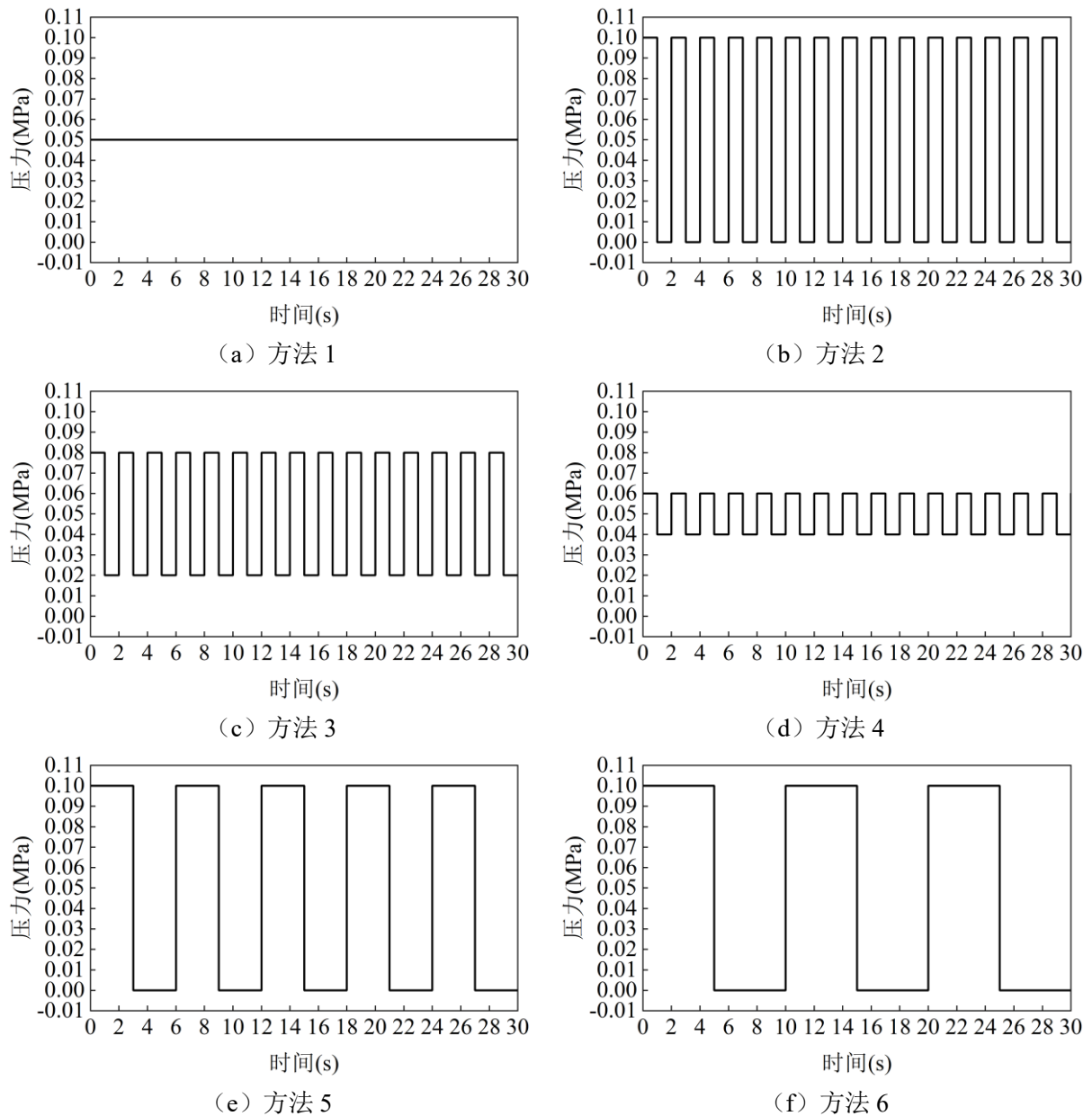


图 3-4 各进气方法下进气压力随时间的周期性变化

3.3 仿真结果分析

为了研究不同换气方法下机器人腔体内流场和爆炸性气体分布随时间的变化,清扫换气过程仿真采用瞬态过程,时间步长设置为 0.1s,每个时间步长的最大迭代步数设置为 100,时间步数设置为 1200。在换气仿真过程中,为了便于对防爆区域仿真结果进行分析,共建立 4 个监测点,均位于机器人腔体的角落位置,即吹扫不利点最有可能出现的区域,监测点与机器人腔体内壁面的距离为 10mm,监测点具体位置如图 3-5 所示。

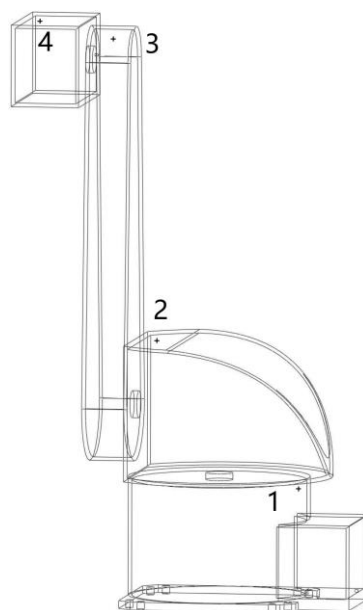


图 3-5 仿真模型的监测点

3.3.1 恒定压力进气与脉冲进气的换气效果对比分析

以方法 1 和方法 2 为例,对比分析恒定压力进气和脉冲进气对换气效果的影响。图 3-6 是两种进气方法下机器人正压腔体内的平均压力随时间的变化情况,可以看出,恒定压力进气时,0-40s 内正压腔体内的压力值稳定地上升,40s 后逐渐趋于稳定值 0.048Mpa。脉冲进气时,0-40s 内正压腔体内的压力值波动上升,40s 后压力值在 0.051-0.056 不断振荡变化,变化周期与脉冲进气的周期基本一致。脉冲进气的气流回路所占据的空间和氦气的扩散空间形成反复“推拉”的局面。“推”的过程为:进气压力从最小值转变为最大值时,气流回路逐渐向上扩散,不断缩小氦气的扩散空间,同时将沿途的氦气输送到出气口;“拉”的过程为:进气压力从最大值转变为最小值时,气流回路逐渐萎缩,氦气扩散空间逐渐增大。一个完整的“推拉”过程就是一次换气过程。

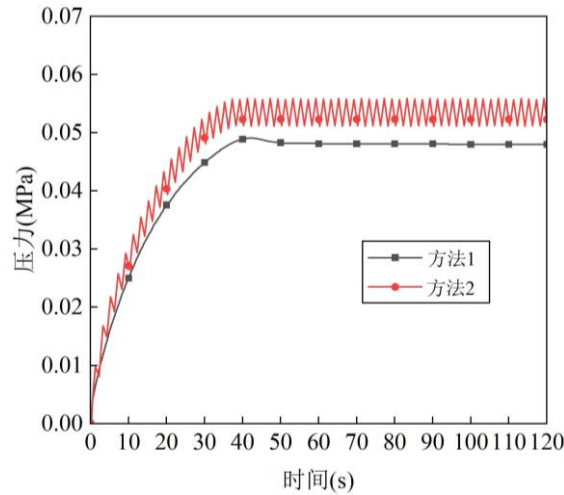


图 3-6 方法 1 和方法 2 中正压腔体内平均压力随时间变化示意图

图 3-7 展示了恒定压力进气方法下，正压腔体内速度场随时间的变化情况。从图中可以看出，恒定压力进气时，气流随着时间不断向前推进，最终在腔体内形成稳定流场，且腔体内（尤其是角落位置和距离进气口较远的位置）的气体流速较慢。图 3-8 展示了脉冲进气方法下，正压腔体内速度场随时间的变化情况。从图中可以看出，脉冲进气在前期造成了正压腔体内流场的大幅度波动，气体的流动速度有所增快，整体上看气流仍从进气口向出气口流动，方向基本不变。

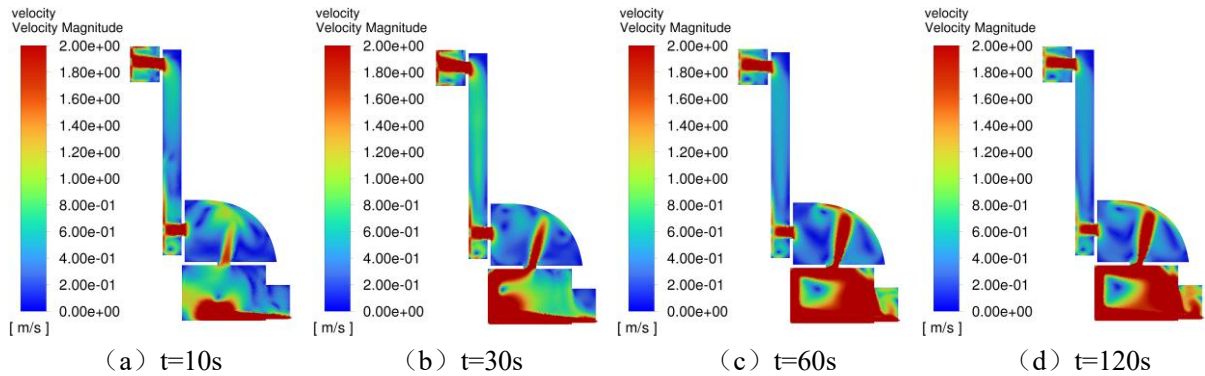


图 3-7 方法 1 中正压腔体内流场随时间变化示意图

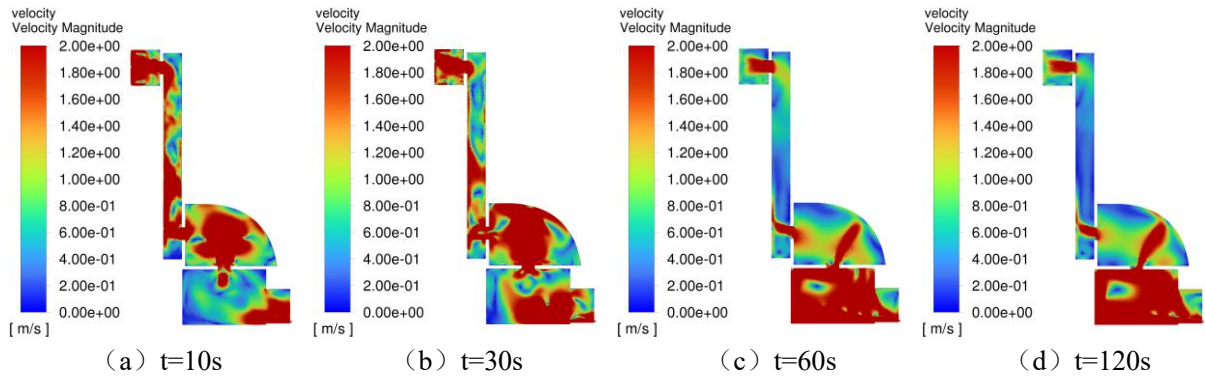


图 3-8 方法 2 中正压腔体内流场随时间变化示意图

图 3-9 展示了恒定压力进气时，正压腔体内氦气浓度分布随时间的变化情况。从图中可以看出，由于气体主要流动在主流道中，腔体内角落位置流速较慢，随着进气气流占据的空间逐渐增加，氦气的扩散空间逐渐被压缩，大多数的氦气堆积在角落停滞区，导致换气效率较低。图 3-10 展示了脉冲进气时，正压腔体内氦气浓度分布随时间的变化情况。从图中可以看出，由于气流的大幅度波动，纯净空气与腔体内氦气的掺混效果不断增强，从而加快了氦气的扩散，有效地避免了气体的堆积。脉冲进气使得停滞区逐渐缩小，氦气的扩散空间向上扩大，同时带动角落区域气流的流动，有效提升了角落区域的换气效率。

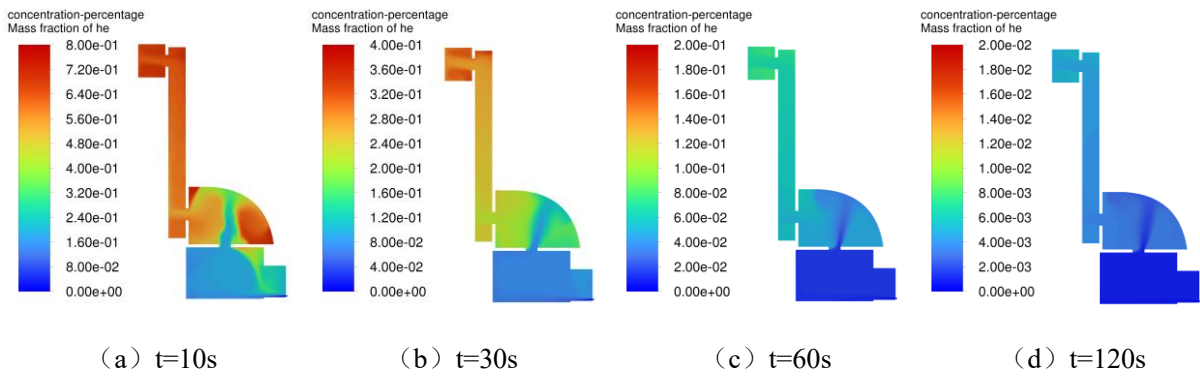


图 3-9 方法 1 中氦气浓度随时间变化示意图

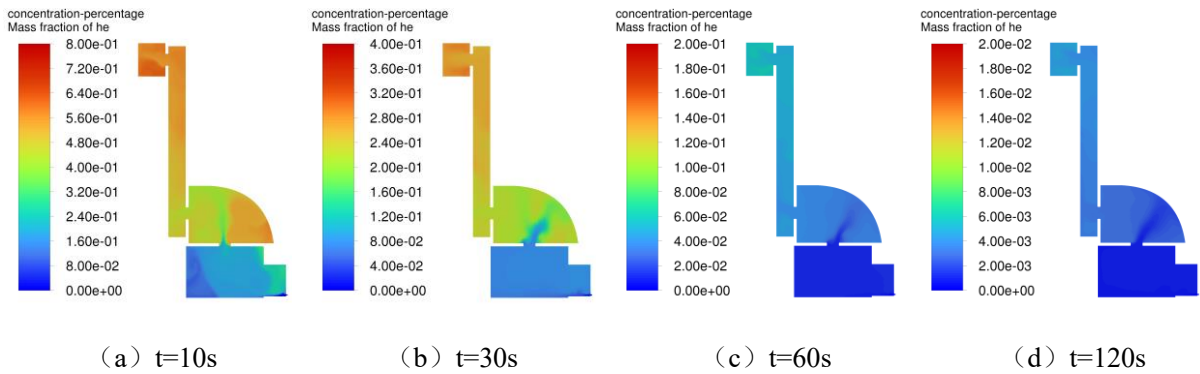


图 3-10 方法 2 中氦气浓度随时间变化示意图

3.3.2 脉冲进气的振幅变化对换气效果的影响

不同换气振幅情况下腔体内压力随时间的变化情况如图 3-11 所示，可以看出，在方法 2、方法 3 和方法 4 中，腔体内压力在 0-40 秒内逐渐波动上升，其中方法 2 的上升速度最快，方法 3 次之，方法 4 的上升速度最慢。40s 之后方法 2、方法 3 和方法 4 中腔体内压力值分别在 0.051-0.056MPa、0.05-0.054MPa 和 0.048-0.051 不断振荡变化。

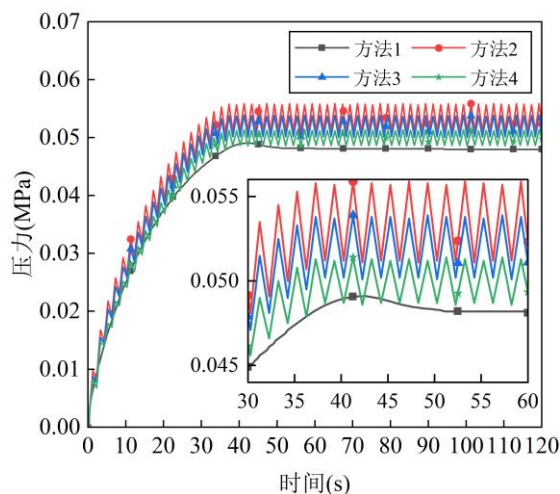


图 3-11 不同换气振幅情况下腔体内压力变化曲线

图 3-12 为 30s 时（即以谷值向正压腔体内充气时）不同振幅情况下腔体内流场分布示意图，图 3-13 为 31s 时（即以峰值向正压腔体内充气时）不同振幅情况下腔体内流场分布示意图。从图中可以看出，方法 2 中腔体内气体流速最快，方法 3 次之，方法 4 较慢。当进气压力从谷值转变为峰值时，会增加腔体内的气体流速，由于方法 2 的振幅最大，其气体流速变化也最为明显。

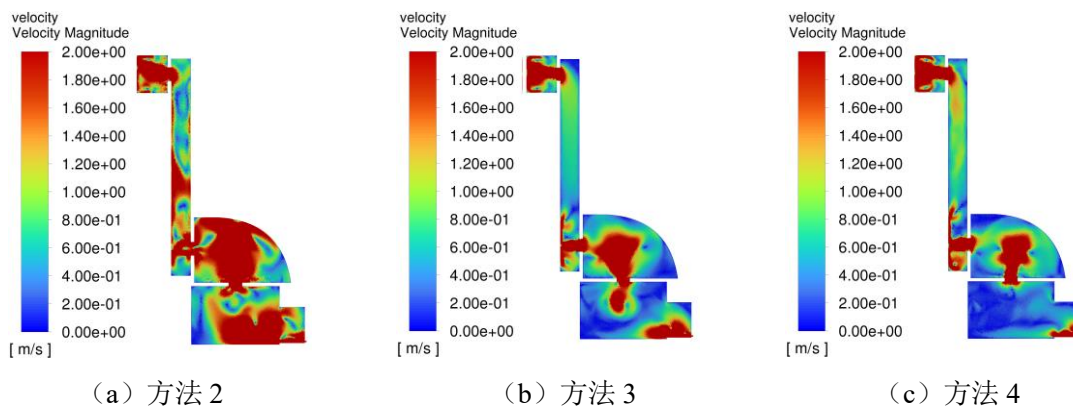


图 3-12 30s 时不同振幅情况下腔体内流场分布示意图

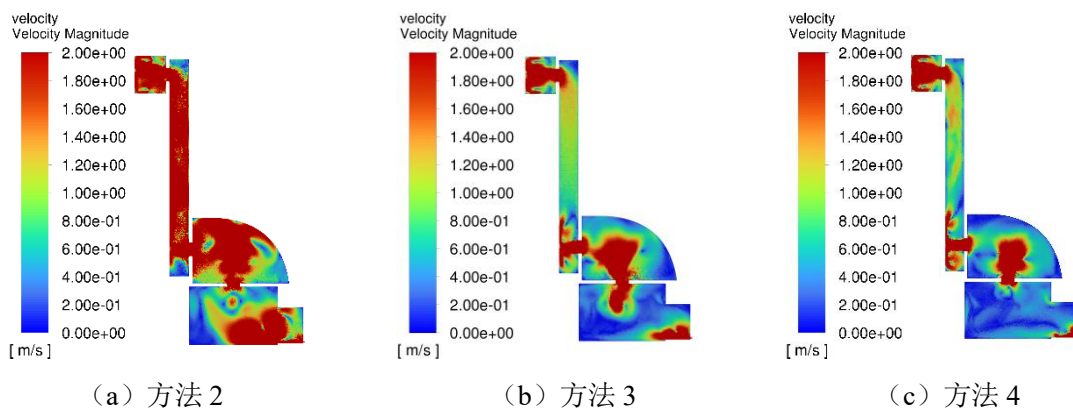
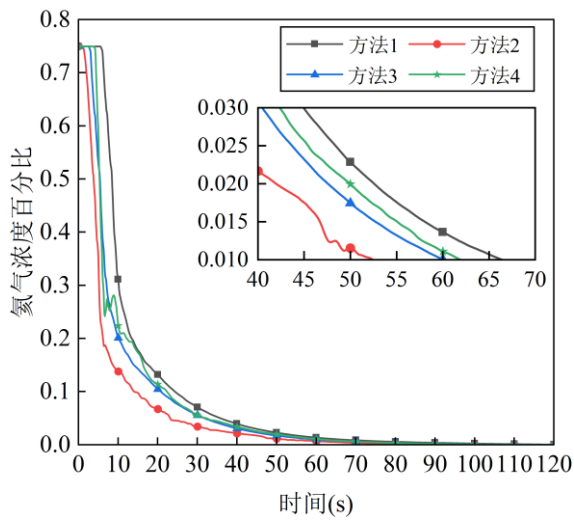
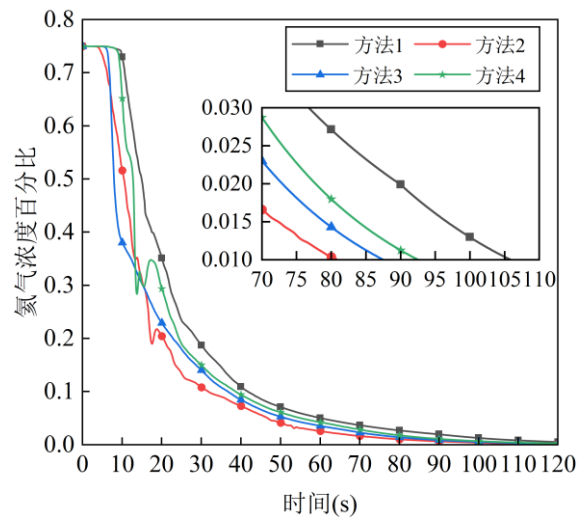


图 3-13 31s 时不同振幅情况下腔体内流场分布示意图

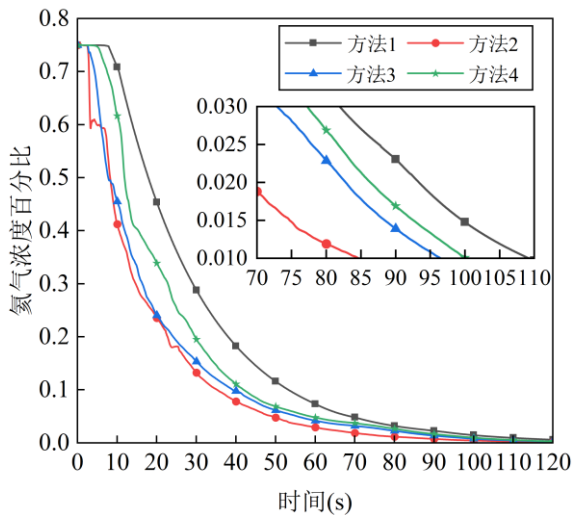
将换气方法 1、方法 2、方法 3 和方法 4 的仿真结果中 4 个角落位置和出气口处气体浓度随时间的变化情况进行对比。如图 3-14 所示为 5 个监测点的氦气浓度百分比随时间的变化曲线，从图中可以看出，所有监测点处的氦气浓度百分比按照方法 2、方法 3、方法 4、方法 1 的顺序依次开始下降，并且在整个过程中方法 1 的氦气浓度百分比下降速度均低于其他三种方法。根据防爆标准，正压腔体中各个区域的氦气浓度百分比低于 1% 为安全。在各个监测点处，方法 2 中氦气浓度百分比下降到安全值所用时间最短，然后依次是方法 3 和方法 4，方法 1 中氦气浓度百分比下降到安全值所用时间均高于其他方法。



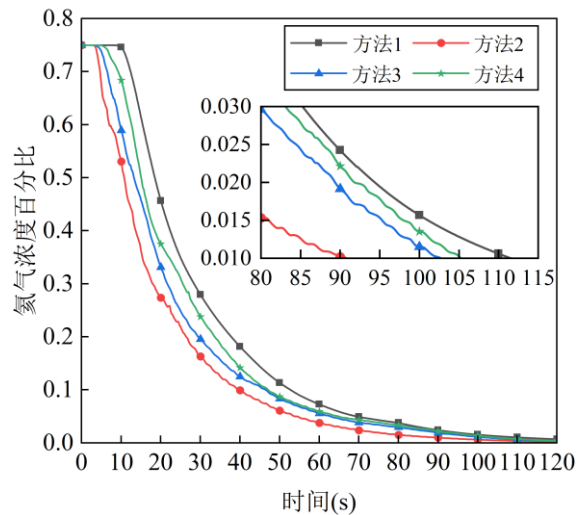
(a) 监测点 1



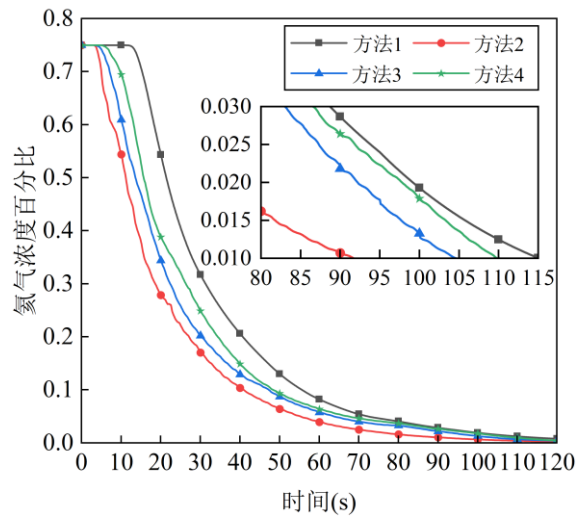
(b) 监测点 2



(c) 监测点 3



(d) 监测点 4



(e) 出气口

图 3-14 不同换气振幅情况下各监测点的氦气浓度变化曲线

进气压力从最大值降低到最小值的过程中会给氦气提供较大的扩散空间,当气流形成气流回路时才能将更多的氦气输送到回风口,进气压力从最小值转变为最大值时,气流回路逐渐向上扩散,不断缩小氦气的扩散空间,同时将沿途的氦气输送到出气口。当周期相同时,脉冲进气的振幅越大,腔体内气流发生的扰动也就越强烈,能够更好地带动整个腔体内的气流流动,正压防爆机器人的换气效率也就越高。若振幅减小,则进气的气流回路波动较小,不利于机器人腔体内的角落区域的气体流动,换气效率也不会有提升。

3.3.3 脉冲进气的周期变化对换气效果的影响

不同换气周期情况下腔体内压力随时间的变化情况如图 3-15 所示,可以看出,在方法 2、方法 3 和方法 4 中,腔体内压力在 0-40 s 内逐渐波动上升,40 s 之后方法 2、方法 3 和方法 4 中腔体内压力值分别在 0.051-0.056 MPa、0.047-0.059 MPa 和 0.045-0.061 不断振荡变化,变化周期与脉冲进气的周期基本一致。

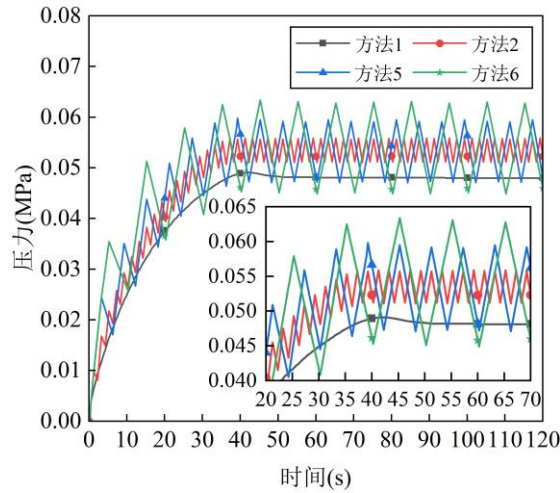
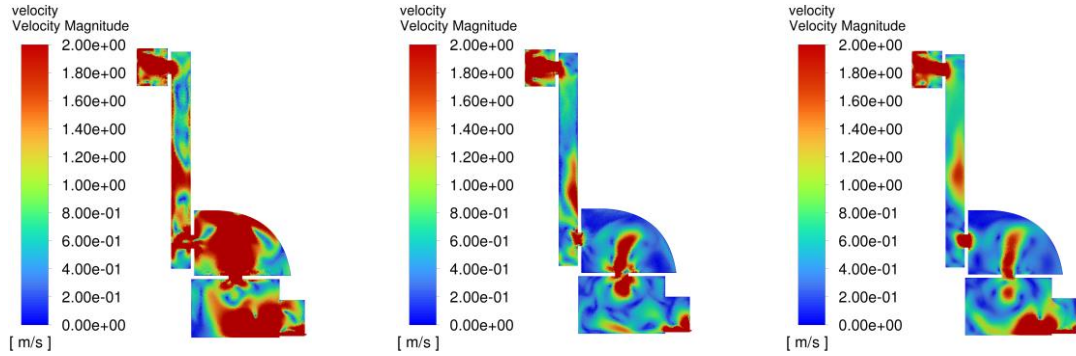


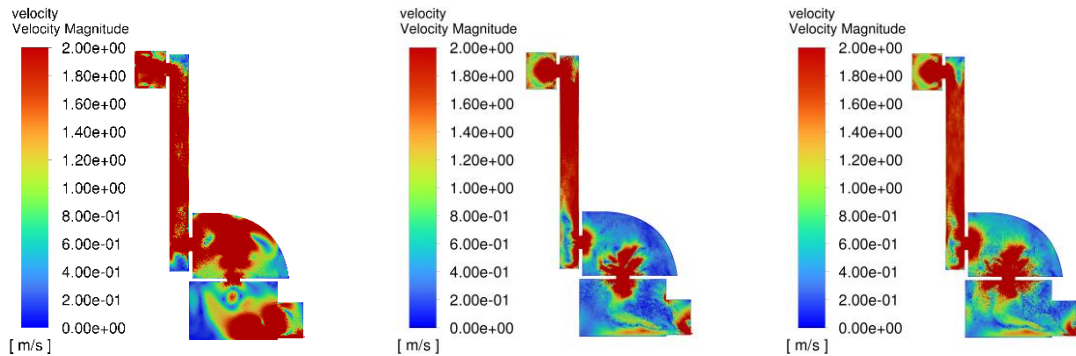
图 3-15 不同换气周期情况下腔体内压力变化曲线

图 3-16 为 30s 时（即以谷值向正压腔体内充气时）不同周期情况下腔体内流场分布示意图，图 3-17 为 30s 后以峰值向正压腔体内充气时不同振幅情况下腔体内流场分布示意图。从图中可以看出，方法 2 中腔体内气体流速最快。当进气压力从谷值转变为峰值时，会增加腔体内的气体流速，由于方法 2 的周期最小，其气体流速变化频率最快。



(a) 方法 2 在 30s 时的流场 (b) 方法 5 在 30s 时的流场 (c) 方法 6 在 30s 时的流场

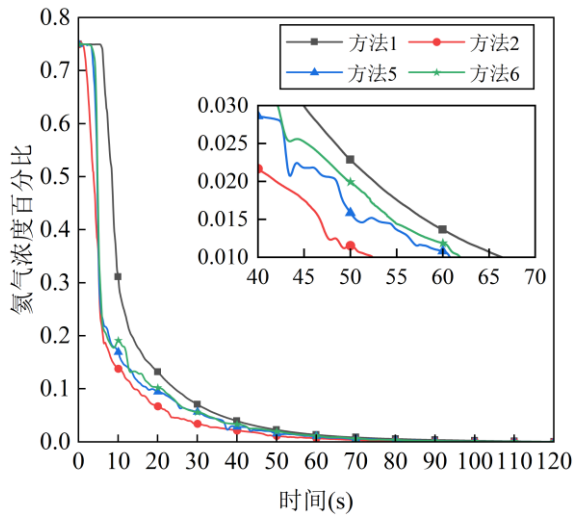
图 3-16 以谷值充气时不同周期情况下腔体内流场分布示意图



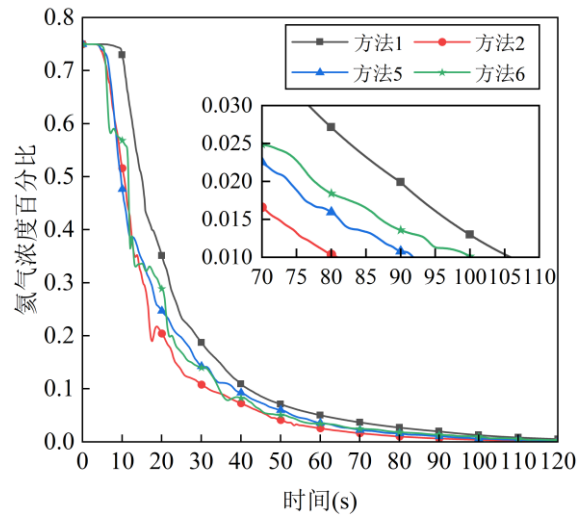
(a) 方法 2 在 31s 时的流场 (b) 方法 5 在 33s 时的流场 (c) 方法 6 在 35s 时的流场

图 3-17 以峰值充气时不同周期情况下腔体内流场分布示意图

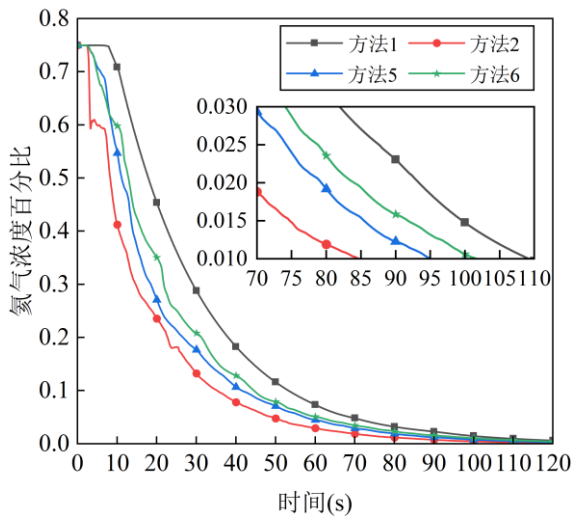
通过将换气方法 1、方法 2、方法 5 和方法 6 的仿真结果进行比较，重点比较 4 个角落位置和出气口处气体浓度随时间的变化情况。图 3-18 为 5 个监测点的氦气浓度百分比随时间的变化曲线，从图中可以看出，在各个监测点处，方法 2 中氦气浓度百分比下降到安全值所用时间最短，然后依次是方法 5 和方法 6，方法 1 中氦气浓度百分比下降到安全值所用时间均高于其他方法。此外，方法 1 中各监测点的氦气浓度百分比曲线平滑下降，在方法 2、方法 5 和方法 6 中，监测点 4 和出气口处的氦气浓度百分比则有规律的波动下降，每一次的波动时间和脉冲周期基本相同。



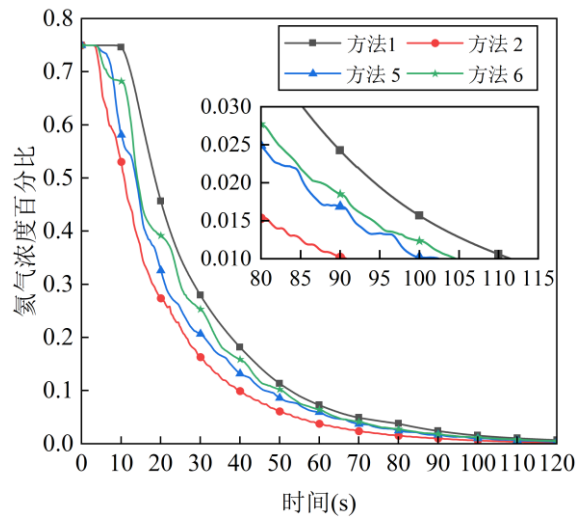
(a) 监测点 1



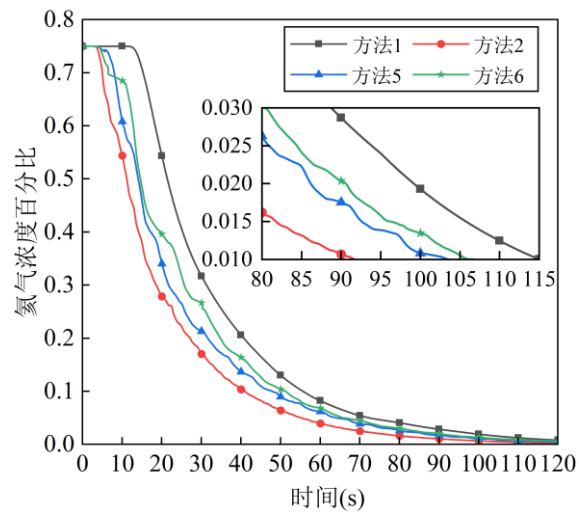
(b) 监测点 2



(c) 监测点 3



(d) 监测点 4



(e) 出气口

图 3-18 不同换气周期情况下各监测点的氢气浓度变化曲线

在方法 2、方法 5 和方法 6 中，分别每 2s、每 6s 和每 10s 会在腔体内产生一次扰动。当振幅相同时，脉冲进气的周期越小，气流在腔体内的扰动次数越多，能够增加腔体内气体流速的不均匀分布，带动气体停滞区的气流流动，从而带动氢气向出气口扩散，因此换气效率就越高。

3.4 本章小结

本章根据流场分析理论，使用 FLUENT 软件对防爆工业机器人正压腔体内清扫换气过程进行有限元仿真，通过对速度云图和浓度云图的分析，从而了解正压腔体内是否存在吹扫不利点。并使用周期性脉冲进气代替恒压进气，对比了恒定压力进气与不同周期和振幅的脉冲进气方法下机器人腔体内爆炸性气体的浓度随时间的变化情况。根据仿真结果，发现脉冲进气有利于角落位置的清扫换气。并且脉冲进气的周期和振幅对换气效率均有影响，当周期相同时，脉冲进气的振幅越大，换气效率越高；当振幅相同时，脉冲进气的周期越小，换气效率越高。

第 4 章 工业机器人正压防爆系统设计

根据周期性脉冲进气对清扫换气效果的影响，开展工业机器人正压防爆系统设计，其中包括正压防爆气路系统设计以及控制系统设计，从而实现机器人正压腔体内的高效清扫换气功能以及正压维持功能。

4.1 正压防爆系统总体方案设计

4.1.1 需求分析

根据工业机器人的结构特点以及周期性脉冲进气对正压型防爆机器人换气效率的影响，对于要设计的工业机器人正压防爆系统，主要应实现如下功能：

（1）清扫换气：在机器人本体启动之前，采用周期性脉冲进气的方法向正压腔体内充入保护性气体（纯净空气），将正压腔体内原有的爆炸性气体排出，保证在较短的时间内使爆炸性气体的浓度降低到安全值以下。

（2）正压补偿：机器人本体工作过程中，正压腔体内的压力需要维持在一定范围内，因此需实时监测正压腔体内的压力大小。当检测到压力值小于设定下限时，向正压腔体内充入保护性气体，直到压力值达到设定上限时停止。

（3）安全泄压：机器人本体工作过程中，若正压腔体内压力过大，将腔体内的气体释放泄压，防止内部压力过高造成正压腔体内零件的损坏。

（4）故障报警：机器人本体工作过程中，若机器人可能发生严重泄漏或者气源供气故障，正压腔体内压力小于安全值，立即对机器人本体进行断电并报警提示。

4.1.2 系统总体框架

根据上述的功能需求分析，对工业机器人正压防爆系统进行整体设计，系统总体设计框图如图 4-1 所示，本文将正压防爆系统分为以下四个子模块进行设计：

（1）主电模块：为正压防爆系统中的元器件提供电源。

（2）控电模块：作为正压防爆系统的“大脑”，对各个模块起到协调作用。控电模块接收各个模块反馈的信息并进行有效决策和处理，然后控制正压防爆系统中各组件的工作状态以及电路的通断状态。

（3）指示灯模块：用于显示正压防爆系统当前的工作状态。

(4) 气动元件模块：实时监测机器人正压腔体内的压力大小以及进出气状态，并反馈到控电模块进行控制调整。

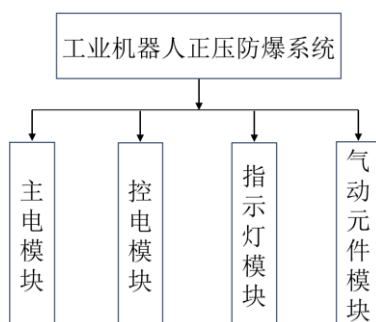


图 4-1 总体组成结构图

4.2 正压防爆气路系统设计

正压型防爆工业机器人的工作区域分为安全区域和危险区域，安全区域为放置防爆柜的非易燃易爆环境，危险区域为安装有机器人本体的工作间。在机器人工作过程中，正压防爆气路系统供给纯净空气，维持机器人腔体内的正压状态，并对正压腔体内的压力进行实时监测。系统主要包括气源、调压阀、供气电磁阀、防爆电磁阀、安全阀、数显压力表等，其结构图如图 4-2 所示。

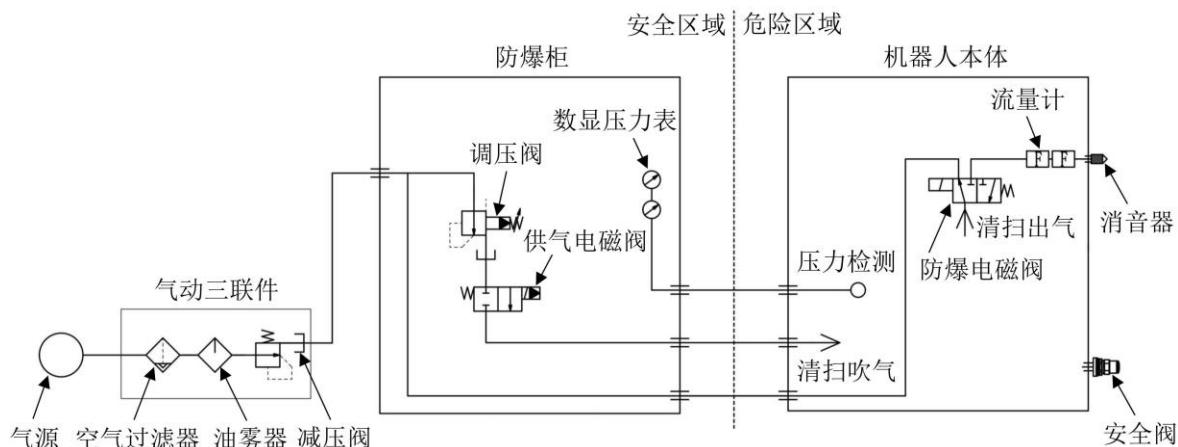


图 4-2 正压防爆气路系统结构图

在如图 4-2 所示的工业机器人正压防爆气路系统中，气源管路上安装有气动三联件，包括空气过滤器、油雾器和减压阀。其中气源由空气压缩机提供，空气过滤器和油雾器的设置，用于过滤杂质和水分，提供纯净的压缩空气，提高正压防爆系统中各零部件的使用寿命。减压阀对输入的气体进行压力调节，避免空气压缩机气压的直接充入，提高供气的安全可靠性。

在防爆柜内部安装有调压阀、供气电磁阀和数显压力表，调压阀安装在气动三联件的后面，用于调节进气压力的大小。供气电磁阀的进气口与调压阀相连，出气口通过气动导管与机器人正压腔体连通，用于向腔体内通入保护性气体。数显压力表通过气动导管与机器人正压腔体连通，实时监测腔体内的气压大小，为了保证压力监测的安全可靠性，数显压力表采用冗余设计。

机器人本体内部安装有防爆电磁阀，防爆电磁阀的进气口与腔体内相通，出气口通过排气管与腔体外连通。排气管上安装有流量计，用于检测机器人清扫换气时的进气量，为了提高流量检测的安全可靠性，流量计采用冗余设计。在排气管的末端即出气口处安装有消音器，用于消除排气时产生的噪声。在机器人腔体壁面上安装有安全阀，若腔体内的压力过大，触发安全阀打开泄压，避免内部压力过高而导致腔体内的零件损坏。

4.3 正压防爆控制系统设计

4.3.1 控制系统硬件设计

根据 4.2 中的正压防爆气路系统，设计了正压防爆控制系统，其示意图如图 4-3 所示。正压防爆控制系统设置有主电模块、控电模块、指示灯模块和气动元件模块。其中主电模块用于为防爆柜内部的各电气元件供给电源。控电模块则用于控制防爆柜内部元器件以及气动元件的工作状态，并控制电路的通断状况。指示灯模块设置在防爆柜的外表面，用于实时显示防爆柜的工作状态。气动元件模块中的调压阀、供气电磁阀和数显压力表安装在防爆柜中，防爆电磁阀、流量计和安全阀安装在机器人本体内，气动元件模块用于监测机器人本体内进出气的状态以及压力的大小，并实时反馈到控电模块来进行控制调整。

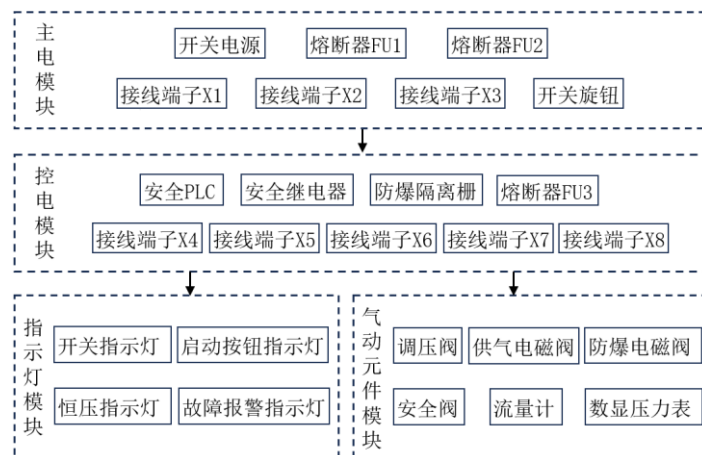


图 4-3 正压防爆控制系统示意图

4.3.2 控制系统核心部件选型

(1) 安全 PLC 选型

安全 PLC 是一种特殊的可编程逻辑控制器，即使在自身或相关外围元器件或执行机构出现故障时，依然能够确保正确响应并迅速切断输出。安全 PLC 的所有组件均设计为冗余多样性结构，采用两个处理器进行交叉检测，每个处理器将处理结果存储在各自的内存中，只有当两个处理器的结果完全相同时，才会执行输出操作，如果处理期间发现任何不一致，系统会立即停止运行。安全 PLC 不仅具备普通 PLC 的自动化控制功能，更能够实现安全控制功能^[81,82]。目前，世界上的安全 PLC 生产制造商较多，如西门子、施耐德、皮尔磁等。基于正压防爆系统的控制设计要求，并同时考虑控制器的成本等多方面因素，本文选用皮尔磁的 PNOZ mm0.1p 机型如图 4-4 所示，其产品参数如表 4-1 所示。



图 4-4 安全 PLC

表 4-1 PNOZ mm0.1p 产品参数

类目	参数说明
宽度尺寸	45mm
高度尺寸	100mm
深度尺寸	120mm
重量	250g
工作环境温度	0-60℃
保护等级	IP20

输入电压	24V DC -15%/+20%
输入电流	5mA
功率消耗	35W
数字输入数量	12
可配置 I/O 的数量	8
测试脉冲输出数量	4
半导体输出数量	4
允许的扩展模块数量	1

（2）安全继电器选型

安全继电器，是一种常见于机械设备、工业控制系统等领域的安全控制元件，可以监测和控制机械设备的运行状态，防止设备在运行过程中发生危险事故。它主要起到控制电路，切断电路和启动设备等作用。安全继电器接收安全信号输入，并通过内部回路的判断，向设备的控制回路输出一个确定性的开关信号。简而言之，安全继电器通常采用双通道信号机制，只有当两个信号通道都正常时，安全继电器才能正常运行，在运行过程中，如果任一通道的信号断开，安全继电器将停止输出，且只有当两个通道的信号都恢复正常并经过复位操作后，继电器才能重新开始正常工作^[83]。常用的安全继电器有德力西、欧姆龙、施耐德、菲尼克斯等，本文选用菲尼克斯的 PSR-SCP-24DC/FSP/1X1/1X2 机型如图 4-5 所示，其产品参数如表 4-2 所示。



图 4-5 安全继电器

表 4-2 PSR-SCP- 24DC/FSP/1X1/1X2 产品参数

类目	参数说明
宽度尺寸	17.5mm
高度尺寸	100mm
深度尺寸	114.5mm
重量	155g
工作环境温度	-20-55℃
保护等级	IP20
输入电压	24V DC -15%/+10%
输入电流	55mA
功率消耗	2.4W
启动时间	50ms
恢复时间	1s
最大切换频率	0.5Hz
保护电路	浪涌保护；抑制二极管，33V（A1-A2）
通断容量（3600/h 周期）	5A（24V（DC13））
	5A（230V（AC15））
输出熔断器	5A T 型保险丝（N/O 触点）
	150mA 快速熔断（常闭触点）

（3）防爆隔离栅选型

防爆隔离栅是一种将危险区域的电压和电流信号进行隔离变送的设备，能够输出单路或相互独立的双路电流/电压信号至安全区域。此外，通过配置的通讯接口，防爆隔离栅能在安全区域实现串行通讯联网。这种智能化的安全栅产品允许使用专用编程器或计算机来设置输入信号类型和输出量程^[84]。常用的防爆隔离栅品牌有海蒂诗、美控、基玛伊等，本文选用基玛伊的 GMI D1031D 机型如图 4-6 所示，其产品参数如表 4-3 所示。



图 4-6 防爆隔离栅

表 4-3 GMI D1031D 产品参数

类目	参数说明
宽度尺寸	15mm
高度尺寸	100mm
深度尺寸	115mm
工作环境温度	-20-60℃
防爆等级	IIC
输入电压	10.7V
输入电流	15mA
功率消耗	39mW

4.3.3 控制系统电路设计

(1) 控制系统主电路设计

正压防爆控制系统的主电路设计如图 4-7 所示，当机器人控制柜启动时，会通过防爆航插线缆向防爆柜供应 220V 的交流电；开启防爆柜的开关后，防爆柜控制系统会接通电源，交流电通过接线端子 X1，首先经过熔断器 FU1 来防止电流过载，以保护防爆柜内的元器件和电路安全。随后，电流会经过开关电源 1，将 220V 的交流电转换为 24V 的直流电，再通过熔断器 FU2 以及接线端子 X2 和 X3，为防爆柜内的相关元器件供电。由于防爆柜内的负载偏小，开关电源 1 的功率为 500W 便可满足要求。

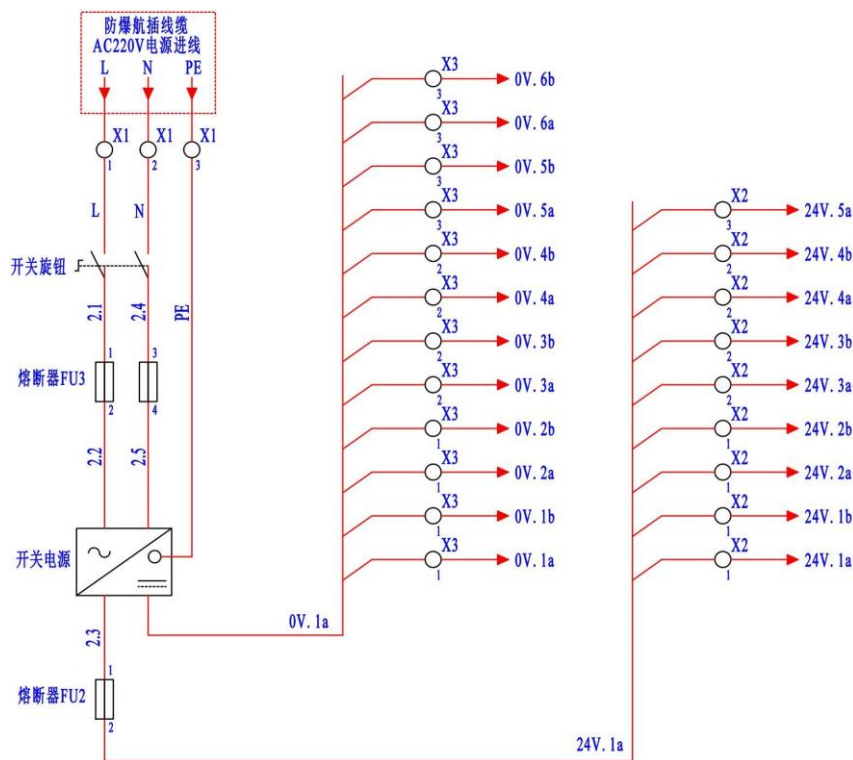


图 4-7 正压防爆控制系统主电路图

(2) 安全 PLC 电路设计

正压防爆控制系统中安全 PLC 电路设计如图 4-8 所示，为了防止安全 PLC 的供给电流过载，提高系统的安全性能，将安全 PLC 的 24V 引脚与熔断器 FU3 相连。启动按钮指示灯的常亮端口 3 与端口 1 相连，当启动按钮按下后，指示灯亮起，同时安全 PLC 接收到的反馈信号会触发控制指令，从而启动防爆系统的清扫换气工作。此外，安全 PLC 的引脚 I4 至 I7 分别与防爆柜内的接线端子 X7 和 X8 相连，两个数显压力表通过接线端子 X7 和 X8 将机器人正压腔体内的实时气压数据反馈给安全 PLC，有助于安全 PLC 及时调整防爆柜内的供气电磁阀以及机器人腔体内的防爆电磁阀的开闭状态，确保机器人腔体内的气压保持在安全水平，防止工作事故的发生。安全 PLC 的 T1 和 T2 号引脚分别连接到恒压指示灯和故障报警指示灯的端口 1，当安全 PLC 控制的防爆系统完成计时清扫任务后，启动按钮指示灯停止闪烁，并且安全 PLC 会发出一个反馈信号，此时恒压指示灯亮起，表示防爆功能已经准备完成。在正压防爆控制系统运行时，安全 PLC 会持续监控系统是否存在故障，如果检测到故障，安全 PLC 会立即发出指令停止整个系统的工作，同时故障报警指示灯亮起。此外，安全 PLC 的 O1 和 O2 号引脚分别连接

到防爆柜内的 X4 和 X6 接线端子，其中 O1 引脚通过 X4 接线端子控制防爆柜内的供气电磁阀在清扫换气和正压补偿过程中的开闭状态，O2 引脚通过 X6 接线端子并结合防爆航插线缆来控制机器人本体内的防爆电磁阀在清扫换气过程中的开闭状态。

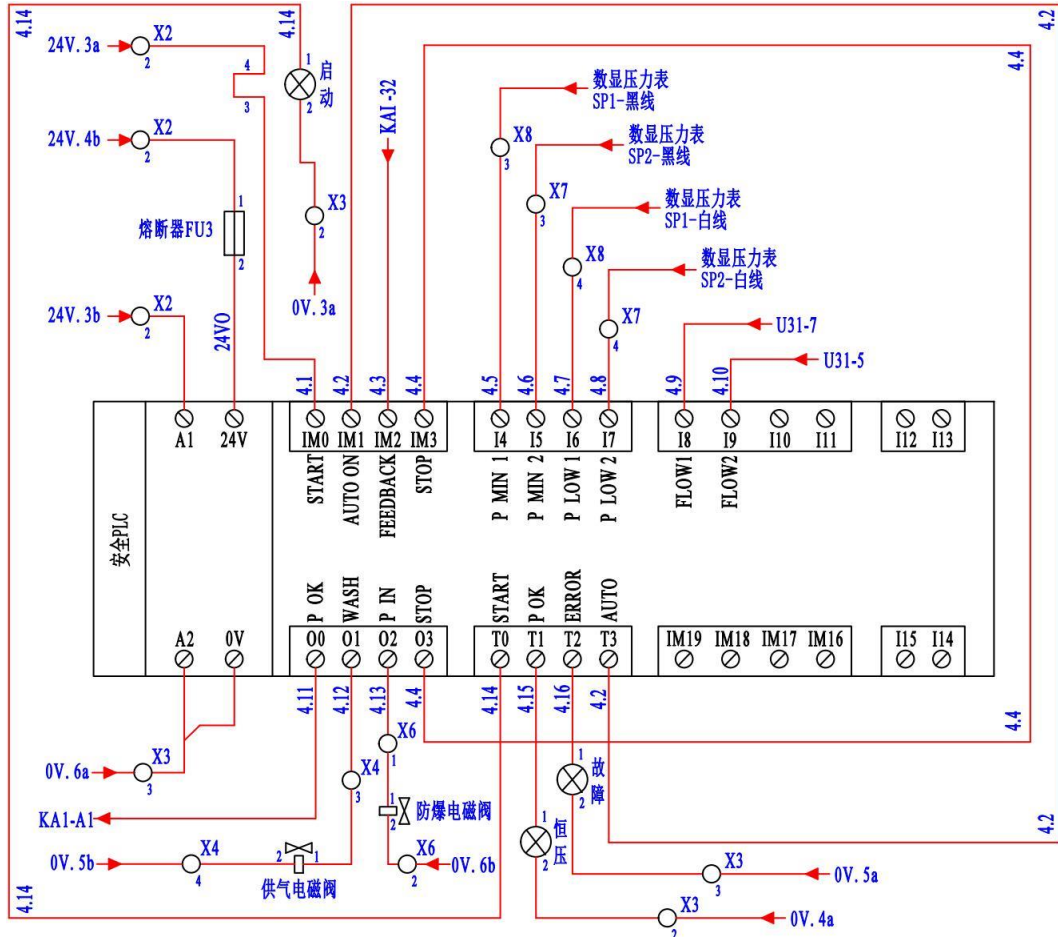


图 4-8 安全 PLC 电路图

（3）安全继电器电路设计

正压防爆控制系统中的安全继电器电路设计如图 4-9 所示，A1 号引脚连接到安全 PLC 的 O0 号引脚上，其作用是传递正压防爆系统清扫换气工作计时完成的信号，以控制安全继电器电路的开闭状态。安全继电器的 13 号和 14 号引脚连接到防爆柜内的 X4 接线端子，并通过防爆航插线缆将防爆功能完成的信号反馈至机器人控制柜内的接触器，以便控制柜为电路提供 24V 电源。安全继电器的 23 号和 24 号引脚连接到防爆柜内的 X5 接线端子，作为备用的一组安全信号，可用于连接外部的喷涂设备。安全继电器的 32 号引脚连接到安全 PLC 的 IM2 号引脚，主要功能是将安全继电器的运行状态反馈给安全 PLC。

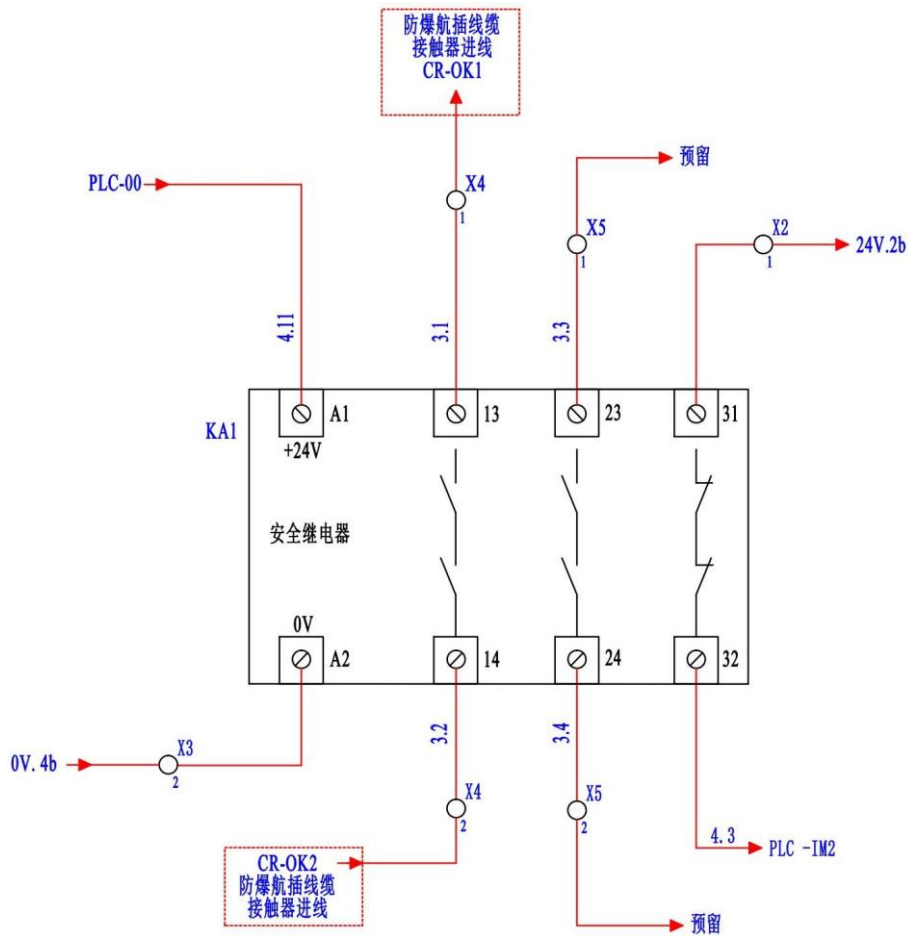


图 4-9 安全继电器电路图

(4) 防爆隔离栅电路设计

正压防爆控制系统中的防爆隔离栅电路设计如图 4-10 所示，防爆隔离栅的 1 至 4 号引脚通过防爆航插线缆和机器人控制柜内相应的接线端子与机器人正压腔体内安装的 2 个流量计相连。在正压防爆系统清扫换气过程完成后，防爆隔离栅会将流量计反馈的清扫换气完成信号转换为安全信号，并通过 5 号和 7 号引脚传送至安全 PLC 的 I9 号和 I8 号引脚。安全 PLC 在接收到相关信号并处理后，会控制正压防爆系统开始清扫换气计时工作，具体的清扫换气时间设定需要根据防爆标准、工作环境以及机器人腔体的容积等因素来确定。

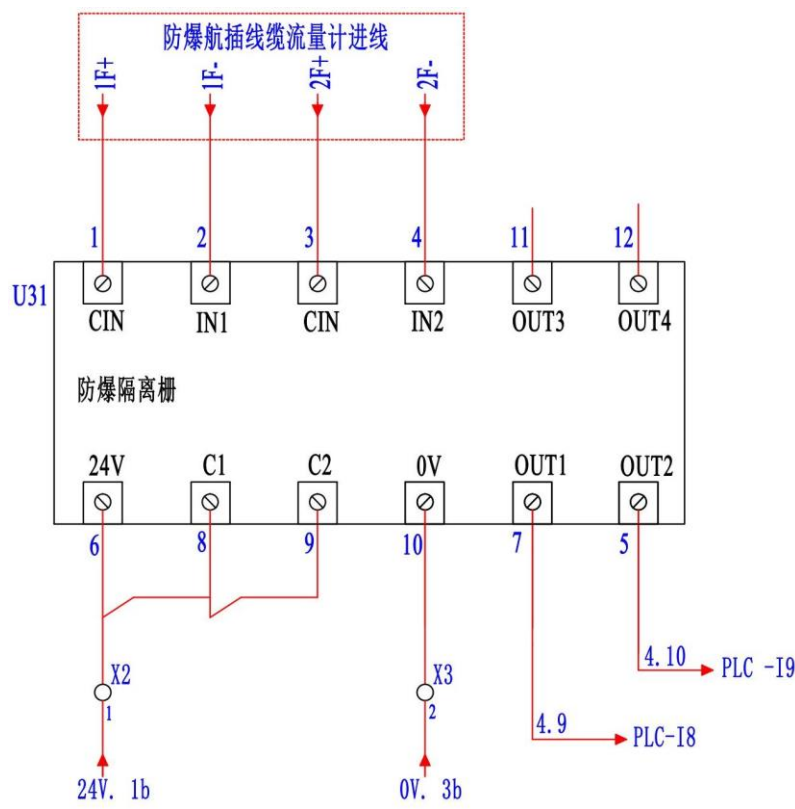


图 4-10 防爆隔离栅电路图

4.3.4 控制系统软件设计

4.3.4.1 软件总体架构

正压防爆控制系统软件采用模块化的结构，将整个软件系统分为 3 个模块:数据采集模块、控制模块、通信模块，其框架如图 4-11 所示。

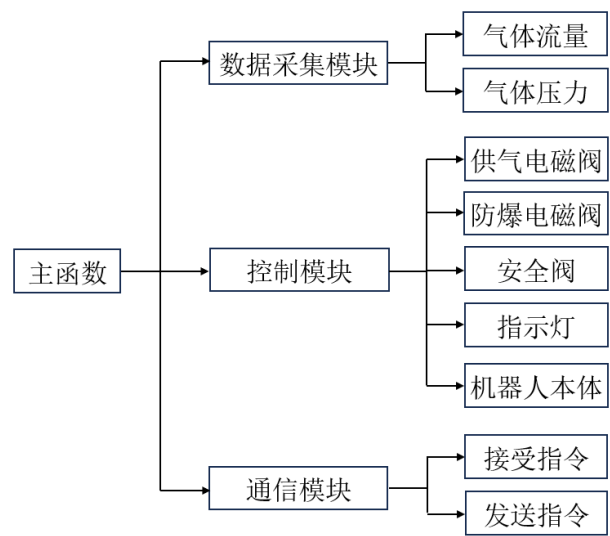


图 4-11 软件设计总体框架

主函数的主要作用是提供主循环，在这个循环中，三个模块的子程序等候调用。

数据采集模块主要用于采集并处理各个检测装置中的数据，其中包括流量计数据的反馈与处理，可以获取清扫换气过程中气体流量信息；采集数显压力表输出的气体压力数据，可以获取机器人正压腔体内的压力信息；采集气体浓度传感器输出的气体浓度数据，可以获取机器人腔体内的爆炸性气体浓度信息。

控制模块主要用于控制正压防爆系统中各电磁阀和指示灯，以及机器人本体。其中包括对供气电磁阀、防爆电磁阀和安全阀通断的控制，各指示灯显示状态的控制，以及发生故障时对机器人本体进行断电的控制。

通信模块主要用于接受上位机给正压防爆系统发送控制指令，并将正压防爆系统中的各项信息传输给上位机，实现正压防爆系统和上位机的信息交换。

4.3.4.2 触摸屏人机界面设计

（1）脉冲换气参数设置

触摸屏开机后进入脉冲换气参数设置界面，如图 4-12 所示。此界面用于清扫换气工作中对周期性脉冲进气的各种参数进行设置，在当前界面下，可以进行脉冲周期设置、振幅设置、占空比设置以及换气时间设置。根据第 3 章的仿真分析结果，并综合考虑供气流量、正压腔体容积等因素，本文将脉冲换气的周期设置为 2s，脉冲振幅设置为 0.05MPa，占空比设置为 0.5，清扫换气时间设置为 360s。

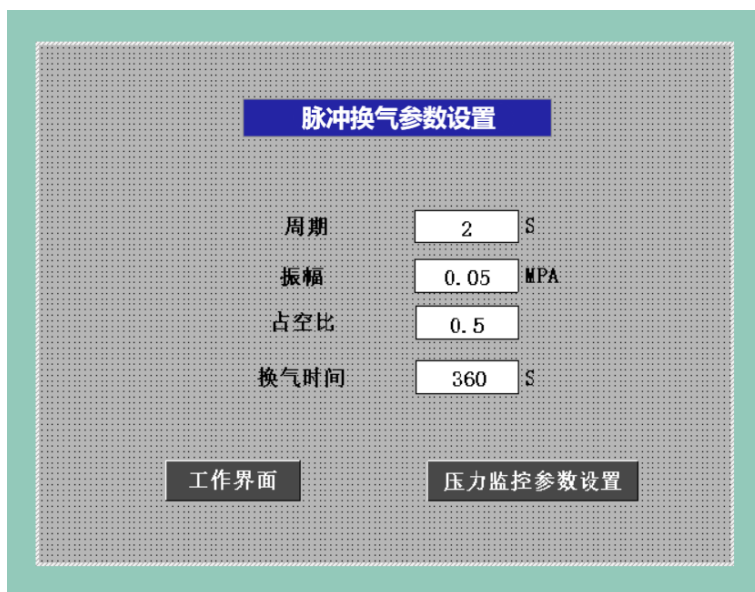


图 4-12 脉冲换气参数设置界面

（2）压力监控参数设置

脉冲换气参数设置完成后，点击“压力监控参数设置”按钮，触摸屏进入压力监控参数设置界面，如图 4-13 所示。此界面用于设置正压防爆系统对机器人腔体内压力监控的参数，包括正压维持范围设置、安全下限值设置和安全上限值设置。根据国家防爆标准，并综合考虑机器人正压腔体的材质及其承压能力，本文将正压维持范围设置在 0.02MPa-0.04MPa 之间，安全下限值设置为 0.01MPa，安全上限值设置为 0.06MPa。

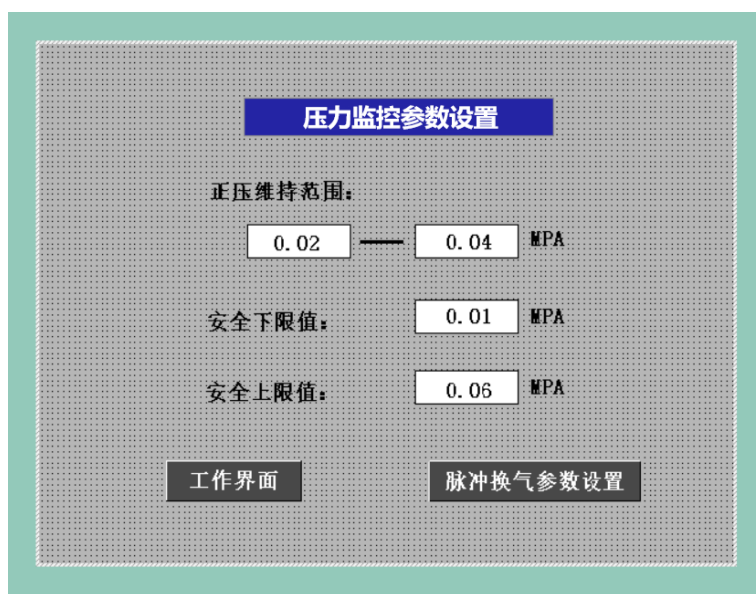


图 4-13 压力监控参数设置界面

（3）工作界面

脉冲换气参数和压力监控参数设置完成后，点击“工作界面”按钮，触摸屏进入工作界面，如图 4-14 所示。开关按钮用于控制正压防爆系统供电的通断，启动按钮用于控制正压防爆系统中各元器件的工作状况，恒压指示灯和故障指示灯用于显示正压防爆系统的工作现状。

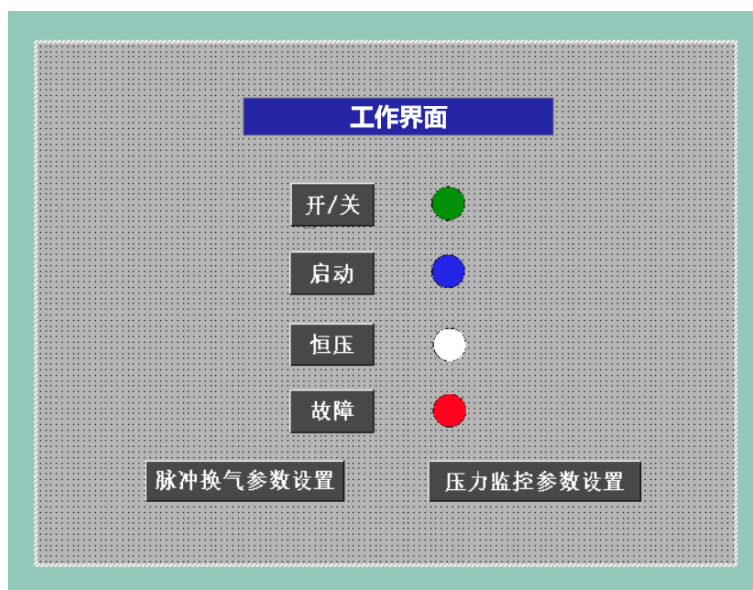


图 4-14 工作界面

4.4 正压防爆系统的工作流程

正压防爆系统的工作流程如图 4-15 所示，在正压防爆系统通电之前，需要对脉冲换气参数以及压力监控参数进行设置，然后才可启动正压防爆系统。系统在工作期间存在清扫换气、正压补偿、安全阀泄压和故障报警四种工作状态。

（1）清扫换气

脉冲换气参数以及压力监控参数设置完成后，进入工作界面，首先点击开关按钮给防爆柜通电，开关绿色指示灯亮起。然后按下启动按钮，启动蓝色指示灯亮起，防爆柜开始工作，供气电磁阀和防爆电磁阀打开，以周期性脉冲方式向机器人正压腔体内充入纯净空气，将原有的爆炸性气体排出。清扫换气过程中，数显压力表和流量计实时监测腔体内的压力值和机器人出气的流量，气体压力需高于 0.02MPa ，气体流量需大于 140L/min （根据机器人工作环境以及正压腔体容积，气体压力和气体流量需达到要求才能有效带动腔体内的气体流动）。清扫换气计时 360s ，关闭供气电磁阀和防爆电磁阀，清扫换气工作完成。

（2）正压补偿

清扫换气完成后，恒压白色指示灯亮起，机器人本体通电，机器人进入工作状态。在机器人工作过程中，正压腔体内的压力维持在 0.02MPa 和 0.04MPa 之间，当检测到压力小于 0.02MPa 时，打开供气电磁阀，向机器人腔体内进行补气至 0.04MPa 时停止。

(3) 安全泄压

在机器人运行时，若检测到正压腔体内压力大于 0.06MPa ，触发安全阀打开泄压，将腔体内压力下降至 0.04MPa 时停止，避免内部压力过高导致密封腔体内零件损坏。

(4) 故障报警

在机器人正常工作过程中，当正压腔体内的压力下降到 0.02MPa 时，打开供气电磁阀进行补气，若腔体内的压力仍然持续下降，直至下降到 0.01MPa 以下，此时机器人可能发生严重泄漏或者气源供气故障，立即对机器人本体进行断电，故障指示灯亮起报警，此时需要对防爆系统进行检查维修，排除故障后重新启动正压防爆系统。

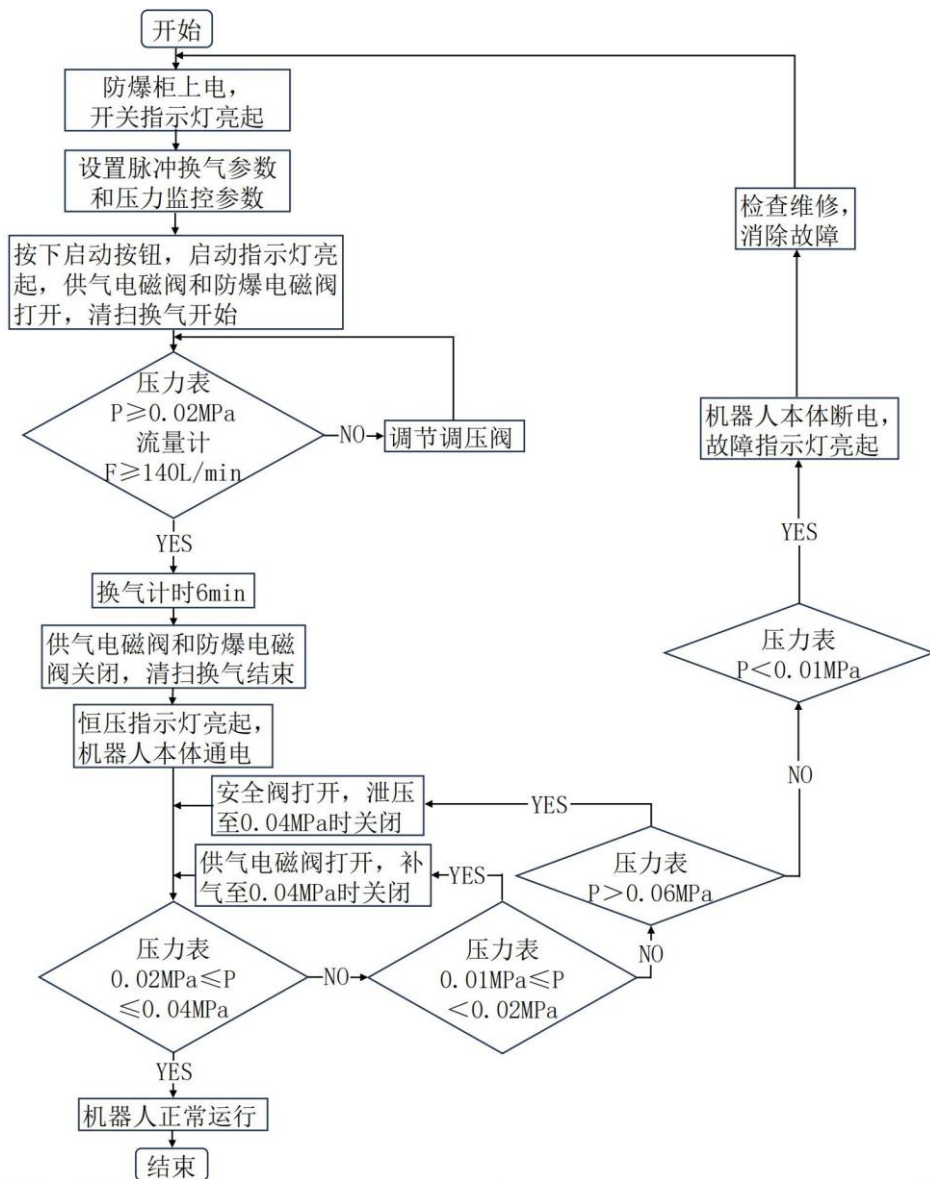


图 4-15 正压防爆系统工作流程图

4.5 本章小结

本章根据功能需求进行了工业机器人正压防爆系统总体方案设计,明确了系统的总体组成框架。然后设计了正压防爆气路系统,并且对控制系统进行了详细的设计,分别完成了其硬件设计、核心部件选型、控制电路设计以及软件设计。该正压防爆系统能够有效实现工业机器人腔体内的清扫换气以及正压维持,保证机器人工作过程中的安全性。

第 5 章 工业机器人正压防爆系统实验研究

针对工业机器人正压防爆系统所需要达到的应用要求和性能指标,对其进行实验研究和检测。实验对清扫换气过程中周期性脉冲进气的相关参数进行研究,主要采集浓度、压力等数据,并将实验数据与仿真结果进行对比分析,验证仿真结果的有效性。此外,在机器人工作过程中,针对正压维持系统的安全可靠性进行检测,主要包括正压补偿实验、安全阀泄压实验以及故障报警实验,验证工业机器人正压防爆系统的安全可靠性。

5.1 实验平台搭建

本文通过控制变量法对工业机器人清扫换气系统进行实验研究,分析周期性脉冲进气的周期和振幅对清扫换气效率的影响,将实验数据与仿真结果进行对比分析。此外,在机器人工作过程中,检测其正压维持系统的安全可靠性。

根据防爆标准 GB/T 3836.5-2021,对于保护气体为纯净空气的正压外壳,换气实验气体选用氦气、氩气或二氧化碳来代替爆炸性气体。选用氦气作为实验气体,可以模拟所有密度低于空气的爆炸性气体。选用氩气或二氧化碳作为实验气体,可以模拟所有密度高于空气的爆炸性气体。由于油漆中挥发出的爆炸性气体主要为甲苯(密度为 0.872g/cm^3)、二甲苯(密度为 0.86g/cm^3)等,其密度低于空气(密度为 1.29g/cm^3),故选用氦气作为实验气体。

根据第 4 章设计的工业机器人正压防爆系统,搭建实验平台如图 5-1 和图 5-2 所示。实验平台主要包括控制柜、防爆柜、机器人本体、空气压缩机、气动三联件、氦气瓶、氦气浓度传感器、气管等。其中空气压缩机用于提供气源,气动三联件包括空气过滤器、油雾器和减压阀,用于提供安全压力的纯净空气。在防爆柜内部安装有调压阀、供气电磁阀和数显压力表,调压阀通过 $\Phi 16$ 气管与气动三联件相连,用于调节进气压力的大小。供气电磁阀的进气口与调压阀相连,出气口通过 $\Phi 16$ 气管与机器人正压腔体连通,用于向腔体内提供保护性气体。防爆柜中的数显压力表通过 $\Phi 6$ 气管与机器人正压腔体连通,用于实时监测腔体内的压力大小。

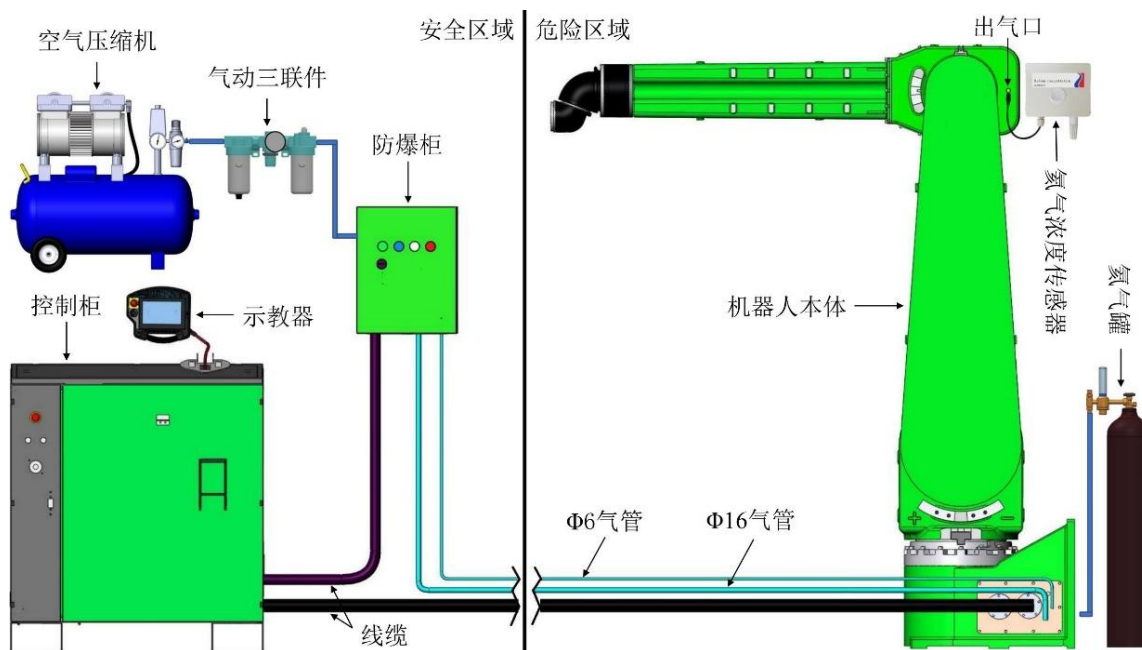


图 5-1 正压型防爆机器人清扫换气实验平台示意图

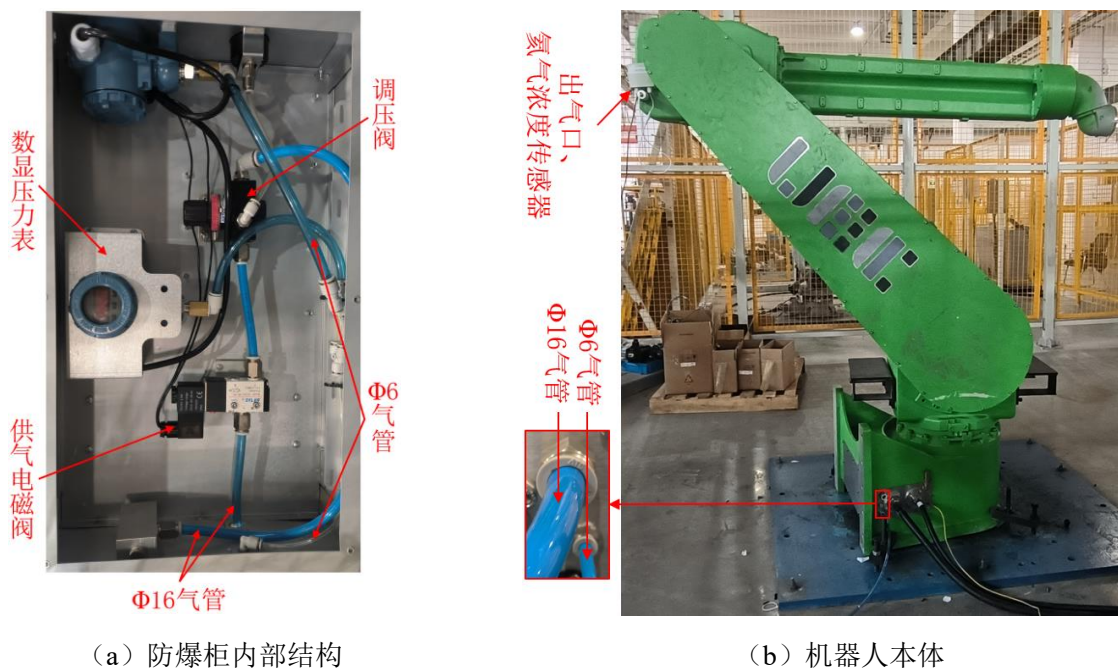


图 5-2 正压型防爆机器人清扫换气实验平台实物图

实验平台中的氮气用于代替爆炸性气体来进行清扫换气实验，氮气浓度传感器用于检测实验中氮气的浓度值。如图 5-3 所示，电脑上安装有与该款氮气浓度传感器配套的使用软件，氮气浓度数据经过 USB 转 485 模块转换后上传至电脑，并实时显示检测到的氮气浓度数值及其变化曲线。



图 5-3 氦气浓度检测装置

5.2 清扫换气系统性能实验

防爆标准中提出,在清扫换气实验中,正压外壳内的氦气初始浓度不低于 70%,换气实验合格的判据为正压外壳内各处的氦气浓度均低于 1%。由于实验中使用的工业机器人的结构不便于改造,正压腔体内部的氦气浓度值难以检测,现测量出气口处气流的氦气浓度值。

实验开始时将氦气浓度传感器探头安装在机器人出气口处,从机器人进气口向腔体内充入氦气,当氦气浓度传感器显示浓度值大于 75%,快速停止充入氦气,使用空气压缩机提供纯净空气进行清扫换气实验,按照第 3 章中设计的 6 种换气方法,设定脉冲进气的周期和振幅参数,以控制调节防爆柜内的电磁阀、调压阀等气动元件。当氦气浓度检测装置显示浓度值低于 1%时,实验完成,实验过程中实时记录腔体内压力和氦气浓度值的变化情况。

如图 5-4 所示为不同换气方法下机器人正压腔体内压力实验值随时间的变化情况,如图 5-5 所示为仿真结果和实验结果对比图。从图中可以看出,实验过程中腔体内压力随脉冲进气振幅和周期的变化规律与仿真结果基本一致,但腔体内压力的实验值和仿真值相差较大,这是由于机器人关节连接处的密封效果欠佳,清扫换气过程中关节连接处会发生少量气体泄漏,导致腔体内压力值会有所减小。

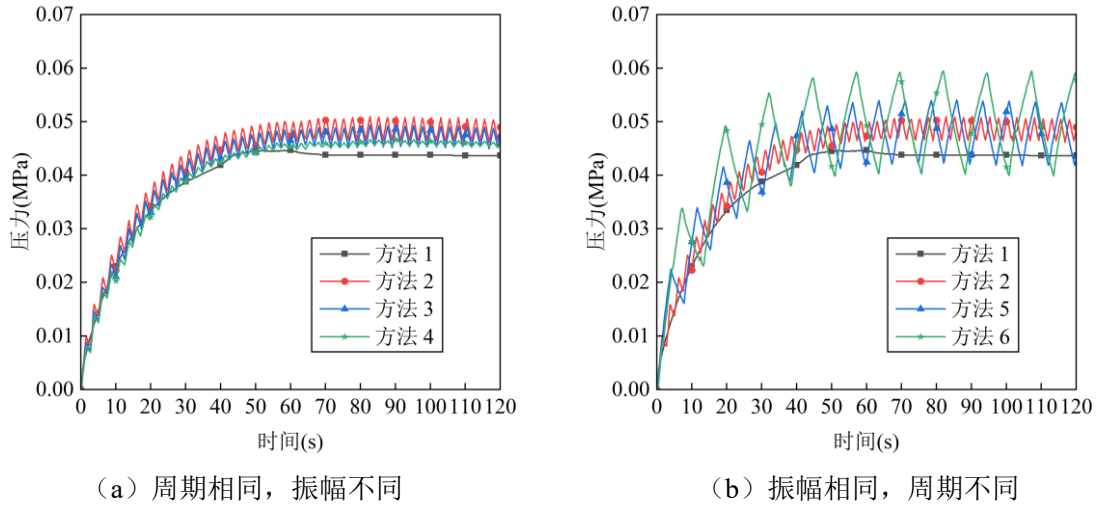


图 5-4 不同换气方法下正压腔体内压力实验值随时间的变化情况

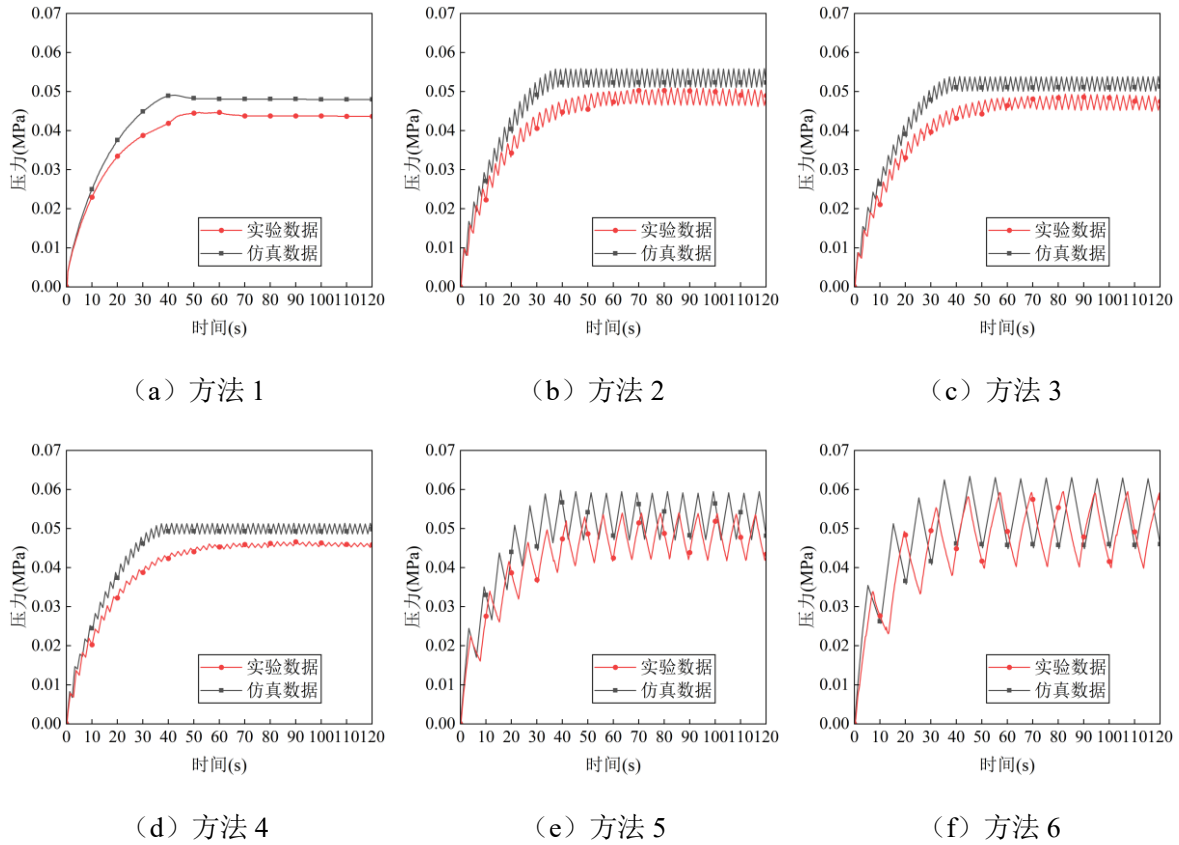


图 5-5 不同换气方法下腔体内压力变化情况仿真与实验对比

如图 5-6 所示为不同换气方法下出气口处氦气浓度实验值随时间的变化情况，如图 5-7 所示为仿真结果和实验结果对比图，从图中可以看出脉冲换气有利于提高防爆机器人的清扫换气效率，且脉冲振幅和周期对换气效率的影响规律与仿真结果一致。6 种不同换气方法下的实验和仿真结果趋势基本吻合，证明了清扫换气仿真结果的有效性。

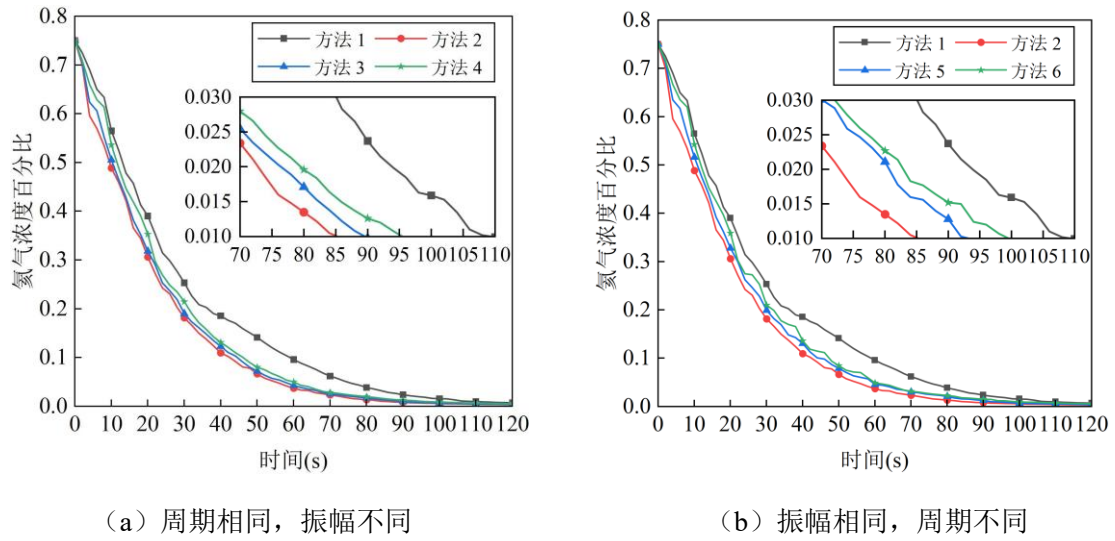


图 5-6 不同换气方法下氦气浓度实验值随时间的变化情况

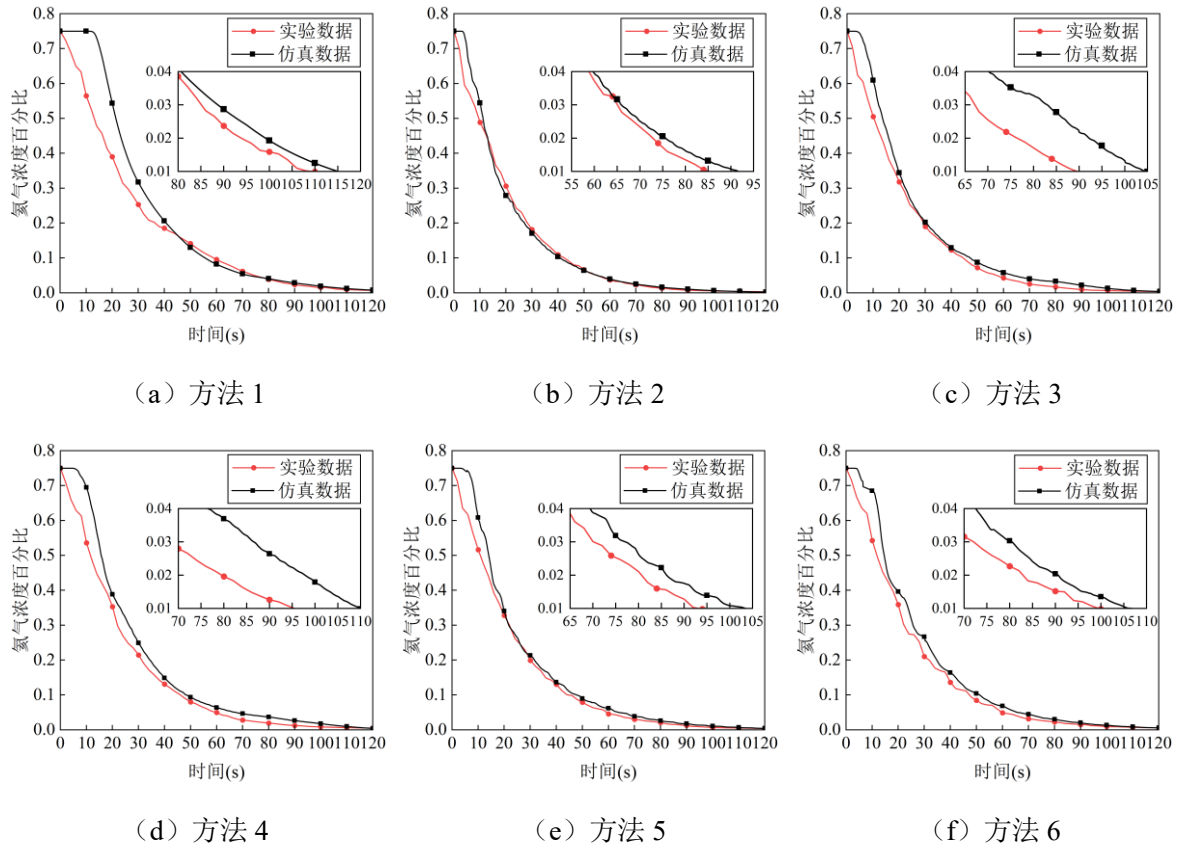


图 5-7 不同换气方法下氦气浓度变化情况仿真与实验对比

5.3 正压维持系统性能实验

5.3.1 正压补偿实验

清扫换气工作完成后，机器人本体开始通电，在机器人工作过程中，实时记录正压

腔体内压力随时间的变化情况,如图 5-8 所示,机器人腔体内的压力基本维持在 0.02MPa 至 0.04MPa 之间,腔体内压力从 0.04MPa 下降至 0.02MPa 两次实验均用时 48.5s。当腔体内压力低于 0.02MPa 时,供气电磁阀打开,向腔体内进行补气至 0.04MPa,补气第一次实验用时 3.75s,第二次实验用时 3.5s。

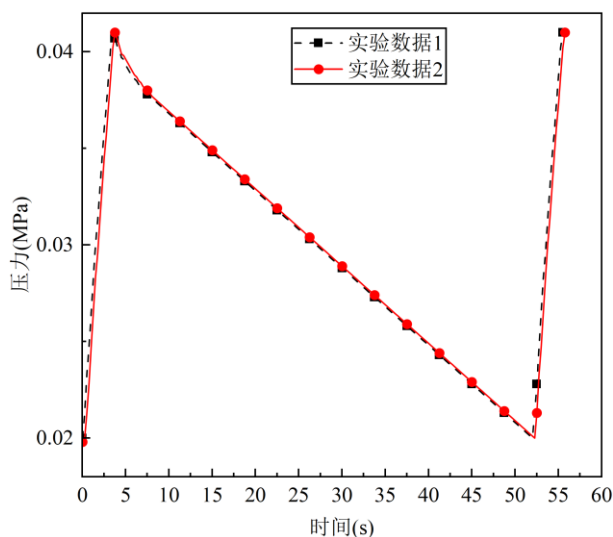


图 5-8 正压补偿实验中腔体内压力随时间的变化情况

5.3.2 安全阀泄压实验

调节调压阀,以 0.1MPa 的压力向机器人正压腔体内充入气体,当腔体内压力高于 0.06MPa 时,触发安全阀打开泄压,将压力下降至 0.04MPa 时安全阀关闭,腔体内压力随时间的变化情况如图 5-9 所示,腔体内压力从 0.06MPa 下降至 0.04MPa 第一次实验用时 3.75s,第二次实验用时 3.5s。

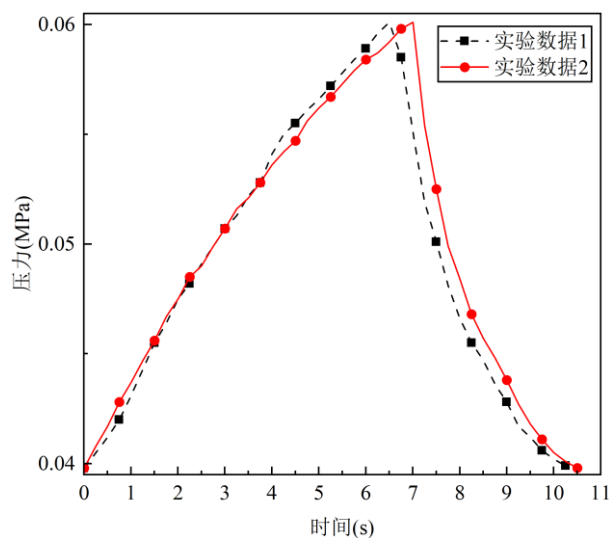


图 5-9 泄压实验中腔体内压力随时间的变化情况

5.3.3 故障报警实验

在机器人工作过程中，关闭气源，空气压缩机停止向机器人腔体内供气，腔体内压力逐渐下降，当压力下降到 0.01MPa 时，机器人本体断电，故障指示灯亮起报警。实验过程中腔体内压力随时间的变化情况如图 5-9 所示，腔体内压力从 0.02MPa 下降至 0.01MPa 第一次实验用时 24.75s，第二次实验用时 25s。

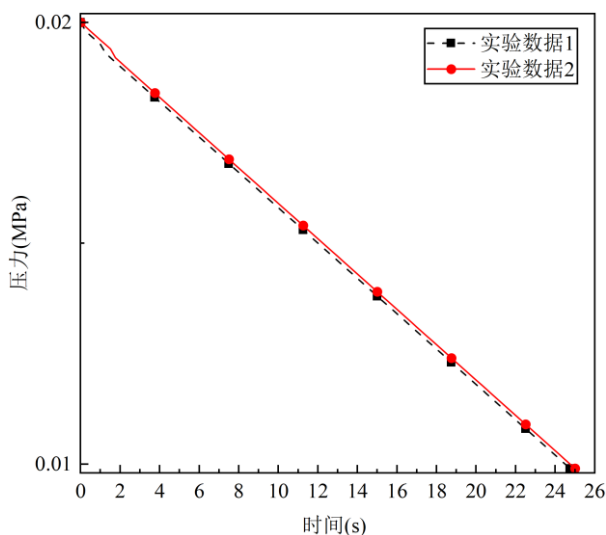


图 5-9 故障报警实验中腔体内压力随时间的变化情况

5.4 本章小结

本章首先介绍了工业机器人正压防爆系统实验平台和实验器材，然后对正压防爆系统的清扫换气功能以及正压维持功能进行了实验。其中，清扫换气系统性能实验研究脉冲进气的周期和振幅变化对换气效率的影响规律，通过对比分析仿真数据和实验结果，验证了仿真计算的有效性。正压维持系统性能实验包括正压补偿实验、安全阀泄压实验以及故障报警实验，确保工业机器人正压防爆系统能够满足有效防爆的功能，提高了工业机器人在工作过程中的安全性。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

本文以工业机器人正压防爆系统作为研究对象，对其进行理论分析，并通过 FLUENT 软件对清扫换气过程进行有限元仿真分析。根据正压型防爆特点和机器人腔体内流场特性，对工业机器人正压防爆系统进行优化设计，并完成了样机实验系统的搭建，通过实验验证了正压防爆系统的安全性。本文的主要工作内容如下：

(1) 通过对市场上防爆工业机器人的调研并查看相关文献，对工业机器人防爆基本理论进行分析，其中详细分析了爆炸产生的原因、国家标准对爆炸性场所的分类、各种防爆型式的特点及适用场合，并结合工业机器人的结构特性及工作环境等实际情况，选用正压型作为本文中工业机器人的防爆型式。然后通过流场分析理论，基于流体运动的基本定律，对机器人腔体内的流场进行建模描述。

(2) 根据流场分析理论，使用 FLUENT 软件对正压型防爆工业机器人的清扫换气过程进行有限元仿真，通过对速度云图和浓度云图的分析，从而找出正压腔体内的清扫不利点。并提出一种周期性脉冲进气的换气方法，对比分析脉冲进气的周期和振幅的参数变化对腔体角落位置清扫换气效率的影响，为正压防爆系统的设计提供参考。根据分析得出，当周期相同时，脉冲进气的振幅越大，清扫换气效率越高；当振幅相同时，脉冲进气的周期越小，清扫换气效率越高。

(3) 根据周期性脉冲进气对防爆工业机器人清扫换气效率的影响以及防爆功能需求，设计了一套工业机器人正压防爆系统，具体包括防爆气路系统和控制系统的设计。根据控制系统的设计方案，完成核心控制部件的选型，绘制出电气原理图，并设计软件人机交互界面，有效的实现了工业机器人高效清扫换气功能和正压维持功能。

(4) 搭建工业机器人正压防爆系统实验平台，对正压防爆系统的清扫换气功能以及正压维持功能进行实验验证。首先，对周期性脉冲进气的仿真结果进行实验验证，将仿真结果和实验数据进行对比分析，验证有限元仿真的有效性。此外，通过对正压补偿、安全阀泄压、故障报警功能的实验研究，验证正压防爆系统的安全可靠性。

6.2 展望

本文针对工业机器人的正压防爆系统做了相关研究,能够实现高效清扫换气和安全正压维持功能。但在研究过程中受时间、实验条件以及研究能力的限制,本文研究的还不够深入,需后续进一步加深完善,主要包括:

(1) 机器人防爆材料的研究与创新,对于在极端环境下工作的机器人,如高温、高压或有腐蚀性气体存在的场景,需要开发高耐热性、高强度和耐腐蚀性的材料,以提高机器人外壳的安全性能。

(2) 研究并优化机器人的密封结构,确保其各个连接点、接口和入口处的有效密封性。利用先进的密封技术,如 O 形密封、金属密封等,来提高机器人的密封性能,确保没有可燃物质进入机器人内部,同时降低正压腔体内压力下降的速度,减少正压补偿的频率。

(3) 结合先进的传感器技术,研究开发能够监测机器人防爆性能的传感器。通过实时检测和反馈机器人正压腔体内的压力、爆炸性气体浓度、温度等参数,确保正压状态的稳定性以及腔体内部空气的纯净度,并及时发现任何泄漏或异常情况。

参考文献

- [1] 徐云辉. 基于点云处理的喷涂机器人高精度标定及最优轨迹规划[D]. 东南大学, 2021.
- [2] 赵杰, 李剑, 臧希喆. 智能机器人技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [3] 罗霄, 罗庆生. 工业机器人技术基础与应用分析[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.
- [4] GB 3836.14-2014, 爆炸性环境 第 14 部分: 场所分类 爆炸性气体环境[S].
- [5] Muir P F, Neuman C P. Kinematic modeling of wheeled mobile robots[J]. Journal of robotic systems, 1987, 4(2): 281-340.
- [6] Asakura T, Guo Q, Takano Y. A Study on Dynamic Analyses of Explosion-Proof Pneumatic Robot and Its Stabilization[J]. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers C, 1997, 63(608): 1310-1316.
- [7] Weber R, Sommers T, Schmidt K, et al. Development of the Neptune On-stream Robotic Inspection System for Above Ground Storage Tanks[M]. US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratories, 1997.
- [8] Gaoqiao Z. Robot of internal pressure explosion-proof construction[P]. Japan: JPWO2009034789A1, 2010-12-24.
- [9] Amano H, Morisono R, Hodosima R. 1A2-B29 Experimental study on explosion-proof performance of robot to support fire fighting and rescue[J]. The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec), 2010: _1A2-B29_1-_1A2-B29_2.
- [10] Ken O, Koji S, Hiroyoshi O, et al. EXPLOSION-PROOF ROBOT[P]. European: EP3505313B1, 2021-06-09.
- [11] Onishi K, Onishi N, Shukutani K, et al. Development of the explosion-proof mobile robot and application to the plant check[J]. Proceeding of Annual/Fall Meetings of the Japan Petroleum Institute, 2017:230.
- [12] Novák P, Kot T, Babjak J, et al. Implementation of explosion safety regulations in design of a mobile robot for coal mines[J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2300.
- [13] 光军. 我国首次研制成功防爆机器人[J]. 劳动保护, 1987, (12): 8.

- [14] 李允旺, 葛世荣, 朱华, 等. 煤矿救灾机器人隔爆壳体的设计与加工[J]. 煤矿机械, 2009, 30(02): 104-106.
- [15] 雷利伟, 朱斌, 贾瑞卿. 轻型轮式废弃矿井探测机器人的防爆设计[J]. 煤矿机械, 2014, 35(04): 1-3.
- [16] 裴文良, 陆文涛, 郭映言, 等. 防爆消防特种机器人研发及应用[J]. 制造业自动化, 2017, 39(07): 73-75.
- [17] 钱钧, 杨汝清, 翁新华, 等. 一种安全工作于城区环境的消防侦察机器人[J]. 机器人, 2006, (06): 571-575+581.
- [18] 张东森. 正压防爆机器人在军工生产中的应用[J]. 中国军转民, 2023, (05): 51-54.
- [19] 李鑫宝. 石化巡检机器人设计与组合导航研究[D]. 河北工业大学, 2022.
- [20] 吕昊. 面向石化储罐的防爆型喷漆机器人结构设计与分析[D]. 河北工业大学, 2018.
- [21] 孙鹏, 廖映灵, 陈培喜, 等. 基于汽车涂装防爆自动喷涂机器人创新工作室搭建研究[J]. 现代涂料与涂装, 2020, 23(09): 35-37.
- [22] 谭震, 加保瑞, 李孝利, 等. 矿井复杂危险环境侦测机器人研究应用[J]. 能源与环保, 2023, 45(01): 250-254.
- [23] 朱世安. 本质安全型防爆设备电气间隙和爬电距离测量技术研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(08): 215-217.
- [24] 武俊. 煤矿机器人关键共性技术与发展探讨[J]. 工矿自动化, 2023, 49(S1): 1-3.
- [25] 李博. 正压型防爆巡检机器人设计[J]. 电气防爆, 2022, (02): 21-23.
- [26] 李世光, 黄莹, 封昌盛. 喷涂机器人防爆设计及检验方法研究[J]. 电气防爆, 2019, (02): 41-45.
- [27] Novák P, Babjak J, Kot T, et al. Exploration mobile robot for coal mines[C]//Modelling and Simulation for Autonomous Systems: Second International Workshop, MESAS 2015, Prague, Czech Republic, April 29-30, 2015, Revised Selected Papers 2. Springer International Publishing, 2015: 209-215.
- [28] Wang W, Dong W, Su Y, et al. Development of search-and-rescue robots for underground coal mine applications[J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(3): 386-407.
- [29] Li X, Zhang H. Research on Inspection Technology of Limited-rotation Explosion-proof Electric Actuators for Coal Mines[J]. Highlights in Science, Engineering and Technology, 2024, 84: 6-9.

- [30] Gao J, Yang X, Hu S, et al. Study of the Explosion Suppression Mechanism of Different Separate and Explosion-Proof Materials[J]. Combustion Science and Technology, 2022: 1-25.
- [31] 马向阳. 基于 STM32 矿用本安电源的研究设计[D]. 西安科技大学, 2015.
- [32] 李雨潭, 朱华. 煤矿救援机器人防爆创新设计探讨[J]. 煤炭技术, 2018, 37(02): 269-271.
- [33] Li Y, Zhu H. A simple optimization method for the design of a lightweight, explosion-proof housing for a coal mine rescue robot[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40: 1-10.
- [34] Gao J, Gao X, Zhu J, et al. Coal mine detect and rescue robot technique research[C]//2009 International Conference on Information and Automation. IEEE, 2009: 1068-1073.
- [35] Zhu J, Gao J, Li K, et. al. Embedded control system design for coal mine detect and rescue robot[C]//2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology. IEEE, 2010, 6: 64-68.
- [36] Murphy R, Kravitz J, Stover S, et al. Mobile robots in mine rescue and recovery[J]. Robotics & Automation Magazine IEEE, 2009, 16(2): 91-103.
- [37] 朱国英. 正压防爆技术在自控设备中的应用[J]. 自动化仪表, 2012, 33(05): 80-83.
- [38] 张春洋, 韩爱山. 正压防爆技术在配电箱中的应用[J]. 自动化应用, 2023, 64(01): 132-134.
- [39] 武岳, 王伟, 王晓智. 一体化电气房正压防爆系统的设计研究[J]. 电气防爆, 2019, (06): 10-13.
- [40] Chernyshov M V, Savelova K E, Yatsenko A A, et al. Simulation of an explosion-proof bin made of relaxation material[C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2023, 460: 10013.
- [41] Liu X, Wang Q, Zhao M. Research on Explosion-Proof and Sealing Performance of Underground UAV in Coal Mine[C]//2021 6th International Conference on Control, Robotics and Cybernetics (CRC). IEEE, 2021: 220-224.
- [42] 聂勇刚. 喷涂机器人防爆系统设计与动力学分析[D]. 南昌航空大学, 2012.
- [43] 张宏强. 六自由度偏置手腕防爆喷涂机器人的研制[D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [44] 程健. 矿井救援机器人的轻量化防爆研究[D]. 中国矿业大学, 2021.

- [45] Rong X, Song R, Song X, et al. Mechanism and explosion-proof design for a coal mine detection robot[J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 100-104.
- [46] Kasprzyczak L, Szwejkowski P, Cader M. Robotics in mining exemplified by Mobile Inspection Platform[J]. Mining–Informatics, Automation and Electrical Engineering, 2016, 54(2): 23-28.
- [47] 张文. 15MW 正压型电机的设计与研制[D]. 上海交通大学, 2014.
- [48] 李清玲. 石化企业在线防爆分析小屋的安全设计与应用研究[D]. 重庆科技学院, 2016.
- [49] 范东英, 孙晓伟. 基于 STC 单片机正压防爆控制系统的设计[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(05): 612-614+655.
- [50] Liu W, Ai M, Xu L, et al. Research on purging and ventilation progress of positive-pressure explosion-proof motor[J]. IEEE Access, 2022, 10: 48964-48972.
- [51] 尹欣. 工业厂房污染物扩散规律与通风设计研究[D]. 中国矿业大学, 2023.
- [52] Matsuoka H. A corrected turbulon model theory of turbulent diffusion and its application[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 1960, 38(3): 148-153.
- [53] Ng K H, Spalding D B. Predictions of two-dimensional boundary layers on smooth walls with a two-equation model of turbulence[M]//Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion. Pergamon, 1983: 170-181.
- [54] Fan Y, Holmberg R, Heikkinen J. CFD simulation on the air flow in a sauna: Fresh air inlet position influences air flow and temperature distribution whilst radiant heat emission takes about 75% of total stove heat output[J]. Building research and information, 1994, 22(6): 307-312.
- [55] Naung S W, Rahmati M, Farokhi H. Nonlinear frequency domain solution method for aerodynamic and aeromechanical analysis of wind turbines[J]. Renewable Energy, 2021, 167: 66-81.
- [56] Tian H, Huang S, Yang M. Flow structure around high-speed train in open air[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(2): 747-752.
- [57] 徐川, 李万莉, 刘翠伟, 等. CFD 模拟障碍物条件下甲烷扩散的有效性研究[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(S1): 90-93+110.

- [58] 田雪. 脉动送风与层式通风耦合下室内热舒适研究[D]. 重庆大学, 2020.
- [59] 刘岩, 王海东, 汤毅, 等. 周期性动态送风对室内污染物分布和通风效率的影响[J]. 建筑节能(中英文), 2022, 50(05): 59-67.
- [60] 张劲松. 现代化工企业管理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [61] 马建伦, 张力, 张杰, 等. 浅谈防爆电气设备的选型[J]. 中国仪器仪表, 2018, (12): 55-58.
- [62] GB/T 3836.5-2021, 爆炸性环境 第 5 部分: 由正压外壳“p”保护的装置[S].
- [63] 周振中. 管道检测机器人防爆与密封性能研究[D]. 中国矿业大学, 2019.
- [64] Lucian M, Diana S, Clementina M. Considerations on the type of protection increased safety “e”[J]. MATEC Web of Conferences, 2022, 373.
- [65] 范咏峰, 李玲. 石油化工装置中的仪表防爆[J]. 石油化工自动化, 2021, 57(04): 49-52.
- [66] 查继明, 蔡福海, 查勇章. 防爆起重机电气设备和线路的防爆设计要求[J]. 中国特种设备安全, 2021, 37(04): 91-93+100.
- [67] Yu X, Meng D. Design analysis and improvement of cooler in positive-pressure explosion-proof low-speed high-capacity induction motors[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 129: 1002-1009.
- [68] Xia Y, Han Y, Xu Y, et al. Analyzing temperature rise and fluid flow of high-power-density and high-voltage induction motor in the starting process[J]. IEEE Access, 2019, 7: 35588-35595.
- [69] Xu Y, Ai M, Yang Y. Research on heat transfer of submersible motor based on fluid network decoupling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 136213-222.
- [70] Sun S, Qiu Y, Xing H, et al. Effects of concentration and initial turbulence on the vented explosion characteristics of methane-air mixtures[J]. Fuel, 2020, 267: 117103.
- [71] 于喜伟, 孟大伟, 李琼. 正压型防爆电机吹扫过程多组分瞬态浓度场分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(04): 49-55.
- [72] 陈华君. 射流鼓泡反应器内气液流动 CFD 模拟研究[D]. 华东理工大学, 2021.
- [73] Babanezhad M, Pishnamazi M, Marjani A, et al. Bubbly flow prediction with randomized neural cells artificial learning and fuzzy systems based on k- ϵ turbulence and Eulerian model data set[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 13837.

- [74] 王彦军. 基于 ANSYS CFD 的离心泵内部湍流数值模拟分析[J]. 机电工程技术, 2021, 50(02): 27-29+60.
- [75] Zeng J, Lin Y, Zhang D, et al. Simulation of the Influence of Fracture Gas State on Gas-Liquid Replacement Based on Fluent Two-Phase Flow[J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 2024, 59(6): 1257-1263.
- [76] 胡梦妍, 黄亚楠, 李丹, 等. 基于 Fluent 的挥发性可燃气体爆炸数值模拟[J]. 辽宁化工, 2019, 48(01): 92-97.
- [77] 张奥. 壁面粗糙度和壁面滑移耦合作用下的微喷孔内空化流动[D]. 大连理工大学, 2022.
- [78] 曹宝峰. 基于 Fluent 的高超音速共形整流罩面形设计[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [79] 申祖宁. 灌区测控一体化平板闸门研发与测流特性分析[D]. 华北水利水电大学, 2022.
- [80] 穆艳丽, 雷基林, 陈康. 内冷油腔振荡冷却仿真方法研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(02): 46-52.
- [81] 王华忠. 工业控制系统及应用—PLC 与组态软件[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [82] 满海波, 刘富凯. 基于 PRO FIsafe 总线的汽车焊装生产线安全控制设计[J]. 机电一体化, 2019(1): 7.
- [83] 匡云超. 中大型选择性激光熔化设备电气控制系统设计[D]. 重庆大学, 2019.
- [84] 冯伟, 王林, 董健. 隔离式安全栅与 PLC 的通讯设计和应用开发[J]. 仪器仪表用户, 2017, 24(09): 5-8.

攻读学位期间取得的科研成果

1) 论文发表情况:

- [1] Fang M, **Chu X**, Yu L, et al. Influence of periodic pulse intake on the ventilation efficiency of positive pressure explosion-proof robot[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 1433. (SCI 收录, 对应论文第 3 章)
- [2] Fang M, Yu L, **Chu X F**, et al. Research on simulation method of multiple time scales dissolution process in tube electrode pulse electrochemical machining[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 110: 318-330. (SCI 收录)

2) 专利发表情况:

- [1] 方明, 余良, **储徐烽**, 等. 一种高空履带式吸附爬壁机器人[P]. 中国专利: ZL202210382440.2, 2023-08-18. (发明专利授权)
- [2] 方明, **储徐烽**, 余良, 等. 一种喷涂机器人正压防爆系统及其防爆方法[P]. 中国专利: CN116922407A, 2023-10-24. (发明专利实审阶段)

致谢

时光荏苒，岁月如梭。读研期间在校园里度过了美好的青春时光和求学之旅，如今即将毕业，感慨万千。

首先，对我的导师方明老师致以衷心的感谢。感谢方老师在学术上给予我专业的指导和启发，以及在生活上给予了我无微不至的关怀和支持。方老师严谨的治学态度、渊博的知识和对学术研究的执着追求，深深地影响着我，并激励着我不断超越自我。

其次，感谢我的父母和姐姐，感谢你们一直以来对我的悉心照顾和鼓励支持，是您们的陪伴和理解让我能够坚持到最后，完成我的读研生涯。

再次，感谢各位室友、同学及实验室的师兄弟在学习和生活中给予我的帮助和支持，你们的经验和热情让我受益匪浅。感谢埃夫特智能装备股份有限公司提供的实验场地及实验器材，感谢蒋立军、方钰等工程师在实验过程中给予的技术支持。

最后，感谢评阅老师和各位专家在百忙之中抽出时间审阅我的论文，提出宝贵的意见和建议，您的审阅和指导，让我对研究内容有了更深入的理解和认识，使我的论文更加完善。

再一次向所有关心和支持我的人表示衷心的感谢，是您们的帮助和鼓励，让我度过了难忘的硕士研究生阶段。愿我们未来的岁月仍然充满着知识的探索和学术的热情！谢谢大家！

尚德敏学 唯实惟新

