

文本复制检测报告单(全文标明引文)

№:ADBD2021R_2021072315351220210723154740311183087038

检测时间:2021-07-23 15:47:40

检测文献: 022

作者: Supervisor;Enterprise

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

学术论文联合比对库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

源代码库

CNKI大成编客-原创作品库

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2021-07-23

可能已提前检测, 检测时间: 2021/4/28 9:20:02, 检测结果: 5.4%

检测结果

去除本人文献复制比: 5.5%

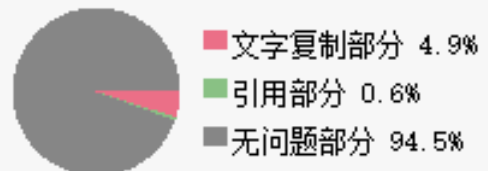
跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 4.9%

总文字复制比: 5.5%

单篇最大文字复制比: 0.4% (基于深度强化学习的多机器人协同导航)

重复字数: [2764] 总段落数: [6]
 总字数: [49952] 疑似段落数: [6]
 单篇最大重复字数: [195] 前部重合字数: [547]
 疑似段落最大重合字数: [1136] 后部重合字数: [2217]
 疑似段落最小重合字数: [29]



指 标: ☐ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

表 格: 0 公 式: 没有公式 疑似文字的图片: 0 脚注与尾注: 0

10.3%(1136)	10.3%(1136)	022_第1部分 (总11028字)
2.5%(217)	2.5%(217)	022_第2部分 (总8667字)
0.3%(29)	0.3%(29)	022_第3部分 (总8781字)
9%(831)	9%(831)	022_第4部分 (总9222字)
0.4%(37)	0.4%(37)	022_第5部分 (总8746字)
14.7%(514)	14.7%(514)	022_第6部分 (总3508字)

(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

1. 022_第1部分

总字数: 11028

相似文献列表

去除本人文献复制比: 10.3%(1136) 文字复制比: 10.3%(1136) 疑似剽窃观点: (0)

1	快速消费品准时配送研究 惠捷(导师: 任海兵) - 《中国矿业大学硕士论文》 - 2017-05-10	1.5% (166) 是否引证: 否
2	TS14020076_惠捷_快速消费品准时配送研究_管理科学与工程_任海兵	1.5% (166)

	惠捷 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-10-26	是否引证: 否
3	机械工程学院G20124381孙博机械工程g 孙博 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-05-06	1.5% (162) 是否引证: 否
4	机械学院 S20170496-孙博 孙博 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-11-22	1.5% (162) 是否引证: 否
5	黄潇 黄潇 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-10-27	1.3% (148) 是否引证: 否
6	城市用地模拟与可持续发展研究 曹凯滨; - 《测绘通报》 - 2011-04-25	1.2% (127) 是否引证: 否
7	盐城湿地类型演化预测分析 张怀清;唐晓旭;刘锐;周金星;凌成星; - 《地理研究》 - 2009-11-15	1.2% (127) 是否引证: 否
8	资兴市土地利用变化及其驱动力研究 游小敏(导师: 胡曰利;吴晓芙;胡月明) - 《中南林业科技大学硕士论文》 - 2007-04-01	1.1% (120) 是否引证: 否
9	移动机器人单目视觉同时定位与建图技术的研究与实现 - 豆丁网 - 《互联网文档资源 (http://www.docin.com)》 - 2017	1.0% (109) 是否引证: 否
10	PSO-TSP问题综述 傅刚; - 《黑龙江科技信息》 - 2012-11-05	1.0% (106) 是否引证: 否
11	实际路网最短路径算法优化与实现 - 道客巴巴 - 《互联网文档资源 (http://www.doc88.com)》 - 2019	0.9% (103) 是否引证: 否
12	基于无线传感器网络的机器人跟踪技术研究 李翠娟(导师: 吴成东;张云洲) - 《东北大学硕士论文》 - 2011-06-01	0.9% (98) 是否引证: 否
13	基于神经网络的元胞自动机与土地利用演化模拟——以广州市白云区为例 乔纪纲;邹春洋; - 《测绘与空间地理信息》 - 2012-07-25	0.8% (90) 是否引证: 否
14	基于元胞自动机的扎龙湿地景观模拟 张玉红;于万辉; - 《Proceedings of 2010 First International Conference on Cellular,Molecular Biology, Biophysics and Bioengineering(Volume 4)》 - 2010-12-25	0.8% (90) 是否引证: 否
15	基于元胞自动机的扎龙湿地景观模拟 张玉红;于万辉; - 《Proceedings of 2011 International Conference on Biomedicine and Engineering (ISBE 2011 V1)》 - 2011-08-04	0.8% (90) 是否引证: 否
16	自主移动机器人巡线控制研究 - 豆丁网 - 《互联网文档资源 (http://www.docin.com)》 - 2016	0.8% (86) 是否引证: 否
17	室内移动机器人自主导航与抓取规划 陈良良(导师: 刘冠峰;管贻生;杨宇峰) - 《广东工业大学硕士论文》 - 2016-06-01	0.8% (83) 是否引证: 是
18	自主移动机器人巡线控制研究 王金波;姜华;徐鹏; - 《自动化技术与应用》 - 2011-07-25	0.7% (77) 是否引证: 是
19	一种新的进化粒子群算法及其在TSP中的应用-百度文库 - 《互联网文档资源 (http://wenku.baidu.c)》 - 2012	0.6% (66) 是否引证: 否
20	基于自适应蚁群算法的旅行商问题的求解 黄志华; - 《嘉应学院学报》 - 2017-02-28	0.6% (66) 是否引证: 否
21	智能船舶交通管理系统关键技术的研究与应用 杨鑫(导师: 柳晓鸣) - 《大连海事大学博士论文》 - 2012-09-01	0.6% (66) 是否引证: 否
22	移动机器人自主导航技术研究综述 王仲民,刘继岩,岳宏 - 《天津职业技术师范学院学报》 - 2004-12-28	0.6% (61) 是否引证: 是
23	110kV输电线路自动巡检机器人系统的研究 周风余(导师: 吴爱国) - 《天津大学博士论文》 - 2008-04-01	0.4% (48) 是否引证: 否
24	改进的遗传算法求解旅行商问题 于莹莹;陈燕;李桃迎; - 《控制与决策》 - 2014-06-12 1	0.3% (33) 是否引证: 是
25	一种用于移动机器人室内定位与导航的二维码 郑睿;原魁;李园; - 《高技术通讯》 - 2008-04-25	0.3% (32) 是否引证: 是
26	《计算技术与自动化》2011年总目次索引 - 《计算技术与自动化》 - 2011-12-15	0.3% (31) 是否引证: 否

原文内容

一种用于高压室的巡检机器人设计Design of Inspection Robot for High-Voltage Room

2021 年 7 月

国内图书分类号: TP242 学校代码: 10079

国际图书分类号: 621.3 密级: 公开

专业硕士学位论文

一种用于高压室的巡检机器人设计

硕士研究生:

导师:

企业导师: □□□

申请学位: 工程硕士

专业领域: 电气工程培养方式: 全日制/在职

所在学院: 电气与工程学院

答辩日期: 2021 年 8 月

授予学位单位: 华北电力大学

Classified Index: TP242

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Professional Master's Degree

Design of Inspection Robot for High-Voltage Room

Candidate:

Supervisor:

Enterprise mentor:

Academic Degree Applied for: Master of of Engineering

Speciality: Electrical Engineering

Cultivation ways: Full-time/On-job

School:

School of

Electrical and Electronic Engineering

Date of Defence: August, 2021

Degree-Conferring-Institution: North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明: 此处所提交的硕士学位论文《一种用于高压室的巡检机器人

设计》, 是本人在导师指导下, 在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知, 论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体, 均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名: 日期: 年月日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《一种用于高压室的巡检机器人设计》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有, 本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定, 同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本, 允许论文被查阅和借阅, 学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校

用户提供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学, 可以采用影印、缩

印或其他复制手段保存论文, 可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于(请在以上相应方框内打“√”):

保密□, 在年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名: 日期: 年月日 导师签名: 日期: 年月日

摘要

电力系统高压室主要用于部署高压变电设备, 包含自动电阻柜、高压电器柜等设备。设备电压等级在 10kV 以上, 供电局工作人员需要周期性检查内部设备的运行状态。当设备出现异常时, 巡视人员的生命安全会受到很大威胁。

同时, 单调重复的巡检记录作业, 相对偏枯燥无趣。此外, 人工巡检的数据记录以纸面化为主, 后续还要人工录入电脑转为电子台账存储分析, 这些业务都会加大运维人员的工作量, 降低运维人员的工作便捷性。

使用巡检机器人代替运维人员进行高压室的巡检工作, 借此方式提高巡检人员的工作安全系数, 同时提高巡检工作的数字化程度和智能化程度。即, 由巡检机器人按照设定任务, 周期性自动完成抄表、红外测温、局放测量等巡检作业, 并且自动保存巡检数据, 在机器人出现异常可自动给出具体告警信息。

本文立足于工程现场实际情况, 结合当前人工智能在机器人行业的前沿技术, 提出了一种用于高压室巡检的智能机器人设计方案, 从无到有系统性地描述了巡检类机器人的设计思想和设计流程, 并对巡检机器人核心软件算法进行了合理的优化设计, 促使技术理论更好地实现工程化落地。本文在严格遵循实用化和模块化的设计原则基础上, 依照硬件类产品的合理设计顺序, 从需求分析、硬件方案、软件方案和使用方案四部分, 较完整的给出了一种使用激光雷达导航定位方案的室内巡检机器人设计方案。其中, 需求分析部分, 立足于运维人员关注的巡检作业能力, 探讨了巡检机器人必备的可见光、测温、局放等巡检能力, 分析了自主移动平台必备的运动控制、导航定位等核心能力。硬件方案部分, 围绕机器人运动和采集必备能力, 较详细地探讨了运动电机、激光雷达、采集传感器等主要硬件的选型要素和场景侧重点。软件方案部分, 出于研发开发量和维护扩展性

考虑，本设计采用 ROS 系统和 Ubuntu 系统组成开发框架，着重探讨了软件地图构建、导航定位等算法的选择依据和算法特性，分析了各算法的缺点，提出了合理的优化思路，并设计了算法优化方案，可以有效缓解理论算法在工程落地阶段的不足。随后，完整地设计了节点型系统的主要业务实现和状态告警内容。在机器人现场使用方案部分，本文合理设计了以调试人员为对象的机器人部署方案，设计了以运维人员为对象的运行方案，设计了以维保人员为对象的维护方案，基本完整地覆盖了巡检机器人从出厂到停止使用的过程。综上所述，本文系统性地完成了一种用于高压室巡检的智能机器人方案设计，从运维人员、研发人员、调试人员和维护人员角度认真思考了机器人的合理设计蓝图，该设计方案可以有效在真实高压室场景中部署使用，

— II —

能够自动化完成高压室场景的常规巡检业务，可以极大降低运维人员的工作强度和危险性，能够提升运维工作的自动化和数字化水平，为电力行业的安全稳定生产保驾护航。同时，本方案对工业类机器人产品的设计具有重要参考意义。

关键词：巡检机器人；导航定位；传感器；人工智能

III

Abstract

High-voltage room of power system is mainly used to deploy high-voltage substation equipment, including automatic resistance cabinet, high-voltage electrical cabinet and other equipments. When the voltage level of the equipment is above 10kV, the staff of the power supply company need to periodically check the operation status of the equipment. When the equipment is abnormal, the life safety of inspectors will be greatly threatened. At the same time, monotonous and repetitive inspection record operation is dry and boring. In addition, the data records of manual inspection are mainly paper-based, and the subsequent manual entry into the computer is converted to electronic account storage and analysis, which will increase the workload of operation and maintenance personnel and reduce the convenience of operation and maintenance personnel.

The inspection robot is used to replace the inspection staff in the high-voltage room, so as to improve the safety factor of the inspection staff, and improve the digital and intelligent degree of the inspection work. That is, according to the set task, the inspection robot can automatically complete the inspection work such as meter reading, infrared temperature measurement, partial discharge measurement periodically, and automatically save the inspection data. When the robot is abnormal, it can automatically give specific alarm information.

Based on the actual situation of the project site, combined with the current cutting-edge technology of artificial intelligence in the robot industry, this paper puts forward a design scheme of intelligent robot for the high-voltage room inspection, systematically describes the design idea and design process of inspection robot from scratch, and reasonably optimizes the core software algorithm of inspection robot, promote the theory of technology to achieve better engineering landing. On the basis of strictly following the practical and modular design principles, according to the reasonable design sequence of hardware products, this paper gives a complete design scheme of indoor inspection robot using lidar navigation and positioning scheme from four parts: demand analysis, hardware scheme, software scheme and use scheme. Among them, the demand analysis part, based on the inspection ability of the operation and maintenance personnel,

IV

discusses the inspection ability of the inspection robot, such as visible picture, temperature measurement, partial discharge, and analyzes the core ability of the autonomous mobile platform, such as motion control, navigation and positioning. In the part of hardware scheme, around the necessary ability of robot motion and acquisition, the selection elements and scene emphasis of main hardware such as motion motor, lidar and acquisition sensor are discussed in detail. In the part of software scheme, considering the amount of research and development and the expansibility of maintenance, this design uses ROS system and Ubuntu system to form the development framework, focuses on the selection basis and algorithm characteristics of software map construction, navigation and location algorithms, and puts forward reasonable optimization ideas for the shortcomings of each algorithm, and designs the algorithm optimization scheme. It can effectively alleviate the shortcomings of the theoretical algorithm in the engineering landing stage. Then, the main business implementation and status alarm content of the node system are designed. In the part of robot field use scheme, this paper reasonably designs the robot deployment scheme with debugging personnel as the object, designs the operation scheme with operation and maintenance personnel as the object, and designs the maintenance scheme with maintenance personnel as the

object, which basically covers the process of inspection robot from leaving factory to stopping using. To sum up, this paper systematically completed the design of an intelligent robot for high-voltage room inspection. From the perspective of operation and maintenance personnel, R & D personnel, debugging personnel and maintenance personnel, the reasonable design blueprint of the robot was carefully considered. The design scheme can be effectively deployed in the real high-voltage room scene, and can automatically complete the routine inspection business of the high-voltage room scene, It can greatly reduce the work intensity and risk of inspection staff, improve the automation and digital level of inspection work, and escort the safe and stable production of the power industry. At the same time, this scheme has important reference significance for the design of industrial robot products.

Keywords:Inspection robot; navigation and localization; sensor; artificial intelligence

V
目录
摘要

..... I	
ABSTRACT	
..... III	
第 1 章绪论	
..... 1	
1.1. 课题背景及研究的目的和意义..... 1	1
1.2. 巡检机器人行业相关技术研究现状..... 2	2
1.2.1. 室内机器人实时定位技术硬件方案..... 2	2
1.2.2. 室内机器人实时定位技术激光雷达定位算法..... 3	3
1.2.3. 室内机器人路径规划算法..... 4	4
1.2.4. 室内机器人速度计算算法..... 5	5
1.3. 主要涉及内容和论文框架..... 6	6
第 2 章机器人功能需求分析	
..... 7	
2.1. 移动功能需求分析	
..... 7	
2.2. 导航定位功能需求分析..... 8	8
2.3. 续航功能需求分析	
..... 9	
2.4. 无线通讯功能需求分析..... 10	10
2.5. 数据采集功能需求分析..... 11	11
2.6. 系统调控功能需求分析..... 12	12
2.7. 运行防护功能需求分析..... 13	13
2.8. 本章小结	
..... 14	
第 3 章机器人硬件方案设计	
..... 15	
3.1. 机器人模块划分	
..... 15	
3.2. 底盘模块设计	
..... 16	
3.2.1. 移动功能设计方案..... 16	16
3.2.2. 导航定位功能设计方案..... 18	18
3.2.3. 续航功能设计方案..... 20	20
3.2.4. 无线通讯功能设计方案..... 20	20
3.2.5. 控制系统设计方案..... 21	21
3.3. 搭载物模块设计	
..... 21	
3.3.1. 数据采集功能设计方案..... 21	21
3.3.2. 传感器位姿调控功能设计方案..... 22	22
3.4. 机器人主要硬件设备选型..... 23	23
3.4.1. 底盘电机选型.....	

VI

3.4.2.	控制单元选型	24
3.4.3.	局放探测器选型	26
3.4.4.	红外热像仪选型	26
3.4.5.	可见光摄像机选型	28
3.4.6.	无线网桥选型	28
3.4.7.	激光雷达选型	29
3.4.8.	交换机选型	31
3.4.9.	电池选型	32
3.4.10.	开关电源选型	33
3.5.	机器人整机供电方案设计	33
3.6.	机器人整机通信方案设计	34
3.7.	本章小结	35
第 4 章 机器人软件系统设计		36
4.1.	机器人软件系统框架搭建	36
4.1.1.	机器人软件系统选择	37
4.1.2.	软件系统运行环境选择	37
4.1.3.	编程语言的选择	38
4.1.4.	软件系统开发环境选择	38
4.2.	建图算法选择及优化	39
4.2.1.	建图算法选择	39
4.2.2.	建图算法缺点分析	41
4.2.3.	建图算法优化完善设计	41
4.3.	激光定位算法选择及优化	43
4.3.1.	激光定位算法选择	43
4.3.2.	激光定位算法缺点分析	44
4.3.3.	定位算法优化完善设计	45
4.4.	路径规划算法选择及优化	47
4.4.1.	路径规划算法选择	47
4.4.2.	路径规划算法缺点分析	47
4.4.3.	路径规划算法优化完善设计	48
4.5.	速度计算算法选择及优化	49
4.5.1.	速度计算算法选择	49
4.5.2.	速度计算算法缺点分析	50
4.5.3.	速度计算算法优化完善设计	
VII		
4.6.	机器人软件系统主要服务模块设计	51
4.6.1.	底盘驱动程序	51
4.6.2.	激光雷达通讯程序	53
4.6.3.	电池管理程序	54
4.6.4.	导航定位程序	55
4.6.5.	云台通讯程序	55
4.6.6.	辅控板卡通讯程序	56
4.6.7.	可见光摄像机通讯程序	56
4.6.8.	局放传感器通讯程序	57
4.6.9.	巡检服务程序	58
4.7.	本章小结	60
第 5 章 机器人现场使用方案设计		61
5.1.	机器人部署方案设计	61
5.1.1.	运行环境地图构建	62
5.1.2.	巡检内容点表制作	63
5.1.3.	运行路径设置	64
5.1.4.	巡检内容标定调试	65
5.2.	机器人运行方案设计	65
5.2.1.	手动控制模式	65
5.2.2.	自动巡检模式	65
5.2.3.	停机模式	65
5.3.	机器人维护方案设计	66
5.3.1.	电池电量检查	66

5.3.2. 轮胎磨损检查	66
5.3.3. 云台运动精度检查	66
5.3.4. 红外热像仪测温精度检查	67
5.3.5. 局放探测器探测能力检查	69
5.4. 本章小结	69
第 6 章结论与展望	70
参考文献	72
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	75
致谢	错误!未定义书签。
作者简介	错误!未定义书签。
第1章绪论	
1.1. 课题背景及研究的目的和意义	
电力系统高压室主要用于部署高压变电设备, 承担高压变电相关职能, 是电力系统送变电环节的一个重要组成部分。高压室内部包含自动电阻柜、高压电器柜、硅整流装置柜、通风机组、控制柜等设备, 供电局工作人员需要周期性检查内部设备的运行状态, 保障安全生产。高压室内部的设备电压等级在 10kV 以上, 设备出现异常时, 巡视人员的生命安全会受到很大威胁。电力行业在尝试使用智能机器人代替巡检人员进行高压室的巡检工作, 希望借此方式提高巡检人员的工作安全系数, 同时提高巡检工作的数字化程度和智能化程度。	
图 1.1 高压配电室现场环境示例 (图源互联网)	
智能巡检机器人在电力行业的应用实践, 其理论意义在于, 为机器人自主在大场景里面自主执行预定动作的研究提供了落地机会, 根据工程现场的实施情况指导理论的发展和技术的进步。其学术价值在于, 智能巡检机器人的研发和工程部署, 是当今时代智能机器人研究的重要组成部分, 需要多个学科的研	
2 发人员参与进来推动技术的发展, 借此平台为国家培养智能机器人行业的专业人才, 促进智能机器人在其他行业的推广和应用。其工程实用价值在于, 其一	
智能巡检机器人确实能够处理大量单调重复的巡检工作, 能降低一线运维人员的工作强度。其二智能巡检机器人配备的后台系统能够提高巡检工作的数据化程度和智能化程度。其三当设备运行出现异常时, 可以使用智能巡检机器人进入危险区域进行数据采集、状态监视等作业, 帮助运检人员排查问题, 保证人员的人身安全。其社会效益和经济效益在于, 智能巡检机器人对安全生产的支撑, 直接推动电网的稳定运行可靠性提升。电网的稳定是国家和社会正常运作的基石, 关乎工业、医疗和民生等重要领域。	
1.2. 巡检机器人行业相关技术研究现状	
近年来, 电力巡检机器人的应用逐步推广, 呈现出广泛探索多点开花的局面。周凤余等人进行了 110kV 输电线路自动巡检机器人系统的研究[1], 在自主控制方式下, 采用分层递阶的控制结构, 通过合理的任务分配及协调, 实现了机器人自主爬行, 自主越障; 王晨等人探索了一种基于 Zigbee 技术的电力巡检机器人定位系统[2], 该系统通过在变电站内灵活布置的无线传感器网络, 实现对整个变电站区域内的完全覆盖, 通过巡检移动机器人代替人员进行巡视检查; 李向东等人进行了智能巡检机器人的体系结构分析与设计[3], 介绍了基于模块设计思想的巡检机器人软硬件体系结构, 给出了基于该体系结构的车体运动学建模和避障算法。通过机器人的现场运行验证了该体系结构的合理性以及可行性;	
王建元等人扩展了一种基于图论的电力巡检机器人智能寻迹方案[4], 将实际检测现场以图的形式转化为电子地图信息, 建立节点关联矩阵, 利用基于传递闭包理论的路径搜索算法对各检测点关联信息进行关联路径搜索。	
巡检机器人相关技术, 包括自主导航定位、传感器、控制单元、通讯单元、执行机构和电源管理系统六大部分, 也处于高速发展阶段。	
1.2.1. 室内机器人实时定位技术	
硬件方案室内机器人定位技术硬件方案, 按照是否需要対使用场景进行物理改造, 可以分为环境改造方式和自适应方式两大类。	
外部环境改造方式的定位技术分支, 以轨道式为主要代表, 其他主要成员有视觉巡线式、二维码式、无线载波通信式。何健等人进行了室内巡查挂轨机器人轨线智能跟踪方法的研究[5], 分析了智能跟踪方法的工作流程, 结果表明, 智能跟踪方法可以有效缩短消耗成本、降低检测误差、提高工作效率、减少人	
3 工劳动强度, 该方法对于电力系统正常工作运行有积极的促进作用; 王金波等人进行了自主移动机器人巡线控制的研究[6], 在使用灰度传感器采集地面轨迹信息的同时, 引入角度传感器对行进方向的角度信息进行采集, 由此克服了传统巡线控制中单一传感器采集信息不全的缺点; 郑睿等人提出了一种用于移动机器人室内定位与导航的二维码[7], 该二维码以排列成矩阵的图案表达信息, 其基于形状不变量理论设计的外轮廓, 可保证对其进行提取时的鲁棒性, 其内部单元模块数量可以根据需要进行选择, 从而可以为移动机器人进行目标识别与定位提供足够的信息; 杨秀萍等人开发的基于无线传感器网络的移动机器人定位导航系统[8], 通过测算移动机器人和信标节点之间的无线电接收信号强度(RSSI)	
进而估计出它们之间的距离, 采用自适应的扩展卡尔曼滤波算法对 RSSI 数据处理得到机器人的当前位置、速度、加速度等状态信息。	
自适应方式分为激光雷达式和机器视觉式。肖鹏等人进行了变电站智能巡检机器人激光导航系统研究[9], 将激光定位技术应用于巡检机器人导航, 设计了巡检机器人激光导航原型系统, 并在室外环境下对其进行了实验测试, 实验结果表明, 巡检机器人运行平稳, 具有较高的导航控制精度。厉茂海等人进行了基于单目视觉的移动机器人全局定位相关的研究[10], 提出在基于单目视觉创建的环境地图中实现移动机器人全局定位。基于 KD 树的最近邻搜索实现特征匹配。应用尺度不变特征变换(SIFT)方	

法提取特征，并用多维向量描述，保证了对图像光强变化、尺度缩放、三维视角和噪声具有不变性。

上述定位方式中，最早批量投用的是轨道机器人，优点是技术门槛低，缺点是轨道铺设繁琐，改造工作量大。轨道机逐步被激光雷达定位机器人取代，

激光定位的优点是无需对室内环境进行改造，缺点是对环境结构化变动的容忍性不如轨道机。电力巡检机器人定位方案发展的方向，是以多线激光为主的多传感器数据融合定位方案，该方案对环境的适应能力较好，能够为机器人本体提供立体防护，也能保证较好的定位精度，缺点是多线激光定位算法运算量较大，对主控单元和要求较高。

1.2.2. 室内机器人实时定位技术激光雷达定位算法激光定位方案的硬件部分主要包括激光雷达和陀螺仪，软件算法的选择则有多种。激光雷达定位算法，根据时间顺序可以分为地图构建算法和实时定位算法两部分。地图构建是指机器人在陌生场景中进行必要的环境数据收集，并构建出可用于后续实时定位参考的地图文件。实时定位是指机器人在已经进行过地图数据采集的场景中，结合实时激光和陀螺仪等传感器数据，参考已构建的地图数据，推算出自身的实时位姿。 4

在地图构建领域，Wang Peng 等人针对 Gmapping 的闭环检测进行了优化

[11]，提出了一种基于 Kalman 滤波的低运算量、高分辨率激光扫描仪的闭环校正算法，对激光扫描仪在日常生活中的应用具有积极的促进作用；Meyer J 等人探索了 Hector SLAM 在退化的城市环境中进行自我定位和建图[12]，相关模块均已成功应用并在 RoboCup 救援比赛中进行了初步测试；Xu B 等人从点云匹配和闭环检测两个方面分析了 Cartographer 激光 SLAM 算法[13]，在三维可视化工具 RViz 中展示了从数据采集、数据处理、环境地图生成的完整流程，实现了室内三维空间重构的算法。

在实时定位领域，Zhang B 等人提出了一种基于自适应蒙特卡罗定位

(AMCL)的多机器人占用网格地图对齐方法[14]，首先利用记录的运动序列和测量信息将一个机器人重新定位到另一个机器人生成的地图中，根据定位结果，

计算出两幅不同地图之间的变换矩阵，并以此矩阵作为 ICP 处理的初始相对位姿信息，得到精确的对准结果，通过实验验证了该方法的有效性；Hanten R 等人对于现实场景中的移动机器人导航场景[15]，提出了基于自适应蒙特卡罗定位

(AMCL)大规模室内导航，使用基于矢量的 CAD 平面图，直接利用这些平面图的线段数据，生成了可见性查找表，减少了用于姿态估计的线段数量，证明了所提出的方法在杂乱无章的环境中表现良好，在内存利用率和精度方面都有较大的提高。

就地图构建算法来看，Gmapping 算法运算量较小，对硬件的要求较低，地图质量较稳定；Hector SLAM 算法运算量较小，对硬件的要求很低，地图质量不稳定；Cartographer 算法运算量较大，对硬件的要求较高，地图精度较稳定。

在室内应用场景内，当前处于 Gmapping 与 Cartographer 并存的阶段。因Gmapping 运算量小的优势存在，会继续成为室内激光定位方案的主选建图算法。

就实时定位算法来看，AMCL 是基于统计学的算法，配合粒子滤波算法进行最优位姿推算，运算量小，但是使用的地图是二位全局地图，在地图面积较大时局部回环误差也较大。Cartographer 引入了区域子图的概念，有效解决了大场景下局部回环误差难以消除的棘手问题，使用非线性优化算法进行局部位姿推算，使用图优化算法进行全局位姿调优，在室内室外的实践效果都比较好，

也因为其框架较复杂，运算量较大，其对硬件的要求较高。

1.2.3. 室内机器人路径规划算法机器人路径规划算法是智能巡检机器人设计的重要组成部分。

王仲民等人对移动机器人自主导航技术的研究情况进行了介绍[16]，对路径 5

规划技术进行了深入研究,对人工智能以及多传感器信息融合技术在移动机器人导航中的应用进行了论述,并对移动机器人自主导航技术的发展趋势进行了展望；陈良良等人探索了室内移动机器人自主导航与抓取规划[17]，介绍了移动机器人 SLAM 技术,通过基于粒子滤波器的 FastSLAM 技术实现了移动平台的自动建图,通过 A*算法实现了移动平台的路径规划,并在软件平台上得到实现；刘浩等人探索了 A*算法在矢量地图最优路径搜索中的应用[18]，将矢量地图本身节点的数据结构和 A*算法需搜索的节点数据结构在索引时相互联系,在计算时又相互分离的策略,提高了 A*算法的执行效率；王滨等人提出了一种基于启发式的快速扩展随机树路径规划算法[19]，该算法在快速扩展随机树算法的基础上，

引入了启发式估价函数,使扩展随机树有利于朝目标点方向进行生长，提高了复杂环境下机器人路径规划的效率,保证了规划的路径接近于最短路径,对同一任务的规划具有一定的可重复性；黎夏等人提出了一种基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[20]，通过神经网络、元胞自动机和 GIS 相结合来进行土地利用的动态模拟，并利用多时相的遥感分类图像来训练神经网络，能十分方便地确定模型参数和模型结构，消除常规模拟方法所带来的弊端；赵艳丽等人描述了实际路网最短路径算法优化与实现[21]，研究了 Dijkstra 算法在数据存储方面简单而必要的优化,重点对基于矩形搜索与双向搜索的实际路网最短路径优化算法进行研究并仿真验证,达到最大程度降低最短路径查询时间,降低最短路径算法冗余度和复杂度的目标；高尚等人提出了一种求解旅行商问题的混合粒子群优化算法[22]，与模拟退火算法、标准遗传算法进行比较,24 种混合粒子群算法的效果都比较好,其中交叉策略 D 和变异策略 F 的混合粒子群算法的效果最好,而且简单有效，对于目前仍没有较好解法的组合优化问题,通过此算法修改很容易解决；于莹莹等人提出了一种改进的遗传算法求解旅行商问题

[23]，在传统遗传算法的基础上,引入贪婪算法进行种群初始化,从遗传进化代数和个体适应函数值两个方面实现遗传参数自适应调节,在加快寻优速度的同时防止寻优陷入局部最优，采用基于贪婪方法的启发式交叉算子优化交叉结果，对交叉前后的种群分别实施精英个体保留策略,保证最优基因结构得以延续速度计算。

1.2.4. 室内机器人速度计算算法机器人速度计算方案是智能巡检机器人底盘设计的基础。Fox D 等人提出的动态窗口防碰撞速度计算策略[24]，是为装有同步驱动装置的移动机器人设计，直接从机器人的运动动力学推导而来，在人口稠密和动态环境中，动态窗口方法以高达 95 厘米/秒的速度安全地控制了移动机器人安全穿越障碍物，到 6

达目标位置；匡建辉等人基于模糊 PD 控制的四轮驱动全向移动机器人速度补偿控制器研究[25]，设计一种速度补偿控制器,基于模糊控制与 PD 控制理论，能够在各种误差 e 与误差变化量 Δe 的情况下,对机器人四个轮子的速度进行有效补偿。

去除本人文献复制比：2.5%(217)		文字复制比：2.5%(217)	疑似剽窃观点：(0)
1	传感器和检测仪表发展的趋势 编译 四川 朱勋斌 - 《电子报》- 2012-08-12	1.8% (152)	是否引证：否
2	基于无线传感网络的火警系统设计 唐杰;边鹏飞;何志琴; - 《科技视界》- 2015-08-05	1.7% (149)	是否引证：否
3	基于马氏距离-数据融合的水电机组运行研究 谭丕成;罗正亮;潘虹;张雁靖; - 《江西水利科技》- 2020-12-15	1.7% (149)	是否引证：否
4	基于LabVIEW和多传感器融合技术的数据中心温湿度监控系统 郑立君;刘桂礼; - 《传感器世界》- 2015-01-25	1.6% (137)	是否引证：否
5	基于ZigBee和数据融合技术的仓储环境无线监测系统及其故障精确定位技术的研究 刘玉宾; - 《信息与电脑(理论版)》- 2016-06-08	1.6% (137)	是否引证：否
6	基于Zigbee与数据融合技术的矿井环境监测系统 刘为云(导师：高颖) - 《烟台大学硕士论文》- 2014-03-01	1.6% (137)	是否引证：否
7	1306039-冯宇谦-养殖场信息采集系统设计与开发 冯宇谦 - 《学术论文联合比对库》- 2016-06-10	1.6% (137)	是否引证：否
8	基于多传感器信息融合技术的密闭空间环境监控系统研究和设计 商丽娟; - 《河南科技》- 2021-02-05	1.5% (134)	是否引证：否
9	传感器和检测仪表的现状和发展趋势 卞正岗; - 《自动化博览》- 2006-12-30	1.5% (134)	是否引证：否
10	浅谈传感器与检测仪表的发展动向 - 《自动化与仪表》- 2010-10-15	1.5% (134)	是否引证：否
11	传感器产业被国内外公认具有发展前途的高技术产业 - 《电子工业专用设备》- 2015-10-20	1.5% (134)	是否引证：否
12	海上风电大数据发展研究——以广东省海上风电大数据中心建设为例 裴爱国;何登富; - 《南方能源建设》- 2018-06-25	1.5% (134)	是否引证：否
13	铁路无人值班变配电所智能巡检系统的探讨 王志文; - 《山西建筑》- 2021-01-13	1.5% (134)	是否引证：否
14	变耦合系数时栅位移传感器研究 武亮(导师：彭东林) - 《重庆理工大学硕士论文》- 2011-04-02	1.5% (134)	是否引证：否
15	基于改进的WVD的旋转机械故障诊断研究 刘伟(导师：刘增力) - 《昆明理工大学硕士论文》- 2013-03-20	1.5% (134)	是否引证：否
16	基于MEMS运动传感器的姿态检测系统设计 杨磊(导师：王加俊) - 《苏州大学硕士论文》- 2015-12-01	1.5% (134)	是否引证：否
17	机电-公婷婷 - 《学术论文联合比对库》- 2014-04-17	1.5% (134)	是否引证：否
18	机电-陈婧 - 《学术论文联合比对库》- 2014-04-17	1.5% (134)	是否引证：否
19	测试信号第一次作业 黄秋雯 - 《学术论文联合比对库》- 2015-12-22	1.5% (134)	是否引证：否
20	SA14226395_刘贵聪_1 刘贵聪 - 《学术论文联合比对库》- 2016-08-26	1.5% (132)	是否引证：否
21	SA14226395_刘贵聪_2 刘贵聪 - 《学术论文联合比对库》- 2016-09-20	1.5% (129)	是否引证：否
22	SA14226395刘贵聪 刘贵聪 - 《学术论文联合比对库》- 2017-02-17	1.5% (129)	是否引证：否
23	基于Zigbee与数据融合技术的矿井环境监测系统 刘为云 - 《学术论文联合比对库》- 2014-03-25	1.5% (129)	是否引证：否
24	基于物联网的农产品物流仓储管理系统 王维龙 - 《学术论文联合比对库》- 2014-10-30	1.5% (129)	是否引证：否
25	S_张凯_电气工程_基于无线传感网络的智能家居系统的研究与应用 张凯 - 《学术论文联合比对库》- 2013-11-15	1.4% (124)	是否引证：否
26	浅议建立检验仪器设备防护等级的必要 宇春玲; - 《现代科学仪器》- 2013-08-15	0.7% (62)	是否引证：否

通过在 Madab-Simulink 环境下的仿真实验表明, 在使用速度补偿控制器后, 机器人对线速度及角速度的跟随性能明显提高, 改善了轨迹跟随的精度; 梁靓等人对机器人的差分方向控制与实现进行了研究[26], 运用差分方向控制算法导出了运动于平面区域的机器人的方位信息, 并将其用于机器人的路径规划问题, 给出了二轮驱动机器人的定位与行走控制的应用实例, 该机器人的定位和行走算法简洁, 受外界环境因素的影响小, 具有灵活、抗干扰能力强等特点。

1.3. 主要涉及内容和论文框架本文旨在设计一种用于高压室的智能巡检机器人, 探索使用机器人替代运维人员完成在危险环境中的日常作业。

本文共分为六个章节。

第 1 章介绍课题背景和相关技术研究现状, 以及论文框架。

第 2 章介绍高压室场景下的巡检机器人功能需求分析。

第 3 章介绍机器人硬件方案设计, 包含模块划分和硬件选型。

第 4 章介绍机器人软件方案设计, 包含导航定位模块和软件系统框架。

第 5 章介绍机器人使用方案设计, 包括机器人使用流程和运行方式内容。

第 6 章是结论部分, 对本文提出的智能巡检机器人设计方案进行分析和总结。 7

第2章机器人功能需求分析

本章主要讨论高压室巡检机器人, 要完成设备运行状态的巡检工作, 所必备的功能需求, 以及相关的关键参数指标。

2.1. 移动功能需求分析高压室的面积通常在 200 平方米以内, 里面设备密集, 机器人要尽可能多地巡检高压室的设备, 需要能够在高压室运动, 具体表现为可以前进、后退、

原地旋转、停止四个动作。

巡检机器人的主流运动方式有轨道式和地面移动式, 轨道式部署工程量大,

变更不灵活, 地面移动式部署工程量远低于轨道式, 变更灵活, 因此选用地面移动式方案。

机器人运动速度较高会增加防护工作的难度, 权衡巡检速度和安全性, 选择 $0.4 \sim 0.7 \text{ m/s}$ 的巡检移动速度范围, 机器人最大移动速度达到 1 m/s 即可。

高压室的地面情况因施工质量而已, 部分路边不平整、有轻微坡度, 设计时要考虑机器人对不平整路况的适应能力, 从实际考察的情况出发, 机器人应具备 20 mm 的越障能力, 5° 的爬坡能力。

图 2.1 高压室地面电缆沟盖板间高度差示例图 8

高压室设计偏紧凑, 内部道路宽度通常是 100 cm , 个别狭窄道路宽度在

70 cm 左右。通过限制机器人自身的尺寸, 增大机器人巡检覆盖比例, 提高机器

人的实用性。要在 70 cm 宽的道路稳定移动, 机器人距离设备要预留 10 cm 的安全间隙, 机器人的自身宽度需要控制在 50 cm 以内。

表 2.1 高压室巡检机器人底盘性能参数表参数名称数值参数释义整机重量 $<40 \text{ kg}$ 重量轻一些, 方便运输 (楼梯、挡鼠板等)

整机长度 600 mm 车窄, 长度适当大一些, 提高底盘稳定性整机宽度 400 mm 宽度小, 适应狭窄过道整机高度 1500 mm 柜体 2200 mm , 车体高一些保证抓图质量轮胎半径 75 mm 轮胎大一些, 提高越障能力越障能力 20 mm 电缆沟盖板的衔接位置不平整, 要能通过爬坡能力 $>5^\circ$ 电缆沟盖板平整度不好, 要适应一定的坡度旋转半径 $<400 \text{ mm}$ 狭窄巡检通道路口, 要能通过运动速度 $>0.5 \text{ m/s}$ 高压室面积不大, 运动速度不需要很高

2.2. 导航定位功能需求分析机器人要自主巡检高压室的设备, 需要实时明确自身位姿、目标位姿, 并能够根据自身位姿和目标位姿规划运动路径, 计算实时速度, 同时在运动中实时保护自身。

导航定位功能包括实时定位、路径规划、速度计算、实时防护四部分的内容。

本方案选用激光实时地图构建技术, 实现地图构建和实时定位功能。

路径规划功能, 经典的算法有蚁群算法、遗传算法等。经典算法一般用于求解复杂路径拓扑的最短路径, 考虑到高压室内部路径拓扑复杂度很低, 使用简单的遍历搜索方法即可满足实际需求。

实时速度计算, 这部分的功能逻辑清晰, 可根据机器人的运动特性自行设计速度计算公式。

机器人运动中的保护逻辑, 应当围绕可能出现的损坏状况, 针对性地添加相关传感器, 尽可能全面立体地保护机器人及巡检设备。 9

表 2.2 高压室巡检机器人定位性能参数表参数名称数值参数释义最大建图面积 $>900 \text{ m}^2$ 偶尔会遇到较大的场景激光探测距离 $>30 \text{ m}$ 偶尔会遇到狭长布局的场景激光探测角度 360° 偶尔会遇到狭长对称布局的场景激光测量精度 $\pm 2 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ 更好, 国产设备当前做不到激光刷新频率 $>10 \text{ Hz}$ 机器人按 1 m/s 运动, 定位滞后 10 cm 以内可接受激光扫描线束 1 室内环境, 单线激光足够定位计算周期 $<100 \text{ ms}$ 支撑 10 Hz 的位姿发布速率定位平移误差 $<\pm 3 \text{ cm}$ 激光精度是 $\pm 2 \text{ cm}$, 定位做到 $\pm 3 \text{ cm}$ 逼近极限了定位角度误差 $<\pm 0.5^\circ$ CPU 运算量、底盘执行精度、巡检需求的权衡

2.3. 续航功能需求分析机器人要在无人监护的情况下长期运行, 必须具备续航功能。

室内挂轨巡检机器人通常在轨道铺设动力线, 机器人运动过程中与动力线保持接触状态, 实时供电, 从而实现能源的长期供应。这种模式思路清晰, 降低了机器人本身硬件设计的复杂度, 部署时铺设轨道的同时铺设动力线, 增加的工程量占比不大, 很适合室内挂轨巡检机器人。

就地面移动式机器人而言, 运动轨迹可灵活调整, 实时动力线供电的模式不适用地面移动的机器人。考虑使用蓄电池续航方案, 即机器人携带容量充足的动力电池组, 巡检过程中由蓄电池提供能源, 能源不足时自主进行能源补给,

从而实现续航功能。

蓄电池方案需要对电池进行充电, 机器人需要配合充电桩一起使用。充电桩的设计有两个方案, 方案一是接触式充电, 即

机器人与充电桩进行物理接触，

建立完整的电气回路，以此实现充电动作。方案二是非接触式充电，其中无线充电技术较稳定。

表 2.3 高压室巡检机器人充电方案对比表参数名称接触式方案非接触式方案充电有效率高较高硬件方案成本较高高防护设计难度低高充电速度高高硬件重量小大 10

接触式充电需要机器人与充电桩可靠接触，对导航定位算法、充电接触环节设计要求较高，充电电流可以比较大，充电效率高。非接触式充电放宽了对机器人导航定位精度的要求，充电电流偏小，充电效率低。

权衡上述两种方案，激光导航定位作为机器人的关键技术，其理论定位精度能够达到（30mm，30mm，0.5°），依据该精度设计充电桩，理论上可以实现机器人与充电桩的可靠接触。而非接触式方案设计复杂度高，充电电流小，

充电效率低，不予选用。

表 2.4 高压室巡检机器人续航性能参数表参数名称参数设计参数释义电池电压 24.0~28.8V 36V 是人体安全电压，首选 24V

续航时间 4h 400 m²的高压室，机器人一次全部巡检任务 2h 足够电池容量 24Ah 电芯容量随使用次数衰减，出厂容量按 8h 续航选择充电电流 15A 按 0.5C 的速度充电，充电 2h，工作 8h

电芯类型磷酸铁锂磷酸铁锂安全性比三元锂高，此场景侧重安全性放电温度 -20~55℃ 电芯行业常规场景放电温度范围充电方式接触充电无线充电对外壳材质有要求，不能使用金属外壳充电温度 0~40℃ 电芯行业常规场景充电温度范围整包重量 <5kg 电池包不宜过重

2.4. 无线通讯功能需求分析机器人投运后，机器人的实时运行状态信息，以及巡检数据内容，需要提供外部接口，便于用户监控和查阅。另一方面，在调试阶段，相比于网线连接，

通过无线接入机器人控制系统，也会大幅度增加调试工作的便捷性。因此，为机器人集成无线通讯设备，通过无线方式进行数据传输。

高压室属于室内场景，无线网络要尽量覆盖整个高压室，而且要求连接稳定。考虑机器人上搭载有相机类设备，视频流对带宽的占用较多，无线通信的带宽要满足高清视频流的实时预览。

考虑电力行业的安全性，设计时机器人的局域网络不接入互联网。如实际场景有连接互联网的需求，可通过添加无线网卡实现。 11

表 2.5 高压室巡检机器人无线通信性能参数表参数名称参数设计参数释义通信方式无线网络网络通信是主流方式频段选择 2.4G 室内有柜体遮挡，2.4 比 5G 抗遮挡性能好带宽要求 >20MHz 要满足 2 路实时视频流传输需求天线选择全向天线机器人移动作业，使用定向天线不合适天线功率 8dB 左右小场景，功率太大反而灯下黑协议选择通用协议调试期间笔记本电脑要连接，使用私有协议不方便

2.5. 数据采集功能需求分析数据采集功能是机器人的核心功能。机器人能够采集的数据类型种类数目、

数据准确度与机器人的实用价值密切相关。

数据采集单元由固定在巡检探测器装置上的各种传感器组成，传感器数据融合是将分布在不同位置的多个同类或不同类传感器所提供的局部数据资源加以综合，采用计算机技术对其进行分析，消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾，加以互补，降低其不确实性，获得被测对象的一致性解释与描述，

从而提高系统决策、规划、反应的速度和正确性，使系统获得更充分的信息。

高压室巡检内容包括：设备红外检测、超声波局部放电检测、开关刀闸状态识别、状态指示灯自动识别、压板位置识别、空开状态识别、旋钮开关位置识别、仪表数据读取、保护压板位置判断、六氟化硫气体检测、温湿度检测、

环境噪声检测。 12

图 2.2 高压室柜面表计示例图表 2.6 高压室巡检机器人采集设备性能参数表参数名称参数选择参数释义可见光相机 1920*1080 高清相机放大倍数 4 室内场景景深小，光学变倍 4 倍满足需求相机聚焦方式自动自动聚焦要成像质量好一些热像仪分辨率 384*288 够用就好，640 价格贵一倍，没必要测温精度 ±2℃或±2% 测温主要看历史变化趋势，对精度不敏感局放传感器超声波方式灵敏度高，容易受环境干扰，需要去环境噪声

2.6. 系统调控功能需求分析高压室巡检机器人作为一种高度定制的工业产品，需要备一套完善的软件系统。通过该系统，使用者可以完成对机器人的调试和控制。因该系统包含调试和控制两部分内容，本文称之为调控系统。

调控系统包含机器人软件系统和机器人调试运维系统工具集两部分。

机器人软件系统主要负责机器人硬件控制、巡检服务逻辑。该系统需要可靠运行，且具有良好的封装性和扩展性。硬件控制程序设计时，需要考虑硬件运行异常的应对策略，发生异常时应尽可能保护巡检设备安全和机器人本体安全。巡检服务逻辑设计时，应考虑程序运行异常的检查措施和补救策略，增强系统的稳健性和可靠性。 13

机器人调试运维系统工具集包含系统平台测试工具、功能模块测试工具、

地图构建编辑工具、巡检监视标注工具、模拟巡检拷机工具、数据备份还原工具、系统更新管理工具。工具集的设计，要遵循界面简洁、操作简便、逻辑严密的设计原则。

图 2.3 电力巡检机器人后台系统标准界面示例（图源中国电科院）

2.7. 运行防护功能需求分析高压室环境属于室内环境。高压室内部的各种柜体设备的防护等级，按行业规定一般是 IP40 以上。即防止大于 1.0mm 的固体外物侵入，防止直径或厚度大于 1.0mm 的工具、电线及类似的小型外物侵入而接触到电器内部的零件；

对水或湿气无特殊的防护。

高压室智能巡检机器人的 IP 防护级别设计，有两个可选的等级方案。

方案一是低配等级，即沿用保护柜体的防护级别，使用 IP40 作为整机的设计标准。因 IP40 的防尘要求低，防水要求也低，所以结构设计的工作量小，壳内电气部件的连接也相对简单，机器人的尺寸和重量相对易于控制，生产装配的工作量和复杂度都较低。该方案的缺点是因为弱化防护要求，机器人在长期运行过程中，受微尘、湿气的侵袭，电路板卡和接头位置出现老化的风险会加 14

剧，进而限制机器人整机的使用寿命。

方案二是高配等级，即沿用变电站智能巡检机器人的防护级别，使用 IP54

作为整机的设计标准。因 IP54 的防尘防水要求都较高，机器人内部的电气设备全部需要做密封设计，结构设计工作量会大幅度增大，壳内电气部件的连接及解耦设计复杂度会大幅度增加，机器人的尺寸和重量相对难以控制，生产装配的工作量和复杂度都较高。该方案的优点是因为强化了防护要求，机器人长期运行的硬件稳定性会显著提高，机器人整机运行的使用寿命也会明显增加。

结合工程实施落地和产品设计角度考虑，拟采用先使用 IP40 级别，快速推出可完成既定功能的高压室巡检机器人的设计。等样机投运后，密切观察机器人运行过程中的硬件老化情况，收集使用信息和内部积尘、锈蚀等情况，视实

际运行状态决定是否将防护级别提升到 IP54 以及什么时间适合提高到 IP54。

2.8. 本章小结本章立足于运维人员关注的巡检作业能力，围绕现场实际环境，讨论了巡检机器人执行巡检作业必须具备的基础功能，包括运动控制、导航定位、数据采集、以及各功能的细化要求。从高压室运维人员角度出发，智能巡检机器人的主要用途是日常巡检，一定程度上降低常规巡检工作的工作量，提高巡检工作的数据化程度。从国家电网管理人员角度出发，部署智能巡检机器人，有较大一部分原因是为在线监测和故障分析铺路。其投用意义在于，把设备日常工作的状态数据收集并记录下来，扩大设备运行的状态数据集，逐步积累出电力设备的运行状态大数据平台，为设备运行状态的评估和故障预判做数据储备。 15

第3章机器人硬件方案设计

巡检机器人的目标使用场景多是高危、工作内容高度重复、需实时监控环境。机器人硬件方案的设计工作，应密切围绕功能实用、运行可靠进行。

人工智能只有结合工程实际有效落地才能真正创造价值，因此巡检机器人的设计应遵循实用化的设计原则。考虑到巡检机器人作为移动巡检平台，其巡检能力集应该是跟随业务需求逐步完善扩充的，因此本设计遵循模块化的设计原则。

遵循实用化原则，在预研阶段，笔者通过对使用场景的深入分析，及与日常巡检人员的沟通来获取日常巡检工作的重点和难点，在此基础上权衡机器人需要具备的功能。当多个功能的设计要素出现冲突时，优先保证更实用的功能的完整有效实现。设计过程中，可通过选取复杂度低、成熟稳定的解决方案，

完善硬件发生异常时的应对措施设计，人性化设计降低生产调试难度，为机器人的可靠运行打下良好的硬件基础。

3.1. 机器人模块划分就巡检机器人产品而言，机器人的实际功能需要快速适配使用场景和客户需求。同时随着技术的进步，设计升级和硬件迭代也会高频发生。

模块化设计的优点在于，功能划分清晰，各模块各司其职，可独立设计、

升级、组装、调试，模块间耦合度低，提高机器人装机调试速度。缺点在于，

模块划分和接口设计工作需要精心设计，增加了设计工作量和设计难度，同时会增加车体的体积、重量。

结合产品本身的产品定位和模块化设计的优缺点，模块化适合硬件迭代频繁阶段的巡检机器人。待机器人功能和硬件稳定之后，则需要权衡其轻量化与组装调试便捷性，考虑是否继续沿用模块化思想。

机器人模块的划分，粒度太小，则模块数量会多，设计复杂度会增大很多，

所以粒度不宜过大。考虑不同使用场景下对机器人的要求，主要是底盘运动性能和被巡检设备的不同，可以将机器人划分为底盘模块和搭载物模块两部分。

底盘作为一个平台，设计时以适配使用场景路况为主。搭载物模块负责数据采集的职能，设计时以适配使用场景设备类型为主。 16

3.2. 底盘模块设计底盘模块设计包含移动功能、导航定位功能、续航功能、无线通讯功能，

同时包含部分机器人调控功能。

3.2.1. 移动功能设计方案巡检机器人的移动功能实现方案，经典方案有轮式和履带式，近年工业上也有足式巡检机器人和多旋翼巡检机器人出现。

轮式方案结构设计复杂度相对较低，控制系统成熟，经济成本相对较低，

功耗相对较低，维护相对简便，越障能力较差，适用于路况较好的场景，如水平度较好的水泥路面。

履带式方案结构设计复杂度高，控制系统也比较成熟，经济成本偏高，功耗相对较高，维护较繁琐，越障能力较强，适用于路况较差的场景，如凹凸不平、石子较多的路面。

图 3.1 履带机器人实物图示例（图源互联网）

足式巡检机器人设计复杂度高，工业使用较少，经济成本很高，功耗相对较高，维护相对简便，具有很好的越障能力，适用于路况较差且障碍物较多的场景。 17

图 3.2 国产四足机器人实物图示例（图源互联网）

多旋翼巡检机器人设计复杂度较高，自动巡检行业初有尝试，经济成本较高，续航能力较差，维护相对繁琐，可靠性和安全性不够高，适用于空间宽敞的环境。

图 3.3 无人机巡检工作照（图源互联网）

表 3.1 高压室巡检机器人底盘方案选型对比表条目名称履带方案轮式方案足式方案无人机方案越障能力中低中高爬坡能力中低中高执行精度低高中中整体重量大小中小搭载能力高高中低硬件成本中低高高续航能力中高低低 18

高压室巡检机器人的使用场景属于室内场景，路况相对平稳。从实用性和经济性考虑，轮式方案契合该场景，同时经济性较好，因此选用轮式方案。

轮式方案的常规选择有双驱动轮双从动轮、双驱动轮单从动轮、四驱定向、

四驱全向四种。

双驱动轮双从动轮，双驱动轮差速转弯，可以绕两驱动轮的连线中心原地旋转。双驱动轮单从动轮，双驱动轮差速转弯，可以绕两驱动轮的连线中心原地旋转，缺少一个从动轮，底盘平稳性会差，对路况要求较高。四驱定向，有较好的越障爬坡能力，但是原地旋转时轮子与地面的摩擦较大，旋转动作不平滑，轮胎磨损快。四驱全向，有较好的越障爬坡能力，可以朝任意方向移动，

运动灵活，设计偏复杂。

图 3.4 两驱底盘实物图示例（图源互联网）

室内环境对越障爬坡要求不高，双驱动轮可以满足驱动要求。四轮结构相对于三轮结构对地面的适应性更好，采用双驱动轮双从动轮方式。

双驱动轮双从动轮的方式，主要分为 2-2 布局和 1-2-1 布局。2-2 布局是两个驱动轮一排，两个从动轮一排，这种布局的优点是能够保证驱动轮与地面的接触比较稳定，缺点是车体会比较大，旋转半径相应增大，对狭窄区域的适应性不好。1-2-1 布局是一个从动轮在前面一排，两个驱动轮在中间一排，一个从动轮在中间一排，这种布局的优点是旋转半径可以设计的比较小，车体的旋转空间基本与车体的外轮廓一致，对狭窄区域有很好的适应性。

3.2.2. 导航定位功能设计方案室内无轨导航定位方案，目前主要有激光定位、泛视觉定位、标志物定位三种方案。19

激光定位方案，即机器人搭载激光雷达与陀螺仪等传感器，采集激光数据和陀螺仪数据，通过地图构建算法生成室内的点云地图。点云地图构建好之后，

机器人结合实时激光雷达数据，在点云地图中通过粒子滤波算法估算机器人的真实位姿，实现即时定位功能。其优点是对外部光照不敏感，在稳定环境下有较好的稳定性，定位精度较好，同时可以使用激光数据对机器人进行保护，缺点是激光雷达的价格较高，对环境结构化有一定要求。

图 3.5 激光 SLAM 构建的点云地图示例（图源互联网）

泛视觉定位方案，即机器人搭载相机，采集室内区域的图元信息和里程信息，从图元中提取特征图元，结合里程信息，构建特征图元库。实时定位时，

机器人采集环境图像信息，提取特征图元，与特征图元库作对比，估算自身位姿。视觉定位方案的优点是硬件成本较低，缺点是对外部光照敏感，定位精度相对激光要低，对环境的视觉特征有一定要求，不能有效区分高度相似区域。

标志物定位，明确指定标志物的特征，主要使用的特征是二维码和引导线，

属于视觉定位的范畴。标志物的策略是建立标志物在地图的坐标信息库，机器人相机实时采集视频流，提取关注特征，并查找该特征的位姿，根据机器人与可见特征的相对位姿，结合特征在地图中的绝对位姿，计算机器人当前在地图中的可能位姿。该方案的缺点是对环境的改造工作量较大，优点是机器人集群时平摊成本低，适合机器人集群使用，单台机器人不适用。

高压室的环境稳定，对安全性要求较高，使用激光定位策略，能够获得较高的定位精度，对光照的适应性较好，运行安全性多一层保障。 20

3.2.3. 续航功能设计方案续航功能方案包含储能电池、机器人充电接触装置、充电器。

具体地，储能电池负责在机器人充电时储存电能，在机器人巡检时释放电能；机器人充电接触装置负责在机器人和充电器之间建立稳定接触的电气回路。

充电器则作为功率变换装置，将市电转换成电压适配电池的直流电。

续航方案的重点在于接触装置的设计。激光定位精度为 cm 级，机器人与充电机构接触如果是刚性接触，则会造成设备损坏或车轮打滑，为保护硬件设备，提高接触可靠性，充电接触应选用柔性接触，且柔性可变形成应大于机器人导航定位精度。

接触装置分两部分，一部分安装在机器人上，一部分固定在室内指定区域。

因其是接触回路，且对充电电流有要求，所以接触部分宜采用导电金属，如铜。

铜属于常温固态金属，固态金属间的接触方式，分为面接触、线接触和点接触。面接触最稳定可靠，通流能力也最强，但是对结构设计、加工公差、机器人导航精度要求较高，实施难度较大。

指 标		
疑似剽窃文字表述		
<div>1. 传感器组成，传感器数据融合是将分布在不同位置的多个同类或不同类传感器所提供的局部数据资源加以综合，采用计算机技术对其进行分析，消除多传感器信息之间可能存在的冗余和矛盾，加以互补，降低其不确实性，获得被测对象的一致性解释与描述，从而提高系统决策、规划、反应的快速性和正确性，使系统获得更充分的信息。</div> <div>2. 防止大于 1.0mm 的固体外物侵入，防止直径或厚度大于 1.0mm 的工具、电线及类似的小型外物侵入而接触到电器内部的零件；</div>		
3. 022_第3部分		总字数：8781
相似文献列表		
去除本人文献复制比：0.3%(29)文字复制比：0.3%(29)疑似剽窃观点：(0)		
1	基于可变斜率补偿的LED驱动芯片的研究与设计 陈建华(导师：赵建明) - 《电子科技大学硕士学位论文》 - 2014-04-28	0.3% (29) 是否引证：否
原文内容		

线接触较稳定，具有移动的通流能力，

对导航定位精度要求低于面接触，设计较易实现。点接触不稳定性较大，通流能力也受限制，易于实现。权衡设计加工难度和使用可靠性，本方案选择线接触方式。

3.2.4. 无线通讯功能设计方案巡检机器人的无线通讯功能，常规方案是搭载无线网桥。无线网桥具有组网灵活、带宽较大、运行稳定、天线可调等优点。

无线网桥有三种运行模式，分别是接入点模式、站模式和中继模式。设置为接入点模式的无线网桥，可以与多个设置为站

模式的无线网桥建立连接。作为站模式的无线网桥，只能与指定的接入点模式网桥建立连接。中继模式常用于远距离直线通讯存在遮挡的场景，作为信号中继设备使用。

巡检机器人作为无线局域网的一个重要节点，是巡检机器人系统的数据中心和枢纽，因此将机器人上搭载的无线网桥设置为接入点模式。其他设备如调试笔记本，可以通过搜索机器人无线网桥构建的无线网络接入到机器人系统内网。

无线网桥按照工作频率可分为 2.4G 网桥和 5.8G 网桥。2.4G 网桥穿透能力和绕射能力要优于 5.8G 网桥，抗干扰能力和带宽要弱于 5.8G 网桥。高压室的设备互相遮挡，2.4G 的带宽可以满足两路高清视频流的需要，因此选用绕射能力较好的 2.4G 网桥。 21

无线网桥的天线，按发射覆盖区域可分为全向天线和定向天线。全向天线多用于短距离无线覆盖场景，定向天线多用于远距离点对点传输场景。高压室属于小范围无线覆盖，因此选用全向天线。天线的发射功率，以覆盖室内场景最长边的 1.2 倍为宜，在保证稳定覆盖的同时，降低天线功耗，节省电池能源。

3.2.5. 控制系统设计方案机器人的控制单元，需要具有运算、存储、通讯功能。考虑到机器人系统开发的便捷性和扩展性，选用工控机作为机器人的控制单元。

工控机根据散热方式可分为有风扇工控机和无风扇工控机。有风扇的工控机使用风扇营造空气对流，借此降低 CPU 温度。无风扇工控机常用散热片以热传导的方式散热。CPU 的温度越高，其计算速度会明显下降，同时运行稳定性越低，容易出现系统崩溃故障，甚至出现硬件烧损情况。本着简约可靠的设计原则，本方案选用无风扇工控机，通过接触传导将 CPU 的热量传递到车架等金属上，避免因风扇故障引起的系列问题。

工控机按照封装程度可分为工业母板和带外壳工控机。工业母板即没有外壳，整个电路板裸露，大部分接口是排针形式，只有少数接口转换为常规接口

（如 USB 接口、COM 口），部分工业母板的系统开关也是排针形式。工业母板空间占用小，如要使用板载排针类接口，需自行设计扩展板。带外壳工控机即有设计好的外壳，外壳上引出了部分常规接口，以及工控机开关及指示灯。

出于机器人体积重量以及后续硬件设备扩展便捷性考虑，选用工业母板型工控机，降低工控机的空间占用，便于结构设计，同时具有较好的扩展性和经济性。

工业母板提供内存条插槽和硬盘插槽，便于用户自行搭建整机。考虑机器人是运动物体，长期处于运动状态，机械硬盘对振动的适应性较差，同时固态硬盘因设计方式的固有优势，对振动环境有良好的适应性，所以本方案选择固态硬盘作为存储设备。

3.3. 搭载物模块设计

3.3.1. 数据采集功能设计方案高压室机器人需要采集多种类型的数据，单传感器难以满足功能需求，因此需要多款传感器共同实现数据采集功能。数据采集功能需结合实际需求和当前的技术水平综合设计，从而提高方案的可行性和实用性。

根据数据类型划分，可将目标巡检数据分为红外测温数据、局部放电强度数据、可见光图像数据、六氟化硫气体浓度数据、环境温湿度数据、环境噪声 22
音频数据。

红外测温功能，当前有两种设备可以选择，一种是单点测温设备，另一种是面阵测温设备。从数据量看，单点测温设备比面阵测温设备差多个数量级，

两者的测温精度都能满足巡检要求。同时，面阵测温设备有伪彩画面，数据可视化程度高便于人工查看，使用轻便，因此选用红外热像仪作为机器人搭载的测温类传感器。

局部放电检测功能，当前可靠性高的传感器都是接触检测方式，也有小部分非接触式的产品出现。单就从检测方式而言，非接触式具有很大的便捷性，

不需要机器人与机柜接触即可采集到所需数据，机器人和机柜设备的安全都有保证。从数据可靠性方面出发，实际检测中鲜有使用非接触式，绝大多数是接触式检测，机器人需要具备这一功能，上送的数据必须高度可信，非接触式传感器数据可靠性存疑。在不了解同时也没有可靠渠道获知非接触式局放传感器产品性能的情况下，选择现场使用较多的接触式局放传感器作为机器人搭载的局部放电传感器。

可见光图像采集功能，通过搭载可见光摄像机实现。可见光摄像机根据通讯接口可分为网络接口和非网络接口，考虑到网络接口便于与监控系统对接，

所以选择网络接口。摄像机的分辨率需要满足图像识别系统的要求，通常 1920*1080 分辨率的图片的清晰度足够看清目标设备，所以选择该分辨率的摄像机即可。

六氟化硫气体浓度采集功能，通过搭载六氟化硫气体传感器实现。六氟化硫气体传感器的选择，主要看传感器的灵敏度和耐用性。宜选用灵敏度高，且长期可靠运行的传感器。

环境温湿度数据采集功能，通过搭载温湿度传感器实现。温湿度传感器与六氟化硫传感器同属气体类传感器，选型侧重点也是灵敏度和耐用性。

环境噪音数据采集功能，通过搭载拾音器实现。拾音器从采集声音的区域可划分为全向拾音器和定向拾音器。考虑到室内环境相对狭小，机器人与设备距离也比较近，所以选择全向拾音器。

3.3.2. 传感器位姿调控功能设计方案考虑到实际巡检时，需要对开关柜不同高度的进行多点局放数据采集。同时柜体较高，过道偏狭窄，摄像机的俯仰拍摄角度大，会影响画面质量。为解决上述问题，需要对传感器进行位姿调控，即为局放传感器配备升降机构和伸缩机构，为图像传感器配备升降和旋转机构。

图像传感器的旋转功能可以通过云台来实现，通过云台调整图像传感器的 23

水平拍摄角度和俯仰拍摄角度，获取被拍摄设备较清晰的成像，降低后续图像识别的难度。

局放的伸缩功能可以通过推杆电机来实现，通过水平布置的推杆电机推动局放传感器与柜体表面接触，完成局放数据的采集。

局放、可见光相机、热像仪的垂直高度调整，可以通过多级折叠升降机构来实现。由大推力推杆电机带动折叠升降机构动作，调整平台平面的高度。

3.4. 机器人主要硬件设备选型

3.4.1. 底盘电机选型巡检机器人的底盘电机选型，目前行业内主要有伺服电机、步进电机和轮毂电机三大类别。

伺服电机的控制速度和位置精度非常准确，并能快速反应，且具有机电时间常数小、线性度高等特性。伺服电机通常配合减速器一起使用，减速器的选型可以根据末端输出速度和扭矩进行调整。该组合的主要优点是控制精度高，

末端输出扭矩上限高。其主要缺点是硬件价格较高，尺寸较大，重量偏重。

步进电机跟伺服电机相似，比伺服电机精度低一些，价格便宜一些。

轮毂电机是将动力系统、传动系统、刹车系统高度集成设计出来的电机。

因为轮毂电机不跟减速器搭配使用，其末端输出扭矩低于伺服电机减速器方案的输出扭矩。同时，因为轮毂电机方案不使用减速器，所以轮毂电机的末端控制精度也会低于伺服电机减速器方案。目前，国内有少数厂家推出了集成驱动器的工业 AGV 用轮毂电机，其集成化达到了很高的水平，为巡检机器人方案设计提供了有力支撑。

高压室智能巡检机器人的运行环境主要是水平地面，对电机的扭矩要求不高，选用高度集成化的轮毂电机方案，能满足室内地面运动的功能需求。

同时，轮毂电机方案会为结构设计带来较大的便利，也有利于控制机器人的硬件成本。 24

图 3.6 轮毂电机实物图示例（图源互联网）

表 3.2 高压室巡检机器人底盘电机选型对比表参数名称 伺服电机方案 步进电机方案 轮毂电机方案 需外部减速器 是否需外部驱动器 是否执行精度 高中 中 整体重量 大 中 小 采购成本 高 中 低 安装复杂度 高 高 低 静态功耗 高 中 低

3.4.2. 控制单元选型巡检机器人的控制单元选型，目前主要有工业控制计算机和智能手机两条分支。

工业控制计算机是经典方案。工控机是专用于工业场景控制用途的特种计算机。与个人电脑相比，其硬件设计方案会依据目标使用场景进行特化和裁剪 25

设计，从而获得更加契合使用场景的性能表现。而工控机又可以根据其封装形式，划分为有外壳工控机和工业主板。两者的主要区别是，有外壳工控机自带金属外壳，除标准接口可见外，板卡上的部件不可见，因封装程度高而导致尺寸偏大及重量偏高；工业主板不带外壳，整个板子主体板面可见，因封装程度低带来了尺寸小和重量轻等优势。巡检机器人行业，目前普遍使用工业主板作为主要控制单元。

智能手机控制方案，是近些年从业余机器人爱好者群体新兴起的简易方案。

其设计思想是使用高度集成化的智能手机，替代工控机作为机器人的控制中枢。

智能手机方案的优点是，自带显示屏幕和无线 wifi 模块，算力较高，运行功耗低，USB 接口扩展能力好等。其主要缺点是，从工控机方案变更为智能手机方案，开发语言需要从 C++ 变更为 Java 语言，需要一段时间过渡。

从智能硬件发展趋势来看，集成化、小型化是硬件选型的主要发展方向。

因此，智能手机方案取代工控机方案，是非常具有前景的一条路线。不过，从当前机器人软件系统的主流路线出发，为降低软件系统的开发工作量和开发周期，本文选用工控机作为主要控制单元。

图 3.7 工控机实物图示例（图源互联网）

出于对第三方库的支持度考虑，优先选用 Intel x86 系列处理器。 26

表 3.3 高压室巡检机器人工控机选型对比表参数名称 Intel Atom 方案 Intel Celeron 方案 Intel i3 方案 功耗 低 中 高 算力 低 中 高 板卡重量 小 中 大 采购成本 低 中 高 定位实时性 差 良好 性价比 中 高 低

3.4.3. 局放探测器选型电气设备产生局部放电时，会产生一定规律的电磁波信号。局部放电信号的大小与其激烈程度及放电点的远近有直接关系，可以围绕信号的物理特性表现，设计并制造专门用于检测局部放电信号的传感器，即局放探测器。

当前国内主流的局放信号检测方式，分为超声波和地电波两种方式。

超声波方案，是依据局放高频放电时会产生超声波的特性，专门采集环境中的超声波信号强度，从而判断是否有局放故障发生，以及依据多点强度信号的变化推测放电位置。超声波方案以其灵敏性和较大数据区分度成为局放测量行业的主流方案。其主要缺点是，环境中的超声波干扰信号较多，因此测量前需要先检测环境超声波强度信号，进行差分判断。

地电波方案，是依据局放放电时其靠近的金属柜面会产生感应电动势特性，

专门采集柜面的感应电动势强度，从而判断是否有局放故障发生，以及依据地电波多点强度信号的变化推测放电位置。地电波方案以其抗干扰性和定位准确性成为局放测量行业的重要辅助方案。其缺点是地电波数据灵敏度偏低，不如超声波信号有明显的区分度，对数据分析人员的专业素养要求较高。

3.4.4. 红外热像仪选型红外热像仪是物体表面温度采集成像装置，其最开始起源于军事用途，逐渐扩展到民用领域。热像仪是将物体发出的不可见红外能量进行采集，并结合当前测量参数信息结算出物体表面实际温度的测温类传感器。红外热像仪的主要优点是，其采集范围较大，是其采集视场角的有效覆盖区域。相比于单点测温，其测温速度更快，信息采集更完整，呈现效果更好，因此广泛用于电力设 27

备的发热情况检测。

当前行业的主流红外热像仪选型，已经从 2016 年的进口产品全面转为国产化替代，其售价也几经下降。红外热像仪的国产替代，对推动巡检机器人硬件降本和生产供货稳定性具有重大意义。

红外热像仪从调焦方式划分，可以分为手动调焦和自动变焦两种方式。自动变焦方式的优点是其有效采集的物体距离范围更宽，而手动调焦方式的有效采集距离较小。自动变焦方式，因硬件多了一级自由度且软件调参难度增加，

所以其售价远高于同等分辨率的手动调焦热像仪。

从高压室的实际柜体设备布局情况考虑，机器人停靠位置与设备的实际距离区间较窄，主要集中在 0.5~3m 以内，使用手动调焦的红外热像仪可以有效满足室内测温的需求。

图 3.8 红外伪彩图片示例表 3.4 某国产红外热像仪产品参数表参数名称 参数数值 参数释义 供电电压 DC 12V 12V 标压 供电运行功耗 5W 发热量偏大，机芯表温在 50℃左右 镜头焦距 4mm 最小聚焦距离 0.3m，适合近距离测温 使用测温范围 -20~150℃ 常规范围，满足机器人巡检测温需求 测温精度 ±2℃或±2% 满足两者之一即可 视场角 93° x 69.9° 水平和俯仰视场角，室内场景主选宽角度 工作温度 -20~50℃ 宽温重量 120g 小巧轻便，对云台集成设计利好 28

通信方式 网口网络通信，TCP+UDP

3.4.5. 可见光摄像机选型可见光摄像机是智能巡检机器人搭载的核心信息采集传感器之一，承担着照片拍摄、视频录制等重要职能。网络型可见光机芯，是智能巡检机器人行业普遍选择的搭载类型。其优点有，体积小，重量轻，通信方式简洁，可快速调试部署等。目前，国产的可见光摄像机在全球范围内占有较大市场份额，为巡检机器人的设计提供了重要且稳定的技术支持。

网络型可见光机芯的选型，主要需要关注画面分辨率、放大倍数及对应的视场角等参数。网络型可见光机芯的主要用途，就是采集到高质量的设备外观画面，画面的分辨率越高，成像质量相对也就越高，对后级的人工监控和图像自动识别都有益处。当前巡检机器人行业的主流分辨率是 1920*1080，即 200w

像素。而放大倍数的选择，变电站智能巡检机器人因需要拍摄的目标物距离范围大，通常使用 30 倍光学变焦；室内环境相对较小，巡检机器人与柜体的物理距离相对可控，选择 4 倍光学变焦即可满足实际使用需求。

图 3.9 高清网络一体化摄像机机芯实物图（图源互联网）

3.4.6. 无线网桥选型无线网桥是无线网络通信设备，可用于实现空间中不直接进行有线连接的电气设备的通信。机器人巡检区域内的无线网络环境搭建方案设计，关乎机器

人运行状态实时监控的流畅性，对用户体验很重要。

当前无线网桥的主流厂家，国内外均占有一定的市场份额。而国内的无线网桥设备，目前侧重于商用领域，进口的无线网桥设备，侧重于工业领域。从网络覆盖范围、通信质量和可靠性角度考虑，本文倾向于选择进口网桥设备。

综合带宽、覆盖范围和覆盖质量角度考虑，本文选择 2.4G 无线网桥作为智能巡检机器人与站端控制设备的通讯装置。当然，如果侧重发展角度，也可以选择 5G 无线网桥作为智能巡检机器人的通讯装置。在室内小房间场景下，两者的实际使用差异并不明显。

图 3.10 无线网桥实物图示例（图源互联网）

3.4.7. 激光雷达选型

激光雷达是智能巡检机器人的核心部件，是机器人导航定位的眼睛。激光SLAM 和视觉 SLAM 发展至今，激光 SLAM 以其更高的环境适应性和光照稳定性，成为巡检机器人行业的主流方案。

激光雷达是主动式传感器，其对运行环境光照变化情况不明显，白天和晚上的运行表现无明显差异。视觉 SLAM 的传感器成本远低于激光雷达，其对光照一致性的要求较高，在光照条件稳定的环境下有较大使用价值，但是当前并不适合光照条件一致性较差的环境。

激光雷达的主要参数有线数、探测范围、角度分辨率、距离精度、采集频率等内容。线数是指激光雷达包括多少个激光发射器，单线激光就表示雷达包括 1 个激光发射器。巡检行业目前主流线数有单线和 16 线，也有少量厂家使用

4 线和 32 线。单线激光的优点是价格较低，通讯开支小，功耗相对较低，缺点

是对结构化较差的运行环境适应能力较弱。多线激光的优点是采集信息量大，

对结构化较差的运行环境适应能力相对较好，缺点是价格偏高，通讯开支和功耗都较大。

高压室的环境场景小，结构化较好且环境稳定，因此本文选择单线激光雷达作为机器人的定位传感器。

图 3.11 单线激光雷达示意图（图源互联网）

本文选择某国产激光雷达公司出品的一款单线激光雷达产品，其主要参数如下表所示。

表 3.5 某国产单线激光雷达参数表

参数名称	参数数值	参数释义
供电电压	DC 9~36V	宽压供电，利好机器人电源方案设计运行
功耗	6W 左右	低功耗，利好机器人续航
探测角度	360°	单线完整角度，利好机器人定位和避障
探测距离	10m@10%	适合室内小场景
角度分辨率	0.18°	每帧 2000 个数据，高分辨率扫描
扫描频率	10Hz	每秒刷新 10 帧测量数据
测量精度	±3cm	精度可满足机器人定位需求
通信方式	UDP 网络通信	主动上送采集数据

3.4.8. 交换机选型智能巡检机器人是多种硬件设备集成化的特种产品，信息汇总是集成类产品设计的重要内容。硬件通信方案，选择以太网作为主要通信架构，各硬件模块优先选择网络通信作为选型参考。

交换机是以太网搭建中的基层信息中转单元，其通信可靠性对智能机器人稳定运行具有重要支撑意义。国产交换机产品，特别是低容量非网管百兆电口交换机，目前在低容量通信场景下具有统治地位。因出货量较大，所以国产交换机产品的稳定性表现也较好。

低容量非网管百兆交换机，按接口方式分，可以分为交换机设备和交换机核心板两大类。交换机设备的接口方式，是常见的 RJ45 口，其优点是标准化接口，部署测试方便，且自带防护。交换机核心板的接口方式，通常是小间距排针，核心板需要依托契合的基板进行使用，其优点是集成化程度高，基板尺寸可适配结构空间，降低结构设计难度。

依据智能巡检机器人的集成化设计原则，本文选用交换机核心板作为目标交换机，实现局域网络环境搭建功能。

图 3.12 交换机实物图示例（图源互联网）

3.4.9. 电池选型锂电池是巡检机器人和 AGV 行业的首选储能设备。电池的选择，主要需要考虑电压、容量、材料等主要参数。

高压室巡检机器人，设计续航时间为 6 小时。根据电气设备的组成和工作强度推测，整机巡检态功耗在 50W 左右。从人身安全和电机扭矩两个角度考虑，

24V 的电压等级能够支撑电机输出合理的扭矩，同时 24V 的电压比 48V 的电压

更加安全，因此选择 24V 作为锂电池选型的电压等级。

在 24V 电压等级下，机器人巡检态工作电流约 2.1A，要满足 6 小时的设计续航要求，电芯容量要在 13Ah 以上。考虑到电池容量的年度衰减，目标电芯容量范围选在 18~25Ah 左右。

锂电池电芯材质，有两种主流方案，分别是三元锂电芯和磷酸铁锂电芯。

三元锂电芯能量密度较大，低温放电性能较好，但是安全性较差，遇到穿刺和剧烈撞击有较大概率发生起火甚至爆炸。磷酸铁锂电芯，相对于三元锂电芯而言，能量密度偏低，低温放电性能也较差，不过其安全性较好。

当前电动汽车和重载 AGV 普遍选用三元锂方案的能源电池，是侧重其高能量密度和较低的价格。而巡检机器人行业，因负载小能耗低，且电池造价占整机造价的比重不大，所以通常使用磷酸铁锂方案的储能电池。

图 3.13 锂电芯拼包实物图（图源互联网）

3.4.10. 开关电源选型开关电源是电子产品中常见的电源调节设备，可以实现调压调流作用。巡检机器人包含的众多电气设备，其供电电源参差不齐，但是共用一个电池。此时，就需要使用开关电源，为各电压等级的电气设备适配其能正常工作的电压范围。

开关电源按其输入输出端是否共地，**可以分为隔离开关电源和非隔离开关电源。隔离开关电源的优点是输出侧与输入侧没有直接电路连接，两者高度解耦合，电路之间的干扰相对较小，缺点是价格偏高。非隔离开关电源的优点是价格便宜，使用量大。**

巡检机器人的电气拓扑较复杂，设备之间的接线存在较多交叉，如果使用隔离电源，就要为所有电气耦合点进行解耦，同时结构侧也要考虑控制电气连通性，设计工作量会剧增。同时，巡检机器人常态不接电在室内作业，外部环境扰动对机器人影响不大。因此，本文选用非隔离开关电源作为电源调节设备，

满足实际场景需求的同时，降低设计复杂度。

3.5. 机器人整机供电方案设计机器人包含的电子部件，分别使用 DC24V、DC12V、DC5V 和 DC3.3V 共 4 个电压等级。其中，DV5V 因设备负载较小，可以从工控机的 USB 口取电；DC3.3V 是板卡内部元器件用电，板卡的整体供电是 DC24V。

下图是机器人供电方案的设计框图。因 DC5V 和 DC3.3V 是元器件级别设备，与部件模组划分粒度不同，框图中不再一一列举。 34

图 3.14 机器人整机供电方案框图

3.6. 机器人整机通信方案设计机器人的部件通信方式，主要分为网口和串口两部分。网口以百兆电口为主，不需要使用光口。其中，串口又可细分为 RS232、RS485、TTL 三种。巡检机器人行业中有部分产品使用了电力载波模块，该策略对简化接线方案有一

定的利好，不过会增加硬件成本和功耗，本文不采用。 35

图 3.15 机器人整机通信方案框图

3.7. 本章小结本章主要介绍了机器人硬件方案的设计内容，围绕具体场景的功能需求，从整机规划到模块划分，再围绕具体功能展开硬件模块的功能设计，然后较详细地介绍了主要部件的硬件选型内容。

4. 022_第4部分		总字数：9222
相似文献列表		
去除本人文献复制比：9%(831) 文字复制比：9%(831) 疑似剽窃观点：(0)		
1	基于深度强化学习的多机器人协同导航 周世正(导师：刘勇) - 《浙江大学硕士论文》 - 2019-01-01	2.1% (195) 是否引证：否
2	10299_085207_G1351011_LW G - 《学术论文联合比对库》 - 2019-11-15	1.7% (153) 是否引证：否
3	H2019252690_屈晗炜_电力系统站内雷电侵入过电压 仿真研究 屈晗炜 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-11-01	1.7% (153) 是否引证：否
4	9_叶师傅_互通立交 叶师傅 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-10-15	1.6% (150) 是否引证：否
5	梁泽宇_51171213059_通信与工程学院_专硕 梁泽宇 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-09-30	1.5% (140) 是否引证：否
6	235471_梁泽宇_智能楼宇配送机器人 梁泽宇 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-09-28	1.5% (140) 是否引证：否
7	235550_梁泽宇_智能楼宇配送机器人 梁泽宇 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-09-29	1.5% (140) 是否引证：否
8	120160020-罗西 罗西 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-05-28	1.5% (137) 是否引证：否
9	基于激光雷达SLAM室内定位方法 白云裳;刘猛;冯酉鹏; - 《中国新通信》 - 2019-08-20	1.4% (133) 是否引证：否
10	基于ROS的室内移动机器人研究 陈勇祺;林盛鑫;彭文翔;郭铭涛;黎兴欢;陈淑也; - 《东莞理工学院学报》 - 2021-06-11	1.3% (119) 是否引证：否
11	Odroid与Pixhawk平台的飞行控制系统研究及应用 孟浩;程贤斌;李冰;高永; - 《单片机与嵌入式系统应用》 - 2021-02-01	1.2% (110) 是否引证：否
12	18_倪国英_基于牛奶的生产量的多目标优化 倪国英 - 《学术论文联合比对库》 - 2018-03-29	1.2% (109) 是否引证：否
13	基于数据耕种与数据挖掘的系统效能评估方法研究 鞠儒生(导师：黄柯棣) - 《国防科学技术大学博士论文》 - 2006-10-01	1.1% (106) 是否引证：否
14	10512802748156325_基于深度学习的牛栏山酒厂巷道式堆垛机可靠性研究 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-11-08	1.1% (100) 是否引证：否

15	S31445411467_冯家煦_基于霍尔元件测量圆环的永磁球形电机两自由度位置检测系统 冯家煦 - 《学术论文联合比对库》 - 2018-10-23	1.1% (98) 是否引证: 否
16	2016282060154-胡诗怡-碾盘山弧形闸门水力学试验及三维数值模拟研究-水利工程-杨国录 胡诗怡 - 《学术论文联合比对库》 - 2018-04-23	1.1% (97) 是否引证: 否
17	1_碾盘山弧形闸门水力学试验及三维数值模拟研究 1 - 《学术论文联合比对库》 - 2018-04-19	1.1% (97) 是否引证: 否
18	集装箱码头泊位作业系统统计分析与评价 刘溪涓(导师: 计明军) - 《大连海事大学硕士论文》 - 2011-05-01	1.0% (96) 是否引证: 否
19	TD-SCDMA与cdma2000干扰共存研究 李超(导师: 滕建辅) - 《天津大学硕士论文》 - 2012-06-01	1.0% (96) 是否引证: 否
20	2009204150_李超_TD-SCDMA与cdma2000干扰共存研究 李超 - 《学术论文联合比对库》 - 2012-05-31	1.0% (96) 是否引证: 否
21	2009204150_李超_TD-SCDMA与cdma2000干扰共存研究 李超 - 《学术论文联合比对库》 - 2012-06-04	1.0% (96) 是否引证: 否
22	TD-SCDMA与cdma2000干扰共存研究 李超 - 《学术论文联合比对库》 - 2012-05-28	1.0% (96) 是否引证: 否
23	TD-SCDMA与cdma2000干扰共存研究 李超 - 《学术论文联合比对库》 - 2018-05-30	1.0% (96) 是否引证: 否
24	基于偏微分方程的欧式期权定价研究 吴一玲(导师: 陶祥兴) - 《宁波大学硕士论文》 - 2009-06-30	1.0% (93) 是否引证: 否
25	商业银行人民币结构性存款的定价研究 吴庆海(导师: 丁正中) - 《浙江工商大学硕士论文》 - 2008-12-01	1.0% (93) 是否引证: 否
26	民用炉具性能在线测试方法构建及应用研究 - 《学术论文联合比对库》 - 2018-06-01	1.0% (88) 是否引证: 否
27	基于SLAM的餐厅智能服务机器人设计与实现 张占宾(导师: 李小坚;段振刚) - 《北方工业大学硕士论文》 - 2019-05-20	0.9% (86) 是否引证: 否
28	基于磁场测量的永磁球形电机位置检测系统 冯家煦(导师: 李桂丹;李斌) - 《天津大学硕士论文》 - 2018-12-01	0.9% (80) 是否引证: 否
29	2016203160_冯家煦_基于磁场测量的永磁球形电机位置检测系统 冯家煦 - 《学术论文联合比对库》 - 2018-11-09	0.9% (80) 是否引证: 否
30	基于改进粒子滤波器的WSNs目标跟踪算法 李宁;徐守坤;马正华;石林; - 《传感器与微系统》 - 2011-03-20	0.8% (78) 是否引证: 否
31	融合IMU的RGBD-SLAM算法改进研究 闵华松;杨杰; - 《计算机工程与设计》 - 2015-01-16	0.5% (43) 是否引证: 否
32	一种融合行人预测信息的局部路径规划算法 赵青;陈勇;罗斌;张良培; - 《武汉大学学报(信息科学版)》 - 2020-05-05	0.4% (37) 是否引证: 否
33	一种跨平台多通道人机交互控制系统设计 樊嘉欣;丑武胜;汪名飞; - 《组合机床与自动化加工技术》 - 2017-04-20	0.3% (30) 是否引证: 否

原文内容

从整体到模块，从模块到硬件方案，从硬件方案到硬件选型，逐步展开，层层深入，将巡检机器人硬件方案的设计思路和流程清晰合理地表述出来。同时，笔者多次围绕具体硬件，展开国产和进口硬件的主要差异，介绍了国产化硬件产品的现状，对硬件国产化的方向给予了高度的认可和敬意。 36

第4章机器人软件系统设计

4.1. 机器人软件系统框架搭建本文设计了一套电力巡检机器人可用的软件系统方案，依据搭建顺序和依赖关系，可以将其划分为 5 层。按照逻辑自下到上排布，分别是 Ubuntu 操作系统层、ROS 机器人操作系统层、硬件服务层、算法模块层、业务逻辑层。

图 4.1 巡检机器人软件系统框图 37

4.1.1. 机器人软件系统选择ROS 是机器人操作系统（Robot Operating System）的英文缩写[27]。ROS 是一种专用于编写机器人软件程序的具有高度灵活性的软件架构，其原型源自斯坦福大学的 Stanford Artificial Intelligence Robot (STAIR) 和 Personal Robotics (PR) 项目。

ROS 是开源的次级操作系统，是可以运行在 Linux 操作系统里面的子系统。它提供类似操作系统的功能，包含硬件抽象描述、底层驱动程序管理、共用功能的执行、程序间的消息传递、程序发行包管理等，同时也提供一些工具程序

和库用于获取、建立、编写和运行多机整合的程序。

ROS 的设计目标是提高机器人研发过程中的代码复用率。ROS 是一种分布式处理框架，可执行文件（又名节点，英文名 Node）能被单独设计，并且在运行时松散耦合。可以简单的理解为，ROS 是一个开放性的通讯框架，负责完成多节点之间的信息交互。每个节点是一个独立的进程，负责与独立的硬件对接或模块化的运算策略，多个节点之间依托 ROS 框架进行协作，共同实现机器人

的硬件联动。

ROS 具备多语言支持、精简与集成、工具包丰富等主要优点，考虑到上述优点对机器人软件系统开发的便利性，本文使用 ROS 操作系统作为机器人软件系统。

图 4.2 ROS 某发行版本的官方图标（图源互联网）

4.1.2. 软件系统运行环境选择 Ubuntu 是 Linux 的一大发行版本分支。因为其界面设计相对较好，很受学 38 界推崇，以至于其近些年发展迅猛，成为学界的主选编程用操作系统。

业界前卫的软件算法通常是学界先做出来的，工业界再跟进学习和落地。

Linux 各分支之间的开发环境一致性并不好，复杂的软件项目，在不同发行版本的移植过程中经常会遇到依赖性问题、库版本问题、数据结构问题，以至于难以移植。综合以上因素，导致前卫的软件算法与操作系统强绑定，工业界出于移植难度和后续更新的考虑，只能接受学界青睐的 Ubuntu 系统。

Ubuntu 系统是以桌面见长的系统，学习简单，易于上手是其优点，但是其运行稳定性不好，漏洞较多，并不适合对稳定性要求很高的巡检机器人。但是又因为其与主流开源算法强绑定，ROS 系统对 Ubuntu 系统有很好的适配和维护，所以 Ubuntu 目前是国内巡检机器人厂家的主选操作系统。

综上所述，本文选择 Ubuntu 作为软件系统的开发和运行环境。

4.1.3. 编程语言的选择 C++ 语言是编译型语言，学习难度相对偏高，但是运行效率很高。在机器人工控主板这种受功耗和散热制约算力偏低，但又对实时性和算力有较高要求的设备上，是很适合的一种编程语言。

相比于 C++，python 最大的优点是学习简单，开发速度快。借深度学习和各行业一起转编程的趋势，python 一跃成为用户量最大的脚本语言。但是 python 的执行效率较低，适合学界做实验，不适合工业界做产品。

机器人是由多种硬件集成的多功能产品，而 C++ 作为经典编程语言，在硬件官方库中处于统治地位。出于对硬件模块配套服务开发的兼容性考虑，本文选择 C++ 作为主要编程语言。

4.1.4. 软件系统开发环境选择

Qt 是一个的跨平台 C++ 图形用户界面应用程序开发框架，是基于 C++ 的一种语言扩展，Qt 的类都是用 C++ 写出来的。因此，Qt 本身已经继承了 C++ 的快速、简易、面向对象等许多的优点。Qt 可以开发带界面的程序，也可用于开发不带界面的程序，比如控制台工具和服务进程等。

Qt 作为目前跨平台性能最好的框架，可以在 Linux 中运行，也可以在 Microsoft Windows、Mac OS X 等多种不同的平台中运行。

考虑到 Qt 对 Linux 系统友好，且是 C++ 的扩展，本文选择 Qt 作为主要开发环境。 39

4.2. 建图算法选择及优化

4.2.1. 建图算法选择 Gmapping 是基于例子滤波和点云配准的一种二维地图构建算法[28]，是最先被 AGV 业界广泛接受和认可的算法。Gmapping 可以实时构建室内地图，在构建小场景地图所需的计算量较小且精度较高。相比于 Cartographer，在构建小场景地图时，Gmapping 不需要太多的粒子并且没有回环检测，因此计算量小

于 Cartographer，同时精度并没有差太多。里程计可以提供机器人的位姿先验，

Gmapping 有效利用了车轮里程计信息，这也是 Gmapping 对激光雷达频率要求低的原因。

表 4.1 高压室巡检机器人建图算法对比表
算法名称 Cartographer Gmapping Hector SLAM
需码盘数据 可选 需要 不需要
需陀计数据 可选 可选 不需要
激光帧率要求 中 低 高
算力要求 高 低 中
回环检测 Ceres Solver 无

g2o

硬件需求 高中低 适应场景 能容忍区域高度变化的大场景 室内平坦场景 结构化良好的室内平坦场景

建图维数 二维/三维 二维 二维 二维 Gmapping 的每个粒子都携带一幅地图[29]，随着场景增大所需的粒子增加，在构建大地图时所需内存和计算量都会增加，所以 Gmapping 不适合构建大地图。此外，Gmapping 在设计时没有嵌入回环检测模块，因此在回环闭合时可能会造成地图错位，所以 Gmapping 不能像 Cartographer 那样构建大的地图。

考虑到高压室的面积通常在 1000 平米以下，以及工控主板的算力不高，本文选择 Gmapping 作为建图算法。其算法输入是激光扫描数据和经过卡尔曼滤波处理后的里程计数据[30]。 40

图 4.3 二维激光 SLAM 地图示例（图源互联网）

图 4.4 在线实时建图业务数据流向图 41

4.2.2. 建图算法缺点分析

Gmapping 算法以其轻量级，硬件需求开支小成为二维定位的主要方案，是一款经过工程现场检验的好算法。即便如此，Gmapping 也有自己的不足。

缺点一，没有对前级激光数据进行滤波降噪，以至于地图噪点多。

缺点二，单线程运算，扫图数据包帧数增加，帧数序号越大运算时间越久。

缺点三，没有做全局优化，墙面等实体成图后很厚，影响定位精度。

图 4.5 Gmapping 构建出的原始地图示例 上图是 Gmapping 构建出的一幅原始地图，白色像素表示激光扫过的区域，黑色像素表示激光探测到实体边界的区域，灰色像素表示激光未扫描过的区域。

图中，有少量白色像素被黑灰包围，这类像素就是不合理像素。从理论上讲，这类白点到机器人位置之间隔着黑色像素，因为黑点代表实体障碍物，那么激光光束根本无法穿过黑点有效探测到该白点位置。

该图的建图相关参数为，每帧激光数据 2000 个点，30 个粒子数，50mm 地图栅格精度，使用英特尔至强 E3-1230 v6 CPU 执行 Gmapping 算法，地图包 522 帧数据，离线建图耗时约 186s，耗时较长。

同时，图中的墙面厚度在 3~7 像素不等，按照 50mm 的栅格精度换算，墙面厚度为 150~350mm。从理论角度出发，激光不能穿过墙面探测墙后的环境，

所以墙体的厚度应该为 1 像素，实际建图最厚位置是理论值的 7 倍，成图质量较差。

4.2.3. 建图算法优化完善设计针对 Gmapping 算法的三个不足，本文围绕具体问题出发，设计了三个优化策略，可有效提升地图质量。使用优化过的建图算法，输出的地图如下所示。 42

图 4.6 使用优化过的建图算法构建的地图关于地图噪点较多和墙体厚的问题，本文参考元胞自动机的设计思想，设计了针对像素的合理性分析策略，将像素点视为元胞，设定相关合理性判断规则，让像素自行判断自身的存着是否合理，如果不合理，则变更为合理的像素值。原始地图上的少量不合理白点，如被黑色和灰色包裹的白点，都在判断出自身是不合理存在后，变更为更为合理的灰色点。同样的，如果有黑点的周围都是黑点，那么它是一个不合理的黑点，应变更为更为合理的灰色点。

图 4.7 地图质量自动降噪优化流程图 43

关于地图构建时间较长问题，本文通过分析激光分辨率和地图栅格的关系，

合理进行了激光数量采样操作，将参与建图运算的激光点数据进行压缩，直接降低了 Scan Matching 的运算量，提高了建图速度。激光分辨率与栅格与距离

的估算公式如下：

$$\text{width} \approx \text{distance} * \sin(\theta) \quad (4-1)$$

其中，width 表示两个相邻激光的光点距离，distance 表示光点距离发射源的距离， θ 表示激光的角度分辨率。已知激光角度分辨率是 0.18° ，地图栅格分辨率是 50mm，则地图栅格对应的激光能够有效分辨的最远探测距离是

15923mm，即 15.9m。也就是说，一个长为 50mm 的障碍物距离激光 15.9m

垂直放置，激光雷达仍会返回一个光点。那么在 15.9m 以内的 50mm 的障碍物，

激光雷达会返回至少 1 个光点，但是这些光点虽然全部参与运算，最后都会因为地图栅格分辨率是 50mm 而出现信息重复，因此相关的运算都是无效运算，

不会对地图质量产生明显影响，但是却会明显影响到建图的速度。简言之，激光雷达的探测分布率超出了地图的栅格精度，所以激光数据不需要全部参算。

在此基础上，对 Gmapping 算法的预处理环节，增加一个以 25mm 为栅格的体素滤波器，对激光数据进行精度去重处理。该处理环境可以有效降低实际参算激光的数量，从而降低运输量，加快建图速度。经此优化后，上图的运算时间降低到 77 秒，下降了约 58.6%。

4.3. 激光定位算法选择及优化

4.3.1. 激光定位算法选择AMCL，自适应蒙特卡洛定位，是机器人在二维移动过程中广泛采用的概率定位系统。其采用粒子滤波器来跟踪在已构建的地图中运动的机器人位姿，

对于大范围的局部定位问题表现良好。

蒙特卡洛法的基本思想是，为了求解问题，首先建立一个概率模型或随机过程，使它的参数或数字特征等于问题的解。然后通过对模型或过程的观察或抽样试验来计算这些参数或数字特征，最后给出所求解的近似值。解的精确度用估计值的标准误差来表示。蒙特卡洛法的主要理论基础是概率统计理论，主要手段是随机抽样、统计试验。

尽管算法中解出的概率分布，只是真实分布的一种近似情况，但是，由于非参数化的特点，它摆脱了解决非线性优化问题时随机量必须满足高斯分布的制约，从而能表达比高斯模型更广泛的分布，也对变量参数的非线性特性有更 44 强的建模能力。

在结构化较好的室内环境下，AMCL 是被业界普遍采用的低算力高精度的二维地图实时定位算法，其对工控机的内存和 CPU 占用都比较高。

图 4.8 导航定位业务数据流向图

4.3.2. 激光定位算法缺点分析本文选用的定位算法是一种基于概率学统计理论的定位策略实现，主要包含似然度运算和粒子重采样两个核心模块。

似然度运算，是指给定机器人推测位姿，给定环境地图，给定当前激光数据，计算出当前激光雷达的探测信息与环境地图的契合度。简言之，实际场景中，机器人正前方 1m 有 1 个柱子，地图上对应位置也有 1 个柱子，当前激光也探测到对应角度上 1m 位置有实体，这就表示激光雷达的探测信息与地图吻合上了，反之则不吻合。因此，如果 2000 个激光点全部都跟地图上的实体障碍物点位吻合，则机器人对应位姿的定位似然度就是 1。单光束得分函数计算公

式如下所示，

$$\text{score} = \text{beamNearestDist} < \text{nearDistThres} ?$$

$$(1 - (\text{beamNearestDist} / \text{nearDistThres})^2) : 0 \quad (4-2)$$

粒子似然度计算公式如下所示，

$$\text{likelihood} = \left(\sum$$

$$li$$

$$) \cdot (\text{beam}(s$$

$$n$$

$$\text{imcore} =$$

$$) / n_{\text{beamSize}} \quad (4-3) \quad 45$$

其中，likelihood 表示某个推测位姿的似然度得分。score 是基于地图信息解算出的光束得分速查表，beam 是激光雷达返回的光束信息。似然度的取值范围为[0,1]。通常，在结构化较好的室内区域，似然度的得分通常在 0.60~0.99

之间。因为激光雷达本身的探测误差，和地图构建的质量偏差，实际定位过程中极少出现激光光点与地图信息百分百吻合

的情况。

图 4.9 优化前的定位算法流程图似然度运算的主要不足，是对激光光束的距离权重设计不合理。即所有光束都是等权重的，会导致距离机器人更近的障碍物，对机器人定位造成更大的影响。一个 500mm 宽的纸箱，放置在距离机器人 2m 位置，和放置在距离机器人 5m 的位置，对机器人的似然度计算结果会引入较大偏差，从而影响到定位可靠性。

4.3.3. 定位算法优化完善设计为提高定位算法似然度运算的合理性，提高机器人定位结果的可靠性，本文提出了一种似然度计算的优化策略。

结合地图栅格精度和光束距离信息，为光束设计合理的权重规则，在远光束和近光束之间找到了个较好的平衡点，适当提高远距离稀疏光束的权重，适当

当降低近距离稠密光束的权重，以此来优化机器人的定位准确性。

$$\text{weight} = (\text{distance} / \text{max_dis})^2 \quad (4-4)$$

其中，weight 是权重，distance 是光束距离，max_dis 是激光有效探测到的最远距离。使用平方运算，是为了加大权重值随距离缩小的下降速度。

图 4.10 优化后的定位算法流程图依据光束距离信息，对光束参算权重进行调整后，可以使远距离的稀疏光束在参算中获得更大的影响，对提升全局定位的结果可靠性有明显提升。 47

4.4. 路径规划算法选择及优化

4.4.1. 路径规划算法选择单源最短路径算法，是一种用于有向图路径规划的常规算法。其用一个优先级队列来记录遍历的顶点与相应路径长度，如果顶点到起点的路径较短，就优先从队列中取出来做扩展，最后在整个图里找到最优路径。单源最短路径算法的缺点是在拓扑较大时，其运算量偏大，实时性会下降。

图 4.11 路径拓扑图示例（图源互联网）

与单源最短路径算法形成鲜明对比的，是 A*算法。A*算法的主要优点是

运算量小，计算速度快，不足之处是它只能找到次优解，不能保证最优。

A* 算法不能找到最短路径的主要原因，是其迭代过程一旦遍历到终点就结束。对于单源最短路径算法来说，当终点出队列的时候，终点的累计距离值是优先级队列中所有顶点的最小值，即便再继续迭代下去，终点的累计距离值也不会再被更新了。而对于 A* 算法来说，一旦遍历到终点，算法就结束迭代，但这个时候，终点的累计距离值未必是最小值。

出于对路径最优的考虑，以及机器人对路径规划速度的实时性要求不算高，

本文使用单源最短路径算法作为机器人路径规划算法。

4.4.2. 路径规划算法缺点分析

路径规划算法的主要问题，是局限于全局距离最优，而不是时间最优。这

一点是路径规划算法通常没有讨论，但是工程实用现场经常遇到的问题。一般路径规划算法，通常默认路径拓扑中各路段的运动速度是等速的。而工程现场中，出于安全性和巡检速度两方面原因考虑，在宽敞的区域，机器人路径速度会设置的高一些，在狭窄区域，机器人的路径速度会设置的低一些，这就造成

了不同路段的实际执行速度并不相同。

图 4.12 以最短距离为目标的巡检任务排序流程图按照运维人员的角度出发，对机器人巡检的参数要求往往是时间最优而不是路程最短。因此，减掉了路径限速参数的路径规划算法，虽然也能在工程现场落地使用，但是却不是最合理的算法实现。

4.4.3. 路径规划算法优化完善设计在单源最短路径算法的基础上，仿照其迭代原理，设计一个单源最短时间算法的实现，将拓扑中的路径长度参数变更为路径耗时参数，即可依据耗时最短的目标，生成一条新路径。 49

图 4.13 以最短时间为目标的巡检任务排序流程图因为有单源最短路径的实现基础，所以此处改动工作量不算大，但是却能够有效解决工程使用中遇到的问题。由此可以得出一点经验，并不是所有好的算法都一定是复杂且难以理解的。从工程实际角度出发，能够完成目标功能，

越简单的逻辑反而越具有生命力和发展性。

4.5. 速度计算算法选择及优化

4.5.1. 速度计算算法选择DWA 算法全称为 dynamic window approach，其原理主要是在速度空间（线速度与角速度）中采样多组速度，并模拟这些速度在一定时间内的运动轨迹，

再通过一个评价函数对这些轨迹打分，得分最高的速度被选择出来发送给底盘电机[31]。如机器人当前路径允许的最大前进速度是 0.7m/s，最大旋转速度是

45°/s，则给定 v_step 为 0.05m/s，r_step 为 5°/s 的情况下，算法计算出所有可能 50

的速度组合队列，该队列包含 150 个候选速度，算法对 150 个候选速度进行固定时长后的轨迹预测，结合碰撞保护、轨迹重合度、到点后位置偏移量、到点后角度偏移量加权计算出一个速度的合理性得分，选出得分最高且通过安全检查的速度，下发给底盘执行。

图 4.14 DWA 算法示意图（图源互联网）

因巡检机器人运动速度在 1m/s 以内，底盘运动速度不高，所以使用行业普遍使用的 DWA 算法作为巡检机器人的速度计算算法。

4.5.2. 速度计算算法缺点分析其算法优点是响应速度较快，计算相对简单，通过速度组合可以快速得出下一时刻规划轨迹的最优解。

DWA 算法的第一个缺点，是评分机制不够完善，当距离调整和角度调整的得分很接近时，会出现旋转振荡的现象。

该算法的第二个缺点，是控制精细化程度和运算量之间的矛盾。即采样步长大，则速度粒度大，控制不够精细化。采样步长小，则速度粒度小，求最高得分的参算数量就多，运算耗时长。

4.5.3. 速度计算算法优化完善设计针对 DWA 算法的两个主要缺点，本文针对性设计了两个优化策略，可有效缓解算法的缺点，提升速度计算算法的工程使用合理性。 51

针对距离和角度得分接近出现振荡的情况，本文设计了振荡监视策略和振荡解除策略。振荡监视策略，即将 DWA 运算出的历史速度存储在一个队列中，

如果一段时间内，队列中被两个刚好转速相反的速度基本平分占据，则认为机器人出现了原地振荡的自锁异常。振荡解除策略，即在发现自锁后，在 DWA

算法内加入修复机制，强制某个速度连续执行 3 次，使机器人底盘越过振荡临界线，从而继续合理运行。

针对控制精细化程度和运算量之间的矛盾，本文设计了两轮采样，可以有效实现较小运算量情况下的精细化控制。两轮采样的思路是，第一轮采样使用粗粒度的速度梯度，降低候选速度的数量，然后计算各个候选速度的得分，从得分中选择前 5 个速度，进行第二轮采样。第二轮采样时，把速度梯度调低，

精细化速度分布，然后同样计算各个候选速度的得分，从中选择得分最高的速度，下发给底盘电机。两轮采样的模式，与粒子滤波算法、分支定界算法很相似，都是用于求解非线性优化类问题时，在尽量不损失优化质量的基础上，降低运算量的常用方法。

4. 6. 机器人软件系统主要服务模块设计

4. 6. 1. 底盘驱动程序底盘驱动程序的主要职能是底盘电机执行控制和状态监测，具体包含目标速度解算及下发，码盘数据解算及发布，运行状态监测及告警三部分业务。

目标速度解算及下发，是指进程将收到的底盘速度目标，根据底盘的结构参数解算为左右两个电机的转速信息，对计算结果进行校核通过后下发给左右电机执行。

码盘数据解算及发布，是指进程周期性与电机固件程序进行交互，获取最新的左右码盘位置数据，并根据编码器线数、轮胎直径、轮间距等信息，从码盘数据解算出底盘的里程数据，发布到机器人系统指定的消息频道上。

码盘数据解算里程数据的原理图如下所示。 52

图 4. 15 依据左右轮移动距离解算旋心里程数据示意图

从码盘数据解算轮胎行程的相关公式组如下，

$l = \text{encoder_left} * \text{ke_m} \quad (4-5)$

$r = \text{encoder_right} * \text{ke_m} \quad (4-6)$

其中，encoder_left 指左电机的码盘的变化数值， encoder_right 指右电机的码盘的变化数值，ke_m 指码盘与行程的转换系数，l 表示单位时间内左轮走过的距离近似值，r 表示单位时间右轮走过的距离近似值。

从轮胎行程解算偏航角度的解算公式如下，

$x = E * r / (l - r) \quad (4-7)$

$\theta = \arctan(r / x) \quad (4-8)$

其中，E 表示左右轮心距，θ 表示底盘的偏航角度。

从偏航角度和轮胎行程，可以解算出底盘旋心（左右轮心连线的中点）的里程位姿，公式如下，

$\text{odo_x} = (l + r) / 2 * \cos \theta \quad (4-9)$

$\text{odo_y} = (l + r) / 2 * \sin \theta \quad (4-10)$

$\text{odo_angle} = -\theta \quad (4-11)$

其中，定义机器人前进方向为机器人底盘坐标系 x 轴正方向，定义机器人正左方向为机器人底盘坐标系 y 轴正方向，定义机器人垂直上方为机器人底盘坐标系 z 轴正方向。 53

图 4. 16 机器人底盘模块俯视透视图运行状态监测及告警，是指进程周期性与电机固件程序进行交互，获取电机当前的运行状态，包括但不限于工作电压、工作电流、工作温度、错误码等信息，并对数据进行合理性检查，如发现电机工作状态异常，则发布相应的告警信息，必要时停止电机运转，从而保护电机。

指 标
疑似剽窃文字表述
1. 操作系统里面的子系统。 它提供类似操作系统的功能，包含硬件抽象描述、底层驱动程序管理、共用功能的执行、程序间的消息传递、程序发行包管理等，同时也提供一些工具程序 和库用于获取、建立、编写和运行多机整合的程序。 ROS 的
2. Gmapping 可以实时构建室内地图，在构建小场景地图所需的计算量较小且精度较高。相比于 Cartographer，在构建小场景地图时，Gmapping 不需要太多的粒子并且没有回环检测，因此计算量小于 Cartographer，同时精度并没有差太多。
3. Gmapping 有效利用了车轮里程计信息，这也是 Gmapping 对激光雷达频率要求低的原因。
4. 蒙特卡洛法的基本思想是，为了求解问题，首先建立一个概率模型或随机过程，使它的参数或数字特征等于问题的解。然后通过对模型或过程的观察或抽样试验来计算这些参数或数字特征，最后给出所求解的近似值。解的精确度用估计值的标准误差来表示。蒙特卡洛法的主要理论基础是概率统计理论，主要手段是随机抽样、统计试验。
5. 参数化的特点，它摆脱了解决非线性优化问题时随机量必须满足高斯分布的制约，从而能表达比高斯模型更广泛的分布，也对变量参数的非线性特性有更 44 强的建模能力。
6. 优点是响应速度较快，计算相对简单，通过速度组合可以快速得出 下一时刻规划轨迹的最优解。

5. 022_第5部分		总字数: 8746
相似文献列表		
去除本人文献复制比: 0.4%(37) 文字复制比: 0.4%(37) 疑似剽窃观点: (0)		
1	Can总线在RH6000控制系统中的开发与应用 李元松(导师: 王宝树;卓明) - 《西安电子科技大学硕士论文》- 2008-11-01	0.4% (37) 是否引证: 否
原文内容		

4.6.2. 激光雷达通讯程序激光雷达通讯程序的主要职能是与激光雷达设备进行交互，完成传感器数据采集、数据预处理、数据发布、运行状态监测和告警等功能。

数据采集，是指进程周期性主动问询或等待设备自行上送测量数据，实现基础的硬件通信和数据校核。

数据预处理，是指进程对收到的采集数据进行简要的核对，如帧间重复度检查、数据有效率检查、数据单位调整等操作。此处给出帧间重复度计算公式

如下，

$$F_sameRate = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{ataCurataLasti - Di}{li}}{0:1} \times 100.0\% \quad (4-12)$$

数据发布，是指进程周期性将预处理结束的测量数据发布到指定的消息频道上。

运行状态监测和告警，是指进程在发现通信失败、数据校核错误、帧间重

复度过高、数据有效率过低等异常时，发布相应的告警信息，必要时停止发布数据，保护机器人本体和环境中的设备。

4.6.3. 电池管理程序电池管理程序的主要职能是与电池 BMS 板进行交互，完成电池运行状态的数据采集、电池工作模式控制和运行状态监测和告警等功能。

电池运行状态数据采集，是指进程周期性与 BMS 进行交互，查询电池包的剩余电量、当前电压、充放电电流、电芯温度等信息。

电池工作模式控制，是指进程对外提供关闭电池的远程过程调用功能，以便机器人在某些特殊场景下关闭电池，整机掉电。

运行状态监测和告警，是指进程周期性检查通信状态、电压合理性、电流合理性、电量合理性、温度合理性等运行状态，发现异常后，发布相应的告警信息，必要时呼叫机器人停车服务，保护机器人本体和环境中的设备。

指定任务量下，机器人完成当前任务所需的电量粗略估算经验公式如下，

$$S_task = S_goBack + N_listSize \times k + S_offset \quad (4-13)$$

其中 S_task 指完成当前任务所需电量，S_goBack 是指机器人完成巡检任务后返回充电点位置充电所需的返航电量，N_listSize 是指当前任务包含的巡检点数量，k 是指依据经验推算出的采集单个巡检点需要的电量，S_offset 是指在完成巡检采集和返航的电量基础上增加的电量裕量。

考虑到机器人执行任务的动作顺序固定，各动作的参数也固定，本文高度

结合机器人巡检作业内容，给出巡检任务电量理论计算公式如下，

$$S_task = T_walk \times kw + T_cruise \times kc + S_offset \quad (4-14)$$

其中，T_walk 是指机器人完成当次任务走路的时间，kw 是运动态时长与电量消耗的对应参数，T_cruise 是指机器人完成当次任务停车巡检的时间，kc

是采集态时长与电量消耗的对应参数，S_offset 是指电量裕量。具体地，

$$T_walk = \sum_{i=1}^n \frac{athSpeedi \times PathLengthi}{P} + \sum_{m=1}^m \frac{urnSpeedi \times TurnAnglei}{T} \quad (4-15)$$

运动执行时间，由直线行驶时间和原地旋转时间两部分组成。

$$T_cruise = \sum_{i=1}^n \frac{eighteighti \times H}{LiftSpeedi \times H + 55} + \sum_{i=1}^n \frac{iltilti \times T}{TiltSpeedi \times T} + \sum_{i=1}^n \frac{ype \times PCruiseTime}{eo i \times T} \quad (4-16)$$

))(int((4-16)

巡检采集时间，由升降平台动作时间、云台旋转动作时间和采集数据时间三部分组成。

4.6.4. 导航定位程序导航定位程序的主要职能是解算当前定位和计算底盘目标速度，具体包括实时定位与发布，多目标路径规划，速度计算及下发，运行状态监测和告警等功能。

实时定位与发布，是指进程周期性接收最新的激光测量数据和原始里程计数据，结合环境地图和激光在机器人坐标系上的安装位姿等先验知识，估算机器人当前在地图中的位姿数据，并将估算的结果和似然度发布到指定的消息频道。

多目标路径规划，是指进程接收到由多个采集目标组成的巡检任务后，对目标停靠点位置进行合理排序，规划出从当前位置出发，能够遍历所有目标停靠点，然后再返回到充电桩进行充电的功能。多目标路径规划问题，属于多目标非线性优化类问题，高压室巡检机器人的路径拓扑相对简单，所以该场景下的求解不算复杂。

速度计算及下发，是指进程依据当前位姿，结合目标位姿和设定好的路径信息，解算出合理的底盘运动速度，并下发给底盘驱动进程的功能。

运行状态监测和告警，是指进程监测激光数据接收状态、原始里程数据接收状态、定位运算似然度数值范围等信息，在发现数据接收异常或似然度低于设定阈值的情况下，发布相应的告警信息，必要时呼叫机器人停车服务，保护机器人本体和环境中的设备。

4.6.5. 云台通讯程序云台通讯程序的主要职能是与云台硬件设备进行通信交互，具体包括控制云台运动到目标位姿，查询云台当前位姿并发布，运行状态监测和告警等功能。

控制云台运动到目标位姿，是指云台通讯进程在收到外部远程过程调用后，

对调用方传入的参数进行解算和校核，然后下发给云台设备的功能。

查询云台当前位姿并发布，是指云台通信进程周期性与云台设备进行交互， 56

获取云台设备当前位姿信息，并对数据进行解算，然后发布到指定的消息频道的功能。

运行状态监测和告警等功能，是指云台通信进程周期性检查自身与云台设备的通讯状态、云台设备运行告警信息等内容，当发现异常后，发布相应的告警信息，必要时呼叫机器人停车服务，保护机器人本体和环境中的设备。

4.6.6. 辅控板卡通讯程序辅控板卡的主要作用是与工控机形成互补，担负工控机不擅长的 IO 操作，

如控制充电继电器闭合或断开等。

辅控板卡通讯程序的主要职能是支撑自动充电、控制面板检测和系统指示灯控制等 IO 相关业务。

自动充电功能，是指辅控板卡检查机器人充电头是否与充电桩有效接触，

从而判断是否可以闭合充电继电器执行充电作业的功能。

控制面板功能，是指辅控板卡周期性检查以机器人系统开关为代表的一系列控制类开关的跳变状态，从而呼叫机器人系统执行与开关逐个对应的业务逻辑，以及由开关组特定排列组合触发的复用功能。

系统指示灯控制功能，是指机器人跟进自身运行情况，判断当前运行状态为正常或异常，并控制系统指示灯亮红色或者亮绿色的功能。默认设计红色灯亮表示告警，绿色灯亮表示正常。

4.6.7. 可见光摄像机通讯程序可见光摄像机通讯程序的主要职能是与可见光摄像机机芯设备进行通信交互，具体包括控制机芯执行变倍调焦动作，查询机芯当前参数状态并发布，控制机芯抓取图片或录制视频，运行状态监测和告警等功能。

控制机芯执行变倍调焦动作，是指可见光摄像机通讯进程在收到外部远程过程调用后，对调用方传入的参数进行解算和校核，然后下发给机芯设备的功能。

查询机芯当前参数状态并发布，是指可见光摄像机通讯进程周期性与机芯设备进行交互，获取机芯设备当前位姿信息，并对数据进行解算，然后发布到指定的消息频道的功能。

运行状态监测和告警等功能，是指可见光摄像机通讯进程周期性检查自身与机芯设备的通讯状态、机芯设备运行告警信息等内容，当发现异常后，发布相应的告警信息，必要时呼叫机器人自动返航服务。 57

4.6.8. 局放传感器通讯程序局放传感器通讯程序的主要职能是与局放探测仪设备进行交互，完成传感器数据采集、数据预处理、数据发布、运行状态监测和告警等功能。

数据采集，是指进程周期性主动问询或等待设备自行上送测量数据，实现基础的硬件通信和数据校核。

数据分析，是指进程对收到的采集数据进行特征提取，结合采集数据时机器人的位姿信息进行逻辑判断，评估目标被检设备的局部放电发生情况和发生位置。

数据发布，是指进程周期性将分析后的测量数据和分析结果发布到指定的消息频道上。

运行状态监测和告警，是指进程在发现通信失败、数据校核错误、多次数据不刷新等异常时，发布相应的告警信息，必要时停止发布数据，终止当前巡检任务的功能。 58

图 4.17 局放巡检结果柜排平面展开图上图是局放超声波巡检结果的柜排平面展开图。局部放电缺陷发生时，伴随发生超声波，超声波可以沿着柜子的缝隙和开孔传播到高压室。巡检机器人要判断柜内是否发生局部放电缺陷，还要尽可能精确地判断出发生放电的柜子位置。

使用扫线映射策略，将测量的数据映射到柜排平面展开图上，直观反映传感器采集数据强度随位置的变化关系，便于确认放电柜子，排除干扰柜子。

4.6.9. 巡检服务程序巡检服务程序的主要职能是根据当前的巡检任务，将巡检任务拆解为各个功能模块的目标业务，并有序控制机器人各模块完成巡检采集任务。具体包括运行状态切换，任务管理，呼叫底盘运动，呼叫云台运动，呼叫采集设备作业，

电量管理等功能。 59

图 4.18 机器人巡检业务流程简图运行状态切换，是指进程跟进外部远程过程调用，将机器人切换为自动运行模式、手动控制模式或停机模式的功能。

任务管理功能，是指进程周期性获取当前的巡检任务，如果有新任务就结合当前状态进行任务处理，并把已完成任务标记为已完成状态，并附上相关采集结果的文件路径信息。

呼叫底盘运动功能，是指进程在执行巡检任务时，根据目标巡检点解算出对应的停靠点位，进而呼叫导航定位进程运动到

目标位置的功能。

呼叫云台运动功能，是指进程在执行巡检任务时，根据目标巡检点解算出对应的云台位姿信息，进而呼叫云台通讯进程执行到目标位姿的功能。

呼叫采集设备作业功能，是指进程在执行巡检任务时，根据目标巡检点解算出对应的采集传感器，进而呼叫对应的采集类传感器执行相关采集动作，获取巡检数据的功能。如巡检点类型是可见光，则进程呼叫可见光摄像机通讯进程，完成可见光照片的抓取动作。 60

电量管理功能，包含三部分业务内容。第一部分业务是待机充电，指进程在机器人完成巡检任务回到充电点后，调用自动充电接口实现自动充电动作的业务。第二部分业务是自动续航，指进程在机器人未完成巡检任务但电量所剩不多时，暂停任务回到充电点后，调用自动充电接口实现自动充电动作补充电量，随后再继续执行被暂停的任务的功能。第三部分业务是低电量关机保护，

指进程在机器人电量不健康，且未处于自动充电状态时，主动关闭机器人，防止设备突发硬掉电从而加大异常出现概率的功能。

4.7. 本章小结本章主要介绍了智能巡检机器人的软件系统设计方案。首先介绍了系统框架的搭建，然后着重介绍了软件核心算法的选择，然后对各算法的优缺点进行了分析，并针对各算法的缺点和不足，针对性地提出了合理的优化思路，并设计了优化方案，最后介绍了节点型系统的主要服务模块的设计策略。可以看出，

在通用操作系统和机器人专用操作系统层面上，我国对世界发达国家的依赖程度非常深。在智能巡检机器人的核心算法设计及开发方面，我国学界和工业界更侧重的是优化和工程落地，而不是算法理论出新和算法架构设计。在针对特定场景设计开发契合功能的业务层，我国的工程化水平处于世界前列。智能巡检机器人是一个很好的时代缩影，提供了很全面的参考维度，可以有效对照出祖国的进步和差距，激励我们前行。 61

第5章机器人现场使用方案设计

5.1. 机器人部署方案设计巡检机器人在陌生环境下的部署方案，就是解决四个基本问题。这四个基本问题分别是“我在哪”、“要看啥”、“路在哪”、“怎么看”。

图 5.1 机器人现场部署流程简图 62

5.1.1. 运行环境地图构建机器人部署的第一步，是构建运行环境的地图，为机器人自主巡检的导航定位做支撑。该步骤的主要目的是为机器人解决“我在哪”的问题。

地图构建过程中，随着地图逐步增大，激光点云配准和优化的运算量会逐步增大，CPU 的负荷会随之增大。理论上，地图足够大时，CPU 会达到算力瓶颈，从而引起实时性能下降，出现数据丢帧的现象。即，上一帧数据还没处理完毕，下一帧数据就已经发过来了，新数据没处理就被覆盖掉，数据连贯性被

破坏，从而影响建图质量。

一味增加 CPU 算力的做法，不仅治标不治本，还会增加整机功耗和硬件成本。因此，使用录包存数据和离线建图的方式，在算力和地图质量之间找到一

个新的平衡。扫图过程不执行建图业务，只是把环境数据存储到文件中去，不会丢帧。建图过程逐帧从扫图记录下来的数据包中取数据，加入到建图运算中去，直到全部运算结束。

扫图的主要操作，就是打开机器人扫图录包服务，手动控制机器人在目标运行环境中走一圈，让机器人在运动过程中把激光数据和里程数据记录下来。

建图的操作，就是启动建图程序，导入扫图记录的数据包，等待建图算法运行完毕，输出地图文件即可。

为丰富地图信息，以便支撑下游环节的保护策略，在三态地图的基础上增加第四态，即安全区域。安全区域是指车体可以安全穿行的区域，选取策略是与障碍物或未知区域保持一定的安全距离。下图中深蓝色像素表示安全区域。

图 5.2 高压室安全区域地图示例 63

5.1.2. 巡检内容点表制作高压室环境中，机器人的主要巡检内容分为三大部分，分别是表记巡检、红外测温 and 局放检测。巡检内容点表制作，主要目的是解决机器人“要看啥”的问题。

该步骤需要调试人员将需要巡视的柜体名字、巡检点位名称、巡检点位类型录入到一份机器人可识别的文件中去，即点表文件。点表文件是人机交互的中间文件，是机器人获取巡检内容的主要途径。

考虑到高压室内有大量柜子属于相同柜型，仅柜子名字不一样，柜面内容高度一致。为降低巡检内容点表制作工作量，本文设计了柜型点表模板，同类柜型可以添加柜名复用，可以有效提高点表制作业务的质量和效率。

图 5.3 高压室目标巡检内容柜型模板文件示例 64

5.1.3. 运行路径设置建图结束后，机器人已经获得了与环境契合的地图数据，结合定位算法，机器人可以知道自身在当前环境中的相对位姿。该步骤的主要目的是解决机器人“路在哪”的问题。

运行路径的设置，目的是让机器人知道什么位置有配电柜等目标巡检设备，

以及走哪条路线能从当前位置运动到柜子附近的停靠点。

路径设置的方式有两种，第一种是实地提取方式，第二种是人工绘制方式。

实地提取方式，就是手动控制机器人，运动到某个目标位置，将机器人所在位置的坐标信息写入到机器人数据库中。人工绘制方式，就是在地图上自行绘制停靠点，然后统一下装到机器人数据库中。

实地提取方式适合对到点精度有较高要求的停靠点设置，而人工绘制方式适合对到点精度要求不高的中转停靠点的设置。

停靠点和路径共同组成二维路径拓扑图，该拓扑图是路径规划模块的输入数据。

考虑到高压室柜型排布整齐，柜型宽度常态一致，可以添加策略，围绕柜排坐标，给定关键参数后，由程序自动生成巡检路径和停靠点位，如下图所示，

三角图标表示停靠点位，紫色线段表示单向路线，蓝色线段表示双向路线。

图 5.4 高压室巡检路径示例图 65

5.1.4. 巡检内容标定调试巡检内容的标定调试，就是人工控制机器人运动到柜体附近，调整云台角度和放大倍数等采集设

备参数，将机器人的位姿参数与点表逐条绑定，存储在机器人数据库中。

该步骤的主要目的是解决机器人“怎么看”的问题。

标定调试是巡检机器人调试中工作量最大的环节，与点位数量成正比，也是当前智能巡检机器人工程实施中的主要难点。

5.2. 机器人运行方案设计机器人的运行方式，围绕特殊情况下人为控制作业、正常情况下自主巡检作业、室内有施工期间暂停作业三个场景，设计了手动控制模式、自动巡检模式和停机模式。

5.2.1. 手动控制模式手动控制模式，是指人工操作机器人，控制机器人底盘运动等基础动作，完成计划外的临时性巡检作业。

比如，高压室内有工程人员进行施工作业，运维人员可以远程控制机器人运动到作业区域附近，调整云台位姿，实现云监工，监护施工作业的安全规范开展。

5.2.2. 自动巡检模式自动巡检模式，是指机器人自行按照设定时间和设定任务执行巡检作业的方式。该模式是最常用的运行模式。

在调试结束后，运维人员按照巡检内容和巡检周期构建定时任务。

定时任务构建成功后，机器人可以遵照设定内容周期性执行巡检作业，并自行保存巡检数据。

5.2.3. 停机模式停机模式，是指机器人停在当前位置，不执行任何有效动作。

当高压室内有施工作业时，因人员、设备、工器具等实物位置不固定，可能堵塞机器人的巡检路径，机器人不能正常执行巡检任务。 66

为降低环境临时变化对机器人运行的影响，同时也降低机器人自动巡检时对施工作业的干扰，可以在施工之前，将机器人切换到停机模式，等待施工结束，高压室道路环境恢复到施工前状态后，再将机器人切换到自动巡检模式。

5.3. 机器人维护方案设计机器人是多硬件集成的运动电气设备，周期性的维护和检修对提高机器人的上线率和使用寿命是有很大的益处的。

5.3.1. 电池电量检查锂电池是有使用寿命的。随着时间的推移，锂电池的容量会逐步降低，直到不能满足巡检需求。

通常以半年为单位对电池的电量进行检查，检查方式为将机器人充满电，

然后反复下发巡检任务，断开充电桩的供电，直到机器人低电量自行关机，记录下机器人单次续航时间。

当发现机器人的续航时间达不到设计要求时，可以为机器人更换新的锂电池。

5.3.2. 轮胎磨损检查机器人底盘在常年运动之后，轮胎的磨损是必然存在的。

轮胎如果严重磨损，会带来两个危害。第一个危害是轮胎花纹被磨平，影响到底盘的抓地力，导致底盘的运动性能下降。第二个危害是轮胎直径变小，

影响到里程计算和速度计算，导致机器人定位精度和到点精度下降。

通常以一年为单位对机器人的轮胎磨损程度进行检查，检查方式分为目检和盲走测距两种方式。目检的方式就是肉眼检查花纹磨平情况。盲走测距方式，

是指手动控制机器人往前运动 20cm，用尺子测量机器人实际前进的距离，计算两者的偏差量。偏差超过 1cm 时，可以对轮胎进行更换，也可以重新录入轮胎直径参数到机器人数据库，纠正进程计算的参数。

5.3.3. 云台运动精度检查云台多次重复运动后，受云台内部传动机构磨损的影响，其到点精度会出现一定的下降。云台到点精度下降，会导致巡检采集数据时，出现画面出现较大角度的偏斜、局放探头对不准设备的不利局面。

通常以一年为单位，对机器人的云台运动精度进行检查，检查方式为仪器 67

测量。即手动控制云台运动到水平角度，使用智能手机上的指南针软件，测量云台角度并记录，然后控制云台偏移 90°，再进行测量记录，观测两次测量结果的角度偏差。偏差超过 1° 时，可以在数据库中修正补偿系数，对云台到点精度进行补偿。当出现严重偏差时，可以更换新云台。

5.3.4. 红外热像仪测温精度检查

红外热像仪设备常年运行后，受设备材料老化的影响，其测温精度会出现

一定的下降。红外热像仪测温精度的下降，会导致巡检测温数据不准确，影响趋势分析和发热告警。

通常以一年为单位，对机器人的红外热像仪测温精度进行检查，检查方式为仪器对照测量，需要借助专业的黑体设备。将黑体放置在距离红外热像仪 5m

的位置，黑体的辐射发射区正对热像仪镜头，打开黑体，以 10° 为单位逐步升温，校对热像仪测得结果与黑体设置温度的偏差。当出现 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 或 $\pm 2\%$ 的温度偏差时，需要校对红外热像仪内部的设置参数。

常用的配置参数包括发射率和透过率两个参数，发射率是指被测物体的发射系数，透过率是指红外热像仪前级锗玻璃的透过系数。

考虑到热像测温校核作业耗时较长，且操作较多，为提高自动化程度，设计自动校核试验台，自动完成红外热像仪的校核工作。自动校核试验台包括黑体、可见光相机、图像识别服务器、调试笔记本、交换机和待测热像仪等主要部件。其中，黑体作为基准源给出可信的变化温度，可见光相机和图像识别服务器实现对黑体数码管数值的自动化识别，交换机实现各网络设备的通讯，调试笔记本汇总并分析数据。 68

图 5.5 红外热像仪自动校核硬件方案图 5.6 红外热像仪自动校核精度曲线图 69

5.3.5. 局放探测器探测能力检查局放探测器设备常年运行后，受设备材料老化和电路老化的影响，其测量精度会出现一定的下降。局放探测器测量精度的下降，会导致巡检局放数据不准确，影响趋势分析和局部放电告警。

通常以一年为单位，对机器人的局放探测器探测能力进行检查，检查方式为仪器对照测量，需要借助专业的手持局放探测器设备。将机器人控制到柜体附近，随机选择几个位置，使用机器人测量其局放数据并记录下来，然后使用

手持局放仪对相同位置进行测量，比较两组数据的趋势是否一致。如两者趋势

一致，则认为机器人搭载的局放探测器正常运行，如不一致，需要将局放探测器返厂进行校准。

5.4. 本章小结本章围绕机器人现场使用的调试部署流程展开，介绍了以调试人员为主要对象的机器人部署方案，然后介绍了以运维人员为主要对象的运行方案，最后介绍了以维保人员为主要对象的维护方案，基本完整覆盖了巡检机器人从出厂后到产品停止使用的过程。其中，机器人部署过程的工作量最大，运行过程的灵活性要求最高，维护过程的技术专业程度要求最高

6. 022_第6部分		总字数: 3508
相似文献列表		
去除本人文献复制比: 14.7%(514) 文字复制比: 14.7%(514) 疑似剽窃观点: (0)		
1	多移动机器人协同定位技术研究 孙骞(导师: 于飞) - 《哈尔滨工程大学博士论文》 - 2016-01-01	5.4% (190) 是否引证: 否
2	空间机械臂六维力/力矩传感器及其在线标定的研究 孙永军(导师: 刘宏) - 《哈尔滨工业大学博士论文》 - 2016-06-01	5.3% (187) 是否引证: 否
3	孙永军_11B308012 孙永军 - 《学术论文联合比对库》 - 2016-05-10	5.3% (187) 是否引证: 否
4	B612040002孙骞 孙骞 - 《学术论文联合比对库》 - 2016-02-28	5.3% (187) 是否引证: 否
5	BA13010013_贺军_2 贺军 - 《学术论文联合比对库》 - 2016-09-30	5.2% (184) 是否引证: 否
6	BA13010013_贺军_1 贺军 - 《学术论文联合比对库》 - 2016-10-08	5.2% (184) 是否引证: 否
7	中国科学技术大学0928_1(new) 贺军 - 《学术论文联合比对库》 - 2016-09-29	5.2% (182) 是否引证: 否
8	112-201513170-王鸿舸-小型四足机器人的奔跑和跳跃控制 王鸿舸 - 《学术论文联合比对库》 - 2018-06-02	5.0% (175) 是否引证: 否
9	单足弹跳机器人可变刚度柔性回转髋关节及其特性研究 尹鹏(导师: 孙立宁;李满天) - 《哈尔滨工业大学博士论文》 - 2015-10-01	4.7% (166) 是否引证: 否
10	37000_1123709003_傅敏霄 傅敏霄 - 《学术论文联合比对库》 - 2014-12-30	4.6% (162) 是否引证: 否
11	21009058-刘丹 刘丹 - 《学术论文联合比对库》 - 2013-05-06	4.6% (161) 是否引证: 否
12	绳索驱动并联机器人的静态与动态特性分析 Zemichael Amare Desta(导师: 晔斌) - 《合肥工业大学博士论文》 - 2019-02-01	4.1% (143) 是否引证: 否
13	无人艇应对主动威胁的智能规避方法研究 王宁佳(导师: 李刚;杨东华) - 《哈尔滨工程大学硕士论文》 - 2017-04-01	4.1% (143) 是否引证: 否
14	轮式移动机械臂倾覆与滑移问题研究 宋韬(导师: 方明伦;奚风丰;郭帅) - 《上海大学博士论文》 - 2016-04-01	3.7% (130) 是否引证: 否
15	目标明确的释放型操作示教与增强学习研究 耿鹏(导师: 徐扬生;吴新宇) - 《中国科学院大学(中国科学院深圳先进技术研究院)硕士论文》 - 2018-06-01	3.6% (128) 是否引证: 否
16	基于双目立体视觉的微型无人机的室内三维地图构建系统的设计与研究 余小欢(导师: 韩波;李平;张宇) - 《浙江大学硕士论文》 - 2013-01-15	2.9% (100) 是否引证: 否
17	复杂地形环境中四足机器人行走方法研究 张帅帅(导师: 李贻斌) - 《山东大学博士论文》 - 2016-05-21	2.9% (100) 是否引证: 否
18	论文4.19 - 《学术论文联合比对库》 - 2014-04-20	2.8% (98) 是否引证: 否
19	111-201220419-张帅帅-复杂地形环境中四足机器人行走方法研究 张帅帅 - 《学术论文联合比对库》 - 2016-05-27	2.8% (98) 是否引证: 否
20	蚁群算法的改进及其在若干优化问题中的应用 许凯波(导师: 鲁海燕) - 《江南大学硕士论文》 - 2018-06-01	2.3% (81) 是否引证: 否
21	002_110220027_吴国魁 吴国魁 - 《学术论文联合比对库》 - 2014-04-21	1.9% (68) 是否引证: 否
22	002_110220027_吴国魁 吴国魁 - 《学术论文联合比对库》 - 2014-05-19	1.9% (68) 是否引证: 否
23	工业机器人的碰撞辨识与安全控制 吴国魁(导师: 吴海彬) - 《福州大学硕士论文》 - 2014-06-01	1.9% (67) 是否引证: 否
		1.8% (64)

24	石化储罐除锈机器人控制系统研究 霍建玲(导师:张明路) - 《河北工业大学硕士论文》 - 2018-05-01	是否引证: 否
25	基于视觉检测的机器人抓取系统研究 马世超(导师:何宏;张在建) - 《天津理工大学硕士论文》 - 2020-06-30	1.3% (47) 是否引证: 否

原文内容

提高机器人部署的自动化程度,提高机器人运行的智能化程度,提高维护过程的数据化程度,是机器人现场使用技术发展的三个方向。 70

第6章结论与展望
智能巡检机器人在电力行业的应用实践,其理论意义在于,为智能巡检机器人研究提供了落地机会,根据工程现场的实施情况指导理论的发展和技术的进步。其学术价值在于,智能巡检机器人的研发设计,需要多个学科的研发人员参与进来推动技术的发展,借电力国企平台为国家培养专业人才,促进智能机器人在其他行业的推广和应用。其工程实用价值在于,降低一线运维人员的日常巡检工作强度,使用智能巡检机器人替代运维人员进入危险区域进行数据采集等作业,保证人员的人身安全。其社会效益和经济效益在于,智能巡检机器人对电网安全生产的数据化支撑,直接推动电网的稳定运行可靠性提升。

本文立足于工程现场实际情况,结合当前人工智能在机器人行业的前沿技术,提出了一种用于高压室巡检的智能机器人设计方案,从无到有系统性地描述了巡检类机器人的设计思想和设计流程。本文结合工程实际和产品发展,提出了巡检机器人的实用化和模块化设计原则。遵循设计原则,从需求分析、硬件方案、软件方案和使用方案四部分,系统性完成了一种使用激光雷达导航定位策略的室内巡检机器人设计方案。

其中,在高压室巡检机器人需求分析部分,立足于运维人员关注的巡检作业能力,探讨了高压室巡检机器人必备的可见光、测温、局放等巡检能力,分析了自主移动巡检平台必备的运动控制、导航定位、自动续航等核心能力。并以实现相关需求为目标,引出了机器人整机硬件方案、软件方案、使用方案三部分重要内容的具体设计。

在机器人整机硬件方案设计部分,围绕机器人运动和采集必备能力,较详细地探讨了执行机构、控制单元、采集单元、储能设备、通讯设备等硬件的选型要素和场景侧重点,并且提出了以契合需求为主要原则的硬件设备选型思想,完成了一种具有工程化落地能力的智能巡检机器人的硬件方案设计。

在机器人整机软件方案设计部分,出于研发开发量和维护扩展性考虑,本设计采用巡检机器人行业通用的 ROS 系统和 Ubuntu 系统组成开发框架。着重探讨了软件地图构建、导航定位等算法的选择考量,分析了软件系统核心算法特性和不足,完整且合理地提出了算法优化思路,并设计了算法优化方案,可以有效缓解理论算法在工程落地阶段的不足。随后,完整地介绍了节点型系统的通讯模块和调度模块的主要业务和状态告警内容。本设计完成了一套便于开发且具有良好扩展性的智能巡检机器人软件方案设计。 71

在机器人现场使用方案部分,本设计从机器人产品发到高压室现场开始,设计了以调试人员为对象的机器人部署方案,设计了以运维人员为对象的运行方案,设计了以维保人员为对象的维护方案,基本完整地覆盖了巡检机器人从出厂到停止使用的过程。

本文系统性地设计了一种用于高压室巡检的智能机器人方案,从产品生命周期不同环节的参与人员角度认真思考了机器人的合理蓝图,该设计可有效完成高压室场景的常规巡检业务,并自动保存巡检数据内容,对工业类机器人产品的设计具有重要参考意义。

纵观电力智能巡检机器人行业发展史,不难发现,我国当前在高端制造、软件系统基础平台、人工智能算法理论研究方向严重不足和近些年的较大进步。电子产品的国产化替代道路,漫长且艰难,需要社会各界共同支撑和帮扶。

同样容易了解到,电力巡检机器人在部署过程中的智能化程度并不高,大量的部署工作依赖于人工调试。优秀的产品,一定是易于生产,易于部署,易于使用,易于维护的,巡检机器人也不例外。当前巡检机器人在部署环节的困境,是行业发展必须解决的现实问题。当前,国家电网东南省份已经在推进巡检机器人部署的智能化提升,且取得了一定的进展,相信几年后的巡检机器人会更加实用、易用,为电网系统的安全稳定运行提供更大的助力。

在文章的结尾,笔者以多年电力一线运维人员的视角,期望国家发展富强,科技进步,人才涌现,社会团结。同时,笔者也希望巡检机器人的核心软硬件国产化程度进一步提高,为一线运维人员提供更加稳定更加丰富的安全保障。 72

参考文献

[1] 周风余. 110kV 输电线路自动巡检机器人系统的研究[D]. 天津大学, 2008.

[2] GB/T 7714 王晨, 崔伟, 柳文述, et al. 一种基于 Zigbee 技术的电力巡检机器人定位系统:, CN206908869U[P].

[3] 李向东, 鲁守银, 王宏, et al. 一种智能巡检机器人的体系结构分析与设计[J]. 机器人, 2005, 27(6):502-506.

[4] 王建元, 王嫻, 陈永辉, et al. 基于图论的电力巡检机器人智能寻迹方案[J]. 电力系统自动化(9):82-85.

[5] 何健, 胡宏宇, 徐波. 室内巡查挂轨机器人轨线智能跟踪方法研究[J]. 电子设计工程, 27(08):69-72+77.

[6] 王金波, 姜华, 徐鹏. 自主移动机器人巡线控制研究[J]. 自动化技术与应用 (7):21-25.

[7] 郑睿, 原魁, 李园. 一种用于移动机器人室内定位与导航的二维码[J]. 高技术通讯, 2008, 18(4):369-374.

[8] 杨秀萍, 刘嵩岩. 基于无线传感器网络的移动机器人定位导航系统[J]. 电子器件, 2007(06):291-294.

[9] 肖鹏, 栾贻青, 郭锐, et al. 变电站智能巡检机器人激光导航系统研究[J]. 自动化与仪表(5):9-13.

[10] 厉茂海, 洪炳镨, 罗荣华, 等. 基于单目视觉的移动机器人全局定位[J]. 机器人, 2007, 29(2).

- [11] Wang, Peng, Chen, Zonghai, Zhang, Qibin, et al. A loop closure improvement method of Gmapping for low cost and resolution laser scanner[J]. Ifac Papersonline, 49(12):168-173.
- [12] Meyer J. Hector Open Source Modules for Autonomous Mapping and Navigation with Rescue Robots[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2013, 8371:624-631.
- [13] Xu B, Fu Y, Zhang C, et al. Research of cartographer laser SLAM algorithm[C]// LIDAR Imaging Detection and Target Recognition 2017. 2017.
- [14] Zhang B, Liu J, Chen H. AMCL based map fusion for multi-robot SLAM with heterogenous sensors[C]// IEEE International Conference on Information & Automation. IEEE, 2013.
- 攻读博士学位期间发表的论文及其它成果 73
- [15] Hanten R, Buck S, Otte S, et al. Vector-AMCL: Vector Based Adaptive Monte Carlo Localization for Indoor Maps[C]// International Conference on Intelligent Autonomous Systems. Springer, Cham, 2016.
- [16] 王仲民, 刘继岩, 岳宏. 移动机器人自主导航技术研究综述[J]. 天津职业技术师范学院学报, 2004, 14(4):11-15.
- [17] 陈良良. 室内移动机器人自主导航与抓取规划 [D]. 广东工业大学, 2016.
- [18] 刘浩, 鲍远律. A*算法在矢量地图最优路径搜索中的应用[J]. 计算机仿真(4):259-263.
- [19] 王滨, 金明河, 谢宗武, et al. 基于启发式的快速扩展随机树路径规划算法[J]. 机械制造, 2007(12):13-16.
- [20] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的元胞自动机及模拟复杂土地利用系统[J]. 地理研究(01):19-27.
- [21] 赵艳丽. 实际路网最短路径算法优化与实现[D].
- [22] 高尚, 韩斌, 吴小俊, et al. 求解旅行商问题的混合粒子群优化算法[J]. 控制与决策(11):86-89.
- [23] 于莹莹, 陈燕, 李桃迎. 改进的遗传算法求解旅行商问题[J]. 控制与决策(08):142-147.
- [24] Fox D, Burgard W, Thrun S. The dynamic window approach to collision avoidance[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1997, 4(1):23-33.
- [25] 匡建辉, 杨宜民. 基于模糊 PD 控制的四轮驱动全向移动机器人速度补偿控制器研究[J]. 计算技术与自动化, 2011, 30(1).
- [26] 梁靓, 黄玉清, 张玲霞, et al. 机器人的差分方向控制与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2004, 2(3).
- [27] Yassin Abdelrasoul, Abu Bakar Sayuti HM Saman, Patrick Sebastian. A quantitative study of tuning ROS gmapping parameters and their effect on performing indoor 2D SLAM[C]// 2016 2nd IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation (ROMA). IEEE, 2016.
- [28] Oliver Brock, Oussama Khatib. High-speed navigation using the global dynamic window approach[C]// Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on. IEEE, 1999.
- [29] Olson E B. Real-time correlative scan matching[C]// Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on. IEEE, 2009.
- [30] OKUMA, K. A boosted particle filter: Multitarget detection and tracking[J]. 74 Eccv, 2004.
- [31] Sorenson H. Kalman Filtering: Theory and Application[M]. 1985. 75
- 攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果 77

说明: 1. 总文字复制比: 被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例

2. 去除引用文献复制比: 去除系统识别为引用的文献后, 计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

3. 去除本人文献复制比: 去除作者本人文献后, 计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

4. 单篇最大文字复制比: 被检测文献与所有相似文献比对后, 重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比

5. 指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的

6. 红色文字表示文字复制部分; 绿色文字表示引用部分; 棕灰色文字表示作者本人文献部分

7. 本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责



✉ amlc@cnki.net

🌐 <http://check.cnki.net/>

👤 <http://e.weibo.com/u/3194559873/>