



单位代码 10006

学 号 21376223

分 类 号 TP24

北京航空航天大學

B E I H A N G U N I V E R S I T Y

毕业设计(论文)

航发检测微型机器人 嵌入式控制系统设计研究

学院名称 能源与动力工程学院

专业名称 空天智能电推进技术

学生姓名 刘丹阳

指导教师 李海旺

2025 年 6 月

论文封面书脊

航发检测微型机器人嵌入式控制系统设计研究

刘丹阳

北京航空航天大学



北京航空航天大学

本科生毕业设计（论文）任务书

I、毕业设计（论文）题目：

航发检测微型机器人嵌入式控制系统设计研究

II、毕业设计（论文）使用的原始资料（数据）及设计技术要求：

设计一套嵌入式软硬件系统，能够实现课题目标机器人的控制，具体要求包括：

1、满足机器人设计的重量、尺寸等要求，控制器及可能的线路不能对机器人运动造成影响

2、能够通过 PC 实现对机器人各运动部件（包括电机、电磁铁、静电吸盘等）的驱动和单独控制，能实现各运动部件的联合控制实现机器人的各种运动形式，能在航空发动机模型中完成指定路径的运动

III、毕业设计（论文）工作内容

1、设计一套软硬件系统，能够实现同时对机器人运动相关部件实现控制，系统硬件包括个人计算机、嵌入式控制板，软件部分包括上位机操作软件、下位机 MCU 程序

2、针对机器人及运动部件设计简单运动逻辑，使之能实现自行连续运动

3、针对航空发动机检测任务中的机器人运动要求，设计完整运动逻辑，使之能自行完成运动目标



北京航空航天大学毕业设计(论文)

IV、主要参考资料

AT89C52 单片机控制的步进电机驱动设计 肖丽佳

基于 FPGA 的小型足球机器人运动控制系统的设计 汪明

基于 STM32 的全向移动机器人设计 杨军文

Low cost two-wheels self-balancing robot for control education powered by
steppermotors J.A.Borja

一种低成本可扩展的步进电机控制电路 汪利建

微型爬壁机器人运动控制的无线通信系统研究 周为

小型履带式移动机器人控制系统设计 高健

能源与动力工程学院空天智能电推进技术专业类 210431 班

学生 刘丹阳

毕业设计（论文）时间：2024 年 12 月 30 日至 2025 年 6 月 3 日

答辩时间：2024 年 6 月 3 日

成 绩：良好

指导教师：李海旺

兼职教师或答疑教师（并指出所负责部分）：

工程热物理 系（教研室）主任（签字）：董苯思

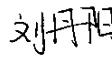
注：任务书应该附在已完成的毕业设计（论文）的首页。



本人声明

我声明，本论文及其研究工作是由本人在导师指导下独立完成的，在完成论文时所利用的一切资料均已在参考文献中列出。

作者：刘丹阳

签字：

时间：2025年6月



北京航空航天大学毕业设计(论文)



航发检测微型机器人嵌入式控制系统设计研究

学 生：刘丹阳

指导教师：李海旺

摘要

航空发动机检测要求不断提高，以微型机器人为载体的无损检测手段呈独特优势。本研究针对团队提出的分节吸附式机器人的控制过程出现的控制复杂度高、难以实现自动化等问题设计了一套嵌入式控制系统，该系统分为运动规划和规划实现两部分。本研究将本型机器人在目标环境的运动建立简化数学模型，建立机器人描述参数体系，针对本型机器人特性搭建路径规划算法，同时搭建规划结果的运动逻辑生成算法，实现根据运动目标给出运动过程。本研究统计机器人运动控制需求设计制作了 PCB 硬件控制板，利用 nRF52840 芯片编写 MCU 程序实现主控功能，并基于 python 设计了配套的上位机软件，实现手动控制，与算法结果结合实现自动连续控制。本研究对控制系统功能进行测试，其能够满足控制需求和自行完成简单运动逻辑；利用模仿环境对本系统进行测试，能够实现预期运动目标的 80%。本控制系统的研究，创新地建立了微型多自由度机器人控制系统的完整设计方法，创新地建立双节吸附型机器人的运动规划方法，对提升本型机器人运动能力及可靠性具有重要意义。

关键词：微型机器人，路径规划，嵌入式系统，串行通讯，PCB 设计



Design of Embedded Control System for Aircraft Detection Micro Robot

Author : LIU Danyang

Tutor : LI Haiwang

Abstract

The increasing demands for aero-engine inspection have highlighted the unique advantages of non-destructive testing methods utilizing miniature robots as carriers. This study addresses the issues of high control complexity and difficulties in automation encountered during the control process of the segmented adsorption robot proposed by the team. A dedicated embedded control system was designed, which is divided into two main components: motion planning and plan execution. To streamline the process, a simplified mathematical model was established to describe the robot's motion in the target environment, along with a comprehensive parameter system to characterize the robot. Path planning algorithms were developed specifically to accommodate the unique characteristics of this robot, and motion logic generation algorithms were implemented to translate planning results into actionable movement sequences based on predefined motion objectives. To meet the motion control requirements of the robot, a custom PCB hardware control board was designed and manufactured. The nRF52840 chip was utilized to program the MCU, enabling core control functionalities. Additionally, a PC-based software interface was developed using Python, providing manual control capabilities and integrating algorithmic results to achieve automated and continuous control. This study tests the functionality of the control system, which can meet control requirements and perform simple motion logic on its own. Testing this system using an imitation environment can achieve 80% of the expected motion goals. This research innovatively establishes a complete design methodology for control systems of miniature multi-degree-of-freedom robots and introduces a novel motion planning approach for dual-segment adsorption robots. These contributions are of significant importance for enhancing the motion capabilities



and reliability of this type of robot, paving the way for more efficient and precise applications in aero-engine inspection and other complex industrial environments. By addressing key challenges in control complexity and automation, this study lays a solid foundation for the future development of advanced robotic systems in specialized fields.

Key words: Micro-robot, Path planning, Embedded System, Serial Communication, Printed Circuit Board (PCB) design



目 录

| | |
|----------------------------|----|
| 1 绪论 | 1 |
| 1.1 研究背景与研究意义 | 1 |
| 1.1.1 总课题研究意义 | 1 |
| 1.1.2 子课题研究意义 | 3 |
| 1.2 国内外研究现状 | 4 |
| 1.2.1 微型机器人控制 | 4 |
| 1.2.2 多端口控制方案设计 | 6 |
| 1.2.3 机器人运动规划方案 | 7 |
| 1.2.4 小结 | 8 |
| 1.3 研究基础 | 8 |
| 1.4 研究目标 | 11 |
| 1.5 技术路线 | 12 |
| 2 运动规划算法 | 13 |
| 2.1 机器人运动描述 | 13 |
| 2.1.1 基本假设与模型说明 | 13 |
| 2.1.2 建立坐标系 | 13 |
| 2.1.3 机器人运动模型与基本运动形式 | 13 |
| 2.1.4 机器人参数的建立 | 15 |
| 2.1.5 机器人参数计算 | 17 |
| 2.2 机器人运动规划 | 19 |
| 2.2.1 机器人路径规划 | 19 |
| 2.2.2 机器人运动逻辑设计 | 22 |
| 2.3 小结 | 24 |
| 3 控制系统设计 | 25 |
| 3.1 下位机设计 | 25 |
| 3.1.1 电路原理 | 25 |



| | |
|-------------------------|----|
| 3.1.2 PCB 设计 | 27 |
| 3.1.3 下位机与机器人连接设计 | 29 |
| 3.1.4 下位机程序设计 | 30 |
| 3.2 上位机开发 | 31 |
| 3.2.1 用户界面 | 32 |
| 3.2.2 通信模块 | 33 |
| 3.2.3 任务调度与控制模块 | 33 |
| 3.2.4 上位机总逻辑 | 34 |
| 3.3 小结 | 34 |
| 4 控制系统测试 | 35 |
| 4.1 上下位机程序测试 | 35 |
| 4.2 机器人部件驱动控制测试 | 36 |
| 4.3 机器人连续运动测试 | 38 |
| 4.4 小结 | 39 |
| 结论 | 40 |
| 致谢 | 42 |
| 参考文献 | 43 |



1 绪论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 总课题研究意义

航空发动机检测技术是飞行器可靠性、安全性保障的重要环节。据 2011 年统计数据，在军用飞机的飞行事故中，由发动机故障原因造成的占比约为 55%；而在民用飞机的飞行事故中，由发动机故障原因造成的占比约为 60%^[1]。

航空发动机检测技术可以在地勤阶段及时发现发动机内部异常情况，快速判定发动机是否具备继续执行飞行任务的能力。因此，航发检测技术是降低发动机故障率，提升飞行器可靠性的最直接方式。先进的航空发动机检测技术可以通过航发检测快速评估与决策，显著提升飞行器的快速恢复能力，实现损伤装备快速修复、再利用，快速恢复空中有生力量，帮助国家在空天领域取得战略优势。因此，先进的航空发动机检测技术在未来空天领域具有重要的战略意义。

随着时代的发展，传统航空发动机检测技术的局限性愈发凸显。传统航空发动机检测主要依靠人工检测和手持内窥镜检测的方法开展检测作业。在执行检测任务时，需要检修人员通过目视检查发动机流道内是否存在异物、叶片或机匣是否存在裂纹等。检测精度较低，检测覆盖率不足，具有一定人力成本。随着航空业对于飞行器可靠性需求的进一步提升，以及飞行任务频次的持续增加，传统航发检测方式已逐渐难以满足行业需求。

当前我国航空产业军民领域对于先进航空发动机检测技术有着迫切需求，急需利用先进航空发动机检测技术进一步提升飞行器可靠性。在军用方面，飞行器可靠性是飞行员的生命线。除了进一步改良设计提升飞行器可靠性意外，更要求地面空勤通过高效、先进、低成本的技术手段完成发动机快速检修，实现空中战力快速恢复。在民用方面，飞行器可靠性是高频次飞行任务的重要安全保障。随着民用飞行任务频次快速增长，迫切需要低成本、高可靠性、高置信度的航发检测技术进一步降低飞行器故障率，保障乘客的生命财产安全。

新型航空发动机检测技术应当具有如下三个重要特征。（1）高检测覆盖率。该类技术应当具备优良的机械缝隙通过性、空间位置可达性，能够在航空发动机等复杂机械装



备未拆解的情况下进入机械内部，具备抵达目标检测位置的能力，从而实现机械检测全覆盖。（2）多维度信息采集。该类技术应当形成全面的信息采集矩阵，具备采集多维度信息的作业能力，通过先进传感器技术获取航空发动机内部各点位的实时情况，实现接近于整机拆解作业的检测效果。（3）快速评估与辅助决策。该类技术应当具备高度的自动化水平，可以一定程度上脱离人工执行自主作业，具备异物检测、故障识别等能力，快速形成检测报告，对航空发动机内部的故障情况综合评估，辅助地勤人员进行快速决策。

应用微型机器人进行航空发动机检测是最具潜力的新型技术方案之一。微型机器人通常指体积在 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 以内的机械系统，具备通过狭小机械缝隙、快速灵活机动、抵达目标检测位置的运动能力，以及携带多种传感器、采集多维度信息的检测能力。作为一种高度集成的无人系统，微型机器人技术可进一步实现机器人阵列协同作业、自主路径规划、自主故障识别与分析。该类技术的高技术集成优势使其具备执行自动化作业的能力，能够有效适应和解决行业需求。

目前微型机器人检测技术仍处于起步阶段。领域内多数微型机器人技术方案以前期技术验证为出发点，仅能够适用平坦地面环境。目前尚未涌现具有一定成熟度的面向航空发动机复杂环境检测作业的微型机器人技术方案。微型机器人技术在航空发动机检测领域应用困难，主要有以下三个因素：（1）苛刻的尺寸要求。航空发动机压气机、涡轮流道内存在大量叶片，是检测作业的重要对象。微型机器人需要具备在叶片级间穿梭、机动的能力，对其尺寸与系统集成度的要求苛刻。（2）复杂的检测环境。航空发动机流道内部几何特征复杂，存在大量缝隙、阶梯、障碍。除此以外，机匣与叶片表面还往往附着有油污和灰尘。种种因素使得微型机器人难以具备与在实验室环境内同样优良的运动表现。（3）高运动可靠性要求。微型机器人往往运动自由度少，形式单一。在航空发动机检测作业中常出现因意外因素倾倒、卡死等情形，使得微型机器人运动瘫痪。这要求微型机器人具备高度的运动可靠性，初步具备从异常状态中恢复常态的运动能力，从而具备持续作业能力。

基于上述原因，本研究提出课题“航空发动机检测微型机器人技术研究”，面向航空发动机检测实际需求，通过团队协作、技术创新，实现了一种应用微型机器人的新型航空发动机快速检测与评估技术。总课题以微型机器人检测技术在航空发动机检测中的具体应用为切入点，设计制作微型机器人系统，为航空发动机微型机器人检测的难题提出



一种初步的解决方案。该方案从实际应用出发，设立五个子课题分别开展研究。其研究内容关系如图 1.1 所示。



图 1.1 研究内容关系图

总课题“航空发动机检测微型机器人技术”下属的五个子课题间互有交叉、配合，通过团队协作的方式，共同完成了一项以航发检测领域需求为出发点、以工程设计应用要求为落脚点的微型机器人技术研究，相应成果有望快速应用于航空发动机与燃气轮机的检测作业试验中，为行业提供新的机械检测技术方案。

1.1.2 子课题研究意义

本研究提出的高适应性分节式吸附型机器人如图 1.2 所示，其具有四个自由度，能实现直线前进、转弯、爬壁、直角壁面转移、倒悬前进等多种运动模态，可以适应多种应用场景，能应用于航空发动机内部这类复杂的作业环境，同时其预期带载能力强，能够携带多种功能组件，实现航空发动机内部检测功能，以及姿态监控等多种其他功能。

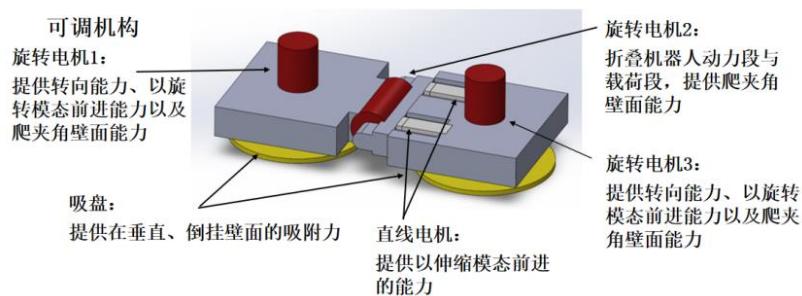


图 1.2 高适应性分节式吸附型机器人示意图

上述机器构型在理想情况下能够实现良好的运动功能，但在实际研究中机器人的



运动控制出现了一些问题：

- (1) 机器人的多自由度要求具有多个独立驱动控制端口，控制复杂度高；
- (2) 机器人运动部件的驱动要求不同，不同的供电需求增加了驱动复杂性；
- (3) 应用要求的高可靠性与高自动化程度要求机器人随体携带控制器，但机器人尺寸和荷载要求限制了控制器的尺寸和质量；
- (4) 使用要求操作简洁性、快速性，而依靠操作者精确操纵到每一个部件十分困难。依靠操作者手动控制精确操作每一个运动部件；
- (5) 应用环境和机器人运动情况从外界无法观察，难以观察运动控制过程，需要机器人能够自行完成运动过程。

综合上述存在问题，本研究希望改善机器人驱动控制方式，使机器人控制操作大幅简化，实现高程度自动化、高可靠性，使机器人能够运动到航空发动机的指定位置，进而能够满足航空发动机内检视的要求。

1.2 国内外研究现状

根据机器人控制系统面临的问题，本研究对微型机器人的控制展开调研，并关注机器人多自由度、多端口控制方案设计以及机器人运动规划方案设计。

1.2.1 微型机器人控制

基于面向机器人的运动原理，本研究关注电磁驱动原理的机器人控制方案。

北京航空航天大学能源与动力工程学院闫晓军教授团队^[2,3]曾提出了一种直接由电磁感应共振驱动的微型爬行机器人。这款机器人体长约 12.3 mm，质量 137 mg。在通过引线供电外加 4 V 交流电压，能够达到 232 mm/s 的最大爬行速度。

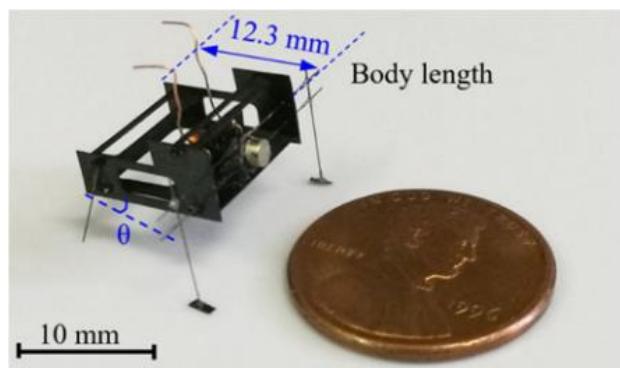


图 1.3 电磁感应共振驱动的微型爬行机器人^[2]

2020 年，美国加州大学伯克利分校环境工程系的 Bhushan 等人^[4]研究了一种昆虫尺

度的无线滚动式微型机器人。尺寸为 $18\text{ mm} \times 8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。该机器人依靠可低压电磁执行器（1~3 V）以及新颖的双棘轮机构驱动连续旋转的轮子实现运动。

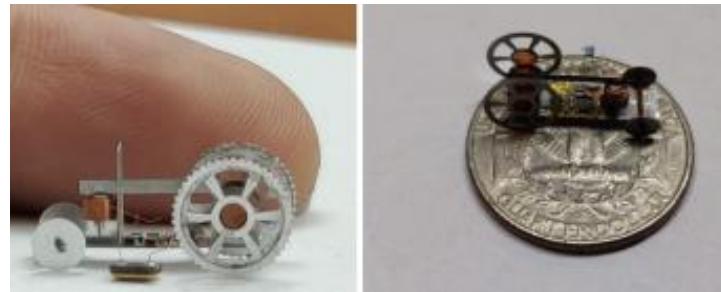


图 1.4 无线滚动式微型机器人^[4]

美国佛蒙特大学机械工程系的 Fath 等人^[5]基于偏心质量直流电机制作了一种重量为 22 g、长度为 4.7 cm 的微型机器人 MARSBot，样机如图 1.5 所示。只需要 3.3 V 作为微控制器和直流电机的输入即可运行。

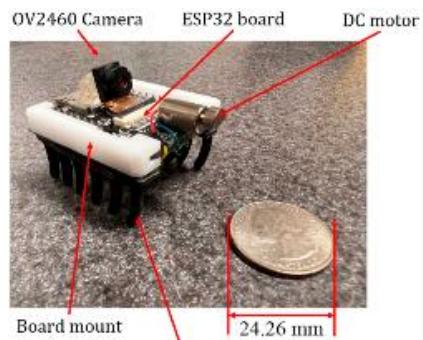


图 1.5 Fath 等人制作的 MARSBot

Kyung-min Lee 等人^[5]制作了一种新型尺蠖机器人，它由电磁振荡致动器（EOA）和爪组成。EOA 由磁轭、磁铁和线圈组成。整个机器人尺寸为 $12.2\text{mm} \times 11\text{mm} \times 9\text{mm}$ 。当机器人伸展和收缩前腿时，机器人的运动是通过不同滑动量来实现的。使用简单的基于运算放大器的驱动电路来提供方波输入^[6]。

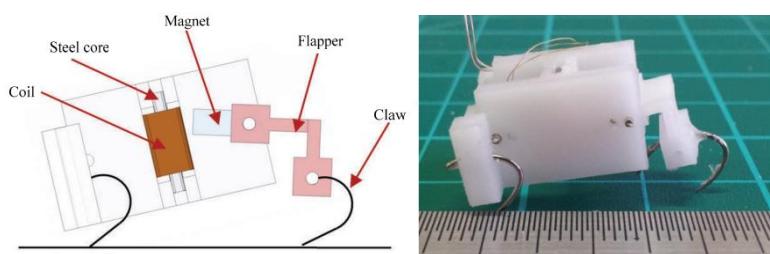


图 1.6 Kyung-min Lee 等制作的尺蠖机器人^[6]

通过调研发现，微型机器人尺寸、质量小，但是它们的运动机构普遍单一，运动形式简单，控制复杂性低，控制器简单，难以满足前述目标机器人多端口、多需求的控制要求。



1.2.2 多端口控制方案设计

多端口控制系统设计中，汪明^[7]针对小型足球机器人提出了一套运动控制方案，底层电路和基于 FPGA 的 SOPC（片上可编程）系统共同构成整个控制系统的硬件电路。底层电路系统包括通信、击球、红外测球、电机驱动和电源模块等各子系统。利用基于 FPGA 的 SOPC 系统解决了机器人模块无处理器结构中一处修改整个系统就要修改的弊病，可以简化系统的设计结构，减小系统的体积，降低功耗，方便系统的升级和修改，提高了系统的灵活性。通信方面由 PTR4000 模块同主机进行无线收发，PTR400 与从机之间通过 SPI 接口连接。

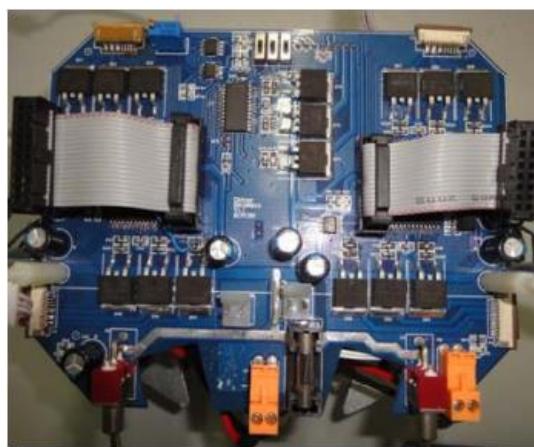
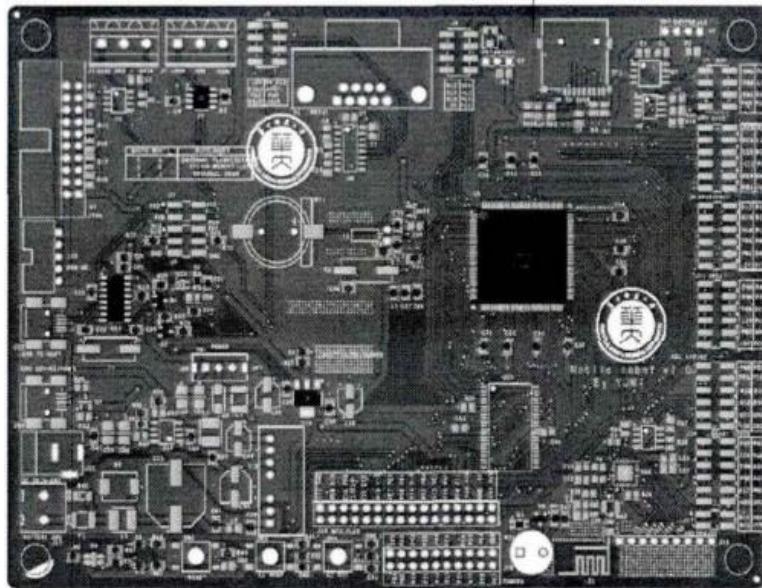


图 1.7 小型足球机器人控制硬件^[7]

杨军文^[8]针对全向移动机器人提出一套控制系统，对核心部件麦克纳姆轮运动学分析，硬件中使用 STM32 作为主控，考虑其最小系统，采用 WIFI 通信方式，考虑单片机程序下载和通信添加 USB 转串口模块和 JTAG 下载模块，考虑到电机、驱动芯片、主控芯片等工作电压的不同添加了电源管理模块。硬件设计方面采用 Allegro Design Entry CIS 软件进行原理图设计，采用 Allegro PCB Editor 进行 PCB 设计。软件方面由上位机安卓 APP、WiFi 通信模块 OpenWrt 嵌入式操作系统移植与 MJPG-Streamer 流媒体服务器搭建、下位机控制器程序三部分组成。

通过调研发现，多端口控制系统的主要设计特点是，控制器硬件由成熟模块的组合连接或者电路板印刷制作而成，功能丰富，常在 PC 或移动电子设备编写上位机控制软件，通过 WIFI 等通信方式与下位机通讯而实现控制，但其控制器体积普遍较大，应用同样方法应注意缩小控制器体积。

图 1.8 全向移动机器人控制板^[8]

1.2.3 机器人运动规划方案

在运动路径规划中，现有的研究方法可以大致分为三类。

第一类是基于图搜索的路径规划算法，如 Dijkstra 算法和 A*算法。这类路径规划算法将地图栅格化，基于格点进行路径搜索和规划。Dijkstra 算法以起始节点为中心不断迭代，寻找距离最近的节点，将其作为下一次搜索的中心节点，在每一次迭代结束后，更新起始节点与所有遍历的节点间的最短距离，最终获得所规划路径的最短距离^[9]。A* 算法是一种启发式搜索算法，以起始节点为中心，向邻近节点扩展，对邻近节点进行代价评估，代价函数最低的节点作为下一个扩展节点进行遍历，从而完成路径规划^[10]。基于图搜索的路径规划算法是离散规划方法，其精度取决于网格的大小。网格尺寸越小，路径越平滑，但计算复杂度越高。大量研究对图搜索方法所得结果进行形状上的优化^[11]，如 Zhu 等人^[12]对折线路径采用多项式优化。而 Li 等人^[13]在 A*算法路径生成后使用自适应追踪重新生成平滑新路径。

第二类是基于优化的路径规划算法，如人工势场法 (APF)。这些方法通常依赖于对环境精确数学建模，以建立该模型与最优路径生成之间的对应关系^[14]。这种方法有效地解决了环境约束，如避障问题。

第三类是基于采样的路径规划方法，如快速探索随机树 (RRT) 和概率路线图 (PRM) 算法^[15]。基于采样的路径规划算法能够解决复杂环境下实体的路径规划问题。其核心思想是通过在状态空间中随机或有策略地采样点，构建一个能够连通起点和终点的图结构



或树结构。基于采样的路径规划方法概率完备且广泛适用，这些优点使其在具有约束的路径规划任务中得到了广泛的应用^[16,17]。但由于基于采样的路径规划方法缺乏启发函数且其空间连续，它的计算效率较低，并取决于生成随机点的有效性。大量研究提出提高计算效率的方法，主要途径是优化路径搜索效率和随机点生成方式^[18]。为提高路径搜索效率，有学者提出了双向路径规划算法和双树搜索方法，如 RRT Connect^[19]。为提高随机点生成效率，通常采用缩小采样空间的方式，如 Inform RRT 算法将采样空间限制在两个粗采样点为焦点的椭圆范围内^[20]。RRT*FN 算法提出了一种修剪优化策略^[21]。

在运动路径规划的研究中存在以单点作为运动路径规划的对象的特点，而目标机器人前后节间可相对位移的特性使得其并不能以单点轨迹描述；且上述路径规划方法或针对二维平面或针对三维空间，与本型机器人在航空发动机内腔表面（二维曲面）的特点不符，不能直接利用。但是上述路径规划方法中的栅格化、随机搜索、评价机制等思想可以作为路径规划的参考。

1.2.4 小结

对现有研究的调研可发现：微型机器人的控制系统由于机器人自由度少、控制方式简单而难以作为本型机器人控制系统设计的参考；多端口控制系统的硬件控制器则体积偏大，目标机器人难以携带。而运动规划方法由于规划对象和规划环境特点不能直接应用于机器人，但其思想仍可以借鉴。

1.3 研究基础

本研究基于图 1.1 构型的机器人实现，其具有四个活动构件和两个吸附装置，具有多自由度，通过吸盘的吸附/脱附和活动构件的运动可以完成多种运动形式。本研究对机器人结构及运动方式做介绍，以下进行几种运动方式的说明以表达机器人的运动原理。

(1) 伸缩前进运动

伸缩前进运动如图 1.9。这一过程需要直线电机与两吸盘的协同配合，按“吸盘 1 吸附、吸盘 2 释放→直线电机推出→吸盘 2 吸附、吸盘 1 释放→直线电机回缩→吸盘 1 吸附、吸盘 2 释放→……”循环即可实现。

(2) 旋转前进运动

伸缩前进运动如图 1.10，过程需要两旋转电机与两吸盘的协同配合，按“吸盘 1 吸附、吸盘 2 释放→旋转电机 1 旋转 180°→吸盘 2 吸附、吸盘 1 释放→旋转电机 2 旋



转 180° →吸盘 1 吸附、吸盘 2 释放→……”循环即可实现。由于机器人两吸盘间距大于直线电机行程，因此旋转前进方式运动速度更快。

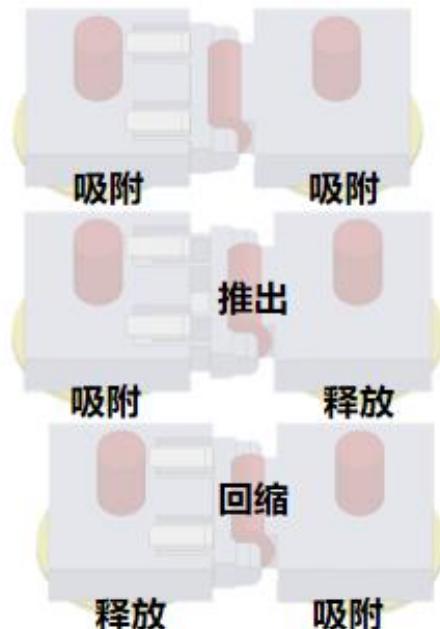


图 1.9 伸缩前进运动过程

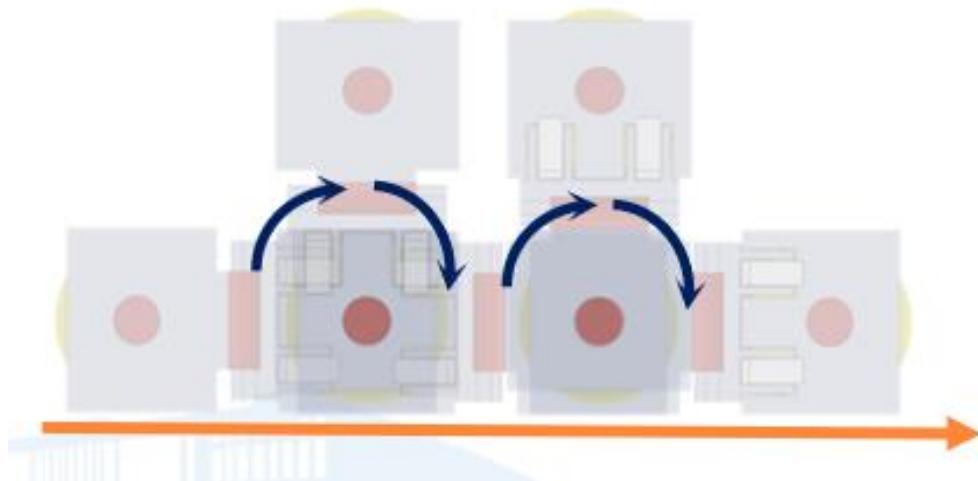


图 1.10 旋转前进运动过程

(3) 圆弧壁面爬行

该运动如图 1.11, 过程与水平面伸缩前进运动相似, 但圆弧壁面相比于水平面, 直线电机推出后吸盘与壁面形成交角, 因此需要圆弧壁面爬行运动需要中间电机加入配合, 按“吸盘 1 吸附、吸盘 2 释放→中间电机内折→直线电机推出→中间电机外展至与吸盘 2 与壁面贴合→吸盘 2 吸附、吸盘 1 释放→直线电机回缩, 中间电机外展→吸盘 1 吸附、吸盘 2 释放→……”循环即可实现。这一运动形式基于航空发动机内部弧形腔体表面的运

动要求。

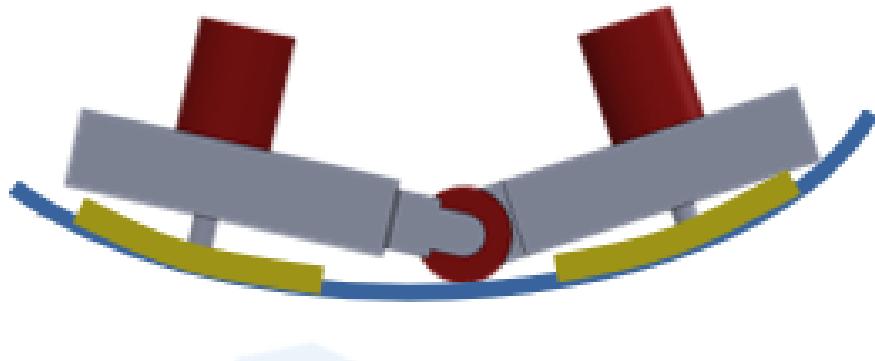


图 1.11 圆弧壁面爬行示意

(4) 直角壁面转移

该运动如图 1.12, 需要除直线电机以外的所有部件协同, 按“吸盘 1 吸附, 吸盘 2 释放→中间电机内折 $>90^\circ$ →旋转电机 1 旋转 180° →中间电机外展至吸盘 2 与壁面贴合→吸盘 2 吸附, 吸盘 1 释放→电机 2 旋转 180° →中间电机外展至吸盘 1 与壁面贴合→”循环即可实现。该运动形式使机器人攀爬壁面, 以至于在航空发动机叶片表面与内腔表面的转移都可以实现, 极大地拓展了机器人的灵活性。

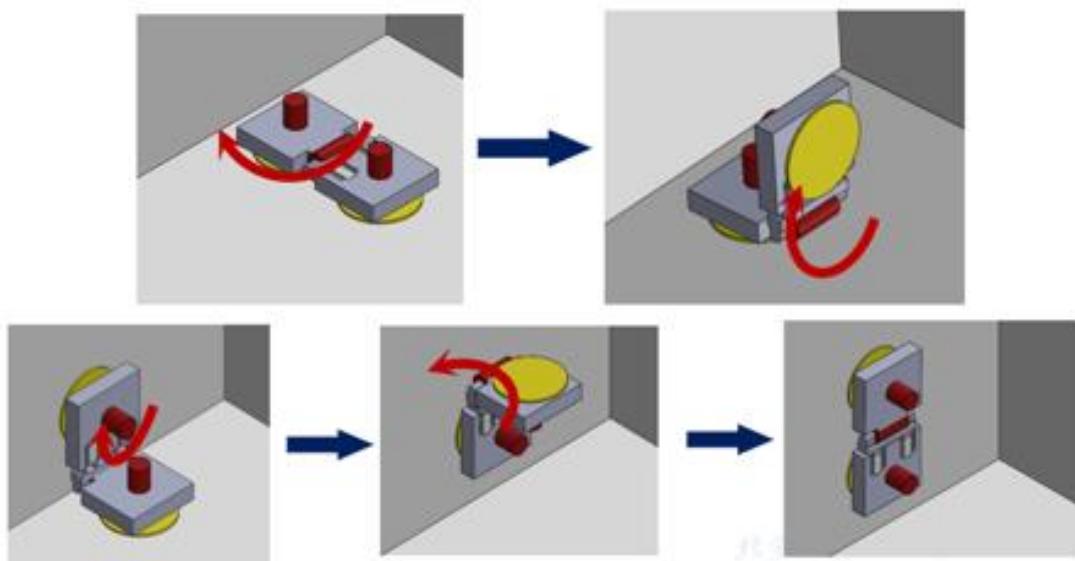


图 1.12 直角壁面转移运动流程图

本研究对这些运动形式进行归纳, 以“+”“-”“0”分别表示电机的正、反、停转, 用“1”“0”分别表示吸盘的吸附、释放, 可以得到运动逻辑归纳表格表 1.1。



表 1.1 机器人运动逻辑归纳

| 运动形式 | 步 | 旋转电机 1 | 旋转电机 2 | 中间电机 | 直线电机 | 吸盘 1 | 吸盘 2 |
|------------|-----|--------|--------|------|------|------|------|
| 伸缩前进 | 1 | 0 | 0 | 0 | + | 1 | 0 |
| | 2 | 0 | 0 | 0 | - | 0 | 1 |
| | ... | 循环 | | | | | |
| 旋转前进 | 1 | + | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 2 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | ... | 循环 | | | | | |
| 圆弧表面 前进 | 1 | 0 | 0 | + | + | 0 | 1 |
| | 2 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | - | - | 1 | 1 |
| | ... | 循环 | | | | | |
| 直角壁面 转移 | 1 | 0 | 0 | + | 0 | 1 | 0 |
| | 2 | + | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| | 3 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 1 |
| | 4 | 0 | + | 0 | 0 | 0 | 1 |
| | 5 | 0 | 0 | - | 0 | 1 | 1 |

上述运动类型均已在航空发动机/燃气轮机内腔得到应用验证，证明了机器人结构及运动形式的合理性。同时，该型机器人的运动构件全部通过漆包线外接至手动控制器，走线复杂，易出现机械干涉导致的断线，降低了可靠性，且手动控制要求机器人操作者时刻观察操作，难度极大。本研究目标即解决机器人的这些控制问题。



图 1.13 本型机器人在航空发动机的应用

1.4 研究目标

根据机器人运动性能及操纵性能要求，本研究列出以下目标：

- (1) 设计一套软硬件系统，能够实现同时对机器人运动相关部件实现控制，系统包括机器人携带的硬件嵌入式控制板，电脑操作软件，控制板实现对机器人所有运动部件



的驱动与控制，同时其面积和重量能够被机器人携带且不影响其运动性能，电脑操作软件能对机器人实现简单、准确、灵活控制；

(2) 针对机器人及运动部件设计简单运动逻辑，使之能实现自行连续运动；

(3) 针对航空发动机检测任务中的机器人运动要求，设计完整运动逻辑，使之能自行完成运动目标。

1.5 技术路线

根据研究目标，本研究安排技术路线如图 1.14：

(1) 嵌入式控制板硬件：面向小尺寸要求下多个独立驱动控制端口的需求，需要进行高度紧凑PCB设计和制造，通过立创EDA进行电路原理的设计及PCB设计，交由代工厂制作；

(2) 嵌入式控制程序设计：面向多独立驱动端口的控制需求和与外部上位机的通信需求，需要进行单片机程序设计；

(3) 上位操作软件开发：面向简洁性、快速性的操作需求，需要进行上位机软件开发，通过python实现；面向用户友好的操作界面需求，需要进行UI界面设计，通过Qt（图形界面工具包）实现；

(4) 机器人运动逻辑生成算法：面向航空发动机内部复杂结构和封闭环境中自动化运动的需求，需要进行针对本研究所指机器人的运动逻辑生成算法的设计，包括运动学建模、环境建模与运动逻辑求解程序，通过matlab实现。



图 1.14 本课题技术路线



2 运动规划算法

本研究所述运动规划算法，是当确定机器人参数、确定爬行环境参数时，给出机器人起始点与目标点位置，即可求出机器人完整运动过程的运动逻辑的一套算法，包括机器人每一步各控制部件的状态，以及该状态持续的时间。运动逻辑生成算法部分的研究，可以分为机器人运动模型建立、路径规划算法的研究与规划路径的运动逻辑执行研究^[22]。对于本型机器人，其构型完全创新，其运动方式与形成的运动逻辑完全不同，且运动环境在航发/燃机中，其具有运动空间狭小和旋转对称性等特点，所以机器人的运动模型、环境模型及路径规划的方式都需要做针对性的研究。

2.1 机器人运动描述

要实现对特定机器人的运动规划，就需要研究其在特定环境内的运动特性，为此本研究对本型机器人在航空发动机内的运动过程进行数学建模，以研究其运动过程的数学关系。

2.1.1 基本假设与模型说明

由于机器人尺寸相对航发/燃机内壁尺寸很小，相对于内壁的曲率半径很小，机器人在任意时刻所在的壁面可以视为一圆柱面。根据前序研究和实地测试现象，模型中暂时以机器人的伸缩爬行运动为主要考虑，认为航发/燃机内壁环境在这种运动形式下在数学意义上为光滑面，忽略可能存在的凸台等，因为它们对应机器人的壁面转移等其他运动形式。

2.1.2 建立坐标系

考虑航发/燃气轮机内壁具有的旋转体特性，内壁表面的任意一点都可以用沿航发/燃机轴线的位移 X 与从横截面看去的旋转角 θ 两坐标表示，如图 2.1所示。而与之相对应，机器人所在位置横截面的半径 R 是 X 的函数。

$$R = R(X) \quad (2.1)$$

2.1.3 机器人运动模型与基本运动形式

当机器人仅有直线电机、中间旋转电机运动而两节中心旋转电机保持静止时，机器

人保持在一平面内运动，而该平面与航发/燃机内壁面相交所得曲线在机器人所在范围内可以视为一椭圆。机器人在该平面内的运动可以简化为两个可相对位移、相对旋转的三角形的运动，如图 2.2 所示，图中给出了机器人简化模型的尺寸 d_1 、 d_2 与 h ，其中 h 表示在机器人水平放置情况下中心电机转轴到水平面的高度， d_1 、 d_2 表示当直线电机行程为 0 时双足吸盘中心到中间电机转轴的水平距离。

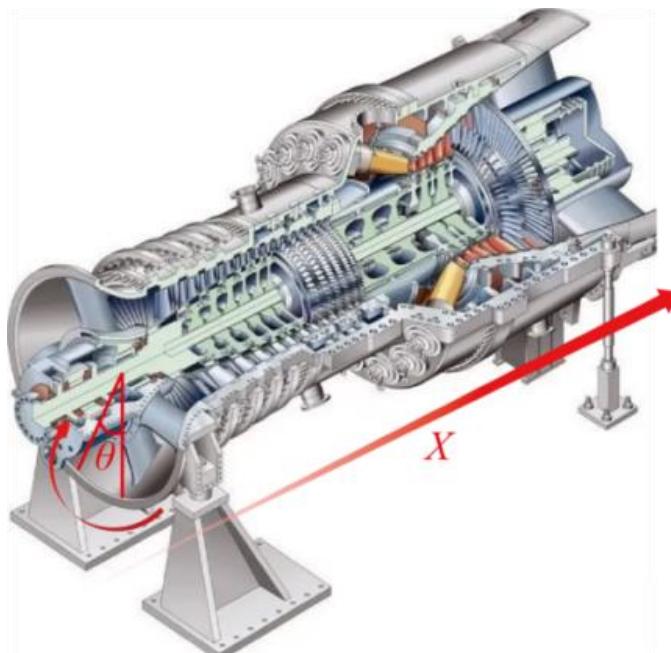


图 2.1 坐标系示意图

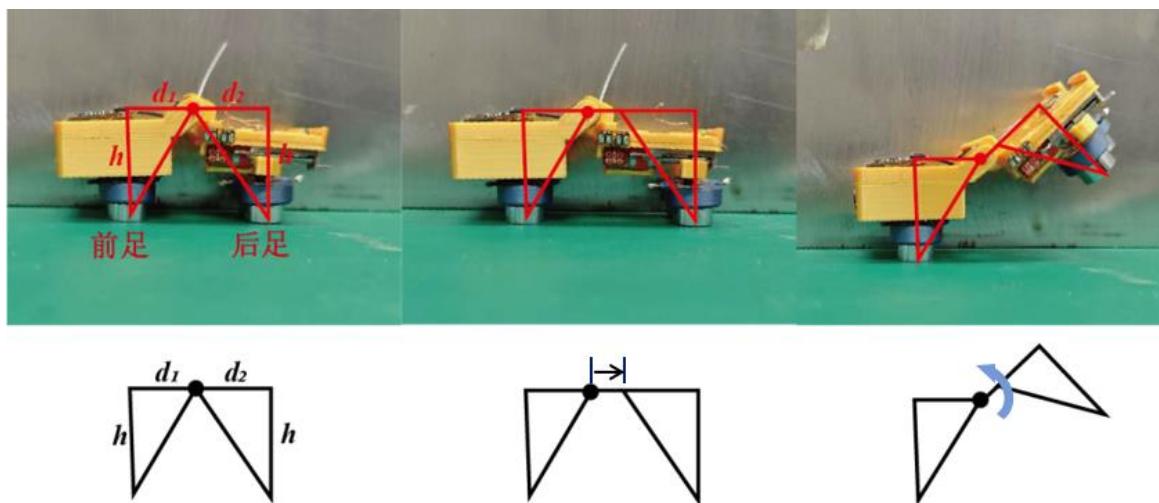


图 2.2 机器人平面内运动的简化

由此，机器人吸盘与内壁面的接触吸附过程简化为三角形的下顶点与椭圆曲线的重合过程，进一步可简化为小圆与椭圆的相交求交点问题。

在吸盘吸附、旋转电机旋转时，可认为是机器人所在平面的旋转，按上述逻辑同样

可以简化为小圆与椭圆的求交点问题，如图 2.3。

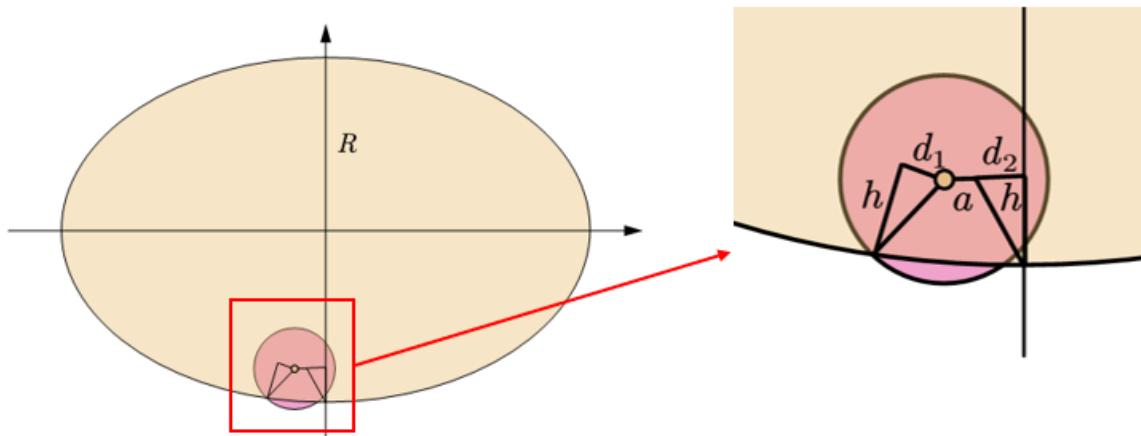


图 2.3 机器人平面运动简化求解示意图

2.1.4 机器人参数的建立

(1) 机器人运动状态数组：由于机器人具有六组可控部件，用机器人运动状态数组 P 表示机器人的运动状态。P[1]、P[2]、P[3]、P[4] 分别表示直线电机、前旋转电机、后旋转电机、中间电机的旋转状态，以 1 代表正转，2 代表反转，0 代表停转；P[5] 与 P[6] 分别代表前吸盘与后吸盘的状态，1 代表打开，0 代表关闭。本研究规定了电机的正反转向问题，对于直线电机，使机器人双吸盘间远离为正，靠近为反；对于前后旋转电机，垂直观察机器人的上表面，使机器人逆时针旋转为正，顺时针旋转为反；对于中间电机，使机器人上表面彼此贴近的方向为正方向，反之为反。经分析，机器人允许运动状态数组共有 55 种可能，其中 15 种有不多于一个的运动部件在运动，称为单一运动形式，40 种有不少于 2 个的运动部件在运动，称为复合运动形式，运动状态数组列于表 2.1。

(2) 机器人部件运动参数：对机器人运动部件的转速进行规定。规定直线电机伸缩速度为 u ，前旋转电机、后旋转电机、中间电机角速度分别为 ω_1 、 ω_2 、 ω_3 。本条所述转速均为绝对值。

(3) 机器人姿态参数：对机器人在环境内的姿态作规定。经分析，需要规定如下三个姿态参数：机器人前进方向角，机器人简化三角形所在平面与环境轴线的线面角，以字母 φ 表示，范围 $[-\pi, \pi]$ ；翻折角，机器人两节间相对转动的角度，用字母 γ 表示，范围 $[-\pi/2, \pi]$ ；直线电机行程，可以用于推算两节间相对位移，用字母 a 表示，范围 $[0, s]$ ，其中 s 为直线电机最大行程。三种姿态参数示意如图 2.4。



表 2.1 运动状态数组

| 运动状态数 | 动作模式 | 动作类型 | 运动状态数 | 动作模式 | 动作类型 |
|--------|-------|--------|--------|--------|------|
| 000011 | 静止 | 单一运动形式 | 201010 | 复合运动形式 | ... |
| 000010 | 静止 | | 102010 | | |
| 000001 | 静止 | | 202010 | | |
| 100010 | 后节伸 | | 001101 | | |
| 200010 | 后节缩 | | 001201 | | |
| 100001 | 前节伸 | | 002101 | | |
| 200001 | 前节缩 | | 002201 | | |
| 010010 | 前轴逆时针 | | 110010 | | |
| 020010 | 前轴顺时针 | | 120010 | | |
| 010001 | 后轴逆时针 | | 210010 | | |
| 020001 | 后轴顺时针 | | 220010 | | |
| 000101 | 前节折起 | | 110110 | | |
| 000201 | 前节放下 | | 110210 | | |
| 000110 | 后节折起 | | 120110 | | |
| 000210 | 后节放下 | | 120210 | | |
| 100101 | ... | 复合运动形式 | 210110 | ... | ... |
| 200101 | | | 210210 | | |
| 100201 | | | 220110 | | |
| 200201 | | | 220210 | | |
| 100110 | | | 101101 | | |
| 200110 | | | 101201 | | |
| 100210 | | | 102101 | | |
| 200210 | | | 102201 | | |
| 101001 | | | 201101 | | |
| 201001 | | | 201201 | | |
| 102001 | | | 202101 | | |
| 202001 | | | 202201 | | |
| 101010 | | | | | |

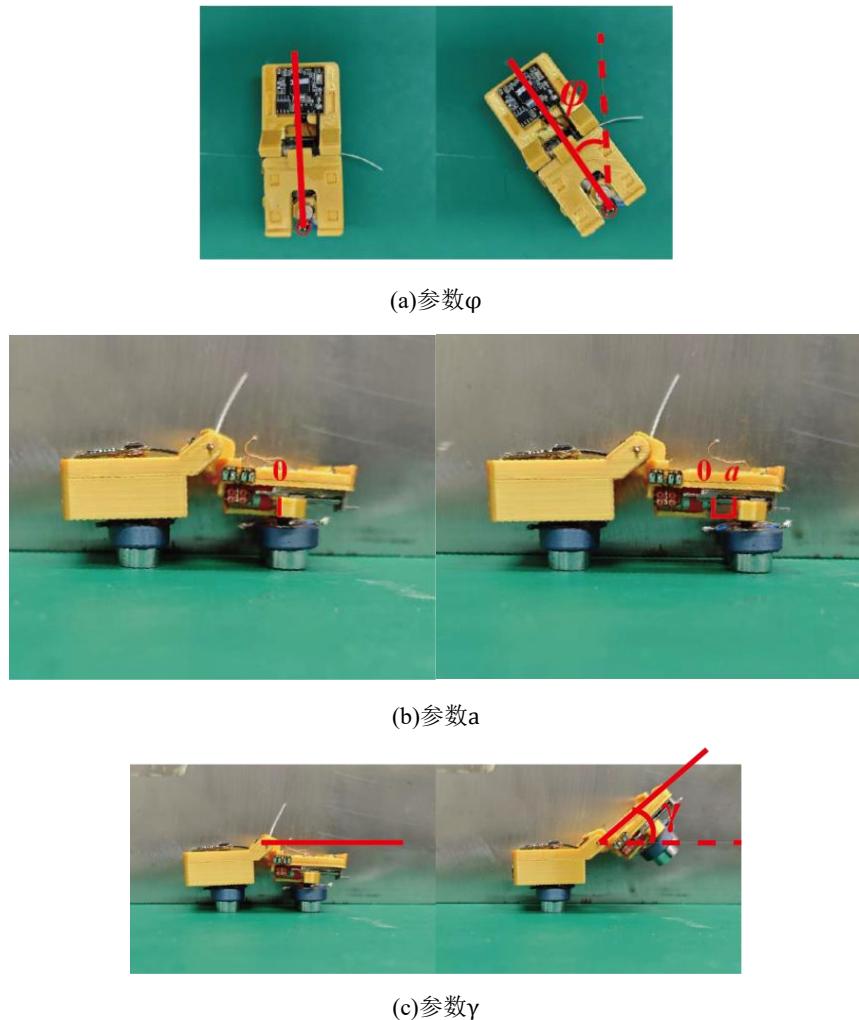


图 2.4 机器人姿态参数示意图

机器人位置参数：由2.1.2中所述，可将机器人吸附于壁面的吸盘中心位置用 (X, θ) 坐标表示，结合机器人姿态参数即可获知机器人的全部位姿信息。

2.1.5 机器人参数计算

为实现机器人的运动计算，需建立机器人各参数间的计算关系。

首先是机器人运动状态数组、部件运动参数与机器人姿态参数的关系。易见，机器人姿态参数的变化量可以列出式(2.2):

$$\begin{cases} \Delta\varphi = (\omega_1 S[2] + \omega_2 S[3]) \Delta t \\ \Delta\gamma = \omega_3 S[4] \Delta t & (\text{if } S[i] = 2, S[i] = -1, i = 1, 2, 3, 4) \\ \Delta a = u S[1] \Delta t \end{cases} \quad (2.2)$$

其次是机器人姿态参数与位置参数关系的建立。根据前述假设，机器人在壁面上的爬行可以视为二维上的三角形模型在机器人所在平面与圆柱面相交所得椭圆上爬行，该

椭圆的方程为：

$$\left(\frac{x \sin \varphi}{R}\right)^2 + \left(\frac{y}{R}\right)^2 = 1 \quad (2.3)$$

而此时机器人一足可以当作是(0,-R)点，由(3)知，可以将求机器人另一足落点的问题转化为小圆与椭圆求交点的问题，如图2.5。此时应当注意，已知机器人前足位置求后足落点的问题与已知机器人后足位置求前足落点的问题中方程略有不同，已知机器人后足位置求前足落点时小圆的方程应当列成：

$$(x + d_2 + a)^2 + (y + R - h)^2 = d_1^2 + h^2 \quad (2.4)$$

而已知机器人前足位置求后足落点是小圆的方程应当列成：

$$(x - d_1)^2 + (y + R - h)^2 = (a + d_2)^2 + h^2 \quad (2.5)$$

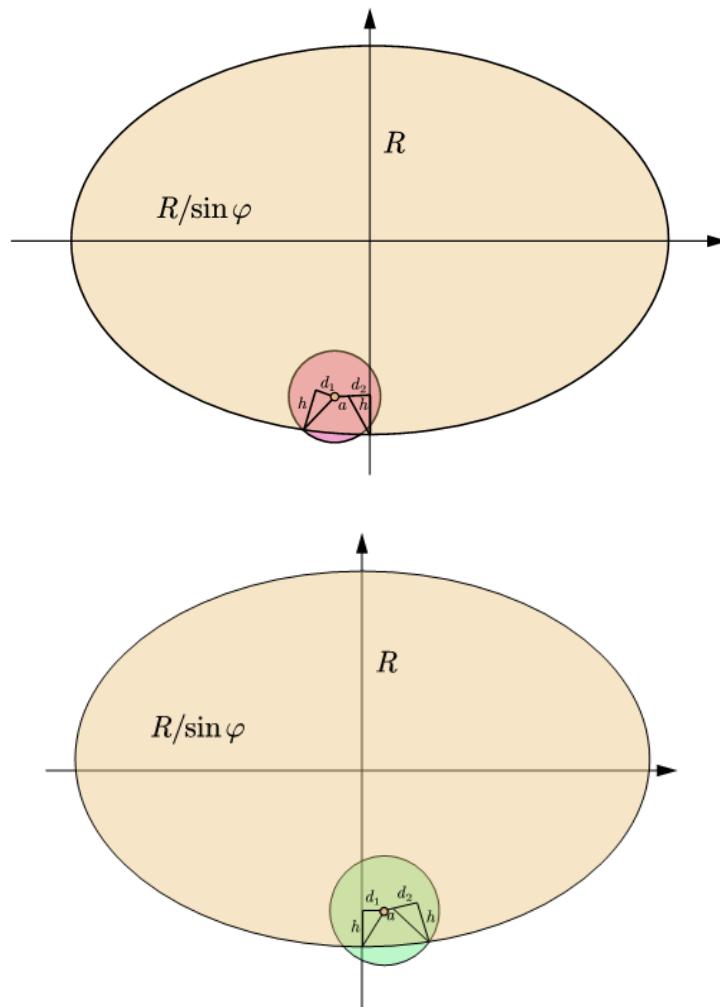


图 2.5 机器人足落点求解平面示意图

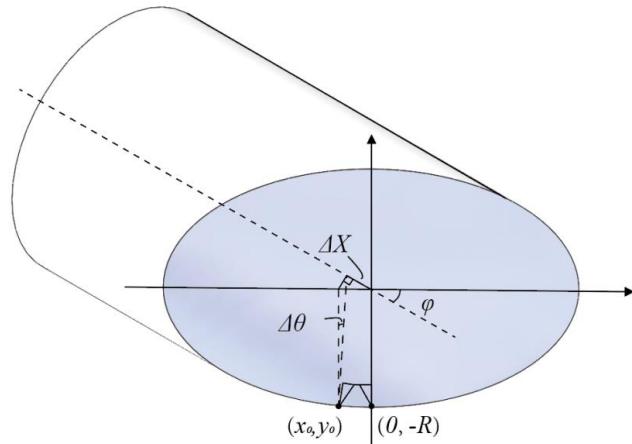


图 2.6 机器人足位置求解立体示意图

将小圆方程与椭圆方程联立，可得两组解，保留合理的一组 (x_0, y_0) ，可列出式(2.5)与式(2.6)：

$$\Delta X = x_0 \cos \varphi \quad (2.6)$$

$$\Delta \theta = \arctan \left(\frac{x_0 \sin \varphi}{y_0} \right) \quad (2.7)$$

已知足坐标 (X_i, θ_i) 则待求足坐标

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X \quad (2.8)$$

$$\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta \theta \quad (2.9)$$

其中*i*为正整数，表示步数，*i*为奇数时表示后足，*i*为偶数时表示前足。

至此，本研究建立了从运动状态、运动参数到姿态参数、位置参数的推导关系，其意义在于，给定一组合理的运动逻辑，根据上述关系可以实现对机器人每一步的位姿信息的推导，这为给出机器人执行路径的运动逻辑提供了基础。

2.2 机器人运动规划

要实现机器人运动的规划，使机器人能够按照一定的动作实现运动目标，就要给出机器人从起始点到目标点的完整运动逻辑，就需要实现从起点到目标点的路径规划和执行规划路径的运动逻辑。

2.2.1 机器人路径规划

(1) 常见路径规划算法与机器人特异性比较

常见路径规划算法包括基于图搜索的路径规划算法和基于采样的路径规划算法。基



于图搜索的路径规划算法将环境转换为网格图，机器人的运动被简化为网格中的点的转移。每个点都可以采用评估函数评估该点对于路径规划的优劣，机器人利用启发式方法搜索一条从起点到目标点的低成本路径，适用于二维平面上的路径规划问题。基于采样路径规划算法的采用随机采样方式构建树状结构，通过树结构上不断迭代更新父节点、由父节点不断扩展子节点来探索最短路径，适用于高维、较复杂的空间。两种算法都是以单点的轨迹作为机器人路径，在一些变体中进行了针对机器人实际物理过程的改进，如路径平滑、碰撞检测等。

本研究所指机器人，在路径规划中有如下特点：

- 1) 运动轨迹的特异性：由于机器人具有分节动作，以单一点描述机器人的运动轨迹是不足的，且由于分节运动受到机器人结构的限制，其两足落点之间具有严格的相对位置限制；
- 2) 运动的连续性和离散性相结合：本机器人的运动轨迹实际是由机器人双足的落点组成，是离散的，且运动的每步彼此间动力学孤立性强，可以实现折线轨迹，而每一步运动过程中机器人的动作是连续的，其动作过程需纳入考虑范围；
- 3) 运动环境的特异性：本机器人在航发/燃机这类立体旋转对称结构中运动，为二维曲面环境，其轨迹虽可以以二维坐标 (X, θ) 表示，但过程中环境尺寸相对机器人尺寸产生了变化，为表示这种变化，机器人的物理约束需表示为 X 的函数。

易见，常见路径规划算法不能直接解决本研究所指机器人的路径规划问题。本研究结合常见路径规划算法的思想与本型机器人的运动特点，提出了针对本型机器人的路径规划算法。

(2) 路径规划的基本实现方式

由于本研究所指机器人具有分节运动，本研究将机器人的路径规划落脚于机器人两足在壁面上的吸附点。根据机器人的结构特点，以双足吸附点位置就可以完全确定机器人位置；且机器人运动过程中，必有至少一足处于吸附状态，对于另一足位置的确定可以根据2.1.5所述数学关系实现。因此本研究在每步路径规划中，以吸附一足位置坐标为根节点，以另一足位置为子节点，以根节点求子节点范围和选取子节点，形成路径规划的基本实现方式。

在以根节点求子节点范围的过程中，易见机器人当直线电机固定、绕一足吸盘中心旋转时，另一足在弧形壁面上的轨迹应为一闭合曲线，且该曲线在坐标系上应具有轴对



称性，该闭合曲线包围的面积取决于 a 的大小。由此，本研究确定子节点可达范围为当 $a=0$ 与 $a=s$ 时子节点轨迹所在的两条曲线之间的包含面积，但该曲线难以通过数学推导直接表达。本研究利用matlab软件，在 $a=0$ 与 $a=s$ 条件下对 φ 取离散值遍历求解 ΔX 与 $\Delta\theta$ ，用椭圆曲线进行拟合，其拟合结果与实际点之间的位置值误差为 10^{-3} mm量级，效果足够精确。因此，子节点范围可以表达为：

$$\frac{\Delta X^2}{A_1^2} + \frac{\Delta\theta^2}{B_1^2} \leq 1 \quad (2.10)$$

$$\frac{\Delta X^2}{A_2^2} + \frac{\Delta\theta^2}{B_2^2} \geq 1 \quad (2.11)$$

其中 A_1 、 B_1 为 $a=s$ 时所求解出坐标系上椭圆的半长轴与半短轴， A_2 、 B_2 为 $a=0$ 是求解出的 (X, θ) 坐标系上的椭圆的半长轴与半短轴。

(3) 贪心策略

确定子节点范围后，在选择子节点的过程中，本研究采用贪心策略。贪心策略是一种在算法设计中广泛使用的方法，其核心思想是通过局部最优选择逐步构建全局最优解。它将问题分解为多个相互关联的决策阶段，当前决策不影响过去状态，仅关注当下最优，每个阶段都选择当前状态下最优的解决方案。在本研究中采用的贪心策略所关注的指标为待选择节点与目标节点的距离，距离越小越优，即每步选择子节点的过程都选择与目标节点距离最近的节点。

(4) 碰撞判断

选择子节点后，还需要判断机器人到达该子节点的过程中是否发生碰撞。由于机器人运动过程中需要抬起未吸附足，其参数 γ 与双足吸附时刻不同，进而使其旋转过程的碰撞体积不同，所以应当分别考虑机器人在到达的静态状态与运动中的碰撞判断。

静态下的碰撞判断应考虑机器人双节的体积，在本研究中以其双节矩形上表面在圆柱壁面上的投影进行表达。易见，对上述投影进行精确的数学描述十分困难，且壁面曲率半径相对于机器人单节尺寸很大，本研究进行了一定的简化：将这一投影简化为机器人单节上表面矩形在与之平行的平面上的投影，依据实际运动情况对其描述进行修正。采用遍历附近的障碍物点并判断其是否在投影矩形内的方式最终实现碰撞判断。

动态过程的碰撞判断可以只考虑机器人吸附一节的体积，因为本型微型机器人中间电机角度范围 γ 可达 180° ，完成折叠后的旋转过程的碰撞尺寸实际上是机器人单节的尺寸。本研究对于旋转过程的碰撞判断采用采样遍历的方式：针对旋转过程中 θ 的变化范

围按一定采样密度取样，对每一个 θ 位置上的单节进行静态碰撞判断，即实现了动态碰撞判断。

将该算法在虚拟地图上进行试验，试验结果如图 2.7。其中蓝色矩形为障碍物，红色点为机器人后足落点，黄色点为机器人前足落点。可见机器人能够采用快速直线前进的方案，并有效避障。但是，本研究注意到，得出该路径规划结果的耗时较长，分析认为是算法复杂度较高导致的。

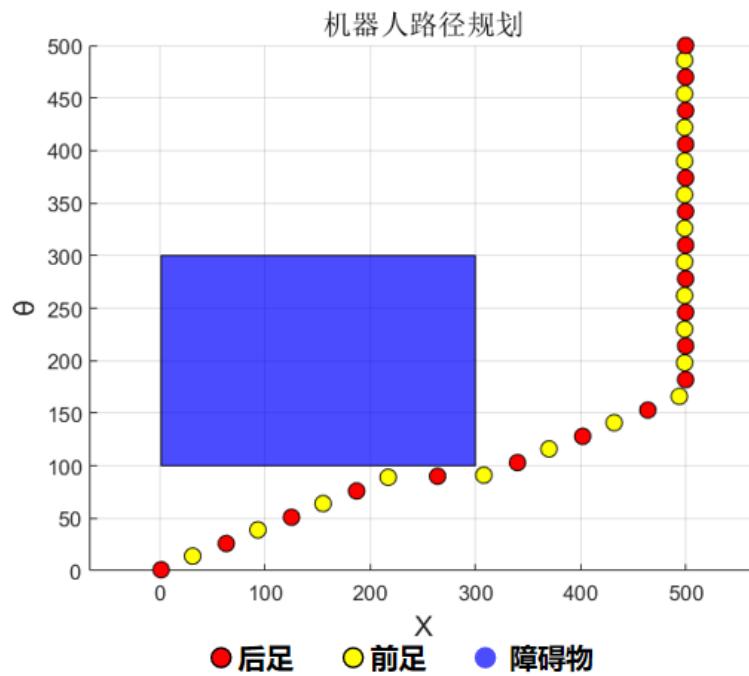


图 2.7 机器人路径规划结果

2.2.2 机器人运动逻辑设计

为实现前文中给出的规划路径，需要给出机器人的对应运动逻辑，即机器人的运动状态数组以及对应的持续时间，也就是建立2.1.5中机器人参数计算过程的反推关系。

(1) 姿态参数的计算

已知双足落点为 (X_j, θ_j) (X_{j+1}, θ_{j+1}) ，则有

$$\Delta X = X_{j+1} - X_j \quad (2.12)$$

$$\Delta \theta = \theta_{j+1} - \theta_j \quad (2.13)$$

当 $\Delta X = 0$ 时有：

$$x_0 = R \sin \Delta \theta \quad (2.14)$$



$$y_0 = -R \cos \Delta\theta \quad (2.15)$$

当 $\Delta X \neq 0$ 时, 据式 (2.6) 有

$$p = \frac{x_0 \sin \varphi_{j+1}}{y_0} = \tan \Delta\theta \quad (2.16)$$

p 为一中间量, 代入式 (2.2) 得

$$y_0 = \sqrt{\frac{R^2}{p^2 + 1}} \quad (2.17)$$

进一步有

$$\varphi_{j+1} = \arctan\left(\frac{py_0}{\Delta X}\right) \quad (2.18)$$

求得姿态参数 φ , 由式 (2.5) 有

$$x_0 = \begin{cases} \frac{\Delta X}{\cos \varphi_{j+1}}, & \Delta X \neq 0 \\ 0, & \Delta X = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

求解出 (x_0, y_0) 代入小圆方程

$$(x_0 + d_2 + a_{j+1})^2 + (y_0 + R - h)^2 = d_1^2 + h^2 \quad (j \text{ 为偶}) \quad (2.20)$$

$$(x_0 - d_1)^2 + (y_0 + R - h)^2 = (a_{j+1} + d_2)^2 + h^2 \quad (j \text{ 为奇}) \quad (2.21)$$

解方程求得姿态参数 a 。由于姿态参数 γ 求解难度较大且实际运动过程对其精确性要求低 (使吸盘贴上壁面即可), 此处忽略对 γ 的求解。这样完成了由位置参数对姿态参数的推导。

(2) 运动逻辑的计算

已知每步姿态参数的 φ_j 、 a_j , 则易求变化量

$$\Delta\varphi = \varphi_{j+1} - \varphi_j \quad (2.22)$$

$$\Delta a = a_{j+1} - a_j \quad (2.23)$$

被求得变化量后, 由式(2.2)易求得与运动部件对应的 Δt , 将其按一定的运动状态数组表达, 使之满足对应的 Δt 。本研究以一吸盘脱附→中间电机内折→前/后旋转电机转动+直线电机推/拉→中间电机放下→双吸盘同时吸附作为一步的运动逻辑顺序。表达形式如表 2.2。

表 2.2 运动逻辑表样例

| 步数 | 运动状态数 | Δt |
|-----|--------|------------|
| 1 | 000101 | 2.67 |
| 1 | 101001 | 0.61 |
| 1 | 100001 | 1.34 |
| 1 | 000201 | 2.67 |
| 1 | 000011 | 0.50 |
| 2 | 000110 | 2.67 |
| 2 | 120010 | 0.04 |
| 2 | 020010 | 1.16 |
| 2 | 000210 | 2.67 |
| 2 | 000011 | 0.50 |
| 3 | 000101 | 2.67 |
| 3 | 201001 | 0.04 |
| 3 | 001001 | 1.16 |
| 3 | 000201 | 2.67 |
| ... | ... | .. |

本节路径规划的全过程如图2.8。

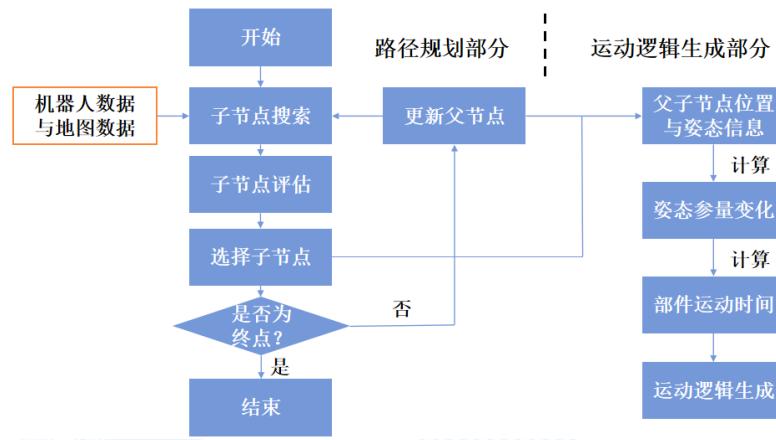


图 2.8 路径规划流程图

2.3 小结

本章中通过机器人与环境的简化数学模型描述了机器人的运动，通过建立机器人的参数体系建立了机器人部件层次、姿态层次、位置层次三个层次之间的计算关系；参考基于图搜索的路径规划算法与基于采样的路径规划算法的思想，基于贪心策略建立了针对本型机器人的路径规划算法，建立了与算法给出的路径配套的运动逻辑生成算法，实现了在已知环境中给出运动起点和运动目标即可给出完整运动逻辑规划的算法，为机器人在航发/燃机内的运动的自动化打下基础。但路径规划算法存在算法复杂度过高、计算耗时长的问题，应在后续研究中得到解决。



3 控制系统设计

完成机器人运动规划之后，本研究对应设计了一套嵌入式软硬件系统来控制机器人按照给出的运动逻辑表进行运动以实现运动的目标要求。这套系统包括为部件运动驱动提供控制端口的下位机（硬件：嵌入式控制板，软件：MCU 程序）与上位机操作软件，上位机操作软件搭载前述机器人运动规划所得运动逻辑，与下位机通信实现按运动逻辑控制。

3.1 下位机设计

由于本型机器人的尺寸很小，且控制部件的连接线数量较多，因此不能将控制器外置，只能设计符合机体尺寸、机体能够携带的控制器，本型机器人控制器可用面积如图 3.1 所示。按照一般小型机器人控制器设计方法难以满足这一面积要求。所以本型机器人需要在板载元件的选型上（关注负载能力、尺寸等）充分调研，在 PCB 设计上反复进行、多次迭代，以避免超出工艺限制。

根据机器人驱动控制及负载需求，本研究所述嵌入式控制板应符合机器人表面尺寸要求，应具备有线/无线通信控制能力，同时分别驱动控制 4 组二相四线步进电机、2 组电磁吸盘的能力，MCU 片上程序烧写的能力。

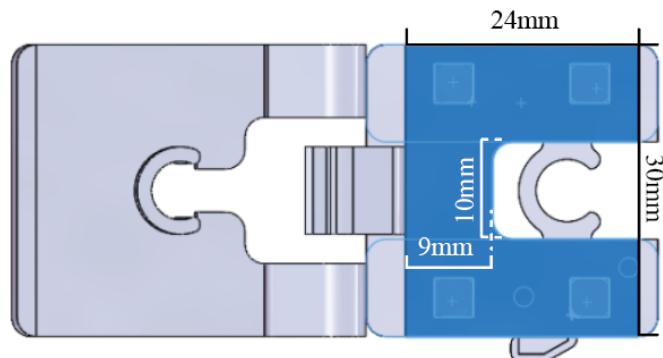


图 3.1 机器人控制器可用面积示意图

3.1.1 电路原理

根据下位机功能需求，本研究将硬件电路分为 MCU 电路、电源管理、电机驱动、电磁铁驱动四部分。由于控制板尺寸要求严格，本研究控制板设计根据尺寸和负载要求对功能元件严格选型。

(1) MCU 电路



MCU电路需满足单片机最小系统要求，包括单片机芯片、电源电路、时钟电路、复位电路，同时需具备程序下载接口，以便程序的下载与调试，需具备串口通信电路，以实现外界控制功能^[23,24]。本研究单片机芯片选取HJ-840芯片，其采用LGA64的极小封装，尺寸 $6.2 \times 7 \times 0.9\text{mm}$ ，开放48个GPIO口，可以满足本研究的GPIO控制需求，且其内部搭载时钟电路，无需外接。考虑到MCU芯片的程序烧录需求，本研究设置JTAG烧录接口，通过USB-TypeC接口接出。

(2) 电机驱动电路

本研究所述电机为5V二相四线制步进电机，额定功率0.21W，其构造如图3.2。本研究采用双极性整步驱动方式，其通电步序如表3.1，通电频率10Hz-200Hz。

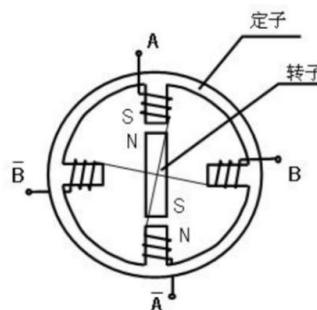


图 3.2 步进电机构造

表 3.1 步进电机驱动通电步序^[25]

| 步序 | A | \bar{A} | B | \bar{B} |
|----|---|-----------|---|-----------|
| 1 | + | - | + | - |
| 2 | + | - | - | + |
| 3 | - | + | - | + |
| 4 | - | + | + | - |

本研究利用选用H桥电路HT8835ARDZ芯片实现步进电机驱动，其面积 $3 \times 2\text{mm}$ ，具备四对输入输出引脚，输出端参考电压范围0-11V，最大电流1.5A，能够满足1个步进电机的驱动要求。MCU在输入端输入控制信号，接入5V驱动电压，步进电机的四个引脚按相序与四个输出引脚连接。

(3) 吸盘控制电路

本研究所述吸盘额定工作电压为12V，通过MCU信号控制，可通过MOS管实现。本研究选用HL2303，P沟道MOS管，耐压30V，能满足电磁铁的驱动控制要求。

(4) 电源管理电路

根据前述电路，本研究将供电需求列于表3.2。

表 3.2 控制板供电需求

| 项目 | 电压 (V) | 电流 (A) | 功率 (W) | 数量 | 总功率 (W) |
|------|--------|--------|--------|----|---------|
| 静态电流 | 3.3 | 0.005 | 0.017 | 1 | 0.017 |
| 电磁铁 | 12 | 0.08 | 0.96 | 2 | 1.92 |
| 步进电机 | 5 | 0.042 | 0.21 | 4 | 0.84 |

控制板上有多直流电压需求，对应设计多电压的DC-DC电路^[26]。本研究设计如图3.3的电源管理电路。VCC-5V、VCC-12V的DC-DC电路分别基于LGS6302B5芯片设计，该芯片面积仅3×2mm，输出端电流限制为1.5A，满足两组电压的功率需求，可以通过配置电阻实现3V-60V宽域DC-DC转换，输出电压公式为：

$$V = 1.2 \times \frac{R_A + R_B}{R_B} \quad (3.1)$$

式中R_B指两电阻中一端接地的电阻，另一电阻为R_A。

由于3.3V电压下功率需求较小，本研究利用3.3V线性稳压芯片RS3236（1×1mm外缘面积）接5V电压实现3.3V电压输出。

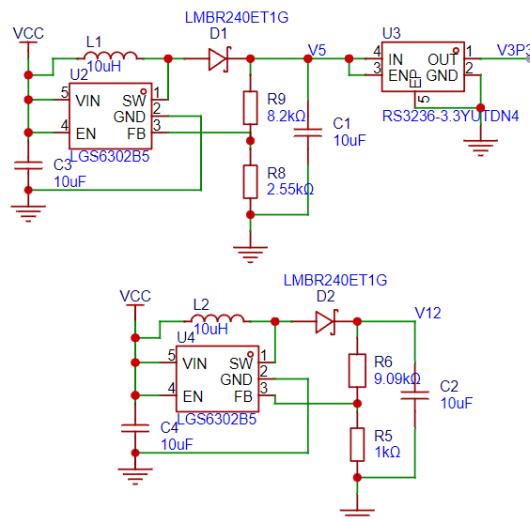


图 3.3 电源管理电路

3.1.2 PCB 设计

本研究利用PCB技术完成控制板硬件设计与制作。PCB（印制电路板）是一种在绝缘基板上经过特殊工艺制造的板子，它能够实现分层印刷电路，能够实现电子元件之间



复杂的电气连接，同时提供机械支撑。此外，它能够优化设备的内部布局，实现元器件的紧凑排列，还能提升电路的性能和效率，为电子设备的稳定运行提供有力保障，从而推动电子产品向小型化、轻量化发展，是本研究实现满足机器人携带的小尺寸要求的控制硬件的重要手段。

本研究PCB设计与制作利用嘉立创EDA平台。嘉立创EDA是一款高度集成化的国产云端电子设计自动化软件，提供从电路设计到PCB制板的全流程服务。支持在线原理图绘制、PCB布局布线、3D预览及设计规则检查，内置海量元件库和封装资源，大幅缩短设计周期，具有仿真验证、综合布线、自动下载与调试等功能，开发者可以快速地搭建复杂的智能硬件系统。软件深度融合嘉立创的PCB打样与元器件商城，可直接将设计文件下单生产，实现“设计-制造-采购”无缝衔接。本研究的PCB设计、PCB制造与SMT贴片工艺依靠嘉立创EDA及嘉立创厂方实现。

本研究PCB设计针对功能要求，需要具备四组二相四线电机驱动输出口，在PCB设计中体现为四组四个为一组的焊盘，分置PCB板的正面和背面；需要具备电源端口（VCC/GND），在本研究中设计为方、圆两种形状，以便于正负识别，防止正负反接导致板子损坏；需要具备通信端口，在本研究中采用UART通信（3.2.2节中详细介绍），其通信接口要求包括UART_TX、UART_RX和GND，为节省空间，GND利用电源端口，不再另外设置。

本研究PCB设计中参照以下原则^[14]：

- (1) 布局规范：按MCU电路、电源管理电路、吸盘控制电路、电机控制电路几个功能模块分区；
- (2) 布线规范：按最低1mm/A设置线宽，线的拐角处设置圆角，以铺铜作为PCB的公共地平面，走线尽可能短，同一芯片的信号线尽可能等长；
- (3) 工艺规范：注意线宽、过孔、线距、线孔距等各项尺寸满足工艺要求，不能低于工艺要求的下限。
- (4) 流程规范：向生产商提交文件之前执行DRC检查，生成3D模型检查是否存在机械干涉。

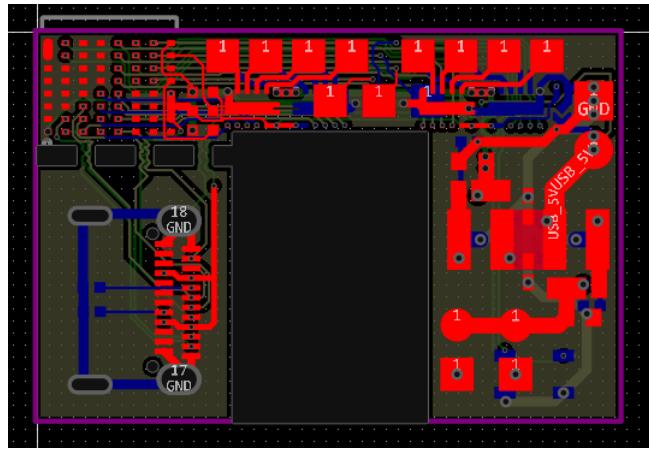
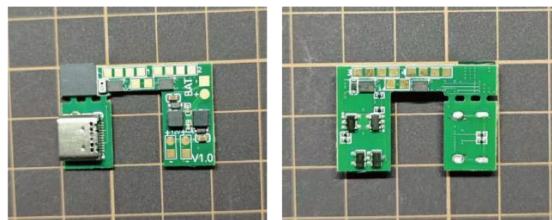
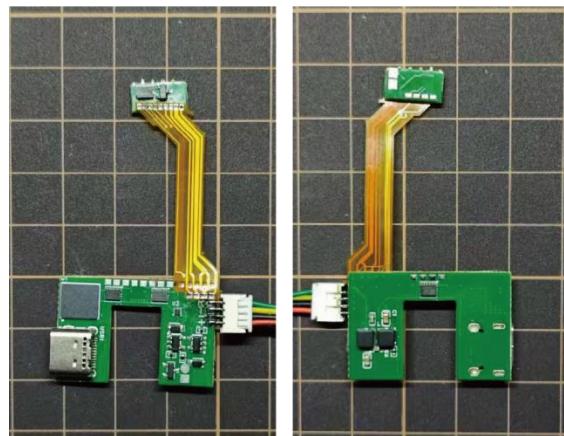


图 3.4 控制板硬件 PCB 设计图

本研究设计的控制板实物如图3.5。图3.5 (a) 所示初版控制板尺寸配合机器人尾节尺寸，外围尺寸 $30\times 20\text{mm}$ ，图3.5 (b) 所示控制板是在图3.5 (a) 所示控制板基础上改进而来，考虑到机器人在两节各有旋转电机和电磁铁，为尽可能减少阻抗损失和避免连线造成运动干涉，图 (b) 控制板设计一副板，外围尺寸 $11\times 6\text{mm}$ ，主装载一电机和一电磁铁的驱动控制电路，主板尺寸不变，并在主板与副板上分别设置与彼此相连的端口，通过专门设计的FPC软板连接。



(a) 初版控制板



(b) 改进后控制板

图 3.5 控制板实物图

3.1.3 下位机与机器人连接设计



在控制板与机器人部件的连接中,为规范化连接方式以增加点连接可靠性,本研究根据控制板与各组电机的相对位置、控制板与电机对应焊盘尺寸设计了 FPC 软板。电磁吸盘端口未设计 FPC,由于吸盘活动范围要求较大且 FPC 软板柔性有限,以漆包线进行连接。

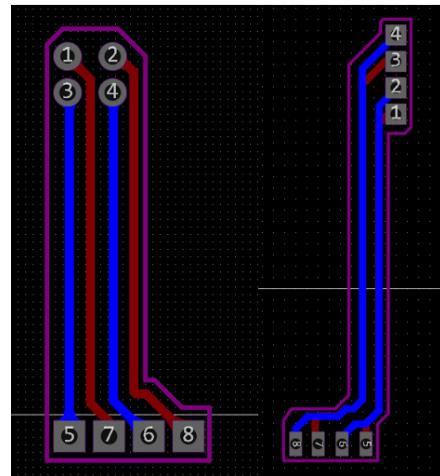


图 3.6 控制板与电机连接 FPC 设计图

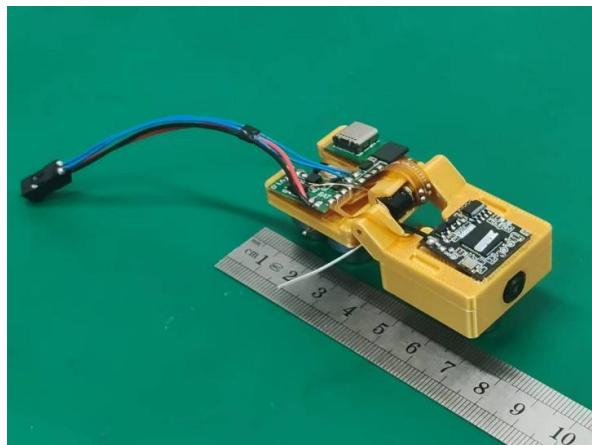


图 3.7 FPC 与机器人部件的实物连接

3.1.4 下位机程序设计

下位机的职能包括,接收并解码上位机传递的字符串命令,执行命令,通过 GPIO 口实现控制。那么下位机程序应包含如下几部分:

- (1) 主函数: 执行初始化操作和循环执行核心功能函数, 初始化操作包括 GPIO、定时器、中断、串口通信等的初始化;
- (2) 串口中断服务程序: 串口中断服务程序负责在串口接收到信号时中断进入串口接收程序, 以实现命令的接收;
- (3) 电机控制程序与吸盘控制程序: 控制程序负责读取当前状态函数并按状态要



求输出一定频率方波（电机）或高/低电平（电磁铁）实现电磁铁和电机的控制。

下位机程序的主要执行部分应包括串口通讯程序和部件控制程序。串口通讯程序逻辑如下：系统初始化配置串口参数并启用接收中断，串口接收中断服务程序读取数据并存入循环缓冲区，检测结束符后触发主程序命令处理循环。命令解析器解析控制参数，存入端口状态值并生成响应信息^[15]。部件控制程序逻辑如下：系统初始化后，主控制循环检测方向控制信号和频率调节信号，并根据设定的频率计算步进延时时间。步进序列生成器根据方向信号生成全步进相位序列，并通过GPIO输出控制信号。延时控制模块根据频率计算单步延时，以保证波频率稳定。本研究借助Nordic搭建的NRF Connect SDK固件库（Zephyr）与驱动库（drivers）实现对GPIO口操作与串口通讯的实现。

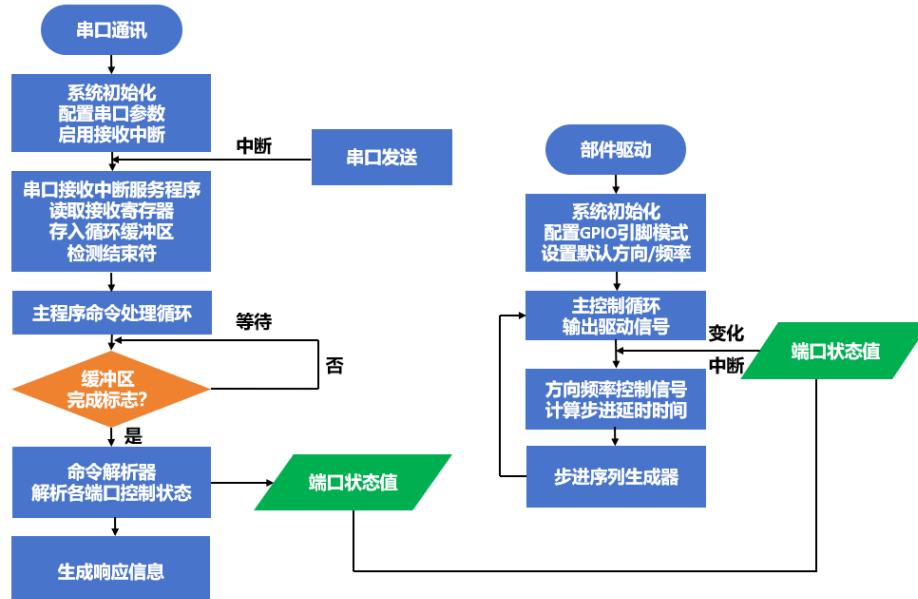


图 3.8 下位机程序逻辑图

3.2 上位机开发

由于本型机器人的运动逻辑实现控制部件较多，通过人手动操作难以实现精准地控制运动逻辑，本研究需要设计一个上位机控制软件，用户通过操作这一软件能使机器人连续执行运动逻辑，以实现简单的操作控制过程。

上位机的职能包括，生成用户界面（UI），感知用户界面动作并改变驱动内部状态，并将改变状态的字符串命令发送出去。由此，上位机开发应包含如下几部分：

- (1) 用户界面（UI）：UI 程序负责生成用户操作的窗口和按钮等，并向主程序传递用户操作的动作（如点击鼠标，按下键盘）。本研究利用 Pyside 中的 Qt 工具包完成；
- (2) 通信模块：上位机的核心部件，负责与下位机进行数据交互，在本控制系统中



主要职责是读取当前状态，发送指令到下位机。

(3) 任务调度与控制模块：主要是使用线程和定时器功能。在本研究中由于上位机负责运动逻辑的实现，在执行运动逻辑的过程中常使用延时功能，同时为了避免执行过程中主程序失效，须建立子线程以在主程序执行中同步执行运动逻辑。

3.2.1 用户界面

本研究所述上位机，应具备用户易操作的界面及响应用户操作并通过串口发送对应指令的能力^[27]。本研究利用Qt制作上位机UI界面程序。Qt是基于C++跨平台的UI和应用软件开发框架^[28]，使用特殊的代码生成扩展以及一些宏，利用Qt Designer工具可设计易用的界面，同时利用PySide2中的Qt相关组件实现程序操作。PySide2作为Qt的Python绑定，提供了完整的GUI开发工具链。PySide2基于Qt的C++实现进行封装，通过Shiboken绑定生成器实现Python原生调用，其核心模块围绕Qt功能体系展开。本研究利用QtCore中的 QFile属性读取设计界面的ui文件，利用QtUiTools中的QUiLoader属性关联界面动作与程序指令。

本研究制作的上位机界面如图3.9，其具备串口选择及串口号刷新区，可以手动选择要调用的串口，可以对每组电机的正反停转及转速实现单独控制，可以对每组电磁铁的开关实现单独控制，并具有执行连续运动逻辑的操作功能。

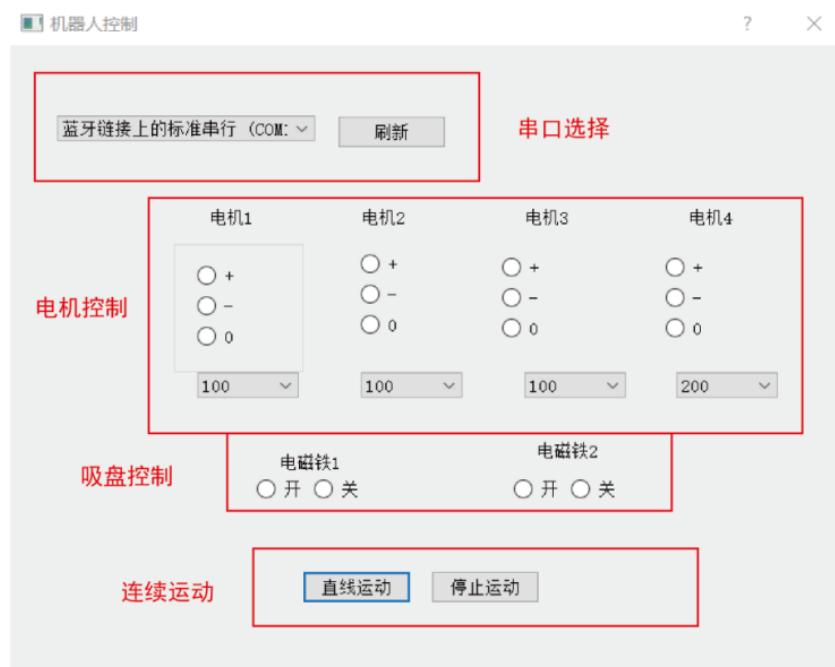


图 3.9 上位机界面



3.2.2 通信模块

通信是实现控制的关键，通信实现的两个核心方法包括确定的通信规范（即通信协议）与程序语言对串口通信的实现。

(1) 串口通信协议

通信协议规定了上下位机之间数据交换的通信规范，而串口通信是一种通过串行接口的通信方式。对比并行通信的多位同时传输，串口数据按顺序依次传输，所需接口少，使用更方便^[29]。本研究使用TTL UART(Transistor-Transistor Logic Universal Asynchronous Receiver / Transmitter)，基于晶体管逻辑电平的异步串行通信协议，以低电平(<0.4V)作为逻辑0，高电平(>2.4V)作为逻辑1^[30]。本研究中使用8N1数据帧结构，即：

[Start Bit(0)] [D0][D1][D2][D3][D4][D5][D6][D7] [Stop Bit(1)]

(2) 通信模块的实现

本研究利用 python 中 serial 库 (pyserial) 完成与下位机之间的数据交互，serial 是处理串口通信的核心工具包，支持多种串口通信协议，是实现程序访问设备串口的关键，其核心 Serial 类可实例化为具体串口对象，初始化时指定端口名称、波特率（本研究采用 115200）、数据位（8 位）、校验位和停止位等，实现对物理端口的精确配置。本研究通过工具库中的 list_ports 实现获知全部可用串口，通过库中 read()、write() 方法进行字节流操作来分别实现串口数据的读取和发送，设置超时机制 (timeout) 避免程序阻塞，同时利用 in_waiting 属性创建变量获取接收缓冲区数据量实现实时监控。

3.2.3 任务调度与控制模块

任务调度与控制模块的核心是创建和管理子线程。本研究利用Python的threading库实现子线程的构建，threading库是标准库提供的多线程编程核心工具，为程序并行运行提供基础支持。该模块通过操作系统级线程接口的封装，使得程序能够在单进程中创建并运行多个执行流 (Execution flow)，适用于需要同时处理多任务的场景。在本研究中，主要负责执行在子线程中连续延时发送指令的同时等待主程序接收操作者发送的指令。其Thread类可通过继承或直接实例化创建线程对象，典型用法包括定义目标函数、设置线程参数后调用start()方法启动线程，线程结束后由系统自动收回线程资源。



3.2.4 上位机总逻辑

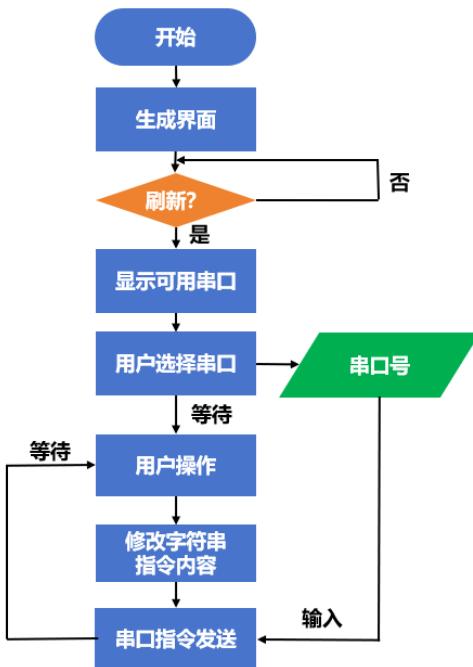


图 3.10 上位机程序逻辑图

本研究最终实现的上位机程序逻辑如图3.10。程序开始后生成界面，等待用户点击“刷新”部分后刷新串口，用户选择串口后记录串口号，等待用户进行下一步操作。用户点击界面按钮后，程序对应修改字符串指令内容后向串口发送，继续等待用户指令。本程序为每个控制按钮设置键盘快捷键，以便于用户更快捷地自行操作机器人的运动逻辑。同时本程序设计一些简单连续运动逻辑，直线运动、转弯运动等按钮，能够实现机器人的连续动作。最后本研究将第4章中的算法给出的运动逻辑载入上位机，使机器人能够按照这一运动逻辑运动至预定地点。

3.3 小结

本研究针对机器人的部件驱动控制需求与机上控制器尺寸要求设计了包括嵌入式控制板硬件、嵌入式控制程序、上位机控制软件在内的嵌入式控制系统。针对部件驱动需求设计了控制器硬件的电路原理，通过嘉立创 EDA 设计平台及嘉立创 PCB 制造工艺完成了控制器硬件的 PCB 设计与制作；利用 Nordic SDK 实现 MCU 程序中的串口通讯、GPIO 操作等核心功能，实现通过 Qt、serial、threading 等 python 库实现了上位机 UI、串口通信、任务调度与控制等功能，载入第 4 章给出的运动逻辑实现机器人全过程控制。

4 控制系统测试

4.1 上下位机程序测试

本研究对下位机程序运行的效果进行了测试，测试环境如图4.1，笔记本电脑通过USB-TypeC数据线、CH340-USB转接板与控制板实现串口通信；控制板通过直流电源供电，通过示波器与万用表测量端口输出波形与电压。

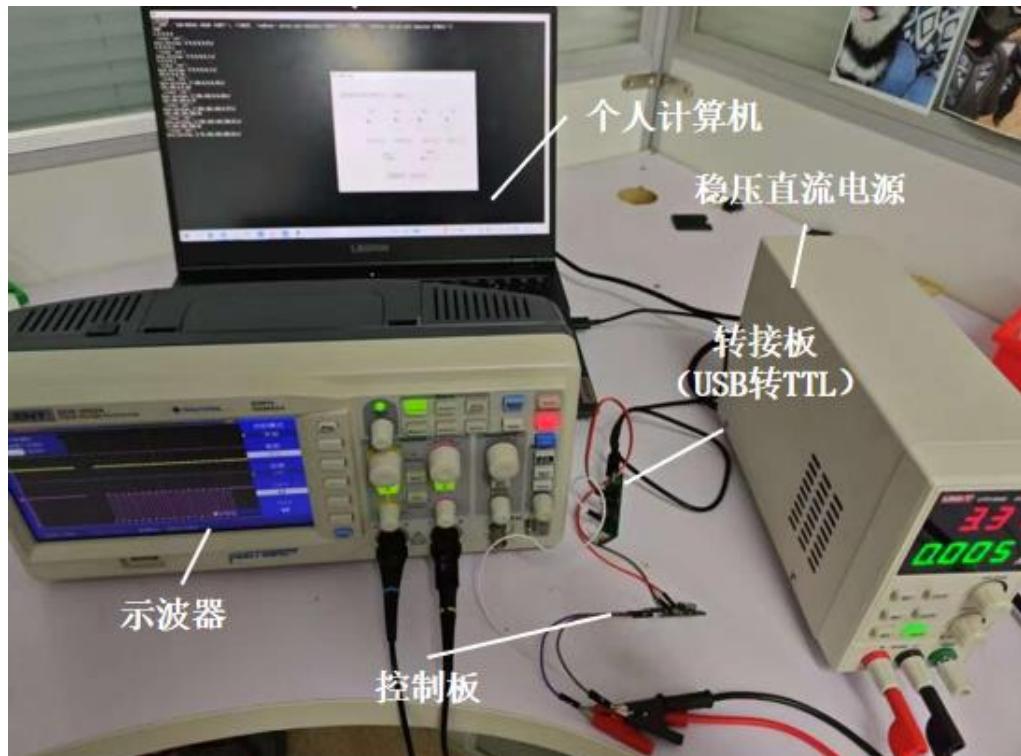


图 4.1 下位机程序测试环境

本研究对四组电机控制端口与吸盘控制端口进行了测试。电机控制端口中对每组端口的A+与A-、B+与B-间的电压波形曲线进行了测试，结果如图4.2，波形为方波，形状良好，电压峰-峰值Vpp接近10V，符合电压要求与A+与A-、B+与B-的反相特征，通过上位机调节频率能够改变波形状态，点击“0”（停转）时波形变为直流波形；对每组端口的A+、B+的电压波形曲线进行测试，结果如图4.3，其波形为方波，且相位特征符合A+领先B+相位 $\pi/2$ ，且通过上位机改变电机转向后两波形的相位关系反转。验证可知，电机端口测试结果符合预期。测试吸盘控制端口，点击上位机界面电磁铁“开”时其正负端口间电压为12.16V，点击“关”时其正负端口间电压为0V，结果符合预期。

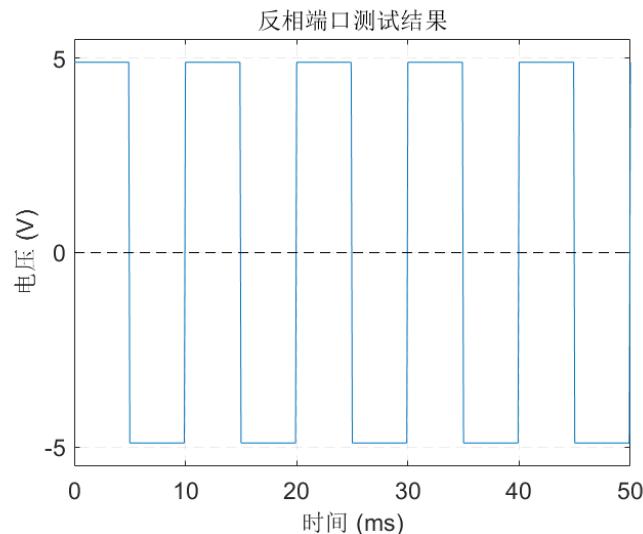


图 4.2 反相端口测试结果 (100Hz)

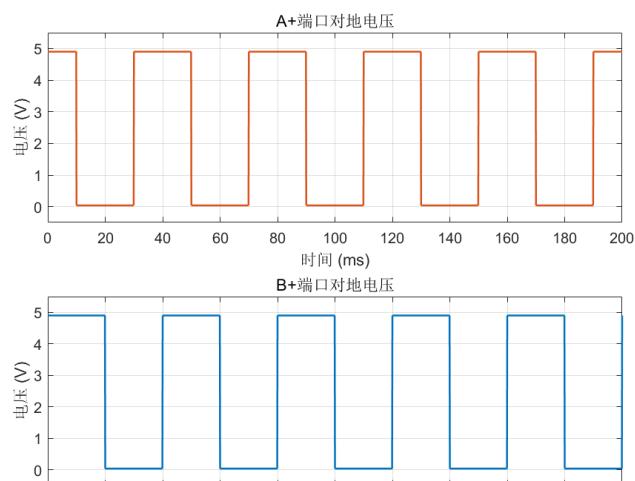


图 4.3 A+、B+端口测试结果对比 (25Hz)

4.2 机器人部件驱动控制测试

4.1 节中测试均为各端口在开路状态下的测试，其结果可以证明程序运行的正确性，但其电机/吸盘驱动功能能否实现还需测试控制器硬件的驱动能力。本研究继续对下位机程序的部件驱动过程进行了测试。

本研究将控制器与机器人控制部件包括电机和电磁铁对应连接，通过上位机软件的手动按键操作测试各电机能否完成目标运动，测试电磁铁是否能满足额定驱动要求。

(1) 单部件驱动控制测试

本研究首先对单部件进行驱动控制测试，选取 40Hz、100Hz、200Hz 三组电机运动的典型速度（慢速、中速、快速），通过拍摄、视频抽帧方式测试不同组电机在不同驱动频率下的速度，通过电压表测试电磁吸盘是否达到额定电压要求，测试结果如表 4.1 和

表 4.2。

表 4.1 不同频率驱动电机测试结果

| 电机频率 | 中间电机($^{\circ}/\text{s}$) | 前旋转电机($^{\circ}/\text{s}$) | 后旋转电机($^{\circ}/\text{s}$) | 直线电机(mm/s) |
|-------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------|
| 40Hz | 60 | 70 | 70 | 3 |
| 100Hz | 110 | 130 | 130 | 7 |
| 200Hz | 135 | 160 | 160 | 9 |

表 4.2 电磁吸盘电压测试结果

| 吸盘状态 | 前电磁吸盘两端电压 | 后电磁吸盘两端电压 |
|------|-----------|-----------|
| 开 | 12.06V | 12.05V |
| 关 | 0.06V | 0.07V |

由测试数据可见，机器人四组电机能够按控制频率的变化调整速度，前后电磁铁开状态符合额定电压要求。

(2) 多部件联合运动测试

控制器驱动机器人运动的实际过程是多个部件联合驱动控制过程，本研究对多部件联合运动过程展开测试。测试过程选取 1.3 中的伸缩前进运动与旋转前进运动，恰能包含机器人所有控制部件。

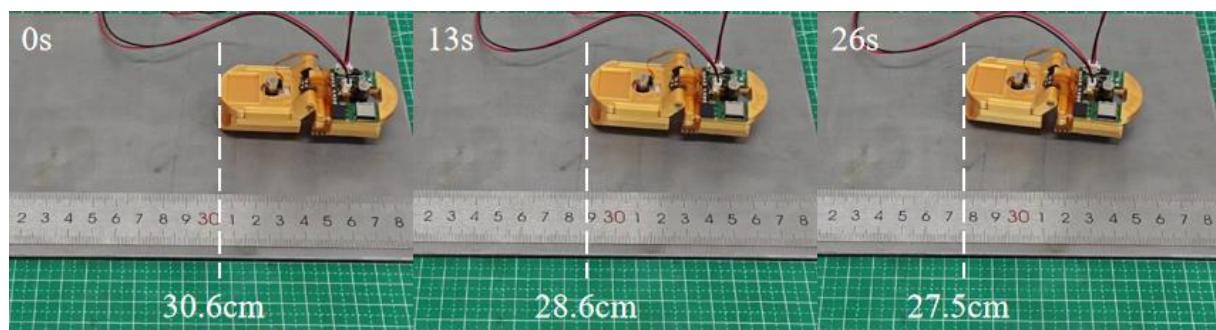


图 4.4 伸缩前进运动测试

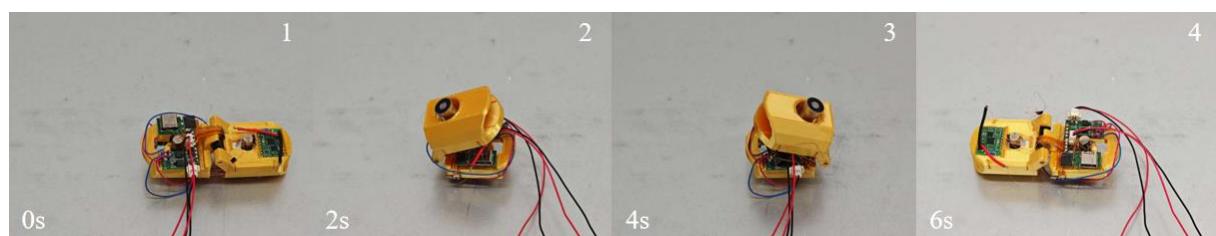


图 4.5 旋转前进运动测试

由测试过程可见，控制板能够实现简单连续运动逻辑的驱动控制，证明了控制板具有多部件联合驱动控制能力。



4.3 机器人连续运动测试

机器人能否实现连续运动是本研究嵌入式控制系统是否实现研究目标的关键，这一测试过程能够实现对控制系统上位机、下位机能否连续长时间工作的测试，能够实现对运动规划算法结果是否正确以及控制器能否完整正确执行运动逻辑实现测试。

(1) 测试环境说明与准备工作

本研究测试环境采用本课题中测试平台构建与测试方案设计子课题搭建的测试环境，其利用 3D 打印技术模拟了叶片形状，通过滚压、浇筑实现与航发/燃机内壁的曲率条件对应的金属板以模拟航发/燃机内表面，叶片粘贴于金属板实现航发/燃机内腔环境的模拟。本研究在该测试环境事先采样地图信息，结合机器人数据给出由地图起点（右侧通道入口）至目标点（左侧通道出口）的全套运动逻辑。



图 4.6 测试环境示意图

(2) 测试过程

本研究将机器人后足中心置于地图位置上标定的起始位置，按确定初始状态参数摆放，并上电按既定运动逻辑进行连续运动。由于测试过程电机旋转角度与设计值存在误差且过程中机器人存在微小滑动，机器人采用既定逻辑运动结果与预期存在误差，采用手动控制进行修正，拍摄了机器人连续运动过程的视频，截取起始位置、120s、240s、360s 机器人所处位置，可见机器人按既定运动逻辑比较顺利地通过了大部分模拟狭窄通道，经测量其在 X 向上（图中比例尺测量方向）运动 20cm，目标位置在 X 向上与起始位置相对距离为 25cm，完成 80%左右运动目标。但在 364s 时机器人出现失控现象，机器人按失控前最后输入的电机和吸盘状态持续不停，使用软件无法改变其状态，仅断电可使其停止运动。

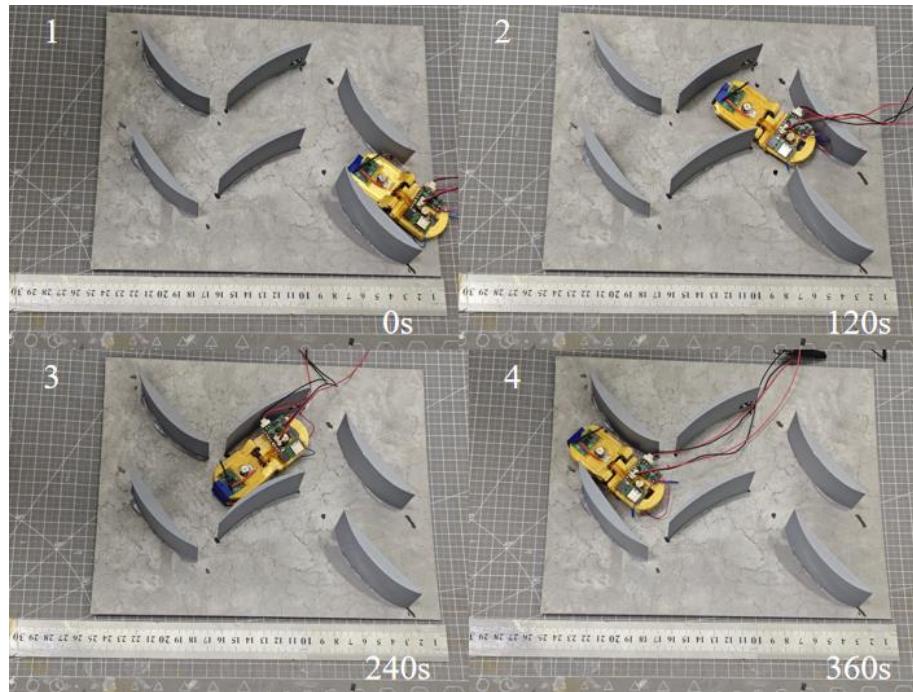


图 4.7 连续运动测试结果

(3) 测试结果评价

测试结果反映，本研究所得嵌入式控制系统能够驱动控制机器人实现一段时间的连续运动，能够令机器人通过大部分狭窄通道，实现 80% 左右运动目标。然而，机器人在运动 364s 后出现失控现象。经研究，发现机器人下位机程序中指令接收区域内存溢出，不能接收新的指令，即连续接收指令的总数有限。

4.4 小结

本章对本研究所构建的嵌入式控制系统进行了测试，按照程序运行、部件驱动控制效果、连续运动效果三个层次展开。根据测试效果得出结论，在短时间的测试下，控制板硬件驱动能力达到要求，上位机、下位机程序逻辑正确；在连续运动逻辑测试下，控制系统能够实现连续运动，算法给出的运动逻辑与实际结果大致匹配，经过一定手动控制操作进行修正，能够完成大部分的运动目标，但连续运动超过 364s 后控制器出现内存溢出，连续接收指令总数有限，即控制系统只能完成控制逻辑步骤有限的连续运动。



结论

针对航空发动机检测微型机器人的运动控制需求，本研究提出了一种嵌入式控制系统，能够实现机器人的电机与电磁吸盘的驱动控制，为微型机器人提供动力。本研究从运动控制的规划与运动控制的实现两个角度出发，实现了本型微型机器人在已知环境的全套运动路径规划和按规划运动的实现。

本研究在针对机器人的运动规划中，以简化数学模型描述了机器人运动过程中的重要结构以及机器人运动环境，从而进一步实现了对机器人在航空发动机/燃气轮机内壁运动过程的描述，将这一过程简化为小圆和椭圆求交点的问题。本研究通过构建机器人的参数体系，从部件状态、姿态、位置三个层次实现了对机器人状态的描述，搭建了三个层次参数之间的正向与反向的数学关系。本研究通过研究基于图搜索的路径规划算法与基于采样的路径规划算法的基本思想与本型机器人的运动形式特点，提出了一套针对本型机器人的路径规划算法，采用图搜索算法的地图栅格化思想与采样算法的随机采样思想，融合贪心策略思想，并针对本型机器人的体积碰撞问题提出了判断方式，并在模拟地图中进行测试，获得测试结果证明了路径规划算法的有效性。本研究基于“位置→姿态→部件”三层次参数的数学关系给出了针对规划路径的运动逻辑生成算法，最终实现出由已知环境和运动目标给出机器人全过程运动逻辑。

本研究设计能够按规划执行运动的嵌入式控制系统，通过分析机器人各部件的驱动控制需求，根据机器人表面尺寸约束，设计了包含 MCU、电机驱动、电磁吸盘驱动、电源管理等模块在内的硬件电路，利用嘉立创 EDA 完成多层 PCB 电路布局设计，通过嘉立创 PCB 与 SMT 工艺完成了硬件制作，实现了机器人能够携带的控制器制作。本研究根据 MCU 选型 (nRF52840) 利用 Nordic 的 SDK 库搭建了具备串口通信接收指令与 GPIO 操作的 MCU 程序，实现硬件控制板对控制指令的板上处理和同时对各部件的集中控制操作。本研究基于 Python 搭建了适配于控制板特点的上位机软件，应用 Qt 工具实现软件操作界面设计以及与主控制程序的数据传递，利用 serial 库实现串口通讯中串口阵列与串口读写等上位机程序核心功能，通过 threading 工具实现线程任务管理。将运动规划算法给出的连续运动逻辑载入上位机专门线程，实现机器人的连续运动操作。

本研究针对本嵌入式系统从控制程序逻辑、控制驱动能力、连续运动性能三个层次展开测试，测试结果显示控制程序逻辑正确，能够实现操作功能；硬件控制驱动能力良



好，能够实现简单的连续运动；利用另一子课题的模拟燃机内环境展开测试，连续运动过程能够实现部分的运动目标，通过狭窄通道的近 80% 距离，但在测试一段时间后出现失控，并未完全实现运动目标。

本研究的创新点如下：

(1) 针对本型航空发动机检测微型机器人提出了完整的运动描述和运动规划体系。本研究提出了关于本型机器人和运动环境——航空发动机/燃气轮机内腔的数学简化模型，提出了分节吸附式机器人在二维曲面空间内的描述参数体系与计算关系，创新性地提出在二维曲面空间上的吸附式机器人路径规划与运动逻辑规划；

(2) 针对本型机器人构建了完整的嵌入式控制系统。本型机器人相比其他微型机器人具有更多运动自由度，需要多控制部件联动，驱动控制要求极大地提高。本研究实现了对复杂、多自由度微型机器人高效、简洁控制的嵌入式软硬件系统的搭建。

本研究尚存在一些不足与对未来的展望：

(1) 本研究设计的运动规划算法尚有缺陷，其采用贪心策略，相比成熟算法策略过于单一，对于更加复杂的运动环境难以应对；且算法计算时间较长，计算复杂度高。后续将进行算法策略的优化以及代码计算复杂度的简化。

(2) 本研究控制系统在执行给出运动逻辑时未能完整执行，未能达成机器人运动目标。分析认为是下位机 MCU 接收区域溢出导致，后续将进一步分析下位机控制程序，增加接收区域定期清除指令以纠正这一问题。

(3) 本研究硬件控制板缺乏保护措施，电源正负反接等操作过程易出现的失误都可能导致控制板关键元件直接损坏。后续将在空间允许的情况下在控制板上增加保护措施，提升控制硬件的可靠性。



致谢

四年时光如白驹过隙，此刻完成毕业论文的我，看着高考倒计时的新闻，那个带着满腔热血走进高考考场、在志愿填报系统上满怀希望地填写“北京航空航天大学”的少年犹在眼前。四年时间改变了许多，不改的是我对航空航天事业的热忱。

在此首先要感谢带领我开展研究工作的徐天彤老师、李海旺老师，在我毕业设计的过程中，面对在我知识面之外的全新课题内容，徐老师与其家人向我提供了无私的帮助，对我在课题中提出的创新性做法，徐老师毫无保留地鼓励我，同时为我评估做法的合理性，对我梳理课题内容和思路起到了至关重要的作用。李老师在繁忙事务之外时常关注本团队以及我的课题进展，并提出许多宝贵的指导意见，对我在科研中的思考方式进步起到了十分有意义的作用。两位老师对我研究的关注，对我循循善诱的教导与鞭策，我将时刻铭记在心。

感谢团队师兄们的热情指导，感谢团队毕设的其他成员与我同甘共苦、一起进步。特别感谢北京理工大学赵岳岩博士对我毕业设计内容的大力支持，我的许多或许幼稚的问题，他都不厌其烦地解答，有赵博士的指导，我感到十分幸运。

同时，我要感谢大一以来每一位优秀的任课教师，他们或严谨细致、或风趣幽默，在教学过程中将我塑造为一名孜孜以求的合格北航学生。

感谢我的父母。离家远行的日子里，他们是我坚强的后盾，无时无刻不在关心我的大学生活，每周不间断的电话让我能够暂时放下学业中的烦恼，重新“充能”去勇敢面对学习生活中的各种困难。

感谢我大二以来的三位舍友，他们或真诚或豁达，让宿舍成为我停靠的港湾。感谢进入大学以来我的同班同学们和朋友们，感谢我们一同拥有的美好的时光，那些明媚的回忆是我大学生活中最宝贵的财富。

最后要感谢飞天合唱团。感谢这个集体让我重新找到了热爱音乐、热爱歌唱、热爱艺术的理由，感谢每一位团员对我的热情接纳，感谢每一个能够“同声共气”的周六夜晚，感谢我们一同拥有过的所有美好的音乐作品。“We sing in love”，希望我们能一直唱下去。

大学四年即将结束，前路荆棘遍布，头顶星光璀璨。祝我能勇敢不悔地前行。



参考文献

- [1] 王常宏. 航空装备机械原因事故主要特点及预防措施[C]. 江苏省航空航天学会、中国航空学会航空维修工程分会、上海市航空学会、北京航空航天学会、江西省航空学会、浙江省航空学会、辽宁省航空宇航学会、湖南省航空学会、贵州省航空学会, 2011: 166-168.
- [2] Liu X, Liu Z, Zhu Y, et al. Moving Mechanism of a High-speed Insect-scale Microrobot via Electromagnetically Induced Vibration[J]. Journal of Bionic Engineering, 2021, 18(3): 662-673.
- [3] Qi M, Zhu Y, Liu Z, et al. A fast-moving electrostatic crawling insect[C]//2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2017: 761-764.
- [4] Bhushan P, Tomlin C. An Insect-Scale Self-Sufficient Rolling Microrobot[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(1): 167-172.
- [5] Fath A, Liu Y, Xia T, et al. MARSBot: A Bristle-Bot Microrobot with Augmented Reality Steering Control for Wireless Structural Health Monitoring[J]. Micromachines, 2024, 15(2): 202.
- [6] Lee K min, Kim Y, Paik J K, et al. Clawed Miniature Inchworm Robot Driven by Electromagnetic Oscillatory Actuator[J]. Journal of Bionic Engineering, 2015, 12(4): 519-526.
- [7] 汪明. 基于 FPGA 的小型足球机器人运动控制系统的设计[D]. 浙江理工大学, 2012.
- [8] 杨军文. 基于 STM32 的全向移动机器人设计[D]. 华中师范大学, 2019.
- [9] Dijkstra E W. A note on two problems in connexion with graphs[J].
- [10] Lin Z, Wu K, Shen R, et al. An Efficient and Accurate A-Star Algorithm for Autonomous Vehicle Path Planning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(6): 9003-9008.
- [11] Neeraja K, Narsimha G. A Multi Objective Hybrid Collision-free Optimal Path Finder for Autonomous Robots in Known Static Environments[J]. Scalable Computing: Practice and Experience, 2022, 23(4): 389-402.



- [12] Zhu S, Yuan J, Xiao J, 等. Obstacle-Avoidance Path Planning of Unmanned Vehicles based on Polynomial Optimization[C]//2022 China Automation Congress (CAC). Xiamen, China: IEEE, 2022: 6988-6992.
- [13] Li B, Wang Y, Ma S, et al. Adaptive Pure Pursuit: A Real-Time Path Planner Using Tracking Controllers to Plan Safe and Kinematically Feasible Paths[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2023, 8(9): 4155-4168.
- [14] Guo H, Hou X, Cao Z, et al. GP3: Gaussian Process Path Planning for Reliable Shortest Path in Transportation Networks[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8): 11575-11590.
- [15] Huang J K, Grizzle J W. Efficient Anytime CLF Reactive Planning System for a Bipedal Robot on Undulating Terrain[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2023, 39(3): 2093-2110.
- [16] Yu J, Chen C, Arab A, et al. RDT-RRT: Real-time double-tree rapidly-exploring random tree path planning for autonomous vehicles[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 240: 122510.
- [17] Yu F, Shang H, Zhu Q, et al. An efficient RRT-based motion planning algorithm for autonomous underwater vehicles under cylindrical sampling constraints[J]. Autonomous Robots, 2023, 47(3): 281-297.
- [18] Zhao P, Chang Y, Wu W, et al. Dynamic RRT: Fast Feasible Path Planning in Randomly Distributed Obstacle Environments[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2023, 107(4): 48.
- [19] Ma H, Meng F, Ye C, et al. Bi-Risk-RRT Based Efficient Motion Planning for Autonomous Ground Vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2022, 7(3): 722-733.
- [20] Gammell J D, Srinivasa S S, Barfoot T D. Informed RRT*: Optimal sampling-based path planning focused via direct sampling of an admissible ellipsoidal heuristic[C]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014: 2997-3004.
- [21] Adiyatov O, Varol H A. Rapidly-exploring random tree based memory efficient motion planning[C]//2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu, Kagawa, Japan: IEEE, 2013: 354-359.



- [22] Li Guangshun, Shi Hongbo. Study of technology on path planning for mobile robots[C]//2008 Chinese Control and Decision Conference. Yantai, Shandong, China: IEEE, 2008: 3295-3300.
- [23] 单立军, 孔永华. 基于 STM32 单片机的智能窗控制系统设计[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(6): 84-90.
- [24] 刘帅. 一种仿生四足软体机器人的设计与控制[D]. 内蒙古工业大学, 2021.
- [25] 杨帅. 舞台灯光控制系统的设计与研究[D]. 中北大学, 2013.
- [26] Wang H, Luo W, Zhou T, et al. Research on Soft-Switching Bi-directional DC/DC Converter for Hydrogen-electric Hybrid Vehicle[C]//2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). Hefei, China: IEEE, 2020: 5514-5519.
- [27] 潘雪荧, 吴庆达. 基于 Qt 的仿蚕机器人上位机软件设计与实现[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(8): 193-196.
- [28] 孙孟宇, 刘绚, 张梅洁. 一种基于 PyQt 的上位机测试软件设计[J]. 山西电子技术, 2025(1): 83-86.
- [29] Huachang L. Analog Serial Communication Between Minitype PIC and PC[J].
- [30] Jian H. Research of Serial Communication Based on STM32[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Education, Management, Information and Computer Science (ICEMC 2017). Shenyang, China: Atlantis Press, 2017.