

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题目：智能割草机路径跟随系统关键技术研究

研究生 王梦瑶

专业 电子科学与技术

指导教师 陈科明 副教授

企业导师 曾佳

完成日期 2023 年 5 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

智能割草机路径跟随系统关键技术研究

研 究 生： 王梦瑶

指导教师： 陈科明

2023 年 5 月

Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University

for the Degree of Master

**Research on key technologies of intelligent
mowers roadbed planning system**

Candidate: Wang Mengyao

Supervisor: Associate Prof. Chen Keming

May 2023

杭州电子科技大学 学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品或成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任。

论文作者签名：

王梦瑶

日期：2023年6月1日

学位论文使用授权说明

本人完全了解杭州电子科技大学关于保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属杭州电子科技大学。本人保证毕业离校后，发表论文或使用论文工作成果时署单位名称仍然为杭州电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅和借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。（保密论文在解密后遵守此规定）

论文作者签名：

王梦瑶

日期：2023年6月1日

指导教师签名：

陈利明

日期：2023年6月1日

摘要

智能割草机可以实现无人化维护,自动割草,其应用越来越广泛。目前,智能割草机普遍存在系统航向角的精度问题和运动跟随问题,导致割草机不能准确直线行走和精准转弯,从而影响割草机的路径规划效果,进而导致割草机效率低、覆盖率低、重复率高等问题。准确的路径跟随系统不仅需要准确的航向角,还依赖于能够应对多种复杂工况的电机驱动控制系统,能够在实际应用中根据不同的工况给出不同的指令调速以提高割草机的运动跟随精度,真正实现割草机路径跟随。

本文针对智能割草机系统航向角的精度问题,提出基于 INS/磁力计组合导航的测量方案,首先对惯性导航传感器进行 N 长滑动滤波来消除静态漂移误差,然后利用惯性导航求出的俯仰角和横滚角补偿磁力计并计算出磁航向角,最后对多传感器进行数据融合,最终输出准确可靠的航向角。

本文针对智能割草机系统运动跟随问题,利用组合导航获取精确航向角,结合电机驱动控制系统,设计了基于 INS/磁力计组合导航和模糊 PD 控制双轮差速电机的智能割草机系统。本文智能割草机系统硬件设计使用主控模块调度各个子模块功能的架构,软件设计使用实时操作系统下的多任务架构,软硬件结合共同实现割草作业、直线行走和路径规划等功能,应用层结合软硬件采用蓝牙和 Wi-Fi 双通道通信,方便用户远程操控和实时查看割草机的运行数据及状态。

利用不同工作环境结合对比实验对组合导航精度问题进行测试。测试结果表明:本文的算法在运动状态监测下,实现静止状态 0 漂移;智能割草机在 35m 平整长廊中直线行走,航向偏移 $<0.5^{\circ}$ 。基于组合导航得到的航向角数据,本文结合智能割草机的运动模型和复杂的工作环境,采用模糊 PD 控制算法和传统 PID 控制算法来控制双轮差速驱动。对比试验结果表明:本文采用的模糊 PD 控制算法在运动跟随的控制效果更为精确,实现智能割草机在 35m 平整长廊中行走测试偏移中心线 $<0.2\text{m}$,在 20m 复杂路况草坪上偏移中心线 $<0.45\text{m}$ 。

关键词: 智能割草机, 航向角, 组合导航, 磁力计, 路径跟随

ABSTRACT

Intelligent lawn mower can realize unmanned maintenance, automatic cutting grass, its application is more and more widely. At present, the intelligent lawn mower generally has the problems of the precision of the system heading Angle and the motion following, resulting in the lawn mower can not accurately walk straightly and turn precisely, which affects the path planning effect of the lawn mower, and then leads to the low efficiency, low coverage rate, high repetition rate. Accurate path following system not only requires accurate heading Angle, but also depends on the motor drive control system which can cope with a variety of complex working conditions. It can give different instructions to speed regulation according to different working conditions in practical application to improve the motion following accuracy of the mower, and truly realize the path following of the mower.

Aiming at the accuracy of heading Angle of intelligent lawn mower system, this paper proposes a measurement scheme based on INS and magnetometer integrated navigation. Firstly, N-long sliding filtering is carried out on inertial navigation sensor to eliminate static drift error, and then the pitch Angle and roll Angle obtained by inertial navigation are used to compensate the magnetometer and calculate the magnetic heading Angle. Finally, data fusion is carried out on multiple sensors. The final output is accurate and reliable course Angle.

In this paper, an intelligent lawn mower system based on INS/ magnetometer navigation and fuzzy PD control of two-wheel differential motor is designed, aiming at the motion following problem of intelligent lawn mower system, using integrated navigation to obtain precise heading Angle and combining with motor drive control system. In this paper, the hardware design of the intelligent lawn mower system uses the main control module to schedule the functions of each sub-module. The software design uses the multi-task architecture under the real-time operating system. The software and hardware are combined to realize the functions of lawn mowing, straight walking and path planning. It is convenient for users to remotely control and view the running data and status of the mower in real time.

The precision of integrated navigation is tested by different working environments and comparative experiments. The test results show that the proposed algorithm can

realize 0 drift in static state under the condition of motion state monitoring. The intelligent lawn mower walks in a straight line in a 35m flat corridor, and the heading deviation is $<0.5^\circ$. Based on the heading Angle data obtained by integrated navigation, this paper combined the motion model of intelligent mower and complex working environment, and adopted the fuzzy PD control algorithm and the traditional PID control algorithm to control the two-wheel differential drive. The comparative test results show that the fuzzy PD control algorithm adopted in this paper has a more accurate control effect on motion following, and the deviation center line of the intelligent lawn mower is $<0.2\text{m}$ in the 35m flat corridor and $<0.45\text{m}$ in the 20m complex road condition lawn.

Keywords: Smart lawn mower, Heading, Combined navigation, Magnetometer, Path following

目录

摘要.....	1
ABSTRACT.....	II
目录.....	1
第一章 绪论.....	1
1.1 研究意义与背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 智能割草机研究现状.....	2
1.2.2 智能割草机路径跟随的研究重点.....	4
1.3 本文的主要工作内容.....	5
第二章 智能割草机系统设计.....	7
2.1 系统总体框架设计.....	7
2.2 系统硬件设计.....	8
2.2.1 MCU 主控模块设计	9
2.2.2 电源模块设计.....	10
2.2.3 电机驱动模块设计.....	11
2.2.4 多传感器模块设计.....	12
2.2.4.1 角度传感器模块.....	13
2.2.4.2 超声波传感器模块.....	14
2.2.5 无线通信模块设计.....	15
2.3 系统软件方案设计.....	15
2.3.1 嵌入式操作系统分析.....	15
2.3.2 多任务软件架构设计.....	16
2.3.3 设备检测类任务设计.....	17
2.3.4 设备控制类任务设计.....	18
2.3.5 设备交互类任务设计.....	19
2.4 系统交互应用层设计.....	20
2.4.1 云平台设计.....	20
2.4.1.1 设备云.....	20
2.4.1.2 业务云.....	21

2.4.2 APP 设计	21
2.5 本章小结.....	22
第三章 基于 INS/磁力计组合导航的航向角测量方案	25
3.1 航向角测量方案分析.....	25
3.1.1 传统航向角测量方案分析.....	25
3.1.2 航向角测量优化方案.....	26
3.2 基于惯性导航的航向角测量设计.....	27
3.2.1 陀螺仪漂移误差影响.....	27
3.2.1.1 陀螺仪航行角解算.....	27
3.2.1.2 陀螺仪的漂移误差.....	27
3.2.2 自适应滑动滤波算法.....	29
3.2.2.1 求解静态漂移误差.....	30
3.2.2.2 确定 N 值.....	30
3.2.2.3 创建滑动窗口.....	32
3.2.2.4 求解偏航角.....	32
3.2.3 直线行走航向角实验结果与分析.....	34
3.3 基于组合导航数据融合解算航向.....	36
3.3.1 姿态描述.....	36
3.3.2 基于磁传感器的姿态解算方法.....	36
3.3.3 基于互补滤波算法的数据融合.....	37
3.3.4 转弯航向角实验结果与分析.....	39
3.4 本章小结.....	40
第四章 基于模糊 PD 算法的智能割草机双轮差速驱动控制	41
4.1 双轮差速驱动控制方案分析.....	41
4.1.1 传统控制方案分析.....	41
4.1.2 控制方案优化.....	42
4.2 智能割草机的运动模型.....	42
4.2.1 智能割草机运动模型分析.....	42
4.2.2 智能割草机三种运动状态分析.....	44
4.2.3 智能割草机运动方向跟随误差分析.....	45
4.3 双轮差速模糊 PD 控制	46
4.3.1 模糊控制理论.....	46
4.3.2 模糊 PD 控制器设计	47

4.4 测试与分析.....	51
4.4.1 测试环境设定.....	51
4.4.2 基于不同控制算法的双轮差速控制割草机行走测试.....	53
4.4.3 基于不同航向角的双轮差速控制割草机行走测试.....	54
4.4.4 结果分析.....	56
4.5 本章小结.....	56
第五章 总结与展望.....	57
5.1 总结.....	57
5.2 展望.....	58
参考文献.....	59
致谢.....	63
附 录.....	65

第一章 绪论

1.1 研究意义与背景

随着社会主义市场经济的发展,全国各地城市化速度逐步加快,中心城区的园林绿化水平也相应提升,大量的公园绿地、足球场草地、高尔夫球场草坪等公共绿化草坪也必须加以维护^[1]。草坪维护繁重且需要定期维护,人工维护成本高。由于国外对草坪管控要求高且开始的早,因此为了降低草坪维护作业的成本,西方国家提出用现代电子技术和智能控制技术来替代人工蓄力战略^[2]。割草机的发展开始于第一台可以收割谷物的手推式割草机,其通过推动齿轮带动旋刀实现割草^[3]。割草机从蓄力发展到拖拉机拖动再到智能控制,在安全性、可靠性等方面取得了重大突破。

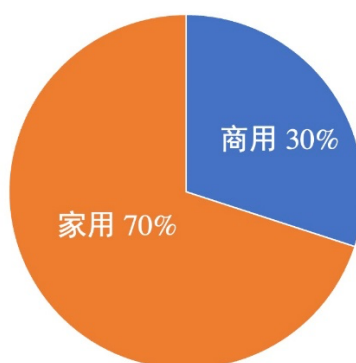


图 1.1 2020 年割草机器人应用终端占比

由图 1.1 可以看出,随着城乡经济的发展,家庭私人草地面积的大幅增加^[4],都需要割草机对其维护和修剪,家用割草机在市场上占比应用终端达到 70%,数据表明市场对应用的需求更加偏向于适用家用的高性价比智能割草机。如图 1.2 所示,随着人们对环保的意识逐渐提升,全球智能割草机市场规模也会越来越大,所以要提高割草机的智能性以及性价比来满足智能割草机的家用所需^[5]。智能割草机可以实现自主规划路线和自主割草,自主充电和感应外界环境并做出相应的保护措施,基本满足市场需求,但是目前市场上实现各项功能的智能割草机的成本较高,系统实现复杂,有实现太阳能供电、有实现 GPS 定位等功能,无疑将只能割草机的成本提高,但是对于普通家用,更加追求性价比,在追求性价比的同时,也希望智能割草机能够提高工作效率,因此对智能割草机的高性价比的优化和设计具有很大的必要性。

智能割草机器人是一种综合机器人系统，其中集成了各类传感器实现对外界环境的感知，可以通过主控调度控制各个模块，测量和计算各类传感器数据，具有自主规划割草路径的能力^[6-8]。智能割草机器人相较于传统割草机有以下几个优势：首先智能割草机器人可以自主工作，其内部嵌入的主控芯片可以实现快速处理各项任务，合理调度各项子任务，与各模块搭配工作实现快速响应外界环境与任务；其次智能割草机器人具有较高的安全性，其具有多种传感器可以感知外部环境，结合控制系统应对外界不同的环境情况自主做出不同的操作行为。

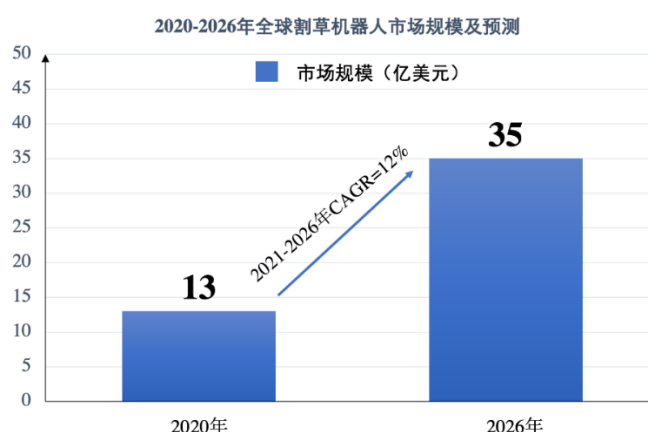


图 1.2 2020-2026 年全球割草机器人市场规模及预测

综上所述，智能割草机的智能化得到了快速发展，但是智能割草机自主割草的工作效率是基于路径规划来提高割草覆盖率，有“弓”字割草、随机割草等方式^[9]；但路径规划提高割草的覆盖率依赖于准确的航向角以及路径跟随驱动控制，不准确的航向角会导致智能割草机的行进中会不断累积方向角度误差，导致割草机随时间越来越偏移原定航向和路径，从而降低割草机工作效率，最终导致割草面积重复覆盖或覆盖不全等问题，所以开展对智能割草机的路径跟随系统的研究有着重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 智能割草机研究现状

智能割草机的研究起源于国外，由于国外对私人草坪管理严格，所以对草坪的修建工作格外重视，需要智能割草机解放双手，提高工作效率。但是早期的智能割草机并不具备自主规划割草的功能，但随着 MEMS(Micro Electro Mechanical Sensor) 传感器发展，将其引入割草机，实现低成本感知外界环境，模拟人的感知，再通过感知数据通过计算以及预判实现对智能割草机的决策判断，由此智能

割草机的功能日益完善^[10]。

国外公司在智能割草机上的研究开始的比较早，研究成果目前也比较前沿和成熟，瑞典 Husqvarna 公司^[11]研发的环保型割草机“Automower”，如图 1.3（a）所示，其在实现太阳能供电的同时也保留了蓄电池供电，最大程度上保证智能割草机的工作时长，可以实现在户外长时间割草^[12]，除此之外该设备可以实现智能互联，即能与亚马逊的 Alexa、Google Home 等 AI 设备和智能家居联动，通过声控系统实现语音遥控等；具有远程对象检测功能的超声波，一旦感测到周围存在障碍物，即可自动降低速度，避免发生危害火损害。



(a)

图 1.3 (a)富世华割草机器人 AM450



(b)

(b)以色列 Robomow 割草机 RK00Pro

以色列 Robomow 公司研发的割草机 RK00Pro 系列中实现以蓝牙的方式远程通信，但也局限于蓝牙不能远距离通信，因此该功能不适用智能割草机户外工作，实物如图 1.3（b）所示；美国的 Friendly Machines 公司推出的 RL805 型智能割草机^[13]，该设备上使用了电子围栏技术，用来提高智能割草机路径规划效率，但是当设备碰到围栏时即随机调转方向，但是随机调转方向的应对措施存在一定的随机性，一定程度上会降低割草效率。除此之外还有很多公司添加各类传感器，如雨水传感器、超声波传感器、避障传感器等来完善智能割草系统，不断扩充与完善智能割草机的功能与性能。

随着国内人均草坪上涨和国外对智能割草机的需求逐年增加，国内公司也纷纷加入，2022 年割草季，九号公司推出智能割草机赛格威 Navimow，该机器使用该公司自主研发的 EFLS（Exact Fusion Locating System）融合定位系统，通过融合多种传感器信息，实现无需提前埋线情况下的厘米级基准定位，让割草机器人在草地上实现厘米级精确定位，采用“弓”字形规划式切割路径以及断点续割功能，能有效避免重复割草^[14]。

苏州宝时得推出威克士 Landroid 智能割草机，配备了全球创新的人工智能（Artificial Intelligence Algorithm）技术，为其在工作时提供导航技术，可以顺利通过任何狭窄通道或错综复杂的草坪。除此之外，Landroid 可以感知障碍物并改

变割草路线避开障碍物。



(a)

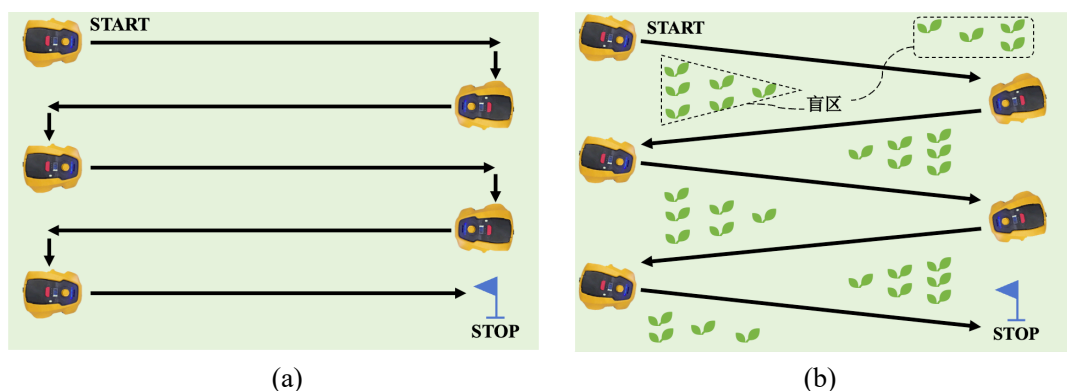


(b)

图 1.4 (a)九号公司赛格威 Navimow (b)宝时得威克士 Landroid

除企业之外，国内很多高校针对提高智能割草机的割草效率做出了很多相关的研究。2016 年浙江理工大学童逸舟团队将图像处理应用于智能割草机系统来拟合工作分界线，可以补偿因航向角不准而导致的割草覆盖率低的问题^[15]；江苏大学对智能割草机的运动控制和割草效率做出一定的改进^[16]，提出在履带式割草机的基础上，加入了 GPS 定位导航功能，方便路径规划，从而提高割草效率；东南大学对智能割草机的驱动电机控制系统做出了相应的改进^[17]，定位系统结合 UWB 定位与航迹推算，从而实现系统以一定角度向前行进保持直行。

1.2.2 智能割草机路径跟随的研究重点



(a)

(b)

图 1.5 (a)理想路径规划示意图 (b)实际路径规划示意图

智能割草机的路径跟随的目标是为了能够实现路径规划的高效性，不合理的路径跟随会使得在路径规划的过程中偏离既定航向最终导致重复割草或者割草覆盖率降低，降低工作效率^[18-19]。如图 1.5 所示，智能割草机以“弓”字型规划割草作业，图 1.5 (a) 为理想的路径跟随系统下的能够沿着规划路线精准直行与转弯的示意图，能够达到覆盖整个割草环境，割草作业效率高，覆盖率高，对比图

1.5 (b) 由于路径跟随系统不够准确, 在直行或者转弯的时候都会存在误差, 在路径规划系统中造成严重影响, 在割草作业中, 出现很多区域未覆盖到, 导致割草效率低下。由上述综述分析, 本文研究的智能割草机的路径跟随系统的主要研究目标有以下两点内容:

1) 航向角信息准确获取策略

准确获取航向角信息是智能割草机实现准确路径跟随的基础。智能割草机的航向角可以通过安装在主板上的惯性传感器获取, 但由于惯性传感器中用来解算航向角的陀螺仪器件会随着时间漂移累积误差, 使得航向角检测精度下降, 所以需要结合磁力计组合导航纠偏以及数据融合滤波, 从而解算出更为精确的航向角信息。

2) 双轮差速驱动控制器系统

航向角是为了感知和对比运动方向, 但是真正控制智能割草机行走方向的是通过双轮差速驱动来完成的, 即通过所获的航向角信息, 实时调整双轮的速度形成速差来调整方向, 回到原来的航向角度。不断与最新获得的航向角信息进行比较并且做出调整, 实现运动跟随。此阶段需要考虑到航向角的变化率, 反映到实际工作中则是表示工况复杂, 对于双轮差速驱动控制也要有对应的不同的措施来应对复杂的工况。同时, 由于智能割草机的运动模型是非线性系统, 在设计双轮差速驱动控制器时也要充分考虑到该因素, 进一步确保双轮差速驱动控制器的快速和精确的反应。

1.3 本文的主要工作内容

为了实现智能割草机的运动跟随的准确性, 需要以准确的偏航角为基础, 设计能对给定航向角精确跟随的双轮差速控制器。因此本文首先使用基于惯性导航组合磁力计的组合导航系统, 结合陀螺仪短时间有效, 磁力计长时间有效的特性做出分析, 加以融合算法最终解算出用于智能割草机航向控制的航向角。对于运动跟随中的双轮差速驱动控制则是能够准确跟随运动航向的关键, 本文通过分析智能割草机的运动模型, 采用前文计算的航向角, 将模糊 PD 控制器用于智能割草机的双轮差速控制系统形成运动跟随系统闭环。

在硬件方面, 本文先介绍智能割草机的各个子模块的设计, 基于主控模块管理各个相应功能子模块的框架下, 共同搭建复杂的硬件环境; 在软件方面, 以 uC/OS-III 操作系统作为软件系统的运行环境, 以多任务软件架构去简单、高效的处理智能割草机复杂的任务系统。全文分为五个章节, 主要研究内容如下:

第一章详细介绍了智能割草机的研究现状, 分析智能割草机需要优化的方向

以及优化意义，对比国内外割草机的技术要点、发展现状以及优缺点进行对比，然后点明了本课题的研究重点，概述了组合导航解算航向角结合驱动控制完成智能控制系统的路径跟随的技术要点。

第二章分别从软件、硬件及交互层面介绍了智能割草机的系统设计，并且对各个层面进行分模块详细介绍及分析，介绍各模块的选型及原因，并做出相应的实物展示。

第三章介绍了基于组合导航计算航向角的算法及实现，首先利用惯性导航传感器算出航向角并加以滑动滤波来消除运动过程中的陀螺仪漂移误差，并且通过加速度计可以判断割草机的运动状态加以状态区分，可以进一步消除漂移误差，该算法适用于智能割草机走直线过程中的航向获取，转弯过程中，航向角偏差率变大，角度补偿不够，所以辅助磁力计加以纠偏，先对磁力计滤波排除干扰，再通过数据融合互补滤波算法算出更加精确的航向角，并且利用变量控制法验证解算出来的航向角的准确性。

第四章首先分析了智能割草机的运动模型，进而分析产生运动跟随误差的原因，随之提出了模糊控制理论，针对运动跟随误差问题，本文提出基于模糊 PD 控制算法来实现对智能割草机的双轮差速控制器的控制，最后利用第三章解算出来的航向角以及本章的控制器进行实验，验证航向角和模糊 PD 控制器的有效性。

第五章对本文内容进行了总结，提出对本文研究的高性价比智能割草机后期可以继续完善的技术要点，对本文智能割草机后续研发工作做出展望。

第二章 智能割草机系统设计

结合市场对智能割草机的功能需求以及技术要点,本章主要介绍智能割草机的系统设计,包括功能介绍、技术实现以及针对上一代智能割草机在功能上的不足之处所做的改进。本系统以主控模块为主,结合相关功能子模块,主控模块调度子模块的完成复杂任务,软件使用 uC/OS-III 操作系统并以多任务方式合理调度控制所需智能的子模块,实现智能割草机的自主割草,持续直行和避障转弯等功能。本系统为了便携用户交互,结合云平台对应用层进行开发设计,使用无线通信模块将整机运行产生的数据上传应用层,实现远程管理和远程升级等功能。

智能割草机的总体设计需要包含供电、电机驱动、控制等基础模块,也要有相应的人机交互模块,环境感知模块、导航模块等。同时考虑成本,功能需求等要素,每个模块的设计都极其重要。

2.1 系统总体框架设计

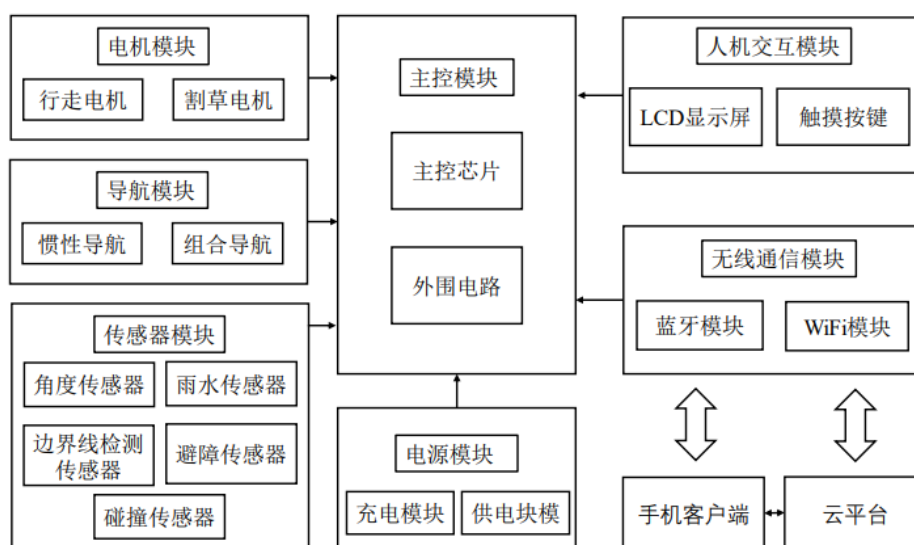


图 2.1 系统框架图

本文智能割草机根据需求以及功能等因素将割草机模块化:首先,电源模块是割草机的动力源,会实时向主控汇报电量,主控模块会根据电量数据下发不同指令采取措施,同时上报云平台;其次,驱动模块由直流无刷电机和割草电机组成,是驱动割草机工作的基础;传感器模块包含多个不同功能传感器来感知外界

或内部环境信息；导航模块为路径跟随与路径规划提供航向信息；通信模块可以实现人机交互的同时将相关数据上报云平台，对机器各个技术要点进行监控；最后，主控模块是属于控制模块的核心，其负责调度各个功能模块以适应不同的工作情景。系统的整体框架如图 2.1 所示。

本文设计的智能割草机是功能齐全、可以实现智能化割草的设备，其具体性能指标如表 2.1 所示：

表 2.1 本文设计的智能割草机主要性能指标

参数名称	参数值	参数名称	参数值
机身重量	< 9kg	工作时间	100min
电池信息	28V、2.5Ah	用户密码	具备
割草效率	50m ² /h	软件升级	具备
割草转速	3500RPM	碰撞保护	具备
割草宽度	500mm	雨水感应	具备
割草高度	20mm~50mm	路径规划	具备
割草面积	2000m ²	声音警报	具备
最大坡度	35°	障碍物识别	具备
噪声大小	小于 65dB	远程操控	具备

2.2 系统硬件设计

智能割草机的硬件系统设计主要包括 MCU（Micro Controller Unit）主控电路、角度检测传感器、驱动电机以及电源等硬件部分实现。在路径跟随系统中，是通过角度传感器测量实时航向角并结合智能割草机的运动学模型计算跟随误差，在 MCU 主控电路中产生转速控制指令来驱动无刷直流电机，实现对驱动电机的控制，电机转速变化驱使智能割草机的两个轮子产生差速从而调整方向，使得智能割草机的运动方向重新跟随到指定航向角上。电路模块组成如图 2.2 所示的主电路板。

本文所研究的智能割草机正面结构图如图 2.3 所示，包括整机外部配有控制面板和紧急停机键，割草高度调整按钮等控制部件，内部配有电池包、电机等部件。控制面板可以让用户直接通过智能割草机输入控制命令，紧急停机键可以让用户在发现问题及时停止，电池包则嵌在机身内部给割草机功能。

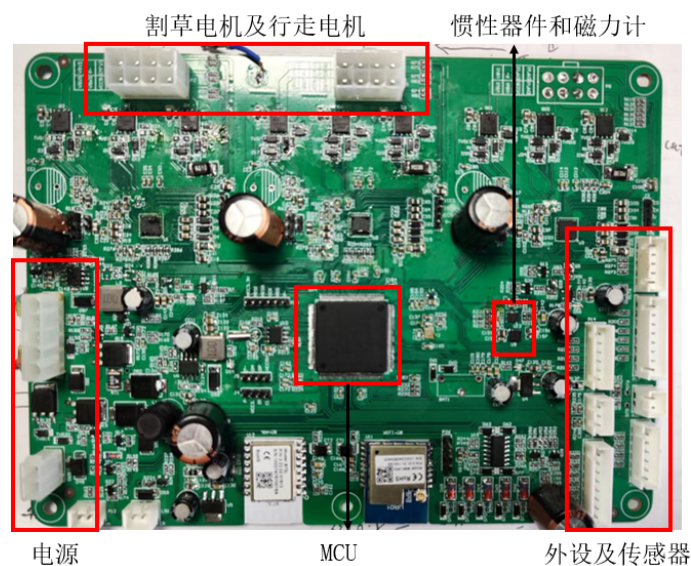


图 2.2 智能割草机主电路板



图 2.3 智能割草机正面结构图

2.2.1 MCU 主控模块设计

主控模块是本系统的核心控制模块，根据智能割草机的各项功能分为各种不同的子模块，主控模块则主要负责合理调用这些功能子模块、分析处理各项数据并做出相应的反馈。

由于智能割草机整机信息采集频繁、作业环境复杂、数据计算处理频繁、驱动控制等任务处理复杂，导致智能割草机的整机系统架构复杂，所以本文综合成本以及性能等方面的考虑，选用 GD32F305VET6 型号芯片，实物对应图 2.2 中

的 MCU 主控芯片。该芯片高效、安全、速度快、功能齐全、接口丰富、易于扩展、性价比高，适用于嵌入式领域，可以在低成本的前提下提供较高的代码效率与计算性能。

2.2.2 电源模块设计

智能割草机的电源模块分为供电模块和充电模块。图 2.4 为割草机充电基站电路板。

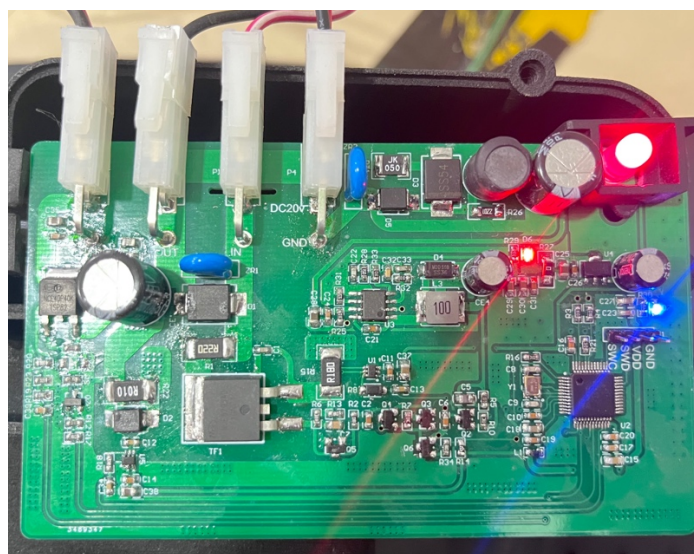


图 2.4 智能割草机充电基站电路板

本文设计的智能割草机的工作环境一般是户外草坪，并且面积较大，所以在户外工作的时候要保证动力源问题，所以在电源模块上的设计要满足高效、满足不同模块的电压电流需求和电压电流转换便捷等要。因此本文设计的供电模块是由 4.2V 的锂电池包组成，放在割草机内部，紧挨着主控电路板，其最高可以输出 28V 电压，能够根据不同模块需求进行电压转换^[20]。

在充电模块设计上，要考虑到保护电池的问题，延长电池使用寿命，所以本文设计的充电模块采用恒流恒压的方式充电，该方式在保证充电效率的同时也能避免电流的过流和过充的问题。该方式的充电过程有三个阶段：预充阶段、恒流阶段和恒压阶段。充电过程如图 2.5 所示，预充就是当检测到电压低于下限阈值电压 2.5V 时会预充至 2.5V，预充阶段电流较小；当电压升高到 2.5V 后则进入第二阶段，该阶段是电池电压进行恒流直充直至电池电压达到预设的满值电压 4.2V；当电池组电压达到 4.2V 附近时，电池进行恒压充电阶段，充电电流减小。

供电模块主要分为三个大模块供电：驱动电机模块、主控模块、其他子模块。驱动模块主要是电池组通过开关控制电路直接为其供电；电池组通过 LM25676、

CJ78M05 以及 LM1117 型号的电压转换芯片，分别将电池组电源转换至 3.3V、5V 和 12V 电压，根据不同模块的电压需求使用主控使用变换后的 3.3V 电压，其他子模块则是按需供电。电源模块中的供电部分的结构图如图 2.6 所示。

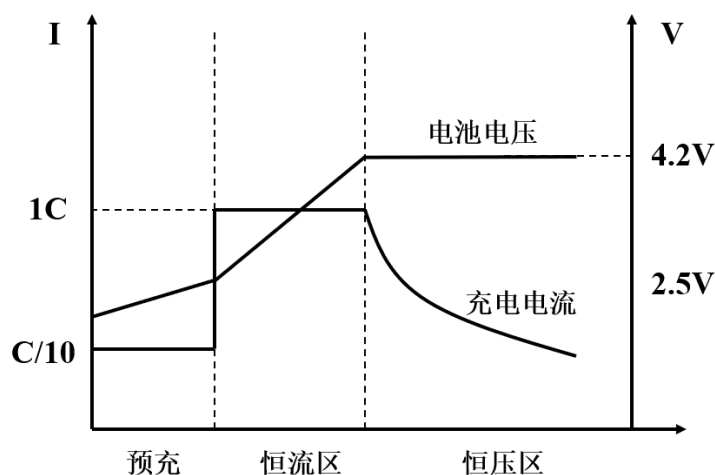


图 2.5 恒流压充电示意图

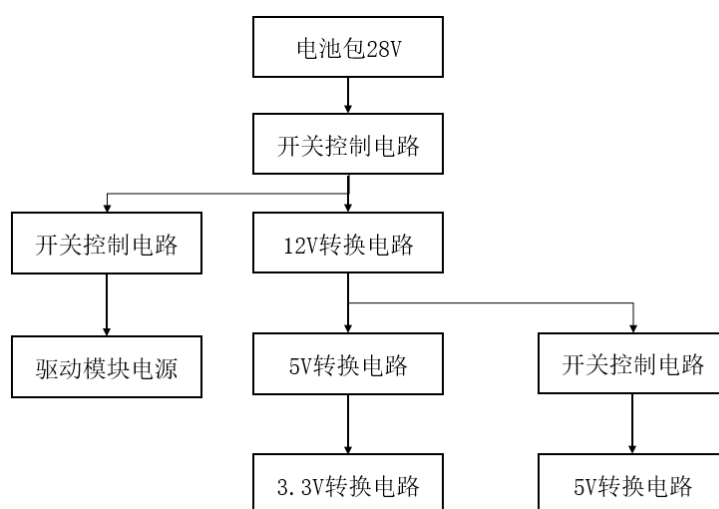


图 2.6 供电模块结构图

2.2.3 电机驱动模块设计

根据智能割草机的工作特征可以将驱动分为行进模块驱动和割草作业模块驱动，因此本文设计的智能割草机的驱动模块包含了这两个模块内容，行进模块的驱动负责控制割草机跟随航向角行走，当航向角发生变化时，行进驱动模块会检测到变化驱动智能割草机两个车轮转动产生差速，从而控制智能割草机行进方向，实现跟随航向行走；割草作业模块驱动则驱动割草工作，带动割草刀片转动

起来实现割草作业。

本文设计的智能割草机系统中的驱动模块需要驱动电机控制芯片和测速芯片来调度驱动相关任务和完成相关车轮转速数据的采集，从而实现调整方向和行进割草的目的。考虑到成本与功能的因素，驱动控制芯片本文选择 MC33035，测速芯片本文选择 MC33039，该芯片响应快，符合本文对其功能的要求。



图 2.7 驱动模块电路示意图

驱动模块是一个有反馈的闭环过程，其电路示意图如图 2.7 所示。其过程主要分为以下几个步骤：首先主控模块根据角度传感器获得航向信息，根据航向信息生成对应的方向指令和速度指令并传递至驱动控制芯片，驱动控制芯片将对比方向与速度指令，采用相关控制算法输出控制驱动电机的指令通过三相电路传给驱动电机^[21]；测速芯片负责检测驱动电机的霍尔信号，输出对应的转速度值传递给控制芯片，主控模块再整合信息进入下一轮调整，由此过程形成闭环控制。

2.2.4 多传感器模块设计

智能割草机要实现草坪自动化割草，除了具备基本的割草功能，还需要具有能够感知周围环境、根据环境和障碍物能够做出自主判断决策的功能。传感器能够感知环境信息，从而可以将外界环境以数字化的形式提供给智能割草机系统的主控模块，主控模块将融合不同的传感器数据生成不同的控制指令应对不同的外界环境^[22]。例如当雨水传感器感受到雨水时，可以生成返回充电桩指令，避免长时间停留在外，也可以通过 APP 上报客户端提醒用户做出相对应措施；角度传感器可以感知当前的行走方向，结合驱动模块调整智能割草机的行走方向，以便更加准确的实现无人割草、进一步实现路径规划^[23]，最终提高割草的覆盖率等。

本文设计的智能割草机的传感器模块集成了雨水传感器、超声波传感器、角度传感器和磁力计、边界线检测传感器和碰撞传感器等。本节主要介绍运动跟随系统相关的传感器，包括角度传感器、磁力计、超声波传感器等。

2.2.4.1 角度传感器模块

角度传感器主要是用来获取智能割草机的运动状态以及相对位置，一般由陀螺仪和加速度计组成惯性导航传感器，陀螺仪传感器可以感知智能割草机在载体坐标系上三个轴的角速度，加速度计传感器则是可以感知智能割草机在载体坐标系上三个轴方向上的加速度，二者组合可以通过四元数、方向余弦等方法计算出相应的姿态角^[24]。

姿态角是用来描述物体的位置与状态，用航向角、俯仰角和横滚角三个欧拉角表示。一般情况下，姿态角的测量都是通过物体在不同坐标系下沿着各轴转动所得，不同的转动顺序会形成不同的坐标变换矩阵，通常按航向角、俯仰角和横滚角的顺序来表示载体坐标系相对于地理坐标系的空间转动^[25]，如图 2.8 所示。

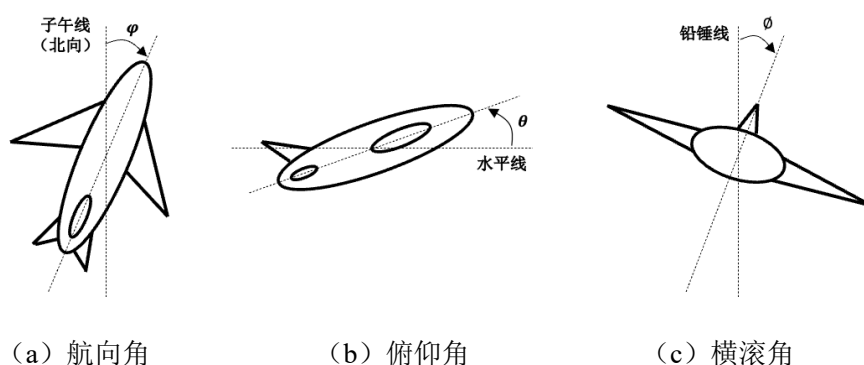


图 2.8 姿态角示意图

智能割草机使用姿态角来感知其运动状态，根据俯仰角和横滚角可以得知割草机的倾斜状态，当割草机在行进过程中遇到斜坡或者障碍物发生侧翻等事故时，主控模块会通过传感器模块计算出角度信息，根据该角度信息推断割草机已发生侧翻事件，主控会立即控制行走电机及割草点击停止转动并通过无线模块上报故障，以减小对割草机的损伤，进一步提高割草机的安全性能。当智能割草机开启自动割草，跟着路径规划的路径作业时，需要依靠准确的航向角配合电机进行准确的直线行走和转弯，由于割草机的工况是环境复杂的草坪，草坪上的石子、滑湿路面、不规则草地形状等非理想路况都会影响割草机的运动跟随，因此会产生相应的误差，所以面对割草机复杂的工作环境，更需要合适的算法策略和性能来获取精确的航向角数据和应对不同工作情况的驱动控制系统，这将是文本重点解决的问题。

本文采用的角度传感器使用的是惯性传感器 QMI8658A，以三轴磁力计 QMC5883P 作为辅助模块组成组合导航模块，该模块通过 IIC 为主控提供相应的

角度信息。作为民用低成本 MEMS 传感器, QMI8658A 在使用过程中伴随有累积误差, 直接使用会引入较大误差, 影响工作效率, 进而导致割草机的工作路径发生偏移, 最终影响工作效率。但因为 MEMS 传感器成本低, 体积小, 集成度高, 使用方便, 所以依旧被广泛使用。

在提高航向角精度方面, 一般有两种方案: 一种是使用滤波算法减小误差影响, 另一种则是采用组合导航, 在惯性导航的基础上组合如磁力计、GPS 等进行数据融合。第一种方案只能减少误差, 不能从根本上解决问题, 但依旧会因为复杂的工作环境产生误差并随时间累积; 第二种方案则是利用不同传感器的特性互补, 陀螺仪只能获取相对航向角, 而磁力计或者 GPS 则是获取绝对方位, 并不会随着时间累积误差, 以此特性叠加算法数据融合, 获取更为可靠的航向角。

本文航向角的计算由两部分组成, 由惯性传感器获取航向角并使用 N 长滑动滤波算法进行滤波以获取长时间的准确航向角用于直线行走, 但是在转弯的过程中, 由于转弯的角速度值增大, 经过滤波后的传感器角度反应速度相对有所降低, 所以转弯角度存在一定偏差, 针对这个问题, 本文在惯性导航的滤波后的基础上加入磁力计形成组合导航模块, 磁力计是计算的航向角是磁航向, 即与地磁的偏差角, 所以是绝对航向角。绝对航向角不会随着运动时长累积误差, 也不会因为角速度提高而出现反应速度下降等问题, 长时间有效, 因此可以用作航向角长时间校准。

2.2.4.2 超声波传感器模块

由于智能割草机的工作环境是工况复杂的户外草坪, 草坪地形不规则且多有如花卉、树木、石头等影响割草机继续安全平稳行进的障碍物^[25-26], 所以智能割草机需具备检测障碍物功能。超声波传感器是通过获取超声波信号在设备及障碍物之间信号来回传输的时间, 可以检测到一定距离内的障碍物。因此本文采用该传感器作为障碍物检测模块的信息采集来源。本文选用 TI 公司的 PGA460 超声波传感器模块, 该模块可以检测到 5~11cm 以内的障碍物。除此之外, 该模块还具备低功耗模式, 当割草机长时间处于未工作状态时, 该模块会自动进入低功耗模式, 在设备工作状态下, 主控模块会调用接口使得该模块进入运动状态, 因此该模块可以实现以低功耗模式工作, 增长工作时长。

一般超声波装置是一个发送端对应一个接收端, 其检测过程使该发送端会一直发送超声波信号, 当感测到足够大小的障碍物时信号会发生反射, 接收端收到反射信号判断前方有障碍物。

2.2.5 无线通信模块设计

本文设计的智能割草机实现通过蓝牙和 Wi-Fi 双模块通信功能，在距离较短的情况下可以选择通过蓝牙连接到智能割草机设备并对割草机设备进行操控，比如控制本设备进行定时、开始或停止操作。但由于智能割草机的工作环境一般都是户外草坪，所以需要实现远距离通信，本文通过 Wi-Fi 通信模块配合 Lora 模块实现最长传输距离 10km 的通信，本设备通过 Wi-Fi 连接云平台，实现运行时数据或状态实时上报、存储和监测等功能。双通信的效果可以有效提升割草机的工作效率与通信质量。

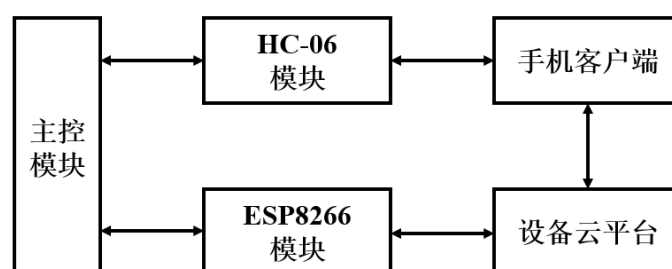


图 2.9 无线通信模块示意图

蓝牙通信选用模块 HC-06 型号，该模块在空旷地带的传输距离能达到 10m，使用 2.4GHz 频段，手机客户端设计扫描特定蓝牙特征值及名称就能便捷的检测与连接本设备。客户可以通过手机控制本设备进行相关操作，过程中可以生成相应的本地日志，该模块成本低、通信速度快、功能俱全，非常适合本智能割草机设备的使用。

Wi-Fi 通信选用模块 ESP8266，该模块具有强大的片上处理能力和存储能力，可以减少占用主控芯片的系统资源^[27]。其透传特性可以更好的实现本设备在局域网内的高质量通信，实现本设备的联网通信功能，同时其支持串口本地升级和远程固件升级（FOTA）功能，具备工作温度范围大、低功耗和高集成、体积小等特性，非常适合本文智能割草机的使用。其无线通信模块的连接交互示意图如图 2.9 所示。

2.3 系统软件方案设计

2.3.1 嵌入式操作系统分析

嵌入式操作系统（Embedded Operating System，简称 EOS）是嵌入硬件的操

作系统，广泛应用于工业物联网，其中包括与硬件相关的底层驱动软件、系统内核、设备驱动接口、通信协议等^[28-29]。嵌入式操作系统负责嵌入式系统的全部软硬件资源的分配、任务调度，控制、协调任务功能^[30]。在嵌入式领域广泛使用的实时操作系统有：uC/OS-III、embOS，RTX 和 FreeRTOS 等。本文设计的智能割草机方案中采用 uC/OS-III 嵌入式实时操作系统，该操作系统运行速度快、占用内存小，并且能够实现高效资源管理、同步及各任务间的消息同步，因此适合本文所设计的智能割草机软件系统。

uC/OS-III 支持抢占式多任务处理和时间片轮转调度方式。可以根据不同的应用场景选择合适的任务调度方式。前者是在时间片结束前，拥有高优先级的任务就会抢占低优先级任务进入就绪状态，得到时间片得以运行；后者时间片轮转则是会同时给所有最高优先级的任务都分配时间片去运行^[31]。

2.3.2 多任务软件架构设计

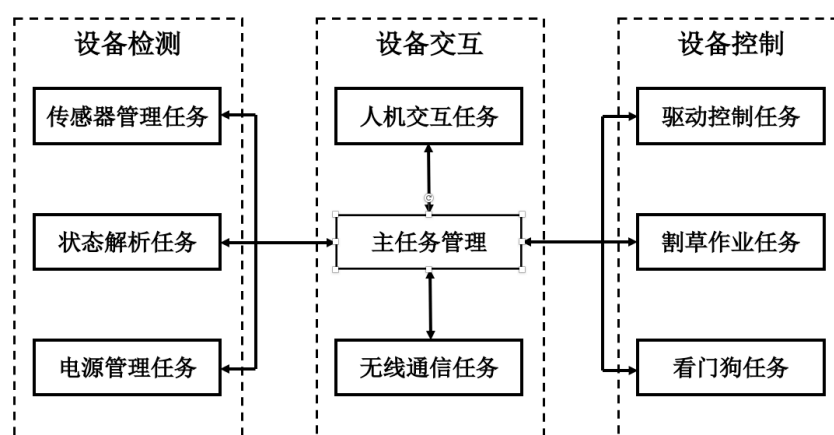


图 2.10 系统软件多任务架构图

智能割草机系统是一个实现多个复杂任务与功能的系统，并且工作环境复杂，可能发生的事件复杂且繁多，因此在软件设计上，要充分考虑到各模块的任务创建、调度与通信，因此本文在智能割草机的软件设计上采用多任务架构进行开发。

为了便于任务管理与调度，本文将智能割草机系统软件根据功能主要分成三大模块：设备检测、设备交互和设备控制。具体软件架构图如图 2.10 所示。设备交互模块实现控制设备，负责调度其他模块，会根据传感器、电源、驱动和看门狗等模块传输来的数据进行解析并给出相应的指令应对不同场景最终实现智能割草、智能充电等行为。

智能割草机系统主要是通过主任务管理各子任务、子任务反馈到主任务的架构实现，例如主任务管理中收到来自于割草机控制面板或者客户端 APP 的割草

作业任务时，会先从各个传感器中获取数据，然后通过主管理任务传递给状态解析任务，解析现在的割草机状态是否可以执行割草作业任务，然后反馈给主任务，主任务再传递相应指令给驱动控制任务，最终执行该任务。

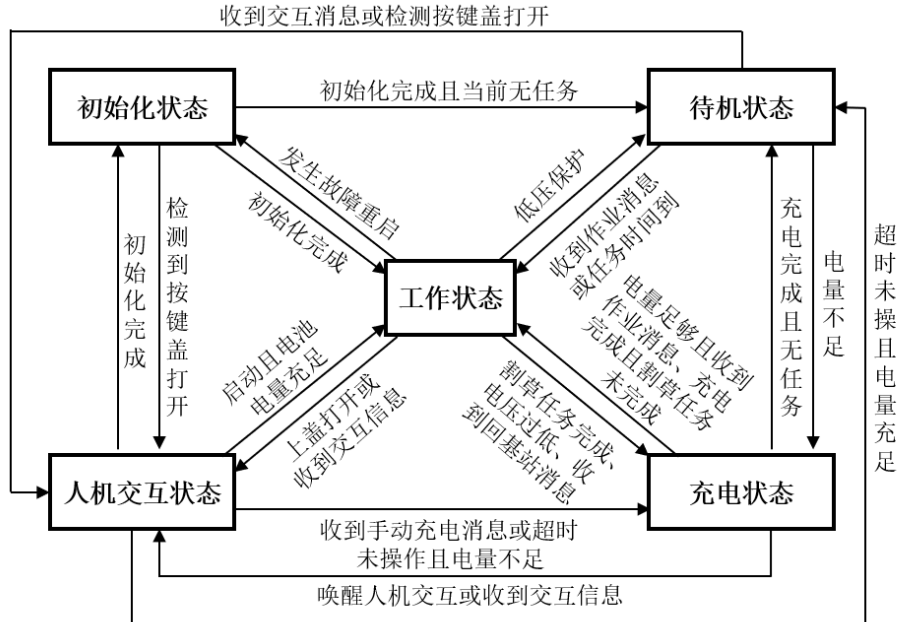


图 2.11 系统状态转换图

为了简化程序设计和便于逻辑理解，本文设计的智能割草机系统的主任务主要分为五种基本状态：初始化状态、人机交互状态、工作状态、待机状态和充电状态，如图 2.11 所示为其状态转换图。初始化状态是指在智能割草机在上电后对各模块的寄存器和引脚、系统外设、定时器、串口及相关参数等进行初始化，一般还包括上电自检等过程，该状态确保智能割草机后续能够正常稳定工作。工作状态一般指智能割草机进行割草作业的状态，用户可以通过智能割草机表面的控制面板或者客户端 APP 远程操控让割草机进入工作状态；待机状态的设置是为了让智能割草机降低能耗，将非工作状态或者非关机状态时进入休眠状态；充电状态就是当割草机检测到电量不足时回到基站充电的状态；人机交互状态是指用户使用客户端 APP 或者智能割草机表面的控制面板对智能割草机发送任务指令的状态。

2.3.3 设备检测类任务设计

智能割草机的设备检测任务是确保智能割草机安全可靠工作的前提，在工作前或工作中，都会进行设备检测，该检测主要包括三个方面的检测，传感器状态

检测、割草机工作状态解析和电源管理任务，这三个任务贯穿智能割草机的整个运行周期。

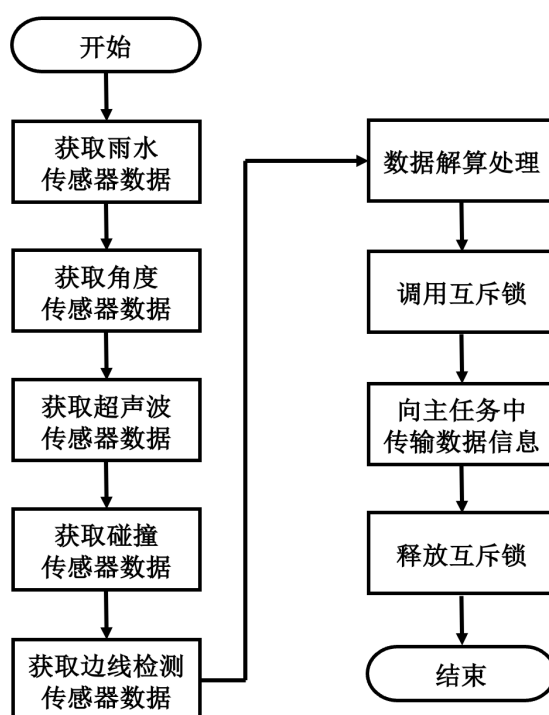


图 2.12 传感器管理任务软件流程图

传感器管理任务就是对各传感器如雨水传感器、角度传感器和超声波传感器等进行数据管理解算处理，然后所有的数据在通过状态解析任务解析出智能割草机的不同状态，将解析出的状态结果交给主任务。传感器管理任务软件流程图如图 2.12 所示。

电源管理任务就是及时检测智能割草机的电量及时反馈给主任务，主任务会根据电量情况并结合智能割草机的状态发送任务指令给各模块做出调整。可以检测状态以降低长时间未使用模块的能耗，从而延长电池使用时间。

2.3.4 设备控制类任务设计

设备控制类任务主要分为以下三部分：割草作业、运动控制和看门狗任务。割草作业任务和运动控制任务都是无人化自驱工作，所以需要配合定时器来完成割草机的相关工作，而看门狗任务则是负责这一部分任务。当智能割草机在工作过程中遇到一种未知的情况导致程序卡死或者进入死循环，该情况将会导致割草机无法继续正常调用各个模块的功能并且存在安全隐患，因此程序对每个工作任务都加入了定时器，当正常工作时就会及时将定时器清零重新开始计时，一旦定

时器到达阈值就会出发警报，智能割草机会根据不同任务的定时器采取不同的补救措施，如强制重启或者上报故障等。

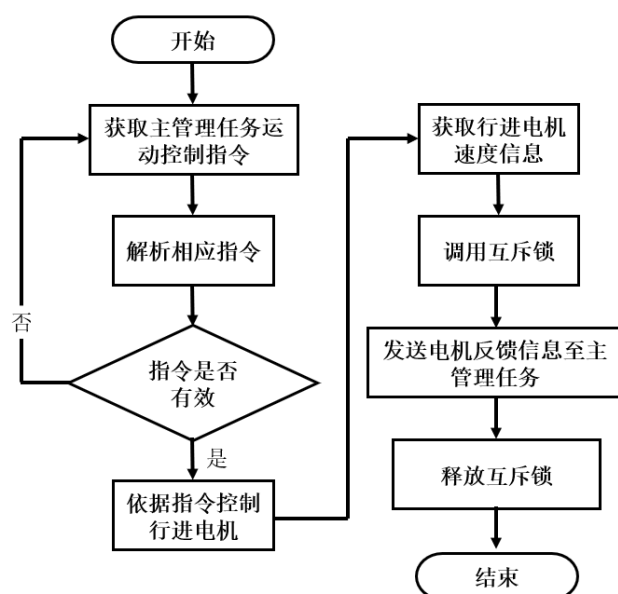


图 2.13 运动控制任务软件流程图

智能割草机的电机驱动分为割草电机和行进电机，割草电机主要完成割草作业任务，主任务收到指令后控制传递给割草作业任务模块，割草作业任务控制割草电机的转速、开始和停止。除此之外，当其他模块检测到机身被抬起、电池电量不足等情况也会通过上报主任务管理通知割草作业模块停止作业，以完成安全稳定的割草作业任务。

运动控制任务主要是对智能割草机的行进电机进行控制，如客户端 APP 发送前进、后退、转向或者停定等指令时，都是主任务管理收到指令派发给运动控制任务执行，本文重点研究的运动跟随系统也是对运动控制任务的研究，以一定的航向角行进，在运动过程中及时调整方向以达到跟随运动方向的目的都是运动控制任务负责。运动控制流程图如图 2.13 所示。

2.3.5 设备交互类任务设计

设备交互有两种方案，通过无线通信任务实现远程交互或者通过如图 2.2 的智能割草机上的控制面板进行交互，即人机交互。两种交互是互补的，无线通信方式可以使用户远程操控智能割草机，更加便捷；人机交互可以使得用户更有体验感。

本文设计的无线通信模块可以实现蓝牙和 Wi-Fi 双通道通信，蓝牙通信一般适合短距离通信，但是连接方便，通信快捷；Wi-Fi 通信结合 Lora 可以实现远距

离传输,并且可以通过云平台将数据以及日志上报,便捷工作人员远程查看故障;本文的无线通信任务负责管理这两种通信方式。

人机交互任务是通过智能割草机机体上的控制面板获取用户的命令并将其翻译成指令传给主任务负责调度,主控面板由触摸按键以及 LCD 显示屏组成,因此在用户输出命令后,会及时在 LCD 显示屏上显示命令执行结果。人机交互任务流程如图 2.14 所示。

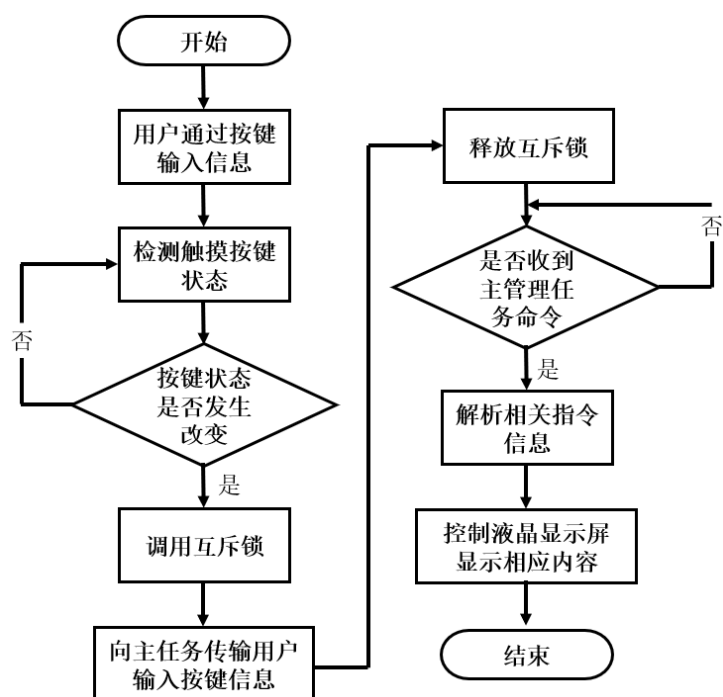


图 2.14 人机交互任务软件流程图

2.4 系统交互应用层设计

2.4.1 云平台设计

2.4.1.1 设备云

由于智能割草机的主要市在国外,所以需要对智能割草机终端实现有效的云管理^[32]。机智云是在物联网领域比较成熟的机智云平台,可以在开发的时候以功能点接入云平台,便于远程售后服务,在智能割草机遇到故障时会通过云平台上报故障信息,工程师通过查看远程故障信息排查错误,对智能割草机软件系统进行远程固件升级,最终解决故障。机智云平台架构图如图 2.15 所示。

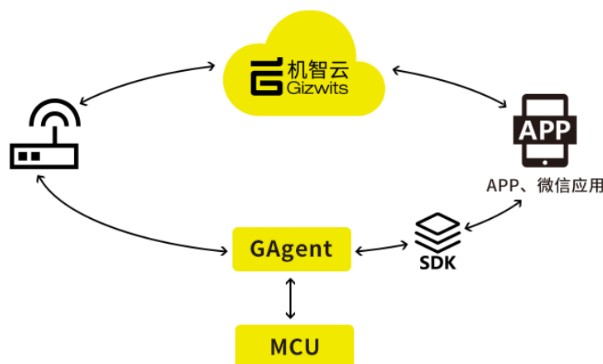


图 2.15 机智云平台架构图

2.4.1.2 业务云

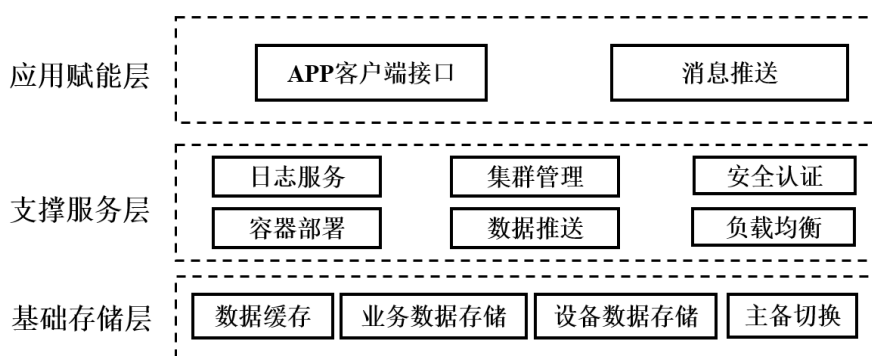


图 2.16 业务云架构图

业务云的工作是根据设备云提供的 API 接口获取通过设备云获得的智能割草机远端采集数据，业务云通过这些数据分析用户使用频率及需求，可以分析智能割草机的功能模块应用及可扩展方向等，除此之外，业务云也是手机客户端的后端服务平台，为客户端的请求提供数据。业务云的具体架构如图 2.16 所示。

2.4.2 APP 设计

本文设计的 APP 客户端实现蓝牙与 Wi-Fi 双通道通信，蓝牙在短距离的通信中有效、可靠和安全，但是工作距离有限，因此本文也实现了 Wi-Fi 通信，借助 Lora 模块实现长距离通信，通过云平台收发数据，实现云端保留通信数据，当智能割草机在运行中遇到问题也能够实时上报云平台，实现远程解决问题。为了便于代码的维护、增高代码的可读性、便于扩展新功能等，本文 APP 设计上采用 MVP 架构。其架构图如图 2.17 所示。

MVP 其实是 MVC 的一种演进版本，比 MVC 更加简单易维护，并且在客户提出新需求或者新的功能时，可以更加简便实现。其采用分层设计的架构目的是

为了降低耦合度，提高了开发效率。

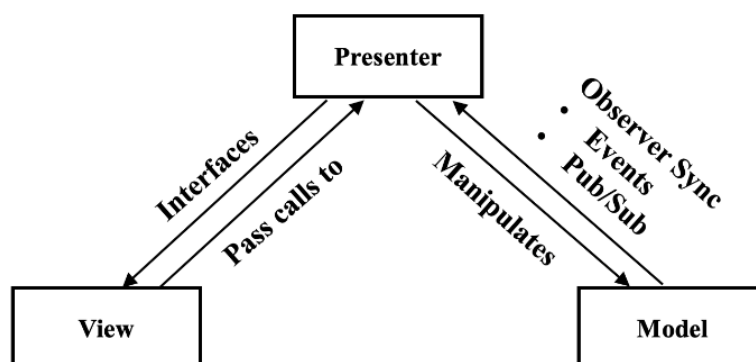


图 2.17 APP 客户端 MVP 架构



图 2.18 App 主页面展示

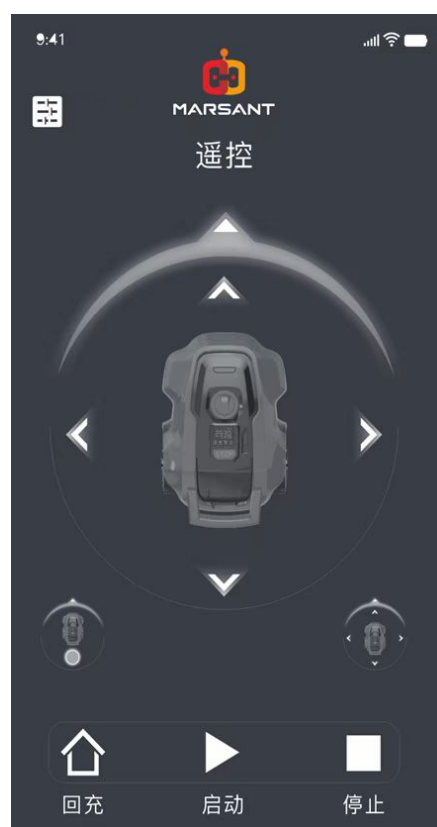


图 2.19 App 遥控方向页面展示

本文设计的智能割草机在 APP 客户端实现了远程遥控、定时工作、操控方向、固件升级以及分区割草等功能。客户端主页面和控制方向页面如图 2.18 和图 2.19 所示。

2.5 本章小结

本章主要讲述智能割草机系统的整体设计，分别从硬件、软件两个角度去分析系统的设计，硬件部分主要介绍各模块分析及选型，同时给予实物对照，软件部分主要是介绍嵌入式软件的设计思想及架构，采用多任务架构结合有限状态机思想将复杂庞大的软件系统有序整合到一起，更具有扩展性，逻辑更清晰。最后介绍智能割草机的云平台以及客户端 APP 开发选型，由此组成完整的智能割草机系统。

第三章 基于 INS/磁力计组合导航的航向角测量方案

在智能割草机系统中，航向角的准确测量是至关重要的，在比较湿滑且有小石子的割草环境下，准确的航向角是朝着目标方向持续直行和精确转弯的基础。通常航向角都是由六轴传感器计算得出，但是陀螺仪存在随机漂移现象^[33-34]，所以解算出来的航向角误差也会随着时间越来越大，导致智能割草机跟随航向行进的时候偏移原定路径越来越远，最终影响割草覆盖率以及割草效率。

针对陀螺仪解算航向角会累积误差问题，本章提出 N 长滑动滤波算法，该算法解决了在动态过程中的静态漂移误差问题，可以实现直行过程中长时间稳定准确的航向角输出；但是在转弯的过程中，航向角变化率比直行过程中因工况复杂导致的航向角变化率高，所以转弯过程中使用该算法转弯会出现角度过调或者角度不够的情况。

针对智能割草机转弯过程航向角不准确的问题，本章在惯性导航解算航向角的基础上辅助磁力计校准，利用磁力计解算磁航向角与前面滤波后得出的航向角进行数据融合。因为磁力计易受干扰，所以并不是每个时刻的磁力计的数据都可以用作数据融合，因此本章先对磁力计滤波，滤波后的数据经过阈值判断，符合阈值范围内的可进行融合数据解算航向。

3.1 航向角测量方案分析

3.1.1 传统航向角测量方案分析

惯性传感器在解算航向角时由于自身存在累积漂移误差现象^[35]，但由于 MEMS 传感器体积小、成本低，运算简单、快速，因此还是被广泛用于解算航向角。程小辉^[36]先是对陀螺仪误差分析进行误差建模，然后利用神经网络算法和卡尔曼滤波最终提高了陀螺仪数据精度，减小了航向漂移角度，但是计算量较大，并且适用于较为稳定的应用场景。徐韩^[37]等通过阿伦方差验证了改进的卡尔曼滤波算法的有效性，并且实验得到较为理想的效果。上述学者都是对每个时刻的随机漂移进行预测和抑制，在静止的情况下能够得到良好的效果，应用场景有限，适用于较为稳定的工作环境，但是对于运动状态的每个时刻的漂移的预测效果不明显，并且以上算法的计算量较大，运算成本高且占用内存多，不适用在地面不平整的草地运作的割草机。

磁力计解算航向角虽然可以长时间得到准确的航向角，但是磁力计本身易受

干扰,使用情况受限^[38]。针对磁力计的校准,前人提出多种方法。庞鸿峰等通过求解磁力计的误差参数来降低各个轴的误差,将高斯牛顿迭代法带入非线性方程求解误差最终实现降低磁力计各轴误差的效果^[39]。Deng 等^[40]使用陀螺仪辅助校准磁力计,将磁力计解算出的航向角误差小于 0.5° 。上述算法应用场景有限,而智能割草机的工作场景是环境不稳定的户外,上述算法无法消除复杂工况下的误差,因此不适用本文的应用。

由于智能割草机的工况是复杂的草坪,对于航向角的累积误差问题,很多学者提出在惯性导航的基础上融入定位系统,结合定位控制割草机的位置,从而解决因为航向角偏移误差带来的割草覆盖率低的问题。2018 年,东南大学吴瀛东团队将差分 GPS 运用在智能割草机系统中,利用差分 GPS 获取工作区域的二维信息^[41],并且不断进行数据存储与比较,推断出长时间没有割草机的区域进行割草,该方法可以解决因航向角偏移带来的工作效率低下的问题,但成本高,运算大,要存储的数据庞大,系统算法更加复杂,不易实现。类似的方法还有东南大学加入 UWB 定位辅助航向角进行路径规划都增加了智能割草机的成本与运算复杂度,同时对智能割草机的存储也是极大考验,因此不适用本文设计的高性价比的设备。

3.1.2 航向角测量优化方案

由于上述方法不适用本文智能割草机的工作场景需求,本文结合惯性传感器和磁力计各自优势进行数据融合^[42],根据智能割草机的动作,分为直行和转弯两种航向角测量方法,利用陀螺仪的静态漂移误差特性设计一种基于惯性传感器的航向角的解算方式,通过惯性传感器中陀螺仪解算航向,用惯性传感器的加速度计判断智能割草机状态,结合智能割草机的低速行走特性,设计 N 长滑动滤波解决动态过程中的静态漂移误差可以实现长时间准确且稳定的航向角,但是对于转弯过程,由于陀螺仪的转速在转弯过程中角速度变化较大,因此 N 长滑动滤波对于角速度变大灵敏度不高,导致转弯角度存在误差,依旧会导致航向偏移问题。针对这个问题,本文设置角速度阈值,当发现大于该阈值时,判断智能割草机为转弯状态。

磁力计测量的是载体与地磁的偏移角,即磁航向。但由于磁力计易受干扰,使用过程中十分受限,针对此问题,本文先是对磁力计的原始数据进行中值滤波,将其数据稳定,稳定后的数据对比阈值,如果小于阈值可以用做辅助惯性导航解算航向角的校准,磁力计计算的是绝对航向角,具有长时间有效性,因此本文将获取的有效数据用于和惯性传感器计算的航向角进行辅助校准,最后选择互补滤

波进行数据融合。

3.2 基于惯性导航的航向角测量设计

本文割草机的航向数据是通过集成在割草机上的惯性传感器 IMU 获取的，它集成了三轴 MEMS 陀螺仪，三轴 MEMS 加速度计。但是陀螺仪传感器存在随机漂移误差，并且会随着时间累积误差，在长时间的航向估计中可靠性会降低，会使得割草机在运动过程中逐渐偏离原定路径，从而导致路径规划降低覆盖率或降低割草机工作效率。

3.2.1 陀螺仪漂移误差影响

3.2.1.1 陀螺仪航行角解算

对于在地面上行走的智能割草机而言，陀螺仪安装在主板上，Z 轴垂直于机身朝天，X 轴朝向机身的正左侧，Y 轴朝向机头，因此，在该坐标系下，根据陀螺仪特性，Z 轴的单轴偏移量即为割草机地面行走的航向偏移角^[43]。在理想情况下，割草机在地面行走，陀螺仪的 Z 轴一直与地面保持垂直，所以 Z 轴角速度和时间的积分便是割草机在该时间段内的航向偏移角。公式如下：

$$\Delta Yaw = \int_{t_2}^{t_1} Z(t)dt \quad (3.1)$$

其中 $Z(t)$ 为陀螺仪在 t 时刻的 Z 轴角速度值， t_0 为起始时间， t_1 为终止时间， ΔYaw 为 $t_0 \sim t_1$ 时间段内的偏航角。

由于陀螺仪在静止状态下，存在静态漂移误差，所以在积分过程中会引入漂移误差，随着时间累积，会导致智能割草机偏航严重。

3.2.1.2 陀螺仪的漂移误差

陀螺仪的漂移误差包括确定性漂移误差和随机漂移误差。对于确定性漂移误差，可通过建立确定性误差的数学模型进行相应的误差补偿可以基本消除确定性漂移误差。而随机漂移无法精确定位产生原因，随机漂移误差的变化没有规律，无法进行建模计算补偿，所以不能用常规方法进行补偿，因此通过算法结合应用过程加以补偿，来削弱随机误差带来的影响，提高陀螺仪的精度。

由此，陀螺仪数据测量模型为：

$$Z_{\text{test}} = Z_{\text{real}} + Z_{\text{error}} \quad (3.2)$$

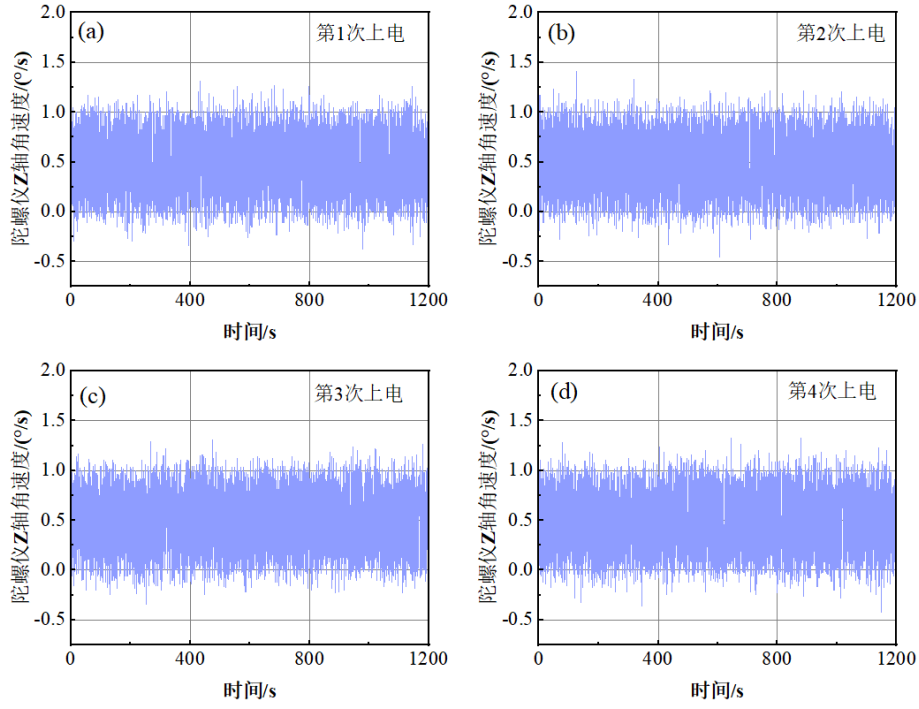


图 3.1 不同上电次数的陀螺仪 Z 轴原始数据

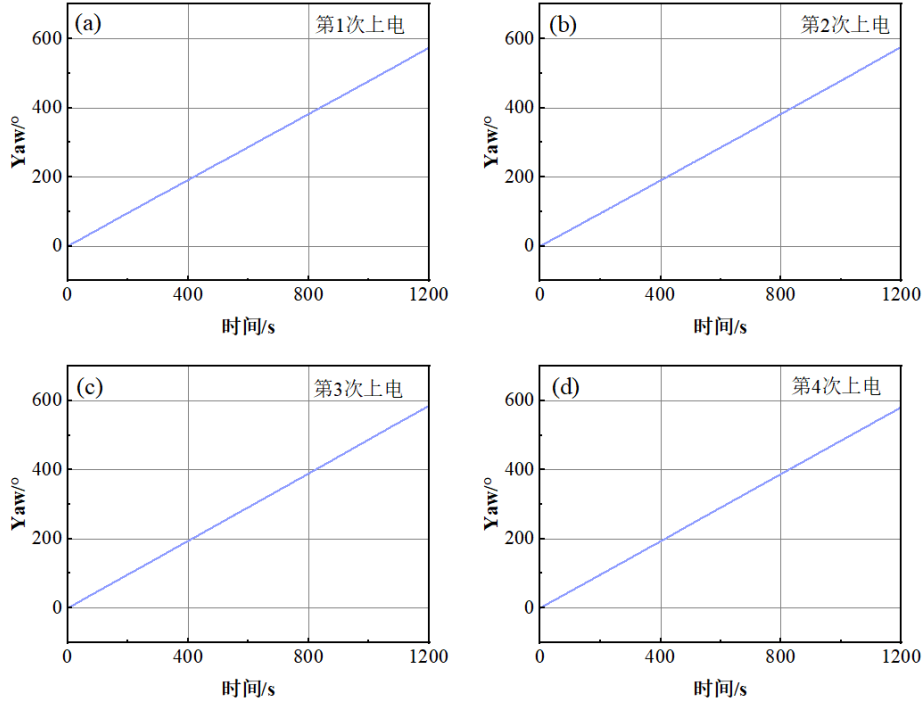


图 3.2 不同上电次数的静止状态累计偏航角误差

其中 Z_{test} 为陀螺仪 Z 轴读取的原始值， Z_{real} 为陀螺仪 Z 轴在该时刻的真实

值, Z_{error} 为陀螺仪在此时刻的随机漂移值。

理论上, 当陀螺仪静止时, $Z_{\text{real}} = 0$; 所以 $Z_{\text{test}} = Z_{\text{error}}$, 此时利用公式 (3.1) 求解出的偏航角就是静态漂移误差的累积。

图 3.1 是割草机在静止状态下在不同时刻上电后采样了四组陀螺仪的 Z 轴原始数据, 采样间隔为 10ms 时间, 每组采样 120000 个, 每组耗时 20 分钟; 使用公式 (3.1) 求解偏航角, 结果如图 3.2 所示, 四组数据皆是陀螺仪在静止状态下偏航角会随着时间累积越来越大, 越来越偏离实际值, 因此可以看出不同时段上电后陀螺仪的随机漂移都是存在的, 但漂移大小不确定, 因此该随机漂移误差是导致航向角漂移误差的主要原因。

由图 3.2 可知, 偏航角会随着时间非严格线性增加, 由于陀螺仪每个时刻的静态漂移值不可预测, 所以可以利用静态漂移的非严格线性增加来解决割草机在动态过程中引入的静态漂移误差, 可以在一定程度上提高精度。

当陀螺仪在运动状态下时, 利用公式 (3.1) 求解偏航角, 即为:

$$Yaw = \int_{t_0}^{t_1} (Z_{\text{real}} + Z_{\text{error}}) dt \quad (3.3)$$

3.2.2 自适应滑动滤波算法

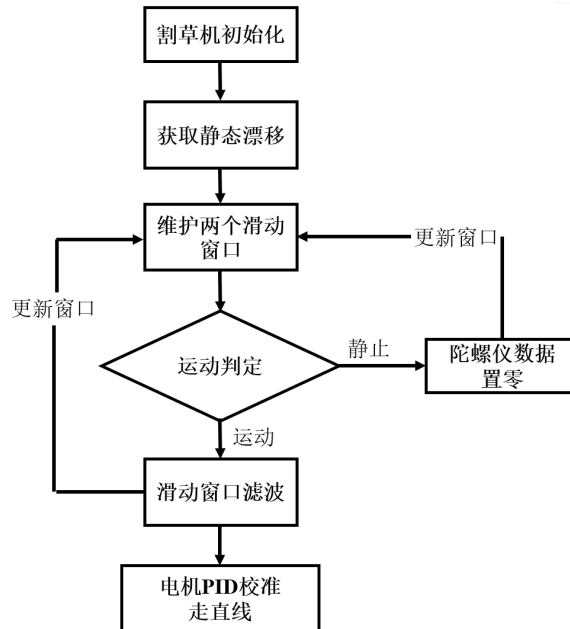


图 3.3 算法流程图

陀螺仪在静止状态下的角速度理想值应为 0, 所以检测到设备在静止的状态

下时，可以在割草机中手动置零，保证割草机偏航角在静止状态下不引入漂移误差；但在运动状态下，角速度值依旧存在漂移误差，此时无法使用置零操作去除漂移误差，但是可以利用静态漂移误差随时间非严格线性累积特性，在累积求和过程中，实时滑动窗口减去静态时获取的 N 个点的静态漂移和，采用滑动窗口获取实时的偏航角，滑动窗口长度也为 N 。自适应滑动滤波引入了一个判断割草机运动或者静止的阈值，在阈值范围内，认为是静止状态，在静止状态，对陀螺仪数值直接赋 0，累积偏航角也相应为 0，所以不会引入累积误差，该算法流程如图 3.3 所示。

3.2.2.1 求解静态漂移误差

陀螺仪在静止状态下，漂移误差的累积是非严格线性增加，利用这一特性，可以补偿动态过程中的漂移误差。每累加 N 点原始值到航向角上都要减去 N 个零漂误差和。

首先在割草机初始化的时候，割草机处于静止状态，以采样周期为 T ，获取陀螺仪 Z 轴的 N 个采样点与时间的积分得到固定窗口长度的静态漂移量：

$$D_0 = \sum_{i=1}^N Z(i) * T \quad (3.4)$$

3.2.2.2 确定 N 值

由于陀螺仪的静态漂移不可预测，但漂移误差的累积和在大趋势上是呈线性增加的，所以本算法采用定长 N 获取固定的静止的漂移误差累积和，之后的航向计算随着时间定时定长减去固定 N 长的漂移误差。

所以选择合适的 N 值必须满足以下公式：

$$\sum_{i=m}^{m+N-1} Z_i - \sum_{i=1}^N Z_i \propto 0 \quad (3.5)$$

其中， Z_i 是静止状态下陀螺仪 Z 轴角速度第 i 个采样值， m 为静止状态下的任意的采样时刻。选取的 N 使得公式（3.5）越趋近于 0 越好。

为了获取合适的 N 值，让割草机在静止状态下，获取陀螺仪的 Z 轴角速度的原始值，采样间隔为 10ms，随着时间的累计，原始未校准的航向角会随着时间累积不断增加，但通过不同 N 点去除漂移后，基本都在零点周围，都起到了去除零漂的作用。

由图 3.4、图 3.5 可以看出当 N 越大，公式（3.5）越趋近于 0，去除零漂的效果越好，但选择合适的 N 值要求既能有效去除漂移误差，也要能够确保有一

定的长效性，还要保证 N 尽可能小以减小单片机内存消耗以及运算。

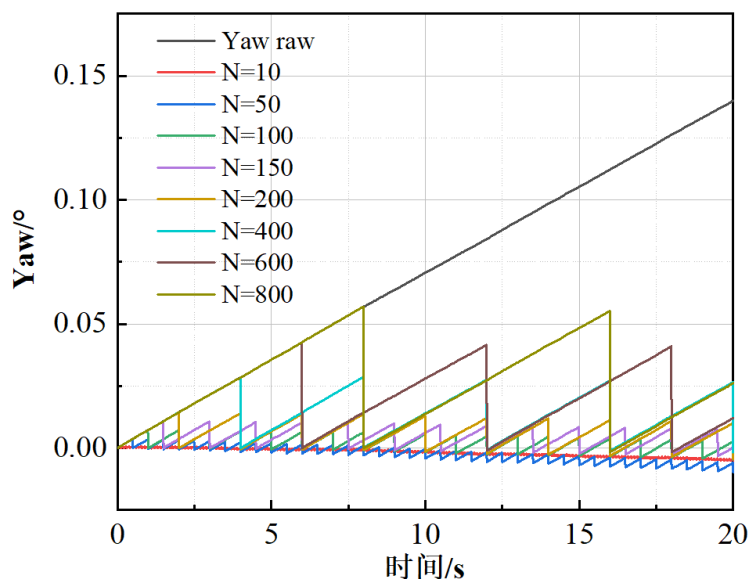


图 3.4 短时间 N 值对比

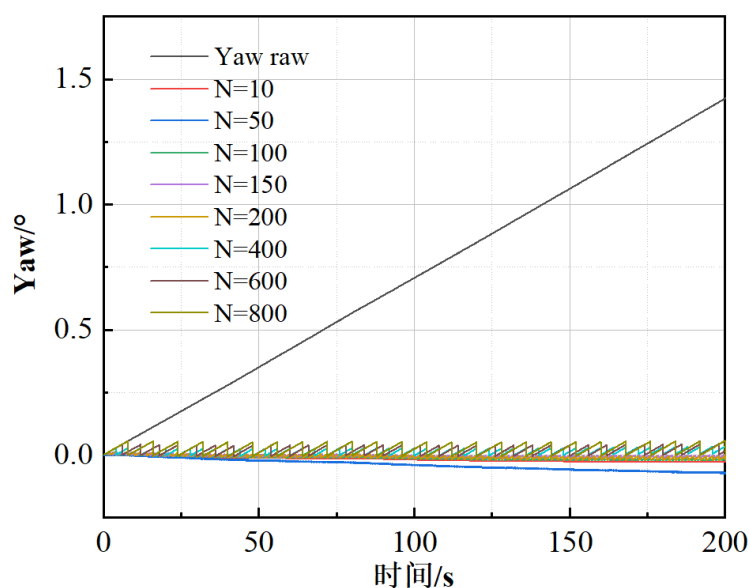


图 3.5 长时间 N 值对比

图 3.4 是短时间内 N 点取值不同对偏航角的影响，可以看出 N 值取值越大跳度较大，但是短时间内，漂移效果差距不大，都可以在一定程度上抑制零漂，但是图 3.5 是长时间的漂移量，可以看出随着时间的累积不同 N 值对于抑制零漂的作用，当 N 达到 200 及以上，在长时间范围内皆可以起到很好的去除运动过程中的零漂问题，但是 N 越大，对于维护滑动窗口的长度越大，对于单片机的内存消耗越大，并且 N 越大，初始化获取静态漂移误差的时长也越大，所以综合公

式推算、实验对比以及出于利用单片机计算，本文结合实际运动情况将 N 值取值为 200。

3.2.2.3 创建滑动窗口

在去除零漂的过程中，每累积 N 个原始值都要减去 N 个静态零漂累积和，这样在短时间内可以看出数据呈锯齿状，不利于实时获取准确的偏航角，但是割草机在实际走直线过程中，需要实时获取准确的偏航角以提供航向校准，锯齿间隔 N 个周期会影响校准效果。

为了解决上述问题，需要维护两个长度为 N 的滑动窗口，第一个窗口存放最新的 N 个陀螺仪 Z 轴原始角速度值，记为 $Z_1, Z_2 \dots Z_N$ ；第二个窗口存放最新求解出来的 N 个时刻的偏航角，记为 $Yaw_1, Yaw_2 \dots Yaw_N$ ；以上两个窗口每次读取数据都要以时间顺序更新窗口。

3.2.2.4 求解偏航角

智能割草机在运动状态时，首先读取到最新的陀螺仪 Z 轴角速度值 Z_{N+1} ，按照公式(3.6)更新该窗口，公式如下：

$$\begin{cases} Z_1 = Z_2 \\ Z_2 = Z_3 \\ \vdots \\ Z_N = Z_{N+1} \end{cases} \quad (3.6)$$

对该窗口求和，并且用初始化静态漂移补偿该窗口长度的运动过程中引入的漂移，得到实时校准值，公式如下：

$$Yaw(N+1) = Yaw(1) + \sum_{i=1}^N Z_i * T - D_0 * T \quad (3.7)$$

按照公式(3.8)更新偏航角窗口：

$$\begin{cases} Yaw_1 = Yaw_2 \\ Yaw_2 = Yaw_3 \\ \vdots \\ Yaw_N = Yaw_{N+1} \end{cases} \quad (3.8)$$

利用两个滑动窗口解决间隔去除漂移误差带来的非实时校准问题，图 3.6、图 3.7 分别是短时间内和长时间内加了滑动窗口和未加滑动窗口的效果对比图，短时间内可以明显看出间隔带来的影响，在割草机运动过程中，由于 N 取值为 200，所以时间间隔长达 2s，意味着中间 2s 的时间内数据都是有漂移的，而割草

机电利用双轮差速控制器进行校准,会根据航向角的偏移量和偏移率实时调整方向,所以依旧还是会引入误差,但是加上滑动窗口的策略之后,割草机可以获得实时的校准后的数据,纠正航向的过程中便不会引入其他误差。

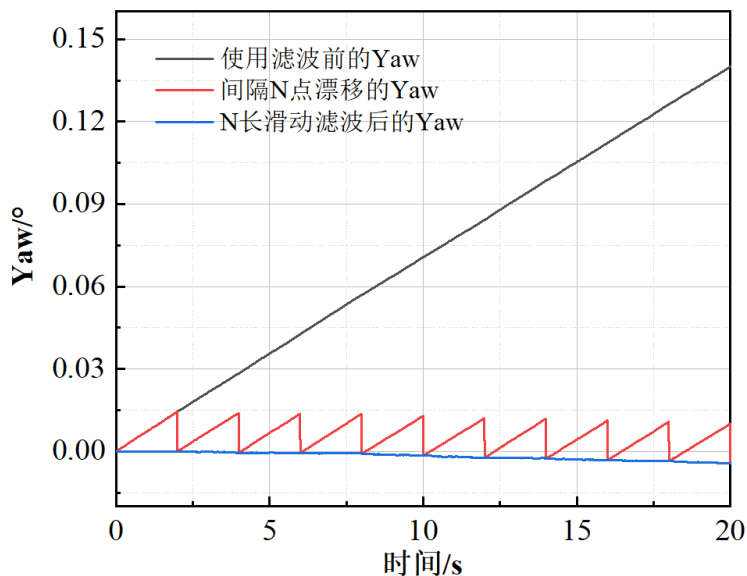


图 3.6 短时间不同策略求解偏航角对比图

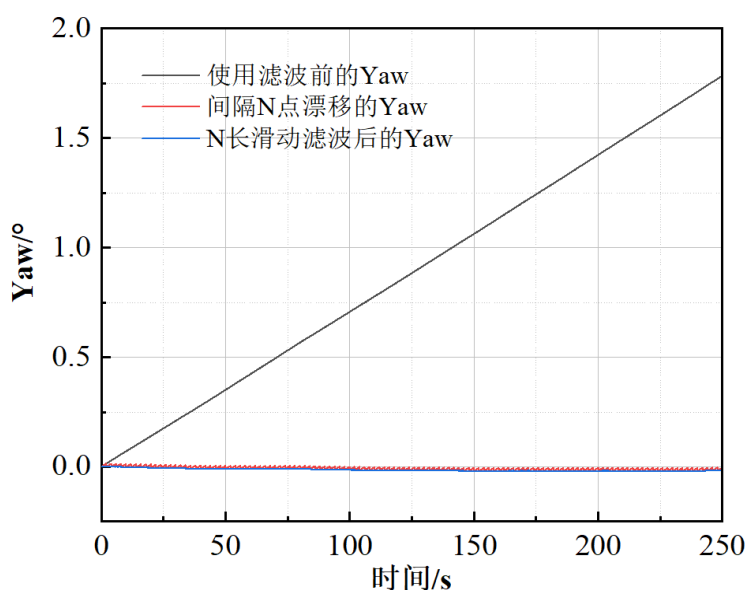


图 3.7 长时间不同策略求解偏航角对比

根据图 3.6、图 3.7 可以看出, N 长滑动滤波可以去除动态下的静态漂移误差, 实现长时间的航向角的稳定输出, 但是因为 N 长是定长, 根据多次实验统计出来的最合适的数据, 适用于割草机直线行走的场景, 但是在快速转弯的过程中, 转弯所得航向角和实际转弯角度之间存在误差, 转弯 90° 误差会有 2° 左右, 所以

为了解决航向角快速变化的问题,本文在惯性导航的基础上加入了磁力计作为校准,使得割草机在直行和转弯模式下都能获得准确的航向角。

3.2.3 直线行走航向角实验结果与分析

本文使用 QMI8658A 作为惯性导航传感器,将之安装在智能割草机如图 2.2 的主板上,主板安装在割草机中间位置,如图 3.8 所示,主板与地面水平, Y 轴对应割草机前进方向, Z 轴向上, X 轴指向割草机右侧。惯性导航传感器和磁力计的坐标系方向一致。通过主控制器 GD32F305 完成初始化,基于对割草机的运行速度和单片机内寄存器大小的综合考虑,陀螺仪的量程选取 $\pm 512\text{dps}$ 。



图 3.8 割草机主板安装

为了验证本算法在运动状态下去除零漂误差的效果,本文对于理想平地环境做了多组测试,理想平地相对于草地而言,地面上没有明显障碍物和阻挡,更为平滑。对于智能割草机行走需要借助电机驱动,本文的割草机使用双轮差速驱动来调整方向,该控制算法是属于控制原理,本节不做详细说明,下节将做详细阐述,但控制算法的优劣很大程度影响割草机直线行走的准确性,所以为了验证本文算法抑制零漂的有效性,验证动态过程中陀螺仪随机漂移对航向角造成的影响,同时为了避免电机引入新的误差,在测试过程中用小推车拉着割草机直线行走进行测试,通过串口记录割草机直线行驶时的实时的航向角数据,实验场景如图 3.9 所示。

小推车拉着割草机沿着 35m 长廊的中间的地板线直线行走,先开机初始化,此阶段割草机处于静止状态,并在此期间获取静态漂移 N 点累积值,同时通过串口连接电脑打印航向角,输出三种算法的航向角进行对比验证算法的有效性。

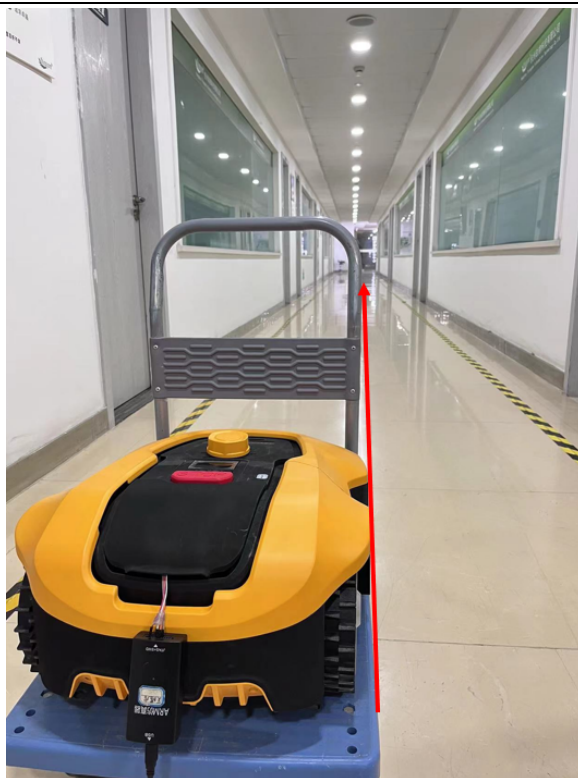


图 3.9 采取理想平地作为测试环境

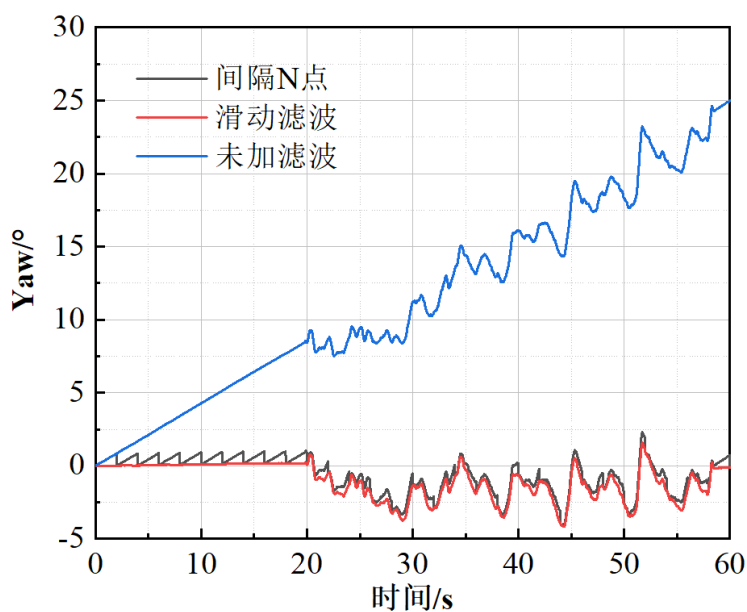


图 3.10 35m 长廊航向角对比测试

理论上，割草机沿着直线行走，去除掉随机漂移误差之后，航向角应该是稳定在某个值上下的。但在推车过程中，无法严格做到紧贴直线行驶，左右会有所晃动，类比割草机在割草过程中的行驶，也会根据所计算出来的航向角进行左右双轮调速调整方向，实验结果如图 3.10 所示，由此可见，前期静止后期运动，在

行走过程中，航向角上下幅度较大，最后到达长廊终点小推车贴着中间之间静止一段时间后为 0.14187° ，基本解决动态过程中的零漂问题，对比未加滤波直接使用四元数解算出来的航向角，有了很大的改善且时效性更高。

3.3 基于组合导航数据融合解算航向

通过惯性导航传感器获得的航向角使用 N 长滑动滤波去除了动态过程中的静态漂移误差，可实现长时间稳定输出。但在割草作业过程中，智能割草机在遇到边界线或者障碍物会掉头或者转弯，这时候为了能够实现路径规划的理想效果，需要精确的转弯的航向角，仅利用惯性导航传感器，在直行相对稳定的动作时可以获得准确的航向角，但是在转弯的过程中，由于角速度变化会比直线行走过程快且智能割草机的工况复杂不可预测，所以割草机在转弯过程中转弯的角度不够精确，转弯角度通常存在误差，会使得智能割草机转弯过多或者转弯角度不足，进而导致转弯后偏离原定航向，最终导致路径规划效果差，割草效率低。所以针对智能割草机转弯时航向角误差问题，本文引入磁力计加以融合校准，本文选用 QMC5883P 磁力计，该磁力计成本低且出厂时就已经做好校准，即磁力计上电后在空中绕“8”字后得到一个以原点为球心的球，无需在使用时进行校准。

3.3.1 姿态描述

姿态角是用来描述物体在不同坐标系下位置关系，通常按载体坐标系相对于地理坐标系的转动顺序求解航向角、俯仰角和横滚角^[45]。

本文通过通过四元数法将从陀螺仪获取到的角速度值转换成欧拉角来表示姿态，根据本文应用的需要，将惯性传感器的坐标系建立在载体坐标系上，Z 轴对应朝天，X 轴对应载体右侧，Y 轴指向载体的前方，由此对应的旋转顺序为 Z-Y-X，对应航向角（yaw），俯仰角（pitch），翻滚角（roll）。由四元数得到三个欧拉角：

$$\begin{cases} yaw = \arctan\left(\frac{2q_1q_2 + 2q_0q_3}{q_0q_0 + q_1q_1 - q_2q_2 - q_3q_3}\right) \\ pitch = -\arcsin(-2q_0q_2 + 2q_1q_3) \\ roll = \arctan\left(\frac{2q_0q_1 + 2q_2q_3}{q_0q_0 - q_1q_1 - q_2q_2 + q_3q_3}\right) \end{cases} \quad (3.9)$$

3.3.2 基于磁传感器的姿态解算方法

磁力计测得的航向角是方向与磁北的夹角，因此对比惯性导航而言，磁传感器解算出来的航向角是绝对航向角，即与地球磁场的夹角^[46]。在导航坐标系下，磁场强度表示为：

$$M_n = [M_{nx} \quad M_{ny} \quad M_{nz}]^T \quad (3.10)$$

由于磁力计易受干扰的特性，因此磁力计所测的原始值的噪声较大不能直接用于计算航向角，因此需要对数据进行预处理，本文采用中值滤波对磁力计数据进行处理，即通过数据采集预设一个滑动窗口，该窗口会根据数据实时采集进行实时更新，因此该窗口的中值滤波器的输出为 $Mid(M_{ni})$ ，公式如下：

$$Mid(M_{ni}) = \begin{cases} M_n(k+1), & \text{当 } n = 2k+1; \\ \frac{1}{2}(M_n(k+1) + M_n(k)), & \text{当 } n = 2k; \end{cases} \quad (3.11)$$

式中， $M_n(k)$ 表示窗口内原始数据中第 k 个数据； n 为中值滤波窗口长度。

在姿态传感器的应用中，由于载体坐标系 XY 可能不在水平面内，即存在横滚角 φ 和俯仰角 ρ 时，需要将载体坐标系内测量的磁感应强度矢量 M^b 转换到参考坐标系内的 M^r ，并求解载体坐标系的磁航向角，转换公式为：

$$\begin{cases} M_x^r = M_x^b \cos \rho + M_z^b \sin \rho \\ M_y^r = M_x^b \sin \varphi \sin \rho + M_y^b \cos \varphi - M_z^b \sin \varphi \cos \rho \\ M_z^r = -M_x^b \cos \varphi \sin \rho + M_y^b \sin \varphi - M_z^b \cos \varphi \cos \rho \end{cases} \quad (3.12)$$

则航向角 Yaw_m 为：

$$Yaw_m = \arctan\left(\frac{M_y^r}{M_x^r}\right) \quad (3.13)$$

通过上述处理过程，可以得到由磁力计数据计算的航向角 Yaw_m ，然后结合前面惯性导航传感器得出的航向角进行航向角判断修正，当 M^b 与 M_{mean}^b 满足以下条件：

$$||M^b|| - M_{mean}^b < M_{thr} \quad (3.14)$$

此时的航向就可以用于数据融合进行最终的航向修正。

3.3.3 基于互补滤波算法的数据融合

数据融合是将多组来自不同的传感器的数据通过算法融合起来以获取比单一数据更为全面、精确的数据，是一种数据处理方式。在多传感器系统中，各个

信源提供的信息可能具有不同特征。多传感器数据融合的基本原理就是充分利用多个传感器的数据^[47]，对多种数据的合理处理和过滤，结合各种信息在时间和空间上的各自优势，通过算法组合起来形成优化后符合预期效果的结果。

多传感器数据融合算法很多，比如互补滤波器、卡尔曼滤波器、扩展卡尔曼滤波器等^[47-48]，这些滤波器各有自己的优缺点以及自己使用的场合，由于磁力计在实际应用过程中易受干扰，所以并不是每个时刻都是符合要求可以作为参考的，因此在前面磁力计的航向解算中做了阈值判断，所以在数据融合过程中也是利用符合阈值判断后的数据做融合，因此本文使用互补滤波方法作为本文数据融合算法。

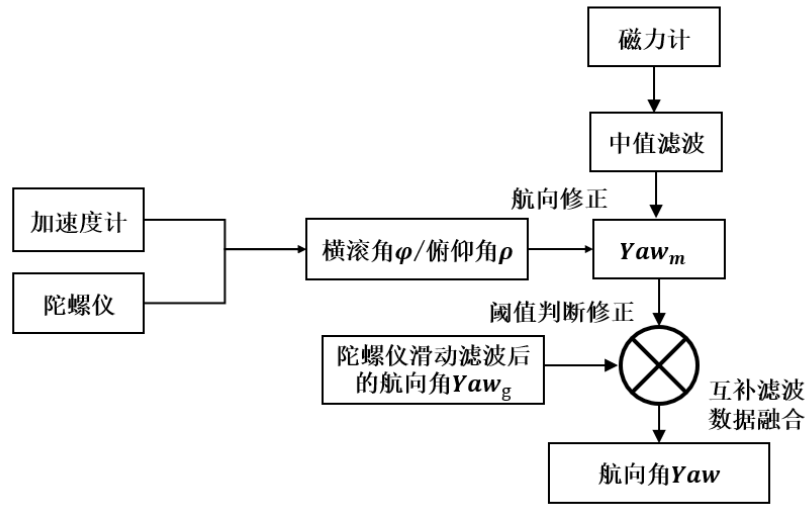


图 3.11 姿态互补滤波融合算法

互补滤波算法是多组数据互补，并进行滤波处理稳定输出后得到姿态的算法。互补滤波器一般有两个输入，根据两个输入的可靠性形成不同的权值，即加权系数，一般情况下，这两个权值都是大于零且和为 1，互补滤波器的原理可以用以下公式表示：

$$\begin{cases} y = k_1 x_1 + k_2 x_2 \\ k_1 + k_2 = 1 \\ k_1 k_2 > 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

式中， k_1 和 k_2 分别是两个输入 x_1 和 x_2 的加权系数， y 为 x_1 和 x_2 互补后的输出结果。

利用互补滤波器将惯性传感器经过滑动滤波计算得出的航向角和磁力计计算出来的航向角进行融合的算法如图 3.11 所示：

首先是加速度计和陀螺仪的采集数据转换为四元数，然后四元数转成欧拉角

表示姿态角,用此欧拉角修正磁力计的磁航向角,对比磁航向角,如果在阈值内,则可用作互补滤波的融合,给两个输入分配合理阈值,通过公式计算得出融合后的航向角;如果磁航向角不在阈值内,即磁力计受干扰程度大,那么互补滤波器将用 3.2 节中利用滑动滤波计算出来的航向角的权值将为 1, 最终获取最准确的姿态。

3.3.4 转弯航向角实验结果与分析

本文使用 QMC5883P 作为磁力计传感器,和惯性传感器一样安装在智能割草机如图 2.2 的主板上,并安装在智能割草机机身内如图 3.9 所示的位置上,为了避免电机带来的扰动,依旧采用控制变量法验证本算法解算航向角的有效性。

由于磁力计易受干扰,所以采用中值滤波对磁力计数据进行处理,有效地抑制数据中的脉冲噪声。在实验室环境下保持磁力计静止,采集数据并对该数据进行中值滤波处理,滤波效果如图 3.12 所示。

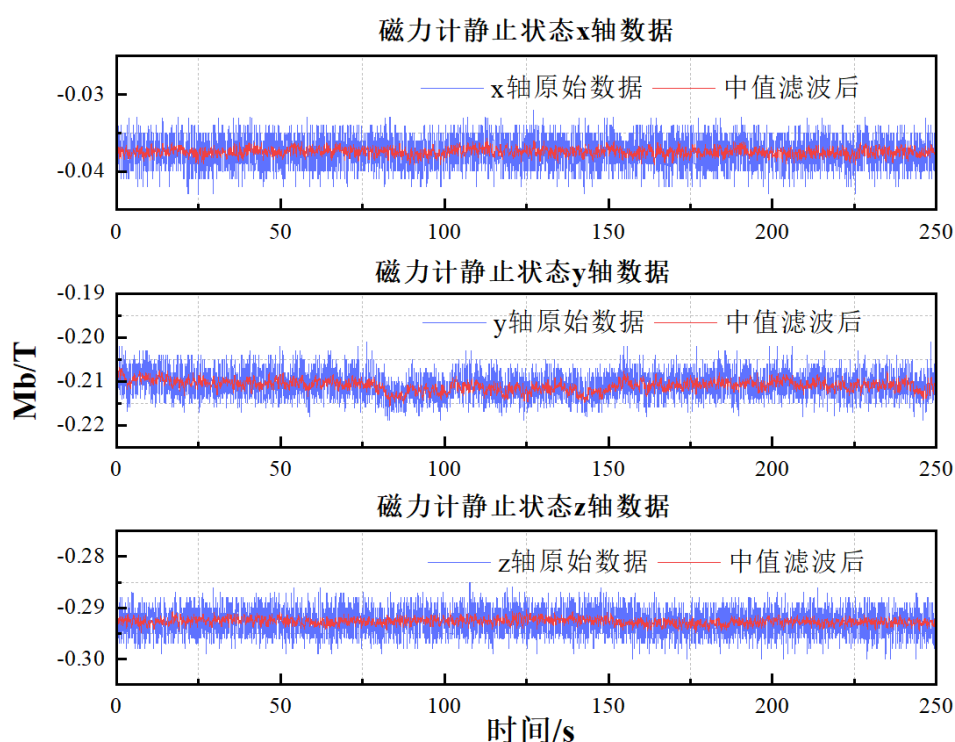


图 3.12 静止时磁力计数据滤波效果对比

为了能够便捷实现转弯,直接将图 2.2 的主控主板从割草机上拆下来作为实验环境,通过 IIC 实现传感器与主控的通信,通过 JLink 连接电脑获取数据,在水平桌面上旋转,对比惯性导航和组合导航的航向角,结果如图 3.13 所示,实验先正向转弯,后反向旋转,来回旋转做出对比,每次旋转 90 度。

通过实验旋转对比，可以看出在短时间内两者的旋转角度都较为接近，但随着时间累积，仅用惯性导航解算的航向角还是逐渐累积误差，旋转次数越多，旋转角度增大，误差累积越大，但在实际割草过程中，智能割草机在遇到较大障碍物或者边界线会直接转弯掉头，仅用惯性导航解算的航向角在多次转弯后，逐渐离路径规划的路径越来越远，最终会导致割草效率低下。所以在对比之下，加入磁力计后的组合导航更加具有优势，可以适用于长时间的导航。

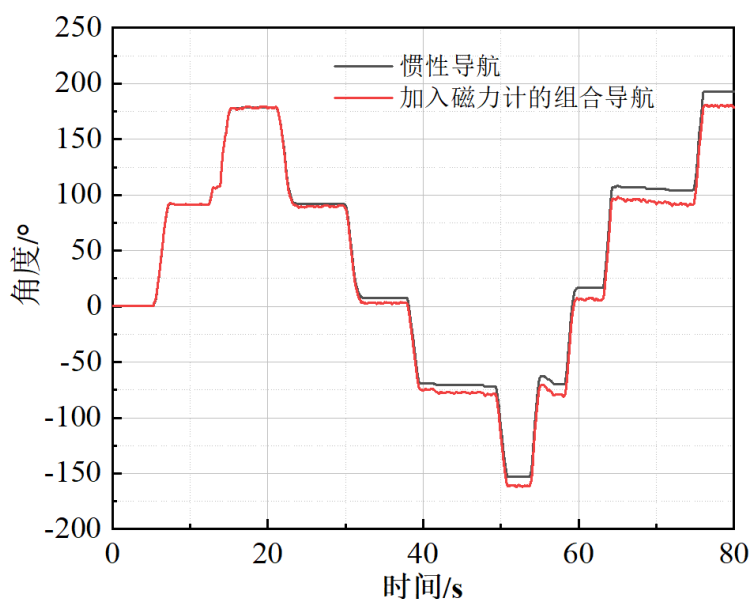


图 3.13 两种算法航向角对比

3.4 本章小结

本章先是利用惯性导航解算航向角，然后针对惯性导航器件本身存在的漂移误差，提出 N 长滑动滤波，实现消除在动态过程中的静态漂移误差，实现智能割草机直线行走过程中长时间航向角的有效可靠，但是该算法在智能割草机多次转弯中航向角误差随时间累积，出现转弯角度不足或过大，针对这个问题，本文在惯性导航的基础上加以磁传感器做以辅助校准，针对磁力计易受干扰的问题，本文采用中值滤波对磁力计数据进行滤波，然后设置阈值，滤波后的磁力计数据在滤波范围内可作为辅助校准数据，最后通过互补滤波算法进行数据融合，融合磁传感器解算出来的磁航向与惯性导航经过滤波后的航向角，最终获取在多次转弯依旧稳定的航向角，该算法解决了单一导航的弊端，为智能割草机提供长时间有效的直行和转弯的可靠的航向角。

第四章 基于模糊 PD 算法的智能割草机双轮差速驱动控制

在获取准确的航向角信息后,智能割草机通过驱动控制智能割草机行走和工作,该驱动控制系统包括双轮差速驱动控制器和驱动轮电机控制器,前者是通过调整双转速差值指令来使得智能割草机的两个驱动轮产生速差从而控制智能割草机的行走方向;而后者是割草机驱动轮速度控制指令的执行机构。本章主要研究根据获取的准确的航向角来给双轮差速控制器调整方向指令,实现快速准确的运动跟随,对于驱动轮电机本章不做详细介绍。

智能割草机的工作环境是工况复杂的户外草坪,草坪的土壤松软、有石子等障碍物,因此智能割草机无法对草坪工况进行预测并预设处理机制,所以智能割草机在草坪工作时通常会出现行走偏差,偏离原定路径方向,导致割草机工作效率下降。针对此问题,在通过传感器获取计算较为准确的航向角后,还需要快速响应的双轮差速驱动系统来配合航向角在遇到复杂工况的变动,能够根据航向角的变化及变化率随时调整,快速反应,能够及时回到规定路径方向。因此本文通过分析智能割草机的运动模型,分析智能割草机在运动行走过程中产生的运动跟随误差,针对该误差,本文提出基于模糊 PD 控制算法用于调整双轮差速驱动控制,能够及时给出调整双轮的运动速度达到调整智能割草机运动角度的效果,实现及时跟随路径规划航向角度的目的。

4.1 双轮差速驱动控制方案分析

4.1.1 传统控制方案分析

针对智能割草机的运动跟随误差,很多学者分析控制误差产生原因,并提出了很多方法来解决控制误差。湖南工业大学谭会生团队通过分析轮式机器人转向时控制系统的控制规则,结合模糊 PID 算法对轮式机器人的转向时的转速误差和转速误差率求导获取在线 PID 调节参数,算法通过仿真证明有效性,但缺乏实验验证^[49]。南京航空航天大学张详^[50]团队提出了基于 IMU 数据使用模糊 PID 控制割草机行走,实验验证了该策略姿态控制与行走控制的性能。该策略结合定位导航,研究了基于 IMU/DGPS 的导航定位方案,使用无迹卡尔曼滤波器融合 IMU 和 DGPS 数据,实现因航向角不准确和 PID 控制不精确导致的路径规划问题,但也从另一方面证明传统 PID 控制不能很好的控制智能割草机方向控制,未能

考虑到智能割草机工作环境复杂、不平坦的问题。

传统 PID 控制器是一种典型的线性控制器^[51]，适合工作环境较为稳定的系统，对于复杂工况的系统，很多情况无法预测，会引入新的误差，导致系统不准确，并且可能因为 PID 中的积分误差产生累计误差。由于智能割草机的工况复杂，且其运动模型非线性特征，因此采用传统 PID 控制算法控制智能割草机的双轮差速控制器，智能割草机的运动跟随响应慢且不准确。针对这个问题，多位学者提出的不同应对方法，如 Lyapunov 直接法、模型预测法、自适应滑模控制等方法^[52-54]，并且都在仿真过程中证实了有效性，但缺乏实验依据。由于智能割草机的系统及工况复杂，无法做出工作环境的准确预测，所以在智能控制中还是存在很多不确定因素，因此在实际应用中还是存在很大的问题。

4.1.2 控制方案优化

目前传统的控制方案主要基于 PID 控制，在过程控制中，按偏差比例（P）、积分（I）和微分（D）进行控制。比例（P）可以控制响应时间，减小误差；积分（I）反应系统的累计偏差，使系统消除稳态误差；微分（D）可以预见偏差变化的趋势，产生超调的控制作用。但结合本文的智能割草机的航向角求解过程，本身陀螺仪就是带有非线性误差，因此（I）过程可能会引入新的误差，因此本文的控制算法选用 PD 控制器。

本章考虑到智能割草机运动模型的非线性特征，普通的 PD 控制适用于线性系统，因此提出将模糊控制理论与 PD 控制器相结合，将智能割草机的复杂工况形成对应模糊规则并转换成程序语言，对复杂地形中不确定扰动根据模糊控制进行补偿，根据航向角的偏差角和偏差变化率制定模糊规则，其输出作为 PD 控制器的输入，由此获得良好的运动方向跟随性能。

4.2 智能割草机的运动模型

智能割草机是一种轮式移动机器人，本文主要研究的是智能割草机运动方向跟随问题，这不仅需要精确的航向角，还需要能够快速跟随航向角进行运动方向调整的双轮差速控制器，针对在控制过程中跟随误差问题，本文需要分析智能割草机的运动学模型。

4.2.1 智能割草机运动模型分析

由于智能割草机的工作是户外未知的复杂环境，因其本身机械结构复杂，所

以在分析运动学模型的时候做出适当的简化，假设：

- (1) 智能割草机是纯钢体；
- (2) 智能割草机的质心在几何中心线上；
- (3) 忽略行进过程中所收到的阻力以及侧向力；
- (4) 正常行进时，车轮与地面无相对滑动；

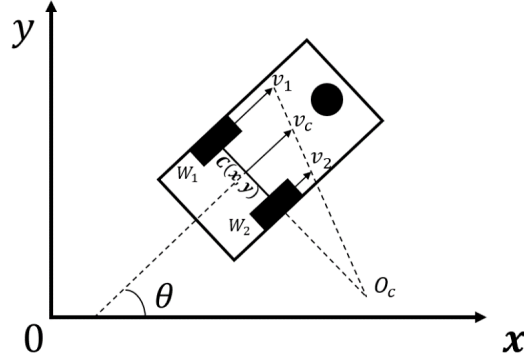


图 4.1 智能割草机运动示意图

本文所设计的智能割草机的运动特性是双轮差速驱动，其后轮是基于直流无刷电机的驱动轮，前轮为从动轮，跟随前轮行走，维护机身平衡，图 4.1 为智能割草机的运动模型简化示意图。其中 L 为智能割草机后驱轮的间距。

以平面任一点为坐标原点建立大地坐标系 xOy ，在该坐标系下定义智能割草机的左右驱动轮中心点分别为 W_l 和 W_r ，而在载体坐标系下这两点在惯性坐标系下移动的线速度为 v_l 和 v_r ，理想情况下即为左右轮转动时的线速度。该值可以通过电机驱动接口输出的角速度 ϕ_l 、 ϕ_r 和驱动轮的半径 r 求得，即：

$$v_l = \phi_l r \quad (4.1)$$

$$v_r = \phi_r r \quad (4.2)$$

点 C 为两个驱动轮中心点连线的中点，对应到 xOy 坐标系下的位置为 (x, y) ，智能割草机的瞬时线速度为 v_c ，瞬时角速度为 ω_c ，姿态角 θ 即为 v_c 与 x 轴的夹角。此时，智能割草机的位姿矢量可以表示为：

$$P = [x \quad y \quad \theta]^T \quad (4.3)$$

智能割草机的瞬时线速度 v_c 则可以表示为：

$$v_c = \frac{v_l + v_r}{2} \quad (4.4)$$

已知左右轮的间距为 L ，令智能割草机的瞬时旋转中心为 O_c ，转动半径为 R ，

即 C 到 O_c 的距离。割草机器人在做同轴（该轴为左右轮到 O_c 的连线）圆周（圆心为 O_c ）运动时，左右轮以及几点所处位置在该圆周运动中的角速度相等，即

$$\omega_l = \omega_r = \omega_c \quad (4.5)$$

由于左右轮到旋转中心 O_c 的半径不同，所以可以推算出 L ：

$$L = \frac{v_r}{\omega_r} - \frac{v_l}{\omega_l} \quad (4.6)$$

则智能割草机的瞬时角速度 ω_c 可以表示为：

$$\omega_c = \frac{v_r - v_l}{L} \quad (4.7)$$

联立上面两个公式，可以求出智能割草机的转动半径：

$$R = \frac{v_c}{\omega_c} = \frac{1}{2} \frac{v_r + v_l}{v_r - v_l} \quad (4.8)$$

故可得智能割草机的运动学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{v_l + v_r}{2} \cos\theta \\ \frac{v_l + v_r}{2} \sin\theta \\ \frac{v_l - v_r}{L} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

4.2.2 智能割草机三种运动状态分析

割草机在行进过程中主要分为三种运动方式，即直行、转弯、掉头。如图 4.2 所示。

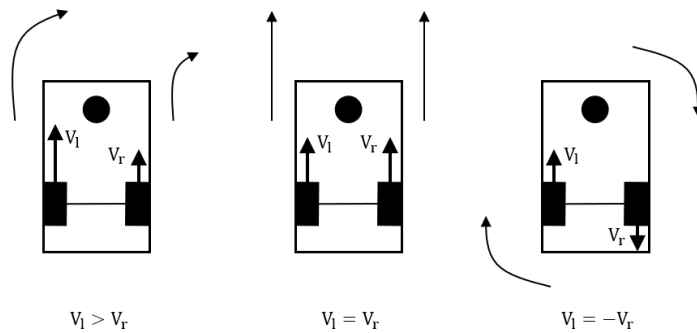


图 4.2 智能割草机运动状态

当左边轮转速 v_l 大于右边轮转速 v_r 时，智能割草机做右转运动，反之做左转运动，当双轮转速相等时，做直行运动。

在智能割草机直行前进中，由于工况复杂，会使得割草机偏离原来的行进方向，即航向角检测发生偏差，所以会根据航向角的误差以及误差率来进行左右轮调速，以便能够及时调整方向准确直行前进。

4.2.3 智能割草机运动方向跟随误差分析

由上述分析可知，智能割草机通过调整左右驱动轮速度形成左右轮的差速，从而实现调整运动方向，但是在实际应用中，驱动轮实际转速与给定参考转速之间存在误差，造成智能割草机调整左右轮转速也会存在误差，并且会随着时间偏离原定路径和航向也越来越大，因此结合上文分析的智能割草机的运动模型研究航向角与驱动轮转速误差关系。

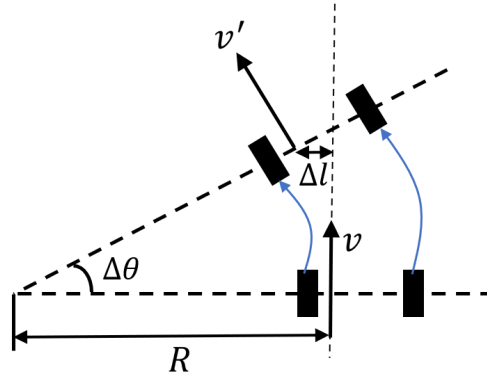


图 4.3 智能割草机运动偏差示意图

由于在运动过程中期望运动方向和实际运动方向存在偏差，图 4.3 是智能割草机的运动跟随过程中的偏差示意图，其中 v 为期望运动方向， v' 为实际运动方向， $\Delta\theta$ 为 Δt 时间内的角度误差，即智能割草机实际与期望的运动方向间的航向角度之差；因此 Δl 为 Δt 时间内产生的位置误差，即智能割草机偏离期望位置的距离。

根据模型的几何关系可推导出智能割草机的运动误差方程为：

$$\begin{cases} \Delta\theta = \frac{\Delta v_l + \Delta v_r}{2R} \Delta t \\ \Delta l = \frac{\Delta v_l + \Delta v_r}{2} \sin(\Delta\theta) \Delta t \end{cases} \quad (4.10)$$

式中： Δv_l 和 Δv_r 分别为左右轮在 Δt 时间内的转速误差， R 为上节中求出的智能割草机的期望转动半径。

根据式（4.10）分析可知，智能割草机的运动方向误差由其左右驱动轮转速

调整相关，在割草机行进过程中，会根据航向角实时调整转速，在调整过程中，由于航向角精度高、变化快，左右轮驱动转速会随之调整，所以合适的差速指令至关重要，合适的差速指令会减小智能割草机行进过程中的运动方向误差。

4.3 双轮差速模糊 PD 控制

在对智能割草机的双轮差速控制器的设计中，要能够跟随航向实现在多种复杂地形下的快速跟随，需要考虑到其运动模型的非线性特征。由于智能割草机的工作环境是工况复杂的草地，所以在运动过程中存在很多不确定性，无法通过建立动力学模型将所有影响割草机控制方向的因素考虑全面，本文设计的控制器是基于运动模型的双轮差速控制器，可以适应复杂工况且硬件成本低。传统的 PID 控制算法无法适用于本文的工况复杂的场景，多次实验证明控制效果并不理想。因此本文提出使用模糊 PD 控制算法，基于模糊控制规则，可以根据工作人员的经验，将复杂工况考虑到算法中，对算法的控制规则进行调整，经过多组实验和对比，找出最合适的模糊控制规则，该算法利用前文计算出来的精确的航向角作为前提，通过该航向角制定模糊规则，判断工况的复杂性，最终获得最为合适的调速指令，来调整双轮的差速，达到调整方向的目的。最后通过实验证明该算法的有效性。

4.3.1 模糊控制理论

模糊控制是由模糊集理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理组的一种智能控制技术，具有非线性特性，能够在行为和思维上模仿人的推理与决策，该控制技术可以对无法确定的控制对象实现控制^[55]。模糊控制首先制定模糊规则，一般是根据实际实验数据所得或者是专家或操作人员经验所得，然后输入信号根据模糊规则模糊化后作为模糊推理的输入信号，进入模糊推理过程，再将推理得到的输出量经过解模糊后输出^[56]。模糊控制系统的鲁棒性强，尤其是用于如智能割草机器人这类模型参数难以精确求解，且具有复杂耦合关系的非线性系统^[57]。

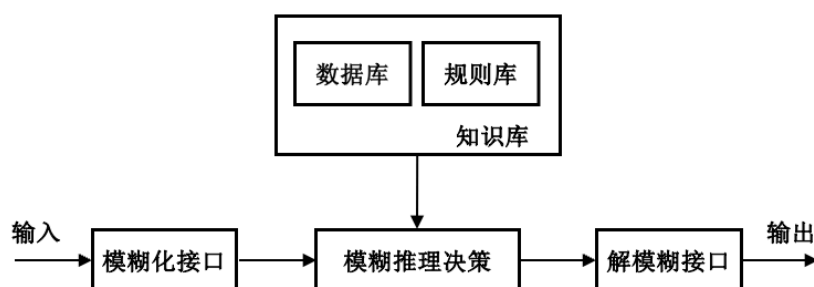


图 4.4 模糊控制器的组成结构

模糊控制器由模糊化接口、数据库和知识库、推理机、以及解模糊化接口组成，其基本结构如图 4.4 所示。

模糊化接口是用来将输入信号的真实值转换为模糊控制器可以理解的模糊输入量，用于后续的模糊推理。一般情况下规定输入匹配对应的论域并且将真实输入值对应到该论域之中，对应生成模糊语言值，然后根据此规则确定隶属度函数，使得每个输入真实值都有与之对应的模糊变量。

数据库和规则库组成一个知识库，数据库存放所有输入、输出变量的全部模糊子集的隶属度矢量值或隶属度函数，隶属度值为模糊子集通过论域等级离散化后的对应的集合。规则库存放将专家知识或相关操作人员的工作经验转换为规则的程序语言。

模糊推理是将输入信号经过模糊化之后通过模糊控制规则，参照模糊集合和知识库完成模糊推理，输出推理后的模糊控制量。在模糊控制推理中，常用的推理方法有 Zadeh 近似推理，它包含正向推理和逆向推理两类，该推理方法运算简单，时间较快。模糊推理后的结果输出仍然是个模糊矢量，不能用来作为控制量，还必须通过解模糊将其转化为机器可以读取的对应的指令结果。因此模糊控制器组成结构中的最后一个部分解模糊接口就是用来将推理后的输出信号转换为可以被机器使用的指令。

去模糊化的方法有很多，如最大隶属度法、重心法和加权平均法等。最大隶属度法是通过选取推理结果模糊集合中隶属度最大的元素作为输出值，但如果最大隶属度对应的输出值多于一个，则取所有具有最大隶属度输出的平均值该方法并不会考虑隶属度函数的形状或者趋势，只是获取最大隶属度的输出值，所以在应用中可能会丢失信息，但优点是运算简单方便，适用于要求不高的场合；重心法则是取隶属度函数曲线围成面积的重心作为模糊推理的最终输出值，该方法获取的推理结果更为灵敏，输入信号产生微小的变化，输出也会产生相应的变化，灵敏度更好；加权平均法在工业控制中应用广泛，根据实际情况决定权值，累积求和得到输出值。

4.3.2 模糊 PD 控制器设计

在控制过程中，比例（P）反应当前系统的基本偏差，系数大，因此调节速度快，合理的比例系数可以减小控制过程误差，同样不合理的比例系数会使得系统的稳定性下降；积分（I）反应的是系统的累积偏差，合理的积分可以使系统消除稳态误差，提高精度，微分（D）则反应系统偏差信号的变化率，能预测偏差变化趋势从而超前消除偏差，但同时微分对噪声干扰会有放大作用，一定程度上

会系统引入干扰，所以一般积分控制和微分必须与比例控制配合。结合智能割草机的运动跟随系统是基于航向角的运动跟随，由驱动系统中的双轮差速控制器完成调速以实现控制方向，但是由第三章解算航向角的过程可知，航向角会随着时间带入累积误差。因此本文在设计控制器时考虑到航向角的累积误差问题，采用比例控制结合微分控制配合的 PD 控制，并在此基础上引入模糊控制的方法实现对智能割草机的双轮差速控制，控制器框图如图 4.5 所示。

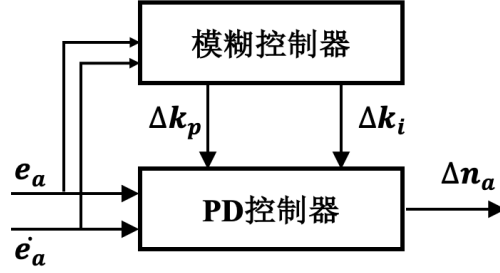


图 4.5 模糊 PD 控制器

模糊 PD 控制器由 PD 控制器和模糊控制器两部分组成，模糊控制器的输入为智能割草机给定的行进航向角与组合导航解算出的最新时刻的航向角的航向角误差 e_a 和航向角误差变化率 $\dot{e}_a$ ，输出为 PD 控制器的修正量 Δk_p 和 Δk_d ，模糊控制器可以通过不同时刻的输入 e_a 和 $\dot{e}_a$ 对照模糊控制规则输出不同的 Δk_p 和 Δk_d ，然后通过 PD 控制器进行修正，最后 PD 控制器输出左右轮电机的转速改变量 Δn_a ，可用式 (4.11) 表示

$$\Delta n_a = k_p e_a + k_d \dot{e}_a \quad (4.11)$$

其中 k_p 和 k_d 为经过模糊控制器修正的实时 PD 参数，若设初始值分别为 k_{p0} 和 k_{d0} ，则

$$\begin{cases} k_p = k_{p0} + \Delta k_p \\ k_d = k_{d0} + \Delta k_d \end{cases} \quad (4.12)$$

模糊控制器的输入变量是航向角误差 e_a 和航向角角误差变化率 $\dot{e}_a$ ，航向角的误差即为该时刻的航向角与既定航向的航向角之间的差值，航向角的误差率为航向角误差与时间的比值。为了作为模糊控制器的输入，将航向角的误差和航向角的误差率根据其范围映射成模糊语言。

模糊子集一般根据需求和结合实际情况划分，不易过多或过少，过多会导致计算复杂，控制规则难以确定落实，从而影响系统的快速运转，导致航向无法快速调整；子集过少会影响控制器的精度。综合考虑本文所设计的智能割草机的复杂工况及航向调整情况，将航向角误差 e_a 和航向角角误差变化率 $\dot{e}_a$ 的模糊子集定

为按表 4.1 中划分。

表 4.1 模糊子集划分表

负大	负中	负小	零	正小	正中	正大
NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL

由于对称三角形隶属函数计算简单，只需要确定三角形的顶点坐标，然后求出该点与三角形之间的距离里就可以得出该点的隶属度，并且该隶属度函数适用性强，可用于多种不同类型的模糊集合，所以本文采用隶属函数对模糊子集进行描述，如图 4.6 所示。

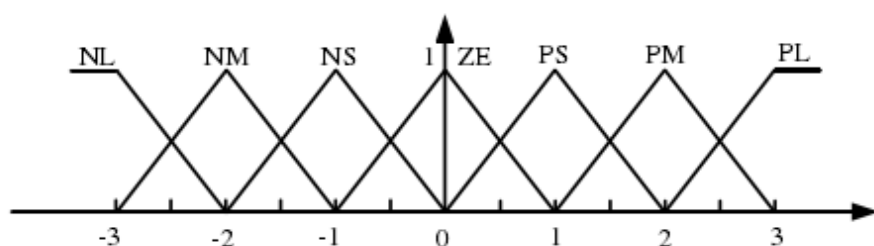


图 4.6 三角形隶属函数

模糊控制规则一般是相关领域专家或操作人员长期积累的经验与知识总结的知识库，在工程应用作将数据与规则对应起来，并且设计出较优的控制策略。

在本文的航向控制中，采用基于模糊控制的 PD 控制器。其中，P 参数在本文所设计的算法中调节控制器响应速度，合理的 P 参数可以在一定程度上提高响应速度的同时也能够稳定运动方向避免振荡；而 D 参数是用来随着航向角的变化率产生变动，合理的 D 参数可以保证智能割草机在动态时避免航向角发生过调，同时在稳态时可以减少扰动。两个参数的合理选取与配合，可以使航向控制系统具备稳定的性能。

结合前文分析的智能割草机非线性运动模型及运动跟随误差产生原因，偏航角误差 e_a 、偏航角误差变化率 $\dot{e}_a$ 与 PD 控制器参数 k_p 、 k_d 之间的制约关系可以概括为如下三个原则：

(1) 当智能割草机直线行走或者路面工况较为平坦时，该状态下智能割草机具有良好的稳态控制性能，此时智能割草机的航向角的误差偏差率的绝对值 $|\dot{e}_a|$ 较小，所以应该取较大的 k_p 值，该值的选取要结合稳定点附近出现振荡和干扰的影响，因此本文在 $|\dot{e}_a|$ 较小时选择较小的 k_d ，在 $|\dot{e}_a|$ 较大时选择中等的 k_d 。

(2) 当智能割草机工作路况比较复杂但还可以继续保持直行时，此时的偏航角误差 e_a 的绝对值 $|e_a|$ 为中等，此时应该选择较小的 k_p 值和中等的 k_d 值；

(3) 当智能割草机的工况非常复杂, 遇到障碍物要及时转弯或者路径规划要转弯时, 此时智能割草机的偏航角误差 e_a 的绝对值 $|e_a|$ 较大, 为了应对复杂的工作情况, 要适当的提高控制器的响应速度, 提高双轮差速控制器的调节速度, 同时要避免智能割草机调节到原定航向时不会出现过调, 此时应该取较大的 k_p 和较小的 k_d ;

根据上述原则可以建立对应模糊规则映射表, 如表 4.2 和表 4.3 所示。

表 4.2 Δk_p 模糊规则表

$\Delta k_p \backslash e_a$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PL	PL	PM	PM	PM	PS	PS
NM	PL	PL	PM	PM	PS	PS	ZE
NS	PM	PS	PS	ZE	ZE	NS	NS
ZE	PM	PM	PS	ZE	ZE	NS	NS
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	ZE	PS	PS	PM	PM	PM	PL
PL	PS	PM	PM	PM	PM	PL	PL

表 4.3 Δk_d 模糊规则表

$\Delta k_d \backslash e_a$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL	PM	PM	PS	PS	PS	PS	ZE
NM	PM	PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
NS	PL	PL	PM	PM	PM	PS	ZE
ZE	PM	PS	PS	ZE	PS	PS	PM
PS	ZE	ZE	PS	PM	PM	PM	PL
PM	NS	ZE	PS	PS	PS	PM	PL
PL	ZE	ZE	PS	PS	PM	PL	PL

解模糊是将模糊规则输出的模糊变量变换通过运算转换为可以被智能割草机驱动系统使用的确切的变量, 在这里是相应的调速值通过解模糊获得对应的指令作为双轮差速驱动控制的输入量。本文解模糊方法选择的是离散单点模糊集合法, 取论域中元素的语言值为 X_i , 论域中元素的隶属度函数为 $\mu(X_i)$, 则可通过公式 (4.13) 所示的计算方法实现重心法解模糊。

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \mu(X_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(X_i)} \quad (4.13)$$

根据上述模糊控制器通过检测并计算的航向角的误差和误差变化率输出可以作为 PD 控制器的参数，通过 PD 控制器得到智能割草机驱动轮的转速调整量指令。智能割草机双轮差速驱动系统框图如图 4.7 所示。

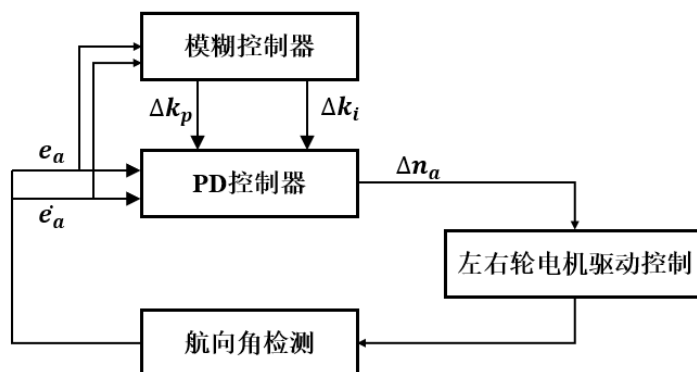


图 4.7 智能割草机双轮差速驱动控制系统框图

4.4 测试与分析

4.4.1 测试环境设定



图 4.8 智能割草机平地直线行走测试

为了验证本系统的运动跟随性能以及智能割草机的沿着路径规划方向行驶的性能，本节根据前文计算出来的精确的航向角结合不同控制算法来验证模糊 PD 控制算法在双轮差速控制器上的有效性；通过前文计算的不同的航向角结合

模糊 PD 算法来验证航向角精确的重要性。在运动跟随系统中，航向角和驱动控制同等重要，相互配合才能实现高性能的运动跟随，完成精准走直线和转弯，沿着路径规划路线行驶，提高割草效率。

本文的实验采用两种环境测试，分为平整路面和复杂的草地工况。通过如图 2.1 所示的智能割草机实物和如图 2.2 所示智能割草机内部的电路板，分别对复杂草地及平整地面行走效果进行实验观测。实验是在割草机运动过程中完成的，用 JLink 连接割草机表面的串口获取数据。



图 4.9 智能割草机直线行走草地测试

在室内平整地形下，进行智能割草机行走测试，测试场景是如图 4.8 的 35m 长方形长廊中，开始前割草机右轮贴着中间直线往前，在每 50cm 处做定点标记，定点标记测量与中间直线的距离，因此获取 70 个偏移中间直线数据，测量精度为 cm，以此对比观测割草机的直线行走的效果。

在凹凸不平的草地上，进行智能割草机行走测试，测试场景如图 4.9 所示。测试距离是 20m 的草坪，以中间绿色的电线作为标准，每隔 50cm 作为定点测量偏移数据。

两种场景都是采用在中间拉直线，每隔 50cm 做出标记，以便在测试过程中做对比。实验过程中实时记录智能割草机行走不同点时偏移中心线的距离，由此比较智能割草机的不同控制算法的优劣以及准确的航向角在驱动控制系统中的重要性。

4.4.2 基于不同控制算法的双轮差速控制割草机行走测试

为了验证本文提出的基于模糊PD控制的双轮差速控制器具有良好的给定运动方向跟随性能,本文对比传统PID控制算法,分别在图4.8的平整地面和图4.9复杂草地上进行测试,实时定点记录智能割草机在行走过程中偏移固定在地面上的中心线的距离,该过程使用前文中计算出的精确航向角,即在航向角精确的情况下,使用两种不同控制算法进行对比实验。

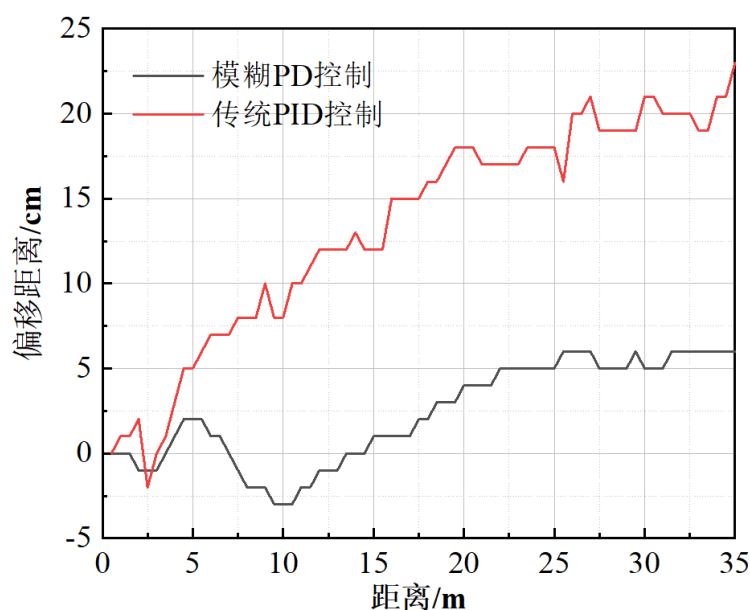


图 4.10 35m 平整走廊偏移中心线距离测试对比

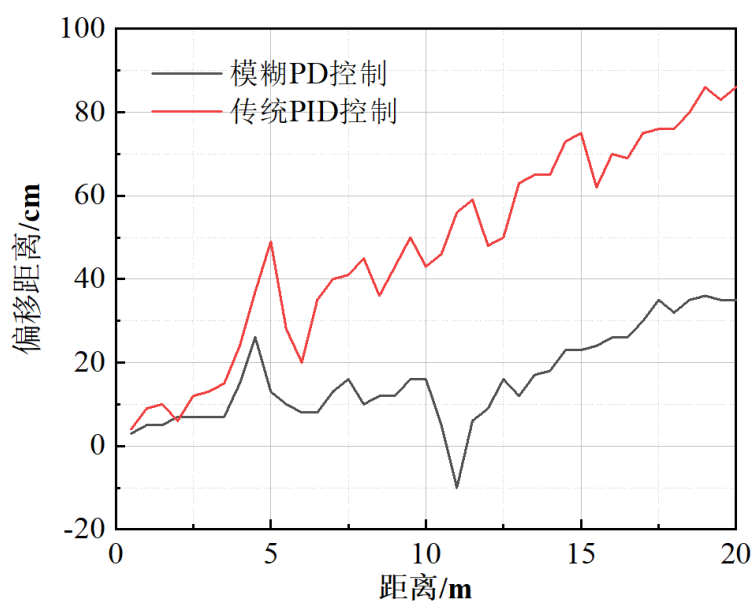


图 4.11 20m 草地偏移中心线距离测试对比

由图 4.10 可以看出, 在 35m 平整长廊中, 模糊 PD 控制的双轮差速驱动控制的精度比传统 PID 控制要稳定且精确, 并且传统 PID 控制在平地进行直线行走的情况下, 会不断调整方向导致角度调整更大, 进而使偏移距离更大; 模糊 PD 控制下的割草机在调整过程中由于模糊规则的自校准, 所以在平地的调速不大, 因此偏移距离较为稳定。

图 4.11 为 20m 草地的实验结果图, 可以看出, 由于草地工况复杂可能会有石子、坑洼等障碍物, 所以相对平整地面的抖动会更大一些, 由此可知模糊 PD 控制的输入即航向角误差以及误差率会更大, 因此调整左右轮速度会根据模糊规则进行调速, 对比传统 PID 而言, 输入的航向角都是同一个值的情况下, 使用模糊 PD 控制算法控制双轮差速驱动会使得智能割草机的在直线行走过程中路径跟随更为准确, 偏移中心线时能够及时做出调整, 在长距离直线行走中可以达到快速调整速度和方向的效果。

4.4.3 基于不同航向角的双轮差速控制割草机行走测试

智能割草机能够稳定且准确的跟随航向角持续行走, 在实验测试中体现为沿着测试场景中所布置的中心线直线行走, 不仅依赖于稳定且能够快速调整角度与转速的双轮差速驱动控制系统, 还依赖于精确与稳定的航向角。在前文的测试中, 对比了传统 PID 控制算法和模糊 PD 控制算法在双轮差速驱动控制中的实验效果, 可以得出在相同的航向角的情况下, 模糊 PD 可以实现智能割草机更加精确稳定的航向跟随。因此本节测试采用模糊 PD 控制算法来控制双轮差速驱动, 使用前文对比的航向角作为智能割草机的不同的航向输入, 分别采用无滤波的航向角、滑动滤波算法后的航向角和组合导航计算出的航向角, 在草地和平整走廊做对比实验。

图 4.12 中使用的航向角为前文所对比的航向角, 使用模糊 PD 控制算法作为驱动控制算法, 不同航向角作为输入, 进行 35m 平整长廊测试。由结果可知, 当对航向角未采用滤波时, 智能割草机行走走到 7m 标记点处就已经触及边界线开始掉头或者转弯, 偏移距离过大, 所以未加滤波的实验结果仅记录到 7m 处。滑动滤波和组合滤波得出的航向角在 35m 平整长廊中的直线行走, 在相同的控制算法之下, 实现结果差距较小。由前文关于航向角的理论计算和测试结果可知, 滑动滤波和组合导航滤波的主要差异在于转弯行驶过程中, 组合导航的航向角与理想结果偏差更小。理想地面的实验中, 已经可以实现长时间直线行走的精确运动跟随, 35m 长廊仅偏移 5cm, 该航向角满足路径跟随的要求。综上所述, 本文提出的路径跟随系统满足路径规划的需求。

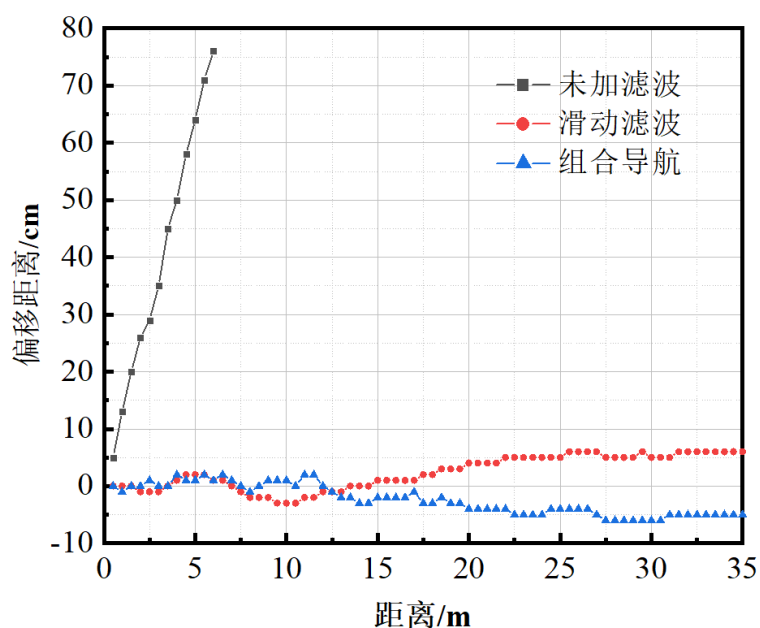


图 4.12 基于不同航向角的 35m 平整走廊的行走测试

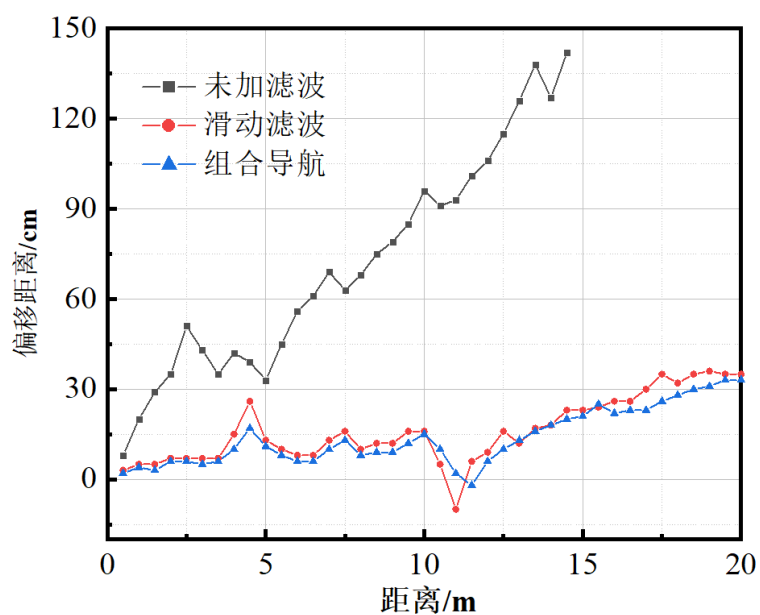


图 4.13 基于不同航向角的 20m 草坪的行走测试

图 4.13 是基于不同航向角的 20m 草坪的行走测试结果，采用图 4.12 中的测试步骤，实验环境是图 4.9 所示的 20m 草坪，输入分别是基于未使用滤波、滑动滤波和组合导航计算而得到的航向角，采用模糊 PD 控制算法控制双轮差速驱动。实际测试中，由于草坪比长廊宽，所以当行走到中心线的 14.5m 处，智能割草机固定在地面上的边界线，执行转弯或者掉头的指令，偏移距离过大。滑动滤波和组合导航的航向输出在直线行走过程中，都能起到较为理想的航向指引作用，及

时在工况复杂的草坪也能实现准确的航向输出，在 20m 的草坪上直线行走仅偏移 30cm 左右，实现精确的运动跟随效果以及满足路径规划的航向精度要求。

4.4.4 结果分析

本章实验都是基于两种场景进行测试：理想平地采用 35m 的平整长廊、复杂工况采用 20m 的长草坪。两种场景下，分别使用前文计算对比出的准确航向角，对比使用模糊 PD 控制算法和传统 PID 控制算法来控制双轮差速控制器。实验结果表明，在相同的输入航向角情况下，模糊 PD 控制算法更为稳定精确，运动跟随更符合路径规划的精度要求。

在验证模糊 PD 算法的有效性之后，本文由对航向角在路径跟进跟随中进行实地测试，使用模糊 PD 算法作为控制算法，对比输入不同的航向角后，在不同实验环境下都进行测试，最后得出在直线行走过程中，不加入滤波的航向角在短距离行走中就偏离中心直线较大，最后脱离直线轨道；而滑动滤波和组合导航滤波在直线行走中都能达到很好的航向指引和纠正作用，实现在理想平地 35m 长廊中偏离中心线仅 6cm，航向精度大大提升，达到路径规划要求，实现精确的路径规划。组合导航和滑动滤波的差距主要体现在转弯过程中，组合导航更为精确，前文第三章已做实验验证。

4.5 本章小结

本章通过智能割草机的运动模型分析了驱动轮转速的偏差对运动跟随误差的影响，进而来分析运动过程中产生的运动跟随误差，并基于智能割草机的运动模型的基础上分析了其运动状态，使用第三章计算出的航向角作为输入，获取到航向角的误差以及误差率作为双轮差速驱动的输入，考虑到智能割草机运动模型中的非线性特征以及智能割草机的复杂工况，本章在 PD 控制的基础上加入模糊控制来调整 PD 参数，以此得到控制性能更高的非线性双轮差速控制器来获取双驱动轮的转速调整指令，以实现智能割草机的运动方向跟随误差校正，最后实验证明该控制器的有效性以及运动跟随系统配合航向角的稳定性。

第五章 总结与展望

5.1 总结

随着近年来城市绿化草坪面积不断增长,人工维护费用越来越高,智能割草机的需求也越来越大。智能割草机可以实现无人化维护,自动割草,其应用越来越广泛,提高割草效果的同时还能降低成本是智能割草机不断优化和改进的方向。因此,结合了现代电子技术和智能控制技术的智能割草机器人逐渐成为智能移动机器人领域的一个研究热点。本文的研究目标是智能割草机系统,主要对智能割草机的路径跟随系统展开了研究,解决了系统航向角的精度问题和运动跟随问题。主要所做的工作可总结如下:

(1)结合发展背景和相关研究现状对目前智能割草机存在的问题进行分析:智能割草机系统中航向角的测量精度低,双轮差速驱动控制存在较大的跟随误差,这都将导致智能割草机不能持续直线行走和精准转弯,从而导致路径规划中智能割草机作业效率低、重复割草或割草覆盖面低等问题。

(2)本文利用 GD32F105VET6 作为主控芯片的主控模块和其他相应功能子模块构建整体硬件系统架构,软件设计是基于实时操作系统运行环境下多任务处理的架构,共同实现自主割草,持续直行和路径跟随等功能。同时还对相关应用层进行了设计,方便用户实时查看智能割草机的运行数据,并且能够远程操控智能割草机。

(3)针对智能割草机系统中航向角测量结果精度低,导致不能长时间准确跟随路线行走的问题。本文提出基于 INS/磁力计组合导航的测量方案,首先对惯性导航传感器进行 N 长滑动滤波来消除静态漂移误差,然后利用惯性导航求出的俯仰角和横滚角补偿磁力计并计算出磁航向角,最后对多传感器进行数据融合,最终输出准确可靠的航向角。

(4)针对智能割草机的复杂工况导致的运动跟随误差大的问题,本文设计了基于模糊 PD 控制算法的双轮驱动控制器,首先根据现有经验以及对复杂草地工况进行模糊分类,对应偏航角误差以及偏航角误差变化率,对应形成论域。针对论域,制作出模糊规则表以提供在不同变化场景下使用不同决策,最后将输出的模糊量通过解模糊得到精确控制值来发送指令给双轮驱动调整双轮转速进行修正,最终完成高性能的运动跟随。

5.2 展望

本文设计的智能割草机运动跟随系统中,以低成本方式解决了目前割草机困扰的智能割草机行走直线偏移问题,进一步为之后的路径规划打下基础。本文结合惯性导航传感器和磁力计实现组合导航系统,成本较低,所以传感器的精度与应用场景有限,未能获取割草机的地理坐标,导致草坪地图精度不高。所以在本文研究的基础之上,未来还能在以下几个方面作进一步研究:

(1)、智能割草机系统中,无法获取草坪相对面积形状,后续可以加入 GPS 作为组合导航的辅助,进一步扩展割草机系统的功能, GPS 技术不仅可以辅助获取航向角校准,也可以获取地理信息,由 Wi-Fi 传给用户端绘制地图等,可以根据地形更加方便做出不同的路径规划,甚至可以根据地形的不同,为用户匹配不同的路径规划策略。

(2)、由于智能割草机的工作环境复杂不可预测,所以在工作中,经常会遇到大小不一的障碍物,智能割草机需要智能避障,避免撞击而发生侧翻,但目前在智能割草机系统中,障碍物检测模块还需进一步细化与智能化,在遇到不同障碍物采取不同的措施,检测到大的障碍物时,可以选择掉头,检测到小障碍物时,可以选择调整方向避开然后继续行进等策略,可以选择采用模糊策略结合障碍物检测的大小进行不同的策略调整,进一步提高工作效率。

(3)、智能割草机的路径规划方案有限,针对不同的割草环境采用不同的路径规划策略,可以针对不同大小提出不同的规划割草策略,结合算法提高割草的工作效率以及覆盖率,避免重复割草或者割草区域覆盖率不高的问题。

参考文献

- [1] 张河宁, 于涛, 段馨蕊, 刘磊, 邱延涛, 苏宏岩. 无人割草机关键技术发展综述[J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2021(09):191-193.
- [2] 孙凌寒. 基于专利申请看机器人割草机的发展[J]. 中国发明与专利, 2019, 16(11):49-54.
- [3] 邢宝. 面向家庭用户的割草机国内外发展现状及趋势研究[J]. 南方农机, 2018, 49(23):2.
- [4] Yang J, Chung S, Hutchinson S, et al. Vision-based localization and mapping for an autonomous mower[C], IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots & Systems. IEEE, 2013.
- [5] 喻波. 智能割草机器人市场调研[J]. 科技创新与应用, 2018, (29):70-71.
- [6] 王建, 洪伟荣, 杨远安. 浅议机器人自动割草机[J]. 科技创新与应用, 2015, (31):42.
- [7] 杨宏芳. 浅谈有关智能割草机的主要技术[J]. 科学中国人, 2017, (21):40.
- [8] 陈万金, 赵春花, CHEN, 等. 智能割草机的关键技术探讨[J]. 湖南农机, 2013.
- [9] Patra B, Nandy S. Lawn mower trajectory tracking by wheeled mobile robot: Its consequences[C], International Conference on Electronics. IEEE, 2017:1-7.
- [10] Hicks R W, Hall I L. A Survey of Robot Lawn Mowers[C], SPIE Intelligent Robotics and Computer Vision Conf. International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [11] Husqvarna. Automower[EB/OL]. <https://www.automower.com.br/>.
- [12] 王敏, 王军洋. 太阳能割草机的发展现状与展望[J]. 江苏农机化, 2020, (03):36-39.
- [13] Friendly Machines Inc. Robomow[EB/OL]. <https://usa.robomow.com/products/>.
- [14] 杨洁. 九号公司董事长高禄峰:看好家用服务机器人赛道以割草机打造新增增长点[N]. 中国证券报, 2021, (A06).
- [15] 童逸舟. 基于图像处理的智能割草机器人路径规划研究[D]. 浙江理工大学, 2016.
- [16] 周宁. 割草机器人割台设计与运动控制研究[D]. 江苏大学, 2005.
- [17] 田春雨. 基于 UWB 定位的智能割草机设计及路径规划研究[D]. 东南大学, 2018.
- [18] 李悟早, 郭术义, 任思杰. 模糊控制理论综述[J]. 河南科技, 2019(11): 12-15.

- [19]洪伟荣,杨远安,王建.浅析有关智能割草机的主要技术[J].科技创新与应用,2015,(31):41.
- [20]陈万金,赵春花.智能割草机的关键技术探讨[J].湖南农机,2013,40(07):156-157.
- [21]佚名. 机器人割草机及其电池检测方法[J]. 电动工具, 2016,(2):6.
- [22]Franzius M ,Dunn M ,Einecke N ,et al. Embedded Robust Visual Obstacle Detection on Autonomous Lawn Mowers[C], 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). IEEE, 2017.
- [23]赵烨. 智能割草机的驱动控制研究[D].浙江大学,2020.
- [24]胡洪波. 基于 INS 升沉与姿态角数据的波浪浮标设计[D]. 哈尔滨工程大学,2018.
- [25]王子萌. 智能割草机器人避障及路径规划研究[D].南京航空航天大学,2020.
- [26]刘昱岑. 割草机障碍物检测系统的设计与实现[D].重庆大学,2019.
- [27]郭斌. 基于物联网技术的智慧蜂箱设计与实现[D]. 杭州电子科技大学,2016.
- [28]林国柱. 基于 Cortex-A8 的物联网网关设计与实现[D]. 浙江工业大学, 2014.
- [29]王海涛. 基于 DSP 和 ARM 的变压器在线监测装置的设计与实现[D]. 北京交通大学, 2013.
- [30]廖伟. 膈肌呼吸机界面的设计与实现[D]. 华南理工大学, 2015.
- [31]刘巍. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS-III}$ 的实时声级计管理系统设计[D]. 湖南大学, 2017.
- [32]顾正甲,胡英杰.软件评估在智能割草机中的应用[J].电动工具,2012.
- [33]盛广润, 高国伟, 张伯源. 基于四元数的四旋翼飞行器姿态解算研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(14):6.
- [34]王猛,吴一,张宇等.捷联惯性导航计算机系统架构发展综述[J].电子产品世界,2023,30(02):33-36.
- [35]王国栋,孙丽艳,王振凯,杨亮.一种 MEMS 陀螺仪零偏建模与估计方法[J].导航定位与授时,2021,8(04):135-140.
- [36]程小辉,张宇.一种应用于三轴稳定器中的陀螺仪漂移抑制方法[J].实验室研究与探索,2020,39(05):36-40.
- [37]徐韩,曾超,黄清华.基于卡尔曼滤波算法的 MEMS 陀螺仪误差补偿研究(英文)[J].传感技术学报,2016,29(07):962-965.
- [38]Gao Q, Cheng D, Wang Y, et al. A Calibration Method for the Misalignment Error between Inertial Navigation System and Tri-axial Magnetometer in Three-component Magnetic Measurement System[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, PP(99):1-1.

-
- [39] 庞鸿锋, 潘孟春, 王伟, 等. 基于高斯牛顿迭代算法的三轴磁强计校正[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7):6.
 - [40] Deng Y . Data of magnetometer ang gyro for "Complete Tri-Axis Magnetometer Calibration with a Gyro Auxiliary".2017.
 - [41] 吴瀛东. 具有差分 GPS 定位功能的智能割草机控制系统研制[D]. 东南大学, 2018.
 - [42] Borenstein J ,Everett H R ,Feng L ,et al. Mobile robot positioning: Sensors and techniques[J]. Journal of Field Robotics, 2015,14(4):231-249.
 - [43] Smith J ,Campbell S ,Morton J . Design and implementation of a control algorithm for an autonomous lawnmower[C], Symposium on Circuits & Systems. IEEE, 2005.
 - [44] Song Q, Feng J, Zhang X, et al. Obtaining the real time yaw angle using electronic compass in quadrotor systems[C].2012 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE),2012:238-242.
 - [45] 付雷. 基于 MEMS 的四旋翼飞行器姿态估计与控制系统研究[D]. 武汉科技大学, 2019.
 - [46] 刘明亮, 崔宇佳, 张一迪, 林海静, 陆起涌. 基于多传感器数据融合的姿态控制与应用[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(07):65-69.
 - [47] 董亚军. 基于多传感器信息融合的室内定位方法研究[D]. 西安电子科技大学, 2020.
 - [48] 徐鑫. 基于多传感器融合的姿态估计算法研究[D]. 苏州大学, 2021.
 - [49] 谭会生, 廖雯. 模糊 PID 在轮式机器人转向控制中的应用[J]. 湖南工业大学学报, 2018, 32(01):81-87.
 - [50] 张祥. 基于 IMU 与 DGPS 的智能割草机系统研究[D]. 南京航空航天大学, 2019.
 - [51] 刘新宇, 桑晨, 李媛媛, 游璧铭, 刘畅. 基于 PID 算法的巡逻无人机[J]. 现代信息科技, 2022, 6(20):141-145+151.
 - [52] 李平, 王建锋, 李娜, 等. 基于 Lyapunov 直接法的移动机器人运动控制研究[J]. 中国科技论文, 2016, 11(02):160-163.
 - [53] 尤波, 王明睿, 李智, 等. 基于模型预测控制的轮式移动机器人轨迹规划[J]. 系统仿真学报, 2019: 1-11.
 - [54] Xue L ,Zhiyong G. Adaptive sliding mode tracking control for nonholonomic wheeled mobile robots with finite time convergence[C], 2017 36th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2017: 720-725.

- [55]朱云国. 移动机器人局部路径规划的研究[D]. 合肥工业大学, 2006.
- [56]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,(04):11-15.
- [57]T. Mohammad Baloch and Timothy Thien Ching Kae. Design and modelling a prototype of a robotic lawn mower[C].2008 International Symposium on Information Technology, Kuala Lumpur, Malaysia, 2008:1-5.

致谢

总以为来日方长，却不知时光匆匆。行文至此，落笔为终，这三年是我二十多年的时光中最为充实且踏实的三年。这三年中，收获颇多，学业顺利、工作顺利、爱情也顺利，一切的顺利要感谢陪伴在我身边的每一个人，谢谢有你们给我的鼓励与陪伴，有你们我最后的学业生涯温暖幸福且顺遂。

首先，特别感谢我的导师陈科明教授。陈老师教会我学以致用，并且给了我实习锻炼的机会，将自己学习的理论知识应用于实际工程之后，给我的帮助很大，并且在应用过程中也给了我很大的鼓励，让我在学业和工作上越来越有自信，越来越敢于面对挑战与困难。在此，我再次向我的导师陈科明表示最诚挚的感谢和崇高的敬意！

其次，感谢我的好友、室友和同门！山水一程，有幸相遇。感谢我的挚友（程娟娟、顾媛媛、周晓璐，首字母排名），这世界有那么多人，恰巧我们成为了朋友，那些不能对家人道出的心事，是你们让他们有了出口，期待彼此成为更好的人！在平常的学习，我的室友古亚娜和陆彬彬同学给了我颇多的帮助，在生活中，我的室友也时常一起玩耍放松，这也是我在研究生生涯中业余生活很温暖幸福的重要原因。感谢我的同门能够在自己即使很繁忙的情况下依旧愿意给我答疑解惑，在找工作的时候也愿意给我提供资源和消息，并且可以相互讨论专业知识与技能，帮我查漏补缺，在论文上，感谢我的同门不停的卷，给我树立危机意识，助我提早完成论文。

然后感谢我的男朋友魏国同学，感谢他在我压力极大的情况下，能够包容我的脾气，不厌其烦的安抚我、安慰我、鼓励我，感谢他在生活中对我的照顾与体谅。感谢他在百忙之中还要帮我看论文、改论文，尤其是在毕业论文撰写期间给予我思路，在论文撰写完成后叮嘱我修正，光帮我修正论文就修订了至少九次！帮助我顺利完成论文。

最后感谢我亲爱的家人，他们对我无条件的信任与支持让我在工作学习中没有后顾之忧！感谢家人在生活上的支持与情感上的陪伴！让我一直勇敢有力量！感谢你们一直伴我左右！

附 录

攻读学位期间发表的学术论文与主要研究成果

一、参与的科研项目

- [1] 智能割草机系统开发，横向课题
- [2] 光伏清洁机器人运维系统，横向课题
- [3] 物联网传感器研发、运维及数据解析升级项目，横向课题

二、专利

- [1] 王梦瑶,陈科明,吴耀增,赖盛纪,齐玲玲. 一种基于陀螺仪的割草机直线行走的航向校准方法[P]. 浙江省: CN115585806A,2023-01-10.