

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题目： 基于低功耗 LoRa 无线组网技术的
草坪养护系统设计

研究生 张河东

专业 电子与通信工程

指导教师 陈科明 副教授

企业导师 曾佳

完成日期 2020 年 3 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

基于低功耗LoRa无线组网技术的草坪养护
系统设计

研 究 生： 张河东

指导教师： 陈科明 副教授

2020 年 3 月

**Dissertation Submitted to Hangzhou Dianzi University
for the Degree of Master**

**Design of lawn maintenance system based on
low power LoRa wireless networking
technology**

Candidate: Zhang Hedong

Supervisor: Associate Prof. Chen Keming

March, 2020

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： 日期： 年 月 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各单位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： 日期： 年 月 日

指导教师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

绿色草坪凭借着美化生活环境,提高空气质量,保持水土等作用成为人类栖身生态中必不可少的一部分,提高草坪品质,草坪养护至关重要。目前草坪的智能养护技术得到较多应用,主要在智能灌溉和智能割草领域,但是存在如下缺点:两种技术应用分别独立,无法协调工作;本地控制为主,不能对设备状态实时监测以及远程控制;性能有待提升,如通信技术性能的提升,智能割草技术有效工作面积的提升。

本文针对目前草坪智能养护技术的缺点,设计了一种基于低功耗 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统,通过自主设计的 LoRa 无线组网技术将智能灌溉和智能割草的设备进行互联,协调各设备的工作,实现反馈式草坪灌溉;通过 LoRa 网关将设备接入互联网,设计了云平台 and APP 软件,实现系统的远程控制和管理;利用先进的 LoRa 通信技术,实现设备低功耗远距离可靠通信。设计的草坪养护系统具有实时性、实用性、记忆性、可靠性和智能化等特点。

针对部分设备需要在能量有限的条件下长时间在室外工作,由于无线通信能耗最大,所以对无线网络协议栈中调度射频状态的 MAC 层进行低功耗设计,针对减小串音功耗和侦听功耗设计了一种自适应负载的低功耗 MAC 协议,通过前导码分割降低串音功耗,通过一种双阈值负载判定机制自适应调整侦听周期,在保证网络通信质量的基础上降低侦听功耗。测试表明,数据通信实时性较好,无线通信总功耗相较于传统的 B-MAC 降低 50%以上。

针对目前基于电磁感应的智能割草机边界识别技术信号特征较复杂,信号提取处理方法性能较差,抗干扰能力不强等缺点导致的智能割草机有效工作面积受限问题,进行改进研究,设计了一种基于三级差分信号处理的边界识别方法,通过传感器信号感应电路产生差分信号,主放大电路对差分信号进行放大并滤除高频干扰,最后通过数字采集电路的 SDADC 过采样、噪声整形和数字滤波等技术实现较高信噪比差分信号提取,测试表明,所设计的识别方法能在 2000 平方米大面积草坪内对边界状态进行可靠识别。

关键词: 草坪养护、LoRa、低功耗、智能割草机、边界识别

ABSTRACT

Green lawn has become an essential part of human living ecology by virtue of beautifying living environment, improving air quality and conserving soil and water, to improve lawn quality, lawn maintenance is very important. At present, the intelligent maintenance technology of lawn is widely used, mainly in the field of intelligent irrigation and intelligent mowing, but there are the following disadvantages: the application of the two technologies are independent, unable to coordinate work; the local control is the main control way, unable to real-time monitoring and remote control of equipment status; the performance needs to be improved, such as the performance of communication technology and the effective working area of intelligent mowing technology.

Aiming at the shortcomings of the current lawn intelligent maintenance technology, this paper designs a lawn maintenance system based on low-power Lora wireless networking technology. Through the independently designed Lora wireless networking technology, the intelligent irrigation and intelligent mowing equipment are interconnected, the work of each equipment is coordinated, and the feedback lawn irrigation is realized. Through the Lora gateway, the equipment is connected to the Internet, and the cloud platform and APP software are designed realizes the remote control and management of the system; advanced Lora communication technology is used to realize the long-distance reliable communication with low power consumption. The designed lawn maintenance system has the characteristics of real-time, practicality, memory, reliability and intelligence.

In view of the fact that some devices need to work outdoors for a long time under the condition of limited energy, because the wireless communication energy consumption is the largest, the MAC layer of radio frequency state scheduling in wireless network protocol stack is designed with low power consumption. Aiming at reducing the crosstalk power consumption and listening power consumption, a low power consumption MAC protocol with adaptive load is designed. First, the crosstalk power consumption is reduced by the preamble division, and then through a double threshold load decision mechanism is proposed to adjust the listening period adaptively, which can reduce the listening power consumption while ensuring the quality of network communication. The related tests show that the real-time performance of data communication is better, and the total power consumption of wireless communication is reduced by more than 50% compared with the

traditional B-MAC.

In view of the limitation of the effective working area of the intelligent mower caused by the disadvantages of the current edge recognition technology of the intelligent mower based on electromagnetic induction, such as the complex signal characteristics, the poor performance of the signal extraction and processing methods, and the weak anti-interference ability, etc., this paper studies the improvement and designs an edge recognition method based on the three-level differential signal processing, which generates the difference through the sensor signal induction circuit, the main amplifying circuit amplifies the differential signal and filters out the high-frequency interference. Finally, the high signal-to-noise ratio differential signal is extracted by the SDADC over sampling, noise shaping and digital filtering technology of the digital acquisition circuit. The test shows that the designed recognition method can reliably identify the boundary state in 2000 square meters of lawn.

Keywords: lawn maintenance、 LoRa、 low power、 intelligent lawn mower、 boundary recognition

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 草坪智能养护技术的研究现状.....	3
1.2.1 智能灌溉技术.....	3
1.2.2 智能割草机器人技术.....	4
1.3 常用无线通信技术的研究现状.....	4
1.4 本文主要工作及章节安排.....	6
第 2 章 基于 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统设计.....	7
2.1 系统总体设计.....	7
2.1.1 需求分析.....	7
2.1.2 总体框架.....	7
2.2 LoRa 无线网络设计.....	9
2.2.1 网络基本架构.....	9
2.2.2 协议栈结构.....	11
2.2.3 通信协议数据帧格式.....	12
2.2.4 入网流程.....	12
2.2.5 关键机制.....	13
2.3 设备端设计.....	15
2.3.1 网关设计.....	15
2.3.1.1 网关硬件设计.....	15
2.3.1.2 网关软件设计.....	15
2.3.2 智能割草机设计.....	17
2.3.2.1 智能割草机硬件设计.....	17
2.3.2.2 智能割草机软件设计.....	19
2.3.3 无线土壤湿度计设计.....	20
2.3.3.1 无线土壤湿度计硬件设计.....	20
2.3.3.2 无线土壤湿度计软件设计.....	21

2.3.4 无线喷灌器设计	22
2.3.4.1 无线喷灌器硬件设计	22
2.3.4.2 无线喷灌器软件设计	23
2.4 应用层设计	24
2.4.1 云平台设计	24
2.4.1.1 设备云	24
2.4.1.2 业务云	25
2.4.2 APP 设计	25
2.5 系统展示	26
2.6 本章小结	28
第 3 章 自适应负载的低功耗 MAC 协议	29
3.1 无线通信能量损耗和系统应用特点分析	29
3.1.1 无线通信能量损耗	29
3.1.2 系统应用特点	30
3.1.3 设计方向分析	30
3.2 典型 MAC 协议分析	31
3.2.1 竞争类 MAC 协议	31
3.2.1.1 同步竞争类 MAC 协议	31
3.2.1.2 异步竞争类 MAC 协议	32
3.2.2 调度类 MAC 协议	34
3.2.3 典型 MAC 性能分析	34
3.3 自适应负载的低功耗 MAC 协议设计	36
3.3.1 基本参数确定	36
3.3.2 双阈值负载判定机制	40
3.3.3 前导码分割	41
3.3.4 自适应负载低功耗 MAC 协议总体设计	41
3.3.5 性能分析	44
3.4 自适应负载的低功耗 MAC 协议性能测试	46
3.4.1 实际通信时延测试	46
3.4.2 实际通信功耗测试	46
3.5 本章小结	48
第 4 章 基于三级差分信号处理的边界识别方法	49
4.1 目前边界识别的现状和缺点	49
4.1.1 边界识别现状	49

4.1.2 基于电磁感应的边界识别缺点.....	49
4.1.3 设计方向分析.....	50
4.2 边界的建立和磁场分析.....	50
4.2.1 边界建立的方法.....	50
4.2.2 工作区域磁场分析.....	52
4.3 基于三级差分信号处理的边界识别设计.....	54
4.3.1 总体设计.....	54
4.3.2 传感器信号前置感应电路.....	54
4.3.3 主放大电路.....	57
4.3.4 数字信号采集电路.....	58
4.3.5 软件设计.....	59
4.4 性能测试.....	61
4.4.1 信号特征识别测试.....	61
4.4.2 相邻边界干扰测试.....	63
4.5 本章小结.....	65
第 5 章 总结与展望.....	66
5.1 本文工作总结.....	66
5.2 展望.....	66
致 谢.....	68
参考文献.....	69
附 录.....	72

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

在人类栖身的生态系统中,草坪对人们有着不可替代的作用。草坪可美化人类生活环境,吸收对人类有害气体以净化空气,减少噪音和太阳辐射,保持土壤结构,防止水土流失^[1]。草坪已成为一个社会各界都关注的产业,并保持着蓬勃发展势头,在国际市场上也保持着较大的竞争力^[2]。在草坪业这样的发展机遇面前,必须不断提高草坪品质,以更好满足人们对草坪景观靓丽、效用理想、品质优良和长盛不衰的需求。

而提高草坪的品质需要对草坪进行定期的养护,草坪养护包括草坪修剪、草坪灌溉、病虫害防治和施肥等^[3]。在这些草坪养护工作中,草坪修剪和草坪灌溉最为频繁,耗时耗力,如图 1.1 所示,而这两项工作做好,可减小其他草坪养护工作的工作量。草坪灌溉是保证草坪正常生长的物质基础,对草坪进行适度的灌溉可以保持草坪较佳的色泽和质量,提高草坪的密度和耐磨性,抑制杂草,减小病虫害发生的概率,延长使用年限^[4]。如果草坪缺少灌溉,特别是在炎热的夏天,容易造成草坪的枯死,但是灌溉过度,导致草坪光合作用降低,抗逆性差。草坪修剪可以控制高度,保持草坪平整,提高草坪观赏价值,增加草坪的密集度、弹性和平整度,利于日光进入草坪基层,抑制和减少杂草生长,适当修剪,能抑制草坪开花结籽,提高草坪纯度,延长生长期^[5]。

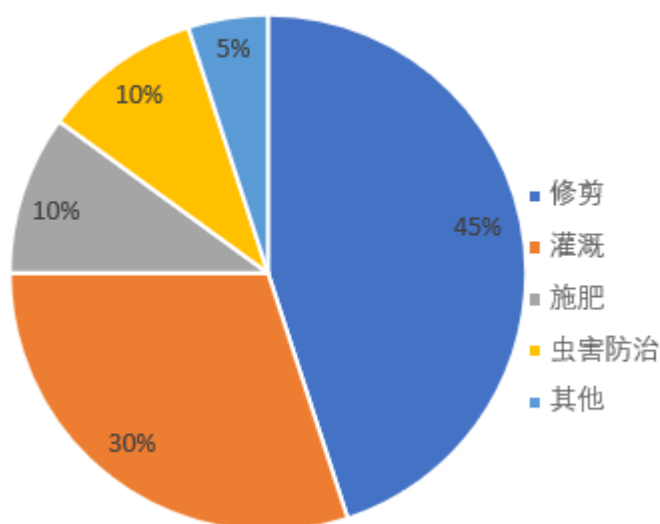


图 1.1 草坪养护各项工作工作量比例图

在传感器技术、智能控制技术和计算机技术等技术快速发展的背景下,针对草坪养护的需求,目前也进行了一些关于草坪智能养护技术的研究,主要在智能灌溉和智能割草领域,

并已经应用，它们改变了传统的人工作业模式，将人们从繁重的工作中解放出来。智能灌溉技术改变了传统人工漫灌方式，采用喷灌形式，很大程度地减小径流和其他浪费，使灌溉变得更加高效。智能割草技术通过设计智能割草机，在特定区域实现草坪修剪作业，消除了传统柴油内燃机割草机噪声大、不安全、污染环境和能源效率低等缺点，且智能割草机修剪后的草坪平整度更好。



图 1.2 智能灌溉

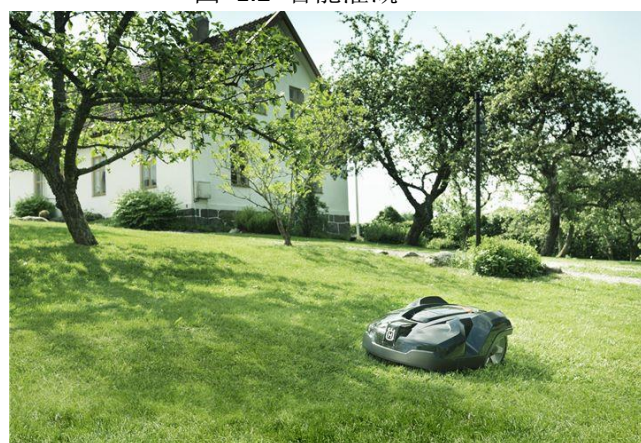


图 1.3 智能割草机

虽然目前的一些智能草坪养护技术降低了劳动成本，使草坪养护变得更加方便，但是目前对于智能草坪养护的应用还存在一定的缺陷：

(1) 各种智能草坪养护应用分别独立工作，还没有进行系统集成研究，无法协调工作，比如可能出现草坪修剪工作时进行草坪灌溉的错误控制，导致智能割草机的损坏。

(2) 各种智能草坪养护技术大多还是使用本地控制，进行无记忆控制，无法随时随地进行设备状态监测，获取设备工作记录，无法远程控制，当设备出现故障时，无法实时报警通知，比如智能割草机出现倾翻等故障，灌溉设备水路阻塞，都无法及时了解和发现，所以无法在无人值守的状态下工作。

(3) 性能不佳，比如智能灌溉技术效率不高，只能单设备进行开环控制，无法反馈式控制，导致水资源的浪费，且设备在室外的使用寿命有限，无法长时间工作，不能进行远距离控制，智能割草机技术有效工作面积还十分受限，针对智能割草机边界识别技术还有待改进。

物联网技术在我们生活的各个领域都得到大量应用,在全球范围内掀起物联网热潮,成为新一轮科技革命的驱动力量。在《2018-2019 中国物联网年度发展报告》中指出,全球物联网应用场景持续扩展,我国物联网正在迈入跨界融合、集合创新、万物智能互联和人机深度交互的新时代^[6]。欧盟曾在《Internet of Things in 2020》报告中分析,在 2020 年后,物联网将全面进入智能化^[7]。物联网可借助传感器全面感知事物信息,通过各种通信技术实现信息可靠传输,然后通过云计算,大数据技术对数据进行分析,实现智能化控制。在物联网技术已经全面发展的背景下,集成智能割草和智能灌溉,设计一种新型的草坪养护系统,具有实时性、实用性、记忆性、可靠性和智能化等特点,意义为:实现人与物的相连,将用户从繁重的劳动中解放出来,设备实时上报运行数据,用户对设备状态进行监测,实现远程控制并及时发现系统故障,系统可在无人值守环境下工作。实现物与物的相连,土壤状态数据采集终端对灌溉终端实现基于反馈的联动智能分区灌溉控制,节约水资源,智能割草和智能灌溉设备实现通信,协调工作。提高草坪养护系统性能,物联网中的低功耗广域网技术,可实现远距离无线通信覆盖,并通过一定的低功耗通信机制,可实现电池供电正常工作多年时间,在对智能割草机工作区域的识别方法进行改进后,智能灌溉和智能割草设备都能实现远距离实时通信,系统总体工作范围扩大。

1.2 草坪智能养护技术的研究现状

1.2.1 智能灌溉技术

目前在智能灌溉技术领域,国内外都进行了研究并得到应用。在国内,郭正琴等人采用 IPC-610 工控组态王开发环境,开发了一种上位机,利用 485 总线通信方式,上位机控制电磁阀,电磁阀控制水路的打开实现灌溉^[8]。采用上位机进行灌溉控制,需要一台计算机运行上位机,不仅增加了成本,而且离开了上位机,系统不能工作,该系统还采用 485 总线进行通信,虽然控制响应快,可靠性高,但是布线不方便,且成本也较高。张崇礼实现了在 STM32 运行 RT-Thread,构建智能灌溉系统,通过 HLK-RM04 WIFI 模块作为网络传输模块,传感器采集土壤湿度,实现手动或自动灌溉,远程灌溉等^[9]。杨辉通过采用 ZigBee 通信方式来进行协调器和终端间的信息传输,协调器通过 USB 转 TTL 实现与电脑 MFC 上位机的通信,从而进行灌溉控制^[10]。在国外, Murad Qasaimeh 等人通过 ZigBee 构建了花园灌溉系统^[11]。使用了 ZigBee 无线通信,节省了布线的成本,但是 ZigBee 通信距离有限,无法满足室内外进行通信的需求,且和我们常用的 Bluetooth 和 WIFI 处于一个频段,存在同频干扰。Rabadiya Kinjal 等人将 WIFI 无线技术应用于智能灌溉系统,根据土壤相对湿度传感器采集的土壤湿度进行灌溉,并实现远程监控^[12]。通过 WIFI 实现了远程控制,实现了远程监控,根据土壤湿度反馈进行灌溉,节约了水资源,WIFI 虽然通信速率较快,但是传输距离受限,且功耗相对 ZigBee 来说较大,无法长时间在室外工作,只能在面积较小的范围内工作。

综上所述,目前智能灌溉技术存在一定的不足:第一,以无反馈控制为主,灌溉灵活性

差,即直接通过某种方式控制电磁阀的开关实现灌溉,只能基于时间实现灌溉,另外较多的智能灌溉技术采用统一灌溉的方式,无法实现分区域按需灌溉,但是不同区域环境因素不同,如果统一灌溉不仅导致水资源浪费,还会抑制某部分草坪生长。第二,采用本地控制状态,比如采用上位机的控制形式,网络化程度较低,无法实现远程控制,应用受限。使用时需要有人值守在灌溉区域内,在如今快节奏的社会生活中,当我们长时间由于旅游或者出差等因素不在家中,草坪在较干旱的天气下水分蒸发较快,长时间不灌溉会导致草坪枯萎,间接导致虫害。第三,通信方式不能完全适应智能灌溉场景,有采用有线 485 形式控制的,需要布线,增加成本,还有利用 WIFI 和 ZigBee 无线技术进行通信的,但是 WIFI 和 ZigBee 无法满足室内到室外较远距离通信,且 WIFI 通信功耗较高,无法实现在室外长期工作。

1.2.2 智能割草机器人技术

智能割草机器人是移动机器人的一种,它能够通过传感器对环境进行感知,根据感知数据进行动态决策以及行为控制,从而完成一定的作业任务,具有较高的效率和较强的承载能力^[13]。国内外对智能割草机器人也进行了一定的研究,其中基于电磁感应确定工作区域进行工作的智能割草机得到了大量应用^[14]。在国外,比较典型的有 Husqvarna Group 的 Auto Mower R 系列智能割草机器人^[15]。经过不断改进,可自由调整草坪修剪模式,具有良好的除草效果,也可通过 APP 控制智能割草机的工作、充电和停止等操作,其工作面积可达 2000 平方米以上,但其价格较昂贵。而在国内,对于智能割草机的研究起步较晚,根据相关文献信息,至少相差 10 年以上,但也取得了一定成果。比较典型的有深圳拓邦公司的 TB Auto Mower 智能割草机,能够在家庭或者公共园林的草坪实现自主割草、充电,无需用户干涉,在以预埋电线为边界的区域内自动建立草坪的地图,规划自动割草的路径,手机 APP 通过 Bluetooth 实现和智能割草机连接,对割草机进行本地控制,但是目前最大工作区域只限定在 500 平方米的区域。

智能割草机的关键技术有信息感知与信息融合技术、路径规划技术、工作区域边界的建立与识别技术和避障技术^[16]。目前国内大多数智能割草机关键技术研究,已经能满足草坪养护基本需求,但是仍然存在不足:第一,工作面积受限,在大面积的工作区域内,边界信号采集与处理的硬件和软件层面还需要进行优化。第二,目前主要采用本地控制,通过 WIFI 或 Bluetooth 实现与 APP 的通信,无法实时获取智能割草机工作状态数据。

1.3 常用无线通信技术的研究现状

在草坪养护系统中,各个设备需要进行通信,而采用有线方式会增加布线成本,并且随着设备增加变得更加复杂,另外室外的工作环境,采用无线方式进行通信更为方便。系统若采用无线通信方式,要实现室内和室外间较远距离的可靠通信,且部分设备采用电池供电,需要进行长时间工作,功耗问题有待解决。系统中各个设备需要协调工作,采用无线组网形式更加高效,而不同的无线组网形式决定系统性能。目前常用的无线通信技术如表 1.1 所示。

表 1.1 当前常用无线通信技术

	Bluetooth	WiFi	ZigBee	Z-Wave	LoRaWAN
主要频段 (Hz)	2.4G	2.4G/5G	2.4G	868M/915M	433M/470M/868M/915M
无线标准	IEEE 802.15.1	IEEE 802.11	IEEE 802.15.4	私有协议	LoRaWAN 国际联盟标准
网络节点数	7	32	65536	232	5000~10000
最大传输速率 (bps)	720k	11~54M	250k	9.6k/40k	21.8k
网络类型	点对点、星 型	星型	mesh	mesh	星型
调制方式	GFSK	DSSS、FHSS、 OFDM、HR/DSSS	GFSK	GFSK	LoRa 扩频
最大传输距离 (室外)	50m	50m	500m	1km	20km
最大传输距离 (室内)	10m	15m	20m	30m	100m
成本	中等	较高	低	低	高
应用	文件传输	网络通信	室内遥控	家居	抄表

目前,常用的无线通信技术有 Bluetooth、WIFI、ZigBee、Z-Wave 和 LoRaWAN^[17]。通信频段上,Z-Wave 的 868M/915M 频段在国外应用比较广泛,在国内还未授权,所以不能应用在本系统中^[18]。Bluetooth、WIFI 和 ZigBee 都应用在 2.4G 频段^[19],存在一定的同频干扰,Bluetooth 主要应用在文件传输领域^[20],WIFI 主要应用在互联网网络通信领域^[21],较高通信速率且近距离要求的场景,无法适用于室外应用,ZigBee 室外视距范围内通信距离可达 500 米,网络容量大,功耗较低,但是 2.4G 频段穿墙能力不如 LoRaWAN 工作频段,不能满足室内到室外通信的应用要求,所以也不能使用^[22]。LoRaWAN 在国内的工作频段是 470M,在物理层上采用 LoRa 扩频调制方式,在 MAC 层上使用 ALOHA 协议,虽然在信号的抗干扰能力、接收灵敏度和通信距离上性能较佳,但在 MAC 层上性能不佳,另外 LoRaWAN 部署成本较高,所以 LoRaWAN 也不适用本系统。

无线通信存在一定的能量损耗,但在能量有限的条件下,需要进行低功耗设计,主流的

节能措施主要包括以下两个方向：一种是采用节点功率控制技术，节点根据信道链路质量动态调节节点输出功率，实现网络中能量均衡，从而延长网络寿命；另一种是改进节点的 MAC 层协议，通过采用冲突避免机制和监听休眠机制节省不必要的能量消耗。

针对草坪养护系统的应用场景，首先要保证远距离可靠通信，其次系统工作在室外，需要在能量有限的情况下长时间工作。根据上诉分析可知，目前常用的无线通信协议存在无法保持较低功耗工作，或者通信距离不足的问题，因此，针对草坪养护系统应用场景的需求自主设计了一种通信协议，它在物理层上与 LoRaWAN 协议保持一样的 LoRa 扩频调制方式，以此来满足草坪养护系统对强抗干扰能力和远距离通信的需求，但是在 MAC 层进行调整，提高网络通信的可靠性，在 MAC 层上进行低功耗设计，满足电池供电设备的功耗需求。

1.4 本文主要工作及章节安排

本文主要研究的是基于低功耗 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统，实现智能灌溉和智能割草，并通过 LoRa 无线组网技术将设备进行互联，系统集成，协调工作，通过 LoRa 智能网关将设备间接接入互联网，设计云平台 and APP，实现设备运行状态实时监测和远程控制，满足人们对智能化生活的需求。通过对 LoRa 无线网络的协议栈 MAC 层进行低功耗优化设计，实现智能灌溉设备既保证网络通信质量，又能降低设备功耗，延长设备使用时间。针对基于电磁感应的智能割草机边界识别技术目前存在的问题，设计了一种基于三级差分信号处理的边界识别方法，提高智能割草机有效工作面积和抗干扰能力。 文章的内容安排如下：

第一章：绪论，详细介绍基于低功耗 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统的研究背景和意义，对草坪智能养护关键技术的研究现状进行分析，包括智能灌溉技术和智能割草机器人技术，最后对目前常用的无线通信技术进行分析讨论，为接下来设计提供方向。

第二章：基于 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统，首先进行系统总体设计，然后分别对系统各个部分进行设计，包括 LoRa 无线网络、设备端和应用层的设计。

第三章：自适应负载的低功耗 MAC 协议的设计。首先对无线通信能量损耗和系统应用特点进行分析，确定设计方向，结合典型 MAC 协议特点，在 MAC 层设计一种自适应负载的低功耗 MAC 协议，自适应负载变化，在保证可靠通信的情况下延长设备的使用时间，减小侦听功耗和串音功耗，并对协议性能进行评估测试。

第四章：智能割草机边界识别技术的研究。针对基于电磁感应的智能割草机边界识别技术信号特征较复杂不易判断，信号提取处理方法性能较差，抗干扰能力不强等缺点而导致智能割草机有效工作面积受限问题，进行改进研究，设计了一种基于三级差分信号处理的边界识别方法，最后对这种方法进行相关的测试。

第五章：对全文的系统设计和关键技术研究加以总结，并对更深层次构建草坪养护系统提出建议和展望。

第2章 基于 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统设计

针对目前智能草坪养护存在的缺陷,本文设计了一种基于 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统。系统包括智能割草设备、智能草坪灌溉设备,通过自主设计的 LoRa 无线组网技术将各个设备接入一个小型 LoRa 星型局域网,通过网关进行统一管理,协调控制,并通过网关将各个设备间接地接入互联网,设计了云平台 and APP 软件,实现对草坪养护系统的远程控制和运行状态实时监测。

2.1 系统总体设计

2.1.1 需求分析

根据构建草坪养护系统的关键要素以及目前智能草坪养护存在的不足,对于需要设计的草坪养护系统,主要需求有如下几部分:

(1) 改变传统人工粗放式的草坪养护方式,实现最大 2000 平方米面积草坪工作范围内智能割草和智能灌溉,将人们从繁重的草坪养护工作中解放出来,提高草坪养护的规范性。

(2) 构建远距离通信小型无线网络,实现各设备之间交互,且交互通信具有较高的可靠性,部分设备能满足低功耗通信需求,延长设备使用时间,智能灌溉和智能割草协调工作,防止系统出现工作紊乱,改变传统无反馈式灌溉,通过反馈式灌溉实现按需灌溉,形成感知、决策和控制的应用闭环,区域分片灌溉,节约水资源。

(3) 实现各个设备接入互联网,对设备运行状态进行实时监测,对系统故障进行报警,不仅可以本地控制,也可远程控制。

(4) 开发配套 APP 软件服务,让用户可通过客户端实现便捷的草坪养护,且遵循人性化、操作简单、服务完善的原则,实现与控制设备智能交互,数据价值的最大化。

2.1.2 总体框架

以智能网关为集中器,无线土壤湿度计、无线喷灌器和智能割草机为节点,构成一个 LoRa 星型网络,实现草坪智能割草和智能灌溉的协调控制。智能网关通过路由器连接到互联网,实现与云平台 and APP 的通信。智能网关作为无线土壤湿度计、无线喷灌器、智能割草机和云平台、APP 通信的桥梁,实现用户和各个设备的交互控制,状态查询等。另外 APP 可通过调用第三方平台数据,查询天气状态,根据天气状态对草坪养护决策进行相应调整。系统总体框架图如图 2.1 所示。

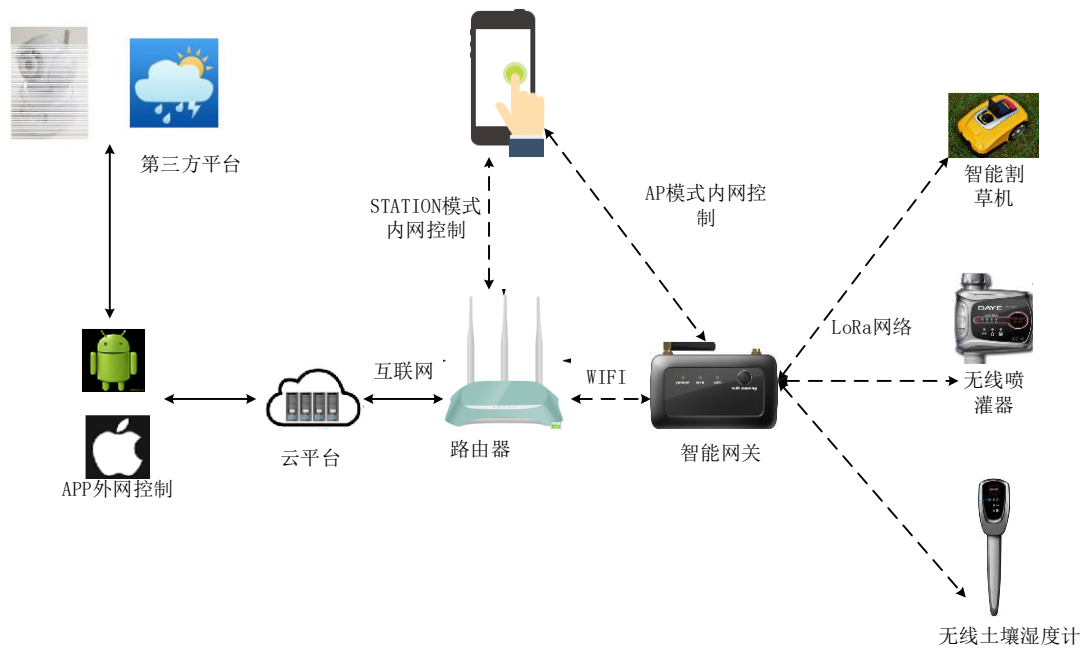


图 2.1 系统总体框架图

系统应用部署图如图 2.2 所示，通过在草坪上布置金属导线，形成电子篱笆墙，智能割草机在电子篱笆墙内工作，另外，在草坪上部署多个无线土壤湿度计和无线喷灌器，并进行绑定，根据无线土壤湿度计采集的土壤湿度数据，控制无线喷灌器进行草坪灌溉。

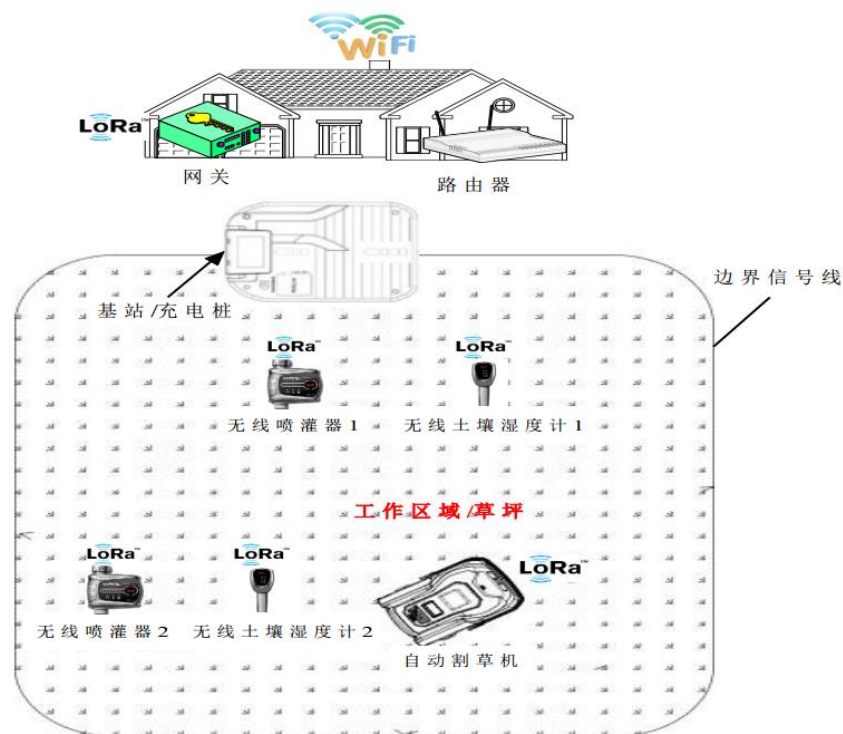


图 2.2 系统应用部署

网关是整个系统的核心部分，负责管理 LoRa 星型网络，其支持无线喷灌器、无线土壤湿度计、智能割草机的接入，并对接入设备进行无线控制。支持 WIFI 接入互联网，实现与

APP 和云平台的通信,设备状态上报和下发命令处理,协调智能割草机以及灌溉设备的工作。

无线土壤湿度计和无线喷灌器组成智能草坪灌溉设备。无线土壤湿度计定时采集土壤湿度,并将湿度信息上报给网关。网关对湿度信息进行分析处理,和无线喷灌器共同作用,实现灌溉无线控制。无线喷灌器控制各个区域草坪喷灌,采用电池供电,进行低功耗设计。当某片草坪区域需要进行灌溉时,网关下发命令给相应的无线喷灌器,实现无线喷灌器的阀门打开与关闭,实现草坪喷灌,另外无线喷灌器也可进行手动设置和控制。

基站和智能割草机组成草坪智能割草设备。基站实现边界信号的产生以及和智能割草机对接充电。在草坪区域上布置金属导线,和基站构成闭合回路,金属导线上通周期性高频脉冲,形成一个电子篱笆墙,当自动割草机电量不足时,沿着金属导线回到基站,基站与自动割草机自动对接进行自动充电。智能割草机是割草设备的主体,当智能割草机在金属导线范围内,且由基站产生周期性高频脉冲,变化的电场产生变化的磁场,智能割草机能进行边界信号检测,当检测到界内信号时,智能割草机开始打开割草电机,转动割草刀片进行割草,当遇到障碍物时进行避让,当到达边界时转弯,继续在边界内工作,自带故障检测,对过流、碰撞、提升、倾斜、翻转、过温等问题进行处理,另外自带雨水检测器,能检测是否下雨,当检测到下雨或者自动割草机电量不足时,自动沿着边界线返回充电站进行待机或者充电,通过液晶显示器和按键可实现简单的人机交互,状态设置。

云平台 and APP 构成整个系统的应用层。云平台实现状态数据的存储,业务数据的处理,是 APP 和网关的通信桥梁。APP 客户端在整个系统中的作用是设备管理以及与物联网云平台通信,在局域网内使用 socket 直接控制设备,外网通过云平台下发指令给设备,实现设备状态监测。

2.2 LoRa 无线网络设计

无线网络的设计和实现是实现设备互联,人与设备交互的基础。为了实现智能割草机、无线土壤湿度计和无线喷灌器等设备的统一管理和协调控制,方便各个设备接入互联网,提升智能化水平和系统交互性,本文设计了一种基于 LoRa 通信的无线局域网络,LoRa 无线网络首先采用星型结构,然后对网络协议栈采用分层设计,设计了一些关键机制提高 LoRa 无线网络通信的可靠性。

2.2.1 网络基本架构

在 IEEE802.15.4 低速率无线个域网技术标准中,将低速率无线个域网中的设备分为两种^[23]。第一种是全功能设备(FFD),它是无线个域网的协调者,可以与同其他任何设备进行通信^[24]。第二种是功能降低的设备(RFD),它是资源受限的设备,只能与全功能设备进行通信^[25]。将全功能设备和功能降低设备从网络逻辑上进行分解,将无线网络中的设备定义为集中器 AP 和节点 ED 两种。整个网络中集中器 AP 只有一个,是整个网络的数据中心,负责建立、管理和维护整个网络。节点 ED 处于整个无线网络的末端位置,它可以根据实际应用需求来进

行定制化设计,在该场景下 ED 是同时接收处理和发送信息的设备。如果节点通信频率较低或者采用电池供电,可以进行节点工作状态的调度,当不工作时设置为休眠状态,减少能量损耗。

在各种网络拓扑结构中,如图 2.3 所示,点对点结构最为简单,但是只适用于两个设备之间的通信,应用十分受限。星型结构中有一个集中器和多个节点,网络中只有节点和集中器的通信方式,其方便对设备进行统一管理,具有良好扩展性,但是该网络的覆盖范围一般比较小。树形网络是星型网络的拓展,主要目的为了扩大网络的覆盖范围,通过加入中继设备实现更远距离的通信^[26]。Mesh 网络中,所有节点均可相互通信,网络中的节点随着移动自动感知,重新组网,但是结构较为复杂^[27]。

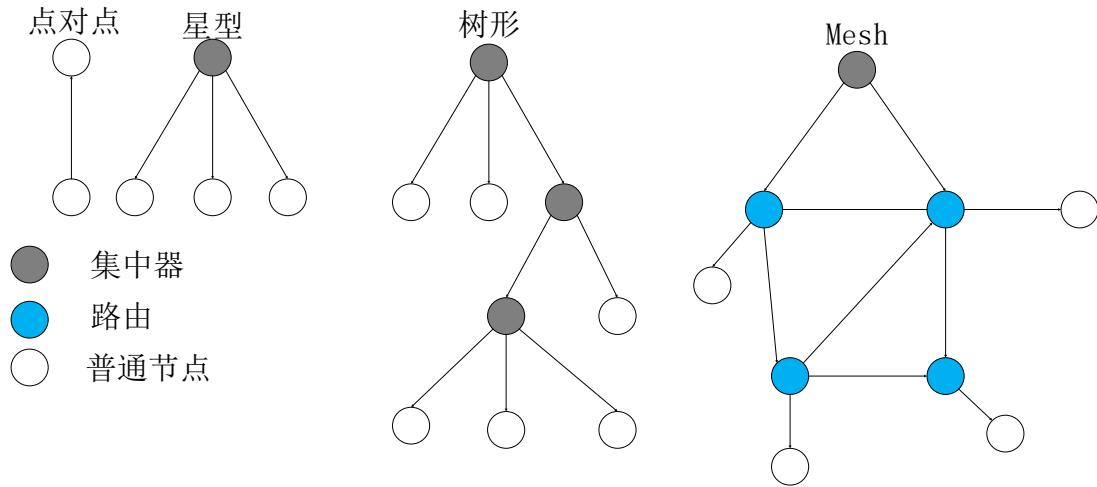


图 2.3 网络拓扑结构

根据对无线通信技术研究现状的分析, WIFI 和 Bluetooth 主要适用于较高通信速率且近距离的通信,无法满足室外通信的需求。ZigBee 室外视距范围内通信距离可达 500 米,但其穿墙能力较差,而且也容易存在同频段干扰,降低其抗干扰能力,使得通信质量无法得到可靠保证。LoRaWAN 在信号的抗干扰能力、接收灵敏度和通信距离上性能较佳,可实现远距离通信,但 MAC 层协议性能较差,所以可针对 LoRa 通信物理层之上的协议进行重新设计。

结合上述分析,由于 LoRa 采用扩频调制和前向纠错编码,接受灵敏度最高可达-148dBm,可保证远距离通信,可以弥补星型网络结构通信距离不远的原有缺陷,所以网络基本架构采用星型架构,同时能发挥星型网络组网方便,结构简单的优点,适用于资源受限的场景,另外 LoRa 在进行低功耗设计时性能极佳。整个网络中,每个节点用唯一的 ID 进行区分,网络基本架构如下如图 2.4 所示。

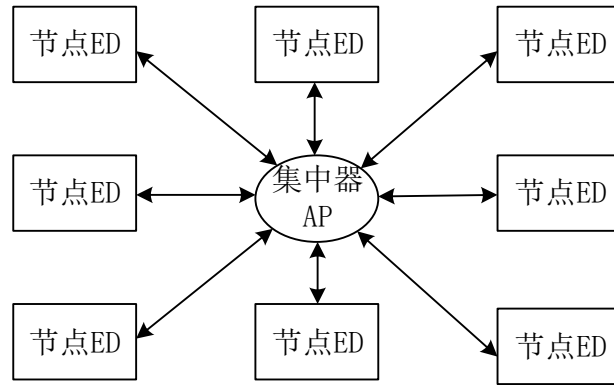


图 2.4 网络基本架构图

2.2.2 协议栈结构

LoRa 网络协议栈参考 OSI 模型采用分层设计，定义了 OSI 参考模型的部分层，从下到上依次为物理层、MAC 层、网络层和应用层，协议栈结构如图 2.5 所示。

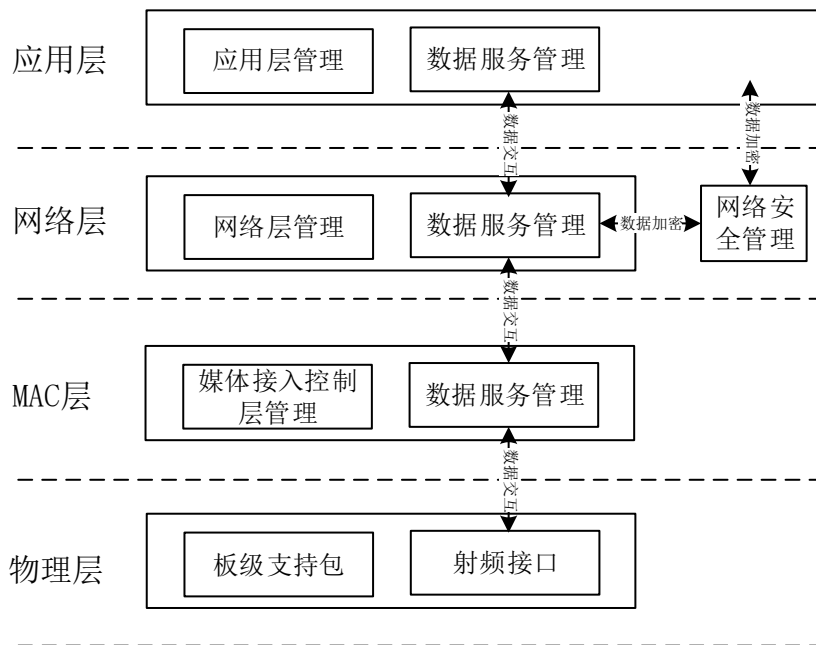


图 2.5 协议栈结构图

物理层是整个协议栈中最基础的部分，由板级支持包和射频接口组成。板级支持包有时钟、外设接口、定时器等外设的配置和初始化，中断处理，为不同的硬件平台提供不同的硬件驱动。射频接口负责管理物理射频收发器并执行信道选择以及能量和信号管理功能，以及消息帧的读取，交给上层处理。

MAC 层下接物理层，上接网络层，在整个网络协议栈中意义重大。主要协调分配数据传输所需要的信道资源，防碰撞处理，协调各个设备的通信，并且负责射频各个部分状态调度，在优化设备功耗起主要作用。

网络层是整个网络协议栈的核心部分，进行网络管理、数据服务管理和网络安全管理。网络管理负责管理网络节点的信息，数据服务管理主要负责接收底层的数据并对底层数据进

行处理，将应用层数据根据不同的端口送给应用层进行处理，网络安全管理实现一些网络加密算法的管理。

应用层通过处理数据接收和发送缓冲区，实现信息的封装和抽取，通过从接收缓冲区提取的数据实现具体应用，通过将数据写入发送缓冲区和设备通信，通过调用网络层接口实现对网络参数的配置。

2.2.3 通信协议数据帧格式

LoRa 无线网络通信协议数据帧格式如图 2.6 所示。从物理层接收到的数据在 MAC 层的帧格式包括数据总长度、目的地址、源地址、网络层数据和校验。MAC 层数据头剥离后传到网络层处理，网络层数据帧包括端口、链路信息、设备信息、帧序号和应用层数据。网络层数据头剥离后传给应用层处理，应用层帧格式包括帧头、帧尾、控制码、节点 ID、集中器 ID、应用层帧计数器、数据域长度和用户数据。相反，数据发送首先应用层构建数据帧，然后提交给网络层，网络层添加网络层帧头后交给 MAC 层，MAC 继续添加数据长度、目的地址、源地址和校验信息，传给物理层发送。

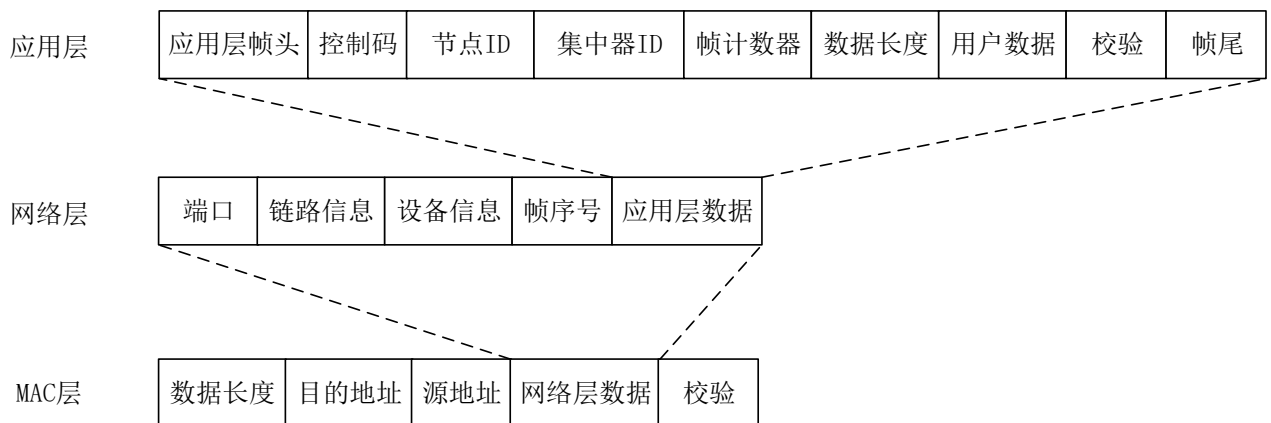


图 2.6 通信协议数据帧格式

2.2.4 入网流程

LoRa 网络节点的入网流程如图 2.7 所示，节点保存有一个 Join 令牌，节点入网分为两个步骤，包括网络加入过程和网络连接过程。首先节点通过向网关发送一个含有 Join 令牌的网络加入请求，网关收到网络加入请求后，首先对 Join 令牌进行校验，如果 Join 令牌正确，网关向节点回复 Join Reply，Join Reply 中包含 Link 令牌。网关完成 Join Reply 的发送后，开启网络监听，等待节点发起网络连接，节点发起 Link 网络连接请求，网关收到网络连接请求后，对 Link 令牌进行校验，如果 Link 令牌正确，网关向节点回复 Link Reply，其中包括网络 IP 等信息，至此节点入网成功。

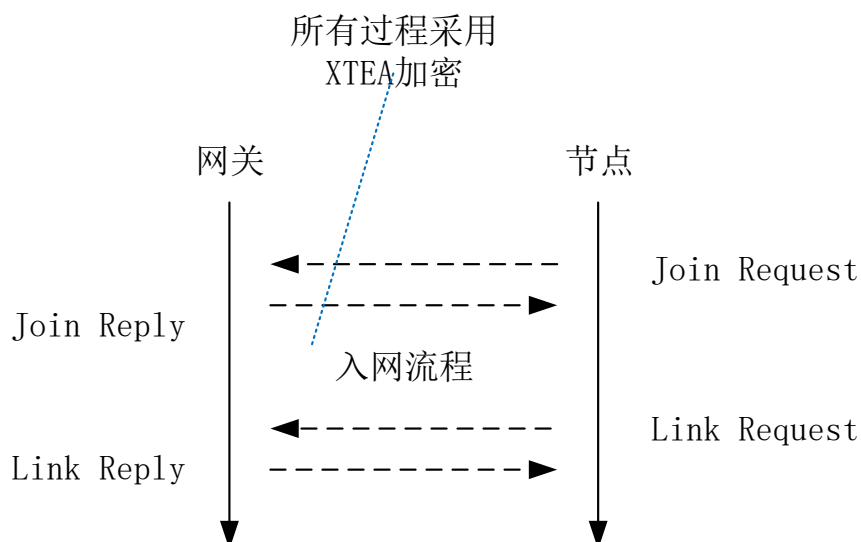


图 2.7 LoRa 网络节点入网流程图

2.2.5 关键机制

(1) 信道检测机制

LoRa 对信道的检测和传统的检测信道 RSSI 值不同，由于 LoRa 通信中有效信号的信号强度甚至低于信道噪声信号强度，所以通过对信道 RSSI 的判定来检测信道是否忙碌是不正确的，LoRa 无线通信技术中有一种信道活动检测机制可对信道是否忙碌进行检测。LoRa 数据包中有一段前导码，而信道活动检测(CAD)是通过检测无线信道上是否存在 LoRa 前导码来判定信道是否被占用，即使 LoRa 信号强度低于信道噪声强度，通过信道活动检测仍然能够将 LoRa 信号检测出来，由于 LoRa 检测前导码的方式不会受到噪声的影响，所以利用 CAD 进行信道检测具有较高的可靠性。

(2) 防碰撞机制

防碰撞机制流程如图 2.8 所示，主要基于非时隙的 CSMA/CA 算法实现，当需要进行数据通信时，首先初始化 CAD，通过 CAD 检测信道上是否存在 LoRa 数据包前导码，如果未检测到 LoRa 数据包前导码，则可以使用信道资源进行数据传输。如果检测到了 LoRa 数据包前导码，则此时的信道资源已被占用，当前设备会进行随机延时退避，然后继续进行 CAD 检测，直到数据包成功发送或者超出最长退避时间，在超出最长退避时间后，会再进行一次随机退避，然后进行重试，直到重试次数为零，则本次数据发送失败。

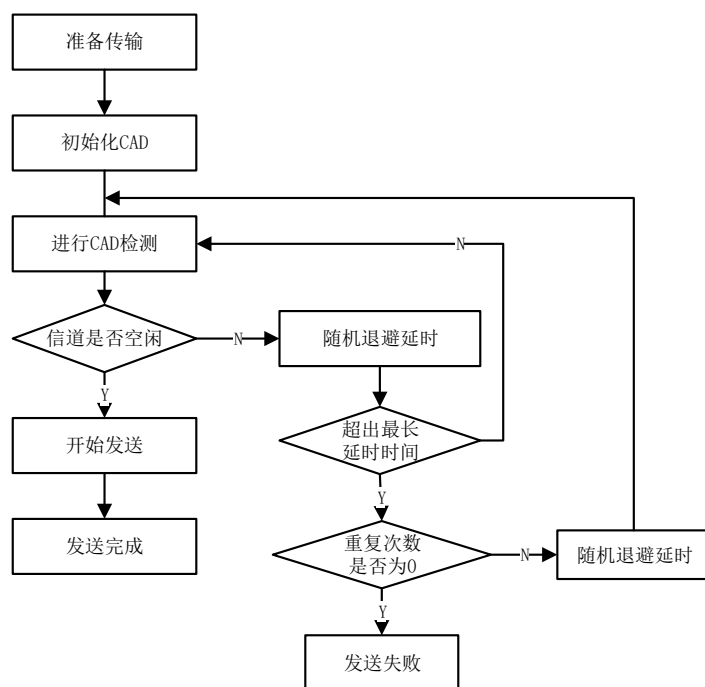


图 2.8 防碰撞流程图

(3) 失败重发机制

失败重发机制的处理流程如图 2.9 所示，当需要进行数据通信时，首先对信道进行检测，但是数据重发次数为零后信道仍然被占用，则认为本次数据通信失败，将所要发送数据写入失败数据缓冲区，在一定时间后进行重发。重发流程和第一次发送时候一致，如果达到最大允许发送次数还是未成功发送，丢弃该数据帧。

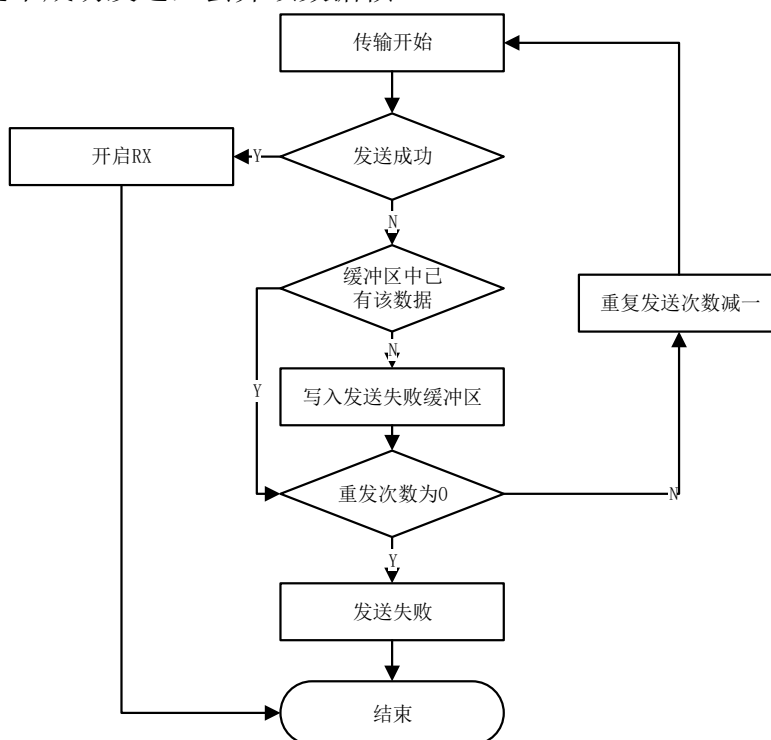


图 2.9 失败重发机制流程图

2.3 设备端设计

2.3.1 网关设计

2.3.1.1 网关硬件设计

网关可与云平台 and APP 进行数据交互，网关还可对 LoRa 无线网络内部 LoRa 节点进行管控，网关硬件框图如图 2.10 所示，网关硬件层采用单 MCU 方案，核心控制 MCU 型号为 STM32F103RCT6，该芯片具有大容量 Flash，建立灵活的信息存储结构，满足网关本地信息存储。该芯片内部集成丰富的硬件接口，包括 TIM、DMA、SPI 以及 RTC 等。互联网网络传输选用乐鑫 ESP8266 SOC WIFI 模组，通过 USART 接口与 MCU 交互，MCU WIFI 驱动程序配置 WIFI 模组工作状态，建立一个与云平台、APP 的网络无线通路。LoRa 无线网络数据传输选用 SX1278 LoRa 模组，通过 SPI 接口与 MCU 交互，MCU LoRa 驱动程序配置 LoRa 模组工作状态，建立网络 LoRa 网络数据链路。通过按键实现 WIFI 配网、设备复位等功能，LED 指示 WIFI 通信状态以及 LoRa 通信状态。另外通过 CH340 实现 USB 到 TTL 的转换，PC 通过连接 USB 接口可查询网关工作状态，网络参数配置和 LoRa 节点通信测试等。

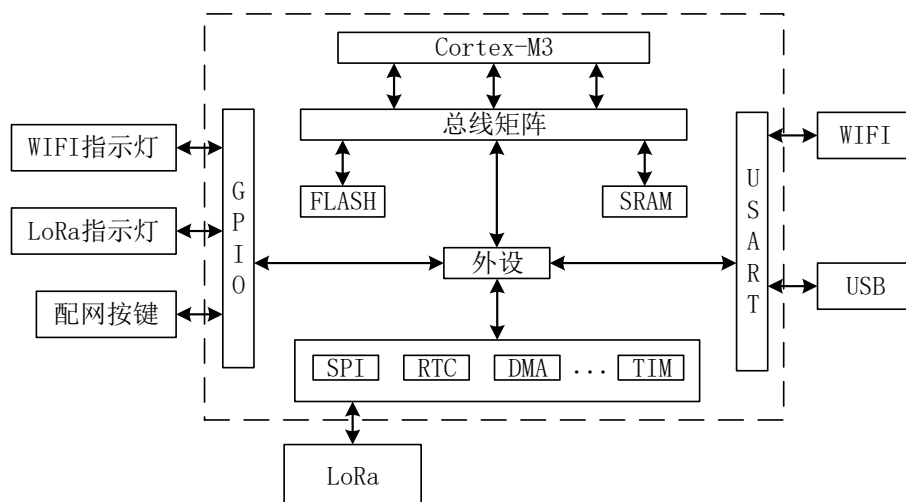


图 2.10 网关硬件框图

2.3.1.2 网关软件设计

网关软件主要负责完成硬件驱动、LoRa 网络的建立、LoRa 节点设备管控、作为 TCP CLIENT 与云平台维持长连接、作为 TCP SERVER 处理来自局域网内 APP 的连接，网络数据解析以及存储功能。网关软件结构如图 2.11 所示。首先网关的主控程序对硬件驱动程序进行调度，在驱动程序的作用下，各个硬件开始工作起来，然后网关的主控程序通过对通信程序、数据处理程序以及信息管理程序的调度，网关开始正常工作。

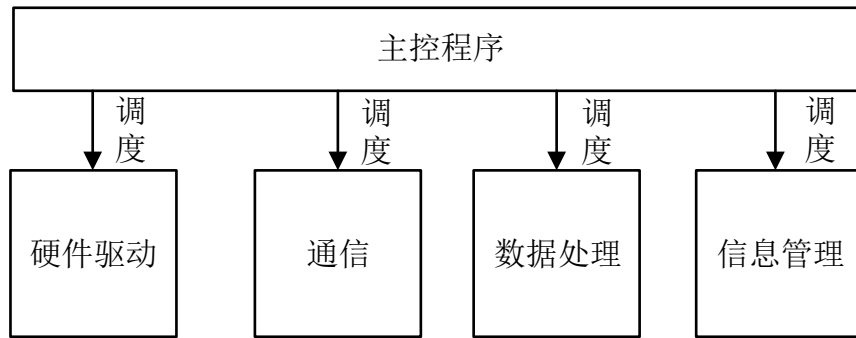


图 2.11 网关软件设计结构图

网关的通信程序包括 WIFI 网络通信和 LoRa 网络通信。WIFI 通信主要指令如表 2.1 所示，WIFI 网络通信由 TCP CLIENT、TCP SERVER 和 UDP 三部分构成。其中 TCP CLIENT 实现与云平台的通信，当接收到建立 TCP 连接指令时，提取 IP 地址和端口号建立稳定的 TCP 连接，定时发送心跳帧和离线检测，这样可保证将网关本地信息上传至云平台以及接收来自云平台的控制指令。与云平台应用层通信采用 MQTT 协议，数据域以 JSON 格式进行传输。

表 2.1 WIFI 主要通信指令

指令说明	发送指令	回复	状态
AP 模式	AT+APSTART="SSID","PASSWORD" \r\n	OK\r\n	格式正确
		ERROR\r\n	格式错误
STA 模式	AT+APSTOP\r\n	WIFI GOT IP\r\n	连接上 WIFI
		WIFI WRONG PASSWORD\r\n	WIFI 密码 错误
SMART CONFIG	AT+CWSTARTSMART\r\n	OK\r\n	开始配网
建立 TCP 连接	AT+CIPSTART="TCP","192.168.101.110",1000\r\n	CONNECTED\r\n	连接成功
		CONNECT CLOSED\r\n	断开连接
数据收发	+IPD,<socket>,<len>:<data>/r/n	ERROR\r\n	数据格式 错误

TCP SERVER 和 UDP 为了实现局域网内域 APP 通信而设计，其通信建立过程如图 2.12 所示。首先 TCP SERVER 和 UDP 服务器端口号已经固定，当 APP 和 WIFI SOC 处于同一个局域网之下时，APP 首先向 WIFI SOC 建立的 UDP 服务器发送 where are you 信息广播，当 WIFI SOC 收到 where are you 后进行 here 回复，APP 收到 UDP 回复后提取 WIFI SOC 的 IP 地址，进行 TCP SERVER 的连接，连接成功后进行数据通信。WIFI SOC 将 TCP CLIENT 数据以及 TCP SERVER 数据通过串口加上头部信息发送给 MCU。LoRa 通信流程主要为网关的主动查询以及节点数据的主动上报，数据帧格式在 LoRa 无线网络设计中已说明。

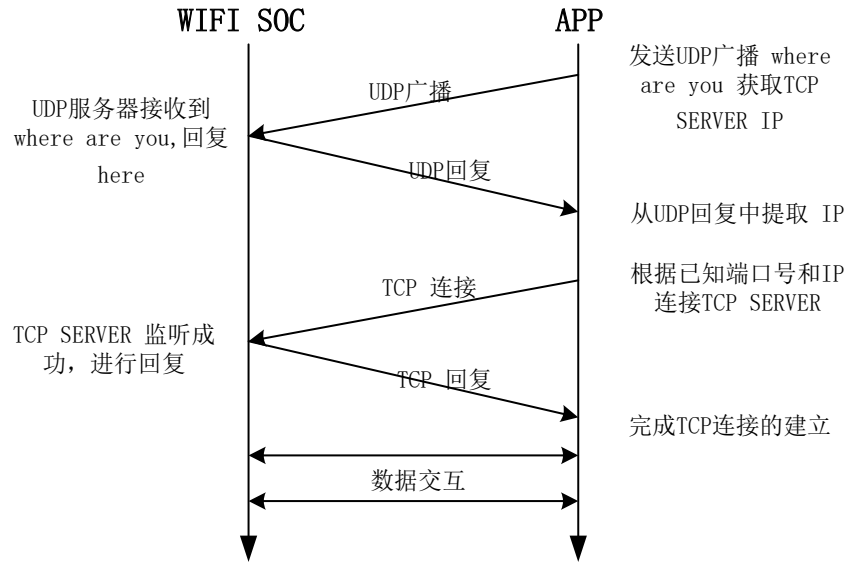


图 2.12 局域网内 APP 与网关通信流程

网关数据处理程序，主要负责数据分组解析。数据处理软件中的数据类型分为云平台下行数据、APP 下行数据、LoRa 网络节点上行数据和节点入网数据。网关数据处理程序流程如图 2.13 所示。

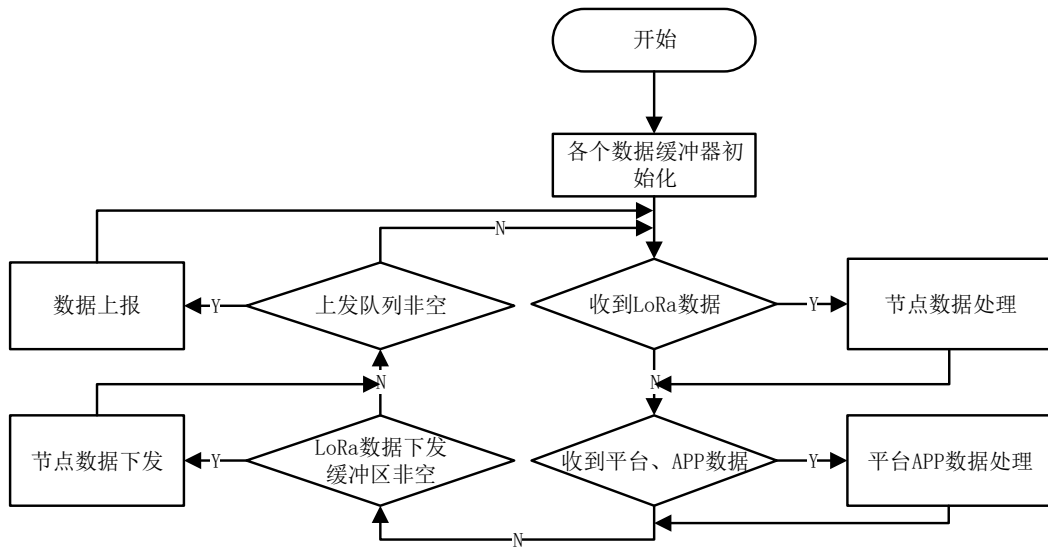


图 2.13 网关数据处理流程图

网关信息存储程序，负责对网关相关处理数据，中间数据进行存储。与上层通信使用队列缓冲区，采用动态内存分配方式，LoRa 网络考虑到节点数量会不断增多，采用固定内存，使用时进行申请，通信完成后进行释放。

2.3.2 智能割草机设计

2.3.2.1 智能割草机硬件设计

智能割草机硬件整体框图如图 2.14 所示，由 MCU 主控、电源管理、传感器、电机控制

系统、通信系统和人机交互组成。MCU 主控采用 STM32F103ZET6，在外设资源和存储资源上都比网关主控芯片都要多，满足割草机控制系统需求。传感器在割草机运行时对外界环境进行实时感知，有雨水传感器、角度传感器、碰撞传感器、提升传感器和边线传感器等。通信系统实现 LoRa 无线通信，接收和处理来自网关的控制信息，并将运行状态进行上传，人机交互包括 LCD 显示器和按键等。

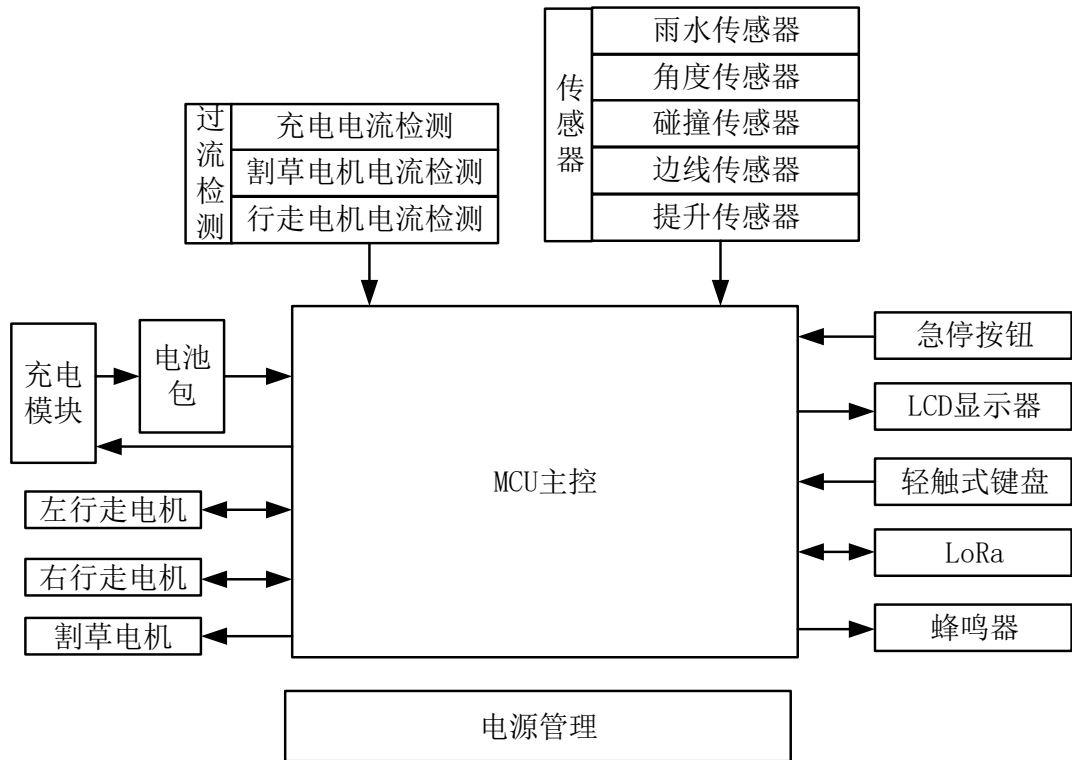


图 2.14 智能割草机硬件框图

电源系统主要负责管理割草机电池充电，并通过开关控制电路为电机控制提供电源，通过 LM2576S12 将电源电压转为 12V 电压、通过 CJ78M05 将 12V 电压转为 5V 电压、通过 LM1117 将 5V 电压转为 3.3V，为各个部分提供合适的电压和电流，保障系统工作，如图 2.15 所示。

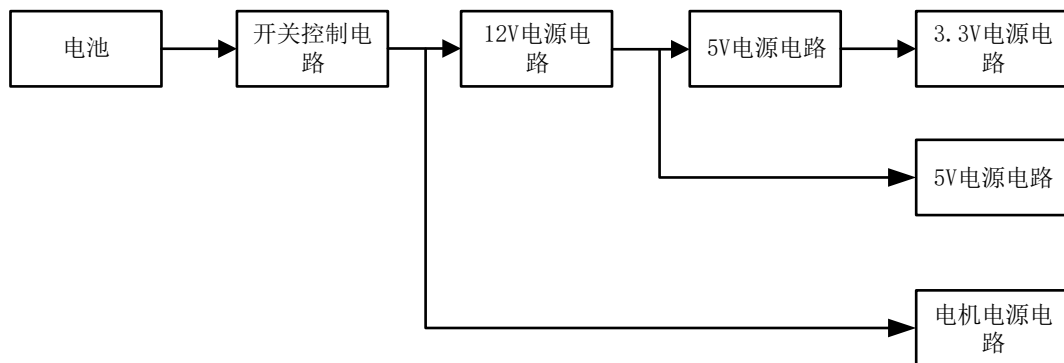


图 2.15 电源转换

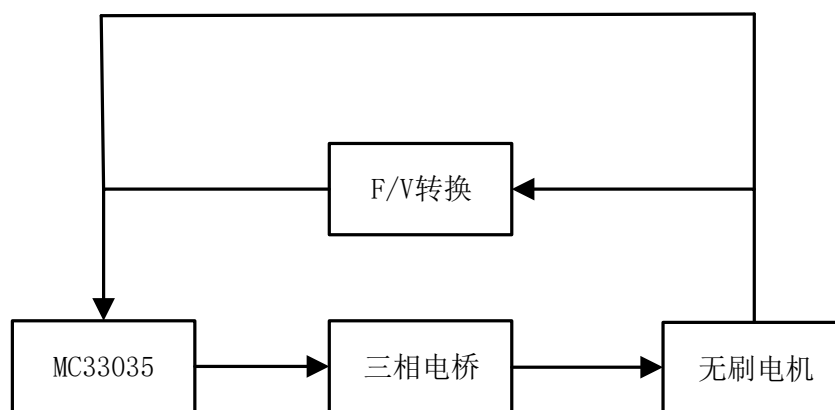


图 2.16 电机驱动

2.3.2.2 智能割草机软件设计

智能割草机软件结构如图 2.17 所示，包括设备驱动、设备控制以及设备交互。设备驱动包括电机驱动、人机交互硬件驱动和传感器驱动。设备控制包括故障检测、运动控制和避障和路径控制。设备交互包括 LoRa 通信交互，LCD、按键交互。

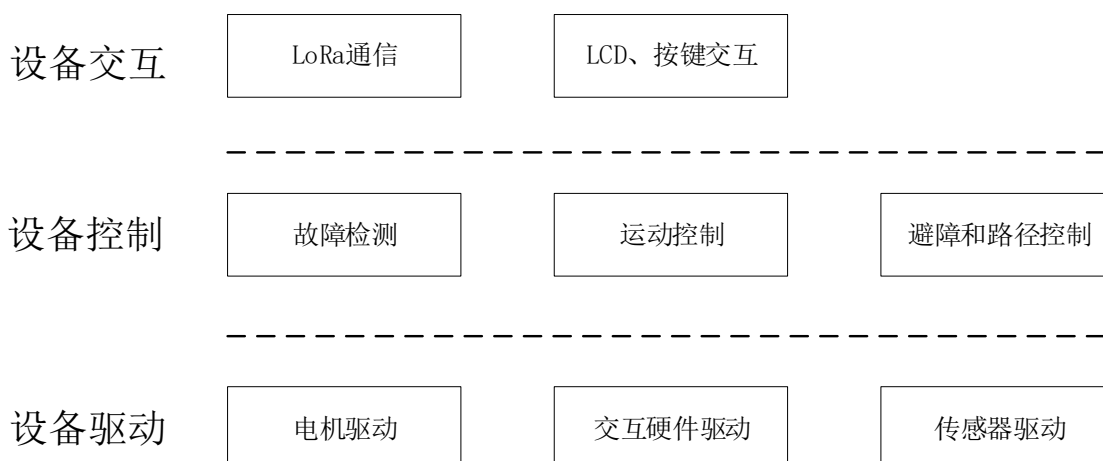


图 2.17 智能割草机软件结构图

智能割草机软件设计采用状态机转换设计。将智能割草机的状态分为交互状态和工作状态。当用户按下 HOME 键、SATRT 键或者 LoRa 相关控制，可由交互状态转为工作状态，当按下急停按键或者出现故障以及 LoRa 相关控制，可由工作状态转为交互状态。LoRa 通信交互应用层数据域格式如表 2.2 所示。

表 2.2 LoRa 交互应用层数据域数据格式

起始符			控制字符	数据			备注	结束符		
44H	59H	4DH	0AH	DATA0		DATA7	0BH	16H	06H	01H

而交互状态和工作状态又分为多个子状态，交互状态转换如表 2.3 所示，工作状态转换如表 2.4 所示。

表 2.3 割草机交互状态转换表

割草机当前状态	触发下一个状态条件	割草机下一个状态
工作状态	电量耗尽	关机
	打开翻盖或出发急停按键	输入密码
关机	电源键按下	
输入密码	密码错误	
	密码正确	菜单设置
	电源键按下或 40s 无操作	关机
菜单设置	电源键按下或 40s 无操作	
	其他按键	菜单设置
	HOME 键、START 键	工作状态

表 2.4 割草机工作状态转换表

割草机当前状态	触发下一个状态条件	割草机下一个状态
待机	电量充足需要进行割草工作	割草
	带能量过低	充电
割草	电量过低	
	停止工作、故障	待机
充电	充电完成、充电故障	

2.3.3 无线土壤湿度计设计

2.3.3.1 无线土壤湿度计硬件设计

无线土壤湿度计完成草坪土壤湿度的采集,并将土壤湿度信息上传,其硬件框图如图 2.18 所示,由 MCU 主控、电源管理、LED 指示灯、土壤湿度采集、电量检测和 LoRa 通信模块组成。无线土壤湿度计主控 MCU 采用 STM32L051C8T6, Coterx-M0 内核,拥有 8K RAM, 64K FLASH,低功耗性能较好,在 RTC 工作的睡眠模式下,功耗只有 0.6uA。电源管理模块负责电源转换,为设备提供稳定电压,由于无线土壤湿度计采用电池供电,电源管理还实现了防止电池的反接。LED 指示灯显示无线土壤湿度计 LoRa 网络状态、湿度状态和电池电量等信息。MCU 通过 ADC 检测土壤湿度和电池电量。湿度采集采用湿度传感器实现,将湿度传感器和一个固定阻值电阻串联,湿度传感器电阻随着土壤湿度的变化而变化,采集湿度传感器两端的电阻即可得到土壤湿度值。LoRa 通信电路实现无线土壤湿度计和网关的通信。

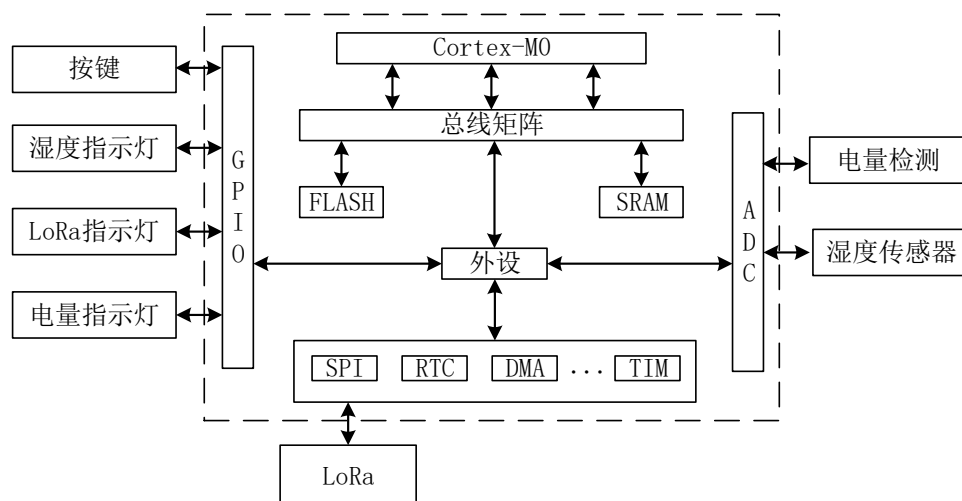


图 2.18 无线土壤湿度计硬件框图

为了更好地得到土壤湿度与湿度传感器阻值变化的关系，采用市面上的两款土壤湿度计进行对照，如图 2.19 所示，确定输入湿度传感器阻值与湿度值之间的对照关系。



图 2.19 市面上的土壤湿度计

在一盆干燥的沙土里，将购买的两款湿度计和无线土壤湿度计插入土壤 50cm 深度，记录无线土壤湿度计模拟电压以及两款市面湿度计的湿度值。在这个基础上，给土壤浇水，使得无线土壤湿度计采集到的模拟电压值出现变化，同时记录两款市面湿度计对应的湿度刻度值，重复该操作。在电源电压 3.3V 情况下湿度传感器电压值，然后计算出湿度传感器阻值，确定阻值和湿度的关系，如表 2.5 所示。

表 2.5 无线土壤湿度计湿度值对照表

电阻值 Ω	>169	117~169	99~117	74~99	57~74	44~74	34~44	30~34	26~30	<26
参考刻度	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

2.3.3.2 无线土壤湿度计软件设计

无线土壤湿度计软件流程如图 2.20 所示。无线土壤湿度计电池上电后，首先从 Flash 中加载无线土壤湿度计工作参数，对硬件驱动进行初始化，如 LoRa 的 SPI 驱动初始化，按键和 LED 的 IO 初始化，RTC 时钟初始化，电量检测和土壤湿度检测的 ADC 初始化等，然后对 LoRa 网络协议栈进行初始化，进行入网，然后进入无线土壤湿度计工作状态，LED 指示灯显示当前土壤湿度状态，电量值，网络状态等信息，如果长时间未收到外部控制命令，包

括按键操作或者 LoRa 数据通信，进入睡眠状态，以降低功耗，睡眠一定时间后唤醒，或者外部按键按下时进行唤醒，唤醒后首先判断是否是按键唤醒，如果是按键唤醒直接进入无线土壤湿度计工作状态，如果是睡眠时间到而唤醒的，首先判断是否需要执行土壤湿度检测，然后对信道进行侦听。对信道侦听后，如果侦听到信号，射频切换到接收状态，等待接收数据，如果接收到的数据本节点，则进入正常工作状态进行数据通信，对数据进行处理，如果数据不是发往本节点，再次进入睡眠状态。

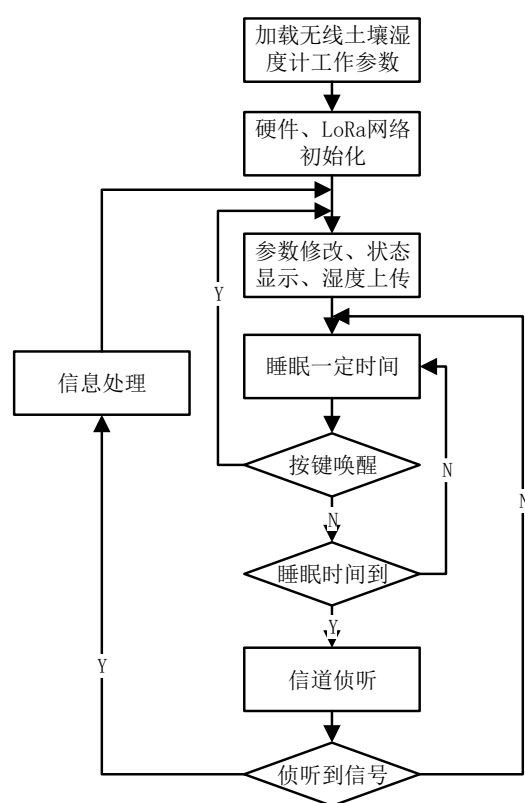


图 2.20 无线土壤湿度计软件流程图

2.3.4 无线喷灌器设计

2.3.4.1 无线喷灌器硬件设计

无线喷灌器硬件框图如图 2.21 所示，有 MCU 主控、电源管理、LED 指示灯、电机驱动、电量检测和 LoRa 通信模块组成。无线喷灌器主控 MCU 采用和无线土壤湿度计相同的 STM32L051C8T6。电源管理模块负责电源转换，为设备提供稳定电压，由于无线喷灌器采用电池供电，电源管理还实现了防止电池的反接。LED 指示灯显示水阀的状态，包括电量、LoRa 网络连接情况和灌溉时间等。MCU 通过电机驱动电路来实现电机转动，电机驱动电路如图 2.22 所示。控制无线喷灌器水阀的打开和闭合，控制草坪灌溉，并通过反馈检测水阀状态。MCU 通过 ADC 内部通道检测电池电量。LoRa 通信模块实现无线喷灌器和网关的通信。

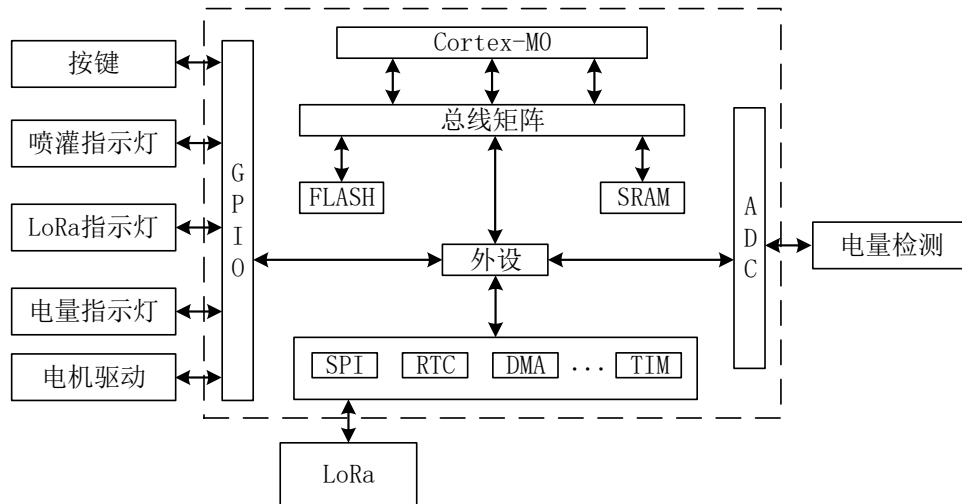


图 2.21 无线喷灌器硬件框图

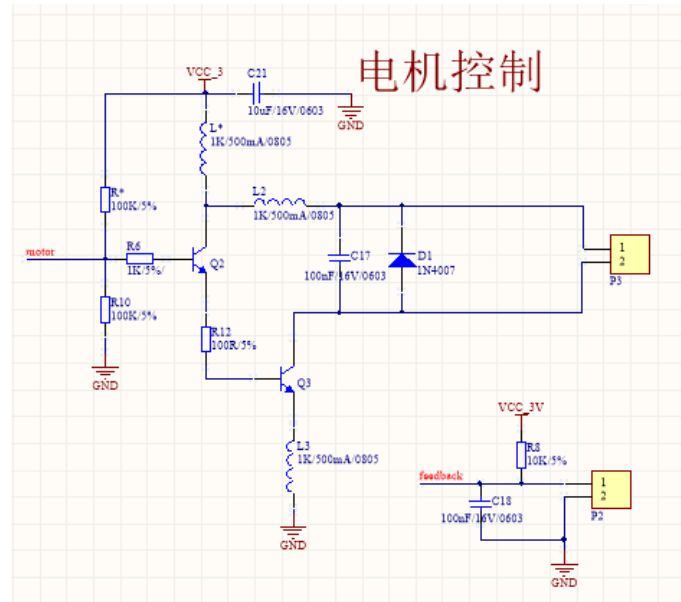


图 2.22 电机驱动电路

2.3.4.2 无线喷灌器软件设计

无线喷灌器软件流程图如图 2.23 所示。无线喷灌器电池上电后，首先从 Flash 中加载喷灌器工作参数，对硬件驱动进行初始化，然后对 LoRa 网络协议栈进行初始化，进行入网，然后进入无线喷灌器工作状态，LED 指示灯显示无线喷灌器工作状态，如果长时间未收到外部控制命令，进入睡眠状态，以降低功耗，睡眠一定时间后，或者外部按键按下进行唤醒，唤醒后首先判断是否是按键唤醒，如果是按键唤醒进入无线喷灌器工作状态，如果是睡眠时间到而唤醒的，需要执行喷灌器动作则进入无线喷灌器工作状态，否则对信道进行侦听。对信道侦听后，如果侦听到信号，射频切换到接收状态，如果接收到的数据发送本节点，则进入正常工作状态进行数据通信，对数据进行处理后进入睡眠状态，如果数据不是发往本节点，进入睡眠状态。

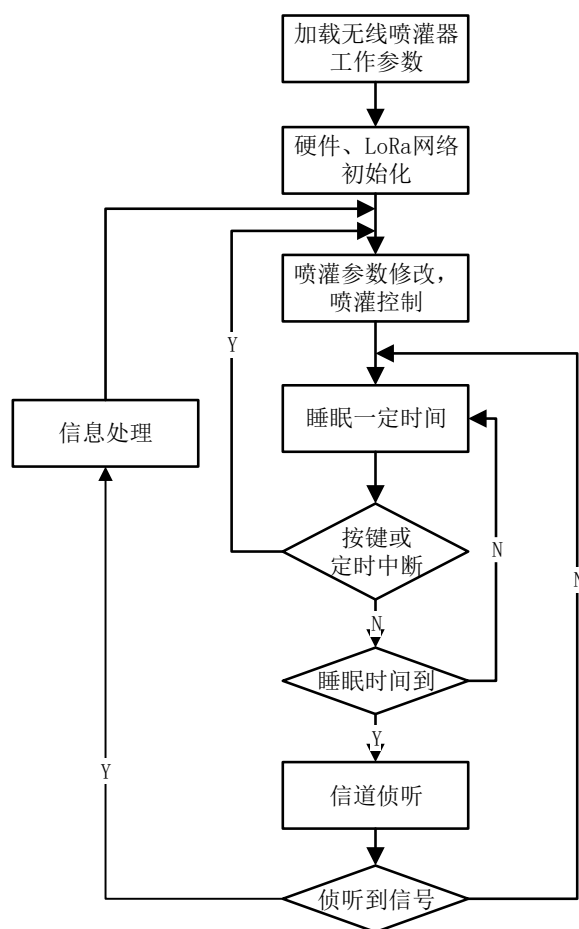


图 2.23 无线喷灌器软件流程图

2.4 应用层设计

2.4.1 云平台设计

2.4.1.1 设备云

设备云使用中国移动的 OneNET 平台，负责与设备互联，设备数据存储和管理。网关通过 WIFI 建立 TCP 连接后，应用层使用 MQTT 协议将设备数据上传到 OneNET 设备云平台，同时对业务云提供 API 调用接口。平台的管理页面如图 2.24 所示。开发者可以根据具体需求进行数据流、触发器设置，监控管理接入设备。

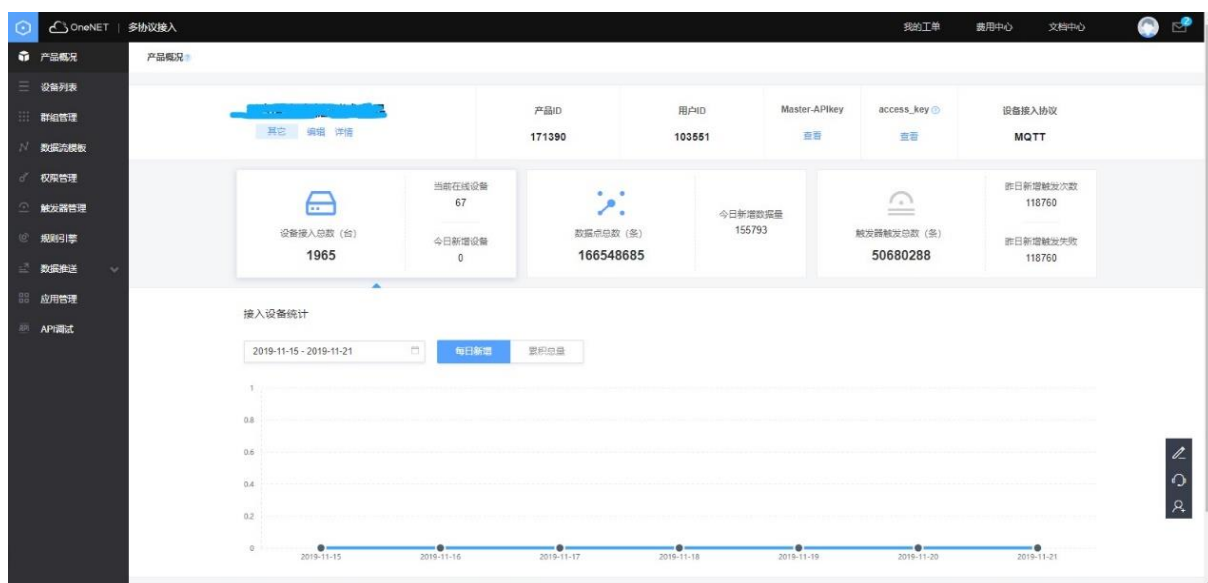


图 2.24 OneNET 平台管理界面

2.4.1.2 业务云

业务云的设计分为三层，包括基础存储层、支撑服务层和应用赋能层，同时支持 APP 等实现的业务服务器集群和存储支撑服务器集群，层级划分及职能如图 2.25 所示。

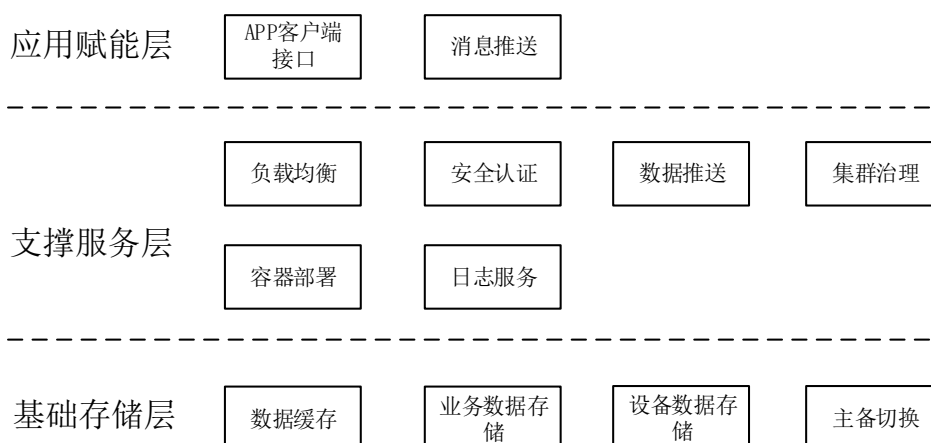


图 2.25 业务云的层级划分及职能

2.4.2 APP 设计

APP 客户端在整个系统中的作用是管理设备以及与物联网云平台通信。在局域网内使用 socket 直接控制设备，外网环境下通过云平台下发指令给设备。APP 方便用户对系统参数进行自定义，以及系统状态参数可视化，系统控制更加方便。通过 APP 可对割草机进行定时工作设置，对灌溉参数进行设置等，实现远程控制，提高系统的智能化水平。APP 设计分层结构如图 2.26 所示。

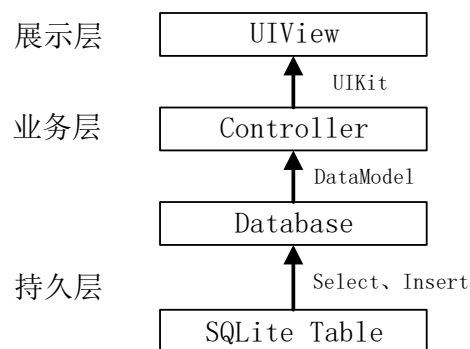


图 2.26 APP 设计分层结构图

2.5 系统展示

图 2.27 为网关电路板，图 2.28 为网关实物图。



图 2.27 网关电路板



图 2.28 网关实物图

图 2.29 为智能割草机基站电路板，图 2.30 为智能割草机基站实物图。



图 2.29 基站电路板



图 2.30 基站实物图

图 2.31 为智能割草机主控电路板，图 2.32 为智能割草机实物图。



图 2.31 智能割草机主控板



图 2.32 智能割草机实物图

图 2.33 为无线土壤湿度计电路板图，图 2.34 为无线土壤湿度计实物图。

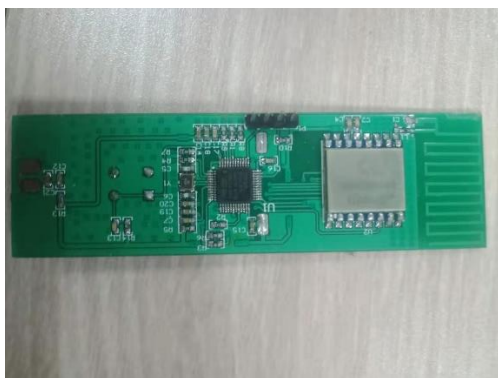


图 2.33 无线土壤湿度计电路板



图 2.34 无线土壤湿度计实物图

图 2.35 为无线喷灌器电路板，图 2.36 为无线喷灌器实物图。



图 2.35 无线喷灌器电路板



图 2.36 无线喷灌器实物图

APP 界面如下所示。依次为主界面，无线喷灌定时控制界面，无线喷灌器自动控制界面和智能割草机界面。

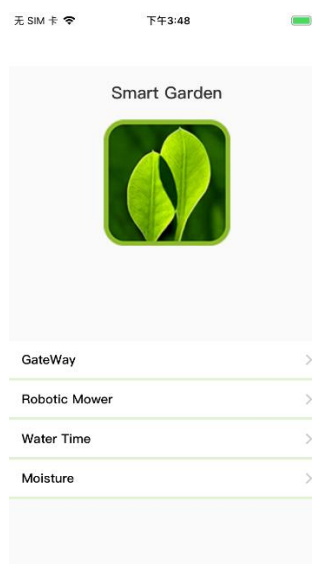


图 2.37 APP 界面 1

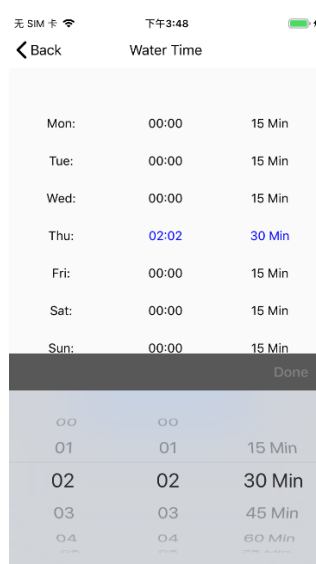


图 2.38 APP 界面 2

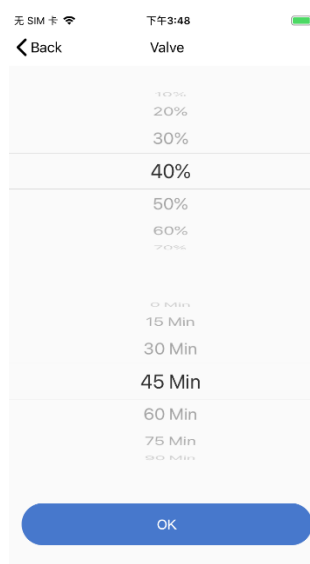


图 2.39 APP 界面 3

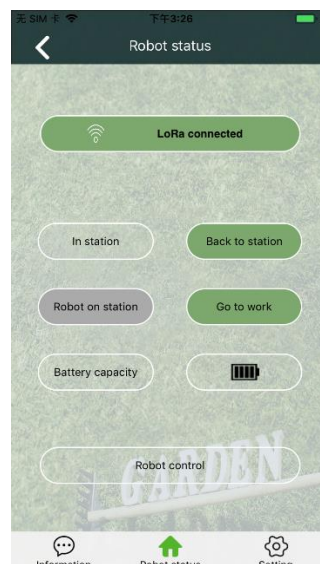


图 2.40 APP 界面 4

2.6 本章小结

本章为基于低功耗 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统的系统设计，首先进行系统总体设计，然后对系统各个部分进行设计，有软件和硬件部分，包括 LoRa 无线网络的设计、设备层的智能网关设计、智能割草机设计、无线土壤湿度计设计、无线喷灌器设计 and 应用层设计。最后对各部分设备进行实物展示。

第3章 自适应负载的低功耗 MAC 协议

由于草坪养护系统中的无线土壤湿度计和无线喷灌器工作环境条件的限制，和智能割草机可以返回充电站充电不同，需要在电池供电、能量有限的情况下进行长时间工作，而设备的最大耗能模块为无线通信模块，既要保证通信效率又尽可能地延长设备的使用时间，需要对无线通信进行低功耗设计。本章对 LoRa 网络协议栈中直接调度信道资源，控制射频状态的 MAC 层进行研究^[28]。结合无线通信能量损耗和系统应用特点，分析当前典型 MAC 协议在性能上的平衡方法，设计了一种设备与网关之间数据交互的自适应负载的低功耗 MAC 协议，实现无线土壤湿度计、无线喷灌器与网关之间的高效低功耗 LoRa 网络通信。

3.1 无线通信能量损耗和系统应用特点分析

3.1.1 无线通信能量损耗

在 LoRa 无线通信中，能量损耗主要分布在射频发送、射频接收、信道侦听和射频睡眠^[29]。其中射频发送状态电流最大，射频接收状态电流次之，信道侦听状态电流比射频接收小，射频睡眠状态电流最小，各状态工作电流如图 3.1 所示。

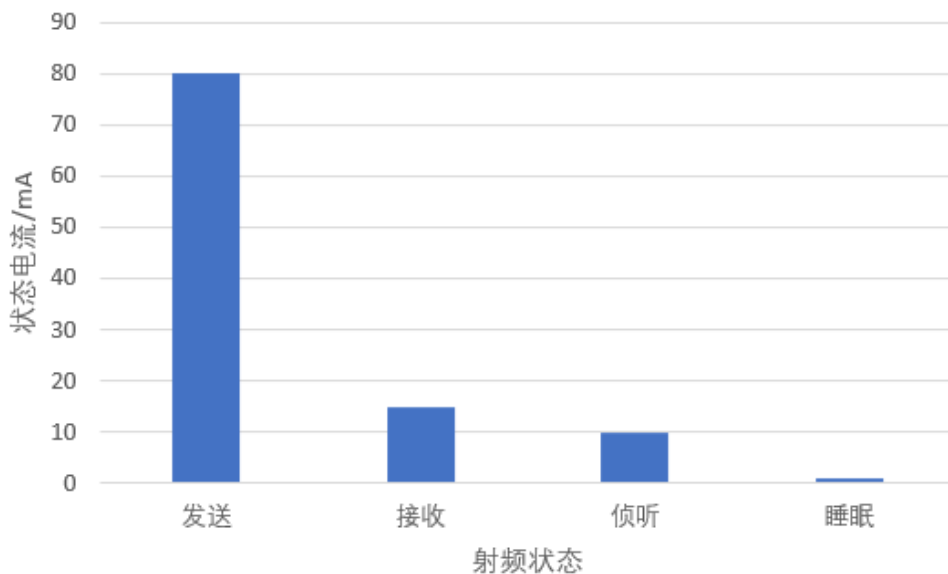


图 3.1 LoRa 各状态工作电流

但是在草坪养护系统中，数据通信量有限，所以低功耗节点射频发送时间有限，主要处于周期性的睡眠侦听状态。虽然侦听电流相对射频发送和接收状态小，但是侦听状态时间相对较长，能量损耗也占很大一部分比例，另外由于串音问题导致射频接收状态的能量损耗也较大，且节点越多，串音功耗越大，在低负载情况下采用传统的基于周期性睡眠侦听的通信，射频各个状态能量损耗情况如图 3.2 所示。

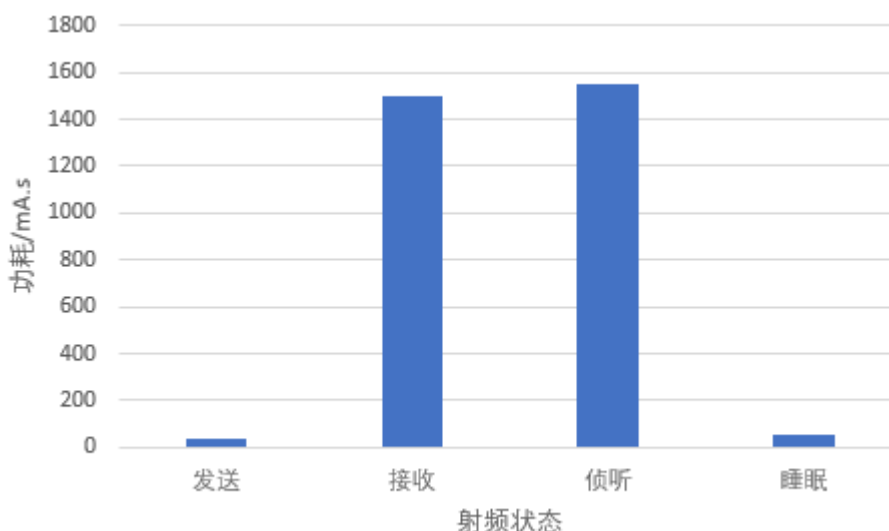


图 3.2 LoRa 低负载下每天各状态能量损耗

3.1.2 系统应用特点

在草坪养护系统中，无线土壤湿度计和无线喷灌器与网关保持双向通信，有如下特点：

(1) 数据通信存在串音能量损耗^[30]。无线信道存在广播特性，即一个节点发出的数据在同一个信道内的其他所有节点都能收到。这个特点会使节点能量损耗增加，并且同一信道内节点数量越多，能量损耗越严重。如网关需要对某个无线喷灌器进行控制，当网关向这个无线喷灌器发送控制指令时，其他无线喷灌器也能接收到该条指令，但是不对这条指令做处理，造成额外的串音能量损耗。

(2) 数据通信存在空闲侦听能量损耗^[31]。当节点需要降低自身功耗又需要与网关保持双向通信的情况下，需要利用低功耗侦听技术定时对信道进行侦听，当侦听到数据包时进行接收处理，而在无数据通信的情况下也要保持对信道侦听，以防错过数据包，侦听周期越小，能量损耗越严重，这也是节点的主要能量损耗之一。

(3) 节点工作在低负载情况下，即每天只存在少量数据通信，并且数据通信存在局部性特点。

3.1.3 设计方向分析

无线通信的低功耗设计主要从软件和硬件两方面考虑。在硬件方面，已经选用了低功耗性能较好的 LoRa SX1278 通信模组和 STM32L051 MCU，这为无线通信的低功耗设计提供基础保障，所以本章主要从软件方面来进行低功耗设计。根据系统应用特点分析，进行低功耗设计主要从减小串音功耗，减小空闲侦听功耗方面入手，但是不能一味追求最低功耗，也要在降低功耗的情况下保证网络通信的性能。在软件方面进行低功耗设计，就要结合 LoRa 网络协议栈进行分析：

网络层：首先 LoRa 网络结构简单，采用星型结构。只存在网关和节点之间的通信，节

点和节点之间只能通过网关进行间接通信，不能直接通信，无路由控制，不需要考虑网络数据传输多跳问题。数据通信只有两种形式，包括节点主动向网关进行数据上报，如无线土壤湿度计定时上传电量信息、土壤湿度值和设备状态，以及网关主动向节点发起的数据通信，如网关向无线喷灌器发起的控制指令和状态查询指令，所以网络层低功耗的优化十分有限。

MAC 层：MAC 层决定节点使用信道的方式，控制着射频各个状态的调度，是低功耗设计最重要的部分^[31]。考虑到系统通信负载存在着不平衡，随机性的特点，如当用户未通过 APP 对无线土壤湿度计和无线喷灌器进行参数设定时，土壤湿度保持在合适的范围内时，无线土壤湿度计只需进行定时土壤湿度测量并进行上报，即此时网络负载较轻，而当用户对无线湿度计和无线喷灌器进行参数设定时，可能会进行频繁通信，通信负载加重。所以可在 MAC 层通过对休眠、侦听等状态的高效合理调度，并结合通信负载特点进行低功耗优化。

物理层：物理层的射频接口管理射频通信的各项参数^[34]，包括射频的发送功率，根据应用特点，节点工作在低负载情况下，射频处在发送状态的时间较少，每次数据发送只要 20ms 左右，所以在功率控制技术上进行优化效果不明显，且室外环境因素复杂，可能存在无线收发数据链路不对称的情况，所以为了保证可靠通信，暂不对发送功率进行优化。

综上所述，要对系统 LoRa 网络无线通信进行低功耗设计，主要是对 LoRa 协议栈的 MAC 层进行低功耗优化设计，减小串音功耗、空闲侦听功耗，提高低功耗性能。

3.2 典型 MAC 协议分析

目前基于对通信过程中各个设备射频状态的调度方式设计了多种 MAC 协议，各有各的在性能上的平衡，根据获取信道的方式进行分类，当前典型 MAC 协议可分为竞争类 MAC 协议和调度类 MAC 协议^[32]。

3.2.1 竞争类 MAC 协议

竞争类 MAC 协议只有在需要进行数据通信时通过竞争方式使用信道资源^[33]。按照某种重传策略，当数据发送失败时会进行重传，当数据重传次数大于最大数据重传次数时，判定无法获取信道资源，数据发送失败，竞争类 MAC 协议易于实现，但是当通信节点较多时，极大概率产生数据碰撞。根据通信节点是否同步，可将竞争类 MAC 协议分成同步竞争类 MAC 协议和异步竞争类 MAC 协议^[34]。同步竞争类 MAC 协议所有节点维持同样的射频工作睡眠周期，若需要使用信道资源进行数据通信，当睡眠结束进入工作后开始竞争信道资源^[35]。异步竞争类 MAC 协议所有节点不用维持同样的射频工作休眠周期，如需要使用信道资源进行数据通信，直接去竞争获取信道资源，具有随机性^[36]。当前典型的同步竞争类 MAC 协议有 S-MAC 和 T-MAC，典型的异步竞争类 MAC 协议有 B-MAC 和 Wise-MAC。

3.2.1.1 同步竞争类 MAC 协议

S-MAC 各个通信节点始终保持着相同的占空比且同步的休眠工作周期，具有相同的任务周期^[37]。S-MAC 的休眠工作周期如图 3.3 所示，节点的工作周期内包括 SYNC 和 RTS/CTS，

SYNC 为了保持网络中各个节点的同步，每隔一个固定的时间在信道内进行广播，RTS/CTS 在数据通信时使用，当发送方需要向接收方进行数据通信时，首先发送一个 RTS，RTS 中携带接收方信息，并且还有通信所需时间，如果不是发往本节点的数据，接收节点可以在本次数据传输时间内进行休眠以降低等待功耗，醒来后继续等待数据通信，直到整个工作周期结束，这样避免了冲突，如果该 RTS 是发往本节点的，回复 CTS，然后发送方进行 DATA 的数据传输，接收方每接收一包数据回复一个 ACK。S-MAC 只有在一个周期内的工作状态下才进行数据传输，工作占空比固定，不能适应网络变化，没有数据发送的情况下，空闲侦听能耗较大，但是能减小串音带来的能量损耗。针对星型网络，延时最小为信道竞争窗口时间和数据接收时间之和，最大延时为最小延时加上睡眠周期时间和同步时间。

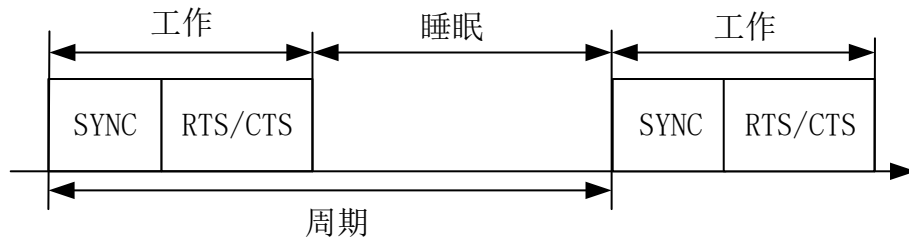


图 3.3 S-MAC 的休眠工作周期

T-MAC 和 S-MAC 类似，不同的是对一个周期内的工作状态固定占空比进行调节^[38]。当一个周期睡眠唤醒进入工作状态，不再等待固定的时间，两种协议工作和睡眠占空比对比图如图 3.4 所示，突起部分为工作状态，其他为睡眠状态。T-MAC 引入了活动时间 TA 定时器^[39]。如果在工作时段 TA 时间内没有检测到数据通信或其他激活事件，则提前进入休眠状态，减小能量损耗，否则 TA 定时器重新计时。利用 TA 定时器随机睡眠的方式可能导致陷入早睡状态，节点数据传输需要等到下一次周期进行，吞吐量低于 S-MAC。T-MAC 针对星型网络通信的时延方面，早睡状态会更大概率导致时延增加一个周期时间。T-MAC 在无数据通信的情况下，不再等待固定时间，节点能提前进入睡眠状态，降低了能量损耗。

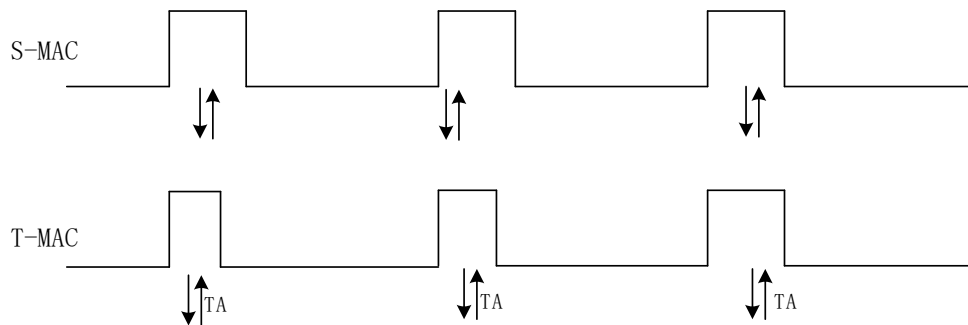


图 3.4 S-MAC 和 T-MAC 工作周期对比

3.2.1.2 异步竞争类 MAC 协议

B-MAC 通信建立在低功耗侦听和前导码技术之上^[40]。B-MAC 通信流程如图 3.5 所示，接收节点固定周期进行睡眠唤醒，唤醒后进行信道侦听，当网关需要与节点进行数据通信时，

在发送的数据之前附上长前导码，前导码长度略大于侦听周期，节点如果侦听到前导码，切换到接收状态，准备在最大等待时间内接收数据，未侦听到前导码，则直接进入睡眠状态，等待再次唤醒进行信道侦听。由于信道侦听周期略小于数据包前导码长度，所以节点在两次侦听范围中一定能侦听到该前导码^[41]。B-MAC 首先实现起来比较简单，节点不需要进行同步^[42]。如果节点侦听到前导码，此时节点切换到接收状态等待接收数据，时延为前导码发送时间，剩余前导码接收时间平均为前导码发送时间的一半，如果该数据不是发往本节点的，该部分为串音功耗，为射频接收状态下剩余前导码接收时间的功耗，随着网络中节点的增加，串音功耗将快速上升。另一方面，网关端发送较长的前导码将导致网关的数据通信拥堵。

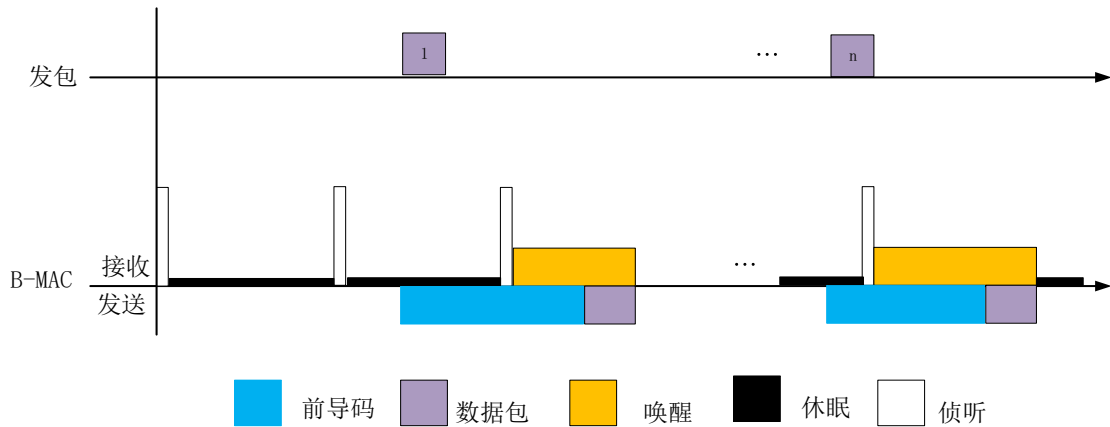


图 3.5 B-MAC 通信流程图

Wise-MAC 的通信流程如图 3.6 所示。Wise-MAC 节点还是和 B-MAC 一致，固定周期进行睡眠唤醒，唤醒后进行信道侦听，但是在接收节点每次通信完成后，将节点的射频调度时间发送给网关，网关就知道何时向节点发起数据通信^[43]。这样就可以缩短前导码，缩短前导码后，节点的串音功耗减小，但是侦听功耗未减小，但是网络延时减小。对于网关端，这种做法可避免网关过长时间地占用信道^[44]。

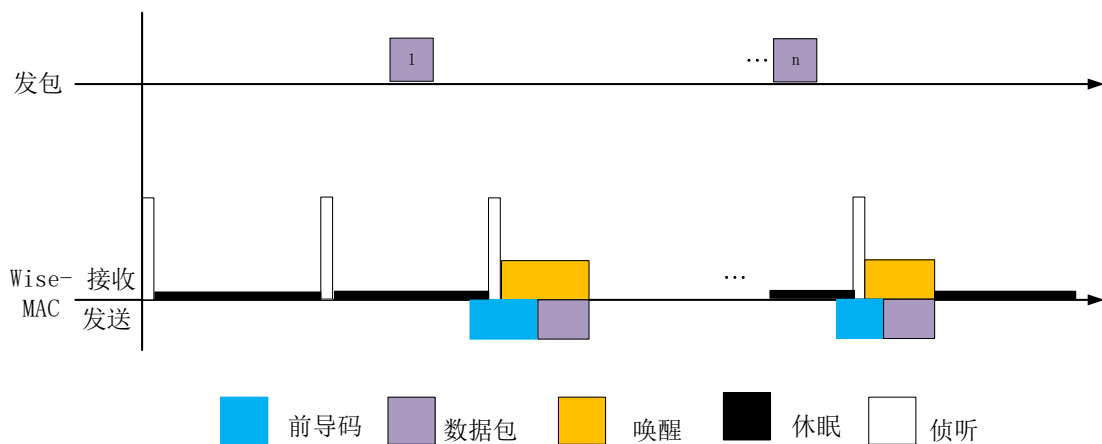


图 3.6 Wise-MAC 通信流程图

3.2.2 调度类 MAC 协议

调度类 MAC 协议根据一个预先设置好的任务表实现信道资源的调度。根据调度方式调度类 MAC 协议分为基于时分复用(Time Division Multiple Access, TDMA), 码分复用(Code Division Multiple Access, CDMA), 频分复用(Frequency Division Multiple Access, FDMA)的 MAC 协议^[45]。调度类 MAC 协议较为成熟且得到更多应用的是时分复用(TDMA)。TDMA 将网关与不同节点的通信分配到不同的时间段, 在同一个信道内分时占用信道资源, 当节点不在本节点通信时隙内时, 节点进入睡眠状态, 是实现信道资源分配调度较为成熟的一种策略。由于 TDMA 是基于调度的, 信道资源固定分配模式使得不会产生数据碰撞问题, 从而不会因为数据重传而导致信道拥堵。

L-MAC 将信道资源在时间上分成多个时间间隙, 如图 3.7 所示, 每个节点有自己专属的一个时间间隙, 所有时间间隙构成一个通信周期^[46]。节点只能在专属的时间间隙里发送数据, 在任何时间间隙内都可以接收数据, 每个时间间隙内都有一个业务时段和数据时段, 当属于本节点的时间间隙到来时, 如果节点需要发送数据, 首先发送一个广播, 其他节点接收到广播后判断是否进入睡眠。时间间隙的设置 L-MAC 中至关重要, 需要考虑每个节点都有一个时间间隙, 不能设置过大, 不然会导致较大的网络延时。

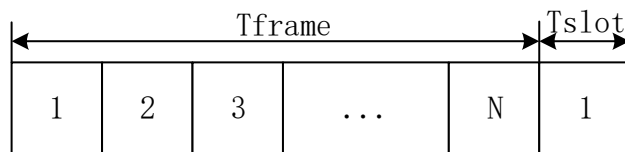


图 3.7 L-MAC 时间间隙分布

3.2.3 典型 MAC 性能分析

对典型 MAC 协议性能分析建立在 APP 向网关随机发送数据, 从网关接收到 APP 数据到网关和节点完成通信的时延以及节点的能量损耗, 假设 S-MAC 和 T-MAC 的周期为 1s, 睡眠时间 0.8s, 工作时间 0.2s, 同步时间为 0.05s, T-MAC TA 时间为 0.05s。B-MAC 和 Wise-MAC 的侦听周期为 1s, B-MAC 数据包前导码长度为 1.1s。L-MAC 共有 5 节点和网关通信, 每个通信时隙为 0.5s。

在时延上, S-MAC 和 T-MAC 的最小时延为竞争窗口时间加上数据通信时间, 最大时延为最小时延加上睡眠时间和同步时间, 但是 T-MAC 采用了 TA 定时器提前休眠机制, 时延比 S-MAC 大。B-MAC 使用了固定的长前导码, 其平均时延为长前导码时间加上数据交互时间。Wise-MAC 平均时延为侦听周期的一半加上数据交互时间。L-MAC 需要等到本节点时间间隙才能进行数据发送, 所以延时主要和等待时间间隙有关, 若在其他时节点时隙内接收, 需要等到本节点时间间隙进行数据回复。典型 MAC 协议的延时如图 3.8 所示。

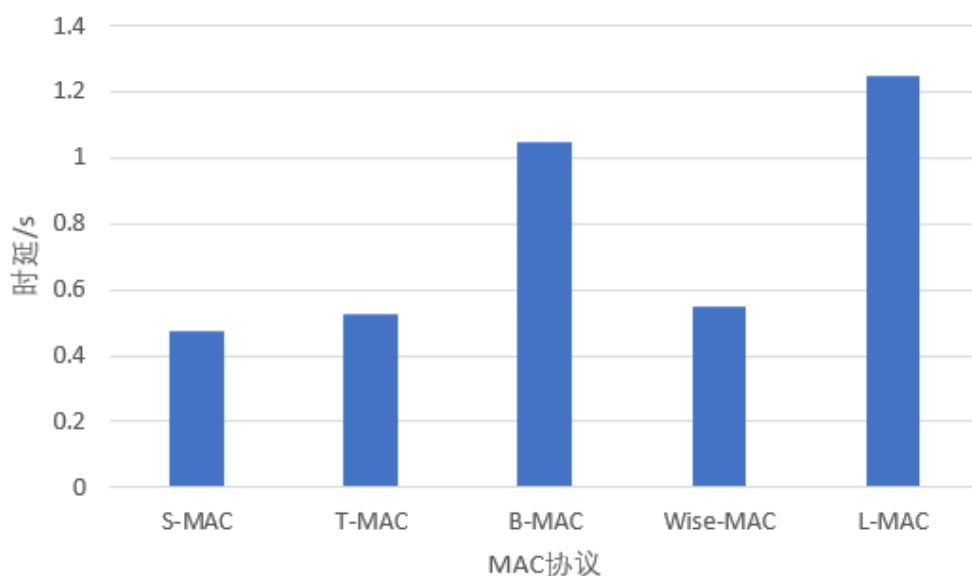


图 3.8 典型 MAC 协议平均时延图

在功耗上，S-MAC 需要在整个周期的工作时间段内都要进行侦听，侦听的能耗较大，T-MAC 通过工作状态占空比调节减小工作状态时间，所以 T-MAC 的空闲侦听能耗比 S-MAC 减小很多。B-MAC 和 Wise-MAC 平均侦听时间为单次侦听时间。L-MAC 的侦听功耗和节点个数有关，时间间隙有关，每个时隙内进行侦听在上诉条件下为 B-MAC 的 2 倍。根据侦听时间得出空闲功耗，如果侦听电流为 10mA，则每秒钟空闲侦听能耗如图 3.9 所示。

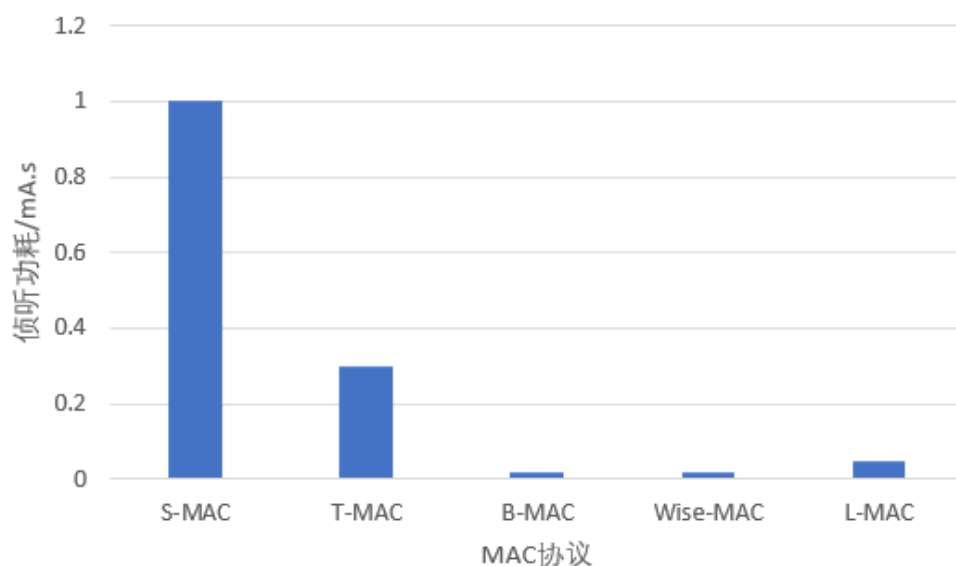


图 3.9 典型 MAC 协议空闲侦听能耗

本系统网络通信具有随机性，且大部分时间工作在低负载情况下。在低负载情况下，调度类协议时延较大，且功耗随着节点数的增加线性增加，所以调度类协议不适用于本系统。在竞争类 MAC 中，同步竞争协议需要实现所有节点同步，空闲侦听能耗较大，而异步竞争协议节点无需同步，每个节点有自己的工作周期，延时方面和同步竞争类协议相差不大。但

是每种协议都有其可取点，通过对 B-MAC 和 Wise-MAC 的研究，发现串音功耗与前导码长度有关，前导码越长，串音功耗越大，这个问题可参考 S-MAC 中 RTS/CTS 和 Wise-MAC，缩短前导码，做前期应答，降低串音功耗，另外侦听功耗与侦听周期有关，侦听周期越小，侦听功耗越大，而侦听周期又与网络时延有关，侦听周期越大，网络时延越大，所以参考 T-MAC 中的自适应策略以及 Wise-MAC 对节点状态进行保存的方法，可针对网络负载进行侦听周期的调整，当网络负载较小时，增大侦听周期，降低侦听功耗，当网络负载较大时，减小侦听周期，减小网络时延。既保证通信质量，又降低通信功耗。

3.3 自适应负载的低功耗 MAC 协议设计

本小节综合上诉典型 MAC 协议的分析以及应用特点等因素设计一种自适应负载的低功耗 MAC 协议，建立在低功耗侦听技术和前导码技术之上。

3.3.1 基本参数确定

CAD 信道侦听功耗按能量损耗情况可分为多个阶段，如图 3.10 所示，包括 CAD 开始检测阶段，CAD 分析阶段，CAD 检测完成阶段。

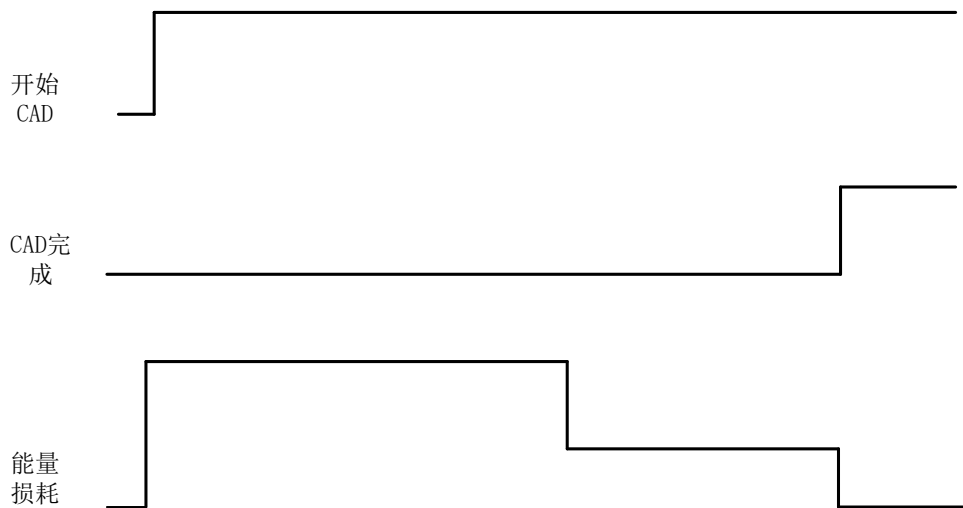


图 3.10 CAD 不同阶段能量损耗

不同的 LoRa 通信参数，CAD 的信道侦听时间不同。在带宽 $BW=500K$ ， $CR=1$ ，不同扩频因子 SF 的 CAD 侦听时间如图 3.11 所示，扩频因子越大，侦听时间越长。在扩频因子 $SF=12$ ， $CR=1$ ，不同带宽的 CAD 侦听时间如图 3.12 所示，带宽越大 CAD 侦听时间越短。

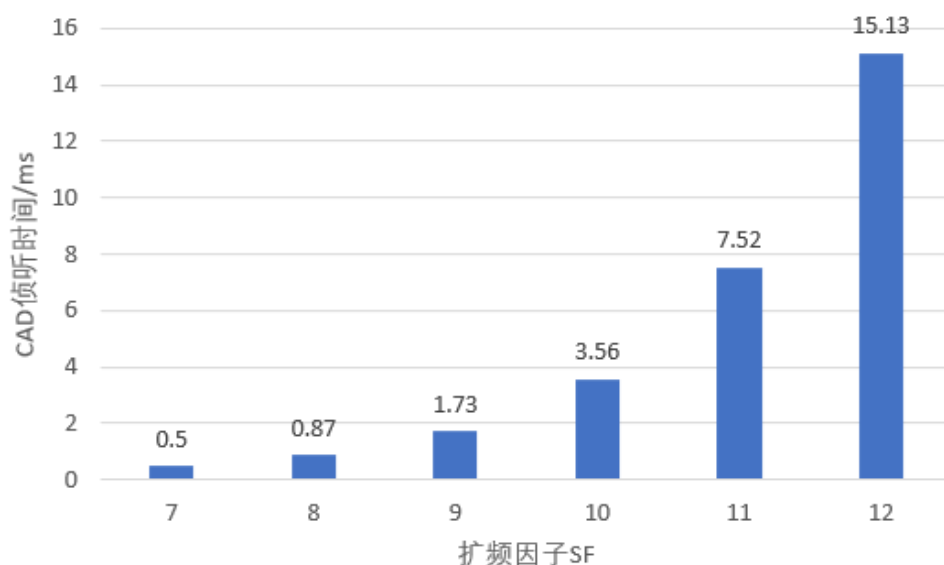


图 3.11 不同扩频因子 CAD 侦听时间

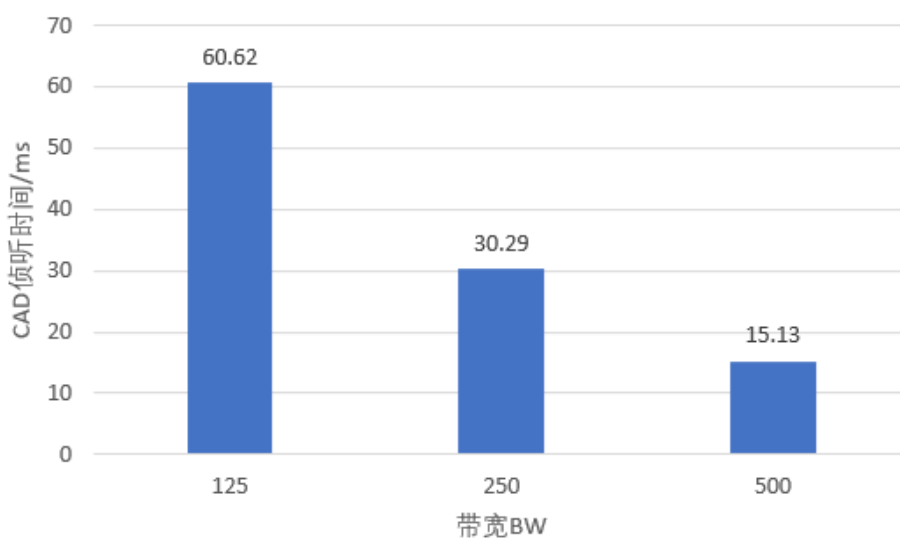


图 3.12 不同带宽 CAD 侦听时间

LoRa 数据包格式如图 3.13 所示，包括三个部分，前导码、可选报头和数据负载。前导码实现接收数据时的同步，以及通过信道活动检测能对前导码进行侦听。前导码长度可以进行调整配置，通过寄存器可设置 4~65536，但实际发送的前导码长度会再附加 4 个符号，可选报头中有负载相关信息，以及决定是否需要添加数据负载的 CRC 校验。数据负载就是用户的应用数据。

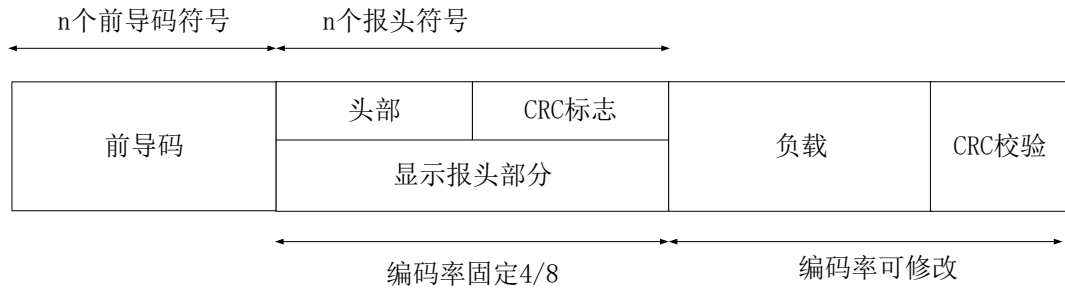


图 3.13 LoRa 数据包格式

LoRa 通信主要有三个，扩频因子 SF、带宽 BW 和编码率 CR，LoRa 通信参数决定了通信距离、通信速率和抗干扰性^[35]。扩频因子表示通过对每个数据比特进行扩展，每个符号转换成码片的数量，随着扩频因子增加，信噪比得到改善，如表 3.1 所示。带宽越大，数据传输越快，然而这会导致接收灵敏度下降。编码率表示纠错码的比率，可提高通信的容错率，但是会增加信息传输开销，不同编码率下的编码开销如表 3.2 所示。在低功耗设计中，需要根据这些参数进行数据传输时间等参数的确定。

表 3.1 不同 SF 码片与符号数之比

扩频因子	码片/符号
6	64
7	128
8	256
9	512
10	1024
11	2048
12	4096

表 3.2 不同编码率的控制开销

编码率	循环编码率	编码开销
1	4/5	1.25
2	4/6	1.5
3	4/7	1.75
4	4/8	2

设理论 LoRa 调制比特率为 R_{bt} ，实际比特率为 R_b ，符号速率为 R_s ，码元传输时间为 T_s 。

$$R_{bt} = \frac{SF}{2^{SF}} \cdot BW \quad (3.1)$$

$$R_b = R_{bt} * \frac{4}{4 + CR} = \frac{SF}{2^{SF}} * \frac{4}{4 + CR} \quad (3.2)$$

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (3.3)$$

$$T_s = \frac{1}{R_s} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (3.4)$$

设数据包中前导码的长度为 N_{pre} ，则传输时间为 T_{pre} ，设负载字节数为 PL ，数据负载符号数为 $payloadSymbolNb$ ， H 表示是否有报头， DE 表示是否是低速模式，负载传输时间为 $T_{payload}$ ，总传输时间为 T_{packet} 。

$$T_{pre} = (N_{pre} + 4.25)T_s \quad (3.5)$$

$$payloadSymbolNb = 8 + \max(\text{ceil}(\frac{8PL - 4SF + 28 + 16 - 20H}{4(SF - 2DE)})(CR + 4), 0) \quad (3.6)$$

$$T_{payload} = payloadSymbolNb * T_s \quad (3.7)$$

$$T_{packet} = T_{pre} + T_{payload} \quad (3.8)$$

在带宽 $BW=500K$ ，编码率为 $CR=1$ 的情况下，使用报头，不使用低速模式，前导码长度为 10，有效字节 20 个情况下，利用上述公式计算不同扩频因子 SF 的数据传输时间，如表 3.3 所示。

表 3.3 不同扩频因子数据传输时间

扩频因子 SF	数据传输时间/ms
7	12
8	22
9	44
10	78
11	156
12	272

通过上述分析，在射频参数 $SF=7$ ， $BW=500K$ ， $CR=1$ 的情况下，通信速率相对较快，在此状态下 CAD 侦听时间也较短，可以降低侦听功耗，所以选用此射频参数。

3.3.2 双阈值负载判定机制

双阈值负载判定机制可实现侦听周期的动态调整，设 U 和 D 两个阈值，当网络负载较大时，将选择较小的侦听周期，当网络负载较小时，选择较大的侦听周期，其原理如图 3.14 所示。有 K 级侦听周期分别为 $C_1, C_2, \dots, C_K$ ，且有 $C_1 < C_2 < \dots < C_K$ 。设置一个 $n(t)$ ，初始化为 0，表示连续多个侦听周期内侦听到前导码或者连续多个侦听周期内未侦听到前导码的次数。设置一个 $c(t)$ ，初始化为 C_1 ，表示侦听周期大小。在一个侦听周期内如果侦听到数据则减小 $n(t)$ ，没有侦听到数据 $n(t)$ 增加。当 $n(t)$ 大于 U 时， $c(t)$ 变大，然后 $n(t)$ 置 0，当 $n(t)$ 小于 $-D$ 时， $c(t)$ 变小，然后 $n(t)$ 置 0。另外当 $n(t)$ 大于零时某个侦听周期侦听到数据， $n(t)$ 置为 -1 (侦听周期大于 $C_{K/2}$ 除外)，当 $n(t)$ 小于零时某个侦听周期没有侦听到数据， $n(t)$ 都置为 1。为了当长期处于空闲状态时突然有数据通信快速调整侦听周期，在 $c(t)$ 大于 $C_{K/2}$ 时，如果侦听到数据，立刻将 $c(t)$ 调整为 $C_{K/2}$ 。以数据发送周期 0.5s 为例，如果此时侦听周期为 1s，则在连续多个侦听周期内都能侦听数据，所以将侦听周期减小，而当侦听周期调整到小于 0.5s 时，则出现部分侦听周期不能侦听到数据的情况，此时侦听周期不再变化。

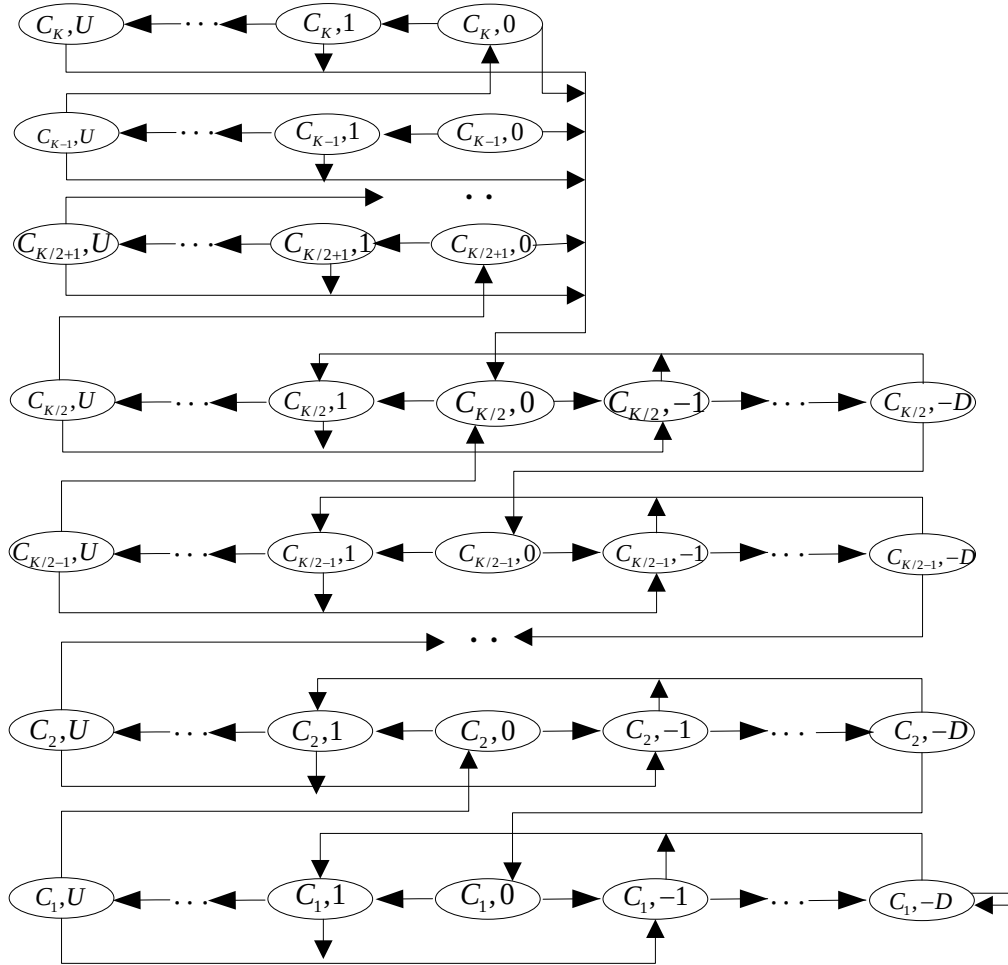


图 3.14 双阈值负载判定机制

3.3.3 前导码分割

在 B-MAC 中，长前导码会导致较大的串音功耗，可将长前导码切割为多个短前导码，在短前导码后嵌入目标节点地址信息，如图 3.15 所示。当发送节点需要向接收节点发送数据时，首先发送节点循环发送含有短前导码和地址信息的数据包，每次发送完后开启一个较小时隙等待接收节点应答，接收节点定时对信道进行侦听，如果侦听到前导码，等待接收目标地址信息，如果不是本节点地址，进入睡眠状态，如果是本节点地址，对该信息进行应答，网关收到应答信息后，开始发送数据。这种方法不仅降低了串音功耗，另外也减小了网关信道连续占用时间。

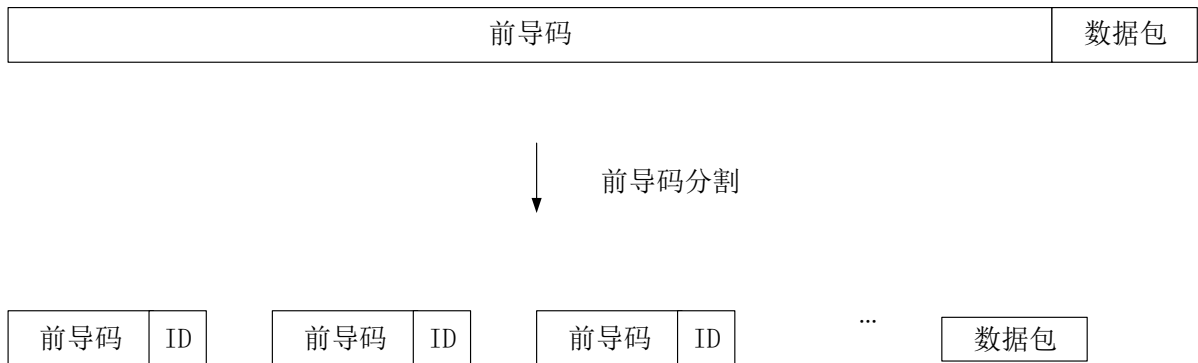


图 3.15 前导码分割示意图

但是前导码分割存在一个问题，在节点信道侦听时，有可能出现在网关等待时隙内节点侦听的现象，这就会导致误判现象，为了解决该问题，采用一种二次睡眠唤醒的侦听方式，如图 3.16 所示。当第一次未侦听到信号时，进行短时间睡眠后进行第二次侦听，短时间睡眠周期略大于网关等待时隙，当然这也导致侦听能耗的变大，为了降低侦听能耗，需要对侦听周期进行动态调整。

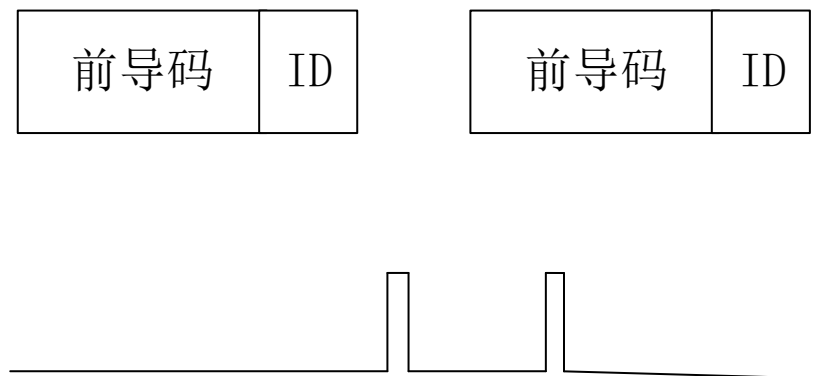


图 3.16 二次睡眠唤醒侦听

3.3.4 自适应负载低功耗 MAC 协议总体设计

结合网络负载不平衡特点，为了节点能耗和时延上的平衡，在 LoRa 无线通信的基础上设计了一种自适应负载的低功耗 MAC 协议，为了方便后续进行描述，将这种自适应负载的

低功耗 MAC 协议取名为 AL-MAC(Adaptive Load MAC)。

AL-MAC 总体通信如图 3.17 所示, 可以发现 AL-MAC 根据负载自适应调整侦听周期。当数据负载变大时, 节点的侦听周期变小, 从而使得数据包延时小, 而当负载变小时, AL-MAC 选择较大的侦听周期, 以降低能量损耗。其中帧头由前导码和节点 ID 组成, 侦听部分为二次睡眠唤醒侦听, 在唤醒区进行确认应答。

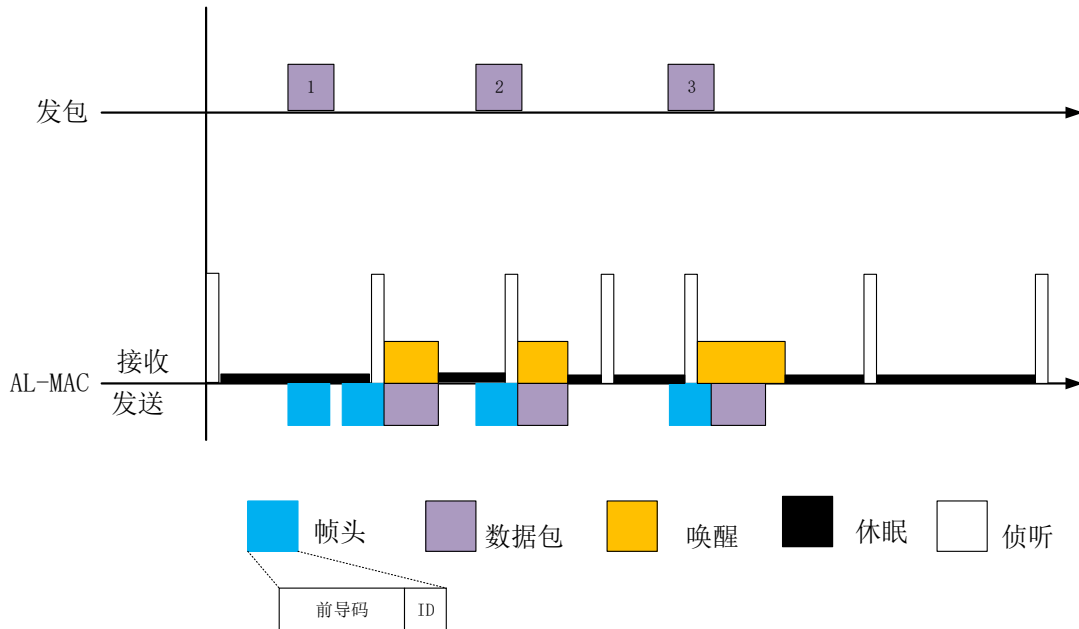


图 3.17 AL-MAC 总体通信

网关的通信流程如图 3.18 所示。将帧头定义为 SP 包, 当网关开始工作后, 构建一个已入网节点通信时间表。当网关需要与某个节点进行数据通信时, 首先通过节点通信表中网关与该节点的通信时间计算出 SP 的最大发送时间 $T_{\max}$, 然后得出最大 SP 发送次数 N 。网关每发完 SP 报文后, 切换到接收状态在一个时隙内等待节点的应答, 节点应答帧中只包含节点地址。如果未等到节点应答, 判断网关 SP 发送次数 SP_TX_NUM 是否小于最大 SP 发送次数 N , 若条件成立, 再次构建一个含有短前导码、含节点地址的数据的报文 SP 进行发送, 条件不成立, 本轮向节点数据发送结束。网关收到了节点的应答, 对应答节点地址进行校验, 如果节点地址错误, 继续发送 SP, 节点地址正确, 网关切换到发送状态, 开始发送要发往节点的数据。数据通信完成后, 网关更新节点通信时间表。

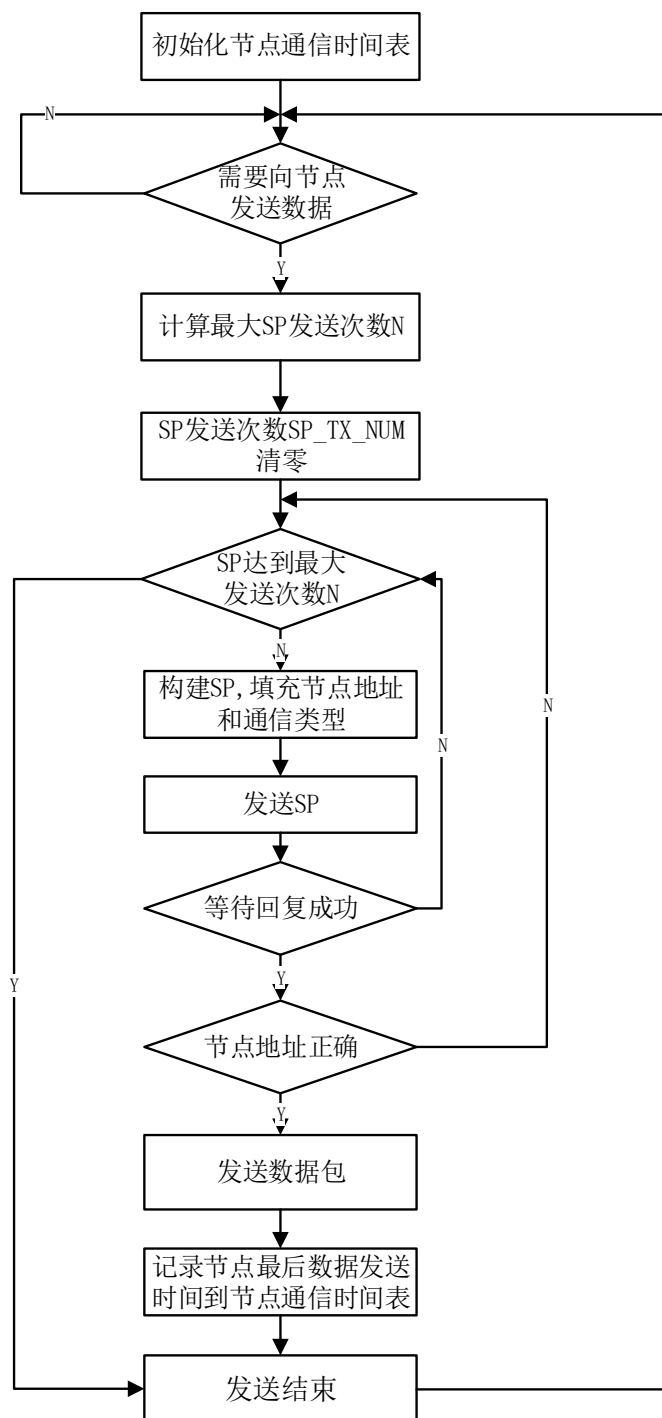


图 3.18 网关通信流程

节点通信流程如图 3.19 所示。节点周期性睡眠唤醒，切换到 CAD 模式，首先进行一次 CAD 侦听，如果侦听到前导码，切换到接收状态，接收数据包，并分析数据域是否是本节点地址，若是发往本节点，切换到发送状态发送进行应答，应答后接收数据进行数据处理，若不是，更新侦听周期进入睡眠状态。如果第一次侦听未侦听到前导码，进行短暂睡眠后进行第二次侦听，如果第二次侦听成功，处理流程和第一次侦听成功一致，未侦听成功更新侦听周期进入休眠状态。

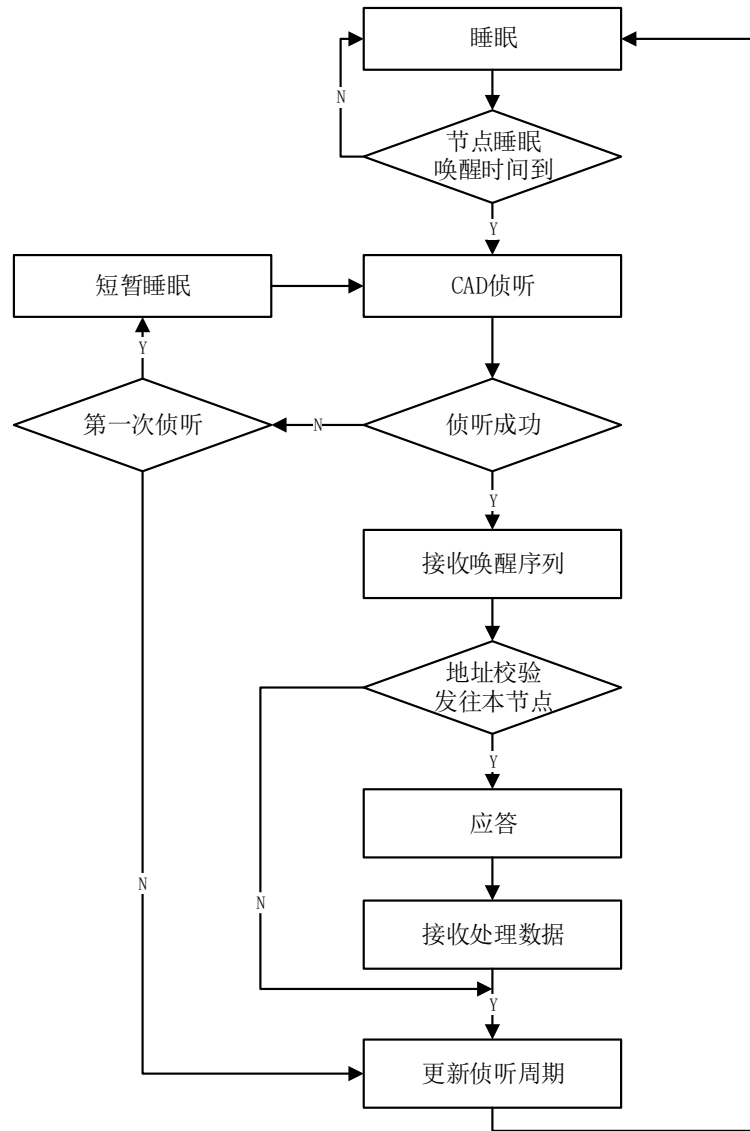


图 3.19 节点通信流程

3.3.5 性能分析

分析不同的自适应策略 AL-MAC, 即不同的阈值参数在网络中的时延性能, 并和 B-MAC 进行比较。分别取自适应策略(U, D)为 (1, 8)、(8, 1) 这两对阈值参数, 侦听周期为 8 级, 包括 2500ms, 2000ms, 1600ms, 1300ms, 1000ms, 700ms, 500ms, 300ms, 在网关持续和节点进行通信情况下, 对通信时延进行分析, 在节点和网关通信之后长期处于空闲状态情况下, 对通信功耗进行分析。

通信时延情况如图 3.20 所示, 假设 AL-MAC 最大侦听周期为 2s, B-MAC 固定侦听周期为 1s, 数据发送间隔为 400ms。B-MAC 使用固定的侦听周期, 数据包时延平均为前导码时间与数据通信时间之和。当无数据负载情况下突然进行通信, AL-MAC 的时延为中间级侦听周期的一半左右, 而持续进行数据通信情况下, AL-MAC 侦听周期不断变小, D 越小, 侦

听周期变小越快, 所以(U, D) 为(8, 1)比(1, 8)变化更快, 更能适应负载变化, 提高数据通信实时性, 最后稳定在一个最小平均时延上。

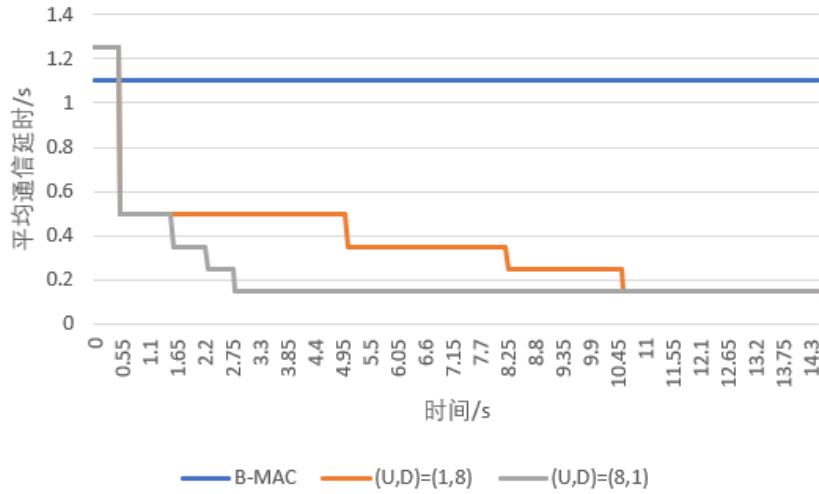


图 3.20 平均时延分析

在进行通信后空载情况下平均每分钟的侦听功耗变化情况如图 3.21 所示。由于 B-MAC 采用固定的侦听周期, 所以其侦听功耗一直不变, 而 AL-MAC 在数据通信完成后侦听周期较小, 故侦听功耗比 B-MAC 大, 在长时间空载情况下, 侦听周期将逐渐变大, 直到最大侦听周期, 这时候功耗最低, U 越小, 侦听周期变大越快, 所以(U, D) 为 (1, 8) 比(8, 1)变化更快, 减小了能量损耗。

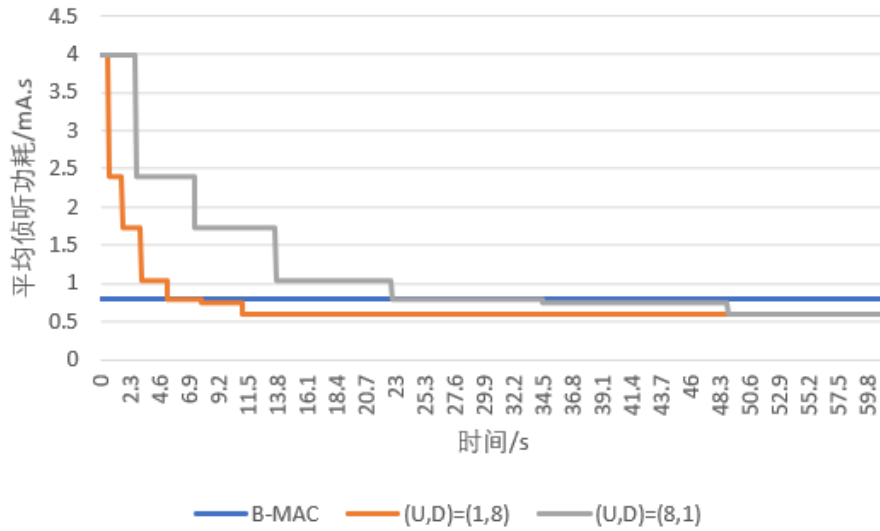


图 3.21 侦听功耗分析

根据对 B-MAC 和 AL-MAC 平均时延和侦听功耗的分析, AL-MAC 不同 U, D 参数的对比分析, 由于本系统网络负载不平衡的特点, 较长时间处于空闲侦听状态, 数据通信具有随机性的特点, 所以选用 U 较大, D 较小的参数, 对负载增大时有侦听周期变化灵敏度更大, 负载变小时侦听周期变化灵敏度小。

3.4 自适应负载的低功耗 MAC 协议性能测试

3.4.1 实际通信时延测试

实际通信时延测试软件如图 3.22 所示。其中(U,D)=(8,1), 侦听周期为 8 级, 包括 2500ms, 2000ms, 1600ms, 1300ms, 1000ms, 700ms, 500ms, 300ms。首先网关通过 USB 接口连接测试软件, 进入速率测试界面, 测试软件在不同通信时间间隔向低功耗节点发送数据包, 连续发送 50 包, 数据包长度为 4 个字节, 通过上位机计算平均往返延时。

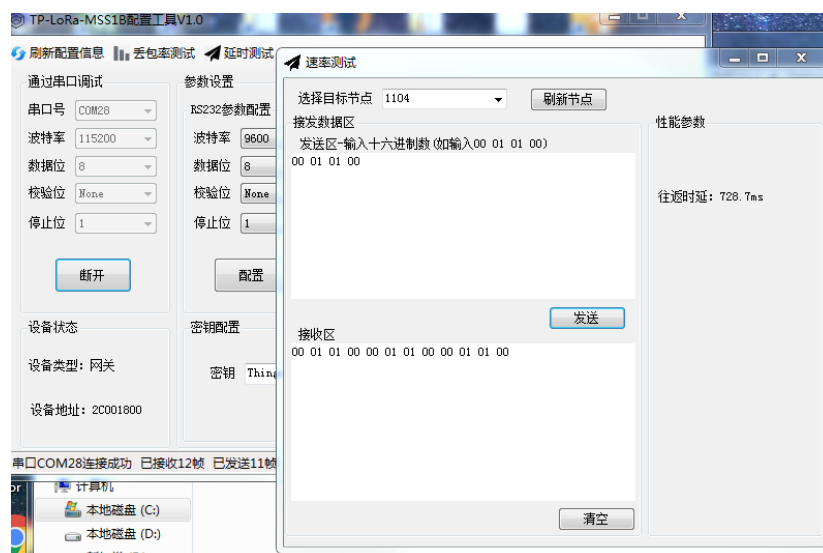


图 3.22 实际时延测试软件图

测试结果如表 3.4 时延测试表所示, 数据包发送间隔越小, 平均往返时延越小, 具有自适应特点。

表 3.4 时延测试表

数据包发送间隔(ms)	实际往返平均时延 (ms)
200	177.3
400	207.4
600	243.1
800	404.8
1100	566.2

3.4.2 实际通信功耗测试

实际通信功耗包括侦听功耗、发送功耗、接收功耗和睡眠功耗组成。以无线喷灌器为实际测试对象, 在无线喷灌器的供电端串联一个 8 欧姆, 精度 0.1%的采样电阻, 通过示波器测量采样电阻两端的电压计算射频发送和 CAD 侦听的能量损耗, 通过高精度电流计测量射频接收和睡眠功耗。示波器单次 CAD 侦听如图 3.23 所示, 射频发送状态波形如图 3.24 所示:

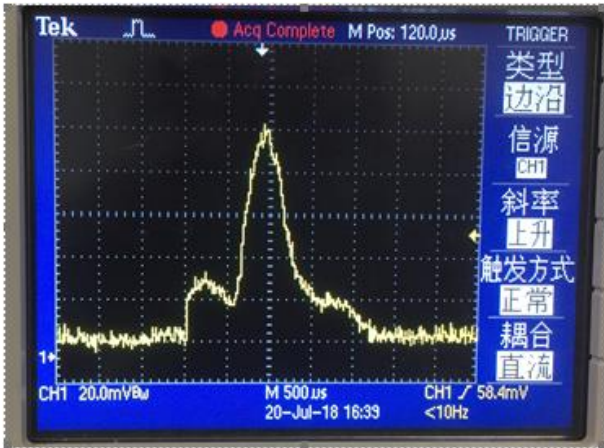


图 3.23 单次 CAD 侦听波形图

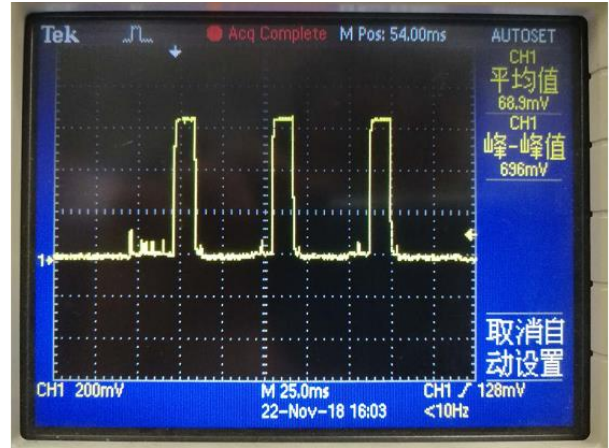


图 3.24 射频发送状态波形图

根据示波器波形图计算出 CAD 检测的平均功耗，计算方法如下所示，其中 I_v 为瞬时电流， T_v 为持续的时间， I_a 为平均电流， T_a 为平均时间， V_v 为示波器波形的有效电压， V_t 为每一时刻的电压值， T_s 为示波器的采样周期， R 为串联的电阻阻值。

$$I_v T_v = I_a T_a \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{R} V_v T_v = I_a T_a \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{R} \int_0^{T_s} V_t dt = I_a T_a \quad (3.11)$$

$$I_a = \frac{1}{RT_a} \int_0^{T_s} V_t dt \quad (3.12)$$

通过高精度电流表与无线喷灌器电源串联，测得睡眠状态电流如图 3.25 所示，射频接收状态电流如图 3.26 所示：

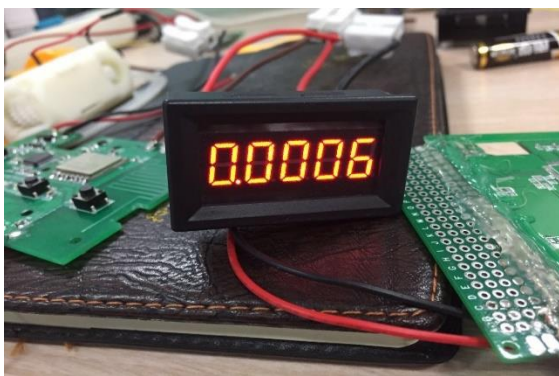


图 3.25 睡眠状态电流

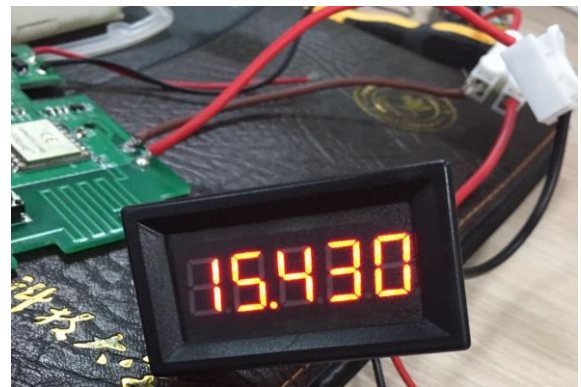


图 3.26 射频接收状态电流

无线喷灌器无线通信模块每天工作情况如下，每天总共进行 20 条数据通信进行数据查询以及状态控制，且有多次通信集中在一个时段，即网络负载的不平衡特点，并且在同一个星型网络下有 10 个同类型设备节点。

在传统 B-MAC 情况下, 固定侦听周期 1s, 无论网关和本节点通信还是其他节点通信, 侦听到信号后都需要切换到接收状态等待平均长前导码发送时间的一半, 串音功耗较大, 但是 B-MAC 没有前期应答, 发送功耗较小, 数据处理时间 100ms, 数据通信射频发送时间为 20ms, B-MAC 各状态的平均功耗及工作时间如表 3.5 所示。通过计算可得 B-MAC 一天侦听功耗为 1555mA.s, 发送功耗为 32mA.s, 接收功耗为 1530mA.s, 睡眠功耗为 52mA.s, 总功耗为 3169mA.s。

表 3.5 B-MAC 通信平均功耗及工作时间

状态	平均功耗	每天的工作时间
MCU(stop with RTC)+RF SLEEP	0.6uA	24h
RF RX	15mA	$20*10*0.5s+20*0.1s$
RF TX	80mA	20*20ms
RF CAD	18uA	24h

在 AL-MAC 情况下, 大部分处于空闲状态, 采用实际时延测试中的最大侦听周期, 能减小侦听功耗, 网关和其他节点通信情况下, 因为前期应答, 当侦听到信号后只需要等待平均短前导码发送时间的一半, 短前导码发送时间为 0.1s, 所以串音功耗较小, 但是应答帧发送会增大发送功耗, 应答帧发送时间为 5ms, 数据处理时间 100ms, 数据通信射频发送时间为 20ms, 则 AL-MAC 各状态的平均功耗及工作时间如表 3.6 所示。通过计算可得 AL-MAC 一天侦听功耗为 1209mA.s, 发送功耗为 40mA.s, 接收功耗为 180mA.s, 睡眠功耗为 52mA.s, 总功耗为 1481mA.s。

表 3.6 AL-MAC 通信平均功耗及工作时间

状态	平均功耗	每天的工作时间
MCU(stop with RTC)+RF SLEEP	0.6uA	24h
RF RX	15mA	$20*10*0.05s+20*0.1s$
RF TX	80mA	$20*20ms+20*5ms$
RF CAD	14uA	24h

综上所述, AL-MAC 相比传统的 B-MAC 在无线喷灌器工作条件下, 无线通信总功耗降低 50%以上, 使用短前导码的前期应答, 串音功耗减小降低了 90%左右, 侦听功耗由于使用了二次睡眠唤醒, 但是在空闲状态时侦听周期较大, 降低了 20%。

3.5 本章小结

本章首先对无线通信能量损耗和系统应用特点进行分析, 然后对当前典型的竞争类 MAC 协议, 调度类 MAC 协议进行研究, 分析其优缺点, 结合对应用特点的分析和对当前典型 MAC 协议的特点和性能分析, 在 LoRa 无线通信的基础上设计了一种自适应负载的低功耗 MAC 协议, 将这种自适应负载的低功耗 MAC 协议取名为 AL-MAC(Adaptive Load MAC), 最后对协议性能进行分析和测试。

第4章 基于三级差分信号处理的边界识别方法

本章对基于电磁感应的智能割草机边界识别技术进行改进研究,针对目前基于电磁感应的智能割草机边界识别中信号特征复杂,信号提取处理方法性能较差,抗干扰能力不强等缺点而导致智能割草机有效工作面积受限,设计了一种基于三级差分信号处理的边界识别方法,对相邻边界干扰以及噪声干扰进行处理,能较为准确地提取感应信号特征,以适应智能割草机在 2000 平方米大面积草坪工作。

4.1 目前边界识别的现状和缺点

4.1.1 边界识别现状

性能较好的智能割草机边界识别技术是智能割草机正常高效工作的基础。在智能割草机识别方法上,国内外都进行了较多的研究。在国外,专利 Electronic demarcating system 中公布了一种基于电磁感应的智能割草机边界建立与识别方法,用导线限定工作区域,且在导线上通上电流信号,通过电磁感应检测边界信号,确定工作边界^[47]。Fa Yu Wang 利用图像处理技术的灰度处理对草坪进行特征识别,对草坪进行灰度分割来确定工作边界^[48]。在国内,陈奇广通过在工作区域边界上设置磁钉,使用磁阻传感器进行感应以确定工作边界^[49]。郑鑫设计了一种基于电磁感应的边界识别方法,通过割草机上边界传感器检测边界信号,确定工作边界^[50]。杨金龙等人利用涡流原理检测边界信号,确定工作边界^[51]。张晓春设计了基于图像处理的无信标边界识别算法,确定工作边界^[52]。

虽然目前在智能割草机边界识别上,有通过图像处理、磁钉信标、涡流检测等技术对工作边界进行识别的研究,但是还处于理论研究阶段,未得到较大的应用,比如图像处理技术对于草坪特征难以分析的场合并不适用。目前在售的智能割草机的边界识别主要采用人为铺设导线边界,使智能割草机在指定范围内工作,通过金属导线上的电流信号产生变化的磁场,然后智能割草机提取变化磁场产生的感应信号特征判定工作区域。这种方法的特点是可实现非接触式测量,对不同环境的适应性好,且实现成本不高,能为智能割草机电量过低时进行充电提供基础。

4.1.2 基于电磁感应的边界识别缺点

虽然基于电磁感应的边界识别有一定的优势,但是还有待改进,目前的基于电磁感应的边界识别方法存在如下的缺点:

(1) 产生的信号特征过于复杂,在工作区域建立过程中,在金属导线上的电流信号决定最后工作区域识别检测信号的特征,如果较为复杂,分析起来较为困难,当受到干扰的情况下信号特征发生改变,导致识别不出有效信号。所以在工作区域建立过程中金属导线上的电流

信号要保证产生的感应信号特征明显且复杂度不高。

(2) 信号提取与识别方法性能较差,未对外界噪声干扰进行过多的处理,电磁信号随着距离衰减较快,在距离边线较远处,信号较小,受外界噪声影响更大,导致信号难以分析或者特征误判,有效工作面积受限。

(3) 未对相邻边界干扰进行处理。当存在两个以上工作区域情况下,多个工作区域互相影响,如果将相邻边界信号的信号特征当作本工作区域的信号,智能割草机识别为界外或者无效信号,根据相关标准智能割草机需要停止工作。

4.1.3 设计方向分析

结合目前基于电磁感应的边界识别的缺点,设计方向主要为以下几点:

(1) 在工作区域建立过程中,基站电流信号设计的尽量简单,但是需要保证特征明显,比如具有一定的周期,一定的脉宽,这样可保证识别端的感应信号也有相同的特点,保证只有在本基站信号下割草机才能正常工作。另外在同样工作区域面积覆盖范围下,减小电流的有效值,降低能耗。

(2) 在边界识别硬件设计上,通过感应电路实现对变化磁场信号的提取,产生感应信号,对微弱信号进行放大,保证较大的信噪比,最后输入到 MCU 处理的信号特征明显,以便最后信号的分析。

(3) 在软件设计上,实现信号特征的分析,由于相邻边界干扰信号和主信号频率特征基本一致,所以无法通过滤波对相邻边界干扰信号进行处理,只能在软件上进行处理。

4.2 边界的建立和磁场分析

本小节对边界的建立方法进行介绍,在构建工作边界的基础上,假定一个理想化正方形工作区域,对工作区域内的磁场情况进行理论分析,得出在工作区域内的磁场变化规律。

4.2.1 边界建立的方法

为了确保智能割草机在特定区域内工作,在需要割草的区域铺上金属导线,金属导线和基站形成一个通电回路。基站控制在金属导线上产生一个周期约为 14ms,脉宽为 130us 的高频电流脉冲,基站电流信号如图 4.1 所示,可以发现,信号占空比较小,能量利用率较高。而金属导线形成的回路区域即为割草机工作区域,金属导线即为工作边界。根据相关标准,只有当智能割草机检测到信号,且信号特征正确,智能割草机才能进行割草作业,否则,智能割草机需要在 1 米距离内停止割草,等待用户操作。

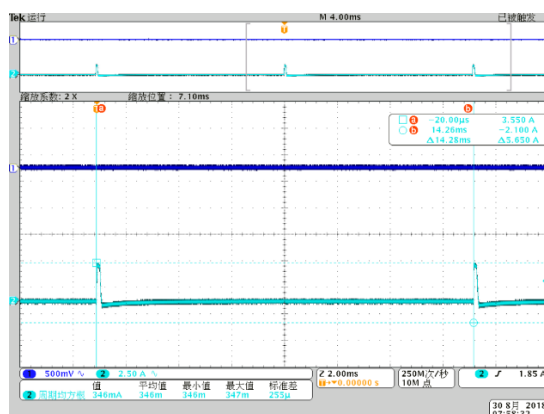


图 4.1 高频电流脉冲信号图

边界信号产生电路如图 4.2 所示，由 MCU 控制 Boundary 信号端，在 BOU-和 SIG+回路产生特定频率的电流脉冲。

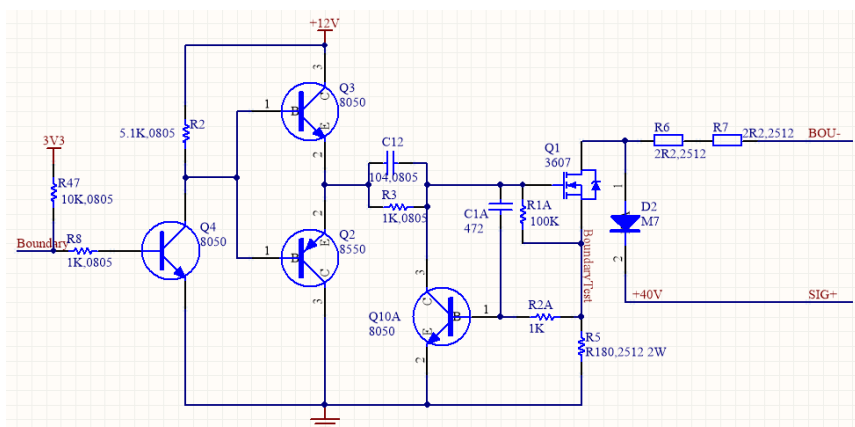


图 4.2 边界信号产生电路

对于草坪内非普通草，通过特定的布线规划，将非普通草布置在闭合回路外，避免智能割草机错割非普通草，布线规则如图 4.3 所示。

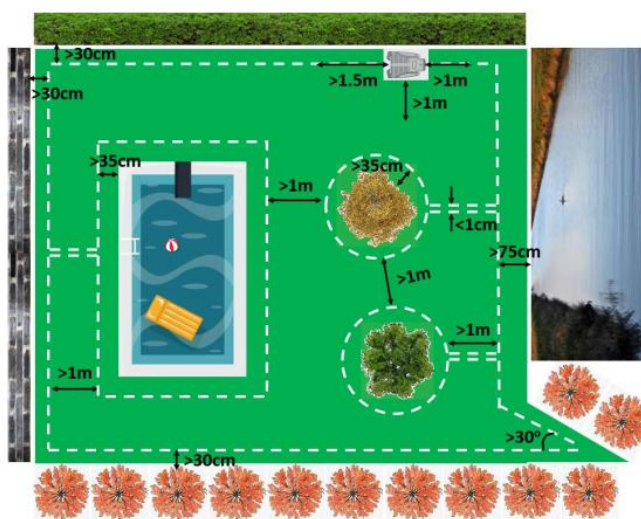


图 4.3 布线规则

4.2.2 工作区域磁场分析

根据毕奥-萨伐尔定律, 电流元 $I d\vec{l}$ 在真空中某一点产生的磁场强度 $d\vec{B}$ 大小与电流元的大小、电流元到该点的位矢和电流元的夹角的正弦的乘积成正比, 与电流源到该点距离的平方成反比^[53]。

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \theta}{r^2} \quad (4.1)$$

对于有限长直导线, 如图 4.4 所示, 在直电流上取 $I d\vec{l}$ 电流元, 其产生的磁场如式 (4.2) 所示, 各电流元在 P 点的 $d\vec{B}$ 同向, 通过式 (4.3) 和式 (4.4) 得出 P 点的磁场强度, 如式 (4.5) 所示。

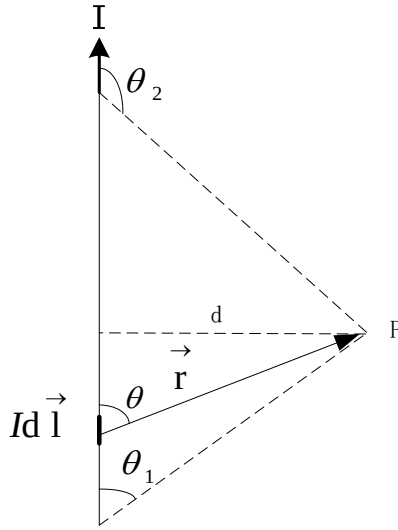


图 4.4 有限长直导线磁场分析建模图

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \theta}{r^2} \quad (4.2)$$

$$B = \int dB = \int_L \frac{\mu_0 Idl \sin \theta}{4\pi r^2} \quad (4.3)$$

$$dl = \frac{ad\theta}{\sin^2 \theta} \quad (4.4)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi d} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi d} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (4.5)$$

将割草区域理想化位一个边长为 a 的正方形区域, 脉冲电流大小为 I , 电流方向为顺时针方向, 如图 4.5 所示。

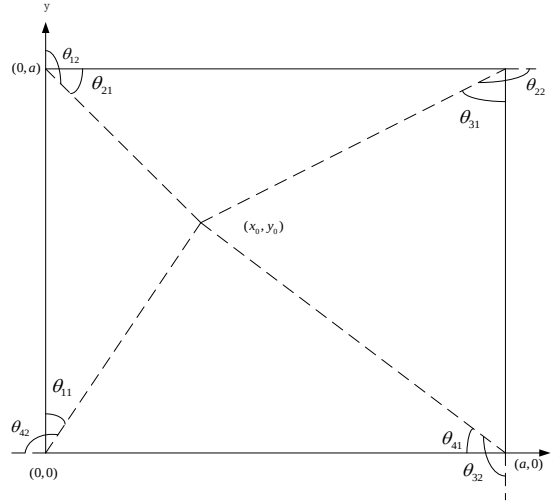


图 4.5 理想化工作区域图

根据有限长直导线附近的磁场强度分析，在边长为 a 的割草区域内的任意一点 (x_0, y_0) 的磁场强度为四段有限长直导线的叠加，磁场强度为 $B_{(x_0, y_0)}$ 如式 (4.6) 所示，其中 B_1 大小如式 (4.7) 所示， B_2 大小如式 (4.8) 所示， B_3 大小如式 (4.9) 所示， B_4 大小如式 (4.10) 所示。

$$B_{(x_0, y_0)} = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} B_1 &= \frac{\mu_0 I}{4\pi d_1} \int_{\theta_{11}}^{\theta_{12}} \sin \theta_1 d\theta_1 = \frac{\mu_0 I}{4\pi x_0} (\cos \theta_{11} - \cos \theta_{12}) \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi x_0} \left(\frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} + \frac{a - y_0}{\sqrt{x_0^2 + (a - y_0)^2}} \right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned} B_2 &= \frac{\mu_0 I}{4\pi d_2} \int_{\theta_{21}}^{\theta_{22}} \sin \theta_2 d\theta_2 = \frac{\mu_0 I}{4\pi (a - y_0)} (\cos \theta_{21} - \cos \theta_{22}) \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi (a - y_0)} \left(\frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + (a - y_0)^2}} + \frac{a - x_0}{\sqrt{(a - x_0)^2 + (a - y_0)^2}} \right) \end{aligned} \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} B_3 &= \frac{\mu_0 I}{4\pi d_3} \int_{\theta_{31}}^{\theta_{32}} \sin \theta_3 d\theta_3 = \frac{\mu_0 I}{4\pi (a - x_0)} (\cos \theta_{31} - \cos \theta_{32}) \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi (a - x_0)} \left(\frac{a - y_0}{\sqrt{(a - x_0)^2 + (a - y_0)^2}} + \frac{y_0}{\sqrt{(a - x_0)^2 + y_0^2}} \right) \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} B_4 &= \frac{\mu_0 I}{4\pi d_4} \int_{\theta_{41}}^{\theta_{42}} \sin \theta_4 d\theta_4 = \frac{\mu_0 I}{4\pi y_0} (\cos \theta_{41} - \cos \theta_{42}) \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi y_0} \left(\frac{a - x_0}{\sqrt{(a - x_0)^2 + y_0^2}} + \frac{x_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \right) \end{aligned} \quad (4.10)$$

其中 μ_0 为真空磁导率，若草坪区域边长为 25m，电流大小为 3A，则区域内的磁场强度分布如图 4.6 所示，在接近边线的位置磁场强度较大，离边线越远，磁场强度越小，在中间

位置磁场强度最小，磁场强度随着距离的增加衰减较快。

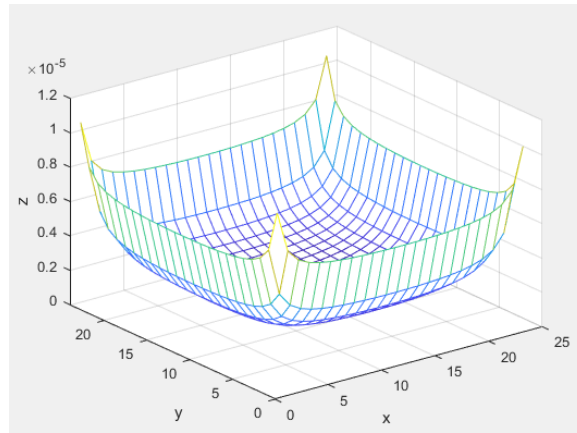


图 4.6 工作区域磁场强度分布

4.3 基于三级差分信号处理的边界识别设计

4.3.1 总体设计

边界识别总体框图如图 4.7 所示，由三级电路构成，前置放大电路、主放大电路和 MCU 数字信号采集电路，感应信号产生后以差分的形式进行传输。前置放大器主要由电感线圈与三极管构成，电感线圈用来检测磁场信号大小，起传感器的作用，三极管构成单管放大器，将感应信号放大，并分离出两路相位相反的互补信号，该互补信号亦即差分信号，输出至后面的主放大电路输入端后，再次进行放大。主放大器也输出差分信号，MCU 的内部 A/D 转换器支持差分输入模式，主放大器输出的差分信号输出给 MCU 内部 A/D 转换器的前端差分放大器。供电电源采用 3.3V，以便与 MCU 匹配，实现低电压电源供电。

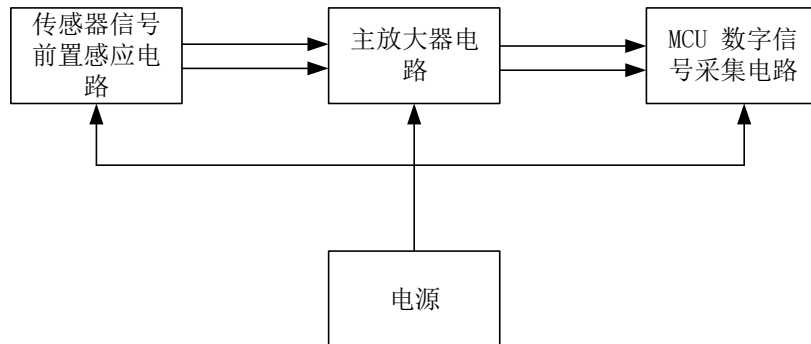


图 4.7 边界识别总体框图

4.3.2 传感器信号前置感应电路

如上节所述，传感信号前置感应电路实现电磁信号感应，电感线圈感应到的信号由三极管构成的单管放大器进行放大，如图 4.8 所示。其中 L11 感应电磁场信号，C20 用于隔离直流信号，R11、R12 和 R13 为三极管设置静态工作点，根据单管放大电路工作原理，设基极电流为 I_b ，集电极电流为 I_c ，发射极电流为 I_e ，则满足式 (4.11) 和式 (4.12)，所以集电极输出信号 U_c 大小为式 (4.13)， U_e 大小为式 (4.14)，其中 R_e 为发射极等效电阻，三极管的集

电极和发射极输出，电磁感应信号叠加在直流偏置上，经过电容后为近似对称的差分信号，并实现电流信号向电压信号的转换。

$$I_c = \beta I_b \quad (4.11)$$

$$I_e = I_c + I_b \quad (4.12)$$

$$U_c = V_{cc} - I_c R_{14} \quad (4.13)$$

$$U_e = I_e R_e \quad (4.14)$$

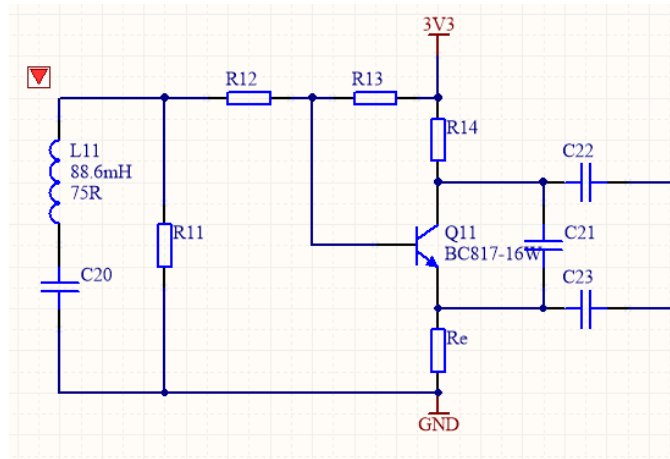


图 4.8 传感器信号放大电路图

基站电流信号近似为梯形信号，如图 4.9 所示，当基站电流上升时，在线圈激发感应电流，而当基站电流恒定时，不会产生变化的磁场，感应电流开始逐渐下降到零，而当基站电流开始下降后，线圈又激发感应电流，但是方向和上升时相反，最后基站电流为零，感应电流开始逐渐下降到零。如果电流恒定时间较短，第一段电流脉冲可能还未到零电流就增加了，可以发现，产生的感应电流信号简单，特征明显。

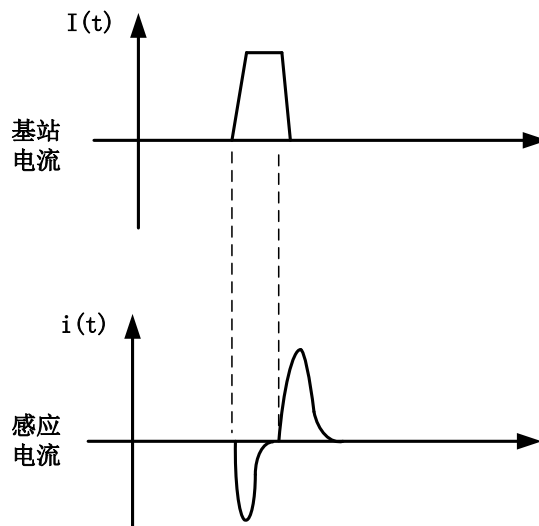


图 4.9 基站电流和感应电流对应关系

线圈电流可通过法拉第电磁感应定律计算，线圈的感应电动势为 E ， M 和线圈所处位置有关， $I(t)$ 为基站电流， L_{11} 为电感值， R 为电感的电阻值， $i(t)$ 为电感电流，将式 (4.15) 代入式 (4.16) 得式 (4.17)。

$$E = -\frac{d\phi}{dt} = -M \frac{dI(t)}{dt} \quad (4.15)$$

$$L_{11} \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = -\frac{d\phi}{dt} \quad (4.16)$$

$$L_{11} \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = -M \frac{dI(t)}{dt} \quad (4.17)$$

采用拉式变换求解线圈的感应电流，如式 (4.18) 所示，线圈电流由脉冲响应和基站电流导数决定， τ_L 为和线圈相关的常数，如式 (4.19) 所示， n 为线圈匝数， μ_0 为磁导率， r_A 为线圈半径， r_a 为绕制线圈的导线半径， ρ_L 为电阻率。最后代入参数可得线圈的感应电流。

$$i(t) = -\frac{M}{L_{11}} [L^{-1}(\frac{1}{s + \tau_L}) * \frac{I(t)}{dt}] \quad (4.18)$$

$$\tau_L = \frac{n\mu_0 r_A [n \ln(8/r_a) - (2n - 1.25)]}{(\frac{2r_A \rho_L}{r_a^2})} \quad (4.19)$$

由于本级输出到后级的传递方式为几十厘米的电线，工作中不免会受到干扰。而且单管放大器输出驱动能力较弱，造成输出的差分信号对称性不佳、波形变形。这样，当信号很微弱时，MCU 不容易准确读取、判断。另外，由于电感是由半人工、半机器绕制的，无论是磁芯品质还是电感量，都存在很大的离散性，造成其感应到的信号不稳定、不一致。2000 平方米面积工作范围，距离边线 5 米时前置传感器信号放大电路输出信号如图 4.10 所示，可以发现干扰信号较大，为了便于后续 MCU 信号特征的分析，增加一级主放大电路对信号进行处理。

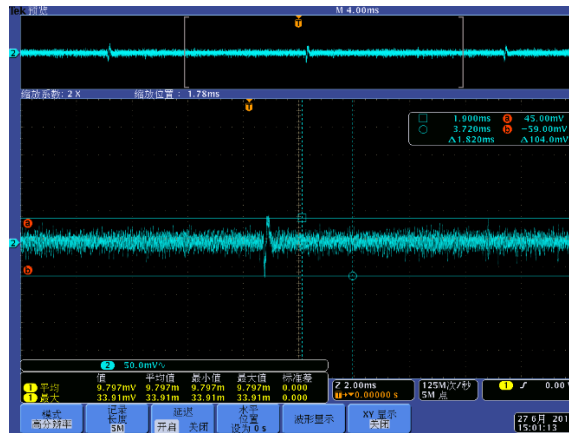


图 4.10 距离边界 5 米前置电路信号输出

4.3.3 主放大电路

由于外界噪声干扰的影响，如果直接对前置感应电路的信号接入 MCU 进行处理，在距离边界较远位置，信号特征很难进行分析，为了对前置电路产生得感应信号进一步处理，增加了一级主放大器信号处理电路，产生一对放大后的差分信号，最后输入到 MCU 的 SDADC 采集端进行模拟量采集。如图 4.11 所示，主放大电路运算放大器构成典型的带有动态范围调整功能的反相放大电路，其中 R5A 为输入电阻，R7A 和 R9A 为反馈电阻，4 个二极管网络组成动态范围调节电路。输出端接有 RC 一阶滤波网络，滤除高频干扰。

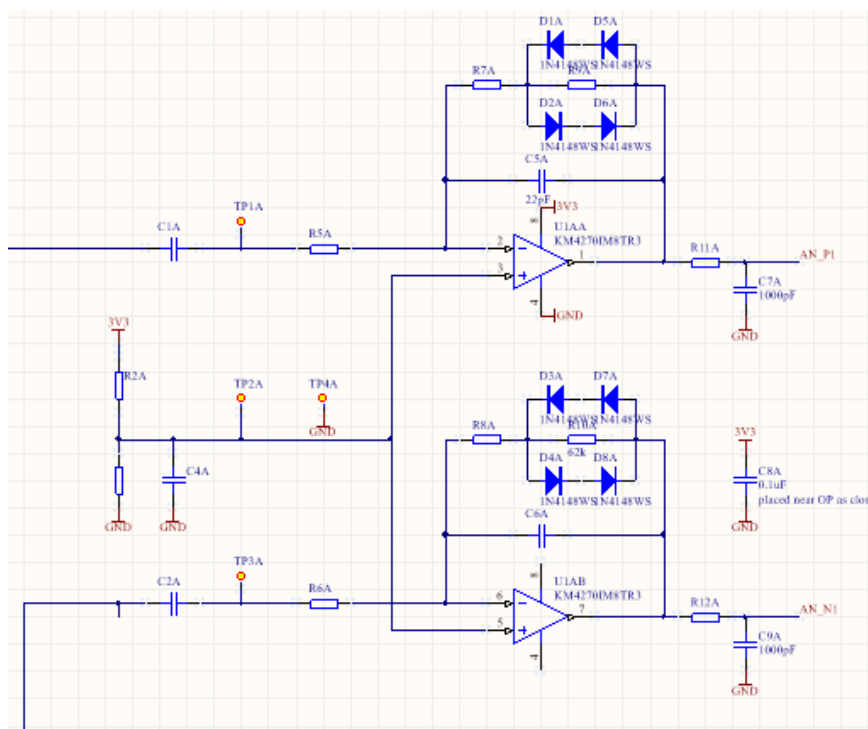


图 4.11 后置信号处理电路原理图

整体电路的增益传输特性表现为两段错开的不同斜率的直线，如图 4.12 所示，以防止输入信号过大，比如对割草电机启动时的干扰信号进行衰减。

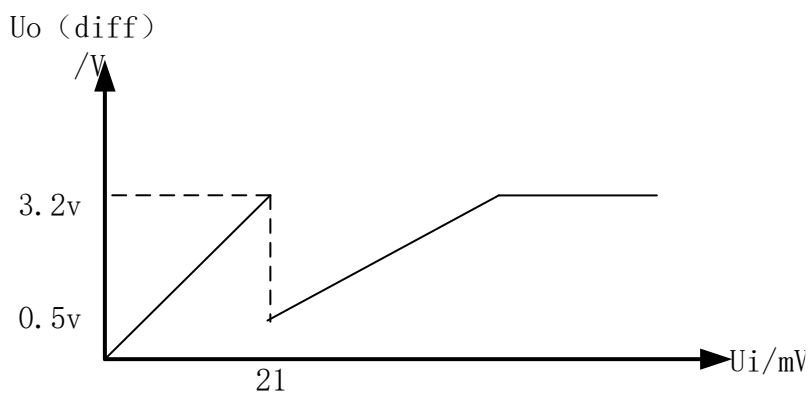


图 4.12 传输特性

两路差分信号经过输入电阻至运放负输入端，在正输入端加上基准电压，将信号电压加上直流偏置，设输出电压为 U_o ，输入电阻为 R_i ，反馈电阻为 R_L ，输入电压为 U_i ，偏置电压为 U_b ，则输出电压满足式 (4.20)。

$$U_o = -\frac{R_L}{R_i}U_i + (1 + \frac{R_L}{R_i})U_b \quad (4.20)$$

经过主放大电路后，最后得到的在距离边线较近的差分输出信号如图 4.13 所示，距离边界 22.5 米较远处差分输出信号如图 4.14 所示，信号特征明显，方便 MCU 信号处理，但还有一定的噪声干扰。

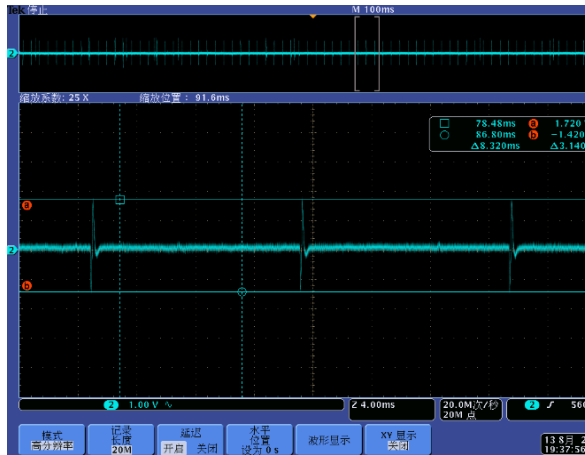


图 4.13 距离边线较近差分输出信号

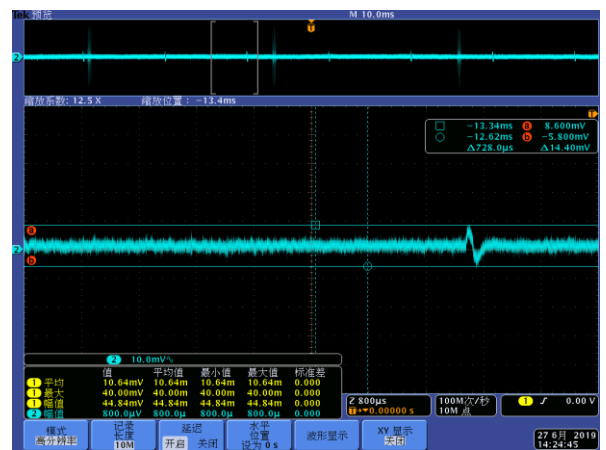


图 4.14 距离边界 22.5 米较远差分输出信号

4.3.4 数字信号采集电路

两路差分模拟信号输入到 MCU 的 SDADC 进行模拟量采集，SDADC 为 Sigma-delta A/D 转换器，支持差分输入模式，包括调制器和数字滤波器，在信号非常小，易受噪声影响时性能更佳，MCU 信号处理结构图如图 4.15 所示。

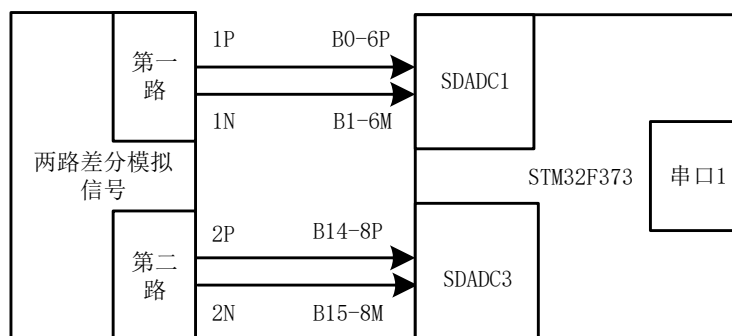


图 4.15 MCU 电路结构图

SDADC 采用 Sigma-delta 调制，采用过采样、噪声整形、数字滤波等技术，实现对输入信号低通，对量化噪声高通的特性，通过数字滤波实现高分辨率的数字采样。在过采样技术下，和奈奎斯特采样 A/D 相比，设功率谱密度为 $P_e(f)$ ，过采样频率为 f_s ，奈奎斯特采样频率为 f_N ，量化噪声功率谱密度如图 4.16 所示。

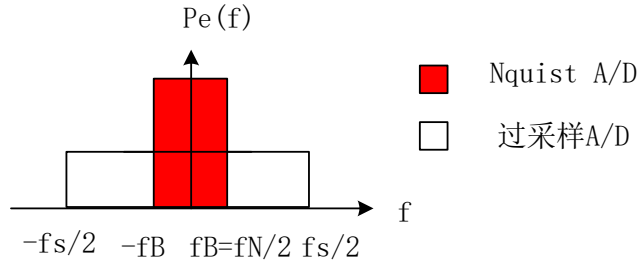


图 4.16 量化噪声功率谱密度

设过采样比为 OSR ，ADC 位数为 N ，最大量化信噪比为 $SQNR_{\max}$ ，如式 (4.21) 所示，所以 OSR 提高一倍，信噪比提高 3dB，另外噪声整形可进一步降低带内噪声能量。

$$SQNR_{\max} = 1.76 + 6.02N + 10\log_{10}(OSR) \quad (4.21)$$

在工作区域较小信号强度情况下，SDADC 的采样值如图 4.17 所示，可以发现噪声信号基本趋于零，信号特征明显。

[96]	-19	short
[97]	-22	short
[98]	-22	short
[99]	-22	short
[100]	-164	short
[101]	-956	short
[102]	-1856	short
[103]	-2035	short
[104]	-1652	short
[105]	-1094	short
[106]	-440	short
[107]	778	short
[108]	1996	short
[109]	2416	short
[110]	2220	short
[111]	1758	short
[112]	1276	short
[113]	836	short
[114]	476	short
[115]	211	short
[116]	18	short

图 4.17 SDADC 采样值

4.3.5 软件设计

在边界的建立中，基站控制金属导线上产生一个周期约为 14ms，脉宽为 130us 的电流脉冲，所以最后主放大电路输入至 MCU 的 SDADC 的信号周期也为 14ms，为保证在一个采样周期内存在一个信号，设置采样周期略大于一个信号周期时间，SDADC 单通道 DMA 方式连续转换的采样率为 50k 每秒，所以进行 800 次采样。软件总体流程图如图 4.18 所示，首先对系统时钟、GPIO、DMA、串口和看门狗等外设进行初始化，然后对边界识别参数进行初始化，完成初始化操作后，两路 SDADC 开始连续一周期信号进行采样，采样完成后，根据采样数据幅值变化分析是否存在有效信号，如果存在有效信号，进行信号特征分析，连续多次分析后将信号特征通过串口发往智能割草机主控板。

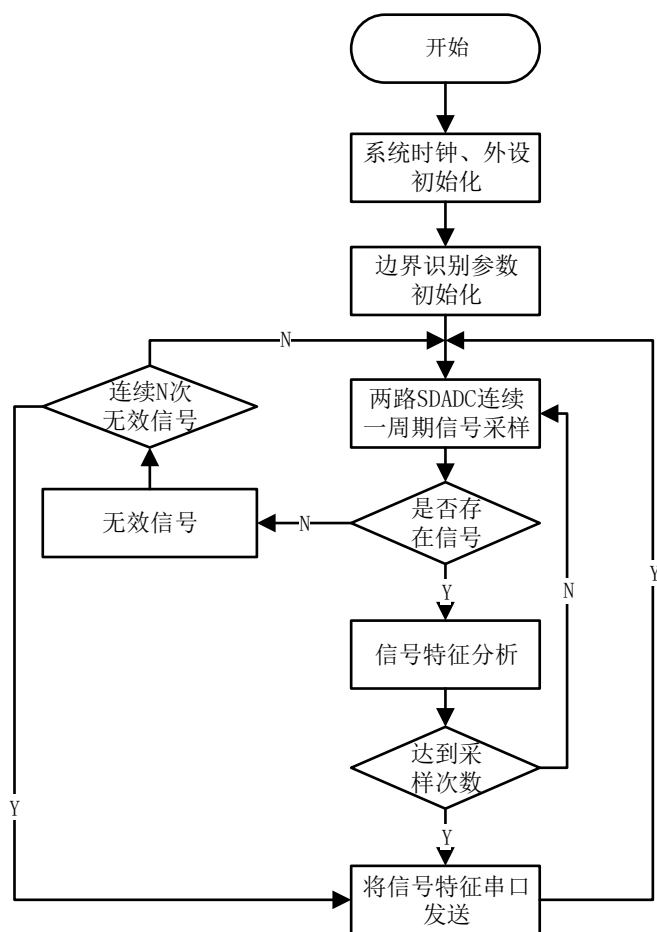


图 4.18 软件总体流程图

经过三级差分信号处理，主放大电路的 RC 一阶滤波网络，差分放大电路的共模信号的抑制，SDADC 对信噪比的提高，最后得到的数字信号特征明显，但是当相邻多户家庭使用智能割草机的情况下，这时候有多个基站同时工作，信号检测时会产生多个信号的情况，如图 4.19 所示，相邻边界的干扰相当与相邻基站产生的界外信号，但是信号幅值相差较大，在信号特征判断上可根据这个特征进行分析。

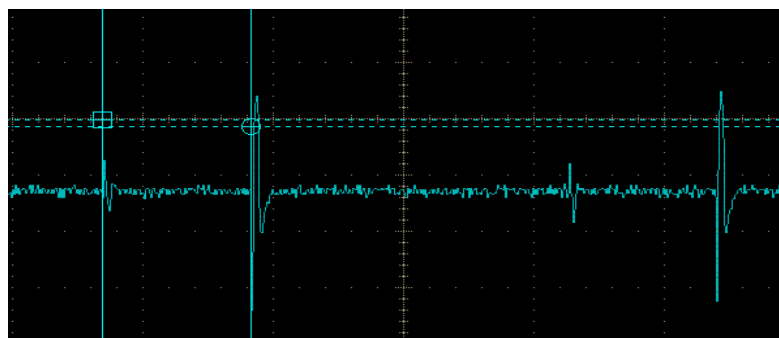


图 4.19 相邻边界干扰信号

结合上述分析，边界信号特征分析流程如图 4.20 所示。首先确定最大信号强度，开始遍历采样数据，确保开始采样不存在信号，避免对采样的截断信号进行分析，遍历采样数据，

找到第一个脉冲，判断信号强度是否符合要求，符合要求继续寻找第二个脉冲，如果极性相反且两个脉冲时间间隔小于某个阈值，则判定找到有效信号，最后确定信号特征，包括极性，信号强度。

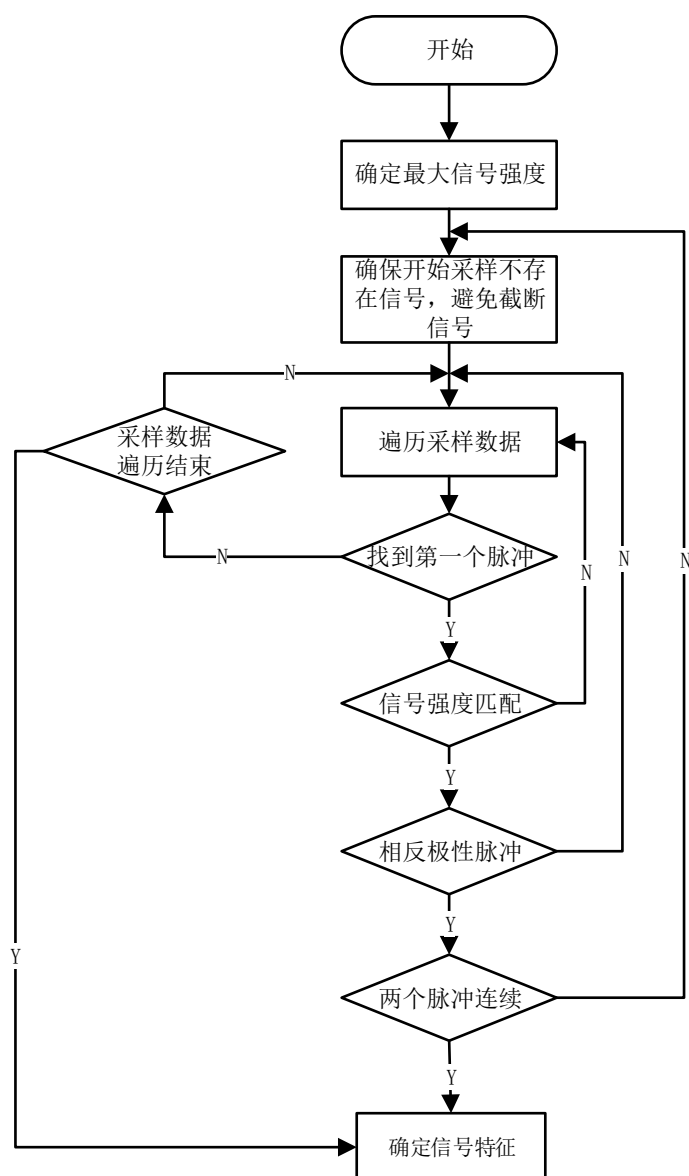


图 4.20 信号特征分析流程

4.4 性能测试

本节对在智能割草机边界识别中，大面积草坪边界信号特征识别、相邻边界信号干扰进行测试，验证本章设计的智能割草机边界识别方法的可靠性。

4.4.1 信号特征识别测试

对大面积草坪边界信号特征识别的正确性，是保证智能割草机正常在特定区域工作的前提，根据信号特征中的信号强度，智能割草机可根据信号强度判断工作区域大致范围，控制运动速度，提高割草效率，以及为智能割草机多传感器融合定位提供辅助条件。所以大面积

草坪信号特征识别的测试主要测量主放大电路差分信号输出信号特征和 MCU 处理识别结果的一致性，以及在距离边线一定距离范围上信号强度的区分度，以评估本章工作区域识别方法对于 2000 平方米草坪上边界识别的可靠性。

边界信号特征识别测试环境如图 4.21 所示，在该环境下构建一个边长为 45m 的正方形草坪工作区域。



图 4.21 信号特征识别测试环境

边界信号特征识别测试方案图如图 4.22 所示，取边长为 45m 正方形的大面积草坪距离边界-1~22.5 米距离上的-1~4 米和 17.5~22.5 米，以及对角线上的 0~2 米为测试点，通过示波器测量主放大电路的差分输出，通过串口调试助手观察 MCU 串口输出的信号识别结果，对比两者，评估信号特征识别的可靠性。

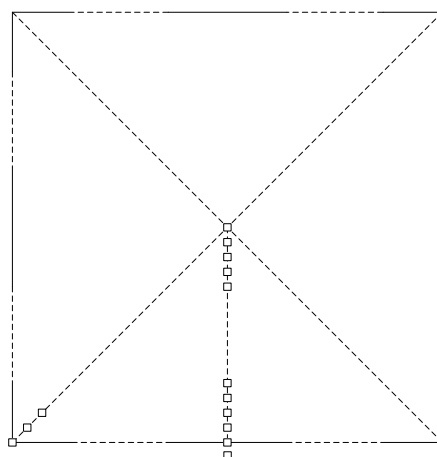


图 4.22 信号特征识别测试方案图

测试结果如表 4.1 信号特征测试结果表所示，结果表明对于边界信号的极性都能正常识别，MCU 识别的信号极性和所在工作区域信号极性一致，MCU 识别信号的幅值和主放大电路差分信号幅值基本一致。当距离边界距离较近时，信号区分度较大，距离较远时信号区分度变小，而噪声小于 30mv，可以准确识别。

表 4.1 信号特征测试结果表

测试点	主放大电路差分信号幅值/mv	识别信号极性	识别信号幅值/mv
中线-1 米	889	界外	915
中线 0 米	3080	界内	3056
中线 1 米	1560	界内	1425
中线 2 米	1430	界内	1507
中线 3 米	768	界内	743
中线 4 米	607	界内	623
对角线 0 米	3190	界内	3173
对角线 1 米	2010	界内	2123
对角线 2 米	1670	界内	1597
中线 18.5 米	375	界内	333
中线 19.5 米	310	界内	321
中线 20.5 米	315	界内	364
中线 21.5 米	340	界内	357
中线 22.5 米	351	界内	364

4.4.2 相邻边界干扰测试

为了评估在相邻边界信号干扰下信号是否还能正常识别,进行相邻边界干扰测试。相邻边界干扰测试环境如图 4.23 所示,由于相邻边界干扰信号只在距离边界较近时才会有影响,当距离边界较远时,相邻边界干扰几乎不存在,在草坪上同时构建使多个小型智能割草机工作区域,并同时工作。



图 4.23 相邻边界干扰测试环境图

相邻边界干扰测试方案图如图 4.24 所示,测试范围在一号小型工作区域草坪范围内,在一号草坪周围有三个工作草坪,分别为二号、三号、四号草坪,距离一号草坪 0.5 米距离,将一号草坪标记点设备测试点,通过示波器观察主放大电路差分输出信号,当相邻边界干扰信号与本基站信号重叠以及非重叠的情况下,测试信号特征识别是否正常。

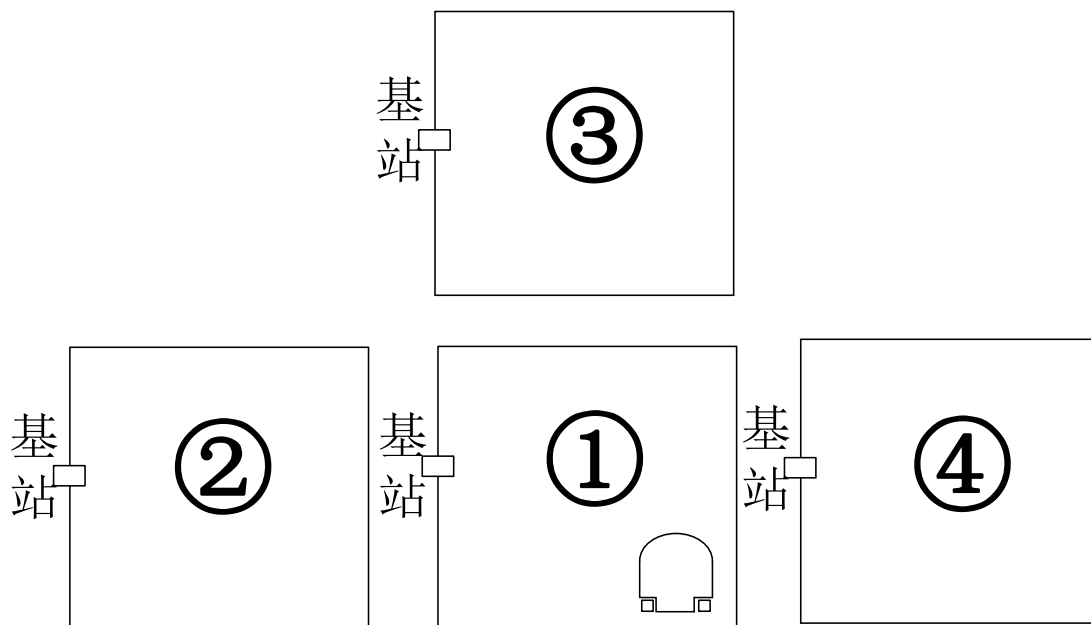


图 4.24 相邻边界干扰测试方案图

相邻边界测试结果如图 4.25 所示,当多个基站同时工作时,通过示波器观察主放大电路的输出,无论在干扰信号和本基站所产生信号非重叠还是重叠情况下,识别的信号边界状态一直为界内状态,信号强度基本一致。



图 4.25 相邻边界干扰测试结果图

4.5 本章小结

本章对基于电磁感应的智能割草机边界识别技术该进研究。首先分析了当前边界识别方法存在的缺点，然后对边界建立和工作区域磁场进行理论分析，设计了一种含有前置传感器信号放大电路，主放大电路，MCU 信号处理的三级差分信号处理方法，对相邻边界干扰以及噪声干扰进行处理，能较为准确地提取感应信号特征，以适应智能割草机在 2000 平方米大面积草坪工作。最后对边界识别进行测试，包括信号特征识别测试和相邻边界干扰测试，在 45m*45m（2000 平方米）的草坪内，噪声信号小于 30mv，而边界信号最小为 300mv，能对边界信号极性进行正确识别，且能排除相邻边界干扰，具有一定的可靠性。

第5章 总结与展望

5.1 本文工作总结

草坪凭借着能美化周边环境，净化空气，防止水土流失，降低噪声等功能成为人们运动休闲的重要场所，草坪已成为一种产业。物联网技术在最近几年得到了飞速发展，物联网相关的产品也越来越多，人们对物联网也越来越熟悉，为了提高景观草坪的观赏价值，促进草坪更好的生长，将人们从繁重的草坪维护工作中解放出来，本课题利用先进的物联网技术和电子技术，结合目前草坪智能养护技术的缺点，设计了一种基于低功耗 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统，本文主要工作如下所述：

1. 对目前草坪养护中的智能割草和智能灌溉的缺点进行分析，在物联网技术的快速发展下，分析构建草坪养护系统的方案，为草坪养护系统设计提供基础。

2. 对草坪养护系统各个部分进行设计。通过在草坪上布置金属导线，形成电子篱笆墙，自动割草机在电子篱笆墙内工作，另外在草坪上部署多个无线土壤湿度计和无线喷灌器，并进行绑定，根据无线土壤湿度计采集的土壤湿度数据，控制无线喷灌器进行草坪灌溉。以智能网关为集中器，无线土壤湿度计、无线喷灌器和自动割草机为节点，构成一个 LoRa 星型网络，实现智能割草和草坪灌溉的协调控制，反馈式灌溉。通过智能网关将各个设备接入互联网，设计云平台 and APP，实现系统远程控制和状态实时监测。

3. 针对物联网使用场景，草坪智能灌溉设备的功耗需求，网络负载的不平衡特点，对无线网络协议栈调度射频状态的 MAC 层进行低功耗设计，针对减小串音功耗和侦听功耗设计了一种自适应负载的低功耗 MAC 协议，首先通过前导码分割降低串音功耗，然后通过一种双阈值负载判定机制自适应调整侦听周期，在保证网络通信量的基础上降低侦听功耗，延长了设备的使用时间。

4. 对基于电磁感应的智能割草机工作区域识别进行改进研究，针对目前基于电磁感应的智能割草机工作区域识别中信号特征较复杂不易判断，信号提取处理方法性能较差，抗干扰能力不强等缺点而导致智能割草机有效工作面积受限，工作时由于干扰易出现故障等问题，设计了一种基于三级差分信号处理的边界识别方法，对相邻边界干扰以及噪声干扰进行处理，能较为准确地提取感应信号特征，以适应智能割草机在 2000 平方米大面积草坪工作。

5.2 展望

本文设计的基于低功耗 LoRa 无线组网技术的草坪养护系统中，解决目前草坪维护工作中比较繁重的草坪修剪和草坪灌溉问题，针对构建的 LoRa 边缘网络具有良好扩展性，以及大数据、云计算、物联网的快速发展背景下，值得继续进行研究：

1. 构建的草坪养护系统中，采集的草坪参数比较有限，后续可以对包括光照强度、温度以及虫害情况等进行监测，以及利用更多的互联网数据，实现草坪的病虫防治、智能施肥，实现草坪培育更加精细化，管理可视化水平更高，决策更加智能化。

2. 为了提高割草效率，针对较大面积的草坪，结合构建的 LoRa 无线网络良好的扩展性，可构建一站多机的智能割草模式，多台智能割草机实时通信，通过网络统一控制，协同作业，特别针对较大草坪，极大提高割草效率，另外针对此应用需要对 LoRa 网络数据通信的可靠性和实时性做进一步优化。

3. 草坪灌溉的高效性还需进一步提升，结合后续对草坪更多参数的采集，综合更多的采集数据对草坪灌溉进行智能决策，根据草坪的生长需求实现真正的按需灌溉。

致 谢

时间转瞬即逝，在杭州电子科技大学电子信息学院，我真切的感受到学校及学院浓厚的学术氛围和高效的科研能力，也深深地意识到自己在学术方面的不足及与别人的差距。过去的三年是学生生涯中最珍贵的财富，感谢给予我帮助的每一个人，也感谢在杭电的学习生活带给我的一切。

首先，感谢我的导师陈科明副教授，老师严谨的教学态度、渊博的学识积累及勤勉的工作精神都让我敬佩不已。在三年的学生生涯中，我对陈老师严厉的教导铭记于心，也感动于老师对我们亲力亲为的指导和鼓励。在今后的学习、工作和生活中，我定当牢记老师的教诲，督促自己不断进步，在此谨向我最敬爱的陈老师表达我最诚挚的敬意和衷心的感谢。

感谢我的同门虞盛峥、周雪梅、薛佳帆和乔冠同学，我的室友张建楠和袁博同学，在学习、工作和思想上都给予了我莫大的帮助和鼓励，也感谢我的师弟师妹，在学校为我提供的一切帮助，能够和他们成为同学和朋友我感到非常荣幸。

感谢我的父母及家人，感谢你们这三年来对我的支持和鼓励，在我面临人生选择的迷茫之际，为我排忧解难，使我能够顺利完成学业。

最后，感谢论文评阅老师和答辩委员会的各位老师！再一次向帮助过我的老师和同学们表达我最诚挚的感谢和问候，这几年的生活因你们的存在而精彩。

参考文献

- [1] 孙兆祐.浅析园林草坪的作用及优缺点[J].国土绿化,2013,28(10):46.
- [2] 单华佳,李梦璐,孙彦,周禾.近 10 年中国草坪业发展现状[J].草地学报,2013,21(2):222-229.
- [3] 彭乔.园林景观中草坪景观的营造与养护管理[J].建材与装饰,2018,14(11):57-58.
- [4] 周文培,张航向.浅述灌溉对草坪草生长发育的影响[J].防护林科技, 2008,25(1): 43-44.
- [5] 李贵娴,郑海霞.浅谈草坪的养护管理[J].现代园艺,2019,41(15):207-208.
- [6] 余伟婷.2018-2019 中国物联网发展年度报告[J].物联网技术,2019,9(9):3.
- [7] Tan L, Wang N. Future internet: The internet of things[C]//2010 3rd international conference on advanced computer theory and engineering (ICACTE). IEEE, 2010, 5: V5-376-V5-380.
- [8] 郭正琴,王一鸣,杨卫中,冯磊,杨绍辉.基于模糊控制的智能灌溉控制系统[J].农机化研究,2006,18(12):103-105+108.
- [9] 张崇礼.基于 STM32 的远程智能灌溉系统[D].秦皇岛:燕山大学,2017,23-30.
- [10] 杨辉.基于 ZigBee 技术的智能灌溉系统设计[D].成都:电子科技大学,2018,35-37.
- [11] Al-Ali A R, Al-Mardini M, et al. ZigBee-based irrigation system for home gardens[C]//2015 International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA'15). IEEE, 2015:1-5.
- [12] Kinjal AR, Patel BS, Bhatt CC. Smart Irrigation: Towards Next Generation Agriculture[M]//Internet of Things and Big Data Analytics Toward Next-Generation Intelligence. Springer, Cham, 2018:265-282.
- [13] Kakoty N M, Mazumdar M, Sonowal D. Mobile Robot Navigation in Unknown Dynamic Environment Inspired by Human Pedestrian Behavior[M]//Progress in Advanced Computing and Intelligent Engineering. Springer, Singapore, 2019:441-451.
- [14] Wang K S, Huang C K. Intelligent Robotic Lawn Mower Design[C]//2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). IEEE, 2018:1-5.
- [15] Johansson G, Vogt Duberg J. Economic Potential for Remanufacturing of Robotic Lawn Mowers with an Existent Forward Supply Chain: A case study on Husqvarna[J]. 2019,16(13):9.
- [16] 陈万金,赵春花.智能割草机的关键技术探讨[J].湖南农机:学术版, 2013, 40(4): 156-157.
- [17] 许杰.物联网无线通信技术应用探讨[J].无线互联科技,2018,15(14):19-20.
- [18] Fuller JD, Ramsey BW, Pecarina JM, et.al. Misuse-based detection of Z-Wave network attacks[J]. Computers & Security,2017,15(64):44-58.

- [19]杨静.短距离无线通信技术对比及其应用研究[J].无线互联科技, 2016,12(13): 12-13.
- [20]钱志鸿, 刘丹. 蓝牙技术数据传输综述[J]. 通信学报, 2012, 33(4): 143-151.
- [21]Li Fei,Liu Min,Zhang Yue,Shen Weiming. A Two-Level WiFi Fingerprint-Based Indoor Localization Method for Dangerous Area Monitoring.[J]. Sensors (Basel, Switzerland),2019, 19(19):6-12.
- [22]何燕翔.ZigBee 技术在智能建筑中的应用研究[J].通讯世界,2019,26(09):5-6.
- [23]曾佳.小型无线传感器网络的可靠性研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2015:42-51.
- [24]刘丹.基于网络层的低速无线个域网节能方法研究[D].长春:吉林大学,2010:24-26.
- [25]赵琰琰,蒋遂平.基于 LoRaWAN 的 MAC 层协议的研究与改进[J].计算机工程与设计,2019,40(05):1276-1281+1293.
- [26]马灿.基于前缀码的 ZigBee 树形拓扑网络编址算法研究[D].天津:天津大学,2017:13.
- [27]王策.混合无线 Mesh 网络协作式安全路由协议研究[D].长春:吉林大学,2019:21.
- [28]杨磊,梁活泉,张正,司鹏搏.基于 LoRa 的物联网低功耗广域系统设计[J].信息通信技术,2017,11(01):40-46.
- [29]孙利民.无线传感器网络[M].清华大学出版社有限公司, 2005:96-107.
- [30]胡四泉,王俊峰.无线传感器网络的智能低功耗侦听协议[J].通信学报, 2009,30(9): 95-101.
- [31]李希臣,张岩.无线传感器网络低功耗 MAC 协议的研究与应用[J].电脑知识与技术, 2017 23(21):18.
- [32]陈德富.无线传感器网络自适应 MAC 协议研究[D].上海:上海交通大学,2012:37-39.
- [33]于晴瑶.不同种类 MAC 协议的工作机制研究[D].青岛:山东大学,2018:14.
- [34]宋一冰.低功耗广覆盖无线网络物理层的关键技术研究[D].北京:北京交通大学, 2016:25.
- [35]Bor M, Roedig U. LoRa transmission parameter selection[C]//2017 13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS). IEEE, 2017: 27-34.
- [36]柳永波.基于 LoRa 的无线自组网 MAC 协议研究[D].西安:西安电子科技大学,2017:32-37.
- [37]于晴瑶.不同种类 MAC 协议的工作机制研究[D].青岛:山东大学,2018:8-10.
- [38]李威,陈枫.无线传感器网络的发射功率自适应调节算法[J].信息通信, 2019,32(2):19-21.
- [39]null Wei Ye, J. Heidemann, D. Estrin. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]. Proceedings of IEEE Information Communications Conference (INFOCOM 2002). IEEE Computer Society, 2002:1567-1576.
- [40]Cano C, Bellalta B, Sfairopoulou A, et al. A low power listening MAC with scheduled wake up after transmissions for WSNs[J]. IEEE Communications Letters,2009,13(4):221-223.
- [41]李智敏,陈祥光.基于异步 MAC 协议的 WSN 节点通信能耗模型的研究及应用[J].北京理工大学学报,2015,35(2):171-175.
- [42]Bdiri S, Derbel F, Kanoun O.Wireless sensor nodes using energy harvesting and B-Mac

- protocol[C] //10th International Multi-Conferences on Systems, Signals & Devices 2013 (SSD13). IEEE, 2013: 1-5.
- [43] Verma A, Singh M P, Singh J P, et al. Survey of MAC protocol for wireless sensor networks[C]//2015 Second International Conference on Advances in Computing and Communication Engineering. IEEE, 2015: 92-97.
- [44] Roy A, Sarma N. Energy saving in MAC layer of wireless sensor networks: a survey[C]//National Workshop in Design and Analysis of Algorithm (NWDAA), Tezpur University, India.2010:96.
- [45] 张雷.无线传感器网络休眠调度应用研究[D].长春:吉林大学,2014:32-35.
- [46] Thanh Dinh, Younghun Kim, Athanasios V. Vasilakos. L-MAC: A wake-up time self-learning MAC protocol for wireless sensor networks[J]. Computer Networks,2016,25(105):33-36.
- [47] Petersson U, Bergvall B A. Electronic demarcating system: U.S. Patent 7,613,543[P]. 2009-11-3.
- [48] Wang F Y, Gao Z L, Yin H Y. Design of Robot Lawn Mower Based on Computer Vision[C]//Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications,2013,404:624-630.
- [49] 陈奇广.自主移动机器人边界识别与自主返回充电研究[D].南京:南京理工大学, 2008:51.
- [50] 郑鑫.具有路径规划功能的智能割草机研制[D].南京:东南大学, 2014:15-21.
- [51] 杨金龙,赵旭,邬杨波,等.基于电磁感应的割草机器人边界技术研究[J].Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2015,32(11):1443-1447.
- [52] 张晓春.具有无信标边界识别功能的智能割草机控制系统研制[D].南京:东南大学,2018:5.
- [53] 陈建明,王娜,张星.电磁耦合能源接受装置设计[J].电源技术, 2013,37(1):124-126.

附 录

作者在读期间发表的学术论文及参加的科研项目

参加的科研项目：

- [1] LoRa 网络草坪养护系统研发，横向课题
- [2] 智能割草机边界识别研发，横向课题

专利：

- [1] 一种自适应负载的低功耗 LoRa 星型网络通信方法

参加的学科竞赛

- [1] 第十四届全国研究生电子设计竞赛 华东赛区一等奖