

杭州电子科技大学

硕士学位论文

题目： 基于无线组网技术的智慧消防系统设计

研究生 司端杨

专业 电子科学与技术

指导教师 陈科明 副教授

完成日期 2021 年 3 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

基于无线组网技术的智慧消防系统设计

研 究 生： 司端杨

指导教师： 陈科明 副教授

2021 年 3 月

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

Design of intelligent fire fighting system based on wireless networking technology

Candidate: Si Duanyang

Supervisor: Associate Prof. Chen Keming

March, 2021

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：司端杨

日期：2021 年 3 月 19 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：司端杨

日期：2021 年 3 月 19 日

指导教师签名：陈利明

日期：2021 年 3 月 19 日

摘要

火灾已成为生活中多发灾害，人们对消防系统提出更高需求。传统消防系统有线传输存在布线复杂、安装维护成本高等问题，无法满足消防系统发展需求。而使用 Zigbee、WiFi 等技术的无线消防系统在大规模应用上存在覆盖范围小、组网能力差、功耗高等问题。面向远距离、低功耗应用场景的 LoRa 无线组网技术在消防系统上的应用越来越受到重视。

本文设计了基于 LoRa 无线组网技术的智慧消防系统，实现了 LoRa 网关、光电感烟探测器、可燃气体探测器、人体红外探测器等设备的软硬件设计，并且设计了 LoRa 无线网络协议，使这些设备能够互连互通，对探测覆盖区域实时监测，并将 LoRa 网关嵌入到智能消防终端上，对报警实时响应。探测器与网关之间的无线传输方式降低系统安装难度与维护成本。

本文针对消防系统中电池供电终端节点的低功耗需求，从软硬件两方面入手，设计了低功耗的光电感烟探测器和人体红外探测器。并设计了基于 RSSI (Received Signal Strength Indication) 值修正的自适应发射功率控制算法，根据无线通信链路状态实时调节两个终端节点的发射功率，降低功耗延长设备使用寿命。通过实际测试，光电感烟探测器和人体红外探测器的待机功耗 14.55uA，光电感烟然测器可使用 5 年以上，人体红外探测器可使用 2 年以上。

针对智慧消防系统无线网络覆盖范围大、节点数量多、密度大的应用需求，并结合实际应用场景特点，本文采用网状拓扑结构，设计了多跳传输机制，扩大无线网络覆盖范围以及节点接入数量，同时设计了一应一答、网络检测、特殊数据处理等多种网络通信机制，保证系统可靠性。通过实际测试，设计的无线网络室内水平通信距离 150 米，垂直距离为 2 层楼高度，通信延时小于 1.2 秒。

关键词：LoRa 无线组网，智慧消防，低功耗，多跳功能

ABSTRACT

Fire has become a frequent disaster in life, and people put forward higher demand on fire fighting system. Traditional wired transmission of the fire fighting system has problems such as complicated wiring and high installation and maintenance costs, which cannot meet the development needs of the fire fighting system. However, in large-scale applications, wireless fire fighting system using Zigbee, WiFi and other technologies have problems such as small coverage, poor networking capabilities, and high power consumption. The application of LoRa wireless networking technology for long-distance, low-power application scenarios in the fire fighting system has attracted more and more attention.

This paper designs a intelligent fire fighting system based on LoRa wireless networking technology, realizes the software and hardware design of LoRa gateway, photoelectric smoke detector, combustible gas detector and human infrared detector, and designs LoRa wireless network protocol to enable these devices can be interconnected to monitor the coverage area in real time. And the LoRa gateway is embedded in the intelligent fire terminal to respond to the alarm in real time. The wireless transmission mode between the detector and the gateway reduces the difficulty of system installation and maintenance cost.

Aiming at the low power consumption requirements of battery-powered terminal nodes in the fire fighting system, this paper designs low-power photoelectric smoke detectors and human infrared detectors from both software and hardware, and designs adaptive transmit power control algorithm based on RSSI (Received Signal Strength Indication) value correction. According to the wireless communication link state, the transmit power of two terminal nodes can be adjusted in real time to reduce the power consumption and prolong the service life of the device. Through the actual tests, the standby power consumption of the photoelectric smoke detector and the human infrared detector is 14.55uA, the photoelectric smoke detector can be used for more than 5 years, and the human infrared detector can be used for more than 2 years.

Aiming at the application requirements of the intelligent fire fighting system with large wireless network coverage, large number of nodes and high density, combined with the characteristics of actual application scenarios, this paper adpots a mesh topology structure and designs a multi-hop transmission mechanism to expand wireless network coverage and the number of nodes access. At the same time, a variety of network communication mechanisms such as a

response mechanism, network detection mechanism and special data processing mechanism are designed to ensure the reliability of the system. Through the actual tests, the designed wireless network indoor horizontal communication distance is 150 meters, the vertical distance is 2 floors, and the communication delay is less than 1.2 seconds.

Keywords: Lora wireless networking,intelligent fire protection,low power consumption,multi-hop function

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 消防系统无线组网网络方案现状.....	1
1.2.1 消防系统网络部署现状.....	1
1.2.2 无线网络通信技术现状.....	2
1.3 本文主要研究内容.....	3
1.3.1 终端节点低功耗研究.....	3
1.3.2 LoRa 中继技术相关研究.....	4
1.4 本文主要工作及章节安排.....	5
第 2 章 基于无线组网技术的智慧消防系统设计.....	7
2.1 系统总体方案设计.....	7
2.1.1 系统总体框架设计.....	7
2.1.2 系统通信流程设计.....	8
2.2 LoRa 网关设计.....	8
2.2.1 LoRa 网关硬件设计.....	8
2.2.2 LoRa 网关软件设计.....	9
2.2.3 LoRa 网关实物展示.....	10
2.3 光电感烟探测器设计.....	10
2.3.1 光电感烟探测器硬件设计.....	10
2.3.2 光电感烟探测器软件设计.....	12
2.3.3 光电感烟探测器功能测试.....	12
2.3.4 光电感烟探测器实物展示.....	13
2.4 可燃气体探测器设计.....	14
2.4.1 可燃气体探测器硬件设计.....	14
2.4.2 可燃气体探测器软件设计.....	15
2.4.3 可燃气体探测器功能测试.....	16
2.4.4 可燃气体探测器实物展示.....	17

2.5 人体红外探测器设计	18
2.5.1 人体红外探测器硬件设计	18
2.5.2 人体红外探测器软件设计	19
2.5.3 人体红外探测器功能测试	19
2.5.4 人体红外探测器实物展示	21
2.6 本章小结	22
第 3 章 基于自适应发射功率控制算法的低功耗机制设计	23
3.1 自适应发射功率控制算法改进	23
3.1.1 RSSI 损耗模型	23
3.1.2 RSSI 修正	24
3.2 低功耗总体方案设计	24
3.3 终端节点硬件低功耗设计	26
3.3.1 硬件低功耗整体设计	26
3.3.2 红外发射、接收驱动电路设计	28
3.4 终端节点软件低功耗设计	29
3.4.1 低功耗软件总体设计	29
3.4.2 自适应发射功率控制算法设计实现	30
3.5 自适应发射功率控制算法测试	33
3.6 终端节点功耗测试	34
3.6.1 测试方案	34
3.6.2 测试数据	35
3.6.3 结果分析	36
3.7 本章小结	38
第 4 章 LoRa 无线网络的多跳机制设计与实现	39
4.1 网络框架设计	39
4.1.1 网络设备类型	39
4.1.2 网络拓扑结构设计	39
4.1.3 网络总体框架	40
4.2 LoRa 无线网络设计	41
4.2.1 网络协议栈结构设计	41
4.2.2 数据帧格式	42
4.2.3 网络关键机制设计	43
4.3 多跳机制设计	49
4.3.1 网络情况分析	49

4.3.2 多跳机制实现.....	51
4.4 无线组网网络测试.....	54
4.4.1 单跳通信距离测试.....	55
4.4.2 多跳功能测试.....	57
4.4.3 通信延时测试.....	59
4.5 本章小结.....	60
第 5 章 总结与展望.....	61
5.1 总结.....	61
5.2 展望.....	61
致 谢.....	63
参考文献.....	64
附 录.....	67

插图目录

图 1.1	无线传输节点能耗分布图.....	4
图 2.1	系统总体框架.....	7
图 2.2	LoRa 网关与节点通信流程.....	8
图 2.3	LoRa 网关硬件框架.....	9
图 2.4	LoRa 网关软件流程图.....	9
图 2.5	LoRa 网关原理图.....	10
图 2.6	LoRa 网关 PCB.....	10
图 2.7	LoRa 网关实物图.....	10
图 2.8	光电感烟探测器框架.....	10
图 2.9	光电感烟探测器软件流程图.....	12
图 2.10	光电感烟探测器原理图.....	13
图 2.11	光电感烟探测器 PCB.....	13
图 2.12	光电感烟探测器电路板.....	13
图 2.13	光电感烟探测器实物.....	13
图 2.14	可燃气体探测器框架.....	14
图 2.15	可燃气体探测器软件流程图.....	15
图 2.16	可燃气体探测器原理图.....	17
图 2.17	可燃气体探测器 PCB.....	17
图 2.18	可燃气体探测器电路板.....	17
图 2.19	可燃气体探测器实物.....	17
图 2.20	人体红外探测器框架.....	18
图 2.21	人体红外探测器软件流程图.....	19
图 2.22	人体红外探测器距离测试示意图.....	20
图 2.23	人体红外探测器原理图.....	21
图 2.24	人体红外探测器 PCB.....	21
图 2.25	人体红外探测器电路板.....	22
图 2.26	人体红外探测器实物.....	22
图 3.1	修正方法效果比较.....	25
图 3.2	红外对管驱动电路.....	28
图 3.3	光电感烟探测器总体流程图.....	29

图 3.4 人体红外探测器总体流程图	30
图 3.5 终端节点发射功率调节流程图.....	33
图 3.6 自适应发射功率控制算法测试结果.....	34
图 3.7 光电感烟探测器实物图.....	34
图 3.8 人体红外探测器实物图.....	34
图 3.9 功耗测试电路示意图	35
图 3.10 LoRa 模块发射波形.....	35
图 3.11 终端节点休眠电流.....	36
图 3.12 光电感烟探测器工作周期.....	37
图 3.13 人体红外探测器工作周期.....	38
图 4.1 网状拓扑结构图.....	40
图 4.2 LoRa 网络总体框架.....	40
图 4.3 网络协议栈结构图.....	41
图 4.4 数据帧格式.....	42
图 4.5 端口字段的位定义.....	43
图 4.6 设备信息位定义.....	43
图 4.7 节点入网示意图.....	44
图 4.8 入网机制流程图.....	44
图 4.9 信道检测机制流程图.....	45
图 4.10 退避机制流程图	46
图 4.11 网络重发机制流程图.....	46
图 4.12 一应一答机制流程图.....	47
图 4.13 帧序号生成机制流程图.....	48
图 4.14 网络检测机制流程图	48
图 4.15 特殊数据处理流程图.....	49
图 4.16 零跳网络分析示意图.....	50
图 4.17 一跳网络分析示意图.....	50
图 4.18 多跳网络分析示意图.....	51
图 4.19 节点跳数分配示意图.....	51
图 4.20 LRU 缓存淘汰示意图.....	52
图 4.21 重复帧过滤出机制流程图.....	53
图 4.22 中继转发机制流程图.....	53
图 4.23 中继过滤机制流程图.....	54
图 4.24 测试对象.....	55

图 4.25 测试平面图.....	55
图 4.26 实际测试环境图.....	55
图 4.27 测试平面图.....	58
图 4.28 实际测试环境图.....	58
图 4.29 上位机页面.....	58
图 4.30 延时测试网络部署示意图.....	59

表格目录

表 1.1	常见无线通信技术.....	2
表 2.1	光电感烟探测器功能测试表.....	13
表 2.2	可燃气体探测器功能测试表	16
表 2.3	探测距离 6 米处测试结果	21
表 2.4	探测距离 10 米处测试结果	21
表 3.1	HC32L130J8TA 低功耗模式	27
表 3.2	基于 LoRa 技术的三种射频芯片关键参数.....	27
表 3.3	SX1278 寄存器地址与发射功率对应表.....	32
表 3.4	终端节点功率与接收信号强度 RSSI 值对应表	32
表 3.5	射频参数设置.....	33
表 3.6	光电感烟探测器 $t_{前}$ 时间段测试数据.....	36
表 3.7	光电感烟探测器 $t_{灯亮}$ 时间段测试数据.....	36
表 3.8	人体红外探测器测试数据.....	36
表 4.1	接收数据类型.....	52
表 4.2	LoRa 网关与光电感烟探测器室内同楼层通信距离测试表.....	56
表 4.3	LoRa 网关与可燃气体探测器室内同楼层通信距离测试表.....	56
表 4.4	LoRa 网关与人体红外探测器室内同楼层通信距离测试表.....	56
表 4.5	LoRa 网关与光电感烟探测器室内垂直楼层通信距离测试表.....	56
表 4.6	LoRa 网关与可燃气体探测器室内垂直楼层通信距离测试表.....	56
表 4.7	LoRa 网关与人体红外探测器室内垂直楼层通信距离测试表.....	27
表 4.8	中继转发方案测试数据.....	59
表 4.9	网络延时测试.....	60

缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文全称
AP	Access Point	无线接入点
CAD	Channel Activity Detection	信道活动检测
CCA	Clear Channel Assessment	空闲信道活动检测
DSDV	Destination sequenced distance vector routing	目的节点序列距离矢量
ED	End Device	终端设备
FFD	Full Functional Device	完整功能设备
GFSK	Gauss frequency Shift Keying	高斯频移键控
HWMP	Hybrid Wireless Mesh Protocol	混合路由协议
LoRa	Long Range Radio	远距离无线电
LRU	Least Recently Used	最近最少使用
MAC	Media Access Control	媒体访问控制
OSI	Open System Interconnection Reference Model	开放式系统互联通信参考模型
RE	Repeater	中继器
RFD	Reduce Functional Device	缩减功能设备
RPL	Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks	低功耗有损网络路由协议
RSSI	Received Signal Strength Indication	接收信号强度指示
RTC	Real Time Clock	实时时钟
SF	Spreading Factor	扩频因子
SWSN	Simple wireless sensor network	简易无线传感器网络

第1章 绪论

1.1 研究背景及意义

随着经济的繁荣和科技的发展,城市化进程加快,超高层建筑、大型综合性建筑、地下建筑的数量不断增加,且建筑结构与内部环境越发复杂,火灾隐患点也直线上升^[1]。近几年我国每年火灾发生次数达到数十万起^[2],造成严重的人员伤亡以及不可估量的直接经济损失,由此产生更为迫切的消防安全需求。各类建筑物以及公共场所中的火灾报警系统不断普及,相应的消防设备不断完善,这些系统和设施也在防火救灾中起到了关键的作用,但目前已有的消防报警系统还是存在一定缺陷,以至于阻碍消防系统在远距离、大规模场景中的应用^[3],例如:

(1) 有线方式布线局限性。当前还是有线消防系统占据主流,其采用有线的方式进行数据传输,由检测节点进行信号采集,然后通过 RS485/RS232 等总线以有线网络的方式与监测中心进行通信。但是在安装过程中,需要做大量的管道铺设和管道内穿线等工作,不仅增加安装难度和安装成本,而且不利于运维人员对设备进行定期的检修和维护。

(2) 覆盖范围有限。由于目前房屋建筑结构愈发复杂,层数越来越多,消防系统覆盖范围也越来越大,因此需要放置很多检测设备^[4]。每幢建筑每个楼层都需要放置检测节点设备,因此部署节点数量巨大,传输距离较远。现有消防系统难以满足实际的覆盖范围需求,无法适应监测节点数量多、密度大的现状^[5]。这使得消防盲区不断增加,建筑中火灾隐患点的数量也是直线上升。

因此,利用先进物联网技术手段来设计新型的智慧消防系统,实现对覆盖范围内环境的实时监测,及时准确上报报警信息,降低安装成本和难度,保障消防系统安全运行,意义重大;本文研究的意义体现在三个方面:其一,采用 LoRa 无线组网的通信方式设计消防系统,各探测设备安装位置相对随意,降低安装成本和难度,避免有线消防系统存在的一系列问题;其二,采用网状拓扑结构构建多跳网络,扩大无线网络覆盖范围以及增加节点接入数量,并设计多个网络机制提升网络可靠性;其三,设计低功耗的光电感烟探测器及人体红外探测器,在稳定上报数据的同时降低电池供电设备功耗,延长探测节点寿命。

1.2 消防系统无线组网网络方案现状

1.2.1 消防系统网络部署现状

传统消防报警系统中的传感器探测节点大多采用两条或多条导线经过复杂布线后连接至报警控制器,有线传输方式不仅增加成本和耗材,而且使系统的抗干扰能力降低,维护也困难。因为传输线路极易老化、磨损,使得这类系统误报率、漏报率和发生故障的频率都很高。由此可见有线传输方式已经不能满足消防系统的发展需求,终将会被无线传输方式替代^[6]。

相较于有线传输方式，无线传输方式的优势在于采用无线电进行信号传输而不是用导线传输数据，使得设备安装快速简单。

目前，无线消防系统一般采用物联网架构部署系统，其网络架构主要分为以下两种：

(1) 传感器采集节点通过短距离无线网络，如 WiFi、Zigbee 等技术，将采集数据上报至汇聚网关设备，再由网关将数据发送到后台服务器。

(2) 通过 NB-IOT、GPRS 或 4G 等流量通道，将 NB-IOT、4G 等模组直接集成到传感器节点上，直接将传感器采集节点的数据上传到对应云平台。

不过上述各方案还是存在一定问题，由于建筑物结构不同以及墙体材质的差异，对无线信号存在信号衰减影响。在结构复杂的楼体内采用蓝牙、WiFi 或 ZigBee 部署无线系统，在大规模应用上存在网络节点少、覆盖范围小、功耗大等缺陷^[7]；而采用 NB-IOT、GPRS 或 4G 等流量通道方式部署网络，有较高的流量资费和功耗，明显不适用与采用电池供电、数据量少、位置相对固定的消防监测设备，增加运维费用。

针对以上网络部署的缺陷以及消防报警系统实际的应用需求，对设计的智慧消防系统的网络提出几点要求：

(1) 良好的实时响应特性：智慧消防系统中对环境中的烟雾、可燃气体泄露进行实时监测，一旦环境异常需第一时间做出响应上报报警信号，避免造成人员或财产损失；

(2) 抗干扰能力强：物联网技术发展迅猛，各类无线设备无处不在，为保证网络能可靠地进行通信，所采用的网络技术必须具备一定的抗干扰能力；

(3) 穿透性强：一般情况下各监测节点都安装在建筑物的各个楼层中，由于建筑结构的不同以及墙体材质的差异，会对无线信号产生一定的衰减，所以选择的网络需要有足够强的穿透力。

鉴于上述要求，选择 LoRa 技术作为无线通信方式，其具有远距离、容量大、低功耗、可靠性高的特点，符合本文设计的智慧消防系统的需求。

1.2.2 无线网络通信技术现状

在设计无线网络时，针对应用场景，进行无线网络的通信方式的选择，是构成一个可靠稳定网络的基石。通过不同的技术特性，可以将相应的无线通信技术按照频段、无线协议、传输速率、传输距离等标准进行划分。目前，应用广泛且较成熟的无线通信技术如表 1.1 所示：

表 1.1 常见无线通信技术

	主要频段 (Hz)	无线标准	网络节点数	最大传输速率 /bps	网络类型	调制方式	最大传输距离/ 室外	最大传输距离/ 室内	成本	应用

续表 1.1

Bluetooth	2.4G	IEEE 802.15.1	7	720k	星型	GFSK	50m	10m	低	文件 传输
WiFi	2.4G/5G	IEEE 802.11	32	54M	星型	DSSS	50m	15m	较 高	网络 通信
ZigBee	2.4G	IEEE 802.15.4	65536	250k	mesh	GFSK	500m	20m	低	室内 遥控
LoRaWAN	433M/470/ 868M/915M	LoRaW AN 国际 联盟标 准	5000 ~ 10000	21.8k	星型	LoRa 扩 频	20km	100m	高	无线 抄表

其中 Bluetooth, WiFi, ZigBee 都应用于 2.4G 频段, 存在同频干扰, 且都是基于 IEEE802 的协议。Bluetooth 多用于移动设备、手机之间一对一或一对多的无线数据交换, 传输距离较短, 传输速率适中^[8]。WiFi 多用于家庭和办公室以及公共场合, 为手机、电脑提供联网服务, 传输速率高, 但是通信范围有限^[9]。ZigBee 相比前两者, 具备低功耗传输特性^[10], 在可挂载节点数量、可靠性等方面有一定优势, 但穿墙能力不如 LoRaWAN 工作频段。在室内应用环境中, ZigBee 不占优势。LoRaWAN^{[11][12]}国内的工作频段为 470M, LoRaWAN 协议能够实现远距离通信, 网络容量较大。其物理层采用 LoRa 扩频调制方式, 但是在 MAC 层采用异步 ALOHA 协议^[13], 信道利用率很低, 多个节点设备同时向网关发送数据时, 会有很大的概率产生数据碰撞, 为了数据的可靠传输, 需要进行数据的重发, 不仅影响了通信系统的稳定性, 还浪费了信道的资源, 导致了网络延时的增加。另外 LoRaWAN 部署成本较高, 所以 LoRaWAN 协议依旧不适用于本系统。

经过上述分析, 目前常用的通信协议不能直接应用于智慧消防系统。因此, 结合智慧消防系统应用需求, 自主设计了一种通信协议, 并将该协议命名为 SWSN 协议。该协议和与 LoRaWAN 在物理层都采用 LoRa 扩频调制技术, 具有 LoRaWAN 的特性。在物理层和物理层之上采用了完全不同的设计, 弥补了 LoRaWAN 中信道利用率低的缺点, 保证了本系统的网络通信具有良好的实时性和稳定性。

1.3 本文主要研究内容

1.3.1 终端节点低功耗研究

本文设计的智慧消防系统中的终端节点光电感烟探测器和人体红外探测器是电池供电设备, 由于系统应用环境和节点规模等条件限制, 更换电池往往十分麻烦, 一旦电源能量耗尽, 节点会退出组网, 这将对系统整体功能的实现以及网络生命周期造成直接影响。因此, 对光电感烟探测器和人体红外探测器采取一些列措施, 从软硬件两方面降低终端节点功耗, 从而

达到延长设备使用寿命的目的。

无线通信系统中的终端节点主要由 4 部分构成：传感器模块、MCU 模块、无线通信模块以及电源模块。传感器模块负责采集环境相关数据；MCU 模块处理、存储其他三个模块的数据，负责整个设备的运行管理；无线通信模块负责与集中器进行无线通信；供电模块为其他三个模块提供稳定的供电电压。这四个模块中，除供电模块不是耗能模块外，其余三个模块在采集数据、处理、传输过程中都不同程度地消耗能量。2005 年爱立信研究和发展中心的 Cintia B.Margi 等人使用柯思博公司的 TelosB 节点，分别测量数据传输节点在数据采集、MCU 数据处理以及无线传输时的功耗情况^[14]。测出各部分能耗分布图如下图 1.1 所示：

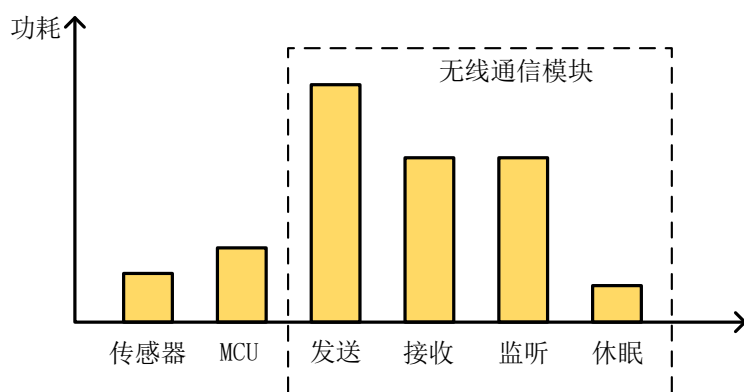


图 1.1 无线传输节点能耗分布图

从图 1.1 可以看出，无线通信模块能耗最大，对总体能耗的影响最大。且在不同模式下的能量消耗：发送>接收/监听>休眠。相对来说，传感器模块以及 MCU 模块的能耗远小于无线通信模块，其中传感器模块的能耗相对于总体能耗可以忽略不计。

有效降低无线通信模块的发射功耗和接收功耗对降低设备总体功耗有显著效果，本文采用基于 RSSI 值修正的自适应发射功率控制算法对无线通信模块的发射功耗进行实时调节，在保证数据正确传输的前提下，降低距离 LoRa 网关较近的终端节点的发射功率，提高距离 LoRa 网关较远的终端节点的发射功率，以降低功耗延长设备使用寿命。同时，为得到能正确反应当前无线链路通信质量的 RSSI 值，对接收机采集到的 RSSI 值进行加权移动均值修正。

1.3.2 LoRa 中继技术相关研究

由于每个无线通信节点的覆盖范围有限，实际应用时，两设备的通信距离远远超过单个节点之间的点对点通信距离，考虑到节点设备硬件资源受限以及系统低成本因素，多跳网络是必然选择。中继技术是实现多跳网络的关键。目前对 LoRa 中继传输的研究主要如下：

文献^[15]提出一种基于 LoRa 无线透传的汇聚节点中继通信组网协议，通过网关广播的方式建立网关到节点的传输链路，通过通信链路映射表进行逐跳传输。

文献^[16]提出基于 LoRa 网关的中继策略设计，针对开阔地区应用场景，基于 Flood 路由协议，使用基于透传模式的网关中继策略；针对城市应用场景，结合 HWMP 路由协议，使

用 WiFi Mesh 组网的中继传输策略。

文献^{[17][18]}提出基于 LoRaWAN 的上行多跳扩展方案，文献^[17]在 LoRa MAC 层帧头加入 Source ID、Destination ID、Number of Routing Entries 等信息，终端节点将数据发给中间节点，中间节点根据 DSDV 路由协议将数据中继至网关；文献^[18]提出最优跳通信策略，根据节点位置生成距离环，在所有可能的环跳组合中，根据瓶颈能耗得到最优跳数。

文献^[19]提出 LoRa 多跳并发传输方案，通过将 LoRa 技术和并发传输（CT）多跳协议相结合，实现基于终端节点中继的并行多跳传输，该方案在中继数据包之间加入时序偏移，同时在数据包之前添加随机定时延迟，保证跳与跳之间的对齐。

文献^[20]提出基于 Contiki 操作系统及 Rime 协议栈的 LoRa 多跳传输方案，以 LoRa 和 Rime 协议组成网关与采集节点的通信结构，节点数据通过 Mesh 网络上报网关。

文献^[21]提出基于 RPL 协议的 LoRa 多跳传输方案，该方案中路由表由扩频因子 SF 构成，通过设计最优 SF 选择机制建立最优路径。

上述各种基于 LoRa 的中继方案针对不同应用场景，采取不同的设计思想，各有优劣。虽然不能直接应用于智慧消防系统中，但其中的一些设计思想值得借鉴。考虑智慧消防系统中设备硬件资源受限，计算能力较弱，所以设计的中继方案在时延较低、通信可靠的前提下，要尽可能降低复杂度。

1.4 本文主要工作及章节安排

本文主要研究的是基于 LoRa 无线组网技术的智慧消防系统，实现了 LoRa 网关、光电感烟探测器、可燃气体探测器、人体红外探测器的软硬件设计，对探测覆盖区域内烟雾浓度、可燃气体浓度以及人体移动的实时检测，并通过 LoRa 网关与消防主机通信，对报警实时响应。通过设计多跳机制，将 LoRa 网关、光电感烟探测器、可燃气体探测器以及人体红外探测器等设备接入多跳网络，扩大无线网络覆盖范围及节点接入数量。设备间的无线互连方式，降低系统安装难度与维护成本。

文章的内容安排如下：

第一章：绪论，首先介绍了基于 LoRa 无线组网技术的智慧消防系统的研究背景及意义、分析当前消防系统无线组网方案以及不足，对本文设计的智慧消防系统无线网络提出相对应的需求，然后对当前常用的无线通信技术分析对比，并对终端节点低功耗设计以及 LoRa 中继技术进行相关研究，为下文系统设计提供方向。

第二章：对智慧消防系统进行了整体的设计，包括 LoRa 网关、光电感烟探测器、可燃气体探测器、人体红外探测器四个设备的硬件设计、软件设计以及各个设备的硬件功能测试，最后进行实物展示。

第三章：对智慧消防系统中的两个终端节点光电感烟探测器和人体红外探测器进行低功耗设计。低功耗方案从硬件、软件两个方面处理降低终端节点能耗，并加入基于 RSSI 值修正的自适应发射功率控制算法，根据无线通信链路状态实时调节两个终端节点的发射功率，

降低节点发射功耗，并对算法进行测试验证。最后对节点功耗进行测试。

第四章：对智慧消防系统的 LoRa 无线网络多跳机制进行设计，首先设计了网络框架；然后结合 LoRa 特性分层设计了协议栈结构以及数据帧格式，并设计多种网络关键机制提高 LoRa 网络通信可靠性；接着对多跳网络进行分析，设计相应机制以实现网络多跳传输；最后对所设计的网络进行测试验证。

第五章：对全文的系统设计和关键技术研究加以总结，并对更深层次的智慧消防系统提出建议和展望。

第2章 基于无线组网技术的智慧消防系统设计

针对研究背景中提出的消防系统存在的缺陷，本文设计了一种基于 LoRa 无线组网技术的智慧消防系统。系统包括 LoRa 网关、光电感烟探测器、可燃气体探测器以及人体红外探测器。通过自主设计的 LoRa 无线组网技术，将各监测设备接入 LoRa 多跳网络，通过 LoRa 网关进行统一管理以及协调控制，实现对探测覆盖范围内环境的实时监测。

2.1 系统总体方案设计

2.1.1 系统总体框架设计

系统以 LoRa 网关为集中器，光电感烟探测器、可燃气体探测器和人体红外探测器为探测节点，构成一个 LoRa 多跳网络，LoRa 网络需支持 3 跳网络，其中市电供电的设备，如可燃气体探测器，可作为中继，电池供电设备，如光电感烟探测器和人体红外探测器，只做终端设备不支持中继。LoRa 网关通过串口嵌入到智能消防终端，实现与系统信息的传递。系统总体框架图如下图 2.1 所示：

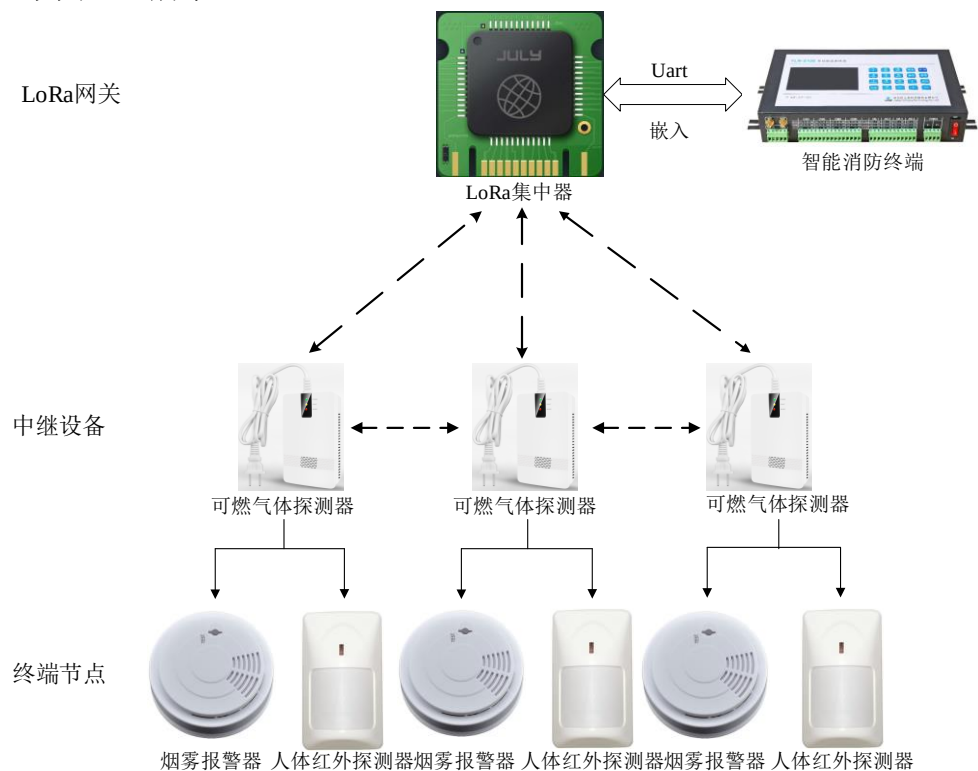


图 2.1 系统总体框架

LoRa 网关:LoRa 网关是整个智慧消防系统的核心部分，其支持光电感烟探测器、可燃气体探测器、人体红外探测器的无线接入，并与接入的节点设备进行无线数据通信。LoRa 集中器通过串口嵌入到智能消防终端上，实现无线网络与智能消防终端的信息交互。

可燃气体探测器：可燃气体探测器负责监测环境中可燃气体浓度，主要检测 CH₄ 和 CO 浓度，在监测区域内发生可燃气体泄露时，探测器声光报警，关闭燃气阀门，并将报警数据上报至 LoRa 网关。可燃气体探测器具备中继功能，不仅主动上报报警数据以及按照运行的冻结周期定时上报冻结数据，还需过滤、转发来自光电感烟探测器和人体红外探测器上报至 LoRa 网关的数据，以及 LoRa 网关下发到终端节点的数据。

光电感烟探测器：光电感烟探测器负责监测环境中的烟雾浓度，在环境中烟参数达到设定阈值时，报警器同时发出声、光报警，并将报警数据上报至 LoRa 网关。烟雾报警器节点还主动上报测试报警数据、电池欠压事件以及按照运行的冻结周期定时上报冻结数据至 LoRa 网关。

人体红外探测器：人体红外探测器快速检测处覆盖区域范围内的人体移动，探测距离分 6 米/10 米两个档位。探测器将报警数据、电池欠压事件以及按照运行的冻结周期定时上报冻结数据至 LoRa 网关。

2.1.2 系统通信流程设计

LoRa 网关与节点的通信流程如下图 2.2 所示，分为节点入网和数据通信两部分。节点入网分为两个步骤，即 JOIN 和 LINK。首先节点向网关发送 JOIN 帧，网关接收到相应的 JOIN 帧，回复节点 JOIN REPLY 帧；然后节点发送 LINK 帧给网关，网关接收到相应的 LINK 帧后，将分配节点的 IP 地址和网络信息装入 LINK REPLY 中发送给节点，至此节点入网成功。

网关与节点进行数据通信时采用一应一答方式，即双方都需要应答回复。节点上报数据时，网关有相应回复帧；网关下发命令时，节点首先进行应答在回复命令。

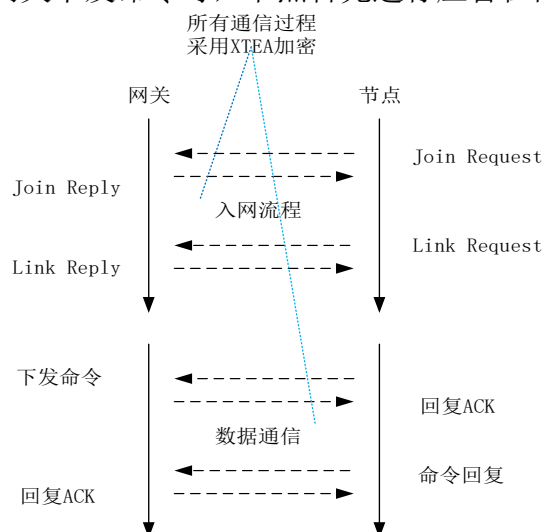


图 2.2 LoRa 网关与节点通信流程

2.2 LoRa 网关设计

2.2.1 LoRa 网关硬件设计

LoRa 网关集中器是整个智慧消防系统的核心部分，其支持中继节点和终端节点的无线接

入，并与接入的节点设备进行无线数据通信。LoRa 集中器通过串口嵌入到智能消防终端上，实现无线网络与智能消防终端的信息交互。其硬件框图如下图 2.3 所示：

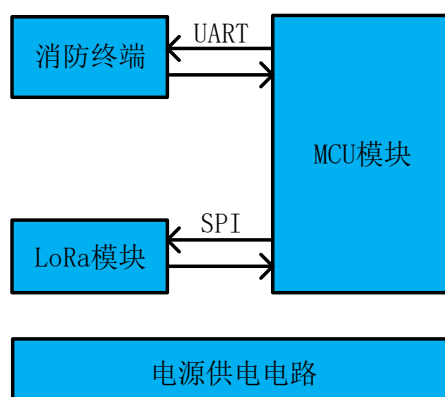


图 2.3 LoRa 网关硬件框架

LoRa 网关嵌入在智能消防终端上，由智能消防终端为其供电；MCU 模块作为控制中心，通过 UATR 方式与智能消防终端进行数据通信；LoRa 通信模通过 SPI 与 MCU 模块进行通信，主要负责与光电感烟探测器、可燃气体探测器以及人体红外探测器等节点设备建立通信连接，保证及时接收来自节点上报的数据。

LoRa 网关采用 HC32F460JETA 作为 MCU，LoRa 模块采用立功科技的 ZM470SX-M 模块。LoRa 网关由智能消防终端提供 6V 电压供电，由 AMS1117-3.3 模块进行 6V-3.3V 转换后为 MCU 模块和 LoRa 模块供电。

2.2.2 LoRa 网关软件设计

LoRa 网关作为整个网络系统的核心，主要功能是管理 LoRa 网络，处理节点上报数据和下发查询指令等功能。LoRa 网关还进行离线检测，对退出组网的节点重新发起连接。其工作流程图如下图 2.4 所示：

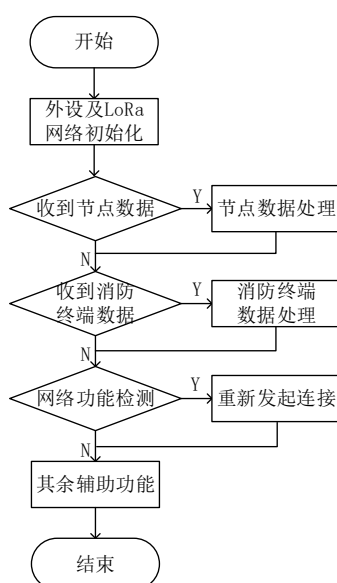


图 2.4 LoRa 网关软件流程图

2.2.3LoRa 网关实物展示

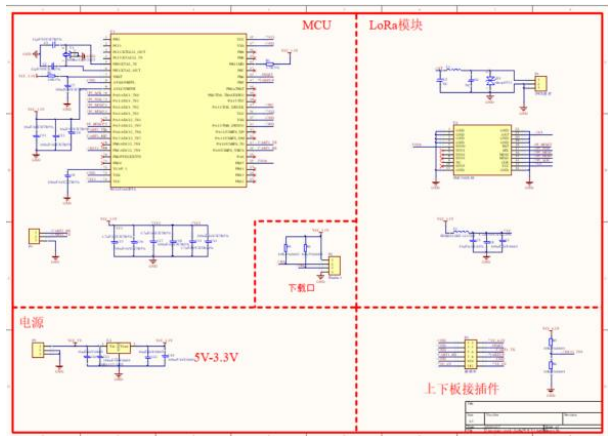


图 2.5 LoRa 网关原理图

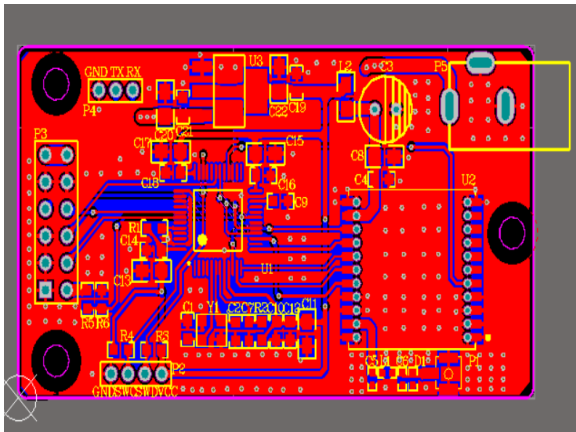


图 2.6 LoRa 网关 PCB



图 2.7 LoRa 网关实物图

2.3 光电感烟探测器设计

2.3.1光电感烟探测器硬件设计

光电感烟探测器在环境中烟雾浓度达到设定阈值时，将火灾报警数据上报至 LoRa 网关，并且探测器应同时发出声、光报警信号^[22]。其电路框架如下图 2.8 所示：

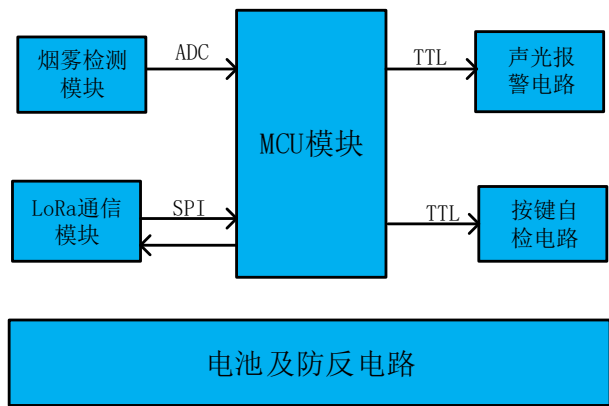


图 2.8 光电感烟探测器框架

光电感烟探测器为电池供电设备，并加入电池防反电路，避免由电池反接造成的设备损

坏，电池为各个模块供电，提供稳定的电压；MCU 模块作为中央处理器，处理各外围模块的信息；LoRa 通信模通过 SPI 与 MCU 模块进行通信，主要负责与 LoRa 网关建立通信连接，保证节点的数据能及时上报给网关；烟雾检测模块采用双向结构迷宫加红外对管的方式每 8 秒定时检测环境中的烟雾，并将采集数据传输给 MCU 模块进行处理判断；声光报警电路在报警时提供声、光指示，指示灯分为报警指示灯和故障指示灯，分别为火警报警和故障报警提供指示；蜂鸣器为各种情况提供提示音，在距离设备三米处，声压可达到国标要求的 80dB 以上；自检功能以按键方式，实现方便运维人员定期对设备进行检查与维护。

由于光电感烟探测器为电池供电设备，所以 CPU 处理器采用了功耗较低的 HC32L130J8TA，有多种工作模式，3V 供电时，深度睡眠模式+RTC 工作只消耗 0.9uA 电流；此外，HC32L130J8TA 自带低电压检测器，通过监测 AVCC 引脚电压对电池电压实时监测，一旦电池电压低于 2.4V，探测器给出欠压提醒。LoRa 模块采用立功科技的 ZM470SX-M 模块。

烟雾检测模块采用双向结构迷宫加红外对管的方式检测环境中的烟雾。烟雾采集过程为：为了降低系统功耗，采用定时检测处理方法，由 MCU 模块控制烟雾检测模块每隔 8 秒检测一次环境中的烟雾，当环境中无烟雾时，由于迷宫结构的存在，红外光接收管接收不到两个红外光发光管发出的红外光，MCU 模块的 AD 采集信号无变化；当环境中产生燃烧后的烟雾时，烟雾颗粒进入双向迷宫结构，对红外光进行散射，使接收管接收到红外光，MCU 模块的 AD 采集信号采集到高于设定阈值的电压，如果 MCU 模块的 AD 采集信号连续三次采集到高于设定阈值的电压，则 MCU 模块控制烟雾检测模块进行连续 3 秒的检测，MCU 控制模块通过连续 3 秒采集到的数据进行分析判断是否发生火灾，一旦确认发生火灾，探测器声、光报警，同时控制 LoRa 通信模块将报警数据上报至 LoRa 网关。

声光报警电路在报警时提供声、光指示。由于设备外壳体积以及电池供电的限制，选择体积较小且低供电电压的压电式蜂鸣器，为了达到报警时距设备 3 米处声压大于 80dB 的要求，需要用三脚电感进行升压处理。通过实际测试，选择参数为 1.6mH/80mH 的三脚电感进行升压。在环境噪音低于 65dB 时，蜂鸣器距报警器 3m 处声压可达到 82.5dB。

按键主要完成自检功能和消音功能。在待机状态下，单击按键，设备开始自检。探测器应能声光报警，说明设备处于正常工作状态。完成自检，则进入待机状态，检测是否需要报警。设备处于报警状态时，单击按键，探测器退出报警状态，进入消音状态，故障指示灯按照 1Hz 频率闪烁，静音时间设置为 15s。静音时间过完以后，进入待机状态，检测是否需要报警；

光电感烟探测器开机后自动进入配网状态，主动发送入网帧，此时报警指示灯和故障指示灯长亮 500ms，蜂鸣器持续鸣叫 500ms。另外，探测器在低功耗状态时，故障指示灯每 60 秒闪烁一次（亮 100ms），表示报警器工作正常；

2.3.2 光电感烟探测器软件设计

光电感烟探测器软件流程图如下图 2.9 所示，上电后设备自动入网。光电感烟探测器对环境烟雾浓度进行检测以及监测电池电压，当环境中烟雾浓度达到报警阈值后设备同时声、光报警，并将报警数据上报至 LoRa 网关；同时对电池电压进行监测，一旦电池电压低于 2.4V，设备进行欠压提示。如若检测环境中无烟雾且电池电压正常则设备进入休眠状态等待下一次 8 秒唤醒检测。

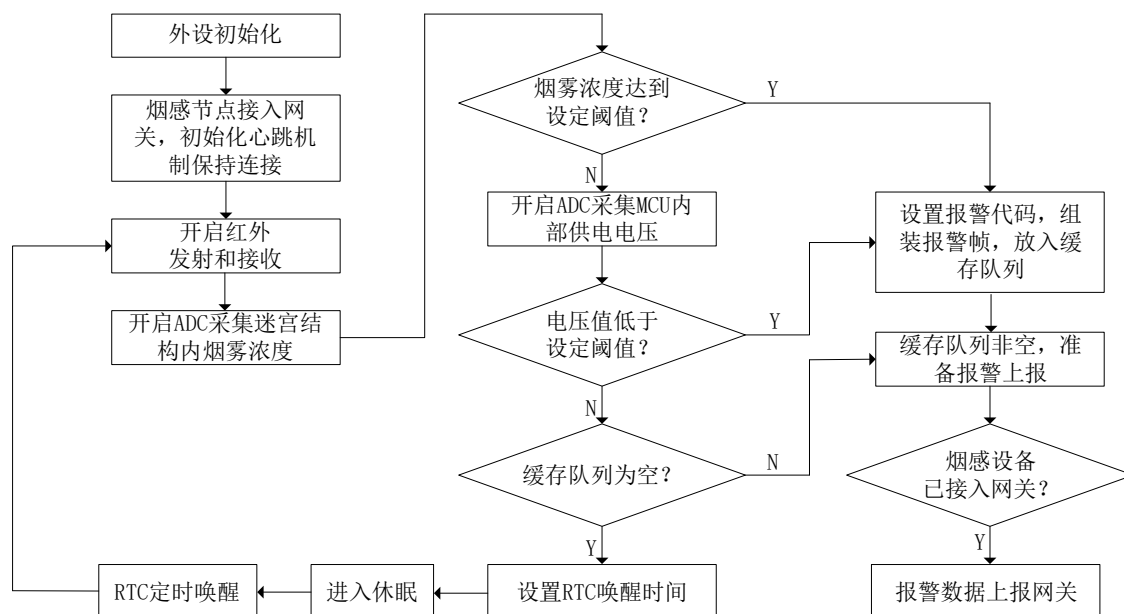


图 2.9 光电感烟探测器软件流程图

2.3.3 光电感烟探测器功能测试

1. 响应阈值及抗干扰测试

测试要求如下：

- (1) 响应阈值测试：当被监视区域发生火灾，其烟雾浓度达到设定阈值（2V）时，探测器应同时发出声、光报警信号；
- (2) 误报测试：报警器应能排除水蒸气等干扰；
- (3) 气流干扰测试：报警器应具备抗气流干扰的能力；

2. 故障功能测试

测试要求如下：

- (1) 低电量状态：当供电电压低于 2.4V，故障指示灯每 50 秒闪烁一次（亮 100ms），同时蜂鸣器发出提示音。
- (2) 故障状态：当 ADC 输入口电压为 0V，或者高于 3V 时，故障指示灯每 10 秒闪烁一次（亮 100ms），表示探测器功能异常。

测试功能点、测试方式及测试结果如下表 2.1 所示：

表 2.1 光电感烟探测器功能测试表

序号	功能测试点	测试方式	测试结果
1	响应阈值测试	用硬纸板燃烧产生烟，把烟吹进迷宫结构，查看 ADC 对应的值	设备初始值电压 1.2V；硬纸板燃烧，ADC 读值电压 2.3V 左右，烟感设备进行报警，同时发出声、光报警信号
2	误报测试	用烧开水后产生的水蒸气测试烟感，看是否会有响应，并记录接收管对应的 ADC 口的电压值	ADC 读值电压 1.5V，设备未进行报警
3	气流干扰测试	上电后将报警器置于通风处，看报警器是否响应；	烟感设备未进行报警
4	低电量状态	用可调稳压电源给设备进行供电，看电源低于 2.4V 时，故障指示灯是否有闪烁	电源低于 2.4V 时，故障指示灯闪烁且蜂鸣器声音提示
5	故障状态	人为将 ADC 输入口电压调节至 0V 和高于 3V	ADC 输入电压异常时，故障指示灯闪烁

2.3.4光电感烟探测器实物展示

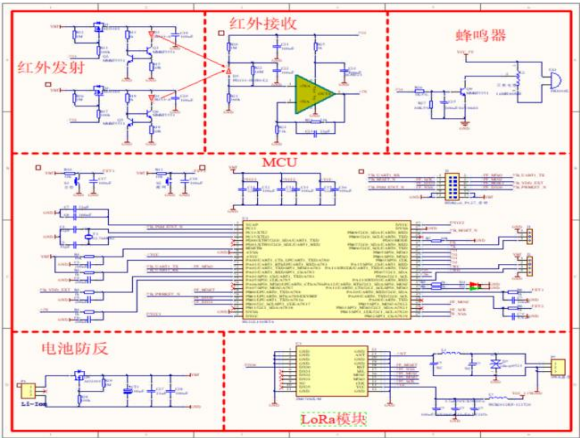


图 2.10 光电感烟探测器原理图

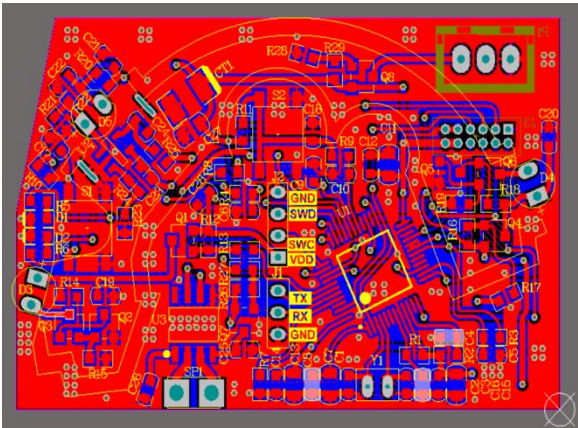


图 2.11 光电感烟探测器 PCB



图 2.12 光电感烟探测器电路板



图 2.13 光电感烟探测器实物

2.4 可燃气体探测器设计

2.4.1 可燃气体探测器硬件设计

可燃气体探测器在监测环境中发生 CH₄ 和 CO 泄露时，将报警数据上报至 LoRa 网关，同时探测器发出声、光报警信号^[23]。其电路框架如下图 2.14 所示：

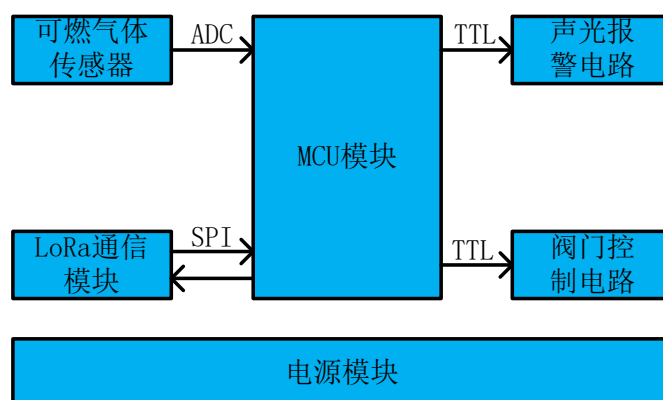


图 2.14 可燃气体探测器框架

电源模块为各个模块提供稳定的电源电压；MCU 模块作为中央控制器，处理各外围模块的信息；LoRa 通信模块通过 SPI 与 MCU 模块进行通信，主要负责与 LoRa 网关建立通信连接，保证节点的数据能及时上报给网关；可燃气体探测器采集环境中可燃气体浓度，并将采集数据传输给 MCU 模块进行处理判断；阀门控制电路在发生可燃气体泄漏时控制阀门及时关闭；声光报警电路在报警时提供声、光指示，指示灯分别为正常工作、泄露报警、以及故障报警提供指示；蜂鸣器为各种情况提供提示音，在距离设备三米处，声压可达到国标要求的不小于 70dB 且不大于 115dB；自检功能以按键方式实现，方便运维人员定期对设备进行检查与维护。

可燃气体探测器采用市电供电，选择 MLA10A-12 作为 AC220V-DC12V 电源模块，后续经 DC-DC 芯片 SY8293 进行 12V-5V 转化以及 LDO 芯片 AMS1117-3.3V 进行 5V-3.3V 转化后给各模块进行供电。

可燃气体探测器既是中继器又是终端节点，与 LoRa 网关采用相同的 MCU 芯片 HC32F460JETA 作为 CPU 处理器；LoRa 模块同样采用立功科技的 ZM470SX-M 模块；

可燃气体传感器选择 MQ-7B，其检测 CO 的灵敏度最高，对 CH₄ 也有一定反应，设备上电后要先对传感器进行预热，由加在传感器 2 脚和 5 脚上的 5V 加热电压实现；

声光报警电路中，指示灯在探测器正常监视时显示绿色、报警时显示红色、发生故障时显示黄色；蜂鸣器采用与光电感烟探测器相同的型号，同样用三脚电感进行升压处理，通过实际测试，选择参数为 1.6mH/80mH 的三脚电感进行升压，在环境噪音低于 65dB 时，蜂鸣器距报警器 3m 处声压可达到 98.9dB；

按键主要完成自检功能、阀门开关控制功能以及消音功能。在待机状态下，单击按键，

设备开始自检，探测器应能声光报警，说明声光报警、传感器 AD 采集信号以及传感器使用寿命均为正常状态；同时在待机状态下，双击按键，电动电磁阀门打开，切断电磁阀关闭；再双击按键，电动电磁阀门关闭，切断电磁阀关闭；设备在报警状态下，单机按键，探测器退出报警状态，进入消音状态，报警指示灯的按照 1Hz 频率闪烁，静音时间设置为 15s。

可燃气体探测器开机后自动进入配网状态，主动发送入网帧，此时所有 LED 灯长亮，并在该状态下进行自检，3 分钟后进入待机状态（开机三分钟内主要给传感器进行预热，无法进行任何操作）在待机状态下，正常工作指示灯长亮，表示报警器工作正常，其余灯根据实际状态进行显示，只在待机状态下，双击按键，可以进行阀门的开关控制。

2.4.2 可燃气体探测器软件设计

可燃气体探测器软件流程图如下图 2.15 所示，上电后设备自动入网。可燃气体探测器对环境中可燃气体浓度进行检测以及监测传感器使用寿命，当环境中可燃气体浓度高于设定阈值，设备同时声、光报警，控制阀燃气阀门关闭，并将报警数据上报至 LoRa 网关；同时探测器实时更新传感器使用时长，一旦传感器达到使用期限，立即报警提示更换。

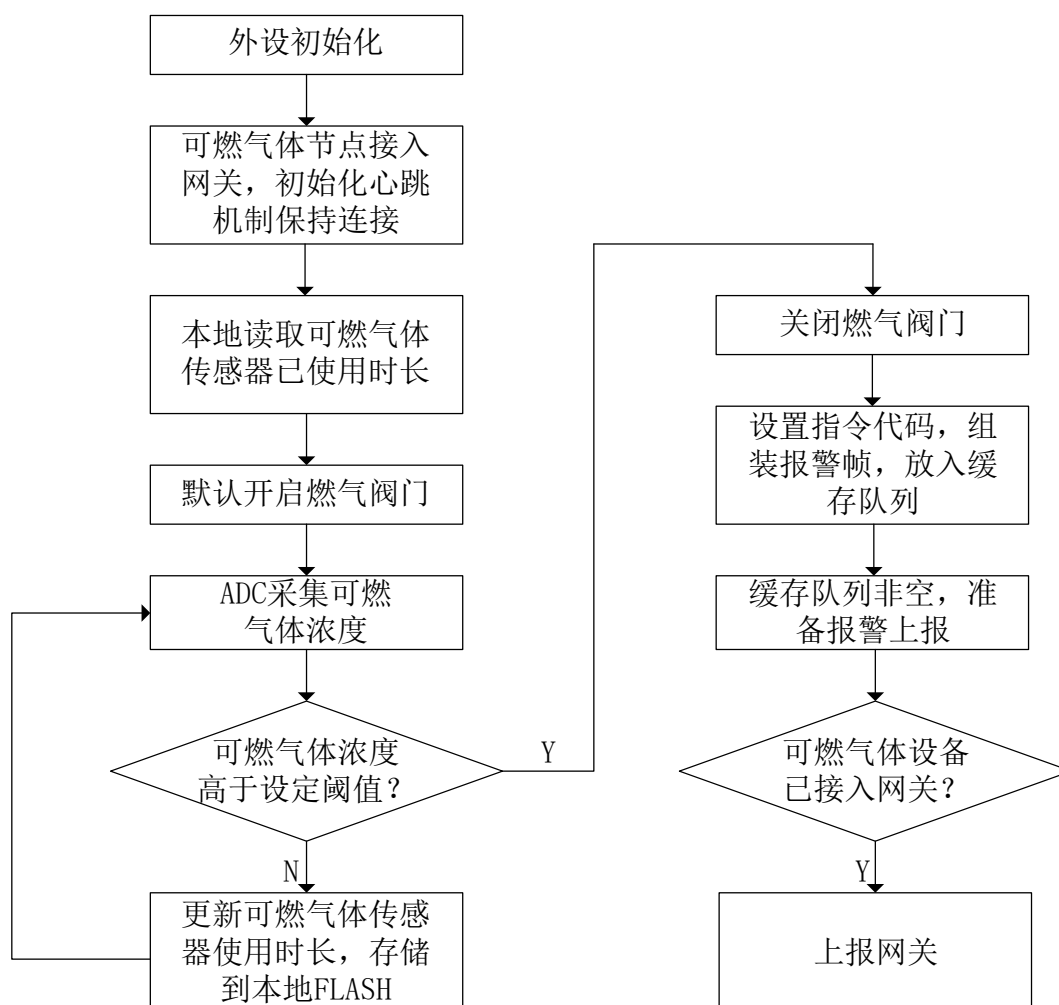


图 2.15 可燃气体探测器软件流程图

2.4.3 可燃气体探测器功能测试

1. 报警动作测试

测试要求如下：

(1) 甲烷报警动作测试：1) 用打火机气体达到设定值时（2V）报警；2) 不同方位选择探头，设备依然可以报警；3) 打火机气体重复测试 6 次，看检测到的 ADC 值是否一致；

(2) 一氧化碳报警动作测试：1) 用打火机气体达到设定值时（2V）报警；2) 不同方位选择探头，设备依然可以报警；3) 打火机气体重复测试 6 次，看检测到的 ADC 值是否一致；

(3) 报警状态测试：当检测到有可燃气体泄漏时，报警器进入报警状态（蜂鸣器声音提示，同时报警指示灯的按照 1Hz 频率闪烁），同时关闭阀门。

2. 故障功能测试

测试要求如下：

故障状态：传感器达到使用期限时，寿命指示灯和蜂鸣器分别按照 1Hz 频率进行闪烁和鸣叫；传感器的 ADC 值不正确：故障指示灯长亮，蜂鸣器按照 1Hz 频率进行鸣叫；

测试功能点、测试方式及测试结果如下表 2.2 所示：

表 2.2 可燃气体探测器功能测试表

序号	功能测试点	测试方式	测试结果
1	甲烷报警动作测试	1.用打火机气体可以使设备进行报警 2.不同方位选择探头，设备依然可以报警 3.打火机气体重复测试 6 次，看检测到的 ADC 值是否一致	1.用打火机气体对着传感器探头，设备能进行报警，初始阈值 0.3V 左右，报警时 ADC 读值 2.4V；10S 左右恢复到正常值 2.不同方位对着探头点气，依然可以报警； 3.用打火机气体重复测试 6 次，ADC 读值都为 2.4V
2	一氧化碳报警动作测试	1.用打火机气体可以使设备进行报警 2.不同方位选择探头，设备依然可以报警 3.打火机气体重复测试 6 次，看检测到的 ADC 值是否一致	1.用打火机气体对着传感器探头，设备能进行报警，初始阈值 0.3V 左右，报警时 ADC 读值 2.5V；10S 左右恢复到正常值 2.不同方位对着探头点气，依然可以报警； 3.用打火机气体重复测试 6 次，ADC 读值都为 2.5V
3	报警状态	将打火机气体喷进传感器探头处，查看设备灯和蜂鸣器是否按照要求报警	蜂鸣器声音提示，同时报警指示灯的按照 1Hz 频率闪烁

续表 2.2

4	故障状态	1.将传感器使用期限改为 2 分钟，看 2 分钟之后，寿命指示灯或不会闪烁，蜂鸣器声音是否区别于报警的声音 2.将 ADC 值调整到 3.1V，蜂鸣器进行鸣叫，故障指示灯亮	1.传感器到达使用期限后，寿命指示灯 1Hz 频率闪烁，蜂鸣器 1Hz 频率鸣叫 2.ADC 值不正确时，故障指示灯常亮，蜂鸣器 1Hz 频率鸣叫
---	------	---	--

2.4.4可燃气体探测器实物展示

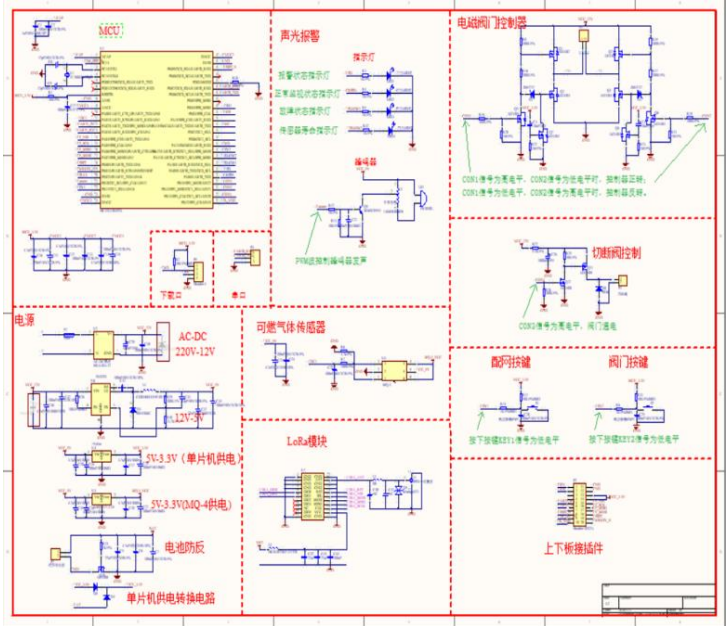


图 2.16 可燃气体探测器原理图

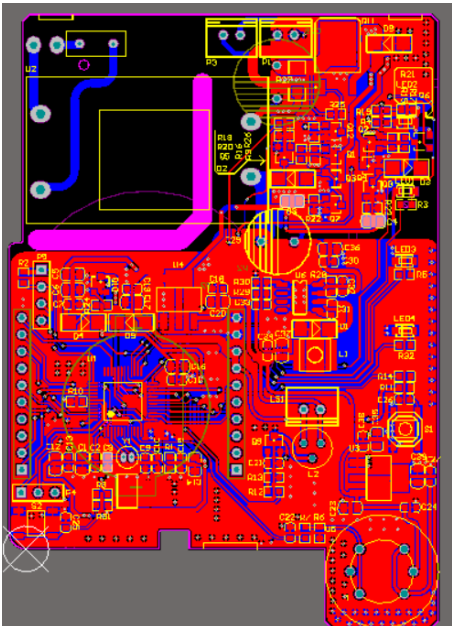


图 2.17 可燃气体探测器 PCB



图 2.18 可燃气体探测器电路板



图 2.19 可燃气体探测器实物

2.5 人体红外探测器设计

2.5.1 人体红外探测器硬件设计

人体红外探测器应能快速探测到探测覆盖区域内的人体移动,并将报警信号上报至 LoRa 网关^[24]。其硬件电路框架如下图 2.20 所示:

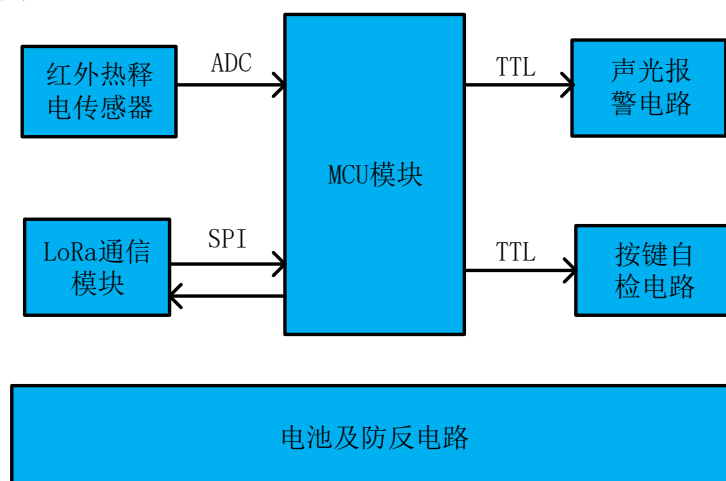


图 2.20 人体红外探测器框架

人体红外探测器同样为电池供电设备,并加入电池防反电路,避免由电池反接造成的设备损坏,电池为各个模块供电,提供稳定的电压;MCU 模块作为中央处理器,处理各外围模块的信息;LoRa 通信模块通过 SPI 与 MCU 模块进行通信,主要负责与 LoRa 网关建立通信连接,保证节点的数据能及时上报给网关;红外传感器负责人体移动探测,并将报警信号通知 MCU 模块。声光报警电路在报警时提供声、光指示,报警指示灯为红色,蜂鸣器为各种情况提供提示音,在距离设备三米处,声压可达到 80dB 以上;自检功能以按键方式实现,方便运维人员定期对设备进行检查与维护。

人体红外探测器也为电池供电设备,所以同样采用功耗较低的 HC32L130J8TA 作为 CPU 处理器,HC32L130J8TA 自带低电压检测器,通过监测 AVCC 引脚电压对电池电压实时监测,一旦电池电压低于 2.4V,探测器给出欠压提醒。LoRa 模块采用立功科技的 ZM470SX-M 模块。

红外传感器选择 S18-L262B-2 数字型热释电红外传感器,当探测区域内由人体移动,红外传感器会检测到热释电红外信号,则 REL 引脚发送高电平给 MCU,通知报警。

报警指示灯设置为红色;由于设备外壳体积以及电池供电的限制,同样选择体积较小且低供电电压的压电式蜂鸣器,选择参数为 1.6mH/80mH 的三脚电感进行升压。在环境噪音低于 65dB 时,蜂鸣器距报警器 3m 处声压可达到 82.5dB;

按键主要完成自检功能,在待机状态下,单击按键,探测器开始自检,探测器应能发出声、光报警信号,说明指示灯、蜂鸣器、AD 采集信号以及电池电压均正常,设备处于正常工作状态。自检完成以后,设备进入待机状态,检测是否需要报警。

人体红外探测器上电 5S 之后，红色报警灯亮 500ms，主动发送入网帧；开机三分钟之后进入低功耗状态。

2.5.2 人体红外探测器软件设计

人体红外探测器软件流程图如下图 2.21 所示，上电后设备自动入网。人体红外探测器主要在探测覆盖区域范围内检测参考目标的移动，如果检测到有人体移动，将报警数据上报至 LoRa 网关；如果探测区域无异常，射频休眠，进入低功耗状态，等待定时唤醒检测。同时监测电池电压，一旦电池电压低于 2.4V，设备进行欠压提示。

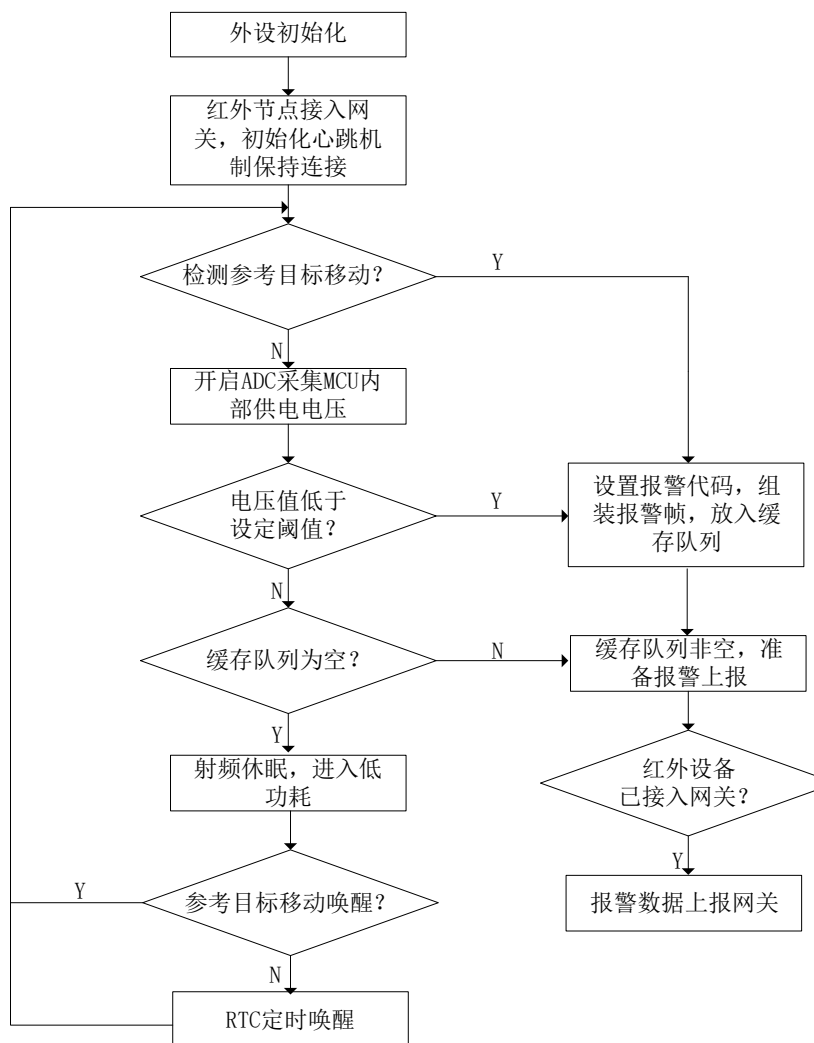


图 2.21 人体红外探测器软件流程图

2.5.3 人体红外探测器功能测试

本次测试主要对探测距离进行测试，探测距离分为 6 米/10 米两档，测试示意图如下图 2.22 所示，图 a 中，BC 路径线的垂线至探测器的距离为探测器最大探测距离。图 b 中，小目标为一直径 30mm、长 150mm 的圆柱形物体。其位于图 a 中 B-C 路径上，距地面 100mm 高。

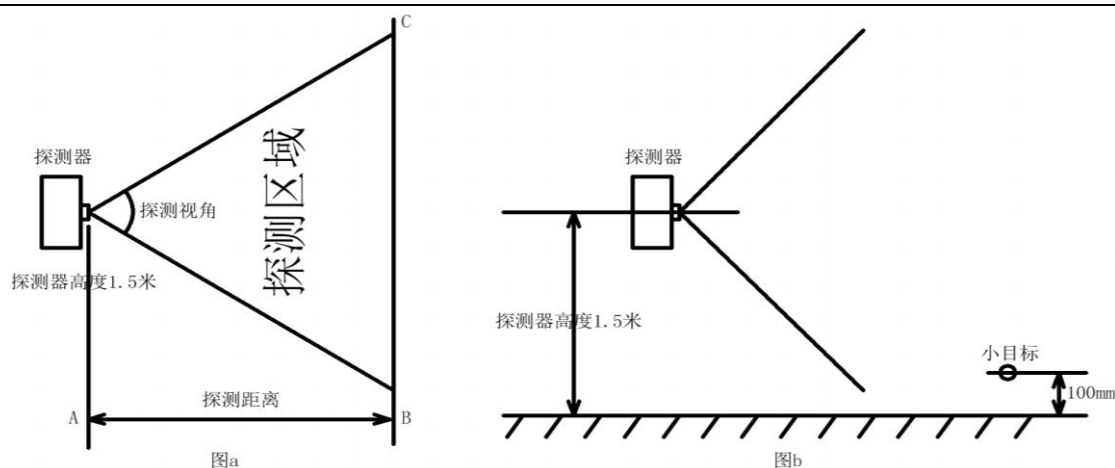


图 2.22 人体红外探测器距离测试示意图

具体测试要求如下：

(1) 探测范围要求：

- ①人体以相对闲懒散步还要慢的速度从 B 点向 C 点移动，当行至探测器探测区域内时，探测器应报警。
- ②人体以相对闲懒散步还要慢的速度从 C 点向 B 点移动，当行至探测器探测区域内时，探测器应报警。
- ③人体以相对锻炼跑步还要快的速度从 B 点向 C 点移动，当行至探测器探测区域内时，探测器应报警。
- ④人体以相对锻炼跑步还要快的速度从 C 点向 B 点移动，当行至探测器探测区域内时，探测器应报警。
- ⑤在探测区域内的其它任意点处，人体分别以慢速、快速，从探测器的左方向右方、从探测器的右方向左方行进，探测器应报警。

(2) 报警状态后的恢复要求：

人体在探测区域内做足以产生报警状态的移动，一旦探测器报警，人体立即停止不动。

5S 后应停止报警。10S 后人体再次重复移动，探测器应能再次报警。

(3) 抗小（动物）目标要求：

- ① 使小目标以人体慢跑速度从 B 点至 C 点和从 C 点至 B 点移动，均应不产生报警。
- ②在探测区域内使小目标以人体慢跑速度，从探测器的左方向右方、从探测器的右方向左方行进，探测器均应不产生报警。

测试结果如下表 2.3 和表 2.4 所示：

表 2.3 探测距离 6 米处测试结果

测试内容	参考目标	移动区域	移动速度	移动方向	响应状态
探测范围	人体	探测区域内	慢速	B 点→C 点	报警
			慢速	C 点→B 点	报警
			快速	B 点→C 点	报警
			快速	C 点→B 点	报警
		探测区域内 任意点	慢速	左侧→右侧	报警
			快速	右侧→左侧	报警
报警后恢复	人体	探测区域内 任意点	中速	左侧→右侧	报警
			中速	右侧→左侧	报警
抗小目标	小目标	探测区域内 所有点	中速	左侧→右侧	不报警
			中速	右侧→左侧	不报警

表 2.4 探测距离 10 米处测试结果

测试内容	参考目标	移动区域	移动速度	移动方向	响应状态
探测范围	人体	探测区域内	慢速	B 点→C 点	报警
			慢速	C 点→B 点	报警
			快速	B 点→C 点	报警
			快速	C 点→B 点	报警
		探测区域内 任意点	慢速	左侧→右侧	报警
			快速	右侧→左侧	报警
报警后恢复	人体	探测区域内 任意点	中速	左侧→右侧	报警
			中速	右侧→左侧	报警
抗小目标	小目标	探测区域内 所有点	中速	左侧→右侧	不报警
			中速	右侧→左侧	不报警

2.5.4人体红外探测器实物展示

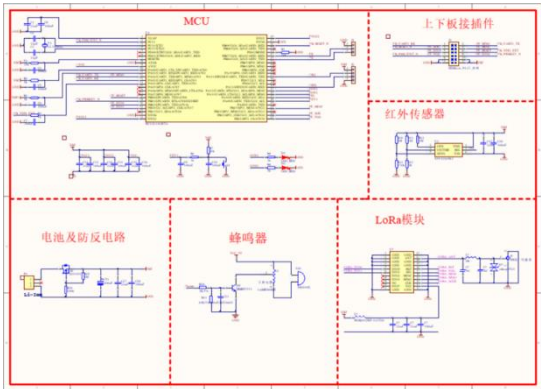


图 2.23 人体红外探测器原理图

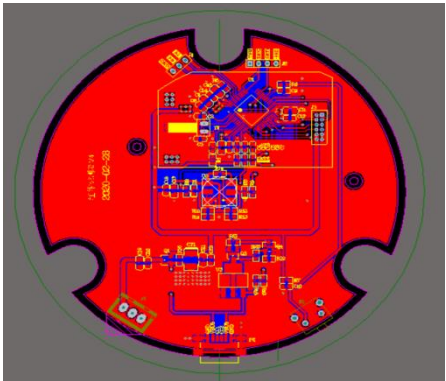


图 2.24 人体红外探测器 PCB



图 2.25 人体红外探测器电路板



图 2.26 人体红外探测器实物

2.6 本章小结

本章对基于 LoRa 无线组网技术的智慧消防系统进行详细设计，首先设计了系统总体框架以及通信流程，然后对 LoRa 网关、光电感烟探测器、可燃气体探测器以及人体红外探测器进行硬件设计和软件设计，并测试设备基本功能。最后进行实物展示。

第3章 基于自适应发射功率控制算法的低功耗机制设计

在基于 RSSI 值的功率调节算法中，仅以当前 RSSI 值作为依据，这种方法适合无线通信链路稳定的应用场景。而在结构复杂、环境多变的建筑中，由于墙体、地面等遮挡物，或人员走动影响无线信号会产生衰减^[25]，接收机接受到的 RSSI 值也会随机波动，采用上述方式将影响功率调节效果。本文在算法中对 RSSI 进行修正，以得到能准确反映当前链路状态的 RSSI 值，利于后续算法对发射功率进行调节。同时对终端节点从硬件、软件两方面进行低功耗设计，延长设备使用寿命。

3.1 自适应发射功率控制算法改进

调节发射功率的前提是正确评估无线链路中的信号衰退情况。经大量实验证明，接收信号强度指示 RSSI 值能很好的反映无线通信的链路质量^[26]。在实际应用环境中，虽然光电感烟探测器和人体红外探测器安装后位置基本不会移动，但无线传输中 RSSI 值还是容易受到多种因素的干扰，如人员走动、地面、墙壁等遮挡物会使 RSSI 值随机波动而产生的小概率的噪音。如果不对 RSSI 值进行处理，会影响发射功率调节效果。因此需要对接收机采集到的 RSSI 值进行修正，选择修正后的 RSSI 值表示当前无线通信链路状态，避免噪声的干扰增加准确性，利于后续算法对发射功率进行调节。

3.1.1 RSSI 损耗模型

在实际通信过程中，RSSI 值由于传输距离的增加会产生衰减。常用对数衰减模型来描述 RSSI 与距离之间的关系^[27]，如式（3.1）所示：

$$[P_R(d)]_{dBm} = [P_R(d_0)]_{dBm} - 10 \times n \times \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X \quad (3.1)$$

式中 $[P_R(d)]_{dBm}$ 表示传输距离为 d 时的接收信号强度， $[P_R(d_0)]_{dBm}$ 表示传输距离为参考距离 d_0 时的接收信号强度， n 为 RSSI 信号的衰减因子， X 表示均值为 0 的正态分布变量。从上式可以看出，RSSI 值随着距离的增加而减小，每个 RSSI 值映射为一个距离值。

上式可以简化为式（3.2），将参考距离 d_0 设置为 1 米，

$$P = A - 10 \times n \times \lg(d) \quad (3.2)$$

式中 P 表示接收机与发射端距离为 d 时的接收信号强度， A 表示距离发射端 1 米处的信号接收强度， n 为 RSSI 信号的衰减因子。在进行无线通信时，由于射频信号的随机性，RSSI 值也会产生波动，此时 RSSI 值与距离不再是一一对应的关系。因此正确进行功率调节的前提是降低 RSSI 值的波动性。

3.1.2 RSSI 修正

3.1.2.1 均值修正

最常用的修正方法是均值修正法^[28]，对多次采样的数据取平均值作为有效结果对功率进行调节，其计算公式如式（3.3）所示：

$$\overline{RSSI} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m RSSI_i \quad (3.3)$$

均值修正法虽然复杂度低，容易实现，但是只有在采集大量数据的情况下，才能显著降低 RSSI 值的波动性，这无疑大大增加了工作量。而电池供电的终端节点硬件结构简单，RAM 和 FLASH 存储空间较小，并不适合大规模数据运算。

3.1.2.2 移动均值修正

在无线通信过程中，当通信环境发生变化时，RSSI 值也会产生随机波动，此时采集的 RSSI 值无法有效表示当前通信链路的状态。通过移动均值修正法，综合当前时刻以及之前若干时刻的采集值，共同进行计算，这样可以有效降低 RSSI 值的波动，从而得到能正确反映当前通信链路状态的 RSSI 值。

移动均值修正的原理是：对于一个长度为 N 的连续采样数据队列，在某一次采集结束后，将队首数据剔除，剩余数据依次前移，并在队尾插入新的采集数据；然后对新形成的队列按照一定规则进行运算，将运算结果作为本次测量结果。具体实现方式为：接收机实时采集得到 RSSI 值，取当前采集的 M 个数据的均值 $\overline{RSSI}_i$ ，得到长度为 N 的均值队列 $(\overline{RSSI}_{i-N+1}, \overline{RSSI}_{i-N+2}, \dots, \overline{RSSI}_i)$ 。对队列中的每个均值乘以权重 $(\alpha_{i-N+1}, \alpha_{i-N+2}, \dots, \alpha_i)$ ，且其权重满足如下条件：

$$\alpha_{i-N+1} + \alpha_{i-N+2} + \dots + \alpha_i = 1 \quad (3.4)$$

那么可得到修正后的值 $\overline{RSSI}_i'$ ，其公式如式（3.5）所示：

$$\overline{RSSI}_i' = \alpha_{i-N+1} \times \overline{RSSI}_{i-N+1} + \alpha_{i-N+2} \times \overline{RSSI}_{i-N+2} + \dots + \alpha_i \times \overline{RSSI}_i \quad (3.5)$$

队列长度 N 越大，修正后的 RSSI 值越平滑，但同时修正值对最近时刻数据的敏感性会降低。根据权重取值的不同，可分为以下三种情况：

（1）简单移动均值修正：选取长度为 3 的队列，并使其在各个时刻的权重相同^[29]，可得到修正后的值为：

$$\overline{RSSI}_i' = \frac{1}{3} \times \overline{RSSI}_{i-2} + \frac{1}{3} \times \overline{RSSI}_{i-1} + \frac{1}{3} \times \overline{RSSI}_i \quad (3.6)$$

（2）加权移动均值修正：选取长度为 4 的队列，为了得到更能反映当前时刻信道状态的 RSSI 值，设置当前时刻的权重大一点，以前时刻的权重值小一点，文献^[30]中，设置权重为 [0.1, 0.2, 0.2, 0.5]，计算公式为：

$$\overline{RSSI}_i' = 0.1 \times \overline{RSSI}_{i-3} + 0.2 \times \overline{RSSI}_{i-2} + 0.2 \times \overline{RSSI}_{i-1} + 0.5 \times \overline{RSSI}_i \quad (3.7)$$

(3) 变化权重移动均值修正: RSSI 值的变化是对通信链路状态的反映, 当 RSSI 值变小时, 说明当前通信链路较差; 当 RSSI 值变大时, 说明当前通信链路较好。所以根据通信链路质量提出变化权重移动均值修正方法^[31], 将本次计算得到的均值 $\overline{RSSI}_i$ 与上一次的修正值 $\overline{RSSI}_{i-1}'$ 进行比较, 对 $\overline{RSSI}_i$ 小于或大于等于 $\overline{RSSI}_{i-1}'$ 两种情况采取不同权重值, 以得到本次修正值 $\overline{RSSI}_i'$, 其公式如下:

$$\begin{cases} \overline{RSSI}_i' = 0.8 \times \overline{RSSI}_i + 0.2 \times \overline{RSSI}_{i-1}', & \left(\overline{RSSI}_i < \overline{RSSI}_{i-1}' \right) \\ \overline{RSSI}_i' = 0.2 \times \overline{RSSI}_i + 0.8 \times \overline{RSSI}_{i-1}', & \left(\overline{RSSI}_i \geq \overline{RSSI}_{i-1}' \right) \end{cases} \quad (3.8)$$

3.1.2.3 修正方法效果比较

在室内条件下, 将 LoRa 网关和终端节点间隔一段距离放置, 分别使用简单均值修正法、加权移动均值修正法以及变化权重均值修正法对终端节点采集到的 50 个 RSSI 数据进行统计, 结果如下图 3.1 所示:

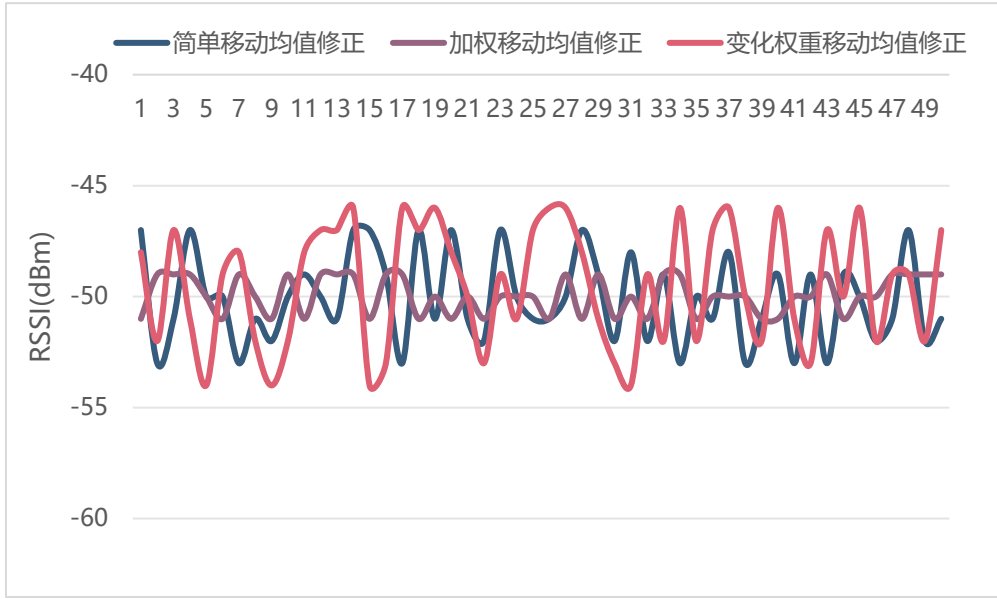


图 3.1 修正方法效果比较

从图 3.1 可以看出, 加权移动均值修正方法对降低 RSSI 值的波动效果更为显著, 故本文选择加权移动均值修正方法对接收机采集到的 RSSI 值进行修正。

3.2 低功耗总体方案设计

对于无线通信模块, 其能量主要消耗在发射损耗、接收损耗以及功率放大损耗^[32]。两个设备距离为 d , 传输 l bit 数据时, 消耗的能量为:

$$E_{TX}(l, d) = E_{TX_elec}(l, d) + E_{TX_amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{elec} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ lE_{elec} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (3.9)$$

式中距离阈值 d_0 为:

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon_{fs}}{\varepsilon_{mp}}} \quad (3.10)$$

其中 $E_{TX_elec}(l, d)$ 为节点设备发射损耗, $E_{TX_amp}(l, d)$ 为节点设备功率放大损耗, 当传输距离 d 大于等于距离阈值 d_0 时, 功率放大损耗使用多路衰减模型, 否则使用自由空间模型^[33]。 ε_{fs} 为自由空间模型功率损耗参数, ε_{mp} 为多路衰减模型功率损耗参数。

节点设备接收 l bit 数据所消耗的能量为:

$$E_{RX}(l) = l \times E_{RX_elec} \quad (3.11)$$

通过 1.3.1 节对终端节点设备不同状态的能耗分析可知, 影响无线终端节点设备功耗的主要因素有以下三部分: (1) 传感器数据采集过程; (2) MCU 模块处理数据运算过程; (3) 射频模块无线传输过程。传感器数据采集部分的耗能最少, 相对总体功耗来说微不足道; 与无线传输过程相比, MCU 模块处理运算过程产生的功耗对总体功耗影响不大, 但在节点设备监测过程中需要 MCU 模块频繁参与完成对系统的控制, 所以这部分功耗也需要考虑进来; 无线传输过程中发射、接收耗能最多, 对总体功耗影响最大, 有效降低这部分功耗对降低总体功耗有显著效果。综上所述, 可以采取如下措施来达到降低终端节点设备整体功耗的目的。

- (1) 降低终端节点的射频收发部分和 MCU 模块的功耗, 从而降低硬件整体功耗;
- (2) 在保证无线信号能稳定可靠传输的基础上, 降低终端节点设备的发射功率;

针对以上考虑, 硬件和软件分别进行低功耗设计, 硬件上使用低功耗的 MCU 芯片和射频芯片以降低设备静态功耗; 软件上根据不同的链路状态, 通过自适应发射功率调节算法降低终端节点设备的发射功率。

3.3 终端节点硬件低功耗设计

光电感烟探测器和人体红外探测器的硬件设计关乎设备的动态功耗和静态功耗。由 3.2 节分析可知, 传感器采集过程、MCU 处理运算过程以及无线传输过程都为耗能部分, 所以针对这三部分进行低功耗设计。传感器将采集数据传输给 MCU 模块进行数据运算, LoRa 模块在 MCU 模块的控制下完成数据传输, 所以选用低功耗 MCU 芯片和 LoRa 芯片以降低这两部分的硬件功耗。传感器能耗对总体功耗影响较小, 传感器技术日渐成熟, 对于人体红外传感器选择低电压、微功耗的热释电传感器进行监测; 对于光电感烟探测器采用双向迷宫结构加红外对管的方式检测烟雾, 对红外发光管驱动采用三极管恒流驱动, 以稳定电流消耗。

3.3.1 硬件低功耗整体设计

MCU 模块作为终端节点设备的核心, 主要负责传感器数据进行处理与转发, 影响其功耗的因素包括动态功耗和静态功耗^[34], 其计算公式如式 (3.12) 和式 (3.13) 所示:

$$P_{Dynamic} = C_{Load} \times f \times V_{dd}^2 \quad (3.12)$$

式中, C_{Load} 表示寄生电容; f 表示工作频率; V_{dd} 表示工作点电压。动态功耗主要由芯片的工作频率和工作电压决定。

$$P_{Static} = I_{leakage} \times V_{dd} = (I_{diode} + I_{subthreshold}) \times V_{dd} \quad (3.13)$$

式中, $I_{leakage}$ 表示漏电流; I_{diode} 表示 PN 结漏电流; $I_{subthreshold}$ 表示晶体管亚阈电流。静态功耗主要取决于芯片内部的晶体管数量以及制造工艺。

MCU 在低功耗模式下, 系统时钟关闭, 设备功耗主要以静态功耗为主; 在运行状态下, 系统时钟开启, 芯片的静态功耗相对于动态功耗可以忽略不计。因此, MCU 模块的功耗取决于芯片制造工艺、内部晶体管数量、工作频率、工作电压、外设开启数目以及工作模式。

通过现有低功耗 MCU 处理器芯片对比, 结合光电感压探测器和人体红外探测器的应用需求, 选择 HC32L130J8TA 作为两个终端节点的处理器, HC32L130J8TA 支持多种低功耗模式, 下表 3.1 显示 MCU 在低功耗模式下外设开启和相应功耗情况:

表 3.1 HC32L130J8TA 低功耗模式

模式	时钟	CPU	外设	功耗
休眠模式	-	停止	运行	35uA
低速工作模式	RCL/XTL	运行	运行	7uA
深度睡眠+RTC	RTC	停止	停止	0.9uA
深度睡眠模式	关闭	停止	停止	0.5uA

通过以上对 MCU 功耗的分析, 由于选定芯片后, 制造工艺、内部晶体管数量以及工作电压已经确定, 所以制定以下 3 种策略来降低 MCU 模块的功耗:

- (1) 关闭未使用的外设接口, 关闭不使用外设的时钟 (PERI_CLKx);
- (2) 在保证任务需求能及时处理的情况下, 通过预分频寄存器降低系统主频以降低功耗;
- (3) 没有任务需要处理时, MCU 立即进入深度睡眠+RTC 模式。

对于无线通信模块而言, 发射功率、传输速率以及调制方式是影响其功耗的主要因素。射频模块的选型原则是在满足数据传输任务的基础上尽量降低其发射功率。相较于传统的 GFSK 调制, LoRa 技术凭借出色的 LoRa™ 远程调制解调技术和前向纠错码技术^[35], 在发射功率相同的情况下可极大的增加传输距离, 能最大程度降低电流消耗, 同时增加无线信号使用的抗干扰能力。所以本文无线通信模块选择 LoRa 技术的射频芯片, 三种 LoRa 技术射频芯片的关键参数如下表 3.2 所示:

表 3.2 基于 LoRa 技术的三种射频芯片关键参数

型号	SX1276	SX1277	SX1278
频率范围 (MHz)	137~1020	137~1020	137~525
扩频因子	6~12	6~9	6~12
带宽 (KHz)	7.8~500	7.8~500	7.8~500

续表 3.2

比特率 (Kbps)	0.018~37.5	0.11~37.5	0.018~37.5
灵敏度 (dBm)	-111~-148	-111~-139	-111~-148

SX1276/SX1277/SX1278 主要区别在工作频段和扩频因子, 由于本文 LoRa 网络以 470MHz 为工作频段, 可以选择 SX1278 芯片作为两个终端节点的 LoRa 通信模块, 本文在设计是直接采用立功电子的 ZM470SX-M 模组, 其内部芯片就是 SX1278。

3.3.2 红外发射、接收驱动电路设计

光电探测器通过双向迷宫结构加红外对管的方式检测环境中的烟雾浓度, 由于迷宫结构的存在, 环境中无烟雾时, 红外光接收管 D5 接收不到两个红外光发光管发出的红外光, MCU 通过 ADC 采集到的电压值为定值; 当环境中产生燃烧后的烟雾, 烟雾颗粒进入迷宫结构, 对红外光进行散射, D5 接收到红外光发光管 D3 和 D4 发出的红外光, MCU 通过 ADC 采集到高于设定阈值的电压值。电路图如下图 3.2 所示:

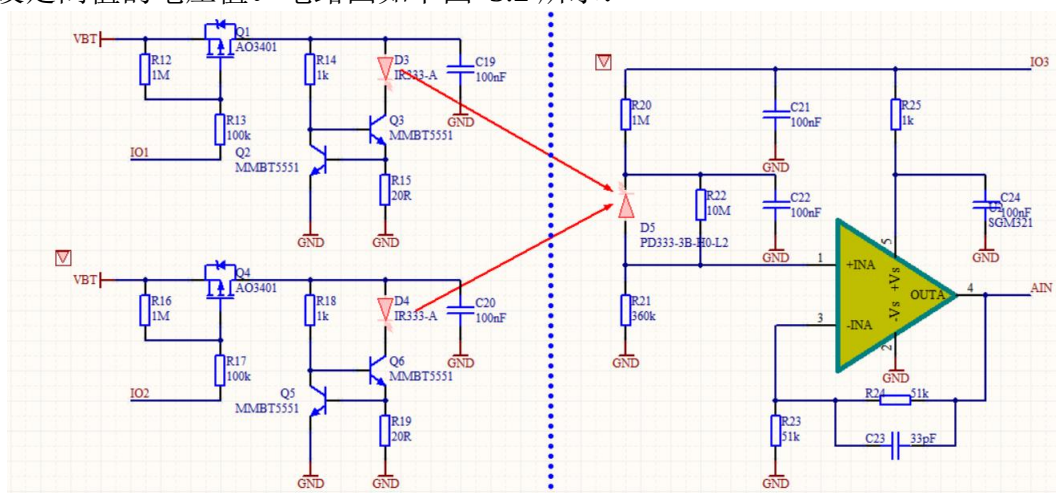


图 3.2 红外对管驱动电路

红外发光管由两个 NPN 三极管进行驱动, 以 D3 驱动电路为例, R14 为启动电阻, 保证检测时 Q3 导通, 电流流过 D3、Q3、R15, 在 R15 上产生压降。如果压降高于 0.7V, 则 Q2 导通, 集电极拉低, 致使 Q3 的基极是低电平, 整个回路被切断。之后 Q3 再次导通, 所以流过 D3 的电流值恒定为 $ID3=0.7V/R15=35mA$ 。两个 NPN 三极管构成简单的恒流电路, 稳定红外对管电流消耗。恒流输出同时延长红外发光管的使用寿命。探测器每隔 8 秒定时检测环境中的烟雾浓度, 非检测期间, MCU 控制 Q1、Q4 关断, 切断驱动电路供电以降低功耗。

红外光接收管与电阻 R20、R21 分压, 经运放放大 2 倍后由 MCU 模块通过 ADC 采集判断处理。运放工作电压由 MCU 提供, 在非检测期间 MCU 切断供电以降低功耗。

3.4 终端节点软件低功耗设计

3.4.1 低功耗软件总体设计

3.4.1.1 光电感烟探测器软件总体设计

光电感烟探测器的主要任务是检测环境中是否有燃烧后产生的烟雾,为了降低设备功耗,采用定时检测处理方法,每隔 8 秒定时唤醒探测器进行检测,非检测期间,设备进入低功耗模式。当检测到烟雾浓度高于设定阈值时,才会唤醒 LoRa 模块,将报警数据上报至网关。上报成功后,LoRa 会继续休眠,设备也重新进入低功耗模式,直到下一次定时唤醒检测或者监测到烟雾浓度异常。光电感烟探测器总体流程图如下图 3.3 所示:

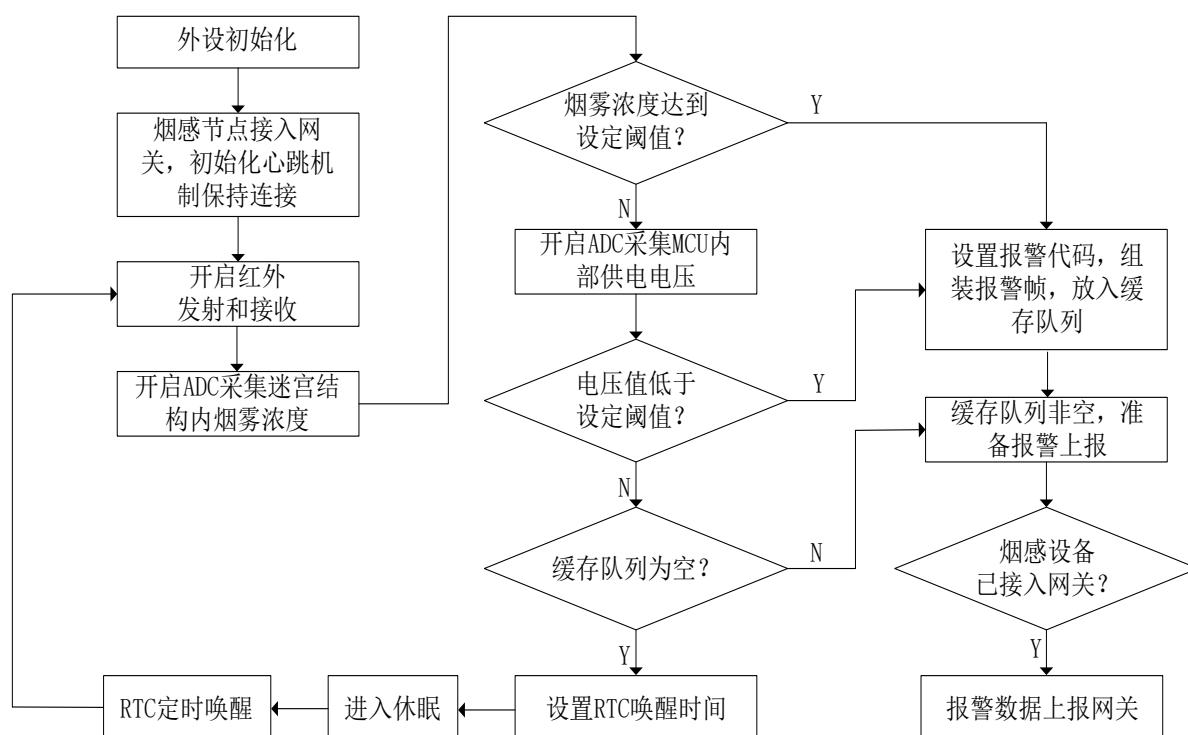


图 3.3 光电感烟探测器总体流程图

3.4.1.2 人体红外探测器软件总体设计

人体红外探测器的主要任务是检测人体在探测覆盖区域范围内的移动,由于终端节点大部分时间在等待事件的发生,因而处于空闲状态,如果探测区域内没有参考目标的移动,则系统立即进入休眠模式以降低功耗,每隔一定时间唤醒。当检测到有人体移动,才会唤醒 LoRa 模块,将报警数据上报至网关。上报成功后,LoRa 模块会继续休眠,设备也重新进入低功耗模式,直到下一次检测到人体移动或定时唤醒检测。人体红外探测器总体流程图如下图 3.4 所示:

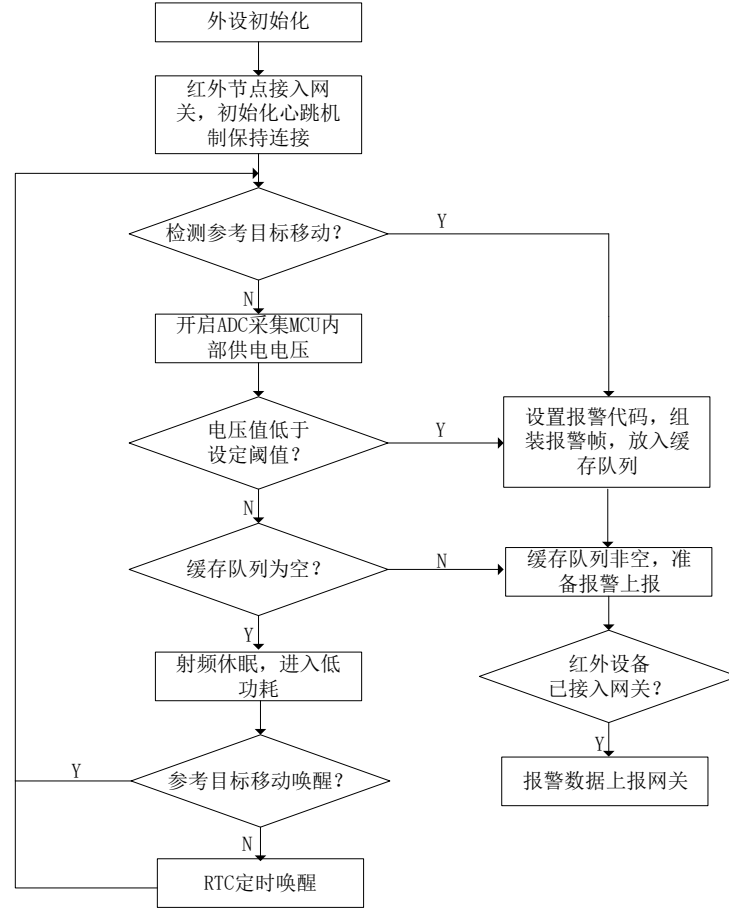


图 3.4 人体红外探测器总体流程图

3.4.2 自适应发射功率控制算法设计实现

在无线传感器网络中, 为保证通信距离和稳定传输, 一般将网络中所有终端节点的发射功率设置为最大值^[36]。本文设计的智慧消防系统中, 终端节点光电感烟探测器和人体红外探测器的安装位置和 LoRa 网关之间并不是等距离分布。对于距离 LoRa 网关较近的终端节点, 不需要很高的发射功率就可以将数据上报; 而对于距离 LoRa 网关较远的终端节点, 其无线链路损耗较大, 所以需要较高的发射功率才能稳定可靠的将数据上报。自适应发射功率控制算法就是在不同的无线链路状态下, 根据信号衰退情况来调节终端节点的发射功率, 从而降低节点设备功耗。

终端节点上报数据时, 靠近网关的终端节点其通信链路质量较好, 网关接收到的 RSSI 值比较大; 远离网关的终端节点其通信链路质量较差, 网关接收到的 RSSI 值比较小。在保证终端节点能稳定可靠上报数据的基础上, 调节不同距离的节点设备的发射功率, 使网关接收到的 RSSI 值大致相同, 可以有效降低通信功耗, 从而延长设备使用寿命。

3.4.2.1 功率控制理论依据

可以用式 (3.14) 表示无线信号的发射功率和接收功率之间的关系^[37]:

$$P_R = \frac{P_T}{d^n} \quad (3.14)$$

式中 P_R 表示接收功率， P_T 表示发射功率， d 表示收发节点之间的距离， n 为传播因子，数值大小由环境决定。

在式 (3.14) 两边取对数可得：

$$P_R(\text{dBm}) = P_T(\text{dBm}) - 10 \times n \times \lg(d) \quad (3.15)$$

对于光电感烟探测器和人体红外探测器，其数据最终上报给 LoRa 网关。设网关的发射功率为 $P_{T_AP}(\text{dBm})$ ，接收功率为 $P_{R_AP}(\text{dBm})$ ，终端节点的发射功率为 $P_{T_ED}(\text{dBm})$ ，接收功率为 $P_{R_ED}(\text{dBm})$ ，由式 (3.15) 可得：

$$P_{T_ED}(\text{dBm}) - P_{R_ED}(\text{dBm}) = P_{T_AP}(\text{dBm}) - P_{R_AP}(\text{dBm}) = 10 \times n \times \lg(d) \quad (3.16)$$

设网关接收功率为 $RSSI_{AP}$ ，终端节点接收功率为 $RSSI_{ED}$ ，代入式 (3.16) 可得：

$$RSSI_{AP} = P_{T_AP}(\text{dBm}) - P_{T_ED}(\text{dBm}) + RSSI_{ED} \quad (3.17)$$

为了保证数据通信稳定性以及降低终端节点设备功耗，需要将 LoRa 网关的接收信号强度值 $RSSI_{AP}$ 控制在一定范围内。在式 (3.17) 中，网关的发射功率 $P_{T_AP}(\text{dBm})$ 为固定值，调节终端节点的发射功率 $P_{T_ED}(\text{dBm})$ 可控制 $RSSI_{AP}$ 值在一定范围内。例如，当 $RSSI_{ED}$ 变大时，可以减小 $P_{T_ED}(\text{dBm})$ ；当 $RSSI_{ED}$ 变小时，可以增大 $P_{T_ED}(\text{dBm})$ ，从而使网关的接收功率 $RSSI_{AP}$ 大致不变。

3.4.2.2 LoRa 模块软硬件设置

SX1278 的发射机有三个射频功率放大器，PA_HF、PA_LF 和 PA_BOOST，分别与外部引脚 RFO_HF、RFO_LF 以及 PA_BOOST 连接。PA_HF 和 PA_LF 为高效率放大器，发射功率可调节范围：-4dBm~+14dBm。PA_LF 支持 525MHz 以下频段，而 PA_HF 支持 860MHz 以上频段。PA_BOOST 为高功率放大器，可覆盖芯片支持的所有频段，发射功率可调节范围：-2dBm~+20dBm。RFO_HF、RFO_LF 引脚输出功率计算公式为式 (3.18) 和式 (3.19)，PA_BOOST 引脚输出功率计算公式为式 (3.20)：

$$P_{out} = P_{max} - (15 - \text{OutputPower}) \quad (3.18)$$

$$P_{max} = 10.8 + 0.6 \times \text{MaxPower} \quad (3.19)$$

$$P_{out} = 20 - (15 - \text{OutputPower}) \quad (3.20)$$

为增大终端节点网络覆盖范围和发射功率可调节幅度范围，选择 SX1278 芯片的 PA_BOOST 引脚作为射频输出口。LoRa 模块通过设置内部寄存器 RegPaConfig 来选择功放和控制输出功率，寄存器地址与发射功率对应如下表 3 所示，为确保所有终端节点能与 LoRa 网关正常通信，终端节点的起始功率均设置为最大值 20dBm。

表 3.3 SX1278 寄存器地址与发射功率对应表

寄存器地址	0x09F1	0x09F3	0x09F5	0x09F7
发射功率 (dBm)	6	8	10	12
寄存器地址	0x09F9	0x09FB	0x09FD	0x09FF
发射功率 (dBm)	14	16	18	20

3.4.2.3 发射功率等级划分

由于 SX1278 芯片的 PA_BOOST 引脚输出功率可调节范围为-2dBm~+20dBm，而接收信号的 RSSI 值范围为-30dBm~-99dBm，发射功率与 RSSI 值不能一一对应；另外，根据实际测试结果，终端节点与 LoRa 网关距离越近，RSSI 值变化范围越大，终端节点与 LoRa 网关距离越远，RSSI 变化范围越小。所以在划分 RSSI 值范围时应使其非均匀分布，即随着终端节点发射功率的增大，RSSI 值与发射功率对应的变化范围应该越小。基于上述分析，为增大终端节点通信距离和发射功率可调节范围，设置 8 个等级的发射功率，并将 RSSI 值具体划分范围与发射功率等级相对应，具体划分如下表 3.所示：

表 3.4 终端节点功率与接收信号强度 RSSI 值对应表

功率等级	发射功率 (dBm)	RSSI (dBm)
1	6	>-50
2	8	-50~-60
3	10	-60~-70
4	12	-70~-80
5	14	-80~-85
6	16	-85~-90
7	18	-90~-95
8	20	<-95

3.4.2.4 算法具体流程

本文设计的自适应发射功率控制算法采用开环功率调节方式。节点收到网关发送的多个数据包后，对接收到的 RSSI 值进行加权移动均值修正，根据修正后的 RSSI 值判断链路质量。节点收到的 RSSI 值通过芯片内部寄存器 RegPktRssiValue 获取，并通过式 (3.21) 进行转换：

$$RSSI[dBm] = -137 + PacketRssi \quad (3.21)$$

式中 $PacketRssi$ 为寄存器直接获取的值。

在设备安装阶段，LoRa 网关会逐一唤醒终端节点对其进行功率调节。调节流程如下：LoRa 网关向终端节点发送多个数据包，终端节点采集到多个 RSSI 值，通过加权移动均值修正方法对采集到的 RSSI 值进行修正得到 $\overline{RSSI}_i'$ ，终端节点根据修正后的 $\overline{RSSI}_i'$ 值对功率进行调节，发射功率与对应 RSSI 值如表 3.4 所示。当终端节点发射功率调节完毕后，会通过丢包

率测试验证相应终端节点在对应发射功率下的数据传输是否稳定可靠。验证流程如下：终端节点向 LoRa 网关连续发送 500 个数据包，如果丢包率小于 1%，终端节点向网关回复 Pa_ConfinOK 指令，该终端节点发射功率调节完毕；如果丢包率大于 1%，终端节点向网关回复 Pa_ConfinFAIL 指令，终端节点发射功率增大一级后再次进行验证，直到所有终端节点调节完毕。自适应发射功率控制算法流程图如下图 3.5 所示：

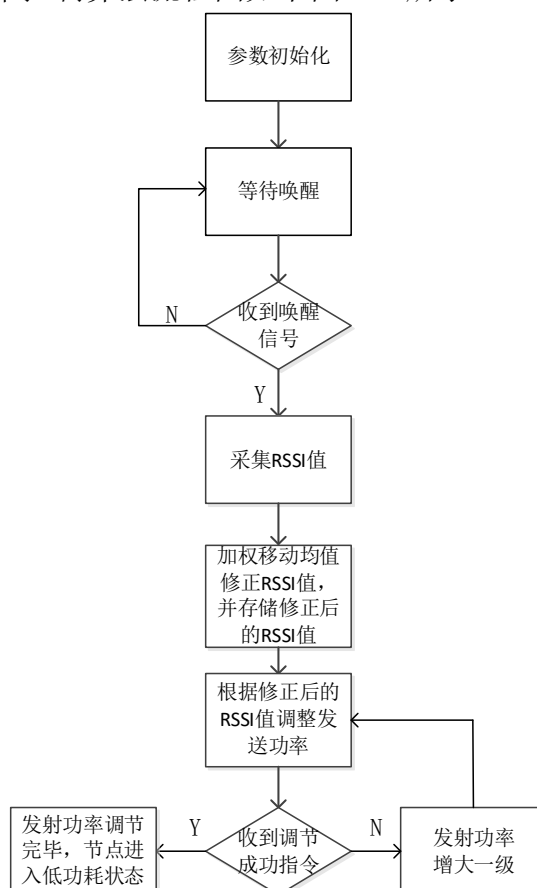


图 3.5 终端节点发射功率调节流程图

3.5 自适应发射功率控制算法测试

主要是测试终端节点与 LoRa 网关间隔不同距离时发射功率的变化情况。选取 5 个光电感烟探测器和 5 个人体红外探测器共 10 个终端节点，将 LoRa 网关位置固定，以网关位置为起点，每隔一段距离放置一个终端节点，终端节点发射功率按照算法调节完成之后，发送数据给 LoRa 网关，网关收到数据后通过上位机打印出来。

射频参数设置如下表 3.5 所示：

表 3.5 射频参数设置

扩频因子 SF	7
带宽 BW	400KHz
发送功率	20dBm

续表 3.5

C/R 编码率	4/6
数据速率	18.23kbps

测试数据如下图 3.6 所示：



图 3.6 自适应发射功率控制算法测试结果

根据图 3.6 测试数据，终端节点距离 LoRa 网关不同距离时发射功率有明显区别，与网关距离近的终端节点发射功率较低，这使得使用电池供电的终端节点的使用寿命增加。

3.6 终端节点功耗测试

功耗测试主要测试光电感烟探测节点以及人体红外探测节点的射频发射功耗以及节点休眠时待机功耗，并对测试数据进行计算分析，以得到设备使用年限；测试对象实物图如下图 3.7 和图 3.8 所示：



图 3.7 光电感烟探测器实物图



图 3.8 人体红外探测器实物图

3.6.1测试方案

(1) 射频发射功耗测试：

测试电路示意图如下图 3.9 所示：

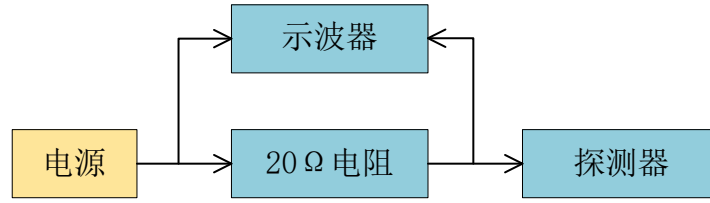


图 3.9 功耗测试电路示意图

在终端节点的 LoRa 模块的供电端串联一个精度 0.1%，阻值 20Ω 的采样电阻，用示波器查看射频发射瞬间的电压波形。因为需要测试的数据是平均功耗，即平均到 1 秒的发射电流，因此将采集到的电压波形积分，除以采样电阻，再除以 1 秒，得出平均发射电流，具体推导如下：

$$I_v T_v = I_a T_a \quad (3.22)$$

$$\frac{1}{R} I_v T_v = I_a T_a \quad (3.23)$$

$$\frac{1}{R} \int_0^{T_s} V_t d_t = I_a T_a \quad (3.24)$$

$$I_a = \frac{1}{RT_a} \int_0^{T_s} V_t d_t \quad (3.25)$$

式中， I_a 为平均电流， R 为采样电阻， T_a 为 1 秒， T_s 为示波器采样周期， V_t 为采样过程中每一时刻的电压值， I_v 为射频发射电流， T_v 为射频发送持续时间。

(2) 终端节点休眠电流：

调节终端节点处于停机模式，并开启 RTC，用万用表电流档检测终端节点休眠状态下的电流值。

3.6.2 测试数据

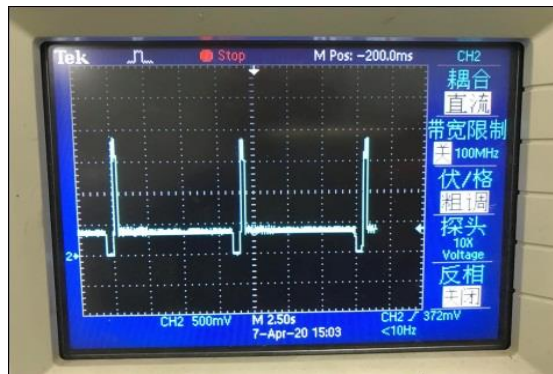


图 3.10 LoRa 模块发射波形



图 3.11 终端节点休眠电流

表 3.6 光电感烟探测器 $t_{\text{前}}$ 时间段测试数据

工作状态	待机 1	发射 2	待机 2	发射 3	求和
持续时间 (S)	15	0.32	15	0.32	30.96
平均电流 (mA)	19	93	19	93	—
耗电量 (mAS)	285	29.76	285	29.76	659.28

表 3.7 光电感烟探测器 $t_{\text{灯亮}}$ 时间段测试数据

工作状态	休眠 (单次时间 需乘以 30 次)	检测 (单次时间 需乘以 30 次)	LED 灯亮	求和
持续时间 (S)	$2 \times 30 = 60$	$0.001 \times 30 = 0.03$	0.02	60.05
平均电流 (mA)	0.0145	60	1.2	—
耗电量 (mAS)	0.87	1.8	0.024	2.694

表 3.8 人体红外探测器测试数据

工作状态	发射 1	待机 1	发射 2	待机 2	发射 3	休眠	求和
持续时间 (S)	0.32	15	0.32	15	0.32	32	30.96
平均电流 (mA)	93	19	93	19	93	0.0145	—
1 周期耗电量 (mAS)	29.76	285	29.76	285	29.76	0.464	659.744

3.6.3 结果分析

(1) 光电感烟探测器:

光电感烟探测器一个完整的工作周期如下图 3.12 所示, 由 $t_{\text{前}} + t_{\text{灯亮}}$ 组成。 $t_{\text{前}}$ 时间段主要是报警时发送数据传输时间, 包括三次数据发送时间 (设置报警时发送 3 次) 以及两个发送间隔时间; $t_{\text{灯亮}}$ 时间段主要是定时检测加休眠时间, 包括 30 次循环的休眠+检测时间。

一天包含的 $t_{\text{灯亮}}$ 时间段个数为:

$$(24\text{H}/\text{天}) \times (3600\text{S}/\text{H}) \div (60.25\text{S}/\text{个}) = 1438.8 \text{ 个/天}$$

一天中所有 $t_{\text{灯亮}}$ 时间段的耗电量:

$$(2.694\text{mAs}/\text{个}) \times (1438.8 \text{ 个/天}) = 3876.13\text{mAs}/\text{天} = (3876.13\text{mAs}/\text{天}) / (3600\text{S}/\text{H})$$

=1.0767mAh/天

我们选择的光电感烟探测器的电池容量为 3400mAh，则电池可用天数为：

$$[(3400\text{mAh} \times 0.9) - (659.28\text{mAs}/3600\text{S}/\text{H})] / 1.0767\text{mAh}/\text{天} \approx 2841.8 \text{ 天}$$

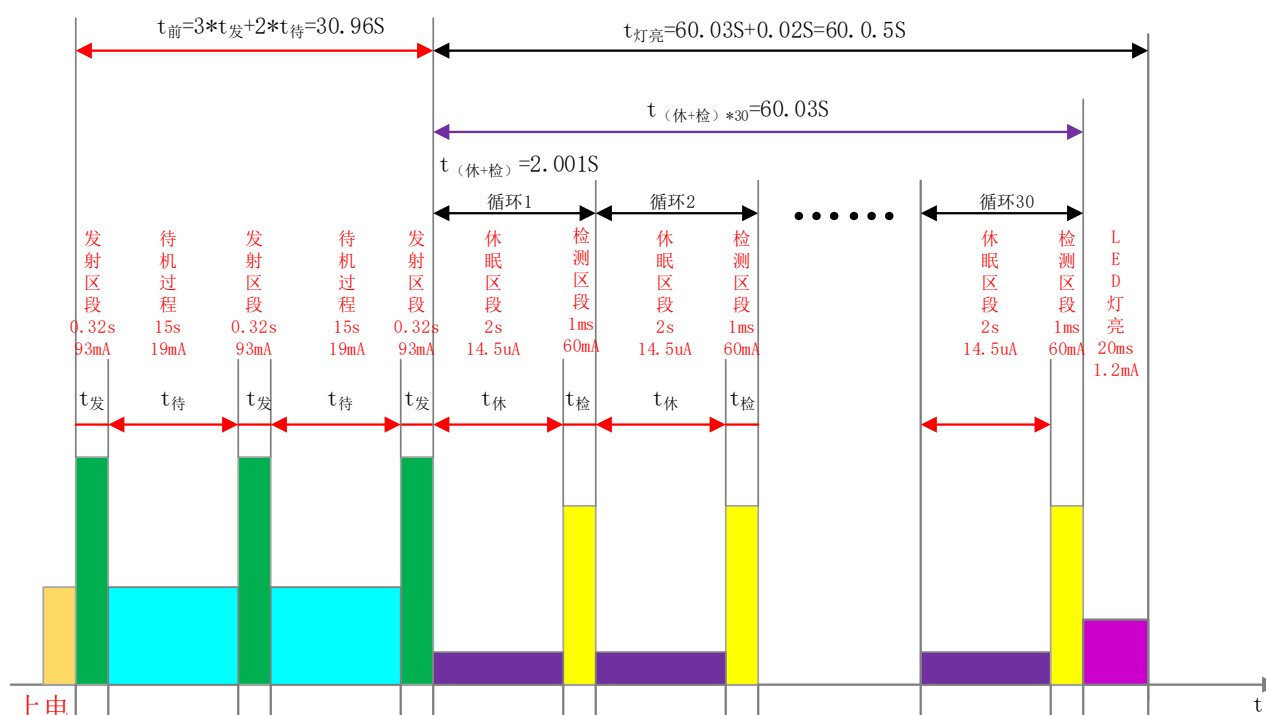


图 3.12 光电感烟探测器工作周期

(2) 人体红外探测器：

人体红外探测器一个完整的工作周期如下图 3.13 所示，主要是报警时发送数据传输时间以及设备休眠时间，报警数据传输时间包括三次数据发送时间（设置报警时发送 3 次）以及两个发送间隔时间。

人体红外探测器一天耗电量为：

$$[(659.744\text{mAS}/\text{周期}) \times 20 \text{ 周期}/\text{天}] + [(24\text{H}/\text{天} \times 3600\text{S}/\text{H}) - (30.96\text{S}/\text{周期}) \times 20 \text{ 周期}/\text{天}] \times 0.0145\text{mA} = (13194.88\text{mAS}/\text{天}) + (86400\text{S}/\text{天}) - (619.2\text{S}/\text{天}) = 14438.7016 (\text{mAS}/\text{天}) = 4.01\text{mAh}/\text{天}$$

人体红外探测器的电池容量同样为 3400mAh，则电池可用天数为：

$$(3400\text{mAh} \times 0.9) / 4.01\text{mAh}/\text{天} \approx 765 \text{ 天}$$

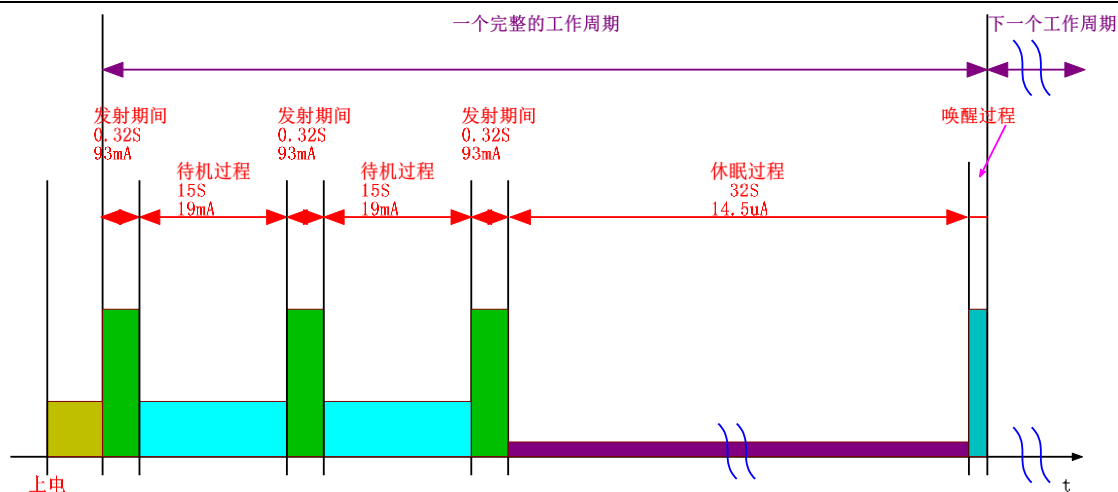


图 3.13 人体红外探测器工作周期

通过以上计算，光电感烟探测器理论上可使用 7 年以上，人体红外探测器理论上可使用 2 年以上，由于电池存在漏电流，且自身放电时的漏电流比设备休眠时的功耗还要大，实际使用时间并不会由那么长，但两个终端节点在低功耗设计下，电池使用时间会明显增加。

3.7 本章小结

本章针对电池供电的终端节点的低功耗需求，从软硬件两方面入手降低节点设备功耗，硬件上选用低功耗芯片，并对红外发射、接收电路进行设计；软件上首先对节点设备进行整体设计，然后对基于 RSSI 值的自适应发射功率算法进行改进，采用加权移动均值修正法对 RSSI 值进行修正，以便更准确地调节发射功率。最后对算法、节点发射功耗以及待机功耗进行实测。

第4章 LoRa 无线网络的多跳机制设计与实现

针对智慧消防系统网络覆盖范围大、节点数量多、密度大的应用需求,本文设计了一种基于 LoRa 无线通信的局域网络,LoRa 无线网络首先采用网状拓扑结构,将 LoRa 网关、光电感烟探测器、可燃气体探测器和人体红外探测器等设备接入多跳网络,并将可燃气体探测器作为中继器,扩大网络覆盖范围和节点接入数量;然后结合 LoRa 特性分层设计了网络协议栈和数据帧结构,并设计了一些网络关键机制以提高 LoRa 无线网络通信的可靠性。并对多跳网络进行分析,提出相应解决机制。

4.1 网络框架设计

4.1.1 网络设备类型

IEEE802.15.4 低速率无线个域网标准中,将系统中各设备分为两种类型:全功能设备 FFD 和功能缩减设备 RFD^[38]。全功能设备作为整个系统的协调者,可以与网络中任一其他设备进行通信^[39]。功能缩减设备功能单一,资源受限,一般就只作为网络应用设备^[40]。

本文将设备分为三种类型:网关 AP、中继 RE、终端节点 ED。AP 也称为网关或集中器,相当于 IEEE802.15.4 标准中的 FFD 设备。整个网络中只有一个 AP 设备,作为整个网络的中心,负责建立、管理和维护整个网络,并分配网络地址及处理网络数据;AP 设备在网络中一直处于开启状态,能够接收到包括 RE 设备和 ED 设备发送过来的数据。RE 和 ED 相当于 IEEE802.15.4 标准中的 RFD 设备,一般只负责数据的采集和收发,不需要管理网络。RE 设备也叫中继器,在网络中也是常开状态,主要功能是接收并转发来自网关或终端节点的数据,扩大无线网络覆盖范围。同时,RE 设备本身也具备终端节点设备的功能,作为数据采集节点使用。ED 设备也称为节点,处于无线网络的末端位置,其功能简单,成本较低,可以根据实际应用需求来进行定制化设计。

4.1.2 网络拓扑结构设计

应用最广泛的网络拓扑结构包括:星型、网状以及 Mesh^[41]。星型网络拓扑结构中,各节点与集中器网关直接相连,所有终端节点只与网关进行双向通信,而终端节点之间不进行通信;网状拓扑结构是星型拓扑结构的扩展,由于加入中继设备,覆盖范围比星型结构要大,节点接入数量也比星型结构要多^[42];Mesh 拓扑结构组成结构化的网络,所有终端节点之间可相互进行通信,其具有极强的自组织能力,网络可以自动感知节点的移动^[43],只要有一个节点移动,就会重新进行组网。

考虑实际的消防系统应用场景,需要一定的网络覆盖范围,但设备安装位置固定,不会进行移动,所有终端节点只需要向网关上报数据,彼此之间不需要进行通信。如果采用星型

拓扑，则终端节点覆盖范围有限，不能满足范围要求；如果采取 Mesh 网络，其结构灵活的优势不会被有效利用，同时 Mesh 网络中多跳路由维护十分困难^[44]。对比之下，网状结构相对适用于智慧消防系统。最终本系统 LoRa 网络采用网状拓扑结构，如下图 4.1 所示：

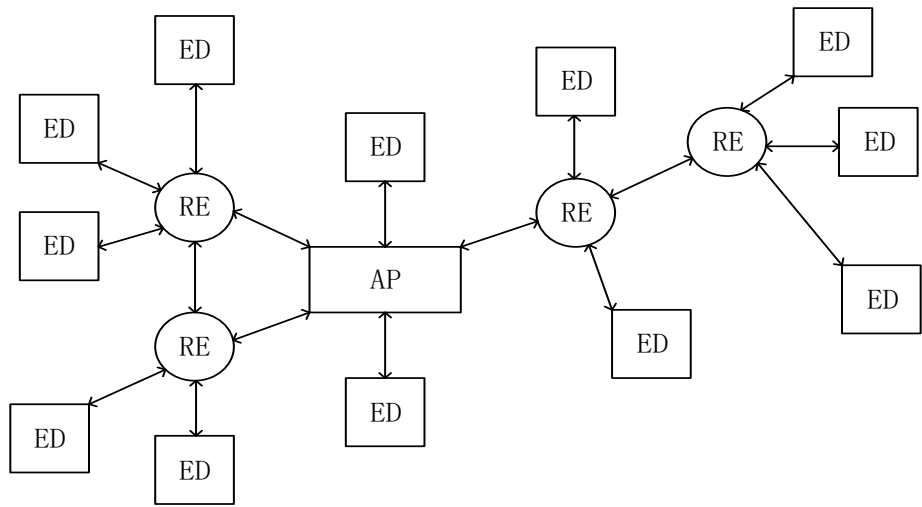


图 4.1 网状拓扑结构图

4.1.3网络总体框架

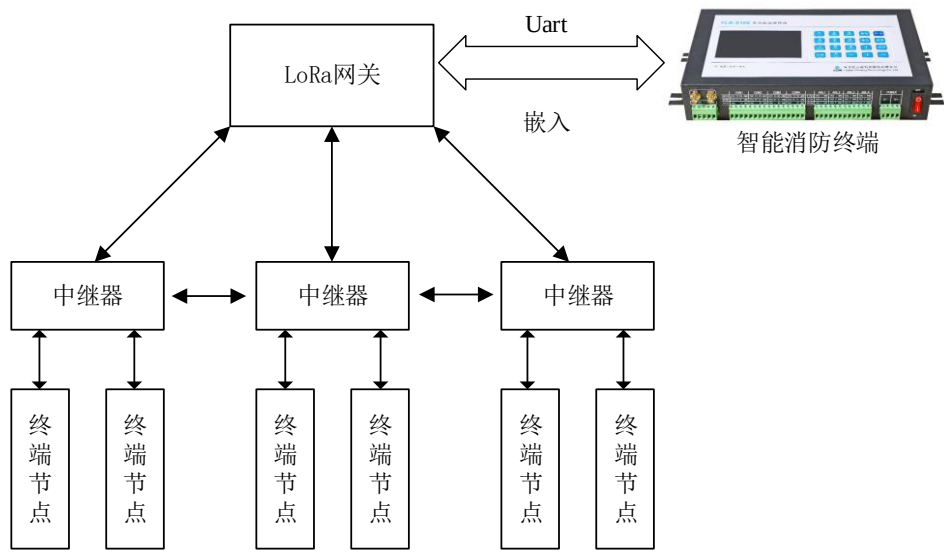


图 4.2 LoRa 网络总体框架

LoRa 网络总体框架图如上图 4.2 所示，在该网络中，LoRa 网关作为 AP 设备，负责网络建立，地址分配、接收处理中继器和终端节点发送过来的数据。市电供电的可燃气体探测器作为中继器 RE，对无线网络覆盖范围和终端节点接入数量进行扩展，可燃气体探测器在多跳机制下，负责转发终端节点发送给 LoRa 网关或者 LoRa 网关发送给终端节点的数据，但其对转发数据不进行任何处理，同时可燃气体探测器也作为终端节点向 LoRa 网关发送数据。光电感烟探测器和人体红外探测器作为终端节点 ED，只与 LoRa 网关通信，而终端节点之间不进行通信。

4.2 LoRa 无线网络设计

4.2.1 网络协议栈结构设计

本文所设计的 SWSN 网络协议基于 OSI 七层模型^[45]，这里对物理层、MAC 层、网络层和应用层的功能点进行说明。该网络协议的架构如下图 4.3 所示：

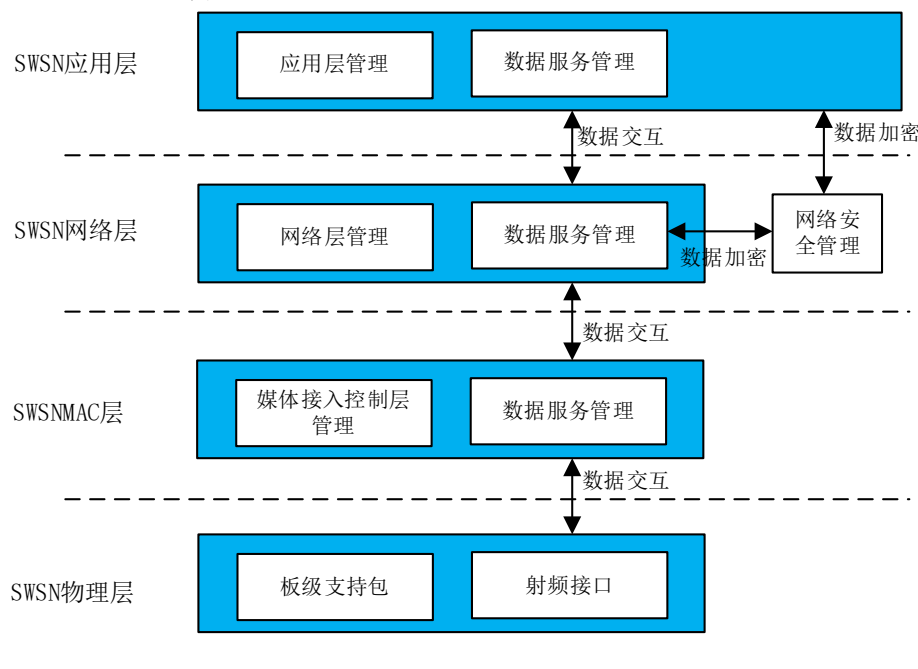


图 4.3 网络协议栈结构图

SWSN 的物理层：具有板级支持包和射频接口两部分，其中板级支持包是 MCU 的时钟、相关外设的接口、系统初始化、定时器和相应的中断处理。支持不同的硬件平台。而射频接口的主要功能则是实现射频模块数据的收发和信息的读取，判断数据是否发送和接收完成。

SWSN 的 MAC 层：具有媒体接入控制层的管理和数据服务管理两部分组成，其中媒体接入控制层主要负责协调设备间的通信，对信道资源分配以及信道检测机制，以避免信道碰撞导致的丢包率问题。数据服务管理，则是将数据在物理层做一次过滤，对不满足物理层帧格式的数据，不在进行网络层处理。

SWSN 的网络层：网络管理主要负责建立网络、配置网络参数、地址管理、节点入网、中继转发等功能；数据服务管理主要负责接收、处理底层数据并向上层进行转发，以及将应用层数据发送到指定地址；网络安全管理主要负责网络加密管理，在网络安全性要求较高的应用环境中对网络数据加密处理以及对接收到的数据进行解密处理，保障数据通信安全性。

SWSN 的应用层：直接面向用户开发使用，由应用层管理和数据服务管理组成。主要负责管理网络设备、用户对网络参数的修改、管理监控轮询点等。应用层管理负责网络设备管理，如查询入网节点地址、接入节点数目、删除入网节点等；数据服务管理负责处理用户对网络参数的修改、处理终端节点采集数据，并实现与网络层的数据通信。

4.2.2 数据帧格式

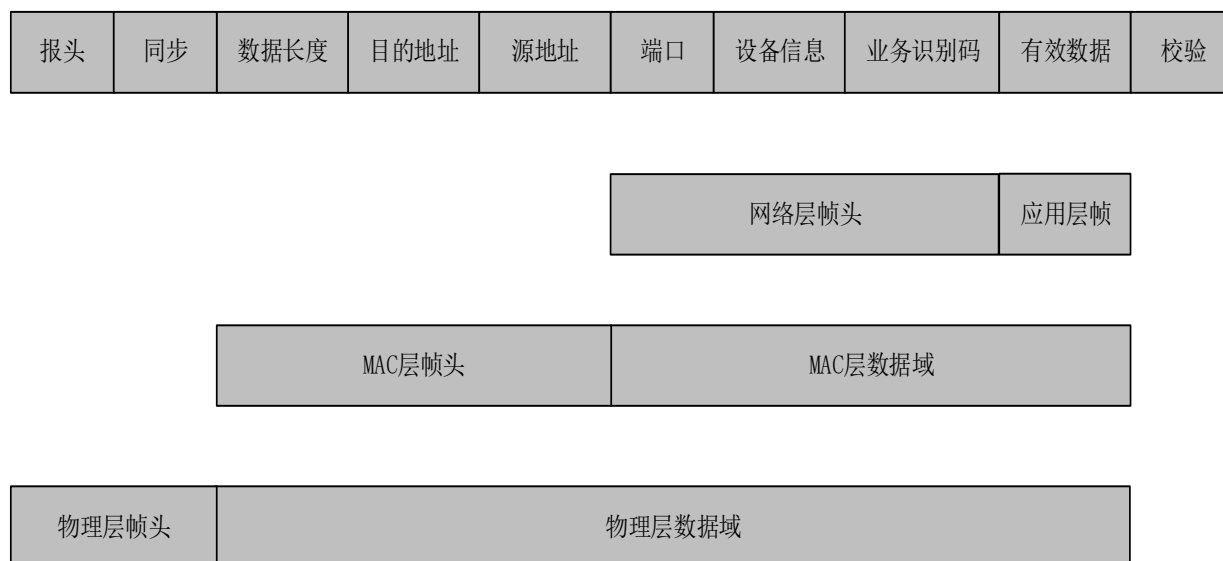


图 4.4 数据帧格式

(1) 物理层数据帧：包括帧头和数据域。报头和同步位组成帧头，两者长度都为 4 个字节，通过报头和同步位可以得到一个正确的数据帧以及帧头起始位置。物理层帧头在数据发送时由射频硬件自动生成添加，在接收数据时由射频硬件自动校验。物理层数据域由 MAC 层进行封装添加。

(2) MAC 层数据帧：包括帧头和数据域。MAC 层帧头包括数据帧长度、目的地址和源地址等。发送数据时 MAC 层帧头负责计算数据帧的总长度、添加目的地址和源地址；接收数据时，网络层可以从 MAC 层帧头得到数据有效长度以及数据目的地址。MAC 层数据域由网络层进行封装添加。

(3) 网络层数据帧：包括帧头和数据域。网络层数据域即为应用层数据帧。网络层帧头包括端口、设备信息和业务识别码。

端口长度一个字节，用于指示各种类型的数据帧所对应的端口号。系统中两个设备建立通信时，需要相互指明本地接收数据的端口号，那么下次通信时，为更好地配合通信，对方就知道在数据帧中指定一个端口号，由网络层进行传递。网络层再将接收到的数据帧送到应用层对应的端口进行相应处理。端口号由网络层进行分配，端口字段的位定义如下图 4.5 所示，端口在网络连接过程中指示当前数据帧所对应的端口号，帮助网络合理分配资源。为方便用户进行调试，对端口号做出如下设置：端口 0x01~0x1F 被设置为网络管理接口；0x20~0x3F 为用户使用端口；0x3F 为广播端口；0x3E 为静态分配的保留端口，由用户进行配置；当两设备连接成功发送或接收数据时，应用层直接使用网络层连接 ID 所映射的端口号。

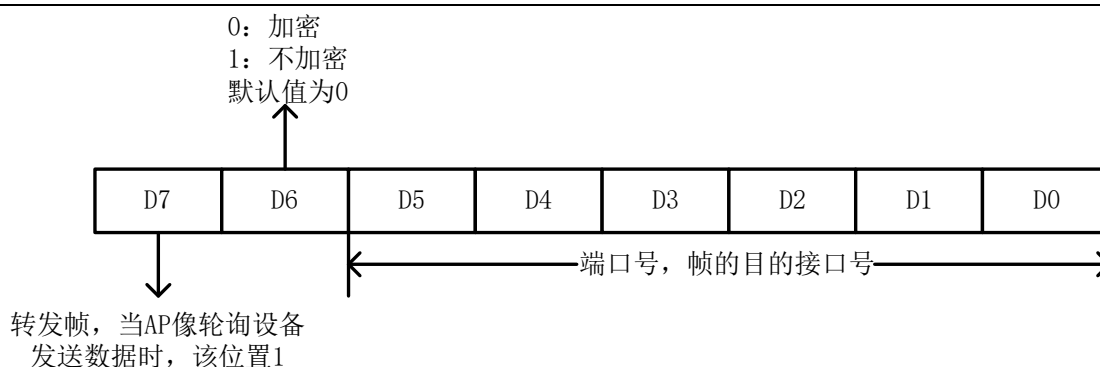


图 4.5 端口字段的位定义

设备信息长度一个字节, 包括设备类型、应答类型、网络跳数等发送/接收设备的信息。其每一位的定义如下图 4.6 所示:

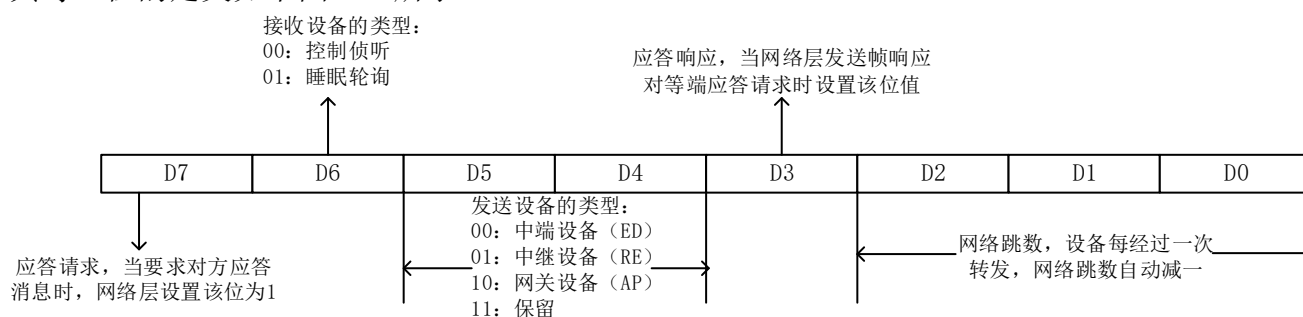


图 4.6 设备信息位定义

业务识别码长度为 1 个字节, 用来增强网络通信的稳定性。网络层使用业务识别码来识别重复帧, 或对未完成的数据进行匹配。每个发送设备在通信中都要保护自己的业务字段。

(4) 应用层数据帧: 一般由传感器产生或者由用户进行指定, 是用户应用层一个接收应用程序接口调用结果发送到应用层的有效载荷, 由应用层数据服务管理定义其数据传输格式。

4.2.3 网络关键机制设计

4.2.3.1 节点入网机制

节点需要与网关建立相应的网络通路才可以进行数据通信。入网流程如下图 4.7 所示, 节点入网分为两个步骤, 即 JOIN 和 LINK。第一步: 节点向网关发送 JOIN 帧, JOIN 帧中带有 join token 的令牌标识, 网关接收到相应的 JOIN 帧, 校验其 join token 的标识, 回复给节点带有 link token 的令牌标识的 JOIN REPLY 帧。节点接收到 JOIN REPLY 的帧, 将 link token 的数据取出, 塞入 LINK 帧中。第二步: 节点发送 LINK 帧给网关, 带有 link token, 网关接收到相应的 LINK 帧后, 将分配节点的 IP 地址和网络信息装入 LINK REPLY 中发送给节点。

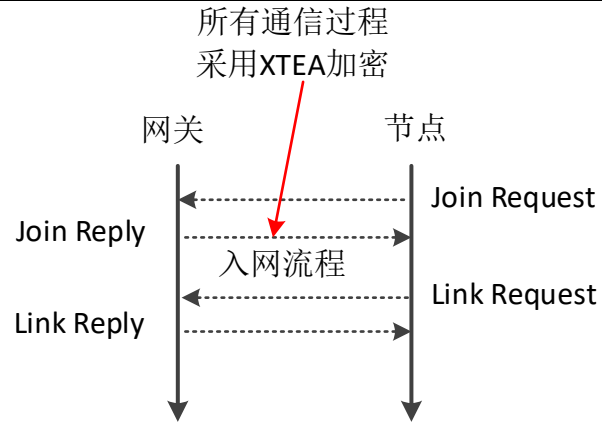


图 4.7 节点入网示意图

下图 4.8 为具体流程。首先初始化网络协议栈，分别发送 JOIN 和 LINK 帧，进行设备的入网。

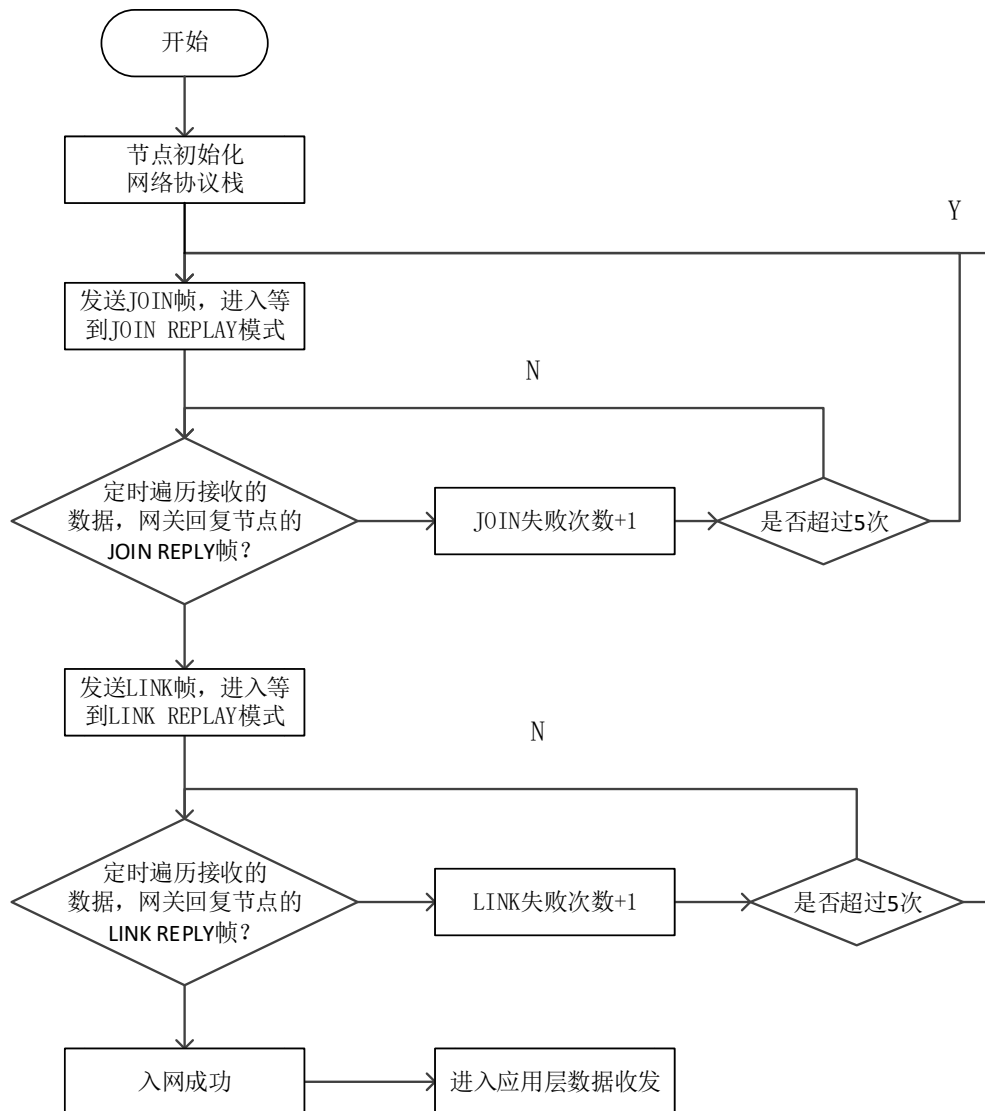


图 4.8 入网机制流程图

4.2.3.2信道检测机制

常用的信道检测技术是基于信号强度进行判断，即检测 RSSI 值。而对于 LoRa 扩频调制技术，有效信息的信号强度比接收机的信号强度还低^[46]，不能用 RSSI 值来判断信道是否空闲。而采用 LoRa 无线通信技术中的活动信号检测技术，对信道是否忙碌进行检测，可靠性更高。LoRa 的数据包组成，最前面一部分为前导码，而信道活动检测检测（CAD）可以通过检测无线信道是否存在 LoRa 前导码以判断信道是否被占用。前导码的检测与信号强度无关^[47]，当信号强度低于接收机底噪，通过 CAD 检测技术，仍然可以检测出 LoRa 信号。图 4.9 为信道检测机制流程图：

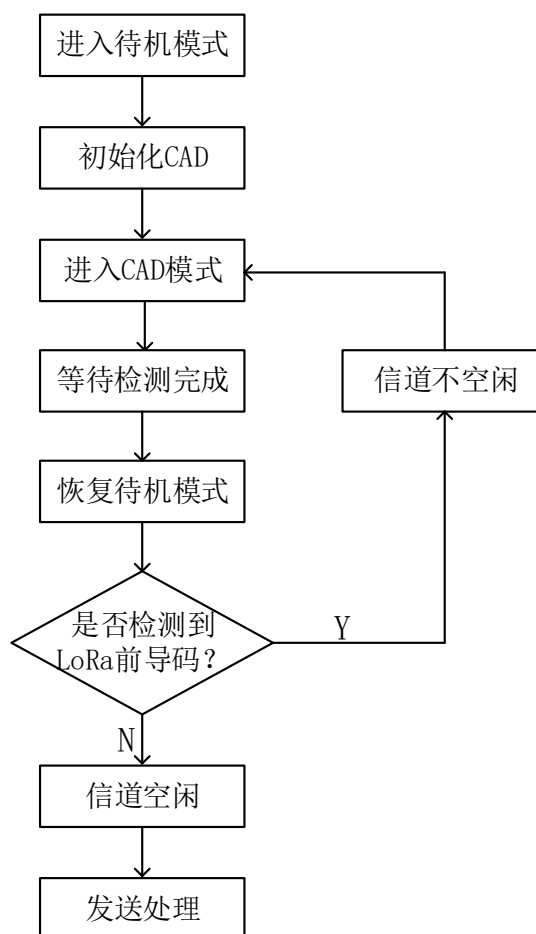


图 4.9 信道检测机制流程图

4.2.3.3退避机制

当网络中存在中继的时候，需要进行数据通信时，首先进行信道检测。如果检测到 LoRa 前导码，说明此时信道被占用，发送数据失败，需设置下一个发送周期进行发送，周期大于 140ms；如果未检测到 LoRa 前导码，说明此时信道未被占用，若连续 3 次检测到信道空闲，则开始发送数据。退避机制流程图如下图 4.10 所示：

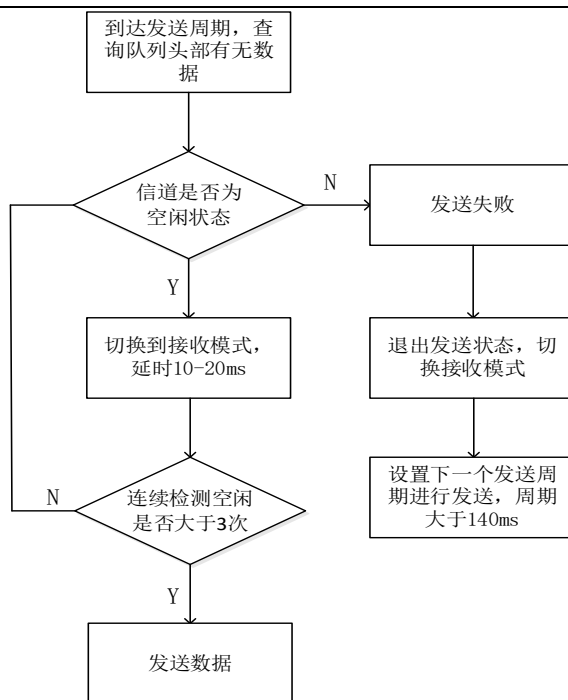


图 4.10 退避机制流程图

4.2.3.4网络重发机制

发送数据时要先进行空闲信道活动检测（Clear Channel Assessment, CCA）^[48]，当信道检测失败的次数大于最大的信道检测次数时，认为该次数据通信失败。将该帧的数据写入失败发送缓冲区，在一定的时间后再进行数据的重发。发送分为普通发送和广播发送。普通机制重发三次后，未成功，则转为广播发送 3 次，如果数据还未发送成功，则丢弃该数据帧。

网络重发机制流程图如下图 4.11 所示：

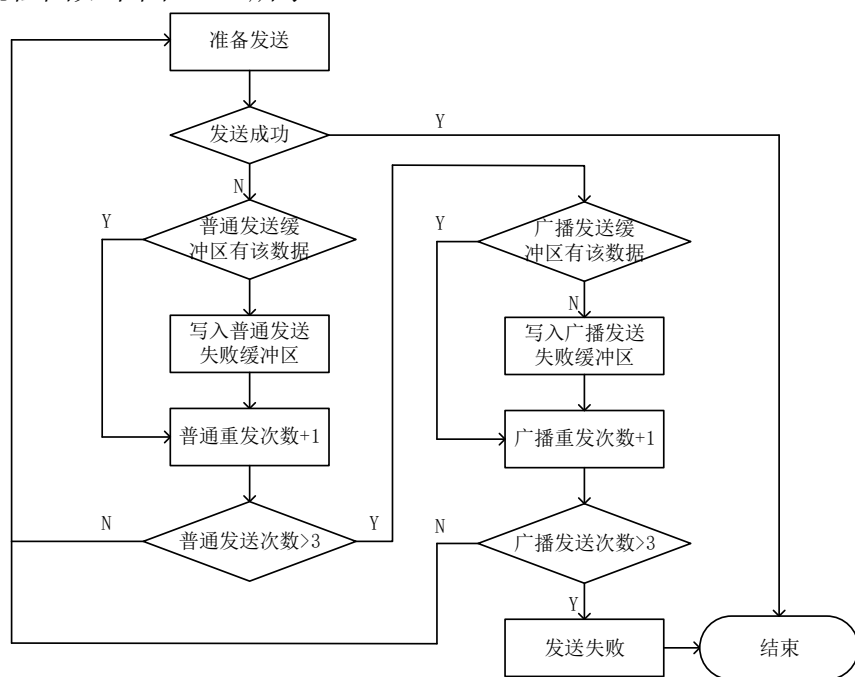


图 4.11 网络重发机制流程图

4.2.3.5 一应一答机制

网关与节点进行数据通信时采用一应一答方式，即双方都需要应答回复。图 4.12 为一一应一答机制流程图，设备发送需要应答的帧，之后进入短暂/长等待模式，短暂等待模式是为了等待附近 ED/AP/RE 的回复帧，长等待模式是等待经过多跳之后 ED/AP 的回复帧。如若接收到相应回复帧，则进行帧校验，如果源地址是自身，且帧序号相同而跳数不同，说明此次数据发送成功，则删除队列头部，等待下一个发送周期。如果未收到相应回复帧，则将数据塞入链表尾部，等到重发。

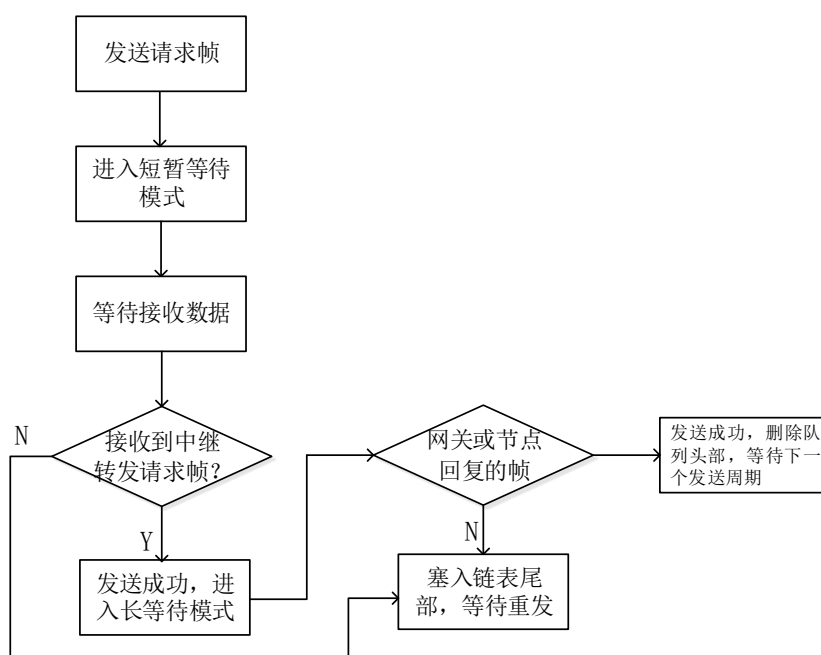


图 4.12 一应一答机制流程图

4.2.3.6 帧序号生成机制

本文设计的网络中因为有中继的存在，在多个中继转发时，需要考虑重复帧的问题，设计了相应的帧过滤机制，所以各个设备帧序号不能每次上电都从零开始计数，当设备不断重启进行数据发送时，相同帧序号的数据均被过滤。也无法将帧序号实时写入 FLASH 中，下次复位从 FLASH 中加载数据，这种方式在频繁的数据收发过程中，会造成 FLASH 读写寿命下降。需要每次上电的时候，加载不同的帧序号。为解决帧序号问题，可利用环境信息进行随机生成，设备上电加载时，利用随机数生成器的值与通过 LoRa 技术监测信道的 RSSI 值与自身的 MAC 值之和，作为设备的第一个帧序号。帧序号生成机制具体流程图如下图 4.13 所示：

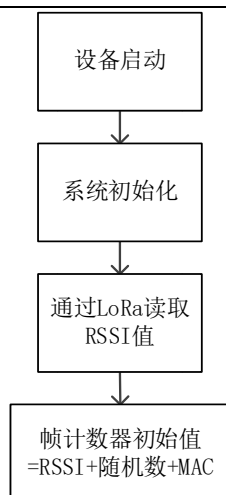


图 4.13 帧序号生成机制流程图

4.2.3.7 网络检测机制

节点需要与网关建立心跳连接^[49]，和 HTTP 协议类似，进行保活连接。节点每隔 t 时间段，向网关上报自己的状态，网关每次接收到帧，会将接收的时间和地址进行数据的保存。网关每隔 $2t$ 的时间，会对每个节点的最近一次上报时间据和目前时间的差值，是否小于 t 间隔，判断节点是否离线，离线则告知终端设备。网关和节点都会定时对射频发送和接收帧数目与网络层的发送和接收帧数目进行统计，用来判断射频和网络层是否正常工作，如果帧统计无变化，需要重启射频资源和重新初始化网络的资源。定时检测机制流程图如下图 4.14 所示：

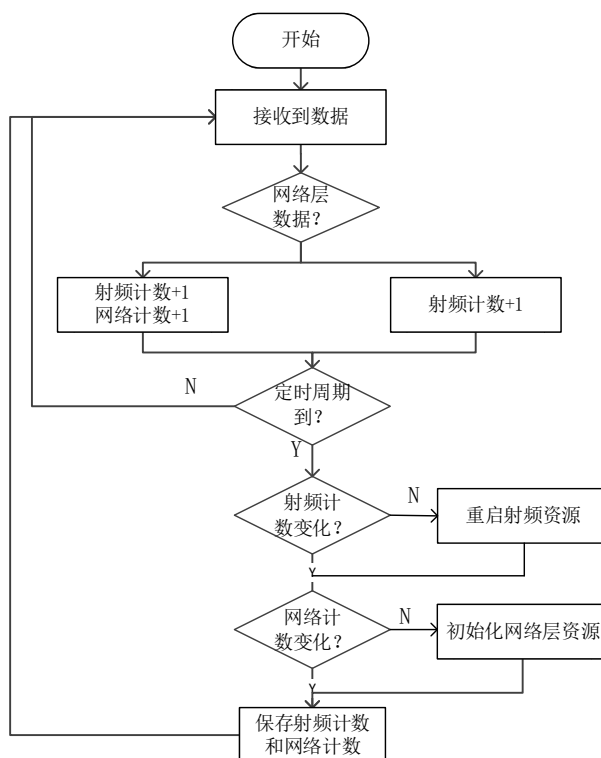


图 4.14 网络检测机制流程图

4.2.3.8 特殊数据处理

当网络中存在节点还没有入网，但是已经有报警数据产生，这时报警帧的优先级是高于入网操作的，通过 port 端口号进行区别，port 端口号为 0x07 时，表示该帧是报警帧，此时还没有接入到网络中，这时网关需要对报警数据进行处理。流程图如下图 4.15 所示：

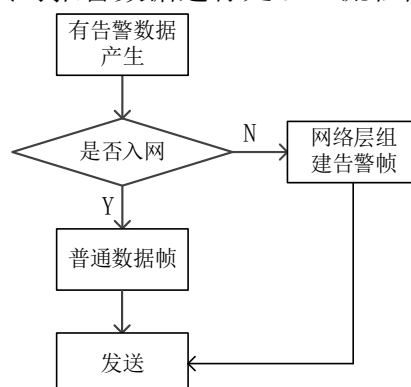


图 4.15 特殊数据处理流程图

4.3 多跳机制设计

在星型网络不能有效覆盖所有监测区域时，需要加入中继器对无线网络覆盖范围进行扩展^[50]。中继器 RE 既作为检测节点处理自身信息，又要执行中继功能，对不是发给自己的帧以及广播帧进行转发，但中继器对转发数据不做处理。每一次中继器转发数据帧后将跳数减一，当跳数为零时不再转发。

4.3.1 网络情况分析

4.3.1.1 零跳网络分析

网络中多个中继器可能收到来自同一个终端节点发送的数据，如下图 4.16 所示，终端节点 1、3、4 都在 LoRa 网关通信覆盖范围内，可以与 LoRa 网关直接通信，如图 4.16 中的红色实线和蓝色实线。但终端节点 3 也同时在中继器 1 和中继器 2 的通信覆盖范围内，中继器 1 和中继器 2 也会收到来自终端节点 3 发送的数据，如图 4.16 中的红色虚线，他们都会对终端节点 3 的数据进行转发，那么 LoRa 网关会收到 3 次来自终端节点 3 的发送数据；终端节点 1 和终端节点 4 分别在中继器 1 和中继器 2 的通信覆盖范围内，它们各自的中继也会转发相应数据，如图 4.16 中的蓝色虚线，那么 LoRa 网关会各收到 2 次数据。当系统中多个节点同时发送数据时，网络中会出现大量冗余数据，增加通信冲突、碰撞的概率，甚至网络瘫痪。

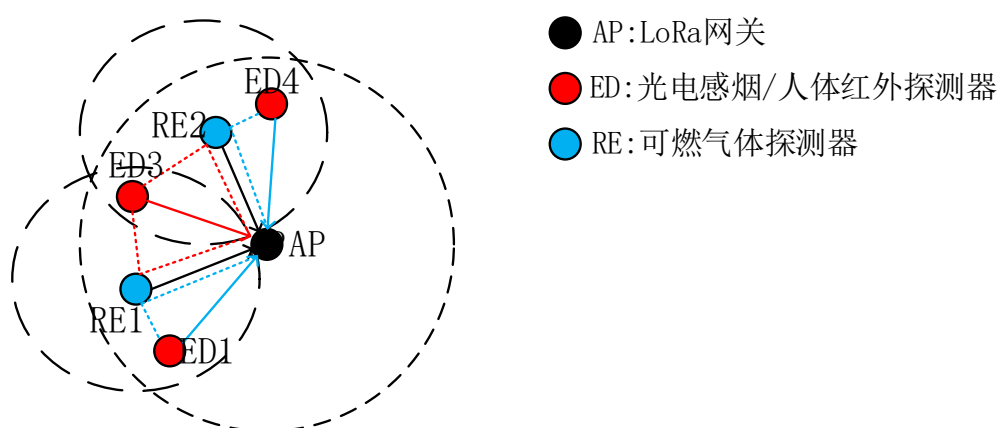


图 4.16 零跳网络分析示意图

4.3.1.2 一跳网络分析

如图 4.17 所示，终端节点 ED 上报数据至 LoRa 网关时，其上一跳中继 RE1、RE2、RE3 都会收到来自 ED 的数据并进行转发，多个中继在转发数据时，AP 会收到三帧关于 ED 的信息，会造成信息的重复处理和信道资源的浪费。当网络中存在多个中继时，AP 和 ED 均会造成数据的重复处理，且 RE 会转发无用的数据帧。

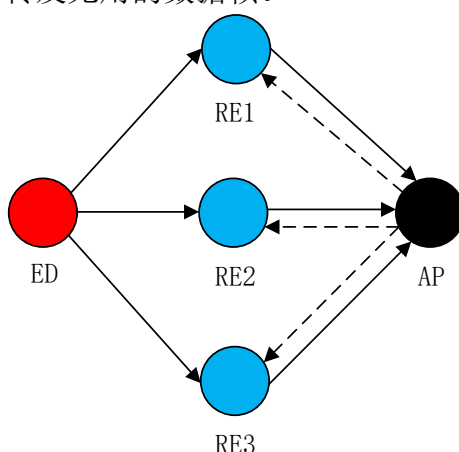


图 4.17 一跳网络分析示意图

4.3.1.3 多跳网络分析

在两跳和两跳以上的网络中都会存在上述零跳和一跳的问题，同时如图 4.18 所示，终端节点 ED 上报数据时，上一跳中继 RE1 和 RE2 收到来自 ED 的数据帧后进行转发，RE3 会收到两个相同的数据帧，并且对两个数据帧都进行转发；另外，AP 收到 ED 的数据帧后会进行应答回复，RE1 和 RE2 都会收到经 RE3 转发过来的应答数据帧，且 RE1 和 RE2 都会转发给 ED，这样 ED 会收到重复的数据帧。针对以上问题，需要设计中继转发过滤机制和重复帧过滤机制避免网络中出现过多冗余数据，降低通信冲突。

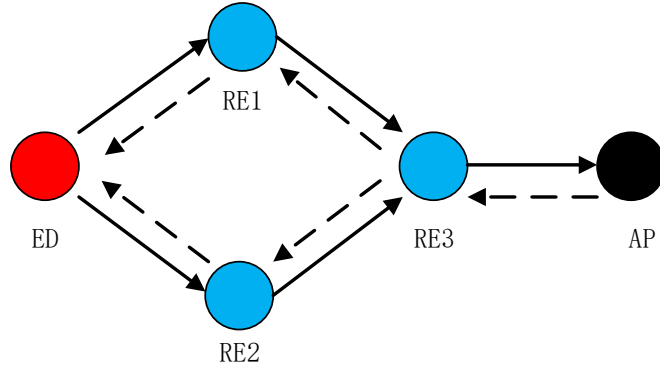


图 4.18 多跳网络分析示意图

4.3.2 多跳机制实现

针对上面零跳、一跳和多跳中存在的问题，需要设计相应的机制来解决对应的问题。

4.3.2.1 设备跳数设置

由于本文设计的 LoRa 无线网络最大支持 3 跳传输，在设备入网阶段，首先将各节点的跳数都设置为 3，各节点按照入网机制发送入网请求帧至 LoRa 网关，由于一应一答机制，网关对节点进行应答回复，节点根据网关回复帧中的跳数信息设置自身跳数。

如下图 4.19 所示，将 RE2 跳数设置为 3。RE2 发送入网请求帧，经 RE1 到达 AP，AP 进行应答回复，回复帧中跳数为 3，经 RE1 到达 RE2，RE1 接收到跳数为 3 的回复帧并进行转发，转发时将跳数减一，RE2 收到跳数为 2 的回复帧，说明收到的回复帧经过 1 次中继转发，则 RE2 与 AP 进行通信需要 1 跳，则在通信过程中将相应的跳数置 1。

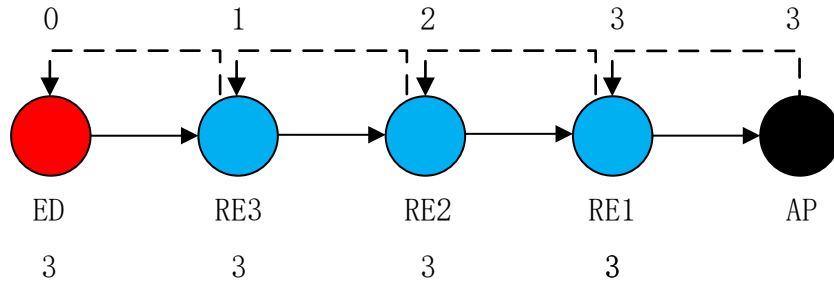


图 4.19 节点跳数分配示意图

通过上述方式，可将所有的节点和网关通信进行跳数设置，在上图 4.16 中，ED3 可以直接与网关进行通信，所以跳数为 0，虽然 ED3 在 RE1 和 RE2 通信覆盖范围内，但 RE1 和 RE2 不再对 ED3 的数据进行转发。

4.3.2.2 帧的优先级机制设计

本文设计的网络中，将回复帧的优先级置为最高优先级，当设备要进行回复时，时刻监测信道，一旦空闲，进行数据的发送，省去了退避的环节。在上图 4.17 中，再进行上述转发流程时，当其中一个中继竞争信道成功，其余中继由于退避机制，并没有向网关发送数据。网关接收到数据帧，需要进行回复时，会第一时接入信道，RE1、RE2、RE3 都会收到回

复帧，此时还没有转发数据的中继丢弃数据帧不再进行转发。减少了冗余数据。

4.3.2.3 重复帧过滤机制设计

因为网络中存在中继设备，对于相同的帧，不同的中继接收到之后，都会进行转发。目的节点和网关接收到帧后会进行数据的处理，则会造成数据的重复处理和信道资源的浪费。为了避免此类情况对资源的消耗，节点、网关和中继在接收到数据时，都会将接收到的数据按照帧的类型、存放时长、目的地址、源地址和帧序号进行保存，相应的数据类型如下表 4.1 所示，其中存放时长，是一个时间计数器。保存的形式采用 LRU 的缓存机制，即最近被访问到的暂时不会淘汰，存放最久的数据将会从缓存空间中移除。当帧被判定为重复时，说明此帧还在网络中进行传输，再次被接收到的概率比较高，所以采用了 LRU 缓存的设计。

表 4.1 接收数据类型

数据类型	1byte
存放时长	1byte
帧计数器	1byte
目的地址	1byte
源地址	1byte

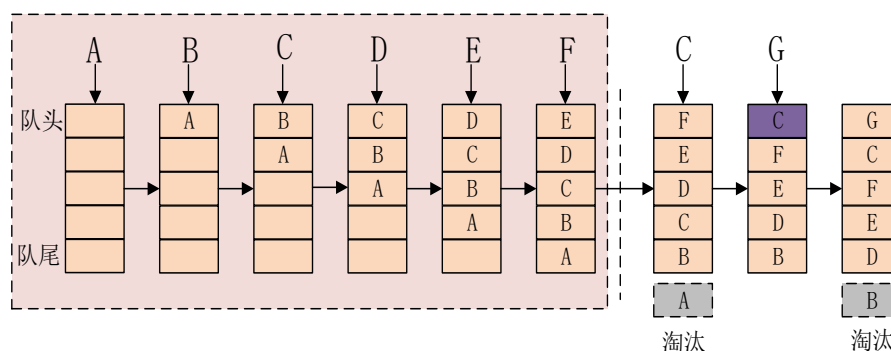


图 4.20 LRU 缓存淘汰示意图

当网关、节点和中继接收到数据时，会与 LRU 缓存中的数据进行对比，数据内容中的关键信息一致，则会被判定为重复帧，会被丢弃，不给予数据处理。若数据为首次收到，将数据处理之后，将数据中的关键因素存入缓存中。具体流程图如下图 4.21 所示。首次接收到的数据，存储单元中的存放时长会被置为 5，每接收到一帧数据时，各个存储单元中存放时长会自减，减为零时，将该存储单元从缓存中移除。而当有重复帧来临时，相应的存储单元中的存放时长会被置为初始值，重新参与自减环节。当缓存数据满时，则会淘汰存放时长最小的单元，将新数据插入缓存当中。

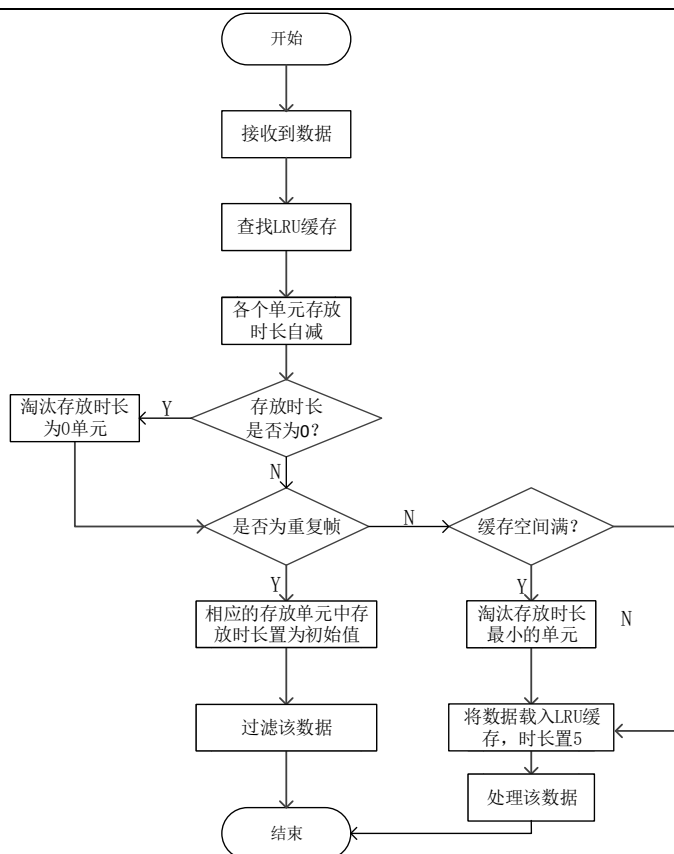


图 4.21 重复帧过滤出机制流程图

4.3.2.4 中继转发过滤机制设计

中继在网络结构中主要负责信息的转发和过滤, 实现网络多跳的功能。中继转发是指通过目的地址进行判断是否是发给自己的帧, 以及相应的广播帧。且每转发一次, 跳数减一, 跳数减为 0 时, 将该帧丢弃, 不再进行转发, 转发帧无需等待回复。中继转发机制流程图如下图 4.22 所示:

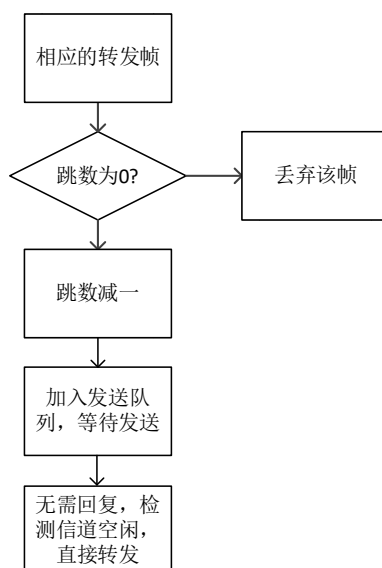


图 4.22 中继转发机制流程图

中继过滤不仅包括上述 LRU 缓存机制中的过滤方案，同时需要通过对应答帧进行判断，将发送队列中的与之对应的请求帧进行丢弃。通过信息位判断该帧是否为应答帧，通过帧序号、目的地址和源地址与发送队列中的帧进行比对，如果存在与之对应的请求帧，将该帧从发送队列中移除。

具体流程图如下图 4.23 所示，中继收到相应的数据帧后，首先判断是不是发往自己的帧，如果是发往自己的帧，则自身进行处理。如果不是发往自己的帧，则通过关键信息与 LRU 缓存中的数据进行比对，如果是重复帧，则将此帧过滤；如果不是重复帧，则再判断是不是回复帧，如果不是回复帧，则将关键信息存入 LRU 缓存中，该帧加入发送队列；如果是回复帧，判断关键信息与发送队列中请求帧是否一致，如果一致则删除队列中请求帧，将回复帧加入发送队列。如果不一致加入到 LRU 缓存和发送队列中。降低了网络中的重复帧的概率。

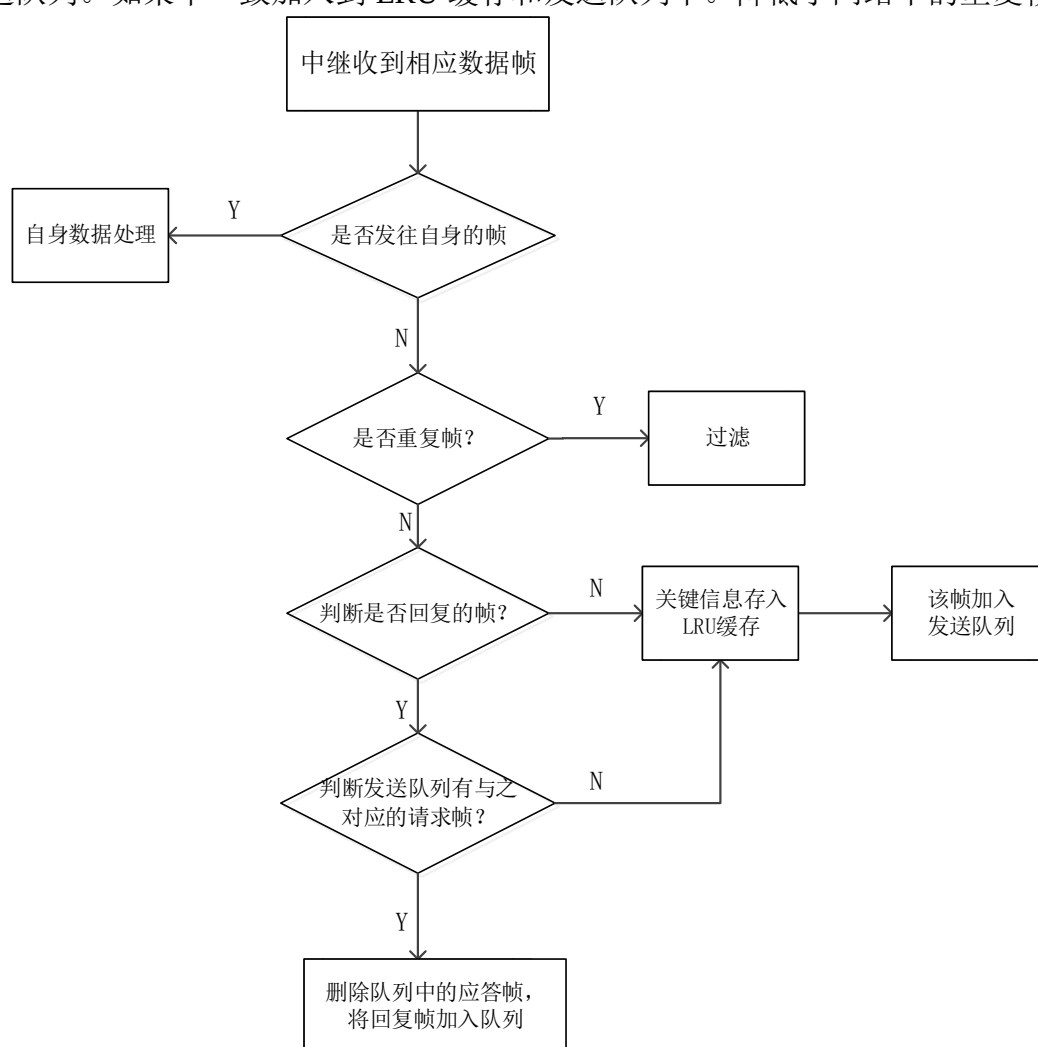


图 4.23 中继过滤机制流程图

4.4 无线组网网络测试

本节主要对无线组网网络进行测试，包括网络通信距离测试、多跳功能测试以及通信延时测试，通过实际测试数据来验证所设计的 LoRa 网络性能。

4.4.1单跳通信距离测试

由于本文设计的智慧消防系统主要应用于室内环境，距离测试只针对室内环境进行。测试对象实物如图 4.24 所示，从左往右分别是 LoRa 网关、光电感烟探测器、可燃气体探测器、人体红外探测器。

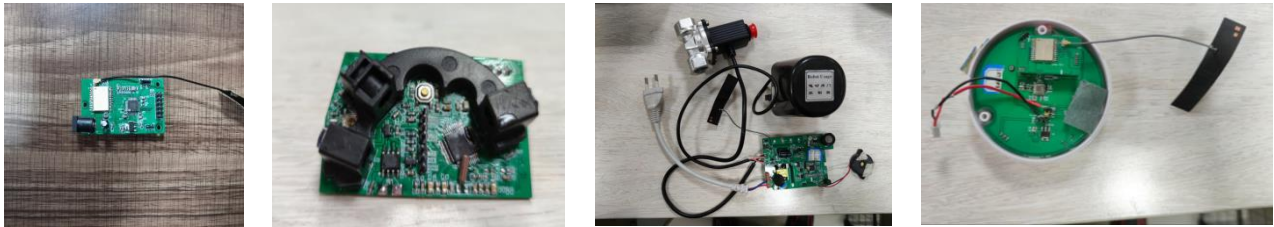


图 4.24 测试对象

4.4.1.1测试方案

本次测试将 LoRa 网关固定，置于 D 区 5 号房间内，光电感烟探测节点、可燃气体探测节点以及人体红外探测节点在 ABCD 区移动，网关和节点离地面高度在 1 米左右，分别测试烟感设备，可燃气体设备和红外设备在同楼层的平行距离以及不同楼层的垂直距离，测试通信距离的评估依据是网关处是否有入网请求数据。测试平面图和实际测试环境如下图 4.25 和图 4.26 所示：

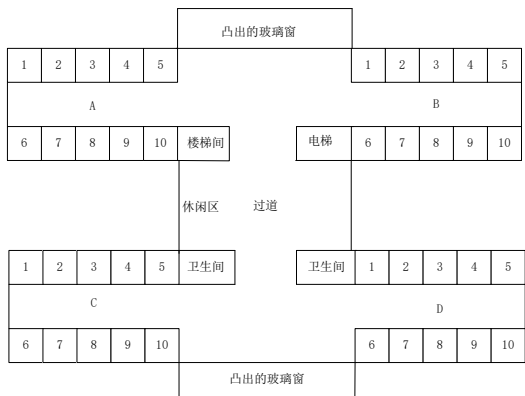


图 4.25 测试平面图



图 4.26 实际测试环境图

测试说明：

设备连接结构：打印窗口 A+网关，节点。

测试方法：节点设备上电之后，会向网关发送入网帧，在网关处打印界面查看是否有入网请求帧；如果能收到，说明通信正常；

LoRa 模块参数配置同 3.5 节。

4.4.1.2测试数据

表 4.2 LoRa 网关与光电感烟探测器室内同楼层通信距离测试表

测试地点	测试距离(m)	是否能收到烟感入网数据	备注
17 楼 C 区 1706	73 米	是	隔一堵墙
17 楼中间过道	45 米	是	90°隔墙转弯，两堵墙
17 楼 AB 区中间	60 米	是	90°隔墙转弯，两堵墙

表 4.3 LoRa 网关与可燃气体探测器室内同楼层通信距离测试表

测试地点	测试距离(m)	是否能收到可燃气体入网	备注
17 楼 C 区尽头	76 米	是	隔一堵墙
17 楼中间过道	45 米	是	90°隔墙转弯，两堵墙
17 楼 AB 区中间	60 米	是	90°隔墙转弯，两堵墙

表 4.4 LoRa 网关与人体红外探测器室内同楼层通信距离测试表

测试地点	测试距离(m)	是否能收到红外入网数据	备注
17 楼 C 区 1707	76 米	是	隔一堵墙
17 楼中间过道	45 米	是	90° 隔墙转弯，两堵墙
17 楼 AB 区中间	60 米	是	90° 隔墙转弯，两堵墙

表 4.5 LoRa 网关与光电感烟探测器室内垂直楼层通信距离测试表

测试地点	测试距离(m)	是否能收到烟感入网数据	备注
16 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 3 米	是	隔一层
15 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 6 米	是	隔二层
14 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 9 米	否	隔三层
18 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 3 米	是	隔一层
19 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 6 米	是	隔二层
20 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 9 米	否	隔三层

表 4.6 LoRa 网关与可燃气体探测器室内垂直楼层通信距离测试表

测试地点	测试距离(m)	是否收到可燃气体入网	备注
16 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 3 米	是	隔一层
15 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 6 米	是	隔二层

续表 4.6

14 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 9 米	否	隔三层
18 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 3 米	是	隔一层
19 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 6 米	是	隔二层
20 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 9 米	否	隔三层

表 4.7 LoRa 网关与人体红外探测器室内垂直楼层通信距离测试表

测试地点	测试距离(m)	是否能收到红外入网数据	备注
16 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 3 米	是	隔一层
15 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 6 米	是	隔二层
14 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 9 米	是	隔三层
18 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 3 米	是	隔一层
19 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 6 米	是	隔二层
20 楼 D 区 5 号房间门口	垂直 9 米	是	隔三层

4.4.1.3 结果分析

从测试数据来看,在同一层测试时,通往 C 区尽头房间有很长一段直线路径,信号需穿过两堵实体墙,节点与网关可正常通信;通往 17 层过道以及 AB 区中间有路径转弯,信号需穿过四堵实体墙,节点与网关仍能正常通信。三个节点设备室内同楼层水平通信距离大于 150 米。垂直楼层测试时,信号可跨越上下各两层楼进行传输,红外探测器由于结构简单,上下可各跨越三层楼通信。

4.4.2 多跳功能测试

4.4.2.1 测试方案

将终端节点位置固定,放置在 17 楼 D 区 5 号房间,各层中继器位置均放置在图 4.27 中 C 点位置,LoRa 网关在图 4.27 中 A 点、B 点、D 点移动,每次测试通过上位机软件让 LoRa 网关发送 100 个数据包,测量网关和节点通信的平均接收质量和丢包率,以验证多跳机制的可行性。测试平面图如下图 4.27,实际测试环境图如下图 4.28 所示,上位机页面如下图 4.29 所示:

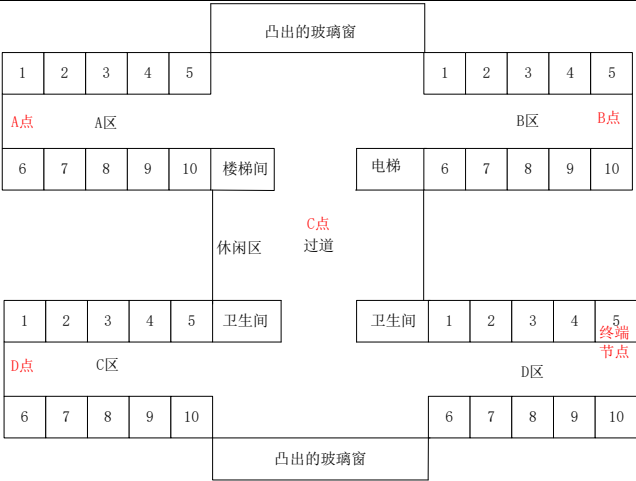


图 4.27 测试平面图



图 4.28 实际测试环境图

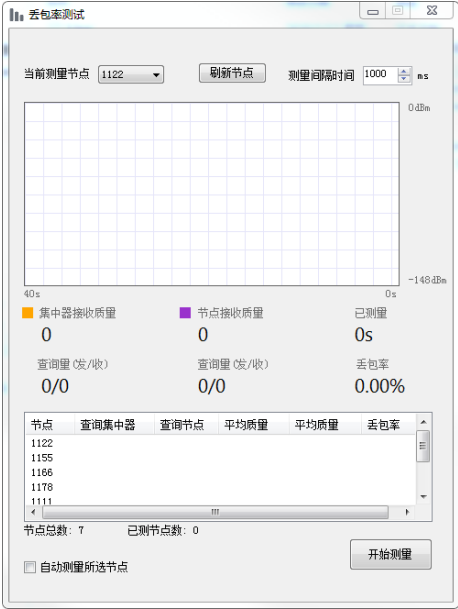


图 4.29 上位机页面

设备位置说明：

网关在 11 楼的时，17 楼 C 点一个中继，13 楼 C 点一个中继，15 楼 C 点一个中继。

网关在 13 楼的时，17 楼 C 点一个中继，15 楼 C 点一个中继。

网关在 17 楼的时，C 点一个中继的位置，剩余两个中继和网关放在一起。

网关在 19 楼的时，17 楼 C 点一个中继，19 楼 C 点一个中继

网关在 21 楼的时，17 楼 C 点一个中继，19 楼 C 点一个中继，21 楼 C 点一个中继。

4.4.2.2 测试数据

表 4.8 中继转发方案测试数据

垂直距离	水平距离	定时发送	发/收	丢包率	信号质量 (dBm)	中继个数
13 楼	A 点	10S	100/90	10%	-47/-92	3
	D 点	10S	100/93	7%	-94/-95	3
15 楼	A 点	3S	100/97	3%	-85/-91	2
	B 点	3S	100/98	2%	-86/-90	2
17 楼	A 点	3S	100/100	0	-95/-97	1
	B 点	3S	100/100	0	-98/-95	1
19 楼	A 点	3S	100/98	2%	-90/-92	2
	B 点	3S	100/98	2%	-86/-91	2
21 楼	B 点	10S	100/92	8%	-100/-94	3
	D 点	10S	100/91	9%	-48/-93	3

4.4.2.3 结果分析

从测试数据来看, 中继转发、网络多跳功能可以实现。测试过程中, 将不同的中继断掉, 数据就不再进行转发, 说明在数据通信过程中, 中继转发功能生效。但是在接收的时候并不能保证完全 100%收到数据, 这里与通信距离, 和信号避让的时间有关系。

4.4.3 通信延时测试

4.4.3.1 测试方案

本文设计的智慧消防系统支持 3 跳网络, 加上末端设备一共 4 跳, 将 LoRa 网关、可燃气体探测器、光电感烟探测器和人体红外探测器按照下图 4.30 示意构建网络, 通过上位机软件给 LoRa 网关发送测试延时专用数据帧, 终端节点收到该帧后回复相同数据帧。射频参数按照 4.3.1.1 节设置。

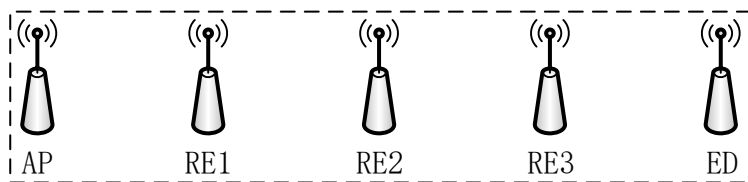


图 4.30 延时测试网络部署示意图

数据通信过程: ①上位机软件向 LoRa 网关发送测试帧; ②LoRa 网关经中继器转发测试帧给终端节点; ③终端节点应答回复; ④节点回发测试帧; ⑤LoRa 网关应答回复; ⑥LoRa 网关回复上位机软件; ⑦传输测试结束。

本次测试不计上位机软件与 LoRa 网关通信耗时, 只统计 LoRa 网络完成一次数据发送的耗时, 即从过程 2 到过程 4 所需时间。

4.4.3.2测试数据

表 4.9 网络延时测试

有效字节数 (Byte)	理论往返延时 (ms)	实际往返延时 (ms)
10	272.4	408.6
20	395.28	592.87
30	518.16	1021.89
40	641.04	1193.67
50	763.92	1498.26
100	1337.36	2256.04
150	1910.8	3266.7
200	2484.24	4026.36
255	3139.6	4709.4

4.4.3.3结果分析

从测试数据来看，三跳网络当传输数据较少时，往返延时时间在 1.2 秒以下。由于退避机制和网络重发机制，实测得到的传输往返传输时间存在偏差。

4.5 本章小结

本章主要对 LoRa 无线网络进行设计；首先对定义设备类型，设计网络拓扑结构设计和系统总体框架；结合 LoRa 特性分层设计网络协议栈结构、数据帧格式，并设计多种网络关键机制提高 LoRa 网络可靠性；然后对多跳网络情况进行分析，提出相应多跳解决机制；最后对设计的网络进行测试验证。

第5章 总结与展望

5.1 总结

火灾已成为日常生活中多发灾害，人们对消防系统的要求也越来越高，传统有线消防系统急需改造升级。而采用 Zigbee、WiFi、NB-IOT 等技术的无线消防系统在大规模应用上存在覆盖范围小、组网能力差、功耗高等问题。面向长距离、低功耗应用场景的 LoRa 无线组网技术在消防系统上的应用越来越受到重视。本文设计实现了基于 LoRa 无线组网技术的智慧消防系统，本文主要工作如下：

(1) 指出当前无线消防系统的缺陷，对本文设计的智慧消防系统无线网络提出相应需求，并对当前常用的无线通信技术分析对比，并对终端节点低功耗技术以及 LoRa 中继技术进行相关研究，为本文系统设计提供方向。

(2) 针对当前消防系统的缺陷，对系统总体方案进行设计，实现了 LoRa 网关、光电感烟探测器、可燃气体探测器、人体红外探测器的软硬件设计，并且对三个监测设备进行功能测试验证。

(3) 针对电池供电的光电感烟探测器和人体红外探测器，从软硬件两方面进行低功耗设计，硬件上通过选择低功耗芯片以及设计红外发射、接收控制电路降低功耗，软件上首先进行总体设计，并加入基于 RSSI 值修正的自适应发射功率校正控制算法，根据无线链路质量实时调节两个探测器的发射功率。通过实际测试，光电感烟探测器待机功耗 14.55uA，可使用 5 年以上；人体红外探测器待机功耗 14.55uA，可使用 2 年以上。

(4) 为解决当前无线消防系统通信距离短、覆盖范围小等问题，本文设计了无线自组网网络，使用网状拓扑结构，以可燃气体探测器作为中继器，实现多跳网络传输，并且加入一应一答、网络检测、特殊数据处理等多个关键机制提升网络的可靠性。通过实际测试，所设计的网络单跳室内水平通信距离可达 150 米，垂直距离为 2 层楼高度，通信延时小于 1.2s。

5.2 展望

本文所设计的智慧消防系统基本可以解决当前无线消防系统所存在的一些问题。但还存在以下几个问题值得进一步深入探究：

(1) 本文所设计的光电感烟探测器和可燃气体探测器使用相对简单的阈值方法进行报警判定，还是存在一定概率的误报，还需要对火灾探测算法进一步研究；另外复合传感器探测火灾的方案日益成熟，下一步可以使用复合传感器加模糊神经网络的处理方式获得相对精确的结果；

(2) 本文设计的组网方案只对小规模应用进行验证，而在实际应用时 LoRa 网关理论挂

载节点数量为 1024 个，网络庞大复杂，有可能出现通信拥堵、延时较长的情况，还需对通信协议以及中继转发进一步深入探究；

（3）在低功耗设计方面，可对 MAC 层协议及控制算法深入探究，进一步降低数据通信功耗。

致 谢

时光匆匆如流水，转眼间，研究生生涯随着毕业论文的提交即将结束，在杭州电子科技大学电子信息学院的每一次学习都是实实在在的经历，都是最珍贵的记忆。在论文完成之际，我要衷心的感谢在学习中帮助过我的每一位老师、同学和朋友，是他们的帮助和支持使我不断成长，谨此致以最深的感谢！

首先，感谢我的导师陈科明副教授，陈老师渊博的专业学识、严谨的教学态度以及精益求精的工作作风，对我影响深远。在三年的学习生涯中，陈老师在学习和科研方面给了我大量指导，并为我们提供良好的科研环境，让我学到了知识，也获得了实践锻炼的机会。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。

感谢我的同门吴新虎、王彪、杜坤、郑杭明、安建伟、檀宇、俞峰、王奕怡同学，他们是我学习、工作和生活上的伙伴，也是我面对困难和挑战时的战友；感谢我的师兄蔡孟君，给予我无私的帮助和鼓励，让我学到很多；也感谢师弟师妹，为我提供的帮助。

感谢我的父母及家人多年来对我的一贯关心、爱护和帮助，无论任何时候都没有给我压力，给了我一个轻松的求学环境。他们的支持、理解和鼓励是我努力完成学业的精神支柱。

最后，感谢论文评阅老师和答辩委员会的各位老师！感谢培养教育我的杭州电子科技大学，电子信息学院浓厚的学术氛围，舒适的学习环境我将终身难忘！

参考文献

- [1] 秦家伟.基于无线传感网的智慧消防预警系统[D].南京邮电大学,2018:1-2.
- [2] 韩倩倩.基于 LoRa 技术的无线火灾报警系统研究[D].北京建筑大学,2020:6.
- [3] 陈亚飞.基于 LoRa 技术的区域安防报警系统设计与实现[D].河北工程大学,2018:2-5.
- [4] 黄林.基于双环境感知与智能化处理的消防系统设计[D].浙江工业大学,2018:16.
- [5] 李鑫.无线通信技术在消防通信系统中的应用[J].信息技术与信息化,2020,(11):132-134.
- [6] 喻阳江.基于 GPRS 的室内无线智能消防系统[D].汕头大学,2018:2-4.
- [7] 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,(13):12-13.
- [8] 夏晶.Bluetooth 技术综述[J].科技信息(科学教研),2007,(26):77.
- [9] Li Fei, Liu Min, Zhang Yue, et al. A Two-Level WiFi Fingerprint-Based Indoor Localization Method for Dangerous Area Monitoring[J].Sensors(Basel, Switzerland), 2019,19(19):4243.
- [10] 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.
- [11] Sanchez-Iborra Ramon, Sanchez-Gomez Jesus, Ballesta-Viñas Juan, Cano Maria-Dolores, Skarmeta Antonio F. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions[J].Sensors(Basel, Switzerland), 2018,18(3):324-329.
- [12] 曾佳.小型无线传感器网络的可靠性研究[D].杭州电子科技大学,2015:13-14.
- [13] 赵琰琰,蒋遂平,车立春.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.
- [14] 蔡孟君.基于无线组网技术的智能地暖控制系统[D].杭州电子科技大学,2019:34.
- [15] 蔡志伟.面向林火预警的 ZigBee 与 LoRa 无线传感网络通信及覆盖研究[D].哈尔滨师范大学,2020:15-27.
- [16] 林晟威.面向物联网应用的无线中继技术的设计与实现[D].北京邮电大学,2019:35.
- [17] José Dias, António Grilo. LoRaWAN multi-hop uplink extension[J].Procedia Computer Science, 2018, 130:424-431.
- [18] 万露. LoRa 上行多跳通信研究及在输电线路中的应用[D].安徽理工大学,2018:19-26.
- [19] Liao C H, Zhu G, Kuwabara D, et al. Multi-hop LoRa networks enabled by concurrent transmission[J].IEEE Access, 2017,5:21430-21446.
- [20] 陈伦斌.无线 LoRa 在输电线路监测中的组网设计与实现[D].西安理工大学,2017:30-33.
- [21] Sartori B, Thielemans S, Bezunartea M, et al. Enabling RPL multihop communications based on LoRa[C]//2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications(WiMob). IEEE, 2017:1-8.

-
- [22]GB 25017-2006, 独立式感烟火灾探测报警器[S], 2006.
 - [23]GB 15322.2-2019, 可燃气体探测器 第 2 部分: 家用可燃气体探测器[S], 2019.
 - [24]GB 10408.5-2000, 入侵探测器 第 5 部分: 室内用被动红外探测器[S], 2000.
 - [25]郑卓然.多跳无线体域网组网方法与轻量级节能算法研究[D].山东师范大学, 2019:21-23.
 - [26]Reijers N, Halkes G, Langendoen K. Link layer measurements in sensor networks[C]//IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. IEEE, 2004:224-234.
 - [27]施志荣.基于 RSSI 测距的无线火灾定位报警系统研究[J].长春师范大学学报,2019,38(06):56-60.
 - [28]Wang J, Gao Q, Yu Y, et al. Toward Robust Indoor Localization Based on Bayesian Filter Using Chirp-Spread-Spectrum Ranging[J].IEEE transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3):1622-1629.
 - [29]Wang J Y, Chen C P, Lin T S, et al. High-Precision RSSI-based indoor localization using a transmission power adjustment strategy for wireless sensor networks[C]//High performance Computing and Communication & 2012 IEEE 9th International Conference on Embedded Software and Systems(HPCC-ICES), 2012 IEEE 14th International Conference on. IEEE.2012:1634-1638.
 - [30]Zhu J, Luo H, Chen Z, et al. RSSI based Bluetooth low energy indoor positioning[C]//Indoor Positioning and Indoor Navigation(IPIN), 2014 Internationnal Conference on IEEE, 2014:526-533.
 - [31]Xiao S, Sivaraman V, Burdett A. Adapting radio transmit power in wireless body area sensor networks[C]//Proceedings of the ICST 3rd international conference on Body area networks. ICST(Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering), 2008:1-4.
 - [32]LEI Jie. Clustering routing algorithm for wireless sensor networks based on changing energy[J].Computer Engineering & Applications, 2009,45(33):105-107.
 - [33]李梁.地质体微振动监测无线组网关键技术研究[D].成都理工大学, 2015:41.
 - [34]王维.通信实时数字信号处理系统早期功/能耗估计与优化[D].北京理工大学,2017:24-25.
 - [35]赵静,苏光添.LoRa 无线网络技术分析[J].移动通信,2016,40(21):50-57.
 - [36]甘露.基于功率控制的无线体域网能量有效传输策略研究[D].重庆邮电大学,2018:6-9.
 - [37]姜亚竹.基于 ZigBee 技术的井场测控系统的低功耗研究[D].上海交通大学,2017:14.
 - [38]郑浩.LoRa 技术在低功耗广域网络中的实现和应用[J].信息通信技术,2017,1101:19-26.
 - [39]刘丹.基于网络层的低速无线个域网节能方法研究[D].吉林大学,2013:10.
 - [40]李金瑶. LoRa 物联网技术及应用[J].电子技术与软件工程,2019(19):5-6.
 - [41]陈宇翔. LoRa 应用关键技术研究[D].杭州电子科技大学,2019:6.

- [42]雷晓明.基于物联网的无线消防系统的研究与应用[D].华北电力大学,2013:7-8.
- [43]王策.混合无线 Mesh 网络协作式安全路由协议研究[D].吉林大学,2019:6.
- [44]苗婷蕊.高效率中继技术的研究[D].北京邮电大学, 2015:8-10.
- [45]梁度.微功率无线通信路由设计与实现[D].重庆邮电大学, 2017:17.
- [46]武吉庆.基于 LoRa 无线技术与 MQTT 通信协议的高压输电线路在线监测终端的设计与实现[D].郑州大学,2018:9-10.
- [47]陈方亭.基于 LoRa 的窄带无线自组网路由协议研究[D].西安电子科技大学,2018:6-13.
- [48]肖思琪.基于 LoRa 的智能电表集抄系统设计[D].湖南大学,2018:8-9.
- [49]Jun Cai, Xuemin, et al.Semi-Distributed User Relaying Algorithm for Amplify-and-Foward Wireless Relay Networks[J]. Wireless Communications IEEE Transactions on, 2008, 7(4):1348-1357.
- [50]丁兴建.无线传感器网络中跳数受限的中继节点部署问题研究[D].北京林业大学,2017:5-8.

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] 消防 LoRa/NB-IOT 产品及 LoRa 无线系统开发，横向课题
- [2] 奥拓高端海洋设备远程运维系统，横向课题
- [3] 智能健康蒸汽房系统，横向课题

专利：

- [1]司端杨,陈科明,曾佳.一种线缆式定位漏水检测装置及方法[P].中国专利，申请公布号：CN112414647A，2021-02-26