

分类号 TP216+.1

学 号 151050218

密 级

西安石油大学

Xi'an Shiyou University

全 日 制 学 术 型

硕 士 学 位 论 文



题 目 基于LoRa技术的油田井口仪表
数据传输研究与实现

作 者 姓 名 韩佳佳

导师姓名、职称 孟开元 副教授

学科(专业)名称 信息与通信工程

提交论文日期 2018年6月5日

学位论文创新性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安石油大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

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：韩佳佳

日期：2018.6.5

学位论文使用授权的说明

本人完全了解西安石油大学有关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西安石油大学。学校享有以任何方法发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为西安石油大学。

论文作者签名：韩佳佳

日期：2018.6.5

导师签名：苏平元

日期：2018.6.5

• 注：如本论文涉密，请在授权说明中指出（含解密年限等）。

论文题目：基于 LoRa 技术的油田井口仪表数据传输研究与实现

专 业：信息与通信工程

硕 士 生：韩佳佳（签名）_____

指导教师：孟开元（签名）_____

摘 要

针对油田现场各个油井分布距离远、数量多、采集信息庞大、处理任务重等问题，本文将 LoRa 无线技术应用到传统的油田仪表中，设计出符合油田复杂工作环境的新仪表，模拟了油田数据的传输过程。

首先对油田井口数据采集过程进行分析，阐述了基于 LoRa 技术的油田井口仪表的功能需求和关键技术，对油田井口仪表总体设计方案进行详细设计；其次对 LoRa F8L10D 数据传输模块和 SX1276 芯片以及 LoRaWAN 通信协议进行研究，从硬件和软件两个层面出发设计出符合要求的无线通信模块；最后对设计的新型仪表进行软硬件方面的调试，测试实际的通信距离、功耗以及通信质量等相关问题，从而达到对现有仪表的改进，设计出符合预期目标的新仪表。

实验结果表明，该仪表能够在远距离环境下正确接收和发送相关数据，测试结果表明该仪表达到了低功耗的要求，满足油田井口仪表数据传输的要求，降低了油田井口仪表数据系统的复杂性，减少了油田现场的调试工作量和生产成本。

关键字：LoRa 技术；油田井口；数据传输；SX1276

论文类型：应用研究

**Subject : Research and Implementation of Oilfield Wellhead Instrument Data
Transmission Based on LoRa Technology**

Specialty: Information and Communication Engineering

Name: Han Jiajia (signature) _____

Instructor: Meng Kaiyuan (signature) _____

ABSTRACT

In terms of current pending issues on oilfield site, for examples, fields are settled with a great distance and a large quantity, therefore, it is a hard task to collect information and be processed. The thesis introduces particularly that the LoRa wireless technology is applied into traditional field instrument in order to design a new instrument working in a complex environment to simulate the transmission process of the oil field data.

Firstly, according to analyzing the process of the oilfield data acquisition, the thesis expounds the function requirement and key technologies of wellhead instrument based on LoRa technology so that the overall design scheme of wellhead instrument can be designed in more details. Moreover, it is the study of LoRa F8L10D data transmission module, SX1276 chip and LoRaWAN communication protocol in the thesis that is conducive to design the wireless communication module which can meet the requirements from two aspects of hardware and software. Last but not the least, it is a necessity to debug the hardware and software of the new instrument for the design by testing the actual problems related to the communication distance, power and communication quality, so as to achieve the improvement of the existing instrument, designing new instruments in line with expectations.

The experimental result shows that the tested new instrument can not only receive and send the relevant data correctly in the remote environment, but also meet the requirements of low power consumption and wellhead meter data transmission. The better effects are that the complexity of wellhead instrument data system, the field debugging workload and the cost of production are reduced.

Key words: LoRa Technology; Oil-Field Wellhead; Data Transmission; SX1276

Thesis: Application Research

目 录

第一章 绪论	1
1.1 论文的研究背景和意义	1
1.1.1 论文的研究背景	1
1.1.2 论文的研究意义	2
1.2 国内外研究现状与发展前景	3
1.2.1 国内外研究现状	3
1.2.2 发展前景	4
1.3 论文研究的主要内容和组织结构	4
1.3.1 论文研究的主要内容	4
1.3.2 论文的组织结构	5
第二章 基于 LoRa 技术的油田井口仪表设计的需求分析	6
2.1 仪表的需求分析	6
2.1.1 仪表的功能性需求	6
2.1.2 仪表的非功能性需求	6
2.2 系统的软硬件平台及相关技术	7
2.2.1 软硬件平台	7
2.2.2 仪表的关键技术	7
2.2.3 仪表的特点分析	9
2.3 本章小结	9
第三章 油田井口仪表的硬件设计	11
3.1 油田井口仪表硬件的总体设计	11
3.1.1 总体系统设计	11
3.1.2 硬件开发平台	11
3.2 基于 SX1276 的硬件设计	12
3.2.1 SX1276 芯片简介	12
3.2.2 SX1276 数字电路	15
3.2.3 LoRa 扩频调制技术的相关参数	16
3.2.4 LoRa 的数据包结构	18
3.2.5 LoRa 数字接口	19
3.2.6 LoRa 调制解调器的操作模式	21
3.2.7 LoRa 调制解调器状态机序列	21
3.3 LoRa 模块	26
3.3.1 LoRa 模块的技术规格	26
3.3.2 LoRa 模块的外围电路	27

3.4 PCB 板绘制	32
第四章 LoRa 协议的设计和数据处理	35
4.1 通信协议的设计	35
4.1.1 LoRa 的标准协议 LoRaWAN	35
4.1.2 LoRa 模块的通信协议设计	36
4.2 数据处理	38
4.2.1 数据发送	38
4.2.2 数据接收	38
4.2.3 其它功能	39
4.3 本章小结	40
第五章 基于 LoRa 技术的仪表数据传输实现与测试	41
5.1 测试环境搭建	41
5.1.1 软件平台介绍	41
5.1.2 测试环境搭建	41
5.1.3 硬件设备程序的下载与调试	42
5.2 基于 LoRa 技术的油田井口仪表的实现与测试	42
5.2.1 LoRa 仪表的配置及参数	42
5.2.2 LoRa 仪表的测试	44
5.2.3 数据收集与分析	50
5.3 测试结果分析	51
5.4 本章小结	51
第六章 结束语	52
6.1 总结	52
6.2 展望	52
致谢	53
参考文献	54
攻读学位期间参加科研情况及获得的学术成果	57

第一章 绪论

随着科技的发展和社会的进步，工业自动化、农业、医疗、物流、航空航天、军事等领域发生了翻天覆地的变化，油田的数字化、智慧化建设更是依托无线通信技术和嵌入式系统的发展。借助这些高新技术的发展，传统油田的运行模式正在退出历史舞台，取而代之的是数字化、智慧化并逐步向物联网的方向靠拢，其中无线仪表充当了不可或缺的作用。目前，无线仪表已经逐渐取代传统的有线仪表，随着技术的不断发展，油田现场将会全面应用无线仪表。因此，无线仪表所采用的技术及其质量对油田生产起着至关重要的作用，目前也是各大公司和仪表厂商研究的热点，同时也是智慧油田建设过程中迫切需要解决的问题之一。

1.1 论文的研究背景和意义

智慧油田概念的提出是对传统油田的进一步完善，提出了如何有效利用现有的数据信息经过一系列的处理、分析，解决传统石油工业如何提高生产效率、降低生产成本的课题。油田井口仪表起到了关键性的作用，同时将 LoRa (Long Range) 技术应用到传统仪表中有利于推动智慧化油田的发展。

1.1.1 论文的研究背景

能源作为人类发展进程中的永恒话题，在每一个发展阶段都是万众瞩目的焦点，因为它控制着国家经济的命脉，石油作为地球上最重要的化石能源之一，一直都是各个国家争夺和储备的重要战略资源。这些年来，我国经济持续高速增长的背后是对石油的过渡依赖，是用石油消耗量堆积起来的粗犷型经济。结合我国近几十年来石油产量和消耗情况以及近几年的数据，可以看出 2017 年我国石油消费总量持续增加同 2016 年相比增长了 5.9%，消费总量达到历史新高 5.88 亿吨，石油对外依存度首次突破 65% 大关达到了惊人的 67.4%。而且根据相关统计学家预测，2018 年我国石油消费总量将很有可能会一举超过 6 亿吨，对外的依存度将会达到 70% 附近。目前由于我国石油井口分布散乱、环境恶劣、开采难度大、成本高的特点导致油田开发工作还有巨大的提升空间。此外，随着经济的发展和工业生产观念的转变，使得石油生产急需摆脱传统的生产方式向数字化、智慧化迈进。在我国工业发展初期，油田上的数据基本上是油田工人现场收集，油田上的设备维护和管理采用的是工作人员定期巡检的方式，设备的检测及油井的工作状态则由工程师评估，由于油田现场环境复杂，油井与油井相互之间较为分散，致使工作人员不能在事故发生的第一时间发现，并采取有效的救援措施。这种运作模式实时性不高、代价大，往往会错失最佳的处理时间从而酿成大祸，在这种情况下无线仪表得以发展^[1]。在当前的油田系统中，采用的是基于 ZigBee 技术的无线仪表对井口数据进行采集，这样可以实现数据的远程采集，可以及时将数据汇总、处理，及时发现隐患从而降低生

产成本。

在现有的工业环境中，因为受到现场环境和其他条件的限制，采用传统的有限电缆进行数据传输存在着各种各样的问题，特别是在一些特殊环境中极不方便，无线仪表一经问世便得到了市场的认可。目前无线仪表中应用最多的无线通信技术是 ZigBee，其低数据速率、自组织、低功耗、低复杂度、近距离传输等特点迎合了现场复杂环境的需求。但是随着经济的飞速发展，工业上对无线仪表的需求急剧增长，无线网络的规模呈几何方式扩增，生产成本也在急剧增加，ZigBee 技术已经不能更好的适应现有的环境，各仪表厂商纷纷寻求新的技术。在这种情况下，再加上无线通信技术和计算机技术的迅猛发展以及嵌入式技术的逐渐成熟，各大仪表厂商和半导体厂商的科研攻关，无线通信技术发生了革命性突破，新一代无线技术 LoRa、NB-IOT、Sigfox 等的诞生给仪器仪表领域注入了新鲜的血液，带来了新的发展方向。

基于 ZigBee 技术的无线仪表在工业领域遇到的瓶颈，在油田领域也没有得到有效的避免。近年来，由于油田规模的急剧扩增，对数据的处理能力要求更高，ZigBee 技术的通信距离有限，导致组网规模进一步增大，整个网络臃肿不堪，为此本课题将传输距离更远的 LoRa 技术应用到油田井口仪表数据采集的过程中^[2]，从而降低组网规模，增加单个设备的网络覆盖范围，降低生产成本。

1.1.2 论文的研究意义

随着社会的发展，从国家层面到各行各业都寻求着转型，追求更好更健康的发展方式，追求从传统的高速增长向高质量增长转变。油田领域也不甘落后提出了智慧油田的新概念，为将来的发展提供了新思路。在油田的生产环节，数据监测极为重要，但由于油井数目多、分布不集中，如何利用较少的人力资源更高效的收集数据维护设备便成了一个重要问题。有线仪表由于其传输介质和油田地形的特殊性，维护成本高传输距离受到的限制较多，正因为这些原因无线仪表以其设计简单灵活、接入方便、安全可靠、节约空间和成本低等优势得到了快速的发展。因此，采用一种传输距离远、功耗低、成本低、可靠性高的通信技术应用到无线仪表中能更好的提高生产效率^[3]。

LoRa 技术自诞生以来，就受到了各大无线通信厂商和国内外学者的广泛关注，其凭借着部署简单、深度覆盖、低功耗等特点得到了要求功耗低、传输距离远、大量连接以及追踪定位等物联网应用的垂青，应用的范围主要有智慧农业、智能停车、车辆追踪、智能抄表、智慧城市等应用领域。

综上所述，如果可以将 LoRa 技术应用到油田领域，为油田数据采集系统提供实时可靠的现场数据，这将会在一定程度上提高油田数据采集的智能化，推动智慧油田的进程。同时可以结合相关技术，为油井工作状态的判断提供更多的技术依据，模拟现场对比相关数据实现远程诊断、操作、预测等一系列决策，从而降低油井事故的发生减少不必要的损失，提高产油效率，丰富智慧油田的功能。同时物联网、人工智能、大数据、

云计算等技术的成熟，将会进一步推动智慧油田的发展进程^[4]。

本文从以上问题着手，因为导致无线仪表网络现有处境的核心问题是 ZigBee 技术的短距离传输，为改善这一状况，针对油田井口数据传输设计出基于 LoRa 技术的无线仪表，达到增加数据的传输距离，降低仪表功耗，降低生产成本，简化网络的目标^[5]。

1.2 国内外研究现状与发展前景

1.2.1 国内外研究现状

随着物联网技术的不断发展，传统的无线通信技术在各个领域逐渐失去了绝对的优势。像 2G/3G/4G、蓝牙、ZigBee、WiFi 等传统无线通信技术，已经不能满足用户对低功耗和远距离的双重需求。在这种大环境下低功耗广域网(Low Power Wide Area NetWork, LPWAN)横空出世，它克服了传统技术的障碍，在降低功耗的同时获得了远距离通信的能力。

LoRa 是以扩频通信技术作为技术支撑的远距离传输解决方案，也是一种低功耗广域网技术。这种方案有别于以往那种不能同时兼顾低功耗和传输距离的解决方案，是一种简单的并且能够同时兼顾远距离、低功耗、大容量的系统^[6]。现阶段，LoRa 网络主要在 915、868、433MHz 信道上传输信息，这些频段在全球大部分地区和国家都是免授权频段即免费频段，为 LoRa 技术的推广起到了至关重要的作用^[7]。

2015 年 3 月，一个以向全球推广 LoRa 技术，加快 LoRa 技术商用步伐的非盈利、开放性组织 LoRa Alliance（简称 LoRa 联盟）正式成立。该联盟自成立以来成员数量迅速增加到目前已经超过 300 多个，其中包括 ZTE、ARM、荷兰皇家电信 KPN、Semtech、ST、Cisco 等全球知名科技公司。

中兴通讯（ZTE）于 2016 年 6 月正式加入 LoRa Alliance。2016 年 7 月，在中兴通讯的推动以及 LoRa Alliance 的授权下成立了一个由各行业物联网应用创新主体为主的跨行业、共同合作、广泛参与的全国性技术联盟即中国 LoRa 应用联盟（China Lora Application Alliance, CALL）。CLAA 的所有成员均是全国各个行业的物联网主体，其主要目标是推动 LoRa 技术及其相关产业链在国内的发展和商用，共同建设中国的 LoRa 物联网技术交流平台，使 LoRa 物联网业务朝着低成本、广覆盖、可以运营以及多业务共享的方向迈进。

从 LoRa Alliance 官方展示的信息表明，目前世界上已经有超过 30 个国家和 150 个城市正在进行试点或部署 LoRa 网络，其中建立或部署 LoRa 的国家有印度、法国、德国、美国等，计划在全国范围内计划建立 LoRa 网络的国家有瑞士、韩国、荷兰等。

在国内典型应用案例是南京 AUGTEK 公司将 LoRa 网络部署在京杭大运河沿岸，到目前为止已经完成了江苏段的网络覆盖；2017 年 10 月 18 日，国内最大的共享单车之一 ofo 正式将 LoRa 模块应用到其单车中，实现其单车的智能化管理；在国内 LoRa 技术还被广泛应用在农田、停车场等各种各样的场合，为 LoRa 网络的应用和建设带来了巨大

的发展空间。

综上所述, LoRa 技术凭借其组网简单、传输距离远、功耗低等特点, 迅速在无线通信领域占领一席之地。本文将在智慧油田中引入 LoRa 技术, 用来收集油田井口的数据并上传至处理中心帮助系统和油田工作人员及时做出合理的操作, 有利于提高生产效率避免一些不必要事故的发生。

1.2.2 发展前景

近年来无线通信技术迎来了一个飞速发展的黄金时期, 无线数据通信的业务量也呈指数式增长, 加上计算机网络技术、半导体技术、以及嵌入式系统的不断发展, 无线通信行业已经不满于短距离的数据传输, 逐渐向远距离、低功耗、大量连接的方向发展。与此同时物联网也对无线通信网络技术有着非常大的期待, 特别是在一些不适合使用 4G/5G 网络的环境, 低功耗网络 (LPWAN) 有着不可替代的作用。LPWAN 技术的特点和物联网应用所需要的远距离、低功耗、远距离、大量连接不谋而合, 也可以说低功耗网络是为物联网而生的^[8]。

LPWAN 可以分为工作于非授权频段的 LoRa 技术和工作于授权频段的 NB-IoT 技术两大类。在国内 LoRa 相较于 NB-IoT (Narrow Band Internet of Things) 发展的极为低调, 华为和三大运营商合作利用现有的移动通信网络加快 NB-IoT 网络的覆盖, 再加上该技术本身具有覆盖面积更广, 适合较为分散的网络的特点为 NB-IoT 网络的发展增加了保障; LoRa 网络则适合密集度更高的边缘地区, 具有成本低、信号强、相对独立的优点^[9]。本文在油田井口仪表中使用 LoRa 技术, 是因为 LoRa 技术的连接量巨大、通信频次低、功耗小以及能适应复杂覆盖环境的特点更适合油田现场环境。

城市感知类应用将会伴随着智慧城市建设程度的深化逐渐深入人心, 这一类型的物联网应用为 LoRa 提供了一个庞大的发展市场, 同时 LoRa 为智慧农业、智能家居、工业制造等不同的物联网行业提供前进的动力^[10]。另一方面, LoRa 也可以用于定位系统, 其中室外定位是将 LoRa 和 GPS 结合, 典型的案例是城市垃圾管理、动物定位以及冲浪/滑雪人员定位等^[11]; 其中室内定位是将 LoRa 和 BLE (蓝牙) 结合, 典型的案例是医院护理跟踪系统^[12]。

1.3 论文研究的主要内容和组织结构

研究和调查与 LoRa 技术和油田井口数据相关的资料以及国内外智慧油田的发展现状, 明确论文研究的主要内容和组织结构。接下来将从研究的主要内容和组织结构两个方向进行介绍。

1.3.1 论文研究的主要内容

本文主要是将 LoRa 扩频技术应用到油田井口仪表中, 设计和实现符合新型仪表的电路结构。通过对 LoRa 标准协议 LoRaWAN 内容的研究, 设计出符合现有系统的通信

协议，完成仪表之间的数据通信过程；在 Keil MDK 开发环境下使用 C 语言编程实现仪表的数据采集、数据存储、无线通信等功能。同时有目的的针对基于 LoRa 技术的油田井口仪表的各个功能进行调试和优化，设计出符合要求的油田井口仪表。

1.3.2 论文的组织结构

本文的主要内容分以下六章：

第一章：绪论。包含的内有论文的选题背景、研究意义、国内外研究现状、发展前景以及论文研究的主要内容和组织结构。

第二章：基于 LoRa 技术的油田井口仪表的总体设计。首介绍了基于 LoRa 技术的油田井口仪表的需求分析，其次明确了该仪表所需要实现的功能，最后介绍了本文所需的软硬件平台并提出设计方案，为之后的研究奠定基础。

第三章：油田井口仪表硬件设计。根据仪表所使用的 SX1276 芯片的技术特性以及 F8L10D LoRa 模块的相关特性，明确仪表的硬件电路设计与实现的相关方法。

第四章：LoRa 协议的设计和数据处理。介绍了 LoRa 技术的标准协议 LoRaWAN 和其数据收发的机制，确定了仪表最终所使用的自定义协议格式。

第五章：基于 LoRa 技术的油田井口仪表系统的实现与测试。主要讲述了测试环境的搭建，以及相关的配置和测试。

第六章：结束语。包括总结与展望，对本文所做工作进行总结，结合智慧油田建设的理念，对基于 LoRa 技术的油田井口仪表提出需要改进和完善的地方，并对研究的内容进行了分析与展望。

第二章 基于 LoRa 技术的油田井口仪表设计的需求分析

随着计算机技术的发展，产品的开发与设计越来越追求高质量、高效率、高稳定性以及高性价比，因此在一个产品设计之初，就应该对产品进行合理的需求分析。需求分析是了解一个产品的市场需求和前景，一个需求分析的质量直接影响着产品的设计方向，开发人员只有在充分了解需求分析的前提下，才能研发出符合实际需求的产品；总体设计，就是根据需求分析建立的设计框架。由此可见，需求分析与总体设计对产品的成型有着非比寻常的作用。

2.1 仪表的需求分析

在设计油田井口仪表之前，进行需求分析是一项必不可少的工作，我们通常从功能性需求和非功能性需求两个方面着手分析。功能性需求主要是从硬件设备本身直观性能方面分析，如物理量、数据收发和查询等；非功能性需求主要是从硬件设备原则入手，相对来说就是抽象性的功能，所开发的设备必须满足这些原则才能算是合格的产品。因为资源有限、设备运行环境相对复杂，所以在油田井口仪表的设计之初进行需求分析非常重要。

2.1.1 仪表的功能性需求

油田现场环境复杂，为了能更好的了解到油田设备的工作状态所需要采集的数据种类非常多包括角位移、压力、载荷、温度等，这些都依靠仪表通过传感器采集。要对油田现场的实际情况进行数据测试，必须实现以下功能：

- (1) 常规数据的采集，例如压力、载荷；
- (2) 数据的存储、查询、删除；
- (3) 数据的发送和接收。

2.1.2 仪表的非功能性需求

油田井口仪表作为油田现场数据采集的重要设备，在设计和开发的过程中，应该最大程度的满足以下几点：

(1) 可靠性。油田井口仪表是整个智慧油田系统的数据接口，有着非常重要的作用，收集着油田井口设备工作过程中的重要信息，为整个系统提供决策和分析所必须的数据。因此，油田井口仪表的可靠性是非常重要的一个性能，直接关系着向上层网络发送的数据的准确性^[13]。

(2) 易升级。由于油田现场环境的复杂性，油田设备都是专门定制的，有着非常强的针对性，这就导致此类设备有着较长的换代周期，所以在设计的过程中应该充分考虑这些因素，采用易升级的器件和设备的同时应该留有相应的接口供后期的软硬件更新，为将来接入标准的 LoRaWAN 网关及其组成的 LoRa 网络中做准备^[14]。

(3) 精简性。油田井口仪表的功能主要是数据采集、存储、收发等，简单决定了仪表是一种小体积的微型嵌入式系统，所以在设计的过程中应该尽可能的精简，软件方面精简代码的内存占用空间，硬件方面减少按钮数量，从而达到缩减仪表体积的目标^[15]。此外协议的实现也需要精简性，该仪表是用来对油田井口设备的参数、工作状态信息进行收集同时接收上层网络的命令，相对比较简单，为此在设计自定义协议时，只需设置相应信息即可，从而大大精简协议格式减少资源浪费。

(4) 稳定性。衡量一个设备的好坏，稳定性也是一个必须考量的因素，同样对于油田井口仪表，稳定性显得更加至关重要。众所周知油田系统为了保证安全性降低事故率，需要时刻监测着设备的工作状态，为了实现这一目的油田井口仪表的稳定性就显得尤为重要^[16]，因此在设计油田井口仪表的过程中，不管是软件层面还是硬件层面都应该非常重视稳定性。

(5) 标准性。本文所设计的仪表在某种成度上是对现有 ZigBee 仪表从硬件到软件的革新，这必然会设计到一系列的标准和规范。所设计的仪表，硬件上要符合硬件设计标准，这样设计的电路才能更加合理、规范；软件上设计的自定义协议，要符合 LoRaWAN 标准协议的同时具备后期升级的特性，为以后接入 LoRaWAN 网关做好技术支持。

2.2 系统的软硬件平台及相关技术

基于 LoRa 技术的油田井口仪表是用来测量油田井口数据，以便工作人员观察油田的工作状态以及对进一步操作的指导。总的来说仪表设计包含硬件和软件两个部分，下面就从这两个部分进行说明。

2.2.1 软硬件平台

从硬件方面来说，在进行基于 LoRa 技术的油田井口仪表的硬件开发过程中，采用的是最方便、操作最快捷、设计化最好的辅助工具 Altium Designer13，对硬件设计从高级信号完整性分析、电路模拟仿真、印刷电路板、电路原理图等方面进行设计和分析^[17]，硬件设计的详细描述见第三章。

从软件方面来说，在进行基于 LoRa 技术的油田井口仪表的开发过程中，是将界面友好、稳定、使用简单的 Windows 操作系统作为其软件开发平台。仪表的软件开发是采用基于 Windows 平台应用范围最广的嵌入式集成开发环境 Keil MDK，其提供丰富的库函数方便开发人员直接调用，再加上功能强大的集成开发调试工具的辅助，极大的促进了软件设计的进程^[18]。软件设计的详细描述见第四章。

2.2.2 仪表的关键技术

本文将 LoRa 扩频技术应用于油田井口仪表中，取代传统的 ZigBee 技术进行油田井口数据的传输。

LoRa 是一种扩频通信技术。扩频通信简单的说就是一种扩展频谱的通信技术，其基本特点是信息本身的带宽比传输过程中所用的带宽小很多^[19]。从香农定理上可以看出，在保证信号质量的前提下，可以采用消耗更多宽带资源的方式来降低信道对信噪比的要求^[20]。可以认为扩频通信是一种以牺牲带宽资源为代价来换取信道对信噪比容忍的通信技术。

扩频通信技术与传统的通信技术不同之处就是多了一个频谱展宽的环节，扩频通信技术首先利用扩频码序列对来自发送端经过调制的数字信号，再进行一次调制将原有信号的频谱展宽，紧接着将扩频后的信号调制到射频端发送出去。展宽后的射频信号在接收端先对其降频，将高频信号转换为中频信号，然后利用和发送端相同的扩频码和相关解扩技术对变频后的中频信号进行处理，最后再进行一次解调同时将原始信息输出。由此可见，扩频系统中的信号在发送之前先要经历信息调制、扩频调制以及射频调制三次调制，相应的在信号接收后也要经历射频解调、解扩以及信息解扩三次相反的操作^[21]。

扩频通信的特点主要有以下几点：

(1) 抗干扰性强。扩频系统的抗干扰能力和其扩展的频谱宽度以及处理增益呈正相关关系。简而言之，假设信号的频谱被展宽一倍，那么要干扰该信号则需要覆盖更宽的频带，变相的减少了干扰密度，若还是原来的信道，干扰强度的程度只有之前的一半。同时，因为接收端利用的是扩频码进行相关检测，所以空中即使存在相同类型的干扰信号源也会因缺少相同的码序列，不能对发送信号进行有效的干扰^[22]。因此，抗干扰性成为了扩频通信最大的长处。

(2) 信息保密性好。因为扩频通信是采用在频带上对信号扩展的方法，令信号具有很宽的频谱，结果是极大程度的降低了带宽内的平均功率以及信号的功率谱密度，所以扩频技术下的信号，可以用很低的信号功率谱密度在充斥着热噪声和信道噪声的环境中进行通信。因为信号和噪声交织在一起，被发现的难度很大，所以就导致想检测出信号相关参数的可能性变得极低。

(3) 易于实现码分多址。扩频通信容易实现码分多址得益于扩频通信系统采用扩频码序列进行扩频调制的结果。任意码型的扩频序列之间具有不同的互相关特性和自相关特性，在接收端使用相关检测技术对接收信号进行解扩，可以达到在不同用户使用不同码型的信号的情况下提取出各自信息的效果。这就达到了多用户在同一频带上互相通话而不相互干扰。

(4) 抗多径干扰。多径干扰是无线电通信中面临的一个技术难题，涉及到无线通信的各个频段。传统抗多径干扰的方法有两种：一是梳状滤波器法，采用相关技术在接收端从时域上将来自不同路径的不同相位、不同延时的信号对其相加，合并成有用信号。二是分集接收技术，消除其他路径信号的干扰，只将最强的有用信号单独分离出来即可^[23]。在扩频通信中这两种方法实现都比较简单，从而使抗多径干扰能力得到了很大的提高。

(5) 能精确的测距。由于信号在信道中的传输速率是固定的,所以要利用传输信号测量距离,需要知道传输信号在两个物体之间传输的时长。扩频通信系统中,为了更加准确的计算出扩频信号在信道中消耗的时间,利用发送和接收信号各自的扩频序列码相位差来精确的测量时间,从而计算出测量地到被测量地之间的距离^[24]。测量的精度与扩展频谱的宽度以及码片的宽度具有一定的关系。测量的准确程度与扩展频谱的宽度呈正向关系,与码片的宽度呈反向关系。

(6) 频谱利用率高。频谱资源看似非常充足,实则非常匮乏不足以满足社会的需求。为了使无线电频段的使用更加合理,世界上的所有国家都成立了专门的无线电频率管理机构,用户在使用相应的频率时需要预先申请,防止出现互相干扰的情况。但是扩频通信系统采用的工作频率在世界上大部分国家和地区使用时,不需要提前申请。这是因为扩频通信系统相较于传统技术的通信系统发射功率更低,能够在信道噪声和热噪声环境中工作,更能在同一块区域实现频率重复使用,以及可以和目前各种窄带通信系统共享频率资源^[25]。

21 世纪无线通信系统将进入扩频时代,无论是军事、航空航天、工业、农业、医疗等方面,扩频技术都将有着巨大的发展空间,随着技术的进一步成熟,其应用将会遍及各行各业。此外,低功耗技术和集成电路的发展可以使扩频设备做到成本低、体积小、重量轻,无形中为扩频技术的推广应用创造了绝佳的条件。

LoRa 技术将功耗低、远距离、多节点、低速率、成本低的特性集于一身,再加上具有安全、可靠、网络容量大等特点,为 LoRa 网络的发展提供了强大的竞争优势。相较于 ZigBee 技术能更好的满足市场对无线通信技术的需求,将其应用于油田井口仪表中能更好的推动智慧油田的发展,优化油田产业结构。

2.2.3 仪表的特点分析

由于传统的油田井口仪表采用的是近距离传输的 ZigBee 技术,随着油田规模的急剧扩大致使组网规模大、节点众多极大地提升了节点通讯的功耗,变相的增大了数据传输时延和生产成本,从而有可能为整个生产环节带来一些隐患影响生产。为了避免这种现象,本文将使用 LoRa 技术代替传统的 ZigBee 技术,充分利用 LoRa 技术的自身特性,为油田生产创造更加良好的环境。

LoRa 技术最明显和突出的特性是具有超远的传输距离,理论上一个标准的 LoRaWAN 网关节点可以覆盖周围 5~10 公里范围内的所有无线终端并有效收集相关数据,比传统的通信模式效率高出许多,从而极大程度的降低了设备的功耗。

2.3 本章小结

本章主要对基于 LoRa 技术的油田井口仪表设计的需求分析从不同的方面进行详细的分析。首先从油田井口仪表的需求分析入手,明确目标的相关需求;最后从软硬件平

台、仪表的关键技术和仪表的特点三个方面分析并阐述了油田井口仪表的总体设计。为后续的设计做相关的准备工作。

第三章 油田井口仪表的硬件设计

油田井口仪表的硬件设计是整个油田井口仪表的核心，实现整个油田数据高速、可靠传输的保障，因此在硬件设计时要求各模块朝着低功耗和微型化发展，性能上追求可靠与稳定，这样才能保证仪表在油田生产过程中稳定高效的工作。

3.1 油田井口仪表硬件的总体设计

3.1.1 总体系统设计

本章主要讲述基于 LoRa 技术的油田井口仪表的硬件设计，包括硬件模块的选择。该无线仪表基本模块组成可以分为：微控制器与 PC 端的数据通信，用于接受 PC 的数据以及微控制器内部数据的上传；外围的复位电路和 JTAG 调试电路，主要用于防止电路发生故障时的重启以及 JTAG 调试；芯片 SX1276 和射频电路组成的无线通信模块，是实现 LoRa 无线通信的重要组成部分；用 I/O 检测内部数据的状态；供电电路是为了提供稳定的电源。

如图 3-1 所示，该模块组成图是本文所涉及的基于 LoRa 技术的油田井口仪表的核心设计，尽可能多的考虑了无线仪表设计的各项指标，例如电压的稳定性、复位电路、数据传输速率以及程序所占用的 RAM 和 ROM 的内存大小等。综合考量之后确定选用 STM32L152CC 的微控制器和美国 Semtech 公司生产的 SX1276 LoRa 芯片。

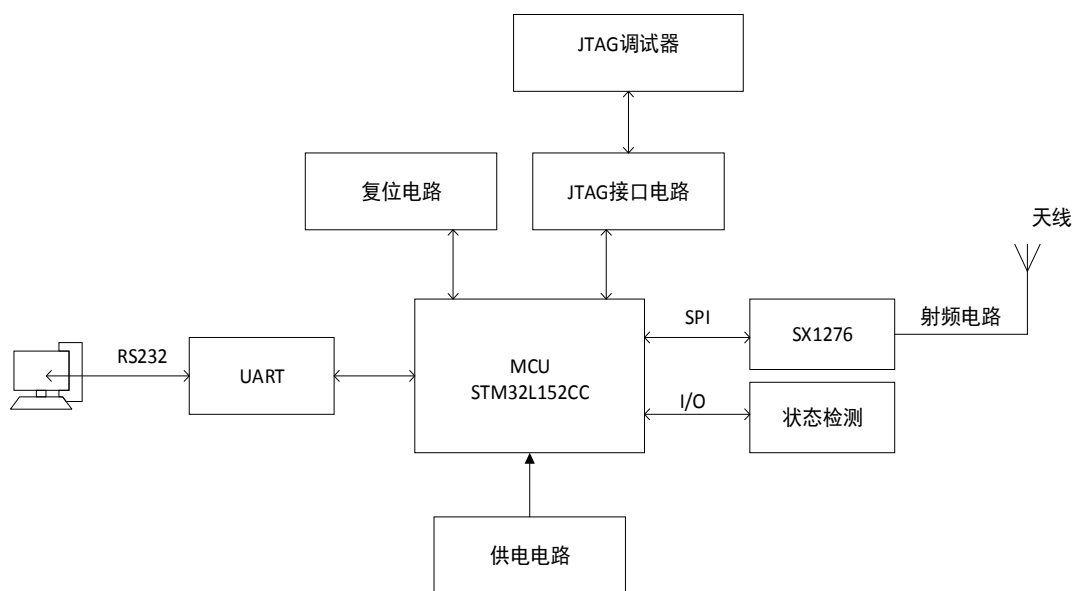


图 3-1 无线仪表基本模块组成图

3.1.2 硬件开发平台

本文采用的硬件开发平台 Altium Designer 13,是由软件开发商 Altium 公司开发的一款 EDA 设计软件，是种一体化的产品开发系统，主要运行在 Windows 操作系统中。

Altium Designer13 开发工具完美结合了原理图设计、电路仿真、PCB 绘制编辑、拓扑逻辑自动布线、信号完整性分析和设计输出等技术，为从事电路设计人员提供了一个全新的设计方案，极大地方便了设计人员的同时也提高了电路设计的效率和质量。Altium Designer13 是一款完全一体化的电子产品开发系统的高级版本，是业界唯一一种完整的板级设计解决方案，也是第一个集设计流程、集成化 PCB 设计、可编程器件设计（如 FPGA）和基于处理器设计等功能于一身的嵌入式软件开发工具，是一种将 PCB、FPGA 和嵌入式设计同步实现的解决方案，可以实现将设计方案从最初的概念转变为成品所需要的所有功能。

Altium Designer13 相比于该软件的其它版本有许多的优点，主要包括：支持软板和软/硬结合板的设计；改善了原理图的拖拽功能，同时针对网络标签、线路重叠、连接节点进行了改良；增强了装配变量和 3D STEP 导出方面的性能；改善了过孔阵列和过孔屏蔽工具，极大程度的减少了设计人员的任务量；自动去除内层中未使用的焊盘，进一步提升了高密度设计过程中内层的使用频率等。

3.2 基于 SX1276 的硬件设计

3.2.1 SX1276 芯片简介

SX1276 芯片使用的是 LoRa 调制解调技术，具有超长距离通信的特性和强大的抗干扰能力，能够在极低的功耗下正常工作。SX1276 借助 Semtech 公司的 LoRa 调制技术，采用成本较低的晶体和材料即可以获得-148dBm 的高灵敏度。SX1276 是对可靠性要求极高和远距离通信的最佳选择方案，因为这些器件将高灵敏度和-20dBm 的功率放大器

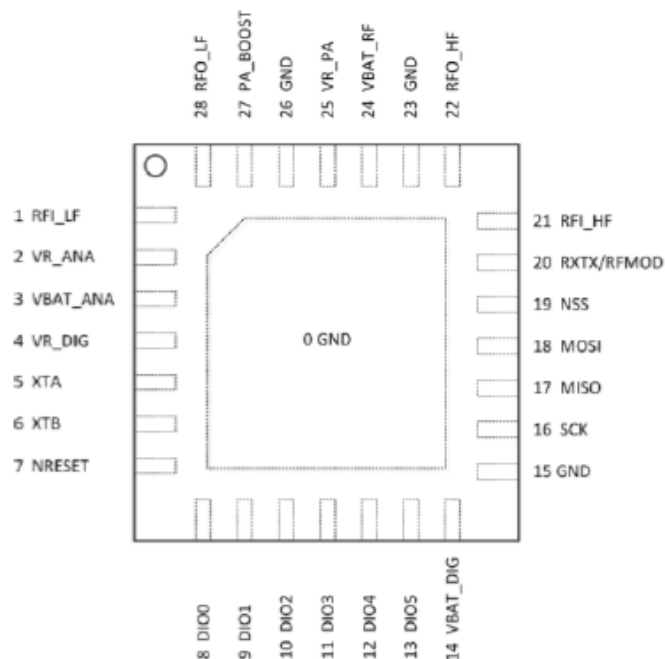


图 3-2 SX1276 的 QFN 封装引脚分布顶视图

联合使用，让这些器件具有行业领先的链路预算^[26]。LoRa 调制解调技术集低功耗、远距离和强大的抗干扰能力于一身，在选择性和抗阻塞方面比传统调制解调技术有着更为突出的优势。图 3-2 是 SX1276 的 QFN 封装引脚分布顶视图。表 3-1 详细说明了 SX1276 芯片的各个引脚的主要用途。

表 3-1 SX1276 引脚功能

编号	引脚名称	类型	描述
0	GROUND	–	外露的接地焊盘
1	RFI_LF	I	频段 2&3 的射频输入
2	VR_ANA	–	用于模拟电路的稳压电源电压
3	VBAT_ANA	–	模拟电路供电电压
4	VR_DIG	–	数字部分稳压电源电压
5	XTA	I/O	XTAL 连接或 TCXO 输入
6	XTB	I/O	XTAL 连接
7	NRESET	I/O	复位触发输入
8	DI00	I/O	数字 I/O，软件配置
9	DI01/DCLK	I/O	数字 I/O，软件配置
10	DI02/DTAT	I/O	数字 I/O，软件配置
11	DI03	I/O	数字 I/O，软件配置
12	DI04	I/O	数字 I/O，软件配置
13	DI05	I/O	数字 I/O，软件配置
14	VBAT_DIG	–	数字模块的供电电压
15	GND	–	接地
16	SCK	I	SPI 时钟输入
17	MISO	O	SPI 数据输出
18	MOSI	I	SPI 数据输入
19	NSS	I	SPI 片选输入
20	RXTX/RF_MOD	O	Rx/Tx 开关控制：Tx 模式为高
21	RFI_HF (GND)	I (–)	频段 1 的射频输入（接地）
22	RFO_HF (GND)	O (–)	频段 1 的射频输出（接地）
23	GND	–	接地
24	VBAT_RF	–	射频模块的电源电压
25	VR_PA	–	用于 PA 的稳压电源
26	GND	–	接地
27	PA_BOOST	O	可选的大功率 PA 输出，适用于所有频段
28	RFO_LF	O	频段 2&3 的射频输出

SX1276 的简化原理方框图如图 3-3 所示。SX1276 是半双工工作方式的低中频收发器。SX1276 收发器首先将收到的信号使用低噪声放大器（LAN）进行放大，LAN 的输入方式采用单端形式，这样可以减少外部器件的使用有利于简化设计；其次，为了改善

第二级线性和谐波抑制将信号转换到差分形式；最后，将收到的高频信号降至中频（IF）同时输出同相正交（I&Q）的信号^[27]。之后的信号处理和调制解调都在数字域进行，数据转换工作由一对模数转换器（ADC）进行。其中接收信号强度指示（RSSI）、自动增益控制（AGC）、自动频率校正（AFC）以及顶级定序器（TLS）的高级数据包和协议级功能都由数字状态机控制。

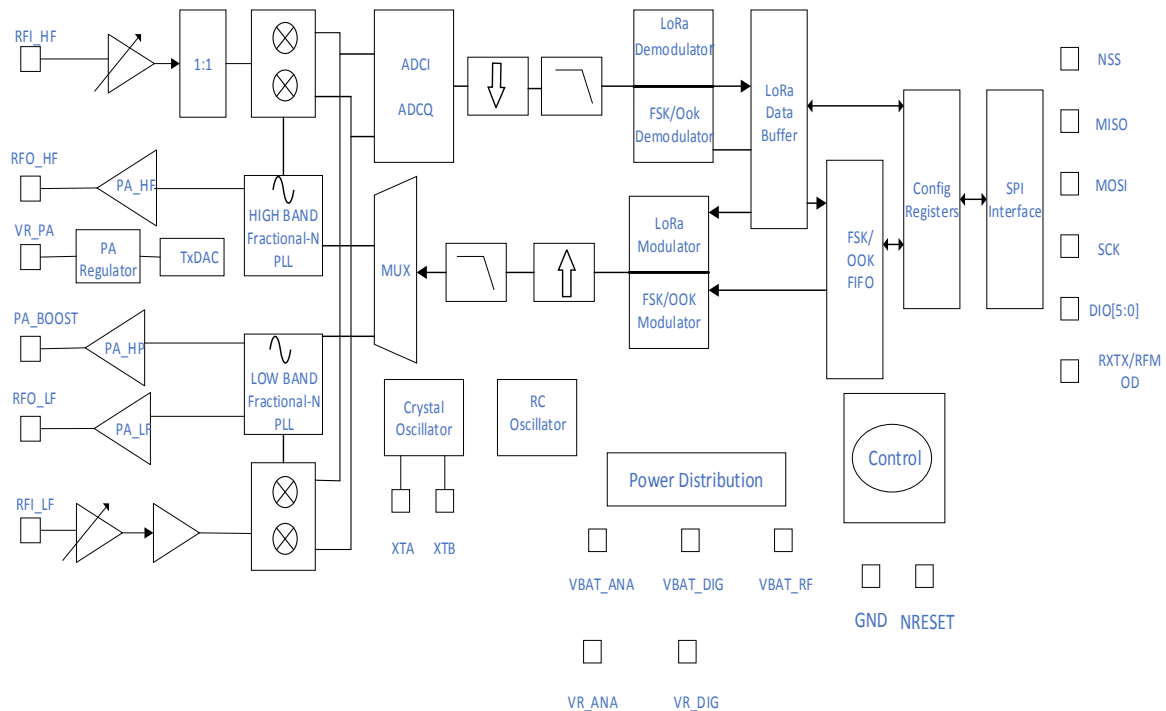


图 3-3 SX1278 的简化原理方框图

接收机和发射机的本地振荡器（LO）用来覆盖超高频（UHF）低频段（低于 525MHz）和 UHF 高频段（高于 860MHz），其二者的频率由频率合成器提供。此外，为了实现快速的自动校准操作和用户透明的低锁定时间，SX1276 还对锁相环（PLL）进行了优化。在传输过程中，频率调制在 PLL 带宽内是以数字方式执行，PLL 还可以选择性的对比特流进行预滤波功能，以提高谱纯度。

SX1276 自身具有三种不同型号的射频功率放大器（PA），其中两个分别与管脚 RFO_LF 和 RFO_HF 连接，能够实现高达+14dBm 的功率放大功能，对高功率没有约束，并且可以通过一对无源器件直接连接到各自的 RF 接收机收入端，从而形成一个天线端口高效收发器。第三个 PA 与管脚 PA_BOOST 连接，可以通过专用的匹配网络提供高达 +20dBm 的功率放大功能^[28]。与高效的功率放大器不同的是，这种高稳定性的功率放大器能够覆盖频率合成器处理的所有频段。

SX1276 具有两个不同的定时基准，RC 振荡器以及 32MHz 的晶体振荡器。可以通过 SPI 接口对数字状态机和射频前端的所有主要参数进行相应的配置，同时 SPI 接口也有对 SX1276 配置寄存器访问的权限。该接口包括一个模式自动定序器，能够监督 SX1276

以最快的速度在中间运行模式间的转换和校准。

SX1276 可以同时实现长距离的 LoRa 调制解调和标准的 FSK 调制解调，可以根据设定的模式自主选择 OOK 调制、FSK 调制和 LoRa 扩频调制技术中的任意一种。

3.2.2 SX1276 数字电路

(1) LoRa 调制解调器

LoRa 调制解调器在无线链路覆盖以及链路鲁棒性方面，比传统的 FSK 和 OOK 调制技术要更加出色，这是因为 LoRa 调制解调器是扩频调制和前向纠错技术的结合产物。同时因为在 LoRa 调制解调器中将扩频因子和纠错率设置为可以调整的模式，所以在带宽占用、数据速率、链路预算以及抗干扰性之间能够达到更好的平衡。表 3-2 列出了 LoRa 调制解调器的一些性能。

表 3-2 LoRa 调制解调器性能示例

带宽 (kHz)	扩频因子	编码率	标称比特率 (bps)	灵敏度 (dBm)	参考频率
10.4	6	4/5	782	-131	TCXO
	12	4/5	24	-147	
20.8	6	4/5	1562	-128	
	12	4/5	49	-144	
62.5	6	4/5	4688	-121	XTAL
	12	4/5	146	-139	
125	6	4/5	9380	-118	
	12	4/5	293	-136	

LoRa 调制解调器的抗干扰性能体现在，其处理后的信号对相同通信链路中的 GMSK 信号干扰的抵抗性能提高了 20dB 左右，正因为如此强大的抗干扰能力，LoRa 调制系统可以在频谱使用率较高的频段和混合通信网络中工作，这样即使原有网路调制方案失败也能够扩大覆盖范围。

(2) 基于 LoRa 调制解调器的链路设计

LoRa 调制解调器将扩频技术和循环纠错编码技术使用定制的调制解调程序组合起来，极大地提升了整个系统的抗干扰能力和链路预算^[29]。图 3-4 展示了调制解调器收发信息的简单过程。在该系统中，LoRa 调制解调器拥有自己单独的双端口模式的数据缓冲 FIFO，并且可以通过 SPI 接口在任意模式下对该通道进行访问。SX1276 在配置寄存器中的映射关系会跟随 LoRa 调制模式发生相应的变化。

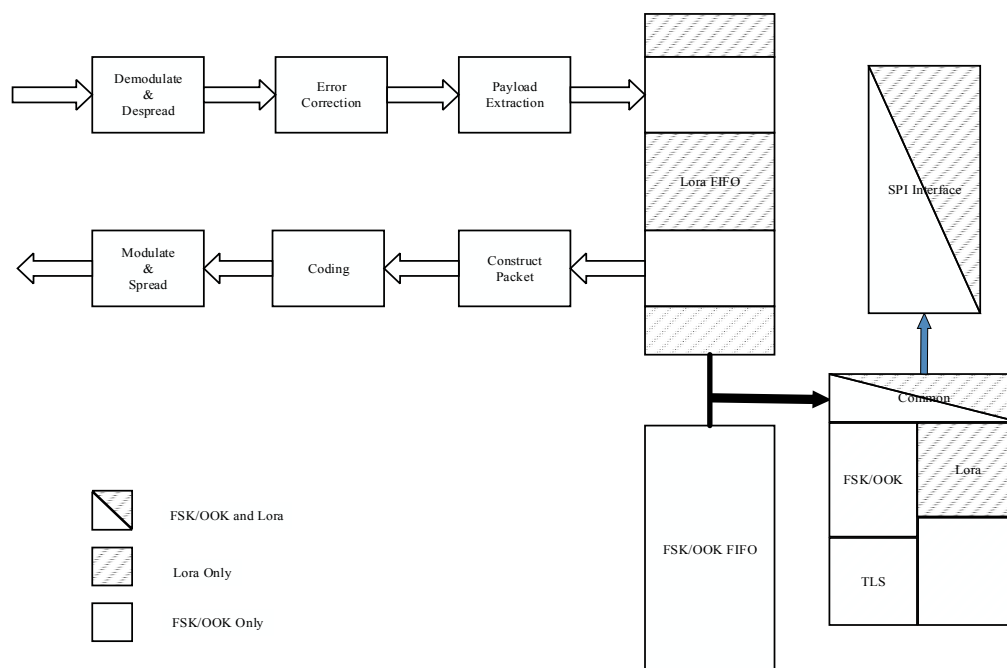


图 3-4 LoRa 调制解调器连接

3.2.3 LoRa 扩频调制技术的相关参数

(1) 扩频因子

LoRa 扩频调制技术中有效负载信息的单位采用多个信息的码片来代表,用符号速率 (R_s) 来表示扩频信息发送的快慢,而扩频因子是码片速率与符号速率之间的比值的绝对值,用来说明每个信息位发送符号的数目。表 3-3 中详细说明了 LoRa 调制解调技术中扩频因子的取值范围。

表 3-3 扩频因子取值范围

扩频因子 (RegModulationCfg)	扩频因子 (码片/符号)	LoRa 解调器 信噪比 (SNR)
6	64	-5dB
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5 dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

在系统通信之前必须事先得知接收端和链路发送端的扩频因子 (Spreading Factor) 以及接收机输入端的信噪比,这是因为任意两个扩频因子之间正交。LoRa 扩频系统在负

信噪比的状态下也能保证接收质量，这进一步提升了 LoRa 接收机的覆盖范围、接收机灵敏度以及链路预算。

（2）编码率

LoRa 调制解调器引入循环纠错编码进行前向错误检测与纠错，用来达到提高链路鲁棒性的目的，但是这样带来的缺点是会产生不必要的传输开销。表 3-4 中详细说明了在不同编码率下的开销。

表 3-4 循环编码开销

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

前向纠错在信道中有干扰的情况下也能提高链路的可靠性，因此，信道条件的变化会导致编码率以及抗干扰性能也跟着变化，为了接收端能够解析信号，可以在数据包的包头中加入编码率。

（3）信号带宽

信道不变的情况下，要缩短数据传输消耗的时间可以采用扩展信号带宽、提高数据速率的方法，但是这种方法是以降低接收灵敏度为代价的。大多数地区对通信系统所占

表 3-5 LoRa 带宽选项

带宽（kHz）	扩频因子	编码率	标称比特率（bps）
7.8	12	4/5	18
10.4	12	4/5	24
15.6	12	4/5	37
20.8	12	4/5	49
31.2	12	4/5	73
41.7	12	4/5	98
62.5	12	4/5	146
125	12	4/5	293
250	12	4/5	586
500	12	4/5	1172

用的带宽都有相应的规定，其中 LoRa 调制解调器中的带宽代表的是全信道带宽或者双边带带宽，FSK 调制解调器中带宽代表的是单边带带宽。LoRa 调制解调器所允许的带宽范围如表 3-5 所示。

(4) LoRa 发送参数关系

通过了解用户可以控制的关键参数，我们可以使用下面的公式计算出 LoRa 符号速率：

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (3-1)$$

其中 BW 表示带宽，SF 表示扩频因子，发送信号为恒包络信号。

3.2.4 LoRa 的数据包结构

LoRa 调制解调器的数据包格式包括显式格式和隐式格式两种。在显示数据包格式中，报头相对较短，包含的信息有编码率、字节数以及数据包中是否使用循环冗余校验(CRC)等。其对应的数据包格式如图 3-5 所示。

LoRa 数据包主要分为三个组成部分：前导码、可选报头以及数据有效负载^[30]。

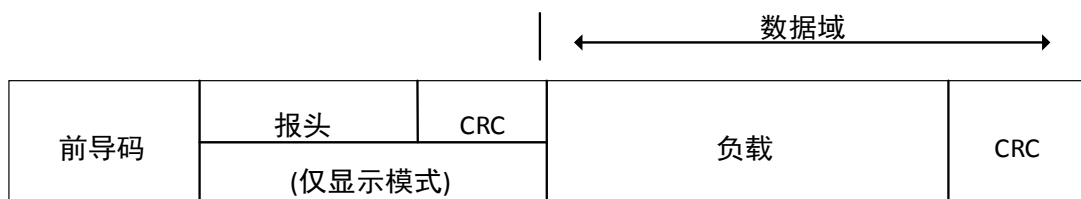


图 3-5 LoRa 数据包格式

(1) 前导码

数据包中的前导码默认长度为 12 个字符长度，也可以根据需要通过编程来设置具体的长度，其作用是用来使接收机和输入的数据流一直处于同步状态。前导码的最小允许长度能够满足通信的相关需求，为此可以在接收密集的情况下，缩减前导码的长度，进而达到减少接收机占空比的效果。所要发送数据的前导码长度可以通过前导码寄存器在 6~65535 之间设置，事实上前导码长度在 10~65539 个字符，这样就可以设置前导码的长度，也可以将前导码的开销设为一个固定值。

为了保证接收机与发射机前导码的一致，接收机中会设置定期检测前导码的机制。当遇到前导码长度不可知或者有可能发生变化时，应该将接收机前导码的长度设置为最大值。

(2) 可选报头

显示格式数据包中的可选报头可以分为显式报头和隐式报头两种模式，可以通过寄存器 RegModemConfig1 上的 ImplicitHeaderModeOn 位进行选择。

1) 显式报头模式

显式报头模式下，报头中携带了有效负载的相关信息，如前向纠错码率、用字节数表示的有效负载长度、可选 16 位负载 CRC 是否被打开。报头默认用最大的纠错码(4/8)进行发送，此外因为报头中带有自身的 CRC 信息，所以接收机可以将无效的报头直接丢弃。这也是系统默认的操作模式。

2) 隐式报头模式

在特殊的情况下，可以使用隐式报头模式来缩减发送时长，这需要 CRC、有效负载长度和编码率等相关参数都提前设定好或是一个定值。在这种状况下，无线链路两端的 CRC、有效负载长度和错误编码率等的设置需要手动进行。需要注意的一点是，当扩频因子被设置为 6 时，隐式报头模式成为唯一的报头模式。

(3) 有效负载

数据有效负载是一个长度可以改变的字段，具体由显示模式下的报头决定或者隐式模式下的相关寄存器的参数来决定实际长度和纠错编码率 CR。此外，有效负载中可以自定义是否包含 CRC 信息。

3.2.5 LoRa 数字接口

LoRa 调制解调器可以分为静态配置寄存器、状态寄存器和 FIFO 数据缓存三种数字接口，这些器件都可以通过 MCU 的 SPI 接口访问。

(1) LoRa 配置寄存器

SPI 接口具有访问配置寄存器的权限。可以在任意模式下对寄存器设备进行读操作，不同的是写操作只能在待机模式或睡眠模式下执行。需要注意的是，自动顶级定序器在 LoRa 模式下不能使用，FSK/OOK 模式下对 LoRa 配置寄存器的相关内容是保持的。

(2) 状态寄存器

状态寄存器可以用来在接收机工作时提供与系统工作状态有关的信息。

(3) LoRa 模式 FIFO 数据缓存

SX1276 芯片 RAM 数据缓存区（以下称作“FIFO 数据缓存”）只有在 LoRa 模式下才能获得访问的权限，其大小为 256 字节。FIFO 数据缓存区的作用是读取发送或接收的相关数据，用户有定制的权限，其中 LoRa FIFO 数据缓存只有 SPI 接口有读取权限^[31]。由用户定义的 FIFO 数据缓存映射关系如图 3-6 所示。只有睡眠模式下，对 FIFO 数据缓存中保存和最后接收操作相关的数据具有读取权限，更换模式时不保存原有的信息。

由于 FIFO 数据缓存采用双端口配置，其中将准备要发送的信息的起始位置和接收的相关操作写入缓存的起始位置分别存放在寄存器 RegFifoTxBaseAddr 与寄存器 RegFifoRxBaseAddr 中，所以能够在 FIFO 缓存区内同时存储准备接收和发送的相关信息。

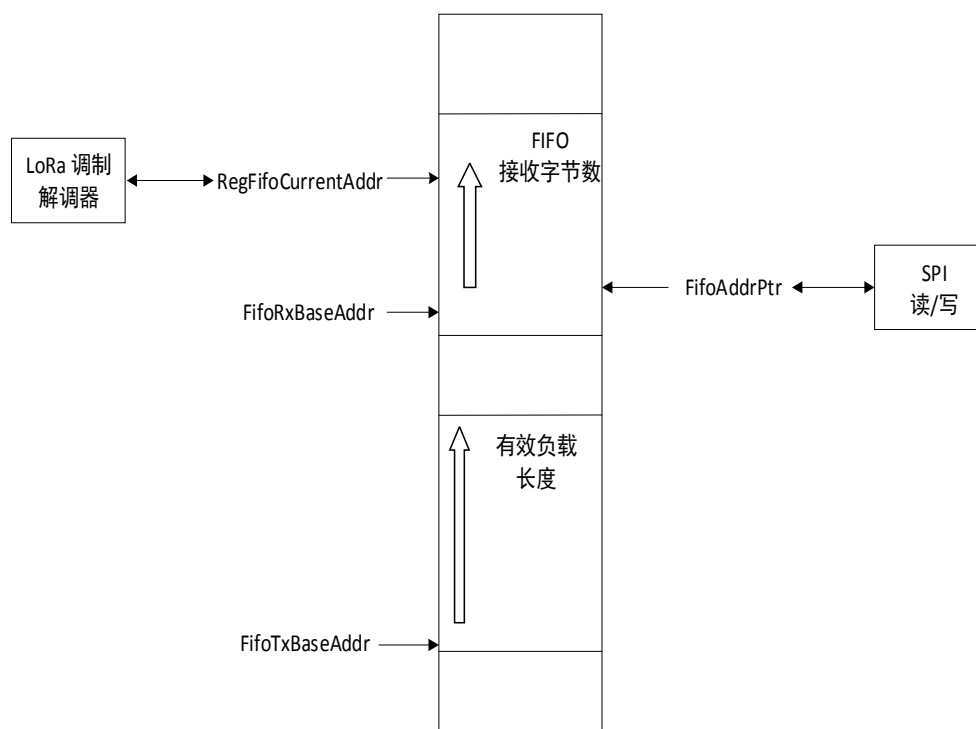


图 3-6 LoRa 数据缓存

默认情况下，为了确保发送 Tx 和接收 Rx 各自能使用一半的内存，器件上电后 RegFifoRxBaseAddr (Rx) 被初始化至地址 0x00，RegFifoTxBaseAddr (Tx) 被初始化至地址 0x80。

但是由 FIFO 数据缓存自身的特性决定，指针的位置可以任意在 FIFO 中单独设置，同样接收 Rx 与发送 Tx 的基址允许在 256 字节的内存区进行设置。将基地址 RegFifoRxBaseAddr 和 RegFifoTxBaseAddr 设定成缓存首地址 (0x00)，可以使 FIFO 数据缓存内将要接收和发送数据的空间得到合理的使用，这样间接的将整个 FIFO 数据缓存只在发送或接收模式下使用。

睡眠模式没有被赋予读取 FIFO 数据缓存的权限，因为 FIFO 数据缓存在睡眠模式下被清空；在其它模式下 FIFO 数据缓存中的数据不会被改变，所以接收的数据包经过相应的处理后可以被重新发送。在非睡眠模式下，数据缓存中的数据只会被新数据“覆盖”，而不是清除。

地址指针 RegFifoAddrPtr 用来定义当前数据的 FIFO 数据缓存空间被使用 SPI 接口读取或写入的一系列操作。所以在读取或写入操作之前，首要任务是将该指针的基地址初始化，防止因为 FIFO 数据缓存被访问后地址指针改变带来不必要的麻烦。

寄存器 RegRxBnBytes 会在成功完成数据接收操作时，计算将要写入数据所需占用缓存单元的字节数，而待发送数据所占用缓存单元的字节数由寄存器 RegPayloadLength 来说明。由于隐式报头模式下有效负载的长度必须是确定的，所以此时寄存器 RegRxBnBytes 是无效的，而在显式报头模式下，待接收的报头中携带的数据包长度就是

接收缓存区的初始空间。在需要读取数据包的时候，只需将寄存器 RegFifoAddrPtr 指向寄存器 RegFifoRxCurrentAddr 即可，因为寄存器 RegFifoRxCurrentAddr 显示最后接收的数据包在 FIFO 数据缓存中的存储位置。

需要注意的是：为了让用户拥有对损坏的数据进行自主处理的权限，不管接收到数据的 CRC 是否无效，都会被写入 FIFO 数据缓存；此外，当出现预先分配的接收 Rx 缓存空间小于接收的数据包时，缓存内存储的部分数据会被覆盖^[32]。

3.2.6 LoRa 调制解调器的操作模式

可以使用设置寄存器 RegOpMode 的 LongRangeMode 位来启动 LoRa 模式，之后就可以查看 LoRa 调制解调器具体使用的操作模式。所提供的功能和寄存器访问范围取决于选定的操作模式，详情见表 3-6。

表 3-6 LoRa 操作模式功能

操作模式	描述
睡眠模式	低功耗模式，在这种模式下，只有 SPI 和配置寄存器可以访问，LoRa FIFO 不能访问。这是唯一允许 FSK/OOK 模式与 LoRa 模式切换的操作模式。
待机模式	晶体振荡器和 LoRa 基带模块被开启，射频部分和 PLL 被关闭。
FSTx 模式	一种用于发射的频率合成模式，所选的发射 PLL 处于锁定状态，并在发送频率上保持活跃，射频部分被关闭。
FSRx 模式	一种用于发射的频率合成模式，所选的发射 PLL 处于锁定状态，并在发送频率上保持活跃，射频部分被关闭。
TX 模式	该模式被激活后，SX1276 将打开接收所需的所有模块、打开功率放大器、发送数据包，并切换回待机模式。
RX 连续模式	该模式被激活后，SX1276 将打开接收所需的所有模块、处理接收到的所有数据，直至客户请求变更操作模式。
RX 单一模式	该模式被激活后，SX1276 将打开接收所需的所有模块、在收到有数据包前保持该状态、随后切换回待机模式。
CAD 模式	CAD 模式下，设备将检测已知信道，用来检测 LoRa 前导码是否存在。

注意：可以利用修改寄存器 RegOpMode 的值，实现模式之间的相互切换。

3.2.7 LoRa 调制解调器状态机序列

接下来主要介绍 LoRa 调制解调器的发送和接受数据的序列及相应的流程图。

(1) 数据发送序列

在发送模式下，PA 模块、射频模块以及 PLL 模块只有在发送数据包的时候才被启动，这样才能最大程度的降低功率消耗率。图 3-7 描述了典型的 LoRa 调制发送序列。

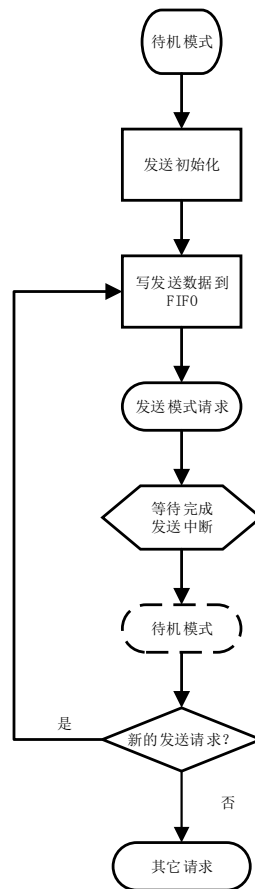


图 3-7 LoRa 调制发送序列

静态配置寄存器只能在睡眠模式、待机模式或 FSTx 模式下才有访问权限；LoRa FIFO 数据缓存仅在待机模式下才开放写入权限；通过发送请求模式，开始发送数据，一旦数据发送结束，则发出中断请求，系统回到待机模式，发送操作完成后，可以手动将无线设备模式设置为睡眠模式或重新向 FIFO 数据缓存写入数据，为之后的发送操作做准备。

(2) 数据接收序列

图 3-8 显示了单一模式和连续模式两种模式下的典型 LoRa 接收序列。

LoRa 接收机有两种工作模式：单一接收模式和连续接收模式。

1) 单一接收模式

在这种模式下，调制解调器将会在指定的时间窗口内搜寻前导码。如果在该时间窗口结束时还没有找到前导码，则系统会产生接收时间超时中断信号并将工作模式切换回待机模式。时间窗口长度由寄存器定义，范围在 4~1023 个符号。

在单一接收模式下，收到数据包后应该立即关闭 PLL 和射频模块，降低功耗。相关流程如下：

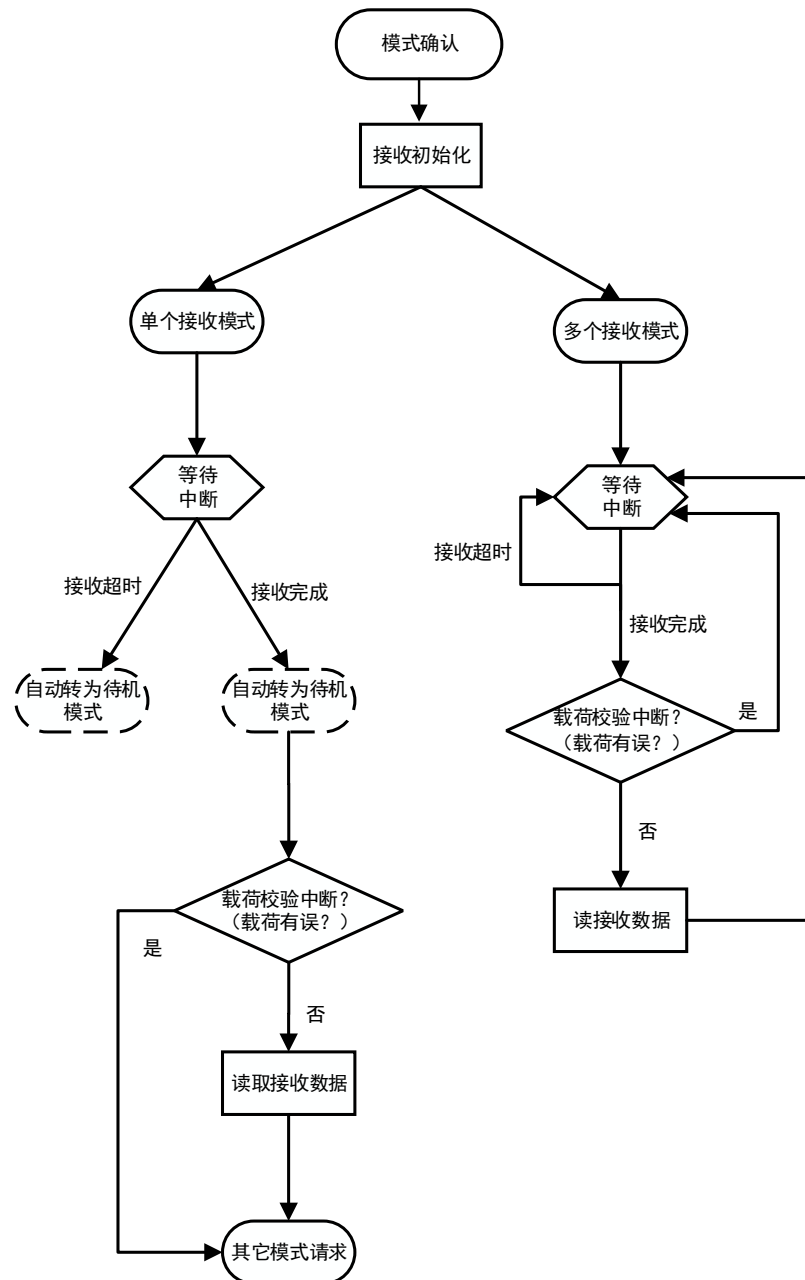


图 3-8 LoRa 接收序列

- 将 FifoAddrPtr 设置为 FIFORXBaseAddress。
- 静态配置寄存器在睡眠模式、待机模式或 FSEx 模式下均可以写入数据。
- 通过选择单一接收操作模式，可以启动单一数据包接收操作。
- 接收机等待接收有效前导码。接收通路的增益会随着有效前导码的接收被确定。随后将接收到由 ValidHeader 中断信号表示的有效显式报头后，开始数据包接收。数据包接收完毕后，产生接收完成中断信号。最后，系统自动恢复到待机模式，以减少功耗。
- 应检查接收机状态寄存器 PayloadCrcError，以保证数据包有效负载的完整性。
- 如果接收到有效的数据包，则应该读取 FIFO 数据缓存中的数据。如果后续需要触发单一数据包接收过程，则应该重新选择单一接收操作模式，以便再次启动接收程序。与此同时，必须将 SPI 指针(FifoAddrPtr)重新调整到缓存的接收基地址(FifoRxBaseAddr)。

2) 连续接收模式

在连续接收模式下，调制解调器将会在信道中一直扫描用来检测前导码，如果检测到前导码，调制解调器将会在下一个前导码被检测出之前，对该前导码进行相关的处理。对于长度超过设置的预定值的前导码，调制解调器将会直接将其丢弃，并重新在信道中检测前导码，但是不会产生中断标志。与单一接收模式有区别的是，连续接收模式下不会响应超时中断而进入待机模式。此时，用户必须将中断信号在下一个前导码被检测出之前清除掉。

值得注意的是在这种模式下，因为被解调的字节是按照接收序列写入数据缓存器的，即新数据包的第一个字节会在上一个数据包的最后一个字节之后写入，所以接收地址指针不会被重置。最后，为了使 FIFO 数据缓存不溢出，微控制器 MCU 将会对地址指针执行相关操作。

连续接收模式下，对接收到的数据包进行以下处理：

- 在睡眠或待机模式下，选择连续接收模式。
- 收到有效报头后，会立即产生接收结束中断，系统将会一直处于连续接收模式，直到后续 LoRa 数据包的出现。

- 检查 PayloadCrcError 标志，以验证数据包的完整性。
- 如果数据包被正确接收，则可以读取 FIFO 数据缓存。
- 接收过程，还可以在需要时推出接收机操作模式。

由于在连续接收模式下，只允许对最后一个数据包所包含的相关信息访问，所以在收到下一个接收结束信号之前对相应的寄存器进行读取操作。

(3) 信道活动检测 (Channel Activity Detection, CAD)

随着扩频技术的发展，人们对信号的质量有了越来越高的要求，原有的用 RSSI 检测信道噪声无法将低于接收机低噪声信号从信道中检测出来，LoRa 信道中干扰信号的检测工作采用信道活动检测技术。其流程如图 3-9 所示。

信道活动检测是在无线信道上对 LoRa 前导码以尽可能高的功耗效率进行检测，在 CAD 模式下，SX1276 在信道中快速搜寻 LoRa 数据包的前导码。

其中 CAD 的操作过程，可以分为以下几个步骤：

- PLL 被锁定。
- 接收机从信道获取接收数据的 LoRa 前导码符号，在这段时间电流消耗对应 Rx 模式电流。
- 无线接收机和锁相环 (PLL) 被关闭，调制解调器开始执行相关数字处理。
- 调制解调器检测到的样本信号与理想前导码之间建立关联关系，建立关联关系所消耗的时间比一个符号周期略小，这段时间的耗电量也会急剧降低。
- 在关联成功的情况下，计算操作完成后调制解调器将产生一个中断信号用来结束

CAD 工作，同时会产生 CAD 检测信号。

- 系统恢复到待机模式。
- 发现前导码时，清除中断的同时将系统工作状态调整为单一或连续的接收模式，同时开始数据的接收工作。

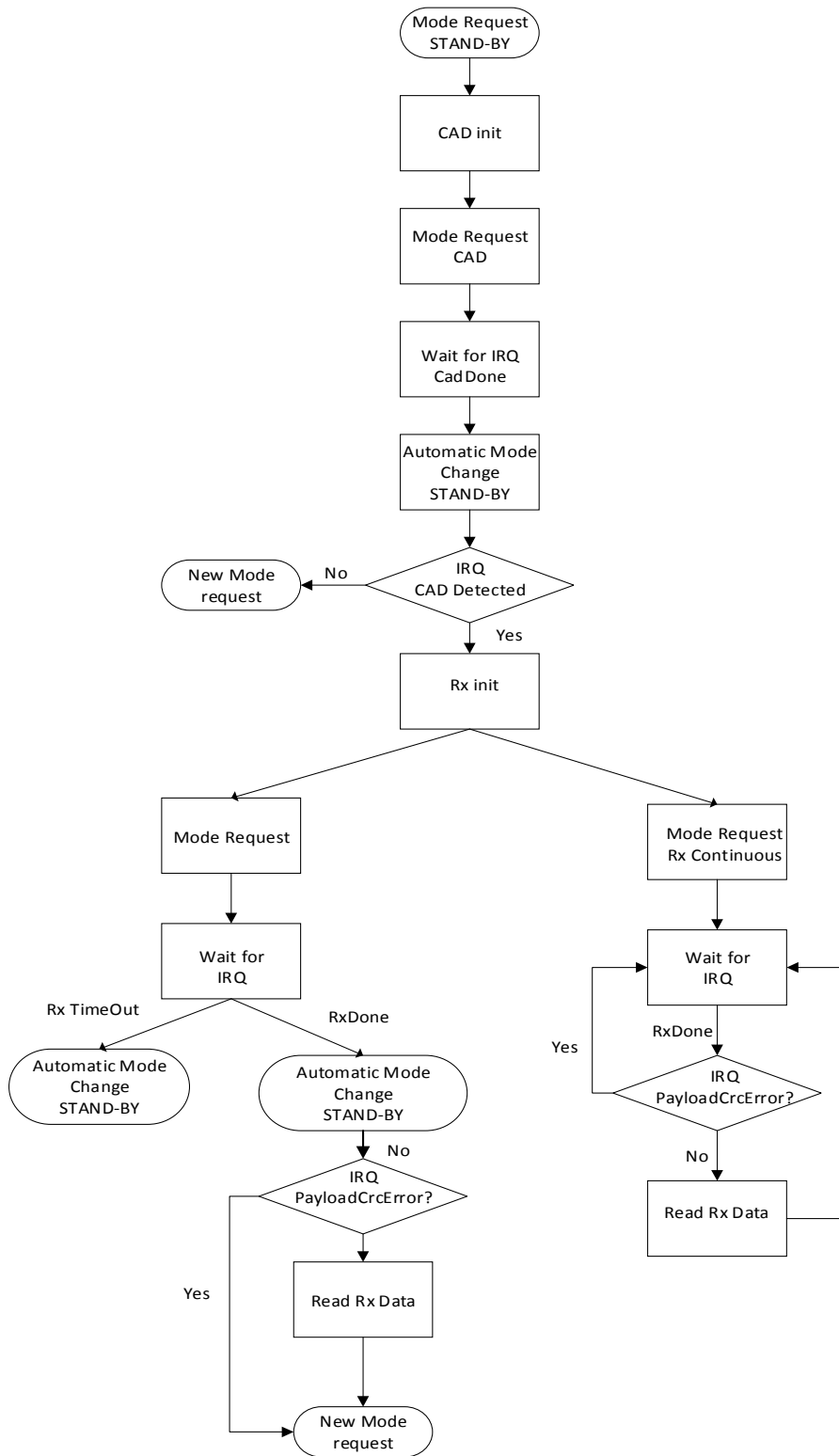


图3-9 LoRa CAD流程

3.3 LoRa 模块

3.3.1 LoRa 模块的技术规格

LoRa 通信模块是本文所设计的一款采用 LoRa 技术的无线数据传输模块，利用网络为用户提供无线数据传输功能。该模块采用高性能的工业级芯片 SX1276，实现低功耗设计，数据的透明传输，提供多路 I/O，实现数据的输入输出等功能。工作频段主要集中在 433MHz 的免授权频段。

(1) 基本功能

LoRa 模块的基本功能如表 3-7 所示。

表3-7 LoRa模块的基本功能

工业级应用设计	采用高性能工业级芯片 电源输入：DC 3.3~5.0V 433MHz免申请频段，频率410-441MHz，提供32个信道 低功耗设计，支持休眠和唤醒模式 接收灵敏度高，通信距离更远
稳定性	内置看门狗，保证系统长时间稳定运行 内置LD0，保证模块稳定供电
可靠性	多数据自动分包传输，保证数据包的完整不丢失 高效的循环交织纠错编码，最大纠错64bit，双256 环形FIFO
通用标准	支持多种封装形式 支持多种天线连接方式，U.FL接口/SMA 接口 智能型数据模块，上电即可进入数据传输状态 使用方便，灵活，多种工作模式选择 方便的系统配置和维护接口 输出标准3.3V TTL 电平 支持串口软件升级
功能	支持OTA（空中下载技术）空中升级 支持空中唤醒功能 支持多种波特率，多种射频速率 可调功率等级
典型应用	电力线在线监测 智慧停车场 土壤温湿度监测 智慧灌溉 无线远程抄表 光伏阵列监测

(2) 模块接口

LoRa模块的接口说明如表3-8所示。

表3-8 LoRa模块的接口说明

项目	内容
串口	标准TTL 电平 数据位：8 位 停止位：1 位、2 位 校验：无校验、奇校验、偶校验 波特率：300、600、1200、2400、4800、9600、19200、38400、57600、115200bps
天线接口	SMA 母头/U.FL 射频连接器，特性阻抗50 欧
封装接口	支持双排2.0mm 插针/2.54mm 插针/SMT 半孔

(3) LoRa参数

LoRa模块的主要参数说明如表3-9所示。

表3-9 LoRa模块参数说明

项目	内容
通信标准及频段	410MHz-441MHz，1000KHz步进，建议433±5MHz，出厂默认433MHz
室内/市区通信距离	F8L10D-N:1km F8L10D-E:2km
户外/视距通信距离	F8L10D-N:3.5km F8L10D-E:11.5km
发射功率	F8L10D-N:20dBm(100mW) F8L10D-E:30dBm(1W)
接收灵敏度	-140dBm
通信理论带宽	6 级可调 (0.3、0.6、1.0、1.8、3.1、5.5Kbps)
信道数	32
最大串口缓存	4K Bytes

3.3.2 LoRa 模块的外围电路

LoRa 模块主要由射频电路和转换电路组成，其原理框图如图 3-10 所示，管脚定义见表 3-10，LoRa 射频电路如图 3-11 所示。

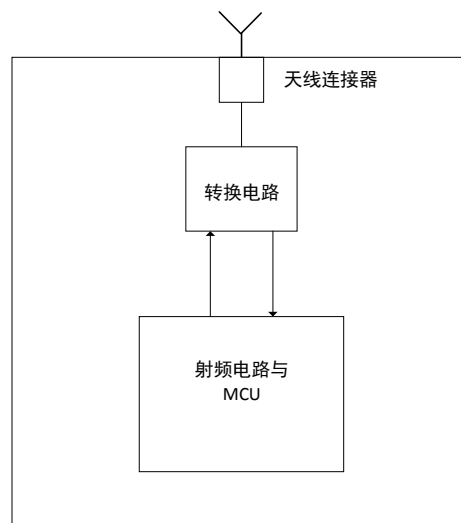


图 3-10 F8L10D 模块原理图

表 3-10 F8L10D 管脚定义

序号	定义	输入/输出	描述
1	VCC	N/A	Power Supply
2	TX	Output	UART Data Out
3	RX	Input	UART Data In
4	D6	Either	GPIO
5	RST	Input	Module Reset
6	D7	Either	GPIO
7	D8	Either	GPIO
8	D9	Either	GPIO
9	WKUP	Either	GPIO
10	GND	N/A	Ground
11	D3	Either	GPIO/ADC
12	D12	Either	GPIO
13	D13	Either	GPIO
14	D10	Either	GPIO
15	D2	Either	GPIO
16	D11	Either	GPIO
17	JIMS_SWDIO	Either	Debug Data
18	JTCK_SWCLK	Input	Debug Clock
19	D4	Either	GPIO/ADC
20	D5	Either	GPIO/ADC
21	D13	Either	GPIO
22	D12	Either	GPIO
23	RX	Input	UART Data In
24	TX	Output	UART Data Out
25	D3	Either	GPIO/ADC
26	VCC	N/A	Power Supply
27	GND	N/A	Ground

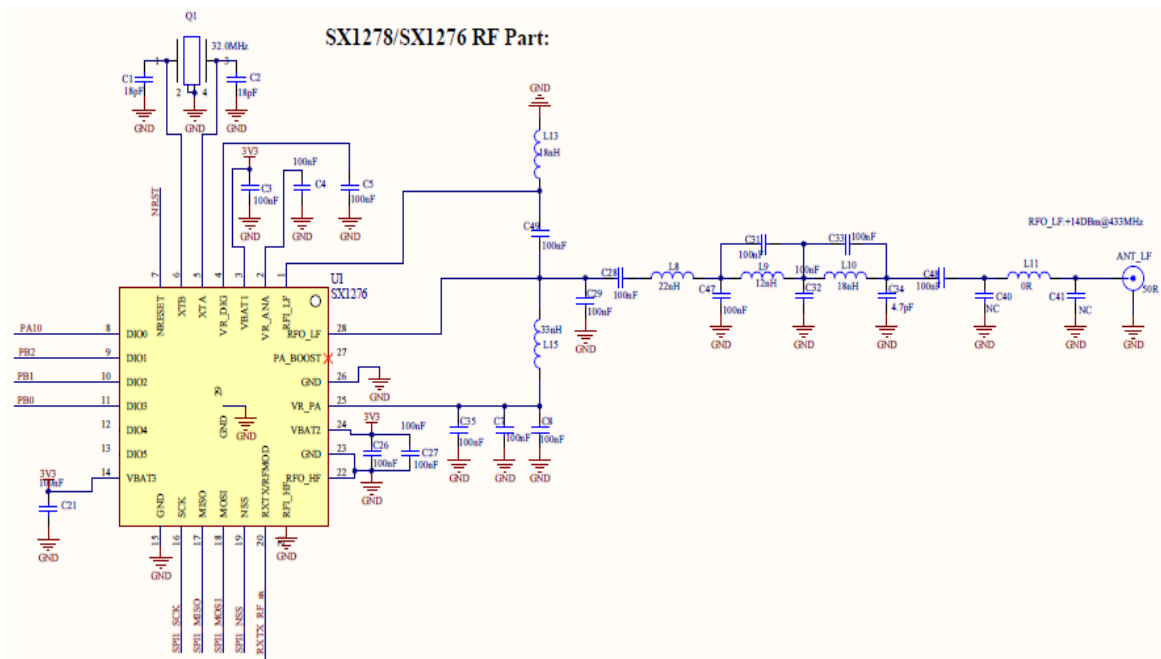


图 3-11 LoRa 射频电路

模块电源自身带有 LDO，输入电压范围：3.3-5V，相关电路如图 3-12 所示。

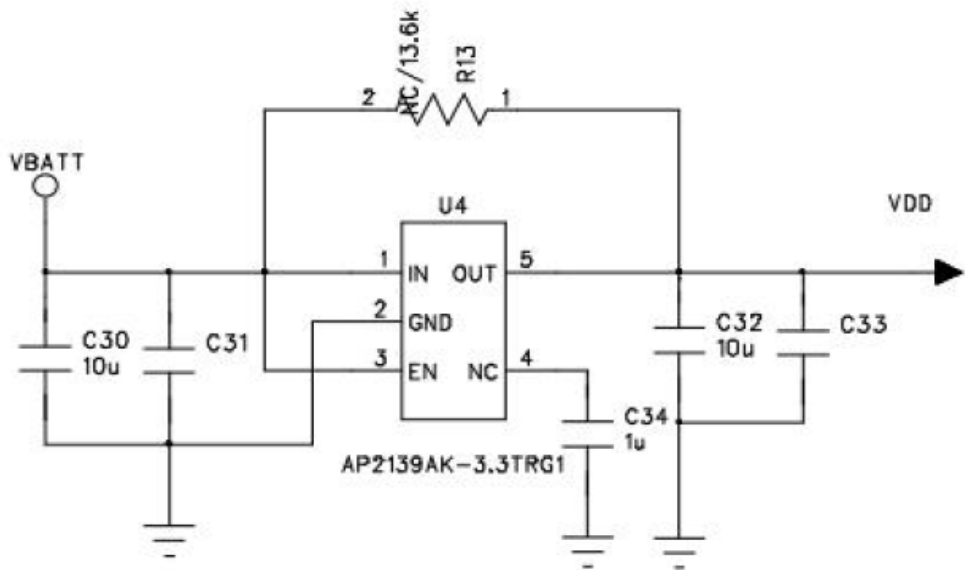
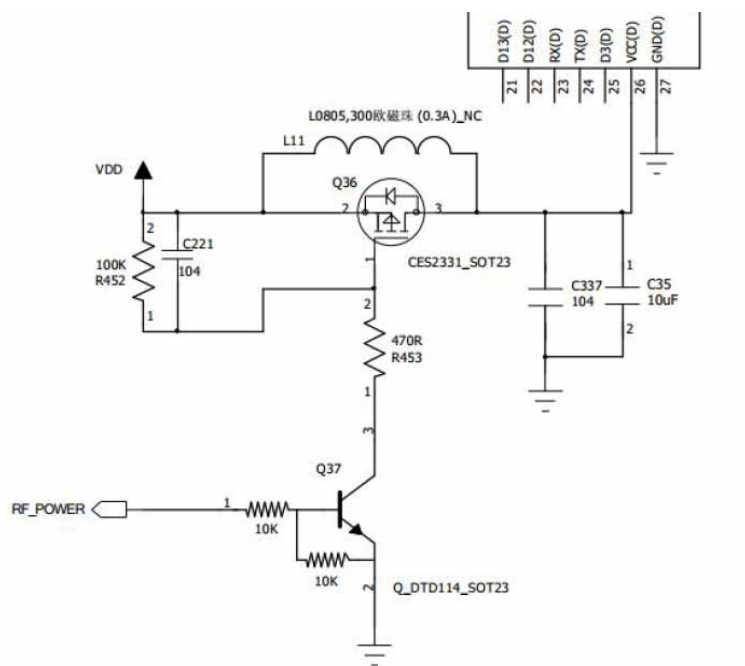


图 3-12 电源 LDO

采用 MCU 的 IO 来控制电源，电路设计模块电源如图 3-13 所示。

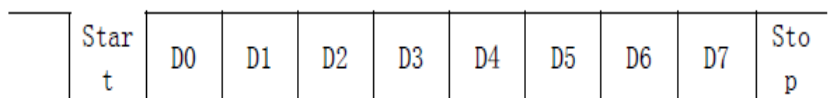


(1) UART 接口

表 3-11 UART 引脚定义

通用异步收发器是一种用来在并行通信和串行通信之间转换的异步传输器，本文用到的是其最常见的一种 9 针的 RS232 串口，用来进行数据转换。RS232 的相关引脚及功能如表 3-12 所示。

1	2	3	4	5	6	7	8	9
DCD	RXD	TXD	DTR	SGND	DSR	RTS	CTS	RI
载波检测	接收数据	发送数据	数据终端准备好	信号地线	数据准备好	请求发送	清楚发送	振铃提示



串口通信参数:

- 1) 通信接口: UART;
- 2) 波特率: 9600、19200、115200bps 等可供选择;
- 3) 起始位: 1 位;
- 4) 数据位: 8 位;
- 5) 停止位: 1 位或 2 位;
- 6) 校验方式: 奇校验、偶校验、无校验。

UART 异步收发数据, 发送和接收可同时进行, 实现全双工作模式, 可由外接设备或模块本身启动数据发送。如图 3-15 所示每个数据字节包含一个起始位 (低电平), 8 位数据和一个停止位 (高电平), 图中所示是 UART 在数据模式为 8-N-1 模式下, 传输字节 0x1F 的数据图。8 位数据位, 无校验位, 1 位停止位即 8-N-1 数据模式。

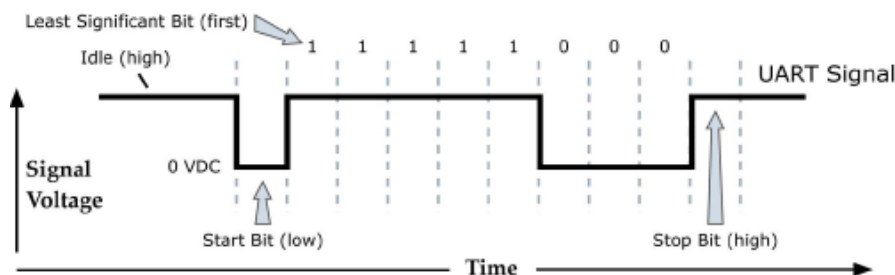


图 3-15 UART 的数据字节

(2) 硬件连接

F8L10D 与 PC 通过 RS232 串口相连, 需要使用串口转换芯片进行电平转换 (如 SP3243、MAX3220 等), 如图 3-16 所示。

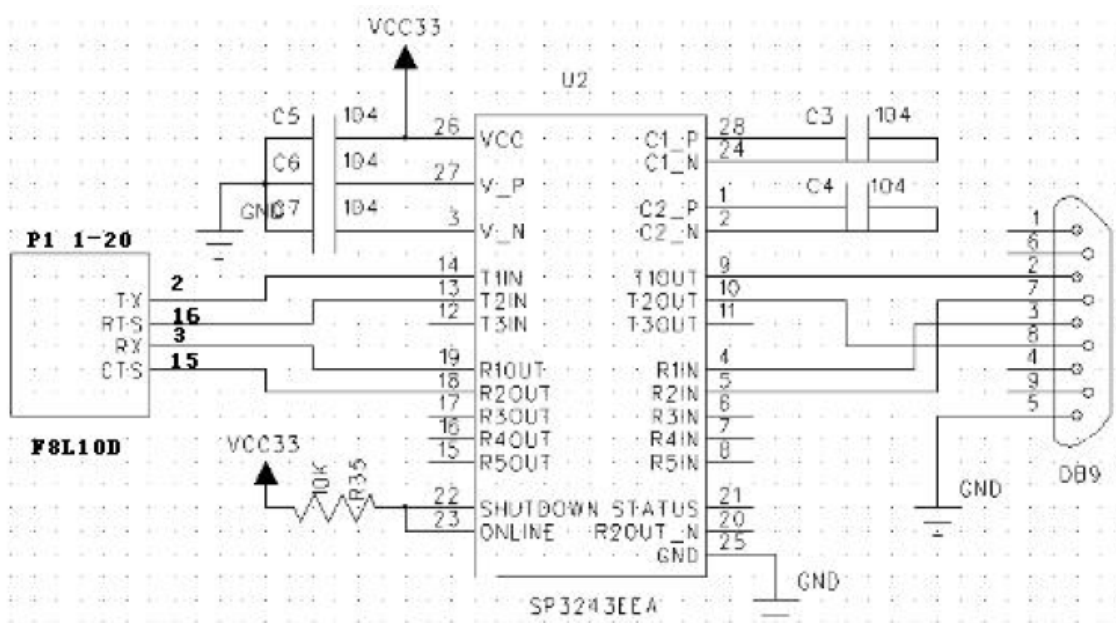


图 3-16 F8L10D 与 PC RS232 连接的电路

3.4 PCB 板绘制

在设计当中要根据设计需求完成电路的基本功能，确保所绘制的原理图具有低功耗、高性能以及硬件可靠性等性能。同样在 PCB 板的绘制过程中也要遵守相应的基本原则，PCB 板设计的是否合理直接影响着电路板的性能，因此在 PCB 设计过程中应该严格遵守相关原则。

PCB 板设计的过程中首先要考虑的问题就是确定板子的尺寸大小，以恰好能安放进外壳为宜，还需要注意板子与外接器件的连接方式，对于一些较大的元器件来说，要采取加固、防振、防冲击等辅助措施。

由于本文设计的无线仪表用于油田井口，所以在设计过程中应该遵循以下原则，具体细节见表 3-13。

PCB 布线时还需要注意以下几点：

- (1) 电路板中禁止出现交叉的线条，用“绕”或“钻”法对有可能交叉的线路进行处理。
- (2) 为了使设计出来的电路工作稳定，不易发生自激现象，应该将同级电路的接地点尽量靠近，同时在该接地点处接入电路的电源滤波电容。
- (3) 对总地线遵循高频、中频、低频逐步按弱电到强电的原则进行布局，宁可接线长点也不能随意接，这样能最大程度的减少自激的发生。

表 3-13 无线仪表 PCB 板基本参数规范

项目	参考值	备注
PCB 尺寸	<105*74mm	4133*2900mil
工艺边	>3mm 且在 PCB 长边上	
MARK 点	对角方向两个以上，尺寸：0.8-2.5mm	
焊盘设计	有没有过孔或间距太大或太小	过孔直径 18*28mil
元件密度分布	插件与贴片间距>3mm	
插件元件孔径	元件引脚直径+0.5mm	
元件芯片分布	尽可能分布在同一焊接面	
布线宽度	0.254mm (10mil)	电源与地线加粗 0.762 (30mil)

LoRa 模块的 PCB 原理图的顶层和底层设计分别如图 3-17 和 3-18 所示。本文所设计的 LoRa 模块的 PCB 板，板宽 1295mil (32.893mm)，板长 959.005mil (24.359mm) 采用 FR-4 层通孔板，IC 使用 QFN 封装，单面贴片生产加工简单，加上单独和大面积的地层和电源层，稳定性好。使用模块化插针接口安装，更新升级容易。

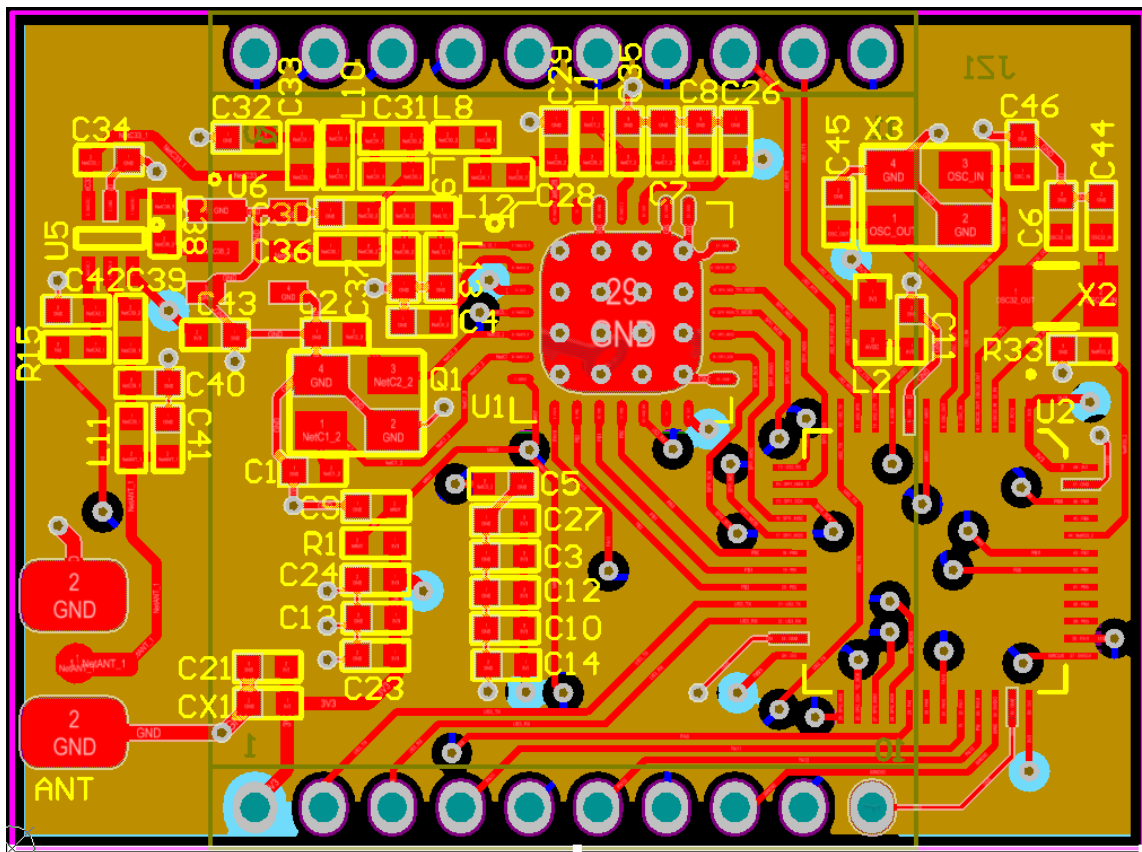


图 3-17 PCB 原理图的顶层设计图

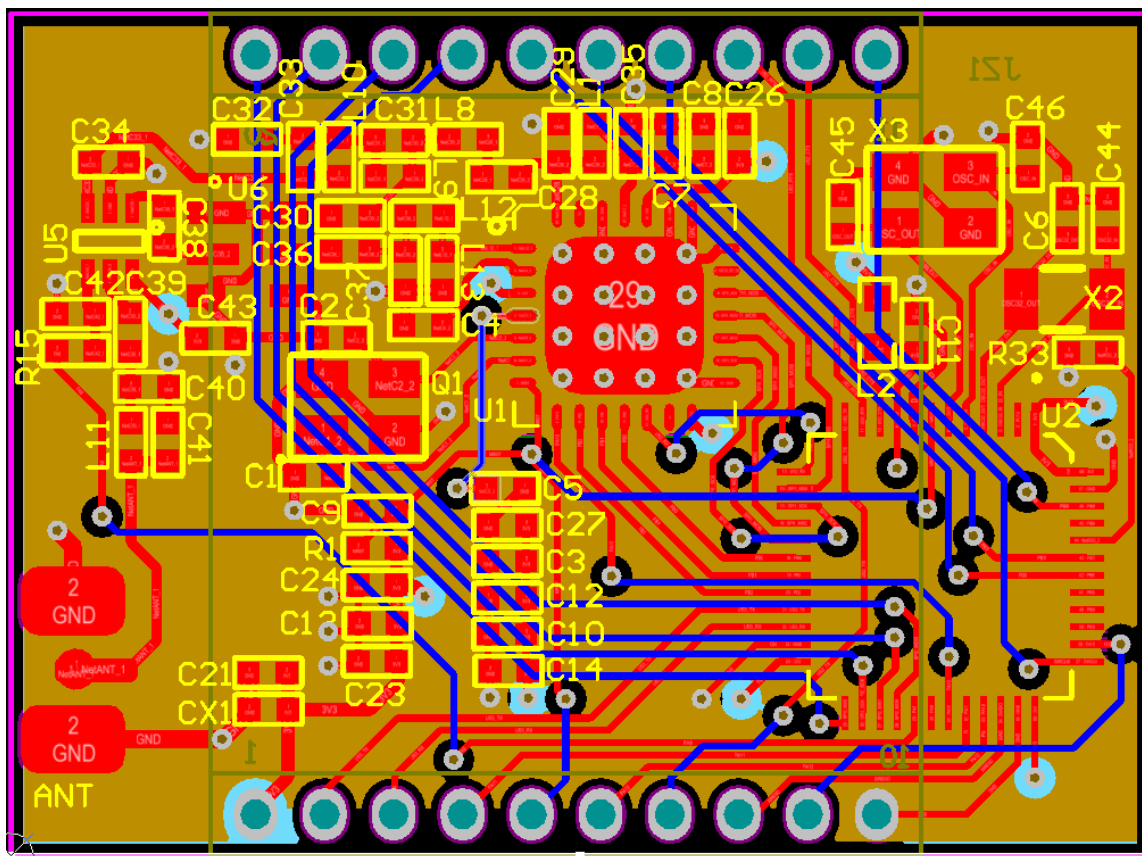


图 3-18 PCB 原理图的底层设计图

3.5 本章小结

本章首先系统介绍了油田井口仪表的总体设计,接着对 SX1276 以及 LoRa 调制解调技术从硬件方面进行相关分析,其次对 LoRa 模块的相关特性进行了简单的介绍,最后对 LoRa 模块 PCB 板的绘制进行了相关说明。

第四章 LoRa 协议的设计和数据处理

无线仪表的正常工作并不是单一的依赖硬件设备，它还需要数据传输和数据处理的过程。为了数据能更好地传输，需要对传输的数据按照一定的格式进行封装，为此本文设计出了一种适应于油田井口仪表数据传输的自定义通信协议。

通信双方进行信息交换和资源共享时所必须遵守的规则和约定就是通信协议，是双方之间的共同语言。一个标准网络中至少存在一个统一识别的通信协议，否则信息交互和资源共享就成为一纸空谈，为此本文所设计的仪表也有一套协议。

4.1 通信协议的设计

协议的设计是为了各个通信设备之间能更好的按照双方约定好的方式通信，这样才能准确无误的传输相关信息，保证工作的正常进行。同时在程序设计中必须严格按照协议格式进行编写。一般来说，一个完整的数据包协议应该包含协议的标识、协议的版本号、序号、类型、数据长度、数据、校验和结束符等。

4.1.1 LoRa 的标准协议 LoRaWAN

LoRa 远距离通信网络有着自己专门定制的 LoRaWAN 通信协议和系统架构，是一个典型的星型网络拓扑结构。LoRa 网关在这种组网方式下还可以充当中继器，连接更远距离的两个通信设备。所有的节点都可以双向通信，服务器和 LoRa 网关之间通过标准的移动通信网络互联，一个终端设备可以和多个网关进行通信，其网络架构如图 4-1 所示。

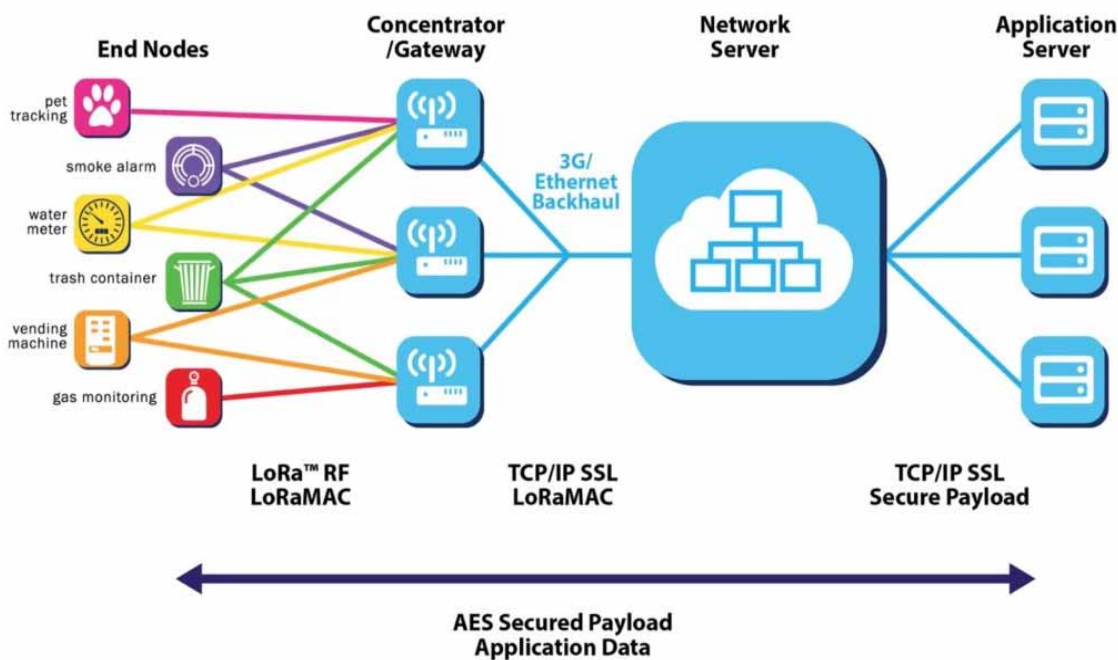


图 4-1 LoRaWAN 网络架构

LoRaWAN 通信协议主要有 A、B、C 三类通信方式或终端设备，这些终端设备覆盖

了几乎多有的物联网场所，具体细节如表 4-1 所示。

表 4-1 LoRa 技术下的三类通信终端方式

类型	简介	下行时机	应用场景
A	A 类终端采用 ALOHA 协议，满足设定条件时才会上发数据，每次上发数据后都会紧跟两个短暂的下行接收窗口，以此来实现双向传输，这种操作模式最省电。	终端发送数据后才能接收数据。	垃圾桶监测、气体监测、烟雾报警器等。
B	B 类终端具有 A 类终端的随机接收窗口，同时还会在特定的时间打开接收窗口，为了确保终端可以在特定的时间准确打开接收窗口，网关需要给终端下发时间同步的信标。	在终端特定的接收窗口可以下发数据，下发的时延有多增加。	阀控、水表、电表等。
C	C 类终端的接收窗口几乎一直处于接收状态，只在发送数据时短暂关闭，C 类终端相比 A 类和 B 类耗电最大。	因为接收终端始终处于接收状态，所以能够在随时对终端下发数据。	路灯控制等。

另外，LoRa 联盟对终端设备指定了一些通用标准，如 LoRa 终端都要实现 A 类终端的功能，高级类终端的功能必须向下兼容低级类^[33]。

4.1.2 LoRa 模块的通信协议设计

通过对 F8L10D LoRa 模块和市场上现存的 LoRa 模块数据传输模式的研究，本文设计了一套用来支持所设计的 LoRa 模块通信的协议格式，设计的 LoRa 模块的操作模式主要包括：透传模式和 API 模式。下面分别从这两个方面对所设计的 LoRa 通信模块进行介绍。

（1）透传模式

这是最简单的工作模式，只需要配置好透传地址，之后所有发给 LoRa 模块的数据都会发送到透传地址，适合点对点的通信。

（2）API 模式

用户在 API 模式下发送数据时，必须把数据封装成 API 的数据帧格式进行发送，所有的数据都包含在特定的帧中，定义的操作和时间都是通过这些帧进行交互的。API 数据帧的通用格式如表 4-2 所示。

表 4-2 API 数据帧的通用格式

帧起始 字节	长度域	命令域	数据域	异或校 验和
1 字节	1 字节	2 字节	xx 字节 (xx<82)	1 字节

API 模式下发送数据时采用的是十六进制，数据域的各个子域需要按照小端模式发送即低字节在前高字节在后，其中有关数据帧的具体细节如下。

帧起始字节：默认为 0xFE。

长度域：数据域的长度。

命令域：发送或接受等命令对应有不同的格式。

数据域：发送的数据内容，包括目的地址和发送内容。

异或校验和：长度域、命令域和数据域三者的异或和。

帧校验（FCS）计算的示例代码如图 4-2 所示。

```

unsigned char calcFCS(unsigned char *pMsg, unsigned char len)
{
    unsigned char result = 0;
    while (len--)
    {
        result ^= *pMsg++;
    }
    return result;
}

```

图 4-2 帧校验（FCS）计算

对应的数据帧代码实现如图 4-3 所示。

```

uint8_t    frameHead;
uint8_t    frameLen;
uint16_t   frameCommand;
uint16_t   srcAddress;
uint16_t   DestAddress;
uint8_t    loraData[80];
uint8_t    frameCrc;
apiProtocol_t  apiProtocolFrame =
{
    .frameHead    = 0xFE,
    .frameLen     = 0x00,
    .frameCommand = 0x0000,
    .srcAddress   = 0x0000,
    .DestAddress  = 0x0000,
    .frameCrc     = 0x00,
};

```

图 4-3 API 数据帧代码实现

4.2 数据处理

本文设计的 LoRa 模块在 API 模式下数据处理的格式，包括数据发送、数据接收及其它辅助功能。

4.2.1 数据发送

API 模式下发送数据帧：FE 06 24 5F 00 00 41 41 41 41 7D，其对应的数据帧格式如表 4-3 所示。

表 4-3 API 模式下发送命令的数据帧

帧头	长度域	命令域	数据域		异或和
FE	06	24 5F	目的地址 (2Byte)	发送内容 (<80Byte)	7D
			00 00	41 41 41 41	

目的地址：低字节在前。

发送内容：按照正常数据格式发送。

4.2.2 数据接收

API 模式下，默认的数据接收格式如表 4-4 所示。

表 4-4 API 模式下默认接收的数据帧

帧头	长度域	命令域	数据域		异或和
FE	06	44 5F	发送端地址 (2Byte)	接收内容	7D
			10 0E	41 41 41 41	

发送端地址：10 0E 表示地址 0x0E10=3600。

接收数据的格式除了表 4-4 所展示的默认格式，还有带 RSSI 的数据接收格式。如果要采用带 RSSI 的数据接收格式，则需要使用 AT 命令 DDM 设置，具体的带 RSSI 的数据接收格式如表 4-5 所示。

表 4-5 带 RSSI 的接收数据帧

帧头	长度域	命令域	数据域			异或和
FE	07	24 7F	发送端地址 (2Byte)	接收内容	RSSI	82
			10 0E	41 41 41 41	A0	

发送端地址：10 0E 表示地址 0x0E10=3600。

RSSI 指的是接收信号强度。

4.2.3 其它功能

(1) 远程查询

远程查询相应管脚的命令：FE 04 24 5E 10 0E 00 02 62，所对应的数据帧如表 4-6 所示。

表 4-6 远程查询命令的数据帧

帧头	长度域	命令域	数据域			异或和
FE	04	24 5E	目的地址 (2Byte)	读命令 (1 字节)	IO 管脚 (1 字节)	62
			10 0E	00	02	

目的地址：10 0E 表示地址 0x0E10=3600

IO 管脚：01=D1/IO1 02=D2/IO2 03=D3/IO3 04=D4/IO4 05=D5/IO5

远程查询中 IO 状态的数据接收格式如表 4-7 所示。

表 4-7 IO 状态数据接收帧

帧头	长度域	命令域	数据域				异或和
FE	06	44 5E	发送端地址 (2Byte)	IO 管脚 (1Byte)	IO 模式 (1Byte)	值 2Byte	01
			10 0E	02	01	00 00	

发送端地址：10 0E 表示地址 0x0E10=3600

IO 管脚：01=D1/IO1 02=D2/IO2

03=D3/IO3 04=D4/IO4 05=D5/IO5

IO 模式：00=不使用 01=模拟量输入 02=GPIO 输入

03=GPIO 输出高电平 04=GPIO 输出低电平

值：IO 模式为 00=00 00

IO 模式为 01=模拟采集值

IO 模式为 02=GPIO 采集电平 00 00/01 00

IO 模式为 03=当前输出值 00 00

IO 模式为 04=当前输出值 01 00

(2) 远程设置

远程对相应管脚进行设置的命令：FE 07 24 60 10 0E 01 02 01 00 00 5F，所对应的数据帧如表 4-8 所示。

表 4-8 远程设置命令的数据帧

帧头	长度域	命令域	数据域					异或和
FE	07	24 60	目的地址 2Byte	写命令 1Byte	IO 管脚 1Byte	IO 模式 1Byte	IO 值 2Byte	5F
			10 0E	01	02	01	00 00	

目的地址：10 0E 表示地址 0x0E10 = 3600

IO 管脚：01 = D1/IO1 02 = D2/IO2 03 = D3/IO3

04 = D4/IO4 05 = D5/IO5

IO 模式：00 = 不使用 01 = 模拟量输入

02 = GPIO 输入 03 = GPIO 输出高电平

04 = GPIO 输出低电平

IO 值：IO 模式为 01\02 设置定时上报时间间隔 0~65535 秒

远程设置中 IO 状态的数据接收格式如表 4-9 所示。

表 4-9 IO 状态数据接收帧

帧头	长度域	命令域	数据域			异或和
FE	04	44 60	发送端地址 (2Byte)	IO 管脚 (1 字节)	写状态 (1 字节)	3C
			10 0E	02	00	

发送端地址：10 0E 表示地址 0x0E10 = 3600

IO 管脚：01 = D1/IO1 02 = D2/IO2 03 = D3/IO3

04 = D4/IO4 05 = D5/IO5

状态：00 = 设置成功 01 = 设置失败

4.3 本章小结

本章主要介绍了 LoRa 网络通信协议和相关的数据处理。讲述了通信协议的设计，LoRa 标准协议下的三类终端通信方式以及本文设计的 LoRa 模块采用的通信规范，同时还详细讲解了 LoRa 模块具体的数据处理和相应的数据帧格式，包括数据发送、数据接收、远程查询和远程设置等。

第五章 基于 LoRa 技术的仪表数据传输实现与测试

5.1 测试环境搭建

5.1.1 软件平台介绍

油田井口仪表的软件设计过程中采用 ARM 公司的 Keil MDK 嵌入式开发工具。Keil MDK 是 Keil 公司为 ARM 系列微控制器开发的嵌入式开发工具，适合专业的应用程序开发工程师以及刚接触嵌入式开发的人员，这款开发工具支持基于 ARM 的所有设备，涵盖了 Keil C 编译器、调试器、实时内核、宏汇编器等标准组件，可以帮助工程师更好的完成任务。

Keil MDK 的功能特点：

- (1) 完美支持 ARM 及 Cortex 系列微处理器。
- (2) 可使用在对安全性有较高要求的应用和工程需要编译器长期支持的环境中。
- (3) 强大的 ARM C/C++编译工具链。
- (4) 提供前期虚拟机模型，满足新架构下软件验证。
- (5) 稳定的小封装实时操作系统。
- (6) 优秀的集成开发、调试和仿真环境。
- (7) TCP/IP 网络套件，提供多种协议和各种应用。
- (8) 保证 IOT 应用安全连接到互联网的需求。
- (9) 提供带标准驱动类的 USB 主机栈。
- (10) 执行分析工具和性能分析器可使程序得到最优化。
- (11) 大量的项目例程可以帮助初学者快速熟悉 MDK-ARM 的强大内置功能。
- (12) DS-MDK Streamline 实现 Cortex-A/Cortex-M 异构下的性能分析。
- (13) 符合 CMSIS (Cortex 微控制器软件标准接口)。

5.1.2 测试环境搭建

(1) 硬件工具

油田井口仪表的设计工作完成之后，需要对其进行模拟现场环境测试，测试过程中所需要准备的工具有：

- 1) LoRa 无线仪表 2 个；
- 2) J-Link 仿真器一个；
- 3) USB 数据线 2 根；
- 4) RS232 串口线 1 根；
- 5) 计算机 2 台（安装 Keil MDK 嵌入式开发工具等）。

(2) 软件工具

- 1) Keil 嵌入式开发工具;
- 2) 配置和数据检测软件 1 套 (LoRa.exe);
- 3) 串口调试助手 (sscom33.exe)。

5.1.3 硬件设备程序的下载与调试

在进行测试之前, 先对硬件设备进行相应的准备工作, 包括无线仪表程序的下载与调试。测试所用的硬件设备实物连接如图 5-1 所示。



图 5-1 硬件实物连接图

无线仪表程序的下载与调试主要分为以下几个方面:

- (1) 通过 Keil MDK 开发工具对编写的程序代码编译, 同时生成 HEX 文件。
- (2) 通过 J-Link 仿真器将无线仪表和 PC 通过 USB 接口连接, 仪表上电, 同时设置好相应的参数, 对应的参数设置如图 5-2 所示。
- (3) 若一切正常, 则点击下载按钮, 开始下载程序, 下载完成后断开连接并关闭软件。

5.2 基于 LoRa 技术的油田井口仪表的实现与测试

5.2.1 LoRa 仪表的配置及参数

- (1) 仪表的配置

要对无线仪表进行测试, 除了将编译好的程序加载到仪表中还需要对仪表进行配置, 所用到的配置工具是 LoRa.exe, 所需要配置的参数主要有波特率、数据位、停止位、校

验位、工作模式、调试等级、空中速率、ID、透传地址等。仪表的配置界面如图 5-3 所示。

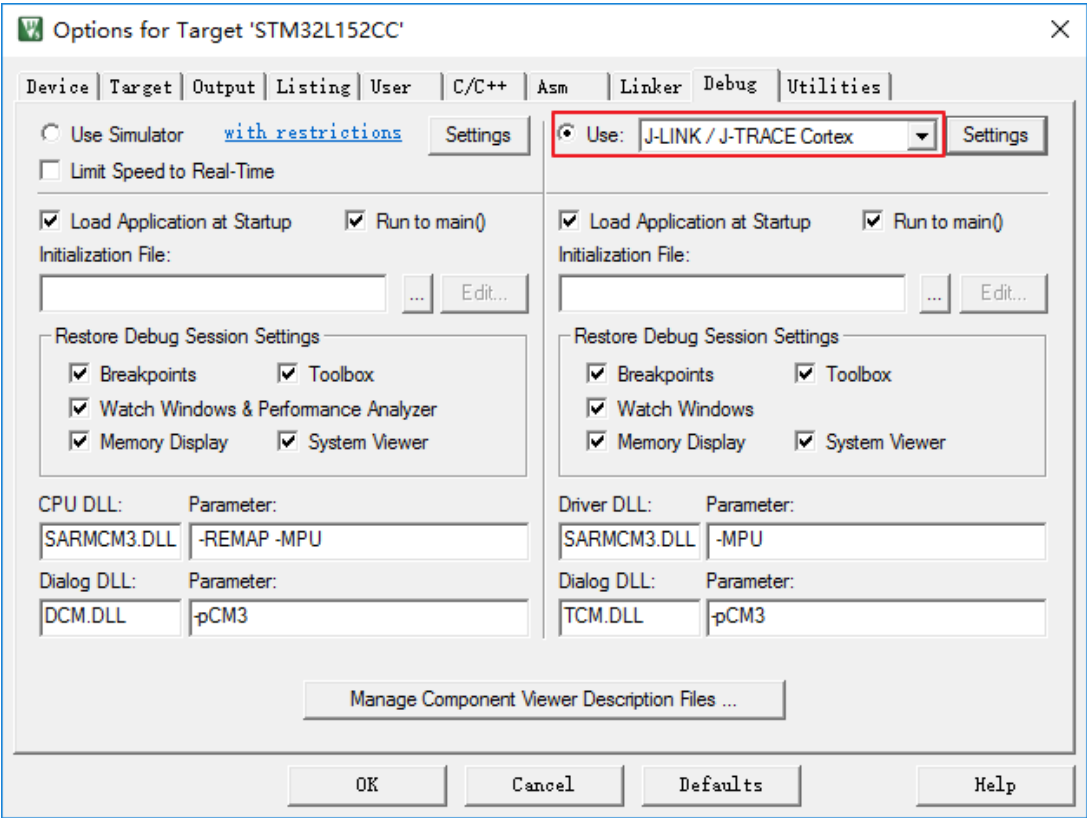


图 5-2 使用 J-Link 仿真器是的参数设置



图 5-3 LoRa 仪表的参数配置界面

(2) 配置参数

LoRa 仪表的部分参数如下：

- 1) 串口通信的相关参数包括：波特率、数据位、校验位、停止位。默认情况下，波特率为 115200bps，数据位 8 位，无校验，停止位 1 位。
- 2) ID 指的是模块的地址，可以在 0 到 65535 之间任意设定。
- 3) 工作模式，分为 API 模式、透传模式和 AT 模式，在测试中我们主要用到透传模式和 API 模式。
- 4) 空中速率可以分为 6 个等级，等级越高速率越高。在同等条件下，空中速率越高，传输的距离越近，所以要根据具体的环境选择合适的空中速率。需要注意的是只有空中速率相同的设备之间才能通信。
- 5) 中继地址是在传输距离超过最大通信距离时，所要经过的中继节点的地址。
- 6) 透传地址是指点对点通信时另一个设备的 ID。

5.2.2 LoRa 仪表的测试

LoRa 仪表通信模型如图 5-4 所示。

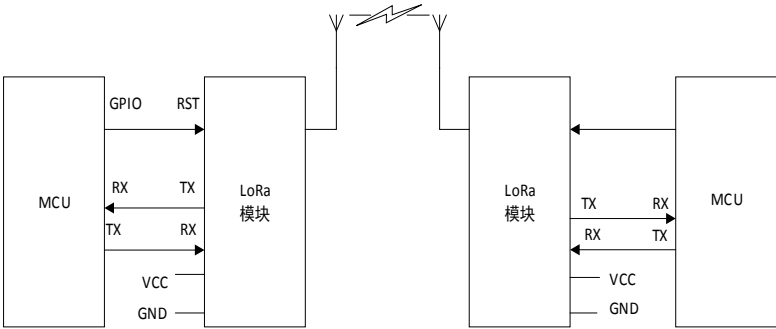


图 5-4 LoRa 仪表通信模型

(1) API 模式配置

API 模式通信的相关配置如图 5-5 所示。



图 5-5 API 模式相关配置 (a)



图 5-5 API 模式相关配置（b）

（2）API 模式下的发送数据

API 模式下发送的数据帧格式按照表 4-2 所示，发送数据的详细格式如表 4-3 所示。选取其中发送的三次数据进行分析，数据和相应的数据帧信息如表 5-1 所示，其中帧地址采用小端模式即低地址在前高地址在后，发送端地址为 0003，发送命令 245f，接收端地址为 0002，接收命令 445f，相应的数据均使用十六进制表示。

表 5-1 发送的数据和其对应的数据帧

发送的数据	生成的数据帧
a1 b2 c3 d4 a5	fe 07 24 5f 02 00 a1 b2 c3 d4 a5 df
a1 b2 c3 d4 a5 44	fe 08 24 5f 02 00 a1 b2 c3 d4 a5 44 94
a1 b2 c3 d4 a5 44 4c 5b 6a 7d	fe 0c 24 5f 02 00 a1 b2 c3 d4 a5 44 4c 5b 6a 7d 90

发送的三次数据详细信息分别如图 5-6 所示。

配置项

Lora配置

IO配置

升级指令

形成发送帧

tcp/Ip

帧解析

帧头

fe

帧长

07

帧命令

24 5f

帧地址

00 02

帧数据

a1 b2 c3 d4 a5

帧校验字节

df

数据

a1 b2 c3 d4 a5

帧预览

fe 07 24 5f 02 00 a1 b2 c3 d4 a5 df

目的地址

00 02

形成发送帧

清除

发送

校验

图 5-6 发送数据的详细信息（a）

配置项

Lora配置

IO配置

升级指令

形成发送帧

tcp/Ip

帧解析

帧头

fe

帧长

08

帧命令

24 5f

帧地址

00 02

帧数据

a1 b2 c3 d4 a5 44

帧校验字节

94

数据

a1 b2 c3 d4 a5 44

帧预览

fe 08 24 5f 02 00 a1 b2 c3 d4 a5 44 94

目的地址

00 02

形成发送帧

清除

发送

校验

图 5-6 发送数据的详细信息（b）



图 5-6 发送数据的详细信息（c）

接收端收到的数据信息，如图 5-7 所示。



图 5-7 接收端收到的数据信息

接收端收到三个数据包分别为：

- fe 07 44 5f 03 00 a1 b2 c3 d4 a5 be
- fe 08 44 5f 03 00 a1 b2 c3 d4 a5 44 f5
- fe 0c 44 5f 03 00 a1 b2 c3 d4 a5 44 4c 5b 6a 7d f1

其对应的数据信息分别为：

- a1 b2 c3 d4 a5
- a1 b2 c3 d4 a5 44
- a1 b2 c3 d4 a5 44 4c 5b 6a 7d

可以看出在 API 模式下，仪表的通信正常。

(3) 透传模式

透传模式适用于点对点通信，首先需要将仪表配置为透传模式。在 API 模式下，将工作模式切换为透传模式，ID 和透传地址要相互对应，保存参数然后重启，重启成功后仪表将进入透传模式。详细情况见图 5-8。



图 5-8 透传模式配置信息 (a)

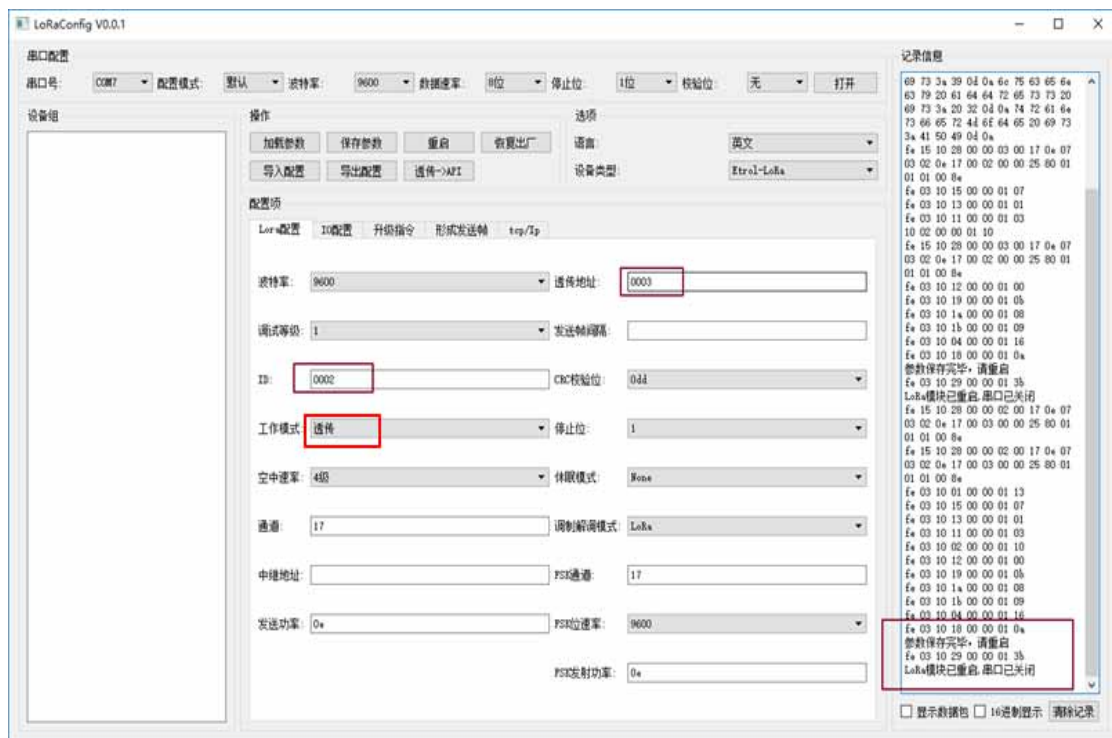


图 5-8 透传模式配置信息 (b)

透传模式下的信息发送和接收采用串口调试助手 `sscom33.exe`，发送端和接收端部分信息如图 5-9 和 5-10 所示。透传模式下的数据相关信息：波特率 9600、数据位 8 位，停止位 1 位，无校验位。

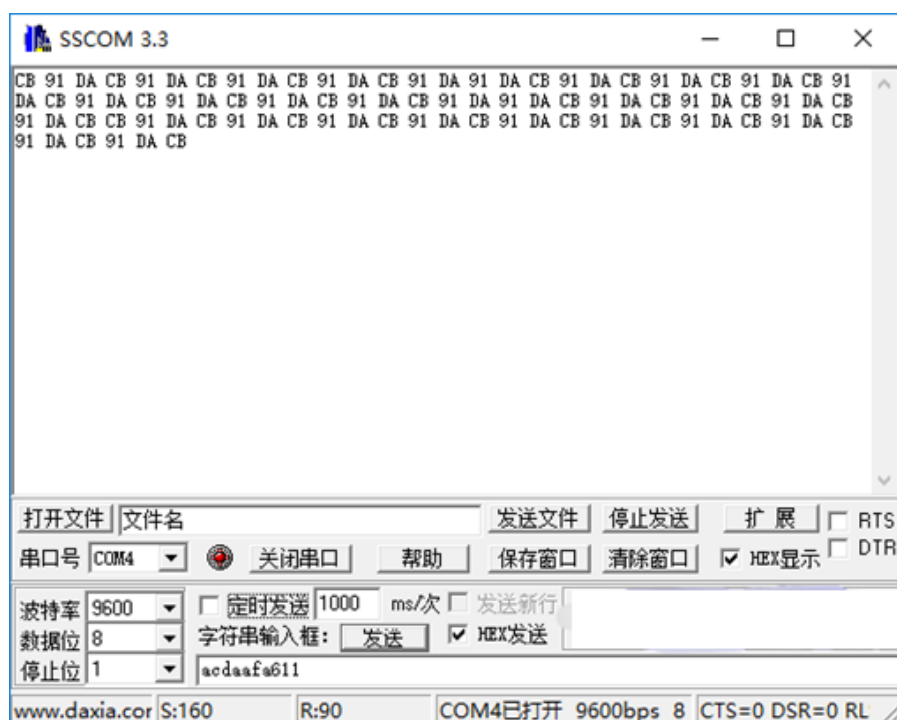


图 5-9 发送端数据信息

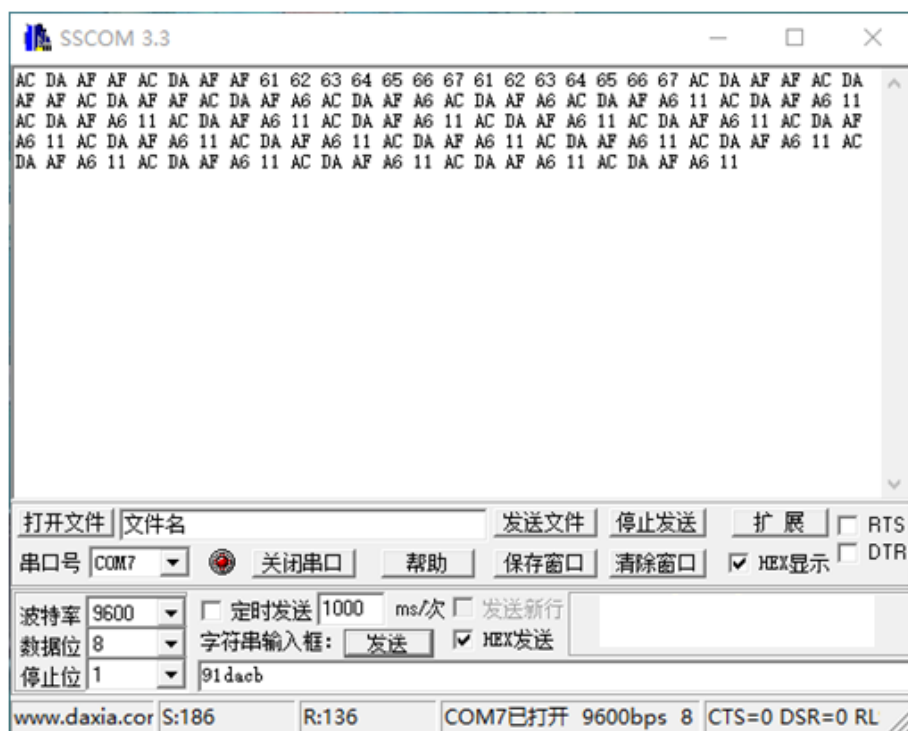


图 5-10 接收端数据信息

5.2.3 数据收集与分析

(1) API 模式

收发数据对比如表 5-2 所示。

表 5-2 输发数据对比

发送数据帧	接收数据帧
fe 07 24 5f 02 00 a1 b2 c3 d4 a5 df	fe 07 44 5f 03 00 a1 b2 c3 d4 a5 be
fe 08 24 5f 02 00 a1 b2 c3 d4 a5 44 94	fe 08 44 5f 03 00 a1 b2 c3 d4 a5 44 f5
fe 0c 24 5f 02 00 a1 b2 c3 d4 a5 44 4c 5b 6a 7d 90	fe 0c 44 5f 03 00 a1 b2 c3 d4 a5 44 4c 5b 6a 7d f1

经分析发送和接收的数据帧完全符合设定协议格式，发送和接收的数据之间不存在差异性。

(2) 透传模式

透传模式是一种点对点的通信方式，数据的收发采用串口调试助手，没有采用 API 模式下收发数据的协议格式。LoRa 无线仪表的通信距离就是在这种模式下测试的。仪表测试的环境选择在空旷的郊区，两个通信仪表尽量在视线范围内，这样可以尽可能的减少障碍物对信号的干扰，使测出的最大通信距离更接近无线仪表的真实情况，得出最有效的数据。

为了确保测出的距离数据真实有效，本文在郊区选取不同的地形进行大规模的测试工作，在透传模式下每次发送 200 个数据包。测试情况如表 5-3 所示。

表 5-3 空旷郊区测试结果

组数	距离/km	收到的数据包数	丢包率/%
1	0.20	200	0
2	0.50	200	0
3	0.80	200	0
4	1.10	198	1
5	1.30	195	2.5
6	1.55	192	4
7	1.75	187	6.5
8	1.90	181	9.5
9	2.00	178	11
10	2.10	174	13
11	2.2	148	26
12	2.28	116	42

由表 5-3 可知，丢包率随着通信距离的增加越来越大，可以看出通信距离在 2.10km 以内时，能够保证通信质量，超过 2.10km，通信质量急剧下降以至于不能保证数据传输的可靠性。

5.3 测试结果分析

综上所述，基于 LoRa 技术的油田井口仪表设计成功，仪表能正常工作，基本达到了预期的传输距离远、功耗低的效果，仪表的预期功能均已实现。整体上实现了数据的收发、查询等功能，在本次测试环节中，为确保测试数据更接近真实值，采用平均值法减少误差，因此在不考虑外界不可控因素影响的条件下，基于 LoRa 技术的油田井口仪表的设计是基本合理的。

5.4 本章小结

本章主要以基于 LoRa 技术的油田井口仪表的调试、运行以及实验结果为主线进行分析与测试。首先对油田井口仪表的测试准备工作进行了描述，具体涉及到软件平台和测试环境的搭建以及硬件设备程序的下载和调试；其次是对油田井口仪表的配置和测试以及相应的数据收集分析；最后对实验结果进行了分析，一切结果说明油田井口仪表工作正常，基本完成了最初设计的功能，达到了预期的设计目标。

第六章 结束语

6.1 总结

无线通信技术一直是通信领域的热门研究方向,LoRa 技术作为无线通信大家庭中的新兴成员,受到了多方关注,应用领域涉及农业、医疗、物流、工业自动化等。无线通信技术作为油田系统的重要技术,为油田数据采集提供了极大的便利,降低了工作人员数据采集的难度。本文通过对现有无线通信技术和油田井口数据的传输特点进行研究,以远距离、低功耗为切入点,将 LoRa 技术应用到油田井口仪表中,用来对油田井口相关设备的数据进行采集和收发。详细的论述了油田井口仪表的软硬件设计、符合 LoRa 标准的自定义协议以及相关测试,设计出基本符合设计要求的油田井口仪表。

本文实现了初步设计的目标和任务,主要完成了以下工作:

(1) 查阅国内外 LoRa 技术和油田井口仪表的相关资料,明确了基于 LoRa 技术的油田井口仪表设计的首要目的和意义。

(2) 通过对基于 LoRa 技术的油田井口仪表的需求进行分析,完成了总体设计方案和相关平台的搭建。

(3) 通过对 SX1276 和 LoRa 模块的研究和分析,完成了仪表的相关设计。

(4) 研究了 LoRa 技术所需的通信协议格式,结合油田井口仪表数据的特点,设计出适合 LoRa 无线仪表的数据传输协议。

(5) 完成了测试环境的搭建,在特定环境下对仪表进行了相关测试,实现了仪表的正常运转,并对测试结果进行了分析。

6.2 展望

随着无线通信技术的发展,LoRa 技术将会越来越完善,本文将 LoRa 技术应用到油田井口仪表中充分利用了该技术的远距离、低功耗的特点,对油田领域的数据传输起到了积极的作用。考虑到 LoRa 技术理论特性,本文所设计的基于 LoRa 技术的油田井口仪表只是达到了最基本的通信,仪表还存在改进和完善的地方,例如应用标准的 LoRaWAN 协议、优化射频电路实现更远距离的通信。由于对石油工业缺乏更专业的认识,以及个人知识的限制,使得设计存在一些不足之处,希望在以后工作和学习中,解决这些问题。

致谢

时间飞逝，转眼毕业在即，对我来说三年的研究生生涯即将结束，二十多年的学生时代也将告一段落。从本科到研究生，我在母校度过的一切都历历在目，这是我人生最重要的七年，它让我变得懂事、坚强，促使我快速成长。在论文即将完成之际，对所有曾经关心、帮助过我的人表示衷心的感谢和深深的敬意！

首先要感谢我的导师孟开元老师，感谢曹庆年老师。两位老师渊博的知识、严谨的治学态度和诲人不倦的品德对我产生了深远的影响。在学术思想和科学研究方面给了我很多指导；在做人做事方面，更是让我受益匪浅。这些宝贵的经验能够让我更好地融入到以后的人生中。在论文选题、设计和论文的写作方面给予了我很大帮助和建议，使得毕业设计的研究工作得以顺利完成。

其次要感谢陕西安控科技股份有限公司的庄贵林董事长、汪长海工程师、赵军峰工程师。感谢公司给我提供实习的机会，使我更早的接触到项目实践中。在工作和毕业设计的实验中，你们的耐心指导使我快速正确的解决了遇到的困难，在此感谢你们对我的悉心指导和无私帮助。

同时感谢我的同班同学和 RTU 实验室的所有同学。这三年里我们像一个大家庭，朝夕相处，一起探讨学术问题，团结协作，互帮互助，共同进步。现在即将毕业，希望大家继续努力，向着自己的人生目标前行。

最后，向审阅论文和参加答辩的老师致以深深的谢意！感谢你们在百忙之中审阅论文、参加答辩。由于本人学术水平有限，论文难免有不足之处，恳请各位老师批评指正！

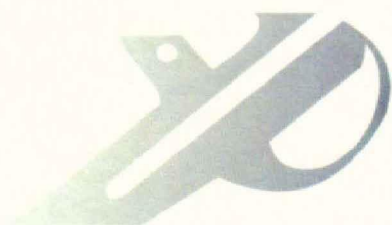
参考文献

- [1] 赵太飞, 陈伦斌, 袁麓等. 基于 LoRa 的智能抄表系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(9):298-301.
- [2] 罗贵英. 基于 LoRa 的水表抄表系统设计与实现[D]. 浙江工业大学, 2016.
- [3] 杨磊, 梁活泉, 张正等. 基于 LoRa 的物联网低功耗广域系统设计[J]. 信息通信技术, 2017(1):40-46.
- [4] 陈永波, 刘建业, 陈继军. 智慧能源物联网应用研究与分析[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(1):37-42.
- [5] Guo L, Fan J, Wen M, et al. Joint optimization of LORA and spares stocks considering corrective maintenance time[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(1):85-95.
- [6] Li Y, Yan X, Zeng L, et al. Research on water meter reading system based on LoRa communication[C]// IEEE International Conference on Smart Grid and Smart Cities. IEEE, 2017:248-251.
- [7] 赵静, 苏光添. LoRa 无线网络技术分析[J]. 移动通信, 2016, 40(21):50-57.
- [8] 刘琛, 邵震, 夏莹莹. 低功耗广域 LoRa 技术分析与应用建议[J]. 电信技术, 2016, 1(5):43-46.
- [9] 徐卸土. LoRa 移动物联网基站无线覆盖分析[J]. 电信技术, 2017, 8(8):38-40.
- [10] Angrisani L, Arpaia P, Bonavolontà F, et al. LoRa protocol performance assessment in critical noise conditions[C]// IEEE, International Forum on Research and Technologies for Society and Industry. IEEE, 2017:1-5.
- [11] Ferrero F, Truong H N S, Le-Quoc H. Multi-harvesting solution for autonomous sensing node based on LoRa technology[C]// International Conference on Advanced Technologies for Communications. IEEE, 2017:250-253.
- [12] 王鹏, 刘志杰, 郑欣. LoRa 无线网络技术与应用现状研究[J]. 信息通信技术, 2017, 11(5):65-70.
- [13] 霍振龙. LoRa 技术在矿井无线通信中的应用分析[J]. 工矿自动化, 2017, 43(10):34-37.
- [14] 杨硕. 扩频通信窄带干扰抑制技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [15] 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(1):19-26.
- [16] 黄增波, 叶锦娇, 赵华玮. 基于 LoRa 技术的低功耗无线锚杆应力传感器设计[J]. 煤矿现代化, 2017(1):39-42.
- [17] 王阳, 温向明, 路兆铭, 等. 新兴物联网技术——LoRa[J]. 信息通信技术, 2017(1):55-59.

- [18]卓传金. 无线仪表技术在油田扩建项目中的应用[J]. 自动化与仪表, 2013, 28(5):55-57.
- [19]杨欢, 李红信. 一种采用 LoRa 技术的智能水表设计[J]. 无线电工程, 2017(12):75-78.
- [20]刘燕君. 基于 Lora 基站的终端测试系统设计与实现[D].武汉:武汉工程大学, 2017.
- [21]Wang K. Application of Wireless Sensor Network based on LoRa in City Gas Meter Reading[J]. International Journal of Online Engineering, 2017, 13(12):104.
- [22]Rizzi M, Ferrari P, Flammini A, et al. Using LoRa for industrial wireless networks[C]// IEEE, International Workshop on Factory Communication Systems. IEEE, 2017:1-4.
- [23]张湧涛, 潘俊钢. 基于 LoRa 技术的井下数据采集系统[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(11).
- [24]高祥凯, 耿淑琴, 何蕴良,等. 基于 LoRa 技术的网络终端无线程序升级系统研究[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2017(10):15-18.
- [25]Noreen U, Bounceur A, Clavier L. A study of LoRa low power and wide area network technology[C]// International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing. IEEE, 2017:1-6.
- [26]Haxhibeqiri J, Van d A F, Moerman I, et al. LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements:[J]. Sensors, 2017, 17(6):1193.
- [27]王于波, 李延, 秦理想等. 基于 LoRa 技术的电力抄表模块研究[J]. 国外电子测量技术, 2018(1).
- [28]董慧, 黄世震. 基于 LoRa 技术的智慧农业系统设计与实现[J]. 微型机与应用, 2017(22):106-108.
- [29]孟开元, 韩佳佳, 曹庆年,等. 基于 LoRa 技术的油田井口数据监测系统设计与实现[J]. 智能计算机与应用, 2017(6):83-85.
- [30]Sancheziborra R, Sanchezgomez J, Ballestaviñas J, et al. Performance Evaluation of LoRa Considering Scenario Conditions.[J]. Sensors, 2018, 18(3):772.
- [31]Aloÿs A, Yi J, Thomas C, et al. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things:[J]. Sensors, 2016, 16(9):1466.
- [32]Shuhaizar Daud,Teoh Shi Yang,Muhamad Asmi Romli, et al. Performance Evaluation of Low Cost LoRa Modules in IoT Applications[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,2018,318(1).
- [33]Petajarvi J, Mikhaylov K, Pettissalo M, et al. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks,13,3(2017-3-01), 2017, Vol. 13(3):1-16.

攻读学位期间参加科研情况及获得的学术成果

[1] 孟开元, 韩佳佳, 曹庆年等. 基于 LoRa 技术的油田井口数据监测系统设计[J]. 智能计算机与应用, 2017,7(6):83~85.



招 生 办：029-88382328

培 养 办：029-88382327

学 位 办：029-88382324

学校网址：<http://www.xsyu.edu.cn>
