

上海交通大学硕士学位论文

面向物联网应用的温室内环境监测系统研究

硕 士 研 究 生：符凌峰

学 号：1130359006

导 师：赵春宇

申 请 学 位：工学硕士

学 科：仪器科学与技术

所 在 单 位：电子信息与电气工程学院

答 辩 日 期：2016 年 1 月

授 予 学 位 单 位：上海交通大学

A Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong
University for Master Degree of Engineering

**The greenhouse environment monitoring
system for the application of IoT**

Candidate:	Fu Lingfeng
Student ID:	1130359006
Supervisor:	Associate Prof. Zhao Chunyu
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Instrument Science and Technology
Affiliation:	School of Electronic Information and Electrical Engineering
Date of Defence:	January 2016
Degree-Conferring-Institution:	Shanghai Jiao Tong University

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文《面向物联网应用的温室内环境监测系统研究》，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，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。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。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密□，在____年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密□。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

面向物联网应用的温室内环境监测系统研究

摘 要

农业物联网是传感技术、网络技术和信息技术在农业领域的综合应用。农业物联网能够促进农业信息化、精细化和智能化,是解决我国农业劳动力日益不足和生产效率较低等问题的有效途径。本文面向物联网应用,以温室内环境监测系统为研究对象,针对物联网传输层、感知层和应用层的设计要求,重点研究 ZigBee 无线监测网络的通讯协议、低功耗节点设计和测点布置策略,以及环境传感器设计和农业物联网监测平台开发。

针对温室内系统布置空间有限、供电困难的特殊情况,搭建节点布置灵活和低功耗的 ZigBee 无线传感器网络。为保证温室恶劣工况下数据的完整性和同步性,并降低无线数据传输功耗,通过精简传输信息帧格式及其对应解析方法,自定义网络通讯协议和流程,大幅提高系统稳定性,减少无线传输功耗。为了有效降低电池供电节点的功耗,通过 ZigBee 节点在采样间隙的低功耗休眠,降低芯片在系统空闲期间的功耗;通过分时供电管理策略,独立控制各组传感器的测量和供电,减少传感器在数据采集与系统休眠期间的功耗。现场实测表明,系统间隔 5 分钟采样时,采用 2200mAh 锂电池供电的节点可连续工作 41 天,能源使用效率比优化前提高 94.7%。为了以少量测点准确反映温室内的温度分布情况,建立二维 CFD 模型,针对夏季高温低风速恶劣气候情况,研究外界径向微风条件下,顶窗打开和闭合时的温度场分布。研究表明,顶窗关闭时温室内温度较高且分布均匀,开窗时温度下降明显,呈现两边高中间低的对称分布。因此,可以通过 5 个测点,分别布置在两侧高温稳定区、中央低温稳定区及高低温交界区,准确反映温室内温度分布和变化趋势。

为了满足温室监测传感器的低功耗和模块化设计要求,采用宽供电范围、低静态电流、具备标准数据接口的传感器芯片;设计满足低功耗要求的传感器接口电路;测试和标定传感器性能;研究不同传感器的封装和布置标准。

为使农业科研人员便捷的获取长期数据,让消费者了解绿色农产品的生产过程,在应用层开发 Web 服务器和前端构成远程监测平台,不间

断记录与作物生长相关的环境数据，并通过前端实时展现温室现状。

本论文研究的基于物联网的温室内环境监测系统，具有系统布置灵活、节点功耗低、数据采集同步、功能拓展性强的特点。通过标准化的传感器接口和网络接口，该监测系统可扩展多样化的传感器，并突破地域限制连接多个温室，组成大型温室监测平台。通过实时显示和长期记录作物生长相关环境数据，该平台有助于农业科研人员对作物在整个生长周期内生长特性的研究，并有助于温室环境智能控制策略的开发和优化。

关键词：农业物联网，温室内环境监测，低功耗无线传感器网络，ZigBee，CFD 模型。

THE GREENHOUSE ENVIRONMENT MONITORING SYSTEM FOR THE APPLICATION OF IOT

ABSTRACT

Agriculture internet of things (IoT) is the integrated application of sensor technology, network technology and information technology in agriculture field. Agriculture IoT can promote agriculture informatization, refinement and intelligence, which is an efficient path to solve the problems of growing labor shortage and low production efficiency in domestic agriculture field. We carried out the research about the greenhouse environment monitoring system based on the IoT technology. The research focuses on the 3 layers of perception, transportation and application in IoT, including the design of greenhouse environment sensors, the low-power ZigBee WSNs (Wireless Sensor Networks) and the development of monitoring platform for agriculture IoT application.

Considering the difficulties in power supply and space limitation in greenhouses, we established a ZigBee WSNs, which can be flexibly organized for measurement and consume low power in operation. In order to ensure the data integrity and synchronization in harsh environment in the greenhouse, and satisfy requirement of low-power consumption in the wireless data transmission, the custom network protocol and communication process were designed by streamlining the information frame format and the corresponding parse method. This protocol can increase the system stability substantially and reduce the wireless transmission power consumption significantly. In order to reduce the power consumption of battery-powered nodes, we turned the ZigBee chips into low-power sleep mode between system sampling intervals, which can reduce the chip power consumption during system idle. At the same time, we managed the power supply of each group of sensors by time-sharing power management strategy, which reduced the consumption during data sampling and system sleep process. The field test showed that the nodes powered by 2200 mAh lithium batteries can continuously work for 41 days with the sample interval of 5 minutes, which means the energy efficiency can improve 94.7% compared with unoptimized ones. In order to accurately represent the distribution of temperature field in

greenhouse with less measurement points, we established a 2-dimensional CFD model. Considering the harsh conditions of high temperature, low wind speed and radial natural breeze outside in summer, we analyzed the distribution of temperature field when roof windows are opened or closed. The research showed that the temperature is high and evenly distributed when windows opened; when windows are closed, the temperature obviously fell and presented a symmetrical distribution, which had the stable high temperature zone at the center and stable low temperature zone at both sides. Therefore, we can use at least 5 measurement points to accurately represent the distribution of temperature, with 2 points arranged at both sides, 1 point at the center and 2 points at dynamic junction areas between the 3 zones.

Considering the requirements of low power consumption and modular design in monitoring system sensors, we chose the digital sensor chips, which had wide range of power supply, low static current and standard data interface. Meanwhile, we designed the low-power sensor interface circuit, tested and calibrated the sensor performance, analyzed the standards of package and arrangement of different sensors.

In order to help agriculture research staffs conveniently obtain long-term historical data and let consumers can understand the green agricultural production process visually, we developed the server and front page to constitute the remote monitoring platform in the IoT application layer. This platform can continuously monitor greenhouse conditions, record a large number of crop growth related environment data and display real-time situation in greenhouse from mobile front page.

Based on IoT, we study the greenhouse environment monitoring system in this thesis, which has the characteristics of flexibility in system layout, low power consumption of measurement node, synchronization in data acquisition and strong expansibility of monitoring function. This monitoring system can assess diverse sensors, break geographical restrictions to connect multiple greenhouses and constitute a large-scale and integrated greenhouse monitoring platform. This monitoring platform can display crop growth related environment data in real time and record them in a long term. These functions can help agriculture research staffs study the crop growth characteristics in a long growth cycle, develop and optimize the intelligent greenhouse environment control strategy.

KEY WORDS: agriculture IoT, greenhouse environment monitoring, low-power WSNs, ZigBee, CFD model

目 录

面向物联网应用的温室内环境监测系统研究	I
摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	V
第一章 绪论	1
1.1 课题来源	1
1.2 研究目的和意义	1
1.3 国内外研究现状及发展趋势	2
1.3.1 国内研究现状	2
1.3.2 国外研究现状	3
1.3.3 发展趋势	3
1.4 研究内容和章节安排	3
1.4.1 研究内容和创新点	3
1.4.2 章节安排	4
第二章 作物生长关键因子分析及其传感器设计	5
2.1 作物生长关键因子分析	5
2.1.1 温度	5
2.1.2 湿度	6
2.1.3 光照	7
2.2 关键因子传感器选用和设计	8
2.2.1 空气温湿度传感器	8
2.2.2 土壤温湿度传感器	12
2.2.3 光照强度传感器	15
2.3 本章小结	18
第三章 低功耗 ZigBee 网络框架与软件设计	19
3.1 内环境监测系统框架与 ZigBee 技术概述	19

3.1.1 温室内环境监测需求分析	19
3.1.2 WSNs 发展与 ZigBee 技术	19
3.1.3 内环境监测系统设计	22
3.2 开发环境与 ZigBee 协议栈	23
3.3 ZigBee 网络自定义通信协议	24
3.3.1 自定义通信流程	24
3.3.2 通讯信息帧格式设计	26
3.4 低功耗 ZigBee 节点的软件设计	29
3.4.1 无线数据传输	30
3.4.2 串口通讯	31
3.4.3 电源管理	31
3.5 传感器数据采集	32
3.5.1 传感器驱动设计	32
3.5.2 测量和供电时序优化	35
3.5.3 智能数据采集机制	35
3.6 本章小结	36
第四章 低功耗 ZigBee 网络硬件设计	37
4.1 CC2530 芯片及核心板设计	37
4.2 传感器节点底板设计	39
4.2.1 电源模块	39
4.2.2 传感器供电管理模块	41
4.2.3 传感器和核心板接口	42
4.3 节点外形封装和测点布置	43
4.4 室外微型气象站	44
4.5 本章小结	46
第五章 系统测试及基于 CFD 模型的测点优化	47
5.1 节点和模块测试	47
5.1.1 传感器测试和标定	47
5.1.2 模块与节点功耗测试	50
5.1.3 无线网络传输质量检测	51
5.2 温室现场测试	53

5.3 基于 CFD 的温度测点布置优化	54
5.4 本章小结	57
第六章 面向物联网应用的监测平台设计	58
6.1 服务器开发	58
6.1.1 开发平台	59
6.1.2 本地监测网络通信模块	59
6.1.3 数据库设计	61
6.1.4 用户权限管理	62
6.2 前端开发	63
6.2.1 开发平台	63
6.2.2 功能模块与界面设计	63
6.3 本章小结	64
第七章 总结和展望	65
7.1 研究工作总结	65
7.2 研究工作展望	66
参考文献	67
致谢	70
攻读硕士学位期间已发表或录用的论文	71

图 录

图 1 作物三基点温度	6
图 2 土壤水分特征曲线	7
图 3 植物光合效率与光照强度的关系	8
图 4 SHT15 结构框图	10
图 5 SHT15 典型接口电路和封装	12
图 6 热电阻法温度测量原理图	14
图 7 SMS-II-50 土壤湿度与温度传感器	14
图 8 SMS-II-50 接口电路设计	15
图 9 BH1750FVI 典型接口电路设计	17
图 10 ZigBee 协议 5 层结构	21
图 11 ZigBee 组网模式	21
图 12 内环境监测系统的框架与部署设计示意图	22
图 13 Z-Stack 协议栈架构	24
图 14 自定义系统通信流程	25
图 15 维持数据同步性的通讯流程图	26
图 16 CSMA/CA 工作流程	30
图 17 SHT15 启动传输时序图	33
图 18 传感器数据采集与供电时序	35
图 19 传感器节点硬件结构框图	37
图 20 CC2530F256 结构方框图	38
图 21 CC2530 核心板原理图	39
图 22 电源模块原理图	40
图 23 传感器供电管理模块原理图	41
图 24 核心板接口电路原理图	42
图 25 传感器接口电路图	42
图 26 防水箱体与防辐射罩封装效果图	43
图 27 节点封装结构设计和传感器测点布置示意图	44
图 28 MULTI-6P 六要素微型气象站	45
图 29 SHT15 10 到 35℃ 升温过程温度测量和相对误差曲线	48
图 30 SHT15 35 到 10℃ 降温过程温度测量和相对误差曲线	48

图 31 SHT15 40 到 85 %RH 相对湿度上升过程测得值和相对误差曲线.....	49
图 32 SHT15 40 到 85 %RH 相对湿度上升过程测得值和相对误差曲线.....	49
图 33 室温下 SHT15 温度和相对湿度重复性测定	49
图 34 SMS-II-50 土壤含水量测得值和相对误差曲线.....	50
图 35 不同障碍物对信号强度和丢包率的影响	52
图 36 环境因素对信号强度和丢包率的影响	53
图 37 监测系统现场测试	53
图 38 温室实测数据与标准数据对比	54
图 39 崇明 5 连栋塑料温室	55
图 40 顶窗打开与关闭状态下 CFD 模型温度场分布	56
图 41 远程监测平台设计和部署图	58
图 42 本地服务器与 ZigBee 协调器通信流程	60
图 43 温室数据库结构和表设计	61
图 44 当前内外环境显示页面	64
图 45 历史数据、温室实景和设置页面	64

表 录

表 1 三种典型测温元件对比	9
表 2 电阻式和聚合体电容式测湿元件比较	10
表 3 SHT15 供电和功耗	11
表 4 SHT15 温度和相对湿度测量性能参数	11
表 5 土壤中主要成分的介电常数	13
表 6 SMS-II-50 性能参数表	15
表 7 四种主要光电材料的测量原理、特性和适用范围	16
表 8 BH1750FVI 性能参数表	17
表 9 下行命令信息帧	26
表 10 下行命令信息帧功能码设定	27
表 11 上行状态信息帧	27
表 12 上行状态信息帧功能码定义	28
表 13 上行数据信息帧	28
表 14 上行数据信息帧状态位定义	29
表 15 PM1、PM2 和 PM3 休眠模式的配置和功耗	32
表 16 SHT15 空气温度和相对湿度测量值修正与补偿系数	34
表 17 传感器节点各模块供电基本要求	39
表 18 HT7333 性能参数表	40
表 19 TPS2034 性能参数表	41
表 20 MULTI-6P 风向风速性能参数	45
表 21 MULTI-6P 温度、湿度、气压、雨量测量参数表	45
表 22 节点和模块功耗测试	51
表 23 顶窗打开和关闭状态下温室温度场测量值和仿真值对比	57
表 24 温室数据库表格设计说明	62

第一章 绪论

1.1 课题来源

本文课题来源于《现代农业装备与设施的研发》(沪农科攻字(2009)第 8-1 号),上海市 2009 科技兴农重点攻关项目,由上海市农业科学委员会主导并开展工作。本文在已有技术基础上,对温室内环境监测系统展开进一步研究,面向物联网应用需求,设计和实现了一套布局灵活、低功耗、通用性强、具备物联网接口的内环境监测系统。

1.2 研究目的和意义

随着我国人口及消费总额的扩大,粮食需求总量、人均粮食需求水平和消费水平将进一步提高,人们的饮食结构也随之发生了变化,对于水果、蔬菜、奶制品等高营养、高附加值、有机健康食品的需求量持续增加,对食品的安全性、品质、供应种类也提出了新的需求^[1,2]。人们在“吃饱”的基本要求下,更需要吃得安全、营养和丰盛,农业生产呈现出总量扩大、消费升级、分层更加明显的趋势,这一趋势将长期且持续的影响农业生产的顶层设计和结构规划。

但目前我国农业生产的现代化和信息化水平较低,整体上技术水平落后。城镇化导致土地资源日渐缩减,农村劳动力人口大量向城镇转移,农村务农人口减少,农业经营出现老龄化和副业化趋势,农业经营成本上升,无法继续维持传统农业劳动密集型的生产方式;工业化的不断推进,导致环境污染加剧,农业生产环境受到威胁,食品安全受到挑战,而人民对高品质安全优质食品的需求和国际农产品在国内市场的推广,进一步加剧了这一矛盾。因此,我国农业急需实现现代化和信息化。

针对这一需求和大趋势,“十三五”规划中提出现代农业和粮食安全发展战略,大力发展设施农业,建立和健全食品安全体系^[3,4],并着重提出农业物联网作为提高农产品产量和质量的关键手段,和信息化发展的主要方向之一。温室栽培作为设施农业的重要组成部分,具有技术和资本集约的特点,其优势在于能够有效减小传统生产方式的限制,人为塑造合适的生长环境,合理和高效的配置生产资源,提高农产品产量、质量以及资源利用率;依托已有的简单电气化设备可以快速连接物联网,实现农业信息化生产,获得优质安全的农产品。因此,温室栽培在我国分布广泛、市场占有率高,并成为设施农业发展的核心领域之一。

本文所属课题主要研究传统农业设施的自动化改造,采用先进的计算机控制取代人工控制,利用仿真优化的控制策略代替经验的控制手段,引导农业生产的集约化和信息化改进。针对温室栽培,综合运用传感技术、嵌入式等技术,设计仿真模型优化环境控制策略,设计了自动化的温室环境调控系统,实时监控作物生长环境。但在研究中也遇到了新的问题,如布置的有线传感器网络布线和供电不便,所设计的本地自动化监控系统无法为远程用户提供实时的温室内环境参数,不便于实验数据获取和生产应用^[5]。

针对温室环境存在的系统布置空间限制大、供电困难等问题,面向物联网应用,结合农业科研和生产应用对温室监测系统的节点低功耗、传感器测量准确稳定、数据同步等具体要求,本文结合无线技术、传感器技术、单片机技术、物联网技术和互联网技术等多领域技术,设计和实现了一套温室内环境无线监测系统。所设计系统采用 ZigBee 技术搭建无线监测网络,配合多点布置、搭载多种传感器的 ZigBee 节点,采集温室内多点的空气温湿度、土壤温湿度以及光照强度数据;电池供电的传感器节点经低功耗优化,布置灵活方便,可长期连续工作;网络汇聚节点与本地计算机通过串口通信,上传传感器数据和接收配置命令,构成本地的自动化无线监测网络;通过互联网平台,将本地监测网络接入到物联网,实现远程的访问和管理。系统提高了温室栽培的信息化和科学管理水平,补充和推进农产品安全管理和食品安全追溯系统,实现了农业物联网的初步应用。

1.3 国内外研究现状及发展趋势

温室栽培,也称为设施园艺,具有技术先进、生产高效、节水节力、土地利用率高、清洁可控等特点,是农业现代化发展水平的重要标志之一。发展先进的温室栽培技术,是向现代化和信息化农业过渡和发展的重要途径。目前,很多国家已开始大规模研究温室栽培技术,并使其成为了支柱产业之一。温室环境监测技术是温室栽培的核心技术之一,也引起了广泛的关注和研究。

1.3.1 国内研究现状

中国是温室栽培的发源地之一,早在 2000 年前,我国就开始使用具有保护措施 of 设施栽培蔬菜。改革开放以后,尤其是 21 世纪以来,随着科技水平、需求总量和水平的不断提高,温室栽培总面积和技术得到快速提升,总面积不断增加、规模不断扩大,占世界总栽培面积的 85% 以上,一直是温室栽培第一生产大国^[6]。但我国的温室栽培技术在许多方面仍低于国际先进水平,包括设施结构不合理、装备和调控

能力差、产品质量安全性低、基础研究薄弱、信息技术普及率低、集约化程度不高等方面^[7,8]，且由于我国温室类型以小拱棚和大中棚为主，电气化程度低，不利于集约化生产，在温室环境精确控制和温室内环境监测等高端技术方面发展缓慢。

1.3.2 国外研究现状

国外温室栽培的发展历史久远，技术发展成熟，以美国、日本和德国最为典型。西欧等国是玻璃温室的主要分布地区，早在 18 世纪已开始发展玻璃温室，德国和荷兰的工业化温室栽培兴起于 20 世纪 50 至 60 年代，同时期的美国和加拿大，技术发展已较为完善^[9,10]。美国温室栽培设备和管理技术高度发达，在温室环境控制设备和传感设备方面保持领先水平，已大范围实现计算机控制。日本温室栽培技术非常注重产业化、自动化、集约化和土地资源的高效利用，广泛分布连栋塑料大棚，无土栽培技术和“植物工厂”模式发达，大力发展机械化和工业化，生产、采摘和贮存过程基本实现自动化。德国农业的信息化程度高，温室栽培已基本实现计算机控制和管理，其遥感技术、精准农业技术等关键技术发展程度与美国相当，处于欧洲领先水平。

1.3.3 发展趋势

随着第三次信息技术革命浪潮——物联网时代的来临，其带来的新增产值将是互联网产业的数十倍，因此各国政府积极提出物联网发展战略，大力研究物联网技术，布局物联网产业。我国在“十三五”中提出实施“互联网+”行动计划，积极发展物联网技术和应用，将农业物联网发展作为农业信息化转变的重要方向之一，各大高校也纷纷响应，开展物联网专项课题研究。中国农业正处于现代化农业快速转型和高速发展时期，必须抓住机遇，大力发展农业物联网，发展设施农业和温室栽培物联网技术和应用^[11]，抓住重点，重点发展温室精准控制和内环境监测的物联网化和应用，开展基础理论和实践研究，争取有所作为和取得突破。

1.4 研究内容和章节安排

1.4.1 研究内容和创新点

本文面向农业的物联网化需求，对温室内环境监测技术展开研究，主要有如下三部分内容：

- 1) 温室环境影响作物生长关键因子分析及其传感器选用。

2) 低功耗多参数 ZigBee 无线传感器网络的设计、系统应用和测试，以及基于 CFD 模型的测点优化。

3) 面向农业物联网应用，远程监测平台服务器和前端设计。

本文在满足功能性需求的，进一步提高系统性能和适用性，具有如下创新点：

1) 本设计方案通过设定协调器命令与节点休眠和唤醒顺序的配合，实现了现场 PC 和远程平台对网络采集周期的灵活控制，通过协调器精确可控的命令周期约束各节点数据采集时间，实现了系统多节点数据的同步采集，满足了农业科研应用中对系统采集周期可控性和数据同步性的要求。

2) 本文针对夏季高温低风速典型恶劣环境，通过 CFD 模型研究顶窗打开和闭合情况下温室内环境温度场分布特征，实现了以少量测点数据准确反映大型温室温度场分布的测点布置策略。

1.4.2 章节安排

本文章节结构安排如下：

第一章，绪论。介绍本文及所属课题研究意义、所使用的技术、国内外温室栽培技术和内环境监测技术的研究现状和发展趋势。

第二章，分析温室内影响作物生长的关键环境因子，结合实际应用为部分因子选用和设计在线传感器。

第三章，详细介绍基于 ZigBee 的低功耗多参数无线传感器监测系统框架、自定义通信协议、软件设计及其功耗优化。

第四章，详细介绍低功耗 ZigBee 网络硬件相关设计和研究，包括传感器终端节点硬件和封装设计，以及室外微型气象站介绍。

第五章，对传感器、模块、节点和系统性能进行测试和校验，并基于 CFD 模型对网络测点布置策略进行优化。

第六章，详细介绍面向物联网应用的远程监测平台设计，包括现场自动化监测系统，以及远程监测服务器和前端设计。

第七章，总结研究内容，展望发展前景和改进方向。

第二章 作物生长关键因子分析及其传感器设计

不同地域和种类的农作物对于环境的要求和抗性各有差异，南方的作物耐涝耐高温，北方的作物耐旱耐寒，这种差异造就了南北地区极具个性化的作物结构和饮食结构，也限制了地域性优良品种的推广。农业科学中，一般采用优化品种耐性抗性和人工塑造适宜环境两种方法来打破这种限制，提高作物的产量和质量，温室栽培技术是后者广泛采用的手段。

塑造适宜气候环境的首要任务是监测温室内部的环境。对作物生长有影响的环境参数多种多样，除了光照、温度、湿度、CO₂浓度、土壤肥力等基本参数外，在部分地区，土壤重金属含量、空气污染物含量、土壤板结等因素对于作物生长也有重要的影响。本文以气候较为温和的华东地区作为研究对象，分析空气温湿度、土壤温湿度、光照强度五大关键环境因子对于植物生长的影响，并选用和设计专用的环境测量传感器。

2.1 作物生长关键因子分析

本节主要从温度、湿度、光照强度三个角度来分析影响作物生长的关键因子。

2.1.1 温度

温度对于作物的影响最为直接，只有在合适的温度内，作物才能萌芽、发育、开花、结果。温度不仅会直接影响光合作用、呼吸作用、蒸腾作用等代谢过程，还会通过影响有机物的合成与运输来间接影响作物的生长。这些影响通过影响酶的合成和活性来实现，酶在不同温度下表现出不同的合成效率和活性，因此，植物的生命活动在不同温度下也表现出差异性，综合表现为最低温度、最适温度和最高温度的三基点温度分布，如图 1 所示。作物只能在最低温度和最高温度之间的温度范围生长，临近或超出最低和最高温度范围，作物生长受到危害甚至死亡。在最适温度下，植物生命过程最活跃，生长最快，但植物的呼吸作用也十分活跃，有机物消耗最快，植物生长得高大而纤细，因此生产中为了培育茁壮的作物，会控制温度在最适温度以下，该温度定义为协调的最适温度。

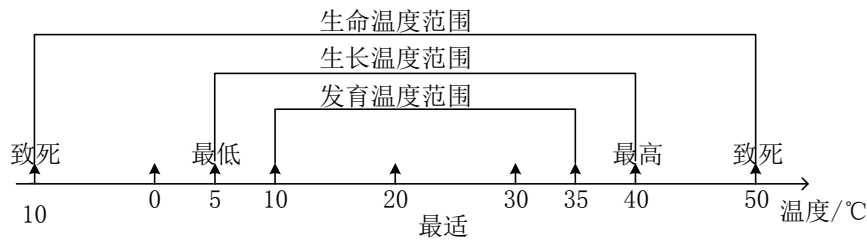


图 1 作物三基点温度

Figure 1 Three-base-points temperature of plant

三基点温度分布因不同的作物种类、生长阶段以及作物器官，具有一定差异。一年生作物在生长初期、开花和结果这三个阶段，它的最适温度是逐步上升的，这也刚好契合作物早春种植到初秋收获的种植周期。三基点温度针对光合作用和呼吸作用也有所区分，分别对应着作物积累和消耗有机物的两大主要生命过程，前者的最适温度一般低于后者，因此需要在生产中需要保持一定的昼夜温差，抑制夜间呼吸作用，维持作物健壮生长和营养生长。

环境温度可分为空气和土壤温度两类。空气温度对作物生命活动作用最明显，直接影响光合作用、呼吸作用和蒸腾作用过程。土壤温度主要作用在植物的根部，水分在植物内部的运转、根系对矿物质和微量元素等养分的吸收、作物的萌芽过程都需要合适的土温条件。

对于温室生产而言，夏季的环境温度容易过高，而冬季环境温度容易过低，往往达不到最佳的生长要求，所以需要使用辅助设施，结合具体的生长周期和环境要求，对温室内的温度进行监测和控制，保持合适的环境温度和昼夜温差。通常通过自然通风、人工通风、喷淋和加热的方式调节温室内空气温度，土壤温度可以通过空气温度间接调节，也可以通过埋设的加热管道进行控制。

2.1.2 湿度

湿度是使温室栽培有别于露天栽培的关键因素，也是温室生产和控制的重要监控参数。环境湿度主要分为空气湿度和土壤湿度两类。

较高的空气湿度是温室环境的典型特征，主要由作物的蒸腾作用、泥土水分的蒸发以及喷雾补充水等因素在温室封闭环境下造成。在温室内，作物蒸腾作用和土壤水分蒸发会释放出大量的水汽，同时，温室内空间密闭狭小、气流缓慢，这都导致室内空气湿度大大高于露天栽培。

高湿环境是导致作物叶片病虫害的主要原因。高湿环境容易导致叶片沾湿，尤其是在夜间，空气骤冷结雾，在叶片表面和薄膜内侧形成冷凝，叶片表面冷凝水、薄膜滴落水滴以及叶片吐水导致叶片湿润，十分适合虫卵孵化和霉菌滋生，导致作

物病害和虫害。

土壤湿度即土壤含水量，分为绝对含水量和相对含水量两种，前者是单位重量烘干土壤中所含水分的重量，后者指单位重量烘干土壤的绝对含水量与其田间最大持水量的百分比。土壤含水量过高会影响植物根系的呼吸作用和对无机物的吸收，导致作物根系缺氧腐烂，甚至死亡。含水量过低会直接影响作物水分吸收，导致细胞缺水死亡，无法进行正常的光合作用和蒸腾作用。植物吸收土壤水的能力受到土壤含水量和土质的影响，如图 2 所示。

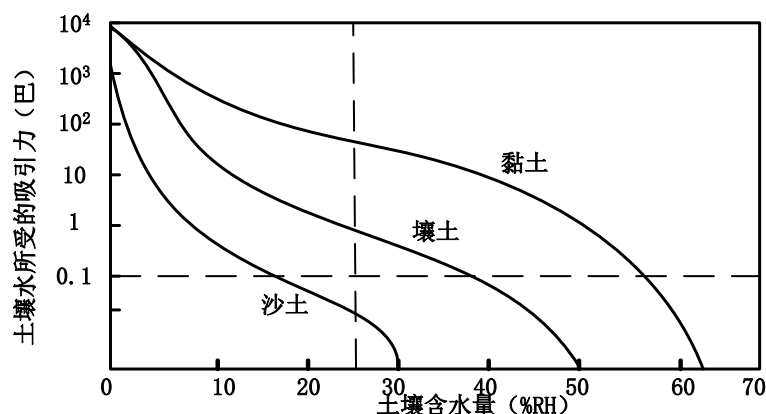


图 2 土壤水分特征曲线

Figure 2 The characteristic curve of soil moisture

温室由于半封闭性，内部空气湿度容易过高导致作物病虫害，需要通过通风或人工加热措施，降低空气湿度和减少冷凝，一般在控制在 50%到 85%RH 较为合适。温室土壤由于较少接触自然降水，水分含量较低，需要通过滴灌或喷淋设备来进行调节，一般需要保持相对含水量在 55%到 70%范围内。

2.1.3 光照

阳光是作物生长的源泉，植物有机物积累量的多少与光照强度和时长有密切的关系，植物各个器官和整体组织的正常发育、保持正常比例，也和光照时长和周期有着直接的联系。不同种类的植物对于光的需求和耐性不同，按照对阳光的需求和耐性从高到低分类，可以分为阳性植物、中性植物和阴性植物三种。阳性植物适宜在完全光照下生长，阴性植物需要在遮阴环境下生长，中性植物介于二者之间，在强光和遮阴下均可以生长。

在一定范围内，植物的光合速率和光照强度呈现正相关关系，当光照强度超过光补偿点时，植物光合速率会超过呼吸作用，净光合进一步增加，随着光照强度进一步增加，达到光饱和点后，光合速率达到阈值不再增长。光补偿点和光饱和点与当前的环境和植物种类有关，阳性植物的光饱和点在 20k 到 25k lx 范围内，阴性植

物在 5k 到 10k lx，其光合效率与光照强度关系如图 3 所示。

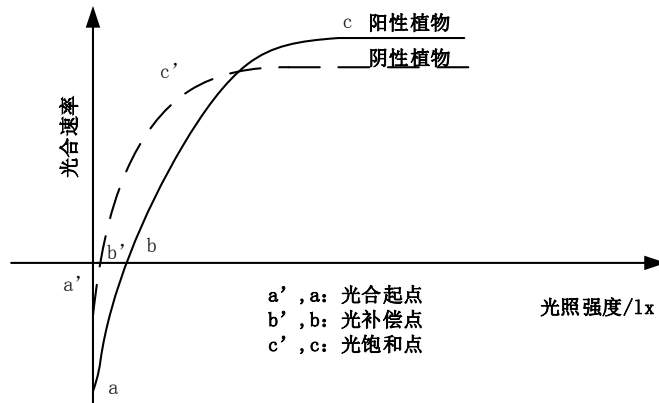


图 3 植物光合效率与光照强度的关系

Figure 3 The relationship of photosynthetic efficiency and light intensity

作物生长所处自然光环境包含各种波段的光辐射，不同波段的光辐射对于植物的光合速率和组织结构生长的影响并不相同，其中红光和橙光最具光合活性，绿光吸收最少，被称为生理无效光。光合作用中，被植物有效吸收的部分光谱能量称为光合有效辐射，简称 PAR，直接影响着作物的产量和品质。一般情况下，光照强度和 PAR 具有比例换算关系，可以通过直接测量光照强度来表征 PAR。

温室内的光辐射主要来自自然光，自然光随季节和纬度的不同有着明显的差异，同时薄膜材料和厚度、温室结构和朝向都会影响到植物的有效光合作用，因此有必要通过辅助手段对温室内光照进行控制和调节，通过人工补光和遮光手段来增强或减弱室内光照强度，比如夜间补充人工光源，盛夏强光时打开遮阳网等。

2.2 关键因子传感器选用和设计

针对变化频繁且作用明显的空气温湿度、土壤温湿度和光照强度五大参数，选用专用的环境传感器，设计其接口和封装，提高测量的可靠性。

2.2.1 空气温湿度传感器

2.2.1.1 空气温湿度测量需求

温室环境监测对于空气温湿度测量的准确性、稳定性和线性要求较高。以华东地区为例，气温分布在-10~40℃范围内，年平均气温 15~18℃，满量程内监测精度要求在±0.5℃，响应时间在 10s 内。空气湿度随环境变化波动较大，50~75%RH 是最适

宜作物生长的空气湿度，0~100%RH 满量程范围内精度要求在 $\pm 5\%RH$ ，分辨率 0.1%RH，响应时间与温度要求相同。同时，针对温室内高温、高湿、高辐射的复杂环境，传感器需要具有一定的防水防尘、抗干扰和低功耗能力，并具有良好的长期稳定性和本地数字化功能，便于模块化设计和分布式布置。

2.2.1.2 空气温度湿度测量原理

传统的测温方法多采用电阻式感温元件，比如热电阻型、热敏电阻型和热电偶型，这类感温元件直接输出模拟量，需要搭配比较器、A/D 转换器等器件来产生有效的输出，需要消耗较多的板上资源，不利于设备小型化的设计要求，同时测量的稳定性和有效性依赖于板上电压的稳定性，耦合性过强，不利于模块化设计。

本文中空气温度测量采用能隙式测温元件，也称带隙式测温元件，其测量原理是一定环境温度下，带隙结构 PN 结的电压增量和 IC 所处环境绝对温度（PTAT）呈现正比例关系^[12]，能带间隙电压是硅材料在绝对温度 0 K 时所具有的带隙电压，幅值为 1.205V，其 PN 结电压增量与绝对温度（PTAT）成正比。该类测温元件和传统热电偶、热敏电阻测温方法对比如表 1 所示。

表 1 三种典型测温元件对比

Table 1 The comparison of 3 typical temperature measurement components

测温元件类型	能隙式	热电偶	热敏电阻
优点	灵敏度高，线性好，体积小	测量范围广，可测高温	灵敏度高，响应快
缺点	不适宜高温测量，需要较多外围器件	测量时需保持参考端温度恒定	不可测高温区，变化率线性较差

能隙式测温元件具有响应快、尺寸小、非线性小、低功耗等优点，但不耐高温，适用于中低温区域的环境温度测量，符合温室内空气温度的监测要求。

目前主流的空气湿度测量方法包括电阻式和电容式两种。电阻式湿度测量，利用湿敏元件的阻值随湿度变化的电气特性来设计的，在元件干燥和吸湿的过程中，水分子分离出 H^+ 离子导致导电状态变化。电容式湿度测量，如聚合体电容式测湿法，利用介质变化型的可变参数电容器来测量湿度，空气湿度变化导致介电常数改变，从而改变导电状态^[13]。常用电阻式和聚合体电容式湿度测量元件对比如表 2 所示。

表 2 电阻式和聚合体电容式测湿元件比较

Table 2 The contrast of resistive and polymer-capacitive moisture measurement components

测湿元件类型	电阻式测湿	聚合体电容式
优点	温度系数低, 抗老化	温度系数低, 灵敏性好, 线性好,
缺点	精度较低, 线性差, 宽湿度范围内需补偿校准	长期稳定性一般

本文空气湿度的测量采用电容聚合体测湿元件, 具有灵敏度高、线性好、重复性较好、温度系数较低等优点, 在 0~100%RH 的量程内, 精度在 $\pm 3\%$ RH 范围内, 具有良好的稳定性和快速的响应速度。

2.2.1.3 传感器选用和设计

综合上述空气温湿度测量需求并对比检测方法, 采用瑞士 Sensirion 公司 SHT1X/7X 系列的 SHT15 温湿度一体传感器。SHT15 集成了一个能隙式温度测量元件、一个电容式聚合体湿度测量元件和一个 14bit ADC, 通过串口电路直接输出已校准的数字信号, 具有响应快、抗干扰能力强等优点, 其结构框图如图 4 所示。

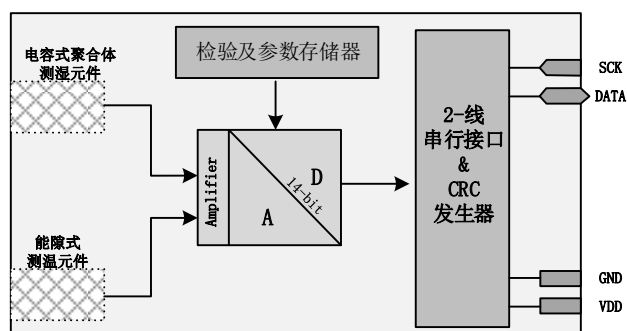


图 4 SHT15 结构框图

Figure 4 The structure diagram of SHT15

SHT15 采用 2.4~5.5V 宽电压供电, 适应不同的供电要求, 休眠时电流低至 $0.3\mu A$, 测量电流仅为 $550\mu A$, 具有良好的低功耗性能, 如表 3 所示; 串口数据收发提供 8-bit CRC 校验, 确保数据和指令的正确传输; 可使用修正公式, 根据 A/D 位数和供电电压, 对测得温度和湿度数据进行修正和补偿, 输出准确的物理量, 并直接计算得到露点信息。

表 3 SHT15 供电和功耗

Table 3 The power supply and consumption of SHT15

参数	条件	Min.	Typ.	Max.	单位
供电 DC		2.4	5	5.5	V
	测量		550		μA
供电电流	平均	2	28		μA
	休眠		0.3	1.5	μA

SHT15 可以准确的采集环境温度和相对湿度，在室温下精度可以达到 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 和 $\pm 2\%\text{RH}$ ，分辨率 8~12bits 可调，量程完全覆盖测量范围，且长期稳定性好，符合温室内空气温湿度的测量要求，其温度和湿度测量性能如表 4 所示。

表 4 SHT15 温度和相对湿度测量性能参数

Table 4 The parameters of SHT15 in temperature and relative humidity measurement

参数	条件	Min.	Typ.	Max.	单位
温度					
分辨率		0.04(12bits)	0.01 (14bits)	0.01 (14bits)	$^{\circ}\text{C}$
重复性			± 0.1		$^{\circ}\text{C}$
精度		± 0.3	± 0.3	± 1.5	$^{\circ}\text{C}$
量程范围		-40		123.8	$^{\circ}\text{C}$
响应时间	1/e	5		30	s
湿度					
分辨率		0.5 (8bits)	0.03 (12bits)	0.03 (12bits)	%RH
重复性			± 0.1		%RH
精度		± 2	± 4	± 4	%RH
非线性度	原始数据		± 3		%RH
	线性化		$\ll 1$		%RH
量程范围		0		100	%RH
响应时间	25°C	6	8	10	s
迟滞			± 1		%RH
长期稳定性	典型值		< 0.5		%RH/yr

传感器通过 4 个引脚完成供电和串口通讯，其中 VDD 和 GND 供应 2.4~5.5 DC 电源，DATA 和 SCK 构成 2-线串行接口，并在信号的读写以及功耗方面进行了优化，

通讯方式与 I²C 类似，但与 I²C 不兼容，具有配套的通讯协议。SHT15 典型接口电路和封装如图 5 所示。

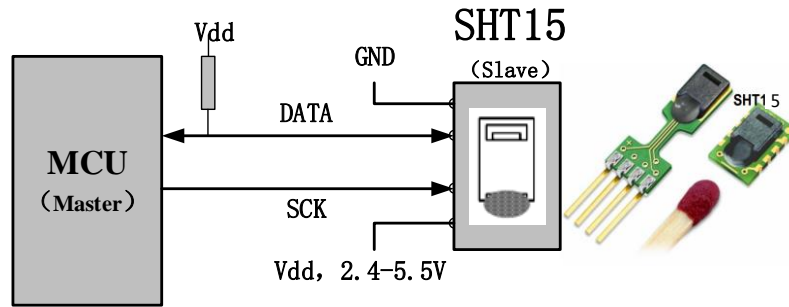


图 5 SHT15 典型接口电路和封装

Figure 5 The typical interface circuit and package of SHT15

2.2.2 土壤温湿度传感器

2.2.2.1 土壤温湿度测量需求

温室环境处于半封闭状态，不易接触自然降水，需要通过人工灌溉方式补充土壤水分，但灌溉会产生较大的能耗，需要准确可靠的监测土壤湿度，保证及时灌溉和避免过度灌溉。同时，土壤温度对作物生长的重要性主要体现在冬季低温情况和作物幼苗期的温度控制，通过一定的辅助方式对温度进行加热处理，控制土壤温度在适宜范围内，保证作物发芽率和幼苗存活率。

根据作物种类、生长周期和土质的不同，作物生长的最适土壤湿度也有所不同，一般保持相对水分含量在 55%~70% 范围最为合适。最适宜的土壤温度因作物不同生长周期和种类而不同，一般在 10℃~25℃ 左右。但对于土壤温度和水分含量的监测要求精度不高，分别在 ±0.5℃ 和 ±5% 左右。

2.2.2.2 土壤温度湿度测量原理

土壤环境和成分复杂，其所含水分依形态分为气态水、液态水和固态水，其中以液态水为主，也是土壤水分含量检测的主要对象。

常用的土壤水分含量检测方法主要包括以下 6 大类：称重法，又称烘干法，是离线检测的主要方法，105~110℃ 烘干至恒温，使土壤水分中自由态水蒸发，由前后重量差计算出水分含量；中子法，根据土壤中快中子和氢原子碰撞时的能量损失最大而最易于慢化的原理，通过测量慢中子云的密度和水分子间的函数关系来测定水分含量；γ 射线法，用探头接收埋设的 γ 射线源透过土壤后的 γ 射线能量，换算得到水分含量；土壤水分传感器法，利用与水分子有直接作用的材料，将水分含量转化

为电信号输出，常用材料包括陶瓷式、电容式等；时域反射法（Time Domain Reflectometry, TDR），电磁波在泥土中传播时，水分对其衰减率的影响最大，由此可以测出泥土的含水量和电导率；频域反射法（Frequency Domain Reflectometry, FDR），基于电磁波脉冲原理，通过测量电磁波在泥土中透射后的频率变化来获得土壤的介电常数，换算得到土壤绝对含水量。

FDR 法利用 LC 电路产生电磁波振荡，根据电磁波在不同介质中的振荡频率变化，测量介质的介电常数，换算得出土壤的体积含水量，由于土壤中水分的介电常数远大于其他成分，如表 5 所示，因此 FDR 方法受土质类型和盐分的影响很小，对水分变化最敏感，这也是 FDR 法可以用来检测土壤含水量的前提之一^[14]。

FDR 法具有精度高、受土壤类型影响小、无辐射污染等优点，且探针几何结构对测量结果影响小，只需要少量的校正工作，操作简单稳定性好，适用于在线式的长期监测，是目前使用广泛的土壤水分测量技术，也是本文进行土壤水分含量测量的主要手段。

表 5 土壤中主要成分的介电常数

Table 5 The dielectric constant of main components in soil

土壤成分	介电常数
空气	1
水	78.2
冰	3
干肥土	7~9
干沙土	3.5
壤土	2.68

土壤温度分布均匀、变化缓慢，一般在夏季低于空气温度，在冬季高于空气温度。对于温室内土壤温度测量的精度、灵敏度和测量范围要求较低，但要求有较好的稳定性和线性，且可适应复杂的土壤环境，因此，本文土壤温度的测量采用热电阻型温度传感器。

热电阻法通过建立温度和电阻的一一对应关系来实现温度的测量，如图 6 所示，在热电阻上加载恒流源和运算放大器，并采集放大后的两端压差，换算得到温度数值。

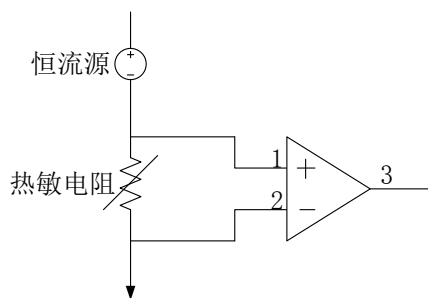


图 6 热电阻法温度测量原理图

Figure 6 The schematic diagram of temperature measurement with thermal resistance method

2.2.2.3 传感器选用和设计

采用一体式土壤水分温度传感器 SMS-II-50，如图 7 所示。SMS-II-50 集成了一个 MS10 土壤水分传感器和一个热电阻测温电路，内置电源稳压器和防反接电路，外壳采用环氧树脂封装，防护等级达 IP68，可直接插入或埋入土壤中，抗氧化和耐腐蚀性能突出。



图 7 SMS-II-50 土壤湿度与温度传感器

Figure 7 SMS-II-50 soil moisture and temperature sensor

MS10 土壤水分传感器，采用 FDR 法直接稳定的反映各种土壤的绝对含水量，符合国际土壤水分测量标准，具有精度高、响应快、互换性好等特点。钢针采用食用级不锈钢材料，可经受长期电解和酸碱腐蚀，受土壤土质和含盐量影响较小，适用于各类土质。热电阻测温电路选用优质铂电阻和四线制测量电路，准确输出土壤环境温度，消除材料和环境对输出精度的影响，测量量程 $-40\sim 80^{\circ}\text{C}$ ，完全覆盖土壤温度变化范围，全量程范围内精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。具体性能参数如表 6 所示。

表 6 SMS-II-50 性能参数表

Table 6 The performance parameters of SMS-II-50

参数	土壤水分	土壤温度
输出方式	0~2V 模拟量/485 输出	
测量量程	0~100%（体积含水量）	-40~80℃
测量精度	±3%（0~53%范围内） ±5%（53~100%范围内）	±0.5
响应时间	< 1s	
供电电压	3.0~3.6V	
最大功耗	40mA	
土壤水分监测区域	以探针为中心，直径 7cm，高度 7cm 的圆柱形区域	
防护等级	IP68	
探针和密封材料	探针：食用级不锈钢；密封：黑色阻燃环氧树脂	
安装方式	探针全部插入或整体埋入被测介质中	

SMS-II-50 可选用模拟输出和 485 输出两种输出模式，模拟输出模式功耗低，适用于单点测量应用，485 输出模式可连接多个传感器，实现对多点多深度土壤环境的监测，但是能耗较大，适用于多点或多深度的测量应用。本文中一个测点只采集单点土壤温湿度参数，所以采用 0~2V 模拟量输出方式，使用节点片上 14bits ADC 直接采集水分和温度模拟量，接口电路设计如图 8 所示。

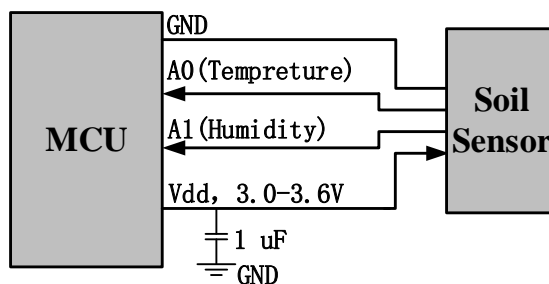


图 8 SMS-II-50 接口电路设计

Figure 8 The interface circuit of SMS-II-50

2.2.3 光照强度传感器

2.2.3.1 光照强度测量要求

光照强度是可见光辐射密度的表征，定义为单位面积上物体受到可见光辐射的光通量，单位 lx。温室中由于结构遮挡和薄膜透射，光照一般弱于室外且分布不均

匀,并具有很强的周期性。以华东地区为例,夏季中午室外最强光照强度可达到 80k lx,在早上光照也在 40k lx 左右,而在冬季,由于日照角度和日地距离较大,光照强度远低于夏季。

光照强度测量的主要目的是把握室内的光照水平,在光照过强和过弱时,进行遮光和补光措施,而非具体的数值计算,因此对于测量的精度和分辨率要求并不高,约 1 lx 左右。同时,光照强度表征的是 400~760 nm 的可见光波段内的辐射强度,太阳辐射全波段范围为 150~1000 nm,对植物生长影响最直接的有效光合波段在 490nm 左右,在不考虑薄膜遮挡特定波段自然光的情况下,光照强度和有效光合效率有固定的换算关系,可以通过测量光照强度来表示有效光合效率。

此外,还需考虑温室内水滴溅射、太阳暴晒和污染物腐蚀等因素的影响,所以传感器本身、封装和外壳都需要具有一定的防护能力。

2.2.3.2 光照强度测量原理

温室中光照辐射主要来自太阳直接辐射、太阳散射辐射和人工光照,光照强度的测量主要针对可见光波段的光辐射。

基于光电材料的光电特性,光强测量元件将光信号转化为一定量的电信号进行输出,主要的光电材料有光电二极管、光敏电阻、光电倍增管、光电池四类,这四种材料的原理、特性及使用场景如表 7。光电二极管测量光强具有良好的线性度、测量精度及灵敏度,环境适应性好且对供电的要求较低,适用于温室内光照强度测量。

表 7 四种主要光电材料的测量原理、特性和适用范围

Table 7 The measurement theory, characteristic and application field of 4 kinds of main photoelectric material

	光敏电阻	光电二极管	光电倍增管	光电池
测量原理	内光电效应,光照引起阻值变化	内光电效应,光照引起导通性变化	外光电效应,光照引起电子溢出表面	光生伏特效,光照产生电动势
优点	体积小,光谱性好	线性化,光谱性好,低噪声	灵敏度高,精度高,噪声低	稳定性好,寿命长
缺点	受温度影响较大,响应慢	没有内部增益	光谱性差,量程小,稳定性差	成本相对较高,体积大
适用范围	调光电路,光控开关	照度计,光电三极管,曝光计	天体光度测量	光伏发电,光电探测

2.2.3.3 传感器选用与设计

选用 BH1750FVI 光照强度传感器测量温室内光照强度。BH1750FVI 是具备 I²C 接口的数字传感器芯片，采用高精度宽频谱的光电二极管，内部集成 16bit A/D 转换器，在 1-65535 lx 的量程范围内具有平均分辨率 1 lx，2.4~3.6V 宽电压供电，成本和功耗很低，适用于大规模布置和电池供电应用场合。其供电、功耗和测量性能如表 8。

表 8 BH1750FVI 性能参数表

Table 8 Performance parameter of BH1750FVI

	Min.	Typ.	Max.	单位
供电电压	2.4	3.0	3.6	V
I ² C 参考电压	1.65	-	供电电压	
测量电流	-	120	190	μA
休眠电流	-	0.01	1.0	μA
量程	1	-	65535	lx
分辨率	4	1	1	lx
工作温度	-40	-	85	°C
响应时间	16	120	120	ms

BH1750FVI 可以滤除 50Hz/60Hz 光噪声干扰，且具有很宽的光谱范围，完全覆盖可见光波段范围，受温度波动和红外干扰影响小，只需少量外部器件就可以组成完整的测量模块。

芯片采用 I²C 接口，SDA 与 SCL 为集电极或漏极开路结构，需要增加 3~10k 上拉电阻，在空闲时维持总线高电平，在 VCC 和 GND 之间加滤波电容和反向二极管作为保护电路，如图 9 所示。光强检测一般作为独立的模块，通过导线连接布置在测点的顶端，为增加模块的通用性和互换性，可以在模块上添加低功耗稳压器和电平转换器，以增加对不同电平供电系统的兼容性。

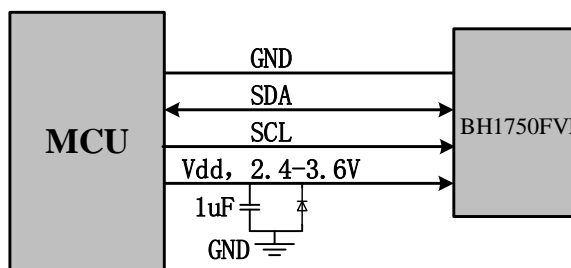


图 9 BH1750FVI 典型接口电路设计

Figure 9 The typical interface circuit of BH1750FVI

2.3 本章小结

本章首先分析了温度、湿度和光照三个影响温室作物生长的关键环境因子，然后从测量需求出发，针对温室内空气温湿度、土壤温湿度和光照强度的检测，分析不同的检测原理和方法，分别选用了 SHT15、SMS-II-50 和 BH1750FVI 三种环境传感器，并设计其接口电路，综合测量温室内的五种环境参数。

第三章 低功耗 ZigBee 网络框架与软件设计

温室是一个特殊的应用环境，具有布置空间有限、布线困难、监测范围大、维护不便等特点，传统的有线传感器网络并不适用于温室监测应用^[15]。因此基于 ZigBee 技术、传感技术和单片机技术，本章节研究一种应用于温室内环境监测系统的无线传感器网络，针对温室的特殊应用需求设计了网络框架，并对具体的软件设计进行详细介绍。

3.1 内环境监测系统框架与 ZigBee 技术概述

3.1.1 温室内环境监测需求分析

温室环境因温室类型、布置地域、温室面积、种植季节和作物的不同具有很大差异，比如单栋塑料温室空间狭小，缺乏供电和网络条件，而在种植高大作物的温室中，光照强度的测量需要考虑作物遮挡等因素。综合而言，面临的主要困难包括布置不灵活、供电困难、建造和维护成本限制大^[16]，这需要监测网络具有灵活的布置能力，便捷的能源供应，较低的设备布置和维护成本，较大且易于扩展的网络覆盖范围。

以华东地区广泛分布的连栋塑料温室为例，该类温室一般采用 3 连栋或以上的钢架结构，覆盖透光性良好的薄膜，屋顶离地 3-5m，每跨宽度 8-10 m，长度约 40m，每栋温室面积 1000m² 左右，配备有较为完善的控制器系统，如顶窗、侧窗、循环风机、湿帘、风机和滴灌等设备，具有一定的供电和联网条件。对于此类温室，监测网络主要考虑参数测量的准确性、系统运行的鲁棒性、网络的覆盖范围和低功耗的要求，并对传感器和芯片进行封装，减少恶劣环境对系统造成的影响。

面向物联网应用的需求，底层的信息采集系统作为感知层，需要方便的通过网络汇聚节点接入互联网，搭配网络层及应用层构成完整的物联网系统。这些限制和需求都要求采用一种可靠稳定的无线方式来组建传感器网络，并便于设置网络汇聚节点，将监测系统接入互联网，满足物联网应用的需求^[17]。

3.1.2 WSNs 发展与 ZigBee 技术

无线传感器网络（Wireless Sensor Networks, WSNs）是一种分布式传感器网络，由散布在区域内、大量低成本低功耗的终端节点互相通讯，组成多跳的自

组织的无线网络。随着微电子、无线通讯以及传感器技术发展日趋成熟，WSNs的应用范围和应用领域不断扩大，作为跨学科、多技术融合的信息技术，它具有自组织、高容错、强隐蔽和部署便捷迅速等技术优势，国内外学者在理论、温室应用的可行性和节能技术方面做了大量有意义的研究^[18, 19, 20]。作为如今计算机网络与信息科学领域的研究热点，WSNs的关键技术主要体现在网络通信协议、网络服务支持以及信息采集系统三个方面。

ZigBee 技术是基于 IEEE802.15.4 标准的低功耗局域网通信技术，其工作模式与蓝牙类似，是一种新兴的短距离、低功耗的无线通讯技术，是 WSNs 信息采集系统的一个重要组成部分，主要用于传感测量和控制应用。

ZigBee 技术为补充蓝牙和 Wi-Fi 的技术空白而诞生和发展。在温室环境监测等低功耗和中短距离局域网的应用中，蓝牙和 Wi-Fi 技术具有很大的局限性，存在技术复杂、功耗大、组网规模小、组网距离近等缺陷^[21, 22]，针对以上局限，以及工业现场对于无线传输高可靠性的要求，经过不断研究和改进，ZigBee 技术逐渐发展和成熟，并具备了如下的优良性能：

低功耗，在完全低功耗休眠模式下，休眠电流最低可达 $0.4\mu A$ ；低成本，通过大幅度简化通讯协议，减少了通讯对设备的要求，芯片价格大幅下降；低速率，数据传输速率为 20~250kbps，满足低速率应用的要求；短时延，从睡眠状态唤醒进入工作状态只需 15ms，节点 30ms 内接入网络；高容量，ZigBee 具有星状、树状和网状三种组网模式，组网规模最多可到 65000 节点；高安全性，ZigBee 提供了三级安全模式，适应不同应用场景，灵活制定安全策略；使用免执照频段，868MHz（欧洲）、915MHz（美国）、2.4GHz（全球）这些工业科学医疗（ISM）频段。

ZigBee 通讯协议是一种低速短距离的无线协议，协议结构采用分层设计思想实现，从底至顶可以分为 5 层，即物理层（PHY）、媒体访问控制层（MAC）、传输层（TL）、网络层（NMW）、应用层（APL），其中物理层和媒体访问控制层遵循 IEEE802.15.4 标准的规定，如图 10 所示。

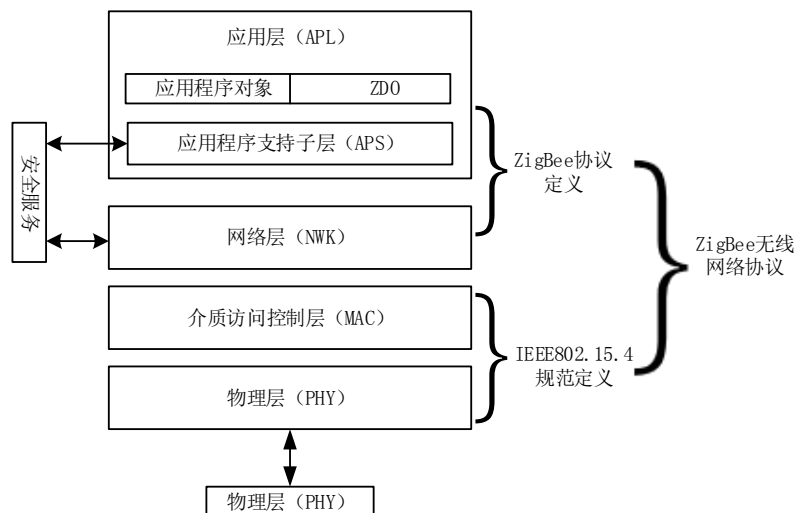


图 10 ZigBee 协议 5 层结构

Figure 10 The 5-layer structure of ZigBee protocol

根据 ZigBee 协议规范说明^[23], ZigBee 无线网络中的设备按其功能分为三种, 即协调器 (Coordinator)、路由器 (Router) 和终端节点 (End Device)。协调器负责组建网络、维护并管理节点入网等行为, 是 ZigBee 网络的通讯中心; 路由器主要负责数据路由和路径选择, 可以通过它方便的扩展网络覆盖范围; 终端节点, 也称为传感器节点, 负责具体的数据采集或控制任务。其中协调器和路由器也称为全功能设备 (Full Function Device, FFD), 终端节点称为精简功能设备 (Reduced Function Device, RFD)。

ZigBee 网络具有三种组网方式: 星状、树状和网状网络, 如图 11 所示。

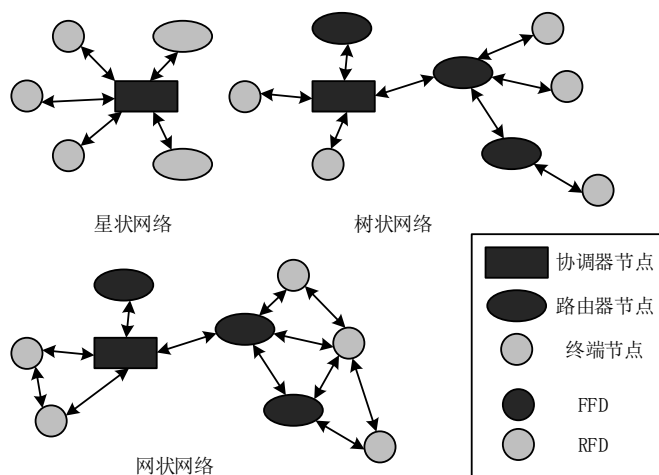


图 11 ZigBee 组网模式

Figure 11 ZigBee networking mode

在所有组网模式中, 网络都以协调器为中心, 但在星状网络中, 节点入网后只能和协调器通讯, 结构简单, 适用于小规模和小范围组网的应用; 树状网络中, 终端节点可经由路由节点连接入网, 有效增加网络覆盖范围, 终端节点在工作间

隔可进入休眠模式，降低节点整体功耗；网状网络中，终端节点也具有数据路由的功能，各节点之间可以自动组织成复杂的多跳网络，适用于复杂多变的应用环境，但节点无法完全休眠。ZigBee 技术可以根据应用场景和组网规模的不同，灵活选择和配置，因此广泛应用于工业、农业、智能电网和车联网等领域，也是本文搭建内环境监测系统的首选技术。

3.1.3 内环境监测系统设计

布置在温室现场的内环境监测系统通过四类设备组成，首先，传感器节点作为终端节点分布在温室内各点，具备传感器数据采集和低功耗休眠功能；然后，功能路由器节点作为路由器节点的一种，布置在温室关键位置，具有数据采集功能和数据路由功能，补充路由器节点也是一种路由器节点，但只具有数据路由功能，布置在温室之间，用于扩大网络覆盖范围；布置在控制室的协调器节点，是网络组建和通讯的核心，各节点组成具有较强扩展性的树状网络。现场 PC 与协调器通过 USB 相连组成网络汇聚节点，PC 连接到互联网将数据发布在，允许用户通过终端访问系统和查看数据。监测系统的框架设计如图 12。

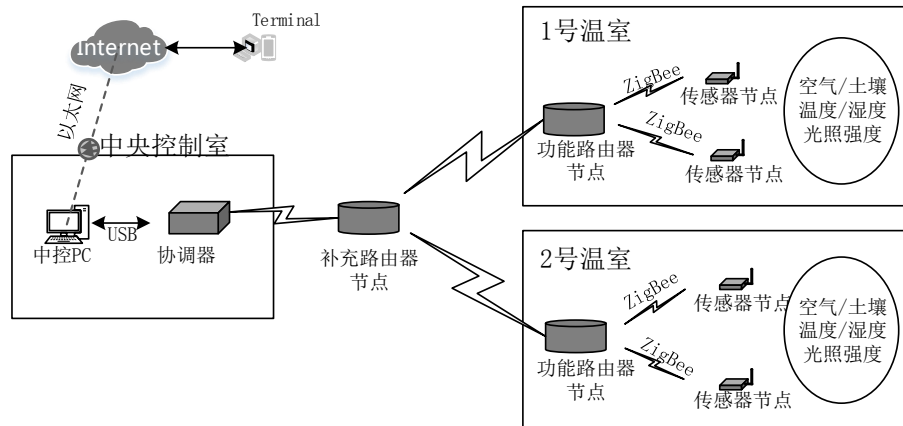


图 12 内环境监测系统的框架与部署设计示意图

Figure 12 The frame and deployment of the internal environment monitoring system

每栋温室布置有 2 个或 2 个以上的传感器节点，该节点连接环境传感器，采集空气温湿度、土壤温湿度和光照强度数据，并将数据通过 ZigBee 无线传输汇总至协调器。传感器节点采用电池供电，在软硬件方面进行低功耗优化以降低功耗，增加连续工作时间。

每栋温室布置 1 个或 1 个以上的功能路由器节点，负责数据路由和扩大网络覆盖范围，并具有和传感器节点一样的传感器模块和数据采集功能，但无法在采样间隙低功耗休眠，且采用外部电源供电。此外，针对现场存在多栋温室或温室间隔较大的情况，在温室外布置补充路由器节点，扩大组网范围，确保间隔较远

的节点可以正常的入网和通讯，补充路由器节点不具备数据采集功能，采用外部电源供电。

在温室现场的中央控制室内布置协调器节点，协调器节点采用外部电源供电，负责组建、维护和管理本地的无线监测网络，布置在网络的中心且空旷的区域，协调器节点与中央控制室内的现场 PC 相连，组成 WSNs 的网络汇聚节点，并作为连接互联网的接口。

3.2 开发环境与 ZigBee 协议栈

所有 ZigBee 节点均采用 CC2530 SoC 芯片为核心。CC2530 是 TI(德州仪器)公司推出的兼容 ZigBee2007 协议的无线射频单片机，它集成了一块增强 8051 MCU 和一块射频芯片，只需外接一个天线和较少外围器件就可以组成稳定的 ZigBee 节点，TI 公司也推出了相应的开发套件，供开发者在开发前期进行测试和研究。

硬件开发环境为 Altium Design 15，围绕 CC2530 进行硬件系统的 PCB 开发和低功耗优化，硬件设计主要采用数字化芯片。软件开发工具为 IAR Embedded Workbench 8.10 for 8051 软件集成开发环境，使用 TI 基于 ZigBee 2007 协议开发的 Z-Stack 协议栈进行无线网络通信的开发。

ZigBee 2007 协议规范由 ZigBee alliance 于 2007 年底推出，定义了 ZigBee 和 ZigBee PRO 2 个基本特性集，在家庭自动化、自动读表和商业楼宇自动化等领域均有较好的应用支持和发展前景。

协议是一系列的通信标准，通信双方需要共同遵循这些标准进行正常的数据收发，而协议栈是协议的具体实现形式，可以理解为已封装的函数库，便于开发人员调用。使用协议栈让开发人员无需对复杂的 ZigBee 协议本身和射频天线等知识有深入了解，直接调用协议栈提供的 API 进行 ZigBee 无线网络通信的学习和开发，大大缩短开发周期^[24]。

Z-Stack 协议栈架构如图 13 所示，和 ZigBee 协议一样采用 5 层的分层实现思想，在应用层又具体分为应用程序支持子层（APS）、应用程序框架层（AF）和 ZDO 设备对象。上层调用下层函数实现功能，但上层实现的功能对下层来说是不可见的。

使用 Z-Stack 协议栈组建网络时，无需关心 ZigBee 协议的具体实现，只需要调用协议栈提供的函数，设定正确的数据流向和通信流程，一般基本通信流程如下：

第一步，网络建立和入网管理。指定一个全功能设备作为协调器来建立和管理网络，路由器和终端节点加入具有相同 PAN ID 的网络，PANID(Personal Area

Network Identification, 个人局域网标志符) 是各个网络的统一身份标识符, 路由器和终端节点启动时自动搜索并加入相同 PANID 的网络, 协调器为其分配 16 位短地址 (short address) 作为局域网内通信的坐标和身份标识, 并注册在协调器的地址列表中, 协调器地址默认为 0x0000, 地址列表中每一个设备短地址对应着其 64 位物理地址 (IEEE Address), 是芯片出厂设置的唯一的标志地址, 也称 MAC 地址。

第二步, 通讯流程设计。网络中各个节点都可以主动向其他节点发送数据, 这一功能通过直接调用 Z-Stack 协议栈提供的无线数据发送函数实现, 但需要设计合理的通信流程来确定无线数据和命令的收发顺序, 保证数据传输的有效性。

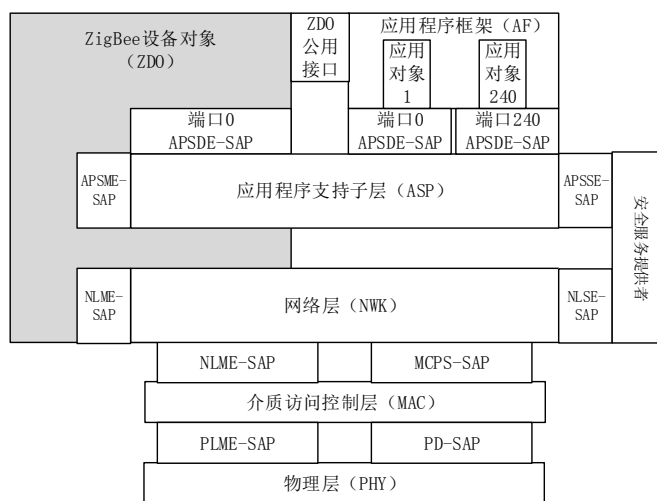


图 13 Z-Stack 协议栈架构

Figure 13 The framework of Z-Stack protocol stack

3.3 ZigBee 网络自定义通信协议

Z-Stack 协议栈可视为一个基于事件 (event) 轮询机制的轻量级操作系统, 普通单片机中通过中断或定时机制实现的功能, 都作为一个事件载入事件列表 (event list) 中, 系统周期轮训事件列表, 并根据事件当前的状态和外界命令, 判断是否触发该事件并执行指定操作。因此在协调器上电启动之后, 所有的功能和操作都通过触发指定事件实现, 比如协调器组建网络、所有设备入网、数据通信、数据采集、系统休眠和唤醒等功能。

3.3.1 自定义通信流程

在 ZigBee 网络中, 协调器对于整个网络的组建、维护和管理, 以及路由器的数据路由功能都是由协议栈的功能函数实现的, 但协调器的广播指令、无线数据的解析、数据的缓存、与 PC 的串口通讯、传感器节点的数据采集、低功耗休眠和唤醒、数据解析和打包、电池状态监测上传等功能, 需要根据 Z-Stack 提供

的基本 API 进行二次开发，并自定义通信协议和流程以满足指定的监测要求，自定义通信流程如图 14 所示。

协调器建立网络后，随时等待处理路由器和传感器节点的入网请求，并周期性的广播休眠命令，在命令中指定节点下一次的休眠时间；接收到休眠命令后，传感器节点解析数据包，按照设定的时间转入 PM2 定时器休眠状态，定时唤醒后自动打开传感器供电，执行采样任务并检查节点状态，采样任务包括 5 类环境参数的采集，节点状态包括传感器状态和电池状态等，以上操作完成后节点关闭传感器供电，将数据和状态信息打包上传至协调器，随后轮询等待下一次的协调器命令，温室内的功能路由器节点具有传感器节点相同的数据采集功能，与传感器节点的通信流程类似，但在采样间隙不进入休眠模式。

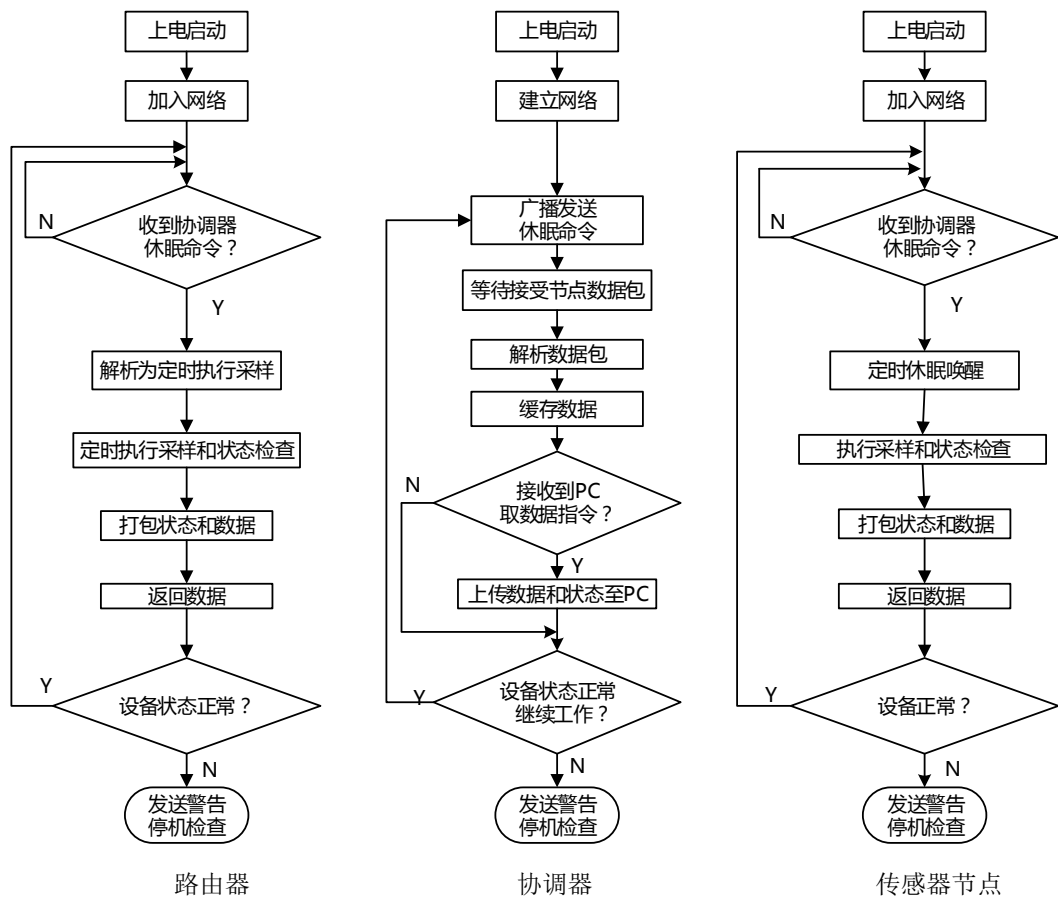


图 14 自定义系统通信流程

Figure 14 Self-defined system communication flow

监测系统要求同一组数据在大致相同的时间段内采集获得，即要求数据具有较好的同步性^[25]，所以采用如图 15 所示的通信流程，将协调器（ZC）稳定的周期性广播命令，作为整个 ZigBee 网络的时间基准。协调器周期性的发送休眠命令，周期为 ZCOrder_time，节点会在限定时间 Wakeup_time 内做出应答并开始时长为 ZCOrder_time - Wake_time 的定时休眠，自动唤醒后执行采样和上传任

务，这一限定时间和组网规模和通信距离有关，但一般不会超过 10s，节点上传数据后轮询等待下一个协调器命令。协调器发出休眠命令的同时，通过串口发送给 PC 一个提示信息 Tips，告知 PC 已开启新的任务周期，且上一周期数据已经备妥，PC 等待指定时间 Gap_time 后主动向协调器请求数据，此时 PC 获取数据的采集时间的分布较为一致，在获取数据时刻之前的 Gap_time + Wake_time - Wakeup_time 内，网络中多个节点的采样时间误差不会随系统运行时间而累计，被约束在 Wakeup_time 内，同时每个任务周期 PC 获取的数据来自上一个周期，各节点的采样数据较为完整，且取数据指令不和当前周期内的任务冲突。

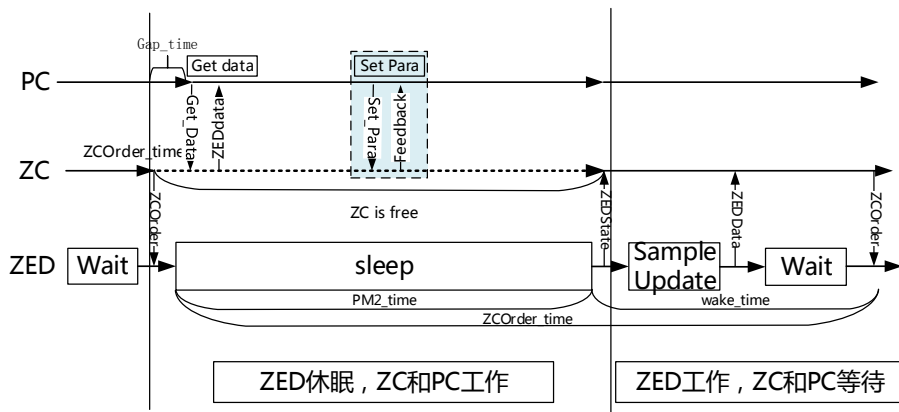


图 15 维持数据同步性的通讯流程图

Figure 15 The system communication flow for data synchronism

3.3.2 通讯信息帧格式设计

数据通信流程定义了数据在网络中的流动方向和顺序,还需要进一步定义数据封装的格式,方便设备对数据的解析。网络中传输的信息包括下行命令信息、上行状态信息和上行数据信息三种。

3.3.2.1 下行命令信息格式设计

下行的命令信息是 PC 发往协调器 (ZigBee Coordinator, ZC) 的配置和取数据指令, 二者通过 USB 转串口数据线通信, 该接口是外界与 ZigBee 系统主动通信的唯一方式, 信息帧格式和定义如表 9。

表 9 下行命令信息帧

Table 9 The downward command information frame

报文组成单元	起始符	长度	功能码	数据	校验码	终止符
占用空间(Byte)	1	1	1	4	1	1
描述(Hex)	3A(:)					23(#)
缩写	SD	LEN	FC	DA	XOR	ED

帧总长度为 9 Byte。

起始符和终止符:SD 和 ED, 分别占用 1 Byte 空间, 定义为 0x3A(:)和 0x23(#), 括号中为对应 ASCII 码表示。

长度: LEN, 1 Byte, 表示余下所有单元的长度之和, 一般为 7。

功能码: FC, 1 Byte, 命令的主要内容, 目前定义的功能及其释义如表 10 所示。

数据: DA, 4 Byte, 下行命令中携带的数据, 空时为 0。

校验: XOR, 1 Byte, 求和校验的校验码, 从 LEN 到 DA 对所有单元字节求和并取低 8 位。

表 10 下行命令信息帧功能码设定

Table 10 The definition of function code in downward command frame

功能码	释义	备注
0x01	重置参数, 重新设置系统参数恢复默认值	DA 为 0
0x02	请求数据, 请求协调器中有缓存的传感器数据	DA 为 0
0x03	配置采样周期, 即 ZC 发送休眠命令周期,	DA 按位倒序装填周期数值(ms), 如 30s=30000ms = 0x7530, 则 data 为 30 75 00 00
0x04	配置唤醒时间, 终端在一个采样周期中最长的唤醒时间	DA 按位倒序装填唤醒时间设置 (ms), 休眠时间=采样周期-唤醒时间
0x05	向功能路由器发送采样和上传数据命令	供控制器网络使用, 从上位机 PC 主动发起采样命令, DA 为 0
0x06	请求功能路由器数据	配合控制网络使用

3.3.2.2 上行状态信息帧设计

上行状态信息从协调器发至 PC, 是协调器对 PC 命令的反馈, 其格式设计如表 11 所示。

表 11 上行状态信息帧

Table 11 The frame of upward state information

报文组成单元	起始符	长度	功能码	校验码	终止符
占用空间(Byte)	1	1	1	1	1
描述(Hex)	25 (%)				26 (&)
缩写	SD	LEN	FC	XOR	ED

为了在 PC 接收该信息时，将上行状态信息和下行的命令信息以及上行的数据信息区分开来，其起始符和终止符设定改为 0x25(%)和 0x26(&)，其余单元设计和下行命令一致，其功能码定义和下行命令信息的功能码相对应，目前定义的功能及其释义如表 12 所示。

表 12 上行状态信息帧功能码定义

Table 12 The definition of function code in upward state information frame

功能码	释义	备注
0x01	重置参数成功	与命令中 0x01 功能码对应
0x02	Tips 信息，ZC 成功发送休眠命令	下行 0x02 命令发出后，直接返回所需数据，不与之对应
0x03	配置采样周期成功	与命令中 0x03 功能码对应
0x04	配置唤醒时间成功	与命令中 0x04 功能码对应
0x05	ZC 向功能路由器发送采样命令成功	与命令中 0x05 功能码对应

3.3.2.3 上行数据信息帧设计

上行数据包括传感器节点和功能路由节点的采样数据，二者在成分和结构上没有区别，但在协调器中保存在不同的 flash 区段中，在协调器内汇总，依次首尾相连进行打包，当 PC 发送 0x02 或 0x06 数据请求命令时，将数据包一次性上传至 PC，布置在 PC 上的服务器，根据通信协议解析数据。其帧格式设计表 13 所示。

表 13 上行数据信息帧

Table 13 The upward data information frame

报文组成单元	起始符	长度	短地址	设备 ID	状态位
占用空间(Byte)	1	1	2	2	1
描述(Hex)	3A (:)				
缩写	SD	LEN	ADDR	ID	ST
报文组成单元	数据长度	数据	校验	终止符	
占用空间(Byte)	1	n	1	1	
描述(Hex)				23(#)	
缩写	DLEN	DA	XOR	ED	

起始符、终止符、校验：与下行命令信息定义一致。

长度：从短地址 ADDR 至终止符 ED 所有单元长度。

短地址: ADDR, 2 Byte, 节点在局域 ZigBee 网络中的通讯地址, 入网时由协调器设定。

设备 ID: ID, 2 Byte, 自定义的设备编号, 在本文小型系统应用中, 设定编号 1~9 为路由器设备, 编号 10~99 为传感器节点。

状态位: ST, 1 Byte, 对应设备的状态信息, 采用独热码编码, bit0~bit7 每一位表示一种状态, 0-正常, 1-异常, 目前定义的状态位如表 14 所示。

数据长度: DLEN, 1 Byte, 该长度表示 DA 单元内数据的长度, 采样 5 参数时该长度为 25, 可根据需要增加或缩减。

数据: DA, n Byte, 节点采集到的数据长度, 采样 5 参数时依次为空气温度和湿度、土壤温度和湿度、以及光照强度, 以 ASCII 码传输和保存, 参数格式为 2 位整数+小数点+2 位小数, 长度为 5 Byte, 一共 25 Byte, 依次首尾拼接组成 DA 单元, 若需扩展或更改监测的环境参数数目和种类, 直接在尾部添加数据并更新 DLEN 即可。

表 14 上行数据信息帧状态位定义

Table 14 The definition of state code in upward data information frame

状态位	释义	备注
Bit7	电池状态	传感器节点电池电压小于 3.3V 置为 1
Bit6	空气传感器状态	空气传感器采样出现异常置为 1
Bit5	土壤传感器状态	土壤传感器采样出现异常置为 1
Bit4	光强传感器状态	光强传感器采样出现异常置为 1
Bit3~0	待定	

3.4 低功耗 ZigBee 节点的软件设计

在 ZigBee 网络三种设备类型基础上, 本文对路由器节点的功能进一步细分为两种, 一种是具有传感器数据采集功能的功能路由器节点, 一种是单纯作为数据路由的补充路由器节点, 加上协调器节点和传感器节点, 这四种设备组成本文的无线监测网络。

除了 Z-Stack 协议栈提供的组网、入网和网络管理功能外, 每一种节点的功能有所区别又有所联系。首先, 无线通信功能作为节点组网的基础, 是每个节点所共有的, 通过直接调用 Z-Stack 协议栈提供的无线收发函数, 各节点之间可以便捷的交换数据和命令; 其次, 传感器节点具有低功耗休眠功能和传感器数据采集功能, 后者也是功能路由器节点所具有的, 而协调器具有串口通信功能, 便于完成和 PC 的通信任务; 最后, 传感器节点作为网络中数量最多且需要电池供电的设备, 在软件和硬件方面进行低功耗优化, 并具备电源管理功能, 监视电池电量, 防止电池发电过度造成损害, 提高节点有效工作时间。

3.4.1 无线数据传输

ZigBee 网络内的无线数据通信采用 CSMA/CA（带有冲突避免的载波监听多路访问）机制^[26]，发送设备在发送数据帧前预约信道，检测网络可用性，防止两个或以上网络设备在数据传输时发送冲突，其工作流程如图 16 所示。

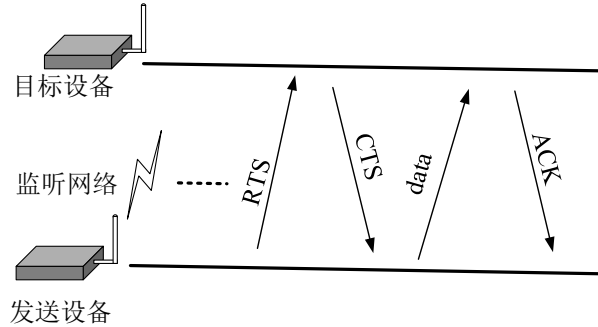


图 16 CSMA/CA 工作流程

Figure 16 The work flow of CSMA/CA

- 1) 预约信道，监视媒体（无线网络）的使用情况，直到没有设备使用网络且持续一定时间后，随机等待一段较短的时间，若此时依然没有设备使用网络，则开始发送数据。
- 2) 正式发送数据前，首先传输 1 小段请求传送报文 RTS（Request to Send），接收到目标设备回应 CTS（Clear to Send）报文后，才正式的发送数据 data，目标设备返回 ACK 代表数据发送成功。

本系统中，无线数据发送通过调用 Z-Stack 的无线发送函数 `AF_DataRequest()` 完成，函数调用需要 8 个参数，分别是 `*dstAddr`（目标设备短地址指针）、`*srcEP`（节点终端描述符指针）、`cID`（profile 内有效簇 ID）、`len`（数据长度）、`*buf`（发送数据缓存区指针）、`*transID`（信息队列编号）、`options`（设置判定数据成功发送的标准）和 `radius`（天线选择，默认和 PC 为 `AF_DEFAULT_RADIUS`），返回值为 `afStatus_t` 状态信息，表示数据发送成功或返回异常类型。系统中的无线传输，主要发生在协调器发送指令，以及传感器节点上传传感器数据时。

协调器采用广播模式将休眠命令发送给所有节点，目标设备的网络短地址 `dstAddr` 为 `0xFFFF`，`option` 设置为 `AF_ACK_REQUEST`，即当目标设备发送回数据确认命令（`data_confirm command`）时 `afStatus_t` 状态正常，表示传输数据有效，否则再次发送。

传感器节点和功能路由节点发送采样结果至协调器，采用点播形式，目标短地址 `dstAddr` 为 `0x0000`，即默认的协调器地址，`option` 设为 `AF_ACK_REQUEST`，若返回状态 `afStatus_t` 异常，则重新发送。

3.4.2 串口通讯

串口通讯是协调器所独有的功能，是 ZigBee 网络和 PC 通讯的唯一接口。Z-Stack 协议栈提供了一些标准化的串口函数，通过统一的串口设置和通信协议，就可以实现串口基本的收发操作。

串口初始化配置，设置波特率为 115200，其余采用默认设置，在 Z-Stack 中，对于串口接收数据的处理通过串口回调函数 `rxCB()` 实现，接收缓冲区的数据会触发 `rxCB()`，在 `rxCB()` 中解析数据并进入串口事件，执行指定的动作。

串口数据发送，调用 `HalUARTWrite(port, *buf, len)` 函数，向指定端口 `port` 发送长度为 `len` 的 `buf` 数据。串口数据接收，通过串口回调函数自动完成，回调函数中包含了 `HalUARTRead(port, *buf, len)` 函数，读取指定 `port` 端口缓冲区内长度为 `len` 的数据，根据自定义的通信流程和命令功能码，解析串口数据，转到命令解析事件中集中处理。

串口通讯需要注意发送和接收数据的长度和间隔。数据长度过长时，需要重新设定缓冲区大小以保证数据不会溢出或被覆盖，连续的接收或发生数据时，需要保持数据包之间一定的收发间隔，否则容易出现乱码。

3.4.3 电源管理

电源管理功能用于电池供电的传感器节点，在周期采集数据的间隙，通过低功耗休眠和关闭传感器供电等操作，降低系统的能耗，主要方法是：硬件上通过关闭系统外接模块的供电实现，比如传感器的供电；软件上通过系统空闲时间内的低功耗休眠实现。同时，监视电池电量状态，防止电池放电过度损害，提醒管理者及时更换电池。

Z-Stack 协议栈提供了 2 种休眠模式，定时休眠 (TIMER sleep) 和深度休眠 (DEEP sleep)。当设备的主动动作基于一种定时机制执行时，采用定时休眠模式，比如一个定时采样的设备，它会周期性的被定时器唤醒，休眠功耗在 mA 级，包括 PM1 和 PM2 两种模式；当系统的主动或被动操作基于外界刺激机制执行时，采用深度休眠模式，比如一个按钮唤醒的设备，其休眠功耗在 μA 级，包括 PM3 休眠模式。针对 CC2530 而言，这三种休眠模式功耗和配置如表 15 所示。

本文中，传感器节点采用定时休眠 PM2 模式，在保持较低休眠功耗的同时，周期执行采样上传任务。传感器节点需要经过以下 4 步设置才能进入 PM2 低功耗休眠模式：

- 1) 在项目工程选项中使能 `POWER_SAVE` 编译选项，开启低功耗模式；
- 2) 设置预编译指令 `RFD_RCVC_ALWAYS_ON` 为 `FALSE`，表示设备在空闲时接收天线关闭；

- 3) 设置所有 Z-Stack 事件允许进入低功耗;
- 4) Z-Stack 事件和 MAC 层没有执行的动作, 系统处于空闲 (idle) 状态;

表 15 PM1、PM2 和 PM3 休眠模式的配置和功耗

Table 15 The power consumption and configuration of PM1, PM2 and PM3 sleep mode

休眠模式	PM1	PM2	PM3
配置	32MHz XOSC OFF 32kHz XOSC ON 稳压器数字部分开启	32MHz XOSC OFF 32kHz XOSC ON 稳压器数字内核关闭	32MHz XOSC OFF 32kHz XOSC OFF 压器数字内核关闭
唤醒方式	复位、外部中断、睡眠定时器过期	复位、外部中断稳、睡眠定时器过期	复位、外部中断
功耗	最低 0.2mA	最低 1 μ A	最低 0.4 μ A

自定义通信流程要求采集数据具有良好的同步性, 需要传感器节点在休眠间隙能够及时对协调器命令做出回应, 而这一点是典型 PM2 休眠无法做到的。所以额外设定预编译指令 POLL_RATE 为 5, 定义节点自动向父节点请求协调器命令的周期为 5 s, 传感器节点会在以 5s 为周期主动向父节点请求缓存在那里的命令信息, 及时捕捉到协调器命令并回应, 缩短响应延时。虽然该设置会消耗额外电池电量, 但由于请求命令封包很小且系统唤醒时间很短, 占用资源少, 所以电量消耗在可以承受的范围之内。

对于电池电量的监视, 通过内部 ADC 函数 HalAdcRead()直接采样 1/3 电池电压, 设置 1.15V 片内电压为 ADC 参考电压, 保证 A/D 转换有一个稳定的参考, 当测得电压小于 3.3V 时, 置上行数据状态位 bit7 为 1, 发出预警, 告知电量不足。

3.5 传感器数据采集

本文中, 传感器节点的标准配备是一个 SHT15 空气温湿度传感器, 一个 SMS-II-50 土壤温湿度传感器和一个 BH1750FVI 光照强度传感器。

3.5.1 传感器驱动设计

SHT15 空气温湿度传感器具备类似于 I²C 的标准数字接口, 并在信号的读写以及功耗方面进行了优化, 但与 I²C 不兼容, 一路串行时钟输入(SCK)来同步微处理器与传感器之间的通讯时钟, 一路串行数据(DATA)三态门用来读写配置命令和数据, 基本通讯流程分 2 步:

第一步, 发送命令。包括一段“启动传输”命令, 表示通讯的初始化、3 个地

址位（目前只有 000）和 5 个命令位，“启动传输”时序如图 3-7 所示，数据手册设定温度采集命令位 00011，湿度测量的命令位 00101。

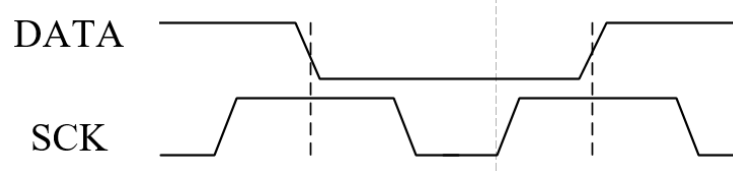


图 17 SHT15 启动传输时序图
Figure 17 The start-transmission timing diagram of SHT15

第二步，测量时序。发送命令并等待 20~320ms 后，SHT15 拉低 DATA 位提示对应参数测量任务完成，时间因测量精度升高而延长；CC2530 检测到这一“数据备妥”信号后开始读取数据，数据包括 2 字节的测量数据和 1 字节的 CRC 校验位，CC2530 拉低 DATA 位提示每一个字节传输成功，之后 SHT15 才可以发送下一个字节的数据，发送完毕后，CC2530 微处理器拉高并保持 DATA 显示 ack 为高电平来中止通信，随后 SHT15 进入休眠模式。

采集完成之后，根据测量环境配置和修正系数校准数据，将数据换算为物理量。温度传感器由能隙材料 PTAT 研发，具有极好的线性，可用式(3.1)直接通过线性修正得到准确的物理量，

$$T_{real} = d_1 + d_2 \cdot SO_T \quad (3.1)$$

式中， T_{real} 表示修正的准确温度， SO_T 表示温度测量值， d_1, d_2 表示转换系数。

相对湿度使用式(3.2)修正输出数值，以补偿湿度传感器的非线性，获取准确相对湿度 RH_{linear} ，

$$RH_{linear} = c_1 + c_2 \cdot SO_{RH} + c_3 \cdot SO_{RH}^2 \quad (3.2)$$

式中， SO_{RH} 是相对湿度测量值， RH_{linear} 是相对湿度转换值， c_1, c_2, c_3 是相对湿度转换系数。

当实际测量温度与 25℃ 相差较大时，相对湿度会受到温度较大的影响，需要通过式(3.3)和当前实际温度对湿度传感器的数据进行补偿，

$$RH_{true} = (T_{oC} - 25) \cdot (t_1 + t_2 \cdot SO_{RH}) + RH_{linear} \quad (3.3)$$

式中， RH_{true} 是空气湿度修正值， T_{oC} 是当前实测温度，单位℃

以上温湿度测量值的转换与修正系数如表 16。

表 16 SHT15 空气温度和相对湿度测量值修正与补偿系数

Table 16 The correction and compensation coefficient for SHT15 temperature and relative humidity measurement

系数	条件	数值	单位
温度转换系数			
d ₁	VDD	5V	-40
		4V	-39.75
		3.5V	39.66
		3V	39.60
		2.5V	39.55
d ₂	分辨率	14bit	0.01
		12bit	0.04
湿度转换系数			
c ₁		-4	
c ₂	分辨率	12bit	0.0405
		8bit	-2.8*10 ⁻⁶
c ₃	分辨率	12bit	0.648
		8bit	-7.2*10 ⁻⁴
相对湿度的温度补偿系数			
t ₁		0.01	
t ₂	分辨率	12bit	5*10 ⁻⁵
		8bit	1.28*10 ⁻³

土壤温湿度传感器直接输出 0~2V 模拟量, 分别对应着 0~100%RH 体积含水量和 -40~80℃ 温度的量程, 使用 HalAdcRead() 函数读取端口模拟量, 分辨率 10bit, 使用外部 3.3V 参考电压, 连续测量三次取平均值得 TO_{temp} 和 TO_{humi} , 使用式(3.4) 转换为物理量,

$$\begin{aligned} T_{soil} &= TO_{temp} * Ref * 60 / 512 - 40, \\ H_{soil} &= TO_{humi} * Ref * 50 / 512 \end{aligned} \quad (3.4)$$

式中, T_{soil} 和 H_{soil} 分布代表实际土壤温度和湿度, TO_{temp} 和 TO_{humi} 分别为土壤温度和体积含水量的测得平均值, Ref 为参考电压, 直接测得电池电压输入。

光照强度传感器接口采用标准 I²C 接口, 采样三次取平均的 GO_{light} , 直接输出光照强度数值, 无需修正和补偿, 实际测量中需要考虑遮光罩影响, 本系统中采用透光率 ω 为 20% 的遮光罩, 则当前环境实际光照强度为 GO_{light} / ω 。

3.5.2 测量和供电时序优化

在响应时间和功耗上, 本论文所选用的三种传感器有较大的差别, 空气温湿度传感器 SHT15 的响应时间最长, 在 5s 以上, 但工作和休眠电流均较低, 光照强度传感器 BH1750FVI 和土壤温湿度传感器 SMS-II-50 的响应时间较短, 典型值分别为 1s 以内和 120ms, 且后者的工作电流较大。在测量时, 按照一定的供电和测量顺序, 只开启当前测量传感器的供电, 进一步的降低测量期间的传感器功耗。

将响应时间较短的土壤温湿度和光照强度传感器作为一组, 由第一块 TPS2034 芯片供电, 供电口定义为 OUT1 和 OUT2, 控制端口定义为 EN1; 响应时间最长的空气温湿度传感器作为一组, 由第二块 TPS2034 芯片供电, 供电口定义为 OUT3, 控制端口定义为 EN2。测量过程中, 首先通过 CC2530 的 P1_0 口控制 EN1 使能 OUT1 和 OUT2 供电 1.5s, 完成测量后, 随即关闭 EN1, 然后通过 P1_1 口控制 EN2 使能 OUT3 供电 7s, 完成测量后随即关闭所有供电端口, 完成传感器测量任务, 各传感器测量和供电时序如图 18 所示。

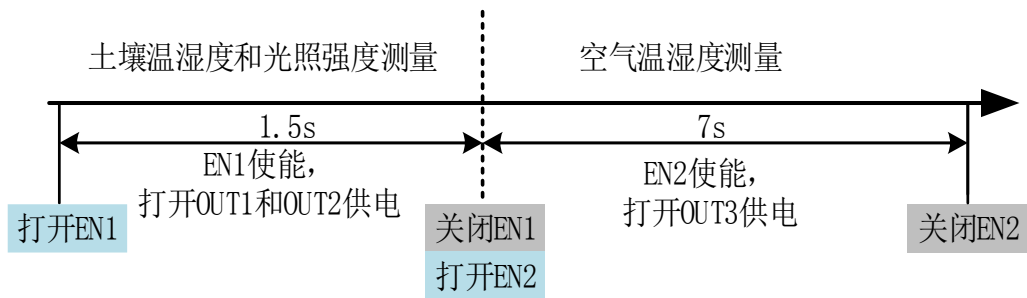


图 18 传感器数据采集与供电时序

Figure 18 The timing diagram of sensor measurement and power supply

3.5.3 智能数据采集机制

在监测系统中, 传感器数据采集的周期需要根据当前环境变化而设定, 在环境变化剧烈或接近阈值时采用较小的采样周期, 准确获取环境变化的关键动态数据, 在环境变化缓慢或远离阈值时采用较大的采样周期, 以降低功耗和减少数据冗余。

本系统中, 根据一天之中时间的变化和一年中季节的变化, 动态的调节传感器的数据采样周期。夏季中午温度变化剧烈且靠近高温阈值, 冬季夜晚温度下降迅速接近低温阈值, 需要采用较小的采样周期捕捉快速的变化, 便于掌握温室内动态信息并及时调控, 可设定采样周期在 5min 以内。夏季夜晚和冬季晴朗白天的温度变化平缓且远离阈值, 采用 15~30min 采样周期, 进行常规的数据记录即

可。在台风和暴雨等极端气候情况下，适当提高采样频率，以应对突发的变化，便于及时采取保护措施。一般在保证不损失关键数据信息并满足低功耗要求的情况下，设置采样周期为 5~10min 即可满足监测要求。

3.6 本章小结

本章首先分析了温室内环境监测的特殊要求，并介绍了 WSNs 发展和 ZigBee 技术的优势，设计了以 ZigBee 技术、传感器技术和单片机技术为核心的监测系统框架。然后，针对系统对于数据同步性的要求，基于 Z-Stack 协议栈，自定义通信协议和数据帧格式，进一步明确各类 ZigBee 节点的具体功能，并详细介绍了节点的软件设计内容和传感器数据采集功能，同时对于采用电池供电的传感器节点，重点介绍对其低功耗性能的优化。

第四章 低功耗 ZigBee 网络硬件设计

ZigBee 网络的硬件设计采用模块化设计的思想, 各功能模块独立设计, 通过标准化的接口连接到底板, 组成完整的功能节点, 可以方便的维护、替换和升级, 并大幅减小主板的尺寸, 便于节点的分布式布置。

硬件设计的主要工作集中在采用电池供电的传感器节点上, 在满足功能性要求的同时, 实现节点的低功耗和小型化。主要包括 CC2530 核心板及其接口、底板、传感器模块和节点外形结构的设计, 如图 19 所示。

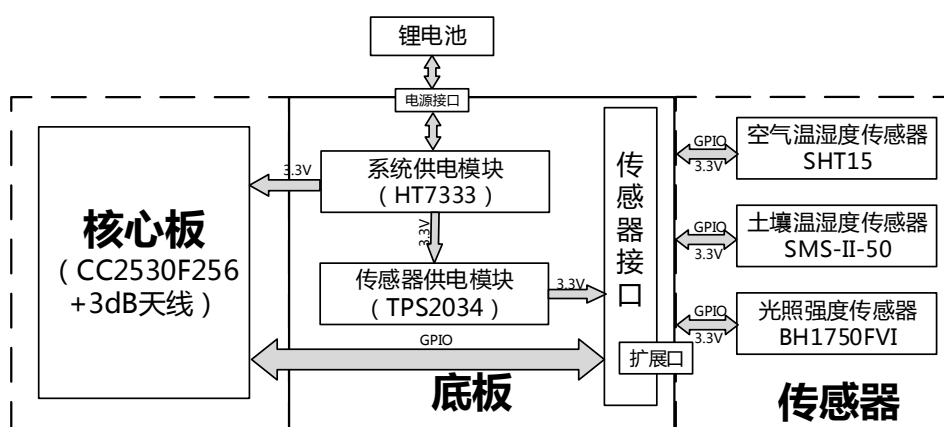


图 19 传感器节点硬件结构框图

Figure 19 The structure of sensor node hardware

网络中路由器节点的硬件与传感器节点相同, 但使用外部电源供电, 且补充路由器节点不具备传感器模块; 协调器节点布置在中央控制室内, 与 PC 通过串口通信, 直接使用 TI 提供的带 mini USB 接口和调试接口的底板, 并使用外接电源供电, 该底板也用于节点的程序下载和调试。

此外, 使用一款室外微型气象站对温室外的气候进行监测, 实现综合监测室内外多点多参数环境信息的目的。

4.1 CC2530 芯片及核心板设计

CC2530 是 TI 公司用于 2.4GHz IEEE 802.15.4 和 ZigBee 应用的片上系统解决方案, 集成了业界标准的增强型 8051CPU, 具有系统内可编程闪存和 8-KB RAM, 提供最大 256KB 的 flash; 结合了 TI 在业内领先性能优良的 RF 收发器, 内置 4 个不同功能的定时器, 适用于控制、测量、802.15.4 CSMA/CA 算法、休眠等不同应用, 满足低功耗系统的设计要求; 高度集成的片上系统提供了丰富外设, 只需少量的外部器件即可开发丰富的应用^[27]。

CC2530 结合了 TI 业界领先的 Z-Stack 协议栈, 综合软硬件优势提供了一个完整的 ZigBee 综合解决方案。本系统使用 CC2530F256 单片机, 具有 256KB flash, 其内部基本构造如图 20 所示。

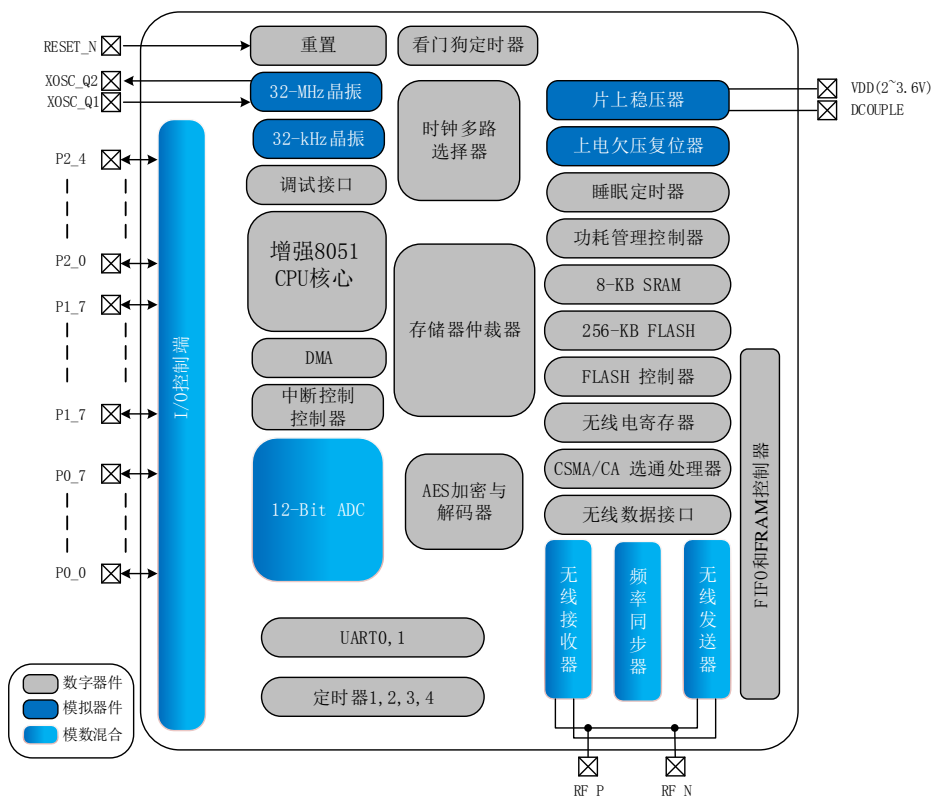


图 20 CC2530F256 结构方框图

Figure 20 The structure diagram of CC2530F256

CC2530 核心板是组成 ZigBee 网络基本功能的最小节点, 板上器件主要包括 CC2530 单片机、天线接口、晶振、I/O 扩展接口等, 只需要提供 2~3.6V 的外部供电并插入天线即可正常工作, 由 TI 官方给出了参考电路设计, 其原理图如图 21 所示。

外接天线直插在核心板上, 核心板通过 2 对 2x7 双排 2.54mm 间距的接口直插在底板上, 核心板可以方便的从底板拆卸下来, 进行软件调试和修改, 易于后期设备的维护、更换和升级。

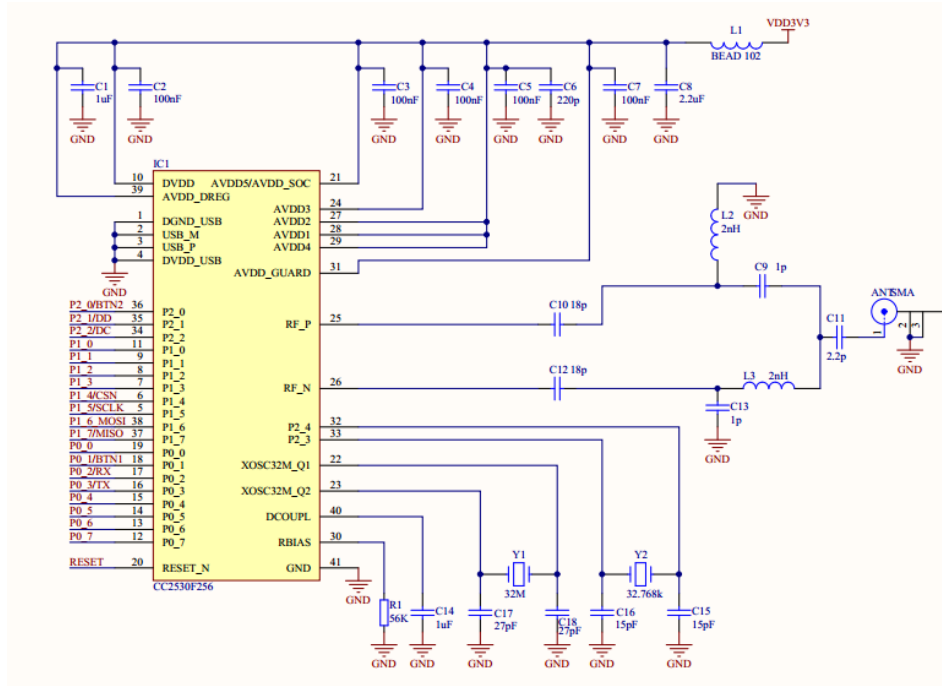


图 21 CC2530 核心板原理图

Figure 21 The schematic diagram of CC2530 core board

4.2 传感器节点底板设计

底板为各模块提供连接的接口，是传感器节点的基础。底板主要包括电源模块、传感器供电管理模块和接口模块三部分。

4.2.1 电源模块

电源是系统的能源基础，对电源模块的设计有如下 3 点基本要求：（1）具有良好的输入输出特性，即有较宽的电压输入范围、低掉电电压、足够的负载能力和稳定的输出性能等；（2）具有良好的保护功能，包括对反接短接的保护、输出过压过载的保护和过热保护等；（3）具有良好的电气绝缘性、电磁兼容性、宽工作温度范围和低温系数，满足复杂情况下的应用需求。同时如表 17 所示，根据节点中各模块和传感器的供电要求，设定系统的基础供电电压为 3.3V。

表 17 传感器节点各模块供电基本要求

Table 17 The basic power supply requirements of the modules in sensor nodes

模块	核心板	SHT15	SMS-II-50	BH1750FVI
供电范围 (V)	2~3.6	2.4~5.5	3.0~3.6	2.4~3.6

对于采用电池供电的传感器节点，除了以上的基本要求外，还要求电源模块具有较低的静态电流，以满足设备在系统休眠过程中的低功耗要求。

针对以上需求，采用 HT7333 超低功耗 LDO 线性稳压器作为电源模块的核心芯片。HT7333 在满足上述基本要求的基础上，还具有低至 $4\mu\text{A}$ 的静态电流、最高 12V 的输入电压、90mV 掉电电压和极低的温度系数，具体性能如表 18，测试条件：输入电压 4.3V，温度 25°C 。

表 18 HT7333 性能参数表

Table 18 The performance parameters of HT7333

参数	测试条件	Min.	Typ.	Max.	单位
输出电压	$I_{\text{OUT}}=40\text{mA}$	3.201	3.3	3.399	V
最大输出电流	$V_{\text{OUT}}\geq 2.97\text{V}$	250	—	—	mA
负载调节率	$1\text{mA}\leq I_{\text{OUT}}\leq 80\text{mA}$	—	45	90	mV
掉电电压	$I_{\text{OUT}}=40\text{mA}$	—	90	—	mV
静态电流	空载	—	4	8	μA
输入电压调节率	$I_{\text{OUT}}=40\text{mA}$ $4.3\text{V}\leq V_{\text{IN}}\leq 12\text{V}$	—	0.2	0.3	%/V
输出误差			± 3		%
温度系数	$I_{\text{OUT}}=40\text{mA}$ $-40^\circ\text{C}\leq T_{\text{a}}\leq 85^\circ\text{C}$	—	± 0.7	—	ppm/ $^\circ\text{C}$
工作温度 T_{a}		-40	—	85	$^\circ\text{C}$

HT7333 自身集成了保护和信号调理电路，外围只需接入滤波电容即可组成工作电路，电源模块原理图如图 4-5 所示。同时考虑对较大电池容量和较低电压转换损耗的要求，采用 3.7V 输出和 2200mAh 容量的锂电池供电，该电池本身也具备了一定的短路反接保护和防腐蚀功能。

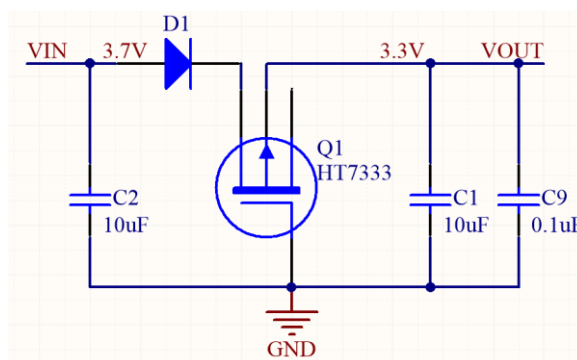


图 22 电源模块原理图

Figure 22 The schematic diagram of power module

4.2.2 传感器供电管理模块

节点配置了空气温湿度传感器 SHT15、土壤温湿度传感器 SMS-II-50 和光照强度传感器 BH1750FVI，统一供应 3.3V 电源，MCU 休眠时需要断开电源以降低传感器的额外功耗。选用 TI 公司的 TPS2034 单路限流配电开关芯片，通过 CC2530 的 2 路 GPIO 软件控制三路传感器供电，配合传感器测量和供电时序，按照顺序打开供电和执行采样任务。

TPS2034 的性能参数信息如表 19 所示。

表 19 TPS2034 性能参数表

Table 19 The performance parameters of TPS2034

参数	测试条件	Min.	Typ.	Max.	单位
输入电压 V_I		0		5.5	V
连续输出电流 I_O		0		2	A
工作虚拟结温度 T_J		-40		125	°C
静态漏源开态电阻 $R_{DS(on)}$	$V_I=3.3V$, $I_O=1A$, $T_J=25^\circ C$		33	37	mΩ
短路电流 I_{OS}	$V_I=5V$, 输出接地, $T_J=25^\circ C$	1.1	1.5	1.9	A
过载电流 I_{OC}	$V_I=5V$	1.6	2.4	3.0	A
低水平输出供应电流	空载, 使能关断, $T_J=25^\circ C$		0.3	1	μA
高水平输出供应电流	空载, 使能打开, $T_J=25^\circ C$		58	75	μA
关断电流	$V_I=3.3V$, 使能闭合, 负载	1			μA
漏电流	输入端接地, 使能关断	10			μA

TPS2034 有 1 路使能控制端和 2 路电源输出端，使用 2 块芯片为，芯片 1 由 1 路 GPIO 控制为土壤温湿度和光照传感器供电，芯片 2 由另一路 GPIO 控制为空气温湿度传感器供电。芯片自身高度集成，且具有一定的保护功能，只需要外接滤波电容和保护电阻即可，其原理图如图 23 所示。

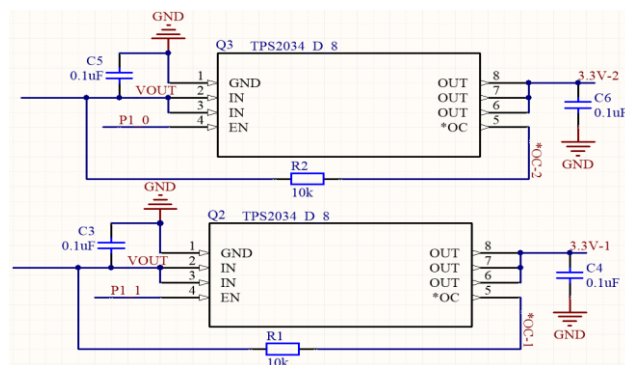


图 23 传感器供电管理模块原理图

Figure 23 The schematic diagram of the sensor power-supply management module

4.2.3 传感器和核心板接口

核心板接口是 2 个 2×6 接线柱，间隔为 2.54mm，用于传感器供电管理的 GPIO 控制端接地处理，以保证在系统休眠时，该端口能维持有效的低电平，核心板接口原理图如图 24 所示。

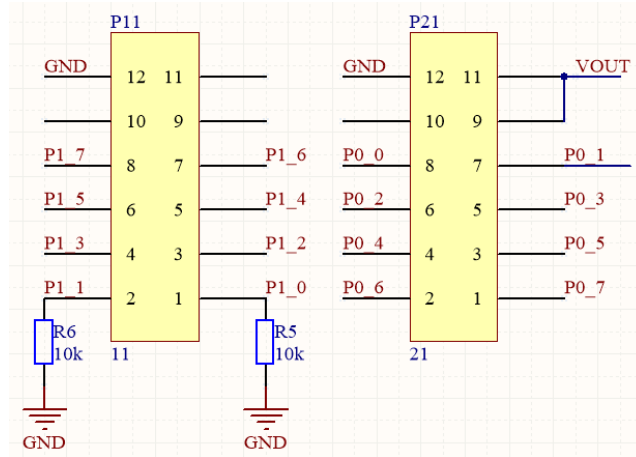


图 24 核心板接口电路原理图

Figure 24 The schematic diagram of core board interface circuit

传感器模块包括空气温湿度、光照强度和土壤温湿度三个部分。在布置时，空气温湿度和光照传感器作为一组，通过 8 芯电缆布置在防辐射照内，土壤温湿度传感器作为第二组，通过 2m 长的 4 芯电缆外接布置在指定的测量位置。传感器接口的设计以具体布置的分组为主，所以第一组 S1 有 8 个接口，并为空气温湿度和光照强度传感器的 DATA 线提供上拉电阻，第二组 S2 有 4 个接口，无需其他器件，其原理图如图 25 所示。

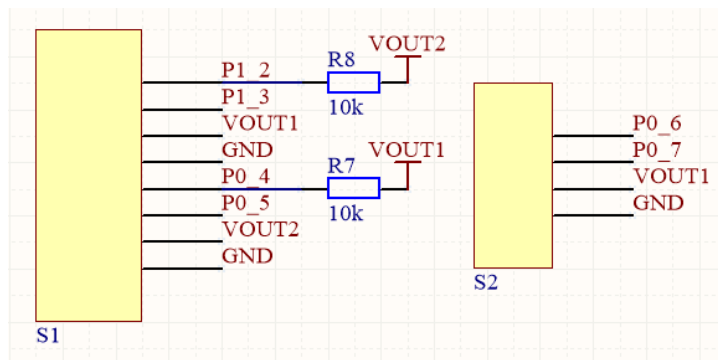


图 25 传感器接口电路图

Figure 25 The schematic diagram of sensor interface circuit

土壤温湿度传感器输出电压模拟量，所以该传感器采用带屏蔽层的 4 芯电缆连接，屏蔽层直接接地 GND，电缆长度不应超过 5m，其余传感器采用直接数字输出，无需屏蔽层。

4.3 节点外形封装和测点布置

温室内环境一般空气湿度较高，对于布置在其中的传感器模块和 ZigBee 节点，要求其外形封装具有防水、防尘、防腐蚀和防暴晒等基本功能，以适应温室的恶劣环境。节点主要由 3 部分组成，首先是作为节点主体的防水箱体及其支架，防水箱体内部装有底板、核心板和电池，其次是装有空气温湿度和光照传感器的防辐射罩，最后是土壤温湿度传感器，传感器电缆通过防水航空插头从箱体引出。

底板、核心板和电池是节点的中枢，其电子器件不能直接裸露在空气中，对于封装的防水和防腐蚀的要求比较高，且需要有一定的防辐射功能，以防太阳直射对电子板和芯片造成损害。采用易加工的铸铝防水盒，盒盖与盒体通过螺丝固定，缝隙通过橡胶线密封，外接传感器电缆采用防水航空插头连接，使用热熔胶防水密封天线孔和螺丝孔，盒盖开孔供防辐射罩安装和 8 芯电缆过孔，箱体通过螺栓固定在可伸长的三脚支架上。

为防止太阳直射对温度测量造成影响，空气温湿度和光照强度传感器对于防辐射的封装要求较高，同时测量环境需要较好的透气性，以便快速准确的测量空气湿度。光照强度传感器的覆盖材料需要有一定的透光率，以保证有效采集环境光强和避免太阳暴晒。因此，采用 7 层防辐射罩，顶部开孔并覆盖透光率为 20% 的透光罩，空气温湿度传感器布置在防辐射罩中间部位，光照强度传感器通过螺丝固定在透光罩下方。箱体和防辐射罩置于节点最高处，封装外形如图 26 所示。

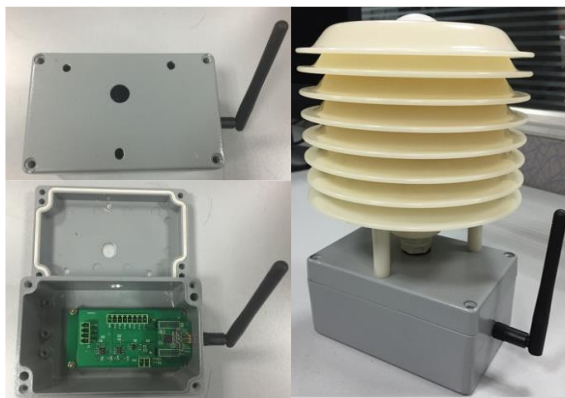


图 26 防水箱体与防辐射罩封装效果图

Figure 26 The package of the waterproof box and radiation protection cover

土壤温湿度传感器通过 4 芯屏蔽电缆从箱体引出，布置在被测区域 10cm 左右深度的土壤中，探针垂直插入底层土中并掩埋压实，对土壤传感器本体的防水防腐性、电缆与箱体连接处的防水性要求较高，所以传感器测量部分采用环氧树脂密封，连接处采用防水航空插头，保证整体的防护要求^[28]。

节点的整体结构和传感器测点布置如图 27 所示。

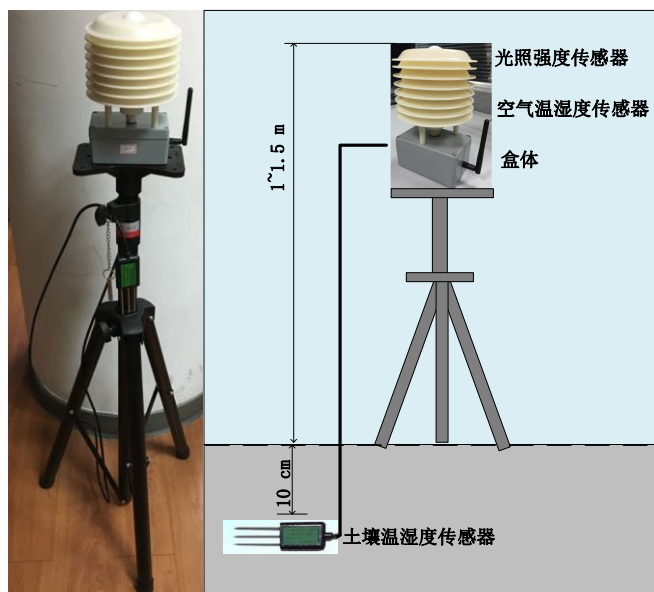


图 27 节点封装结构设计和传感器测点布置示意图

Figure 27 The diagram of the node package design and the sensors measurement point layout

4.4 室外微型气象站

系统需要对温室外部的环境进行监测，以掌握温室所处的整体气候环境，并为控制策略提供外界环境参数的输入。对于室外环境的测量，主要集中在空气温湿度、风向风速、雨量 5 种参数，在不同的季节可以补充其他参数的测量，比如光照强度、大气压力参数等。

本系统中，采用集成的 MULTI-6P 六要素微型气象站，测量风向、风速、空气温度、空气湿度、大气压力和降雨量六种参数。其外形结构如图 28，由上至下依次是压电式雨量计、超声波风速风向计、二极管结电压温度计、电容式湿度计和压阻式气压计，微型气象站采用一体式设计，具有重量轻、结构紧凑、坚固耐用、耐腐蚀和易于安装拆卸的优点，可全天候工作，不受暴雨、冰雪等极端天气影响，不需要现场的校准和维护。气象站采用 12~30V DC 供电和 485 总线输出，防护等级达 IP68，方便布置与较远的测量位置，适用于各种环境下全天候和长期稳定的气象环境监测。

风速风向计采用超声波时差法设计，超声波在空气中的传播会受到气流的影响，当二者方向重合时，超声波速度加快，反之减弱，通过声速大小和方向的变化，可以得到精确的风向和风速，具有灵敏度高、启动风速低和风向测量无盲区的优点，风向风速测量性能参数如表 20。



图 28 MULTI-6P 六要素微型气象站

Figure 28 MULTI-6P 6-elements miniature weather station

表 20 MULTI-6P 风向风速性能参数

Table 20 The performance parameters of the MULTI-6P wind direction and speed measurement

	风速	风向
测量原理	超声波时差法	超声波时差法
测量范围	0~60m/s	0~359.9°
准确性	±3%	±3°（风速 10m/s）
分辨率	0.1m/s	0.1°

温度测量采用二极管结电压法，利用二极管的伏安特性精确测量环境温度，精度高、线性和长期稳定性好。采用电容式湿度测量传感器测量空气湿度，采用高精度硅压式压力传感器测量大气压。压电式雨量计，通过计算周期时间内滴落的雨滴数量，以及每次雨滴产生冲击力的大小估算出雨滴质量，以 10 秒作为一个计数增量，直接输出 1 分钟和 1 小时的降雨量，并计算一天内的降雨总量，测量精确灵敏、响应快，具体性能参数如表 21。

表 21 MULTI-6P 温度、湿度、气压、雨量测量参数表

Table 21 The performance parameters of MULTI-6P in temperature, humidity, air pressure and rainfall measurement

参数	温度	湿度	气压	雨量
测量原理	二极管结电压法	电容式	压阻式	压电式
测量范围	-40~80℃	0~100%RH	10~1100hPa	0~200 mm/h
测量精度	±0.2℃	±3%RH	±0.5hPa（25℃）	
分辨率	0.1℃	0.05%	0.1hPa	0.1mm（降雨量） 0.1mm/h（降雨强度）
时间漂移	<0.04℃/yr	<0.5%RH/yr		

4.5 本章小结

本章首先介绍了系统硬件模块化设计的要求，然后介绍了 CC2530 芯片及其核心板和底板的设计，包括电源模块、传感器供电管理模块和接口模块三部分，最后，介绍了传感器和节点的外形封装设计和布置要求，同时选用了一款室外六要素微型气象站，满足对温室内外环境综合监测的要求。

第五章 系统测试及基于 CFD 模型的测点优化

系统测试是检验设计和优化成果的主要途径。首先,对节点和各模块的功耗、传感器性能、以及无线网络传输质量进行测试;然后,在温室现场搭建小型 ZigBee 网络,测试网络整体运行的稳定性和传感器数据测量的准确性;最后,针对 5 连栋塑料温室,建立 CFD 仿真模型分析温室内温度场分布,优化监测网络温度测点的布置策略。

5.1 节点和模块测试

节点和模块测试首先针对传感器模块,重点测试空气温湿度和土壤水分含量测量的相对误差和重复性;其次,测试各模块和节点整体的工作与休眠电流;最后,在不同典型环境下,测试节点信号强度和丢包率。

5.1.1 传感器测试和标定

在温室内,环境参数的变化比较缓慢,因此本系统中主要评估传感器的静态特性指标,主要对 SHT15 温度和湿度测量的相对误差和重复性,以及 SMS-II-50 湿度测量的相对误差进行校验和标定,计算方法由国标 GB/T 18459-2001 所确定 [29]。

5.1.1.1 SHT15 相对误差与重复性

采用相对标定法对 SHT15 的空气温湿度测量进行标定,以精度和准确性更高的维萨拉 HMT13 空气温湿度变送器为参考标准,依据国标 SJ 20722-1998 标定温度传感器的方法及 GB/T 15768-1995 标定湿度传感器的方法^[30,31],温度标定范围 10~35℃,采用水浴加热方法控制温度,在升温过程中湿度自动上升,降温过程湿度下降,在升温正行程和降温反行程中,对 5 个传感器的温度和湿度测量的相对误差,以及 25℃室温状况下的温湿度测量的重复性进行标定。

(1) SHT15 温度相对误差:

首先,测量 10 到 35℃升温正行程温度变化,以 HMT130 作为标准计算相对误差,重复测量 3 次,测量结果和相对误差曲线如图 29 所示。

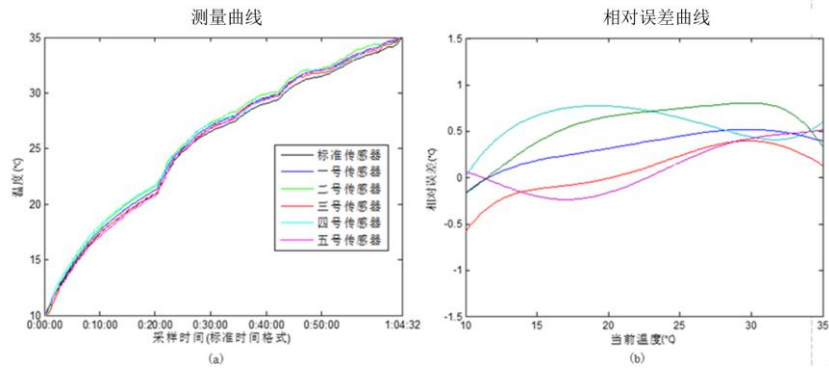


图 29 SHT15 10 到 35℃升温过程温度测量和相对误差曲线

Figure 29 The curve of SHT15 temperature measurement and relative error from 10 to 35 °C

然后，测量 35 到 10℃降温反行程温度变化，以 HMT130 作为标准计算相对误差，如图 30 所示。

误差分析：图 29(b)和图 30(b)所示最大相对误差为 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ ，升温过程较大的误差分布在低温段，降温过程较大相对误差分布在高温段，原因是 SHT15 的响应时间较 HMT130 短，水浴控温的升温过程中，低温段温度上升的速度较快，而降温过程中高温段下降速度较快，导致 HMT130 的测量滞后于 SHT15，但平均相对误差在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内，且体现出良好的线性，总体满足测量要求。

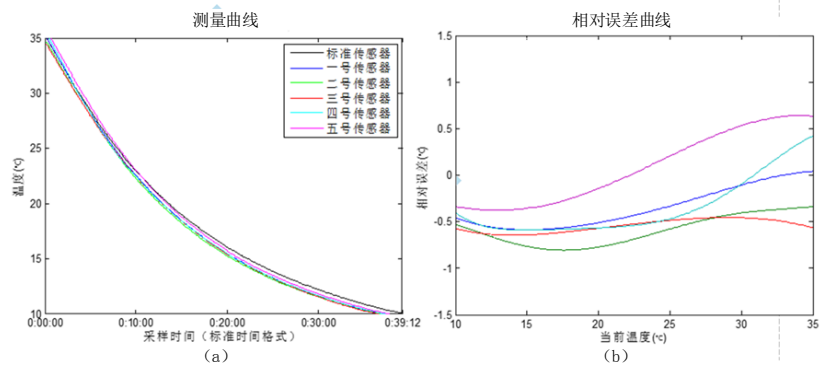


图 30 SHT15 35 到 10℃降温过程温度测量和相对误差曲线

Figure 30 The curve of SHT15 temperature measurement and relative error from 35 to 10 °C

(2) SHT15 相对湿度相对误差

相对湿度的测量与温度测量同时进行，在水浴控温的封闭环境内，相对湿度的变化趋势和温度一致，二者同升同降。温度在 10~35℃变化时，湿度在 40~85%RH 范围内变化，以 HMT130 作为参考，计算相对误差。相对湿度上升过程和下降过程测量曲线和相对误差如图 31 和图 32 所示。相对误差表现出和温度类似的滞后特征，是因为 SHT15 响应时间比 HMT130 短，HMT130 湿度测量滞后，在相对湿度上升过程的低湿度段和下降过程的高湿度段，相对湿度变化快且波动大，测得相对误差较大。

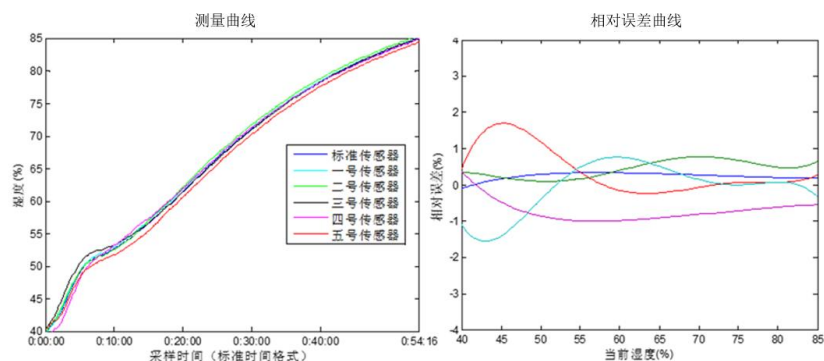


图 31 SHT15 40 到 85 %RH 相对湿度上升过程测得值和相对误差曲线

Figure 31 The curve of SHT15 relative humidity measurement and relative error from 40 to 85 %RH

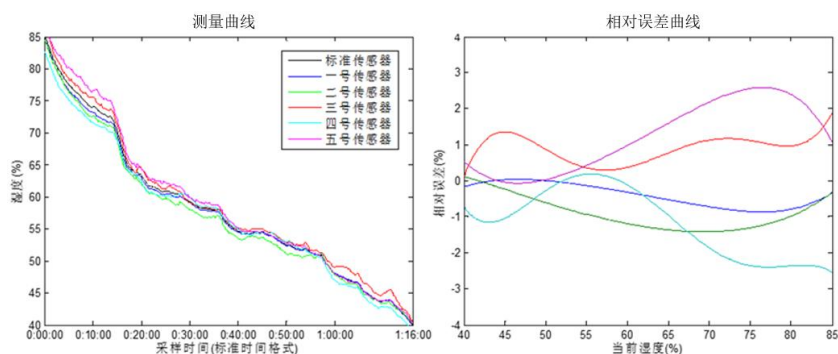


图 32 SHT15 40 到 85 %RH 相对湿度上升过程测得值和相对误差曲线

Figure 32 The curve of SHT15 relative humidity measurement and relative error from 85 to 40 %RH

(3) SHT15 温湿度重复性

在 25℃室温环境下，测试 5 个传感器的温度和相对湿度测量的重复性，如图 33 所示。

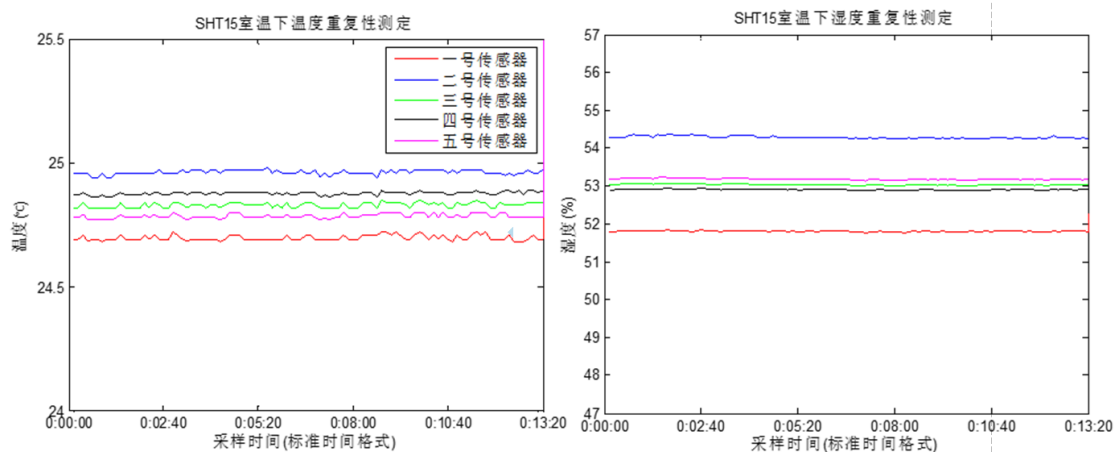


图 33 室温下 SHT15 温度和相对湿度重复性测定

Figure 33 The repeatability of SHT15 temperature and humidity measurement at the indoor temperature

测得在室温 25℃左右，1~5 号传感器的温度重复性依次为 0.012、0.008、0.009、0.007、0.012，湿度重复性依次为 0.008、0.009、0.074、0.011、0.008，

测试结果显示 25℃ 室温下，传感器温度和湿度测量重复性良好。

5.1.1.2 SMS-II-50 土壤绝对含水量

国标 LY/T 1213-1999 规定了称重法是土壤含水量测定的标准方法^[32]，由此标定 SMS-II-50 土壤绝对含水量的相对误差和重复性特性。

采用称重法，首先获取 500g 完全烘干的土壤，土壤采用机制营养土，每次加入定量纯水获得含水量梯度变化的土样，布置 5 个 SMS-II-50 传感器同时测其绝对含水量，直至完全饱和，则此时的加水量即为该土样的田间最大持水量，计算每一次的加水量和田间最大持水量比值，得到土壤相对含水量的真实值，作为计算相对误差的参考标准，测量值和相对误差如图 34 所示。

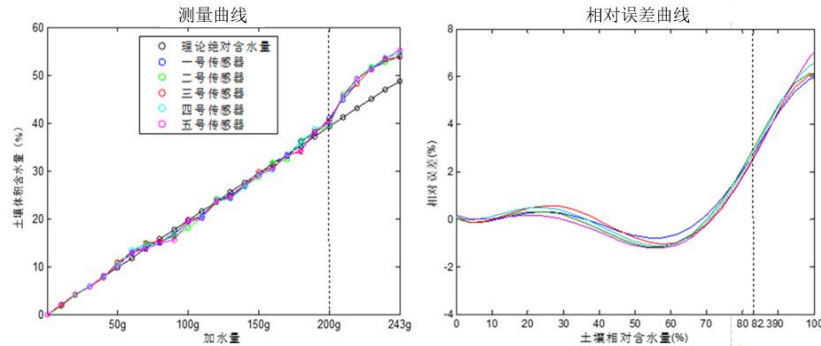


图 34 SMS-II-50 土壤含水量测得值和相对误差曲线

Figure 34 The curve of SMS-II-50 soil moisture content measurement and relative error

如图中所示，在加水至 200g 时，绝对含水量达到 40%，相对含水量达到 82.3%，相对误差明显增大，达到 3%~6%，相对含水量在 80% 以内时，相对误差在 3% 以下。满量程时，传感器 1 至 5 号的土壤绝对含水量线性度依次为 6.29%、6.69%、6.39%、6.58%、6.65%，相对含水量小于 80% 时，线性度依次为 1.06%、1.11%、1.16%、1.76%、1.16%。

实际应用中，土壤相对含水量一般小于 80%，过高的含水量会影响根系呼吸作用，导致其缺氧腐烂，因此 80% 以下的测量性能已满足实际应用要求。因此，检验和标定参数满足传感器数据表所述和温室监测的要求。

5.1.2 模块与节点功耗测试

首先，对底板和核心板模块的平均休眠电流和工作电流分别进行测试，分析各模块功耗的大小和主要来源；然后，对节点整体的休眠和工作功耗进行测试，检验是否满足设计的功耗性能要求。功耗测试结果如表 22 所示，低功耗优化后，休眠期间的平均电流仅为工作期间的 1/50 左右。

表 22 节点和模块功耗测试

Table 22 The power consumption measurement of the sensor node and module

模块	平均工作电流/mA	平均休眠电流/mA
核心板	20.42	0.0068
底板	2.61	0.0065
传感器节点 1	27.12	0.55
传感器节点 2	26.91	0.56

核心板休眠功耗主要来自于 CC2530 休眠和部分引脚漏电流, 底板休眠功耗主要来自于 HT7333 和 TPS2034 的静态电流, 整体节点的休眠功耗来自于以上二者加上各传感器的漏电流。

为测量应用中节点实际的功耗情况, 使用容量为 2200mAh 的锂电池为传感器节点供电, 充满电时的放电电压为 4.17V, 考虑到 HT7333 的输入电压范围和系统供电要求, 并防止电池放电过度损坏, 设置放电下限在 3.3V 左右, 除去电池自身老化和自然放电造成的电量损耗, 保守估计有效放电效率为 65%, 设定节点唤醒工作时间为 10s。

采样间隔设为 10 s, 即连续无休眠工作时, 根据表 22 测试平均工作功耗计算, 得到连续工作时间为 52.9 小时, 实测节点可连续工作 51.2 小时。

采样间隔设为 30s, 则一个周期内, 节点唤醒 10s, 休眠 20s, 平均工作电流 27.02mA, 平均休眠电流 556 μ A, 则通过计算, 节点可连续工作 152.5 小时, 实测连续工作时间 148.3 小时, 由(5.1)计算可得, 采用周期为 30s 时, 能源使用效率提升 65.1%。

$$P = (1 - \frac{T_u}{T_o}) \times 100\% \quad (5.1)$$

式中, P 是能源使用提升效率, T_u 是低功耗优化节点的连续工作时间, T_o 是低功耗优化后节点的连续工作时间。

实际生产应用中, 一般采用 5min 或以上的采样间隔, 以 5min 为例, 一个周期内, 节点唤醒 10s, 然后休眠 290s, 通过计算可得, 传感器节点可以连续运作 995.1 小时, 即 41 天左右, 相比没有低功耗优化的节点, 能源使用效率提高 94.7%, 达到低功耗设计和生产应用的要求。

5.1.3 无线网络传输质量检测

为研究不同的环境对于 ZigBee 网络无线传输质量的影响, 模拟温室现场植物和薄膜遮挡、以及晴朗和阴雨等天气情况, 在不同障碍物和天气情况下, 测试网络传输的信号强度和丢包率情况, 并推导节点的有效通讯距离。

通过分析各节点接收的信号强度指标 RSSI (Received Signal Strength Indication) 及其丢包率, 可以检测整个网络的传输质量和有效传输距离, 其中 RSSI 值是反映节点信号强度和距离之间对应关系的主要指标, 直接体现了无线传输的质量^[33]。测试时, 天线垂直且位于同一水平面上, 保证相互之间最大的传播距离。

(1) 障碍物测试

分别测试无障碍、墙壁障碍和草丛障碍对信号强度和丢包率的影响, 其中草丛障碍条件模拟温室内低矮植被的环境。如图 35 所示, 墙壁对 ZigBee 信号影响最大, 主要是因为 2.4GHz 信号属于短波信号, 穿透力强但无法绕开障碍物, 而草丛的影响很小, 可以忽略不计, 由此可以认为, 温室内的低矮植被环境不会对 ZigBee 网络信号传输的可靠性造成明显影响。

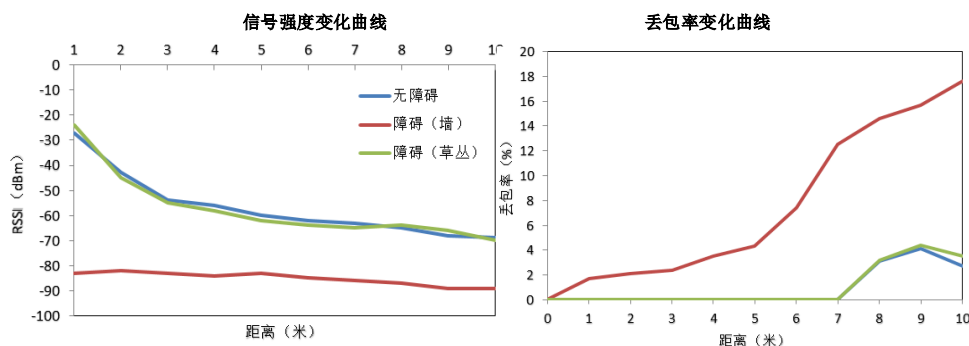


图 35 不同障碍物对信号强度和丢包率的影响

Figure 35 The influence of different obstacles on signal strength and packet loss rate

(2) 环境因素测试

分别在走廊、草丛(晴朗)和草丛(阴雨)环境下, 测试环境因素对传输质量的影响, 其中, 笔直无障碍的走廊模拟空旷无障碍的理想环境, 草丛晴朗和阴雨环境模拟温室所处的晴朗和阴雨天气环境。如图 36 所示, 信号强度在 10m 范围内急剧下降, 符合 2.4GHz 信号在自由空间指数衰减的特性, 在 10m 以上距离衰减速度明显下降, 距离达到 90m 时, 信号强度低至 -90dBm, 同时丢包率随距离增加显著上升, 但晴朗和阴雨气候环境对信号传输基本没有影响。

实测中, 节点在理想情况下的最大通信距离可达 126m, 但丢包率很大, 不满足通信的基本要求, 60m 范围内丢包率小于 5%, 且 RSSI 大于 -90dBm, 满足有效通信的要求。因此在现场的无线网络布置中, 设定节点的直线距离不大于 60m, 以保证无线通讯的稳定性。

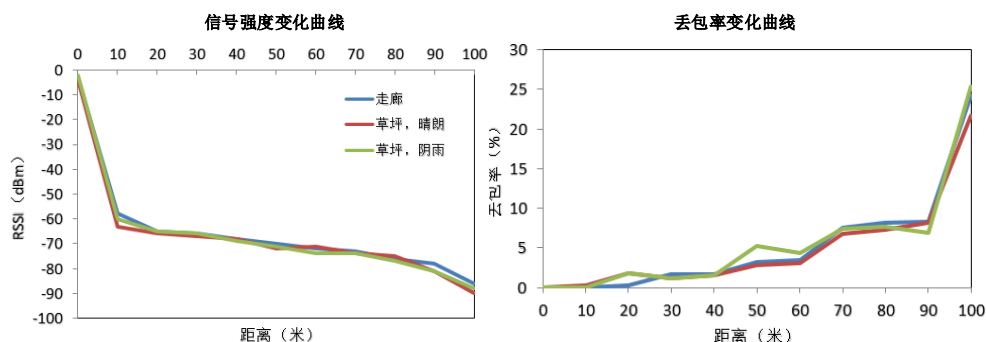


图 36 环境因素对信号强度和丢包率的影响

Figure 36 The influence of the environment factors on signal strength and packet loss rate

5.2 温室现场测试

在现场布置 ZigBee 无线传感器网络，综合测试节点在温室现场复杂环境下的实际功耗、无线传输质量、节点及传感器布置策略、数据采集准确性等性能。

在上海交通大学农业与生物院的连栋玻璃温室内进行测试，温室内已种植番茄，株高 1m 以内，已放置有一套美国 HOBO 公司的高精度温室监测设备，如图 37 所示。

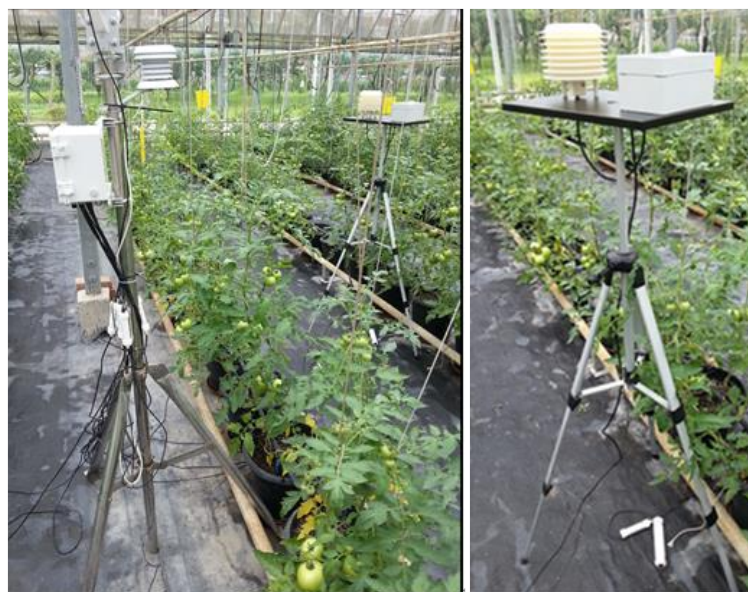


图 37 监测系统现场测试

Figure 37 The field test of monitoring system in greenhouse

以 HOBO 设备的数据作为参考标准，对传感器的测量精度、线性度、以及节点的稳定性和封装性能进行实地测试，结果显示节点工作稳定，传感器测量数据准确，误差在要求范围之内，所测得空气温度、空气湿度、光照强度、土壤水分含量与标准值对比如图 38 所示。

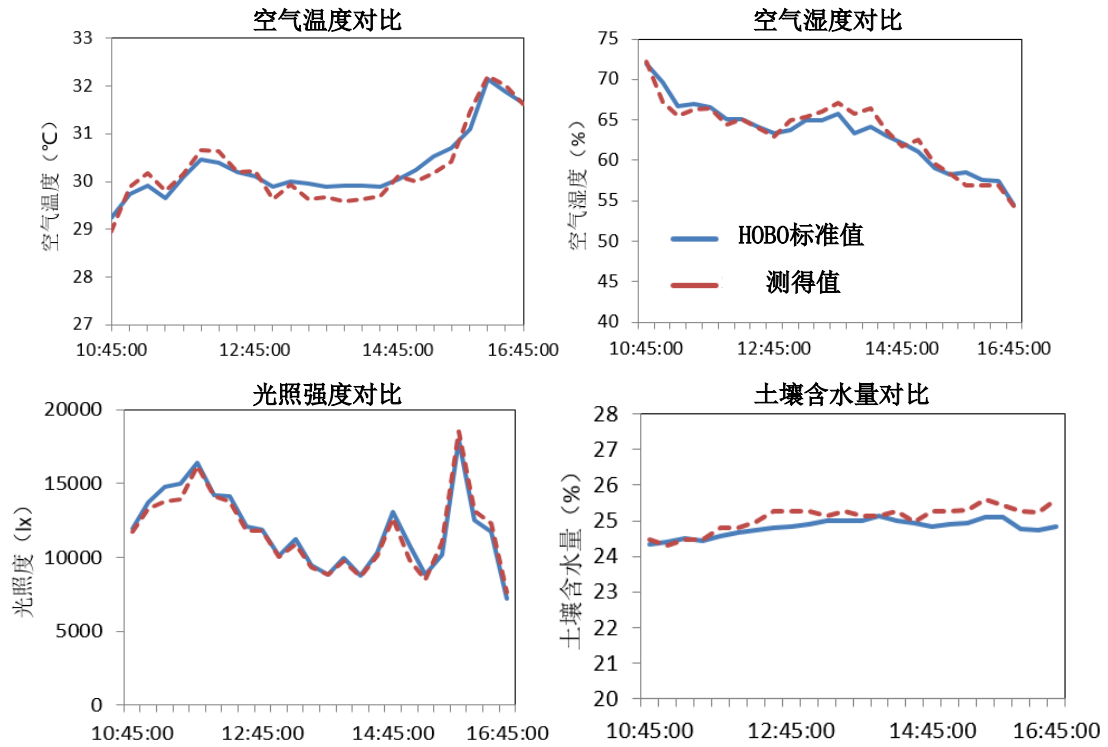


图 38 温室实测数据与标准数据对比

Figure 38 Contrast of the measured and standard data in field test

在位于崇明的 5 连栋塑料温室进行实地布置, 该连栋温室总面积 1280m², 长 40m, 宽 32m, 主要测试节点和传感器的稳定性、实际功耗和有效通信距离。在温室中央布置一个路由器节点, 两侧间隔一跨对称布置 2 个传感器节点, 协调器节点布置在温室外的控制室内, 相邻节点最大距离 30m, 构成 3 节点的小型 ZigBee 网络。连续测量 3 天左右, 结果显示系统运行和无线数据传输稳定, 传感器节点的低功耗性能达到设计要求。

5.3 基于 CFD 的温度测点布置优化

现代温室一般建造面积较大, 为有效监测整体的温度状态, 往往需要大量的测点和传感设备, 导致成本过高。因此, 为利用有限的测点准确反映温室整体的温度分布, 对温室微气候的变化规律展开理论研究和分析, 把握微气候的分布和变化规律, 并由此实现对测点布置的优化。

以华东地区广泛分布的连栋塑料温室为主要研究对象, 针对夏季典型的高温低风速气候, 建立二维 CFD (Computational Fluid Dynamics) 模型, 研究外界径向微风情况下, 顶窗打开与闭合时, 温室温度场的分布和变化。基于所设计平台采集数据, 验证仿真模型, 然后利用该模型优化温度测点的布置策略, 以少量的测点获得温室内整体的温度分布信息。

(1) 建模对象

建模对象为 5 连栋塑料温室，建造于崇明生态岛中兴镇南，如图 39 所示，面积为 40m×32m，屋脊为东西走向，顶高 5.2m，每跨宽度 8 m，肩高 3m，温室内配置有通风、湿帘、滴灌和遮阳网等环境控制设备。建模尺寸边界条件与实际温室一致，不考虑温室内作物影响。



图 39 崇明 5 连栋塑料温室

Figure 39 5-span plastic greenhouse in Chongming

(2) 建模理论

建模所采用 CFD 软件为 Fluent 14.5。温室内空气流的流动同时满足质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律^[34]，这些守恒定律都可以通过通用的守恒方程式(5.2)来描述^[35]，

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi u) = \text{div}(\Gamma \text{grad}(\phi)) + S \quad (5.2)$$

式中， ρ 为流体密度， ϕ 为通用传输量， u 为流体速度矢量， Γ 为广义扩散系数， S 为广义源项， div 和 grad 分别为散度和梯度算子。

温室中气体流可以当作湍流处理，而式(5.2)中采用直接计算湍流运动的方法，对设备内存空间和计算速度要求非常高，所以选择标准 κ - ϵ 模型^[36]对湍流模型进行简化处理。仿真不考虑温室内植被影响，假设材料的光学属性对所有波长的辐射均为漫灰辐射，即对所有波长的辐射都为常数，采用 Fluent 14.5 中的 DO 模型，该模型能处理所有厚度半透明材质的辐射问题，适用于以薄膜作为介质参与辐射传播的情况^[37]。

(3) 计算域和网格划分

为了能够准确的描述大气边界层的气候特征，计算域包含了连栋温室及其周边区域，所设计计算域尺寸为 280m×40m，分别为温室长度和高度的 7 倍和 8 倍^[36]。在网格划分上，温室内区域使用相对细的网格划分，准确捕捉室内流场变化；温室外区域使用相对粗的网格划分，降低计算量；在薄膜边界、土壤表面及通风口等流场梯度变化较大的区域，对网格进行加密处理。最终温室内部计算

域网格尺寸为 0.1m，外部为 0.3m，类型为四边形和三角形的不规则尺寸。

(4) CFD 模型与验证

CFD 模型边界条件的设置主要来自于实验测量值，实验时间为 2015 年 8 月 7 号中午，外界气温 37℃ 左右，偏南风，风速 0.7m/s 左右，该时段的气候更能体现华东地区夏季典型的高温、低风速和强辐射的气候特征。在 CFD 算例中，采用该时段的测量数据作为边界条件输入，选用 ANSYS Workbench 14.5 的 ANSYS Fluent 作为数值仿真的 CFD 解算器。

现场试验的数据采集使用本文设计的监测系统，测试期间天气晴朗，外界风向基本和温室屋脊走向保持垂直，侧窗和通风门均关闭，未种植作物。数值计算时，设置外界风速和风向与测量数据一致，分别计算顶窗打开和关闭情况下，温室内温度场变化，如图 40 所示

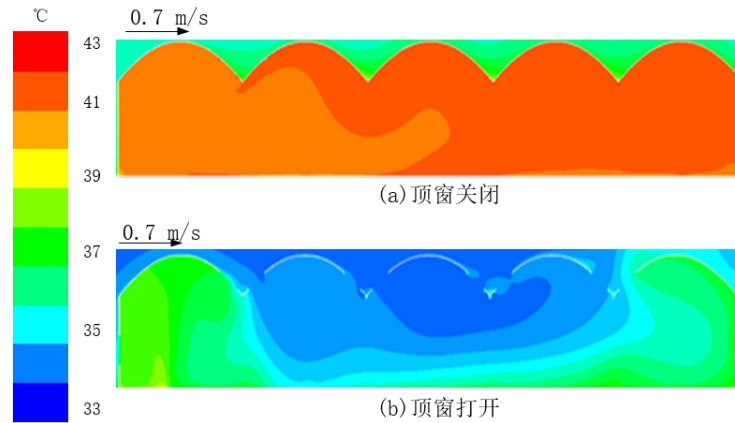


图 40 顶窗打开与关闭状态下 CFD 模型温度场分布

Figure 40 The temperature field distribution of CFD module when top window is open and closed

测试期间，在每一跨的正中央布置传感器节点，设置采样周期为 1min，空气温湿度传感器 SHT15 布置在离地 1.5m 处。

首先，打开顶窗，通过室内传感器网络和室外微型气象站，连续采集温室内多点温度和室外的气候信息，等待数据稳定后，连续测量三次取其平均值，获得顶窗打开状态下的温度数据。然后，关闭顶窗并重复上述步骤，获得顶窗关闭状态下的温度数据，所得测量数据和仿真数据对比如表 23 所示。

验证结果显示，仿真结果与测量数据吻合较好，偏差在 5% 以内，但测量数据普遍大于仿真值，且实际温度越大时，二者的偏差越大。可能的原因是：防辐射罩在强辐射下发热，导致局部温度升高。

表 23 顶窗打开和关闭状态下温室温度场测量值和仿真值对比

Table 23 The comparison of measurement and simulation data when window open and closed

测点 位置	顶窗打开			顶窗关闭		
	仿真值/°C	测量值/°C	偏差/°C	仿真值/°C	测量值/°C	偏差/°C
第一跨	38.4	39.1	0.7	40.6	41.2	0.6
第二跨	37.6	38.0	0.4	40.7	41.4	0.7
第三跨	35.3	35.6	0.3	40.9	41.9	1.0
第四跨	35.2	35.6	0.4	41.4	42.3	0.9
第五跨	36.8	37.4	0.6	41.8	42.7	0.9

(5) 温度场分布分析及温度测点布置优化

如图 40 中所示, 在顶窗关闭时, 外界风对温室内温度场影响很小, 温度场分布基本均匀, 受外界强辐射和内部封闭环境影响, 温度接近 42°C (315K); 在顶窗打开时, 受外界径向微风作用, 温室内降温效果明显, 平均温度在 37°C, 与外界温度一致, 迎风区高温面积略小于背风区, 整体呈现两边高中间低的对称分布, 且第一跨和第五跨温度偏高, 因为该两跨的顶窗并未开启, 避免局部较大湍流造成快速回旋风, 破坏该区域作物的组织结构。

根据上述模型和流场分析, 在关键区域布置少量的节点, 即可获得温度场整体的分布和变化趋势, 实现对温度测点布置策略的优化。首先, 布置在高温稳定区和低温稳定区, 即温室的两侧和中部区域, 测点离地 1~1.5m, 该区域始终是温室最高和最低温度的分布区域, 在该区域布置测点, 可以获取温度场的高低温阈值基本; 然后, 在对高低温交界的区域布置测点, 即 2 跨和 4 跨中上层, 测点离地 2~3m, 获取温室动态信息。由此可以仅使用最少 5 个传感器节点, 获取温室整体的基本温度分布、高低阈值和变化趋势, 有效降低测点的布置数量和系统布置成本。

5.4 本章小结

本章首先对各模块和节点的性能进行测试, 包括空气温湿度和土壤水分含量的测量性能测试, 底板、核心板和传感器节点的功耗测试, 网络无线传输质量测试三部分; 然后, 在温室现场, 测试系统的稳定性和数据采集准确性。最后, 建立简化的二维 CFD 仿真模型, 研究夏季高温低风速典型气候下的温度场分布, 并以该模型优化监测网络的温度测点布置策略。

第六章 面向物联网应用的监测平台设计

物联网技术架构由感知层、网络层和应用层组成。利用互联网延伸和拓展的网络构成网络层，利用智能感知和识别等技术，把传感器、控制器、物体和人以新的方式连接起来构成感知层，二者有机结合形成人与物、物与物相联的信息化、智能化的网络，并在此基础上面向用户与应用需求，创新性的开发丰富的应用构成应用层。本文所开发面向物联网应用的监测系统即属于感知层，需要开发服务器构成网络层来处理和传递感知层信息，开发具有丰富功能的前端构成应用层，充分体现和发挥物联网的优势和潜力。

基于互联网技术的远程监测平台的开发，包括服务器和前端两部分，同时搭建监视器网络，采集温室内部图像信息。系统部署如图 41 所示。

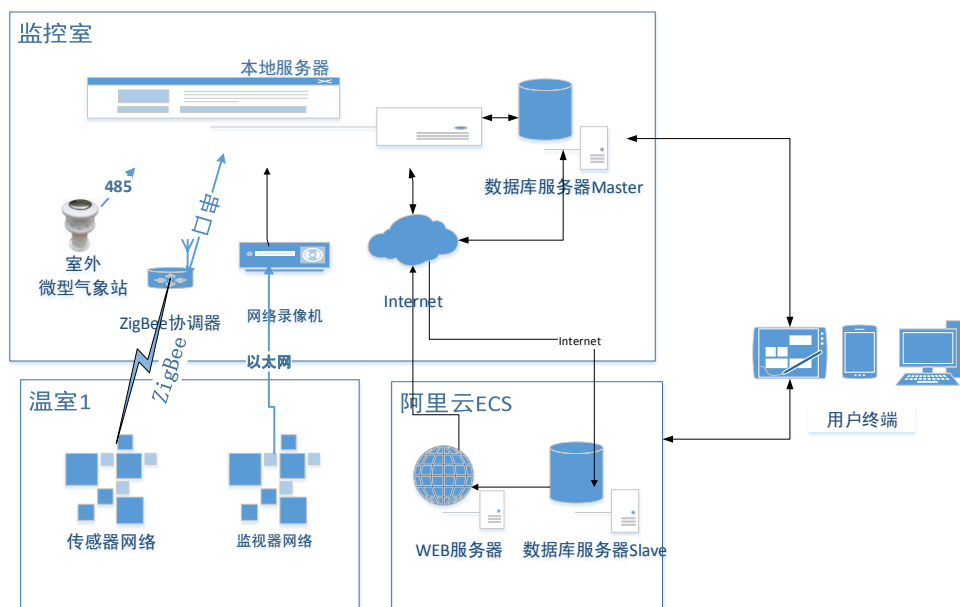


图 41 远程监测平台设计和部署图

Figure 41 Remote monitoring system design and deployment diagram

6.1 服务器开发

服务器开发选用 LAMJ（Linux + Apache + MySQL + Java）架构，主要包括三大模块：本地监测系统通信模块，负责与协调器通过串口进行数据和命令的交互，定时获取数据；数据库模块，保存设备信息、采样数据、事件信息和用户信息等，便于前端查询和更新配置；用户管理模块，为软件开发者、科研工作者、温室管理者和普通消费者设置不同的访问权限，适用于不同应用场景，保障网络的安全性。

同时，将本地服务器和数据库在阿里云 ECS 备份，利用阿里云服务器成熟稳定的硬件架构和维护服务，提高服务器可靠性和数据库安全性，方便大型系统的拓展。在连接多个温室的大型系统中，每个温室群会布置一个本地服务器，这些本地服务器会汇总在云服务器及云数据库中，构建初步的云服务，供用户快速访问全局数据。

6.1.1 开发平台

服务器是为系统提供数据计算和数据服务的设备，具备响应服务请求、承担和保障服务任务的功能。服务器的开发除了硬件配置和维护外，一般包括服务器操作系统、服务器系统软件、开发语言和数据库四部分。

服务器操作系统：开发系统环境选用 Windows 7，部署环境为基于 Linux 的 64 位 CentOS 系统(Community Enterprise Operating System, 社区企业操作系统)，该操作系统完全免费，稳定性好，为众多商业服务器所使用。

服务器系统软件：Apache Tomcat 7 服务器。Apache 具有优越的跨平台性和安全性，可以简单快捷的通过 API 扩充编译多种语言解析器，是使用量排名第一的 Web 服务器软件，但是只支持静态页面。Tomcat 是一款应用 (Java) 服务器，用来处理 Apache 无法支持的动态页面并解释 Java 程序。

开发语言：Java 语言。Java 是目前广泛使用的面向对象的、可撰写高效和跨平台应用的程序设计语言，具有优秀的平台移植性、通用性、安全性和高效性，可以方便快捷的开发网络应用，并在一定程度上操作硬件，如计算机串口通讯。

数据库：MySQL 5.6.21 数据库。MySQL 是目前应用最广泛的关系型数据库之一，具有速度快、体积小、总体成本低等特点，完美配合 Apache 服务器工作，广泛应用于中小型应用的开发。

6.1.2 本地监测网络通信模块

部署在本地的服务器 PC 通过 USB 转串口线与 ZigBee 协调器连接，通过相同的串口配置和自定义通讯协议，实现服务器与本地监测网络的通信。设定串口配置为波特率 115200，8 位数据位，无校验位和流控，1 位停止位。

串口通信协议如本文第三章第三节所示，为保证检测系统采样数据的同步性，本地服务器 PC 与协调器的通信流程如图 42 所示，分为两步：

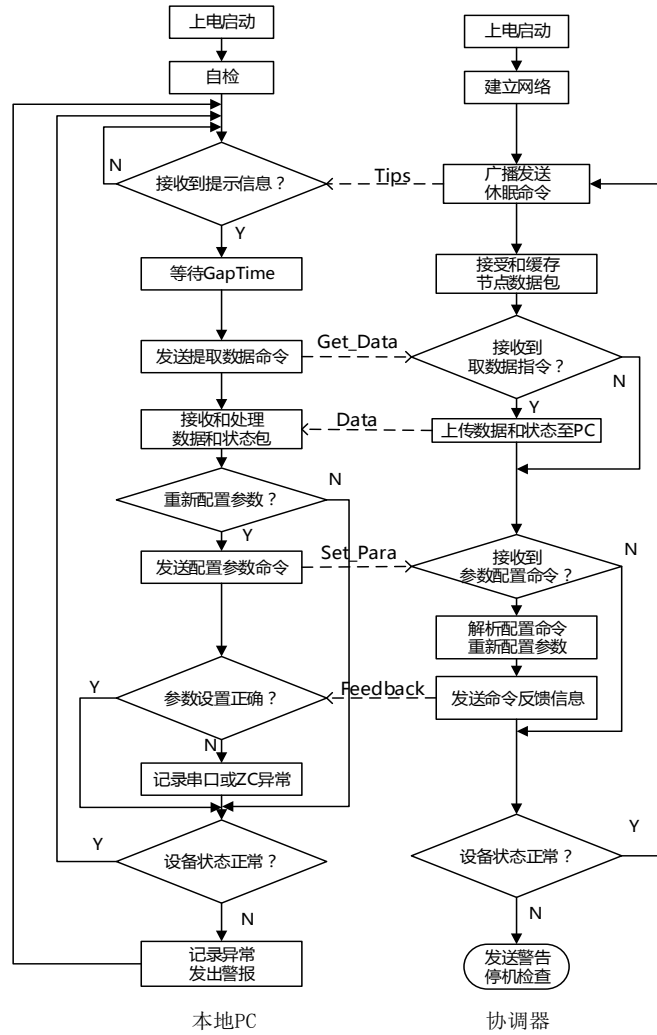


图 42 本地服务器与 ZigBee 协调器通信流程

Figure 42 The communication flow between local server and ZigBee coordinator

(1) PC 等待 ZigBee 协调器发送提示信息 Tips，Tips 表示协调器已发送休眠命令，且上一周期数据已经备妥，等待 10s 后，根据表 9 所定义的下行命令信息帧格式，PC 向 ZC 发送数据请求或配置命令。

(2) 根据表 11 所定义上行状态信息帧格式和表 13 所定义上行数据信息帧格式，PC 接收并解析 ZC 发送的数据和命令反馈信息。

至此一个周期的通信结束，服务器将接受的数据和状态信息进行分类和保存，并根据表 14 所定义，解析和记录设备的状态信息。

在整个通信过程中，通信模块和协调器相互独立工作。本地监测网络可以脱离服务器，按照设定的配置工作；只有在接收到 Tips 信息时，服务器才会开启后续操作，所以监测网络故障不会对服务器造成影响，弱化了二者的耦合关系。

同时，服务器每隔 1 min 从室外微型气象站读取室外环境参数，并记录在数据库中，对比读取的数据和设定的阈值，判断是否发出警告或执行应急操作。

6.1.3 数据库设计

合理的数据库设计，首先需要充分体现和满足系统的功能要求，清晰的表述数据和对象间的关系，并具有良好的拓展性；其次，通过主键、外键、非空、限制和索引等限制，提高数据的鲁棒性、准确性和一致性；最后，通过合理的表结构设计、物理分区和增加索引等辅助措施，提高数据的读取和查询效率。

本文中的数据库与传统数据库有所不同，主要体现在其与真实物理世界直接连接，数据来源于真实世界的传感器，具有更多的不确定性，需要在设计时考虑多种不稳定因素^[38,39]。

数据库的主要工作包括管理系统设备、保存长期数据和记录操作事件日志，同时，为用户提供用户管理和数据查询服务，因此，数据库的设计主要分为设备管理和配置、数据记录、事件记录以及用户管理 4 大功能模块，如图 43 所示。

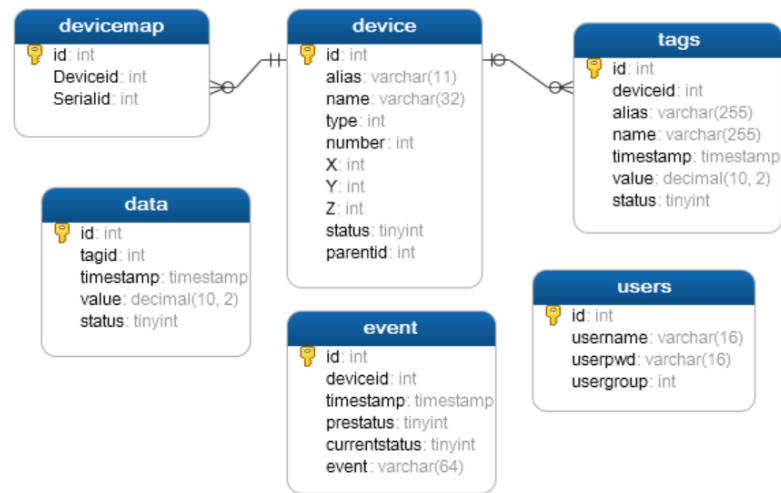


图 43 温室数据库结构和表设计

Figure 43 Greenhouse database structure and table design diagram

其中，表 device、devicemap 和 tags 属于设备管理和配置功能模块，除 value、timestamp 和 status 数据外，其余信息根据现场设备情况人工录入；表 data 属于数据记录功能模块，自动录入采集的传感器数据和设备状态；表 event 属于温室事件记录模块；表 users 属于用户管理模块。各表设计说明如表 24 所示。

上述各表基本满足服务器的功能要求，通过主键、外键和索引约束，保证数据的鲁棒性和准确性。增加额外的索引，对数据量最大的 data 表进行分表和水平切分处理，并将一年以上的数据转移到数据仓库，提高数据读取和查询的效率。

表 24 温室数据库表格设计说明

Table 24 Database tables design specification

表名	说明
device	记录监测网络中所有设备和传感器的信息和编号
devicemap	服务器定义 DeviceID 与设备定义 ID 的一一映射关系
tags	记录监测系统所有测点信息，如当前值和状态等信息
data	记录所有测点采集的数据
event	保存系统事件日志，包括系统和本地系统自动通信记录和远程手动命令记录
users	保存用户信息，如用户名称 ID、password 和权限组等

6.1.4 用户权限管理

用户权限管理基于业务和安全需求设置安全策略，赋予用户指定权限，使他们只可以接触到对其授权的系统资源。这是服务器开发中的关键一环，因为浏览器是每一台计算机都具备的应用，如果不建立有效的权限管理系统，非法用户将会轻易的访问所有服务器暴露给前端的内容，严重危害服务器的安全性。

用户权限管理一般采用基于角色管理设计，将用户、角色、模块和权限相互组合，形成一个强大的权限管理系统^[40]。用户的权限通过用户的角色来控制，一个用户可以拥有多个角色，其权限是这些角色的补集，而一个角色具有多个模块的权限，用户权限在前端的显示，就是由角色所拥有的模块和功能决定的，各个功能和模块在开发时被细化，并赋予不同的权限，通过权限管理被用户安全合理的利用。根据权限从高到低排列，用户可以分为系统用户、超级用户、管理者用户、专家用户、操作员用户和客户用户等。

本系统中权限管理主要面对系统开发者、科研工作者、温室生产管理人员和普通消费者，这四类用户所拥有的权限依次降低，在 user 表中通过设置 usergroup 来限定该用户的权限范围。

系统开发者，即系统的设计、开发、编写和部署人员，拥有最高一级的系统用户权限，可以对服务器、数据库、前端页面程序等内容进行查看和修改。

科研工作者和温室生产管理人员，作为管理者用户，是系统的高级管理者和使用者，拥有查看系统所有数据、配置和管理用户信息的权限，可以根据科研和生产管理需要，修改系统的配置参数和自定义的监测策略，比如根据种植作物对环境的敏感程度，或根据科研与仿真的要求，远程设置监测系统的采样周期。

普通消费者，作为客户用户，仅能浏览服务器允许其查看的内容，是数量最多、访问量最大、权限最低的用户组。

6.2 前端开发

前端是平台的前台和界面，其主要职责是把网址和服务的内容更好的呈现给用户，从用户的角度出发，将数据、服务和内容串联起来。

6.2.1 开发平台

传统的前端开发也称网页制作，在 web1.0 时代，用户主要浏览以静态内容为主的网页，但在 web 2.0 时代，页面具有更多更生动的富媒体内容、更好的交互性和用户体验，此时的前端开发也叫 web 前端开发。随着移动互联网的快速发展，各种形式多样的手机端应用迅速发送，以其快速、安全、便捷和优秀的用户体验等优点，成为前端开发的重要平台，因其作为独立的程序包安装在终端设备本地，所以也称为本地 APP（Native Application，本地应用）。但本地 APP 开发周期长，维护成本高，并不适合于小型应用的开发。

随着网页技术的发展，出现了基于 web 的 LAPP（Light App，轻应用），它是一种即搜即用、无需下载的全功能 App，应用内容可以通过全网搜索，增加应用和服务的曝光率，无需升级客户端，支持用户搜索时实现调用和主动订阅，基于最新的 HTML5 标准，为移动用户提供优质的应用与服务，具有媲美本地 App 的用户体验。

本系统前端面向普通消费者，基于微信公众平台开发微信 App，充分利用微信公众平台丰富的开放接口，缩短开发周期，降低维护和升级成本，用户只需要关注微信公众号即可访问微信 App，方便的查看温室内的相关情况。

6.2.2 功能模块与界面设计

本系统主要面向普通消费者进行前端的开发，配合智能温室管理系统向外界展示温室相关情况，具备三大功能模块：温室内外环境参数显示、历史记录查询和显示、温室内的实景图像展示。

前端展示设计有 4 个页面，分别是当前内外环境显示页面、历史数据显示页面、温室实景展示页面和设置页面。

当前内外环境显示页面如图 44，包含三部分：第一部分，当前室外环境显示，主要由室外微型气象站获得，包括温湿度、光照强度和风向风速等信息，部分参数来自于网络上公开的气象数据；第二部分，当前温室内环境数据显示，计算温室内各节点数据的平均值显示，包括空气和土壤温湿度、光照强度、作物的种类和生长状态显示；第三部分，从零点开始，显示当天温室内环境参数变化曲线。

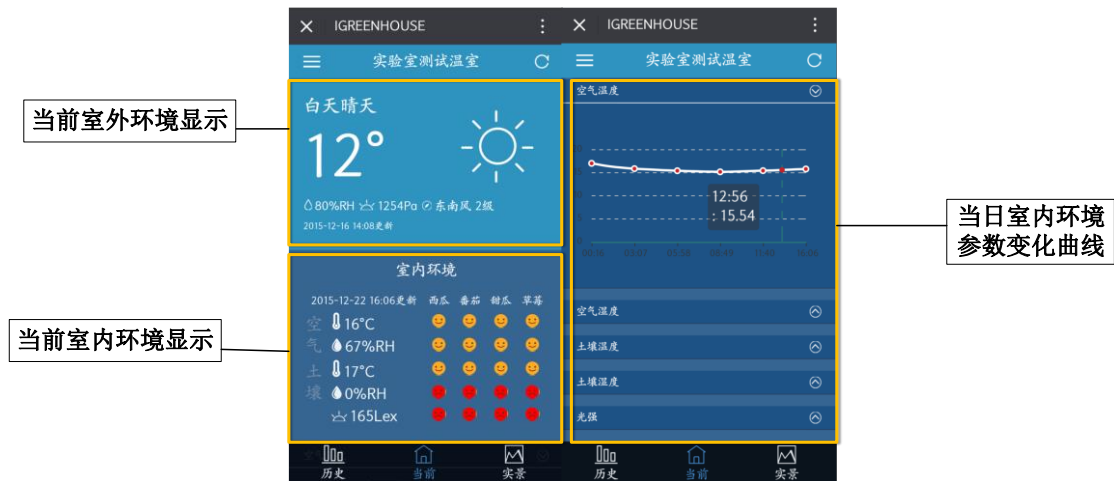


图 44 当前内外环境显示页面

Figure 44 The current environment display page inside and outside the greenhouse

历史数据显示页面，如图 45(a)所示，显示本周、本月和所有已记录数据，目前设定的数据最长记录周期为 1 年。

温室实景展示页面，如图 45(b)所示，展示温室内外的实景图片，直观的展示温室内外环境和气候情况，以及温室内种植作物种类和生长状况。

设置页面，如图 45(c)所示，目前支持所展示的温室和种植作物的选择。



图 45 历史数据、温室实景和设置页面

Figure 45 Historic data display, virtual show and setting page

6.3 本章小结

本章针对物联网感知层、网络层和应用层的三层架构，开发服务器和前端应用。首先，开发本地服务器，实现本地监测网络与互联网的连接，包括本地监测网络通信模块、数据库和用户权限管理三部分。然后，针对普通消费者和农业科研人员，开发基于微信公众平台的微信 App，供所有用户查看温室当前内外环境状态和历史数据。

第七章 总结和展望

7.1 研究工作总结

本文综合运用 ZigBee 技术、传感技术、单片机技术、物联网技术等多领域技术,研究和实现了一种通用性强、布置灵活、低功耗的多参数温室内环境监测系统,综合监测温室内多点的空气温湿度、土壤温湿度以及光照强度信息。重点优化电池供电节点的低功耗性能、传感器的稳定性和网络的无线传输质量,传感器数据采集准确稳定,网络布置可拓展性强。自定义通信流程,实现采样周期灵活可控和数据同步采集。基于 CFD 仿真模型,优化温室内温度测点的布置策略,降低监测网络的硬件成本。

面向物联网应用,综合服务器开发、数据库开发、前端开发等互联网技术,开发物联网应用的网络层,面向用户需求开发功能丰富的物联网应用,提高了温室栽培的信息化水平。该监测平台为温室生产物联网化、以及远程监控技术发展提供了良好的技术储备,为完善农产品安全管理和食品安全追溯系统,提供了平台和强有力的技术支持,实现了农业物联网的初步应用。

对本文主要研究工作总结如下:

1) 温室环境影响作物生长关键因子分析及其传感器选用。分析温室内影响作物生长关键环境因子,选用专用传感器,设计其接口电路、外形封装和安置标准。

2) 低功耗 ZigBee 无线传感器网络的设计,以及基于 CFD 模型的测点优化。基于监测需求和布置条件,应用 ZigBee 技术、传感器技术和单片机技术,设计和实现了本地无线传感器监测系统;优化了节点的低功耗性能,传感器节点在电池供电情况下可以连续使用 1~2 个月。测试和标定传感器性能与参数,检测和分析模块和节点的功耗、无线网络的传输质量,并在温室现场实测系统性能,测试结果均满足温室环境监测和设计要求。针对温度监测,基于 CFD 仿真模型优化温度测点布置策略,在 1200 m² 连栋温室内布置 5 个测点,即可获得整体温度场的基本温度分布,降低系统硬件和维护成本。

3) 面向农业物联网应用,设计远程监测平台。利用本地 ZigBee 网络和计算机,实现了自动化监测网络,面向物联网应用设计了服务器和前端,将本地系统作为物联网感知层加入物联网系统,在云端备份数据,并布置网络服务器,让管理者和消费者可以远程查看温室环境,实现了农业物联网的初步应用。

7.2 研究工作展望

本文设计的面向物联网应用的温室内环境监测系统,虽然取得了较好的应用和科研成果,但在研究过程中也发现了许多问题和改进的方向,在传感器种类拓展和性能优化、组网技术升级、物联网平台服务器设计、测点布置策略和控制策略优化等方面,可以进一步展开研究。

1) 传感器方面。针对丰富多样的监测要求,选用种类更多、性能更加优良、功耗更低的传感器,比如 CO_2 浓度传感器、土壤盐碱度和基本矿物质含量传感器等。尤其是土壤水分含量传感器,可以在低功耗和本地数字化方面,进一步研究和优化。

2) 组网技术方面。利用基于 IPv6 的 6LoWPAN 技术和 ARM Cortex M3 内核的 CC2538 芯片,开发与互联网无缝连接的低功耗无线传感器网络。

3) 网络开发方面。开发语言采用 PHP + C + Python 配置代替 Java,便于扁平化和模块化开发,以及大型网络应用拓展。

4) 测点布置策略优化方面。利用现有平台积累大量数据,搭建和验证更多典型温室结构和气候条件下的 CFD 模型,分析多参数的分布与变化趋势,针对性的优化监测系统的测点布置策略,组建测点布置的专家数据库,扩大布置策略的适用范围。

5) 控制策略优化方面。搭建 COMSOL 多物理场仿真模型,分析多种控制手段下温度场和湿度场的变化,基于离线机器学习方法,利用本文所实现监测系统提供的大量数据,分析单一控制手段和组合控制策略对温室内环境调控的作用,训练和优化温室组合调控策略,进一步研究温室环境精确控制技术。

参考文献

- [1] 封志明. 中国未来人口发展的粮食安全与耕地保障[J]. 人口研究, 2007,02:15-29.
- [2] 杨劲松, 周华, 赵其国. 保障我国“耕地红线”及“粮食安全”十字战略方针[J]. 土壤. 2011(10)
- [3] 何芬, 马承伟. 中国设施农业发展现状与对策分析[J]. 中国农学通报, 2007,03:462-465.通报,
- [4] 胡鞍钢, 地力夏提·吾布力, 鄢一龙. 粮食安全“十三五”规划基本思路[J]. 清华大学学报(哲学社会科学版), 2015,05:158-165+198-199.
- [5] 周德乐,陈大跃,孙丽娟,朱成刚. 多点大棚环境参数检测系统的设计[J]. 电气自动化,2013,04:9-11+14.
- [6] 郭世荣, 孙锦, 束胜, 陆晓民, 田婧, 王军伟. 我国设施园艺概况及发展趋势[J]. 中国蔬菜, 2012,18:1-14.
- [7] 张震, 刘学瑜. 我国设施农业发展现状与对策[J]. 农业经济问题, 2015,05:64-70+111.
- [8] 蒋卫杰, 邓杰, 余宏军. 设施园艺发展概况、存在问题与产业发展建议[J]. 中国农业科学, 2015,17:3515-3523.
- [9] 郭世荣, 孙锦, 束胜, 李晶. 国外设施园艺发展概况、特点及趋势分析[J]. 南京农业大学学报, 2012,05:43-52.
- [10] 陈殿奎, 刘伟. 从荷兰温室园艺的发展反思我国工厂化农业[J]. 中国蔬菜,2004(6)
- [11] 葛文杰, 赵春江. 农业物联网研究与应用现状及发展对策研究[J]. 农业机械学报, 2014,07:222-230+277.
- [12] 祁雪. CMOS 带隙温度传感器电路的研究[D]. 东南大学, 2006.
- [13] 秦永和. 湿度传感器测试系统[D]. 哈尔滨工程大学,2003.
- [14] 陈海波, 冶林茂, 范玉兰, 汪迪. 基于 FDR 原理的土壤水分测量技术[A]. 中国气象学会. 中国气象学会 2008 年年会干旱与减灾——第六届干旱气候变化与减灾学术研讨会分会场论文集[C]. 中国气象学会, 2008:4.
- [15] 王新坤, 李红. 我国温室的研究现状与发展趋势[J]. 排灌机械工程学报, 2010,02:179-184.
- [16] 何鑒. 基于嵌入式系统和现场总线多参量传感器网络研究[D]. 上海交通大学硕士论文. 2011(01)
- [17] 张猛, 房俊龙, 韩雨. 基于 ZigBee 和 Internet 的温室群环境远程监控系统设

- 计[J]. 农业工程学报,2013,S1:171-176.
- [18] 张瑞瑞. 精准农业传感器网络中的节能技术研究[D]. 中国农业大学, 2015.
- [19] 郭文川, 程寒杰, 李瑞明, 吕健, 张海辉. 基于无线传感器网络的温室环境信息监测系统[J]. 农业机械学报, 2010,07:181-185.
- [20] 周益明. 基于无线传感器网络的温室群监测与控制系统的關鍵技术研究实现[D]. 浙江大学, 2009.
- [21] 李莉, 刘刚. 基于蓝牙技术的温室环境监测系统设计[J]. 农业机械学报, 2006,10:97-100.
- [22] 马增炜, 马锦儒, 李亚敏. 基于 WIFI 的智能温室监控系统设计[J]. 农机化研究, 2011,02:154-157+162.
- [23] ZigBee Alliance. ZigBee Standards Organization. ZigBee Specification[S]. [S. L]:ZigBee Alliance, 2007
- [24] 闫沫. ZigBee 协议栈的分析与设计[D]. 厦门大学, 2007.
- [25] 邢伟伟, 白瑞林. IEEE 1588 时间同步在 ZigBee 低功耗中的应用[J]. 自动化仪表, 2012,11:27-30.
- [26] 常大为, 刘双梅, 万晓榆. 基于 IEEE 802.15.4 的 CSMA/CA 性能分析与研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2006,01:28-33.
- [27] 张京, 杨启良, 戈振扬, 齐亚峰, 周兵, 殷欣. 温室环境参数无线传感器网络监测系统构建与 CC2530 传输特性分析[J]. 农业工程学报, 2013,07:139-147.
- [28] 刘卉, 汪懋华, 王跃宣, 马道坤, 李海霞. 基于无线传感器网络的农田土壤温湿度监测系统的设计与开发[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008,03:604-608.
- [29] GB/T 18459-2001, 传感器主要静态指标计算方法[S].
- [30] GB/T 15768-1995, 电容式湿敏元件与湿度传感器总规范[S].
- [31] SJ 20722-1998, 热电阻温度传感器总规范[S].
- [32] LY/T 1213-1999, 森林土壤含水量的测定[S].
- [33] 王丹. 基于 RSSI 的无线传感器网络定位方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.
- [34] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004:7~11.
- [35] Patankar S.V., Numerical heat transfer and fluid flow, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980
- [36] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2):269~289.
- [37] Bournet P.E. and Boulard T., “Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies”, *Biosystems Engineering*, 2010, **74**(2), 195-217.

- [38] 李文明. 基于数据库的温室环境管理智能决策支持系统的研制[D]. 山东农业大学, 2006.
- [39] 刘艺. 基于农业生产过程的农业物联网数据处理若干关键技术的研究[D]. 北京邮电大学, 2014.
- [40] 龚富强. 基于角色的用户权限管理系统开发与应用[D]. 西北工业大学, 2007.

致谢

首先，感谢我的导师赵春宇老师。赵老师为人谦和，才学深厚，在我研究生学习阶段，赵老师给了我很多关键性的指导和建议；在学术期间，受到赵老师慈父般的谆谆教诲；在我求职过程中，赵老师给了我许多诚恳的指导和帮助；在我大论文写作期间，赵老师花费大量精力指导我完成论文和提炼研究内容。赵老师严肃务实的科研精神和人格魅力让我受益良多，深深的影响了我工作生活和为人处事的态度。在此我万分感谢。

其次，感谢黄震宇老师。在科研过程中，黄老师教会了我很多科研的方法 and 态度，让我养成了很多良好的科研习惯和工作习惯，在大论文写作和答辩过程中，黄老师在 ppt 制作、答辩准备和表达技巧方面给予了我很大的帮助，指出研究和论文中许多关键性的问题。在此我深表感激。

感谢朱成刚老师和何科爽师兄，感谢他们在硬件设计与 CFD 仿真工作给予我的指导和帮助。感谢高浩天师弟在服务器和前端开发上给予我的帮助。

感谢我的同学和实验室的师兄师弟们，感谢他们在我两年半的研究生阶段，帮我分担烦恼，无私的鼓励我、帮助我。

最后感谢我的父母和家人，感谢他们无论何时、何地、何种处境，都永远支持我、鼓励我。

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] 第一作者. 基于 ZigBee 技术的连栋温室低功耗环境监测系统设计. 传感器与微系统, 已录用。
- [2] 一种一维结构的不连续在线检测方法。发明专利, 审中-实审。