

单位代码： 10293 密 级：           

南京邮电大学

专 业 学 位 硕 士 论 文



论文题目： 基于物联网的家庭室内环境监测系统的研究与实现

学 号 1215043034

姓 名 汤振

导 师 倪晓军

专业学位类别 工程硕士

类 型 全 日 制

专业（领域） 计算机技术

论文提交日期 二零一八年四月

# **The Research and Implementation of Home Interior Environment Monitoring System Based on Internet of Things**

Thesis Submitted to Nanjing University of Posts and  
Telecommunications for the Degree of  
Master of Engineering



By

Tang Zhen

Supervisor: Prof. Ni Xiaojun

April 2018

## 南京邮电大学学位论文原创性声明

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的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京邮电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作了明确的说明并表示了谢意。

本人学位论文及涉及相关资料若有不实，愿意承担一切相关的法律责任。

研究生学号：\_\_\_\_\_ 研究生签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 南京邮电大学学位论文使用授权声明

本人承诺所呈交的学位论文不涉及任何国家秘密，本人及导师为本论文的涉密责任并列第一责任人。

本人授权南京邮电大学可以保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子文档；允许论文被查阅和借阅；可以将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、汇编本学位论文。本文电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。论文的公布（包括刊登）授权南京邮电大学研究生院办理。

非国家秘密类涉密学位论文在解密后适用本授权书。

研究生签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

# 摘要

随着社会生产力的发展以及生活水平的不断提高，人们更加重视室内环境质量对身体健康和工作效率的影响，也对其提出了更高的要求。因此对室内环境进行有效地监测，准确地评判室内环境质量具有重要的现实意义。本文以此为背景，结合家庭室内环境监测的实际需求，将物联网相关技术运用其中，设计实现了一套基于物联网的家庭室内环境监测系统，能够实现多个室内环境特征参数的监测，并应用数据融合技术处理传感器采集的数据，对家庭室内环境的舒适度等级做出综合评判。

本文详细的分析了物联网体系结构，基于物联网三层体系结构将系统的整体结构划分为环境特征参数采集模块、数据汇集上传模块和数据存储处理模块。环境特征参数采集模块由 ZigBee 节点与采集数据的传感器构成，实现数据的采集、汇聚并传送给物联网网关。数据汇集上传模块主要由物联网网关构成，选用现在流行的卡片机 RPi3 B 作为开发平台，实现对数据的解析、封装，最后上传至物联网云平台。数据存储处理模块以 OneNET 物联网云平台为核心，负责存储和管理数据，用户通过不同的应用与终端查看数据。系统的硬件设备体积小，组网灵活高效，数据传输稳定，便于部署实施。

系统采用多传感器数据融合的方式对数据进行处理，运用模糊理论中的模糊贴近度与模糊综合评价法提出了基于模糊理论的两级数据融合算法，提升数据的准确性和可靠性，实现对室内环境舒适度的综合评判。

**关键词：**物联网，环境监测，数据融合，ZigBee，模糊理论

# Abstract

With the rapid development of social productivity and the continuous improvement of living standards, people not only pay more attention to the influence of the quality and comfort of indoor environment on health and work efficiency, but also require more on the quality and comfort of the environment. Therefore, it is of great significance to effectively monitor the indoor environment and accurately evaluate the indoor environmental quality. Based on this background, combining with the actual needs of indoor environment monitoring, we will apply the related technologies of Internet of Things(IOT) to design and implement a set of IOT-based home indoor environment monitoring system, which can monitor multiple indoor environmental applications' characteristic parameters of multi-sensor data fusion technology for the integration of collected data, and then make a comprehensive evaluation for the comfort degree of home environment.

In this paper, the IOT program and key technologies are analyzed in detail. Based on the three-tier program of IOT, the overall structure of the system is divided into modules of the environment characteristic parameter acquisition, the data collection uploading and storage processing. The environment characteristic parameter acquisition module is composed of the ZigBee node and data acquisition sensor, which realizes the data collection, convergence and transmission to the IOT gateway. The data collection and upload module is mainly constructed of the IOT gateway. The popular card machine RPi3 B is selected as the development platform for data analysis, encapsulation and final upload to the IOT cloud platform. Data storage and processing module takes the IOT cloud platform of OneNET as the core, which is responsible for the storage and management of data, which can be checked by using different applications and terminals. It is easy to deploy and implement the system due to small hardware devices, flexible and efficient networking and stable transmission of data.

The system uses Multi-sensor data fusion method to process the data. A data fusion algorithm, based on fuzzy closeness degree and fuzzy comprehensive evaluation method of fuzzy theory, is proposed to improve the accuracy and reliability of data and realize the comprehensive evaluation of indoor environment comfort degree.

**Key words:** Internet of Things, Environmental monitoring, Data fusion, ZigBee, Fuzzy theory

# 目录

第一章	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.2	研究现状	2
1.2.1	室内环境监测技术	2
1.2.2	数据融合技术	3
1.3	研究意义与内容	4
1.4	论文的组织结构	5
第二章	相关技术研究	6
2.1	物联网相关概念	6
2.1.1	物联网概述	6
2.1.2	物联网体系结构	6
2.2	ZigBee 技术	8
2.2.1	ZigBee 技术概述	8
2.2.2	ZigBee 网络拓扑	9
2.2.3	ZigBee 协议架构	10
2.3	数据融合技术	11
2.3.1	数据融合的基本原理	11
2.3.2	数据融合的结构与级别	12
2.3.3	数据融合的主要方法	15
2.4	本章小结	16
第三章	系统总体设计	18
3.1	系统总体结构	18
3.2	系统硬件设计	20
3.2.1	无线节点主芯片选型	20
3.2.2	传感器选型	21
3.2.3	物联网网关设计	23
3.3	物联网云平台设计	24
3.3.1	云平台架构与资源管理	24
3.3.2	云平台通信协议	26
3.4	本章小结	27
第四章	基于模糊理论的数据融合算法	28
4.1	系统数据融合结构	28
4.2	基于模糊贴近度的一级数据融合	29
4.2.1	模糊集合	29
4.2.2	模糊贴近度	30
4.2.3	基于模糊贴近度的加权融合模型	31
4.2.4	数据一级融合算法设计	32
4.3	基于模糊综合评判法的二级数据融合	33
4.3.1	模糊综合评判法	33
4.3.2	数据二级融合算法设计	34
4.4	本章小结	42
第五章	系统软件设计	43
5.1	环境特征参数采集模块	43
5.1.1	开发环境	43

5.1.2 节点软件开发 .....	44
5.1.3 数据帧格式 .....	47
5.2 数据解析上传模块 .....	48
5.2.1 串口数据解析 .....	48
5.2.2 数据上传 .....	49
5.3 数据存储处理模块 .....	50
5.3.1 云平台应用设计 .....	50
5.3.2 用户端设计 .....	51
5.4 本章小结 .....	55
第六章 实验分析与系统测试 .....	56
6.1 实验分析 .....	56
6.2 系统测试 .....	60
6.2.1 节点通信测试 .....	60
6.2.2 网关通信测试 .....	61
6.2.3 软件运行测试 .....	62
6.3 本章小结 .....	64
第七章 总结与展望 .....	65
7.1 总结 .....	65
7.2 展望 .....	66
参考文献 .....	67
附录 攻读硕士学位期间申请的专利 .....	69
致谢 .....	70

# 第一章 绪论

## 1.1 研究背景

人类的日常生活环境与人类的生存发展有着密切的关系。但工业化和城市化的快速发展以及能源的不合理利用,造成了严重的环境污染,并已经危及人类的正常工作和生活。随着社会生产力的发展以及生活水平的不断提高,人们已经注意到身体健康和工作效率都与室内环境质量有着密切的关系。人们开始对家庭室内环境提出了更高的要求,不仅仅只注重其安全性,而且越来越关注环境质量与舒适性。因此,对室内环境进行有效的监测并积极调节舒适的室内环境,为人们的工作、生活和身体健康提供环境保障,具有十分重要的现实意义。

近年来,人们对于环境保护的意识越来越强,为控制环境污染和保护环境,我国政府已经实施了很多措施改善环境质量,如增加大气环境监测、加强水环境与水污染处理监测、提高生态环境监测,但却忽略了自身生活所在的室内环境。随着中国房地产的发展,住宅区的大量出现使得家庭居住环境质量变得更加不可忽视。对室内环境质量的控制和监测是一项重要的工作,其重要目的是确保人们拥有适宜的工作和生活空间。然而,包括监测湿度,温度,照度,有害气体等在内的室内综合环境质量并不容易监测和控制<sup>[1][2]</sup>。随着现代电子技术、自动化技术和通信技术<sup>[3][4]</sup>的发展,智能家居<sup>[5][6]</sup>孕育而生。近年来,随着智能家居系统的深入研究,智能家居系统得到了广泛的推广,也使得研究和实现家庭室内环境监测具有重要的现实意义,因为它也是智能家居中非常重要的一部分。但传统的环境监测手段已经不能适应现代社会的发展要求,所以智能化、实时化、集成化的监测技术与设备成为研究的重点。

当提及到智能家居以及家庭室内环境监测技术与设备,自然而然的便会联想到其所涉及的热门领域,那就是物联网。物联网(Internet of Things, IoT)<sup>[7]</sup>以及它所拥有的巨大潜力已成为当今时代的关键技术发展之一<sup>[8]</sup>。物联网是信息社会的全球性基础设施,通过基于现有的、不断发展的可互相操作的信息和通信技术,来连接(物理和虚拟)事物,实现高级服务<sup>[9]</sup>。物联网在2008年的一份报告<sup>[10]</sup>中被美国国家情报委员会(NIC)命名为可能影响美国权力的六大关键民用技术之一,也是Mark Weiser设想的无处不在计算的推动者。

随着互联网的普及,借助网络,人与人之间已经能够完成跨域空间的交流与沟通,物联网将我们身边的每一件物体都连入网络,实现物与物之间的交互。物联网是继互联网与移动通信网之后的第三次信息浪潮,通信网之后世界信息产业的又一次创举。预计到2020年,由于各种物体逐渐的大量的涌入,连接到物联网的物体数量预计将达到500亿<sup>[11]</sup>。



这些日益增多的物联网对象的主要目的是生成有关我们周围环境的有用数据，使其更加智能化。通过收集和分析过去、现在和将来的数据，为环境提供所需的信息。这些数据可以实时地帮助我们对环境做出最佳决策。预计物联网将会成为大数据的主要生产商之一。数据和其他资源的共享和协作将是实现智能城市 and 智能社会的关键因素<sup>[12]</sup>。各种类型和形式的数据的相互融合，即数据融合，可用来提高数据质量和改善决策结果，因此数据融合技术将在物联网领域扮演非常重要的角色。数据融合被定义为用于将传感器数据或从感官数据导出的数据，组合成常用表示形式的理论、技术和工具<sup>[13]</sup>。对物联网等信息获取的大数据，例如数量、速度、多样性、准确性等进行及时的融合分析，实现对现实环境的高效、可靠、准确的决策和管理，这将是未来的一大挑战。

## 1.2 研究现状

### 1.2.1 室内环境监测技术

所谓室内环境<sup>[14]</sup>，既包括人们的家庭住所，也包含人们长期工作、学习和娱乐等各种相对封闭的场所。由于人们的多数活动都是在室内进行，室内环境的优劣程度就直接影响人们的身心健康，已经越发被社会各界所重视。为了使室内环境中的有害因素对人身健康造成的危害减低到最小，就需要室内环境监测技术给与科学有效且适合的方法对室内环境展开监测，提供真实有效的数据支持。

国外在室内环境监测技术的研究发展上处于先进地位，早在 20 世纪 60 年代，欧美发达国家就提出“室内空气质量”的概念<sup>[15]</sup>，并将室内环境空气质量监测作为一个新的研究领域。之后美、德、日等国家展开室内环境质量控制的研究，分别制定了本国的室内环境质量标准，也制定出适合室内环境质量的监测方法。传统的室内环境监测方法主要有两种，即仪器监测法和环境标准法<sup>[16]</sup>。传统法在实际使用时能够得到准确可靠的监测结果，但都必需要专业工作人员全程参与，程序复杂，人力财力成本较高，不易于普及。

伴随着物联网产业的兴起与发展，借助电子计算机技术、网络通信技术等多方面的技术支持，室内环境监测技术向着系统化、网络化<sup>[14]</sup>和智能化快速发展<sup>[17]</sup>。自从 1984 年美国建成世界首幢室内环境智能监测办公大楼之后，欧美各国相继推出智能化的家居环境监测方案。德国弗劳恩霍夫研究所与多家公司联合研发出 EIB 总线系统<sup>[18][19]</sup>，美国在 1989 年制定出用于家庭自动化的 CEBus 标准<sup>[20]</sup>。1998 年新加坡开发了新加坡模式的智能化系统 8X<sup>[21]</sup>，实现智能家居环境监测。早期的室内环境监测方案中，较成熟且推广率高的都是采用实时性高、

通信稳定可靠的有线通信技术，但是存在布局难以调整，扩展性差等明显缺陷。室内环境监测技术之后便逐步向无线通信方向发展，借助 ZigBee、WiFi、蓝牙和 UWB 等无线通信技术，使得监测系统更易实施，监测范围更大，成本更低。应用无线通信技术的智能室内环境监测系统不受空间与线路的限制，运用智能化的无线终端，使用户可随时关注环境状态并及时获知环境异常情况<sup>[22]</sup>。进入 21 世纪，云计算、大数据和人工智能等前沿技术迅速发展，室内环境监测技术又迈上一个新台阶。依托自身的技术实力，很多知名企业如 Google、IBM、cisco 等都开始深入室内环境监测领域中<sup>[23]</sup>。Google 在 2014 年收购智慧家居设备制造商 Nest Labs，之后推出的一款智能家居系统，可对室内环境数据进行处理分析<sup>[24]</sup>。

国内的室内环境监测技术的发展相对国外起步较晚，国家卫生部在 1987 年颁布《公共场所卫生管理条例》，明确要求室内空气、光照、噪声等需要检测，同年才出现第一家生产空气质量优化相关产品的企业<sup>[25]</sup>。之后一系列室内环境质量监测相关的标准或规范的出台（例如《室内环境空气质量监测技术规范》（HJPT167-2004）、《室内空气质量标准》（GB/T18883-2002）等）<sup>[26][27]</sup>，使得我国的室内环境质量评价有了准确、权威性的参考。在国内，有效的监测室内环境大多还是仪器监测法，只能做阶段性监测，也不具备数据分析能力，信息的利用率差，仪器多数是进口设备，成本较高。国外也存在比较适合我国使用的监测系统，例如 8X，但由于移植性差、性价比低以及系统结构问题无法在国内普及。随着我国科学技术的发展，国内一些企业也研发出相关产品，例如岚宝德源 LB-A 型检测仪<sup>[28]</sup>、海尔家庭系统<sup>[29]</sup>、台湾 Advantech 推出一款室内环境监测系统，可减少传统传感器的安装成本，降低无线和云集成的复杂度，使用云服务收集环境数据以便后续深入分析使用。

纵观国内外室内环境监测技术的发展<sup>[30]</sup>，监测方法由仪器慢慢转变为智能化、集成化的系统<sup>[32]</sup>，系统的网络通信也逐步从有线到无线转变<sup>[31]</sup>。室内环境监测不单单只是独立地采集数据，其也将作为物联网大数据的信息来源，为更深入的环境分析、评估、预测提供真实、有效且权威的数据<sup>[35]</sup>。

### 1.2.2 数据融合技术

信息的质量在决策中起着非常重要的作用，获得可靠和准确的信息就显得尤为重要。在如今的信息化时代，大量的数据会在短时间内由多个信息源产生，使这些大量数据精确且高度准确并有效利用的最佳途径就是数据融合<sup>[36]</sup>。数据融合技术早期只是用于军事领域，20 世纪 70 年代美国开始研究声呐信号理解系统，从此拉开了数据融合研究的序幕。在之后的 10 年间，美军开始研发采用数据融合的战略战术监视系统，C3I 系统就是数据融合技术用于采

集、处理战场信息的成功案例<sup>[37]</sup>。由于在战略和战术监视上的重要性，1988年美国国防部将其列为20世纪90年代20项重点研发的关键技术中最优先发展的A类<sup>[38]</sup>。进入90年代，美国相继研究出多套系统，如全源信息分析体系（ASAS）、陆军自动战术情报保障系统（LENSCE）、敌军态势分析系统（ENSCS）等等，大大增强的美军的作战实力。数据融合技术另一个重要应用是在机器人领域，自1986年起，IEEE每年的“机器人与自动化”学术会议上都开设关于数据融合的专题。首次采用多传感器数据融合技术的移动机器人 Hailar 可以在未知环境中作业。斯坦福大学在移动机器人上成功利用 Kalman 滤波技术将视觉、滑觉和超声波传感器信息进行融合，指导机器人行动。Emil M. Petriu 等融合机器人上的传感器数据用于监测环境<sup>[39]</sup>。

国内直至20世纪80年代末才开始关于数据融合技术的研究。起初相关领域学者主要研究数据融合在多目标追踪问题上的应用，自1991年海湾战争结束后，国家开始重视研究和发发展数据融合技术，大力支持高校和科研机构展开相关研究工作，并取得了一定的成果，但还是基本处于理论研究层次，在实际应用方面还尚未有较好的成果。

随着数据融合技术的发展，现在已经逐渐获得商业的认可<sup>[40]</sup>，在智能交通系统，地理信息，海陆监视，数据信息安全，医疗监视、诊断等领域已经广泛的应用数据融合技术处理信息。

### 1.3 研究意义与内容

在物联网迅猛发展的大背景下，针对人们对室内健康环境的需求，通过对室内环境监测系统的研究，给出一种基于物联网的监测方案，利用组网方式灵活的 ZigBee 网络和嵌入式相关技术，使其可以根据监测区域的具体要求进行组网和设计，对人们身边的环境特征参数如温度、湿度、光照及有害气体进行实时连续监测，传感器节点实时采集数据信息，利用物联网云平台进行数据的存储和转发。利用多传感器数据融合技术进行数据分析，以达到准确的获得环境信息，并综合评判室内环境质量，对室内环境舒适度做出评价，进而能够对改善人们的生活质量和净化室内环境起到良好的指导作用。因此，无论是在学术研究还是在工程应用方面都具有一定的价值和意义。

本文研究的家庭室内环境监测系统，可以对环境中的温度、湿度、有害气体等进行实时连续监测，结合物联网云平台实现数据的远程存储管理，利用多传感器数据融合技术进行数据分析实现家庭室内环境舒适度等级的综合评判。本文主要完成以下工作：

- （1）研究物联网的体系结构，对物联网关键技术中的 ZigBee 技术和数据融合技术做了深入

分析。

(2) 基于物联网体系结构设计系统总体结构。

(3) 设计与实现系统的硬件部分。确定无线网络的通信方式和通信协议，并选定无线节点主芯片型号；选定传感器型号；选择网关硬件开发平台，确定网关通信方式。

(4) 选择系统使用的物联网云平台，分析了云平台的架构、资源管理和通信协议。

(5) 对模糊理论中的模糊集合、模糊贴近度和模糊综合评判法进行研究分析，提出基于模糊理论的数据融合算法，用于提高传感器采集数据的准确性，进而实现系统对家庭室内环境舒适度等级的综合评判，并通过实验对算法的有效性进行分析。

(6) 设计并实现系统的软件部分。分析节点间通信的工作原理，设计节点间通信的数据帧格式，对节点进行软件开发，实现组网通信；开发网关串口数据解析，数据上传功能；设计云平台应用，设计开发用户端软件。

## 1.4 论文的组织结构

全文是由六个章节组成，各章节的具体安排如下：

第一章是绪论，对课题的研究背景和相关领域的研究现状进行了详细概述与分析，说明了本文的研究意义与内容，给出了文章的组织结构安排。

第二章是论文相关的技术研究，首先介绍了物联网相关概念，描述了物联网体系结构，然后分别介绍了 ZigBee 技术及数据融合技术的基本概念以及特点。

第三章是对家庭室内环境监测系统的总体设计，分析了系统的设计目的与需求后给出了系统总体结构，然后介绍了系统硬件的设计，主要说明了无线节点主控芯片的选型、传感器的选型以及物联网网关的设计，最后说明了物联网云平台的设计。

第四章是本文采用的数据融合算法，首先说明数据融合的结构，提出了基于模糊理论的两级数据融合算法，分别是基于模糊贴近度的一级数据融合和基于模糊综合评判的二级数据融合。

第五章是系统软件设计，根据系统总体结构介绍了环境特征参数采集模块、数据汇集上传模块和数据存储处理模块的软件设计，说明了软件设计的流程。

第六章是实验分析与系统测试，对融合算法的有效性进行实验分析，对系统的各部分的性能进行了测试。

第七章是总结与展望，对全文研究内容作了总结与概括，并提出存在的缺陷以及今后的研究方向。

## 第二章 相关技术研究

本章主要对本文所涉及的相关技术作具体描述。首先介绍物联网的概念、特点、体系结构及关键技术,然后详细介绍了 ZigBee 的协议架构与网络拓扑以及数据融合技术的相关理论与常见算法,最后进行了总结。为后续章节的相关技术提供了理论以及技术基础。

### 2.1 物联网相关概念

#### 2.1.1 物联网概述

物联网是一种能实现让具有独立功能的普通物体互通互联的网络,通过利用各种的感知设备,结合不同的通信方式,将物与物连接入互联网,实现信息采集、传输与处理的自动化和智能化,达到随时随地进行科学管理的目的<sup>[41]</sup>。作为一种新型的网络模式,物联网将具有感知能力的网络融合在一起,兼容各种异构系统和分布式资源达到互操作性的最大化,利用各种智能计算技术分析处理海量数据信息,实现物与物(T2T)、物与人(T2H)、人与人(H2H)之间的智慧互联。因此,物联网具有全面感知、可靠传输和智能处理的三大特点<sup>[42]</sup>。根据物联网的概念与特点,物联网的体系结构被划分为三层,即感知层、传输层和应用层<sup>[43]</sup>。

#### 2.1.2 物联网体系结构

如上一节所述,物联网具有三层体系结构,包括感知层、传输层和应用层。图 2.1 给出了三层体系结构的描述。

##### (1) 感知层

感知层在物联网中扮演着感觉器官的角色,用来感知外界环境的各种各样的情况信息,通过采集这些信息来识别物体并将相关重要数据上传。感知层也被称为“设备层”,由物理对象和传感器设备组成,该层主要处理由传感器设备识别和收集对象的特定信息,并将这些信息转换为数字信号,以便其安全传输到信息处理系统。感知层涉及的技术包括 EPC 技术、RFID 技术、传感器技术、无线传感网技术等。

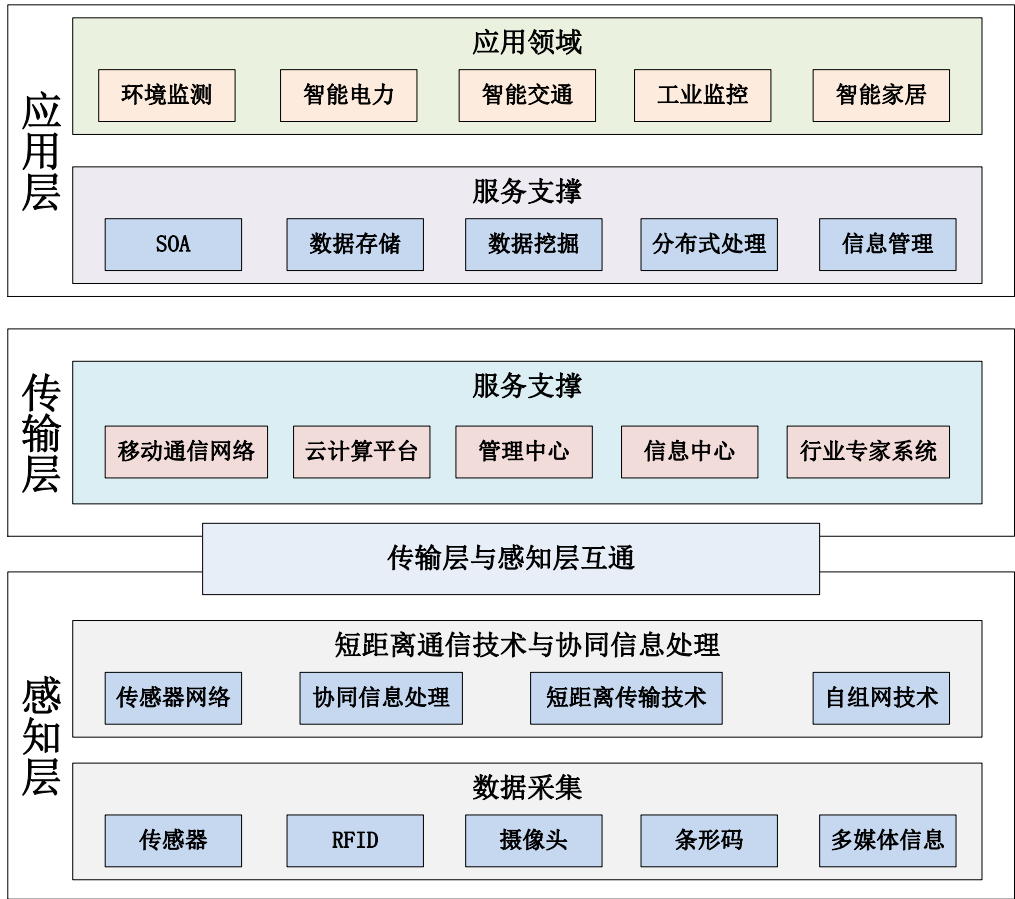


图 2.1 物联网体系架构

(2) 传输层

传输层被称为是物联网的神经系统，它负责通过各种网络将从感知层获取的信息传递到处理中心进行处理。传输层是基于通信网和互联网建立起来的，通过综合利用有线传输和无线传输，实现感知层数据和控制信息的双向传递、路由和控制，实现以数据为中心的存储、查询、挖掘、决策和分析。传输层的涉及的关键技术主要分为汇聚网技术、接入网技术和承载网技术。汇聚网技术主要包括 ZigBee、蓝牙和 UWB 等短距离通信技术。接入网主要采用 6LoWPAN、M2M 及全 IP 融合架构。承载网技术主要包括 3G、4G、WLAN、GSM、GPRS 和三网融合等技术。

(3) 应用层

应用层是物联网体系架构中的最上层，它为数据提供应用程序的全局管理，开发物联网的各种应用。物联网的应用依据应用目的和场景可分为四种类型，即扫描型、查询型、控制型和监控型。扫描型应用例如手机钱包，查询型应用如远程抄表、智能检索，像智能家居、智能交通便属于控制型应用，而环境污染监控则属于监控型应用。物联网应用层关键技术包括中间件、云计算、人工智能、数据融合等技术。

## 2.2 ZigBee 技术

### 2.2.1 ZigBee 技术概述

如 2.1.2 节所讲，在物联网传输层的整体结构中，汇聚网是其中的重要组成部分。短距离通信技术是支撑汇聚网的关键技术，而 ZigBee 技术便是其中之一，也是本文所涉及的主要技术。

在实际的应用中，会布置大量且分布范围广泛的节点来组成无线传感网络，大部分节点将会处于室外，只能用电提供电力来源，所以在进行信息传输时，就要考虑带宽、传输距离以及功耗等因素，为此 ZigBee 技术孕育而生。

ZigBee 是 ZigBee 联盟建立的一种短距离无线网络数据传输通信协议标准，在 IEEE 802.15.4 标准的基础上对网络层协议和 API 进行了标准化，主要用于近距离无线连接，可工作在 868MHz、915MHz、2.4GHz 频带上，最大数据传输率为 250kbit/s，具有低速率、低功耗、组网灵活等特性。ZigBee 设备可以在不更换电池的情况下连续工作几年。随着技术的发展，每个网络节点间的距离从标准的 75 米扩展到几百米甚至千米，并实现了与其他网络连接。由于 ZigBee 的多种特性，被广泛应用于无线传感器网络与物联网中。

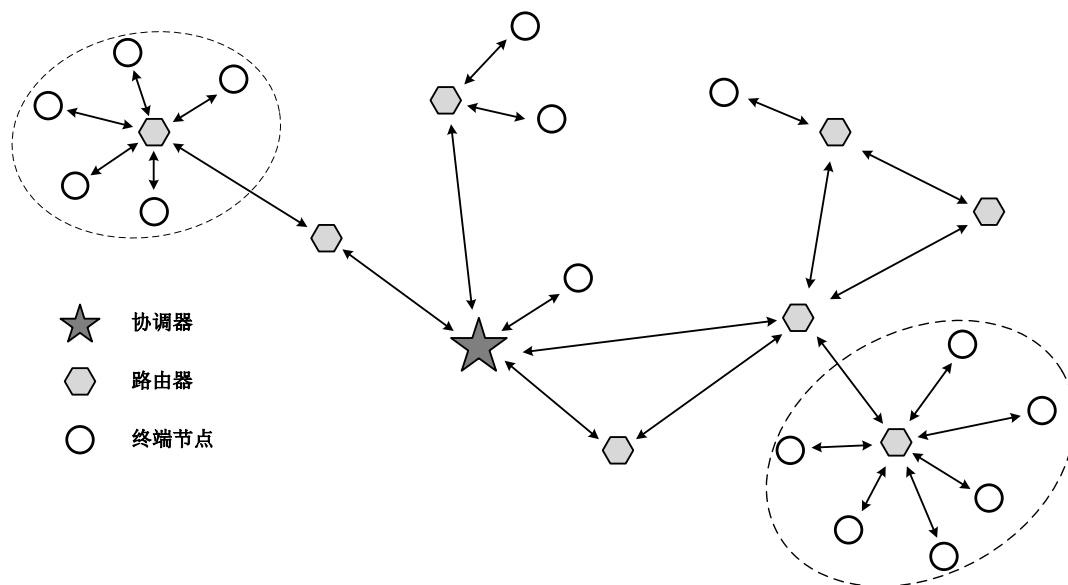


图 2.2 ZigBee 网络设备

ZigBee 网络支持全功能设备（FFD）和精简功能设备（RFD）两种物理设备。只有 FFD 可以担任协调器的角色，实现所有的 IEEE 802.15.4 协议功能，支持任何拓扑结构并可以和任何设备通信。RFD 只能和网络协调器通信，实现简单的网络功能。在 ZigBee 网络中存在 3

种逻辑设备，分别为协调器（Coordinator）、路由器（Router）和终端节点（End Device）。Coordinator 主要功能是建立一个网络、管理网络节点、存储网络节点信息等，属于 FFD。Router 负责将申请加入网络的新节点添加到网络中,然后进行管理和维护并和其他节点通信，也属于 FFD。End Device 不具备维护网络的能力，主要存在于网络拓扑末端，用于挂载采集测量数据的设备，属于 RFD。设备类型、角色及网络结构如图 2.2 所示。

### 2.2.2 ZigBee 网络拓扑

ZigBee 网络根据应用的需要，支持三种网络拓扑类型，即星形拓扑结构、树状网络拓扑和网状网络拓扑。如图 2.3 所示。

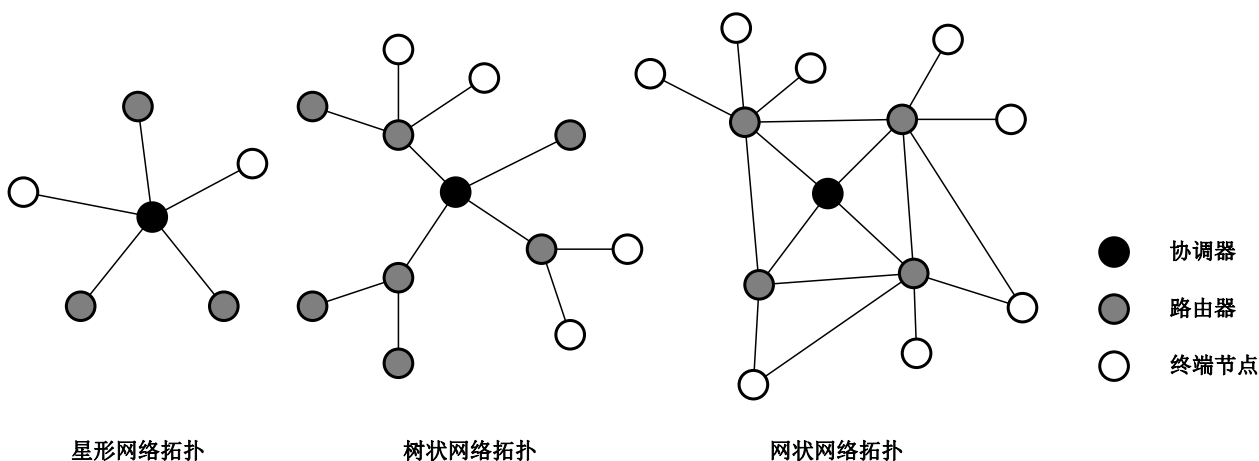


图 2.3 ZigBee 网络拓扑结构

#### （1）星形网络拓扑

星形网络拓扑是以协调器作为网络中心，其它节点直接与网络中心相连，形成的一种向外发散式的网络。星形网络属于集中控制型网络，节点间通信都会先经由协调器，所以星形网络会使中心节点的负担过重，节点之间灵活性变差，加之网络过于简单，覆盖范围有限而不适合大型网络，但星形结构的网络具有构造简单、易于管理、网络成本低的优点，在小型网络中仍然被广泛使用。

#### （2）树状网络拓扑

树状网络拓扑可以看做是多个星形网络拓扑的集合，利用路由器作为星形网络的中心，再与以协调器作为的根节点相连，使网络可以覆盖更广的区域。树状网络中的每个节点只有唯一的父节点，且只允许父子节点间相互通信，非父子关系的节点只能根据树状网络路由转发信息。这就导致了网络稳定性较差，如果某一节点断开，其子节点都将脱离网络。但树状网络还是保持了星形网络的简单性，所需资源较少，成本较低，网络覆盖范围大。



### (3) 网状拓扑结构

网状拓扑结构是基于树状网络拓扑实现的,但与树状网络拓扑最大的不同在于任意两个位于通信范围内 FFD 设备都可以直接通信。网状网络采用多跳式路由使不直接相连的节点通过路由转发的方式相互通信,使得网状网络覆盖面积较大。网状网络具有很强的灵活性,节点能通过多条路径传输数据,网络可靠性高。网状拓扑结构由于结构复杂,对节点存储能力和数据处理能力有更高的要求,导致网络组建成本较高。

### 2.2.3 ZigBee 协议架构

ZigBee 协议栈架构是建立在 IEEE802.15.4 标准基础上,IEEE802.15.4 标准仅定义了物理层和媒体访问控制层,ZigBee 联盟在此基础上对网络层和应用层以及安全服务规范进行的标准化。ZigBee 协议标准采用分层结构,由物理层(PHY)、媒体访问控制层(MAC)、网络层(NWK)和应用层(APL)构成<sup>[44]</sup>。Zigbee 协议架构如图 2.4 所示。ZigBee 协议栈架构的每层基本都由一个数据实体和一个管理实体构成,层与层间的实体通过服务接入点(SAP)交换原语实现信息的传递。

PHY 是协议架构的最下层,通过物理层数据实体(PLDE)和物理层管理实体(PLME)提供数据服务和管理服务,PLDE 和 PLME 分别通过 PD-SAP 和 PLME-SAP 与上层传递信息,主要实现无线物理信道上的数据发送和接收、空闲信道评估(CCA)、信道能量监测(ED)和链路质量指示等功能。MAC 位于第二层,包括 MAC 公共部分子层(MCPS)和 MAC 管理实体(MLME)。MCPS 主要提供 MAC 的数据服务,MLME 负责 MAC 的管理并维护该层的信息数据库(PIB)。MAC 的主要功能为完成个域网的关联和取消、保证网络设备安全和保证时隙机制等。

NWK 与 AFL 分别位于三、四层。NWL 是 ZigBee 协议架构的核心,它兼容了 IEEE802.15.4 标准使 MAC 得以正常工作,并且为 APL 提供服务接口。NWK 包括网络层数据实体(NLDE)和网络层管理实体(NLME)。NWK 主要功能为建立新网络并配置网络设备、管理网络设备的入网与退出、管理路由信息等。APL 包括应用支持子层(APS)、ZigBee 设备对象(ZDO)和用户应用对象。在 APL 中,每个设备可以有 240 个应用对象,每个应用对象只有唯一的终端地址,通过 APSDE-SAP 收发数据,其中地址 0 用于 ZDO。APL 的主要的功能为定义设备角色、设备间信息转发、地址映射等。

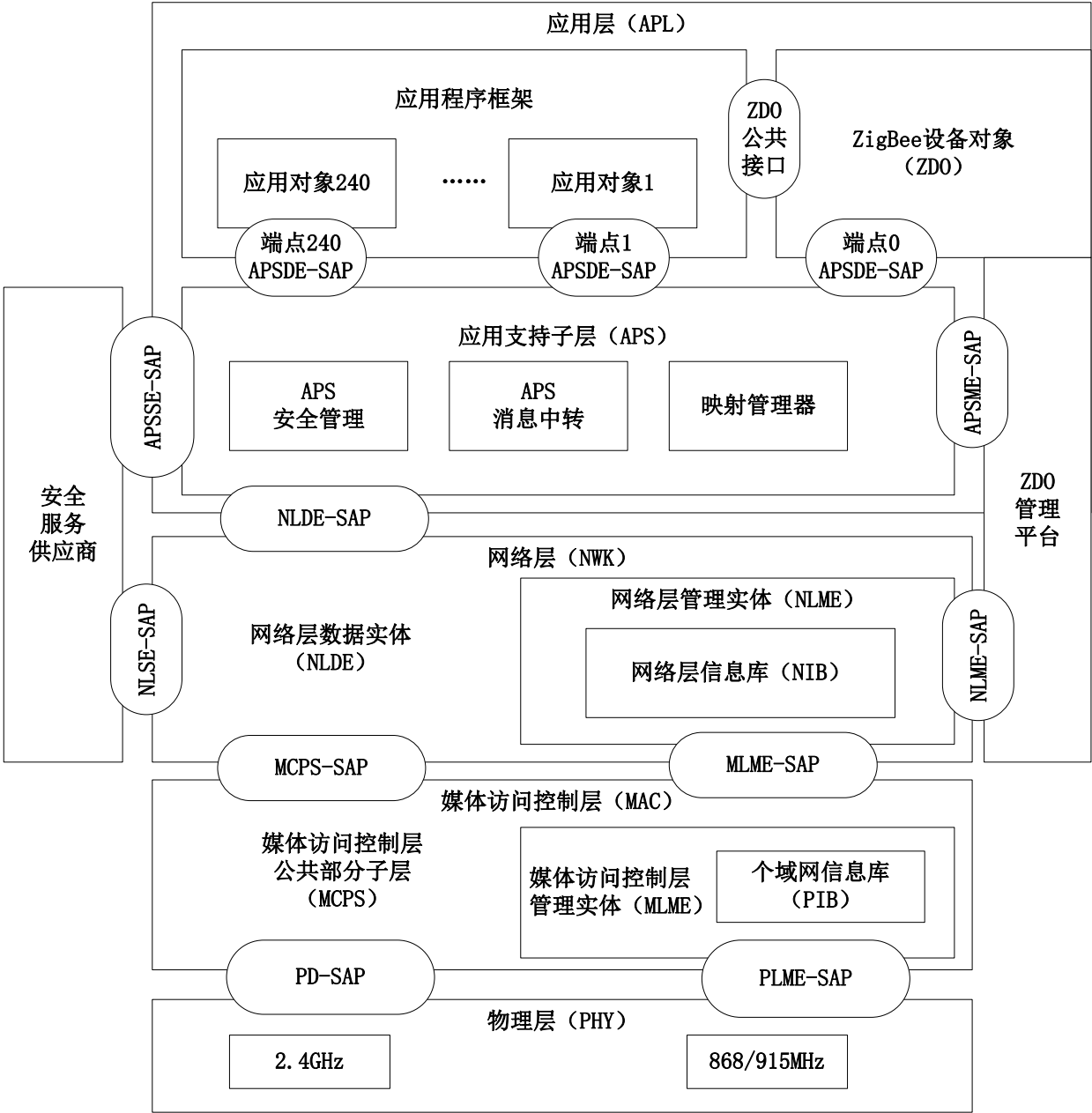


图 2.4 ZigBee 协议架构

2.3 数据融合技术

2.3.1 数据融合的基本原理

数据融合也称为多传感器数据融合或多传感器信息融合，可以综合处理来自同一目标的多个传感器或多源的信息，从而获得较单一信息源更为全面、可靠的结论。实际上，数据融合类似于模拟人脑综合处理复杂问题的过程。人体的眼睛、耳朵和鼻子等功能器官类比为多个传感器，景物、声音和气味类比为传感器探测到的信息，人脑能结合这些信息和已有的先验知识对其周围的环境和事件作出决策。

### 2.3.2 数据融合的结构与级别

在数据融合理论中, 根据输入信息形式以及融合功能的抽象层次之间的差异, 将数据融合分为不同的级别。早期提出的一种分级模型将数据融合划分为数据级、特征级和决策级三个级别。美国联合实验室 (JDL) 之后提出了一种较为通用的三级模型框架, 包括位置估计与目标身份识别、态势估计和威胁估计, 此种模型的划分依据为数据融合输出结果的不同。后来 JDL 又在之前的三级模型框架基础上, 将位置估计与目标身份识别分开, 将数据级、特征级和决策级融合包含于目标识别之中, 增加了检测级融合, 形成了更具实际指导性的五级融合模型。如图 2.5 所示, 模型的五级分别为检测级融合、位置级融合、目标识别级融合、态势估计和威胁估计。

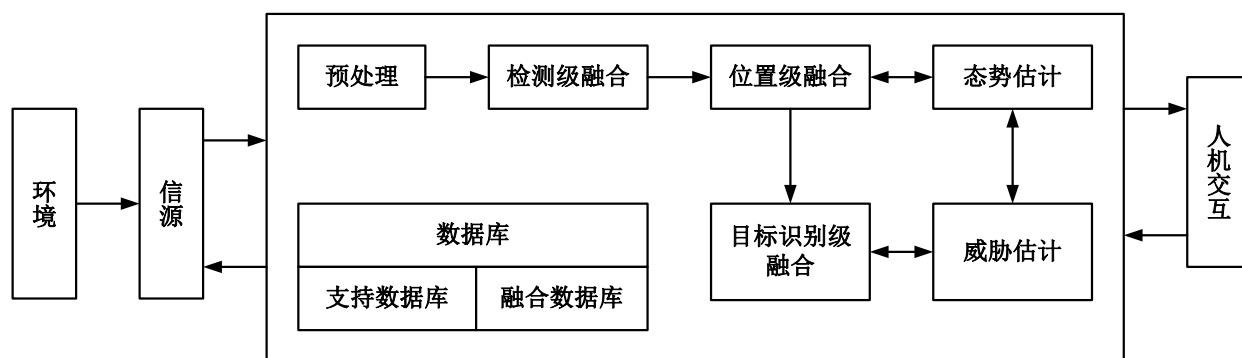


图 2.5 数据融合模型结构

#### (1) 检测级融合

检测级融合是在分布式信号处理系统中对从信号源获得数据信号进行融合, 得出数据信号层面上的融合结果。数据信息的主要处理方式是根据检测准则制定最优化的检测门限对数据信息进行筛选, 再将筛选过的数据信息传递至下一级, 直至在融合中心产生的最终检测结果。该级的结构模型主要有分散式结构、树状结构、串行结构、并行结构和反馈并行结构。

#### (2) 位置级融合

位置级融合是对传感器的测量轨迹、观测报告或状态估计进行直接的融合。位置级融合属于跟踪级别的融合, 通过综合多传感器的位置信息获得目标的位置和速度, 建立目标的航迹, 创建数据库存储目标信息, 被广泛用于目标跟踪系统。位置级融合可以对数据信息进行时间或空间上的融合, 也可以进行时空混合融合。该级主要有集中式、分布式、混合式和多级式结构。

#### (3) 目标识别级融合

目标识别级融合是对与目标识别或属性相关的数据进行融合, 这些数据来自多个传感器,

通过融合处理最终获得目标身份或属性的综合性估计。该级也称为属性级融合、属性分类或身份估计。目标识别级融合主要有数据级融合、特征级融合和决策级融合 3 种方法。

### (a) 数据级融合

数据级融合即像素级融合，此种方法直接融合采集到的原始数据，是面向数据的融合。这种数据融合对传感器的原始数据及预处理阶段产生的信息分别进行融合处理，能够最大可能地保持信息的原始性。融合所需要的原始数据来源于同类型的传感器，一般采用集中式融合体系。数据级融合所处理的传感器信息量较大，因而处理代价较高。传感器的原始数据会具有不确定性、不完全性和不稳定性，在融合时还需要有较强的数据过滤能力来降低无效数据对融合结果的干扰。融合过程如图 2.6 所示。

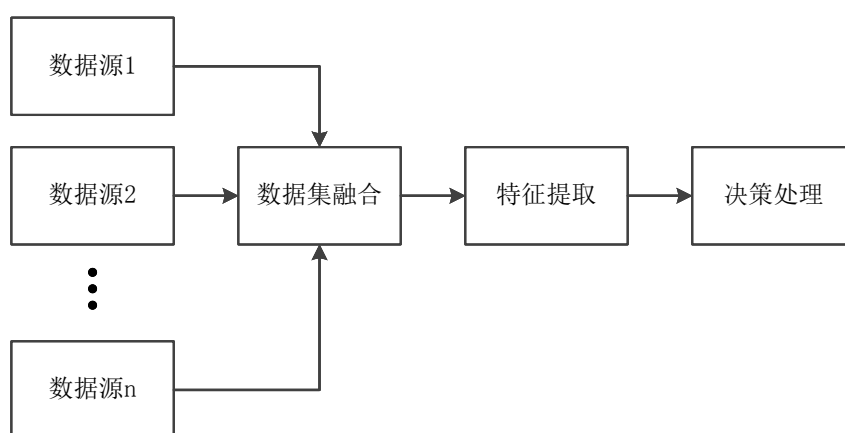


图 2.6 数据级融合过程

### (b) 特征级融合

特征级融合是中间层次的融合，它将从不同数据源获取的原始数据用于提取出对象的特征信息并融合为特征向量，再利用特征向量来反映事物的属性，并对信息进行分类、汇集和综合处理，是面向特征的融合。特征级融合分为目标状态信息融合和目标特性融合。目标状态信息融合是目标跟踪领域主要融合方法，融合系统对数据进行预处理后完成数据配准，再实现参数关联和状态矢量估计。目标特性融合主要用于特征层的联合识别，主要采用模式识别的相应技术，先对特征进行相关处理，再对特征矢量进行分类组合。融合过程如图 2.7 所示。

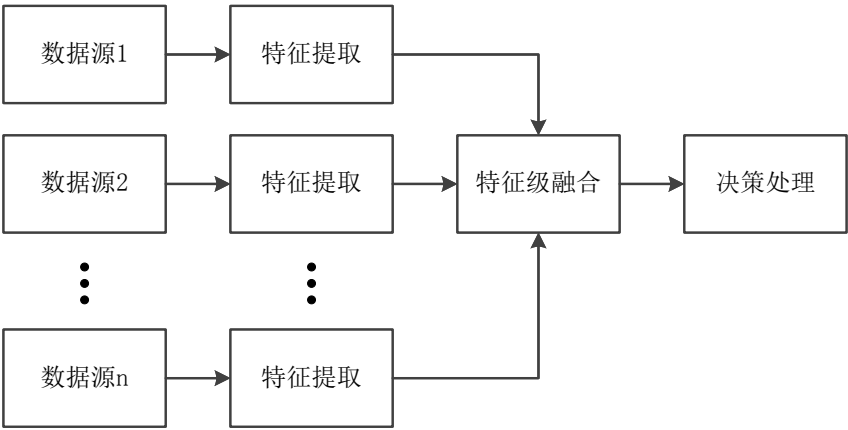


图 2.7 特征级融合过程

（c）决策级融合

决策级融合使用不同类型的传感器来观测同一个目标，在本地将每个传感器所采集的信息进行特征抽取、识别或判决，得到对所观测目标的初步结论，依据相关准则和每个判定的可信度来作出最优的决策。决策级融合是面向应用的高层次融合，它以具体决策问题的需求为出发点，充分利用目标的各类特征信息，给出最终的简明而直观的决策结果。决策级融合处理信息方便灵活，能有效反映目标或环境的不同类型的信息，并且可以处理非同步数据，大大降低了信息关联。融合过程如图 2.8 所示。

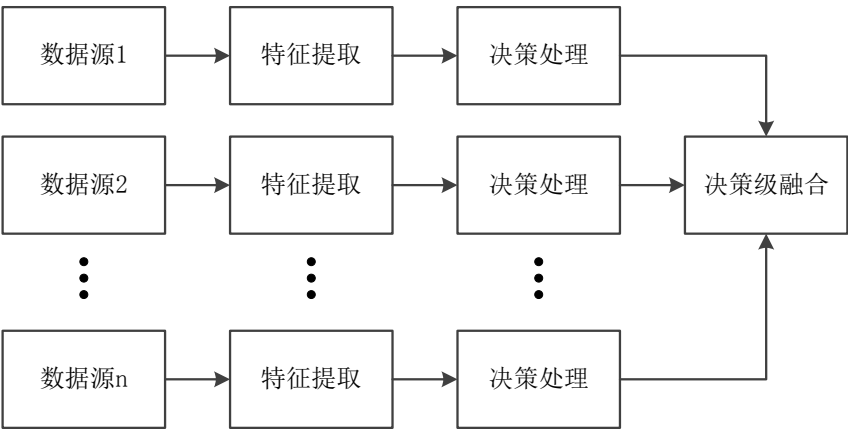


图 2.8 决策级融合过程

上述三种融合级别各有特点，在具体的系统中可依据融合的目的与条件加以选用。具体的特点介绍如表 2.1 所示。

（4）态势估计

态势估计主要用于军方的 C<sup>3</sup>I 系统中，是对敌我双方战斗力部署以及动态变化情况的评估过程。态势估计能够确定战争爆发的深层次原因，推断并预测敌方未来的活动意图。再通过估计敌方兵力结构、特点，得到战场综合态势图，为我方提供最优作战决策。

(5) 威胁估计

威胁估计是在态势估计的基础上，综合机动力、行为企图、破坏力和运动模式推断敌方在未来对我可能存在的威胁，预测出发生战争的几率、过程或严重性，为我方能够有效抵挡敌方进攻提供风险评估。威胁估计最重要的作用是能定量表示敌方作战能力，帮助我方更准确地找出敌方漏洞。威胁估计也主要用于 C<sup>3</sup>I 系统中。

表 2.1 三种融合级别的特点比较

特点 \ 级别	数据级融合	特征级融合	决策级融合
信息处理量	大	中	小
信息损失	小	中	大
容错性	差	中	优
抗干扰性	差	中	优
计算量	大	中	小
实时性	差	中	好
传感器依赖性	大	中	小
融合水平	低	中	高

2.3.3 数据融合的主要方法

数据融合算法主要分为经典方法和现代方法两大类。经典的融合算法是指基于经典数学理论的融合算法，主要包括：加权平均法（Weighted Average Method）、贝叶斯估计法（Bayesian Inference）、D-S 证据理论（Dempster-Shafer Inference）、卡尔曼滤波（Kalman Filter）等。现代的融合算法是指依据人工智能理论、现代信息论等发展起来的融合算法，主要包括：聚类分析（Cluster Analysis）、神经网络（Neural Networks）、模糊逻辑（Fuzzy Logic）、粗糙集理论（Rough Set Theory）、支持向量机（Support Vector Machines）等。这些融合算法的简要介绍如表 2.2 所示。

表 2.2 融合算法的简要介绍

算法名	算法描述	优点	缺点
加权平均法	将从多个传感器获得的信息加权平均后作为最后的融合值	信息丢失较少, 适合融合传感器的原始数据	如何分配从传感器获取的数据权值以及选取合适的权值计算方式
贝叶斯估计法	在设定观测空间先验概率的前提下, 利用贝叶斯理论计算出后验概率, 就可以处理不确定性问题	直观性好, 有数学公理基础, 容易理解, 计算量中等	合适的概率分布和观测空间的先验概率较难获得, 无法区分“不知道”与“不确定”信息
D-S 证据理论	使用集合来表示命题, 将对命题的不确定性描述转化为对集合的不确定性描述	有较强的理论基础, 不要求提供先验知识, 对区分“不知道”与“不确定”信息的灵活性较高	计算量随信源数的增长呈指数级别增长, 判决规则有较高的主观性
卡尔曼滤波	利用测量模型的统计特性和状态空间方程, 递推得到在统计意义下的最优融合数据估计	能有效减小数据的误差, 不需要大量的存储空间	计算量大, 对错误数据较敏感
聚类分析	将数据集划分为若干互不相交的簇, 使得同一簇内结果的“簇内相似度”高且“簇间相似度”低	不要求提供先验知识, 结果较为直观, 结论简明	对数据的分离度要求高, 忽略了数据的非线性特性
神经网络	模仿生物神经网络的结构和功能的数学或计算模型, 对函数进行估计	不要求提供先验知识, 能高速并行运行, 有较强的自学习、自适应、自组织以及容错能力	计算量大, 缺少有效的学习机制, 难以获取全局最优解
模糊逻辑	对于具有模糊性的检测目标, 通过建立隶属函数得出可信程度, 从而进行识别和分类	能精确处理信息的不确定性问题, 适用于决策级融合, 响应速度快	对信息的表示、处理缺乏客观性
粗糙集理论	通过利用已知的知识库来近似刻画“不精确”或“不确定”的知识	不要求提供先验知识, 对“不确定”性的描述、处理相对客观	对含糊概念刻划的太简单, 缺乏处理“不精确”或“不确定”数据的机制, 需要其他方法补充
支持向量机	在线性可分的条件下, 通过建立一个最优决策超平面, 使该平面两侧距离该平面最近的两类样本之间的距离最大化	可处理样本空间数据的高维问题, 能解决非线性问题, 能避免局部极小点问题, 有良好的泛化性能	对参数调节、核函数选择以及缺失数据较敏感, 针对非线性问题还没有通用的解决方法

## 2.4 本章小结

本章主要介绍了物联网的相关概念。首先分析了物联网的三层体系结构以及涉及到的关键技术。之后分小结重点介绍了物联网中的 ZigBee 技术和数据融合技术, 介绍了 ZigBee 技

术的概念，分析了 ZigBee 技术的协议架构与网络拓扑。最后对数据融合技术的基本原理、数据融合的级别与结构、数据融合的主要方法做了详细的分析。



### 第三章 系统总体设计

本章主要对系统的总体设计做具体说明。首先说明系统的总体结构，然后分别介绍系统各主要部分的硬件的设计，包括无线节点主控芯片选型、传感器选择和物联网网关设计。最后介绍了物联网云平台的设计。

#### 3.1 系统总体结构

本文所研究的系统目标在于对家庭室内环境的监测，能够实现对室内环境特征参数的监测，并应用数据融合技术对数据进行融合处理，进而对家庭室内环境的舒适度等级做出综合评判。具体而言，本家庭环境监测系统可实现以下功能，如图 3.1 所示：

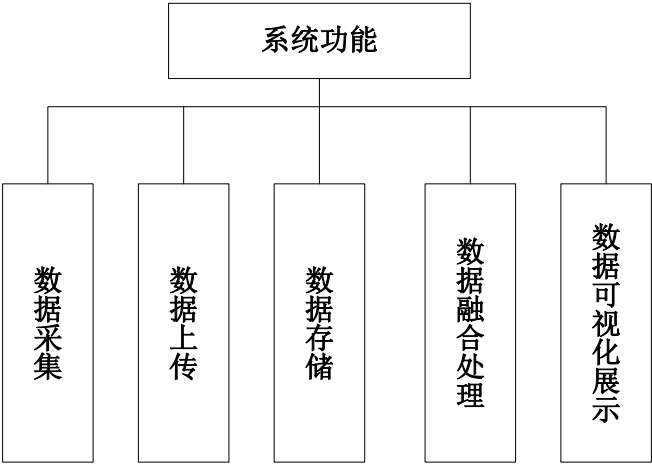


图 3.1 系统功能图

数据采集与上传。系统的最底层主要由无线网络组成，网络中的终端节点分别挂载传感器实时采集环境特征数据，包括温度、湿度、光照强度以及有害气体含量。网络的汇聚节点收集各个终端节点的数据，并发送至与之相连接的物联网网关。物联网网关对数据进行解析、封装，最后上传至物联网云平台。

数据存储。本系统的数据存储分为云端存储于本地存储两部分。系统利用物联网云平台实现数据的存储功能，将系统采集的数据存到云端数据库，用以后续查询和处理。本地存储由用户端的数据库实现，用于辅助用户端的功能实现。

数据融合处理。本系统利用数据融合技术，对监测同一环境特征的多个传感器数据做融合处理，提升此环境特征数值的准确性。然后对多种环境特征数据进行数据融合，对家庭室内环境的舒适度等级做出综合评判。

数据可视化展示。本系统在用户端提供的可视化的界面展示，显示环境特征参数的采集数据，并给出数据融合处理后的结果，且操作简单。此外，也要能满足能在移动设备查看数据的需求。

根据系统设计目的与可实现的功能，并基于物联网三层体系结构，本文将系统整体结构划分为包含感知层、传输层及应用层的三层结构。感知层实现数据采集，传输层实现数据的上传，应用层实现系统的具体业务逻辑。本文结合系统每层的实现功能及所需要的软硬件资源，将系统整体结构的三层重新命名为环境特征参数采集模块、数据解析上传模块和数据存储处理模块。具体的系统结构如图 3.2 所示。

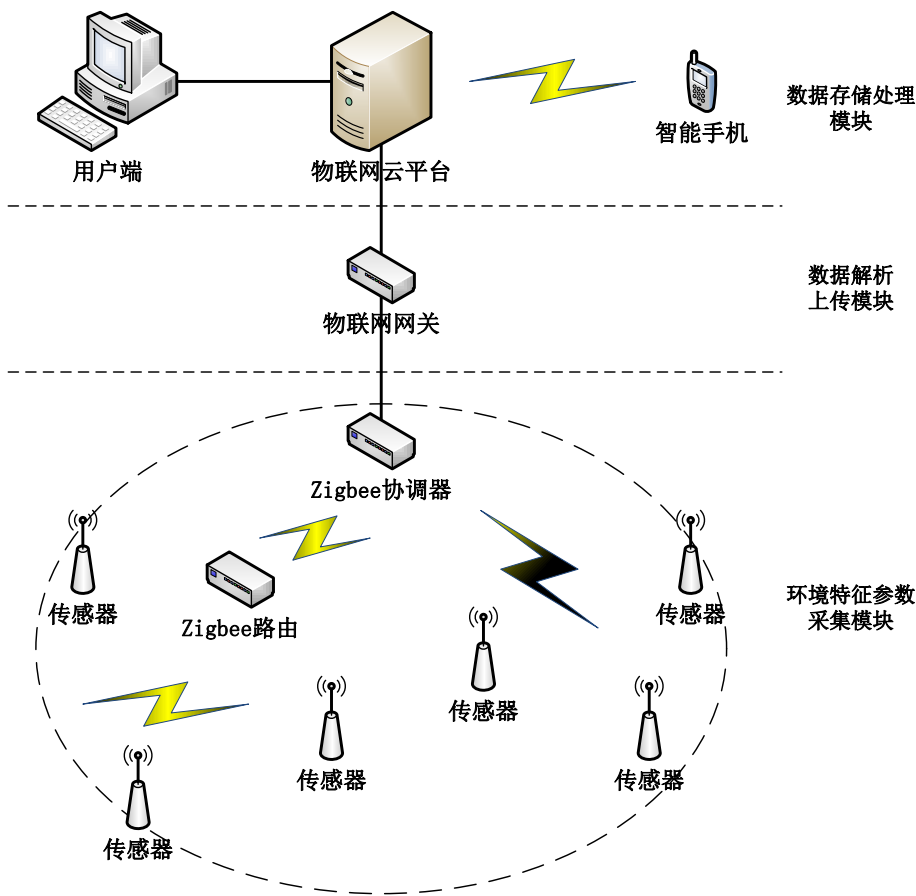


图 3.2 系统结构图

环境特征参数采集模块由 ZigBee 节点与传感器构成，主要实现环境特征数据的采集，并将数据汇聚至采集网络的中心节点，即 ZigBee 协调器，再传送给物联网网关。数据解析上传模块主要由物联网网关构成，主要负责连接协议不同的网络，使数据跨网络传输。中心节点接收到的数据汇聚至网关，网关对数据进行解析、封装，最后上传至物联网云平台。数据存储处理模块的核心是物联网云平台，平台存储系统采集的所有数据并将数据提供给用户端，用户端对数据融合处理得出对环境的评判结果。

## 3.2 系统硬件设计

### 3.2.1 无线节点主芯片选型

在确定选择无线节点的主控芯片之前，先要确定无线网络的通信方式，选择合适的通信协议。本系统的无线网络主要用于采集并传输环境参数，数据量不高且对数据的传输速率的要求也不高。本系统在设计时，为了排除节点供电布线对家庭室内环境的影响，节点选择使用电池供电，这就需要对节点的能耗提出要求。根据第二章对 ZigBee 技术的相关介绍，使用 ZigBee 协议组建无线网络可以良好的满足系统设计的要求，故本文选择 ZigBee 协议组网。

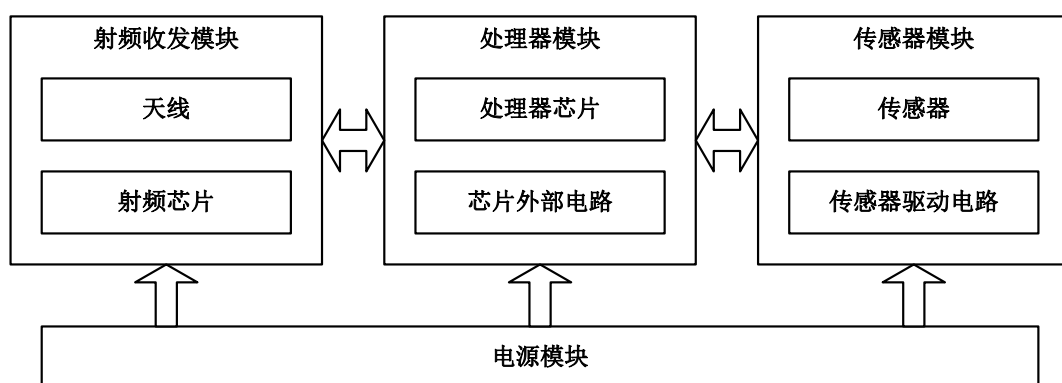


图 3.3 无线节点结构框图

图 3.3 为无线节点结构框图，无线节点在设计使用上除了传感器模块与电源模块外，必须具有支持无线通信协议的射频收发器和处理器，具体实现时就需要分别选择射频芯片和处理器芯片。然而现在有许多厂商将两者结合在一起，推出了片上系统（SoC）。本文系统的无线节点选择 TI 推出的 SoC 芯片 CC2530F256。

CC2530F256 支持 2.4GHz 的 IEEE 802.15.4 标准、ZigBee 协议栈和 RF4CE 协议。CC2530F256 内置了业内领先的 2.4GHz IEEE 802.15.4/ZigBee RF 收发机 CC2420，并结合了工业标准的增强型 8051MCU，提供 MCU 和无线设备之间的接口，提高了无线通信模块与单片机组合时的可靠性。CC2530F256 具有 8KB 的 SRAM 和 256KB 的空间可供系统编程使用。CC2530F256 提供丰富的外设，包括 21 个 GPIO 接口、2 个 UART 接口并可复用 SPI 接口、8 通道可配置分辨率的 12 位 ADC，以及其它功能。另外 CC2530F256 包括一个电源管理功能，可以实现使用不同供电模式低功耗运行，延长电池寿命。

CC2530F256 支持最新的 ZigBee 协议 ZigBee 2007/PRO，其具有更好的节点控制机制、网络流量管理机制和更好的频率捷变管理机制，功耗相对较低，支持各种网络拓扑结构。CC2530F256 支持主流无线网络操作系统 Z-Stack，可以使用 IAR 嵌入式工作台进行开发。目

前 CC2530F256 库存量大且价格低。

3.2.2 传感器选型

(1) 温湿度传感器

本系统选用温湿度复合数字传感器模块 AM2302 来测量温度和湿度。AM2302 应用专用的数字模块采集技术和温湿度传感技术，内置一个高性能 8 位单片机控制电容式感湿元件和高精度测温元件，将感知的温湿度经校准后以数字信号的形式输出，具有较高的可靠性与稳定性。每个 AM2302 都经过极为精准的校准，校准系数以程序的形式储存在单片机中。AM2302 采用标准的数字单总线接口，4 引脚封装，电路简单易实现且数据信号稳定。AM2302 使用便捷，性能优良，常应用于测试及检测设备、自动控制、医疗、气象及其它相关温湿度检测控制领域。表 3.1 展示了 AM2302 的性能参数。

表 3.1 AM2302 性能参数

参数		AM2302
电气特性	供电电压 (V)	3.3~5.5
	采样周期 (s/次)	2
	功耗 (mA)	0.5 (测量)
		0.015 (休眠)
温度	量程范围 (℃)	-40~80
	精度 (℃)	±1
	响应时间 (s)	<10
相对湿度	量程范围 (%RH)	0~99.9
	精度 (%RH)	±2
	响应时间 (s)	<5

(2) 光强传感器

本系统选用带有环境光强度传感器芯片 BH1750FVI 的传感器模块采集环境光强。BH1750FVI 采用数字型两线式串行总线接口 (I<sup>2</sup>C) 交换数据，可通过指令直接读取 16 位光强数字值。其光强探测范围广，光谱灵敏度接近视觉，对光源的依赖性弱，受红外线影响小。BH1750FVI 可以根据收集的光线强度数据来调整液晶或者键盘背景灯的亮度，因此被广泛应用于各种电子产品中。表 3.2 展示了 BH1750FVI 的性能参数。

表 3.2 BH1750FVI 性能参数

参数	BH1750FVI
量程 (lx)	1~65535
精度 (lx)	±10
工作电压 (V)	2.4~3.6
工作电流 (mA)	0.19
工作温度 (℃)	-40~85
功耗 (mW)	260

(3) 甲醛传感器

本系统选用数字空气质量模块 SM427N001 来监测甲醛含量。SM427N001 是一款高性价比的串口数字输出的空气质量传感器模块，它通过简单的电路连接就可以通过 UART 接口读取数据。SM427N001 经过老化、标定和校准，具有良好的一致性以及对甲醛、苯等有机挥发气体极高的灵敏度，并能保证长期工作的稳定性。表 3.3 展示了 SM427N001 的性能参数。

表 3.3 SM427N001 性能参数

参数	SM427N001
气体量程 (mg/m <sup>3</sup> )	0.01~5.0
分辨率 (mg/m <sup>3</sup> )	0.01
工作电压 (V)	5.0±0.2
工作电流 (mA)	≤80
工作温度 (℃)	-10~50
工作湿度 (%RH)	≤95
响应时间 (s)	≤10
使用寿命 (年)	≥10

(4) 一氧化碳传感器

本系统选取 MQ-7 型气体传感器用于采集一氧化碳含量。MQ-7 是一种气电变换器，把可燃性气体的浓度转化为电压或者电流信号。MQ-7 利用气敏材料二氧化锡半导体制造而成的，对一氧化碳的灵敏度高，可检测多种含有一氧化碳的气体，广泛用于家庭环境的气体泄漏装置且成本低。

### 3.2.3 物联网网关设计

本文系统的环境特征参数采集模块使用的是 ZigBee 网络传输数据，数据要到达上层的数据存储处理模块需要通过以太网传送。然而 ZigBee 网络与以太网的传输协议不同，数据无法直接跨网络传输，这就需要网关设备在两个相互独立的网络之间建立连接。网关设备在具体实现中需要具备关键两部分，一是与 ZigBee 协调器相互通信的硬件接口，二是可接入以太网的通信模块。除此之外还需要有一定的运算处理能力，并且便于开发。

表 3.4 Raspberry Pi 各版本参数

型号	Zero/Zero W	RPi A+	RPi B	RPi B+	RPi2 B	RPi3 B
SoC	BCM2835				BCM2836	BCM2837
CPU	ARM1176JZF-S 700MHz 单核				ARM Cortex-A7 900MHz 四核	ARM Cortex-A5 3 1.2GHz 四核
GPU	Broadcom VideoCore IV， OpenGL ES 2.0， 1080p 30h.264/MPEG-4 AVC 高清解码器					
RAM	512MB	256MB	512MB		1GB	
USB 2.0	1		2	4		
	支持 USB hub 扩展					
视频输出	RCA 视频接口输出（仅 1 代 B 型），支持 PAL 和 NTSC 制式， 支持 HDMI（1.3 和 1.4）， 分辨率为 640 x 350 至 1920 x 1200 支持 PAL 和 NTSC 制式					
音频输出	3.5mm 插孔（Zero 无此项），HDMI 接口					
SD 卡接口	Micro SD		标准 SD	Micro SD		
网络介入	无 （Zero W 配有 WiFi 和蓝牙）		10/100 以太网接口（RJ45 接口）， RPi3 B 配有 WiFi 和蓝牙			
GPIO	40		26	40		
额定功率	（低于 RPi B）		700mA 3.5W	600mA 3.0W	1000mA 5.0W	（高于 RPi2 B）
电源输入	5v（Micro USB 或 GPIO 引脚供电）					
总体尺寸 （mm）	65×30×5	65×56	85.6×53.98		85×56×17	
操作系统	Debian GNU/Linux、Fedora、Arch Linux、RISC OS RPi2 B 和 RPi3 B 还支持 Windows10 和 Snappy Ubuntu Core					

基于以上几点原因，本系统采用物联网界较流行的卡片电脑 Raspberry Pi（树莓派）作为网关的硬件开发平台。Raspberry Pi 应该算得上世界上最小的台式机了，其差不多与信用卡的

大小相同,因此称为卡片机。麻雀虽小,但五脏俱全,Raspberry Pi 具有普通电脑的所有功能,且性能卓越又价格低廉。从 Raspberry Pi 诞生至今,已经迭代的多个版本,表 3.4 给出了 Raspberry Pi 各版本的性能参数。本系统物联网网关的开发选用 Raspberry Pi 的最新版本第三代 B 型,简称 RPi3 B。此版本拥有历代最高的 CPU 主频与最大的 RAM 容量,性能足以满足网关的硬件开发需求。RPi3 B 除了支持 RJ45 网络接口接入以太网外,还支持 WiFi 方式接入,这更为网关的开发提供了便利。RPi3 B 可以运行基于 Linux 发行版本 Debian 的 Raspbian 操作系统,支持多种语言开发,比传统的 ARM 开发板简单实用。RPi3 B 的 40 脚 GPIO 端口将 UART 串行总线、I<sup>2</sup>C 总线与 SPI 总线功能引出,方便了设备间通信。

本系统中网关设备 RPi3 B 与 ZigBee 协调器使用 UART 串行总线作为相互通信的硬件接口,RPi3 B 中运行 Raspbian 操作系统,可以通过系统配置使用 RJ45 网络接口或 WiFi 方式接入以太网。

### 3.3 物联网云平台设计

物联网云平台可以理解为具有物联网服务功能的大数据处理中心,能够提供物与物之间数据的通信与交换功能。从数据的层面上看,物联网云平台处于系统的中心位置,云平台要与传感器节点之间保持紧密的联系,又要能够将数据提供给用户端,即云平台能接收传感器节点所采集的数据,并将数据有效的存储起来,同时云服务器能够提供通信接口,使用户能够通过通信接口向云平台发送控制指令查询云平台上存储的数据,并且能够发送指令对传感器节点进行控制。

许多物联网应用方案提供商也都提出过云平台方案,但方案 and 解决思路都只用于解决特定问题,且并未向公众开放使用。然而物联网公共云平台在平台的开发、服务器集群的架设以及相关维护上已提供的完整的方案,在移动终端的开发以及软硬件等内部通信方面也提供解决方案,这对于众多开发者而言,大大提高了系统的设计和搭建效率,大幅降低了人力财力成本。本系统采用物联网公共云平台作为云平台的解决方案,在比较了国内几款物联网平台(例如阿里云、百度云、yeelink 以及 OneNET)后,综合考虑平台功能与开发效率,最后选择中国移动物联网开放设备云平台 OneNET。

#### 3.3.1 云平台架构与资源管理

OneNET 是中国移动物联网公司推出的物联网开放平台,该平台能够向用户提供多种云平台级的服务,包括物联网领域设备连接、协议适配、数据存储、数据安全、大数据分析等。

OneNET 为适配各种网络环境提供了多种网络协议类型，以便于各种智能终端快速准确接入，并提供丰富的 API 和应用模板以支持智能硬件和应用软件的开发，同时平台还提供大数据存储、分析服务，能够有效降低物联网部署和应用开发的成本。

OneNET 设备云平台架构示意图如图 3.4 所示，OneNET 设备云平台在云计算服务中作为 PaaS 层，分别向为 SaaS 层和 IaaS 层提供中间层核心能力。

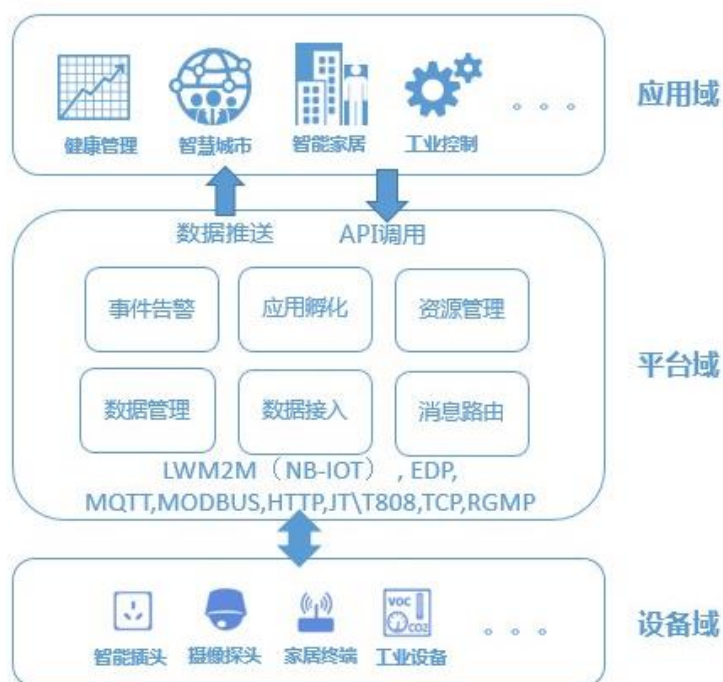


图 3.4 OneNET 设备云平台架构示意图

OneNET 设备云平台对资源的管理采用层次化的结构，如图 3.5 所示。对于每个用户而言，可以创建多个产品，产品对应用户的真实设备，是用户在 OneNET 上最上层的云端资源，是对数据进行封装管理的形式。OneNET 设备云平台允许产品通过公开协议和私有协议两种方式接入平台。在公开协议产品中，用户可以创建多个设备、APIKey、应用、触发器，并可以对这些资源进行管理。在每个设备下，用户可以为该设备创建多个数据流，数据流用于存储数据，并可以在数据流内新增和查询数据点。OneNET 设备云平台使用 APIKey 进行操作的鉴权以及权限控制，依据 APIKey 字段判别该用户是否具有对应操作的权限。



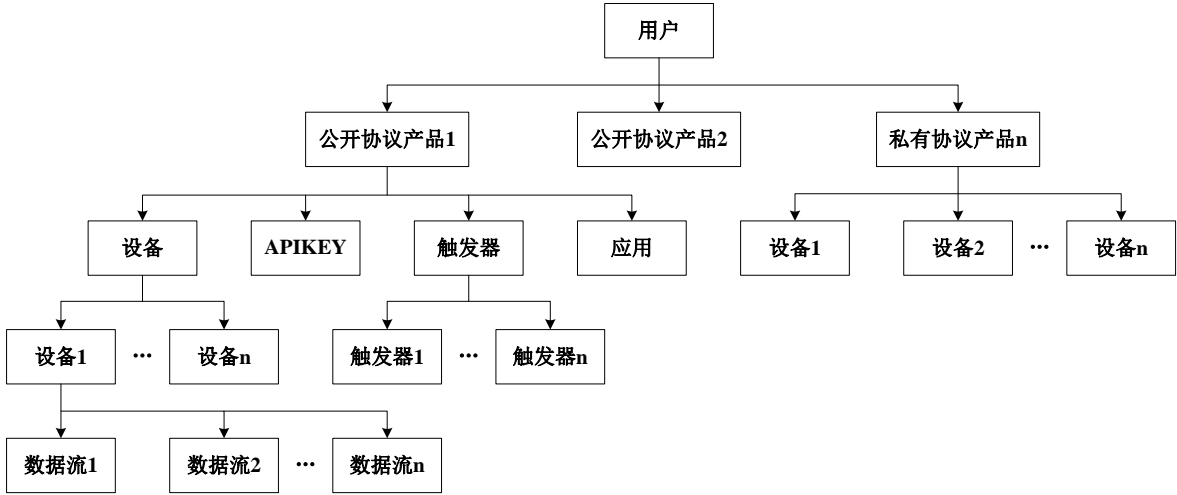


图 3.5 OneNET 设备云平台资源管理层次结构图

3.3.2 云平台通信协议

OneNET 设备云平台支持多种网络通信方式，以能够满足不同终端设备接入平台的需求，主要可支持以太网口接入、WiFi 方式接入以及 GPRS 方式接入。在项目具体开发时，根据实际需要选择不同的通信方式，为开发提供极大的便利。

表 3.5 OneNET 设备云平台协议

分类	协议	功能特点
公开协议	EDP	长连接协议；数据加密传输；终端数据点上报；平台消息下发（支持离线消息）；端到端数据转发；支持 float 型、int 型、string 型、JSON、二进制类型数据点
	MQTT	长连接协议；终端上报数据点，平台下发消息；提供基于 Topic 的消息订阅、发布以及推送，支持单播或组播；支持 float 型、int 型、string 型、JSON 类型数据点
	HTTP	短连接协议；终端上报数据点，平台侧提供相关资源管理；支持 float 型、int 型、string 型、JSON、二进制类型数据点
	Modbus	长连接协议；平台作为主机，周期性下发命令，单条命令的内容以及下发周期由单条数据流的属性确定；终端上报的数据将自动转化为数据流中的数据点；预先设置处理公式，对数据进行初步处理
	JT\T808	支持 9 种 JT/T808 协议的消息报文；终端上报数据到平台进行存储；终端和平台可以保持长连接，可及时检测设备的在/离线状态；标准的“位置信息汇报”等消息格式，方便已支持 JT/T808 协议的终端快速接入平台；基于“上/下数据透传”模式，可以灵活上传用户自定义的数据，接收来平台的数据
	TCP 透传	长连接协议；支持用户自定义脚本；高灵活性；支持一个连接传输多个设备数据
私有协议	RGMP	设备上电后自动注册激活（无需提前分配设备标识）；上传设备传感器数据；上传设备事件；远程配置设备程序；远程控制设备（发送通知信息）；支持 OTA

OneNET 设备云平台支持多种行业标准协议的解析和转换，使平台可以应用到不同的行业场景之中。支持的协议包括 EDP、MQTT、HTTP、Modbus、JT\T808、LWM2M（NB-IOT）

与 TCP 透传。除了支持多种公开协议外，OneNET 设备云平台还支持私有接入协议 RGMP。表 3.5 给出了各协议的功能特点。根据分析比较，本文系统选用 WiFi 方式接入平台，并使用 HTTP 协议通信。

### 3.4 本章小结

本章主要对系统的总体设计做出说明，首先基于物联网的体系结构确定了系统的三层总体结构。然后分别介绍系统各主要部分的硬件设计，确定选用 CC2530F256 作为系统的无线节点主控芯片，对系统监测所需的传感器进行了选择。设计了物联网网关模块，选用 RPi3 B 作为网关硬件开发平台，确定了网关的通信方式。最后选择 OneNET 作为系统使用的物联网云平台，并分析介绍了云平台的架构、资源管理和通信协议。

## 第四章 基于模糊理论的数据融合算法

对环境进行检测需要采集多种环境特征数据，这就需要使用多种传感器。采用多传感器数据融合的方式对采集数据进行处理，可以提高系统测量的准确性以及决策的一致性和可靠性，本文监测系统运用模糊理论中的模糊贴近度与模糊综合评价法提出了基于模糊理论的数据融合算法，应用于室内环境舒适度评判系统，以实现对室内环境舒适度的综合评判。本章将给出数据融合结构和融合算法的具体设计。

### 4.1 系统数据融合结构

本文所介绍系统的数据融合结构如图 4.1 所示，采用了两级数据融合结构模式。本文选取温度、湿度、光照、甲醛、一氧化碳五个家庭室内的环境特征数据作为监测目标。家庭室内的环境监测系统通过各个传感器，对各个监测点监测的环境特征参数进行实时采集，从而获取家庭室内环境情况，并以此对家庭室内环境状况做出正确、及时的判断。

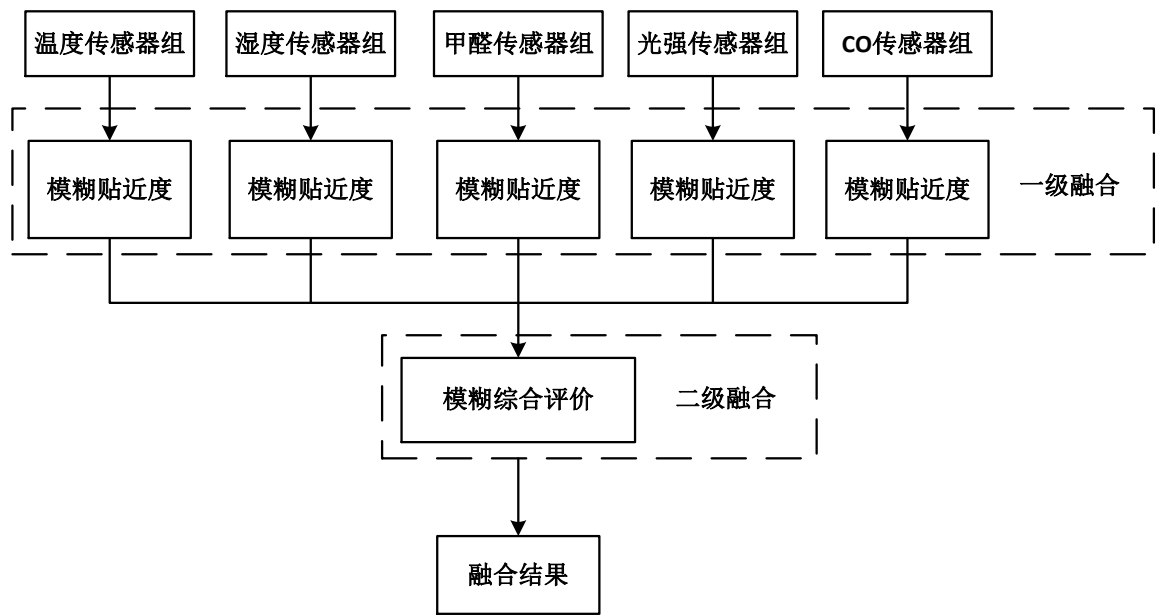


图 4.1 系统数据融合结构图

第一级信息融合是局部融合，属于目标识别级中的数据级的融合。采用多传感器对同一种环境特征参数进行监测，应用基于模糊贴近度的加权融合算法，融合各传感器之间的数据信息，这对比使用单传感器而言，可以减少传感器自身测量结果的局限性与不准确性，使得到的环境特征参数更接近真实值。同时对五个环境特征参数进行采集，通过第一级融合后，获得五个环境融合值，将作为输入量用于第二级数据融合。

第二级数据融合是全局融合，属于目标识别级中的决策级融合。第二级数据融合是基于第一级信息融合的基础上，对各个环境特征参数的融合值进行横向分析。家庭室内环境舒适等级需要综合多方面的因素，仅由一个参数难以获得对环境舒适度状态的一致性估计，加之环境舒适等级的界限不明确，存在模糊性与不确定性，所以使用模糊综合评判法对第一级数据融合的结果进行再次融合，对环境舒适等级进行分析评判，得到最终的一致性估计。

## 4.2 基于模糊贴近度的一级数据融合

### 4.2.1 模糊集合

对于普通集合，元素与集合的关系无非是两种，属于或不属于，用数学符号表达即为  $x \in A$  或  $x \notin A$ 。为了更好的表示元素与集合关系，运用函数的形式表达，这便是特征函数：

定义 4.1：设  $A \in P(U)$ ， $U$  是论域，则称映射  $\chi_A$

$$\chi_A : U \rightarrow \{0,1\}$$

$$x \mapsto \chi_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases}$$

为集合  $A$  的特征函数。所以  $\chi_A(x)=1$  表示元素  $x$  属于集合  $U$ ， $\chi_A(x)=0$  则表示元素  $x$  不属于集合  $U$ 。

在模糊理论中，承认元素与集合间的关系可以介于属于或不属于之间，使集合的属于概念由经典的绝对属于扩展为相对属于，所以集合的特征函数的取值范围也从集合  $\{0,1\}$  扩充到区间  $[0,1]$  上的连续值，对应的集合与特征函数定义便发生了改变。

定义 4.2：设  $A$  是论域  $U$  到闭区间  $[0,1]$  的一个映射，即

$$A : U \rightarrow [0,1]$$

$$x \mapsto A(x) \in [0,1]$$

则称  $A$  是  $U$  上的一个模糊集合或一个模糊子集，特征函数  $A(x)$  称为模糊集合  $A$  的隶属函数，特征值即  $A(x)$  的取值称为  $x$  对模糊集合  $A$  的隶属度。论域  $U$  上的模糊集合全体称为模糊幂集，记为  $F(U)$ 。所以隶属函数表示元素属于某一模糊集合的程度关系，即隶属度越接近于 1，元素属于该模糊集合的程度越大；反之则越小。

模糊集合有多种表示方式，常见的有 Zadeh 表示法、模糊向量表示法等。设论域

$U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , 则  $U$  上的模糊集合  $A$  用 Zadeh 表示法与模糊向量表示法分别表示为:

$$A = \frac{A(x_1)}{x_1} + \frac{A(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{A(x_i)}{x_i} \quad (4.1)$$

和

$$A = (A(x_1), A(x_2), \dots, A(x_n)) \quad (4.2)$$

#### 4.2.2 模糊贴近度

定义 4.3: 对于模糊集或模糊向量  $A, B, C$ , 设  $A, B, C \in F(U)$ , 若映射  $R: F(U) \times F(U) \rightarrow [0, 1]$  满足条件:

- (1)  $R(A, B) = R(B, A)$ ;
- (2)  $R(A, A) = 1$ ,  $R(X, \emptyset) = 0$ ;
- (3) 若  $A \supseteq B \supseteq C$  或  $A \subseteq B \subseteq C$ , 则  $R(A, B) \geq R(A, C)$ ,

那么称  $R(A, B)$  为  $A$  与  $B$  的模糊贴近度,  $R$  称为  $F(U)$  上的模糊贴近度函数<sup>[45]</sup>。

模糊贴近度在模糊理论中用来表示两个模糊集之间的接近程度, 常用的模糊贴近度有距离贴近度、格贴近度、最大最小贴近度、算术平均最小贴近度等<sup>[46]</sup>。在选择采用何种贴近度时, 应综合考虑分辨率、奇异值抑制能力、计算量等特点。相比于其他几种模糊贴近度, 距离贴近度对奇异值的抑制能力较好, 并且不需要先将数据归一化, 计算量较小, 应用较为广泛。

距离贴近度主要有三种形式, 即减数距离法、倒数距离法和指数距离法<sup>[47]</sup>。减数距离法的数学模型为:

$$R(A, B) = 1 - cd_{AB} \quad (4.3)$$

其中,  $c$  为适当选取的参数, 使得  $R(A, B) \in [0, 1]$ 。

倒数距离法的数学模型为:

$$R(A, B) = \frac{1}{1 + (d_{AB})^\varepsilon} \quad (4.4)$$

其中,  $\varepsilon \geq 1$ 。

指数距离法的数学模型为:

$$R(A, B) = \exp(-d_{AB}) \quad (4.5)$$

在以上距离贴近度所提到的距离  $d_{AB}$  是模糊向量  $A$  和  $B$  之间的距离。距离的表示可以有

多种形式，例如海明（Hamming）距离、欧几里得（Enclid）距离、切比雪夫（Chebyshev）距离等。设模糊向量  $A = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ， $B = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ，海明距离的表达式为：

$$d_{AB} = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (4.6)$$

### 4.2.3 基于模糊贴近度的加权融合模型

在采用多传感器对同一种环境特征参数进行监测时，由于传感器的可靠性和精确度存在差异，就希望使得精准度更高的传感器能够在数据融合上对融合值产生较大的贡献，同时降低低精度传感器对最终结果的影响。因此给传感器分配不同的权值，给越准确越可靠的传感器赋予越大的权重，使融合值较传感器的直接测量结果更接近监测真实值，达到提高监测准确性的目的。设  $n$  个传感器对应的权值分别为  $a_1, a_2, \dots, a_n$ ，其中  $a_i$  为  $[0,1]$  区间上的实数，由此可以建立加权融合的数学模型，即：

$$M = \frac{a_1 A_1 + a_2 A_2 + \dots + a_n A_n}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (4.7)$$

在加权融合模型中的如何确定权值将直接影响融合结果的有效性。在理想状态下，传感器的测量值与测量目标的真实值相同，但由于现实环境中各种因素的影响，传感器的测量值与真实值之间会存在误差，测量值只能认为是真实值的近似值，所以测量值能否代表真实值或是否有效就具有模糊性和不确定性，因此可以用模糊理论的方法来处理它们之间的关系。

设用  $n$  个传感器对某一目标进行测量，测量数据集合为  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ ，集合中的元素  $A_i = (x_{i_1}, x_{i_2}, \dots, x_{i_m})$  为某一传感器在不同时间点测量的数据所组成的  $m$  维向量，传感器测量目标真实值集合为  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ ，集合中的元素  $B_i = (y_{i_1}, y_{i_2}, \dots, y_{i_m})$  为不同时间点的真实值所组成的  $m$  维向量，由于  $n$  个传感器所测量的目标相同，即目标真实值相同，则可认为集合  $B$  中的元素都相等。对于向量  $A_i$ ，其对于向量  $B_i$  的接近程度，即测量数据与真实值之间的接近程度，反映了传感器测量数据的有效性， $A_i$  越接近于  $B_i$  则测量值的准确度就越高，因此可以用来确定传感器的权值。由于在模糊集理论中，模糊贴近度表示两个模糊集之间的接近程度，因此可以采用模糊贴近度来构造加权融合模型。

设  $A_i$  为某传感器测量数据构成的模糊集， $B$  为传感器测量目标的真实数据构成的模糊集，模糊贴近度  $R(A_i, B)$  表示某传感器测量数据与目标真实数据的接近程度，则可以得到基于模糊贴近度的加权融合模型：

$$M = \frac{r_1 A_1 + r_2 A_2 + \cdots + r_n A_n}{\sum_{i=1}^n r_i} \quad (4.8)$$

其中,  $r_i = R(A_i, B)$ ,  $A_i = (x_{i1}, x_{i2}, \cdots, x_{im})$ ,  $B = (y_1, y_2, \cdots, y_m)$ ,  $i = 1, 2, \cdots, n$ 。

在实际应用中, 由于传感器测量目标的真实值是未知的, 所以无法得到具体的模糊向量  $B$ , 通常采用多传感器测量数据均值向量作为其近似估计, 即:

$$y_j = \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij} \quad (4.9)$$

但这种方法对真实值的估计偏差较大, 当存在较大异常值时, 估计值会受到影响向异常值偏移, 导致权值计算不正确, 从而影响融合值的准确性。

为了能够有效减少异常值的影响, 本文提出基于传感器间相对偏差建立置信距离矩阵的方法。设  $n$  个传感器在某一时间点对同一目标的测量值分别为  $x_1, x_2, \cdots, x_n$ , 第  $i$  个传感器与第  $j$  个传感器的相对偏差为:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| \quad (4.10)$$

由于相对偏差在一定程度上可以反映传感器间的相互信任程度, 即传感器之间的偏差越小则被信任度越高, 也就越真实可靠, 反之则越不真实可靠。由此  $d_{ij}$  可以表示传感器  $i$  被传感器  $j$  的信任程度, 并建立置信距离矩阵  $D$ :

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

传感器的精确度是被测量目标的测量值与真实值的一致程度, 传感器测量值在精确度范围内的波动属于正常现象, 由此可以取传感器精准度的 2 倍作为衡量信任程度的上限  $k$ 。当传感器的相对偏差  $d_{ij} > k$  时, 则认为传感器  $i$  不被传感器  $j$  所信任。在正常工作的  $n$  个传感器中, 产生较大异常值的传感器比例通常占少数, 若某一传感器的不被信任比例在整体中超过半数, 则认为此传感器的测量值为异常值, 应该排除。在排除异常传感器的数据后, 将其余正常传感器测量值的均值作为测量目标的真实值的近似估计。

#### 4.2.4 数据一级融合算法设计

数据一级融合算法所融合的数据是来自测量同一环境特征的传感器, 即同质传感器。通

过  $n$  个同质传感器对某一监测参数进行采样监测, 获得  $n$  个参数, 经一级融合后得到融合值。

对于某一类环境特征, 设有  $n$  个同质传感器对其进行监测, 第  $i$  个传感器的测量值为  $x_i$ , 具体融合算法过程为:

- (1) 计算  $n$  个同质传感器所测量的环境特征参数间的相对偏差, 建立置信距离矩阵  $D$ :

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

- (2) 计算各传感器的被信任比例。根据信任程度上限  $k$  排除被信任比例低于 0.5 的传感器数据, 信任程度上限  $k$  为传感器精准度的 2 倍, 统计被排除传感器总数  $t$ ;

- (3) 计算保留的  $n-t$  个同质传感器所测量的环境特征参数, 求平均值  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \frac{1}{n-t} \sum_{i=1}^{n-t} x_i \quad (4.13)$$

- (4) 计算各同质传感器测量数据与式 (4.13) 所求得平均值  $\bar{x}$  之间的海明距离  $d_i$ :

$$d_i = |x_i - \bar{x}| \quad (4.14)$$

- (5) 计算各同质传感器测量数据与平均值  $\bar{x}$  之间的模糊距离贴近度  $R_i$ :

$$R_i = \frac{1}{1 + (d_i)^\varepsilon} \quad (4.15)$$

此时, 为了提高分辨率取  $\varepsilon = 10$ 。

- (6) 计算各同质传感器的相对权重值  $\omega_i$ :

$$\omega_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (4.16)$$

- (7) 计算该环境特征参数的一级融合值:

$$\hat{X} = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i \quad (4.17)$$

## 4.3 基于模糊综合评判法的二级数据融合

### 4.3.1 模糊综合评判法

在生产生活中, 经常会面临择优问题, 如何评判不同事物的优劣就成了问题的关键。往



往决定事物好坏的因素多种多样,例如评价农业机械的使用性时,就需要衡量作业性能、经济性、可靠性、舒适性等多个指标<sup>[48]</sup>。若只依据某一个属性来做评判,虽然简化了评判过程,但这样得出的结论会因所选属性的不同而千差万别,并且带有强烈的主观性,既不全面也不准确,甚至还会是错误的。另外,在评价事物的有些属性时,无法得到一个“非此即彼”的确定答案,而是用模糊性的语言分为不同程度的评语。因此在进行比较并评判事物时,必须综合考虑,选择出最优者,这既是模糊综合决策问题。模糊综合评判法(FCE)就适用于解决此类问题,利用模糊数学的思想,分析评价模糊性事物,综合考虑与事物相关的各个因素,得出对事物总体的综合决策,具有精确与非精确相统一、定性与定量相结合的特点<sup>[49]</sup>。

模糊综合评判法包含五个基本步骤:

- (1) 确定因素集。
- (2) 确定评语集。
- (3) 单因素评判,确定模糊评判矩阵。
- (4) 确定各因素权重。
- (5) 综合评判。

本系统中的每种传感器所监测的家庭室内环境特征都不同,其数据只能从一个方面反应家庭室内环境状况,会有一定局限性和不确定性。家庭环境的舒适度等级具有模糊性,不能用具体的量化值给出明确的界限划分,因而适合采用模糊综合评判法对舒适度等级进行综合决策。故本系统的第二级数据融合应用模糊综合评判法,利用模糊综合评判对不同的环境特征信息进行融合,减少单一环境特征属性的局限性,提高决策结果客观真实性和可信度。

#### 4.3.2 数据二级融合算法设计

数据的二级融合主要采用的是模糊综合评判法,主要包上文中提到的五个基本步骤,本小节将对基本步骤的具体内容进行介绍。

##### (1) 确定因素集 $X$

因素集是评价对象的属性或指标的集合,可以表示为:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$$

其中,元素  $x_i$  为影响最终评判水平的第  $i$  个因素,  $i=1,2,\dots,n$ 。

评价一个对象首先需要分析影响评价结果的因素,因素作为对象的参数指标或者质量指标,反应了对象的属性或性能,能够综合地反映其对象的质量<sup>[50]</sup>。

本系统应用模糊综合评判法评判的对象为家庭室内环境舒适度等级,能够影响评判结果

的因素为多种环境特征参数，具体而言便是用于监测环境的传感器所采集的数据。若系统中采集了  $n$  种环境特征参数，则本评判模型的因素集可确定为  $X = \{\text{环境特征参数 1, 环境特征参数 2, } \dots, \text{环境特征参数 } n\}$ 。

在本系统中，传感器所采集的数据经一级数据融合后，同质传感器数据的融合值即是所监测的此种环境特征参数的具体数值，是因素的数量化表示。故因素集的具体表示为五种一级融合值组成的集合，记为  $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\} = \{\text{温度值, 湿度值, 光照值, 甲醛值, 一氧化碳值}\} = \{\hat{X}_1, \hat{X}_2, \hat{X}_3, \hat{X}_4, \hat{X}_5\}$ 。

## (2) 确定评语集 $Y$

评语集是对所有因素的评判等级所构成的集合，可以表示为：

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m\}$$

式中， $y_j$  为第  $j$  个评判结论， $j=1, 2, \dots, m$ 。

给待评价对象制定不同程度的评语，是进行综合评判并正确地评价对象的前提。根据我国室内空气质量标准及相关文献，本文系统把室内环境监测的舒适度等级划分成舒适度优、舒适度良好和舒适度差三种程度，则其评判集记为  $Y = \{y_1, y_2, y_3\} = \{\text{舒适度优, 舒适度良好, 舒适度差}\}$ 。因素集中的每种因素针对各评价等级的具体分类标准如表 4.1 所示。

表 4.1 室内环境评价指标分级标准

因素（单位）	舒适度优	舒适度良好	舒适度差	标准范围
温度（℃）	20~24	16~20; 24~28	<16; >28	16~28
相对湿度（%RH）	40~60	30~40; 60~80	<30; >80	30~80
光照（lx）	300~500	100~300; 500~700	<100; >700	100~700
甲醛（mg/m <sup>3</sup> ）	0~0.03	0.03~0.1	>0.1	0~0.1
一氧化碳（mg/m <sup>3</sup> ）	0~3	3~10	>10	0~10

## (3) 做单因素评判，得评判矩阵 $R$

做单因素评判是对因素集中的每一个因素做一次评判，从而得到因素集到评语集的一个模糊映射，然后由模糊映射诱导出因素集与评语集的模糊关系。

这里需要先引入几个概念：

### (a) 模糊关系

定义 4.4: 给定集合  $A, B$ ，称笛卡尔乘积  $A \times B = \{(a, b) | a \in A, b \in B\}$  的一个模糊子集  $R$  确定了一个  $A$  到  $B$  的模糊关系，记作  $A \xrightarrow{R} B$ ，隶属度  $R(a, b)$  称为  $(a, b) \in A \times B$  关于  $R$  的相关程

度。

定义 4.4 说明了的模糊关系适用于表示集合间具有的程度上差异的关系，当集合  $A, B$  为有限集时， $A$  到  $B$  之间的模糊关系  $R$  可以用矩阵表示。

(b) 模糊矩阵

定义 4.5: 设集合  $A, B$  只有有限多个元素， $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ ， $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ， $R$  是  $A$  到  $B$  的一个模糊关系。以  $R(a_i, b_j) = r_{ij}$  ( $r_{ij} \in [0, 1]$ ) 作为第  $i$  行，第  $j$  列元素构成的矩阵称为模糊矩阵，记为  $\mathbf{R} = (r_{ij})_{m \times n}$ 。模糊矩阵是模糊关系也是模糊集合，只是表现形式不同。

(c) 模糊映射

定义 4.6: 对于集合  $A, B$ ，称映射  $f$

$$f: A \rightarrow F(B)$$

$$a \mapsto f(a) = Z \in F(B)$$

是从  $A$  到  $B$  的模糊映射。

(d) 模糊变换

定义 4.7: 对于集合  $A, B$ ，称映射  $T$

$$T: F(A) \rightarrow F(B)$$

$$A \mapsto T(A) = Z \in F(B)$$

为  $A$  到  $B$  的一个模糊变换。

若模糊变换  $T$  满足  $T(A \cup B) = T(A) \cup T(B)$ ， $T(\lambda A) = \lambda T(A)$ ，则称  $T$  为模糊线性变换。若模糊线性变换  $T$  与模糊关系  $R \in F(A \times B)$  满足  $T(A) = A \circ R$ ，则称  $T$  是由模糊关系  $R$  诱导出的。符号“ $\circ$ ”表示模糊关系的复合。

根据以上的理论依据与做单因素评判的过程，首先对上文所建立的因素集  $X$  中的每一个因素做评判，得到从因素集  $X$  到评语集  $Y$  的模糊映射  $f$

$$f: X \rightarrow F(Y)$$

$$x_i \mapsto f(x_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \in F(Y)$$

其中， $f(x_i)$  是关于因素  $x_i$  的评语模糊向量，是对  $x_i$  的一个评价。 $r_{ij}$  表示关于  $x_i$  具有评语  $y_j$ ，也是  $x_i$  对  $y_j$  的隶属度。然后由模糊映射  $f$  诱导出模糊关系  $R \in F(X \times Y)$ ，进而可以确定判定矩阵

$$\mathbf{R}=(r_{ij})_{n \times m}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

其中，判定矩阵的每行元素必须满足归一化或正规化<sup>[51]</sup>。

判定矩阵中元素即隶属度的确定直接影响着综合评判结果的准确度，隶属度可由隶属函数求出，因此建立合适的隶属函数非常重要。建立隶属函数的方法有多种，包括模糊统计法、专家经验法、指派法等。本文依据相关文献并参考相关专家建议，确定选用指派法，表达式为式（4.19）、式（4.20）和式（4.21）：

$$\text{偏小型: } A(x)=\begin{cases} 1 & x \leq a \\ \frac{1}{1+\alpha(x-a)^\beta} & x > a \end{cases} \quad (\alpha > 0, \beta > 0) \quad (4.19)$$

$$\text{中间型: } A(x)=\frac{1}{1+\alpha(x-a)^\beta} \quad (\alpha > 0, \beta > 0) \quad (4.20)$$

$$\text{偏大型: } A(x)=\begin{cases} 1 & x \geq a \\ \frac{1}{1+\alpha(x-a)^\beta} & x < a \end{cases} \quad (\alpha > 0, \beta > 0) \quad (4.21)$$

其中， $\alpha$  取边界值的隶属度为 0.5 时所求的值， $\beta$  取 2。

根据因素集  $X$ 、评语集  $Y$  与隶属函数，最后可得到判定矩阵：

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

矩阵  $\mathbf{R}$  中的第一列元素  $r_{i1}$  运用式（4.19）计算，第二列元素  $r_{i2}$  运用式（4.20）计算，第三列元素  $r_{i3}$  运用式（4.21）计算。在计算隶属度时，隶属函数中参数  $a$  的取值需要根据各因素评判等级的具体区间划分来决定。根据表 4.1 中环境因素对于各舒适度等级评价标准的量化区间，在计算  $r_{41}$ 、 $r_{42}$  和  $r_{43}$  即甲醛含量对各舒适度等级的隶属度时， $a$  的取值可分别定为 0.03、0.06 和 0.1，同样对于一氧化碳含量， $a$  的取值可分别定为 3、6 和 10。对于温度、相对湿度和光强，其评价标准的量化区间不唯一，且不具有单调性。但若选取某一标准值为基准，以此实际值与标准值之差的绝对值量化评价标准，则其评价标准的量化区间便具有唯一性，且具有单调性。通过研究调查相关资料和数据，温度、相对湿度和光强的最舒适参考值分别为 22℃、

55%RH 和 75lx，由此以差值来量化各评价等级的标准如表 4.2 所示。综合表 4.1 和表 4.2，可得出个计算各因素隶属度时隶属函数参数  $a$  的取值如表 4.3 所示。

表 4.2 以差值量化的评价等级标准

因素（单位）	因素实际值与标准值之差			
	舒适度优	舒适度良好	舒适度差	最舒适参考值
温度（℃）	0~2	2~6	>6	22
相对湿度（%RH）	0~5	5~25	>25	55
光照（lx）	0~100	100~300	>300	400

表 4.3 参数  $a$  计算不同因素隶属度时的取值

因素	参数 $a$ 取值		
	偏小型	中间型	偏大型
温度	2	4	6
相对湿度	5	15	25
光照	100	200	300
甲醛	0.03	0.06	0.1
一氧化碳	3	6	10

（4）确定各因素权重

在模糊综合评判法中，每个因素对评判结果的作用程度各不相同，为了权衡各个因素的重要程度并量化表示，可以对每个因素赋予不同的权重值，各因素的权重值组合在一起即构成权重集。权重集可以看作是因素集上的模糊子集，是判断对象与判断因素的模糊关系，权重集的元素值反映了各评价因子在量化形式下对总体评价的重要性。权重集可以表示成归一化的权重向量，即：

$$A = (a_1, a_2, \cdots, a_n)$$

其中， $a_i$  为因素的权重值，且  $\sum_{i=1}^n a_i = 1$ ， $a_i \geq 0$ ， $i = 1, 2, \cdots, n$ 。本系统中有 5 个环境特征参数，其权重值可构成权重向量  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5)$ 。

本文权重集的元素由层次分析法（Analytical Hierarchy Process，AHP）确定<sup>[52]</sup>。层次分析法可以将复杂问题中的因素划分为有序的层次结构，从而成为一个连贯的多准则多目标决策方法。这是一种定性和定量相结合的有效方法。

确定因素的权重是层次分析法的核心。本文对环境综合评判中，需要确定各环境特征参

数的权重值，层次分析法的具体计算步骤如下：

(a) 构建专家判断矩阵

若要确定  $n$  个因素的权重值，可首先通过 1-9 比例模型与专家经验，对各因素进行两两比较，建立判断矩阵  $\mathbf{P} = (w_{ij})_{n \times n}$ ， $w_{ij}$  是第  $i$  个因子与第  $j$  个因子的相对重要性比率，且  $w_{ij}$  与  $w_{ji}$  互为倒数，比率值可通过 1-9 比例模型的二元决策表（表 4.4）得出。

表 4.4 二元决策表

因素 $x$ 与 $y$ 相比较	$w_{ij}$	$w_{ji}$
$x$ 与 $y$ 同等重要	1	1
$x$ 比 $y$ 稍微重要	3	1/3
$x$ 比 $y$ 明显重要	5	1/5
$x$ 比 $y$ 强烈重要	7	1/7
$x$ 比 $y$ 极端重要	9	1/9
$x$ 比 $y$ 处于上述相邻判断之间	2, 4, 6, 8	1/2, 1/4, 1/6, 1/8

根据本文系统中的 5 个因素两两之间的相对重要关系，可以得出判断矩阵  $\mathbf{P}$  为：

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1 & 4 & 2 & 3 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 1/3 & 1/2 & 3 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/3 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

(b) 求解判断矩阵的特征向量和特征值：

在构造完判断矩阵  $\mathbf{P}$  后，求出判定矩阵  $\mathbf{P}$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$ ，再利特征方程  $\mathbf{P}\mathbf{W} = \lambda_{\max}\mathbf{W}$  求解出相应的特征向量  $\mathbf{W}$ ，然后将特征向量  $\mathbf{W}$  归一化，即为所求个因素的权重向量。

为了使计算简单，这里使用求和法<sup>[46]</sup>做近似计算求取特征向量。和法是先将判断矩阵  $\mathbf{P}$  每一列元素做归一化，然后对行求和得出特征向量。求出特征向量后再做归一化即可得到权重向量。具体步骤如下：

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 5 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1 & 4 & 2 & 3 \\ 1/5 & 1/4 & 1 & 1/3 & 1/2 \\ 1/3 & 1/2 & 3 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/3 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{每一列归一化}} \begin{bmatrix} 60/137 & 24/49 & 1/3 & 18/41 & 8/21 \\ 30/137 & 12/49 & 4/15 & 12/41 & 6/21 \\ 12/137 & 3/49 & 1/15 & 2/41 & 1/21 \\ 20/137 & 6/49 & 1/5 & 6/41 & 4/21 \\ 15/137 & 4/49 & 2/15 & 3/41 & 2/21 \end{bmatrix}$$

$$\xrightarrow{\text{对行求和得到特征向量}} W = \begin{bmatrix} 572777 \\ 275233 \\ 5403952 \\ 4128495 \\ 429201 \\ 1376165 \\ 3324479 \\ 4128495 \\ 678262 \\ 1376165 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{归一化}} \begin{bmatrix} 0.4162 \\ 0.2618 \\ 0.0624 \\ 0.161 \\ 0.0986 \end{bmatrix}$$

经过上述计算最后可以得到权重向量  $A = (0.4162, 0.2618, 0.0624, 0.161, 0.0986)$ 。判定矩阵  $P$  的最大特征值  $\lambda_{\max}$  由式 (4.24) 近似求得：

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(PW)_i}{\omega_i} \quad (4.24)$$

其中,  $(PW)_i$  表示  $PW$  的第  $i$  个分量。经计算得  $\lambda_{\max} = 5.068$ 。

#### (c) 一致性测试

在构造判定矩阵进行两两比较判断时, 由于客观事物的复杂性, 导致判断结果会带有主观性和片面性, 所以必须进行一致性测试<sup>[53]</sup>。一致性测试需要计算验证两个指标, 一个是一致性指数  $I_{CI}$  另一个为平均随机一致性指数  $I_{RI}$ , 其计算公式分别为式 (4.25) 与式 (4.26):

$$I_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4.25)$$

$$I_{RI} = \frac{\bar{\lambda}_{\max} - n}{n - 1} \quad (4.26)$$

式 (4.26) 中的  $\bar{\lambda}_{\max}$  为多个  $n$  阶随机正互反矩阵最大特征值的平均数。针对于  $I_{RI}$  的值, 前人根据相关的原理已经对不同的  $n$  得到对应的  $I_{RI}$  值, 如表 4.5 所示。

表 4.5 不同  $n$  下的  $I_{RI}$  值

$n$	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$I_{RI}$	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54

得出  $I_{CI}$  与  $I_{RI}$  后做一致性比率计算:

$$I_{CR} = \frac{I_{CI}}{I_{RI}} \quad (4.27)$$

当  $I_{CR} < 0.1$  时, 判断矩阵的一致性被认为是可接受的, 特征向量  $W$  可作为各因素的权重

向量。否则,应该纠正和重新计算判断矩阵。根据上文的计算结果,将 $\lambda_{\max} = 5.068$ 带入式(4.25)中计算得 $I_{CI} = 0.017$ 。由表 4.5 得,当 $n = 5$ 时, $I_{RI}$ 取 1.12。最后将 $I_{CI}$ 与 $I_{RI}$ 的值带入式(4.27)中求得 $I_{CR}$ 的值为 0.015,故上文求得的判断矩阵 $P$ 的一致性是可接受的,权重向量 $A$ 可作为各因素的权重向量。

#### (5) 做综合评判

综合评判是模糊综合评价法的最后一步,是将因素集 $X$ 上的模糊子集权重集 $A$ ,通过判定矩阵 $R$ 变换为评语集 $Y$ 上的模糊子集 $C$ 的过程,可表示为:

$$C = A \circ R \quad (4.28)$$

其中, $C = (c_1, c_2, \dots, c_m)$ 就是模糊评判的结果, $c_j$ 反映了评语集中第 $j$ 种评判结论 $y_j$ 在综合评判中所占的地位。

进行综合评判求取模糊评判结果时,常使用模型 $M(\wedge, \vee)$ 来式(4.28)中定义符号“ $\circ$ ”的运算方式,即 $c_j = \bigvee_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij})$ ,” $\wedge$ ”为取小,” $\vee$ ”为取大。但这种模型只考虑主要影响因素,并没有使权重值起到加权的作用,从而导致评判结果失真。为此在实际应用中需要对模型进行改进。

可以将模型 $M(\wedge, \vee)$ 中的运算符“ $\wedge$ ”取小与“ $\vee$ ”取大分别用“ $*$ ”乘与“ $+$ ”加代替,便可得到模型 $M(*, +)$ ,则符号“ $\circ$ ”的运算方式变为 $c_j = \sum_{i=1}^n a_i r_{ij}$ 。改进后的模型考虑了所有因素的共同作用,避免了评判结果的失真。

在做综合评判的最后,常用最大隶属原则确定最终的判决结果。最大隶属原则的规则为:评判结果应有最大的隶属度;评判结果的隶属度必须大于某一阈值;评判结果的隶属度与其他评判结果的隶属度之差必须大于某一阈值。具体而言,对于求解出的模糊子集 $C$ 中,由于元素 $c_j$ 反映了评语集中第 $j$ 种评判结论 $y_j$ 在综合评判中所占的地位,所以 $C$ 中的最大值在满足最大隶属原则的另外两项规则时,其对应评语集中的评判结论就是综合评判的最终结果。综上所述,在判定最大隶属原则是否有效时,若式(4.29)成立,则最大隶属原则有效。

$$\frac{1}{m} < \frac{\max\{c_1, c_2, \dots, c_m\}}{\sum_{i=1}^m c_i} \leq 1 \quad (4.29)$$

对上文所得的判定矩阵 $R$ 与权重向量 $A$ 运用模型 $M(*, +)$ 求取模糊评判结果,则本系统的综合评判结果可描述为:



$$C=A \circ R=(0.4162,0.2618,0.0624,0.161,0.0986) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \\ r_{41} & r_{42} & r_{43} \\ r_{51} & r_{52} & r_{53} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

对  $c_1$ 、 $c_2$  和  $c_3$  用最大隶属原则确定最终的判决结果。

#### 4.4 本章小结

本章主要说明系统采用的数据融合算法。首先介绍了系统的数据融合结构，提出了基于模糊理论的两级数据融合算法，分别是基于模糊贴近度的一级数据融合和基于模糊综合评判的二级数据融合，并对每一级算法做了具体分析。

## 第五章 系统软件设计

本章主要说明系统的软件设计。软件设计依据系统的总体结构分为环境特征参数采集模块、数据汇集上传模块和数据存储处理模块三个模块的软件设计。本章将分模块对软件设计做具体说明。

### 5.1 环境特征参数采集模块

#### 5.1.1 开发环境

本系统的无线节点软件设计是在 TI 公司推出的 ZigBee2007 协议栈的基础上进行的。协议栈用函数的形式将 ZigBee 协议具体实现,使用者可以通过调用应用层的 API 就可以组建网络,减少的开发周期。本文选用 ZigBee2007 协议栈的 ZStack-CC2530-2.5.1a 版本,并配合 IAR 软件集成开发工具,使用 C 语言开发。图 5.1 为在 IAR 中展示的协议栈工程结构。

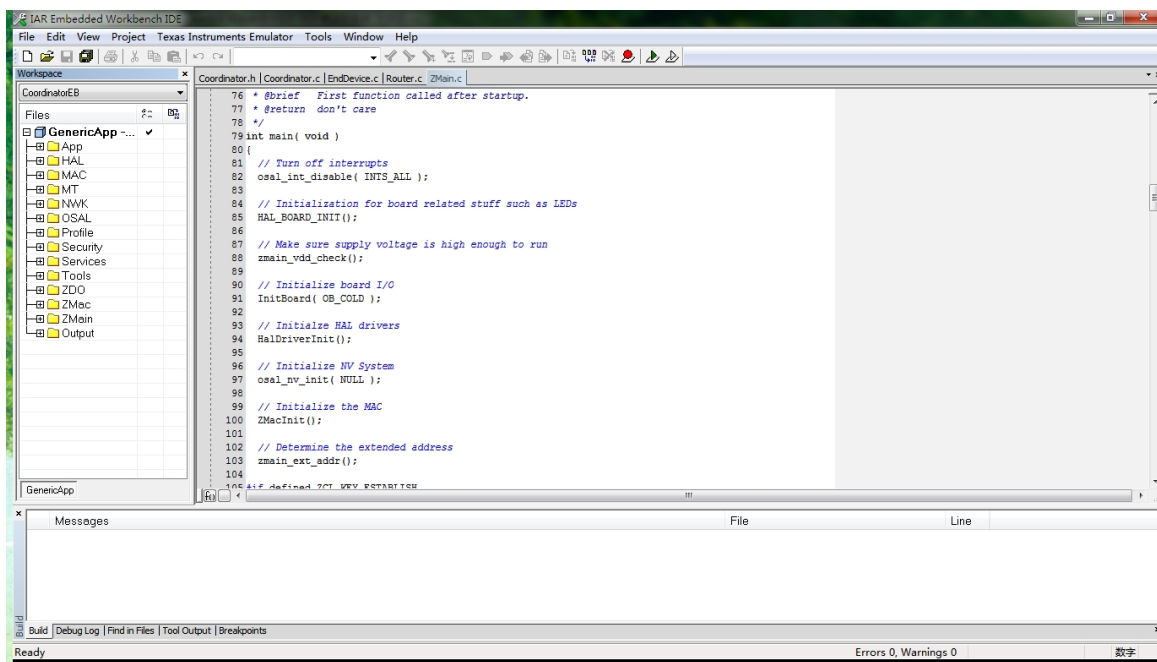


图 5.1 协议栈工程结构

无线节点的软件开发是在 TI 官方给出的实例工程 GenericApp 的基础上进行的。从图 5.1 可以观察到整个工程采用分层的结构具体实现协议栈。ZigBee 网络的建立的方法已经在工程中实现,只需调用相关的接口方法,在整个工程上完成数据的采集与通信便简化为应用层的软件开发。Z-Stack 协议栈使用操作系统抽象层 OSAL 进行任务调度,OSAL 采用事件轮询机制,在各层进行初始化后,便进入事件轮询过程,协议栈通过指针访问事件表中的每一项,

如果有事件发生，便查找到对应的事件处理函数进行处理，处理完成后指针继续访问事件表查看有无事件发生。根据 OSAL 的运行原理，节点应用层的开发的主要工作为将用户自定义的事件加入 OSAL 的事件表和实现对应的事件处理函数。

5.1.2 节点软件开发

根据 2.2.1 节所述，ZigBee 节点分为协调器、路由器和终端节点，每一种的节点的作用和实现的功能都不同，因此需要分别进行软件开发。

(1) 协调器软件设计

协调器在本文系统中主要负责实现的功能为：ZigBee 网络的建立、管理；接收节点采集的环境特征参数；通过串口将数据发送至物联网网关。协调器运行流程图如图 5.2 所示。

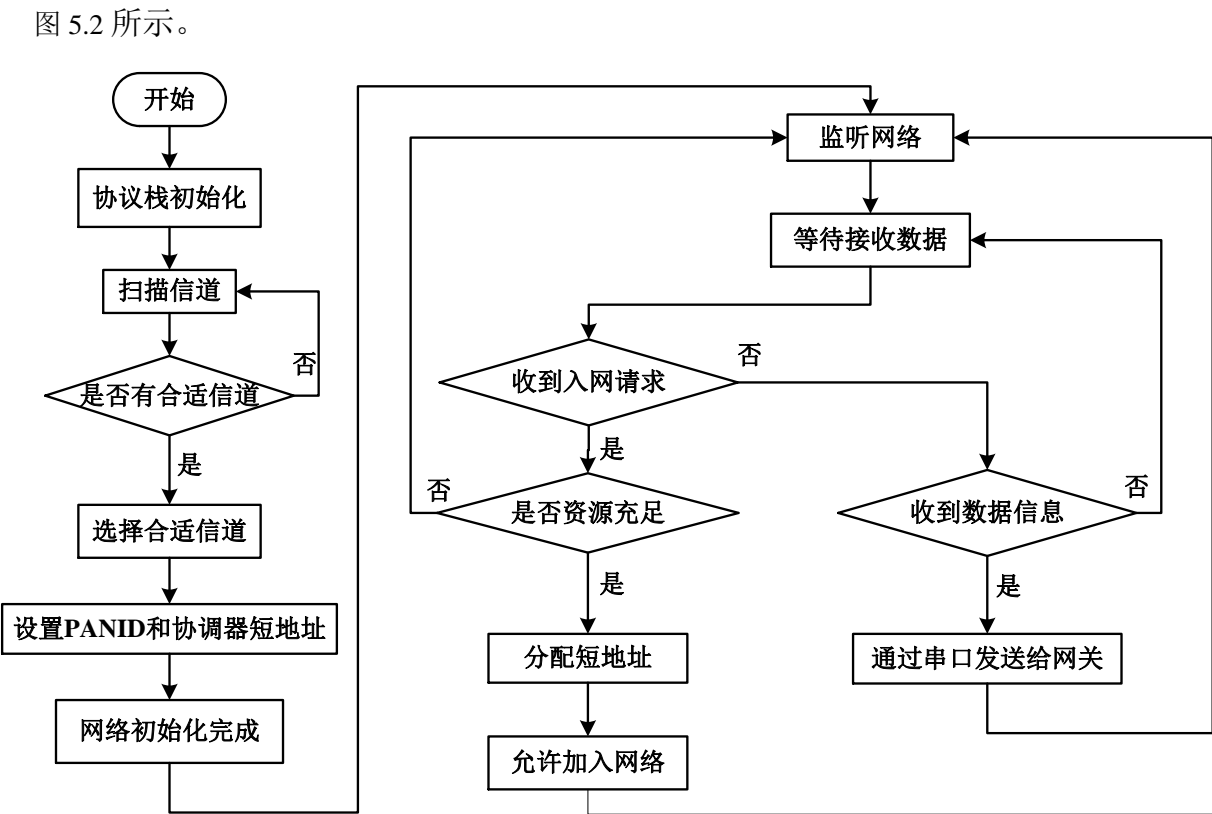


图 5.2 协调器运行流程图

协调器在 ZigBee 无线网络中处于中心地位，整个网络的建立需要由协调器负责完成。协调器在确定要建立新网络时，先进行信道扫描。找到合适的信道后，协调器将为新建立的网络分配一个在同一信道内唯一存在的 PANID，并将 0x0000 设置为自身所在网络的 16 位短地址用于标识设备。在网络初始化之后，协调器周期性的在网络中发送查询帧，不断监听整个网络，当监听到其他节点有申请加入网络的关联请求时，在资源充足的情况下会为此节点分配一个用于标识设备的 16 位短地址，并发送关联响应。协调器还是整个无线网络的信息汇聚

中心，系统中节点采集的环境特征参数都将发送至协调器，协调器将信息汇聚后，通过串口发送至物联网网关。

协调器的软件开发在实例工程 GenericApp 中的 CoordinateEB 模式下进行。协调器应用串口与网关通信，这就需要对串口进行初始化设置。在 Z-Stack 协议栈应用层中，调用函数 GenericApp\_Init 实现用户自定义的初始化，串口的初始化需要在函数中添加相应的参数配置，具体内容如图 5.3 所示：

```
halUARTCfg_t uartConfig; // 串口配置
uartConfig.configured      = TRUE;
uartConfig.baudRate        = HAL_UART_BR_115200; // 设置波特率
uartConfig.flowControl     = FALSE; // 硬件流设置
uartConfig.flowControlThreshold = 64;
uartConfig.rx.maxBufSize   = 128;
uartConfig.tx.maxBufSize   = 128;
uartConfig.idleTimeout     = 6;
uartConfig.intEnable       = TRUE;
uartConfig.callBackFunc    = NULL; // 回调函数设置
HalUARTOpen( HAL_UART_PORT_0, &uartConfig ); // 打开串口
```

图 5.3 串口参数配置

对串口初始化后便可以通过函数 HalUARTWrite 和函数 HalUARTRead 实现串口数据的收发。

## (2) 终端节点软件设计

终端节点在本文系统中主要负责实现的功能为：加入网络；获取传感器监测的环境特征参数；发送环境特征参数至协调器。

终端节点在 ZigBee 无线网络中处于末端，主要用于加载传感器感知目标环境的状态。终端节点在完成协议栈初始化后，首先会主动扫描可通信范围内的信标帧，搜寻协调器。找到协调器后，终端节点向协调器发送关联请求命令帧和数据请求命令帧。协调器响应请求后，终端节点将立即回复一个确认帧，终端节点将保存协调器的短地址和扩展地址。当终端节点成功收到协调器的加入请求回复后，便与协调器建立关联，加入网络，获得协调器为其分配的短地址，就可以与其他节点通信。终端节点还可以通过路由节点加入网络，终端节点扫描网络寻找可能成为网络父节点路由节点，将这些父节点的信息存储在邻居表中。终端节点依据路由机制向一个父节点发送申请入网请求，父节点可响应并回复申请入网请求，并为其分配的短地址，使其加入网络。终端节点的软件流程图如图 5.4 所示。

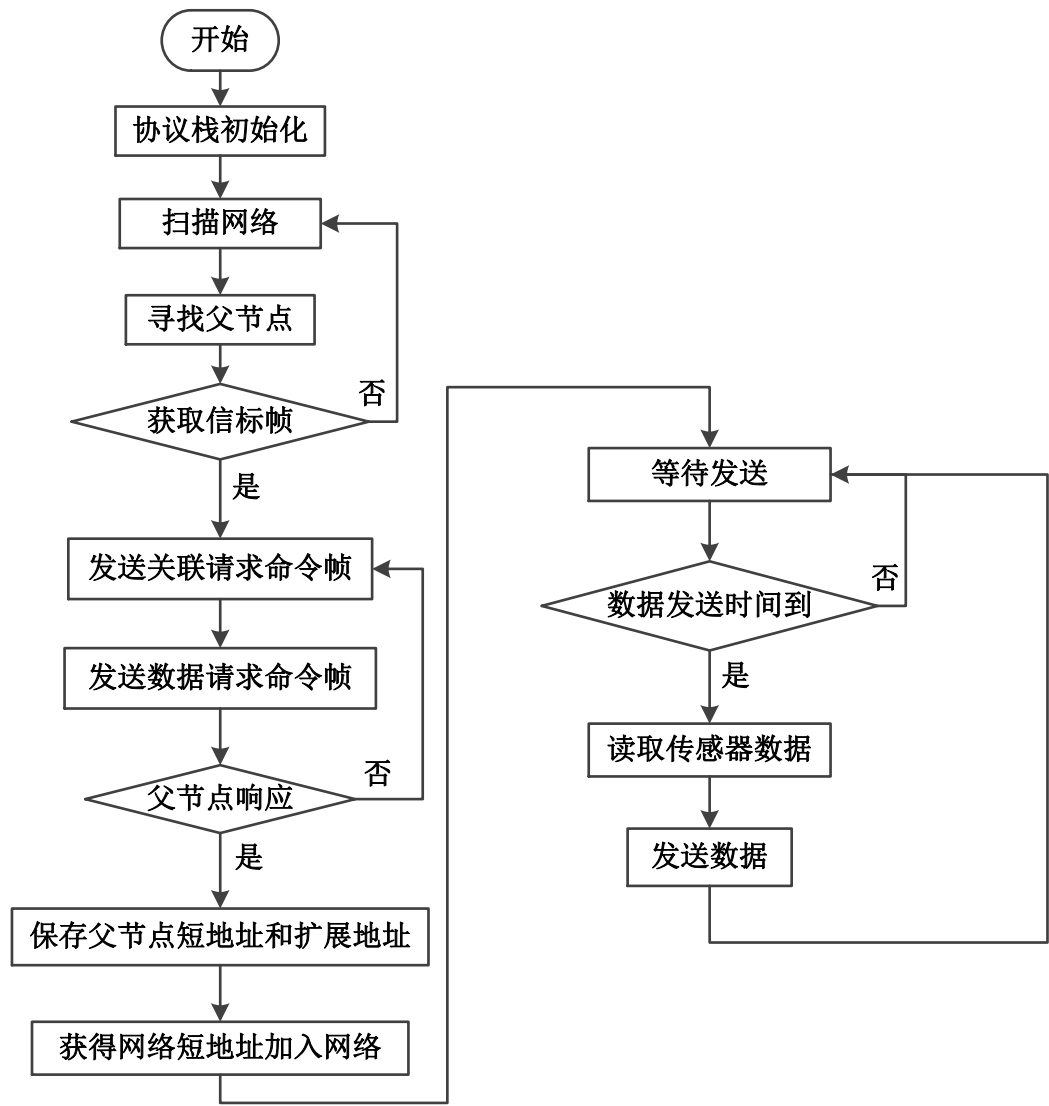


图 5.4 终端节点运行流程图

(3) 路由节点软件设计

路由节点在本文系统中主要负责实现的功能为：加入网络；辅助非协调器节点加入网络；路由转发终端节点的数据信息；发送信息至协调器。

ZigBee 的路由机制包括路由发现、路径保护和维护、路径期满。Z-Stack 协议栈采用 AODV 路由算法实现路由机制。每个路由节点都周期性的与其邻接路由节点交换路由信息，并存储于自己的路由表中。在信息传递过程中，如果路径出现故障导致信息无法及时传递，路由节点可以通过路由功能找寻新的路径传递信息，防止信息传递中断，使网络具有自愈性。路由节点可作为非协调器节点的网络父节点，响应非协调器节点的入网请求，并为其分配的短地址。路由节点加入网络的过程和向协调器发送信息的过程都与终端节点基本相同。路由节点在本文系统中不连接传感器，只做网络的拓展、信息的路由转发和向协调器发送建立时网络必要的信息。路由节点运行流程图如图 5.5 所示。

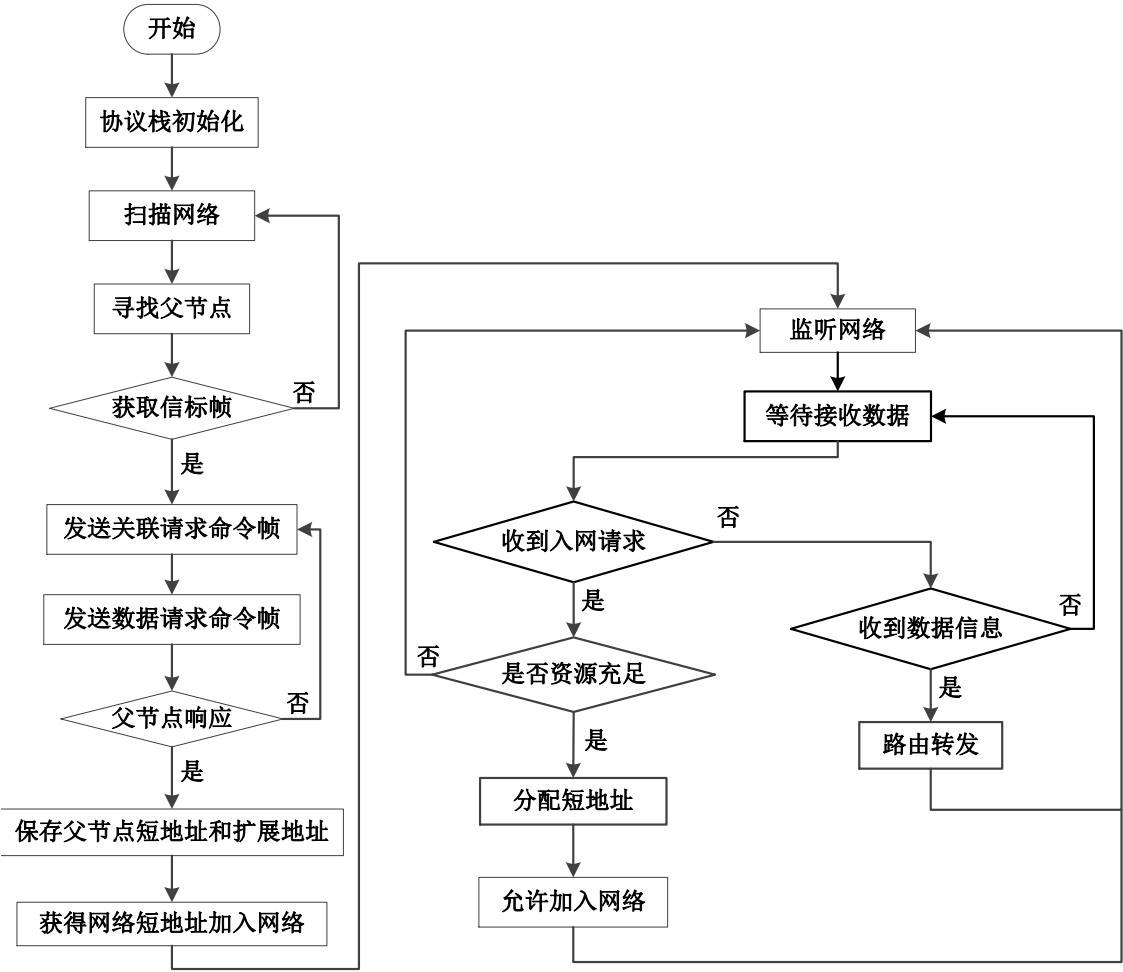


图 5.5 路由节点运行流程图

5.1.3 数据帧格式

终端节点会获取不同类型的传感器数据，并发送给协调器，然后传送给网关。为了能使网关能够解析出每一个节点发来的不同类型传感器的数据，就必须设计统一的数据帧格式用于数据的封装，传输和解析。数据帧格式结构如表 5.1 所示。

表 5.1 数据帧格式结构

数据帧起始标志	节点类型	节点 ID	传感器数据	数据帧结束标志
2 字节	1 字节	1 字节	10 字节	1 字节

数据帧长为 15 字节，数据帧的前 2 个字节是数据帧起始标志，其值固定为 0x2626，即“&&”，用于标识一帧数据的开始。数据帧的第 3 个字节是节点类型，有三种取值：0x01 表示协调器；0x02 表示路由器；0x03 表示终端节点。数据帧的第 4 个字节是节点的 ID。数据帧的第 5 至第 14 字节是传感器数据，其具体的结构如表 5.2 所示。数据帧的最后一个字节是

数据帧结束标志，其值固定为 0x24，即 “\$”，用于标识一帧数据的结束。

表 5.2 数据帧的传感器数据部分结构

温度数据		湿度数据		光强数据		甲醛数据		一氧化碳数据	
2 字节		2 字节		2 字节		2 字节		2 字节	
高 8 位	低 8 位	高 8 位	低 8 位	高 8 位	低 8 位	高 8 位	低 8 位	高 8 位	低 8 位

在 Z-Stack 协议栈中，数据帧使用联合体实现，具体的定义如图 5.6 所示：

```
typedef union
{
    uint8 data_frame[15];           //用于协调器存储数据帧
    struct
    {
        uint8 head[2];              //数据帧起始标志
        uint8 dev_type;              //节点类型
        uint8 dev_id;                //节点ID
        uint8 sensor_T[2];           //温度数据
        uint8 sensor_H[2];           //湿度数据
        uint8 sensor_L[2];           //光强数据
        uint8 sensor_HCHO[2];        //甲醛数据
        uint8 sensor_CO[2];          //一氧化碳数据
        uint8 tail;                  //数据帧结束标志
    } FRAME;
} DATAFRAME;
```

图 5.6 数据帧具体内容

5.2 数据解析上传模块

5.2.1 串口数据解析

数据汇聚上传模块的软件开发主要在物联网网关设备上进行。根据 3.2.3 节对物联网网关的设计，网关通过串口接收协调器获取的数据。在网关对串口数据解析之前，为了能和协调器正常通信且数据传输稳定，需要对网关的串口进行初始化，设置相同的通信速率，以实现正确的接收串口数据。网关使用 Python 语言开发，引用封装了串口访问功能的 pySerial 模块实现的串口配置和应用。Raspbian 操作系统中串口所对应的的设备文件为/dev/ttyS0，pySerial 模块中提供原生类 serial.Serial 用来操作串口设备文件并初始化串口，然后打开串口接收协调器发来的数据。

在实现串口正常通信后，网关将对收到的数据进行解析。根据 5.1.3 节制定的数据帧格式，将每一帧中的数据信息分别提取出来，首先根据数据帧起始标志、结束标志以及数据帧长度判断是否为正确的一帧数据，如果数据帧的第 1、第 2 和最后一个字节分别为 0x26、0x26、

0x24，且帧长度为 15 字节，则说明数据帧正确，否则舍弃。数据帧的第 3 第 4 字节分别为节点类型与节点 ID，网关将依此区分是哪个节点发来的数据帧。数据帧的传感器数据部分的解析以温度数据为例，数据帧中的第 5 和第 6 字节为温度传感器的测量值，分为存储数据的高 8 位与低 8 位。分别解析出数据的数据的两部分后，将高 8 位数据左移 8 位与低 8 位数据组合成 16 位数据，之后再根据传感器数据手册对其进行数值转换，得到可直接使用的十进制数值。其余四种传感器的测量值的解析过程与此相类似。

5.2.2 数据上传

物联网网关在解析完串口数据之后，需要将数据上传至物联网云平台。网关与云平台的 HTTP 服务器建立 TCP 连接，通过 HTTP 协议将解析之后的数据打包上传。网关将基于云平台约定的方式建立连接，需基于约定的格式编辑头部含有 APIKey 的请求报文，不同的传感器数据将经过网关打包为 JSON 格式，具体格式的实例如表 5.3 中所示。使用 POST 方法通过云平台虚拟设备指定的 URL 上传至数据流，并以数据点的形式存储。数据上传的流程如图 5.7 所示。

表 5.3 POST 请求报文格式

URL	http://api.heclouds.com/devices/<设备 ID>/datapoints
HTTP 头部	api-key:<用户 APIKey> Content-Type:application/json
HTTP 内容 (实例)	{ "datastreams":[ { "id": "Temperature", "datapoints": [ { "value": 24.1 } ] }, { "id": "Humidity", "datapoints": [ { "value": 22.4 } ] }, { "id": "Light_intensity", "datapoints": [ { "value": 186 } ] }, { "id": "Gas_concentration", "datapoints": [ { "value": 0.02 } ] }, { "id": "Gas_concentration_CO", "datapoints": [ { "value": 3.25 } ] } ] }





图 5.7 数据上传的流程

## 5.3 数据存储处理模块

### 5.3.1 云平台应用设计

当网关与云平台连接成功后,网关解析出不同节点采集的数据,然后分别传送至云平台的虚拟设备,并在虚拟设备所关联的数据流中创建数据点。OneNET 云平台具备 UI 设计功能,通过平台的应用编辑器可以快速的设计数据展示界面。根据 3.3.1 节对 OneNET 资源管理的介绍,用户在自己的产品下可以创建与设备相关的应用。对于 Web 端与移动端,平台分别提供了应用设计模块,本文系统的数据主要来源于终端节点,在移动端应用设计时,利用云平台支持多页面控件独立的功能,为不同的终端节点设计不同的应用页面,方便管理和查看数据。在每个节点页面中使用可视化控件仪表盘和折线图实现节点数据展示,一个仪表盘和一个折线图组成可视化展示的子模块,分别用于展示某种环境特征参数的当前值和数据变化趋势。控件通过设置与相应的虚拟设备数据流关联便可展示其中数据。在 Web 端应用设计时,将不

同节点的同一环境特征参数放在同一个折线图控件中显示，以便比较数据间的关系。图 5.8 和图 5.9 分别为 Web 端与移动端的应用设计界面。

用户可以通过云平台的账号登录在浏览器查看设计的应用界面，也可以通过移动端 App 查看，实现数据的 Web 端与移动端的可视化展示。

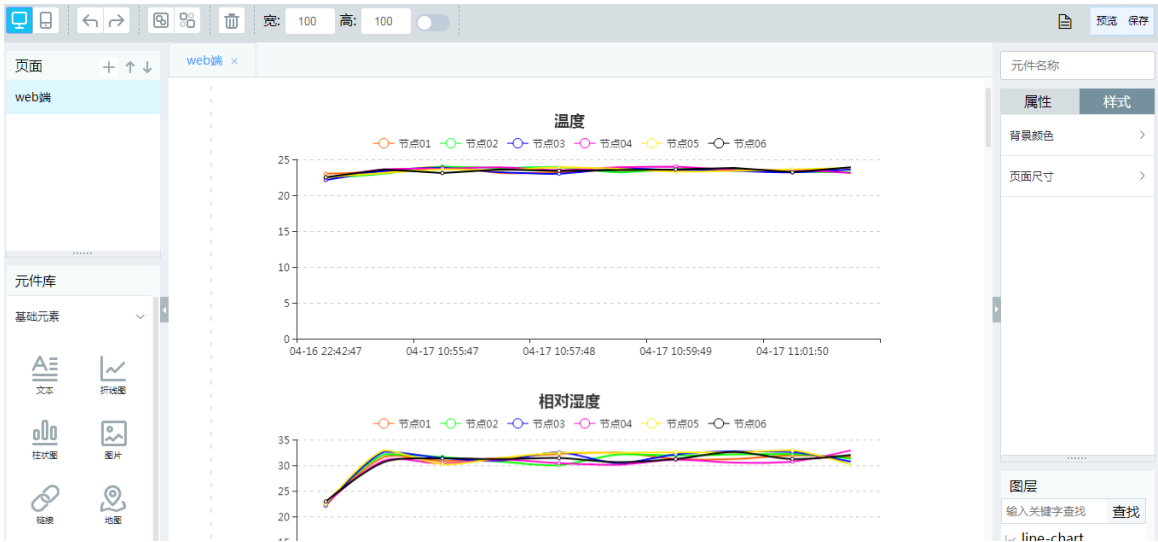


图 5.8 Web 端应用设计界面



图 5.9 移动端的应用设计界面

### 5.3.2 用户端设计

用户端软件设计采用 Qt 开发，主要实现云平台数据获取、数据存储和数据融合处理，并对上述功能提供交互界面。

Qt 是一个开源的图形用户界面开发框架，采用 C++ 语言编写，可提供与原生应用程序相同的功能和速度。Qt 为开发者提供大量的功能，包括支持多媒体、网络通信、SQL、XML、

2D 和 3D 图像动画等。Qt 的可跨平台和支持多编译器也为开发者提供了便利,在目标平台(例如 RPi3 B)上进行应用程序的运行和调试之前,可以先在开发环境(例如 Windows 环境)上运行和调试,从而可以提前验证用户界面,从而大大缩短开发时间。本用户端开发选用的 Qt 版本为 Qt-5.6.1,选择 Qt Creator 作为集成开发环境。

(1) 数据获取

用户端通过 HTTP 协议的 GET 方式从云平台获取数据,利用 Qt 的网络模块中的类 QNetworkRequest 构造一个向目标 URL 发送 HTTP 请求的对象,调用类的成员方法 setRawHeader 添加请求头部信息。类 QNetworkAccessManager 用于实现网络请求的发送和响应的接收,调用其成员方法 get 实现从云平台获取数据。云平台的返回的信息是以 JSON 格式封装的数据,使用自定义方法 readJSON 解析出各传感器采集的数据和采集时间信息,实时显示在用户端界面上,并存储于数据库中用于数据融合计算。

(2) 数据存储

用户端的数据存储应用 MySQL 数据库实现,数据库中的表包括用户信息表(user\_info)、节点信息表(node\_info)和数据信息表(data\_info)。用户信息表用于存放用户基本信息,具体的属性定义如表 5.4 所示,其中用户 ID 和密码是用户登录的凭证。

表 5.4 用户信息表 (user\_info)

属性含义	属性名	数据类型	是否为空	附加说明
用户 ID	userid	varchar(16)	否	主键
密码	password	varchar(64)	否	
用户姓名	name	varchar(16)	是	
性别	sex	varchar(1)	是	
手机号	cardid	varchar(11)	是	
邮箱	email	varchar(64)	是	

节点信息表用于存储云平台中创建的虚拟设备信息,根据 3.3.1 节和 5.2.2 节可知虚拟设备与真实节点是一一对应的关系,通过表中的节点 ID 相互关联。具体的属性定义如表 5.5 所示。

表 5.5 节点信息表 (node\_info)

属性含义	属性名	数据类型	是否为空	附加说明
节点 ID	nodeid	int	否	主键
节点名	nodetitle	varchar(16)	否	
节点编号	authinfo	varchar(16)	否	

数据信息表用于存储节点采集的传感器数据，表中的数据由用户端从云平台获取，并可以作为第四章融合算法的原始输入数据，计算出融合结果。具体的属性定义如表 5.6 所示。

表 5.6 数据信息表 (data\_info)

属性含义	属性名	数据类型	是否为空	附加说明
序号	id	int	否	主键 自增
节点 ID	nodeid	int	否	外键
时间	time	datetime	否	
温度数据	tempdata	float	否	
湿度数据	humdata	float	否	
光强数据	lightdata	int	否	
甲醛数据	HCHOdata	float	否	
CO 数据	COdata	float	否	

(3) 数据融合处理

用户端的数据融合处理功能就是运用本文第四章设计的数据融合算法，实现同质传感器的数据融合，提高观测值的准确性，并且综合多种环境特征，实现对家庭环境的综合评价。数据融合处理功能的实现流程为：

- 第一步：从数据库中的数据信息表中选出每个节点最近时间点的传感器数据，将相同性质的传感器数据组成源数据组，用于融合计算；
- 第二步：将源数据组作为输入数据，通过基于模糊贴近度的一级数据融合方法，计算出各传感器的权重值，输出一级融合结果，通过用户端输出展示；
- 第三步：重复第一、二两步，直至得到全部 5 种环境特征参数的一级融合结果；
- 第四步：将 5 个融合结果组合为因素集，通过隶属度函数计算出判定矩阵；
- 第五步：将判定矩阵输入二级数据融合模型中计算出模糊评判结果，并输出到用户端界面展示。

(4) 用户端界面

用户端的界面按功能可分为三个部分，即用户登录注册界面、主界面和用户信息管理界面。图 5.10 展示了用户登录和用户注册界面，用户输入正确的用户名和密码即可登录使用，用户也可通过注册新的用户信息登录使用。

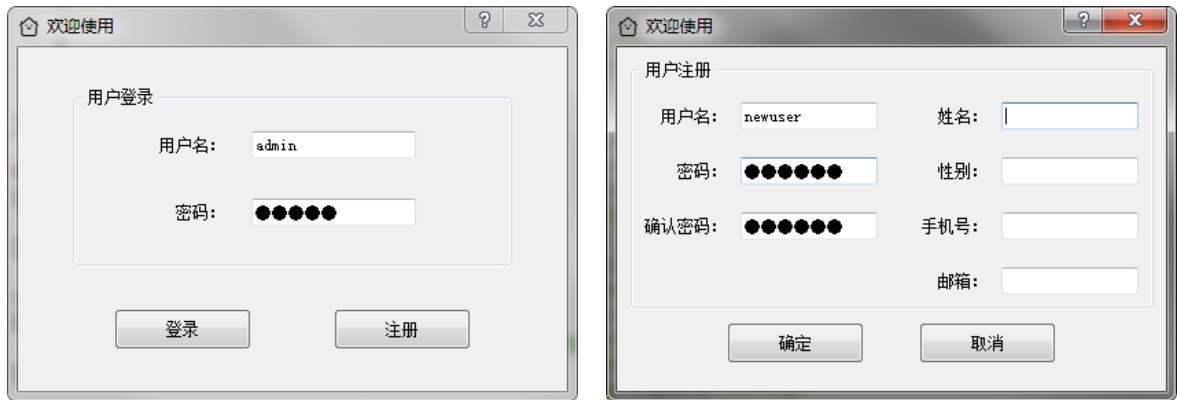


图 5.10 用户登录（左）和用户注册（右）

主界面包括节点数据和舒适度评价两个子页面，分别如图 5.11 和图 5.12 所示。节点数据子页面可以实时显示从云平台获取节点采集的数据，还可以通过历史查询功能查看数据库中保存的历史数据。舒适度评价子页面用于计算和显示数据融合的结果。两个子页面可以通过主界面下拉菜中的选项切换显示。用户需要输入云平台的 APIKey 获得云平台的操作权限后，与云平台建立连接才可从云平台获取数据，实现相应的功能。



图 5.11 主界面节点数据子页面



图 5.12 主界面舒适度评价子页面

用户端还提供用户信息更新与密码修改功能，通过主界面菜单栏中的用户管理可以打开相应的功能窗口，方便用户管理使用。图 5.13 为用户信息更新和密码修改窗口。

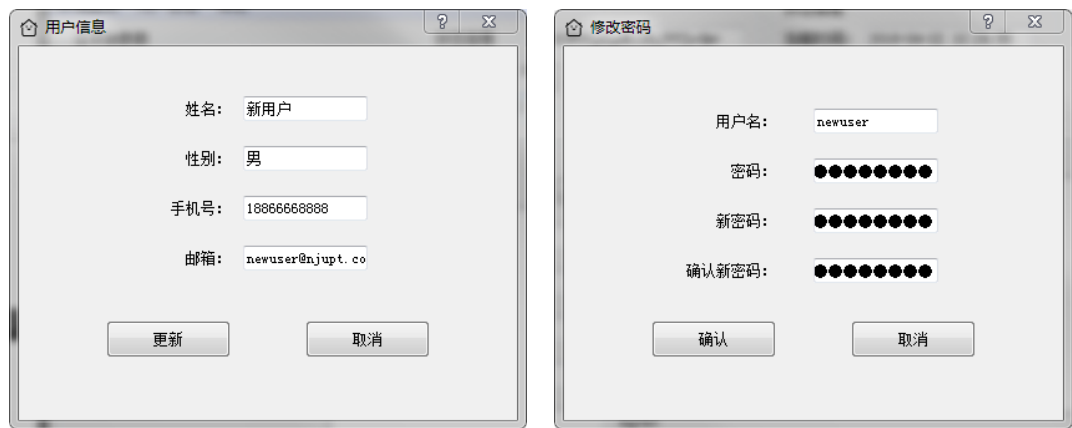


图 5.13 用户信息更新（左）和修改密码（右）

5.4 本章小结

本章主要说明的系统软件设计，根据系统的三层总体结构，依此对各主要部分的软件设计进行说明。首先分析了 3 种 ZigBee 节点的工作原理，给出了节点的软件设计流程。设计制定了 ZigBee 网络与网关通信的数据帧格式。之后说明了网关的串口接收、数据解析、数据上传功能的软件设计。最后阐述了 OneNET 云平台应用设计和用户端的软件设计。

## 第六章 实验分析与系统测试

本章主要是通过实验对第四章提出的数据融合算法进行验证分析，并对家庭室内环境监测系统的硬件和软件进行测试。

### 6.1 实验分析

为了验证数据一级融合算法的有效性，采用 6 个节点在同一时间采集的湿度值作为实验数据，并以湿度计的测量值作为数据采集时刻指真实值的估计值。表 6.1 展示了经数据一级融合算法融合后各传感器权值的分配情况，当前时间点真实值的估计值为 24。由式（4.17）可以计算出融合值为 23.9，与估计值的误差为 $|23.9-24|/24=0.0041$ 。用算术平均法融合得到的结果为 23.6，与估计值的误差为 $|23.6-24|/24=0.0167$ 。对比可知本文的数据一级融合算法较算术平均法更为精确，融合结果更加接近真实值，可以达到提高数据准确度的目的。

从表 6.1 中可以看出，模糊贴中度较低的传感器被赋予的权值较小，反之，模糊贴中度较高的传感器被赋予了较大的权值，这就可以达到对可能存在的较大异常值的抑制，确保了整体融合值的精准度，达到了融合同质传感器数据的目的。

表 6.1 传感器权值分配

传感器序号	某时间点测量值	被信任比例	模糊贴中度	传感器权值
1	25.4	6/6	0.0034	0.0026
2	22.4	6/6	0.1094	0.0841
3	25.0	6/6	0.0421	0.0324
4	22.4	6/6	0.1094	0.0841
5	24.3	6/6	0.9830	0.7558
6	22.3	6/6	0.0533	0.0410

为了进一步验证算法对异常值的抑制能力，对 3 号传感器进行干扰，使其产生异常值。表 6.2 展示了有异常值时权值的分配情况，可以看出 3 号传感器的测量值相比其他传感器存在较大的偏差，根据本文的数据一级融合算法得到模糊贴中度很小，其被分配的权值也非常小。经计算得到的融合值为 22.9，与估计值的误差为 $|22.9-24|/24=0.0458$ 。用算术平均法融

合得到的结果为 28.7，与估计值的误差为 $|28.7 - 24|/24 = 0.1958$ 。对比可知本文的数据一级融合算法计算出的融合结果受到异常值的影响较小，融合结果更加接近真实值。

表 6.2 异常值抑制能力

传感器序号	某时间点测量值	被信任比例	模糊贴近度	传感器权值
1	25.4	5/6	0.0008	0.0004
2	22.4	5/6	0.6007	0.2717
3	55.4	1/6	0.0000	0.0000
4	22.4	5/6	0.6007	0.2717
5	24.3	5/6	0.6499	0.2940
6	22.3	5/6	0.3583	0.1621

为了更好的验证数据一级融合算法的有效性，本文选取了 50 组不同时间点采集的湿度数据，融合结果如图 6.1 所示。从图中可以看出采用本文设计的融合算法比算术平均法更接近真实值。图 6.2 和图 6.3 为不同算法的融合结果与真实值的相对偏差比较和误差比较，为了方便比较相对偏差，将真实值标准化为 0。从图中可以看出，本文算法与真实值之间的相对偏差总体上低于算法平均法，误差总体上也低于算法平均法。

根据上述验证实验的结果分析，本文设计的数据一级融合算法能够提高数据的准确性，对异常值有很好的抑制效果，可以达到数据融合的目的，具有实际的应用价值。

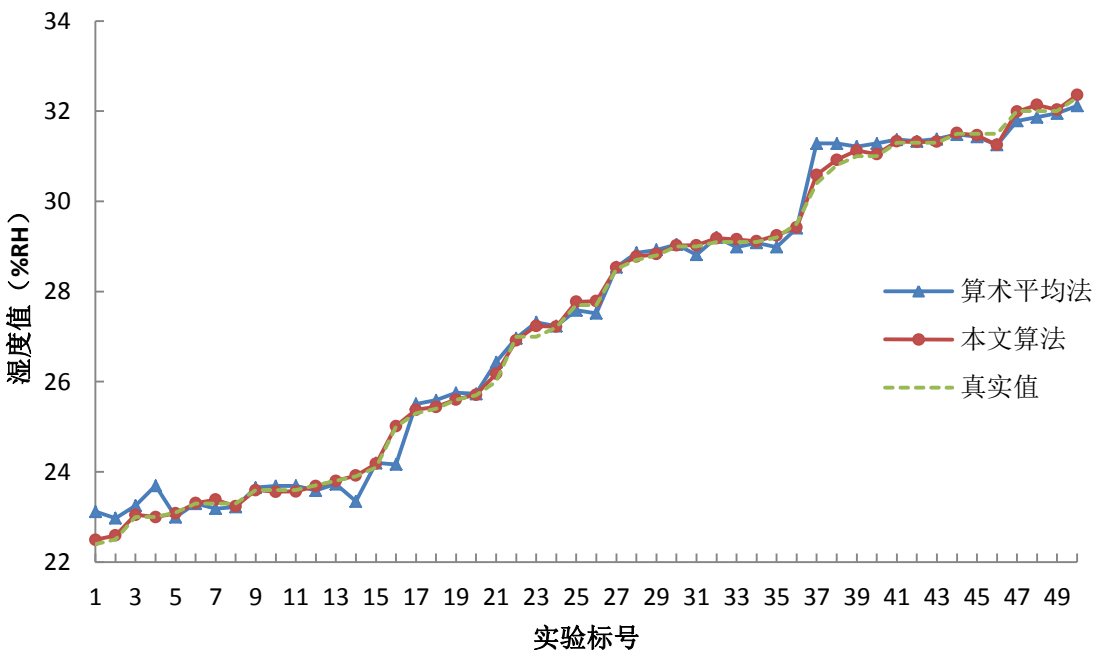


图 6.1 融合结果图



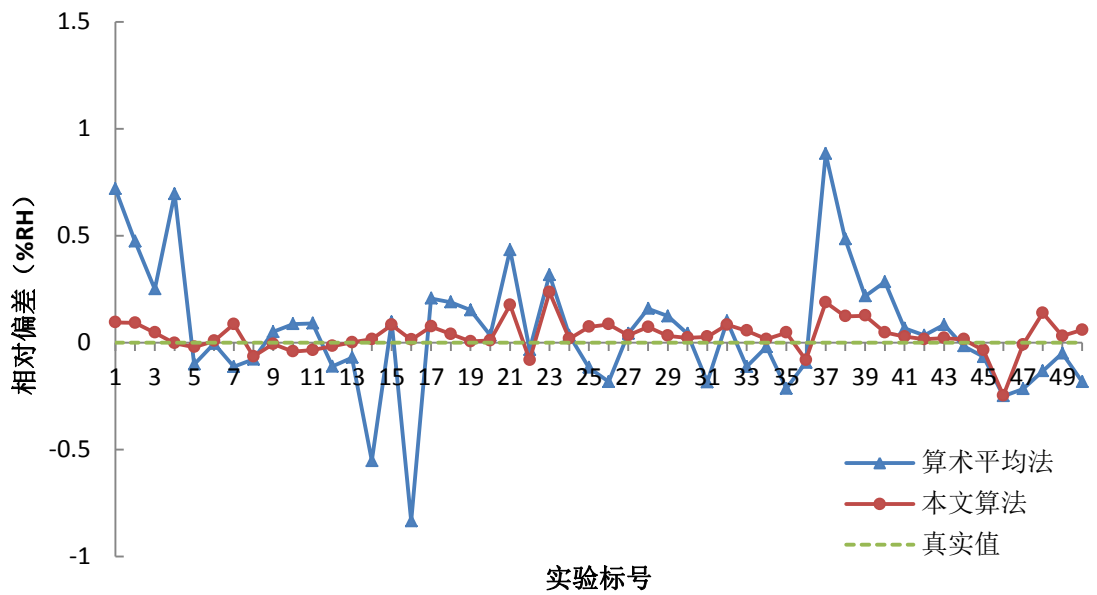


图 6.2 相对偏差比较

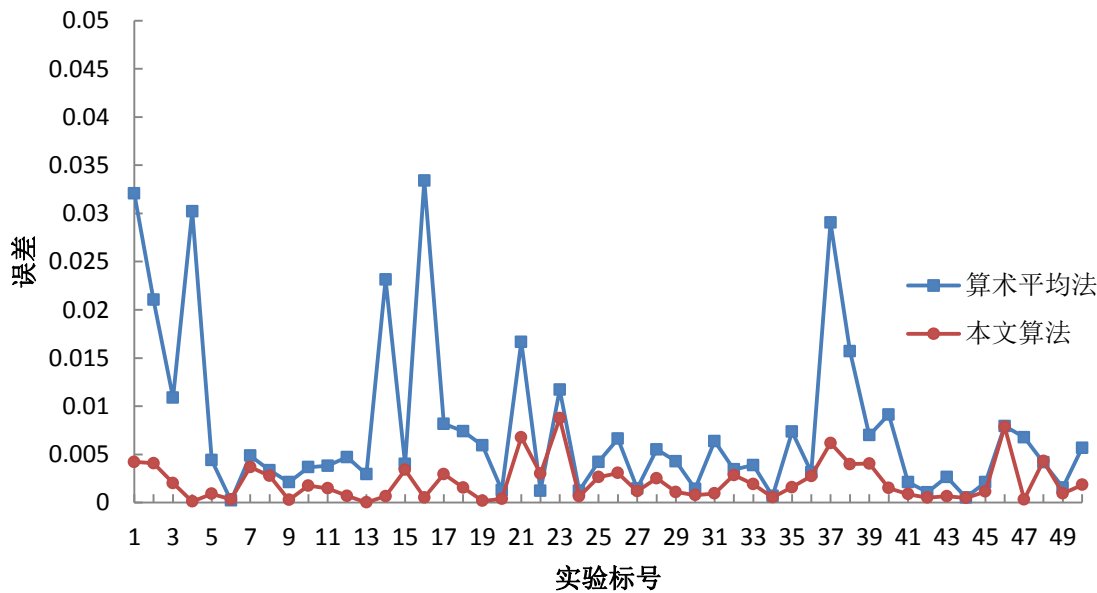


图 6.3 误差比较

为验证数据二级融合算法的有效性，本文以在不同环境舒适度等级下获取的数据作为输入值，利用数据二级融合算法进行评价计算。表 6.3 为在舒适度为优时获取的数据以及评价计算结果，二级融合算法得出的结果与各环境参数反映的结果相吻合。表 6.4 是在舒适度为良时获取的数据以及评价计算结果，虽然一氧化碳所反映的结果为优，但二级融合算法综合评价了多种环境参数，得出了与实际情况相一致的结果。表 6.5 是在舒适度为差时获取的数据以及评价计算结果。从表 6.5 可以看出，不同的环境参数所反映的舒适度不同，很难得出明确的结论，但二级融合算法在综合评价 5 种环境参数的基础上，依然得出了与实际情况相一致的最终结果。综上所述，本文设计的基于模糊综合评判法的二级融合算法能够综合各环

境因素，对舒适度做出综合评判。

表 6.3 舒适度评判结果 I

环境参数	数值	隶属度			结论
		优	良	差	
温度	22.3	1	0.0681	0.0299	优
相对湿度	58.9	1	0.1687	0.0532	优
光强	395	1	0.0617	0.0276	优
甲醛	0.03	1	0.3077	0.0755	优
一氧化碳	1.5	1	0.1649	0.0525	优
融合算法评价结果		0.848	0.1147	0.0373	优

表 6.4 舒适度评判结果 II

环境参数	数值	隶属度			结论
		优	良	差	
温度	25.8	0.2358	0.9615	0.1712	良
相对湿度	39	0.1712	0.9615	0.2358	良
光强	613	0.1637	0.9367	0.2483	良
甲醛	0.06	0.3077	1	0.2	良
一氧化碳	4.2	0.7353	0.5525	0.1063	优
融合算法评价结果		0.1969	0.6655	0.1375	良

表 6.5 舒适度评判结果 III

环境参数	数值	隶属度			结论
		优	良	差	
温度	13.6	0.0238	0.0491	1	差
相对湿度	30	0.0588	0.2	1	差
光强	229	0.3315	0.7483	0.1306	良
甲醛	0.08	0.1379	0.5	0.5	不确定
一氧化碳	10	0.0755	0.2	1	差
融合算法评价结果		0.0639	0.1854	0.7507	差

6.2 系统测试

6.2.1 节点通信测试

为了保证采集的传感器数据能够有效传输，需要对 ZigBee 节点间的通信性能进行测试。在测试过程中，主要考量丢包率和误码率。由于节点主要采集家居室内环境数据，在实际应用时应考虑将节点布置于人体头部常处于的高度，根据相关资料，人体在保持坐姿时头部离地面的高度平均约为 1.2m，为了使数据更具有实用性，可将节点布置在距室内地面约 1.2m 高度。

测试场地选择一间面积约 50 平米的研究生教研室模拟系统的应用场景，在距地面高度 1.2m 处随机布置 6 个终端节点，在协调器附近布置 3 个路由器节点，最后将协调器布置在室内相对中心位置。终端节点同时向协调器发送数据包，每个数据包包含 16 字节数据，两个数据包间间隔 1s，路由器节点只负责数据路由转发。测试分为 5 组，每组发送的数据包总数不同，为了测试网络的抗干扰性，在数据包总数相同情况下加入干扰节点作对比实验。干扰节点由额外的终端节点充当，不间断的向协调器发送数据包。测试结果如表 6.6 所示。

表 6.6 通信性能测试结果

发送数据包数（个）	无干扰节点			有干扰节点		
	接收数据包数（个）	丢包率（%）	误码率（%）	接收数据包数（个）	丢包率（%）	误码率（%）
600	600	0	0	600	0	0
1200	1199	0.1	0.1	1198	0.2	0.1
2400	2398	0.1	0.2	2388	0.5	0.5
4800	4797	0.1	0.3	4704	2	1.7
6000	5989	0.2	0.3	5885	1.9	1.5

从测试结果可以看出，网络通信的丢包率和误码率在有无干扰的情况下都低于 2%，能够保证数据的正常通信。

将传感器连接到终端节点，协调器通过串口与 PC 机连接，利用串口调试工具在 PC 机上查看终端节点发送来的传感器数据。在协调器上电后，分别给多个终端节点上电，打开串口调试工具，在正确配置串口后可以观察到终端节点发送的数据，如图 6.4 所示。

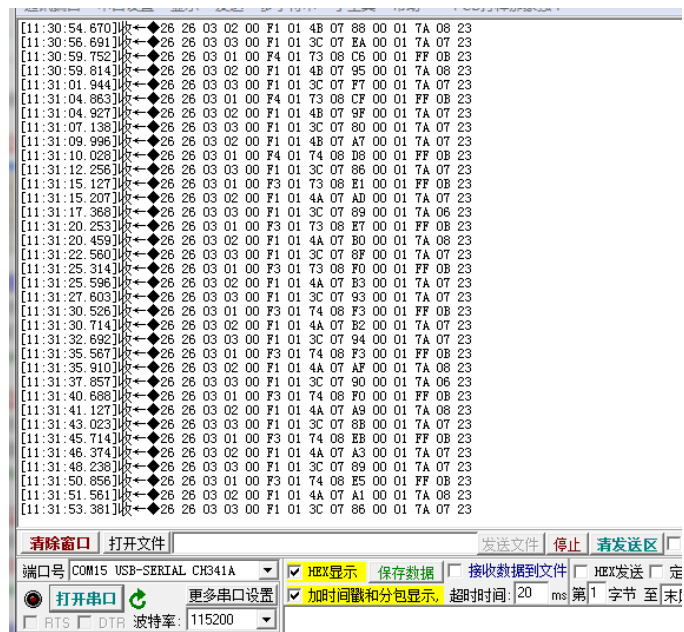


图 6.4 串口数据测试

6.2.2 网关通信测试

网关通信测试主要分为两部分，一是测试网关能否通过串口接收协调器发送的数据，并正确解析；二是测试网关能否将数据上传至云平台。

将网关和协调器通过串口相连接，协调器利用网关提供电源。启动网关，然后给终端节点上电，通过远程终端工具 XShell 观察网关系统命令控制台的输出内容。图 6.5 为网关命令控制台的输出内容，其中 SerialData 部分为从串口接收的数据，共 30 位十六进制数，符合 5.1.3 节设定的数据帧格式。SensorData 部分为经过解析的传感器数据，Request 部分为云平台相应 http 请求的返回信息，errno 和 error 的值分别为 0 和 succ 时，表示数据成功上传至云平台。

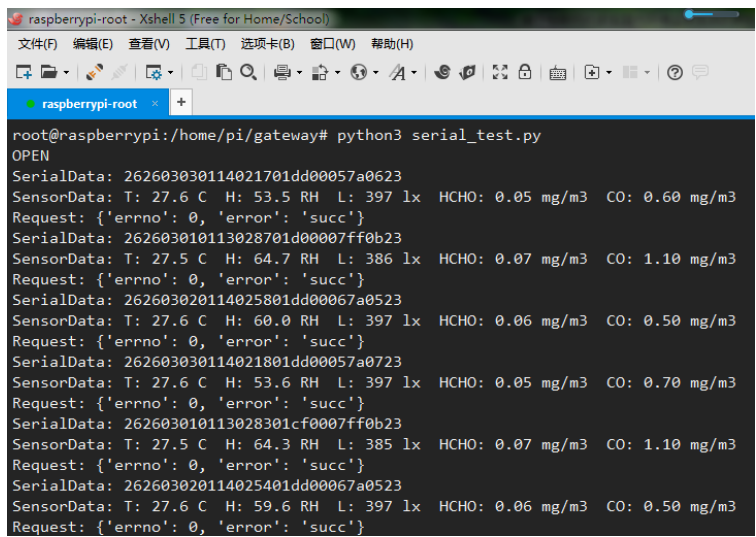


图 6.5 网关通信测试

### 6.2.3 软件运行测试

软件运行测试包括测试云平台应用和客户端对数据接收与处理。当网关接收到由终端节点采集到的环境数据，通过解析、封装数据后上传至云平台，云平台将不同的数据存储在不同的数据流中，最终可以在设计的 Web 端与移动端应用中展示。图 6.6 为云平台 Web 端的数据效果展示。对于移动端应用，用户可以通过与平台关联的 App 查看数据展示效果，图 6.7 为安卓手机版的展示效果。通过图 6.6 和图 6.7 可以说明云平台应用能够正常稳定的实现数据的可视化展示。

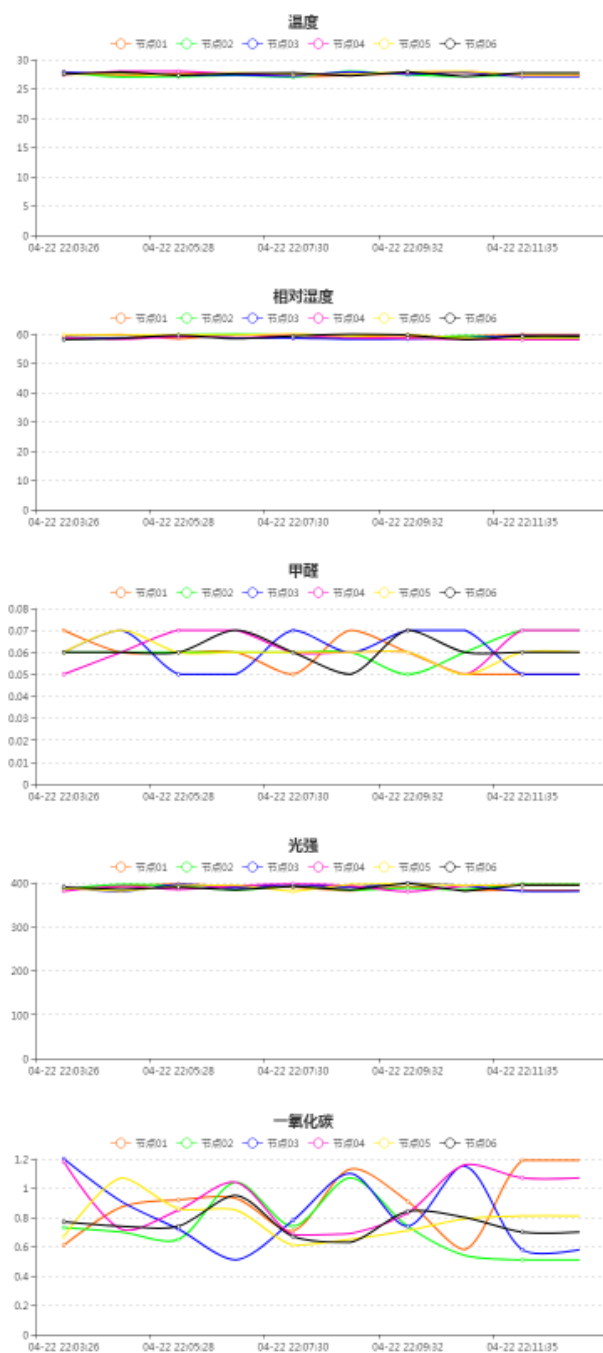


图 6.6 Web 端应用界面

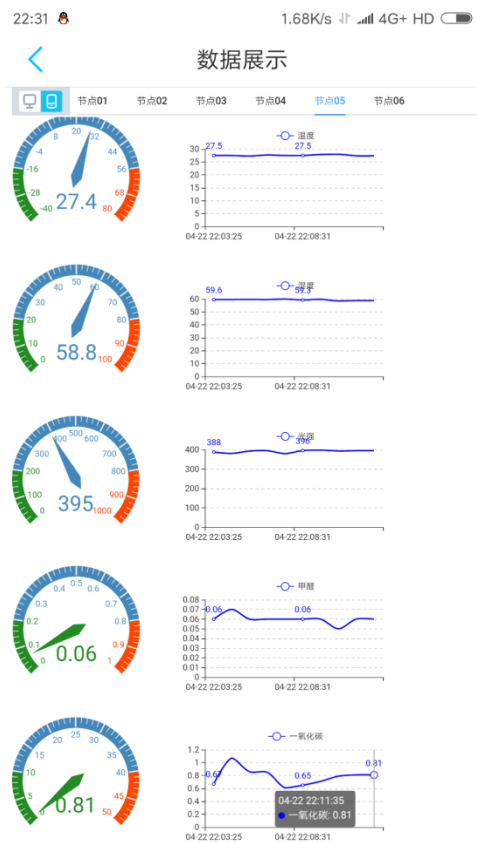


图 6.7 移动端应用界面

用户端的测试包括测试能否正常的与云平台建立或中断连接、能否正常获取存储在云平台的数据、能否正常操作本地数据库以及能否正常的运行数据融合算法对环境做出评价。经过测试，用户端能够正常运行，图 6.8 展示了用户端主界面节点数据子页面的运行效果，图 6.9 展示了用户端主界面舒适度评判子页面的运行效果。



图 6.8 用户端节点数据展示



图 6.9 用户端舒适度评价展示

6.3 本章小结

本章主要是通过实验对第四章提出的数据融合算法进行验证分析，通过实验验证了一级融合算法能够提高数据的准确性，对异常值有很好的抑制效果，然后对二级融合算法的效果进行分析，验证了其可以对环境做出综合评判。最后对家庭室内环境监测系统的节点和网关的通信性能以及软件运行效果进行测试，测试结果表明系统运行稳定，达到了预期的效果。

## 第七章 总结与展望

### 7.1 总结

随着当今生活水平的提高,人们越来越重视提升自己的生活质量,尤其是家庭室内环境的质量,因为环境质量的优劣至今影响着身心健康。人们因此对实时、准确的家庭室内环境监测的需求也随之增加。当今物联网迅猛发展,运用物联网关键技术于环境监测之中,会对监测质量的提升起到举足轻重的作用,也是现在环境监测技术系统的一个重要发展方向。

本文以家庭室内环境监测的目的与需求出发,研究设计了基于物联网的家庭环境监测系统,系统根据物联网的整体体系结构设计总体方案,将 ZigBee 无线通信技术运用到系统中,实时采集并传输温度、湿度、光强、甲醛和一氧化碳五个环境特征的数据至物联网网关。系统选用现在物联网界较为流行的硬件开发平台并结合 OneNET 云平台,设计了物联网网关加云平台的方案,实现云计算与物联网的结合。系统采用数据融合技术处理数据,提出两级数据融合结构,有效提升传感器所采集数据的准确性,并能综合多种室内环境信息,对家庭的环境质量做出评价,提高环境监测质量。系统所使用的设备体积小,整体设计方便易实施,开发周期短且成本低,为家居环境监测提供的有效的解决方案,具有一定的实际应用价值。

本文在系统的相关技术研究与系统的设计上主要完成了以下工作:

(1) 分析了家庭环境监测的研究背景和发展趋势,介绍了室内环境监测技术的研究现状。对本文所基于的物联网技术做了简要概述,分析了物联网的体系结构以及介绍了体系结构中使用到的关键技术。重点介绍分析了支撑系统设计的 ZigBee 技术和数据融合技术,介绍了 ZigBee 技术的概念,分析了 ZigBee 技术的协议架构与网络拓扑,对数据融合技术的基本原理、数据融合的级别与结构以及主要方法做了详细分析。

(2) 完成系统的总体设计,确定了基于物联网感知层、传输层和应用层的三层系统总体结构。对系统各主要部分的硬件进行设计,确定选用 CC2530F256 作为系统的无线节点主控芯片,对系统监测所需的传感器进行了选择。设计了物联网网关模块,选用业界较为流行的 RPi3 B 作为网关硬件开发平台,确定了网关与上下层间的通信方式。选择 OneNET 作为系统使用的物联网云平台,确定云平台的接入方法和通信协议。

(3) 完成系统软件设计,在环境特征参数采集模块实现包括协调器、路由节点和终端节点的无线通信、串口收发、传感器驱动和数据采集。制定了数据传输的帧格式,实现了网关与 ZigBee 网络的数据通信。在数据解析上传模块中实现了网关对数据的解析,实现了与 OneNET 平台



的连接并将数据上传。在数据存储处理模块建立了云平台的系统设计监测界面，实现了数据在 Web 浏览器和移动 App 端的实时展示。在 PC 端基于 Qt5 实现了系统数据融合处理以及可视化界面。

(4) 设计系统数据融合结构，提出了基于模糊理论的两级数据融合算法。为了降低传感器自身测量结果的局限性与不准确性，设计了基于模糊贴近度的一级数据融合算法，使得到的环境特征参数更接近真实值。基于模糊综合评判的二级数据融合在第一级融合的基础上，横向分析各个环境特征参数，对家庭环境综合质量做出评判。

(5) 最后通过实验对本文设计的家庭室内环境监测系统的硬件和软件进行调试，并给出了系统的效果展示，验证系统可行。

## 7.2 展望

本系统依据物联网体系结构结合并应用数据融合技术，实现了家庭室内环境监测的基本功能，但是由于时间、资金和个人能力有限，系统还存在一些不足之处，想要投入实际应用还需要进一步的优化改进，具体有以下几个方面：

(1) 为了达到更真实的监测结果，可以增加环境特征参数监测的种类，并选择精准度更高的传感器来获取环境数据，从而能更全面更准确的反应环境情况。

(2) 本系统只是对环境进行监测和评判，终端节点只负责发送数据。未来可以添加指令接收相应功能，就可以根据环境的评价结果，控制与节点相连的外部设备，例如空调、空气净化器等，及时的对环境进行调控，使系统更加智能化。

(3) 系统的用户端只实现必要的基础功能，界面也不够美化，未来还需要进一步优化并增加更多的功能，例如对数据库的优化和管理、增加对云平台、节点的控制功能等。

## 参考文献

- [1] Chung W Y, Lim J W. Patterning of thin tin oxide films with nanosize particle for 2-dimensional micro gas sensor array[J], Curr. Appl. Phys, 2003, 3:413-416.
- [2] Chung W Y, Lee D D. Real time multi-channel gas leakage monitoring system using CPLD chip[J], Sens. Actuators B, 2001, 77(1):186-189.
- [3] Coetzee L, Eksteen J. The Internet of Things-promise for the future? An introduction[C]. Ist-Africa Conference Proceedings, IEEE, 2011:1-9.
- [4] Singh D, Tripathi G, Jara A J. A survey of Internet-of-Things: Future vision, architecture, challenges and services[C]. Internet of Things. IEEE, 2014:287-292.
- [5] Davidoff S, Min K L, Yiu C, et al. Principles of Smart Home Control.[C]. UBIComp 2006: Ubiquitous Computing, International Conference, UBIComp 2006, Orange County, Ca, Usa, September. DBLP, 2006:19-34.
- [6] Harper R. Inside the Smart Home[M]. Springer London, 2003.
- [7] Atzori L, Iera A, Morabito G. The Internet of Things: A survey[J]. Computer Networks, 2010, 54(15):2787-2805.
- [8] Alam F, Mehmood R, Katib I, et al. Analysis of Eight Data Mining Algorithms for Smarter Internet of Things(IoT)[J]. Procedia Computer Science, 2016, 98(C):437-442.
- [9] Cai R M. Overview of the Internet of Things[J]. Electronic Product Reliability & Environmental Testing, 2011, volume 24(2):211-228(18).
- [10] Wang C, David B, Chalon R. A Smart City Case Study: Dynamic Management of Road Lanes[C]. International Conference on Distributed, Ambient, and Pervasive Interactions. Springer, Cham, 2014:629-640.
- [11] Al-Fuqaha A, Guizani M, Mohammadi M, et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(4):2347-2376.
- [12] Mehmood R, Alam F, Albogami N N, et al. UTiLearn: A Personalised Ubiquitous Teaching and Learning System for Smart Societies[J]. IEEE Access, 2017, 5(99):2615-2635.
- [13] Mitchell H B. Multi-Sensor Data Fusion: An Introduction[M]. Springer Publishing Company, Incorporated, 2007.
- [14] 薛娇娆,李文君,魏恩棋.室内空气环境监测技术的现状及问题[J].绿色科技,2016(20):59-60.
- [15] 曹彬.公共建筑室内环境质量与人体舒适性的关系研究[A].中国建筑学会暖通空调分会、中国制冷学会空调热泵专业委员会.全国暖通空调制冷 2010 年学术年会学术文集[C].中国建筑学会暖通空调分会、中国制冷学会空调热泵专业委员会:2010:5.
- [16] 普剑江.室内环境监测与舒适度评判系统研究[J].低碳世界,2013(22):28-29.
- [17] 荣洽.物联网技术在环境监测领域中的应用[J].通讯世界,2017(23):351-352.
- [18] 黄卜夫,吴明光,杜贵福.欧洲设备安装总线(EIB)概述[J].电子技术应用,2001(04):6-8.
- [19] 王永利,朱琨,蒋军.基于 EIB 的融合组网技术在智能家居中的应用[J].信息通信技术,2014,8(03):30-34.
- [20] Desbonnet J, Corcoran P M. System architecture and implementation of a CEBus/Internet gateway[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1997, 43(4): 1057-1062.
- [21] 闫林生.物联网家居环境智能监测系统研究[D].湖南工业大学,2014.
- [22] ZigBee Alliance ZigBee Specification. "Document 0534r17", 2007.
- [23] 徐庆伟.智能家电发展与研究现状分析[J].现代商贸工业,2010,22(08):101-102.
- [24] 张凌.室内环境监测中的 BP 神经网络算法的改进及其仿真分析[D].南京邮电大学,2017.
- [25] 张凯,徐晓光,胥松涛,周丽森,张伟,周丽丽.浅谈《公共场所卫生管理条例实施细则》的执法困境与对策[J].中国卫生监督杂志,2017,24(04):387-390.

- [26] 刘文凯.室内环境空气质量监测技术规范研究[D].清华大学,2004.
- [27] 李连东.室内环境空气监测中存在的问题及对策探讨[J].化工设计通讯,2016,42(12):122+128.
- [28] 马瑞.基于 ARM 的室内环境监测系统设计[D].西北师范大学,2016.
- [29] 闽栋.物联网与移动互联网融合发展促进信息消费[J].世界电信,2013(12):23-27.
- [30] Tao Wang. Development direction of smart home system[C]. International Conference on Industrial Mechatronics and Automation, Wuhan, 2010: 310-313.
- [31] Dongmei Yan, Zhiguan Dan. ZigBee-based Smart Home System Design[C]. 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, Chengdu, 2010: 650-653.
- [32] Joonseok Park, Mikyeong Moon, Seongjin Hwang, Keunhyuk Yeom. Development of Simulation System for Validation Contextual Rule in Smart Home[J]. IEEE, 2007, 1143-1146
- [33] Yeong-Hyun Kwon, Dong-Ryeol Shin. The security monitoring system using IEEE 802.15.4 protocol and CMOS Image Sensor[J]. IEEE Computer Science, 2009, 1197-1120
- [34] Tien-Wen Sung, Chu-Sing Yang, An adaptive joining mechanism for improving the connection ratio of ZigBee wireless sensor network[J]. International Journal of Communication System, 2010,23:231-235.
- [35] 刘梦亭,赵丽红.基于 ARM11S3C6410 与 GPRS 的智能家居远程控制系统[J].现代电子技术,2015,38(5): 27-30.
- [36] Dong J, Zhuang D, Huang Y, et al. Advances in multi-sensor data fusion: Algorithms and applications[J]. Sensors, 2009, 9(10): 7771-7784.
- [37] 胡丹丹,肖书明,王燕清,高庆吉.基于多传感器的数据融合技术[J].东北电力学院学报,2004(01):62-67.
- [38] 李娟,李甦,李斯娜,陈新亿.多传感器数据融合技术综述[J].云南大学学报(自然科学版),2008,30(S2): 241-246.
- [39] Petriu E M, Patry G G, Whalen T E, et al. Intelligent robotic sensor agents for environment monitoring[C]. Virtual and Intelligent Measurement Systems, 2002. VIMS'02. 2002 IEEE International Symposium on. IEEE, 2002: 14-19.
- [40] Alam F, Mehmood R, Katib I, et al. Data fusion and IoT for smart ubiquitous environments: A survey[J]. IEEE Access, 2017, 5: 9533-9554.
- [41] Gubbi J, Buyya R, Marusic S, et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions[J]. Future generation computer systems, 2013, 29(7): 1645-1660.
- [42] 沈苏彬,范曲立,宗平,毛燕琴,黄维.物联网的体系结构与相关技术研究[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2009,29(06):1-11.
- [43] Serbanati A, Segura A S, Oliverau A, et al. Internet of Things Architecture[J]. Concept and Solutions for Privacy and Security in the Resolution Infrastructure, EU Project IoT-A, Project Report D, 2013, 4.
- [44] 李文琛.基于多传感器数据融合的无线环境监测系统[D].南京理工大学,2014.
- [45] 刘法贵,赵娟.模糊贴近度及应用[J].华北水利水电学院学报,2006, 27( 3):104-106.
- [46] 李安贵.模糊数学及其应用[M].北京:冶金工业出版社,2009.
- [47] 韩峰,朱镭,智小军.基于模糊理论的多传感器数据融合测量[J].应用光学,2009,30(06):988-991.
- [48] 王桂民.基于规模化经营的水稻生产机器系统优化研究[D].江苏大学,2017.
- [49] 张中昱. 基于 BP 神经网络和模糊综合评价的环境分析评价系统[D].天津大学,2006.
- [50] 杨纶标,高英仪,凌卫新.模糊数学原理及应用[M].广州:华南理工大学出版社,2011:94-106.
- [51] 马钊.基于模糊综合评判的认知无线电系统安全态势评估方法研究[D].中国地质大学,2017.
- [52] Li Y, Sun Z, Han L, et al. Fuzzy Comprehensive Evaluation Method for Energy Management Systems Based on an Internet of Things[J]. IEEE Access, 2017, PP(99):1-1.
- [53] Sun H, Wang W, Cao Y, et al. Application of Fuzzy Data Fusion in Multi-sensor Environment Monitor[C]. International Conference on Computational Intelligence and Security. 2009:550-553.

## 附录 攻读硕士学位期间申请的专利

- (1)倪晓军、汤振、葛昌利,一种基于数据融合的环境等级评估方法,201711445464.3,2017.12;
- (2)倪晓军、葛昌利、汤振,一种基于多 GPS 接收机的无人机姿态追踪方法,201710838971.7,2017.09。

## 致谢

时光匆匆，近三年的研究生生涯很快就要进入尾声。回顾这几年在南邮的学习和生活时光，我的收获颇多，很感谢南京邮电大学提供的学术平台和极好的运气，让我有机会师从倪晓军导师门下、遇见可爱的同学和朋友们。在毕业论文写作之际，我想对给予我帮助和鼓励的导师、好友及父母表示深深的感谢。

首先，要感谢我的导师倪晓军老师，从我读研究生开始到毕业论文的完成都离不开倪晓军老师的悉心指导。说起与倪晓军老师的第一次相识还是在我大三的时候，那时倪老师是我微型计算机原理与接口技术课程的任教老师，倪老师风趣幽默且严谨认真的教学风格深深的吸引着我，对于我在学习中遇到是问题倪老师总是给予耐心细致的解答，是我从中获益良多，这也促使着我加入倪老师师门攻读研究生。读研期间，倪老师更是在学术上给予我专业的指导，让我获益匪浅。为了培养专业硕士的工程实践能力，倪老师主动推荐我加入校企合作的科研项目，让我在项目中获得了很多技能，更重要的是收获的不可多得的项目实践经历，更为我后来的求职就业提供的巨大的帮助。

其次，感谢我的同门葛昌利同学，感谢师门的师兄师姐师弟师妹在读研期间对我的真心帮助，充实了我的生活。感谢 905 教研室朝夕相处的伙伴们，虽然与大家的研究方向不同，但是每次交流都可以使自己的视野和思维更加开阔，感受颇深，感谢他们陪我度过短暂却很有意义的三年科研时光。

我还要感谢我的父母和彭高婧同学，他们总是在我学习的时候默默的支持我，在我遇到困难和不开心的时候无条件的帮助和理解我，他们的支持是我完成学业最坚强的后盾。我知道我要用一辈子去回报他们。

最后，感谢审阅组的各位专家对本论文提出的宝贵意见和建议。