

杭州电子科技大学

硕 士 学 位 论 文

题 目：面向软件定义的智能物联网网关的研究与设计

研 究 生 袁 博

专 业 电子与通信工程

指导教师 周磊 副研究员

完成日期 2020 年 3 月

杭州电子科技大学硕士学位论文

面向软件定义的智能物联网网关的
研究与设计

研 究 生： 袁 博

指导教师： 周磊 副研究员

2020 年 3 月

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

**For software-defined smart IoT gateways
Research and Design**

Candidate: Yuan Bo

Supervisor: Associate researcher. Zhou Lei

March, 2020

摘要

随着 5G 时代的到来和智能终端的迅速发展, 5G 为推动物联网的革新提供了强有力的技术支持, 5G 标准的制定满足物联网对网速、带宽、安全的需求。在万物互联的愿景下, 以及物联网应用的高普及率, 必将会有大量的物联网智能终端数据随时随地的产生, 物联网网关数据将呈现多元化, 多量化, 复杂化。这也为物联网网关数据管理带来如何实现数据管理的敏捷性, 高效性, 稳定性不足问题。传统的物联网网关功能模式单一, 组网操作繁琐, 情景模式特色化不足等已无法满足用户, 对于产品可交互, 用户自己做主, 以及“傻瓜操作”的需求。

首先, 本文针对日益复杂, 多元化, 高增量的物联网感知层数据为数据管理来的压力以及数据处理方面性能不足的问题, 提出一种基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型, 提高了数据处理的敏捷性, 高效性, 稳定性。

其次, 针对软件定义物联网网关功能、数据帧协议格式以及感知层模式配置以及终端设备统一管理、多协议融合、和向云端服务器提供数据等问题。本文设计了一套面向软件定义的智能物联网网关架构, 该架构分为感知层、信息存储层、网络层、数据分析处理层以及指令集层。增强网关与场景及需求的快速融合能力, 实现软件定义网关功能。

最后, 针对物联网网关功能的异构问题, 本文实现了一套面向软件定义的智能物联网网关软硬件平台, 通过向上层提供一套通用型指令集调度接口的物联网网关, 满足了用户弹性化定义网关的需求, 实现网关功能的异构以及硬件模块可插拔。

本文设计并实现的一种面向软件定义的智能物联网网关, 融合指令集设计相关技术, 软件定义相关理论技术, 事务驱动相关方法, 多协议异构融合相关技术, 信息存储相关技术, 利用物联网网关相关技术, 实现了对于物联网网关功能的弹性化软件定义。本文设计的网关已投入实际应用, 在本校后勤智能产业展厅、实验室、酒店、网咖等地安装几十套, 已稳定运行一年多并得到广大用户的一致好评, 目前该智能物联网网关已与诸暨供电局签署战略合作伙伴关系, 该智能物联网网关具有实际应用价值。

关键词: 物联网, 网关, 软件定义, 事务驱动, 指令集, 异构融合

ABSTRACT

With the advent of the 5G era and the rapid development of smart terminals, 5G has provided strong technical support to promote the innovation of the Internet of Things. The formulation of 5G standards meets the Internet of Things' needs for network speed, bandwidth, and security. Under the vision of the Internet of Everything and the high penetration rate of IoT applications, a large amount of IoT smart terminal data will be generated anytime and anywhere, and the IoT gateway data will be diversified, quantified and complicated. This also brings the problem of how to achieve data management agility, efficiency, and lack of stability for the data management of the IoT gateway. The traditional IoT gateway has a single function mode, tedious networking operations, and insufficient specialization of scenario modes. It has been unable to meet users' needs for product interaction, user self-control, and "fool operation".

First of all, this article aims at the increasingly complex, diversified and high-incremental IoT perception layer data, which brings pressure on data management and insufficient performance in data processing. This paper proposes a data management model for IoT gateways based on transaction-driven processes. Agility, efficiency and stability of data processing.

Secondly, it addresses the issues of software-defined IoT gateway functions, data frame protocol format, and configuration of the perception layer mode, as well as unified management of terminal equipment, multi-protocol integration, and provision of data to cloud servers. This paper designs a set of software-oriented intelligent IoT gateway architectures. The architecture is divided into perception layer, information storage layer, network layer, data analysis and processing layer, and instruction set layer. Enhance the rapid integration of gateways with scenarios and requirements, and implement software-defined gateway functions.

Finally, in view of the heterogeneity of IoT gateway functions, this article implements a software-defined intelligent IoT gateway software and hardware platform. The IoT gateway provides a set of general-purpose instruction set scheduling interfaces to the upper layer to meet the user flexibility. Define the requirements of the gateway, realize the heterogeneity of the gateway functions, and the pluggable hardware modules.

This paper designs and implements a software-defined intelligent Internet of Things gateway, integrated instruction set design related technologies, software-defined related theoretical technologies, transaction-driven related methods, multi-protocol heterogeneous fusion related

technologies, information storage related technologies, and the use of the Internet of Things Gateway-related technologies enable flexible software definition of IoT gateway functions. The gateway designed in this article has been put into practical application. Dozens of sets have been installed in the school's logistics intelligent industry exhibition halls, laboratories, hotels, Internet cafes and other places. It has been running stably for more than a year and has been well received by users. At present, the intelligent IoT gateway It has signed a strategic partnership with Zhuji Power Supply Bureau. This intelligent IoT gateway has practical application value.

Keywords: IoT, Gateway, Software definition, Transaction driven, Instruction Set, Heterogeneous fusion

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	II
目录.....	IV
1 绪论.....	1
1.1 研究背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状及趋势.....	2
1.2.1 物联网研究现状.....	2
1.2.2 物联网网关研究现状.....	3
1.2.3 软件定义网络研究现状.....	4
1.3 课题主要创新点.....	5
1.4 论文组织结构.....	5
1.5 本章小结.....	6
2 相关理论研究基础和技术.....	7
2.1 物联网技术及应用.....	7
2.1.1 传统物联网架构.....	7
2.1.2 物联网的支撑技术.....	8
2.2 智能物联网网关关键技术.....	8
2.2.1 多协议异构融合关键技术.....	9
2.2.2 信息存储关键技术.....	9
2.2.3 事务驱动关键技术.....	9
2.2.4 软件定义指令集关键技术.....	9
2.2.5 感知层硬件隔离关键技术.....	9
2.3 无线传输技术.....	9
2.3.1 Zigbee 无线传输技术.....	9
2.3.2 NB-IOT 无线传输技术.....	10
2.4 指令集.....	11
2.5 低功耗发展与应用.....	12
2.6 本章小结.....	12
3 基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型.....	13

3.1 基于事务驱动过程的物联网网关数据处理模型.....	13
3.2 事务处理模块.....	14
3.3 事务驱动链.....	15
3.4 事务结构链.....	16
3.5 事务驱动构造过程.....	16
3.6 数据模型设计.....	17
3.7 模型性能分析及结论.....	17
3.7.1 模型分析对比.....	17
3.7.2 实验结果分析及结论.....	18
3.8 本章小结.....	20
4 面向软件定义的智能物联网网关架构与设计.....	21
4.1 智能物联网网关系统需求分析.....	21
4.2 面向软件定义的智能物联网网关架构设计.....	21
4.3 智能物联网网关设计.....	22
4.3.1 网关感知层设计.....	22
4.3.2 智能网关信息分类器设计.....	23
4.3.3 网关信息存储层设计.....	23
4.3.4 面向软件定义的智能网关网络层设计.....	25
4.3.5 面向软件定义的智能网关数据分析处理层设计.....	26
4.3.6 面向软件定义物联网网关指令集层.....	27
4.4 指令集调度仓库构建.....	27
4.4.1 软件定义指令集调度执行器.....	28
4.4.2 软件定义感知层传感网络指令集.....	29
4.4.3 软件定义网络功能模式指令集.....	29
4.4.4 软件定义内存管理操作指令集.....	30
4.4.5 软件定义环境“脉搏”信息融合数据帧指令集.....	30
4.4.6 面向软件定义的帧数据格式自定义指令集.....	30
4.4.7 面向软件定义的终端设备调度控制指令集.....	30
4.5 本章小结.....	31
5 智能物联网网关的软硬件功能实现.....	32
5.1 智能物联网网关硬件层实现.....	32
5.1.1 核心控制单元.....	32
5.1.2 有线网络传输硬件层.....	33
5.1.3 无线传输模块.....	34

5.1.4 环境感知模块模块.....	35
5.1.5 印刷电路板(PCB)设计	35
5.2 智能物联网网关软件层实现.....	36
5.2.1 主控制程序.....	36
5.2.2 数据分析处理程序.....	37
5.2.3 信息存储软件程序.....	39
5.2.4 网络通信程序.....	40
5.2.5 网络通信数据协议帧格式设计.....	41
5.2.6 软件定义程序.....	42
5.3 智能物联网网关软件层性能分析.....	44
5.3.1 网关常规数据管理程序性能分析.....	44
5.3.2 基于事务驱动模型的数据管理模型的网关数据管理程序分析.....	45
5.3.3 管理程序性能分析.....	46
5.4 本章小结.....	46
6 网关平台测试与应用.....	48
6.1 网关硬件层测试.....	48
6.1.1 电源供电电路测试.....	48
6.1.2 主控 MCU 最小系统电路测试.....	48
6.1.3 传感器电路测试.....	48
6.1.4 以太网电路测试.....	48
6.2 网关软件层测试.....	49
6.2.1 网关一键式组网功能测试.....	49
6.2.2 网关信息查询功能测试.....	50
6.2.3 软件定义功能测试.....	50
6.2.4 网关平台展示.....	51
6.3 应用场景.....	52
6.4 智能终端设备展出.....	52
6.4.1 低功耗智能门锁.....	52
6.4.2 智能控制面板.....	52
6.4.3 智能红外转发器.....	53
6.4.4 智能人体红外感应.....	53
6.5 详细设计与实现.....	53
6.5.1 Web 端	53
6.5.2 移动客户端.....	55

6.6 面向软件定义的智能物联网网关优势对比.....	56
6.7 系统应用.....	58
6.8 本章小结.....	58
7 总结与展望.....	60
7.1 论文工作总结.....	60
7.2 工作展望.....	61
致谢.....	63
参考文献.....	64
附录.....	67

1 绪论

1.1 研究背景与意义

物联网（Internet of Things，缩写 IoT）的本质就是将各种传感器连接起来，通过互联网实现人与物品、人与人的关联，达到物品智能化的效果。物联网“搭载”互联网以及传统电信网等信息，让“冰冷的物体”具备信息交流，智能分析，可模拟类似人与人之间文字交流实现物与物之间的信息传递，并且实现人与物体之间的信息交互，实现物-物、人-物之间的互联互通。顺应经济全球化的迫切需求，让身边的事物体既是一个信息单元个体，而且还是庞大的系统集群中的一个“杠杆单元”。让物体信息化，智能化，物与物之间实现通信交互，实现多信息单点物体协同运行。数据上传至云端，庞大的物物数据，实现云端-智能信息物体单元协同工作。具备独立信息传递的物体单元之间实现互联互通的网络构建。

近些年物联网被广泛应用于智能农业，智能教室，智能家居，智慧用电，工业控制以及军事国防等领域。已经在多个方面改变了全球几十亿人的生活以及工作方式。服务于社会大众，但是目前基于物联网有关于人类社会、文化、科技与经济信息的部分采集还必须依靠人工来完成输入和管理的操作。随着社会的长足进步，在社会的经济导向、社会生活驱动以及民众的消费需求的影响^[1]。无论是从网络管理，信息安全性方面，海量物体信息单元设备管理、物联网网络硬件层以及软件架构都将对传统的物联网技术带来冲击，必将面临一场巨大的变革与挑战。在物联网庞大的物联网网络内，物联网网关作为物联网网络负责中端云联合的桥梁，负责搭建物联网局域网络，统一管理调度物体信息单元设备，实现端云数据实时交互，是物联网网络中重要的一环，决定着物联网单元信息设备与云服务器之间的信息同步，通信数据的安全性以及保证物联网内数据实时通信。

由于物联网技术、家庭无线局域网技术的成熟以及开源硬件以及协议栈的高速发展，类似物联网相关应用如雨后春笋般生长，导致大部分厂商都成为软硬件集成商。协议栈“嫁接”使物联网应用的技术门槛一再降低，各种物联网智能硬件和智能场景方案如雨后春笋般出现。^[2]这些物联网智能硬件以及解决方案，丰富便捷了人们的生活，同时也有很多弊端。首先，物联网只是一个技术，结合物联网应用于不同场景，例如智能家居行业。没有制定统一的行业技术标准，众多厂家采用基于开源协议栈进行封装，封装自己内部协议。以至于行业至今没有统一的兼容性高的技术标准。行业没有统一的智能网关标准，不同厂家各抒己见，有自己的特点，入行门槛相对较高。减缓了物联网在应用产业的拓荒之路，减缓智能全球化的速度。用户体验感没有跟上，不同厂家都有自己的特色智能产品，由于厂家之间缺乏兼容性，用户根据兴趣自由组合智能家居网络设备，由于缺乏兼容性，用户需要购买不同厂商的产品，

并需要绑定式的购买特定智能家居网关。用户需要重新下载 APP 进行试用学习并进行配置，增加用户的工作量，降低用户体验。需要重新再配置网络，室内可能会存在多个智能物联网网络。增加网络的复杂性。传统物联网网关数据处理方式单一，批量数据基于一个数据处理软件串行解析处理，很大程度上限制了网关处理数据实时性的要求，由于当前网关接触的数据都是小批量，数据类型单一。当传统网管处理大批量多元数据时，这种弊端就被无限放大化。

这些数据如何高可靠，高稳定，用户按需定制数据。传统智能家居网关协议单一迭代更新能力差，新的协议更新需要手动刷固件，固件是厂商已经封装好的软件包。用户无法自主修改，这样就缺乏组网灵活性。传统网关自组网灵活性，兼容性差、不同厂家的设备之间不支持互相加网操作，需要根据说明文档进行繁琐的配置操作，增加用户的工作。由于网络协议的固定封装，使设备间缺乏互联互通性，不支持独立设备加入网络。传统网关针对用户的功能需求弹性化选择不足，用户不能根据自己的需求，弹性化选择智能单品组成个性化智能家居系统。需要根据指定厂家提供的情景模式进行选择使用，缺乏个性化。增加用户操作复杂度。因此，开发集软件定义物联网网关提供新的出发点，利用 SDIoT 的集中控制，弹性化定制，简化配置，提高性能的优势^[3]。将该思想应用于物联网网关上，可以改善传统网关协议单一，设备接入兼容性差，配置复杂，数据协议格式无法配置，不支持情景配置等特点，低功耗技术引入。与此同时会带来新的挑战，多协议兼容性，通信可靠性，建立可靠稳定的信息存储模型，建立庞大的硬件指令集以及通信协议指令集，允许不同厂商设备接入网络等。因此如何利用 SDIoT 使物联网网关变得更加可靠、稳定、灵活、以及安全性，对模型优化是重大的考验，需优化模型，做到扬长避短。对于研究 SDIoT 应用于物联网网关具有重要价值以及改变未来物联网架构具有重要意义。

本设计将针对智能物联网网关异构能力不足，基于事务驱动过程的数据管理模型，研究设计一种集多协议异构融合与指令集于一身的面向软件定义的智能物联网网关，是一个非常有益的课题。

1.2 国内外研究现状及趋势

1.2.1 物联网研究现状

物联网是基于互联网延伸出的一种网络技术，互联网面向广域的网络用户，物联网面向具有数据通信功能的设备，通过统一制定的通信协议，实现物体与物体之间的数据交互。在冰冷的物体之间形成可进行自主数据交互的网络。物联网分为感知层、数据处理层、以及网络层。物联网实现一个终端感知设备采集环境数据信息，进行数据处理分析得到结算结果，通过网络层传数据到目标设备。物联网支持部署成千上万个传感数据采集节点，部署传感设备，各节点可以是不同种类的数据采集源。实现全面数据感知，收集到的数据具有全面性，实时性，支持数据交替更新。物联网支持有线与无线局域网络实现异构融合，实现设备云端化。实现终端设备数据点到面的传输。

美国作为世界首屈一指的科技强国，各种革新世界的技术产出于美国。由当年的互联网技术到如今的物联网技术。物联网这个词汇也是发源于美国本土高校，在 20 世纪 90 年代，是由麻省理工大学率先提出。此概念一出率先占领主流的科技专栏，如雨后春笋一般，爆发式增长。携手步入 21 世纪，物联网的概念不断成熟，相关技术指标也在不断完善。美国在国际电信联盟 (ITU) 正式向全世界官宣物联网的概念^[4]。随后美国科技高速发展，借着物联网的浪潮。在 21 世纪 10 年代，世界上首款物联网开发平台，由美国的 Qualcomm 公司率先发布。从此物联网进入高速超车环节，旨在为推动研究物联网领域的先进技术。以此为推动力，物联网爆发，德国政府大力支持物联网产业，投入大量的人力、物力、财政支持。覆盖能源、农业、汽车产业等九大行业^[5]。

中国作为世界上发展速度最快的国家，第一时间嗅到物联网的气息。当时中国认为物联网是国家科技发展的重要环节，推动国家的快速发展，设定为国家战略导向^[6]。当年时任国家总理的温家宝在南下视察无锡的时候，强调物联网是国家发展的一个重要战略，也是一个好的发展时机，中国未来要投入更大力度在物联网技术研发上。此举作为一个导火索，推动了物联网在国内的快速发展。目前我国在物联网相关产业的发展，每年都稳固增长，增速保持在 20 个百分点以上^[7]。

1.2.2 物联网网关研究现状

美国作为物联网技术的推动者，在不断的技术探索中发展物联网融合技术。物联网浪潮最先影响的是美国的一些大型通信公司，其中就有当时的 AT&T 通信公司。在当时美国社会人工服务费比较高，而且抄表工作形式又单一，所以通信巨头公司 AT&T 借着这个市场需求，常规电话通信作为媒介，实现远程有线抄表功能，这也是第一个实用的具有物联网概念的设备^[8]。美国 20 世纪 80 年代迎来了技术大浪潮，硅谷几大巨头齐发力，推动了计算机技术的发展。随着集成电路的发展，带动了传感器的发展。由于全产业的同步进行，物联网的雏形慢慢建立起来了，传感设备采集数据，传输媒介当时选用现场总线，但是由于现场总线对于硬件接口的要求，所以产生了大量数据传输的不兼容情况。随着互联网的飞速发展，全球建立起互联互通的网络 (Internet)。也推动了物联网的技术革新，由于传感器采集的数据需要借助媒介传输，但是不同的媒介之间出现了一个数据不兼容的问题。此时引入一个概念，就是选用一个中间设备用于数据协议管理^[9]。这个概念也就是物联网网关概念，引入物联网网关概念使得数据能实现兼容，完成数据传输。

物联网网关作为物联网中的一个数据中转枢纽，起着关键性作用。物联网网关不仅负责传感器的数据接收，协议格式解析。围绕着万物互互通以及高速互联网的推动，世界各国瞄准物联网，开始把战略重心调整到传感器网络如何借助物联网网关，接入到互联网，实现全球的传感设备互联互通上^[10]。各国投入大量研发经费在上边。

国内借助着物联网的浪潮，以及迎合万物互联的口号。国内各大公司以及政府建立相关研发团体进行技术攻关。目前国内物联网民用产品有几大公司板块，其中以小米异军突起占

据着国内大半的份额，小米打造全产业链，迎合互联互通，最近小米推出的支持三协议异构的网关，实现小米的米家全栈智能产品的互联互通。还有一家企业是杭州的独角兽企业涂鸦智能，公司围绕 AIOT 的智慧网关，实现网关智能化，实现传感器到云端的通路。还有很多公司以及政府参与到物联网的大趋势中。

由上述参考文献引入分析，可以发现目前市面上的网关具有一定局限性，都是围绕网关在某一领域的应用定义网关。将网关定义成为某种特定应用场景服务的设备。

1.2.3 软件定义网络研究现状

软件定义网络 SDN(Software Defined Networking)，最近几年备受关注的革新性的技术^[11]。软件定义网络，顾名思义从字面上大概就能知道他的实现目的就是用软件编程的方式，以此达到对网络的配置或者定义。软件定义网络的设计理念来了一次革新，不同于传统的网络架构，好的网络建立在高性能的物理硬件平台上。网络的功能逻辑都与物理硬件层之间存在着强耦合性，也就是网络的功能实现是基于硬件的。SDN 的基本思想是对现有网络抽象化，对底层物理层的复杂实现进行屏蔽，宗旨是为上层应用层提供方便、弹性的管理与配置^[12]。SDN 作为一种新型的支持软件定义网络功能的架构，该架构实现包含三部分。并且根据功能层分为网络物理驱动层、控制层以及应用层三层结构。用户可通过对应用层进行软件编程，实现在应用层对网络功能灵活配置。这种 SDN 技术就是一种将网络虚拟化，软硬件分离，实现一种更加灵活地运行模式^[13]。而且围绕软件定义的相关研究也会是未来发展的大趋势，未来将会浮现更多类似于软件定义的技术手段。

可见虽然传统物联网网关技术已经趋于稳定，但是传统的物联网网关系统，数据解析单纯地采用单一数据处理模型，串行解析数据包的方式，耗时，效率低。在面对当今时代中，海量物联网多元化数据，传统网关的数据管理理念的弊端，将严重放大化^[14]。网关设计单纯地采用软硬件强耦合思想，围绕硬件资源设计软件，网关内部功能模块软件、应用场景软件、情景模式模型等都与网关系统固件版本有关，不支持弹性化用户自定义。传统网关现有功能严重限制了网关的多用途弹性设定、多场景灵活，以及多元数据的高效实时处理。网关通信网络模式单一，限制网络的调配适应能力。

通过调研软件定义相关文献，发现大多文献都是以软件定义网络为课题的研究，缺少软件定义物联网网关相关研究。

综上所述，现有的软件定义相关研究以及物联网网关研究都围绕应用场景研究，都是围绕网关在某一领域的应用定义网关。相关研究都是围绕某一具体实现，缺乏环境的自适应调节能力。然而在实际应用中由于应用场景的复杂多变，以及用户日益改变的需求^[15]。现有的物联网网关研究已经无法满足网关多场景适用性，用户弹性化自定义网关全栈资源，以及无法满足网关功能二次开发，无法顺应当今万物互联，以及 5G 到来对网关处理多元，多量，带宽要求高的数据无法很好的胜任，这也是本课题研究的价值意义。

1.3 课题主要创新点

本设计与目前市面上存在的物联网硬件相比具有以下创新点：

(1) 提出一种基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型

针对传统网关数据解析过程，采用单一数据处理结构模型串行数据输入，执行，输出结果。针对大批量的多元数据来说，将无法实现数据高效、实时性处理。引入新的网关数据管理模型，支持数据源按照功能、属性快速的分类分组，匹配相关数据处理子程序，实现数据源点对数据处理子程序点处理将提高系统管理数据的效率。模型由五个基本模块组成，事务设计-试卷、事务驱动功能方法树、事务结构树、事件驱动过程建模、设计数据管理模型。

(2) 设计一种面向软件定义的智能物联网网关架构

根据上述一种基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型，结合软件定义以及指令集技术，设计实现一种面向软件定义的智能物联网网关架构。架构按照功能层划分为 5 部分，分别是感知层、网关数据分析处理层、网络层、网关指令集层以及网关信息存储层。所有协议基于原协议栈进行二次封装，引入软件定义概念建立多协议栈网络操作指令集合库，可弹性化软件定义网络，包括组网、退网、网络切换、数据传输协议格式、网络配置指令集实现个性化网络模型。以及感知层硬件驱动指令集合库，通过软件调度传感层硬件指令集、包括硬件驱动开关、工作方式、数据采集周期、完成传感层网络的搭建。通过软件定义完成网关系统的初始化配置。

(3) 设计实现面向软件定义的智能物联网网关的软硬件

围绕提出的面向软件定义的智能物联网网关的架构，设计实现智能物联网网关的软硬件。网关硬件层，围绕异构设计思想，硬件电路集成 Zigbee、NB-IOT 模组、以太网网络通信电路。集成多个外设传感器模块，并且预留多个串行通信接口，支持可拓展。在硬件平台基础上，围绕数据管理模型与网关架构设计网关系统软件。网关系统软件，内部实现提出的基于事务驱动过程的数据管理模型，将该模型设计理念应用于网关内部数据处理，软件定义，信息存储等功能子模块程序中。

1.4 论文组织结构

论文按照研究内容一共划分为七个章节，其中具体章节的内容如下：

第一章，绪论。本章对面向软件定义的智能物联网网关相关的研究背景与意义，国内外研究现状、以及创新点等做了阐述。

第二章，相关理论研究基础和技术。根据本文课题涉及的相关理论及技术点进行收集和查阅分析。介绍传统物联网架构、物联网支撑技术，引出本课题所涉及的相关技术，包含智能网关技术、指令集技术、无线通信技术以及低功耗技术。

第三章，基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型。对基于事务驱动的数据管理模型架构描述，介绍模型包含的模块，以及实现原理。并且基于物联网网关的功能需求，将数据管理模型与网关功能需求相结合分析。

第四章，面向软件定义的智能物联网网关架构设计。着重介绍面向软件定义的智能物联网网关架构的总体设计，本设计架构分为感知层、数据分析处理层、网络层、指令集层以及信息存储层，并对各层结构进行分析。

第五章，智能物联网网关的软硬件功能实现。根据设计的面向软件定义的智能物联网网关的架构，设计实现物联网网关的软硬件功能，并详细描述软硬件功能设计。最后分析智能物联网网关数据管理软件的性能。

第六章，智能物联网网关平台测试与应用。本章主要对智能物联网网关平台几大核心功能进行功能测试，论证系统可行性。并展示该平台在实际工程中的应用。

第七章，总结和展望，对面向软件定义的智能物联网网关开发工作的总结，分析智能物联网网关应用优势，最后对智能物联网网关将来可以改进的地方进行分析。

1.5 本章小结

本章首先对面向软件定义的智能物联网网关的研究背景和意义、国内外研究现状进行分析，介绍软件定义网络的由来、当初的物联网以及物联网网关的发展情况和相关技术。重点介绍了面向软件定义的智能物联网网关的创新点，最后对本章内容进行总结。

2 相关理论研究基础和技术

随着物联网的快速发展,以及人类追求高质量生活的需求。物联网网络在逐渐变得庞大,已由当初的单一的点对点数据交互发展到现在的点对面、面对面逐渐实现物物相通,人物结合的趋势。构建万物互联的美好愿景。庞大的物联网更好的服务于人类生活。物联网网络在向着高并发,高可靠,宗旨是让物体变得有意识有知觉,并且能够像人一样进行环境感知信息分析,消息交互。物联网网络中,网关是至关重要的一点,搭建感知层的局域网络,并且灵活高效管控大批量的终端节点设备能够稳定运行,作为网络硬件层与云端服务器信息交互的闸门,管控信息流的走向。

2.1 物联网技术及应用

2.1.1 传统物联网架构

架构主要分为三层结构:感知层、网络层、应用层。三层结构之间的数据呈现一种链式传递过程,感知层感知测量环境信息,数据通过网络层传输至云端服务器。根据应用层提供的应用场景模型分析数据。这三层之间相互协同工作。其中感知层主要由传感单元构成,有温湿度、气体、酒精、PM2.5、等传感器。

这些传感器就像人的五官,捕捉着身边的环境信号,并对捕捉到的信号进行分析判断。网络层则相当于人体内的神经系统网络,将感知信息传递至云计算服务器。应用层类似人的具体行为特征,结合感知信息做出相应的执行动作。传统物联网架构以及功能如图 2.1 所示。

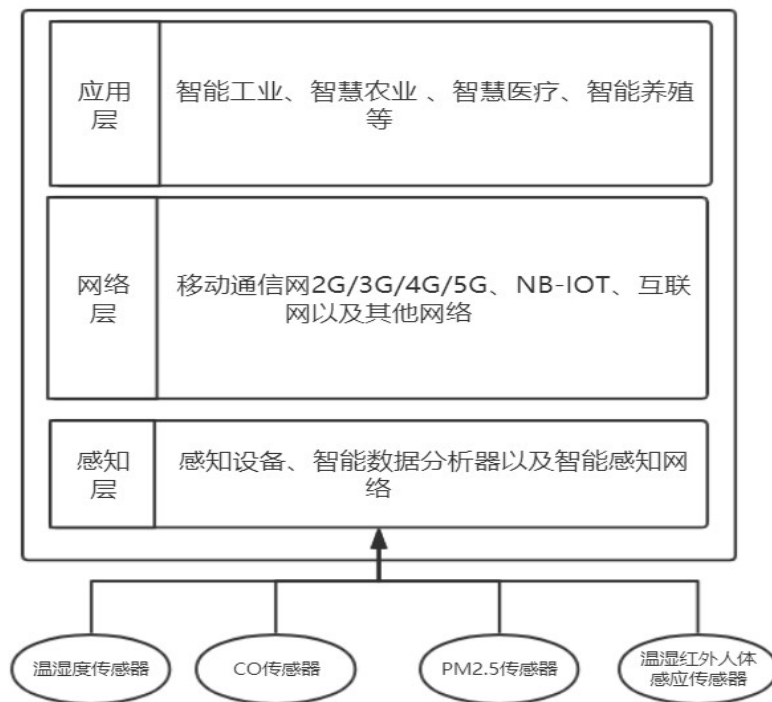


图 2.1 传物联网架构图

感知层，为架构的最底层也是整个架构的最为基础的部分，也是核心的一层。该层网络主要负责完成对物理世界的信息感知、分析以及采集。感知层包括各种感知设备、智能数据分析器以及智能感知网络。例如各种差传统的无线传感网络，无线 RFID 地标识别传感网络，以及无线红外传感网络等。感知层通过传感设备采集声、光、气信息，并对信息进行分类处理。

网络层，主要功能是网络数据接入与传输。是网络架构中的至关重要一个环节，作为连接传感网络与云服务器的桥梁，实现了边端云一体化，端云数据共享交互。将感知层采集到的信息数据进行传送、汇聚。网络已经服务于我们的身边的各个角落，网络通信技术的发展壮大推动了物联网的快速落地，为数据传输提供了可靠的通信媒介。

应用层，在真实场景中物联网的实际应用，应用层的主要功能是获取海量的感知层数据，并根据应用场景对信息进行分析理解。包括物联网应用，智能工业，智慧农业，智慧医疗等。

2.1.2 物联网的支撑技术

物联网的技术是历史悠久的，长足发展进步的技术。物联网技术是赋予物体语言交流能力，是对现有成熟技术的整合。物联网包括网络通信技术、感知技术、存储技术以及数据融合技术四大关键技术。

（1）网络通信技术

基于网络通信协议栈搭建的物联网网络，终端设备借助搭建的局域网通信网络实现设备间数据交互传输，数据已以太网网络为载体实现数据云端同步。

（2）感知技术

以传感器为基础感知层，作为物联网的眼睛、手、耳朵、鼻子去感知环境信息，采集环境数据信息，模拟数据数字化处理。

（3）存储技术

存储技术在系统中扮演着重要的角色，系统运行过程中会产生大量中间数据，此时就需要高效稳定的存储模型。能够实现自动存储分配，内存查询以及存储信息查重纠错的功能。一个好的存储算法会提高系统的运行效率，优化物理内存的使用，降低 IO 吞吐频次。

（4）数据融合技术

物联网传感网络采集到的不同类别的数据信息，终端设备的组网信息、设备心跳数据信息和云端控制指令信息需要高度融合，指定统一的数据传输协议。以实现数据的高可靠复用以及分类处理等。

2.2 智能物联网网关关键技术

智能物联网网关包括多协议异构融合、信息存储、事务驱动、软件定义指令集、感知层硬件隔离五种关键技术。

2.2.1 多协议异构融合关键技术

本设计网关集 Zigbee、NB-IOT、以太网、红外传输协议异构融合的智能物联网网关，协议栈之间兼容适配，协同工作。如何保持单协议能够独立稳定工作，以及多协议高效兼容的建立通信网络是本设备网络层的核心。通信的核心是硬件搭配稳定的网络协议栈，并且支持协议栈之间灵活切换，合理搭配使用，网络可实现迭代组合^[16]。自定义协议栈底层接口函数并封装为上层调用接口，供应用层调度组合。为多协议栈制定统一的通信数据标准，网络提供实时监控机制，跟踪监控设备在线情况。并且提供一种掉线在再组网模式。实现了网络的健壮性，灵活性，实时性。

2.2.2 信息存储关键技术

信息存储技术，内置内存模型，地址映射机制，存储网关组网信息，终端设备分为低功耗和非低功耗两类，低功耗分为传感设备、智能门锁，非低功耗设备分为红外设备、触摸情景面板、电动窗帘等。存储模型按照类分为俩张页表，一张表中分出多个数据存储块。以一个房间为一个模型单位，另一个页表也分为多个数据存储块。建立存储模型，存储结构，建设所有存储信息的索引页表，存储数据结构为链表，作为查询与存储的索引。具有唯一性，内存模型具有智能检索查重功能，具有自动跟新动态设备信息。

2.2.3 事务驱动关键技术

事件驱动模型分为主动与被动模式。事件驱动模型在内存中建立俩种驱动模型页表结构。其中一个被动事务驱动页表存储预先默认事务模型，支持分布式异步事务分发与结果同步内存^[17]。另一个页表存储用户自定义的指令集，支持动态页表实时更新。智能家居的情景模式以终端设备事件为触发信号驱动事务执行。

2.2.4 软件定义指令集关键技术

引入软件定义的概念，将抽象的智能网关设备的物理层简单直观化，将智能网关设备的相关硬件的配置封装为指令集库^[18]。用户根据功能需求，通过应用软件选取相关精简指令集，指令集配对形成新的功能指令集包。

2.2.5 感知层硬件隔离关键技术

感知层硬件隔离技术，简化硬件操作复杂度。通过封装硬件的配置封装。提供配置接口函数，提供给上层用户调用并对底层硬件设备进行配置。

2.3 无线传输技术

2.3.1 Zigbee 无线传输技术

ZigBee 网络协议又被称作紫蜂协议，类似于蜜蜂搜寻食物的过程方式^[19]。ZigBee 数传模块类似于移动网络基站。通讯距离从标准的 75m 到几百米、几公里，并且支持无限扩展。本设计选用 Zigbee 网络中的星形网络模型。ZigBee 星形网络如图 2.2 所示。

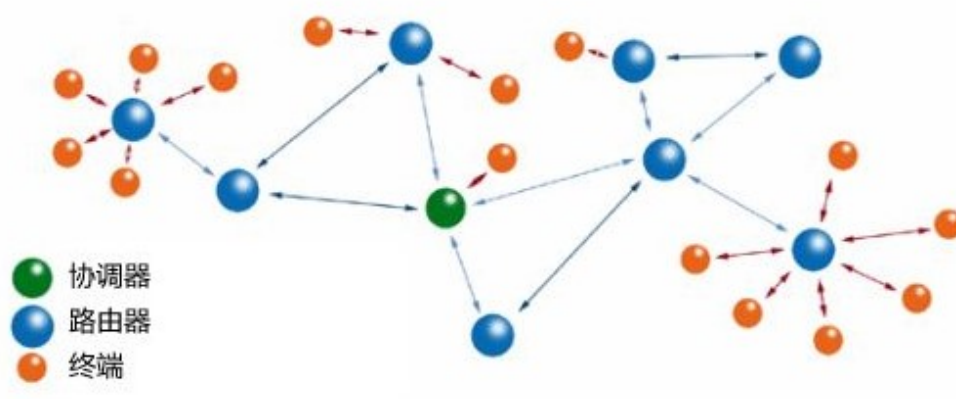


图 2.2 ZigBee 星形网络

Zigbee 的特性:

(1) 低功耗

工作模式情况下, Zigbee 传输速率低, 传输数量很小, 所以信号的收发时间很短, 非工作模式下, Zigbee 节点会处于休眠模式, 使得 Zigbee 节点非常省电^[19]。

(2) 低成本

由于 Zigbee 协议的通用性以及广泛开源, 降低对通信控制器的要求, 并且 Zigbee 协议还免收专利费, 所以大大降低了成本^[20]。

(3) 低速率

Zigbee 可以在 2.4 GHz、868 MHz、915 MHz 频段上工作, 传输速率分别达到 20 kbit/s 、40 kbit/s 、250 kbit/s, 能满足低速率传输数据的应用要求。

2.3.2 NB-IOT 无线传输技术

NB-IoT(Narrow Band Internet of Things)支持处于低功耗状态的设备, 能够实现在广域网的数据连接, 也被称为低功耗广域网^[21]。具有四大优势:

(1) 海量链接的能力

在同一基站的情况下, 同一个扇区在设备连接数方面效果显著, 当前扇区能够同时支持 10 万台设备接入网络。

(2) 覆盖广

在相同的频段下, NB-IoT 本身的网络增益有了大幅度提升, 相比较现有的无线网络, 增益提升了 20dB, 同时网络的覆盖面积提升效果显著, 有 100 倍^[22]。

(3) 低功耗

NB-IoT 借助 PSM(Power Saving Mode, 节电模式)和 EDRX(Extended Discontinuous Reception, 超长非连续接收)可实现年为以单位的待机时长, 待机最优值甚至达到 10 年之久。

(4) 低成本

由于无需组网，天线可复用，市场售价总体低于 5 美元。NB-IOT 传输图如图 2.3 所示。

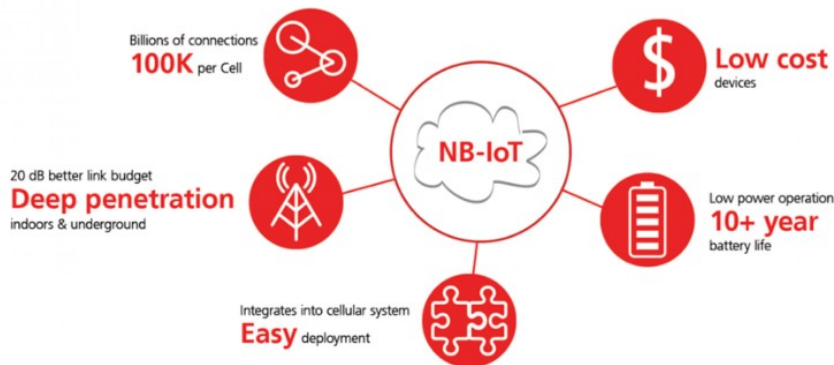


图 2.3 NB-IOT 传输图

2.4 指令集

计算机指令就是指挥机器工作的指示和命令，一个程序包含多条程序执行语句。程序的执行是按照程序内逻辑结构逐条执行的过程^[23]。每一条执行语句就是一个执行动作，简单地说就是使用针对系统可操作的汇编指令完成程序执行语句的功能。一台完整的计算都包含一套自己针对硬件资源操作的指令，这些不同操作功能的指令组合在一起，统称为指令集。计算机系统中 CPU 性能的其中一个衡量点就是，计算机系统内部集成的操作指令集。指令集的性能优劣决定着计算机系统的处理性能。

一套简单的指令集，不需要太多的指令，能满足实现基本的模式配置、数据转移和流程控制就够了。一条指令的执行还是要分多个阶段，这样才可以提高硬件的处理效率。指令集执行需要到指令集仓库库中去查表，调度执行^[24]。指令集仓库分为对外映射以及对内映射，对外映射为对操作指令集映射，对内映射为对物理层资源的映射。指令集的执行都要基于一个庞大的指令集仓库，该功能指令集仓库映射装与物理层，网络层等功能函数接口。

(1) 取指，指令集操作库中取出执行指令，并按照指令编码对其分解，得到 GT(网关标识符)、Functional_content(例如网络层内容)、Function_operand(功能操作数网络组网模式)、configuration_parameter(配置参数 0 个一个或多个)。

(2) 译码，根据 Functional_content、Function_operand 取出对应指令仓库的基地址 addressA、addressB。

(3) 执行，LAU(Instructional arithmetic unit)指令算数逻辑单元在不同指令下执行不同的操作，包括简单运算、地址加减、指令集仓库内存寻址、指令集调度等等，执行反馈结果为 valE，作为指令执行的验证。

(4) 写回，将前面生成的结果写回寄存器文件。

(5) 更新 PC，将 PC 设置成下一条指令的地址。

这些步骤现在看起来杂乱无章，不知有何用处。但仔细分析，可以看到，每个阶段只与一两个硬件相关的事情，由输入决定输出。而各个阶段之间的联系就是各种信号的输入和输出，比如，译码阶段的输出值可以作为执行阶段的输入，而执行阶段的输出又可以作为写回阶段的输入，这样就可以用简单的逻辑操作把这些硬件单元连接起来，实现我们需要的功能。

2.5 低功耗发展与应用

低功耗技术降低设备的运行功耗，需要软硬件联合调试，最大程度降低设备功耗。目前低功耗技术如雨后春笋一般，结合智能家居，智能穿戴等。随着硬件实力的进步以及软件的完善，低功耗已经成为检验一家公司产品的优质性。

2.6 本章小结

本章节首先引出传统物联网架构，传统物联网都有哪些技术支撑，从而引出本文设计智能物联网的关键技术支持，并展开围绕技术点做一些阐述。最后对本章内容进行总结。

3 基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型

随着物联网以及 5G 技术的发展，物联网将面临设备的多样性，数据的多元化压力。需要提供一个多元数据快速分类，分组处理，数据源主动触发处理程序。传统数据解析过程，阻塞式等待数据输入，执行，输出结果。针对单一小数据量数据尚可，但是针对目前多元，大批量的数据来说，该数据处理方法将无法做到高效、稳定。需要引入新的网关数据的解析过程，快速的分类分组数据集，根据数据源匹配相关数据处理程序，做到点对点处理将提高系统管理数据的效率^[25]。以此为出发点，将网关资源事务化，网关内的数据管理基于事务或者事件驱动，根据事务属性的不同分组管理，已达到多元数据管理秩序化，支持事务驱动动态调整。

提出一个基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型(IoT Gateway Data Management Model Based on Transaction Driven Process, 缩写 IGMTDP)。支持事务驱动的创建，一个完整的事务驱动设计过程由功能需求、概念设计、事务设计、到事务发布订阅。智能网关处理大量数据源，根据数据源的功能，种类，以及属性的不同，以事件或者事务驱动的形式触发网关数据管理功能子程序，事件与数据处理程序功能化对应^[26]。实现数据高效快速解析处理，数据处理完成结果数据以及执行动作都定义为事件或者事务驱动形式，每一种功能属性都对应一种执行程序。围绕数据解析，分析处理，结果存储反馈，行为动作以事件或者事务的形式联动。

3.1 基于事务驱动过程的物联网网关数据处理模型

下图 3.1 是基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型的体系框图。

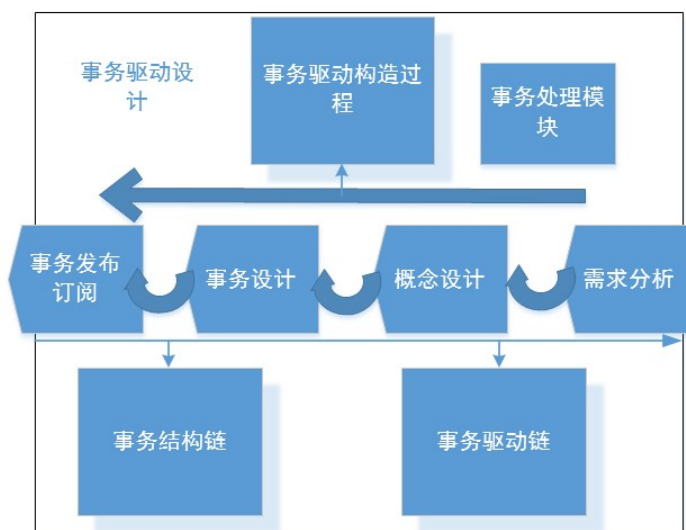


图 3.1 基于事务驱动过程的数据管理模型

IGMTDP 模型由四个基本模块组成，事务处理 (Transaction processing)、事务驱动链 (Transaction driven chain)、事务执行链 (Transaction execution chain)、事务驱动构造过程 (Transaction driven construction process) 又包括需求分析，概念设计，事务设计和事务发布订阅。

IGMTDP 模型的核心模块需要具备事务的加载，事务的判别以及事务的处理功能^[26]。事务处理模块，将不同事务驱动的构造过程表征的体现为一组结构化的事务处理过程，并将这些结构化的处理过程集成在模型内，支持事务驱动构造重定义表征结构化事务处理过程^[27]。不同的数据源体现为不同的事务或者事件数据源，事务执行链为事务处理结果动作执行调用，事务执行链则为执行动作的细化执行^[27]。

IGMTDP 具有如下特性：

- (1) 事务驱动设计流程的描述；
- (2) 事务驱动设计过程中，对事务驱动逻辑功能与执行过程详细描述；
- (3) 支持设计者事务自定义、分析以及评估；
- (4) 支持设计人员协同异构设计事务；
- (5) 支持事务数据源分组对应解决包含相关事务处理结构化过程；

一个完整的事务驱动构造过程，类似于一套产品功能需求分析，概念设计，到模型建模，最后到产品生产实现^[28]。为一个事务驱动创建的完整过程。

3.2 事务处理模块

事务处理 (Transaction processing) 模块类似于一种试题求解的模型，该模型可以形象的理解为，一批学生围着一块试卷来求解试题，学生可以写字、画符号、写公式在试卷上的方式进行交流通讯，每个学生都可以写出自己的解题思路、一个学生可以完成一道试题，多个学生协同可以共同完成一道试题。事务处理模块包含三部分分别是：

(1) 事务数据源，事务数据源根据数据专属特性，以数据类别、属性、应用场景为例。分组为单独的事务数据源也可称为知识源^[28]。随后知识源作为解决试题的一个参考，知识源根据试卷上的试题作答状态，判断是否需要作答，根据判断决定作答。

(2) 事务处理中间层，该事务处理中间层，作为一个共享区域。支持不同种类、不同类别、不同的事务数据源通过该共享区域，事务数据源可以在共享区域停留、中转、事务解析处理、以及执行控制信号，每一种操作都类似于一种试题，数据处理的过程就是解题的过程。

(3) 回答，回答是按照一个固定的时间片轮转查询的，回答是对事务数据源经事务处理中间层解析处理后，根据得到的结果判断并完成相应的执行动作。完成执行动作后修改试题作答状态，此时试题为未作答状态，试题新状态又满足事务触发条件。

3.3 事务驱动链

事务驱动链是一种层级关系，是一种类似于河流的主流与支流的关系的链条关系。可以是单独一条主链，也可以是一条包含多个支链的主链。事务驱动链描述的是事务执行的功能与实现方法之间的关系，是一个事务执行过程的展示。事务驱动执行实现某一种功能，该功能可以是多个功能与方法之间的联动关系，也可以是多个方法实现一个固定功能^[28]。事务驱动链结构图如图 3.2 所示。

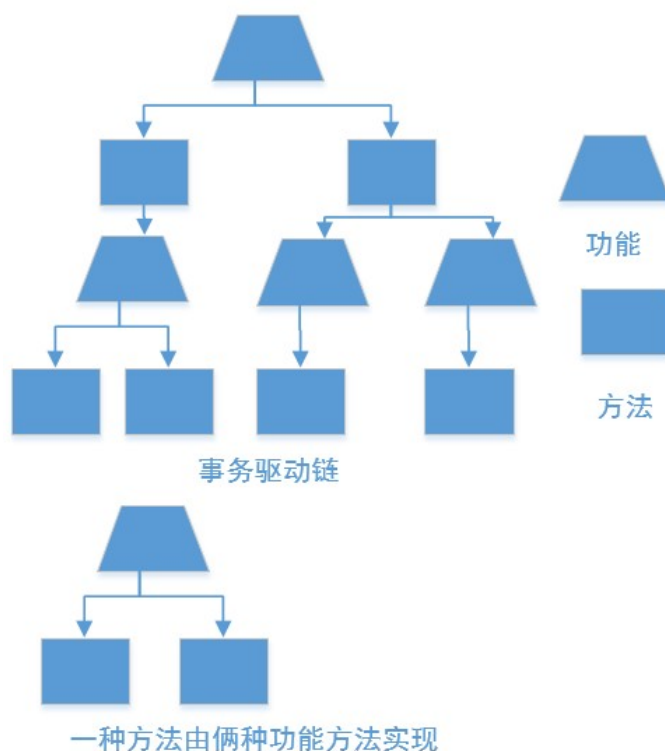


图 3.2 事务驱动链结构图

事务驱动链是一种自上而下的设计思想，符合事务驱动设计的规律。一个事务为大的功能，一个功能包含一个或多个方法。如上事务驱动链结构所描述的，该事务驱动链以层级递进的方式，最上层为事务驱动总的功能，逐层递进，最下层为事务驱动的实现方法也叫一个事件。

3.4 事务结构链

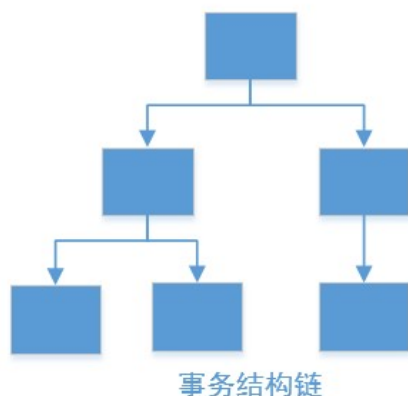


图 3.3 事务结构链结构图

事务结构链体现了事务的组成关系，通常以事务结构链驱动的方式出现。事务按照事件进行分解，事件再进一步分解为事件和硬件接口，直到不能再分解结束。事务结构链记录了构成事务的事件、属性、硬件功能接口以及联动关系。事务结构树主要支持事务驱动详细设计阶段^[28]。最终该事务驱动模型包含硬件调用接口、事件功能类型、以及功能配置参数等。事务结构树则把重心放在事务本身。事务结构树采用自上而下与自下而上相结合的设计方法。

3.5 事务驱动构造过程

在 IGMTDP 模型中，事务驱动构造是事务需求到发布的一个完整过程。事务驱动构造过程着重于过程本身的功能需求、概念设计、事务设计、到事务发布订阅整个工作流程，该模型与事务驱动功能方法树和事务结构树互通协作^[29]。该模型是建立在基于事务驱动的更宏观的层面，从需求到实现去讲述。事务驱动构造过程流程图如图 3.5 所示。每一个标记编号的方框都代表着一个数据帧单元流，该数据流可以是多种类型的事务数据源。事务数据源可以是一个事务驱动、一个事务处理结构、一个控制指令等^[30]。形象的称之为功能单元，数据流判断器为小圆框，图中用 P 表示。在箭头交汇点处的流控制通道，支持多条数据流通路和并联一条数据通路，也支持一个数据流分叉为双数据通路。事务数据模型为分布式异步任务执行提供参考。

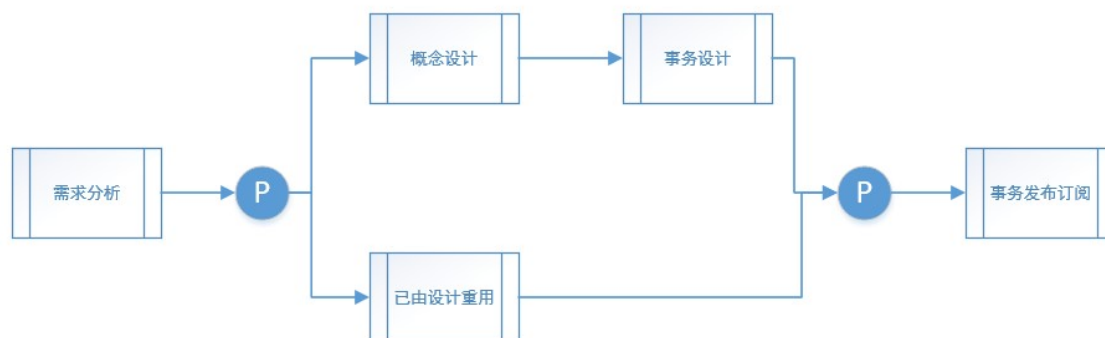


图 3.4 事务驱动构造过程流程

3.6 数据模型设计

在 IGMTDP 模型中,事务的设计已经不限于表征性的单一事务数据集,而是设计一个适用于整个设计过程的共享事务数据模型。事务数据模型包含所需的数据要求。基于该事务数据模型,设计人员可以共享事务数据模型^[31]。事务数据模型大致包含如下五类数据类型:

(1) 情景模式数据,该数据模型支持情景事务驱动自定义,描述情景事务包含的事务、事件、以及相互之间的联动方式。

(2) 控制信号,控制信号只要针对事件驱动控制信号,负责调用执行网关相关功能接口。

(3) 试题数据,试题数据支持出题,类似提供功能函数接口,等待满足条件的知识源判断执行,完成做题行为。做题过程与做题完成后都应立即改变试题状态。

(4) 事务驱动数据,网关事务驱动数据,包含事务与事件的组合方式。

(5) 心跳数据,用于保证局域网以及云端网络的稳定连接。

3.7 模型性能分析及结论

3.7.1 模型分析对比

(1) 传统物联网网关数据管理模型分析

传统物联网网关数据管理模型主要负责,管理终端设备组网、设备信息管理、终端数据云端上传以及终端设备远程控制的功能。传统物联网网关是基于生产者-消费者模型原理设计的数据管理模型。网关内部数据源分为三部分,分别是生产者、消息缓存队列、消费者。其中生产者代表数据源,分别代表终端设备的网络数据、传感数据、以及云端下发的控制数据。消息中间队列就是一个消息中间件,类似于数据缓冲区。消费者则是广义的数据处理模块,可以是类,函数,线程,进程。生产者产生的数据源被加载到消息缓存队列中,消费者负责从数据缓冲区中取数据执行。在单机物联网网关中,消费者一般都是在数据缓冲区中获取数据并加载执行,由于生产者生产的消息缓存队列的缓存空间有限,所以生产者在消息缓存队列内存沾满情况下,阻塞等待消息缓存队列中数据执行完毕产生空闲空间。针对传统的物联网网关应用场景,在对数据量,时效性要求不高的场景适应。但是该模型的特点是,处理数据比较消耗时间、线程独占、以及生产数据不需要即时的反馈等。这中特性针对于传统的小批量终端设备数据采集,传输,响应要求不高的智能家居,智能工业等物联网应用完全适应。传统物联网网关数据管理模型结构图如图 3.5 所示。

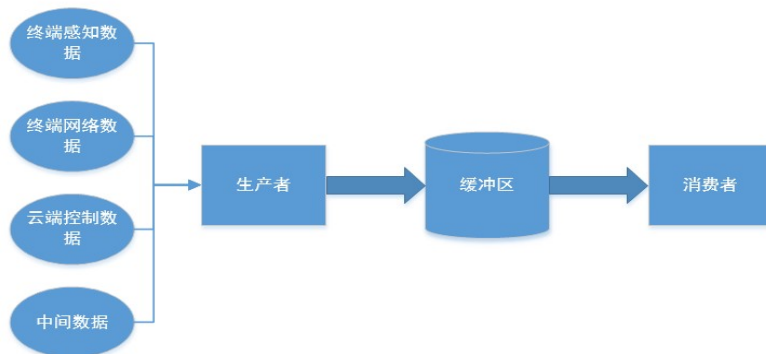


图 3.5 传统物联网网关数据管理模型

（2）基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型分析

随着 5G 时代的到来以及物联网相关技术的蓬勃发展，物联网相关应用应用于我们的生活，普及率越来越高，随之而来的就是高带宽、大批量终端设备数据解析、以及应用场景和用户需求自定义的挑战。将需求，功能抽象化为事务驱动类型，每一次数据加载、分析处理，执行都可以视为一次事件驱动过程的模型，数据就是事务或事件，根据事务功能属性自动分配处理程序，数据处理完成执行相应事件或者事务驱动。该模型的执行过程抽象为四个阶段，事务驱动的呼叫者、事务驱动中间缓存区、事务驱动自响应、事务驱动应答者。基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型满足上述功能要求，该模型应用到物联网网关数据管理服务中。

区别于传统的物联网网关数据管理模型，该物联网网关数据管理模型的突出优点是：数据处理的响应时间短。由于在该模型中，源数据，中间数据以及结果数据都以事务或事件形式表示，所以一个数据的完整处理流程时间消耗少，而且由于数据的事件或者事务在系统中的专属性，这也是的数据解析准确性提高，并解决了数据粘包问题。由于中间缓存区存储的是事务索引并不是具体数据，所以该模型支持高带宽数据解析、支持由于用户自定义数据管理模型中的管理规则，用户可以自定义网关情景模式，增添自定义数据解析函数到数据管理软件中。而传统的物联网网关仅仅能满足网络配置、数据解析、存储、传输以及控制的基本功能。不具有数据管理模型的弹性化定义功能，数据在系统解析过程中解析过程耗时，容易解析失败。

3.7.2 实验结果分析及结论

实验数据选用同一型号同一品牌的 6 种终端设备的 6 种加网数据以及环境数据，6 种设备分别是门磁、门锁、红外人体感应、CO 传感器、温湿度传感器、PM2.5 传感器。测试数据同一时刻并行输入到系统中，以便更好的测试系统的性能。分别选用传统数据管理模型与 IGMTDP 模型进行数据管理模拟实验。选用三项主要指标，即响应时间、数据处理可靠性、以及一帧数据解析过程消耗时间作为对传统数据管理模型与 IGMTDP 的性能比较分析。

（1）实验结果分析

设备加网数据载入响应时间测试结果如下图 3.6 所示。图 3.6 中分别展示传统数据管理模型与 IGMTDP 设备加网数据载入响应时间的测试结果。

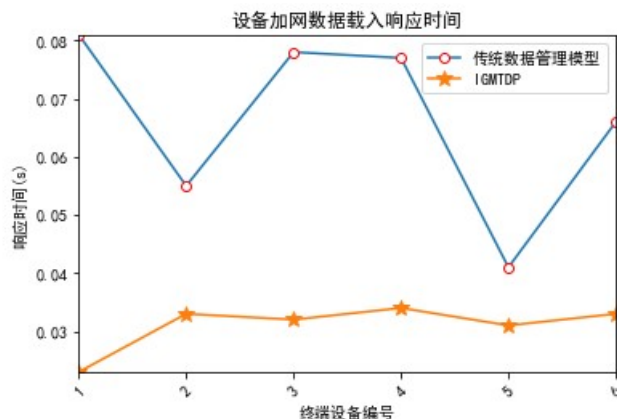


图 3.6 设备加网数据载入响应时间对比图

由图 3.6 可以看出，不同的 6 组终端设备组网测试数据同时输入，传统数据管理模型针对设备加网数据载入的响应时间不稳定，最大响应时间为 1 号设备 0.082s，最小响应时间为 0.041s。总体响应时间趋势波动明显。而 IGMTDP 针对设备加网数据载入的响应时间相对稳定，整体响应时间平均值为 0.03 左右，整体响应时间趋势稳定。最小响应时间为 0.025s，最大响应时间为 0.034s。折线图比较发现，IGMTDP 针对设备加网数据载入响应时间，时效性要优于传统数据管理模型。

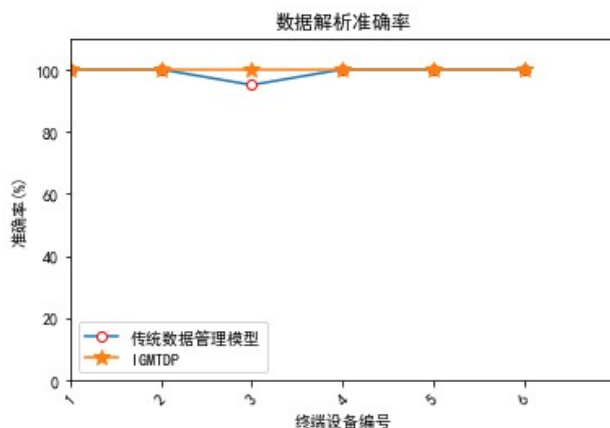


图 3.7 数据解析准确率对比图

如图 3.7 所示为数据解析准确率统计图，数据解析准确率代表着数据管理模型按照模型的数据解析逻辑解析一帧数据，解析结果是否满足数据管理功能逻辑。如上图 3.7 所示，传统数据管理模型针对 6 组不同的终端设备组网数据，数据解析准确率基本维持在 100%，只有在解析第 3 个终端设备的组网数据时，出现解析准确率不足 100%，只有 94%。反观 IGMTDP 针对 6 组不同终端设备组网数据解析，准确率统一为 100%。所有数据都解析成功。折线图趋势比较发现，GMTDP 针对设备加网数据解析准确率要优于传统数据管理模型。

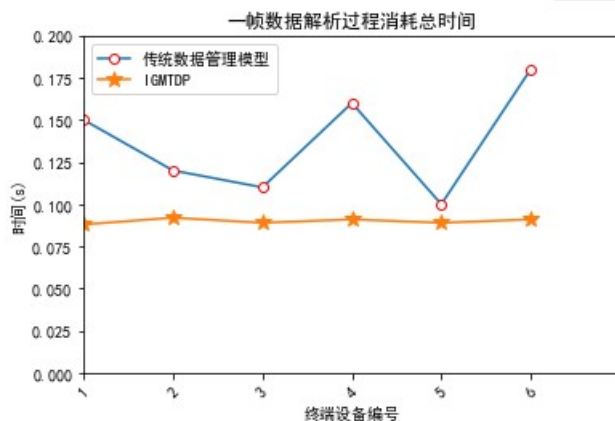


图 3.8 一帧数据解析过程消耗总时间对比图

如图 3.8 所示为一帧数据解析过程消耗总时间对比图，一帧数据解析过程消耗总时间为括数据加载数据缓冲区时间、数据解析总时间、数据存储总时间的总和。代表数据管理模型解析一帧数据完整过程所需的总时间，用来衡量数据管理模型的数据处理效率。如上图 3.8 所示，传统数据管理模型针对 6 组不同的终端设备组网数据，各组数据的时间消耗不稳定，第 4 个终端设备的数据解析过程消耗总时间最多为 0.164s，第 5 个终端设备的数据解析过程消耗总时间最少为 0.11s。反观 IGMTDP 针对 6 组不同终端设备组网数据解析，6 组不同的帧数据解析过程消耗总时间趋于平稳，第 4 个终端设备的数据解析过程消耗总时间最多为 0.088s，第 1 个终端设备的数据解析过程消耗总时间最少为 0.068s。折线图趋势比较发现，IGMTDP 针对设备一帧数据解析过程消耗总时间要优于传统数据管理模型。

(2) 结论

从上述实验结果可以看出，IGMTDP 相对于传统物联网网关数据管理模型，设备加网数据载入响应时间消耗更小，而且 6 组终端设备组网数据载入响应时间消耗趋势平稳，提高了数据的及时响应的能力。并且数据解析准确率整体上前者要优于后者，反应出基于 IGMTDP 的数据解析软件更加稳定。一帧数据解析过程消耗总时间，IGMTDP 的整体效果也是强于传统物联网网关数据管理模型。IGMTDP 在整体性能上要优于传统物联网网关的数据管理模型，是一种可行的解决方案。并在后序第五章软件实现部分，对基于 IGMTDP 网关数据管理软件进行性能分析。

3.8 本章小结

本章主要围绕针对现有多元，多量数据处理方式的不足。引出建立一个基于事务驱动过程的数据管理模型的目的。提出一个基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型-IGMTDP，详细阐述 IGMTDP 的技术实现，以及结合网关管理需求分析模型包含的相关核心模块实现原理。最后进行模型性能分析与结论，通过实验对比两种模型在解析数据方面的性能。最后的得出 IGMTDP 是一种可行方案，最后对本章内容进行总结。

4 面向软件定义的智能物联网网关架构与设计

本课题是基于传统物联网架构体系，相关技术点以及设计思想为本课题的研究设计提供支持。物联网项目的前车之鉴，系统开发软硬件强耦合性要求高，系统稳定性不足，可移植性差。网关资源按照功能型模块化设计，以功能模块的方式调用完成系统以及功能的创建。这也为本设计提供灵感，设计基于上述模块的控制指令集库。实现调用指令集完成相应操作。

由上一章节提出的基于事务驱动过程的数据管理模型，引出设计一个基于事务驱动过程的数据处理模型概念的面向软件定义的智能物联网网关架构。本设计架构分为感知层、数据分析处理层、网络层、指令集层以及信息存储层，各数据层之间通过层级间的数据流进行通信，网关支持软件定义指令集操作网关资源^[32]。

4.1 智能物联网网关系统需求分析

智能物联网网关功能需求可大致分为以下几点：

（1）感知层支持软件定义传感设备数据采集模式、功能以及数据传输配置。提升传感通信数据信息安全防护，加密传输数据流。

（2）数据分析处理层，支持网关数据分组分析处理，网关接收数据按照功能、种类、属性进行分组，根据组别进入相应得到数据处理通道完成数据解析处理，还支持周期针对终端设备进行数据流监控调优。

（3）网络层负责网关与云端数据交互，负责数据协议帧封装，解析云端支持软件定义传输数据帧格式，解析云端控制数据。

（4）网关指令集层，内嵌网关资源控制指令集库，支持软件定义指令集操作，完成对网关资源的配置与调度，情景模式自定义，网关功能模型自建。满足用户弹性化自定义网关。

（5）网关支持远程应用场景固件一键式更换，网关支持多协议异构融合，满足全场景应用。

（6）网关信息存储层，支持数据快速存储、删除、查询以及数据查重，数据分组存储，设备信息映射。

4.2 面向软件定义的智能物联网网关架构设计

图 4.1 为面向软件定义的智能物联网网关架构。

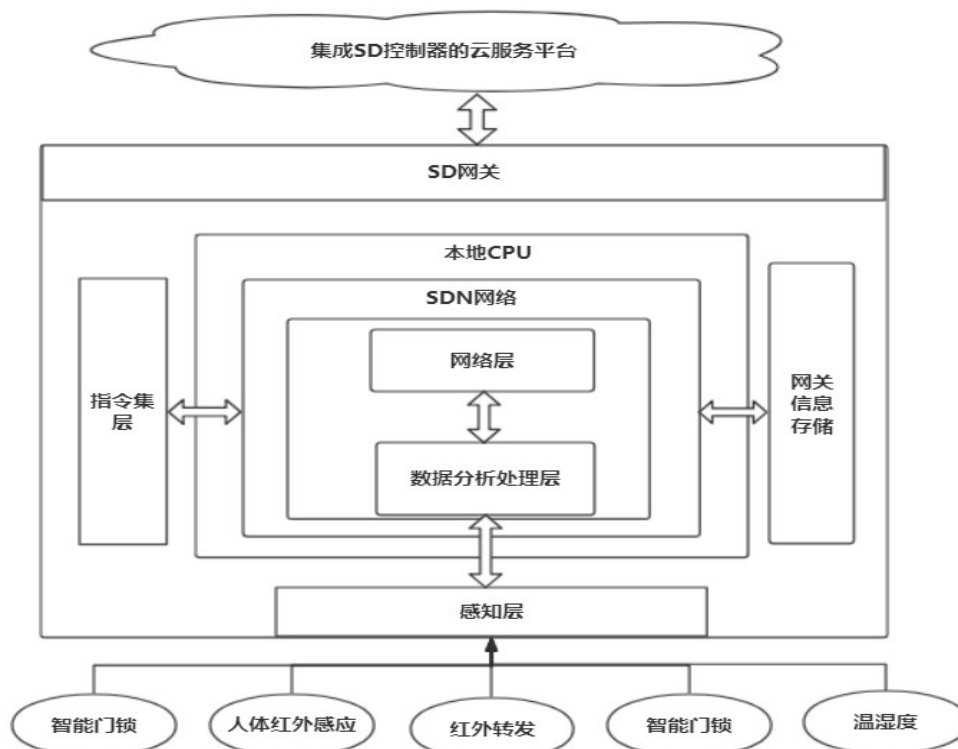


图 4.1 面向软件定义的智能物联网网关架构

如上图所示智能物联网网关，结合软件定义(SD)，架构包含感知层、网关数据分析处理层、网络层、网关指令集层以及网关信息存储层。

4.3 智能物联网网关设计

4.3.1 网关感知层设计

智能网关感知层，集成网关板载硬件传感驱动层，工作模式配置模块，终端智能设备传感信息采集模块，传感器调度模块。该模型的主要功能保证传感设备正常启动运行关闭，感知层传感数据采集，为上层服务提供数据调用接口。板载硬件传感驱动层，为板载传感模块适配驱动程序，保证传感模块正常运行。终端智能设备传感信息采集模块，采集传感设备环境数据信息，整合数据。提升传感通信数据信息安全防护，加密传输数据流^[33]。面向软件定义的感知层，支持软件定义感知层传感器工作模式配置，包括设定传感器上报数据周期，数据采集频率，以及配置采样数据精确度。通过软件设定配置参数，启动传感器按照设定参数工作。支持传感数据异步采集处理。支持软件定义感知层多传感器调度组合，灵活定义感知层传感器工作网络，增删改查接网传感设备。如图 4.2 网关感知层结构图所示。

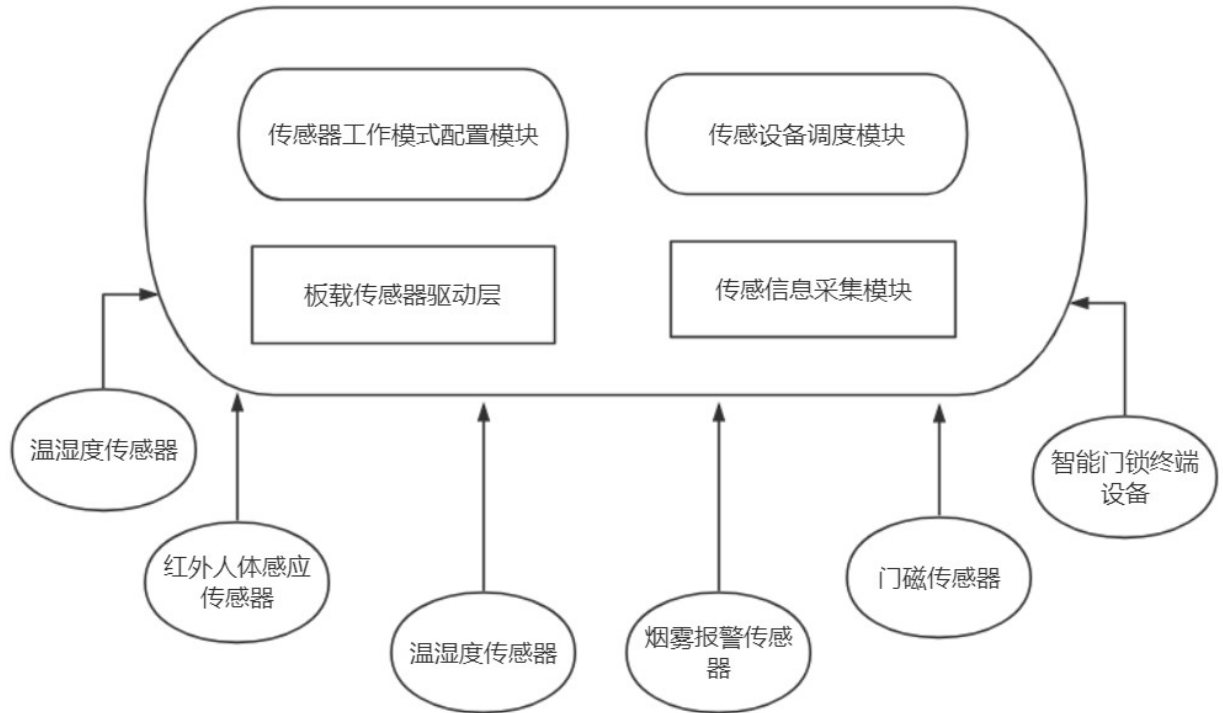


图 4.2 网关感知层结构图

4.3.2 智能网关信息分类器设计

智能网关信息分类器负责感知层的下一级和网络层上一级，负责将感知层整合后的数据信息进行分类分析，感知层数据根据数据属性分为内网网络组网数据、云端网络层数据、以及终端节点设备数据三类。感知层整合后的一帧数据中包含当前数据帧的类型属性位，分类模型根据数据属性标志位分类数据。选择下一步要进入哪个解析通道。解析通道一为网络数据解析通道，通道二为节点终端设备以及板载传感感知模块数据解析通道，通道三为终端设备异常报警信息。智能网关信息分类器如图 4.3 所示。

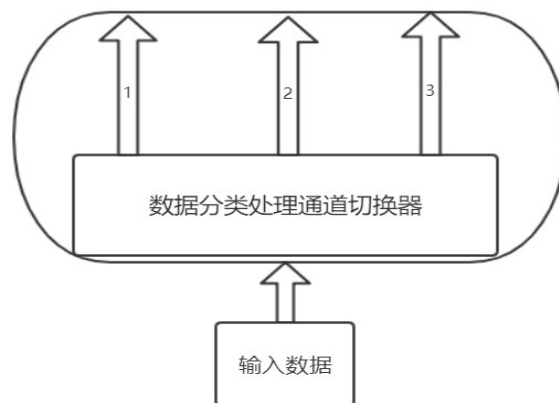


图 4.3 智能网关信息分类器

4.3.3 网关信息存储层设计

(1) 网关信息存储层结构

网关信息存储层，建立 5 块块信息存储区分别为终端设备网络信息、感知层传感数据存储区、设备运行情况存储区、内存页表使用情况存储区，以及可拓展内存区。网关信息存储结构图如图 4.4 所示。

1) 终端设备网络信息，负责存储终端设备网络信息，包括终端设备的网络编号，设备短地址信息，MAC 地址信息以及，终端设备的终端号。

2) 感知层传感数据存储区，存储终端设备以及板载传感模块的环境数据，包括终端设备的电量，传感器的状态信息，环境信息例如温湿度，CO 气体浓度等。

3) 设备运行情况存储区，存储终端设备的在线情况，网关周期性的向终端设备广播式发送在线确认数据帧，等待终端设备做出回应。如果当前设备做出回应，则说明终端设备在线，每一次周期性检查设备在线情况，都要做一次在线情况存储区域数据更新，保证网关可靠高效的管控终端设备。存储终端设备异常信息，异常信息包括电量异常，设备网络异常，终端设备传感数据异常，保障网络设备的稳定工作。

4) 内存页表使用情况存储区，存储页表数据块的使用情况，用 0/1 去标识，0 代表当前页表未使用，1 则代表当前页表已经使用。当有新的数据加入内存页表中，需要先检索该标志位状态，如果为 0 则直接存储，如果为 1 则需要初始化页表内存块。

5) 可拓展内存区，支持数据存储区拓展，支持内存自建查询索引。

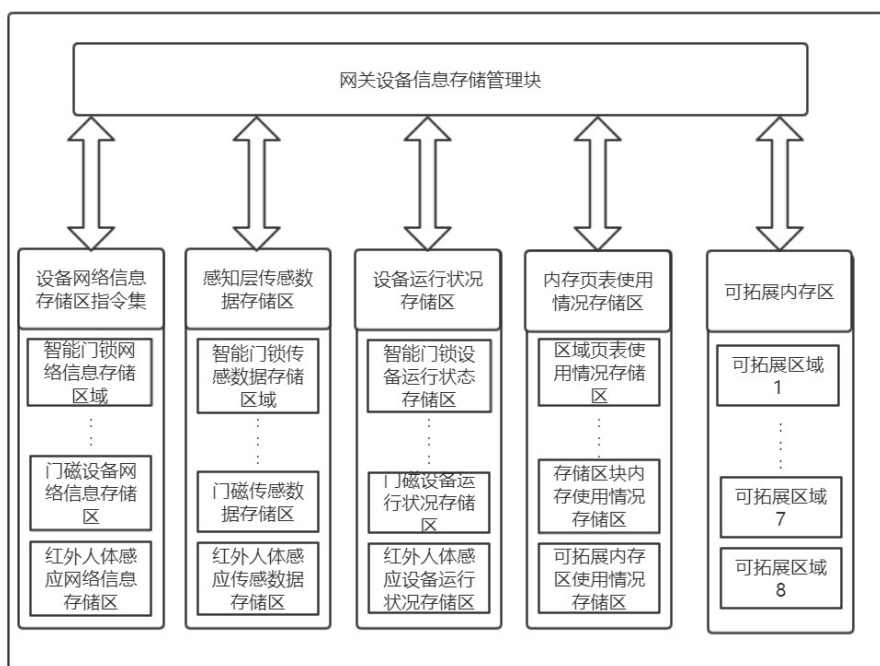


图 4.4 网关信息存储结构图

(2) 网关设备信息存储管理模块

网关设备信息管理块 DMB(Device management block)统一管理设备的信息，初始化网络，终端设备完成加网操作，DMB 具有设备组网查重机制，防止设备重复组网操作^[36]。设备加网

成功, 根据设备加网数据帧解析出对应 ID 号, 构建 DMB 模型, 构建设备 ID 号与内存页的虚拟地址映射机制。形成类似字典的存储模型, 即可根据设备 ID 键值查询相应的内存块^[34]。

智能网关信息存储结构, 该存储结构采用二级页表内存模型, 一级页表存储对应数据块的基准地址+偏移地址信息+设备位置 Id, 二级页表为一级页表指向的地址以及内存页内的存储位置^[35]。二级页表模型之前构建初始化设备管理模型, 该模型数据结构为单向链表结构, 链表单元数据模型由终端设备簇 ID(Zone_ID), 设备属性 ID(Type_ID), 设备 Id(Device_ID), 以及设备专属身份 Id(User_ID)组成。设备属性 ID(Type_ID), 用来区分当前设备是传感设备, 智能面板, 红外转发模块以及智能门锁等。簇 ID(Zone_ID)代表数据的类型, 例如组网数据, 心跳数据, 传感感知数据, 报警数据以及网关板载传感数据等, 设备 ID(Device_ID)。

例如, 报警类传感器根据属性 Id 的不同可分为: 门磁、人体红外、烟雾、燃气、震动、CO 等传感器, 设备身份 ID(User_ID), 该身份 ID 为设备的专属信息, 每个终端设备具有独一无二的 ID 号。采用虚拟地址映射技术, 将簇 ID(Zone_ID)映射为二级页表存储区域的基地址, 属性 ID(Type_Id)映射为二级页表内的数据块的基地址, 设备 ID(Device_ID)为页表内的数据块内的偏移地址。

(3) 信息存储调度策略

信息存储调度策略包括内存分配与内存调度策略, 内存分配用于动态构建终端设备的信息仓库, 负责检索内存块内存信息与动态创建、申请、删除以及查询内存块。网关定义一块固定大小的内存区域, 该算法负责在该内存区域为设备动态分配空闲内存, 回收空闲区域内存以及内存有效性查询^[37]。智能网关信息存储动态分配算法采用链式内存分配法, 该算法采用可灵活动态创建与删除的链表结构^[38], 如下图 4.5 所示, 每个单元数据块中第一块区域存储标识位, R(Running)代表已经被占用。F(free)代表内存空闲。第二块区域存储终端设备相关属性信息有簇 ID、属性 ID、设备 ID、设备 MAC 地址信息, 第三块区域存储数据长度。第四块区域为内存使用计数器, 最后一块区域代表指向下一个结点的指针。

当需要申请内存的时候就从链表头部开始遍历, 找到符合要求的地址, 根据页表内块地址+块内偏移地址拆分这个结点的信息, 分出来一部分地址。比如某个终端设备组网成功, 设备网络信息申请二级页表进行数据存储。



图 4.5 智能网关信息存储结构图

4.3.4 面向软件定义的智能网关网络层设计

智能网关网络层集多网络协同, 但网络切换, 网络数据传输协议帧格式封装库, 定义指令集映射底层网络功能函数。网关集 Zigbee、TCP/IP、NB-IOT 以及红外传输协议。实现多

协议协同稳定工作,网络分为内部局域网络包括 Zigbee、红外传输协议。外部网络包括 TCP/IP、NB-IOT 的数据通道,支持数据上传至云端。多网络之间支持独立运行,例如网关可以设定当前只工作在局域网中则采用 Zigbee 网络或红外传输通信方案。或者当前网关无需局域网,只负责与云端进行数据交互,采用以太网或者 NB-IOT 通信方案。实现网络切换操作,载体为软件定义模型,支持远程软件定义设定网络工作模式。网络数据传输协议帧格式封装库,集成多种数据传输协议格式模板,按照数据类型分为云端数据协议格式和终端设备数据格式。数据协议格式抽象具体化为函数形式,源数据抽象为函数入口参数形式,函数执行结果为数据协议帧格式。例如上传云端数据,只需调用对应接口函数传入源数据,将函数返回结果作为数据帧上传至云端。

4.3.5 面向软件定义的智能网关数据分析处理层设计

智能网关数据分析处理层集数据分析模块和设备设备控制模块于一体。数据分析模块分为双通道,一通道为网络数据分析通道主要负责物联网局域网与云端网络数据的解析处理。二通道为局域网网络数据包括设备加网,退网,心跳数据,云端网络数据包括远程设备控制指令,例如远程开关门锁,开关灯,电动窗帘控制、远程软件定义指令集数据,例如软件定义网络工作模式指令集,软件定义感知层硬件指令集等、远程网络操作指令数据包括组网,删网,查询设备在线链表信息,查询终端设备存储页表信息等,对获取数据分析处理并执行相应操作。三通道为终端设备信息分析通道主要负责物联网局域网终端设备的信息分析处理。包括终端设备的环境数据信息,感知异常状态信息,设备异常状态信息,数据解析分析,整合后的数据同步更新到信息存储模型中,复制相同数据到网络层模型,进行数据封装上传同步到云端。智能网关信息存储结构如图 4.6 所示。

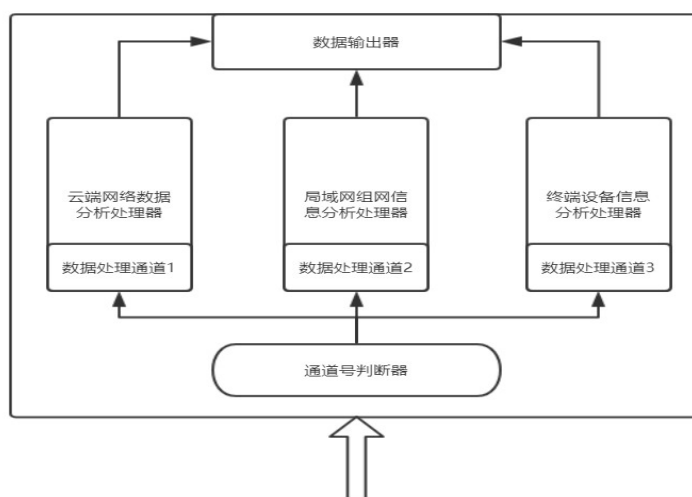


图 4.6 智能网关信息存储结构图

4.3.6 面向软件定义物联网网关指令集层

建立庞大的指令集仓库，指令集与网关功能逻辑形成一一映射关系，并按照指令集不同功能分为不同种类的页表集合存储庞大的指令集合，根据控制指令分析器分析操作指令，在指令集仓库中扫描相应指令的功能实现接口^[40]。最后执行指令集功能操作。

4.4 指令集调度仓库构建

指令集调度仓库存储网关的所有操作指令集，整体存储结构按照功能分为网络功能模式指令集页、感知层传感网络指令集页、帧数格式自定义指令集页、内存管理操作指令集页，环境“脉搏”信息融合数据指令集页以及终端设备调度指令集页 6 块指令集存储区域^[41]。智能网关指令集层结构如图 4.7 所示。

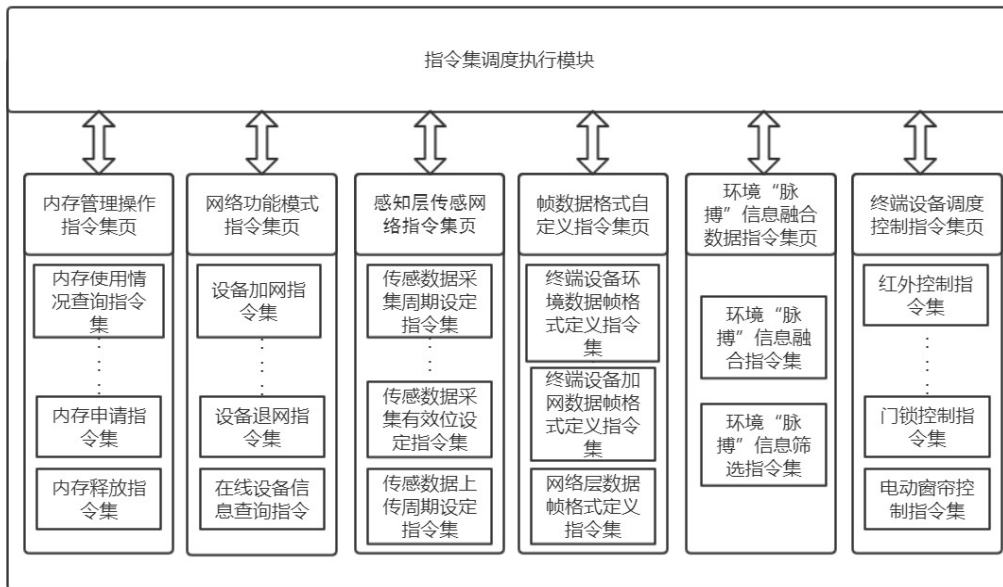


图 4.7 智能网关指令集层结构图

(1) 网络功能模式指令集页，网络功能模式指令集页存储有关于网关网络相关功能操作指令集，包括控制终端设备加网，退网，删除网络的网络协议层功能控制指令集以及终端设备在线情况查询等指令集。

(2) 感知层传感网络指令集页，感知层传感网络指令集页存储感知层网络设备的配置指令集，包括配置感知层传感设备采样周期，传感数据采集有效位以及数据上报周期等指令集。

(3) 帧数格式自定义指令集页，帧数格式自定义指令集页存储可自定义通信数据帧协议格式指令集，按照数据帧类型分为不同页内存存储块，每块区域存储多种数据帧格式。包括终端设备环境数据帧格式定义指令集，终端设备加网数据帧格式定义指令集以及网络层格式定义指令集。

(4) 内存管理操作指令集页，内存管理操作指令集页存储内存使用情况查询指令集，内存申请指令集，内存释放指令集。调用指令集操作可完成动态申请与释放内存空间，查询内存占用与空闲情况。

(5) 环境“脉搏”信息融合数据指令集页，环境“脉搏”信息融合数据指令集页分为环境“脉搏”信息融合指令集，环境“脉搏”信息筛选指令集。调用环境“脉搏”信息筛选指令集可完成筛选数据帧中包含哪些传感数据。调用环境“脉搏”信息融合指令集对筛选传感数据进行数据融合，封装为一帧数据。

(6) 终端设备调度指令集页，终端设备调度指令集页，负责完成对终端设备的功能调度，页内按照不同终端设备功能分为多个指令集存储块。例 1，调度控制智能门锁终端设备完成开关锁操作。例 2，调度控制智能窗帘完成开关窗帘操作。

相应的功能操作指令集存储在对应的存储页表中。每个页表存储功能执行指令，分为网络功能模式指令集页、感知层传感网络指令集页、帧数协议据格式定义指令集页、内存管理指令集页，环境信息融合数据指令集页以及终端设备调度指令集页。

4.4.1 软件定义指令集调度执行器

软件定义指令集调度执行器，使用功能指令解释器解析软件定义控制语句，将控制语句翻译为操作指令集，调用指令集调度器在指令集仓库调度指令集，指令集执行通道选择器对操作指令集进行通道选择，选择执行方式^[41]。执行通道分为双通道 1,2。智能网关指令集调度执行器如图 4.7 所示。

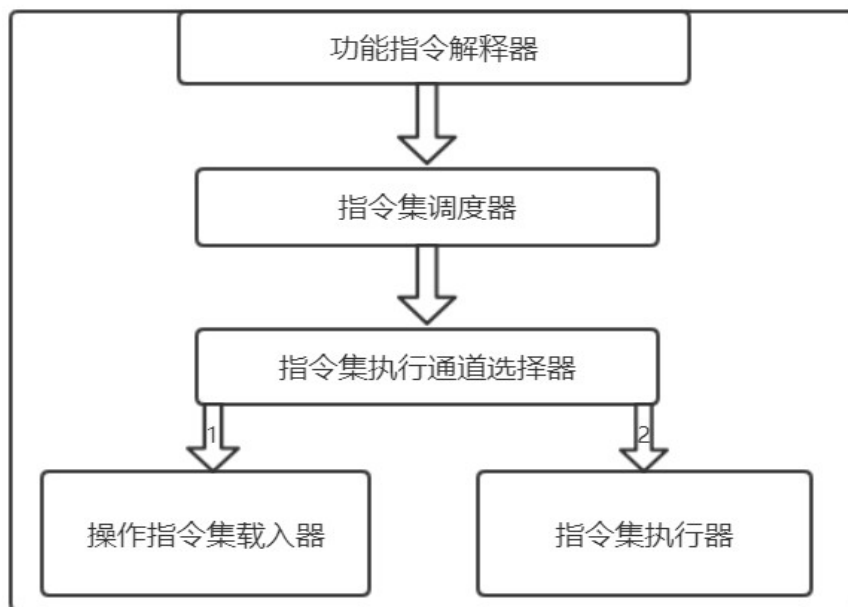


图 4.7 智能网关指令集调度执行器

(1) 操作指令集载入器通道，该通道负责载入用户软件自定义的配置指令集，包括网络功能配置指令集、感知层传感网络工作模式配置指令集、帧数据格式自定义指令集等相关网

关系统工作模式配置指令集。该软件定义的配置指令集需要载入到系统初始化配置执行区域。网关系统初始化完成软件自定义工作模式配置。

(2) 指令集执行器通道, 该通道负责执行设备功能操作相关指令集, 例如云端下发远程开关锁指令, 需切换指令集执行器通道执行开关锁指令完成本次执行过程^[42]。

4.4.2 软件定义感知层传感网络指令集

感知层传感网络分为两类, 第一类是板载硬件传感模块, 第二类是终端节点传感设备。网关控制单元与板载传感模块之间, 以驱动为通信载体通过硬件数据总线与传感设备进行数据交互, 网关控制单元与板载硬件设备之间数据流向主要集中在上行数据, 板载传感器模块周期性采集环境数据传输给控制单元, 进行数据分析处理。网关控制单元与终端设备之间通过无线传输, 本设计的局域网是基于 Zigbee 的无线网络, 终端节点设备之间通过协议规定数据传输帧格式进行数据交互。网关控制单元与板载硬件设备之间数据流为双向数据, 上行数据包括终端设备加网信息上报, 传感节点环境数据采集上报, 设备硬件信息上报, 主动式心跳包上报。下行数据包括云端查询指定终端设备的设备信息, 远程控制可控终端设备, 例如远程开关锁、开关灯。

软件定义传感网络指令集封装底层配置传感器的采样周期, 数据上报周期, 上传数据帧先后顺序, 数据采样有效位以及数据上报方式, 分为主动式周期上报或者被动式触发式数据上报接口函数。定义指令集与传感器功能接口函数实现映射关系, 用户操作某个功能, 只需发送对应指令字符串和操作参数即可实现指令集到执行过程的转换^[42]。例如要实现配置某个设备的采样频率和采集数据有效物。例如需要配置温湿度采集模块, 采样周期设定为每小时一次, 数据采集有效位为保留小数点后俩位。发送 ‘GT Sensing_Layer Significance_Bit 保留有效位数’ 指令集配置数据采集有效位保留 2 位。

4.4.3 软件定义网络功能模式指令集

智能物联网网关网络层主要负责无线局域网网络搭建, 管理终端节点设备的加网, 退网, 数据帧解析。查询网络设备在线情况以及设备关联信息表, 配置网络信息包括网络编号、加网设备上限数, 终端设备短地址以及 MAC 地址信息。终端节点设备加网, 退网等涉及协议栈的操作, 统一封装底层协议栈网络层接口函数。调用相应网络操作指令集即可控制设备的加网退网操作, 可通过软件定义网络指令集, 配置网络允许加网的设备最大个数, 配置网关允许加网的设备类型, 该设定完成后网关智能按照软件定义的指令集组合工作, 完成对网关的加网审核机制。查询网络设备在线情况以及设备关联信息表, 底层封装多个功能函数组合实现一个功能^[43]。例如查询网络设备在线情况, 底层调用内存数据查询, 数据提取, 数据建表等单一功能函数。组合完成一个具有查询功能的综合函数。配置网络信息, 可以通过指令集加参数完成网络信息的配置, 例如设定网络编号。只需发送指令集 ‘GT Net Set_Net_ID 设备号’ 即可完成对网络编号的配置。

4.4.4 软件定义内存管理操作指令集

软件定义内存管理操作指令集，包括查询指令集，数据添加指令集，数据删除指令集，内存销毁指令集，内存设备添加指令集。查询功能分为内存物理存储空间剩余空闲内存情况，查询内存包含页表存储信息。内存管理指令集封装内存管理底层接口函数，内存页表数据查询，空闲内存查询，内存申请，地址映射等底层接口。通过软件调用内存管理对应的功能指令集即可掌握内存的存储状况，内存的利用率等相关信息。

(1) 在使用查询内存使用情况功能时，需发送指令完成内存信息的回显。例如，发送指令集 ‘GT Memory search 1’ 查询当前设备信息存储区内内存使用情况。指令集执行结果

(2) 当有新终端设备想要加入网络时，当前存储模型中没有其对应的内存存储区域。需要通过软件调页表创建指令集，例如发送 ‘GT Memory app_paper 内存大小数据索引地址设备 ID 号’ 即可完成新设备的内存页表创建。

4.4.5 软件定义环境“脉搏”信息融合数据帧指令集

环境信息融合数据帧，一种节省数据传输开销。每一个网络中，无论局域网还是云端网络，终端设备都需要周期性上报心跳数据到设备在线监控端，保证终端设备实时在线。但是大部分心跳包只包含心跳应答数据，作为一帧数据上报，少量数据在允许范围中，当遇到大批量数据后，会影响网络的稳定性。所以引入环境信息融合技术，顾名思义就是设备环境心跳数据包，心跳包中包含该终端设备的环境采集数据，设备信息以及心跳数据。云端接收到数据，一帧数据都比较有价值，提高可了网络的可塑性。

4.4.6 面向软件定义的帧数据格式自定义指令集

数据通信协议帧格式支持软件自定义，内存中集成大量数据帧格式模板，帧格式具有固定的包头包尾，数据长度，环境数据位，剩余预留位置支持软件自定义设定帧数据格式。内存中存储的数据帧格式模型映射为指令集，帧数据位置信息自定义模型。例如设定当前位置数据为传感数据或者状态数据属性都可以。

4.4.7 面向软件定义的终端设备调度控制指令集

终端设备调度控制指令集，指令集页内根据终端设备的属性分为多块指令集，每一个指令集块存储着一种终端设备相关的所有操作指令集^[44]。例如当前指令集块为智能门锁指令集，则块内存储开关锁，门锁状态查询、门锁远程授权、门锁异常查询等设备指令集。本课题中，事件被定义为一个调度执行的基本单位，一个开锁为一个事件，关锁为一个事件，开关锁然后查询当前锁状态的这个过程就是一个事务。事务包含事件，事件服务事务。表 4.1 为红外转发终端功能控制指令表，表 4.2 为终端设备调度指令表。

表 4.1 功能设置指令表

红外转发终端设备	功能设置指令
红外学习	0xA0

红外学习指令下发	0xA1
设定空调型号	0xA2
空调开	0xA3
空调关	0xA4
空调模式设置	
自动模式	0xA5
制冷模式	0xA6
除湿模式	0xA7
送风模式	0xA8
空调温度控制	
温度加	0xBE1
温度减	0xBE0

表 4.2 终端设备功能指令

终端设备	设备功能指令
网络层	
加网	0x9F
退网	0x95
查询	0x8A
终端设备	
门锁开	0xCE1
门锁关	0xCE0

4.5 本章小结

本章通过综合分析面向软件定义的智能物联网网关的功能需求，首先结合基于事务驱动过程的数据管理模型设计一套面向软件定义的智能物联网网关架构。然后分析架构内包含的功能层结构，包含感知层、网关数据分析处理层、网络层、指令集层以及网关信息存储层。并对各层内部结构进行分析，最后对本章内容进行总结。

5 智能物联网网关的软硬件功能实现

前文对面向软件定义的智能物联网网关的总体架构设计做了详细分析。本章节主要围绕网关的具体实现进行描述，按照功能层分为硬件层和软件层。

网关硬件层，网关选用单 MCU 方案，负责数据处理控制，网关核心控制 MCU 型号为 STM32F103VET6，网络传输选用 W5500 芯片支持以太网方案以及选用 NB-IOT 模组支持端云传输方案，局域网数据传输选用 Zigbee 协调器模组，以及传感数据采集模块。

在网关硬件电路的支撑上，网关软件层得以实现。为 STM32 设计数据处理控制软件程序，负责完成硬件电路的初始化、传感数据采集、内外网网络的建立、终端设备管控、网络信息解析存储以及指令集调度执行功能^[45]。

5.1 智能物联网网关硬件层实现

5.1.1 核心控制单元

网关核心控制 MCU 型号为 STM32F103VET6，该芯片具有大容量 Flash，建立灵活的信息存储结构，满足网关信息本地存储。该芯片内部集成丰富的硬件接口，A/D，D/A，定时器，PWM，DMA，SPI 以及 I2C 等接口。满足网关复杂逻辑的硬件资源需求。

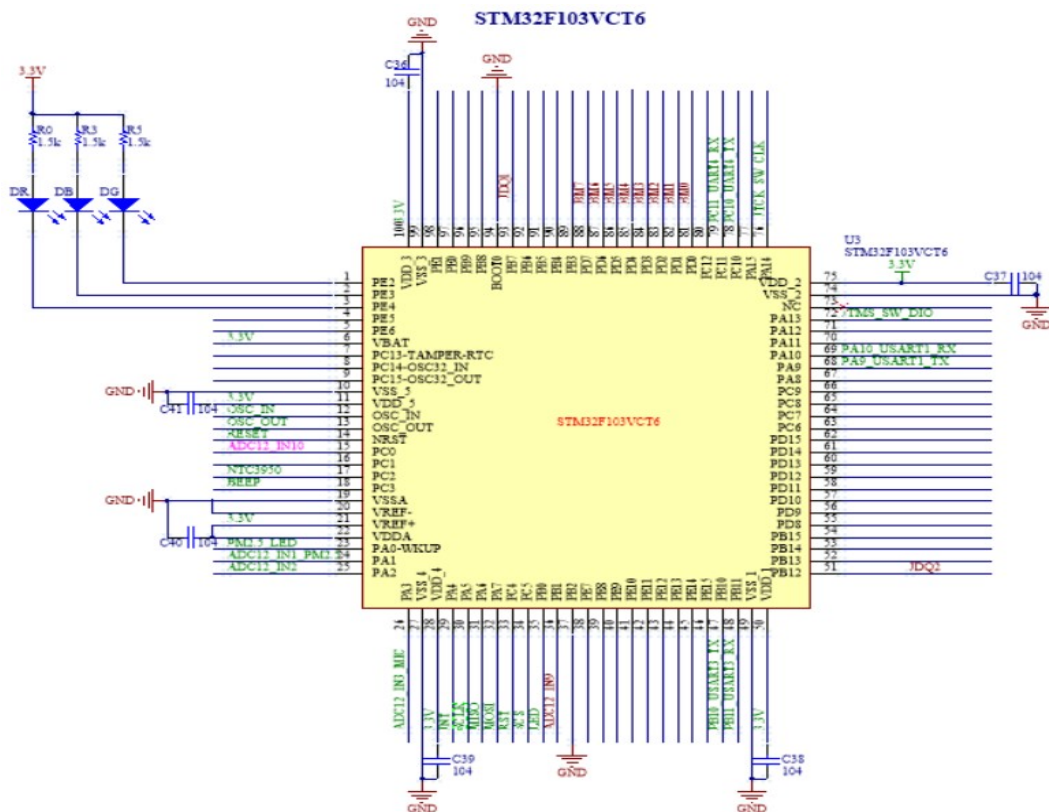


图 5.1 核心控制单元原理图

图 5.1 中 U3 为网关的核心控制单元，负责处理网关的数据流，执行运算处理，并执行相关控制。

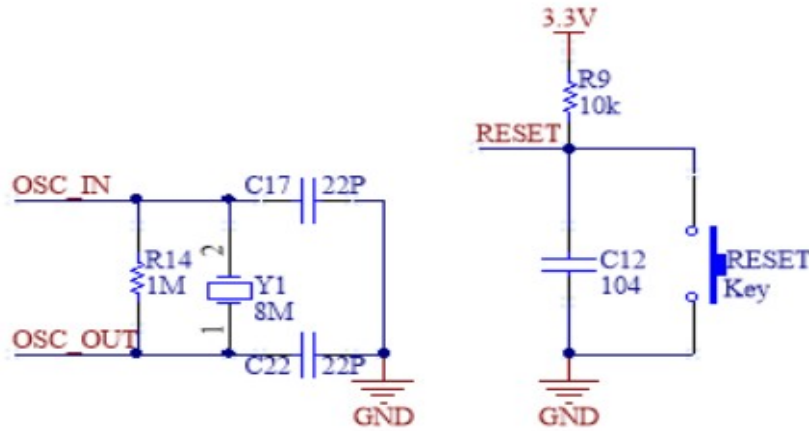


图 5.2 时钟电路左(a)和复位电路右(b)

上图 5.2 左(a)为时钟电路和右(b)为复位电路，并通过与核心控制器相连。核心控制器外围晶振电路为 MCU 的运行提供稳定的时钟频率，选用 8M 晶振 Y1 为 MCU 提供主频，由 C17 和 C22 两颗电容协同启振。复位电路主要负责初始化 MCU 相关功能配置，运行中间数据，寄存器存储信息等。

5.1.2 有线网络传输硬件层

智能网关支持云端进行功能控制以及对局域网内部终端设备管控，首先为网关建立一个云端网络通路，选用 W5500 网卡芯片，实现云端有线网络数据通路。

W5500 网卡芯片通过 SPI 数据接口与核心控制 MCU 连接，MCU 网卡驱动程序配置 W5500 网卡工作模式，通过数据总线与网卡进行数据交互，满足发送接收数据需求。网络传输模块的电路图如图 5.3 所示。

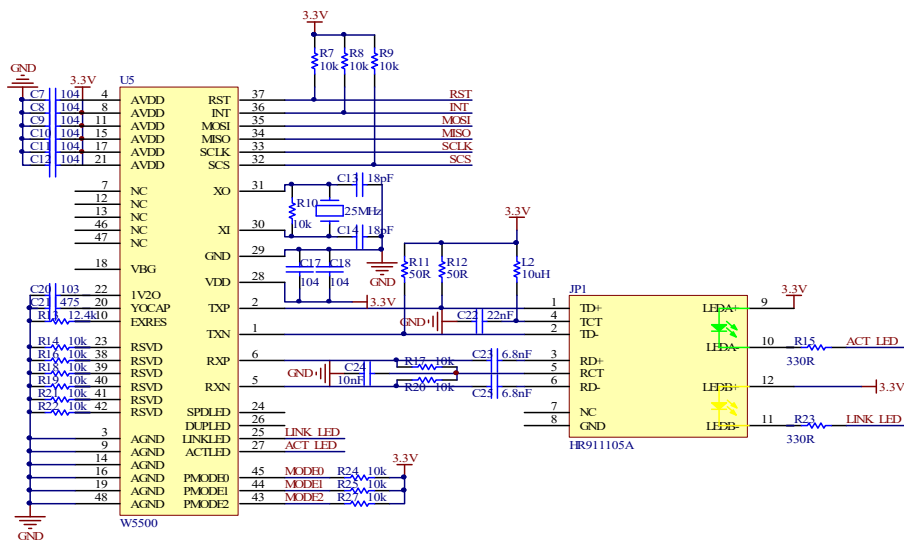


图 5.3 网络传输模块的电路图

5.1.3 无线传输模块

智能物联网网关不仅需要有线云端网络实现数据云端同步，更需要特殊条件下无线网络同样支持数据云端同步。无线局域网则负责终端设备数据同步网关，无线云端网络则负责数据云端同步。

(1) ZigBee 协调器模块，选用集成 8051 内核的 CC2530 芯片实现 Zigbee 协调器的开发，选用基于 TI 的 Stack 协议栈作为无线局域网的网络层。本智能网关设计，基于原有协议栈进行应用层二次封装，提供用户与开发的双接口。ZigBee 协调器模块电路如图 5.4 所示。

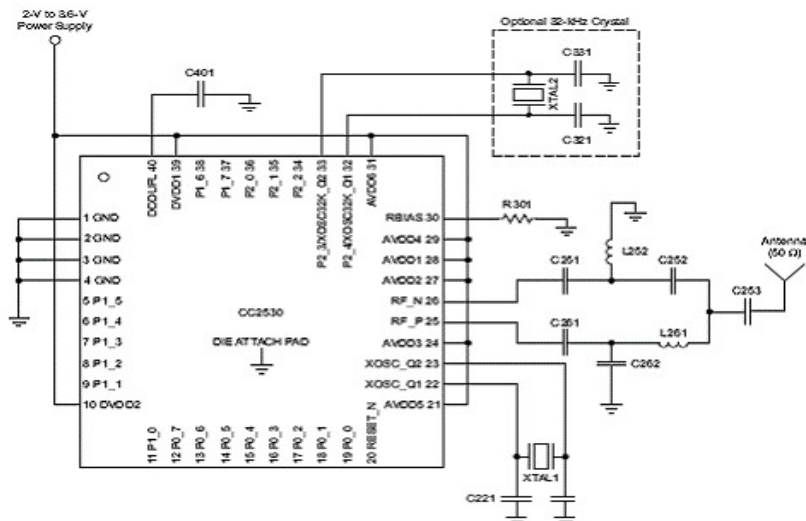


图 5.4 ZigBee 协调器模块电路

(2) NB-IOT 传输模组，如下图 5.5 NB-IOT 模组电路图所示，系统班围绕 BC95 的 NB-IOT 核心控制芯片，加入外设供电、天线、数据交互电路，实现一个 NB-IOT 的最小系统模块，预留通信接口可实现数据交互，功能配置。

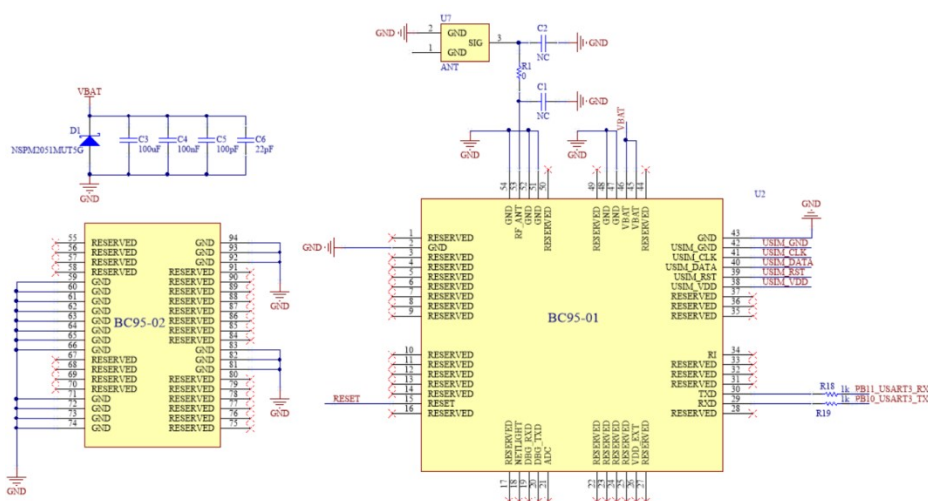


图 5.5 NB-IOT 模组电路

5.1.4 环境感知模块模块

(1) 温湿度模块，图为 DHT11 电路，供电端采用 5V 直流供电，采集数据传输通道采用单总线与核心控制 MCU 通信，并加入上拉电阻，保证数据的可靠传输以及稳定性。DHT11 检测电路如图 5.6 所示。

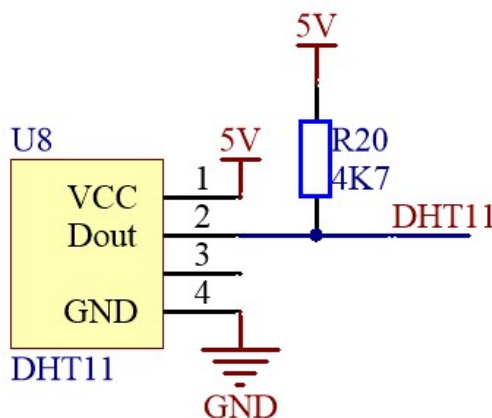


图 5.6 DHT11 检测电路

(2) PM2.5 检测模块，智能网关板载集成 PM2.5 传感模块，该模块型号选用 GP2Y1014AU。传感器基于红外光受空气中颗粒物遮挡信号反馈为原理实现。空气中颗粒浓度越高，对红外光遮挡情况越明显。光电接收管对红外光接收率降低，从而判断空气中颗粒物的浓度。PM2.5 传感模块的电路如图 5.7 所示。

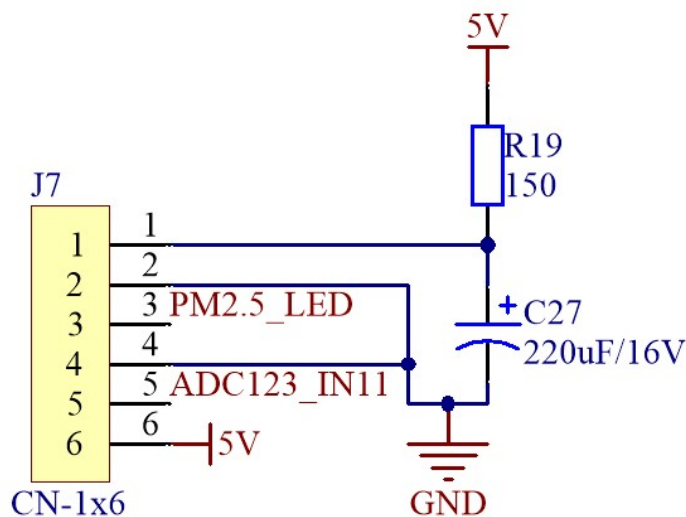


图 5.7 PM2.5 检测模块电路

5.1.5 印刷电路板(PCB)设计

在网关硬件设计中，将网关系统按照功能实现分为多个子模块，功能外设围绕核心控制芯片设计，先实现基于核心控制芯片的最小系统，然后逐个实现功能外设模块，预留通信接

口，与核心控制芯片连接。设计 PCB 版图，围绕核心控制器摆放各模块电路，然后合理布线。供电线路，控制信号线路，数据采集线路都采用不同的布局布线方式。智能网关 PCB 设计图如图 5.8 所示。

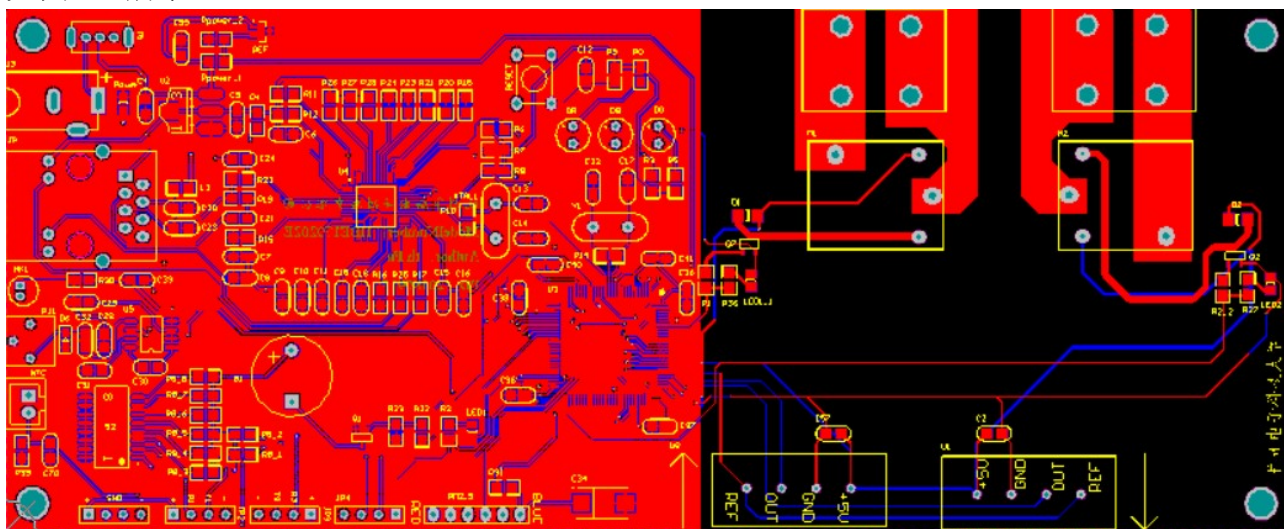


图 5.8 (a)智能网关板图（正面）

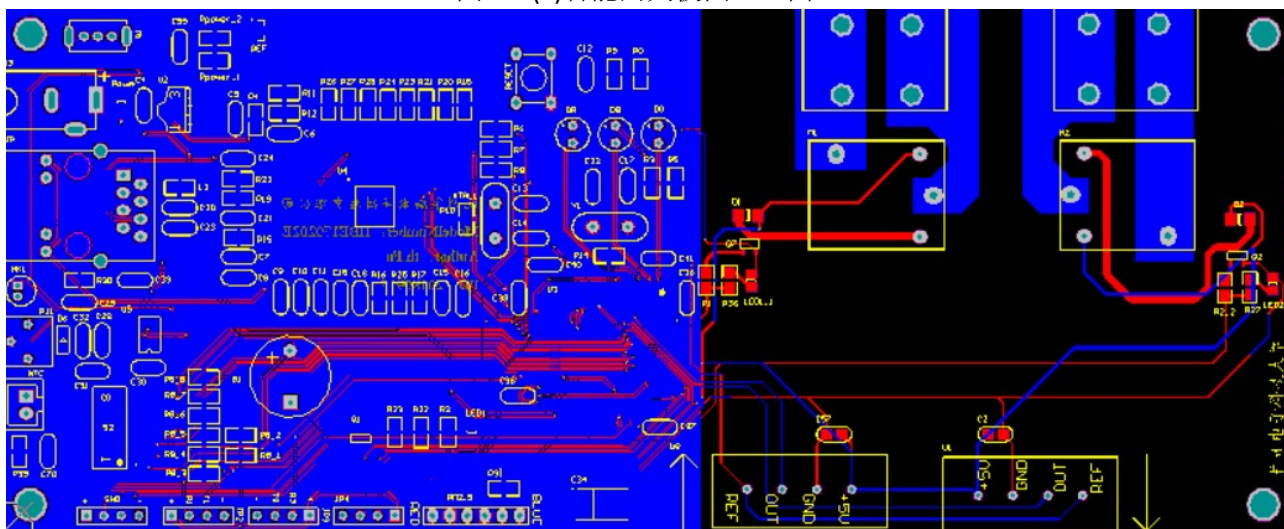


图 5.8 (b)智能网关板图（背面）

5.2 智能物联网网关软件层实现

通过对物联网网关硬件功能设计做了详细分析，引出软件层的设计，网关系统软件从整体架构触发，按照功能层分为主控制软件、数据分析处理层软件、信息存储层软件、网络通信层软件、软件定义层软件^[46]。引入上文第三章提出的基于事务驱动过程的数据处理模型为本课题设计智能物联网网关系统相关软件实现提供设计思想。

5.2.1 主控制程序

智能网关的主控任务程序主要负责调度其他功能子程序模块，功能子程序模块包括，驱动程序，软件定义程序、数据处理程序、网络通信程序以及信息存储程序。

(1) 驱动程序，负责为板载硬件模块提供驱动，负责让硬件功能模块工作起来。

(2) 软件定义程序，负责分析软件定义相关 GT 操作指令，在本地指令集库中找到与该软件定义指令映射的指令集，并调度指令集执行操作。

(3) 数据处理程序，主要负责网关数据分组解析，网关情景模式自定义、软件自定义，事务驱动配置、终端设备调度。

(4) 信息存储层软件，负责分组存储网关数据，对内存数据进行增删改查，查询操作，记录网关内存区空间利用率。

(5) 网络通信层软件，负责建立高效可靠的网络通信通路，网络信息发送与接收操作。

主控任务程序首先初始化网关系统资源配置，包括有线网络与无线网络通信网络配置，核心控制器与网关模组之间的数据通信方式配置、底层传感模块驱动初始化，配置传感模块的工作模式，数据传输方式，数据采集模式等配置。初始化信息存储区，装载内存区内容，初始化缓冲区中间数据。然后根据程序框架调度相应的功能子程序模块执行相应的操作。网关系统软件框架如图 5.9 所示。

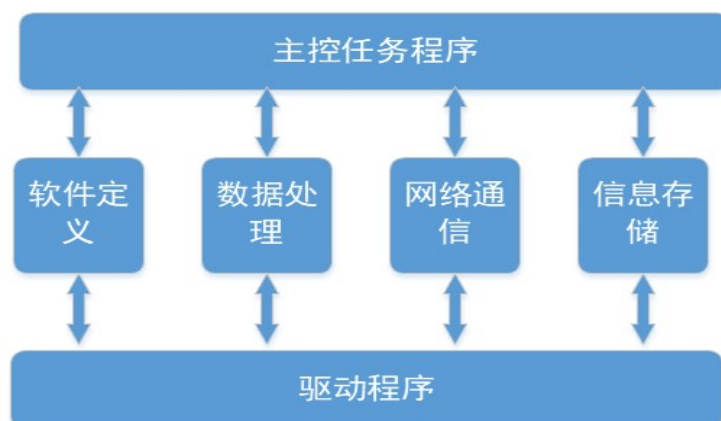


图 5.9 网关系统软件架构图

5.2.2 数据分析处理程序

智能物联网网关数据分析处理程序，主要负责数据分组解析。本数据分析处理程序引入第三章提出的基于事务驱动过程的数据管理模型，设计一种基于事件或者事务驱动的数据分析处理程序，数据处理程序根据事件或者事务属性和功能进行数据分组，按照分组情况进行数据处理分析，也支持数据处理程序中的情景模式状态机设定。数据分析处理软件中的数据类型分为云端下行数据、感知层传感数据、感知层设备加网数据。数据处理层按照上传数据帧中的属性标志位区分，当前数据属性。然后调用对应分组的数据处理程序。此部分流程图如图 5.10 所示。

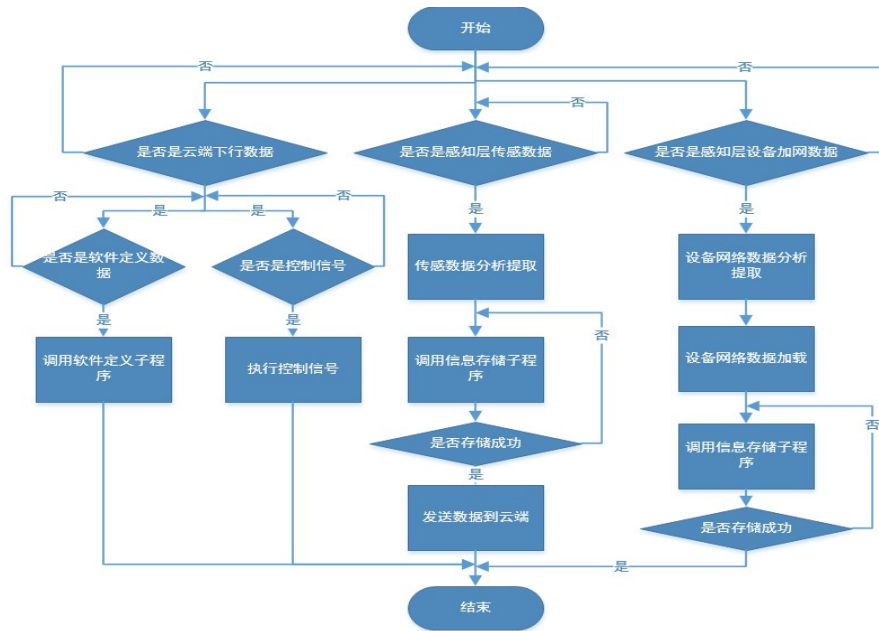


图 5.10 数据分析处理流程图

(1) 接收数据为感知层设备加网数据，分组到相关数据处理通道，对网关设备上传的一帧组网数据，进行包头包围拆分。根据簇 ID 区分数据类型。如表为属性 ID 表格，每一个属性 ID 代表一类数据。如表 5.1 数据属性，表 5.2 终端设备编码。

表 5.1 数据属性

数据属性	Type_ID
设备组网数据	0x2F00
传感感知数据	0x0800
云端控制数据	0x0A00

表 5.2 终端设备编码

终端设备	Device_ID
门磁	0x15
红外人体感应	0x0d
烟雾	0x0b
CO	0x0c
燃气	0x2d
温湿度	0x0a
软件定义信号	0xaa
控制信号	0xbb

根据数据属性 0x2F00，判断当前数据帧为组网数据，然后提取设备编码和短地址信息。调用信息存储子程序根据设备的 Type_ID 以及 Device_ID 对解析提取数据指定位置存储。等待存储结果，存储成功则该过程结束否则等待存储完成。表 5.3 为组网数据帧格式。

表 5.3 组网数据帧格式

	帧头	数据长度	设备编码 Device_ID	数据区			异或校验位	帧尾
				设备短地址	数据属性 Type_ID	感知数据		
长度	2	2	1	2	2	4*n	1	2
数值	0xAACC		0x15	0xFA03	0x2F00	0x42		0xEEFF

(2) 接收数据为感知层传感数据，根据 Type_ID 为 0x0800 数据分组到传感数据处理通道，提取传感数据以及设备编码信息，调用信息存储子程序根据设备的 Type_ID 以及 Device_ID 对解析提取数据存储在传感数据存储页内的门磁数据存储块。等待返回存储结果，当收到存储成功结果，调用网络通信层子程序数据发送到云端服务器。表 5.4 为传感数据帧格式。

表 5.4 传感数据帧格式

	帧头	数据长度	设备编码 Device_ID	数据区			异或校验位	帧尾
				设备短地址	数据属性 Type_ID	感知数据		
长度	2	2	1	2	2	4*n	1	2
数值	0xAACC		0x15	0x0B2F	0x0800	0x42		0xEEFF

(3) 接收数据为软件定义数据，根据 Type_ID 为 0x0A00 将数据分组到云端数据处理通道，然后根据 Device 判断是软件定义信号还是控制信号。如表 5.5 所示，该云端控制数据为软件定义指令，调用软件定义子程序完后设定功能。表 5.5 为云端控制数据帧格式。5.5 云端控制数据帧格式

	帧头	数据长度	设备编码 Device_ID	数据区			异或校验位	帧尾
				设备短地址	数据属性 Type_ID	GT 控制 指令数据		
长度	2	2	1	2	2	4*n	1	2
数值	0xAACC		0xaa	0x0000	0x0800			0xEEFF

5.2.3 信息存储软件程序

网关信息存储层软件程序，负责对网关相关处理数据，中间数据进行存储。借鉴第三章的数据处理模型，本信息存储层程序基于事务驱动机制，将不同种类的存储数据定义为不同

的事务，信息存储层程序根据不同的事务去动态分配不同的数据存储通道。此部分流程图如图 5.11 所示所示。

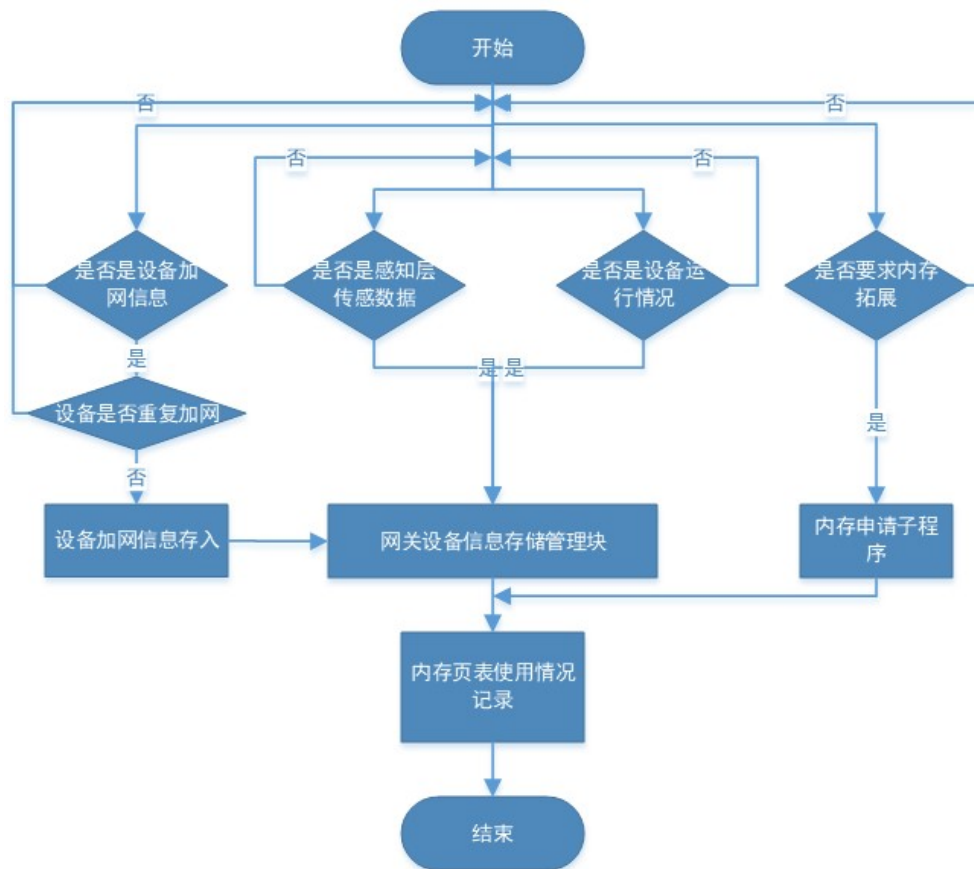


图 5.11 数据分析处理流程图

(1) 当存储信息为设备加网信息，先根据该设备的设备编码 ID，遍历存储层存储页表，查询是否有相同 ID，如果有则说明当前设备重复组网，不进行网络信息存储。当判断设备为第一次组网，传输设备短地址和设备 ID 信息到网关设备信息存储管理块进行数据存储。存储完数据之后，更新内存页表使用情况信息，结束当前流程。

(2) 当存储信息为内存拓展信息，解析内存拓展数据帧，提取信息长度位置，设备地址信息以及设备 ID 号存储信息，然后调用内存申请子程序，在信息存储区内的内存拓展区，申请固定大小区域，存储拓展信息。

5.2.4 网络通信程序

网关网络通信程序，负责将网关本地数据信息上传至云端服务器，程序接收待发送数据。判断该数据是否需要上发至云端，如果判断是则继续判断当前网关外网络是否稳定，当前网络稳定则对带传输数据进行网络传输协议封装，如果当前网络不稳定，则将待传输数据存入缓存区，等待网络维持稳定再执行发送操作^[47]。然后将待传输数据封装为云端数据帧格式，

上传至云端。一次发送完成之后，判断当前数据发送任务是否继续，判断是则重复之前操作，如果判断否则立即结束当前流程。此部分流程图如图 5.12 所示。

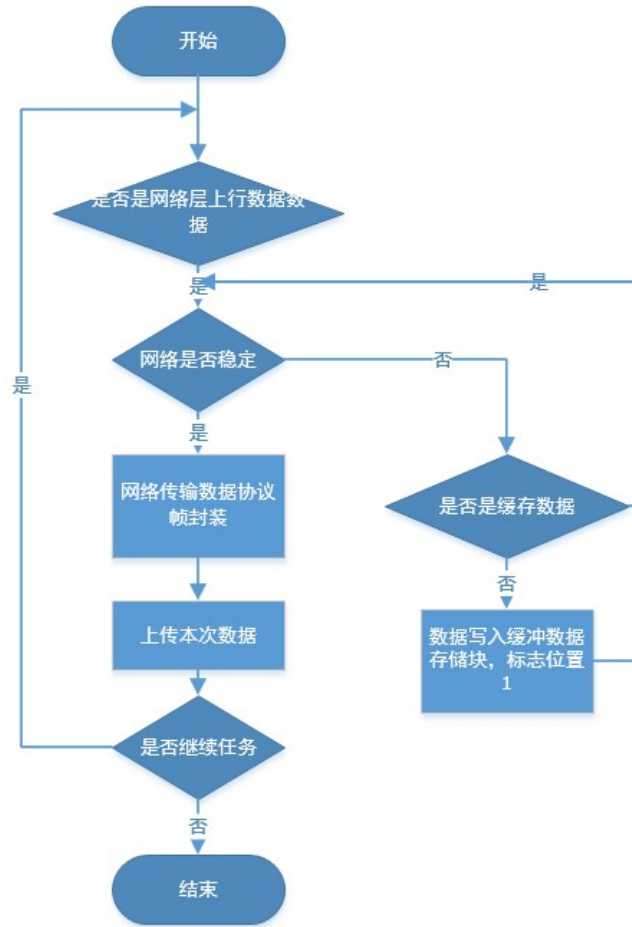


图 5.12 网络通信流程图

5.2.5 网络通信数据协议帧格式设计

网关发送至云端服务器的数据帧分为两种。分别是上传数据帧和心跳“脉搏”数据；数据传输帧格式如表 5.6 和“脉搏”数据帧格式如表 5.7 所示。

表 5.6 上传数据帧格式

	数据帧头	有效数据长度	上报标识位 (0/1/2)	数据区			数据校验位	帧尾
				终端号	设备编号 Device_ID	感知数据		
长度	2	2	1	2	4	2*n	1	2
数值	0xAAC C	*	应答成功 0、失败 1、主动上报标识 2	0x0001	0x15	*	*	0xEE FF

传输数据帧格式中，上报标识位（0/1/2）标记当前上发数据为什么类型，0x00 和 0x01 表示数据为网关接收云端下发指令，执行反馈成功还是失败。0x02 则代表上传数据为主动上报，例如感知数据。数据层由终端号、设备编号、感知数据组成。感知数据由 n 个 2 字节数据组成。

表 5.7 “脉搏”数据帧格式

	数据帧头	有效数据长度	上报标识位 (0/1/2)	数据区		数据校验位	数据帧尾
				终端号	固定数据		
长度	2	2	1	2	1	1	1
数值	0xBBFF	0x0008	0x02	0x0001	0xaa	*	0xBF

“脉搏”数据网关与云端服务器保持稳定连接的依据，类似人的脉搏信号，固定周期跳动一次，网关周期性的发送“脉搏”数据到云端服务器，保持与云端的长连接状态。该数据格式固定，固定数据也为固定的 0xaa。

5.2.6 软件定义程序

软件定义程序，是基于一套软件定义调度指令集构建的，通过 GT 指令对网关内部资源进行配置和调度^[49]，GT 指令的语言结构如表 5.8。该 GT 指令帧格式包括帧头 GT，标识当前控制指令为 GT 指令，功能符为指令要执行的宏观功能表述，操作符则表示该指令集具体完成的操作动作，功能配置参数数据则为指令集操作提供动态模式配置，该区域也可省略，根据用户操作需求，不加配置参数则默认执行。表 5.8 为 GT 指令功能符，表 5.9 为 GT 指令帧格式。

表 5.8GT 指令功能符

功能符作用	功能符	操作符
内存操作	Memory	内存查询(search)、内存申请(app_paper)、内存释放(free)、内存格式化(delete)
感知层操作	Sensing_Laye	数据采集有效位(Significance_Bit)、采集周期(Acquisition_cycle)、数据上传周期(Upload_cycle)
网络层操作	Net	加网(join)、退网(exit)、查询在线设备(find)
帧数据协议格式定义	Data_Protocol	环境数据帧格式定义

		(Environment_data)、网路数据帧格式定义(Net_data)、加网数据帧格式定义(Join_Net_Data)
设备调度控制	Equipment_Schedul	红外控制(Infrared)、门锁控制(Door)、电动窗帘控制(Screen)等
环境“脉搏信息融合” 数据指令	Pulse_data	环境数据融合(Data_fusion)、环境信息筛选(Data_screening)

表 5.9GT 指令帧格式

	帧头	功能符	操作符	功能操作/配置参数数据
功能操作	GT	功能标识符	功能操作符	参数配置数据
功能操作 1	GT	Memory	search	1
功能操作 1	GT	Memory	app_paper	内存大小 8 数据索引地址设备 ID 号
功能操作 3	GT	Sensing_Laye	Significance_Bit	2

(1) 功能操作 1, 软件定义指令'GT Memory search 1', GT 为软件定义帧头, 附加功能符 Memory 为对内存操作, 附加操作符 search 为查询操作。参数附加数据 1 代表第一部分。该软件定义指令实现查询信息存储区内块编号为 1 区域的存储信息。如果查询其他数据块只需换附加参数数据就好。

(2) 功能操作 1, 'GT Memoryapp_paper 内存大小数据索引地址设备 ID 号', GT 为软件定义帧头, 附加功能符 MEMORY 为对内存操作, 附加操作符 app_paper 为内存页操作。参数附加数据为'内存大小 8 数据索引地址设备 ID 号'。该软件定义指令实现在数据索引地址作为基地址, 申请内存大小为 8 字节的内存区间, 设置设备 ID 号作为内存索引号。

(3) 功能操作 2, 'GT Sensing_LayeSignificance_Bit 2', GT 为软件定义帧头, 附加功能符 Sensing_Laye 为对感知层操作, 附加操作符 Significance_Bit 为有效位操作。参数附加数据 2。该软件定义指令实现配置数据采集保留 2 个有效位。

软件定义程序负责执行云端软件定义事务, 对云端软件定义控制 GT 指令进行分析提取操作功能码, 操作功能配置参数等数据^[50]。然后判断解析时候成功, 如果解析成功, 则执行遍历指令集库为解析后提取的指令参数, 查询指令集映射关系, 记录映射关系。如果解析失

败则返回上一过程重新对 GT 指令解析。随后判断当前指令集映射关系是否查找成功，如果成功则加载当前软件定义指令集^[51]。如果失败则返回重新查找。最后本流程结束。此部分流程图如图 5.13 所示。

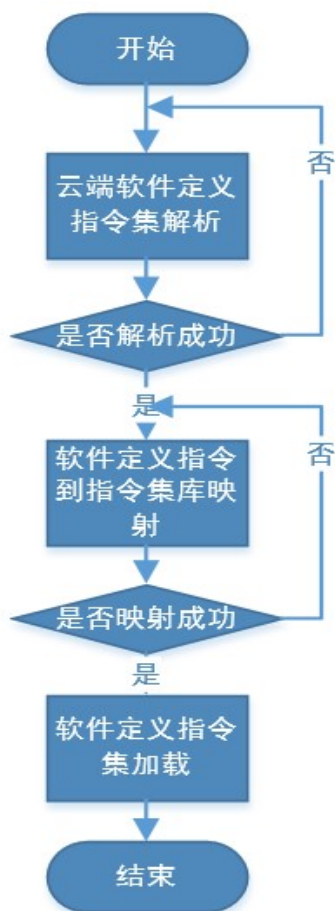


图 5.13 软件定义流程

5.3 智能物联网网关软件层性能分析

5.3.1 网关常规数据管理程序性能分析

网关常规数据管理程序，以网关内部数据处理程序为中心，支持源数据输入到处理程序然后等待处理结果输出。以阻塞式的方式，等待数据载入。按照统一的数据处理功能逻辑执行。执行完数据之后，结果输出储以及执行其他动作。网关常规数据管理程序运行过程如图 5.14 所示。

```

硬件驱动初始化.....
硬件驱动初始化完成
网关功能模式配置初始化.....
网关功能模式配置完成
网关允许组网
等待设备加网.....
数据分组：当前数据为设备加网数据
接收数据：[ 0xAACC 0x0b 0xDB01 0x2F00 0x42 0xEEFF]
解析数据结果：[ 0b][ DB01 ][ 42 ]
数据加载存储模型
[ Device_ID=0x0b
  Device_addr=0xDB01
  Data1=0x42]
数据存储完成
任务结束
接收数据：[ 0xAACC 0x15 0xFA03 0x2F00 0x42 0xEEFF 0xAACC 0x0c 0x0A3B 0x2F00 0x42 0xEEFF ]
解析数据结果：[]
解析数据失败
接收数据：[ 0xAACC 0x15 0xFA03 0x2F00 0x42 0xEEFF ]
解析数据结果：[]
[ Device_ID=0x15
  Device_addr=None
  Data1=0xNone]
数据存储失败
任务结束

```

图 5.14 网关常规数据管理程序运行过程图

5.3.2 基于事务驱动模型的数据管理模型的网关数据管理程序分析

基于事务驱动模型的数据管理模型的网关数据管理程序，在数据与管理程序之间，不存在中心的概念。数据源于管理程序之间互相关联，相互辅助，以事件或者事务的形式定义不同功能、属性的数据源。不同的事件或者事务与管理程序相互对应，不再是统一的一个数据管理输入输出接口。而是不同的事务驱动型管理程序。源数据的处理，存储以及执行动作都以事件或者事务的形式定义^[52]。做到数据主动找其数据管理程序，而不是数据管理程序阻塞式等待源数据输入。基于事务驱动模型的数据管理模型的网关数据管理程序运行过程如图 5.15 所示。


```

硬件驱动初始化.....
硬件驱动初始化完成
网关功能模式配置初始化.....
网关功能模式配置完成
网关允许组网
等待设备加网.....
数据分组：当前数据为设备加网数据
接收数据：[ 0xAACC 0x0b 0xDB01 0x2F00 0x42 0xEEFF ]
解析数据结果：[ 0b][ DB01 ][ 42 ]
数据加载存储模型
[ Device_ID=0x0b
  Device_addr=0xDB01
  Data1=0x42]
数据存储完成
接收数据：[ 0xAACC 0x15 0xFA03 0x2F00 0x28 0xEEFF ]
[ Device_ID=0x15
  Device_addr=FA03
  Data1=0x28]
数据存储成功
接收数据：[ 0xAACC 0x15 0x0A3B 0x2F00 0x33 0xEEFF ]
[ Device_ID=0x0c
  Device_addr=0x0A3B
  Data1=0x33]
有3个终端设备加网成功
设备信息装载成功
终端设备网络建立成功
任务结束

```

图 5.15 基于模型的网关数据管理程序运行过程图

5.3.3 管理程序性能分析

综上所述，智能网关系统分别使用两种不同的数据管理模式建立数据管理软件，分别测试网关组网功能数据，由执行结果分析。发现网关常规数据管理程序在执行网关组网操作时，但设备组网能顺利完成解析，处理，存储。但是当多个终端设备同时组网时，网关此时无法对批量数据及时解析。会出现数据不完整，错误。无法完成解析，也会出现数据解析完成，但是存储失败。而基于事务驱动模型的数据管理模型的网关数据管理程序，组网过程则表现的出色，无论是单数据帧还是多数据集都能实时高效完整的解析处理数据并且完成存储。

5.4 本章小结

本章主要围绕智能物联网网关的软硬件功能实现去描述，先从网关硬件角度去按照由核心控制单元到局部的方向，描述核心控制单元、网络传输单元、无线传输模组单元、环境感知单元，然后展示 PCB 版图。以网关硬件为基础设计网关软件功能，整体按照层级分类，主

任务控制程序包含功能子程序实现完整的系统功能，并且详细解析每一个功能子程序的实现过程。并对数据管理程序进行分析，得出基于事务驱动的数据管理模型性能好的结论，最后对本章内容进行总结。

6 网关平台测试与应用

对平台的软件功能层进行测试和硬件各子功能模块电路进行测试。首先异步测试软硬件实现，待测试效果达标之后。然后同步测试平台的软件与物理硬件层之间的兼容性，并联合测试软件嵌入硬件的整体性能，这一环节的目的是为了测试平台整机是否满足预定功能需求以及实际生产环境的要求。平台测试需要搭建模拟真实生产环境的测试环境，并进行性能测试与功能测试^[54]。本章节主要对平台软件功能进行测试，以及平台展出和优势对比，最后展示平台在生产环境中的实际应用。

6.1 网关硬件层测试

针对网关硬件层测试，主要测试几个部分，分别是网关电源供电电路、主控 MCU 最小系统电路、传感器电路、以太网电路进行测试。

6.1.1 电源供电电路测试

网关板载供电采用 5V 直流供电，需要板载输入电源电路将 5v 电压转换为 3.3V，为板载芯片及设备供电。测试板载电源电路是否能正常工作，首先断开电源电路与后级电路接线端，只测试电源电路。电路接入 5V 电压，测试电源电路核心芯片工作电压是否正常，查看电源芯片可以正常工作，在查看电源芯片输出电压是否为 3.3V，测试正常。然后测试加上后级电路电源芯片是否能提供正常工作电流，当把后级电路接入电路中，测试电源芯片能够稳定输出电压与电流，并且持续工作一段时间，测试电源芯片温度正常，测试完毕，电源电路可以正常工作。

6.1.2 主控 MCU 最小系统电路测试

主控 MCU 最小系统为网关的核心处理器，驱动着网关的正常运行。MCU 最小系统局部电路包括，主控芯片 MCU、供电电路、晶振电路、复位电路。首先测试芯片的供电是否正常，测量电压 3.3V 正常。用万用表测量晶振电路与复位电路均接线连接正常，芯片焊接处无短路，芯片最小系统电路正常。

6.1.3 传感器电路测试

网关板载多个传感器电路，有温湿度 DHT11 电路，PM2.5 传感电路。第一步主要测量主控 MCU 引脚与传感器电路之间的数据线是否连接正常，测试主控 MCU 与传感电路中间均正常连接。然后测试传感电路的供电是否正常，测量电路的公共地连接正常，之后测试传感电路供电正常。该部分电路测试完毕，电路接线正常。

6.1.4 以太网电路测试

以太网电路网关与云端实现互联互通的关键电路，这部分电路由 W5500 芯片以及外设电路，网口电路，以及 SPI 数据线。首先测试 W5500 芯片供电是否正常，测试芯片外设之前的连接情况。然后测试网口电路，网口有三个指示灯，红、黄、绿三个灯。单独测试网口指示灯，逐一供电观察灯是否正常工作。测试发现网口指示灯可以正常工作。最后测试网络芯片与主控 MCU 之间的 SPI 总线是否连接正常。经测试发现，以太网电路正常。

6.2 网关软件层测试

针对网关软件层测试，主要测试几个特殊功能层，分别是网关一键组网功能、网关信息查询功能、以及软件定义功能进行测试。

6.2.1 网关一键式组网功能测试

本测试主要测试网关一键式组网功能，针对 Zigbee 局域网中，终端设备加网功能测试。本设计功能初衷是满足用户的操作舒适度，省去了设备繁琐组网的操作。一键式组网功能也是本网关平台区别于市面上其他网关的，也是本平台所独有的功能。平台软件实现网络协议栈接口封装，网关允许组网，设备加网功能接口联动执行。用户只需在手机 APP 上点击组网按钮，此时终端设备集体启动电源即可无需其他操作，网关自动将设备信息存入网关路由表中，整个过程用户无需知道原理，全程网络自组网，一键式简化过程。一键组网功能后台执行过程图如图 6.1 所示，前台一键式组网命令下达，网关开始执行联动组网功能接口，屏幕上显示出当前加网设备信息，等待所有设备加网成功后，执行重载数据到信息存储层。此时一个网关终端设备加网操作已经完成。

```

网关接收组网命令
主动发送广播信号通知设备加网
等待设备加网信息上报.....
当前有设备加网信息
当前加网设备: 门磁
提取设备信息: Device_ID=0x15
Device_addr=0x0DAB
Data1=0x42
当前设备加网信息成功加载到内存
当前加网设备: 红外人体感应
提取设备信息: Device_ID=0x0d
Device_addr=0xF3BC
Data1=0x42
当前设备加网信息成功加载到内存
当前加网设备: 烟雾
提取设备信息: Device_ID=0x0b
Device_addr=0x3BAD
Data1=0x33
当前设备加网信息成功加载到内存
当前加网设备: 温湿度
提取设备信息: Device_ID=0x0a
Device_addr=0x5FCB
Data1=0x31
当前设备加网信息成功加载到内存
当前终端设备加网完毕
当前成功加网设备: 门磁 红外人体感应 烟雾 温湿度
  
```

图 6.1 网关终端设备加网操作执行图

6.2.2 网关信息查询功能测试

本测试主要测试网关信息查询功能，该功能为网关信息存储功能中的重要环节。测试查询当前在线设备信息表信息，查询当前网关信息存储区的内存使用情况。网关信息存储软件是平台封装在内存硬件物理层上的一层功能调度接口。可以直接调用接口函数完成对内存的功能操作^[53]。网关内存查询功能后台执行结果如图 6.2 所示。

```
网关接收组网命令
主动发送广播信号通知设备加网
等待设备加网信息上报.....
当前有设备加网信息
当前加网设备: 门磁
提取设备信息: Device_ID=0x15
Device_addr=0x0DAB
Data1=0x42
当前设备加网信息成功加载到内存
当前加网设备: 红外人体感应
提取设备信息: Device_ID=0x0d
Device_addr=0xF3BC
Data1=0x42
当前设备加网信息成功加载到内存
当前加网设备: 烟雾
提取设备信息: Device_ID=0x0b
Device_addr=0x3BAD
Data1=0x33
当前设备加网信息成功加载到内存
当前加网设备: 温湿度
提取设备信息: Device_ID=0x0a
Device_addr=0x5FCB
Data1=0x31
当前设备加网信息成功加载到内存
当前终端设备加网完毕
当前成功加网设备: 门磁 红外人体感应 烟雾 温湿度
```

图 6.2 网关内存查询功能后台执行结果

6.2.3 软件定义功能测试

软件定义功能是平台的亮点功能，该软件定义功能集成在平台内部。基于指令集仓库完成对系统资源的调度。指令集仓库是封装在底层网络层功能、感知层功能、设备调度功能的接口函数。按照自定义编码协议封装指令集在指令集仓库中。网关接收软件定义功能操作指令，解析功能操作指令集，对功能指令集进行解释，解释为调度联动操作符。根据事务驱动功能结构，在指令集仓库中进行指令调度执行^[54]。软件定义功能测试后台执行结果如图 6.3 所示。软件定义分别执行感知层配置指令，完成感知层传感采集有效位保留 2 位设置。执行终端设备调度指令，完成对指定终端设备门锁的开操作。

```

执行软件定义功能
等待接收云端软件定义指令
软件定义指令分析：感知层配置指令
接收指令：GT Sensing_Laye Significance_Bit 2'
解析配置指令.....
功能符：Sensing_Laye
操作符：Significance_Bit
参数：2
加载配置指令到指令集层
调度指令融合为指令集
执行操作
软件定义指令分析：终端设备调度指令
接收指令：GT Equipment_Schedul Door on'
解析配置指令.....
功能符：Equipment_Schedul
操作符：Door
参数：on
加载配置指令到指令集
调度终端调度指令融合为指令集
执行操作
完成任务

```

图 6.3 软件定义功能测试后台执行结果

6.2.4 网关平台展示

本课题设计的面向软件定义的智能物联网网关的内部集成的模型以及功能模块均已进行基础功能测试，智能物联网网关集成智能家居场景应用情景，测试网关内部模型协同能力以及模块功能实现效果。该智能网关系统研发测试完成基础功能之后，确定网关软硬件兼容，协同工作效果良好。将本设计以智能物联网网关为核心，衍生开发适合智能家居应用场景的智能家居网络产品。该智能家居系统网络包括智能物联网网关、智能传感设备包括：低功耗门磁、红外人体感应、温湿度传感器、烟雾报警传感器。基于 NB-IOT 的远程智能授权门锁、智能红外转发设备、智能窗帘、智能面板、智能灯控系统以及智能家居能耗管控系统、云端 Web 和手机 APP 的智能全方位产品线。目前智能家居系统成功部署在杭州电子科技大学后勤智能展厅，系统已稳定运行 8 个月之久。测试版本的生产环境下考核，已经达到产品标准。后序新版本系统已经成功参加乌镇全球互联网大会，作为参展方，成功部署智能家居系统，目前该系统在稳定运行一年的时间。本章主要介绍智能物联网网关的应用与评估。



图 6.4 网关平台家用版本左(a)酒店专用版本右(b)

6.3 应用场景



图 6.5 应用场景客房外部图左(a)客房内部图右(b)

如上图是智能家居系统受邀参展乌镇互联网大会智慧酒店项目，本次参展的智能家居系统是集成了天猫精灵语音助手的全新的智能家居系统，布展其中一间豪华套房，让住户感受全场景，全方位体验的快乐度假。本次参展产品有机会登上了中央台报道，也验证了系统的鲜明特色。

6.4 智能终端设备展出

6.4.1 低功耗智能门锁

如上图是基于低功耗技术的远程授权门锁，该门锁软硬件均为团队自主研发，该门锁支持 NB-IOT 与 Zigbee 双网络通路。该门锁的亮点功能是远程用户授权，以及远程虚拟钥匙开锁。支持本地刷卡开锁，门锁执行开关锁之后锁状态信息及时上上传网关或者同步到云端。门锁核心技术为低功耗技术，低功耗软硬件技术均为实验室独立研发，申请专利，提出支持多信号或门唤醒方式的低功耗硬件技术，提出远程数据唤醒低功耗机制。

6.4.2 智能控制面板



图 6.6 智能控制面板

如上图是智能控制情景面板，采用 Zigbee 数据通道。支持远程 web 和手机 APP 开关窗帘，并且可以手机 APP 设定窗帘的开关步进速度。

6.4.3 智能红外转发器



图 6.7 智能红外转发器

如上图所示智能红外转发器，该设备是红外设备的信号放大发射器。因为红外发射的有效距离受红外发射端的发射功率影响。所以该设备类似于红外信息放大转发器，接收智能网关发送的红外控制信号，进行信号放大并把放大的红外操作信号转发到指定红外设备。

6.4.4 智能人体红外感应



图 6.8 智能人体红外感应

如上图所示智能人体红外感应设备，基于低功耗技术的人体红外传感器，当人体经过传感器时会触发传感器。上报数据显示有人在附近区域。

6.5 详细设计与实现

6.5.1 Web 端

模块监控 web 显示界面如图 6.9 所示，界面展示当前所有在线设备，每一个设备都有一个单独小的数据显示块。显示当前设备的环境感知数据，设备状态以及电量信息。软件定义 web 界面如图 6.10 所示，界面展示共有 5 中软件功能定义模式，通过软件定义的方式分别完成不同的功能定义。



图 6.9 模块监控 web 显示界面



图 6.10 软件定义 web 界面

6.5.2 移动客户端



图 6.11 移动客户端控制界面左(a)右(b)

如上图 6.9 所示为移动客户端展示，支持手机对网关进行操作，远程控制终端设备以及远程门锁授权。



图 6.12 移动客户端门锁控制界面

如上图 6.12 所示为移动客户端门锁控制界面，支持手机远程门锁授权以及开锁，界面实时显示当前开锁人身份信息以及门锁对应房间号。

6.6 面向软件定义的智能物联网网关优势对比

如表 5.8 面向智能物联网网关与传统网关优势对比，分别针对传统的物联网网关与软件定义的智能物联网网关分别在物联网网关数据管理模型、物联网网关架构以及物联网网关软硬件平台三个方面分别进行比较。

表 6.1 为面向智能物联网网关与传统网关优势对比表

类别	方面	传统的物联网网关	软件定义的智能物联网网关
物联网网关数据管理模型	设计概念思想	传统的物联网网关数据管理模型，每一次数据处理都需要，CPU 搬运数据到缓存队列，阻塞式等待数据处理子程序处理数据。然后再进行下一次数据写入	基于事务驱动的物联网网关数据管理模型，基于事务驱动的思想，将网关数据事务和事件化，每一种务实对应着一种事务处理模式。事务自响应触发事务处理模式，执行结果也以事务驱动的形式响应动作。并且支持自定义事务驱动模式，自定义模式到网关内部数据分析处理层，做到自定义增删改查数据管理能力。区别于传统型更具弹性化，灵活性，概念新颖。
	带宽	由于数据缓存队列的长度有限，而且加载整帧数据到缓存中，所以一个周期内数据加载量受限。因此带宽受限。	事务缓冲队列，每次加载的仅仅是事务名，占用更小的内存。所以一个周期内数据加载能力增强，因此带宽增大。
	稳定性	相对不同种类帧数据，或者多批次数据处理，完整执行过程所耗时间波动明显。	相比于传统的，随着数据种类不同以及数据批次上升，完整执行过程所消耗时间趋于平稳
	响应时间	数据加载到数据缓冲队列后，等待系统响应解析执行，不同的数据源会对响应时间有波动。	相比于传统模型，该模型响应时间大大缩短，并且针对不同种类的数据都趋于稳定。
物联网网关架构	架构设计思想	传统的物联网网关架构设计，以功能模块化设计，具体功能对应一个功能模块，所有的模块都是固定执行逻辑，不能修改	相比于传统的物联网网关架构，设计思想围绕层去分类，然后每一层又包含具体的实现功能模块。每一种具体功模块预留开发接口，逻辑可修改。软硬件弱耦合，具有与软硬件可裁剪能力。

	多协议异构能力	网关协议相对单一，一个网关只支持一两种协议组合，不支持多协议协同，以及通信网络再融合	相比于传统物联网网关，支持多协议异构融合。支持 Zigbee、NB-IOT 无线网络以及以太网有线网络，并且网关预留蓝牙以及多种无线网络接口。实现即插即用。
	软硬件弱耦合能力	不支持弱耦合能力，软硬件强耦合，更换场景需要更换硬件物理层	软硬件弱耦合能力，统一硬件平台，软件可以自由实现，不需要考虑硬件资源问题
	网络传输	网络传输基于传统的 TCP/IP 协议，局域网基于 Zigbee 或者其他协议栈，数据传输安全部分考虑不足。	网络传输基于传统的 TCP/IP 协议，加入数据传输加密多重验证方式，增强数据的安全性。局域网基于 Zigbee 或者其他协议栈，加入多重安全验证机制，为防止设备掉线等异常，集成设备掉线重连机制。
	软件自定义能力	不支持软件自定义	支持软件自定义物联网网关功能、情景模式、事务驱动、协议帧格式设定以及
物联网网关软硬件平台	平台设计思想	传统的物联网网关平台设计，首先应用场景功能需求，硬件设计，由于要考虑硬件资源利用，所以基于硬件结合需求设计软件。	相比于传统物联网网关平台设计，首先功能需求分析，由于软硬件的弱耦合性，软硬件可以同时进行。设计实现一款万能物联网网关软硬件平台，
	一键式自组网	不具备该功能，不支持多设备同时组网，点对点组网。	支持一键式组网功能，用户只需远程下达组网指令，网关设备自组网无需额外操作。支持所有设备同时加网操作。
	情景模式自定义	不具备该功能，情景模式为开发过程设定好的情景模式。	支持情景自定义功能，支持用户自定义情景联动模式。
	软件定义网关	不支持该功能，软硬件强耦合，只支持固件升级。	支持软件自定义，支持软件定义网关工作模式，资源调度配置等功能。
	传感层设备	不支持该功能	支持该功能，在不需要更换系

	采集数据模式定义		统固件的情况下。支持物理层传感采集模块数据采样频率、数据有效位、以及数据上传周期。
	硬件模块可插拔	不支持拓展	支持硬件模块可插拔，做到即插即用，驱动自识别。

综上所述，通过传统物联网网关与面向软件定义的智能物联网网关的优势对比分析，同过对比数据总结。无论是在物联网网关数据管理模型、物联网网关架构以及物联网网关软硬件平台上，面向软件定义的智能物联网网关在不同方面比传统的物联网网关更优秀，性能更好，支持用户弹性化自定义等特色功能，也更加迎合当前的 5G 浪潮、追求产品智能化、弹性化、操作简单化、环境适应能力强，该面向软件定义的智能物联网网关具有非常大的市场价值。

6.7 系统应用

本课题面向软件定义的智能物联网网关居网关，经过对网关软硬件的各硬件组成模块以及软件层的性能测试，各项测试结果反映本课题设计的智能网关已达到预期的任务。本网关结合近几年一直都很火的智能家居需求，设计实现一套支持软件弹性化自定义的智能家居系统。该系统包括智能终端设备、网关以及云端 web 和手机 APP。该智能物联网网关平台已经在乌镇智慧无人酒店正式投入使用，该智能家居系统集成到智慧无人酒店系统。

基于面向软件定义的智能物联网网关的智能家居系统，分为智能传感端、智能网关、智能应用三部分。其中智能传感端包括门磁、门锁、红外人体感应、窗帘、红外转发等设备。智能应用包括 web 控制界面、手机 APP 控制端。

首先，启动网关，远程下达组网指令，此时网关声光响应。等待终端设备加网操作，自组网待设备加网成功后网关。声光响应，回复通知用户设备加网成功。

其次，智能网关内部集成多种情景模式，支持网关对场景环境自反应执行。实现一个联动的功能。当酒店住户在前台办理入住之后，前台会引导住户到指定房间，用户刷卡开启门锁，触发情景模式联动检测，门磁感应到门打开以及红外人体感应检测到人进入。触发迎宾模式，联动窗帘打开，室内温度调节，水暖加热等功能。做到智能网关自响应，自调度执行动作。

用户可以通过手机 APP 对智能网关进行功能设置，情景自定义，事务分发，数据查询等功能。支持用户 web 界面远程软件定义方式，进行网关功能自定义组合。

6.8 本章小结

本章主要测试网关相关功能，以及展示智能家居系统相关实物展示，展示网关 web、手机 APP 端控制界面展示。介绍 Web 会实时记录并显示室内环境信息，实时监控保障系统的

稳定运行。然后对智能网关在实际的应用项目中进行功能，在实际应用中体现智能物联网网关的价值。

7 总结与展望

7.1 论文工作总结

针对当前快速发展的物联网技术，物联网相关应用系统已经广泛服务于我们的生活，融入我们生活的各个角落^[55]。例如智能家居方便我们的生活，智能医疗服务于医患群体，各种服务类物联网应用正在改变着我们的生活，服务着一个又一个群体^[56]。本课题针对市面上现有的物联网网关产品的协议异构融合性差、终端设备产品兼容性不足、网关弹性化定义能力不足以及支持二次开发能力不足等缺陷。设计实现一套多协议异构融合与软件定义与一身的面向软件定义的智能物联网网关的平台。

本课题先提出一种基于事务驱动过程的数据管理模型，根据该模型设计一种面软件定义物联网网关架构，最后根据提出的架构设计实现智能网关软硬件。在对现有存在的传统网关以及终端设备的充分研究的基础上，完成对网关的多协议栈异构融合封装^[57]、完成对网关功能以及终端硬件控制的接口封装、指令集设计以及调度模型研究、事务驱动过程的数据处理模型的研究、软件定义方案设计以及网关和终端设备嵌入式软件架构的设计。基于该智能网关，用户可以通过软件操作指令集，需求自定义网络工作模式、数据通信协议、终端设备组合、事务驱动模型组合的工作方式^[57]。智能网关支持板载自带的传感模块设备以及终端节点设备的可裁剪。到目前为止，所完成的工作细节总结如下：

（1）调研了当前市场物联网网关的发展，结合本课题调查分析相关的技术栈，调查传统物联网网关的国内外研究现状，并分析本文面向软件定义的智能物联网网关的在物联网应用中的价值。

（2）分析智能网关应用需求，包括数据分析处理，情景模式自定义，模式自定义等功能需求，以及数据流与各层软件之间的关系等。研究现有的传统网关数据管理模型的不足点，围绕事件驱动技术，并结合上述需求，提出一种基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型。与传统的物联网网关数据管理模型对比，基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型能够在管理多元、多量、复杂数据方面具有高可靠、敏捷性、稳定性的突出能力。

（3）基于事务驱动过程的物联网网关数据管理模型，通过调研软件定义理论技术、指令集理论技术、信息存储理论技术、多协议融合理论技术以及物联网相关技术。结合网关需求设计一个面向软件定义的智能物联网网关架构。该架构区别于传统的物联网网关架构，能够增强网关与场景及需求的快速融合能力，实现软件定义网关相关资源，该架构能实现多协议异构融合，支持多种物联网协议以及相关通信模组软硬件可插拔，具有高可用性以及复用能力^[58]。

(4) 针对上述智能网关架构, 围绕架构针对软硬件进行需求分析。设计并实现一个智能网关的软硬平台。PCB 版图设计实现, 软件采用 C 语言以及汇编语言混合编程, 主要以 C 为主开发网关系统程序, 包网络层程序、存储层程序、数据分析处理程序、终端设备管控程序、硬件驱动代码、软件定义指令集调度程序等。软件集成在硬件架构中。该平台区别于传统的物联网网关平台, 具有一键式自组网功能、支持情景模式自定义、软硬件弱耦合设计原理, 支持硬件模块可插拔驱动自识别。

(5) 最后对智能网关硬件分模块进行测试, 测试每一个模块电路能否正常工作。测试模块相关数据总线工作, 以及供电电路。测试系统核心处理单元与模块之间数据通路, 待上述测试完毕。进行网关整机测试, 生产环境中测试网关的性能, 遇到问题解决问题, 记录问题。提出系统迭代更新方案。本文设计的智能物联网网关支持功能快速自测, 由于自身软硬件的弱耦合性, 所以软硬件功能测试可同步进行。

(6) 安装部署能力出众, 本文设计的智能物联网网关易安装, 以及操作简单特性。用户安装只需完成上电, 然后手机 APP 点击一键式组网, 一键式完成设备加网, 信息存储, 数据上报, 信息上传全部自动完成。只需 20s 就可完成对几十台设备的组网工作, 这也是本文设计网关的突出之处。最终智能网关结合智能家居打造的面向软件定义的智能家居产品成功推出, 已经受到用户的好评, 目前已经在杭州高校、酒店、展厅、网吧部署了几十套智能网关, 目前整机系统稳定运行中。

7.2 工作展望

本系统设计在实际应用中运行稳定, 初步达成为预期需求, 但还存在一定的改进空间, 章节最后列出后续改进工作如下:

智能网关通信可以增加 WIFI 或者最新的 5G 技术、加入人工智能分析算法对用户的行为习惯进行分析可以预判用户的行为为用户提供舒适的生活习惯、加入智能语音助手, 通过语音识别即可操作网关。

(1) 本课题中的智能物联网网关, 目前只支持无线 Zigbee 局域网、有线以太网以及无线 NB-IOT 网络。但是对于实际应用中的安装条件限制, 以及未来数据带宽以及实时性要求。还为网关引入 5G 新技术, 网关集成 5G 通道, 可直接支持视频与音频大带宽高清数据实时上传至云端服务器。

(2) 本课题网关具有对用户当前行为作出自反应行为, 但是网关不具备对用户行为做预判, 所以未来为网关集成人工智能分析算法模型, 对用户的行为习惯进行分析可以预判用户的行为为用户提供更加舒适的生活体验。后期也可加入智能语音助手, 通过语音识别即可操作网关。

(3) 网关动态流量调优, 随着物联网的飞速发展, 未来物联网网关必面临大量的终端设备数据上报, 数据的种类也将多种多样, 但是未来的数据通信与处理都将以处理价值为依托,

省去处理无价值高并发数据，反过来处理有价值的数。这就需要网关具备数据价值分析以及动态调优网络流量带宽的能力。

致谢

时间如白驹过隙一般，一晃研究生俩年半的时间已过去，马上接近尾声了。回想当初我当初入学报道，徘徊在校园，对即将开始的研究生涯充满了无数期待。回想这俩年半的研究生生活，非常难忘，不仅丰富了个人的专业技能，也提升了综合素质。在本论文完成之际，本人在此感谢所有关心、帮助过我的老师、同学、亲人和朋友；

首先，研究生遇到最重要的人，我的导师周磊老师。在此表达对您的感谢之情。非常荣幸能够成为您的学生。周磊老师在我研究生生涯教会我好多素质技能，为我指明前进方向。教导我要成为一个对社会有贡献的人。导师知识渊博、严谨的态度、求真务实的工作态度、勇于探索的精神。都鞭策着我不断前进，您教育我实践是真知，让我在生活中，学习中等都脚踏实地的，做真实的自己。在课题研究过程中，周老师都给予我极大的支持。周磊老师提出的诸多建议对我的课题研究与设计起到了至关重要的作用。周磊老师教会我的能力，对我以后的生活工作都有帮助，是我终生受用不尽的宝藏。衷心的感谢周磊老师在研究生两年半时间里在学习、生活上对我的关怀和帮助。

其次，感谢*实验室与我一起并肩作战的同门、师兄和师弟们。感谢我的同门付天昊、赵琪，我们从互不相识到亲如兄弟。我们三个同门并肩作战，一起攻克多个国内技术难题，协作项目，生活中互相帮助。刚进入实验室时，师兄师姐给予我很多帮助，让我快速的融入实验室的氛围中。感谢我的师弟张迪、李屏、万荣贵、何迎翔，经常与我交流知识技能，互相学习，给与我很多支持。

还要感谢我的父母、亲人和朋友，在我遇到苦难的时候对我的鼓励与支持，在生活上给予我帮助，催促我不断努力，面对困难时也要勇往前进。

最后，感谢评审组的各位专家和教授们，感谢您抽出宝贵的时间审阅论文，如有不足和疏漏之处，恳请各位指正。

参考文献

- [1] 白光洲. 物联网生态价值体系及应用推广研究[D]. 北京邮电大学,2018.
- [2] 黄宇龙. 信息化时代物联网发展现状分析与前景[J]. 电子技术与软件工程,2017 (22):25.
- [3] 莫皓颖,户江民,董帅,雷雪冰.软件定义通信系统技术[J]. 中国新通信,2019,21(10): 67.
- [4] 国际电信联盟(ITU)量子信息技术国际研讨会在上海召开[J]. 电子世界, 2019(12):4.
- [5] 李睿. 面向智能楼宇设备的物联网网关的设计与实现[D]. 延边大学,2018.
- [6] 赵婧媛. 浅谈物联网技术在国内的发展[J]. 品牌,2014(11):59.
- [7] 《学术前沿》编者. 中国的物联网战略[J]. 人民论坛·学术前沿,2016(17):4-5.
- [8] 孙洪雷. 面向高性能计算的软件定义存储网关的设计与实现[D]. 国防科学技术大学, 2015.
- [9] 徐勤丰. 物联网网关的设计与实现[D]. 浙江工业大学,2016.
- [10]李忠灵. 基于 Linux 的物联网网关设计[D]. 大连理工大学,2014.
- [11]陈林. 支持软件定义网络的网关安全接入技术与实现[D]. 电子科技大学, 2018.
- [12]VictorGlass,EricWoychik,Ephram Glassa.Software defined network communications: The likely standard for smart grids[J].The Electricity Journal,2019,32(9).
- [13]胡龙. 软件定义网络与服务关键技术研究[D]. 华中科技大学,2017.
- [14]米沃奇. 物联网的推动者——软件定义网络[J]. 电脑知识与技术(经验技巧), 2015 (10):117-118.
- [15]潘春雨. 软件定义蜂窝网中的资源管理技术研究[D]. 北京邮电大学,2019.
- [16]夏辉. 多传感器协议融合技术研究[D]. 沈阳理工大学,2018.
- [17]杨石. 嵌入式信息系统中移动事务处理模型的研究[D]. 长春理工大学,2012.
- [18]Engineering-Electrical Engineering;RecentFindings from Kuwait University Provides New Insights into Electrical Engineering (Segment Routing In Software Defined Networks:a Survey)[J]. Computers, Networks & Communications,2019.
- [19]黄静,陈兰. ZigBee 网络路由算法研究与优化[J]. 计算机系统应用,2019, 28(10):251-256.
- [20]李玉林. ZigBee 网络路由协议性能分析[J]. 电子技术与软件工程,2017(12): 20-21.
- [21]马亚蕾. NB-IOT 技术浅析[J]. 电子制作,2019(17):74-75.
- [22]Ito, H.,Watanabe, M.. A Uniform Partitioning Method for Mono-Instruction Set Computer (MISC)[P]. Network-Based Information Systems (NBIS), 2012 15th International Conference on,2012.
- [23]李进印. 关于计算机指令系统的探讨[J]. 科技信息,2012(12):229.

- [24] Ya Liu, Yanling Zhou, Xianping Zheng, Wangping Xiong. The research and development of reduced instruction set computer[P]. Communication Software and Networks(ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on, 2011.
- [25] 秦臻. 无线传感器网络事务管理模型研究[D]. 南京邮电大学, 2014.
- [26] 孟洋. 智慧城市—事务模型软件体系结构设计[D]. 天津大学, 2014.
- [27] 李彦, 赵武, 晏强. 一种基于过程的计算机辅助设计方法[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2003(09):740-744+749.
- [28] 晏强. 基于过程的计算机辅助设计模型及原型系统的研究[D]. 四川大学, 2003.
- [29] 曾坤. 事务存储系统:事务冲突与事务并行[D]. 国防科学技术大学, 2011.
- [30] 曾明, 杨扬, 王元卓, 张静乐. 协同服务中事务处理模型分析方法[J]. 计算机工程, 2010, 36(06):8-11+14.
- [31] 田永利, 邹慧君, 郭为忠. 基于功能-过程-动作-机构的计算机辅助机械运动系统概念设计模型的研究[A].
- [32] 赵建光. 基于向量网的软件定义无线传感器网络研究[D]. 北京交通大学, 2019.
- [33] 林勇, 谭清中, 唐彦. 物联网感知层传感技术解析及应用[J]. 数字通信, 2011, 38 (03): 24-27.
- [34] 李晖. 磁盘存储中基于自适应分区的 I/O 调度算法的研究[D]. 西南大学, 2019.
- [35] 丘晖, 胡军军, 李嫚, 胡颖茂. 一种存储网关介绍及提升数据读写性能策略研究[J]. 广东通信技术, 2019, 39(03):16-20+37.
- [36] 柳毅, 王平雁. 基于存储网关的数据安全去重方案[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(17):112-116+149.
- [37] 王紫荆. 面向物联网的高效路由与调度算法研究[D]. 北京邮电大学, 2019.
- [38] 张震, 盖昊宇. 物联网中传感节点传输任务实时调度方法研究[J]. 长春大学学报, 2019, 29(04):45-50.
- [39] 薛钦. 基于传感网络的智能设备管理系统研究[D]. 扬州大学, 2018.
- [40] 陈宏君, 张磊. 结构化文本语言编译器的虚拟机指令设计与优化[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2018, 18(05):23-27+48.
- [41] 关文博. 基于 RISC-V 指令集微处理器的运算模块设计[D]. 黑龙江大学, 2018.
- [42] 张俊武. 基于指令构架的波形合成方法与驱动设计[D]. 电子科技大学, 2018.
- [43] 徐远超, 张志敏, 蒋毅飞. 基于多目标遗传算法的单指令集异构多核系统静态任务调度[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(10):2237-2242.
- [44] 陈虎. 面向应用的指令集处理器关键技术研究[D]. 国防科学技术大学, 2011.
- [45] 史冰清. 高安全性的物联网网关设计与实现[D]. 电子科技大学, 2018.
- [46] 古宗海. 基于开源硬件的物联网网关中间件的即插即用方案设计与实现[D]. 北京邮电大学, 2016.

- [47]吕悦.互联互通带来智能家居的“软硬件分离”[J].智能建筑与智慧城市,2016(05):12.
- [48]梁宏涛. 数据加密技术在计算机网络通信安全中的应用分析[J]. 江西通信科技, 2018(01):39-42.
- [49]王睿. 面向软件定义物联网的信任管理及攻击防御机制研究[D]. 山东大学,2018.
- [50]许晨辉. 面向 QoS 保证的软件定义网络资源管控技术研究[D]. 南京航空航天大学,2016.
- [51]江严明. 软件定义网络可靠性研究[D]. 北京交通大学,2015.
- [52]王晓燕. 基于嵌入式实时数据库的事务模型及处理技术的探讨[J]. 办公自动化, 2014(10):35-37.
- [53]屈晓光,胡玉露. 一种提高软件可测试性的诊断测试方法[J/OL]. 电子技术与软件工程,2019(22):55-58[2019-11-28].
- [54]吴玲玉,张宗哲,马凯. 基 ISO26262 的嵌入式软件测试研究[J/OL]. 软件导刊: 1-7[2019-11-28].
- [55]胡炜. 物联网技术应用及主要特征[J]. 电子技术与软件工程,2018(08):17.
- [56]米子秋. 物联网核心技术研究[J]. 中国新通信,2018,20(07):71.
- [57]姜惠友,李峻峰,李丹. 高性能网络协议栈兼容性研究[J]. 电信科学,2019,35(05): 25-31.
- [58]杜乾. 工业无线 WIA-PA 协议栈优化设计与实现[D]. 重庆邮电大学,2017.

附录

作者在读期间发表的学术论文、参加的科研项目

一、比赛获奖：

2018 年 08 月第十三届中国研究生电子设计竞赛国家三等奖

2019 年 03 月华为软件精英挑战赛华东赛区第 64 名

二、发表科研成果：

- 1.一种基于 NB-iot 技术的智能授权门锁电路系，发明专利，已公开
- 2.基于物联网的三相电路功率监控装置，实用新型专利，已授权