

面向控制和实时监测任务的智能家居物维网关键技术及应用研究

Key Technologies And Application Research Of Control And Real-time Monitoring Tasks In
Smart Home Web Of Things

博士后姓名：张帆

工作站名称：厦门华联电子有限公司博士后科研工作站

流动站（一级学科）名称：厦门大学信息与通信工程博士后科研流动站

专 业（二级学科）名称：信号与信息处理

研究工作起始时间 2013 年 11 月

研究工作期满时间 2016 年 02 月

厦门华联电子有限公司

厦 门 大 学

2016 年 03 月

厦门华联电子有限公司博士后科研工作站 厦门大学博士后研究工作报告

著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用博士后研究工作报告的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交该报告的纸质版和电子版，有权将该报告用于非赢利目的的少量复制并允许该报告进入学校图书馆被查阅，有权将该报告的内容编入有关数据库进行检索，有权将博士后研究工作报告的标题和摘要汇编出版。保密的博士后研究工作报告在解密后适用本规定。

本研究报告属于： 1、保密（ ）， 2、不保密（ ）

纸本在 年解密后适用本授权书；

电子版在 年解密后适用本授权书。

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

随着移动互联、云计算等技术的发展以及人们生活水平的提高,近年来智能家居市场获得长足发展,出现了大批新型产品,越来越多的用户通过智能设备无线接入互联网,实现内容的获取及相互之间的交互,一定程度上满足了大家的需求,但还普遍存在实时特性差、对于 Web 支持有限、大量使用私有协议或底层协议、标准兼容性低、设备互联互通困难的问题。

本课题针对智能家居中的两类典型应用场景,将 Web 协议和架构引入物联网领域,构建出具有开放性和松耦合特性的智能家居物维网(Web of Things, WoT)应用架构,研究工作取得以下创新点:

1. 构建了一种不依赖于操作系统的嵌入式 REST 服务器,将智能家居的各类操控建模为资源表现状态转移,可通过标准 HTTP 动作访问 RESTful API 实现控制及监测流程;
2. 提出与智能家居消息系统应用相适应的事件分发 Pub/Sub 及事件分发 RPC 两种消息传递模式;
3. 基于 WebSocket 持续连接,提出具有实时同步特性的智能家居状态和传感数据监测流程,以及智能家居实时控制流程;
4. 提出一种符合 JSON-schema 规范,用于描述智能家居控制与监测应用消息元数据的 JSON 数据结构。

通过一款室内 LED 彩光智能吸顶灯以及一套用于家居照明控制及环境空气质量、温湿度监测的综合信息终端对上述技术进行了实验验证,数据分析表明,在智能家居室内应用中,采用嵌入式 REST 服务器架构可以满足实时操控需求;在智能家居远程应用中,通过引入基于 WebSocket 的持续连接,在事件分发 Pub/Sub 及事件分发 RPC 消息传递模式支持下,远程监测及控制均可以保证好的实时特性,具有很大的实用价值及广阔的应用前景。

关键词: 智能家居; 物维网; 实时; 控制; 监测; REST; WebSocket; 事件分发 RPC; 事件分发 Pub/Sub; 消息

Abstract

With the development of mobile Internet, cloud computing and other technologies as well as the improvement of people's living standards, in recent years, the growth of smart home market is substantial, there are a large number of new products be shown for customers, more and more users use smart devices to wireless access the Internet to achieve contents and interaction between users which meet people's demand partly, however, the existing methods have ubiquitous disadvantages such as poor real-time characteristics, limited support for Web, extensive use of proprietary or bottom layer communication protocols, lower standards compatibility and devices are hard to interconnect with each other.

This report introduces the Web protocols and architectures into the field of Internet of things in two typical smart home scenarios, builds a WoT (Web of Things) application architecture that has open and loose coupling characteristics. Research work has following points of innovation.

1. Building an embedded REST server that does not depend on the operating system. Modeling various types of intelligent home operations to resource REST (Representational State Transfer), this kind of method can implement control and monitoring processes by accessing RESTful API through standard HTTP actions.

2. Proposing event dispatch Pub/Sub and event dispatch RPC messaging modes that suitable with smart home messaging system.

3. Based on the WebSocket persistent connections, processes of smart home state, sensor data monitoring and smart home real-time control with real-time synchronization feature are proposed.

4. A JSON-schema specification is proposed, which is used to describe the JSON data structure of smart home control and monitoring applications message meta-data.

Using an indoor hue LED smart ceiling lamp and an integrate information terminal which is used for lighting control, air quality, temperature and humidity monitoring to do some experiments verification for the above techniques. The experimental data analysis shows that using embedded REST server architecture can satisfy the demand of real-time control in LAN smart home applications. By introducing persistent connections based on WebSocket, supported by event dispatch Pub/Sub and event dispatch RPC messaging modes, remote monitoring and control can guarantee a good real-time characteristic in WAN smart home applications. These techniques have

tremendous practical value and a considerable application prospect.

Keywords: smart home, Web of Things, real-time, control, monitoring, REST, WebSocket, E-RPC, E-Pub/Sub, message

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘 要.....	1
Abstract.....	2
目 录.....	4
第一章 绪论	6
1.1 智能家居控制及监测的发展趋势和需求	6
1.2 智能家居控制及监测应用开发研究现状	8
1.3 本文的研究内容与创新点	11
1.3.1 研究内容	11
1.3.2 创新点	12
第二章 嵌入式 REST 服务器构建技术	13
2.1 RESTful 设计思想在智能家居系统中的应用	13
2.2 针对 Web 资源的操作设计	15
2.2.1 HTTP 报文	15
2.2.2 JSON 数据交换标准	15
2.2.3 智能家居应用请求报文及响应报文结构	17
2.2.4 REST 架构下可控资源及操作的定义	19
2.3 不依赖于操作系统的嵌入式 REST 服务器	21
2.3.1 服务器结构组成	22
2.3.2 控制及监测流程	25
第三章 嵌入式 REST 服务器智能家居应用开发和实时性能测试	32
3.1 应用开发背景	32
3.2 软硬件选型及设计	33
3.2.1 硬件组成	34
3.2.2 适应物维网架构的移动 Web 应用设计	34
3.3 实时性能测试	35
第四章 基于消息机制的远程实时监测及控制	39
4.1 智能家居消息系统	39
4.1.1 消息及其表示	40
4.1.2 智能家居应用对消息传递模式的需求	41
4.1.3 智能家居系统成员及与消息传递模式对应关系	42
4.2 家居操控 Pub/Sub 及 RPC 消息传递模式	43
4.2.1 事件分发 Pub/Sub 消息传递模式	44
4.2.2 事件分发 RPC 消息传递模式	45
4.2.3 消息主题名及 RPC 过程标识名的组织	48
4.3 智能家居状态及传感数据监测	49
4.3.1 数据定时上报监测流程	50
4.3.2 用户主动查询监测流程	51
4.4 智能家居实时控制	52
4.5 消息元数据设计	53

4.6 基于 WebSocket 协议的持续连接	56
第五章 物维网智能家居监测及控制应用实时性能测试	61
5.1 应用背景	61
5.2 系统软硬件选型及设计	62
5.2.1 硬件组成	62
5.2.2 服务器部署及 Web 客户端设计	63
5.3 实时性能测试	64
5.3.1 测试条件	64
5.3.2 结果及分析	65
第六章 结论与展望	70
6.1 研究总结	70
6.2 后续展望	71
参考文献	72
致谢	76
博士生期间发表的学术论文、专著	77
博士后期间发表的学术论文、专著	78
个人简历	80
联系地址	80

第一章 绪论

1.1 智能家居控制及监测的发展趋势和需求

智能家居的概念在很久以前就已经提出，在全世界经历多年发展，已涵盖几乎所有传统弱电行业，但直到最近几年，随着移动互联及各类物联网技术的飞速发展才逐步开始为大众所接受，各类总线技术、无线通信技术及电力线载波通信技术都被广泛使用，出现了众多产品提供商、系统集成商，智能家居产业链的一个概览如图 1 所示。



图 1 智能家居产业链概略图

从当前市面上存在的产品来看，智能家居产品可分为三类：（1）带有传

感器无直接网络连接能力的智能家居产品；(2) 有网络连接能力并具备云服务控制能力的智能家居产品；(3) 有网络连接能力但不具备云服务控制能力的智能家居产品。

其中(2)和(3)类产品均具有网络连接能力，是智能家居领域的主要产品类型，支撑这样的现代智能家居产品的应用主要有两类，一类是将智能手机等移动设备作为物联网控制器以增加控制距离和控制能力，给用户传统遥控器无法达到的用户体验；另一类是以移动设备作为状态监测终端，远程实时获取家居产品的状态及能耗、空气质量、温度、湿度等数据，增强用户的感知能力，以便及时进行决策，当重要或偶然事件发生时触发报警或信息提醒推送，即赋予用户通过智能手机或其他终端设备进行监测及操控的能力，在小范围局域网内时进行直接或者联动触发控制，远程时可以通过云服务平台进行数据交换实现控制及监测功能。

如 LED 智能照明系统中，一般都提供了调光调色、颜色及场景设置、灯端传感数据及灯具运行状态监测等主要功能，其中远程操控及数据采集是两类基本核心内容，一方面以智能手机、Web 浏览器作为控制端对灯具实施各类操控；另一方面以智能手机、Web 浏览器作为状态监测终端，获取灯具产品的运行状态及能耗、室内空气质量、温度、湿度、光照等监测数据。

为了带来更好的用户体验，这些功能需要具有实时特性，当重要或偶然事件发生时及时触发报警或使用户获知信息（如火情、空气质量严重异常、用电严重异常时），以便及时进行决策。

另一方面，未来通过将智能家居控制及监测服务与各类其他互联网服务（如 IFTTT^[1]）进行有机融合，实现生活信息和服务信息的合理交互，在很大程度上能够将消费者个人与家庭和社会网络融为一体，实现人、物、环境的无边界沟通，这需要智能家居产品能够充分利用已有的 Web 系统、协议技术，以物维网（Web of Things, WoT）^[2]思想来构建整个系统，而且，为了简化移动端跨平台开发，降低独立开发 Android、iOS 版本移动应用的工作量，缩短开发周期，核心控制及数据监测功能可以利用 HTML5 技术实现跨平台开发，构建混合型移动应用，所以智能家居控制及监测系统对 Web 的直接支持也是一项重要需求。

1.2 智能家居控制及监测应用开发研究现状

传统的智能家居集成系统往往价格高企，需要大量的安装、集成、布线等复杂工序和大量的维护成本，系统复杂度高，用户难于操作，普遍存在标准兼容性差、设备互联互通困难的问题，尽管有“闪联”、“e 家佳”、“广联” [3]等标准可供参照，其各由不同厂商或部门主导，都想制定全套解决方案，定义自己的智能家居控制中心和数据中心，经实际验证这样一些标准和模式难于实现数字家庭、智能家居领域的整体融合。

近几年来，随着云计算、移动互联以及 WiFi、Zigbee、蓝牙 4.0、LTE 4G 等无线通信技术的不断进步，无线通信模块日渐向小型化、低功耗化发展，在各种家居设备内部集成小型低功耗通信模块以赋予其便捷网络接入能力成为了可能，加之移动互联和云计算技术不断进步，智能家居领域出现一波新的发展[4][5][6]浪潮，并直接催生出了包括 Philips Hue 智能 LED 灯[7]、Nest 智能温控器[8]、Google Glass 智能眼镜[9]、Latin 蓝牙智能秤[11]、美菱电器 CHiQ 智能冰箱[12]等相关产品，在网络普遍覆盖的环境下，越来越多的用户通过这些设备无线接入网络，实现内容的获取及相互之间的交互。智能家居控制及监测应用相关的开发及研究日益受到重视。

在产业界，部分新型智能家居系统通过利用现有 Internet 和 Web 架构，合理开放数据 API 接口，实现了一些简单、可扩展的控制监测应用，如智能家居开放平台 SmartThings[13]通过 SmartThings Hub、开放 API 接口等使自己成为智能家居基础设施，通过 SmartThings 平台，开发者能开发出相应的移动应用，消费者可以通过手机控制各类不同厂商的智能家居设备，如 Philips Hue 智能 LED 灯、Wemo 贝尔金智能插座[14]等；2013 年 9 月，智能温控器厂商 NEST 宣布开放 API，并通过与 Control4 合作，将 NEST 整合到 Control4 的控制系统内，消费者可以通过 Control4 的智能设备、APP 等对 NEST 产品进行操控，实现各类复杂应用；2014 年 10 月，已到谷歌旗下的 NEST 团队收购智能家居平台 Revolve，获得智能家居设备控制及监测互联互通的核心技术；微软也与家庭自动化设备制

造商 Insteon 达成合作伙伴关系,并且所推出的 WIN10 操作系统集成了 AllJoyn^[19] 物联网互联互通协议,助力家居物联的发展。

国内的几家云服务和电商平台服务巨头京东、阿里、腾讯、百度均加入到了智能家居产业当中,正积极布局产业链。特别是以京东、阿里为首的电商巨头,凭借其在云服务、商业推广上的优势积极推出适用于智能家居产品的云服务及超级 APP 来构建自己的生态体系,但他们的推广模式多为对外提供云服务及超级 APP,让为数众多的通信模块生产商推出适用于其云服务的通信固件,并由通信模块生产商将整套服务推广到传统的智能硬件商,若要实现较为复杂的智能家居控制及监测任务需要繁杂的商务合作协商,同时,其提供的基本是基于云服务的 HTTP RESTful API 接口,对于远程控制及监测应用存在着实时性一般的问题。

国内的科技公司和家电厂商,如小米、博联、美的、海尔等,一般都从通信方式入手,采用收购或合作的方式来使用某种无线通信模块,并且定义了自己的一套应用层协议,这些企业所构建的产品生态圈内的所有产品均采用同种通信模块和应用层协议,可以使用一套统一的超级 APP 进行智能家居控制及监测操控。

苹果公司在 2014 年发布了用于智能家居应用的 HomeKit^[15]平台,是一套开放的 API 和协议集合,整合了 Siri 的语音交互功能,用户可通过 Siri 语音输入控制指令,实现对门锁、灯具、摄像头、开关插座等智能家居设备的集成化控制,苹果习惯基于新的领域建立一个完整而封闭的生态圈,然后邀请其他企业加入其中,但智能家居市场巨大,结构复杂,真正需要的是一个开放和互联互通的环境,这样才能促进各方协调发展;另外,HomeKit 的一项重要功能是利用 Siri 的语音理解及合成能力进行智能家居设备的操控,但基于手机进行语音指令的发送有些不符合消费者的日常使用习惯,不同用户语音差异巨大,往往难于产生自然、一致的交互效果,用户体验难以保证。

在通信架构和协议选择上,远程云服务与智能设备及移动/Web 客户端之间的通信架构和网络协议直接影响到智能家居系统控制及监测的稳定性、可靠性及用户使用体验,由于物联网架构及网络协议技术的统一问题长久未得到解决,现有智能家居系统中云服务器与智能设备或网桥/网关间使用的 Ajax 轮询、Comet、WebHooks、Flash sockets^[29]等技术大都是基于原有 HTTP 的请求响应模式进行

修改，不是真正的异步全双工信息传输方式，通信效率不高，实时性不够好，而 MQTT 等协议^{[16][17]}存在不直接支持 Web 环境等问题，使得智能家居产品产业化落地工作方面仍有滞后。

云服务厂商机智云的方案中，智能设备与云端采用 MQTT 协议实现通信，为了与 Web 客户端实现互联，其增加了一个协议转换网关，实现 MQTT 消息与 WebSocket^[30]消息之间的转换，系统结构的复杂性有所增加。

云服务厂商 2lemetry（已被 Amazon 收购）的 ThingFabric 平台^[18]支持 MQTT、Websocket 协议，但为了实现 Web 客户端与智能硬件设备之间的控制及监测功能，需要其服务器内部的内置规则引擎及协议转换模块参与，结构较为复杂。

新的 ZigBee3.0^[20]标准定义了超过 130 种设备以及其他更广范围的类型，包括家庭自动化、智能照明、能源管理、智能家电、安防、传感器和医疗保健监控产品，在一定程度上有利于产品的互联标准化，不过还存在打造一套完整的 ZigBee 智能家居系统需要一个 ZigBee 网关配合才能使用的问题，这对于未来不同类型产品的互联融合是一种不利因素。

可以看到，虽然智能家居控制及监测应用开发研究实施非常广泛，但整个发展还只是处于较为初级的阶段，控制及监测这两类应用都依赖于物联网架构、网络协议技术、云计算和无线通信技术的发展，而其中物联网架构及网络协议技术的统一问题长久未得到解决，使得智能家居产品产业化落地工作方面仍大大滞后，市面上已有产品往往结构复杂、大量使用私有协议或底层协议，遵循自有标准，可扩展性差、耦合性强、开发难度高，价格也令普通用户难以接受，物联网领域虽有组织正在做这方面的标准化工作，但标准化耗时过长，无法应付当前的需要。

针对这样的问题，提出本课题的研究工作。

1.3 本文的研究内容与创新点

1.3.1 研究内容

本课题研究拟将现有 Web 协议和架构引入物联网领域,运用 Internet 及 Web 环境的 REST、WebSocket、Pub/Sub (Publish/Subscribe , 发布订阅) [31]、RPC (远程过程调用) [28]技术,研究在智能家居物维网应用架构下,适用于智能家居控制及实时监测两类应用,具有开放性和松耦合特性的应用技术,并以此为基础在智能家居产品上进行验证。

针对室内智能家居控制及监测环境,通过在智能家居终端硬件设备或网关上建立嵌入式 REST 服务器,传感器、执行器、配置数据等物理资源作为 Web 资源对外提供,进行一个物理资源到 Web 资源的映射,对外提供开放的接口,智能家居设备的监测及控制无需经过远程云端,用户在 Web 客户端使用一套统一的无状态操作对智能家居产品实现轻量级的 Web 访问及控制,客户端与智能设备之间利用 HTTP 方法来传输 JSON 封装格式的数据,使得带嵌入式 REST 服务器的智能设备可无缝集成进现有 Web 中。

研究内容包括智能家居应用请求报文及响应报文结构,REST 架构下可控资源及操作的定义,嵌入式 REST 服务器结构组成,基于该结构的智能家居控制及监测流程分析,在一个智能照明应用环境下进行软硬件实现及实时性能测试。

针对远程智能家居控制及监测环境,将智能家居控制及监测应用纳入消息系统,控制信令及传感状态数据以消息形式进行传输,通过采用合理的消息传递模式实现智能家居的实时控制及监测功能。

研究内容包括智能家居应用对消息传递模式的需求,智能家居系统成员与消息传递模式的对应关系分析,适用于智能家居控制及监测的消息传递模式及运行流程,为消息系统提供持续 TCP 连接的技术分析,以及描述消息组成的元数据 JSON 数据结构,针对一个智能综合终端利用研究工作进行软硬件实现及实时性能测试。

1.3.2 创新点

本课题针对智能家居中的两类典型应用场景，研究工作取得了以下创新点：

1. 构建了一种不依赖于操作系统的嵌入式 REST 服务器，将智能家居的各类操控建模为资源表现状态转移，可通过标准 HTTP 动作访问 RESTful API 实现控制及监测流程；
2. 提出与智能家居消息系统应用相适应的事件分发 Pub/Sub 及事件分发 RPC 两种消息传递模式；
3. 基于 WebSocket 持续连接，提出具有实时同步特性的智能家居状态和传感数据监测流程，以及智能家居实时控制流程；
4. 提出一种符合 JSON-schema 规范，用于描述智能家居控制与监测应用消息元数据的 JSON 数据结构。

通过一款室内 LED 彩光智能吸顶灯以及一套用于家居照明控制及环境空气质量、温湿度监测的综合信息终端对上述技术进行了实验验证，数据分析表明，在智能家居室内应用中，采用嵌入式 REST 服务器架构可以满足实时操控需求；在智能家居远程应用中，通过引入基于 WebSocket 的持续连接，在事件分发 Pub/Sub 及事件分发 RPC 消息传递模式支持下，远程监测及控制均可以保证好的实时特性，具有很大的实用价值及广阔的应用前景。

第二章 嵌入式 REST 服务器构建技术

在一般的智能家居应用中，最常见的模式是基于 TCP/IP 等较为底层的通信协议进行开发，可扩展性和效率都不高，智能家居硬件设备构成的智能物件与现有 Web 难于集成^[23]。另一方面，Web 技术可提供良好的互操作特性，在实践中得到了检验，所以在智能家居应用场景中引入 Web 相关的协议与标准是一个很好的选择。

2.1 RESTful 设计思想在智能家居系统中的应用

REST (REpresentational State Transfer, 表现状态转移)^[24]定义了一组体系架构原则，开发者可以根据这些原则设计以系统资源为中心的 Web 服务器，使用不同语言编写的客户端可以通过高层协议处理和传输资源状态。Roy Thomas Fielding 在他 2000 年的博士论文"Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures"中对这种用于互联网的软件架构类型进行了描述。

REST 作为一种面向资源的 Web 架构，其包括四个概念：

- 1) 资源，能够提供某种服务的实体；
- 2) 名称，资源具有可寻址的能标明身份的 URI (Uniform Resource Identifier, 统一资源描述符)；
- 3) 请求方法，通过请求实现资源状态的转移；
- 4) 表现，资源可以使用不同格式进行表示，如 XML、RSS、CSV 或 JSON。

REST 具有一些显著特征：

- 1) 通过客户-服务器实施交互操作，接口与数据存储或处理分离，可以独立进行设计；
- 2) 无状态性，客户端每一次请求都需要包含所需要的所有信息，不依赖于存储；
- 3) 具有统一的接口，接口通过 URI 对资源进行标识，服务器能够由某一种状态转换为另一种状态；

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.