

Design and Key Technology Research of Embedded Smart Home Energy Management System

Xiaoling Liao¹ Tianshu Chen^{2*}

1 Guilin Normal University, Guilin, Guangxi, 541199, China

2 Nanning Institute of Technology, Guilin, Guangxi, 541006, China

Abstract

The proportion of household energy consumption in the overall social energy usage continues to rise. Achieving refined monitoring and optimized scheduling of household energy use is of great significance for the implementation of the “carbon neutrality” goal. Embedded systems, with their advantages of low power consumption, high real-time performance, and ease of customization, have become the core technology for building a smart home energy management platform. Based on a comprehensive review of the current research status of smart home energy management at home and abroad, this paper analyzes the main bottlenecks of the current system in terms of device interoperability, local data processing burden, and depth of big data analysis. Then, it proposes a three-layer energy management architecture based on embedded gateways, wireless sensor networks, and cloud platforms, and elaborates on the design ideas of key modules such as data collection, communication networking, edge processing, and cloud visualization. Finally, from the perspectives of technology, economy, and society, the feasibility of the system is demonstrated, and the development trends of future intelligent improvement, multi-technology integration, and policy-driven are also presented. This research can provide theoretical references for the engineering implementation and promotion and application of household energy management systems.

Keywords

embedded system; smart home; energy management; internet of things; cloud computing; energy consumption monitoring

嵌入式智能家居能源管理系统设计与关键技术研究

廖小玲¹ 陈天树^{2*}

1 桂林师范学院, 中国 · 广西 桂林 541199

2 南宁理工学院, 中国 · 广西 桂林 541006

摘要

家庭能源消耗在整体社会用能中占比持续攀升, 实现家庭级用能的精细化监测与优化调度对落实“双碳”目标具有重要意义。嵌入式系统以其低功耗、高实时性、易定制等优势, 成为构建智能家居能源管理平台的核心技术。本文在系统梳理国内外智能家居能源管理研究现状的基础上, 分析了当前系统在设备互操作性、本地数据处理负担、大数据分析深度等方面的主要瓶颈。进而提出一种基于嵌入式网关、无线传感网络与云平台协同的三层能源管理架构, 详细阐述了数据采集、通信组网、边缘处理与云端可视化等关键模块的设计思路。最后从技术、经济与社会三个维度论证了系统的可行性, 并展望了未来智能化提升、多技术融合及政策驱动的发展趋势。本研究可为家庭能源管理系统的工程实现与推广应用提供理论参考。

关键词

嵌入式系统; 智能家居; 能源管理; 物联网; 云计算; 能耗监测

【基金项目】2024 年中国高校产学研创新基金—新一代信息技术创新项目, 项目名称: 智慧校园中网络安全体系构建与应用实践—以桂林师范学院为例(项目编号: 2024IT272)。

【作者简介】廖小玲(1991-), 女, 中国广西桂林人, 硕士, 信息系统项目管理师, 从事通信与网络安全研究。

【通讯作者】陈天树(1988-), 男, 中国广西贵港人, 学士, 信息系统项目管理师, 从事嵌入式系统应用研究。

1 引言

随着居民生活水平提高和家用电器数量激增, 家庭能耗占全社会终端用能的比例已超过 25%, 且呈现持续增长态势。传统家庭用电管理依赖人工判断, 缺乏实时监测与智能控制手段, 导致大量待机能耗与不合理用电行为。与此同时, 国家《“十四五”现代能源体系规划》明确提出推动能源系统数字化、智能化转型, 鼓励智慧能源示范工程建设。在此背景下, 智能家居能源管理技术应运而生。

嵌入式系统作为智能家居的核心支撑技术之一, 具有专用性强、功耗低、体积小、实时响应快、支持深度定制等

优点,非常适合部署于家庭环境。通过将嵌入式技术、物联网通信与云计算分析相结合,可以构建一个从数据采集、传输、处理到控制执行与可视化展示的完整闭环系统。然而,目前国内外相关研究仍存在设备接口不统一、数据处理过度依赖本地服务器、大数据分析功能薄弱等突出问题,限制了系统的规模化推广。

本文立足上述问题,首先综述国内外研究进展与不足,然后提出一套基于嵌入式网关与云平台协同的智能家居能源管理系统架构,详细讨论各模块的设计要点,最后分析技术可行性并展望未来发展方向。研究成果可为后续工程开发与政策制定提供参考。

2 国内外研究现状及存在的主要问题

2.1 国外研究进展

国外对智能家居能源管理的研究起步较早。2001年,IBM公司首次提出以家庭网关为核心的智能家居控制方案,实现了通过互联网对家电的远程状态查询与开关控制,为后续能源管理功能奠定了基础。进入2010年后,随着物联网通信技术(ZigBee、Z-Wave、Wi-Fi、BLE)的成熟,美国、德国、日本等国家涌现出多家提供家庭能耗监测产品的企业,例如Nest温控器、Sense能耗监测装置等。这些产品普遍具备实时功率读取、设备识别、用电报告生成及远程调控能力。

2.2 国内研究现状

中国智能家居产业虽然起步晚于欧美,但发展速度极快,目前已进入物联网、人工智能与嵌入式技术深度融合的演变期。在能源管理领域,早期研究多集中于工业园区、大型公共建筑等宏观场景,家庭层面的精细化能耗管理研究相对薄弱。近年来,随着居民用电占比上升和国家节能减排政策推进,越来越多的学者开始关注家庭能源管理系统(Home Energy Management System, HEMS)。

郭振涛等(2022)设计了基于物联网与大数据的能源管理平台,用户可通过手机App查看各设备实时功率,并设置定时通断或权限管理。彭金银(2024)引入智能机器人技术,通过强化学习对家庭用电需求进行预测,实现空调、热水器等大功率设备的动态调控。章敏艳(2024)构建了具备环境感知能力的自适应控制系统,可根据室内光照、温度及人员活动情况自动调节照明与暖通设备。唐楷等(2024)则从硬件终端入手,研发了具备计量与通信功能的智能插座,支持语音助手和手机远程操控,提升了设备的可管理性。

上述研究在算法、终端及平台层面均取得了一定成果,但整体来看,我国智能家居能源管理系统的家庭渗透率仍然较低,大规模商用案例较少,且多数系统仍停留在实验室或示范工程阶段。

2.3 现有系统存在的主要问题

综合国内外研究可以发现,目前基于嵌入式的智能家居能源管理系统主要面临以下两个方面的共性瓶颈。

(1) 设备接口异构,信息孤岛现象突出。智能家居设

备涉及照明、安防、家电、暖通等多个品类,不同厂商的通信协议和接口标准互不开放,导致用户难以将全部设备接入统一管理平台。即便使用同一品牌的生态产品,跨品牌的数据汇聚仍十分困难。这严重制约了能耗数据的全面采集与系统级优化调度。

(2) 数据处理本地化造成成本与能耗增加。许多现有方案将数据存储与分析放在家庭内部服务器或嵌入式网关上,虽然规避了隐私泄漏风险,但每户都需要部署一台具有一定计算能力的服务器,这本身就会增加数十瓦的静态功耗。对于一个本应“节能”的系统而言,控制器的自身能耗若超过其带来的节能量,则失去了经济意义。此外,本地服务器的采购与维护成本也降低了普通用户的使用意愿。

3 系统架构与关键模块设计

为解决上述问题,本文提出一种“端—边—云”三层协同的智能家居能源管理系统架构。系统自下而上分为数据采集层、边缘处理层与云端应用层。

3.1 数据采集层

该层包括部署在各个用电设备供电线路上的电能传感器(如电流互感器、电能计量芯片HLW8032、BL0937等)。传感器以非侵入或低侵入方式接入,测量电压、电流、有功功率、功率因数等参数,采样频率可设置为1次/秒至1次/分钟,兼顾数据粒度与传输负载。采集到的数据通过有线(PC、SPI、UART)或无线(2.4 GHz私有协议)方式汇集至本地嵌入式网关。

3.2 边缘处理层

边缘处理层的核心是嵌入式融合网关。该网关采用ARM Cortex-M系列或低功耗Cortex-A系列处理器(如STM32F4、全志V3s等),运行轻量级嵌入式操作系统(RT-Thread、FreeRTOS或精简版Linux)。网关主要承担以下功能:

协议转换与设备接入:支持ZigBee、BLE、Wi-Fi等多种无线协议,同时预留RS485等有线接口,实现异构设备的数据汇聚。

本地实时控制:在不依赖云端的条件下,根据预设阈值(如功率超过2 kW持续10分钟)自动执行断电或告警,满足居家防火的响应速度要求。

数据预处理与上传:对原始数据进行滤波、压缩和特征提取,然后通过有线宽带或4G/5G模块上传至云平台,减少无效数据传输。

3.3 云端应用层

云端利用主流物联网云平台(如阿里云IoT、腾讯云IoT Hub、AWS IoT Core)或自建MQTT服务器,实现以下功能:

数据持久化与可视化:存储至少一年的历史能耗数据,提供日、周、月、年维度的能耗柱状图、饼图及趋势曲线。

智能分析引擎:应用线性回归、时间序列分解(STL)或轻量级LSTM模型,对家庭用电进行短期预测(未来24

小时)，并识别待机功耗异常、设备老化征兆等。

远程交互与控制：用户通过微信小程序或独立 App 查看实时功率、接收告警消息，并可手动或定时控制各插座通断。

3.4 系统工作流程

用户正常使用家电时，传感器以 1 Hz 频率采集功率数据，边缘网关每 5 秒打包一次数据并上传云端。云端每 15 分钟运行一次负荷识别与异常检测，若发现“深夜时段仍有高功率设备运行”或“冰箱压缩机连续运行超过 2 小时”，则向用户手机推送提醒。用户也可在 App 内设置“离家模式”，网关自动断开电视、机顶盒、饮水机等待机功耗较大的插座，实现节电。

4 研究方法与技术路线

4.1 研究方法

本研究综合采用文献调研、实验平台验证、功能分析与案例评估四种方法。首先通过系统文献检索梳理国内外代表性成果，提取技术参数与性能指标；其次搭建包含 3 ~ 5 种典型家电的实验环境，测试不同通信方案的丢包率与功耗；然后对各模块进行功能分解，通过迭代开发优化阈值算法；最后选取 1 ~ 2 户家庭开展为期一个月的实地测试，对比系统部署前后的总用电量变化。

4.2 技术路线

技术路线分为六个阶段：

需求分析：通过问卷调查与用户访谈，明确用户最关心的功能（如电费预算、设备遗忘关闭提醒、防火告警）以及可接受的硬件成本（建议低于 300 元/户）。

系统总体设计：确定“端—边—云”三层架构，选择具体硬件型号与通信协议。

模块详细设计：分别设计传感器节点固件、网关程序、云端数据表结构与 App 界面原型。

系统集成与联调：将各模块组装，进行功能测试与性能测试（包括数据采集准确度、端到端延迟、网关自身功耗等）。

用户交互界面优化：基于可用性测试反馈，简化操作流程，增加一键节能建议。

实地部署与效果评估：选取典型家庭，记录实施前后各两周的用电量，并统计用户满意度。

5 可行性分析

5.1 技术可行性

嵌入式处理器、电能计量芯片、无线 SoC 等核心元器件均为成熟货架产品，且已有大量开源例程和开发板可供参考。项目组成员具备嵌入式软硬件开发经验，曾完成家居环境监测系统，熟悉传感器组网（ZigBee、Wi-Fi）及云平台对接。因此技术层面不存在无法逾越的障碍。

5.2 经济可行性

以单户系统为例：一个嵌入式网关（含电源、外壳）

约 80 元，6 个智能插座（每个 25 元）共 150 元，云服务费用按消息量计算每年约 15 元，总硬件成本约 245 元。根据类似项目测试数据，合理使用待机切断与错峰控制可节约家庭用电 8% ~ 15%，以月均电费 150 元计算，每年可节省 144 ~ 270 元，投资回收期约为 1 ~ 2 年。随着产量增加，硬件成本仍有下降空间，经济上完全可行。

5.3 社会可行性

该系统有助于提高居民低碳意识，减少无效待机能耗，契合国家“双碳”目标。同时，系统提供的异常功率告警功能可在一定程度上降低电气火灾风险，具有明显的公共安全效益。因此社会接受度较高。

6 发展趋势与展望

基于当前技术发展态势，智能家居能源管理将呈现以下三个趋势。

(1) 跨学科融合加深。嵌入式技术将与人工智能、区块链（用于点对点电力交易）、5G 低时延通信等技术深度融合，催生出虚拟电厂、需求侧响应等新型商业模式。家庭不再只是电力消费者，也可成为分布式能源的提供者。

(2) 政策驱动下的规模化部署。国家已明确将智慧能源纳入“十四五”重点任务，多地政府对安装智能电表和家庭能耗监测系统提供补贴。随着标准的统一（如 Matter 协议），设备互操作性将得到根本改善，推动系统从示范走向普及。

7 结语

本文围绕嵌入式技术在智能家居能源管理中的应用，系统梳理了国内外研究现状，指出现有系统存在设备互操作性差、数据处理本地化负担重、大数据分析应用不足三大核心问题。在此基础上，提出了一种“端—边—云”协同的三层系统架构，并详细阐述了各模块的功能设计与技术实现路径。最后从技术、经济与社会三个维度论证了系统的可行性，并对未来发展趋势进行了展望。后续研究将重点开展实际硬件平台的搭建与长时间序列的实地测试，以量化系统的节能效果与用户接受度。

参考文献

- [1] 郭振涛, 张明, 李华. 基于物联网与大数据技术的家庭能源管理系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(4): 112-117.
- [2] 彭金银. 人工智能机器人技术在智能家居能源系统优化中的应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2024(2): 55-60.
- [3] 章敏艳. 自适应智能家居能源管理系统的构建与性能分析[J]. 信息技术与信息化, 2024(1): 88-93.
- [4] 唐楷, 王磊, 陈思. 基于物联网智能插座的电器能耗监测与控制实现[J]. 电子设计工程, 2024, 32(3): 45-49.
- [5] 国家能源局. “十四五”现代能源体系规划[EB/OL]. (2022-01-29). <http://www.nea.gov.cn>.
- [6] 周兴华, 刘志刚. 嵌入式系统在智能家居能源管理中的应用综述[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2023, 23(6): 1-5.