

物联网技术在家庭能源管理系统中的应用

罗宜欣
新疆大学

DOI:10.32629/acair.v4i2.20407

[摘要] 本研究针对家庭场景设备多样与功耗敏感特性,构建了包含感知层、网络层与应用层的家庭能源管理系统物联网架构,选用ZigBee作为内部主干通信协议,结合边缘预处理技术降低云端传输负担约30%。通过对A小区一户家庭的实证分析,系统部署后全屋月均能耗由350kWh降至308kWh,节能率达12%,其中空调能耗降幅18.3%。用户体验研究显示,评分 ≥ 4 分的群体主动关断闲置设备频率提升25%,表明系统交互设计可有效促进节能行为转化。

[关键词] 家庭能源管理系统; 物联网架构; 低功耗通信; 边缘计算; 节能优化
中图分类号: E965 **文献标识码:** A

Application of Internet of Things technology in household energy management system

Yixin Luo

Xinjiang University

[Abstract] Aiming at the diversity and power consumption sensitivity of home scene devices, this study constructs the IoT architecture of home energy management system including perception layer, network layer and application layer. ZigBee is selected as the internal backbone communication protocol, and the edge preprocessing technology is used to reduce the cloud transmission burden by about 30 %. Through the empirical analysis of a family in A community, the average monthly energy consumption of the whole house is reduced from 350 kWh to 308 kWh after the deployment of the system, the energy saving rate is 12 %, and the air conditioning energy consumption is reduced by 18.3 %. User experience research shows that the frequency of active shutdown of idle devices by groups with scores ≥ 4 is increased by 25 %, indicating that system interaction design can effectively promote the transformation of energy-saving behaviors.

[Key words] household energy management system; IoT architecture; low power communication; edge computing; energy saving optimization

引言

随着智能家居与能源互联网的融合发展,家庭能源管理成为提升用能效率、响应需求侧管理的关键环节。当前家庭场景中设备类型多样、功耗特性差异显著,传统管理方式存在数据采集不精准、通信协议适配难、控制响应滞后等问题,制约了节能潜力的释放。在此背景下,构建可落地部署且具备扩展能力的物联网架构,实现家庭能源的智能感知、高效传输与优化调度,对降低家庭能耗、提升用户体验具有重要意义^[1]。本研究聚焦家庭能源管理系统的架构设计、数据采集处理技术及应用效果,旨在为家庭能源智能化管理提供可行方案与实证支撑。

1 国内外研究现状

家庭能源管理系统作为智慧城市以及能源互联网的最终成果,在近年来已经成为学术界以及工业界的研究焦点。在早期的家庭能源管理方案大多依靠Wi-Fi通信技术,通过其高带宽的优

势来实现设备的快速接入。然而,在实际的应用中,Wi-Fi协议的弊端逐渐显现:一方面,Wi-Fi芯片的待机功耗高,对于依靠电池供电的温湿度传感器等感知节点来说,这是难以实现其长效续航的;另一方面,Wi-Fi协议典型的星型拓扑结构在面对多墙体、长走廊等复杂的家庭户型时,极易容易出现信号衰减和覆盖盲区,这会降低系统的通信稳定性。

在数据处理的层面上来看,传统的家庭能源管理系统大多采用了“端-云”的架构,将所有感知数据直接透传至云端服务器来进行逻辑判定和存储。但随着采样频率向着秒级甚至是毫秒级升级,这种传统模式面临着严峻挑战。首先,全部数据上传至云端服务器会对家庭出口带宽产生巨大压力,极易引发链路拥塞;其次,云端计算所产生的往返时延也会导致空调实时调温、照明系统自适应调节等实际场景的体感响应速度表现不尽如人意。而针对这一痛点,近年来部分研究者也在尝试着将机器

学习的相关算法部署在家庭端的一侧，但正如文献^[2]所述，传统的深度学习模型的权重规模以及高算力需求，这些特性都与边缘设备极其受限的内存以及能耗预算之间存在着难以调和的矛盾，这也导致高复杂度的模型目前大多仍高度依赖云端基础设施，模型的高维特性使得其在边缘节点的直接部署变得极不切实际^[3]。近年来也有国内研究聚焦于“边云协同”架构与分布式边缘智能的探索。通过云端全局调度与边缘控制解耦来缓解端侧算力压力^[4]。然而，前沿算法在实际落地时，仍普遍受限于异构设备底层协议繁杂及通信开销大的工程阻碍。因此，从底层通信协议与边缘预处理策略入手，构建轻量、高效且易于部署的系统架构，仍是当前的破局关键。

2 家庭能源管理系统的物联网架构构建

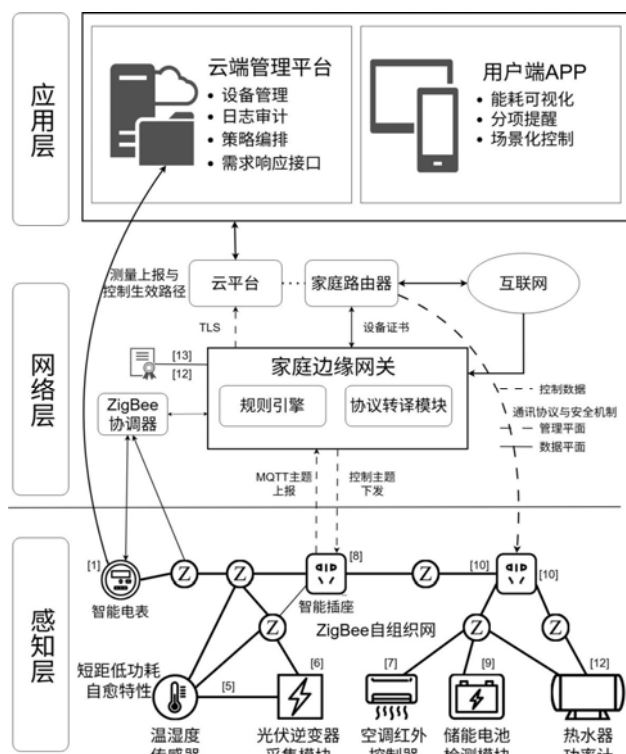


图1 家庭能源管理系统物联网架构图

由于常见家庭场景中设备的类型多样且多数功耗敏感，因此本研究把家庭能源管理系统划分为感知层、网络层与应用层三层结构，同时围绕可落地部署与后续扩展进行设计：感知层配置有智能电表、温湿度传感器、智能插座、空调红外控制器、光伏逆变器采集模块等节点，选用低功耗传感元件与窄休眠占空比的策略，借助本地时钟与去抖动采样把采集频率与场景负载相匹配，同时预留设备标识与校准接口以便即插即用；网络层使用ZigBee来组建近距离自组织网承载节点间通信及入网认证，边缘网关集成有ZigBee协调器与Wi-Fi模块，通过汇聚与转译多协议数据，再依靠MQTT发布订阅模型把状态上报与控制指令解耦，核心链路采用了TLS会话与设备级证书来保证数据的安全传输，同时设置本地规则引擎以在外网异常时能够维持关键控制；

应用层的设计包括了用户端APP与云端管理平台，前者面向居住者开展能耗可视化、用电分项提醒与场景化策略下发的应用功能，而后者则承担着设备生命周期管理、策略编排与日志审计的职责，并对接分时电价与需求响应接口。从可扩展角度来看，系统将驱动适配、主题命名与设备发现这三个重要的功能模块标准化，结合IPv6地址规划与时钟同步机制来实现跨房间漫游以及批量升级，端到端交互路径与安全边界如图1^[5]。

3 家庭能源数据的采集与处理技术

3.1 家庭能源感知节点的部署策略

家庭负荷通常呈现出多类型与周期性启停交织的特性，因此本研究联合规划了感知节点的部署、房间功能、用能时序以及射频覆盖这四项内容，重点观测高波动功率负载，综合权衡了采样点与负载空间耦合程度、遮挡风险、射频衰减和维护便利性。设定80 m²两居室样板户型为研究对象，客厅设置2个智能插座服务影音设备集群与临时小家电使用区，插座分别位于电视柜电源汇集位与沙发侧墙位，便于把长期稳定负载与临时接入负载进行分开统计，在距地1.2 m的中央通道侧壁安装配置1个温湿度传感器，避开空调出风与日照直射，从时空代表性角度提高热环境测量的稳定性，同时把空调红外控制器固定在与室内机保持无遮挡视距的位置，视距不超过5 m以提升控制下发的可靠性。卧室部署1个智能插座覆盖床头电源组，另配置1个温湿度传感器贴近睡眠区的热感受点，安装高度约1.2 m并远离窗侧对流区，以此降低昼夜温差所带来的测量数据偏差。

面对热水器等大功率负载，可以选用回路级电能采集模块并将其布置在配电箱，电流互感器夹持在专用回路导线上；若为燃气热水器，则组合使用出水口附近的温度探头与点火侧电流取样，用以判定加热工况与闲置状态。照明负载采用墙面嵌入式开关控制器嵌装于86盒位置，并在采光面侧墙设置光照采样点，安装高度略低于窗楣以减轻直射造成的饱和，数据将被用于日照补偿调光策略。考虑到ZigBee近距离自组织网的链路裕度，把市电供电的插座节点当作中继构建冗余路径，户内形成至少两条可替代链路，同时避开无线路由器强信道并让节点与金属家电保持不小于0.2 m的间距，可以有效降低衰减与多径。对于电池供电的温湿度传感器，采用事件触发叠加低占空比轮询策略，并把安装位置预留更换空间；所有节点在入网前完成标识与校准，同时在部署过程中记录坐标与房间编号，以便后续进行策略编排、批量升级与跨房间漫游。

3.2 低功耗物联网通信协议的选型

在家庭能源管理的封闭空间内，协议选型需统筹覆盖半径、功耗、节点容量以及单点成本。结合80平方米两居室的布局特征，本研究把ZigBee、LoRa与NB-IoT开展针对性比较。ZigBee源自IEEE 802.15.4，支持自组织网与多跳转发，室内典型覆盖10至100 m；节点配合窄占空比休眠可把平均功耗控制在1 mW以下；单节点硬件成本约50元。该组合与家庭内短距离、多节点并发以及对局部自愈都需要高度契合。

进一步观察LoRa，其扩频机制能够带来长距离与穿透力，但

星型接入与较低有效吞吐都会限制高频次状态上报,室内多墙环境下由单跳去覆盖所有终端并不稳健,同时模块大小与天线尺寸以及总体成本都加大了插座类终端的结构改造难度。NB IoT依托蜂窝网络提供广覆盖,虽然适用于分散在外场的公用设施计量,但接入需绑定运营商与订购流程,费用与生命周期运维产生耦合,链路时延与上行主导的业务形态也不利于照明与空调控制对低时延交互的诉求。权衡以上的所有条件,本研究把ZigBee当作家庭内部设备间的主干协议,由边缘网关进行汇聚与转译,从而在覆盖、功耗与成本三项指标上平衡,并为温湿度传感器、智能插座、回路级电能采集模块以及空调红外控制器提供可扩展的统一接入路径^[6]。

3.3 能源数据的边缘预处理方法

为了解决家庭能源管理在局域场景中的低时延与带宽受限约束,在边缘网关中进行数据预处理显然更易满足具体的部署场景。网关收到来自于智能电表、插座以及回路级采集模块的秒级序列之后,会先对时钟和缺测的片段进行对齐和插补,再把滑动窗口平均用于抑制高频噪声,并在窗口内维护残差与一阶梯度以支撑异常值判定。为了将窗口长度与采样频率以及典型负载启停时序相匹配,客厅照明与影音集群最好设置为5至15个采样步长,空调与热水器则采用更长窗口以保留缓变趋势。对于已经过去噪的序列,网关把常态段落按时间聚合与差分编码,仅在突变、越阈与长时漂移被触发时发布事件消息,同时把原始片段与异常标签作为高优先级主题推送至云端服务器;而日常状态则以统计摘要的形式上报,从而把传输与存储压力前置化消解。鉴于消息载荷得到收敛,MQTT主题发布频率与链路拥塞风险同步下降,本地规则引擎凭借预处理后的特征量直接驱动照明调光与空调温控,指令闭环主要在网关内部完成。由此推导,在两居室样板部署与相同采样粒度下,该策略通常可把云端传输负担下降约30%,并把控制交互的响应路径显著缩短,进而提高居住侧的体感响应速度^[7]。

$$y_i = \frac{x_{i-N+1} + x_{i-N+2} + \dots + x_i}{N}$$

其中, y_i 表示滑动窗口平滑后的功率采样值(单位: W), x_i 为原始功率采样值(单位: W), N 为窗口长度对应的采样点数量(单位: 个)。

4 家庭能源管理系统的应用效果评估

4.1 系统能耗优化效果的量化分析

家庭能源管理系统在负荷感知以及调度上的介入需要可以量化用电削减的分析策略,本研究把A小区一户三口之家作为对象,选用系统部署前后各3个月的分项计量数据,构建基线期与干预期作为对照样本。考虑到季节差异引起的波动,选择气温变化幅度接近且没有剧烈震荡的月份,并把居住人数与主要电器使用场景保持一致,空调月均能耗由120 kWh降至98 kWh,照明由30 kWh降至25 kWh,叠加厨电与娱乐设备为主的其他负载轻度下降,使全屋合计由350 kWh降至308 kWh,呈现稳定的降低趋势。

需要重点关注的是,空调侧更高的降幅体现了温控策略对设定点与启停频率的联合优化,把峰段运行时长转移至谷段可以降低不必要的循环,照明侧变化则来源于场景化调光与常闭策略,把误点亮与过照度时间削减。如果把每个月的平均能耗作为量化口径,采用基线期作为参照计算相对降幅,可得到全屋节能率约12%,而根据分项贡献结构显示,空调贡献高于其他负载,契合可调负荷具备更大弹性的判断。进一步从峰谷分解角度观察,峰段占比收窄而谷段占比上升,为总量收敛提供了行为层面的解释,也为后续跨季节参数映射提供了可供追踪的指标体系^[8]。

4.2 用户体验与节能行为的关联研究

在家庭能源管理系统的实际使用场景中,本研究把用户体验这一复合概念拆分为操作便捷性与数据可视化效果,并据此构建Likert 5分量表。操作便捷性指的是引导用户完成用能监测与设备控制的步骤难易与系统的响应效率,而数据可视化效果则是指把用电曲线与各项能耗呈现得清晰易解读的程度。依靠50份有效问卷的量化评分,得到操作便捷性平均得分为4.2分,数据可视化平均得分为4.0分,并把两项等权均值当作用户体验综合评分,用于划分不同用户群。见表1。量表条目覆盖有开关设备、定时策略配置、用量对比三类高频任务,同时在数据呈现维度纳入阈值警告、颜色编码与对比基线三项可视化特性,以便把交互效率与信息可读性纳入同一评价框架。对照系统交互日志与用户自报记录,本研究把主动关闭闲置设备的频率定义为单位周内由用户主动发起的关断次数。

进一步观察发现,体验评分达到4分及以上的用户,在系统上线后,主动关断频率相对使用前提高25%,而低于4分的用户增幅虽然有限。但全体样本层面仍呈现出中等幅度的提升,说明用户在关键任务中使用策略配置能明显感知更加顺手,并且在负荷曲线与分项能耗面板中获得更强的即时反馈时,会把节能意图更稳定地转化为具体行动。需重点关注的是,界面把高频开关路径缩短、把异常用能提示前置、把关键能耗差异以对比色突出,这些行为能够在行为触发机制上降低认知与操作成本,并且在日常场景中形成可被重复调用的提示。由此推导,围绕路径优化与信息显著性提升来迭代交互细节,把复杂判断拆解为少步可执行的操作,这些设置都将更有助于把用户体验的正向感知转化为持续的节能行为。

表1 用户体验评分与节能行为关联表

群体	样本量 n	操作便捷 性均分	数据可视 化均分	使用前频 率 次每周	使用后频率 次每周	提升 幅度
全部样本	50	4.2	4.0	3.9	4.6	18%
体验评分≥4	32	4.5	4.3	4.0	5.0	25%
体验评分<4	18	3.7	3.5	3.8	4.1	8%

5 结语

本研究通过构建分层物联网架构,优化感知节点部署策略,选择ZigBee作为家庭内部通信协议,并采用边缘预处理技术,有

效平衡了覆盖、功耗与成本需求。并且通过实证结果表明,系统可实现12%的全屋节能率,且用户体验与节能行为存在显著关联。未来研究可进一步拓展跨季节参数优化,增强与分布式能源设备的协同调度能力,同时持续迭代交互设计,提升用户参与度与节能行为的持续性,为家庭能源管理的规模化应用提供更完善的技术支撑。

[参考文献]

[1]马莉.基于物联网的能源管理信息化平台设计研究[J].中国信息化,2025,(05):72-73.

[2]Alajlan N N, Ibrahim D M. TinyML: Enabling of Inference Deep Learning Models on Ultra-Low-Power IoT Edge Devices for AI Applications[J]. Micromachines,2022,13(06):851.

[3]Aldaej A. Deep Learning-Inspired IoT-IDS Mechanism for Edge Computing Environments[J].Sensors,2023,23(24):9869.

[4]潘玺安,艾欣,胡俊杰,等.考虑网络安全约束的分布式智能电网边云协同优化调度方法[J].电工技术学报,2024,39(19):6104-6118.

[5]林继业,张璐.物联网在智能绿色建筑设计中的应用研究[J].绿色建筑与智能建筑,2025,(07):84-86.

[6]立若旺姆,李振超,李铭.物联网技术在智能电力通信系统设计中的应用[J].电气时代,2025,(06):67-69.

[7]黄晨.基于物联网的建筑智能化管理平台研究[J].城市建设,2025,(09):53-55.

[8]李怀,于震,陈语涵.我国建筑能源管理系统应用现状调研和分析[J].建筑科学,2025,41(06):137-144+204.

作者简介:

罗宜欣(2005--),男,汉族,江西九江人,本科,研究方向:边缘计算、软件工程与智能物联网。