

## A Fine-Grained Energy Auditing System Based on Wireless Sensor Networks\*

SHI Gaotao, ZHAO Zenghua\*, XU Ruitao, LÜ Zhihong, SHU Yantai

(School of Computer Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 320001, China)

**Abstract:** Natural resource preservation has recently become a significant concern, and has motivated research and development efforts to assist in both conservation and management. Electricity usage in residential and commercial buildings represents a significant fraction of total energy expenditure. A key prerequisite for energy conservation is knowing when and where energy is being spent. However, in the current energy reporting devices only provide coarse grained information. This paper presents a fine grained power auditing system based on the sensor networks. This system can provide detailed information about the total energy consumption in any period for each appliance and thus will become an efficient tool for future real-time pricing. At the same, some behavior model can be drawn from the collected data based on the proposed system.

**Key words:** wireless sensor networks; electricity consumption; auditing system; fine-grain; real-time pricing

**EEACC:** 6150P

## 基于无线传感器网络的细粒度电器能耗计量系统\*

石高涛, 赵增华\*, 徐瑞涛, 吕志宏, 舒炎泰

(天津大学计算机科学与技术学院, 天津 300072)

**摘要:** 自然能源保护和节省是当前人们所关注的一个热点, 引发很多研究人员开发和设计相应的节能技术。电能的利用在家庭和商业中占有重要比例, 因此如何提高电能的利用率具有重要意义, 其中一个关键问题是需要找出电能消耗详细信息。然而, 在当前的电能统计方法中, 无法获取每台电器用电的详细数据。本文基于无线传感器网络技术开发一套电器能耗细粒度统计平台, 包括电能采集节点、电能数据传输网络和存储与可视化等部分, 能够统计出每一单个电器的当前总的能耗、过去任意时段能耗, 为未来实时电价提供有力工具。同时, 基于该系统亦可对用户用电行为规律进行分析。

**关键词:** 无线传感器网络; 电器能耗; 计量系统; 细粒度; 实时电价

**中图分类号:** TN915.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2010)06-0850-05

随着人类工作生活越来越频繁, 已经给大自然带来严重的负面影响, 其中自然资源的过度消耗使人类第一次面临严重的能源危机。尽管当前新型能源技术不断被提出, 但是在一个较长时间内, 如何充分利用传统能源依然是解决能源问题的可行有效的办法。

电能是与我们现代化生活密不可分的能源, 作为在电能消耗中占有很大比重的电器用电(包括家庭用电、工业设备用电等)在节能方面还存在着很大的空间。美国能源局估计, 73% 的电能消耗来自于建筑物<sup>[1]</sup>。事实上, 根据上海市能源利用监测中心的报告, 一套家庭影院待机能耗 30 W 左右。电脑外加上打印机、扫描仪、电脑音响, 合计待机能耗 20 W 左右。若以每 3 家用户拥有一套家庭影院和一台电脑来算, 一个

650 万户的城市家庭中每套影院系统和电脑系统如果通过合理控制, 使其能耗降到 0.5 W, 那么每年就能省下电量约  $9.3 \times 10^8$  kWh, 从而省下电费  $4.5 \times 10^8$  Yuan。

可以看出, 如果能借助一种方法做到电器的合理用电, 提高电能的利用率将能带来极大的节约, 无论是对单位、个人还是对整个国家都具有重要的意义。尽管我们都希望能够做到节约用电, 然而从哪里入手? 如何才能做到节约用电?

当前的电量计量方法只能获取每个住户或者单位过去总的用电量, 对每一台电器更加详细的耗电情况以及历史时段的能耗无从获取。研究表明<sup>[2]</sup>, 实时细粒度电器耗能反馈和能耗可视化将能改变用户行为, 使用电量降低 10% 到 20%。可见, 为了有效节

**项目来源:** 国家自然科学基金资助项目(60903193, 60702038); 微软亚洲研究院基金资助(FY08-RES-OPP-034); 教育部博士点新教师基金资助(200800561042)

**收稿日期:** 2009-12-23 **修改日期:** 2010-01-28

能,急需一种能提供电器详细耗电情况的统计手段。

本文提出一个基于无线传感器网络<sup>[3]</sup>的电器能耗细粒度统计平台,该平台实时监测每个电器的耗电量,并通过无线的方式将所有电器的耗电数据收集到服务器中,供用户查看。同时,基于该平台,可对长期收集的数据进行分析,挖掘用户用电行为模式,进而对用户电器进行智能控制。

本文的主要贡献在于:(1)将无线传感器网络应用在电器能耗统计中,提出一个无线计量、存储和分析系统。(2)设计和开发了一个可用于测量电器能耗统计的无线传感器节点。(3)通过实地测试系统统计和分析了典型电子设备的耗能情况。

本工作的意义在于:(1)提供一个细粒度的计量平台向用户反馈用电情况,有利于提供节能依据。(2)为未来实时电价提供辅助工具。(3)通过详细的能耗记录可以与过去发生的事件相关联,可以推测用户过去的行为。

## 1 相关工作

提供细粒度的能耗统计设备或技术已被当前科研院所和工业高度关注。目前已经有可以单独测试某一电器的能耗情况<sup>[4-6]</sup>,但是这类产品只能提供过去所有时间内的电量情况,无法获得过去任意时间段的电量。

目前一些大型 IT 公司如 Google 也从事家电细粒度的能耗计量研究<sup>[7]</sup>,然而尚未见其产品。

目前能够提供详细资料的有 UC Berkeley 大学开发的平台<sup>[8-9]</sup>,该平台的功能和本文所设计的平台最为接近,但该硬件平台完全从零开始设计,功能过于复杂。我们的工作与之主要的区别在于:(1)硬件平台简单,可以方便与现有电源连接设备相接。(2)提供丰富的可视化功能,能够显示过去任意时间段(精确到秒)的能耗。(3)本文还对能耗与用户行为的关系进行初步的探索。

此外,文献[10]提出了一个非入侵式的电量监测系统,通过检测电器在耗能过程中释放的可测量信号来估计电器的能耗情况。然而,此方法检测的精度不高,并且会受到外界环境中其它信号的影响。

## 2 系统架构

### 2.1 系统结构

整个能耗统计平台由三大部分组成,如图 1 所示,包括信息采集与传输系统、信息存储与融合系统和信息发布系统。其中信息采集与传输系统负责对每一个家用电器的耗电量进行实时监测,并将采集

到的数据周期性地通过无线方式一跳或多跳地传输到服务器中。信息存储和融合系统负责接收到每个电器传来的历史数据信息,并提供可视化的数据显示,同时对采集到的历史数据进行分析,挖掘用户电器使用规律,并对用户用电行为进行预测。信息发布系统可以提供用户远程的访问和信息接收,这一功能有利于未来和智能家居系统相融合。以下将对每一个组成部分进行介绍。

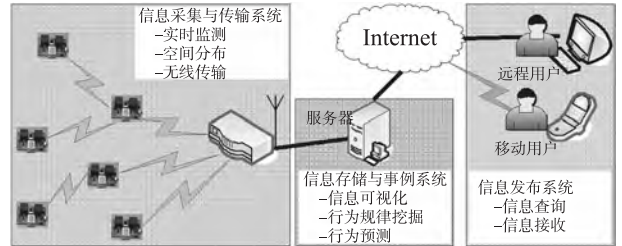


图 1 能耗计量系统结构

### 2.2 节点设计

为了实现以上描述功能,我们设计了一种基于电能计量芯片 CS5463<sup>[11]</sup>的电能监测模块。该模块的硬件是由 JN5139<sup>[12]</sup>无线收发模块、电能计量芯片 CS5463 及接口电路组成。

CS5463 是带有串行接口和  $\Delta - \Sigma$  模/数转换器,能够进行高速功率(电能)计算的高度集成电路。CS5463 可以通过使用低成本的分压电阻器或电压互感器测量电压,使用分流器或电流互感器测量电流,从而计算出有功功率。JN5139 是一款兼容于 IEEE 802.15.4 的低功耗、低成本无线微型控制器。该模块内置一款 32 位的 RISC 处理器,配置有 2.4 GHz 频段的 IEEE 802.15.4 标准的无线收发器、64KB 的 ROM、96KB 的 RAM。

电压、电流采样电路把所输入的大电压、大电流信号转变成 CS5463 可接受的小电压信号。电压通道输入范围为 150mV(rms),电流通道根据增益设定的不同(为 10 或 50),相应的输入电压范围为 150 mV(rms)或 30 mV(rms)。CS5463 测得采样电路输入的电压、电流值并据此由内部的电能计算函数计算出电能,并按类型存入相应寄存器中。MCU 通过 SPI 接口即可读取测量的电压、电流及功率等数据,然后通过 radio 发送到收集中心。电量监测模块硬件框图如图 2 所示。

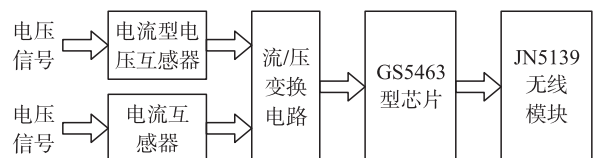


图 2 电量检测模块功能框图

图 3 是设计的电量采集实物图。本文所提节点与现有的工作相比简单易用,与传统接线板很容易集成在一起。文献[8-9]所开发的节点相对比较复杂,将电源接线部件也集成到了电路板中。我们的节点只需要从现有的插线板中引出相关电源线即可。

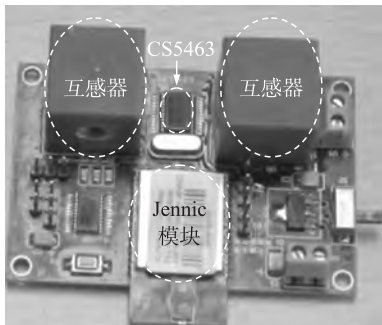


图 3 无线能耗测量节点

### 2.3 网络设计

考虑到本系统亦可用于大规模的工厂与办公单位,因此,每个节点不一定都能够和服务器直接通信,为此需要为该系统设计一个组网协议和路由协议。该协议是基于 IEEE 802.15.4 标准。

组网过程如下:

首先,启动服务器的 Coordinator,它固定工作在一个预先设定的 Channel 上,并指定其工作层号为 0。

其次,每个电量采集节点在启动后都自动扫描该 Channel 上的邻居节点,并选其中层号最小的邻居节点作为其父节点,同时设置自己的层号为父节点层号加 1。

每个节点周期性上传数据,每个电量采集节点在上传数据时,除了上传数据外,还要将该数据沿途经过的节点 ID 封装到数据包中。这样做的目的是为了以后查询方便。因此,数据路由过程如下:

节点将自己的 ID 和数据封装成数据包发送给父节点;每个节点在收到一个来自子节点的数据包后都将自身的 ID 也加到该数据包中,然后转发给自己的父节点。该过程一直持续下去,直至到达 Coordinator 节点。

这样经过一段时间之后,服务器将了解到每一个节点上传经过的路径,因此,当需要查询某一个节点时,服务器将该节点上传的逆路径封装在查询消息中,然后通过网关下发到逆路径上的第一个节点。每个节点在收到该查询信息时,从中查看下一跳的转发节点,并转发出去。该过程以此下去,直至查询消息到达目的节点。

与已有的查询方法相比<sup>[13]</sup>,这一处理过程的好处在于有效避免大规模的查询消息 Flooding。考虑

到该系统网络拓扑相对比较稳定,因此,采用这一方法能有效降低网络负载。

### 2.4 数据存储、显示与分析

所有节点的数据都可以通过后端可视化显示工具进行显示,包括某一时段电量,当前总的耗电量。同时,这些数据都会存入数据库,可以供未来随时查询。所有查询结果都以柱状图或曲线图可视化地显示。

另外,通过对电器典型工作状态能耗的测量,可以作为分析用户用电行为的依据。在这个基础上,分析长期收集的数据可对用户行为规律做简单预测。

## 3 实验结果

### 3.1 数据收集系统

为了验证系统的功能,我们分别选取了普通笔记本电脑、无线嵌入式设备 Wi-Zi 节点<sup>[14]</sup>两种设备进行测量,统计其能耗情况。

实验测量 Dell D630 笔记本分别在休眠、正常工作、待机和运行游戏四种情况下的功率情况,下表列出了测试结果:

表 1 D630 不同状态下功率测量值

状态	功率/Wh			持续时间/min
	最大	最小	平均	
正常工作	15.27	10.60	13.44	140
运行游戏	17.33	15.89	16.79	80
待机	8.72	8.32	8.39	280
休眠	0	0	0	50

从上表可以看出 D630 在不同的工作状态下功率是不同的,待机功率相对正常工作状态有近 40% 的降低,而运行游戏的功率最大,原因在于运行游戏需要启用显卡,触发大量运算部件工作。此外,即便是同一工作状态下,功率也不是稳定的。从整个测量结果来看,D630 笔记本工作能耗大概在 15 W 左右,待机能耗为 8 W 左右。

我们也测量了无线设备 Wi-Zi 节点的能耗情况。该无线设备基于 MPC8272 开发板扩展为可支持 WiFi 和 Zigbee 功能,作为 WiFi 和 Zigbee 数据转换网关。Zigbee 模块子板的控制模块采用 Jennic5139,它集成了 MCU 和射频模块。

测试环境如下:使用两个 WiZi 节点,通过调整节点的运行状态,每 10 min 统计一次该时段内的用电情况。下表是该设备在不同工作状态和具有不同功能部件情况下的能耗测量情况。

表2 Wi-Zi 节点不同状态能耗统计

状态	平均功率/Wh
无 WiFi 网卡待机	0.95
有 WiFi 网卡待机	2.53
单向 2 Mbit/s UDP(发送端)	4.36
单向 2 Mbit/s UDP(接收端)	3.23
双向 2 Mbit/s UDP(发送端)	4.51

此外,我们对 D630 笔记本电池充电能耗情况进行了测试。图 4 是统计的每 10 min 的功率情况。从图中可以看出,电池充电时并不是一开始就马上进入最大功率,我们猜测这是由于电池里的化学元素需要一个激活过程。同时,充电最大功率会持续一段时间,之后充电功率会逐渐降低,2 h 后不再有能耗。

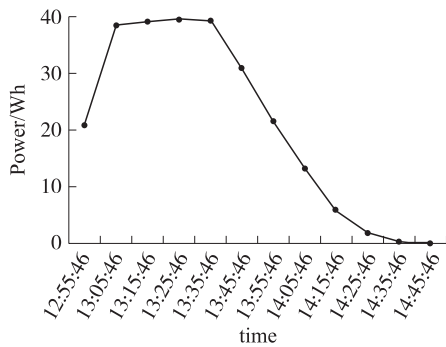


图4 D630 电池充电功率变化图

### 3.2 用户行为规律

为了说明系统基于测量的用户用电规律功能,我们对 1 台学生科研用的 Dell 笔记本电脑日常耗电情况进行了监测,每个学生完全根据自己的日常工作爱好使用电脑。为了测试需要,要求学生在离开时除了关机之外,设定机器自动待机。

系统每 10 min 采集一次电量,并传到数据库中保存起来。图 5 是其中一个学生从 2009-10-27 到 2009-10-28 的用电情况,采集数据已被换算成 Wh。

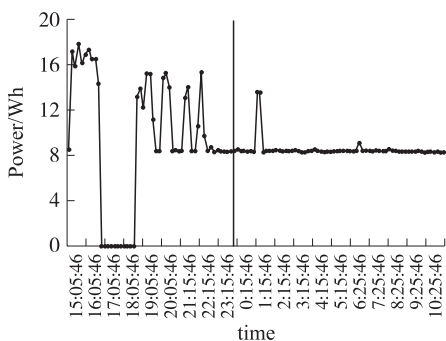


图5 两天的用电变化图

根据表 1 的测量数据可知,D630 机器正常工作平均功率为 13 Wh 左右,待机功率为 8 Wh 左右,运行游戏的平均功率为 18 Wh 左右。据此,可以推测出下图中学生在 15:20 左右,机器运行了游戏程序,导致能耗相对其它时间多出近 2W 左右,其后该生离开电脑,并关机。在晚上 18:30 左右,该机器处于正常工作状态,中间断断续续离开了电脑。图中高能耗部分表明该机器正在被使用,8 W 左右的能耗为机器待机电耗。值得注意的一个异点是在 1:15 左右出现了较高的能耗,我们推测是该机器运行的操作系统 Windows 发生了自动更新,从而带来了一些额外的能耗。

## 4 结论和未来工作

本文针对当前电量计量系统的缺点以及当前能源问题的紧迫性,基于无线传感器网络技术设计和实现了一个细粒度的电器能耗计量系统,并在该系统上对典型的电子器件能耗情况进行测试,同时还根据长期收集的用电情况来推测用户规律进行了探索。该系统同样可以用于大型商场、超市以及工厂环境的用电耗能计量。

未来我们将基于该平台对更多典型的能耗较大的电器如冰箱、空调等进行长期测量和监测,并通过收集的数据进行处理,分析电器能耗的变化规律,进而研究有效的节能方法。

### 参考文献:

- [1] Doe. Buildings Energy Data Book, Department of Energy [EB/OL]. <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/>. 2009-03.
- [2] Chetty M, Tran D, Grinter R E. Getting to Green: Understanding Resource Consumption in the Home [C]//Hee Yong Youn, We-Duke Cho eds. Proceedings of the 10 th International Conference on Ubiquitous Computing, (UbiComp), New York, NY, USA, 2008. 242-251.
- [3] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless Sensor Networks: A Survey [J]. Computer Networks: 2002, 38(4), 393-422.
- [4] Wattsup Corp, Watts up? "Plug Load" Meters Specifications [EB/OL]. <https://www.wattsupmeters.com/secure/products.php?pn=0>.
- [5] Silver Spring Networks, The Smart Energy Platform [EB/OL]. <http://www.getgreenbox.com/>.
- [6] Energy Hub, Smart Grid Home [EB/OL]. <http://www.energyhub.net/>.
- [7] Google Corp, Google PowerMeter Introduction [EB/OL]. <http://www.google.org/powermeter/>.
- [8] Jiang X, Dawson-Haggerty S, Dutta P, et al. Design and Implementation of a High-Fidelity AC Metering Network [C]//Proceed-

- ings of Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), New York, NY, USA, ACM Press, 2009, 253 – 264.
- [9] Jiang X, Taneja J, Ortiz J, et al. An Architecture for Energy Management in Wireless Sensor Networks[J]. ACM SIGBED Review, 2007, 4(3), 31 – 36.
- [10] Kim Y, Schmid T, Charbiwala Z M, et al. ViridiScope: Design and Implementation of a Fine Grained Power Monitoring System for Homes[C]//Sumi Helal, Hans Gellersen, Sunny Consolvo Eds, Proceeding of 11 th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp), Orlando, Florida, USA, 2009, 245 – 254.
- [11] Cirrus Logic, Single-Phase Bi-Directional Power/Energy IC[EB/OL]. <http://www.cirrus.com/en/products/pro/detail/P1092.html>.
- [12] Jennic Ltd, Jennic Wireless Microcontrollers[EB/OL]. <http://www.jennic.com/>.
- [13] Chalermek Intanagonwivat, Ramesh Govindan, Deborah Estrin, John Heidemann, and Fabio Silva. Directed Diffusion for Wireless Sensor Networking[J]. ACM/IEEE Transactions on Networking, 2002, 11(1), 2 – 16.
- [14] Gaotao Shi, Zenghua Zhao, Yantai Shu, et al. Monitoring the High-voltage Transmission Lines Based On Two-tier Wireless Networks[C]//Theodoros Salonidis eds. Proceeding of the 4 th ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization (WiNTech). Beijing China, 2009, 77 – 78.



石高涛(1978 –),男,河南鹿邑人,博士,讲师,主要研究方向为无线传感器网络、嵌入式网络系统。shgt@tju.edu.cn;



赵增华(1974 –),女,河南安阳人,博士,副教授,计算机学会高级会员,传感器网络专委会委员,主要研究方向为无线网络、无线多媒体传输。zenghua@tju.edu.cn.