国际电气工程先进技术译丛

Springer

嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用

Embedded Systems for Smart Appliances and Energy Management

[德] Christoph Grimm
Peter Neumann 编著
[意] Stefan Mahlknecht
王永 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

关于本书

本书系统地介绍了嵌入式系统在智能电器与能源管理方面的应用，首次从多学科融合的角度将包括嵌入式系统、信息技术以及电力工程在内的多种技术加以整合。本书涵盖的内容包括：未来配电网络面临的挑战、智能电器的能耗管理、微型发电设备、需求—响应管理、超低能耗待机、智能待机以及家庭与楼宇自动化的通信网络。



国际电气工程先进技术译丛

嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用

[德] Christoph Grimm
Peter Neumann 编著
[意] Stefan Mahlknecht
王永 译

机 械 工 业 出 版 社

当前社会对节能减排的呼声越来越高，国家电网也正在接纳新型清洁能源以及私有发电设备的并网，物联网正逐渐兴起，本书在这样的背景下，针对越来越复杂的能源管理需求，提出将能源管理引入用电端，通过嵌入式系统使电器智能化，与整体电网进行信息连接，共同达到能源管理的目的。与国内同类书相比，本书除概念以外更多关注现实问题，结合欧洲对相关问题的先进探索，从问题解决领域系统化地给出方向和建议。

本书的作者通过整理欧洲发达国家在能源管理方面的研究成果和有益尝试，提出了系统的解决方案，内容覆盖配电网络、智能电器的能耗管理、需求—响应管理、超低能耗待机、网络安全以及适用于电力自动化的通信网络。本书既可以供国家电网的管理人员制定策略参考，又可以供相关科研单位针对本书所提出的多种学科的课题展开深入研究，电力、通信、家电、元器件等相关企业还可以参考本书进行细分市场的产品规划与技术储备，还可作为电力工程、通信、家电、嵌入式系统等领域的科研与教学人员以及企业产品开发人员在智能电网、智能电器研究方向的参考资料。

Translation from English language edition:
Embedded Systems for Smart Appliances and Energy Management
by Christoph Grimm, Peter Neumann and Stefan Mahlknecht.
Copyright©2013 Springer New York
Springer New York is a part of Springer Science + Business Media.
All Rights Reserved.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版，未经出版者书面允许，本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有，翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记　图字：01－2013－7169 号。

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用/（德）格里姆，（德）诺伊曼，（意）马尔科涅彻编著；王永译．—北京：机械工业出版社，2014.12

（国际电气工程先进技术译丛）

书名原文：Embedded systems for smart appliances and energy management

ISBN 978-7-111-49082-1

Ⅰ.①嵌…　Ⅱ.①格…②诺…③马…④王…　Ⅲ.①微处理器－系统设计－应用－控制电器②微处理器－系统设计－应用－能源管理系统　Ⅳ.①TP332②TM571③TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2014）第 312613 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）

策划编辑：顾　谦　责任编辑：顾　谦

责任校对：刘怡丹　封面设计：马精明

责任印制：刘　岚

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2015 年 3 月第 1 版　第 1 次印刷

169mm×239mm·8.5 印张·449 千字

0001—2800册

标准书号：ISBN 987—7—111—49082—1

定价：49.80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务　　网络服务

服务咨询热线：010－88361066　　机 工 官 网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010－68326294　　机 工 官 博：weibo.com/cmp1952

010－88379203　　金　书　网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版　　教育服务网：www.cmpedu.com

译 者 序

本书讲解了下一代分布式的能源系统，对西方国家智能电网现状与先进实践进行介绍，提出通过信息技术来优化电网的管理，使用智能电器与嵌入式系统实现对电网的分布式智能化管理。

电力市场的体量非常庞大，管理的瓶颈也日益显现。本书首先分析了节能减排以及越来越多的可再生能源应用为电网管理所带来的挑战，提出了分散型能源系统的概念，清晰及有说服力的论述使得非电力专业的人员也能认识到电网管理的现实问题以及合理的解决方向。书中接着对构成解决方案所需的各专业技术进行讲解与分析考量，包括智能电器建模、无线通信标准、网络安全、嵌入式平台、低功耗电源以及智能电表技术等，给出了技术原理、研究成果以及设计建议。

感谢本书的存在，翻译本书是一个愉快的过程，我本人也受益良多。书中所讨论的主题有非常多的领域等待我们去突破，去发挥我们的聪明才智。期待国内更广阔的环境以及相关企业的脱颖而出，期待这样的智能技术早日走进千家万户。

本书的翻译过程得到了何宗彬先生的大力帮助，在此表示感谢。也要感谢我的爱人，她在翻译过程中付出了很多辛苦，提供了很多帮助。

限于译者的经验和水平，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

译者

原书前言：嵌入式系统可以减少二氧化碳排放吗？

简短来说，是的。前提是我们要满足一个关键需求：我们必须广泛部署一种智能的、经济的、分布式的通信系统，一直延伸到单独的家用或办公用电器。为了理解为什么需要这样一个通信系统，我们得回顾一下整个供电系统的挑战以及它的来龙去脉。

减少二氧化碳（CO_2）的排放是全球性挑战。很明显，在未来的 CO_2 减排战略中，像风机以及光伏这种低碳/无碳可再生能源技术将会是重要的角色。然而，我们是工作在一个没有任何商量余地的约束条件下的：维护整个配电网络的稳定，这是至关重要的。因此，整体发电量必须随时与整体用电量相匹配。然而，可再生能源的生产是不稳定的，所以我们必须设法防止这种不稳定性对电网平衡的破坏。我们用来解决电网稳定性的方案必须足够强健，如果我们不想让灾难性的后果再次出现的话，例如发生在 2003 年美国东北部和中西部以及加拿大安大略省的大停电[1]。

对于可再生能源的不稳定问题，解决方案是对它们进行智能化的管理，在发电端，同时也在用电端。我们必须使得用电量与发电量相匹配，即与现代工业化国家的现有方案相反。对于电力消耗大户，例如制造业，这种管理已经相当成熟了。相比起来，对于小型建筑物以及居民社区我们还没有采取有效的方案，可它们在整体用电量中占到了 30%，并且在 CO_2 整体排放中贡献了 20%[2]。

直到现在为止，电力供应都是大规模集中化的。然而可再生能源在整体发电构成中正越来越大地成为一个重要组成部分。因此我们的电力设施会快速地进化为分散式的系统，由为数庞大的小型发电设施来为局部的用户群供电。由此而大量增加的不稳定性供电无疑会给整体电网的稳定性带来风险，我们该如何解决这个问题？

面对这些挑战，信息与通信技术（Information and Communication Technologies，ICT）是一项重要的使能机制。应用这些技术，将建筑物以及单独的家用与办公用电器嵌入监测器、控制器并与发电设备相连接，将会使发电设备每分钟都能知晓本地用户的用电量及分布情况。没有了这种将发电、输电和用电设备相连的实时通信，智能能源管理将无从谈起，结果就会是不稳定的电网、频繁的断电故障。

1. 能源管理：多学科的挑战

在一个（至少是部分的）分散式系统中，并且这个系统还（至少是部分的）应用了可再生能源，智能地将能源管理与能源需求都管理起来，可不是件小事。设计一个嵌入式系统来管理、监测和控制这些用电设备，以及实现它们与发电设备的通信，是一个多学科的挑战，读者可以从本书中领会到。它需要科学家、工程师和社会学家的专业知识，来设计出经济及商业模型，来支撑这一任务的财政可行性研究，以及设计出嵌入式系统的实现。解决方案将会把经济学与电力工程、计算机科学、无线通信技术、微电子学等技术联系起来。

能源发电工业是世界上最大的工业实体。电力是以集中的方式生产的，然后单向输送给用户。然而，大型集中式发电厂是高度密集投资型的。在北海地区大型的近海风力电厂的经验表明，要保障初期投资到位的努力其难度之大，与传统的火电厂一样困难（甚至还会更难）。与之相比，分散式的小型的可再生能源发电不仅能显著减少密集投资，而且经济效益很好，可扩展性很好，还能引入客户参与。用户可以参与到全新的、区域的分散式的能源市场中，这里平衡着光伏、风力、生物燃料等能源，所有的利益相关者都能积极地发电，并以效能价格核算的方式来使用。

用电客户所购买的不仅是能源，还包括能源供给的服务，需要能源实时地供给，而不是等到下个星期。需求现场管理（Demand Site Management，DSM）这一方法被用来匹配需求与现有资源，不过它要求终端用户在使用用电设备时需要接受一些约束。对于这些约束，首要的条件是它不能显著降低用户的舒适性和方便性，否则将无法赢得广泛的用户接纳。另一方面，有些时候舒适性和方便性的降低还是可以接受的，例如客户发现遵守这些约束可以降低开销或避开价格上涨，又或者可以在紧急情况下用来确保电网的稳定。能源管理方法还可以在电力市场的效率方面起到一定的作用。供应商借助能源管理可以根据能源供需关系来调整价格，当然这种利益最大化的诉求不可以对电网的稳定性带来负面影响。

传统的电力工程所面对的都是我们熟悉的、构建完善的系统，它由传统的发电厂发电，加入有限数量的可再生能源，再输送给家庭或工厂。随着从可再生能源中获得的能源比例的提高，对电网的智能化管理的成败在于它在发电端和用电端信息双向传输的能力、收集和分析数据的能力，以及基于分析来识别和产生所需的行动和响应的能力。在基础级的解决方案中还包括能量的存储（以各种形式），以及本地化的能耗管理。

为了支持这种新的供给/需求匹配的模式，需求—响应管理（Demand Response Management，DRM）会试着根据电力供给的多少来调节用电量。给定这样一个新的结构，由一些可管理的小型的生产加消费实体（产销合一）来实现对电网的大幅增强，有两个重要的问题需要解答：

• 对于电网的管理信息网络，如何解决“最后一英里”的连接问题？我们一定要这么做吗，还是我们可以开发一种单向通信的机制来大幅减少投资？

• 当 DRM 在供电者间分担负荷时，抑或是当它减少本地的发电量或者用电量时，我们如何保证公平的能源分配？

就像我们已经提及的，数据传输以及数据的分析和响应是智能能源管理的基础。既然我们获取和传输敏感数据，信息安全就会是我们关注的重点。人们当然不希望电力公司追踪他们家里的信息或者是黑客破坏他们的电力供应。所以必须时时刻刻保护数据的安全，不仅在一个设备或系统正常运转的情况下，还包括将设备安装到一个安全的网络的时候，即试运行，设备或系统在安全机制下被识别和批准的阶段。

更进一步的重要问题是成本。现阶段已有的解决方案，每个受管理的电器其“智能化”成本在几百美元，如果要在小型建筑和居民社区广泛部署，这一成本比在经济上可行的成本高出两个数量级。为了降低价格，我们需要微电子平台。欧洲的研究项目 SmartCoDe[3] 给出估计，在大批量生产的情况下，制造每个受管理设备所必备的高集成度的微电子器件可以低于 4 美元。

然而成本往往不是惟一的问题。既然要将这些设备集成到数量巨大的电器当中，低功耗也是必需的。设计低功耗的系统级封装（System in Package，SiP）或者片上系统（System on Chip，SoC），需要整合多种不同的技术。需要各领域的重要专业知识，例如传感器/执行器技术、模拟/混合信号开发、数字设计、软件开发以及 SiP/SoC 在嵌入式系统的实现。

上述列举还远远不够完整，仍然有很多问题需要解决。这里要表明的是在如今我们所面对的各种挑战中没有哪个是通过关注单个问题就能够解决的。为了解决这些问题，每个人都需要理解全景图以及它的寓意。未来是交叉学科的。

2. 本书章节总览

本书的书名是嵌入式系统在智能电器和能源管理中的应用。嵌入式系统通常的含意是，将一个（微电子）系统和它的软件集成到一个大的通常是自主的系统中，用来监测或控制设备而不需要人工干预。通用的嵌入式系统的例子有，汽车的防抱死制动系统（ABS）以及装好就不用再管它的室内恒温系统。在本书中，我们把嵌入式的定义扩大为将电器集成到一个具体的用例中并考虑所有相关因素。因此本书也采用了对于学术技术出版物来说非传统的路线来讲解：在深入嵌入式系统和微电子系统“硬核”之前，在前两章先做一些铺垫。

第 1 章，使电网可靠工作的需求—响应管理（DRM）。我们详细描述了集成可再生能源到电网中所引发的挑战，以及对小规模电力消耗智能化管理的需求。

第 2 章，智能小规模分散式能源系统（IDES）。指出我们必须重新设计现有的电网结构，从一个主要是中央化的网络到一个经过完全开发的分散式的网络，

以用来应对从化石能源到可再生能源的转变。小规模的分散式系统不仅贡献于能源供给，也利于未来电网的稳定，将断电区域限定在小范围。

第3章，智能电器的建模设计。我们讨论根据电网的可供电量来控制用电需求的方式与算法，以及通过建模与仿真来研究如何实现这些需求。这里主要关注小型建筑物和居民社区，我们还会引入一种新的设备分类，即耗能产品（Energy using Products，EuP）。

第4章，建筑自动化所需的无线网络通信标准。我们讨论一些有希望将能源管理集成到既有建筑中的无线通信技术，这些建筑只能有限度地进行结构改造。当然，对于新的建筑，可以将它设计成里里外外都集成能源管理，但对于所有需要装备的建筑来说它们只占一小部分。

第5章，智能嵌入式电器网络的安全。我们分析了威胁、流程和环境，进而引入了建立自动化所需的加密概念。

第6章，可供能源管理的嵌入式集成平台。对于把能源管理加入到用电产品中，并且满足严格的安全要求，以及低的功耗与成本，我们为此给出了一种高层硬件设计的建议。这个建议所采用的方法是基于平台的，这样会简化和加速微电子器件的设计，为它们在实际应用场景中所要满足的要求进行量身定制。

第7章，低功耗智能电器的供电。我们综合介绍了如何设计一个低功耗和低成本以及高效率的电源模块，包括超低的待机功耗。

在最后一章，即第8章，智能电表的能耗测量技术，我们讨论了与高度集成的智能电表相关的拓扑方面、架构方面以及电路设计方面的问题，这在本书所建议的微电子器件设计中是关键的一项特性。

3. 感谢

本书所介绍的多数成果来自欧洲委员会第七框架计划所部分资助的研究项目。在此深深地感谢这些研究成果，我们借此可以做正确的事情。

Peter Neumann 和 Christoph Grimm，汉诺威和维也纳，2012年4月。

1）Final Report on the August 14th Blackout in the United States and Canada，U. S. – Canada Power System Outage Task Force，https：//reports. energy. gov/

2）Worldwide Trends in Energy Use and Efficiency，Key Insights from IEA Indicator Analysis，International Energy Agency，http：//www. iea. org

3）www. fp7 – smartcode. eu

汉诺威，德国 Peter Neumann

凯泽斯劳滕，德国 Christoph Grimm

关 键 词

第 1 章——DRM（需求—响应管理），电网，可靠性

第 2 章——可再生能源，IDES（智能小规模分散式能源系统），智能电网

第 3 章——建模，仿真，智能电器，能源管理，建筑，可再生

第 4 章——无线通信，建筑自动化，无线个域网

第 5 章——安全，密钥分发，建筑自动化，家用，MITM（中间人攻击）

第 6 章——微电子，平台，能源管理，智能电器，无线个域网，智能卡

第 7 章——待机功耗，电源，高效率，智能电器

第 8 章——智能电表，功率测量，ASIC（专用集成电路），传感器接口，微电子

目　　录

译者序
原书前言：嵌入式系统可以减少二氧化碳排放吗？
关键词

第 1 章　使电网可靠工作的 DRM …… 1

1　简介 …… 1
2　电力市场的考量 …… 2
2.1　原理 …… 2
2.2　挑战 …… 3
3　用户的新角色 …… 5
3.1　用户分类 …… 5
3.2　DRM 活动 …… 7
3.3　电网的经济性与电网的稳定性 …… 9
3.4　DR 系统的基础功能构成 …… 9
3.5　具体案例：德国 …… 10
3.6　管理最后一英里 …… 10
4　分散式网络管理 …… 10
4.1　与因特网的相似性 …… 11
4.2　粗劣的分散式决策模型所产生的效果 …… 11
4.3　学习因特网的概念 …… 14
4.4　可用性、有效带宽与公平性 …… 16
4.5　探讨 …… 16
5　小结 …… 17
参考文献 …… 18

第 2 章　IDES …… 19

1　简介 …… 19
2　IDES 的定义 …… 20
2.1　有限 IDES 实现实例 …… 22
3　经济压力驱动能源系统转变 …… 23
3.1　工业与市场结构 …… 23
3.2　未预料的外部事件 …… 24

3.3 人口学 …… 24
3.4 认知的变化 …… 24
3.5 新知识 …… 24
3.6 社会需求 …… 25
4 IDES 在未来能源供给中的机遇 …… 25
4.1 电网基础结构与稳定性的问题 …… 25
4.2 高峰定价与实时电能市场 …… 27
4.3 社会级别经济分析 …… 27
4.4 可持续能源 …… 28
4.5 可扩展性 …… 28
4.6 波动性 …… 28
4.7 成本与经济性 …… 29
5 关键使能技术 …… 30
5.1 对于智能小型分散式能源的管理 …… 30
5.2 能源存储 …… 30
5.3 能源预测 …… 30
5.4 能源政策、立法与法规框架的革新 …… 30
6 未来：虚拟电厂与工业 …… 31
7 小结 …… 31
参考文献 …… 32

第 3 章 智能电器的建模设计 …… 33

1 简介 …… 33
2 抽象建模 …… 34
2.1 对公寓或建筑物仿真 …… 35
3 精化建模与应用场景 …… 36
3.1 节点内建模与精化 …… 36
3.2 WSN 建模与仿真 …… 37
4 ESL 仿真 …… 39
5 小结与展望 …… 40
参考文献 …… 41

第 4 章 建筑自动化所需的无线网络通信标准 …… 43

1 简介 …… 43
2 各协议标准概述 …… 43
2.1 IEEE 802.15.4 …… 43
2.2 ZigBee …… 44
2.3 6LoWPAN …… 44

2.4　无线 HART …… 44
2.5　ISA 100 …… 45
2.6　WiMi …… 45
2.7　SimpliciTI …… 45
2.8　KNX …… 45
2.9　EnOcean …… 45
2.10　Dash7 …… 45
2.11　WISA …… 46
2.12　ANT 和 ANT + …… 46
2.13　WiMax …… 46
2.14　ONE – NET …… 46
2.15　Z – Wave …… 46
2.16　Insteon …… 46
2.17　蓝牙 …… 46
2.18　WiFi …… 47
2.19　NFC …… 47
2.20　RuBee …… 47
3　典型无线应用场景 …… 47
3.1　低功耗传感器 …… 47
4　工业应用 …… 49
4.1　家庭与建筑自动化 …… 49
4.2　数据传输速率 …… 50
5　小结 …… 51
参考文献 …… 52

第 5 章　智能嵌入式电器网络的安全 …… 53

1　简介 …… 53
2　智能嵌入式电器网络所面对的攻击 …… 54
2.1　打补丁 …… 56
2.2　无线暴露 …… 56
3　密码学 …… 57
3.1　MITM …… 60
3.2　密钥分发 …… 61
3.3　安全过程 …… 63
3.4　端到端加、解密 …… 63
4　系统是如何被入侵的 …… 64
4.1　针对具体实现的攻击 …… 65
5　小结 …… 66

参考文献 …… 68

第 6 章 可供能源管理的嵌入式集成平台 …… 69

1 简介 …… 69
2 精细化能源管理的嵌入式网络平台 …… 69
3 需求与方法 …… 71
4 节点架构模型概述 …… 72
5 EM 节点硬件架构 …… 75
6 EM 节点内部的功耗管理 …… 79
7 小结 …… 81
参考文献 …… 81

第 7 章 低功耗智能电器的供电 …… 82

1 简介 …… 82
2 电容性电源 …… 82
2.1 限流电容 C_1 和稳压二极管 D_1 的功能与参数 …… 83
2.2 R_1 的功能与参数 …… 84
2.3 R_2 的功能与参数 …… 87
2.4 整体效率与整体损耗 …… 88
2.5 更换负载后的效率 …… 93
3 电容性电源的集成电路方案 …… 95
4 基础的降压变换器 …… 95
5 改进的降压变换器 …… 97
参考文献 …… 100

第 8 章 智能电表的能耗测量技术 …… 101

1 简介 …… 101
1.1 能耗测量单元 …… 101
1.2 通信接口 …… 101
2 能耗测量算法 …… 102
2.1 数学背景 …… 102
2.1.1 非线性负载的电流消耗：ω_n 的测量 …… 103
2.1.2 非线性负载的电流消耗：I_0 的测量 …… 103
2.2 算法设计 …… 103
2.2.1 量化细化 …… 105
2.2.2 为所需的动态范围进行细化 …… 106
2.3 ADC 的设计 …… 106
2.3.1 通过参数缩放细化算法 …… 110

2.3.2　对器件偏差进行算法细化 …… 111
3　系统构架设计 …… 115
3.1　PGA/缓冲器的设计 …… 116
3.1.1　∑－Δ ADC 的设计 …… 118
4　小结 …… 121
参考文献 …… 122

第 1 章　使电网可靠工作的 DRM

Holger Hermanns 和 Holger Wiechmann

1　简介

欧洲的电力系统正在发生飞快的变化。这是大量部署小型和中型的可再生能源发电设备所带来的直接结果，再加上影响可再生能源的光照强度和风速不可控这一事实。这些促使人们寻求一些新颖的方法来控制和管理电力系统网络，其核心目标是连续地匹配整个电网的发电量和用电量。如果不匹配，就会影响到供电的频率，这种频率偏移事实上是承担了生产与消费不平衡的缓冲作用。

这种平衡是由电力生产商根据周期性（每周、每天、每小时、每 15min）对用电量的预测来进行维护的。供电量和用电量的实时匹配由专门的电厂和控制回路，连续地监控并将频率稳定在 50Hz（在欧洲）这样的途径来完成。这种机制可以缓冲相当于峰值用电量的 10% 的抖动。

不过这种相沿成习的做法依赖于两个假设：电量生产是确定性的；是可控的过程。这两个假设在未来将不再成立，下面会进行解释。这会带来一个挑战性的控制难题，也就是说当发电和用电双方出现随机行为时要保持发电量和用电量紧密绑定。广义上来讲，目前欧洲主要电力供应商的焦点是想办法让用电量更加可控，以便让用户来缓冲发电量上不可控的抖动。为此创造出了需求—响应（Demand – Response，DR）管理 DRM 的概念。DR 系统旨在能够根据电网的总体和局部状态信息暂时减少或增加用电量。本章就问题领域进行介绍，并且纵览各种基于 IT 技术的方案来最终解决这一挑战。方案聚焦于分散式的 DR 控制方法以及它们的稳定性。本章先会细数各种技术的约束以及功能，接着会讨论一系列的分散式控制方法，它们采用并组合了日常使用的因特网与 LAN 协议中的理念。从可靠性、吞吐量和公平性方面来探查这些方法，结果是这种由因特网产生的打破同步的机制，尤其是引入随机化的方法成为整个解决方案能站得住脚的关键一环。

本章组织结构如下：在第 2 节概略地描述一下欧洲的电力市场；第 3 节通过几个具体的观察和预测，提出了终端用户在 DRM 策略中的角色；第 4 节对分散式 DRM 方法进行深入讨论，重点关注电网的稳定性以及从因特网中学到的经验；第 5 节对本章进行小结。