

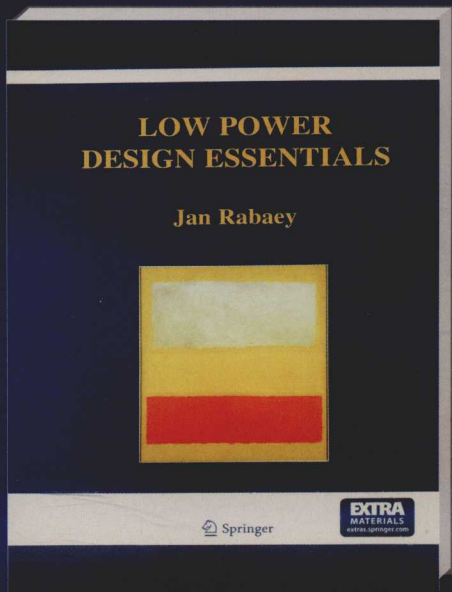
IEEE Fellow 集成电路专家基于其多年在世界知名高校和集成电路设计公司的教学材料编撰而成。

本书从电路、架构、时钟、存储器、算法和系统等不同层面，阐述低功耗电路设计挑战和方法，内配大量图例，方便学生及工程师自学。



电子与嵌入式系统
设计译丛

 Springer



Low Power Design Essentials

低功耗设计精解

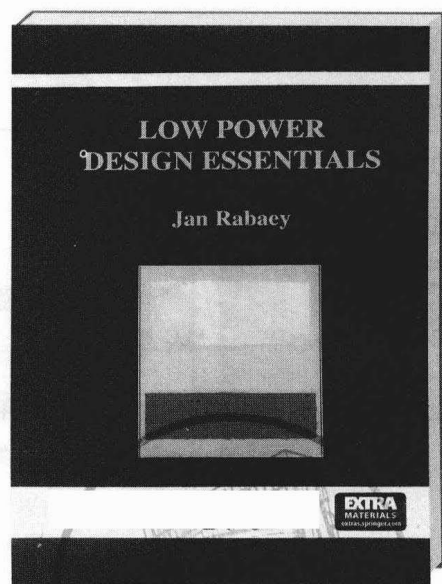
[美] 简·拉贝艾 (Jan Rabaey) 著

蒲宇 赵文峰 哈亚军 杨胜齐 译



机械工业出版社
China Machine Press

电子与嵌入式系统
设计译丛



Low Power Design Essentials

低功耗设计精解

[美] 简·拉贝艾 (Jan Rabaey) 著

蒲宇 赵文峰 哈亚军 杨胜齐 译



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

低功耗设计精解 / (美) 简·拉贝艾 (Jan Rabaey) 著; 蒲宇等译. —北京: 机械工业出版社, 2019.11

(电子与嵌入式系统设计译丛)

书名原文: Low Power Design Essentials

ISBN 978-7-111-63827-8

I. 低… II. ①简… ②蒲… III. 数字集成电路—电路设计 IV. TN431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 222940 号

本书版权登记号: 图字 01-2014-2860

Translation from the English language edition:

Low Power Design Essentials

by Jan Rabaey

Copyright © Springer Science+Business Media, LLC 2009

All rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

低功耗设计精解

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 张梦玲

责任校对: 殷虹

印刷: 三河市宏图印务有限公司

版次: 2020 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 186mm × 240mm 1/16

印张: 23

书号: ISBN 978-7-111-63827-8

定价: 129.00 元

客服电话: (010) 88361066 88379833 68326294

投稿热线: (010) 88379604

华章网站: www.hzbook.com

读者信箱: hzit@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

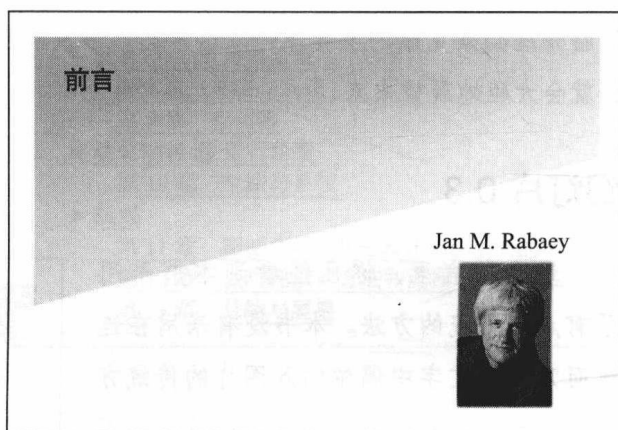
本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

前 言

幻灯片 0.1

欢迎阅读本书。

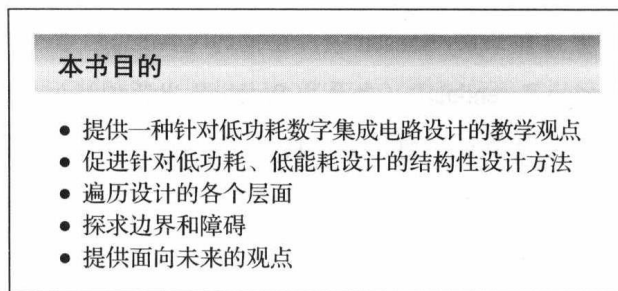
近年来，功耗和能耗已经成为数字电路设计中最引人注目的问题。一方面，功耗已经严重制约了电路的运行速度；另一方面，能耗节省技术已经让我们能够造出随处可见的移动设备，它们可以在单电池供电下支持更长的待机时间。



幻灯片 0.2

你可能很想知道，既然市场上已存在很多关于低功耗设计的书（我自己也合著过其中的一些），为什么还需要本书呢？答案很简单：所有的此类书都是汇编成册的，而且都是针对在功耗和能耗的主要设计课题上已颇具专业功底的读者而编写的。今天，这些课题变得尤为引人注目，我认为

需要一本适合教学的书。这意味着从基础入手，通过严格的方法论并采用统一的符号和定义来揭示不同的主题。本书采用最为先进的半导体制造工艺（90nm 及以下尺寸）结合实例阐明概念，主要适用于中短期低功耗设计课程，也非常适合想要通过自学来紧跟低功耗设计前沿的专业人士阅读。



前言也给了我机会去阐述一个长期让人们对低功耗设计感到望而生畏的问题。业内的许多人士似乎认为，只是将一些“应用技巧”点对点套用在设计上，只有大师级的人才能把低功耗弄得水落石出，低功耗方法这个概念是一个自相矛盾的说法。事实上，近年来，研究和设计人员已经表明，这些认识一点都不正确。过去几年里，最为重要的低功耗实现之一是最低能耗的设计，这虽然很有趣，但并非我们真正的追求。通常情况下，我们是在权衡电路延迟和能耗的同时，探求一个针对指定性能的最低能耗或者针对指定能耗的最优性能。一些探索优化设计的工具能帮助我们在设计的各个层次和级别上，根据丰富的信息来权衡电路延迟和能耗。

整本书将秉承这种方法。同时我们也会探求，如果要继续降低每次运算的能耗，我们将会面临哪些必须克服的主要障碍。这自然会涉及能量可以缩放的物理极限问题。只要有可能，我们就会大胆地展望未来。

幻灯片 0.3

这个前言里，你已经看到本书采用了有点非正统的方法。本书没有采用在连续而冗长的文字中偶尔插入图片的传统方式，取而代之的是相反的做法：首先是图片，文字放在其旁边作为注释。依照我的经验，一张图片比一页文字更能有效地传达信息（所谓“一图胜过千言万语”）。这种方式被 Willy Sansen 教授在他的《Analog

Design Essentials》（也是由 Springer 出版的）一书中首次采用。当我第一次看见他的书时，我立刻就被他的这个创意给迷住了。我对他的那本书看得越多，就越喜欢它。故而这本书……浏览它时，你会发现，幻灯片和注释发挥了完全不同的作用。这种格式的另一优点是，教师基本上立刻拥有了所有的课件。

新颖的格式

- 在 W. Sansen 教授编著的《Analog Design Essentials》(由 Springer 出版) 中首次采用
- 幻灯片用于快速列出关键点和问题，同时提供图形化视角
- 幻灯片的注释提供深入的讲解，解释具体原因，并将各个专题串联起来
- 一个用于专题讲座的理想工具

幻灯片 0.4

本书的大纲采用如下方式：在建立了基础之后，着手解决三种不同操作模式下的功耗优化——设计阶段、待机阶段和运行阶段。在每种模式下所使用的技术截然不同，但所有情况下我们都要把动态功耗和静态功耗同时优化——在今天的半导体工艺下，漏电功耗几乎可以与开关功耗（switching power）相提并论。因此，将它们分开并没有太大的意义。事实上，更好的设计往往需要对两者进行精心的权衡。最后，本书总结一些常用的课题，比如设计工具、功耗的限制，以及对未来的一些预测。

大纲

- 背景
 - 第1章 综述
 - 第2章 纳米晶体管及其模型
 - 第3章 功耗和能耗基础
- 优化功耗 @ 设计阶段
 - 第4章 电路层技术
 - 第5章 架构、算法和系统
 - 第6章 互联和时钟
 - 第7章 存储器
- 优化功耗 @ 待机阶段
 - 第8章 电路与系统
 - 第9章 存储器
- 优化功耗 @ 运行阶段
 - 第10章 电路与系统
- 展望
 - 第11章 超低功耗 / 电压设计
 - 第12章 低功耗设计方法和流程
 - 第13章 总结与展望

幻灯片 0.5

没有他人的帮助，是不可能完成这本书的。首先，对 Ben Calhoun、Jerry Frenkil、Dejan Marković 和 Bora Nikolić 的帮助以及合著某些章节的行为表示深深感激。另外，还有很多人对提供幻灯片制作和审阅本书初稿有帮助。特别要感谢那些对低功耗设计技术领域有深远影响和卓越建树的同行——Bob Brodersen、Anantha Chandrakasan、Tadahiro Kuroda、Takayasu Sakurai、Shekhar Borkar 和 Vivek De，在过去几十年中与他们的合作真是让我感到无比愉快和振奋。

致谢

感谢我的许多同事对这本书的贡献。没有他们，我是不可能完成这一套幻灯片的。要特别感谢以下做出了重大贡献的人：Ben Calhoun、Jerry Fenkil 和 Dejan Markovic。与他们一起工作绝对是一种享受。

另外，很多人也为本书提供了资料或者审阅了本书的部分章节，衷心地感谢他们。他们是：E. Alon、T. Austin、D. Blaauw、S. Borkar、R. Brodersen、T. Burd、K. Cao、A. Chandrakasan、H. De Man、K. Flautner、M. Horowitz、K. Itoh、T. Kurdoda、B. Nikolic、C. Rowen、T. Sakurai、A. Sangiovanni-Vincentelli、N. Shanbhag、V. Stojanovic、T. Sakurai、J. Tschanz、E. Vittoz、A. Wang，以及我在伯克利无线研究中心的研究生。

还要感谢那些资助了我对低功耗设计技术和方法进行研究的基金资助部门。特别感谢 FCRP 项目及其成员公司，以及美国国防部高级研究计划署。

幻灯片 0.6 ~ 幻灯片 0.7

每章末尾都给出该章所引用的一组参考文献。对于你尤其感兴趣的那些低功耗设计主题，这两个幻灯片列举了许多常用的参考文献、综述论文以及富有远见的演讲稿。

低功耗设计——参考文献

- A. Chandrakasan and R. Brodersen, *Low Power CMOS Design*, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- A. Chandrakasan and R. Brodersen, *Low-Power CMOS Design*, IEEE Press, 1998 (Reprint Volume).
- A. Chandrakasan, Bowhill, and Fox, *Design of High-Performance Microprocessors*, IEEE Press, 2001.
 - Chapter 4, "Low-Voltage Technologies," by Kuroda and Sakurai
 - Chapter 3, "Techniques for Leakage Power Reduction," by De, et al.
- M. Keating et al., *Low Power Methodology Manual*, Springer, 2007.
- S. Narendra and A. Chandrakasan, *Leakage in Nanometer CMOS Technologies*, Springer, 2006.
- M. Pedram and J. Rabaey, Ed., *Power Aware Design Methodologies*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- C. Piguet, Ed., *Low-Power Circuit Design*, CRC Press, 2005.
- J. Rabaey and M. Pedram, Ed., *Low Power Design Methodologies*, Kluwer Academic Publishers, 1995.
- J. Rabaey, A. Chandrakasan, and B. Nikolic, *Digital Integrated Circuits - A Design Perspective*, Prentice Hall, 2003.
- S. Roundy, P. Wright and J.M. Rabaey, *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks*, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- A. Wang, *Adaptive Techniques for Dynamic Power Optimization*, Springer, 2008.

在 2007 年春季休假期间，当我在欧洲旅行时，我欣然把本书内容汇编成册，这是一个美好的过程。我希望各位读者也喜欢本书。

低功耗设计——精选论文

- S. Borkar, "Design challenges of technology scaling," *IEEE Micro*, 19 (4), p. 23–29, July–Aug. 1999.
- T. Kuroda, T. Sakurai, "Overview of low-power ULSI circuit techniques," *IEICE Trans. on Electronics*, E78-C(4), pp. 334–344, Apr. 1995.
- Journal of Low Power Electronics (JOLPE), <http://www.aspbs.com/jolpe/>
- Proceedings of the IEEE, Special Issue on Low Power Design, Apr. 1995.
- Proceedings of the ISLPED Conference (starting 1994)
- Proceedings of ISSCC, VLSI Symposium, ESSCIRC, A-SSCC, DAC, ASPDAC, DATE, ICCAD conferences

——Jan Rabaey

目 录

前 言	
第 1 章 综述	1
第 2 章 纳米晶体管及其模型	25
第 3 章 功耗和能耗基础	57
第 4 章 优化功耗 @ 设计阶段——电路层技术	80
第 5 章 优化功耗 @ 设计阶段——架构、算法和系统	117
第 6 章 优化功耗 @ 设计阶段——互联和时钟	155
第 7 章 优化功耗 @ 设计阶段——存储器	185
第 8 章 优化功耗 @ 待机阶段——电路与系统	211
第 9 章 优化功耗 @ 待机阶段——存储器	237
第 10 章 优化功耗 @ 运行阶段——电路与系统	254
第 11 章 超低功耗 / 电压设计	292
第 12 章 低功耗设计方法和流程	321
第 13 章 总结与展望	350

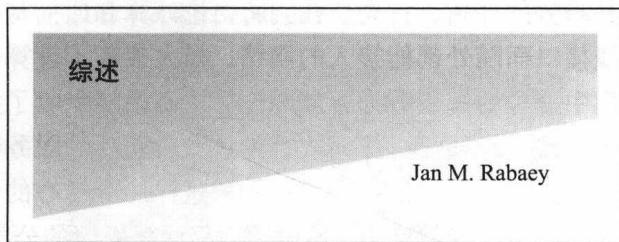
第 1 章

综 述

幻灯片 1.1

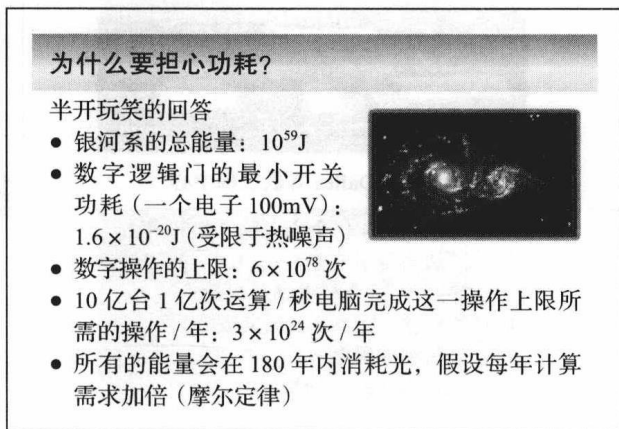
这一章将讨论为什么在如今复杂的数字集成电路中功耗和能耗已成为主要的设计问题之一。我们首先从功耗的角度，分析不同的应用领域，并评估它们各自的具体问题和要求。大多数针对未来的预测显示这些问题极有可能不会消失。事实上，一切都似乎

表明，这些问题甚至会加剧。接下来，我们评估技术发展趋势——企望工艺尺寸的缩小可以帮助解决一部分的问题。但是，互补金属氧化物半导体（CMOS）尺寸缩小似乎只会使问题变得更糟。因此，通过设计方案将能耗、功耗控制在一定范围内是最主要的机制。找到核心的设计主题和技术，并且设法将它们系统地、有方法地应用起来，是本书的主要目的。在相当长的时期内，低功耗设计包括一系列特有的技术。要将这些技术成功而广泛地推广，并避免太多“人为干预”，需要把这些技术和传统的设计流程紧密结合。然而，低功耗设计技术和方法之间的差距依然存在。



幻灯片 1.2

设计人员和应用开发人员担心功耗的原因有许多。近年来，人们迫切提出对“绿色电子”产品的需求。虽然过去电子产品的功耗只占整个功耗预算的一小部分，这种情况在过去几十年里已经发生了重大的变化。在办公室和家庭里，台式机和笔记本电脑被广泛使用。消费电子器件以及机顶盒的待机功耗一直快速增长，以至于在我写本书的时候，它们已经和一个普通容量冰箱的功耗大



为什么要担心功耗？

半开玩笑的回答

- 银河系的总能量： 10^{59}J
- 数字逻辑门的最小开关功耗（一个电子 100mV）： $1.6 \times 10^{-20}\text{J}$ （受限于热噪声）
- 数字操作的上限： 6×10^{78} 次
- 10 亿台 1 亿次运算 / 秒电脑完成这一操作上限所需的操作 / 年： 3×10^{24} 次 / 年
- 所有的能量会在 180 年内消耗光，假设每年计算需求加倍（摩尔定律）

2 低功耗设计精解

小相提并论了。电子产品功耗正变得与现代化的汽车功耗相当。这些趋势在未来只会更加明显。

在这张幻灯片中，针对不断增长的电子产品功耗作为功耗预算的一部分，我们可以做一些直观的推理。如果摩尔定律继续存在，而未来的计算量保持每年增长1倍，我们银河系的总能量将在非常短的180年内被耗尽（即使我们假设每次数字运算都消耗最少的能量）。然而，正如戈登·摩尔本人在2001年的ISSCC会议上所说的，“没有指数是永远的”，随后迅速指出，“…但永远可以延迟”。

幻灯片 1.3

此后的一系列幻灯片针对一些数字集成电路领域占主导地位的应用领域进行功耗需求及其趋势的评估。首先，我们将讨论计算和通信基础设施。互联网的问世，加上采用有线和无线接口而随处都能接入的网络，极大改变了计算的性质。今天，由大公司运营的在不同地点集中处理的海量数据存储和计算中心已经吸收了大量的世界各地的来自公司和个人的运算负荷。这一趋势没有任何放缓的迹象，而新的服务器群正以惊人的速度并入网络。但是，这种集中处理是要付出一定代价的。这样一个中心的“计算密度”以及随之而来的功耗是非常巨大的。引用谷歌公司（最倡导远程计算概念的公司之一）Luis Barosso的话，数据中心的成本仅由每月的电费决定，而非硬件或者维护的费用。电费来自于电子设备的功耗，以及消除散热的成本——也即空调。这就解释了为什么大多数数据中心的建立地点都经过了仔细考虑，在这些地点容易获取能量也存在行之有效的冷却技术（比如接近主干河流——有点可怕地类

功耗：主要的设计限制（1）

大型数据中心的成本由电费决定

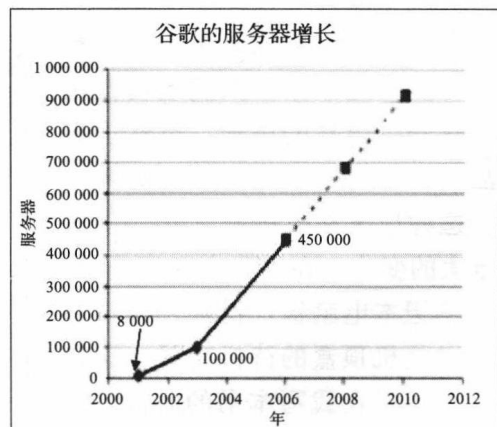


俄勒冈 Dalles 谷歌数据中心

- 世界范围内 4 亿个人电脑（2000 年）
 - 被认为每年消耗 $0.16 \text{TKW} \cdot \text{h} (10^{12})$
 - 等同于 26 个核电站总电量
- 每年超过 $1 \text{GW} \cdot \text{h}$ 用来致冷
 - 包括制造用电

[Ref: Bar-Cohen et al., 2000]

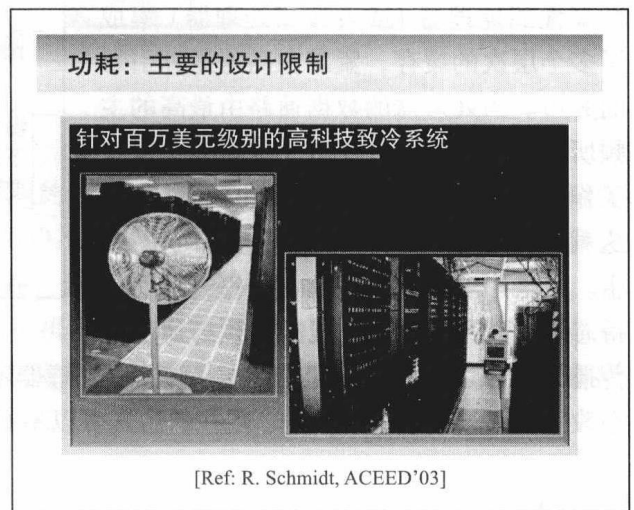
NY Times, June 06



似于核电厂)。虽然数据中心代表了由计算和通信基础设施所消耗的功耗的主要部分, 其他的组成部分也不可忽略。高速路由器链接全球各地的数据, 以及让我们能够以无线方式连接到网络无线基站(接入点), 这都对功耗带来了挑战。由于它们的位置, 功耗的可获取性以及冷却技术的有效性经常是非常有限的。最后, 分布式计算和通信基础设施也不能忽略。在办公室、工厂、家庭的有线和无线数据路由器、后台计算服务器和台式电脑加在一起也带来了一个可观的功耗。这些日益增长的计算基础设施导致了很大一部分办公室里的空调费用。

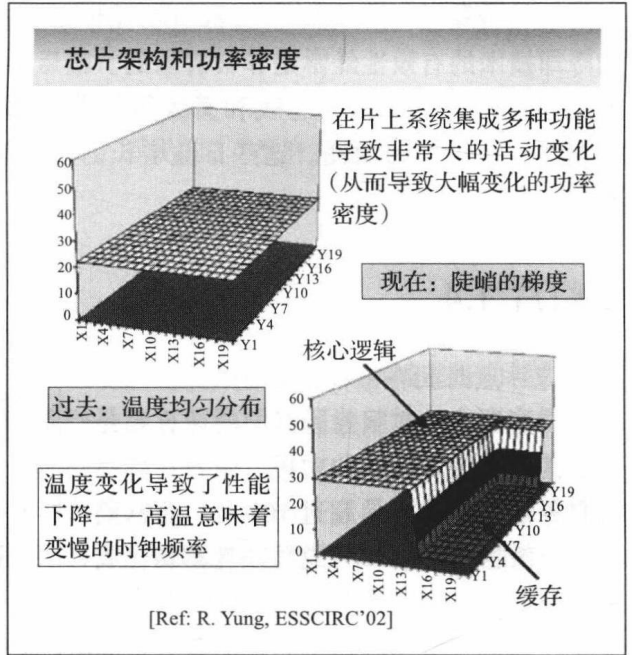
幻灯片 1.4

花一点时间在散热问题是值得的。一个典型的、放在服务器群中的计算服务器能消耗高达 20KW 的功耗。服务器群中的服务器数量很容易超过 100 台, 而它们的总功耗能达到 2MW (这些功耗都转化成了热量)。设计空调系统、房间中空气流通过路径和机架是相当复杂的, 需要许多的模型和分析。一个不良设计所带来的影响可以很大(即重大失误), 或者很小。在这样一个数据中心的设计中, 冷却的空气从地板引出, 它从机架上的刀片表面上升从而逐渐被加热。这样就形成了一个温度梯度, 这可能意味着更靠近地板的处理器比在顶部的处理器更快! 即使采用最好的空气冷却实践技术, 预测数据中心的整体动力学也非常困难, 并且可能导致冷却不足。有时候一些快速的简易修复是唯一的拯救办法, 正如在这些可笑的图片中看到的那样。这些图片是由 Roger Schmidt 提供的, 他是 IBM 的杰出工程师、IBM 大型计算机散热系统设计和管理的高级专家。



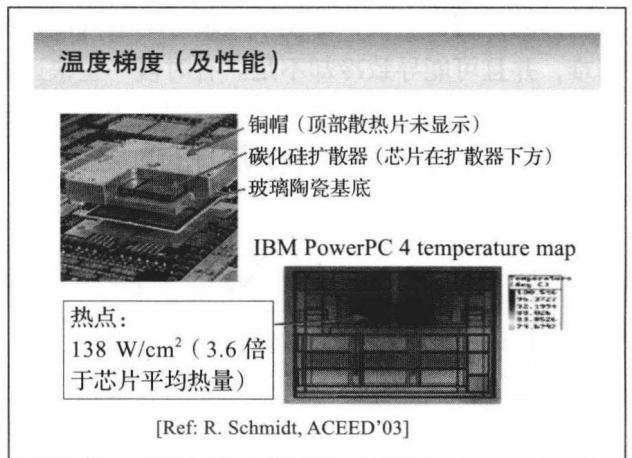
幻灯片 1.5

机架上的温度梯度会造成性能差异，同样的事实也存在于今天先进的高性能处理器之中。过去，芯片尺寸足够小，并且芯片上的运算工作量非常平均。这就形成了芯片表面的平坦的温度曲线。随着片上系统（SoC）的出现，越来越多的功能被集成在小尺寸的芯片之上，往往具有非常不同的工作负载和活动属性。例如，大多数高性能处理器（或者多核处理器）集成了多个层次的缓存，紧靠在高速运算引擎的旁边。当处理器的数据通路由最高的主频所控制，并且几乎 100% 时间都在保持工作时，它的功耗比缓存的功耗高很多。这就导致了芯片内热点和温度梯度的产生。这会影响元件的长期可靠性，从而使得芯片的验证工作非常复杂。执行速度和传播延迟都强烈地受温度的影响（取决于处理器不同的工作模式），芯片上的温度梯度可以动态改变。和过去不一样的是，现在的仿真可以不必在单一温度下进行。



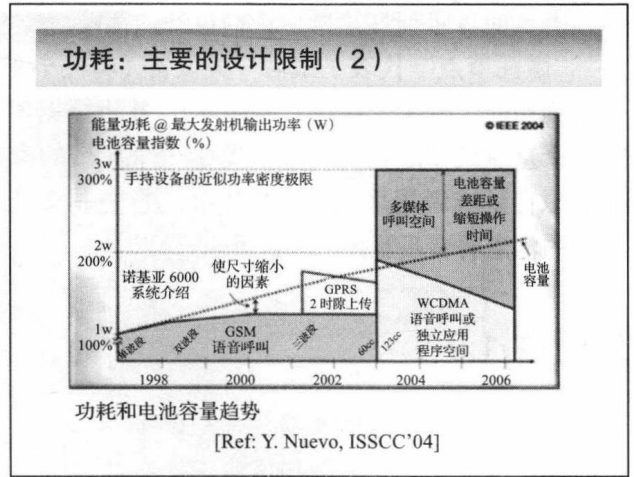
幻灯片 1.6

这张幻灯片非常好地展示了这些热梯度的存在。它展示了 IBM PowerPC 4（20 世纪 90 年代的一款处理器）的温度情况。处理器核到缓存之间有超过 20℃ 的温度差异。更令人吃惊的是，热点（数据流水线）的发热量几乎等于 140W/cm²。这是冷却系统散热能力的 3.6 倍。为了纠正这种不平衡，不得不构建一个复杂的组件去让热量能从更为广阔的芯片面积上得以散开，从而改善散热过程。在高性能原件中，封装的费用已经成为总成本中的重要部分。能帮助减轻封装难题的技术（要么通过减小梯度或者通过减小所选择子系统的功耗密度）是至关重要的。结构化的低功耗设计方法，正如本书所提倡的，能做到这一点。



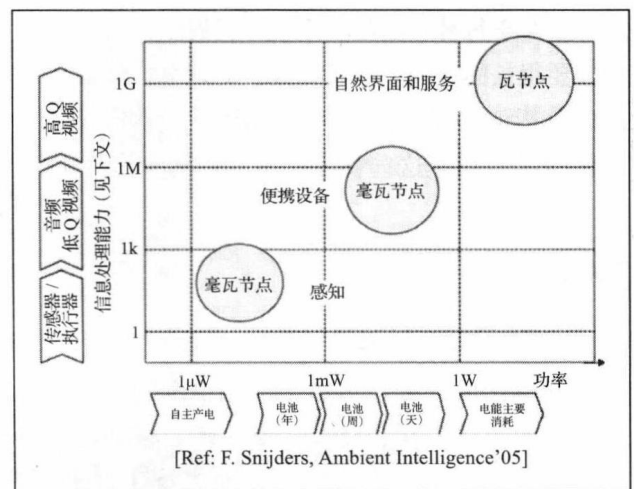
幻灯片 1.7

低功耗 / 能耗变得如此重要的第二个原因是，移动电子设备的兴起。虽然移动消费电子已经存在了相当长的一段时间（FM 收音机、便携 CD 播放器），但却是笔记本电脑和数字蜂窝手机的同步成功成为驱动低能耗计算和通信的原动力。在用电供电的设备里，能量的存储是有限的，并且功耗的大小决定了电池的使用时间（对不充电时候的电池而言）以及多久时间需要充电。电池容量、尺寸以及重量普遍是由应用或者相关设备所决定的。蜂窝电话可以允许的电池尺寸通常设置为最大 $4 \sim 5\text{cm}^3$ ，这是由用户可以接受的尺寸所制约的。给定某个既定的电池技术，设备在两次充电之间的预计可运行时间——今天的手机用户期望能有数天的待机时间以及 $4 \sim 5\text{h}$ 的通话时间——就划定了不同运行模式下的最高功耗，这也决定了哪些功能可以由该设备支持，除非低功耗设计能有重大突破。比方说，一部手机的平均功耗限制大概是 3W ，这受限于今天的电池技术。这个限制反过来决定了你的手机能否支持数字视频广播、MP3 功能以及 3G 网络以及 WIFI 互联。



幻灯片 1.8

从这个角度来看，是有必要把消费和计算设备划分为若干分类——基于它们的能量需求以及功能。在“环境智能”未来之家（由飞利浦公司的 Fred Boekhorst 在他 2002 年 ISSCC 的主旨演讲中所提出的术语），我们可以识别三种不同类型的设备。首先，我们有“瓦节点”（功耗大于 1W ）。这就是那些连接到电网的节点，它们提供大约 10 亿次运算 / 秒的计算能力，实现计算和数据服务的功能，也提供路由和无线接入。能源的可获取性，以及由此获得的运算能力，让它们成为了实现先进多媒体处理、数据处理和用户界面交互的最理想的平台。第二类设备称为“毫瓦节点”（在



在

1mW 和 1W 之间)。它们工作在几百万次运算 / 秒，这代表着移动、不受束缚的设备，比如掌上电脑、通信设备（连接到广域网和局域网）以及无线显示器。这些设备由电池供电，它们归类于前一张幻灯片所讨论的设备的范畴。

“微瓦节点”代表了最后一类设备（功耗小于 1mW）。它们的功能是向网络添加认知，提供感测功能（温度、存在、运动等），并将数据发送给更强大的节点。1000 次运算 / 秒的计算能力严重制约了它们的功能。鉴于一个典型的家庭可能包含了数量庞大的这种节点，它们必须能源自足或者用采集的能量供电。它们非常低的功耗水平使后者成为可能。关于这类节点更多的信息将在后面的幻灯片里提到。

幻灯片 1.9

通过上面的讨论，很明显地产生了一个问题：电池技术正走向何方？正如在前面的幻灯片 1.7 已经看到的那样，电池的容量（即对于给定的电池容量，可以被存储和使用的能量）大约每 10 年增长 1 倍。这也就意味着每年 3% ~ 7% 的改进（当有新技术出现的时候这个斜率会有所变化）。这个增长速度大幅滞后于摩尔定律，即计算的复杂度在每 18 个月之内就会增加 1 倍。电池技术受到的严峻挑战的背后原因是化学工艺，因为提高电池容量往往需要新的化学品和电极材料，而这些都是非常难做到的。此外，对于每种新的材料来说，发展制造过程需要很长的时间。尽管如此，对现有化学品的分析似乎显示出了巨大的潜力。醇或者汽油的能量密度大约比锂聚合物高了两个数量级。可惜的是，对于这些物质的有效性和安全性的担忧，让它们很难被利用在小容量的电池之中。

电池存储：一个限制因素

- 基础科技进步很小
 - 利用化学反应储能
- 电池容量每年增加 3% ~ 7% (在 1990 年代翻倍，之前趋势平缓)
- 能量密度 / 尺寸和安全操作都是限制因素

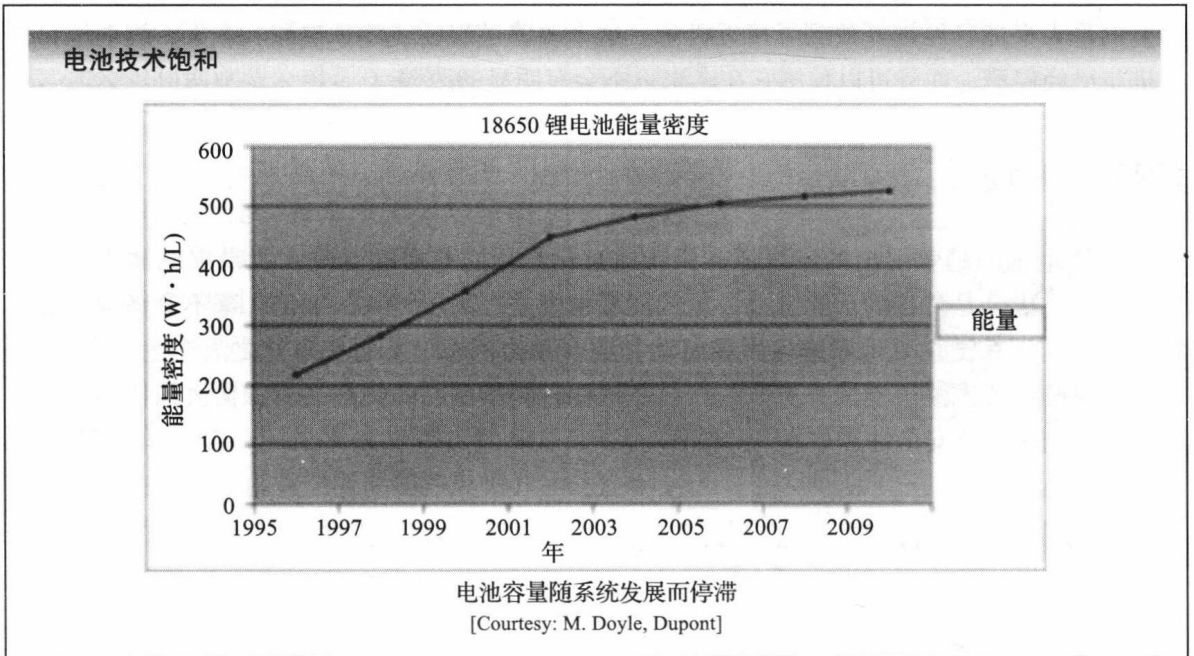
材料能量密度	KW · h/kg
汽油	14
铅酸	0.04
锂聚合物	0.15

关于不同材料的能量密度的更多信息，请查阅 http://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density

幻灯片 1.10

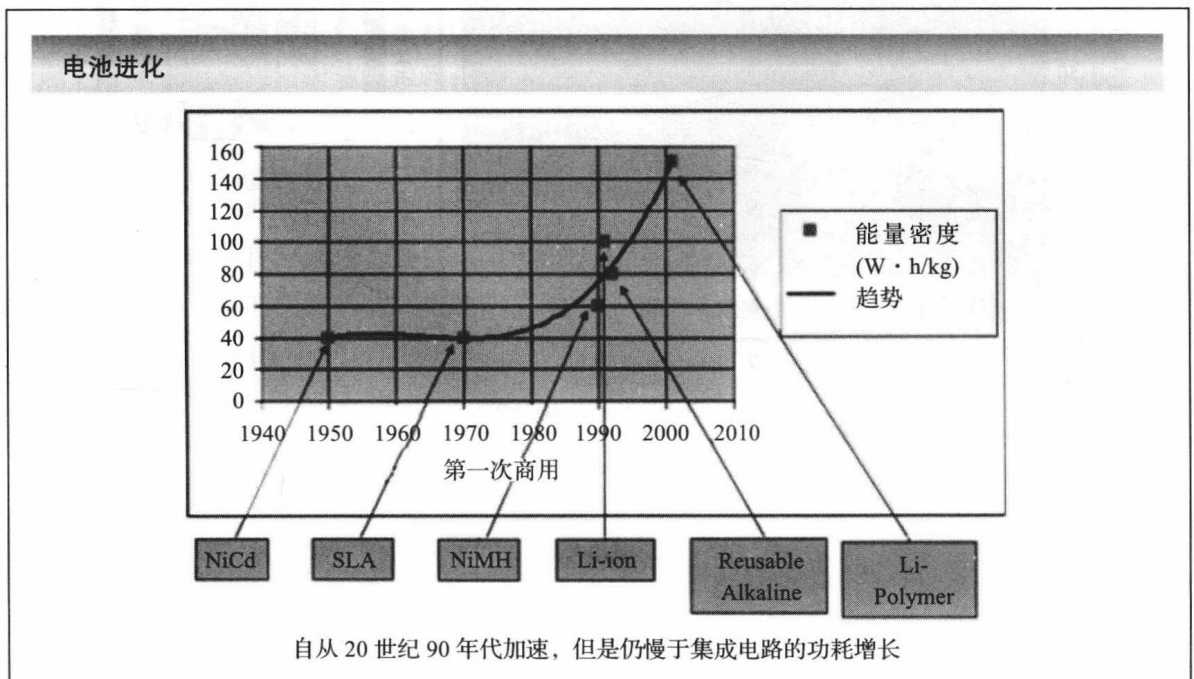
事实上，电池容量的历史趋势有很大的变化。截至 20 世纪 80 年代，很少或者说根本没有取得任何进展，再由于应用范围的狭窄，几乎没有动力去推进电池发展。手电筒可能是最主要的应用。在 20 世纪 90 年代，移动应用开始腾飞。急剧开展的研究结合先进制造策略极大地改变了这个斜率，将电池容量在近十年内提高了 4 倍。遗憾的是，自 21 世纪初，这个过程开始有些停滞。电池容量的主要改进只能依靠引入崭新的电池化学品。也需要注意的是，一个电池容量（即可以从它提取出的能量）也取决于电池的放电曲线。缓慢地消耗电池

会比很快放电获得更多的能量。因此，将电池结构和手头的应用进行匹配是非常值得的。



幻灯片 1.11

电池所能提供的储能容量最终由所采用材料的基本化学品属性所决定，这一事实被清楚



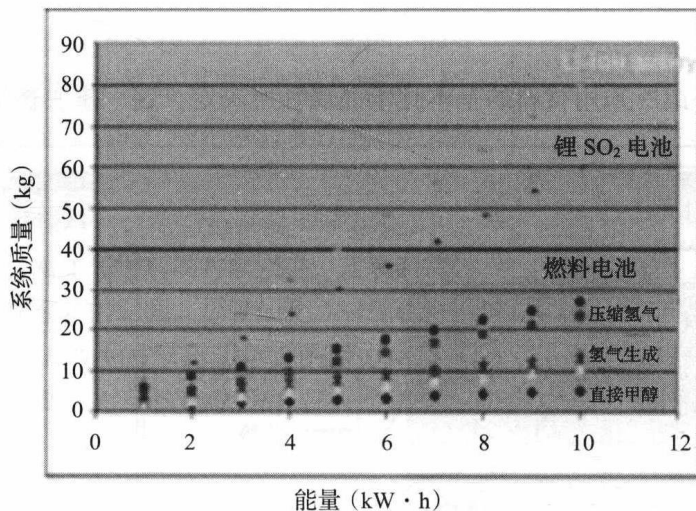
地在这张幻灯片所诠释。在 20 世纪 90 年代，锂电池的容量被大幅改善。这主要是得益于更好的工程技术：改善电极结构，更好充电技术的产生，以及先进的电池系统设计。由于材料固有的最大潜能已经被开放到了接近极致，这个改善过程已经趋于饱和。今天，锂电池科技的进步已经停滞，而且可以预测它在未来也不会有明显的改善。

幻灯片 1.12

从所呈现的趋势引出的底线是，只有通过化学品的革命性变化才能带来电池容量的增长。显然，机会是存在的。比方说，氢的能量密度是锂离子的 4 ~ 8 倍。毫不奇怪地，氢燃料电池目前正在被认真地考虑应用在电动和混合动力汽车上。氢气氧化之后产生水和电流。乙醇、甲醇或者汽油可能成为更好的燃料。这些材料所面临的挑战是，如何去保持小规模而高效率，同时保持安全性和可靠性。

需要更高的能量密度

燃料电池可以增加一个数量级的存储能量
例如：甲醇的为 $5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$



[Ret: R. Nowak, SECA'01]

