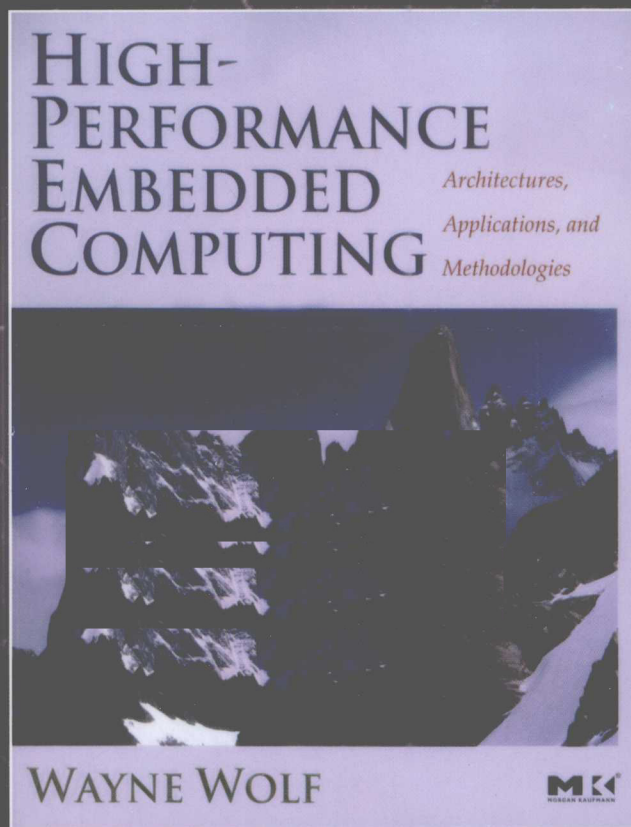




计 算 机 科 学 丛 书

高性能嵌入式计算

(美) Wayne Wolf 著 鞠大鹏 王海霞 汪东升 译
普林斯顿大学 清华大学



High-Performance Embedded Computing
Architectures, Applications, and Methodologies

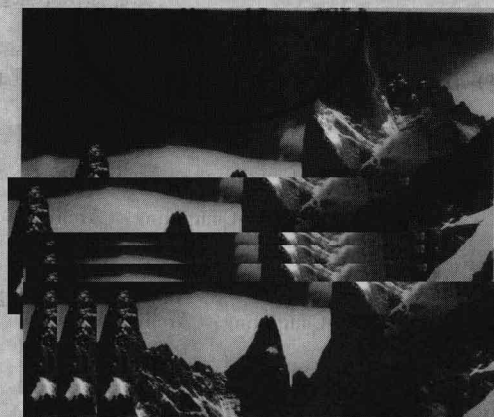


机械工业出版社
China Machine Press

计 算 机 科 学 丛 书

高性能嵌入式计算

(美) Wayne Wolf 著 鞠大鹏 王海霞 汪东升 译
普林斯顿大学 清华大学



High-Performance Embedded Computing

Architectures, Applications, and Methodologies



机械工业出版社
China Machine Press

本书从性能、功率、能耗等方面阐述了嵌入式系统与传统通用计算机系统在设计上的区别。本书第1章是背景资料,第2章介绍嵌入式系统使用的各种处理器,第3章研究程序,第4章讨论多处理器系统,第5章介绍多处理器体系结构,第6章介绍多处理器的软件及其调度算法,第7章专注于硬件和软件的协同设计。全书包含大量实例,涵盖许多嵌入式计算领域的高级主题,适合已熟悉嵌入式软硬件基础知识的技术人员和学生阅读。

Wayne Wolf: *High-Performance Embedded Computing: Architectures, Applications, and Methodologies* (ISBN 978-0-12-369485-0).

Copyright © 2007 by Elsevier Inc. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-259-673-4.

Copyright © 2010 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by China Machine Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由机械工业出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本版仅限在中国境内(不包括中国香港特别行政区及中国台湾地区)出版及标价销售。未经许可之出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

封底无防伪标均为盗版

版权所有,侵权必究

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号:图字:01-2006-6515

图书在版编目(CIP)数据

高性能嵌入式计算/(美)沃尔夫(Wolf, W.)著;鞠大鹏等译. —北京:机械工业出版社, 2010.5

(计算机科学丛书)

书名原文: *High-Performance Embedded Computing: Architectures, Applications, and Methodologies*

ISBN 978-7-111-28822-0

I. 高… II. ①沃… ②鞠… III. 微型计算机—系统设计 IV. TP360.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第076716号

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:刘立卿

三河市明辉印装有限公司印刷

2010年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·21.75印张

标准书号:ISBN 978-7-111-28822-0

定价:65.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

客服热线:(010) 88378991; 88361066

购书热线:(010) 68326294; 88379649; 68995259

投稿热线:(010) 88379604

读者信箱:hzsj@hzbook.com

出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域中取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的计算机产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson, McGraw-Hill, Elsevier, MIT, John Wiley & Sons, Cengage 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Andrew S. Tanenbaum, Bjarne Stroustrup, Brain W. Kernighan, Dennis Ritchie, Jim Gray, Alfred V. Aho, John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman, Abraham Silberschatz, William Stallings, Donald E. Knuth, John L. Hennessy, Larry L. Peterson 等大师名家的一批经典作品，以“计算机科学丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。大理石纹理的封面，也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力襄助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播，有的还专程为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近百个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着计算机科学与技术专业学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

译者序

嵌入式计算应用非常广泛，发展历史也很悠久。Wayne Wolf 是这一研究领域的翘楚，本书是他在嵌入式计算系统设计方面的代表作。该书针对诸如空间、时间及功耗等关键性嵌入式系统资源，从设计方法、实现机制到优化技术提供了一整套详尽论述，同时还大量涉及了与多处理器系统相关的重要设计问题。

尽管嵌入式计算利用了很多已有的计算机科学和工程技术，但它也提出了一些独特的挑战。首先，绝大多数嵌入式系统必须实时完成任务，需要软硬件设计人员的设计思想有重大转变。其次，嵌入式计算更加侧重于功耗。要满足这两点特定需求，更好地设计这类更加复杂的系统，有必要对嵌入式硬件和软件特性展开深入研究。本书的目标是为新兴的高性能嵌入式计算领域提供一个参考框架，包含了绝大部分技术人员和学生感兴趣的高级嵌入式计算系统的课题。在所涉及课题的选择上，Wayne Wolf 力图确保它们是在嵌入式计算领域中独有的课题和结论。同时作者特意介绍了一些来自其他学科的背景材料，以此为平台更好地探讨嵌入式系统问题。

尤为难能可贵的是，Wayne Wolf 除了引经据典，竭尽所能为每个问题找到其主要解决方法的代表性文献之外，还亲自指导了书中提到的许多课题的研究工作，而且在许多他构造的嵌入式系统中实践了提出的设计方法，收到了良好的效果。

要做好本书的中文翻译工作的确很不容易，不仅是因为书中的许多新技术、新方法，而且作者在各个相关的研究领域都有所涉猎，对于初次接触的的我们来说，翻译本书也是一个经验积累、不断学习改进的过程，因此本书延迟了很长一段时间才完稿。当然，书中译文不确切的地方可能会有不少，我们表示歉意的同时也衷心恳请读者批评指正。

在中译本行将出版之际，对参与本书翻译及校对工作的刘振宇博士等表示由衷的感谢，正是他们辛苦、细致的工作才促成今天这一成果的实现。

译者

2010 年 5 月

前 言

本书的目标是为新兴的高性能嵌入式计算领域提供一个参考框架。计算机的发展已经远远超越了早期的 8 位微控制器时代。如今，嵌入式计算机由能够运行成千上万行代码的微处理器构成。它们实时运行并且功耗很低。为了适当地设计这类系统，人们已经对嵌入式硬件和软件特性展开了深入研究。现实生活中的飞机、手机和数字电视等都依赖于高性能嵌入式系统。我们对如何设计这类系统已经相当了解，但还有更多的知识需要掌握。

实时控制实际上是计算机最初的应用之一——第 1 章中提到的 MIT Whirlwind（旋风）计算机研制于 20 世纪 50 年代，用于武器控制。但微处理器使嵌入式计算开始在计算机应用领域中占据相对非常重要的位置。尽管复杂的嵌入式系统在 1980 年以前就已经开始使用，但嵌入式计算作为一个学术研究领域直到 20 世纪 90 年代才形成。即便现在，许多传统的计算机科学和工程学科在探讨嵌入式计算课题时并没有充分了解其他学科研究领域中的相关工作。

嵌入式计算机应用非常广泛，每年售出数十亿台。成千上万的专业人员设计嵌入式系统，至少 50 万程序员从事嵌入式软件编程。尽管嵌入式系统在构成细节上千差万别，但应用于嵌入式计算领域的原理是通用的。有些原理几十年前就已经被发现，而另外一些则是近期刚被人们知晓的。嵌入式计算作为一个研究领域，其发展促使嵌入式系统设计从一种技术转变为一门学科，这种转变适当地使某些重要的、有时甚至是对安全至关重要的任务可以完全托付给嵌入式计算机来完成。

关于这个领域，有理由提出这样一个问题：它与传统的计算机系统课题——例如客户端/服务器系统或科学计算——相比有什么区别？我们是否仅仅将相同的理论应用于更小的系统，还是需要研究一些新的东西？我相信，尽管嵌入式计算利用了很多计算机科学和工程技术，但它也提出了一些特有的挑战。

首先，绝大多数嵌入式系统必须实时完成任务。这需要软件和硬件设计人员的设计思想有重大转变。其次，嵌入式计算更加侧重于能耗。能耗在计算机系统的各个方面都是十分重要的，但嵌入式应用与很多通用系统相比，更加注重能耗效率。上述两点导致要满足特定的需求，嵌入式系统与通用系统相比，需要更加复杂的设计。

本书假设读者已经熟悉嵌入式硬件和软件的基础知识，例如在《计算机组成原理》中可能提到的内容。在此基础上，本书探讨一系列深入的课题。在要介绍的课题的选择上，我力图确保它们是在嵌入式计算领域中独有的课题和结论。我特意介绍了一些来自其他学科的背景材料，从而做好准备以便更好地探讨嵌入式系统问题。

下面是本书简要的介绍：

- 第 1 章为其他章提供了一些重要的背景材料。其中将定义一组嵌入式计算领域的中心课题。它着眼于方法论和设计目标。我们研究了计算模型，它是应用特性的参考

框架。这一章还研究了一些基于嵌入式计算的重要应用，为全书中将要用到的一些术语提供背景。

- 第2章着眼于一些嵌入式系统中使用的不同类型的处理器。我们考虑优化处理器性能的技术，例如电压调整和嵌入式CPU中的处理器内存体系。我们着眼于优化嵌入式CPU的技术，例如代码压缩和总线编码，以及模拟处理器技术。
- 第3章研究程序。编译过程的后端有助于决定代码的质量，它是第一个主题。我们将在内存系统优化方面花费很多时间进行研究，因为内存特性是性能和能耗的主要决定性因素。我们考虑性能分析，包括模拟和最坏执行时间分析。我们还讨论计算模型如何反映到编程模型和编程语言中。
- 第4章转向多处理器系统。我们将研究和比较调度算法，包括语言设计和调度机制之间的交互。我们评估操作系统体系结构及其导致的负载。我们还会考虑检验多处理器系统特性的方法。
- 第5章集中讨论多处理器体系结构。我们考虑交通工具中使用的紧耦合的多处理器和物理分布的系统。我们描述体系结构及其组件：处理器、内存和网络。我们还将讨论多处理器的设计方法。
- 第6章着眼于多处理器的软件和它们的调度算法。我们还研究多处理器中动态资源分配使用的中间件体系结构。
- 第7章专注于硬件和软件的协同设计。我们研究用于描述嵌入式应用和目标体系结构的不同模型。我们将会涉及很多用于协同综合的算法，并比较这些算法使用的模型和假设。

希望这本书能涵盖高级嵌入式计算系统的技术人员和学生感兴趣的绝大部分主题。有些主题的参考文献很少：嵌入式系统的软件测试就是一个典型例子。我试图为每个问题找到其主要解决方法的代表性文章。但是很遗憾，在很多情况下我无法充分描述一个特定的问题。

这本书是关于嵌入式计算的；它略微涉及但没有详细阐述下面的一些相关领域：

- 应用——嵌入式系统被设计用来支持例如多媒体、通信等应用。由于对应用领域有一定了解非常重要，因此第1章介绍了一些关于应用的基本概念。关于这些应用领域的深入介绍请查阅其他文献。
- VLSI——尽管片上系统是嵌入式系统的重要介质，但它们不是唯一的介质。汽车、飞机和很多其他重要系统由分布式嵌入网络控制。
- 混合系统——混合系统研究连续系统和离散系统之间的交互。这是一个重要且有趣的领域，很多嵌入式系统能够利用混合系统技术，但混合系统有专门的文献进行阐述。
- 软件工程——软件设计是一个内容很丰富的领域，它提供了重要的基础。但对于特定于嵌入式计算的很多问题并未回答。

我要感谢很多在编写这本书过程中帮助过我的人：Brian Butler (Qualcomm)、Robert P. Adler (Intel)、Alain Darte (CNRS)、Babak Falsafi (CMU)、Ran Ginosar (Technion)、John Glossner (Sandbridge)、Graham Hellestrand (VaSTSystems)、Paolo Ienne (EPFL)、Masaharu

Imai (Osaka University)、Irwin Jacobs (Qualcomm)、Axel Jantsch (KTH)、Ahmed Jerraya (TIMA)、Lizy Kurian John (UT Austin)、Christoph Kirsch (University of Salzburg)、Phil Koopman (CMU)、Haris Lekatsas (NEC)、Pierre Paulin (ST Microelectronics)、Laura Pozzi (University of Lugano)、Chris Rowen (Tensilica)、Rob Rutenbar (CMU)、Deepu Talla (TI)、Jiang Xu (Sandbridge) 和 Shengqi Yang (Princeton)。

我非常感谢我的编辑 Nate McFadden 以及审校人员对我的支持、指导和鼓励。审校过程有助于明确本书的角色，Nate 始终带给我具有深刻见解的想法和评论。我还要感谢一直支持我的编辑——Morgan Kaufmann 的 Denise Penrose，她从一开始一直在指导本书。

我还要感谢数字图书馆，尤其是那些 IEEE 和 ACM 数字图书馆。如果没有它们这本书不可能完成。如果我需要在图书馆中查找所有需要用到的论文，那我就要带着疲倦的双眼和成千上万张纸，拖着疲惫的双腿在书架间奔走。数字图书馆的确帮了我大忙。

感谢 Nancy 和 Alec 的耐心，我最爱的亲人。

Wayne Wolf

普林斯顿，新泽西

本书赞誉

本书是对系统设计方面资料文献的及时增补。嵌入式系统设计数量以及安装数量已经远远超过了通用计算系统的数量，然而介绍有关嵌入式系统设计方面的书籍却寥寥无几。这本书对嵌入式系统设计的大量研究问题进行了详尽论述，从设计方法学、评价机制到针对存储空间、运行时间及能耗等嵌入式系统关键资源的优化技术。此外，本书还涵盖了越来越重要的与多处理器系统相关的设计问题。Wayne Wolf 是嵌入式设计领域专家中的领军人物，他亲自指导了本书中提到的许多课题的研究工作，而且在他构造的大量嵌入式系统中实践了书中提出的设计方法。本书不仅有益于经验丰富的嵌入式系统设计者，而且也将使设计新手获益匪浅。

——Daniel P. Siewiorek, 卡内基-梅隆大学

本书重点介绍高端嵌入式计算机。在这个领域，设计人员需要在硬件和软件设计中达到一种平衡，可以推断该研究领域将主导未来几年中最新设计方法学的发展方向。围绕最佳工业界设计实例和真实设计实例和应用，Wayne Wolf 认真组织并集中介绍了大量最先进的研究方法，其中许多方法很可能成为未来 10 年一些设计成功的关键之处。这本书恰逢其时，最适用于攻读高级嵌入式计算机工程课程的设计人员和学生，同时也有助于研究人员和科学家了解发生在计算机体系结构和电子设计自动化等交叉领域的重要研究进展。

——Paolo Ienne, 洛桑理工学院, 洛桑, 瑞士

处理器正不断离开我们的办公桌，而逐步嵌入到我们的家电设备、汽车、电话中，甚至不久的将来我们的衣服、钱包也要用到它们。可以肯定，嵌入式计算在体系结构范围内不再是一个缓慢、无聊、无足轻重的研究问题，它已成为一个核心的研究问题。Wayne Wolf 的书将硬件和软件设计综合起来介绍，对有志于嵌入式系统设计的研究人员颇有益处。

——Rob A. Rutenbar, 卡内基-梅隆大学

计算机系统工程学各领域的教育工作者都应该看一看这本书。它在性能、体系结构以及设计等方面的不同观点使各层次学生对相关基本概念有了更加深入的理解。在我看来，它为任何从事“系统”领域研究的人来说指明了发展的方向。

——Steven Johnson, 印第安纳大学

现在生活中嵌入式设备越来越多，人们日常活动中经常把手机、PDA 及 MP3 等带在身边。这些设备的设计及约束条件与通用的计算系统（如笔记本或台式电脑）有很大差异。

本书详细探讨了这些基本设计问题，同时也涉及了一些新的研究领域，如传感器网络和多处理器。

——Mitchell D. Theys, 芝加哥伊利诺伊大学

本书不仅介绍了嵌入式计算的最新研究进展和相关实例系统，还特别介绍了嵌入式计算中的软/硬件协同设计及多处理器体系结构设计等问题。这部不凡的书将适于研究人员、设计人员及学生阅读，并从中受益。

——Andreas Polze, 哈索 - 普拉特纳学院, 波茨坦大学

嵌入式计算机系统无处不在。这部书将工业实践经验与最新的业界研究成果整合在一起，深入并全面地论述了高性能嵌入式系统的基础设计、关键问题、最新研究问题及在现实世界中面临的挑战。本书将非常适用于研究生、科研人员、实践专家。

——Jie Hu, 新泽西理工学院

目 录

出版者的话

译者序

前言

本书赞誉

第1章 嵌入式计算 1

1.1 高性能嵌入式计算的前景 1

1.2 示例应用 3

1.2.1 无线电和网络 3

1.2.2 多媒体 7

1.2.3 车辆控制和操作 10

1.2.4 传感器网络 13

1.3 设计目标 14

1.4 设计方法 15

1.4.1 基本设计方法 16

1.4.2 嵌入式系统设计流程 18

1.4.3 基于标准的设计方法 19

1.4.4 设计检验和确认 21

1.4.5 方法论 21

1.4.6 算法与体系结构联合开发 22

1.5 计算模型 23

1.5.1 为什么研究计算模型 23

1.5.2 有限与无限状态 23

1.5.3 控制流和数据流模型 26

1.5.4 并行和通信 28

1.5.5 并行的来源和使用 31

1.6 可靠性、安全与防卫 32

1.6.1 为什么需要可靠的嵌入式系统 32

1.6.2 可靠系统设计的基础 33

1.6.3 新式攻击和对策 36

1.7 电子消费品体系结构 37

1.7.1 蓝牙 37

1.7.2 WiFi 39

1.7.3 联网的电子消费品 39

1.7.4 高层次服务 40

1.8 小结 41

问题 42

实验练习 43

第2章 CPU 44

2.1 介绍 44

2.2 处理器的比较 44

2.2.1 评价处理器 44

2.2.2 处理器的分类 46

2.2.3 嵌入式处理器与通用处理器 46

2.3 RISC 处理器与数字信号处理器 47

2.3.1 RISC 处理器 47

2.3.2 数字信号处理器 48

2.4 并行执行机制 51

2.4.1 超长指令字处理器 52

2.4.2 超标量处理器 54

2.4.3 SIMD 与向量处理器 54

2.4.4 线程级并行 55

2.4.5 处理器资源利用率 56

2.5 性能可变处理器体系结构 57

2.5.1 电压和频率的动态调整 58

2.5.2 “优于最坏情况”设计 59

2.6 处理器存储层次结构 60

2.6.1 存储组件模型 60

2.6.2 寄存器堆 64

2.6.3 cache 64

2.6.4 片上 SRAM 66

2.7 附加的 CPU 技术 67

2.7.1 编码压缩 67

2.7.2 代码和数据压缩 76

2.7.3 低功耗总线编码 79

2.7.4 安全性 82

2.8 CPU 模拟 85

2.8.1 基于执行日志的分析 86

2.8.2 直接执行	88	4.2 实时进程调度	152
2.8.3 微系统结构建模模拟器	88	4.2.1 预备知识	152
2.9 CPU 的自动化设计	90	4.2.2 实时调度算法	154
2.9.1 可配置处理器	90	4.2.3 动态电压调整的调度	160
2.9.2 指令集综合	97	4.2.4 性能估算	164
2.10 小结	102	4.3 语言和调度	165
问题	102	4.4 操作系统的设计	170
实验练习	103	4.4.1 嵌入式操作系统中的内存管理	170
第3章 编程	104	4.4.2 实时操作系统的结构	171
3.1 介绍	104	4.4.3 操作系统开销	173
3.2 代码生成和后端编译	104	4.4.4 对调度的支持	173
3.2.1 指令模型	105	4.4.5 进程间通信机制	175
3.2.2 寄存器分配	107	4.4.6 电源管理	175
3.2.3 指令选择和调度	109	4.4.7 嵌入式设备中的文件系统	176
3.2.4 代码放置	111	4.5 验证	178
3.2.5 编程环境	113	4.6 小结	182
3.3 面向内存的优化	114	问题	183
3.3.1 循环变换	114	实验练习	183
3.3.2 全局优化	117	第5章 多处理器体系结构	184
3.3.3 缓冲区、数据传输和存储 管理	119	5.1 介绍	184
3.3.4 面向 cache 和片上 SRAM 的 优化	120	5.2 为什么需要嵌入式多处理器	185
3.3.5 面向主存的优化	124	5.2.1 嵌入式系统的需求	186
3.4 程序性能分析	125	5.2.2 性能和能耗	186
3.4.1 性能模型	126	5.2.3 专用性和多处理器	188
3.4.2 路径分析	127	5.2.4 可扩展性和效率	189
3.4.3 路径计时	129	5.3 多处理器的设计技巧	189
3.5 计算与编程模型	134	5.3.1 多处理器设计方法	189
3.5.1 面向中断的语言	135	5.3.2 多处理器的建模和模拟	190
3.5.2 数据流语言	135	5.4 多处理器的结构	191
3.5.3 面向控制的语言	140	5.5 处理单元	197
3.5.4 Java	144	5.6 互连网络	197
3.5.5 计算异构模型	145	5.6.1 模型	198
3.6 小结	148	5.6.2 网络拓扑	200
问题	149	5.6.3 路由和流控制	202
实验练习	151	5.6.4 片上网络	202
第4章 进程和操作系统	152	5.7 内存系统	208
4.1 介绍	152	5.7.1 传统的并行内存系统	208
		5.7.2 内存模型	209
		5.7.3 异构内存系统	210

5.7.4 一致性并行内存系统	212	实验练习	261
5.8 物理分布式系统和网络	214	第7章 硬件/软件协同设计	262
5.8.1 时间触发的结构	214	7.1 简介	262
5.8.2 FlexRay	216	7.2 设计平台	262
5.8.3 飞机网络	222	7.3 性能分析	264
5.9 多处理器的设计方法和算法	223	7.3.1 高层综合	264
5.10 小结	227	7.3.2 加速器评估	268
问题	228	7.4 硬件/软件协同综合算法	270
实验练习	229	7.4.1 程序表示	271
第6章 多处理器软件	230	7.4.2 平台描述	271
6.1 简介	230	7.4.3 模板驱动的综合算法	272
6.2 嵌入式多处理器软件的不同之处	230	7.4.4 通用多处理器的协同综合	278
6.3 实时多处理器操作系统	231	7.4.5 多对象优化	284
6.3.1 操作系统的角色	231	7.4.6 控制和 I/O 综合	288
6.3.2 多处理器调度	234	7.4.7 内存系统	289
6.3.3 动态任务的调度	246	7.4.8 可重构系统的协同综合	291
6.4 嵌入式多处理器系统服务与中间件	248	7.5 硬件/软件协同模拟	292
6.4.1 基于标准的服务	249	7.6 小结	294
6.4.2 片上系统服务	251	问题	294
6.4.3 服务质量	254	实验练习	295
6.5 设计验证	258	术语表	296
6.6 小结	260	参考文献	315
问题	260		

第 1 章 嵌入式计算

- 嵌入式计算的基本问题
- 嵌入式计算应用
- 嵌入式系统的设计方法和系统建模
- 计算模型
- 可靠性和安全性
- 电子消费品

1.1 高性能嵌入式计算的前景

这本书的主题是，很多嵌入式计算系统都是高性能计算系统，需要精心设计才能满足严格的要求。它们不仅需要大量计算，还必须满足量化目标：实时性能（而不仅仅是平均性能）、功耗/能耗和成本。量化目标使得嵌入式计算系统的设计与通用计算系统有很大区别，因为后者的用户是不可预知的。

当要设计计算机系统来满足各种各样的量化目标时，我们很快发现，没有一个系统对所有应用都是最佳的。不同的计算需求导致在性能和功耗、硬件和软件等方面做出不同的权衡。我们必须通过不同的实现来满足一系列应用的需求。方案应该是可编程的，以保证设计灵活且有生命力，但不需要提供不必要的灵活性，以免与系统的需求相背离。

通用计算系统是将硬件和软件分开设计的，但是在嵌入式计算系统中，我们需要同时设计硬件和软件。通常，一个问题可以通过硬件方式、软件方式或两者的结合来解决。不同的方案有不同的权衡；硬件/软件结合设计提供的空间越大，我们能找到的设计方案就越好。

如图 1-1 所示，嵌入式系统设计的研究应该考虑三个方面：**体系结构（architectures）、应用（applications）和方法论（methodologies）**。与通用计算系统的设计相比，嵌入式计算系统的设计人员更依赖于方法论和相关应用的基本知识。让我们分别考虑这些方面。

由于嵌入式系统设计人员既设计硬件又设计软件，因此他们必须研究体系结构，一般来说，包括硬件、软件和这两者之间的关系。硬件体系结构包括硬件/软件结合设计的专用硬件单元，处理器的微体系结构，多处理器或分布式处理器网络结构等。软件体系结构决定我们怎样利用并行性和非确定性来提高性能和降低成本。

设计高效的嵌入式计算系统的关键在于了解你的应用，充分利用应用的特性来优化设计，实现很多通用系统中不可能完成的高效优化。但这也意味着我们必须对应用足够了解，才能充分利用它的特性，而避免为系统的实现人员制造麻烦。

方法论在嵌入式计算里扮演了一个特别重要的角色。我们不仅需要设计很多不同类型的嵌入式系统，还要做到可靠和可预测。设计过程本身的成本通常在整个系统的成本中

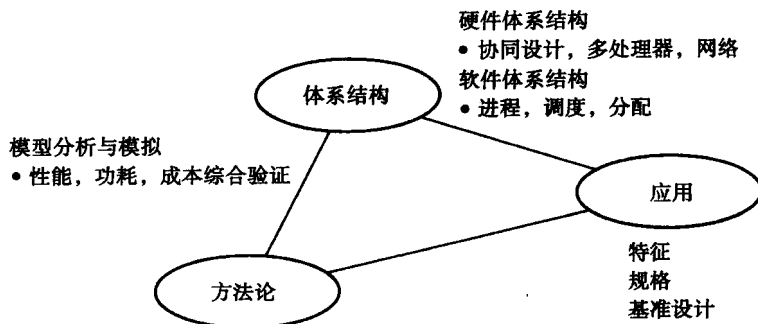


图 1-1 嵌入式系统设计的特征

占有很大比重。方法论可以结合机器和人工操作，将如何设计系统的知识系统化。方法论可以帮助我们做出重大或者小的决定。

通用计算系统的设计人员遵循比较狭义的硬件设计方法，使用标准的基准程序作为输入来跟踪和模拟。对处理器的修改一般由手工完成，并可能因此产生新的发明。嵌入式计算系统设计人员需要更复杂的方法，因为他们的系统设计既包括硬件设计也包括软件设计。嵌入式系统的不同特性——用于通信的片上系统、自动网络等等——也促使设计者根据他们自己的目标调整设计方法。

设计方法中的步骤可以实现为工具。分析和模拟工具广泛用于评估成本、性能和能量消耗。综合工具依据规范创建优化的实现。工具在嵌入式计算机设计中尤为重要，是因为：第一，我们在设计一个面向应用的系统，可以使用工具来帮助我们理解应用的特性。第二，我们在设计嵌入式系统时通常时间很紧张，工具可以帮助我们提高工作效率，生产出可预测性更高的产品。

嵌入式计算系统的设计越来越依赖于层次模型。模型已经在计算机科学中应用了很久，用于提供抽象概念。其中，性能、能耗和功能的抽象是很重要的。因为嵌入式计算系统将复杂的功能建立在精密平台之上，设计人员必须使用一系列模型才可能完成系统设计。早期的设计流程需要适当精确的简单模型，后期的设计则需要更精确的模型。

嵌入式计算系统与很多学科都有关系，关键是实时计算和硬件/软件协同设计。实时系统研究作为一门学科的出现要早于嵌入式计算。实时系统以面向软件的视角，研究如何设计能够实时计算的计算机。实时系统中的调度技术是嵌入式系统的核心技术。硬件/软件协同设计出现在嵌入式计算新时代的萌芽期，它以整体的视角研究实时计算的硬件和软件。

图 1-2^①显示了嵌入式计算系统开发的重点。我们可以看到，嵌入式计算系统在计算历史上出现得很早：MIT 的 Whirlwind 作为最早的计算机之一，设计用于火炮控制。随着计算机科学和工程成为一个专业的领域，早期研究为实时计算奠定了基础。嵌入式计算

① Many of the dates in this figure were found in Wikipedia; others are from <http://www.motofuture.motorola.com> and <http://www.mvista.com>.

的一部分技术是专门为解决嵌入式系统中出现的问题而开发的，而其他技术（如以下所列），则是由通用计算技术演变而来的。

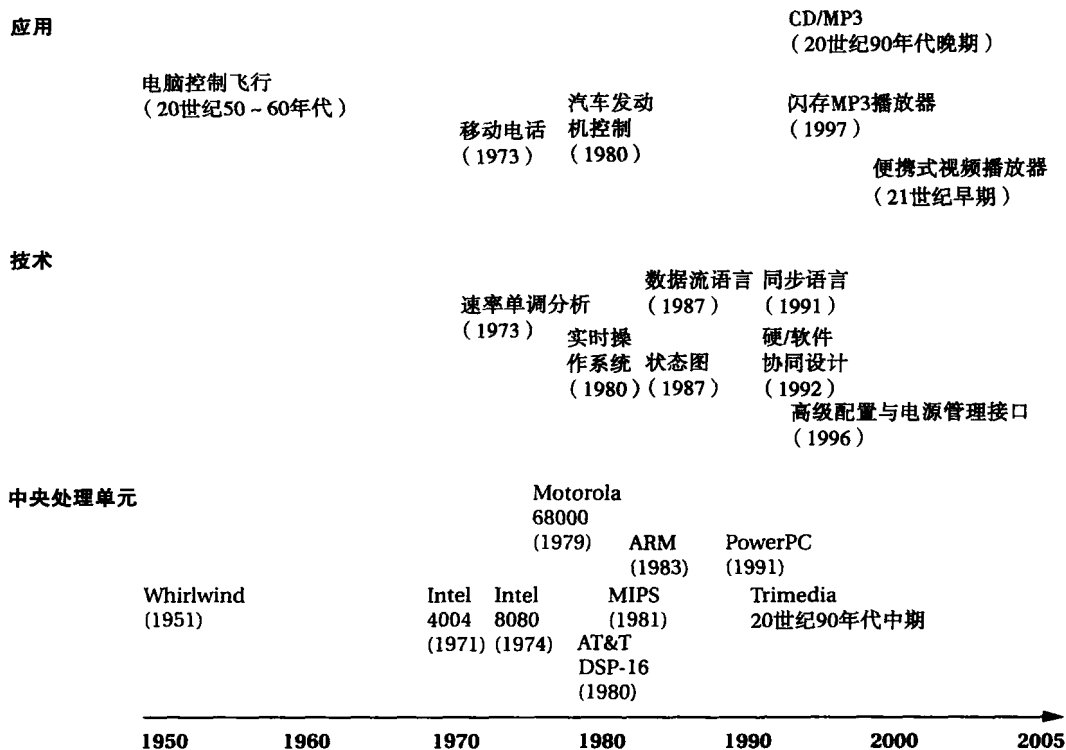


图 1-2 嵌入式计算系统历史中的闪光点

- 低功耗设计开始主要面向硬件，但现在包括软件技术和硬件技术。
- 编程语言和编译器为嵌入式系统设计人员提供了诸如 Java 等工具和高度优化的代码生成器。
- 操作系统不仅提供了调度器，还提供了文件系统和高性能嵌入式系统中常见的其他工具。
- 网络用于为车辆和许多其他应用创建分布式实时控制系统，如互联网驱动的装备。
- 安全性和可靠性成为嵌入式系统设计越来越重要的方面。VLSI 组件在尺寸极小的情况下变得不再可靠，而可靠性的需求却更加迫切。曾经仅限于通用系统的安全威胁现在也已经逼近嵌入式系统。

1.2 示例应用

了解一些运行在嵌入式系统上的应用对于系统设计人员具有很大的帮助。本节着眼于三个常见应用中的若干基本概念，这三个应用是通信/网络、多媒体和汽车。

1.2.1 无线电和网络

现代通信系统将无线电和网络进行结合。如图 1-3 所示，无线电携带着数字信息，用

于连接网络。那些网络可能是专用的，例如传统的蜂窝电话，但无线电逐渐被用于互联网协议系统的物理层。

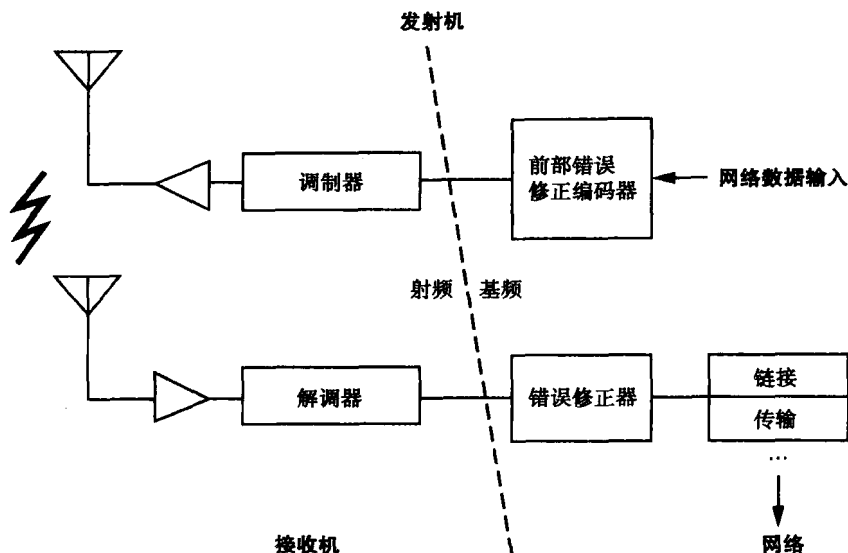


图 1-3 一个无线电与网络连接

国际标准化组织（ISO）的开放系统互连（OSI）模型 [Sta97a] 为网络服务定义了如下模型。

1. 物理层（physical layer）——电气和物理连接
2. 数据链路层（data link layer）——单链路上的流量和差错控制
3. 网络层（network layer）——基础端到端服务
4. 传输层（transport layer）——面向连接的服务
5. 会话层（session layer）——控制活动，如检查点
6. 表示层（presentation layer）——数据交换格式
7. 应用层（application layer）——应用和网络之间的接口

尽管嵌入式系统很简单，不需要使用 OSI 模型，但 OSI 模型实际上却很有用。甚至相当简单的嵌入式网络都提供物理、数据链路和网络服务。越来越多提供互联网服务的嵌入式系统需要实现 OSI 模型中的所有功能。

互联网（Internet）是遵循 OSI 模型的网络的一个样例。互联网协议（Internet Protocol, IP） [Los97; Sta97a] 是互联网的基础协议。IP 用于不同类型网络之间的互联（internetwork）——网络互联标准。IP 位于 OSI 模型的网络层。它不提供有保证的端到端服务，而是提供数据包的尽力发送路由（best-effort routing）。需要更高层的协议来管理源和目的地之间的数据包流。

无线数据通信得到广泛使用。在接收端，数字通信必须完成以下任务：

- 将信号解调至基带
- 检测基带信号以确认比特位