

HZ BOOKS
华章教育

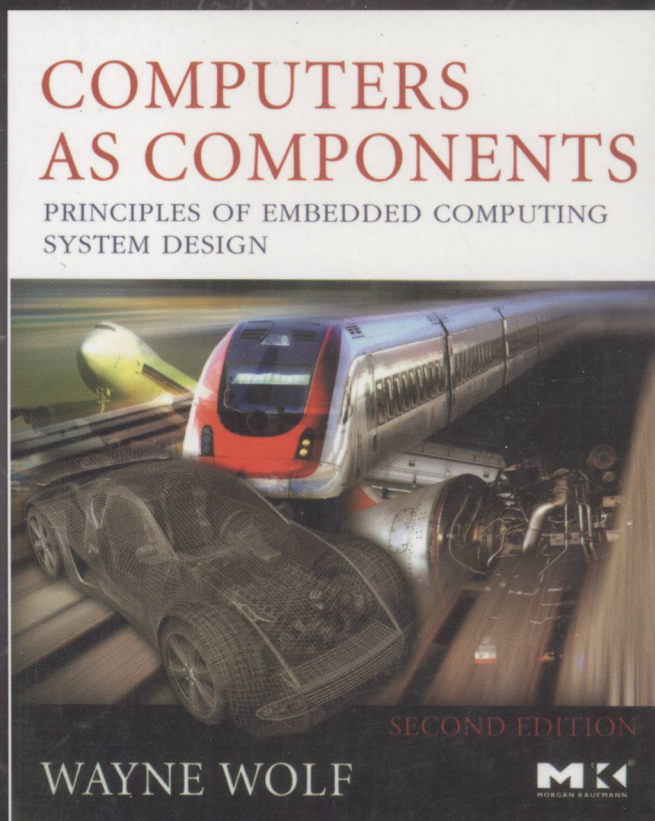


计 算 机 科 学 丛 书

第2版

嵌入式计算系统设计原理

(美) Wayne Wolf 著 李仁发 等译



Computers as Components
Principles of Embedded Computing System Design
Second Edition



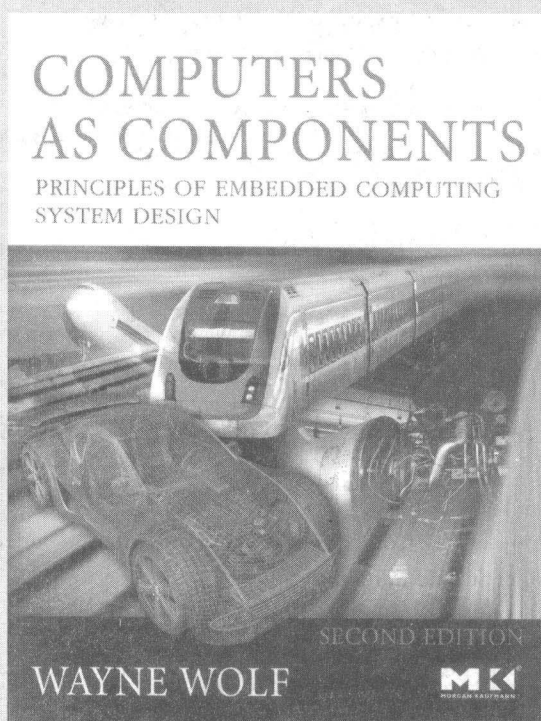
机械工业出版社
China Machine Press

计 算 机 科 学 丛 书

第2版

嵌入式计算系统设计原理

(美) Wayne Wolf 著 李仁发 等译



Computers as Components

Principles of Embedded Computing System Design

Second Edition



机械工业出版社
China Machine Press

本书从组件技术的视角出发,讲述了嵌入式计算的基本原理和技术。书中以实际芯片TI TMS320C55x™(C55x) DSP和软件系统FreeRTOS.org为例,一章一个重点,涉及构造嵌入式系统相关的指令系统、CPU、基于总线的计算机系统、程序设计与分析、进程和操作系统、多处理器、网络、系统设计技术等主要方面。

本书特别适合作为计算机、电子信息、通信工程、自动化、机电一体化、仪器仪表及相关专业高年级本科生和研究生的教材,也适合相关的工程技术人员参考。

Wayne Wolf: Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design, Second Edition (ISBN 978-0-12-374397-8).

Copyright © 2008 by Wayne Hendrix Wolf. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-272-334-5

Copyright © 2009 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。

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: 01-2009-1341

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式计算系统设计原理 第2版 / (美)沃尔夫(Wolf, W.)著;李仁发等译. —北京:机械工业出版社, 2009.6

(计算机科学丛书)

书名原文: Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design, Second Edition

ISBN 978-7-111-27068-3

I. 嵌… II. ①沃… ②李… 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(2009)第070625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: 迟振春

北京瑞德印刷有限公司印刷

2009年6月第2版第1次印刷

184mm × 260mm • 20.75印张

标准书号: ISBN 978-7-111-27068-3

定价: 55.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010) 68326294

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，不仅筹划了研究的范畴，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分社较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，华章分社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, Brian 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”已经出版了近两百个品种，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。华章分社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：

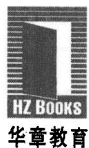
华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzsj@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



译者序

嵌入式计算及系统是信息科学与技术领域继PC机、互联网之后的第三个新趋势。

目前有关嵌入式计算及系统的书籍甚多，但美国普林斯顿大学Wayne Wolf教授所著的《Computers as Components: Principles of Embedded Computing System Design》第1版是第一本系统讲述嵌入式计算这门学科的书，可以说在很大程度上引发了嵌入式系统课程的创立。

在第2版中，作者进行了大量更新，以实际芯片TI TMS320C55x™(C55x) DSP和软件系统FreeRTOS.org为例，一章一个重点，涉及构造嵌入式系统相关的指令系统、CPU、基于总线的计算机系统、程序设计与分析、进程和操作系统、多处理器、网络、系统设计技术等主要方面。尤其是在实时系统、多处理器、软硬件协同设计等方面进行了重写与拓展，介绍了各领域最新研究成果。此外，新版还更新、补充了大量习题和实验练习供读者进行实践。

本书内容丰富，语言通俗流畅，深入浅出，讲解详细，配合了丰富的应用示例与编程示例，使得读者在进行理论学习的同时，能够很容易地联系实际，从而加深对嵌入式计算设计理念的认知与理解，获取先进的技术实践指导。

本书特别适合作为计算机、电子信息、通信工程、自动化、机电一体化、仪器仪表及相关专业高年级本科生和研究生的教材，也适合相关的工程技术人员参考。

参与本书翻译工作的有：李仁发（第1章）、杨柳（第2章）、刘樑骄（第3章）、凌纯清（第4章）、彭鑫（第5章）、黄丽达（第6章）、肖玲（第7章和第8章）、杨志邦（前言、第9章和附录），术语表由杨志邦、刘樑骄、彭鑫、凌纯清和黄丽达共同翻译完成。李仁发教授组织了全书的翻译工作，汇总与校订由黄丽达负责。徐成教授给予了大量的专业指导，并审阅了全书。

由于时间与水平所限，译稿中难免存在不妥或错误之处，敬请读者指正。

译者

2009年2月

第1版序言

数字系统设计已经进入一个新的时代。当微处理器设计转向一种典型的优化工作时，只把微处理器作为其部件的嵌入式计算系统设计已经成为一种广阔的科技前沿。无线系统、可穿戴系统、网络系统、智能家电、工业过程系统、先进汽车系统以及生物接口系统由于与这个新领域产生了交叉而提供了一些例子。

受传感器、转换器、微电子学、处理器性能、操作系统、通信技术、用户接口和封装技术进步的推动以及对于人类的需要和市场潜能更深入的理解，正在涌现出大量新的系统和应用。现在系统设计师和嵌入式系统设计人员的责任是把这些可能变成现实。

然而，在现阶段，嵌入式系统设计仍处于一种手工阶段。虽然有关硬件组件和软件子系统的知识是很清楚的，但是还没有协调整个设计过程的通用系统设计方法，在大多数项目中嵌入式系统的设计仍然采用某种特定方法。

嵌入式系统设计所面临的某些挑战源于基础技术的改变以及系统各部件如何能全部正确地混合和集成在一起的细微之处，另一些挑战源于新的并且常常是不熟悉的系统需求。此外，用于通信和协作的基础设施和技术的改善已经使快速设计以响应市场需求呈现出前所未有的可能性。但是，还没有有效的设计方法和相关的设计工具足以迅速应付这些挑战。

在VLSI时代的开始阶段，晶体管和导线是基本部件，快速设计基于芯片的计算机是一种梦想。今天，CPU和各种特殊处理器以及子系统仅是一些基本部件，但快速、高效地设计极复杂的嵌入式系统却仍是一个梦想。现在不但系统规格说明极其复杂，而且它们遇到了实时期限、低功耗、有效地支持复杂实时用户界面、强劲的成本竞争以及设计的系统必须可升级等问题。

Wayne Wolf教授编写了系统地处理大量新的系统设计需求和挑战的第一本教科书。他提出了嵌入式系统设计的形式体系和方法学，那些真正要理解跨越大量部件技术的系统设计基础、构造新型“超薄”系统的设计师可以运用这些方法。

从分析每一种技术基础出发，Wolf教授为规范和建造系统结构及行为提供了形式化方法，然后通过一系列示例解析这些思想。他仔细研究了所涉及的复杂性以及如何系统化地处理这些复杂问题。你会提前清楚地理解这些设计问题的本质，并知道如何攻克这些难关的关键方法和工具。

作为嵌入式系统设计的第一本教科书，本书将被证明是在这个重要和最新出现的领域里获得知识的一个无价的工具。本书亦可以作为实际设计工作的参考，并在设计过程中作为可信的指南。我强烈地向读者推荐本书。

Lynn Conway

密歇根大学电子工程和计算机科学系名誉教授

第2版前言

相对2000年本书第1版出版的时候，如今嵌入式计算更为重要。更多的产品中使用了嵌入式处理器，从玩具到飞机都有应用。片上系统现在使用几百个CPU。手机朝着新的标准计算平台方向发展。就像2006年9月《IEEE Computer》杂志上我的专栏中所指出的那样，当今世界至少有50万嵌入式系统程序员，可能接近80万。

在这一版中，我尽力做了更新和补充。本书的一个主要改变是使用TI TMS320C55x™(C55x) DSP。我慎重地重写了关于实时调度的讨论。尝试将性能分析主题在尽可能多的抽象层次上扩展。指出多处理器在甚至最平凡的嵌入式系统中的重要性，此版对硬/软件协同设计和多处理器也进行了更普通化的介绍。

计算机教学领域内的一个改变是，本教材成为了越来越低年级的课本。过去用于研究生的教材现在用于高年级本科生；在可预见的未来，本书的部分内容将可作为大学二年级教材。我认为可以选取本书的部分内容去覆盖更先进和更基础的课程。一些高年级学生可能不需要前面章节的背景知识，这样可以花更多时间在软件性能分析、调度和多处理器上。当开设介绍性课程时，软件性能分析可作为探索微处理器体系结构和软件体系结构的一个可选方案；这样的课程可以关注前几章的内容。

本书和我的其他书的新网站是<http://www.waynewolf.us>。在这个网站里，可以找到本书相关材料的概括、实验建议，还可找到关于嵌入式系统的更多信息的网站链接。

感谢

感谢许多帮助我完成第2版的人。德州仪器的Cathy Wicks和Naser Salameh在理解C55x上给了我非常有价值的帮助。FreeRTOS.org的Richard Barry不仅慷慨地允许我引用他的操作系统中的源码，还帮我澄清代码的解释。本书的编辑是Morgan Kaufmann出版社的Chuck Glaser，他知道何时需要耐心，何时需要鼓励，何时需要诱导。当然，还要感谢Nancy和Alec耐心为我录入。本书的任何问题，不管是大小，自然都是我个人的责任。

Wayne Wolf

第1版前言

微处理器早已成为我们生活的一部分，然而，微处理器足够强大以致能执行真正复杂的功能还是近几年的事。根据摩尔定律，微处理器飞速发展的结果是嵌入式计算作为一门学科出现。在微处理器的早期阶段，所有组件相对较小也较简单，需要且期望把一些单独的指令和逻辑门集中在一起。今天，当系统包含了几千万个晶体管和数万行高级语言代码时，我们必须使用有助于我们处理复杂性的设计技术。

本书试图捕捉嵌入式计算这一新学科的某些基本原理和技术。嵌入式计算的某些挑战在台式机计算世界中是众所周知的。例如，为从带流水线的高速缓存体系结构中获得最高性能，经常需要仔细分析程序轨迹。类似地，随着嵌入式系统的复杂性不断增长，在软件工程中针对特定复杂系统开发的技术变得十分重要。另外一个例子是设计多进程系统。对于台式机，通用操作系统的需求与实时操作系统的需求是截然不同的；过去30年针对大型实时系统开发的实时技术如今已普遍用于基于微处理器的嵌入式系统中。

嵌入式计算还面临一些新的挑战。一个较好的例子是功耗问题。在传统计算机系统中功耗已经不是一个主要考虑因素，但是对于用电池供电的嵌入式计算机，这是一个基本考虑因素，而且在功耗容量受重量、成本或噪声等限制的情况下是十分重要的。另外一种挑战是截止时限驱动的程序设计。嵌入式计算机常常对程序完成的期限做硬性限制；这种形式的限制在台式机世界里是罕见的。随着嵌入式处理器越来越快，高速缓存和其他CPU单元也使得执行时间越来越难以预测。然而，通过仔细分析和巧妙编程，我们可以设计可预测执行时间的嵌入式程序，甚至面对高速缓存等不可预测的系统部件也如此。

幸运的是，有许多工具可用来处理复杂嵌入式系统所面临的挑战：高级语言、程序性能分析工具、进程和实时操作系统，等等。但是理解这些工具如何协调地一起工作本身就是一项很复杂的任务。本书提供了一种自底向上的方法来理解嵌入式系统设计技术。通过先理解微处理器硬件和软件的基础知识，我们就能获得有助于创建复杂系统的强有力的抽象能力。

对于嵌入式系统专业人员的忠告

本书不是一本用来理解某种特定微处理器的手册。为什么在这里呈现的技术你会感兴趣呢？有两个理由：第一，诸如高级语言编程和实时操作系统这样的技术对于构造大型实际的复杂嵌入式系统是非常重要的。生产会因为不能工作的错误系统设计而被弄得杂乱无章，系统之所以不能工作是因为它们的设计者试图从出现的问题中寻求解决方法而不是从问题中走出来换个更大的视角研究问题。第二，用于建造嵌入式系统的组件是经常变化的，但其原理不变。一旦你掌握了创建复杂嵌入式系统所涉及的基本原理，就可以迅速地学习一种新的微处理器（或编程语言），并且把同样的基本原理用于新的组件。

对于教师的忠告

传统的微处理器系统设计起源于20世纪70年代，当时微处理器的种类相对有限。传统课程强调定制硬件和软件来构建一个完整系统。因此，它只强调某一特定微处理器的特性，包括其指令系统、总线接口，等等。

本书采用更抽象的途径研究嵌入式系统。本书利用一切机会讨论实际组件和应用，但本质上它不是一本微处理器数据手册，因此它的论述方法初看起来是新奇的。本书不是集中于某种特定微处理器，而是试图用一般性的例子来推出更一般的应用原理。本人认为这种方法对于教学更有利，而从长远角度来看对于学生也更有用。对于教学更有利是因为不必太过于依赖复杂的实验室装置，而只需花费一些时间在纸上练习、模拟和编程练习。对于学生更有用是因为他们在这一领域的最终工作所使用的组件和设施与学校的肯定是不同的。一旦学生掌握了基础知识，他们学习新组件的细节就会容易得多。

对于获得有关嵌入式系统的物理直觉，实践经验特别重要。某些硬件设计经验是非常宝贵的；我认为每一个学生都应该知道烧制塑封集成电路块的气味。但我强烈建议你避免专注于硬件设计。如果你花费太多的时间去构建硬件平台，你将没有足够的时间去编写有趣的程序。一个实际问题是，大多数课程没有时间让学生用高性能I/O设备和可能的多处理器来建造复杂的硬件平台。多数学生可以通过测量和评价一个现有的硬件平台来学习硬件知识。编制复杂嵌入式系统程序的实践也可以教给学生相当多的硬件知识，调试中断驱动代码是学生基本不会忘记的一种经验。

本书的主页 (www.mkp.com/embed) 中包括本书相关材料的概括、教师手册、实验材料、到相关Web站点的链接以及与包含习题解答的有口令保护的ftp站点的链接。

感谢

感谢许多帮助我准备这本书的人。一些人给了我关于本书各个方面的建议：关于规格说明的Steve Johnson（印第安那大学），关于程序跟踪的Louise Trevillyan和Mark Charney（均在IBM研究所），关于高速缓存未命中的Margaret Martonosi（普林斯顿大学），关于低功耗的Randy Harr（Synopsys），关于低功耗的Phil Koopman（卡内基-梅隆大学），关于低功耗计算与累加器的Joerg Henkel（NEC C&C实验室），关于实时操作系统的Lui Sha（伊利诺伊大学），关于ARM体系结构的John Rayfield（ARM），关于编译器和SHARC的David Levine（Analog Devices），以及关于SHARC的Con Korikis（Analog Devices）。许多人员在各阶段对本书进行了审阅：David Harris（哈佛姆德学院）；Jan Rabaey（加州大学伯克利分校）；David Nagle（卡内基-梅隆大学）；Randy Harr（Synopsys）；Rajesh Gupta、Nikil Dutt、Frederic Doucet和Vivek Sinha（加州大学欧文分校）；Ronald D. Williams（弗吉尼亚大学）；Steve Sapiro（SC协会）；Paul Chow（多伦多大学）；Bernd G. Wenzel（Eurostep）；Steve Johnson（印第安那大学）；H. Alan Mantooth（阿肯色大学）；Margarida Jacome（得克萨斯大学奥斯汀分校）；John Rayfield（ARM）；David Levine（Analog Devices）；Ardsher Ahmed（马萨诸塞大学/达特茅斯大学）；Vijay Madiseti（佐治亚理工学院）。还要特别感谢编辑Denise Penrose，Denise费了很大精力寻找本书的潜在用户并和他们交流，帮助我们了解读者想要学什么。特别感谢她的直觉和坚持。Cheri Palmer和她的出版团队在无法想象的紧迫日程内作了出色的工作。当然，所有的错误和失误都是我的。

延伸阅读



作者: Patrick Juola
书号: 978-7-111-23917-8
定价: 42.00



作者: Barry B. Brey
书号: 978-7-111-22827-1
定价: 85.00
译者: 金惠华 艾明晶 尚利宏



作者: Muhammad Ali Mazidi 等
书号: 978-7-111-21524-0
定价: 65.00
译者: 严隽永



作者: Kunle Olukotun Lance
Hammond James Laudon
书号: 978-7-111-25381-5
定价: 26.00
译者: 汪东升 王海霞 李鹏

教师服务登记表

尊敬的老师:

您好!感谢您购买我们出版的_____教材。

机械工业出版社华章公司本着为服务高等教育的出版原则,为进一步加强与高校教师的联系与沟通,更好地为高校教师服务,特制此表,请您填妥后发回给我们,我们将定期向您寄送华章公司最新的图书出版信息。为您的教材、论著或译著的出版提供可能的帮助。欢迎您对我们的教材和服务提出宝贵的意见,感谢您的大力支持与帮助!

个人资料(请用正楷完整填写)

教师姓名		☐ 先生 ☐ 女士	出生年月		职务		职称: ☐ 教授 ☐ 副教授 ☐ 讲师 ☐ 助教 ☐ 其他
学校				学院			
联系电话	办公:			联系地址及邮编			
	宅电:						
	移动:			E-mail			
学历		毕业院校			国外进修及讲学经历		
研究领域							
主讲课程			现用教材名		作者及出版社	共同授课教师	教材满意度
课程: ☐ 专 ☐ 本 ☐ 研 人数: 学期: ☐ 春 ☐ 秋							☐ 满意 ☐ 一般 ☐ 不满意 ☐ 希望更换
课程: ☐ 专 ☐ 本 ☐ 研 人数: 学期: ☐ 春 ☐ 秋							☐ 满意 ☐ 一般 ☐ 不满意 ☐ 希望更换
样书申请							
已出版著作				已出版译作			
是否愿意从事翻译/著作工作 ☐ 是 ☐ 否				方向			
意见和建议							

填妥后请选择以下任何一种方式将此表返回:(如方便请赐名片)

地 址: 北京市西城区百万庄南街1号 华章公司营销中心 邮编: 100037

电 话: (010) 68353079 88378995 传真: (010) 68995260

E-mail: hzedu@hzbook.com marketing@hzbook.com 图书详情可登录<http://www.hzbook.com>网站查询

目 录

3-12345678910111213141516171819202122232425262728293031323334353637383940414243444546474849505152535455565758596061626364656667686970717273747576777879808182838485868788899091929394959697989910010110210310410510610710810911011111211311411511611711811912012112212312412512612712812913013113213313413513613713813914014114214314414514614714814915015115215315415515615715815916016116216316416516616716816917017117217317417517617717817918018118218318418518618718818919019119219319419519619719819920020120220320420520620720820921021121221321421521621721821922022122222322422522622722822923023123223323423523623723823924024124224324424524624724824925025125225325425525625725825926026126226326426526626726826927027127227327427527627727827928028128228328428528628728828929029129229329429529629729829930030130230330430530630730830931031131231331431531631731831932032132232332432532632732832933033133233333433533633733833934034134234334434534634734834935035135235335435535635735835936036136236336436536636736836937037137237337437537637737837938038138238338438538638738838939039139239339439539639739839940040140240340440540640740840941041141241341441541641741841942042142242342442542642742842943043143243343443543643743843944044144244344444544644744844945045145245345445545645745845946046146246346446546646746846947047147247347447547647747847948048148248348448548648748848949049149249349449549649749849950050150250350450550650750850951051151251351451551651751851952052152252352452552652752852953053153253353453553653753853954054154254354454554654754854955055155255355455555655755855956056156256356456556656756856957057157257357457557657757857958058158258358458558658758858959059159259359459559659759859960060160260360460560660760860961061161261361461561661761861962062162262362462562662762862963063163263363463563663763863964064164264364464564664764864965065165265365465565665765865966066166266366466566666766866967067167267367467567667767867968068168268368468568668768868969069169269369469569669769869970070170270370470570670770870971071171271371471571671771871972072172272372472572672772872973073173273373473573673773873974074174274374474574674774874975075175275375475575675775875976076176276376476576676776876977077177277377477577677777877978078178278378478578678778878979079179279379479579679779879980080180280380480580680780880981081181281381481581681781881982082182282382482582682782882983083183283383483583683783883984084184284384484584684784884985085185285385485585685785885986086186286386486586686786886987087187287387487587687787887988088188288388488588688788888989089189289389489589689789889990090190290390490590690790890991091191291391491591691791891992092192292392492592692792892993093193293393493593693793893994094194294394494594694794894995095195295395495595695795895996096196296396496596696796896997097197297397497597697797897998098198298398498598698798898999099199299399499599699799899910001001100210031004100510061007100810091010101110121013101410151016101710181019102010211022102310241025102610271028102910301031103210331034103510361037103810391040104110421043104410451046104710481049105010511052105310541055105610571058105910601061106210631064106510661067106810691070107110721073107410751076107710781079108010811082108310841085108610871088108910901091109210931094109510961097109810991100110111021103110411051106110711081109111011111112111311141115111611171118111911201121112211231124112511261127112811291130113111321133113411351136113711381139114011411142114311441145114611471148114911501151115211531154115511561157115811591160116111621163116411651166116711681169117011711172117311741175117611771178117911801181118211831184118511861187118811891190119111921193119411951196119711981199120012011202120312041205120612071208120912101211121212131214121512161217121812191220122112221223122412251226122712281229123012311232123312341235123612371238123912401241124212431244124512461247124812491250125112521253125412551256125712581259126012611262126312641265126612671268126912701271127212731274127512761277127812791280128112821283128412851286128712881289129012911292129312941295129612971298129913001301130213031304130513061307130813091310131113121313131413151316131713181319132013211322132313241325132613271328132913301331133213331334133513361337133813391340134113421343134413451346134713481349135013511352135313541355135613571358135913601361136213631364136513661367136813691370137113721373137413751376137713781379138013811382138313841385138613871388138913901391139213931394139513961397139813991400140114021403140414051406140714081409141014111412141314141415141614171418141914201421142214231424142514261427142814291430143114321433143414351436143714381439144014411442144314441445144614471448144914501451145214531454145514561457145814591460146114621463146414651466146714681469147014711472147314741475147614771478147914801481148214831484148514861487148814891490149114921493149414951496149714981499150015011502150315041505150615071508150915101511151215131514151515161517151815191520152115221523152415251526152715281529153015311532153315341535153615371538153915401541154215431544154515461547154815491550155115521553155415551556155715581559156015611562156315641565156615671568156915701571157215731574157515761577157815791580158115821583158415851586158715881589159015911592159315941595159615971598159916001601160216031604160516061607160816091610161116121613161416151616161716181619162016211622162316241625162616271628162916301631163216331634163516361637163816391640164116421643164416451646164716481649165016511652165316541655165616571658165916601661166216631664166516661667166816691670167116721673167416751676167716781679168016811682168316841685168616871688168916901691169216931694169516961697169816991700170117021703170417051706170717081709171017111712171317141715171617171718171917201721172217231724172517261727172817291730173117321733173417351736173717381739174017411742174317441745174617471748174917501751175217531754175517561757175817591760176117621763176417651766176717681769177017711772177317741775177617771778177917801781178217831784178517861787178817891790179117921793179417951796179717981799180018011802180318041805180618071808180918101811181218131814181518161817181818191820182118221823182418251826182718281829183018311832183318341835183618371838183918401841184218431844184518461847184818491850185118521853185418551856185718581859186018611862186318641865186618671868186918701871187218731874187518761877187818791880188118821883188418851886188718881889189018911892189318941895189618971898189919001901190219031904190519061907190819091910191119121913191419151916191719181919192019211922192319241925192619271928192919301931193219331934193519361937193819391940194119421943194419451946194719481949195019511952195319541955195619571958195919601961196219631964196519661967196819691970197119721973197419751976197719781979198019811982198319841985198619871988198919901991199219931994199519961997199819992000200120022003200420052006200720082009201020112012201320142015201620172018201920202021202220232024202520262027202820292030203120322033203420352036203720382039204020412042204320442045204620472048204920502051205220532054205520562057205820592060206120622063206420652066206720682069207020712072207320742075207620772078207920802081208220832084208520862087208820892090209120922093209420952096209720982099210021012102210321042105210621072108210921102111211221132114211521162117211821192120212121222123212421252126212721282129213021312132213321342135213621372138213921402141214221432144214521462147214821492150215121522153215421552156215721582159216021612162216321642165216621672168216921702171217221732174217521762177217821792180218121822183218421852186218721882189219021912192219321942195219621972198219922002201220222032204220522062207220822092210221122122213221422152216221722182219222022212222222322242225222622272228222922302231223222332234223522362237223822392240224122422243224422452246224722482249225022512252225322542255225622572258225922602261226222632264226522662267226822692270227122722273227422752276227722782279228022812282228322842285228622872288228922902291229222932294229522962297229822992300230123022303230423052306230723082309231023112312231323142315231623172318231923202321232223232324232523262327232823292330233123322333233423352336233723382339234023412342234323442345234623472348234923502351235223532354235523562357235823592360236123622363236423652366236723682369237023712372237323742375237623772378237923802381238223832384238523862387238823892390239123922393239423952396239723982399240024012402240324042405240624072408240924102411241224132414241524162417241824192420242124222423242424252426242724282429243024312432243324342435243624372438243924402441244224432444244524462447244824492450245124522453245424552456245724582459246024612462246324642465246624672468246924702471247224732474247524762477247824792480248124822483248424852486248724882489249024912492249324942495249624972498249925002501250225032504250525062507250825092510251125122513251425152516251725182519252025212522252325242525252625272528252925302531253225332534253525362537253825392540254125422543254425452546254725482549255025512552255325542555255625572558255925602561256225632564256525662567256825692570257125722573257425752576257725782579258025812582258325842585258625872588258925902591259225932594259525962597259825992600260126022603260426052606260726082609261026112612261326142615261626172618261926202621262226232624262526262627262826292630263126322633263426352636263726382639264026412642264326442645264626472648264926502651265226532654265526562657265826592660266126622663266426652666266726682669267026712672267326742675267626772678267926802681268226832684268526862687268826892690269126922693269426952696269726982699270027012702270327042705270627072708270927102711271227132714271527162717271827192720272127222723272427252726272727282729273027312732273327342735273627372738273927402741274227432744274527462747274827492750275127522753275427552756275727582759276027612762276327642765276627672768276927702771277227732774277527762777277827792780278127822783278427852786278727882789279027912792279327942795279627972798279928002801280228032804280528062807280828092810281128122813281428152816281728182819282028212822282328242825282628272828282928302831283228332834283528362837283828392840284128422843284428452846284728482849285028512852285328542855285628572858285928602861286228632864286528662867286828692870287128722873287428752876287728782879288028812882288328842885288628872888288928902891289228932894289528962897289828992900290129022903290429052906290729082909291029112912291329142915291629172918291929202921292229232924292529262927292829292930293129322933293429352936293729382939294029412942294329442945294629472948294929502951295229532954295529562957295829592960296129622963296429652966296729682969297029712972297329742975297629772978297929802981298229832984298529862987298829892990299129922993299429952996299729982999300030013002300330043005300630073008300930103011301230133014301530163017301830193020302130223023302430253026302730283029303030313032303330343035303630373038303930403041304230433044304530463047304830493050305130523053305430553056305730583059306030613062306330643065306630673068306930703071307230733074307530763077307830793080308130823083308430853086308730883089309030913092309330943095309630973098309931003101310231033104310531063107310831093110311131123113311431153116311731183119312031213122312331243125312631273128312931303131313231333134313531363137313831393140314131423143314431453146314731483149315031513152315331543155315631573158315931603161316231633164316531663167316831693170317131723173317431753176317731783179318031813182318331843185318631873188318931903191319231933194319531963197319831993200320132023203320432053206320732083209321032113212321332143215321632173218321932203221322232233223432253226322732283229323032313232323332343235323632373238323932403241324232433244324532463247324832493250325132523253325432553256325732583259326032613262326332643265326632673268326932703271327232733274327532763277327832793280328132823283328432853286328732883289329032913292329332943295329632973298329933003301330233033304330533063307330833093310331133123313331433153316331733183319332033213322332333243325332633273328332933303331333233333334333533363337333833393340334133423343334433453346334733483349335033513352335333543355

3.2.3 陷阱	71	4.5.2 硬件设计	114
3.3 协处理器	71	4.5.3 PC作为平台	115
3.4 存储系统机制	72	4.6 开发和调试	117
3.4.1 高速缓存	72	4.6.1 开发环境	117
3.4.2 存储管理单元和地址转换	76	4.6.2 调试技术	118
3.5 CPU的性能	80	4.6.3 调试难点	120
3.5.1 流水线技术	80	4.7 系统级性能分析	121
3.5.2 高速缓存	83	4.7.1 系统级性能分析	121
3.6 CPU的功耗	83	4.7.2 并行	124
3.7 设计示例:数据压缩器	86	4.8 设计示例:闹钟	125
3.7.1 需求和算法	87	4.8.1 需求	125
3.7.2 规格说明	88	4.8.2 规格说明	126
3.7.3 程序设计	89	4.8.3 系统体系结构	129
3.7.4 测试	94	4.8.4 组件设计与测试	130
总结	95	4.8.5 系统集成与测试	130
本章学习要点	95	总结	130
推荐读物	96	本章学习要点	130
习题	96	推荐读物	130
实验练习	98	习题	130
第4章 基于总线的计算机系统	99	实验练习	132
引言	99	第5章 程序设计与分析	133
4.1 CPU总线	99	引言	133
4.1.1 总线协议	99	5.1 嵌入式程序组件	133
4.1.2 DMA	104	5.1.1 状态机	133
4.1.3 系统总线配置	105	5.1.2 面向流的程序设计和循环缓冲区	135
4.1.4 AMBA总线	106	5.1.3 队列	136
4.2 存储设备	107	5.2 程序模型	137
4.2.1 存储设备组织	107	5.2.1 数据流图	137
4.2.2 随机存储器	108	5.2.2 控制/数据流图	139
4.2.3 只读存储器	108	5.3 汇编、连接和装载	140
4.3 I/O设备	109	5.3.1 汇编程序	141
4.3.1 定时器和计数器	109	5.3.2 连接	144
4.3.2 A/D转换器和D/A转换器	110	5.4 基本编译技术	145
4.3.3 键盘	110	5.4.1 语句翻译	146
4.3.4 发光二极管	111	5.4.2 过程	149
4.3.5 显示器	111	5.4.3 数据结构	149
4.3.6 触摸屏	112	5.5 程序优化	150
4.4 组件接口	112	5.5.1 表达式简化	150
4.4.1 存储器接口	112	5.5.2 无效代码的清除	151
4.4.2 设备接口	112	5.5.3 过程内嵌	151
4.5 用微处理器设计	113	5.5.4 循环变换	151
4.5.1 系统体系结构	113	5.5.5 寄存器分配	153

5.5.6 调度	156	6.3 基于优先级的调度	201
5.5.7 指令选择	157	6.3.1 单一速率调度	201
5.5.8 理解并使用你的编译器	157	6.3.2 截止时限最近者优先调度	203
5.5.9 解释器与JIT编译器	157	6.3.3 RMS和EDF的比较	205
5.6 程序级性能分析	158	6.3.4 对建模假设的进一步分析	206
5.6.1 程序性能的要素	159	6.4 进程间通信机制	207
5.6.2 测量驱动的性能分析	162	6.4.1 共享内存通信	207
5.7 软件性能优化	164	6.4.2 消息传递	209
5.7.1 循环优化	164	6.4.3 信号	209
5.7.2 性能优化策略	166	6.5 评估操作系统性能	210
5.8 程序级能量和功率的分析与优化	167	6.6 进程的功耗管理与优化	212
5.9 程序大小的分析与优化	169	6.7 设计示例：电话应答机	214
5.10 程序验证与测试	170	6.7.1 工作原理与需求	214
5.10.1 白盒测试	170	6.7.2 规格说明	216
5.10.2 黑盒测试	175	6.7.3 系统体系结构	218
5.10.3 评估功能测试	176	6.7.4 组件设计与测试	219
5.11 软件调制解调器	177	6.7.5 系统集成与测试	219
5.11.1 工作原理与需求	177	总结	220
5.11.2 规格说明	178	本章学习要点	220
5.11.3 系统体系结构	178	推荐读物	220
5.11.4 组件设计与测试	179	习题	220
5.11.5 系统集成与测试	179	实验练习	224
总结	180	第7章 多处理器	225
本章学习要点	180	引言	225
推荐读物	180	7.1 为什么要使用多处理器	225
习题	180	7.2 CPU和加速器	227
实验练习	185	7.2.1 系统体系结构框架	228
第6章 进程和操作系统	186	7.2.2 系统集成和调试	229
引言	186	7.3 多处理器性能分析	229
6.1 多任务和多进程	186	7.3.1 加速器和加速	229
6.1.1 任务和进程	187	7.3.2 调度和分配的性能影响	232
6.1.2 多速率系统	188	7.3.3 缓冲和性能	234
6.1.3 进程的时限要求	189	7.4 消费电子体系结构	235
6.1.4 CPU量度	192	7.4.1 用例和需求	235
6.1.5 进程状态与调度	192	7.4.2 平台和操作系统	236
6.1.6 调度策略	193	7.4.3 闪存文件系统	236
6.1.7 运行周期性进程	194	7.5 设计示例：移动电话	237
6.2 抢占式实时操作系统	195	7.6 设计示例：CD和DVD	238
6.2.1 抢占	195	7.7 设计示例：音频播放器	241
6.2.2 优先级	196	7.8 设计示例：数码相机	241
6.2.3 进程和上下文	197	7.9 设计示例：视频加速器	243
6.2.4 进程和面向对象设计	200	7.9.1 算法和需求	243

7.9.2 规格说明	245	8.7.2 规格说明	273
7.9.3 体系结构	246	8.7.3 体系结构	274
7.9.4 组件设计	248	8.7.4 测试	275
7.9.5 系统测试	248	总结	275
总结	248	本章学习要点	276
本章学习要点	249	推荐读物	276
推荐读物	249	习题	276
习题	249	实验练习	277
实验练习	251	第9章 系统设计技术	278
第8章 网络	252	引言	278
引言	252	9.1 设计方法学	278
8.1 分布式嵌入式体系结构	252	9.1.1 为什么需要设计方法学	278
8.1.1 为什么使用分布式系统	253	9.1.2 设计流程	279
8.1.2 网络抽象	253	9.2 需求分析	283
8.1.3 硬件和软件体系结构	254	9.3 规格说明	284
8.1.4 报文传递编程	256	9.3.1 面向控制的规格说明语言	284
8.2 嵌入式系统网络	257	9.3.2 高级规格说明	286
8.2.1 I ² C总线	257	9.4 系统分析和体系结构设计	288
8.2.2 以太网	260	9.5 质量保证	291
8.2.3 现场总线	262	9.5.1 质量保证技术	293
8.3 基于网络的设计	262	9.5.2 验证规格说明	294
8.4 可达因特网系统	264	9.5.3 设计评审	295
8.4.1 因特网	264	总结	296
8.4.2 因特网应用	265	本章学习要点	296
8.4.3 因特网安全	266	推荐读物	296
8.5 交通工具和网络	267	习题	296
8.5.1 汽车网络	267	实验练习	297
8.5.2 航空电子系统	270	附录A UML表示法	298
8.6 传感器网络	270	术语表	301
8.7 设计示例: 电梯控制器	271	参考文献	312
8.7.1 工作原理和需求	271		

第 1 章 嵌入式计算

- 为什么在系统中嵌入微处理器
- 嵌入式计算的困难和特点
- 设计方法学
- 系统规格说明
- 本书概览

引言

这一章为我们研究嵌入式计算系统提供了基础性的知识。为了了解设计的流程，我们首先需要知道微处理器为什么以及怎样被用于控制、用户接口、信号处理以及其他一些任务。微处理器已经变得如此普遍，以致于使我们忘记很多事情没有它处理是多么困难。

我们首先回顾各种用途的微处理器，然后回顾微处理器为什么被用于系统设计中，即传递复杂行为、快速的设计周期等等。接下来，1.2节中，我们通过一个系统设计的例子，了解设计系统的主要步骤。1.3节深入研究了规格说明嵌入式系统的技术，我们将在本书中使用这些规格说明技术。在1.4节，我们使用一个模型火车控制器作为例子，应用了1.3节中介绍的规格说明技术，这一技术在本书后续章节中也会经常提及。1.5节逐章概述了本书。

1.1 复杂系统与微处理器

什么是嵌入式计算系统？宽泛地说，是指任何包括一个可编程计算机的设备，但本身并未被刻意设计为一台通用计算机。因此，PC本身并不是一个嵌入式计算系统，尽管PC经常用来构建嵌入式计算系统。但是，通过微处理器构建的传真机或时钟就是一个嵌入式计算系统。

这意味着，对很多产品的设计来说，嵌入式计算系统设计是一种有用的技术。汽车、手机甚至家用电器都广泛使用微处理器。在很多领域中，设计者都必须能够清楚微处理器能够被使用在哪些地方，使用能够实现所要求任务的I/O设备设计一个硬件平台，并实现能够执行要求任务的软件。计算机工程学，就像机械设计、热力学，是在很多领域中能够应用的基本学科。当然，嵌入式计算系统设计不是孤立存在的。很多嵌入式计算系统设计中遇到的挑战都不是计算机工程学中的问题，例如有可能是机械或模拟电路方面的问题。本书主要关注嵌入式计算机本身，因此，将主要集中在使最终产品能实现预期功能的硬件和软件上。

1.1.1 嵌入式计算机

计算机在用于计算初期就被嵌入到应用当中。Whirlwind就是一个例子，这是一台在20世纪40年代末到50年代初由MIT设计的计算机。Whirlwind也是第一台支持实时操作的计算机，最初的设想是作为一种装置控制飞行模拟器。与今天的计算机相比它的体积非常庞大（例如，它包含4 000多个电子管），但其从组件到系统的完整设计是适应实时嵌入式计算需求的。计算机在取代机械或人为控制方面的作用在它刚开始发展时就很明显，比如，在20世纪40年代

末，计算机被用来控制化学药品的生产过程[Sto95]。

微处理器是一种单芯片CPU。从20世纪70年代开始，超大规模集成电路（VLSI）技术使得我们能够将一个完整的CPU集成到单个芯片上，但是这些被集成的CPU都很简单。Intel 4004是第一块微处理器，它被嵌入在计算器当中。这台计算器并不是通用计算机，它仅仅提供基本的算术功能。然而，Intel的Ted Hoff实现了可正确执行所需功能的可编程通用计算机，并且这种单片计算机能够被重新编程而用于其他产品。因为集成电路设计曾经是（现在仍然是）一个昂贵且费时的过程，所以能够通过改变软件来重复使用硬件设计是一个关键的突破。HP-35是第一台能执行一些先验功能的手持计算器[Whi72]。它于1972年面世，因而使用几块芯片实现了CPU，不是单芯片的微处理器。它能够通过编写程序来执行数学计算，而不是设计数字电路来进行三角函数一类的运算，被认为是设计很成功的计算器。

在单芯片CPU问世后，汽车设计者很快开始使用微处理器。微处理器在汽车中最重要同时也是最复杂的应用就是控制引擎，如控制火花塞点火、燃料与气体混合等等。汽车电子的大体发展趋势就是电子设备将会取代机械装置。推动基于微处理器的引擎控制的巨大力量来自两个方面，一是20世纪70年代的石油危机使得消费者在燃料上的花费更多，二是担心法律会对汽车引擎排放进行限制。要同时实现低油耗和低排放是相当困难的，为满足这些目标而又不损害发动机性能，汽车制造商求助于只有微处理器才能执行的复杂控制算法。

微处理器具有不同层次的精度，通常按它们的字长来分类。8位微控制器是为低开销应用设计的，它包括板载存储器和I/O设备。16位微控制器通常用于更复杂的应用，比如更长的字长或者片外I/O和存储器。32位RISC（精简指令集计算机）微处理器为计算密集型应用提供非常高的性能。

由于各种各样的微处理器出现，使得它的应用范围很广。已经有很多家庭使用的微处理器。典型的微波炉至少有一个微处理器控制炉的操作。很多房子拥有先进的自动调温系统，可以在一天的不同时间改变温度。现代照相机同样也可以嵌入微处理器对其进行控制。

数字电视广泛地使用嵌入式处理器。在一些情况下，专用的CPU被用来执行重要的算法，例如，用于DirecTV的SGS Thomson芯片中就有CPU用来进行音频处理[Lie98]。这个处理器用来有效地执行数字音频解码程序。使用可编程CPU而不是硬连接单元的原因有两个：第一，会使系统更容易设计和调试；第二，为升级和其他应用提供可能。

今天，高端的汽车可能有100多个微处理器，即便是便宜的轿车也有40多个微处理器。其中一些微处理器只做很简单的事情，例如检测安全带是否在使用。其他的微处理器控制关键的功能，如点火和制动系统。

应用示例1.1介绍了一些微处理器在BMW 850i中的使用。

应用示例1.1 BMW 850i制动与稳定控制系统

此例介绍了BMW 850i的一套复杂的车轮控制系统。防抱死制动系统（ABS）通过反复制动减少打滑。自动稳定控制（ASC+T）系统辅助引擎改善汽车行驶的稳定性。这些系统主动控制汽车的关键部分，作为控制系统，它们需要和汽车交互操作。

我们首先看ABS。ABS的目的就是在汽车制动的过程中，当车轮转动太慢时，临时释放制动力，因为当车轮停止转动时，汽车就会开始打滑变得难以控制。它与液压泵（为制动提供动力）协作，系统如下图所示。这个连接方式允许ABS系统调节制动，以防止车轮被锁死。ABS系统使用每个车轮上的传感器测量车轮的转速。通过车轮的转速，ABS系统决定如何改变液压液的压力，以防止车轮打滑。