



国际信息工程先进技术译丛

 Springer

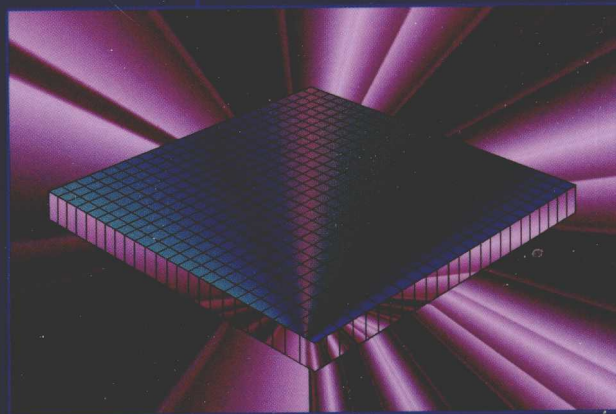
嵌入式系统设计 —— 嵌入式 信息物理系统基础

(原书第2版)

**Embedded System Design Embedded
Systems Foundations of Cyber-Physical
Systems 2nd Edition**

(德) Peter Marwedel 著

何宗彬 任国栋 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

013024695

TP360.21

71

国际信息工程先进技术译丛

嵌入式系统设计——嵌入式 信息物理系统基础

(原书第2版)

(德) Peter Marwedel 著
何宗彬 任国栋 等译



机械工业出版社



北航

C1632306

TP360.21
71

本书针对近年来电子与通信技术的发展对嵌入式系统的需求,从总体上介绍了嵌入式系统的设计模式与方法,从系统的规范与建模、嵌入式硬件、嵌入式操作系统、系统的评估与验证、应用程序的实现与优化等方面,对信息—物理系统的嵌入式设计进行了讲述。透过本书,读者可以学习到更多关于嵌入式领域的前沿知识与设计方法,也可以进一步巩固嵌入式系统知识。本书对工程实践也有着较强的指导意义。

本书可以作为工程师的嵌入式学习资料,也可以作为本科、硕士和研究人员的参考书,对当前的课程教学能起到很好的补充作用。

Translation from the English language edition: "Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems 2nd Edition" by Peter Marwedel.

Copyright© 2011, Springer Netherlands.

Springer Netherlands is a part of Springer + Business Media.

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。版权所有,侵权必究。本书版权登记号:图字:01-2012-2422号

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统设计——嵌入式信息物理系统基础(原书第2版)/(德)马维戴尔(Marwedel, P.)著;何宗彬等译. —北京:机械工业出版社, 2013. 2

(国际信息工程先进技术译丛)

书名原文: Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems 2nd Edition

ISBN 978-7-111-41255-7

I. ①嵌… II. ①马…②何… III. ①微型计算机—系统设计 IV. ①TP360. 21

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第015318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

版式设计:霍永明 责任校对:刘雅娜 张晓蓉

封面设计:马精明 责任印制:邓博

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年3月第1版第1次印刷

169mm×239mm·18.75印张·381千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-41255-7

定价:79.90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

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译者序

随着电子技术、通信技术等的飞速发展，嵌入式系统已经广泛地应用在工业控制、通信、航空航天、消费电子产品等领域，其所带来的价值不可估量。随着时间推移，嵌入式系统的需求量呈现指数增长，并且应用范围不断扩大，同时对系统的复杂性、稳定性、安全性以及关键性的要求也日益提高。嵌入式系统如何满足这种需求，怎样提高嵌入式软件的开发效率，怎样以最短的时间开发出最令人满意的、高效可靠的嵌入式软件成为了摆在人们面前的问题。

本书以全面而整体的视角，重新审视嵌入式系统，全面总结了嵌入式系统中常见的以及关键的设计模式及设计方法。这些模式及方法广泛应用于嵌入式系统或嵌入式软件中。本书还提出了很多新颖的设计模式，为嵌入式系统开发者提供了强有力的工具。通过这些模式，开发者可以用最短的时间设计出性能好、稳定性强、安全性高的嵌入式系统或软件，而且也能为系统日后的升级维护打下坚实的设计基础。读者能够从本书系统地掌握嵌入式系统的设计模式进行系统的开发。本书针对嵌入式系统中从硬件设计到操作系统选择、方案的评估及验证、应用程序的验证、系统的优化及测试出发，对嵌入式系统设计方面的知识进行了详细阐述，本书的读者可以从这些设计原则中进行良好的嵌入式架构设计。

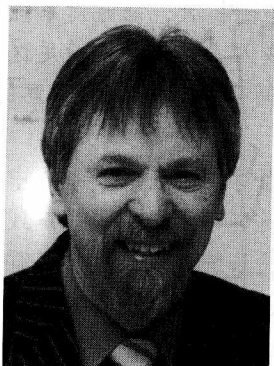
诚然，本书不是一本简简单单的工程类书籍，读完本书后某些方法并不能马上用于具体的工程实践中，但是本书所介绍的嵌入式开发思想却时时刻刻影响着所有阅读过本书的嵌入式开发人员。

本书在翻译的过程中得到了很多人的帮助和鼓励，在此感谢机械工业出版社编辑在本书翻译过程中给予的帮助，还要感谢李兵、李华、黄志登、杨建华、王耀、刘悦、王晨、李亚东、刘葆、崔波、魏玉冰、何朝荣、张凯、孙江涛、何钰、殷凤梅等人对本书部分内容翻译方面给予的指导以及对本书部分内容的翻译。由于时间关系，虽然尽最大的努力翻译，但是译文中难免有疏漏和错误之处，恳请读者批评指正。

译者

关于作者

Peter Marwedel



Peter Marwedel 出生在德国汉堡 (Hamburg)，他于 1974 年在德国基尔大学 (The University of Kiel) 获得物理学博士学位。1974 ~ 1989 年，Peter Marwedel 一直在该校的计算科学与应用数学学院工作。从 1989 年起，他受聘成为德国多特蒙德工业大学 (TU Dortmund) 教授，而后一直在该校计算机科学学院的嵌入式系统研究方面担任领军人物，同时他也在德国一家专门从事技术转让的公司 ICD e. V. 担任重要职务。Marwedel 教授于 1985/1986 年在帕德伯恩大学 (The University of Paderborn) 担任客座教授，1995 年在加州大学欧文分校 (The University of California at Irvine) 担任客座教授。1992 ~ 1995 年，Marwedel 教授担任多特蒙德工业大学计算机科学学院院长。Marwedel 教授在 DATE 会议的成功开展方面起到了非常积极的作用，他还发起了 SCOPES 和 Map2MPSoCs 的一系列研讨会。他在 1975 年开始了对高层综合方面的研究，尤其是在 VLIW 的综合方面。而后，他的研究领域扩展到了嵌入式处理器 (特别是处理器的可重定向性)。Marwedel 教授研究项目还包括对处理器自测试程序的综合，以及 Levi 多媒体单元的设计 (参考 <http://ls12-www.cs.tu-dortmund.de/teaching/download/index.html>)。Marwedel 教授是 ArtistDesign 小组负责人，ArtistDesign 是欧洲一个研究嵌入式与实时系统设计艺术的组织，他领导着嵌入式系统能耗方面相关的一些项目，尤其关注嵌入式系统中内存架构以及时序的可预测性。Marwedel 教授在 2003 年获得其所在大学的教学成就奖。

Marwedel 教授是 IEEE 会员、DATE 会员、ACM 高级会员以及 Gesellschaft für Informatik (GI) 会员。

Marwedel 教授已经结婚并有两个女儿与一个儿子，他的爱好包含轨道建模以及摄影。

E-mail: peter.marwedel@tu-dortmund.de。

网站: <http://ls12-www.cs.tu-dortmund.de/~marwedel>。

原 书 前 言

定义与范围

直到 20 世纪 80 年代末期, 信息处理仍然依赖于大型计算机及海量的磁带式存储介质。在 90 年代, 信息处理开始转向使用个人计算机 (PC)。随着产品小型化趋势的发展, 大多数的信息处理设备将使用小型的便携式计算机, 大型产品将集成多个信息处理设备。PC 上的信息处理较常见, 但其实信息处理也存在于多种大型产品中, 如电信设备。一般来讲, 科技产品必须以先进的技术来吸引顾客。在科技发达国家的汽车、摄像机、电视机、手机等领域, 如果产品中没有嵌入式计算机, 产品将很难畅销。基于此, 并根据一些预测 (参见 [National Research Council, 2001]), 信息与通信技术 (Information and Communication Technologies, ICT) 的未来特征可以用如下的一些术语来概括:

- 1) 普及计算 [Weiser, 2003];
- 2) 普适计算 [Hansmann, 2001], [Burkhardt, 2001];
- 3) 环境智能 [Koninklijke Philips Electronics N. V., 2003], [Marzano and Aarts, 2003];
- 4) 消失的计算机 [Weiser, 2003];
- 5) 后 PC 时代。

术语 1 与 2 都反映了计算 (与通信) 无处不在的事实, 信息将随时随地触手可及。这些关于未来的预测, 也包括我们的日常生活将进入普遍计算的时代。作为环境智能, 它们的重点之一就是未来的智能建筑。其实术语 1~3 仅有些许的差异: 普适计算侧重于无时无处不在的信息分享; 普及计算侧重于如何对现有信息进行利用。术语 4 表明了处理器与软件将更广泛地应用于很多小系统中, 很多时候它们都不是直接可见的。术语“后 PC 时代” (Post-PC era) 则是指硬件平台中基于标准架构的 PC 将会减少。

下一代 ICT 系统需要两项关键技术:

- 1) 嵌入式系统 (Embedded Systems);
- 2) 通信技术 (Communication Technologies)。

图 0.1 展示了嵌入式系统与通信技术如何影响普适计算。

举例来说, 一些嵌入式的普适计算设备, 在使用诸如网络化的基本通信技术时, 必须满足嵌入式系统关于实时性与可靠性的要求。除部分章节有所提及处, 关于通信技术的细节并不在本书的讨论范围, 读者需要另行参考其他著作。那么, 究

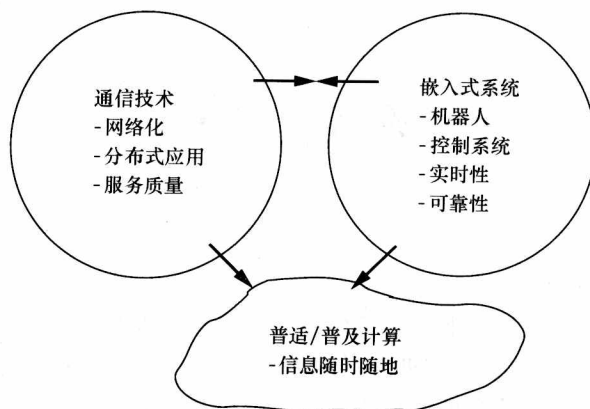


图 0.1 嵌入式系统对普适/普及计算的影响 (© European Commission)

竟什么是“嵌入式系统”？它们可以有如下定义 [Marwedel, 2003]：

定义：嵌入式系统是集成在产品中的信息处理单元。

如汽车、火车、飞机、电信及制造设备等包含嵌入式系统的设备，它们有很多共性，如对实时性的要求、对可靠性以及效率的要求等。在这些系统中，与物理环境及物理系统的连接尤为重要，下面的引用也对此进行了强调 [Lee, 2006]：

“嵌入式软件是基于物理处理器的一种软件，它用于在计算系统中管理时间与并发性”。

以上引用可以被用来定义“嵌入式软件”这一术语，如果将其中的“软件”换成“系统”，它也可以扩展为对嵌入式系统的定义。如果加以强调其与物理系统的连接，则可以引申出“信息—物理系统” (Cyber-Physical System, CPS 或 cy-phy 系统)。cy-phy 系统的定义如下：

定义：“信息—物理系统是计算与物理过程的集成” [Lee, 2007]。

这个新的术语强调了诸如时间、能量、空间与物理工程的关系。在大部分软件都运行在 PC 上的环境中，这种关系常常被忽略，那么现在对其进行强调，就有着重要的工程意义。对于信息—物理系统，在系统建模时，需要同时考虑物理环境的模型。从这种意义上讲，可以将信息—物理系统理解为嵌入式系统（信息处理单元）与物理环境的组合。当希望强调物理与环境的关系时，将随时引用这一新术语。在未来，面向生物与化学的连接也会变得重要。

本书提供了信息—物理系统设计中的重要设计概念，覆盖了技术规范、硬件组件、系统软件、应用实现、仿真与验证、典型系统的优化以及测试方法。

嵌入式信息—物理系统的重要性

嵌入式信息—物理系统被认为是 ICT 未来最重要的应用领域。嵌入式系统中的处理器数量已经超过了 PC，这种趋势仍将继续。据此，嵌入式软件的数量也将保持增长。人们已经预言了新的摩尔定律：消费电子产品中的代码量每两年将会翻倍 [Vaandrager, 1998]。嵌入式系统的重要性不断增长，它甚至影响到了美国国家研究委员会的一份报告 [National Research Council, 2001]。该报告中指出，“信息技术 (Information Technology, IT) 正在带来一场新的革命…嵌入式计算机所组成的网络…依靠对大量设备与传感器的连接，它将很有可能从根本上改变人们与环境的相互关系，它使信息以前所未有的方式进行收集、分享与处理…整个社会将因此创造一个新的里程碑”。

关于嵌入式市场规模的统计资料，可以从相关的网站上查找到。这类站点如“IT facts” [IT Facts, 2010]，它分析了嵌入式系统市场的重要性。也可以从另一个角度看待嵌入式市场的规模，大部分的嵌入式处理器都是 8 位处理器，但除此之外，32 位处理器也正被大量使用到嵌入式系统中 [Stiller, 2000]。早在 1996 年，就有人估算说每个美国人平均每天要接触超过 60 种微处理器 [Camposano and Wolf, 1996]。一些高端汽车上装置了超过 100 种微处理器[⊙]。因为人们一般并不会意识到他们正在使用微处理器，所以这个数据其实比典型的预估值还要高。关于嵌入式系统的重要性，也有如下报道 [Ryan, 1995]：

“工业中的嵌入式芯片驱动着我们所生存的世界的发展…它们是基于电力工作的系统的重要部分”。

根据多项预测，嵌入式系统的市场将在未来远大于 PC 一类的市场。美国国家科学基金会一直在资助信息—物理系统的研究工作 [National Science Foundation, 2010]。在欧洲，第六、第七框架项目支持嵌入式系统的研究与开发 [European Commission Cordis, 2010]。ARTEMIS 联合组织 [ARTEMIS Joint Undertaking, 2010] 也在政府与公司之间创建了一个合作研究组织，从而推动嵌入式计算的研究与开发。这些积极的行动，都证实了欧洲的工业界对此领域有着巨大的兴趣。当然，在其他的国家与地区也存在着类似的组织。

在当前的很多课程或培训中，都未能有效地强调嵌入式/信息—物理系统的重要性。本书的写作目的就是要改变这一现象：它将提供学习嵌入式/信息—物理系统的第一课。因此，它被设计为教科书的形式。但它又比一般的教科书提供了更多的参考，它也能帮助读者丰富关于这一领域的信息。因此，本书也适用于教师以及工程师。对于学生，本书提供的丰富的参考资料可以使其更迅速地找到相关信息。

⊙ 根据 Personal communication 的统计。

本书的读者

本书适合于以下4类读者:

1) 计算机科学 (CS)、计算机工程 (CE)、电子工程 (EE) 专业的学生以及其他 ICT 相关专业对嵌入式/信息—物理系统有所研究的专业学生。本书适合对计算机软、硬件有一定基础的本科大三以上学生阅读, 即适合高年级的在校生阅读。本书的目的之一, 是为读者在以后的课程中探索更深层次问题铺平道路。本书假定读者具备一些计算机科学的知识, 因此电子工程专业的学生可能需要去阅读一些补充材料, 从而更好地理解本书的内容。事实上, 本书中提及的一些内容也许已经被电子工程专业的学生所知晓。

2) 一直从事嵌入式硬件但希望对嵌入式软件开发也有所涉猎的工程师。本书也将提供很多的背景资料以使读者能更好地了解相关的出版物。

3) 在集中开展特定领域的研究前, 希望快速而大致了解嵌入式系统技术中的关键概念的博士研究生。

4) 讲授关于嵌入式系统的新课程前的教师。

嵌入式系统课程的整合

不幸的是, 在最近由 ACM 和 IEEE 计算机科学 [ACM/IEEE, 2008] 出版的最新版计算机科学课程中, 嵌入式系统并没有被覆盖到。但是, 相关的应用产品的增长又形成了对此类课程的强烈需求。本书将帮助读者克服当前嵌入式系统学习中可利用的资源较少的限制。例如, 对更好的规范语言、模式、工具生成、时序验证、系统软件、实时操作系统、低功耗设计技术、可靠性设计技术等的需求。本书将讲授一些问题的要点, 从而作为读者展开相关研究的第一步。

本书的覆盖范围

本书涵盖了嵌入式系统中的软件与硬件, 写作出发点可以以如下的话来解释: “嵌入式系统的开发决不能忽略潜在的硬件因素。时序、内存使用、功耗以及物理缺陷都很重要。” [Caspi et al., 2005]。

本书侧重于硬件与软件设计中的基本概念, 因此除非某些工具与产品确实不同凡响, 否则本书不会对其进行详细介绍。这在 ARTIST 中也可以解释为“如果一开始没有奠定良好的理论基础, 则它们在今后的培训中将更难以学会, 然而这些理论又是我们必须重视的。” [Caspi et al., 2005]。本书通过微控制器编程的讲授, 来讲授嵌入式系统的设计, 我们希望书中的材料不会很快过时, 其中的概念在未来多年内仍将具有指导意义。

关于计算机科学与工程教科书, 我在一篇论文中对此也有一些提议 [Marwedel, 2005]。本书的一个重要目标, 即梳理出关于嵌入式系统设计中重要的相关

课题，并且讨论它们之间的联系。由此，可以避免在 ARTIST 手册中提及的一个问题：“要经历太多工业实践才能迎来一个领域的成熟，这通常又归因于文化。…课程…对于那些特别强调某项技术的课程，它们并未提供足够广泛的知识面。…因此，工厂经常难以找到训练有素的工程师” [Caspi et al., 2005]。

本书也是微控制器编程实践与理论知识的桥梁。更进一步地，它将帮助老师与学生去积极获取更多详细资料。关于某些话题，本书进行了详实的讨论，某些只作了简要概述。概述性章节的引入，是为了引入更多相关的问题与参考。这种方式使教师可以针对其所需在本书中进行选择，并查阅书中提及的参考资料。本书包含了比常规教科书更多的参考内容，这样，本书可以作为一个综合向导，为读者在进行其他资料的学习时指明方向。在实验室、项目以及独立研究中，对这些参考资料的研究也将为其带来积极作用。

关于本书的更多相关资料可以从如下网站获得：

<http://ls12-www.cs.tu-dortmund.de/~marwedel/es-book>

网页包含了演示 ppt、仿真工具、勘误以及其他的相关材料。发现本书错误或希望评价此书的读者可以发送邮件至：

peter.marwedel@tu-dortmund.de

在完成章节练习时，可以参考一些补充内容（如 [Wolf, 2001]、[Buttazzo, 2002] 和 [Gajski et al., 2009]）。

预备知识

阅读本书需要对以下领域有基本认识：

- 1) 高中水平的电气知识（如基尔霍夫定律）；
- 2) 运算放大器（可选）；
- 3) 计算机架构，如 J. L. Hennessy 与 D. A. Patterson 相关著作的初级水平 [Hennessy and Patterson, 2008]；
- 4) 类似于门与寄存器的基本数字电路知识；
- 5) 计算机编程（含软件工程理论）；
- 6) 操作系统基础；
- 7) 计算机网络基础；
- 8) 有限状态机；
- 9) 微控制器编程的基本经验；
- 10) 基本的数学概念（如数组、积分、线性方程），最好能有统计学及傅里叶级数的知识；
- 11) 算法（图形算法、优化算法以及分支界限）；
- 12) NP-completeness 的概念。

本书所需预备知识的架构如图 0.2 所示。

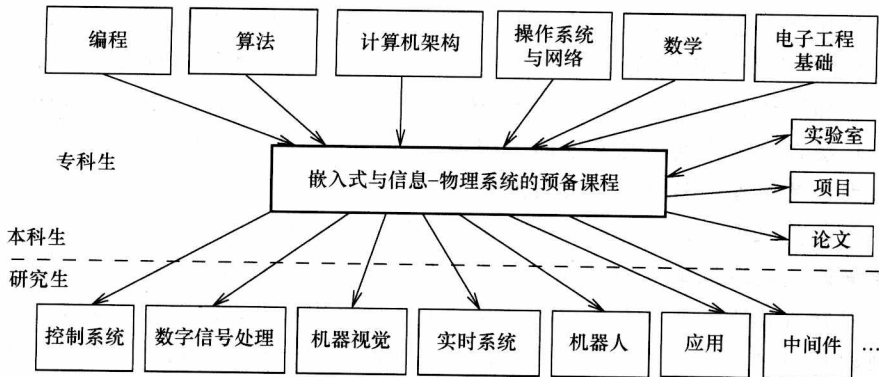


图 0.2 本书知识点的架构

其他推荐学习资料

使用本书作教材,最好有专门的实验室,可以使用小型机器人,如 Lego Mindstorms™ 或相似的其他机器人来做实验。可选地,也可以让学生利用有限状态机的工具来进行实际操作。

以下领域的专业课程可以作为本书的补充学习资料(参见图 0.2 的底行)⊙:

- 1) 控制系统;
- 2) 数字信号处理;
- 3) 机器视觉;
- 4) 实时系统、实时操作系统与调度;
- 5) 中间件;
- 6) 诸如通信、汽车、医疗设备及智能家居等应用领域的材料;
- 7) 机器人技术;
- 8) 传感器与执行机构;
- 9) 嵌入式系统的特定语言;
- 10) 特定应用的计算机辅助设备工具;
- 11) 硬件系统的常规验证;
- 12) 硬件与软件系统测试;
- 13) 计算机系统的性能评估;
- 14) 低功耗设计技术;
- 15) 计算机系统的安全性及可靠性;
- 16) 普适计算;

⊙ 不同学校的本科及研究生课程可能存在差异。

17) 嵌入式系统的影响。

本书的历史

自本书第1版在2003年发行之后，嵌入式系统的快速发展带来了许多新的产物。同时，许多领域的重点也发生了改变。我们就需要根据这些变化，来重新对某些课题进行讨论。2007年本书的德语第1版出版后，我们开始了新的研究。至此，发行基本上是全新的英语版本变得很有必要，也即当前的第2版。

本书引用中未能提及版权或商标的名称，它们同样受法律保护。

欢迎您阅读本书！

Peter Marwedel

多特蒙德（德国），2010年8月

原书致谢

我的博士研究生，尤其是 Lars Wehmeyer，对本书的初稿进行了仔细校对。同时，参与我课程的学生也向我提供了很多有价值的帮助。David Hec、Thomas Wiederkehr、Thorsten Wilmer 和 Henning Garus 参与了本书的校对工作。以下同事及学生的意见也被整合到了本书中：R. Dömer、N. Dutt [加州大学欧文分校 (UC Irvine)]、A. B. Kahng [加州大学圣地亚哥分校 (UC San Diego)]、W. Kluge、R. von Hanxleden [基尔大学 (U. Kiel)]、P. Buchholz、M. Engel、H. Krumm、O. Spinczyk [多特蒙德工业大学 (TU Dortmund)]、W. Müller、F. Rammig [帕德博恩大学 (U. Paderborn)]、W. Rosenstiel [图宾根大学 (U. Tübingen)]、L. Thiele [苏黎世联邦理工大学 (ETH Zürich)] 以及 R. Wilhelm [萨尔大学 (Saarland University)]。在本书的写作准备过程中，还使用到了以下朋友的资料：G. C. Buttazzo、D. Gajski、R. Gupta、J. P. Hayes、H. Kopetz、R. Leupers、R. Niemann、W. Rosenstiel、H. Takada、L. Thiele 以及 R. Wilhelm。我的博士研究生小组为本书编写了章节练习。当然，作为作者，我为本书中的所有错误与不当之处负责。

我要真诚地感谢欧洲委员会对如下项目的支持：MORE、Artist2、ArtistDesign、Hipeac (2)、PREDATOR、MNEEMEE 和 MADNESS，它们为本书第 2 版的写作提供了精彩的题材。

本书是使用 TeXnicCenter user interface 的 L^AT_EXtype 软件完成的。我也同时想感谢软件的作者为此所做的工作。

我也要感谢那些接受因作者写作本书带来了额外工作量的朋友。

最后，感谢 Springer 出版社一直推动与支持本书的出版工作。

目 录

译者序

关于作者

原书前言

原书致谢

第 1 章 简介	1
1.1 应用领域与实例	1
1.2 共同特征	3
1.3 嵌入式系统设计的挑战	7
1.4 设计流程	9
1.5 本书的结构	12
1.6 思考题	13
第 2 章 规范与建模	15
2.1 需求	15
2.2 计算模型	20
2.3 早期设计阶段	24
2.3.1 用例	25
2.3.2 (消息) 序列图	26
2.4 通信有限状态机	28
2.4.1 时间自动机	28
2.4.2 状态图: 隐性共享内存通信	30
2.4.3 同步语言	37
2.4.4 SDL: 消息传递的场景	39
2.5 数据流	43
2.5.1 范围	43
2.5.2 Kahn 处理网络	44
2.5.3 同步数据流	46
2.5.4 Simulink	47
2.6 Petri 网	49
2.6.1 简介	49

2.6.2	条件/事件网	50
2.6.3	库所/变迁网	51
2.6.4	预测/变迁网	54
2.6.5	评估	55
2.7	基于离散事件的语言	57
2.7.1	VHDL	57
2.7.2	SystemC	69
2.7.3	Verilog 与 SystemVerilog	71
2.7.4	SpecC	72
2.8	冯·诺依曼语言	73
2.8.1	CSP	73
2.8.2	ADA	74
2.8.3	Java	76
2.8.4	Pearl 与 Chill	77
2.8.5	通信库	77
2.9	硬件建模的层次	78
2.10	计算模型的比较	80
2.10.1	比较的标准	80
2.10.2	UML	82
2.10.3	Ptolemy II	84
2.11	思考题	84
第3章	嵌入式系统硬件	87
3.1	简介	87
3.2	输入	88
3.2.1	传感器	88
3.2.2	离散系统: 采样保持电路	90
3.2.3	数值离散化: A-D 转换器	93
3.3	处理单元	96
3.3.1	概述	96
3.3.2	ASIC	98
3.3.3	处理器	98
3.3.4	可编程序逻辑	110
3.4	内存	112
3.5	通信	114
3.5.1	需求	114
3.5.2	电气健壮性	115
3.5.3	实时性的保证	116

3.5.4 例子	118
3.6 输出	119
3.6.1 D-A 转换器	120
3.6.2 采样定理	122
3.6.3 执行器	125
3.7 安全硬件	126
3.8 思考题	126
第4章 系统软件	129
4.1 嵌入式操作系统	129
4.1.1 总体需求	129
4.1.2 实时操作系统	132
4.1.3 虚拟机	135
4.1.4 资源访问协议	136
4.2 ERIKA	140
4.3 硬件抽象层	143
4.4 中间件	143
4.4.1 OSEK/VDX COM	143
4.4.2 CORBA	143
4.4.3 MPI	144
4.4.4 POSIX 线程 (Pthreads)	145
4.4.5 OpenMP	145
4.4.6 UPnP、DPWS 和 JXTA	146
4.5 实时数据库	146
4.6 思考题	147
第5章 评估和验证	149
5.1 简介	149
5.1.1 范围	149
5.1.2 多目标优化	150
5.1.3 相关目标	151
5.2 性能评估	152
5.2.1 早期阶段	152
5.2.2 WCET 估算	152
5.2.3 实时微积分学	156
5.3 资源与功耗模型	159
5.4 热模型	160
5.5 风险及可靠性分析	161

5.6	仿真	168
5.7	快速原型及仿真	169
5.8	形式验证	170
5.9	思考题	171
第6章	应用程序映射	174
6.1	问题定义	174
6.2	实时系统中的调度	176
6.2.1	调度算法分类	176
6.2.2	没有优先级约束的非周期性调度	179
6.2.3	有优先级约束的非周期性调度	184
6.2.4	没有优先级约束的周期调度	191
6.2.5	有优先约束的周期调度	195
6.2.6	零散事件	195
6.3	硬件/软件分割	195
6.3.1	简介	195
6.3.2	COOL	196
6.4	映射至异构多处理器	201
6.5	思考题	205
第7章	优化	207
7.1	任务级并发性管理	207
7.2	上层优化	210
7.2.1	浮点至定点转换	210
7.2.2	简单循环转换	211
7.2.3	循环分块	213
7.2.4	循环分割	215
7.2.5	数组折叠	217
7.3	用于嵌入式系统的编译器	218
7.3.1	简介	218
7.3.2	高效节能编译	219
7.3.3	基于内存架构的编译	219
7.3.4	调和编译器以及时序分析	225
7.3.5	DSP 编译	227
7.3.6	多媒体处理器的编译	229
7.3.7	用于 VLIW 处理器的编译器	230
7.3.8	用于网络处理器的编译器	231
7.3.9	编译器的产生、重定向以及设计空间的研究	231