

原书第2版

嵌入式系统导论

CPS方法

[美] 爱德华·阿什福德·李 (Edward Ashford Lee) 桑吉特·阿伦库马尔·塞希阿 (Sanjit Arunkumar Seshia) 著

加州大学伯克利分校

张凯龙 译

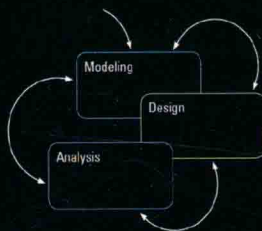
西北工业大学

Introduction to Embedded Systems
A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition

Edward Ashford Lee and
Sanjit Arunkumar Seshia

**INTRODUCTION TO
EMBEDDED SYSTEMS**
A CYBER-PHYSICAL SYSTEMS
APPROACH

Second Edition



机械工业出版社
China Machine Press

计 算 机 科 学

原书第2版

嵌入式系统导论

CPS方法

[美] 爱德华·阿什福德·李 (Edward Ashford Lee) 桑吉特·阿伦库马尔·塞希阿 (Sanjit Arunkumar Seshia) 著
加州大学伯克利分校

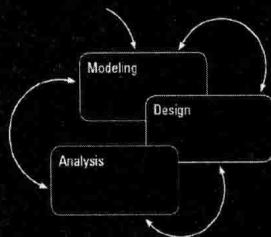
张凯龙 译
西北工业大学

Introduction to Embedded Systems
A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition

Edward Ashford Lee and
Sanjit Arunkumar Seshia

INTRODUCTION TO EMBEDDED SYSTEMS A CYBER-PHYSICAL SYSTEMS APPROACH

Second Edition



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式系统导论: CPS 方法 (原书第 2 版) / (美) 爱德华·阿什福德·李 (Edward Ashford Lee), (美) 桑吉特·阿伦库马尔·塞希阿 (Sanjit Arunkumar Seshia) 著; 张凯龙译. —北京: 机械工业出版社, 2018.8

(计算机科学丛书)

书名原文: Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition

ISBN 978-7-111-60811-0

I. 嵌… II. ①爱… ②桑… ③张… III. 微型计算机 - 系统设计 IV. TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 201133 号

本书版权登记号: 图字 01-2017-0151

Authorized translation from the English language edition entitled Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach, Second Edition (ISBN 978-1-312-42740-2) by Edward Ashford Lee, Sanjit Arunkumar Seshia. Copyright © 2017 by Edward Ashford Lee & Sanjit Arunkumar Seshia.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanic, including photocopying, recording, or by any information storage retrieval system, without permission of by Edward Ashford Lee; Sanjit Arunkumar Seshia.

Chinese simplified language edition published by China Machine Press.

Copyright © 2018 by China Machine Press.

此版权仅限在中华人民共和国境内 (不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区) 销售。未经授权的本书的出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书从 CPS 的视角, 围绕嵌入式系统的建模、设计和分析三方面, 深入浅出地介绍了设计和实现 CPS 的整体过程及各个阶段的细节, 重点是论述系统模型与系统实现的关系, 以及软件和硬件与物理环境的相互作用。本书共四部分, 其中第一部分着重分析了连续动态、离散动态与混合系统等模型以及状态机组合模型和并发计算模型等基础理论。第二部分聚焦于系统的设计, 以理论化的方式阐述了传感器、执行器、处理器、存储器、输入与输出等硬件组件以及多任务和调度等核心软件机制。第三部分详细论述了 CPS 的分析与验证方法, 还针对日益严重的物联网空间安全问题阐述了安全性与隐私性的内容。第四部分给出了有关集合与函数、复杂性与可计算性的两个附录。

本书适合研究型大学计算机、自动化、电子信息及电气工程等专业的高年级本科生、研究生学习, 尤其适合作为高级嵌入式系统类课程的授课教材或参考教材。

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: 余 洁

责任校对: 李秋荣

印 刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版 次: 2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 20.25

书 号: ISBN 978-7-111-60811-0

定 价: 89.00 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

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@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



爱德华·阿什福德·李
(Edward Ashford Lee)

加州大学伯克利分校电子工程与计算机科学系 (EECS) 罗伯特·S. 佩珀 (Robert S. Pepper) 杰出教授; 研究兴趣集中于嵌入式实时计算系统的设计、建模与分析, 曾任加州大学伯克利分校电子工程 (EE) 分部以及电子工程与计算机科学系主任。1979年获得耶鲁大学计算机科学学士学位, 1981年获得麻省理工学院 (MIT) 电子工程与计算机科学硕士学位, 1986年获得加州大学伯克利分校电子工程与计算机科学博士学位。1979年至1982年期间, 曾在位于新泽西州霍姆德尔的贝尔实验室任职。他是伯克利设计技术股份有限公司 (BDTI) 的联合创始人、IEEE会士 (IEEE Fellow)、美国国家科学基金会总统青年科学家, 并于1997年获得美国工程教育学会的弗雷德里克·埃蒙斯·特曼奖。



桑吉特·阿伦库马尔·塞希阿
(Sanjit Arunkumar Seshia)

加州大学伯克利分校电子工程与计算机科学系教授; 研究兴趣集中于可信计算、计算逻辑和形式化方法及其在嵌入式系统、计算机安全、电子设计自动化以及合成生物学等领域问题中的应用; 于印度理工学院孟买分校获得计算机科学与工程学士学位, 于卡内基-梅隆大学 (CMU) 获得计算机科学硕士和博士学位。他曾获美国青年科学家与工程师总统奖 (PECASE)、艾尔弗雷德·P. 斯隆研究奖, 以及卡内基-梅隆大学计算机科学学院杰出学位论文奖。

译者简介



张凯龙

博士、博士后（法国），西北工业大学计算机学院副教授，西北工业大学—巴黎高科MINES机器人与群智能系统联合实验室主任，第二届中国嵌入式系统十大杰出青年，主要研究嵌入式计算与系统技术、机器人与群智能系统技术等。

文艺复兴以来，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取得了垄断性的优势；也正是这样的优势，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, 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相助，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，有的还专门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

Introduction to Embedded Systems: A Cyber-Physical Systems Approach, 2E

接触本书原著是在2017年11月,时值我受西北工业大学国际著名高校访问计划资助对UC Berkeley(加州大学伯克利分校)进行短期学术访问。众所周知,UC Berkeley的计算机专业在国际上享有盛名,为全球的计算机专业人才培养以及技术发展做出了杰出贡献。为此,我希望借此机会从多个方面来展开学习和交流。一方面,我应邀与UC Berkeley PATH(Partners for Advanced Transportation Technology)研究所、机械工程系(ME)、电气工程与计算机科学系(E ECS)等机构的学者及其团队就无人车与智能交通领域的研究进行深入、充分的学术交流。同时,我也抓紧时间参与电气工程与计算机科学系的本科生、研究生课程,以体验和了解该专业的教学体系、相关课程的内容组织和教学方法等。鉴于我已从事嵌入式系统教学十余年,Edward Ashford Lee教授所开设的“嵌入式系统导论”(Introduction of Embedded System,课程代码E ECS 149)课程也就成为要旁听的重点,并提前购买了本书原著(原著采用了新的出版方式,课程网站上提供了可下载的PDF文件,本书“前言”对此进行了简要说明)。藉由课程,与Edward Ashford Lee教授进行了交流,随后应教授的邀请在混合与嵌入式软件系统中心(CHESS)做了学术报告,并初步达成了将这本优秀著作翻译为中文的意向,是为本翻译工作的开端。

纵观全书,我们可以发现本书内容视角独特、内容新颖、方法独到,其立意于嵌入式系统技术发展的新阶段——信息物理融合系统(CPS),重点以与之相关的数学、模型、机制等计算机科学的理论和方法为主要内容,形成了一个强调理论性和原理性的知识体系。本书用“理论”的方式来深入阐述嵌入式系统这一实践性强的工科课程,体现出作者深厚的理论基础、广博的专业知识以及创新的专业思维。在自然科学范畴,归纳并建立正确的基础理论体系或者用这样的理论体系来指导实践,是跳出万变现象来彻底解决一系列科学、工程问题的根本。如爱因斯坦所言:“数学之所以有高声誉,另一个理由就是数学使得自然科学实现定理化,给予自然科学某种程度的可靠性。”嵌入式系统基础理论体系的建立也是如此,其会让具体科学、工程问题的解决更为可靠,也常常可以免去嵌入式系统设计过程中由经验性、试验性工作所带来的种种困扰。当然,从理论的角度出发来学习嵌入式系统知识具有两大挑战:一是要有良好的理论基础,以保证对本书内容的深刻理解和掌握;二是要有良好的计算机工程基础,以实现抽象理论与具体设计方法的融会贯通。这对读者的学习基础及目标都提出了更高的要求。因此,本书适合计算机科学、计算机工程及相关电子类专业的高年级本科生和研究生学习。

我于2017年出版了《嵌入式系统体系、原理与设计》一书,该书偏重于计算机工程相关的原理与方法,与本书的内容体系完全不同。显然,本书的翻译工作对于我来说将是一个极为宝贵的专业学习机会,为此我坚持了“Working by Learning, Learning by Doing”的工作态度以及一人完成翻译的工作方式。翻译是二次创作的过程,科技著作的翻译更是如此——既要准确还原书中阐述的专业知识和观点,同时还要尽可能润色文字以符合中文读者的阅读习惯。在互联网时代,计算机搜索工具和翻译工具的出现为翻译工作提供了极大的便利。不可否认,基于大数据和深度学习的自然语言翻译技术已经取得了长足的进展,偶尔也

会对某个句子给出令人赞叹之译。但翻译不仅是语言的事情，还涉及知识、领域、文化、习惯等多个方面，因此，这些工具目前仍只能作为辅助，距离完全替代人的工作还有很长的路要走。为了做到尽量准确，在翻译过程中我不断查阅资料，尽力拓展与内容相关的专业知识并不断学习翻译方法和规范。在这段夜以继日的日子里，我能够时时体会到深入学习和不断进步的成就感，这已经完全抵消了身体上的疲劳！正如高斯所言：“给我最大快乐的，不是已懂得的知识，而是不断学习；不是已达到的高度，而是继续努力攀登。”这里，也引用著名作家路遥先生一段经典的文字与广大读者共勉：“我的创作历程是艰苦地摸索前行的历程。几乎每走一步都要付出身心方面的巨大代价。我认识到，文学创作从幼稚趋向于成熟，没有什么便利的那些所谓技巧，而是用自我教育的方式强调自身对这种劳动持正确的态度，这不是‘闹着玩’，而应该抱有庄严献身精神，下苦功夫……我要求自己，在任何时候都不丧失一个普通劳动者的感觉，要永远沉浸在生活的激流之中。所有这些我都仍将坚持到底。”

感谢在翻译工作期间给予我关心、支持和帮助的所有人！特别是原著的两位作者——UC Berkeley 电气工程与计算机科学系的 Edward Ashford Lee 教授和 Sanjit Arunkumar Seshia 教授，以及 UC Berkeley PATH 研究所的 Zhang Wei-Bin 研究员，正在 UC Berkeley 作访问教授的 MINES Paristech 机器人研究中心主任 Arnaud de La Fortelle 教授，西北工业大学计算机学院的张艳宁教授、王庆教授、尚学群教授、郭阳明教授、邓磊副教授、吴晓副教授，以及机械工业出版社华章公司的余洁编辑、张梦玲编辑和姚蕾编辑！

感谢在书稿校对阶段付出辛勤努力、贡献智慧的课题组硕士研究生王雨佳、李孝武、谢策、李刘洋、费超、王敏、谢尘玉、巩政！他们聪颖好学、充满活力又富有团队合作精神，希望继续与他们共同学习并携手迎接新的挑战！

感谢我的家人，让我心中充满了爱和责任，也给予了我不断前行的力量！特别感谢我的太太李瑜女士，感谢她一如既往地信任和支持我，在这段漫长的日子里再一次打理了家庭大大小小的事务，让我能够静心、专心于本书的翻译工作！感谢嘉航和嘉芮两位小朋友，他们让生活时时充满童趣，愿爱陪伴他们成长！

这是我的第一本译作。虽自觉已尽力，但个人知识与能力有限，不妥之处在所难免，期待广大读者的宝贵意见和建议（我的邮箱：kl.zhang@nwpu.edu.cn）。

本书内容

计算机及软件最常见的用途是在人类消费及日常活动中进行信息处理，我们使用它们来撰写书籍（就像本书）、在互联网上查询信息、通过电子邮件进行通信，以及记录金融数据等。然而，生活中绝大多数的“计算机”并不可见。它们控制汽车的引擎、刹车、安全带、安全气囊以及音频系统；它们将你的声音进行数字编码，进而转换为无线电信号并从你的手机发送到基站；它们控制着微波炉、冰箱以及洗碗机；它们驱动从桌面喷墨打印机到工业大容量打印机等各式打印设备；它们控制工厂车间的机器人、电厂的发电机、化学工厂的生产过程以及城市的交通灯；它们在生物样本中检测细菌，构建人体内部的图像并评估生命体征；它们从太空的无线电信号中寻找超新星及地外智慧生物；它们给予玩具“生命”，使其可以与人进行触觉、听觉的交互；它们控制飞行器及火车，等等。这些“隐蔽”的计算机被称为**嵌入式系统**（Embedded System），其中所运行的软件则被称为**嵌入式软件**（Embedded Software）。

尽管嵌入式系统已广泛地存在和应用，但计算机科学在其相对较短的发展历程中仍以信息处理为核心。直到近些年，嵌入式系统才得到研究者越来越多的关注。同样，也是直到近些年，本领域的研究者和机构才日益意识到设计和分析这些系统需要不同的工程技术。尽管嵌入式系统自 20 世纪 70 年代就被应用，但这些系统更多时候是被简单地看作小型计算机系统，如何应对资源受限（处理能力、能源、存储空间受限等）是其核心工程问题。由此，设计优化就成为嵌入式系统的工程挑战。由于所有设计都会从优化过程中受益，因此，嵌入式系统学科也就与计算机科学的其他学科没什么区别，只是要求我们更加积极地应用这些共性优化技术。

近来，研究者已经认识到嵌入式系统的主要挑战源自于其与物理进程的交互，而并非资源的限制。美国国家科学基金会（NSF）的项目主管 Helen Gill 率先提出了“信息物理融合系统”（Cyber-Physical System, CPS）^①这一概念，以强调计算进程与物理进程的集成。在信息物理融合系统中，嵌入式计算机与网络对物理进程进行监测和控制，且物理进程与计算之间存在着相互影响的反馈环路。为此，该类系统的设计就需要充分理解计算机、软件、网络以及物理进程之间相互关联的动态特性。研究关联的动态特性就使得嵌入式系统有别于其他学科。

在研究 CPS 的过程中，所谓的通用计算很少涉及的一些关键问题就开始浮现出来。例如，通用软件中，任务执行时间是一个性能指标，而不是正确性指标。过长的任务执行时间并不会引入错误，仅会导致不太方便，也因此价值较低。但对于 CPS 而言，任务执行时间可能对整个系统的功能正确性非常关键。这是因为，相对于信息世界，物理世界中的时间流逝是无法挽回的。

① 也译为信息物理系统、赛博物理系统。——译者注

而且, CPS 中很多事件都是同时发生的。物理进程通常由这样一组同时发生的事件所构成, 这明显有别于顺序化的软件执行过程。Abelson 等 (1996) 将计算机科学描述为“程序化认识论”, 认为这是关于程序的知识。相比较而言, 物理世界中的进程很少是顺序化的, 而是由诸多并行进程所构成。那么, 通过设计影响这些进程的一组动作来评估和控制其动态特性就成为嵌入式系统设计的首要任务。所以, 并发性才是 CPS 的本质, 在设计和分析嵌入式软件中存在的诸多技术挑战也都源自于桥接和弥合固有顺序化语义与并发性物理世界的需要。

写作动机

软件与物理世界交互的机制正在发生着快速变化。今天, 整个趋势正朝着“智能化”传感器和执行器 (或作动器) 的方向发展, 这些组件搭载了微处理器、网络接口以及可以远程访问传感器数据并激活执行器的软件。无论现在是被称作物联网 (IoT)、工业 4.0、工业互联网、机器通信 (M2M), 还是万物互联、智慧地球、万亿传感器 (Trillion Sensor) 世界、雾计算 (Fog, 类似于云计算, 但更近于地面) 等, 其发展前景实际上都是深度连接信息世界与物理世界的技术。在物联网领域中, 这些“世界”之间的接口都是从信息技术特别是网络技术中获取灵感并演化而来。

物联网接口是非常方便的, 但仍然不适合这两个不同世界之间的紧密交互, 对于实时控制及安全攸关系统尤其如此。紧密交互仍然要求综合且复杂的底层设计技术。嵌入式软件设计人员被迫投入更多精力来关注中断控制器、内存架构、汇编级编程 (以利用特定指令或者精确地控制时序)、设备驱动设计、网络接口以及调度策略等问题, 而不是聚焦于具体想要实现的行为。

这些技术 (无论顶层还是底层) 的庞大体系及复杂度促使我们开设如何掌握这些技术的导论性课程。但是, 一门更好的导论课程应该关注如何对软件、网络及物理进程的关联动态特性进行建模和设计, 且该类课程仅介绍现今 (而不是早期) 达成这一目标的技术。本书就是我们针对该类课程所撰写的。

关于嵌入式系统的技术资料大部分都关注使计算机与物理系统实现交互的技术集合 (Barr and Massa, 2006; Berger, 2002; Burns and Wellings, 2001; Kamal, 2008; Noergaard, 2005; Parab et al., 2007; Simon, 2006; Valvano, 2007; Wolf, 2000)。其他一些则关注采用计算机科学技术 (如编程语言、操作系统、网络等) 来处理嵌入式系统技术问题 (Buttazzo, 2005a; Edwards, 2000; Pottie and Kaiser, 2005)。虽然目前这些实现技术对于设计和实现嵌入式系统是必要的, 但是它们并未构成学科的知识核心。相反, 其知识核心应该主要定位于可以结合计算与物理动态特性的模型和抽象。

一些书籍已经致力于从这一方面进行讨论。如《Modeling Embedded Systems and SoCs: Concurrency and Time in Models of Computation》(Jantsch, 2003) 关注计算的并发模型;《Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems》(Marwedel, 2011) 重点阐述软硬件行为的模型;《Embedded Multiprocessors: Scheduling and Synchronization》(Sriram and Bhattacharyya, 2009) 侧重于信号处理行为的数据流模型, 以及将其映射到可编程 DSP 的方法;《Principles of Cyber-Physical Systems》(Alur, 2015) 则聚焦于信息物理融合系统的形式化建模、规格以及验证。以上这些都堪称非常优秀的教材, 深入地涵盖了某个特定的主题。并发模型 (如数据流) 以及软件的抽象模型 (如状态图)

提供了一个比命令式编程语言（如 C 语言）、中断与线程以及设计者必须考虑的架构细节（如 Cache）等更好的起点。然而，这些书籍并没有提供一门导论课程所要求的全部内容。其要么过于专业，要么过于高深，或者是兼而有之。在“关注系统实现时所涉及模型及其关系”的指导思想下，本书主要提供了一系列导论性内容。

本书的主题是关于系统实现模型及其关系的。我们所研究的模型主要涉及动态性，即时域中的系统状态演化。我们不讨论表示系统结构静态信息的结构模型，虽然这些模型对于嵌入式系统设计亦非常重要。

基于模型开展研究具有非常突出的优势。模型可以具有形式化的属性，因此，我们可以给出关于模型的断定性描述。例如，我们可以断言一个模型是确定性的，这意味着对于相同的输入会有相同的输出。任何系统的物理实现都不可能有这样绝对的断定。如果我们的模型是对物理系统的良好抽象（这里的“良好抽象”是指其仅仅忽略了无关紧要的方面），那么，关于模型的明确断定将使我们系统的物理实现足够信任。而这些信任将是极其有价值的，尤其对那些出现故障时会威胁人类安全的嵌入式系统更是如此。研究系统模型可以让我们了解这些系统在物理世界中的行为。

我们关注软硬件与其运行时所处物理环境的相互影响，这就要求对软件及网络的时间动态性进行显式建模，以及明确描述应用程序固有的并发特性。实现技术还未赶上这一理想目标的事实不应成为我们教授错误工程方法的理由。我们应该按照建模与设计方法所需要的内容来进行阐述，并且通过重点阐述相关原理来充实这些内容。因此，当今的嵌入式系统技术不应像以上所引用的大多数文献中那样被理所当然地呈现为事实和技巧的集合，反而应该是作为迈向良好设计实践的基石。那么，问题的焦点应该是良好的设计实践是什么，以及当今技术对此存在哪些阻碍和促进。

Stankovic 等人（2005）支持“现有面向 RTES（实时嵌入式系统）设计的技术并不能有效地支撑可靠、健壮的嵌入式系统的开发”这一观点。同时，他们提出了“提升编程抽象级别”的需要。而我们认为，提升抽象级别仍然是不够的，必须对所用的抽象进行根本性改变。例如，软件的时间特性在较低层抽象中完全缺失时，就不可能将其引入更高层的软件抽象之中。

我们需要具有可重复时间动态性的健壮、可预测的设计（Lee, 2009a），这就必须要构建可以恰当反映信息物理融合系统实际特性的抽象。其结果是，CPS 的设计将会变得更加复杂，涉及更多的自适应控制逻辑、时域中的演化性和更高的安全性与可靠性等，所有这些都不会受到当今设计的脆弱性的影响——小的变化将会产生巨大的影响。

除了处理时间动态性之外，CPS 设计总是面临着并发问题的挑战。由于软件深深植根于顺序化抽象，诸如中断与多任务、信号量与互斥等并发机制就显得尤为重要。为此，我们在本书中致力于对线程、消息传递、死锁避免、竞态条件以及数据确定性进行重点讨论和理解。

本版说明

这是本书的第 2 版。除了修订一些错误、改进论述及措辞之外，本版增加了两个新的章节。第 7 章介绍了传感器与执行器，其重点是建模。第 17 章则阐述了嵌入式系统安全与隐私的基础知识。

录 B 回顾了可计算性与复杂性理论的基本结论，这有益于深入理解系统建模与分析中所存在的诸多挑战。需要说明的是，附录 B 依赖于第 3 章中所述状态机的形式化方法，因此，这一部分的阅读要以第 3 章为基础。

鉴于近来的技术进步正在根本性地改变着出版业，本书的发行也采用了非传统的方式。免费的 PDF 形式专为在平板电脑上阅读而设计，读者可在网站 <http://LeeSeshia.org> 下载该 PDF 文件。其布局采用了优化设计，适合于中等大小的屏幕，尤其是笔记本电脑以及 iPad 等平板电脑。而且，超链接及色彩的广泛使用将大大提升在线阅读的体验。

我们试图使本书适应于电子书格式，理论上适合在各种大小的屏幕上阅读，以充分利用各种常用屏幕的优势。然而，正如 HTML 文档一样，电子书的格式采用了重排（reflow）技术，在加载过程中要重新计算页面布局。重排结果高度依赖于屏幕大小，而且在很多屏幕上显示得并不理想。因此，我们选择了对布局进行控制，且不推荐在智能手机上进行阅读。

尽管电子阅读非常方便，但我们仍然认为纸质载体是有其实际价值的，读者可以随手翻阅，也可以将其显眼地放在书架上。

读者对象

本书主要适合高年级本科生、低年级研究生进行学习，也适合希望理解嵌入式系统工程原理的从业工程师以及计算机科学家。我们假定读者已经拥有诸如计算机结构（例如，应该知道 ALU 是什么）、计算机编程（本书采用 C 语言）、基本的离散数学和算法等基础知识，并且对信号与系统有最基本的了解（例如，采样时间连续信号意味着什么）。

错误反馈

如果你发现本书中存在错误或印刷错误，或者对本书有任何改进建议或其他意见，请发电子邮件至如下地址：

authors@leeseshia.org

无论是电子版还是纸质版，都请提供本书的版本信息以及相应的页码。谢谢！

致谢

衷心感谢以下人员对此书做出的贡献以及提出的宝贵建议：Murat Arcak、Dai Bui、Janette Cardoso、Gage Eads、Stephen Edwards、Suhaib Fahmy、Shanna Shaye Forbes、Daniel Holcomb、Jeff C. Jensen、Garvit Juniwal、Hokeun Kim、Jonathan Kotker、Wenchao Li、Isaac Liu、Slobodan Matic、Mayeul Marcadella、Le Ngoc Minh、Christian Motika、Chris Myers、Steve Neuendorffer、David Olsen、Minxue Pan、Hiren Patel、Jan Reineke、Rhonda Righter、Alberto Sangiovanni-Vincentelli、Chris Shaver、Shih-Kai Su（亚利桑那州立大学 CSE 522 课程的学生，该课程由 Georgios E. Fainekos 博士讲授）、Stavros Tripakis、Pravin Varaiya、Reinhard von Hanxleden、Armin Wasicek、Kevin Weekly、Maarten Wiggers、Qi Zhu，以及过去几年 UC Berkeley 电气工程与计算机科学 149 课程[⊖]中的所有学生，特别是 Ned Bass 和 Dan Lynch！特别感谢 Elaine Cheong 博士，她仔细地阅读了本书的大部分章

⊖ EECS 149 课程：嵌入式系统导论。——译者注

节，并给出了许多有益的建议！感谢本书首次出版以来帮助我们修改错误、改进内容的所有读者！特别感谢我们的家人，特别是 Edward 的家人 Helen、Katalina 和 Rhonda，以及 Sanjit 的家人 Amma、Appa、Ashwin、Bharathi、Shriya 和 Viraj，感谢他们的耐心和支持！

延伸阅读

近年来已经出现了很多嵌入式系统相关书籍。这些书籍以令人惊讶的多元化方式来处理相关主题，且通常是论述已经转入嵌入式系统的、更为成熟的学科观点，如 VLSI 设计、控制系统、信号处理、机器人学、实时系统或者软件工程。其中一些是对本书内容的有益补充。在此，我们将这些书籍强烈推荐给希望拓展理解本主题相关内容的读者。

《Computer Architecture: A Quantitative Approach》(Patterson and Hennessy, 1996) 一书虽然没有聚焦于嵌入式处理器，但该书是计算机体系结构的标准参考书目，也是任何对嵌入式处理器体系结构感兴趣的读者的必读书目。《Embedded Multiprocessors: Scheduling and Synchronization》(Sriram and Bhattacharyya, 2009) 侧重于信号处理应用，如无线通信、数字媒体，并对数据流编程方法给予了特别全面的覆盖。《Computers as Components: Principles of Embedded Computer Systems Design》(Wolf, 2000) 对硬件设计技术、微处理器体系结构及其对嵌入式软件设计的意义进行了阐述。《Functional Verification of Programmable Embedded Processors: A Top-down Approach》(Mishra and Dutt, 2005) 基于体系结构描述语言 (ADL) 对嵌入式体系结构进行了介绍。《DSP Software Development Techniques for Embedded and Real-Time Systems》(Oshana, 2006) 专门对德州仪器 (TI) 的 DSP 处理器进行了介绍，并概述了体系结构方法和汇编级编程。

从软件角度，《Hard Real-Time Computing Systems: Predictable Scheduling Algorithms and Applications》(Buttazzo, 2005a) 对实时软件的调度方法进行了精彩论述。Liu (2000) 提出了一种用于处理偶发实时事件的软件技术。《Languages for Digital Embedded Systems》(Edwards, 2000) 一书非常好地阐述了一些嵌入式系统设计中使用的面向领域的高级编程语言。《Principles of Embedded Networked Systems Design》(Pottie and Kaiser, 2005) 对嵌入式系统中的网络化技术特别是无线网络进行了很好的阐述。《Better Embedded System Software》(Koopman, 2010) 一书论述了嵌入式软件的设计过程，包括需求管理、项目管理、测试计划以及安全计划等。《Principles of Cyber-Physical Systems》(Alur, 2015) 就信息物理融合系统的形式化建模与验证提供了非常好的、有深度的处理方法。

如前所述，并没有任何一本书可以综合、全面地覆盖嵌入式系统工程师可用的所有技术。读者可以在很多关注当今设计技术的书籍中找到相应的有用信息 (Barr and Massa, 2006; Berger, 2002; Burns and Wellings, 2001; Gajski et al., 2009; Kamal, 2008; Noergaard, 2005; Parab et al., 2007; Simon, 2006; Schaumont, 2010; Vahid and Givargis, 2010)。

教师注意事项

在伯克利，我们以本书作为高年级本科生课程“嵌入式系统导论”的教材。通过以下网址可以获取本书的讲义及实验材料：

<http://LeeSchia.org>

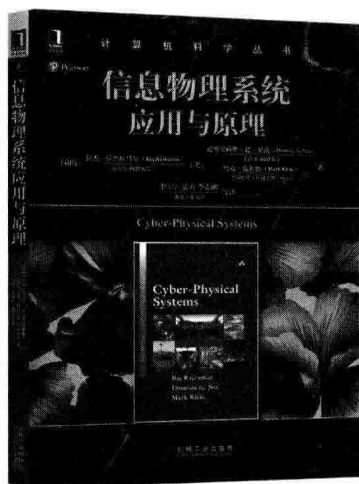
另外，教学机构中具有资格[⊖]的教师可以通过以下网址获得解答手册以及其他教学资料：

<http://chess.eecs.berkeley.edu/instructors/>

或者，也可通过电子邮件联系作者，邮件地址：authors@leeseshia.org。

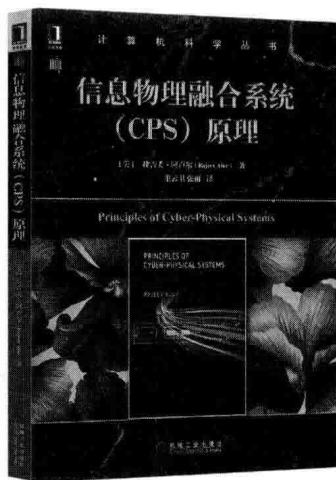
⊖ 所谓资格，是指已经申请并获得了 CHES 网站教师工作组的账号；CHES 是加州大学伯克利分校混合与嵌入式软件系统中心（Center of Hybrid and Embedded Software Systems）的缩写。——译者注

推荐阅读



信息物理系统应用与原理

作者：[印] 拉杰·拉杰库马尔 [美] 迪奥尼西奥·德·尼茨
译者：李士宁 张羽 李志刚 等 ISBN: 978-7-111-59810-7 定价：79.00元



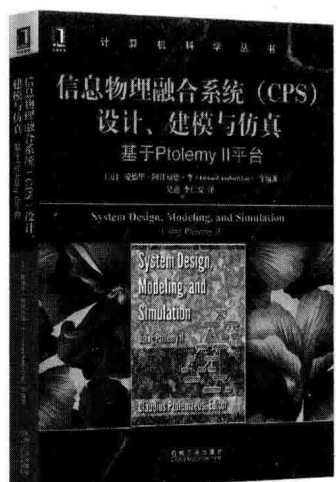
信息物理融合系统（CPS）原理

作者：[美] 拉吉夫·阿卢尔 译者：董云卫 张雨
ISBN: 978-7-111-55904-7 定价：79.00元



信息物理系统计算基础：概念、设计方法和应用

作者：[德] 迪特玛 P.F.莫勒
译者：张海涛 罗丹琪 ISBN: 978-7-111-59145-0 定价：99.00元



信息物理融合系统（CPS）设计、建模与仿真——基于Ptolemy II平台

作者：[美] 爱德华·阿什福德·李 译者：吴迪 李仁发
ISBN: 978-7-111-55843-9 定价：79.00元

出版者的话

译者序

前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 应用 1
- 1.2 启发式示例 4
- 1.3 设计过程 5
 - 1.3.1 建模 7
 - 1.3.2 设计 8
 - 1.3.3 分析 8
- 1.4 小结 9

第一部分 动态行为建模

第 2 章 连续动态 12

- 2.1 牛顿力学 12
- 2.2 参元模型 15
- 2.3 系统特性 17
 - 2.3.1 因果系统 17
 - 2.3.2 无记忆系统 18
 - 2.3.3 线性与时不变性 18
 - 2.3.4 稳定性 19
- 2.4 反馈控制 19
- 2.5 小结 22
- 习题 23

第 3 章 离散动态 25

- 3.1 离散系统 25
- 3.2 状态的概念 28
- 3.3 有限状态机 28
 - 3.3.1 迁移 29
 - 3.3.2 响应 31
 - 3.3.3 更新函数 32

- 3.3.4 确定性与接受性 34
- 3.4 扩展状态机 35
- 3.5 非确定性 37
 - 3.5.1 形式化模型 38
 - 3.5.2 非确定性的用途 39
- 3.6 行为与轨迹 39
- 3.7 小结 41
- 习题 41

第 4 章 混合系统 45

- 4.1 模态模型 45
 - 4.1.1 状态机的参元模型 45
 - 4.1.2 连续输入 45
 - 4.1.3 状态精化 46
- 4.2 混合系统分类 47
 - 4.2.1 时间自动机 47
 - 4.2.2 高阶动态性 49
 - 4.2.3 监督控制 53
- 4.3 小结 56
- 习题 57

第 5 章 状态机组合 61

- 5.1 并发组合 62
 - 5.1.1 平行同步组合 63
 - 5.1.2 平行异步组合 64
 - 5.1.3 共享变量 66
 - 5.1.4 级联组合 68
 - 5.1.5 通用组合 70
- 5.2 分层状态机 70
- 5.3 小结 72
- 习题 72

第 6 章 并发计算模型 75

- 6.1 模型的结构 75