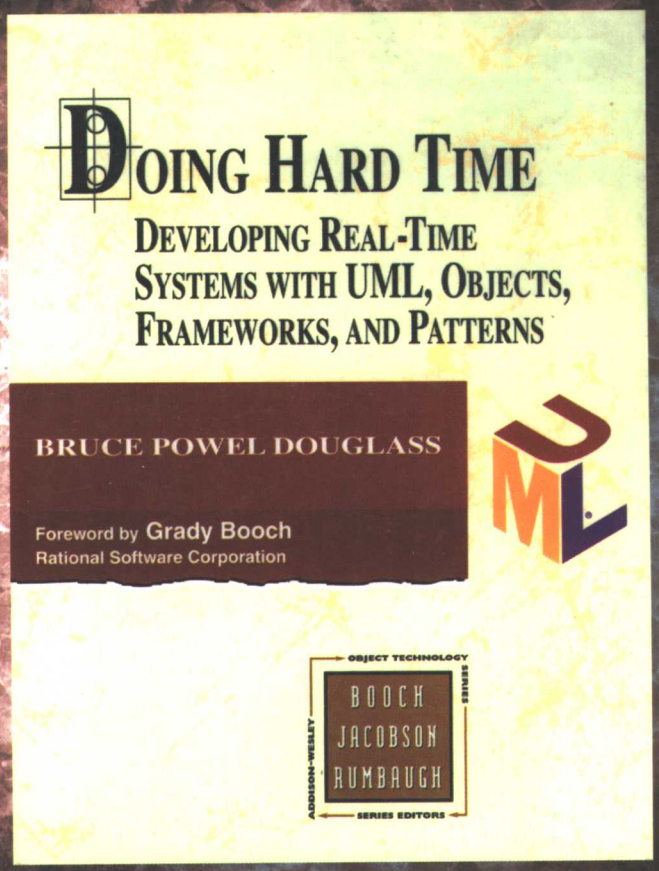
计 算 机 科 学 丛 书

嵌入式与实时系统开发

——使用UML、对象技术、框架与模式

(美) Bruce Powel Douglass 著 柳 翔 等译



Doing Hard Time

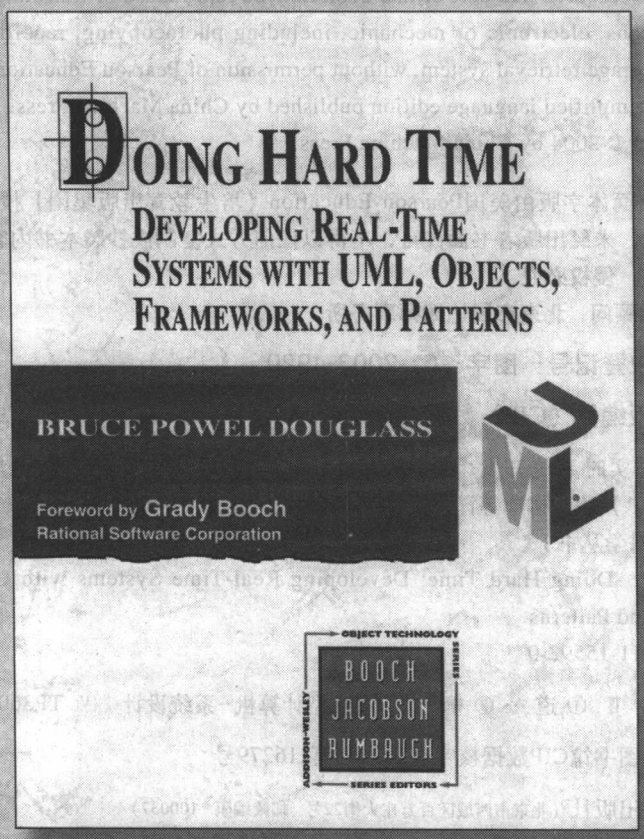
Developing Real-Time Systems with UML, Objects, Frameworks, and Patterns

机械工业出版社
China Machine Press

计 算 机 科 学 丛 书

嵌入式与实时系统开发
——使用UML、对象技术、框架与模式

(美) Bruce Powel Douglass 著 柳 翔 等译



Doing Hard Time

Developing Real-Time Systems with UML, Objects, Frameworks, and Patterns

机械工业出版社
China Machine Press

本书将实时系统、对象建模、快速开发过程以及系统保险性等几个完全分离的学科统一起来，重点介绍了使用统一建模语言（UML）进行基于模型的实时系统和嵌入式系统开发以及被称为ROPES的基于风险的迭代开发生命周期。本书共分为四部分，包括：基础知识、分析、设计、高级实时对象建模。另外，书后还包括三个附录，总结了UML符号表示并介绍了两个工具——Rhapsody和TimeWiz。

本书适合作为计算机科学专业本科生或研究生教材，同时也可作为专业软件开发人员的参考书。

本书版权登记号：图字：01-2003-4920

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式与实时系统开发：使用UML、对象技术、框架与模式 /（美）道格拉斯（Douglass, B. P.）著；柳翔等译. -北京：机械工业出版社，2005.3

（计算机科学丛书）

书名原文：Doing Hard Time: Developing Real-Time Systems with UML, Objects, Frameworks, and Patterns

ISBN 7-111-15592-0

Ⅰ. 嵌 … Ⅱ. ① 道 … ② 柳 … 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（2004）第116279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 晖 迟振春

北京昌平奔腾印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

2005年3月第1版第1次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 29.75印张

印数：0 001-4 000册

定价：55.00元（附光盘）

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，还揭橥了学术的源变，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、从业人员较少的现状下，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图文信息有限公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，华章公司就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过几年的不懈努力，我们与Prentice Hall，Addison-Wesley，McGraw-Hill，Morgan Kaufmann等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从它们现有的数百种教材中甄选出Tanenbaum，Stroustrup，Kernighan，Jim Gray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、研究及庋藏。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，有的还专诚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，为进一步推广与发展打下了坚实的基础。

随着学科建设的初步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步入一个新的阶段。为此，华章公司将加大引进教材的力度，在“华章教育”的总规划之下出版三个系列的计算机教材：除“计算机科学丛书”之外，对影印版的教材，则单独开辟出“经典原版书库”；同时，引进全美通行的教学辅导书“Schaum's Outlines”系列组成“全美经典学习指导系列”。为了保证这三套丛书的权威性，同时也为了更好地为学校和老师们服务，华章公司聘请了中国科学院、北京大学、清华大学、国防科技大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、浙江大学、中国科技大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、中国人民大学、北京航空航天大学、北京邮电大学、中山大学、解放军理工大学、郑州大学、湖北工学院、中国国家信息安全测评认证中心等国内重点大学和科研机构在计算机的各个领域的著名学者组成“专家指导委员会”，为我们提供选题意见和出版监督。

这三套丛书是响应教育部提出的使用外版教材的号召，为国内高校的计算机及相关专业的教学度身订造的。其中许多教材均已为M. I. T.，Stanford，U.C. Berkeley，C. M. U. 等世界名牌大学所采用。不仅涵盖了程序设计、数据结构、操作系统、计算机体系结构、数据库、编译原理、软件工程、图形学、通信与网络、离散数学等国内大学计算机专业普遍开设的核心课程，而且各具特色——有的出自语言设计者之手、有的历经三十年而不衰、有的已被全世界的几百所高校采用。在这些圆熟通博的名师大作的指引之下，读者必将在计算机科学的宫殿中由登堂而入室。

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，但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。教材的出版只是我们的后续服务的起点。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，我们的联系方法如下:

电子邮件: hzedu@hzbook.com
联系电话: (010) 68995264
联系地址: 北京市西城区百万庄南街1号
邮政编码: 100037

专家指导委员会

（按姓氏笔画顺序）

尤晋元	王　珊	冯博琴	史忠植	史美林
石教英	吕　建	孙玉芳	吴世忠	吴时霖
张立昂	李伟琴	李师贤	李建中	杨冬青
邵维忠	陆丽娜	陆鑫达	陈向群	周伯生
周立柱	周克定	周傲英	孟小峰	岳丽华
范　明	郑国梁	施伯乐	钟玉琢	唐世渭
袁崇义	高传善	梅　宏	程　旭	程时端
谢希仁	裘宗燕	戴　葵		

秘　书　组

武卫东　　温莉芳　　刘　江　　杨海玲

译 者 序

微电子技术、通信技术和全球信息化的飞速发展，极大地推动了基于微处理器的嵌入式系统在各个领域尤其是移动通信和消费类电子产业的应用。据世界权威机构公布的统计数字，全球用于嵌入式系统的微处理器已占85%以上的微处理器销售额。目前，嵌入式系统广泛应用在工业控制、仪器仪表、通信、汽车、军事装备、船舶、航空航天、消费类产品等领域，所带来的全球工业产值已超过了1万亿美元。中国信息化与全面小康社会建设对嵌入式系统市场提出了巨大需求，微处理器、微控制器和DSP芯片技术以及嵌入式软件是通信、消费类电子等各类电子信息产品的核心。数字化电子信息产业的基础是以应用为中心的嵌入式系统芯片设计和面向应用的嵌入式软件工程。中国嵌入式系统市场预计每年将直接创造千亿元的效益，所带动的相关工业产值将超过上万亿元，成为电子信息产业新的经济增长点。2003年国内手机年销量达到1.8亿部。国内数字化家电产品年需求量几亿台，每一类数字化家电产品都有千万台市场需求量。国内集成电路、板级产品和电子信息产品已具有大批量生产能力，与嵌入式系统相关的产品出口正逐年增长，在全球市场也将占有一席之地。

不仅越来越多的应用领域需要嵌入式系统，而且嵌入式系统所处理的事情的范围、复杂性以及关键性均呈现几何增长。为了满足嵌入式系统开发者日益增长的需要，寻找提高软件生产率的方法，以更短的时间构建出质量更高的系统，其重要性是毋庸置疑的。

本书以UML标准1.3版为基础，重点介绍使用统一建模语言进行基于模型的实时系统和嵌入式系统开发方法以及嵌入式系统快速面向对象过程（ROPES）。UML是第三代建模语言，它严格地定义了对象元模型的语义，而且为对象结构、行为的捕获和通信提供了符号表示。1996年底，UML成为了OMG中的标准建模语言。

关于在实时系统中使用对象方面的书并不多，而在实时系统中使用最新的对象建模语言（UML）方面的书更是屈指可数。所有关于面向对象方面的书主要是针对商业或者数据库应用领域的，而且完全没有涉及到实时方面。另一方面，关于实时系统方面的书会在很大程度上忽略面向对象方法。

本书将几个完全分离的学科领域统一起来，这些学科领域包括实时系统（如守时性和性能）、面向对象建模、快速开发过程以及系统保险性。本书将这些技术有机融合，陈述了如何使用UML的对象语义和符号表示开发出可供发布的实时系统的过程。这个统一的方法使开发者能够通过简单而且易于理解的步骤，最终提交出正确而守时的嵌入式系统和实时系统解决方案。

由于时间的关系，难免有理解不够深入之处。虽然我们尽了最大努力，但译文中难免有疏漏和错误之处，敬请读者指正。

最后，向参与本书翻译和讨论的所有人员表示感谢，恕不在此一一列出。

译者简介

柳翔 男，1963年生，湖北省麻城人。博大软件有限公司总裁兼首席系统架构师，北京大学软件与微电子学院嵌入式系统系系主任、客座教授。1984年毕业于湖南大学电气工程系，1987年获中国科学院自动化所模式识别与智能控制所硕士学位，1993年获法国波尔多第一大学国立无线电通信工程学院图像和信号处理博士学位。

柳翔博士曾长期为摩托罗拉（Motorola）公司服务，历任摩托罗拉公司科技咨询委员会（SABA）委员、软件全球集团新加坡中心市场拓展部经理、软件开发经理、系统架构师、项目经理、高级主任工程师等多个技术与管理职务。主持过多个无线通信网络管理、宽带通信多媒体终端、移动式个人数字终端及多媒体信号处理软件项目。由于在实时系统与嵌入式软件、宽带和无线通信网络管理方面的成就，于2001年被摩托罗拉任命为公司科技咨询委员会委员。作为摩托罗拉软件全球集团新加坡中心主要管理者之一，将其发展为SEI-CMM五级软件外包企业。在加入摩托罗拉前，柳翔博士曾在中国科学院自动化所及法国信号处理研究组织从事过多年实时信号处理研究及产品开发、多维信号模型和快速算法以及图像处理研究，在国际学术杂志及国际学术会议上发表过多篇论文，他在中科院曾参与或主持过多个中国国家级研发项目和新产品开发。从2003年3月起，柳翔博士创立博大软件有限公司，任公司总裁兼首席系统架构师。博大软件主要从事美、日、欧国家和地区软件外包业务、嵌入式系统（无线与宽带通信终端）解决方案和软件工程职业培训与教育。从2002年10月起，北京大学软件与微电子学院聘请柳翔博士为嵌入式系统系系主任、客座教授，主持设计出嵌入式软件工程硕士学位课程体系。主讲 《嵌入式系统概论》、《无线通信服务终端》、《嵌入式软件开发技术与工具》、《数字家庭网关技术》等硕士研究生课程。

柳翔博士主持设计出的嵌入式系统工程专业资格认证体系（ESEPC），是将国际上先进的嵌入式系统知识体系和其长期工业界的工程实践有机结合，注重能力培养的培养体系。旨在加强嵌入式软件业和电子信息产业的竞争地位，为有志于从事嵌入式系统相关产品开发的公司与个人，提供不断完善能力的培养计划，从而取得可持续的发展机会。

从2003年11月起，柳翔博士受聘为中国软件行业协会教育与培训专家委员会专家，参与中国软件人才培养方案的开发建设。柳翔博士以其ESEPC培养体系为基础，设计出嵌入式软件开发专业培训方案，于2003年12月5日由中国软件行业协会在人民大会堂正式发布，在中国软件行业全面推广。

序

1971年，全世界只有大约142 000台计算机（当时比尔·盖茨才16岁）[1]。到1999年，仅个人计算机就已达到了3.5亿到4亿台[2]，而嵌入式设备至少还要多出一个数量级[3]。尽管PC是微处理器革命中最为显著的产品，但是有更多的设备隐藏于幕后，例如电梯、起搏器、便携式电话、工业控制机器、手表、汽车传动和刹车系统、家庭自动控制系统、电器（需要软件来实现其功能）。嵌入式设备软件的开发尤其具有挑战性：它必须与现实世界（一般都非常嘈杂和不可预测）进行交互，其运行受到时间和性能的约束（响应是用毫秒至纳秒来衡量的），而且要保证其运行的可靠性和保险性（尤其对于关乎人命的系统来说）。随着Sun公司的Jini技术、Microsoft公司的通用即插即用以及IBM公司的T-Spaces等技术的发展，我们可以预见通过因特网连接起来的、无所不在的分布式设备和嵌入式设备的发展。但必须有人来编写所有相关软件。

在本书中，Bruce深入浅出地介绍了嵌入式系统的开发过程。我尤为喜欢他关于抽象和UML使用方面的观点。（尽管在这方面与我的观点可能存在一些分歧！）他在书中覆盖了所有基本问题：守时性、速率单调调度、并发性、保险性、调试、事件驱动建模、与实时操作系统的交互、架构，这确实是一项非常全面的工作。他轻松的行文风格以及他的智慧（他经常引用*Book of Douglass*中的话语）使得到处充满数学公式而枯燥沉闷的主题变得富有趣味性。

我从Bruce身上学到了许多东西，我保证你同样也会。

Grady Booch
Rational软件公司

---

[1] John Gantz, International Data Corporation, 在http://www.idc.com/jgcdxdt.htm上报道。

[2] 参见http://www.intel.com/pressroom/archive/speeches/pg110298.htm。

[3] 参见http://www.eg3.com。

前　言

目标

当今世界依靠嵌入式计算机而运转。现代社会中的各个领域，从生产到运输甚至医药，实际上都离不开嵌入式计算机。典型的家庭是一个计算生态系统，其中包括电话、电视机、洗衣机、微波炉以及其他许多基于硅的生物群。这些计算设备中许多（即使不是大多数）设备对其功能有守时性需求，因此，迟来的动作常常是错误的动作。许多嵌入式设备在出现故障或者失效的时候，会造成极大危害。

不仅越来越多的事情可以通过嵌入式计算设备进行处理，而且被处理的事情的范围、复杂性以及关键性均呈现几何增长。为了满足此类系统开发者日益增长的需要，技术创新的重要性是毋庸置疑的。以硬件复杂性作为电子设备开发过程中的限制因素的时代已经过去。大多数制造实时系统和嵌入式系统的公司已经意识到“千里之堤，溃于蚁穴”的道理，开始认真地寻找提高软件生产率的方法。更好的实时系统和嵌入式系统开发方法是本书的源泉和灵魂。

本书重点介绍使用统一建模语言（UML）进行基于模型的实时系统和嵌入式系统开发以及被称为ROPES的基于风险的迭代开发生命周期。UML是第三代建模语言，它严格地定义了对象元模型的语义，并为对象结构、行为的捕获和通信提供了符号表示。1996年底，UML成为了OMG中的标准建模语言，而且作者一直全力推动UML标准的发展。本书是以UML标准1.3版为基础的。

基于模型的开发对当今的高复杂性、短开发周期的商业环境来说至关重要。致力于对基本问题的抽象比专注于底层实现细节更加重要，我们应该致力于“是否应该在反应堆核心中增加控制杆以避免彻底垮台呢？”而不是专注于“我是否应该在出现非零或者进位的情况下执行跳转呢？”通过增加抽象层次，我们很可能在更短的时间内构建出更为复杂而且缺陷更少的系统。

因为UML是可执行的，所以它可以由UML模型自动生成可执行系统。其重要性不仅仅是节约了从抽象模型到可执行代码进行手工翻译所耗费的时间和工作量。这是一项正处于起步阶段的技术，允许开发者从概念的定义快速转入到概念的测试当中，减少了早期的风险而且促进了对问题解空间的探索。概念性缺陷可以在许多与之相关的瑕疵产生之前被尽早地识别和修正，从而使得在更短的进度时间内构建出质量更高的系统。

本书有意地将几个几乎完全分离的学科领域统一起来，这些学科领域包括实时概念（如守时性和性能）、对象建模、快速开发过程以及系统保险性。这使得开发者能够通过简单而且易于理解的步骤，最终提交出正确而守时的嵌入式解决方案。

关于在实时系统中使用对象方面的书并不多，而在实时系统中使用最新的对象建模语言（UML）方面的书更是屈指可数。一方面，所有关于面向对象方面的书主要是针对商业或者数

据库应用领域的，完全没有涉及到实时方面。另一方面，关于实时系统方面的书又在很大程度上忽略了面向对象方法。这些书大体上分为两个阵营：一方完全忽视方法学上的考虑而仅把注意力集中在“裸机”编程方面，另一方具有高度理论性但很少在真正实现可工作的系统方面给出建议。本书旨在为这些技术架起相互沟通的桥梁，介绍如何使用UML的对象语义和符号表示开发出可实施的实时系统。尽管使用特殊的工具示范实例，但是本书所讨论的内容是与工具无关的。

适用读者

本书针对专业软件开发人员以及计算机科学专业的中、高年级学生。本书可以作为本科生或者研究生教材，但是重点在于开发实践方面而不是理论介绍。书中仅列出少数的数学公式，更多的理论和数学方法可参考相应的参考书。本书假设读者至少精通一门编程语言，以及对面向对象和实时系统的基本概念有初步的认识。

本书结构

本书由五部分组成：

1. 基础知识

这部分介绍UML的对象语义和符号表示、实时系统、保险性的重要性以及开发过程。

2. 分析

这部分陈述不同类型的分析（包括通过用例、场景和状态机来捕获需求）、识别问题中的关键抽象以及基本行为建模。

3. 设计

这部分着重介绍附加的设计层次信息（例如并发模型、运行时制品（库、可执行代码等）的产生）、到物理架构的映射、通过设计模式优化对象协作的运用以及算法的建模。

4. 高级实时对象建模

这部分讨论困难而复杂的实时应用和嵌入式应用所关心的主题。这些主题包括通过数学分析确定对象模型的可调度性、把通常出现的行为问题转化成行为设计模式的通用状态机解决方案的具体化以及实时框架的结构和功能。

5. 附录

本书提供了三个附录。

- UML符号表示总结：对UML及本书中所用到的符号的一个简短指南。
- Rhapsody：完全构造性的UML可视化编程工具，对随书光盘中提供的UML可视化编程工具的介绍。
- TimeWiz：用于时序分析的集成工具，对随书光盘中提供的可调度性分析工具的介绍。

随书光盘

本书随书光盘所提供的资料分为三类：

- 书中所出现的全部例子。这些模型是以Rhapsody工程形式给出的，而且可以拷贝到你的本地硬盘上，使用Rhapsody工具打开和操作。

• Rhapsody。可视化编程工具安装文件。

• TimeWiz。可调度性分析工具安装文件。

我相信（和希望）本书能够满足学生以及专业开发人员的需要，这正是我写这本书的出发点。

致谢

向本书的所有评审员表示感谢，他们的工作使我保持严谨和中肯，他们是：

Eran Gery	i-Logix公司
Jim Collins	i-Logix公司
Larry McAlister	ENSCO公司
Therese M. Douglass	空中交通软件架构公司
Gary Cernosek	Rational软件公司

我还要感谢i-Logix公司的Neeraj Chandra和Gene Robinson，他们的支持使我在这本书上付出了如此大的精力；感谢Mitre公司的Doug Jensen在可调度性主题上提出的意见；感谢Therese Douglass在空中交通控制系统方面提出的专家意见；同时感谢Addison-Wesley编辑组成员，包括Carter Shanklin、Krysia Bebick和Maureen Willard等。

Bruce Powel Douglass博士

1999年初，冬天的深夜

作者简介

Bruce Powel Douglass 3岁自学阅读并在12岁之前掌握了微积分学。14岁的时候他退了学，在进入俄勒冈大学就读数学专业之前的几年时间内游遍了美国。Douglass获得了俄勒冈大学运动生物学专业的硕士学位和南达科他州医学院神经生理学专业的博士学位。在攻读博士学位期间，他为研究多细胞生物神经系统中的信息处理而创立了一个被称为自相关因子分析的数学分支。

Bruce有近20年实时系统软件开发经验，同时他在实时系统、嵌入式系统领域中是一名声明显赫的演讲者和作者。在嵌入式系统以及UML世界会议的顾问委员会工作期间，他讲授过多方面课程，包括软件估算与调度、项目管理、面向对象分析与设计、通信协议、有限状态机、设计模式以及保险性关键系统的设计。他在实时面向对象分析与设计领域创立和讲授课程多年，而且为许多期刊和杂志撰写过关于实时领域的文章。

Bruce现在是实时系统开发工具的主要生产商——i-Logix公司的首席技术演讲师[⊖]。Bruce与Rational Software公司及其他UML伙伴通力合作，共同制定了统一建模语言（UML）的规格说明。他是对象管理组织（OMG）中的实时分析与设计工作组的主席之一，实时分析与设计工作组致力于UML的有关扩展，以便能更好地满足实时系统和嵌入式系统的需要。他还为许多构建大规模、实时、保险性关键系统的公司提供咨询、培训和指导。他编著了四本有关软件方面的书籍，其中包括*Real-Time UML*（Addison-Wesley，1998），还编写过一本关于乒乓球方面的简短教科书。

Bruce喜欢古典音乐而且能够专业地弹奏古典吉他，擅长乒乓球、自行车竞赛、跑步以及跆拳道等多项运动。他正和两个儿子在Frozen North研究认识论。可以通过电子邮件bpd@ilogix.com与他联系。

⊖ 除了技术开拓外，首席技术演讲师更像首席科学家。

目　录

第二部分 分 析

第三部分 设 计

第四部分 高级实时对象建模