



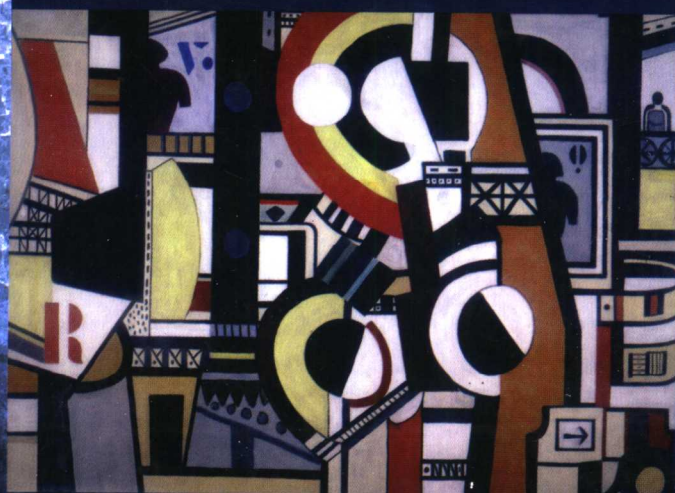
计 算 机 科 学 丛 书

现代体系结构的 优化编译器

(美) Randy Allen Ken Kennedy 著 张兆庆 乔如良 冯晓兵 译
吴承勇 连瑞琦 刘 畅

OPTIMIZING COMPILERS
for
MODERN ARCHITECTURES

Randy Allen & Ken Kennedy



Optimizing Compilers
for Modern Architectures



机械工业出版社
China Machine Press



中信出版社
CITIC PUBLISHING HOUSE

计 算 机 科 学 丛 书

现代体系结构的 优化编译器

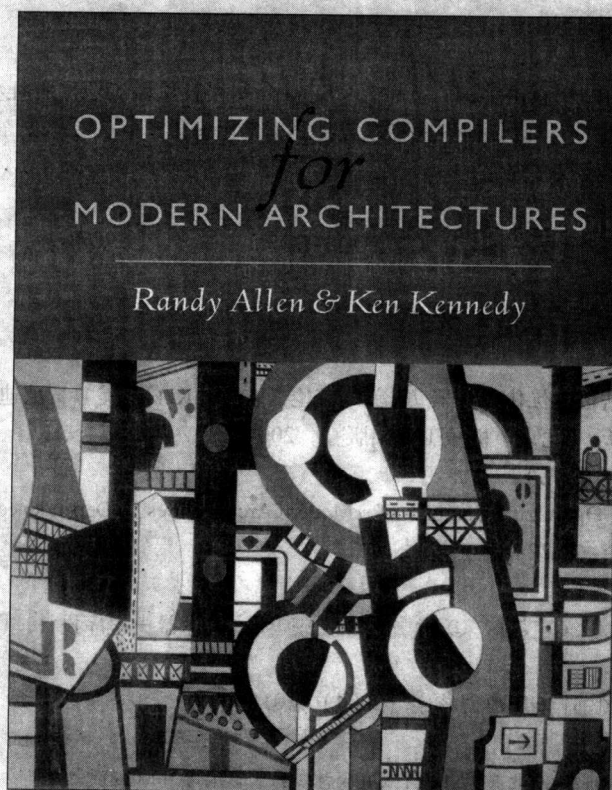
(美) Randy Allen Ken Kennedy 著

张兆庆
吴承勇

乔如良
连瑞琦

冯晓兵
刘 畅

译



**Optimizing Compilers
for Modern Architectures**
A Dependence-Based Approach



机械工业出版社
China Machine Press



中信出版社
CITIC PUBLISHING HOUSE

本书介绍对现代体系结构的编译器进行优化的方法,理论基础是基于循环依赖的。分析基于依赖的变换的正确性论述和依赖测试的详细过程。剖析怎样扩展依赖去处理循环嵌套中的控制流以及跨越整个程序的过程。本书还讨论怎样能用依赖来回答现代计算机系统编译中的众多重要问题,包括支持不同类型体系结构(例如,向量、多处理器、超标量)的并行化,存储层次结构的编译器管理,带指令级并行性的机器的指令调度。最后,介绍一些不大为人熟知的应用,如硬件设计、数组语言实现以及消息传递系统的编译。

Randy Allen & Ken Kennedy: Optimizing Compilers for Modern Architectures, A Dependence-Based Approach (ISBN 1-55860-286-0).

Copyright © 2001 by Elsevier Science (USA).

Translation Copyright © 2004 by China Machine Press.

All rights reserved.

本书中文简体字版由美国Elsevier Science公司授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

本书版权登记号: 图字: 01-2001-5271

图书在版编目(CIP)数据

现代体系结构的优化编译器 / (美) 艾伦 (Allen, R.), (美) 肯尼迪 (Kennedy, K.) 著; 张兆庆等译. - 北京: 机械工业出版社, 2004.7

(计算机科学丛书)

书名原文: Optimizing Compilers for Modern Architectures, A Dependence-Based Approach
ISBN 7-111-14122-9

I. 现… II. ① 艾… ② 肯… ③ 张… III. 编译器 - 程序设计 IV. TP314

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第018060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: 李伯民 王镇元

北京忠信诚胶印厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004年7月第1版第1次印刷

787mm × 1092mm 1/16 · 37.5印张

印数: 0 001 - 4 000册

定价: 69.00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，又具有学者个性，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，又是挑战；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、翻译国外优秀教材上。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、研究及度藏。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”的总体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30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，我们的联系方式如下：

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
石教英
张立昂
邵维忠
周立柱
范明
袁崇义
谢希仁

王珊
吕建
李伟琴
陆丽娜
周克定
郑国梁
高传善
裘宗燕

冯博琴
孙玉芳
李师贤
陆鑫达
周傲英
施伯乐
梅宏
戴葵

史忠植
吴世忠
李建中
陈向群
孟小峰
钟玉琢
程旭

史美林
吴时霖
杨冬青
周伯生
岳丽华
唐世渭
程时端

秘 书 组

武卫东

温莉芳

刘江

杨海玲

序

Randy Allen和Ken Kennedy编写的“现代体系结构的优化编译器”一书是并行优化编译技术领域一部权威性的著作。有幸由乔如良教授和张兆庆教授将全书译成中文，无疑对国内这一领域的教学、科研和工程的发展有着深远意义。

编译优化理论和技术是决定现代高性能计算机发展的十分关键的技术领域之一。优化编译技术的研究发展是和先进计算机结构——从微处理器到超级计算机——紧密相关联的。纵观优化编译技术最为超前的美国，各大学和科研机构中对这一领域的研究多是以电脑主流制造业的密切支持与合作研究为背景的。先进计算机体系结构和编译优化技术真可说是休戚与共、缺一不可。

本书的两位作者是长期从事优化编译技术研究的知名专家。特别是K. Kennedy教授更是学术界公认的泰斗。肯尼迪教授领导主持的一系列优化编译课题，既具有杰出的技术水平，又有着重大的学术影响。早在20世纪70年代末期，肯尼迪的研究工作对自动向量化编译技术的奠基和发展起过重大作用。80年代，肯尼迪和他在RICE大学的研究室对自动并行编译技术的贡献更为卓著。例如，他们在过程间优化的研究成果首创被商用编译器成功采用的先例。

基于他在学术上的成就和对计算机界的卓越贡献，肯尼迪教授先后被选为美国国家工程学院（National Academy of Engineering）院士，美国高科技协会（American Association for Advanced of Science）院士，IEEE院士和美国计算机学会（ACM）院士。肯尼迪教授在其三十多年的学术历程中，亲自指导了三十多名博士生。其中许多都是优化编译技术领域的精英，大多在知名大学任教或成为工业界的骨干。这本巨著中的许多内容正是作者和他的学生们多年经验的结晶。1997年，肯尼迪被美国总统任命为HPCC委员会两主席之一。

张、乔二教授是国内优化编译方面的资深专家和学术带头人。他们主持领导的中国科学院计算所先进编译技术试验室曾承担多项这一领域中重大长期研究项目，成果硕硕。近年来承担的Motorola和Intel等大公司委托的优化编译技术上的工程项目在国际上也颇具影响。由张、乔二教授和冯晓兵、吴承勇、连瑞琦、刘旻主持本书的翻译本出版是中国计算机学术界的一件大喜事，值得我们庆贺。

我有幸与Kennedy教授及张、乔、冯、吴等译者相识多年，这次能为这本书的中译本做序是我的荣幸。希望我的寥寥数言能有助于本书在国内计算机界广为推广。



美国特拉华大学（University of Delaware）电子与计算机工程系终身教授

特拉华生物研究所生物信息中心主任

SUX excellence中心主任

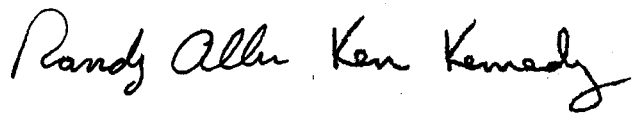
CAPSL实验室主任和中国科学院计算技术研究所客座教授及联合实验室主任

Note To Chinese Readers

We are delighted that our book “Optimizing Compilers for Modern Architectures” will now be available to Chinese readers in their native language. This book was intended to serve several purposes. First we wanted it to be a good text for advanced students of compiler construction for high performance computers. Second, we wanted to produce a useful reference for professional compiler writers. Third, we wanted the material to be of value to scientists and engineers who develop application for modern high performance computers by providing an understanding of how to transform programs to achieve the very best performance on these machines.

We would like to thank the researchers at Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences who have done such a remarkable job of translation. Not only have they made this edition possible but, with their help, we have been able to correct many of the errors in the original English language edition. We sincerely hope that you, our Chinese readers, find the result of this effort both useful and interesting.

Randy Allen and Ken Kennedy



致中国读者

对于我们的著作《Optimizing Compilers for Modern Architectures》中文版的即将面世，我们感到由衷的高兴。本书可以满足不同读者的需要。首先，我们希望它能成为面向大学高年级学生的关于高性能计算机编译器构造的优秀的教科书。其次，我们希望它能作为专业编译器开发人员的有用的参考书。最后，对于那些为现代高性能计算机开发应用软件的科学家和工程师，我们希望本书的内容有助于他们了解应该如何变换程序从而能够在现代计算机上获得最佳的性能。

我们要感谢中国科学院计算技术研究所的同行们，他们不仅出色地完成了本书中文版的翻译工作，并且帮助我们更正了英文版中的许多错误。在此真诚地希望中国读者发现这是一本非常有价值的书。

Randy Allen和Ken Kennedy

译者序

Intel公司David Kuck院士在评论Ken Kennedy和Randy Allen的新书“Optimizing Compilers for Modern Architectures: A Dependence-Based Approach”时，这样写道：“编译程序是计算机科学与技术的皇后。编译器一直是应用与系统之间的桥梁。现在它们不仅决定应在新的硬件中实现哪些体系结构特色，而且说明对软件开发者而言，哪些新的语言特色将是有效的。”

Kuck院士和Kennedy教授都是并行优化编译理论与实践方面的最著名学者。Kuck将编译程序称为“计算机科学与技术的皇后”是十分恰当的。

自1958年ALGOL58问世后，20世纪60年代在程序设计语言理论、数据结构、算法设计与分析、可计算性理论等方面的研究，取得了令人惊叹的硕果，编译理论、技术和实验起了很大的推动作用。至今编译领域中仍有很多具有挑战性的问题，吸引广大计算科学与技术研究人员投身于此项事业。

现代计算机体系结构大都具有各种粒度的并行机制和分层存储结构，访存仍是当今各类计算机体系结构的瓶颈。优化编译器的主要任务可以说是：扬计算机结构之长—挖掘程序中的并行性，避其之短—挖掘程序的局部性（重用性），实施有效的寄存器分配和Cache管理。这正是Kennedy和Allen在书中讲述的主要内容。第5章（提高细粒度并行性），第6章（开发粗粒度并行性），第8章（改进寄存器的使用），第9章（管理Cache）和第10章（调度）是优化的主要手段。第2、3、4章是全书的理论基础和基本的程序变换方法。为使程序分析和优化更精确和有效，第7章和第11章是必须的，但它们增加了编译器的实现难度。最后三章可以看成是编译技术的特定应用。

Kuck院士在他的评论中接着写道：“作为该领域的创新者和研发者，作者依据丰富的经验写出了此书。该书对Cache管理、向量化、并行化等优化，做了非常好的综合。论题涉及到现代体系结构，这些题材确实可以应用于从台式计算机到世界上最快的超级计算机上。书中的例子是从Fortran中抽取出来的，但其理论可以应用到许多程序设计语言上。我认为该书将起到极好的教科书作用，并为软件开发者广泛地利用。”

正如Kuck院士所说，书中用大量的Fortran例子说明基本概念、理论、方法和优化的效果，使全书通俗易懂。每章的后面有一节实例研究，介绍作者在编译器的实践中的真实材料，以及有关策略有效性的实验论据。最后还有若干练习题。这些材料和习题无论是对学生，还是对学术界、工业界的软件开发者都大有益处。这里软件开发者不仅指编译器的设计与实现者，还包括应用软件开发人员。他们可以从中学到如何写一个优化程序的许多概念、方法和规范，特别是应使用程序设计语言中那些有效的语言成分，摒弃那些使程序可读性、可维护性差和难以优化的语言成分。

我们希望此书的翻译出版，能对我国高校的软件教学与科研有所帮助。这是我们翻译此书的初衷。

本书的翻译组织工作由张兆庆研究员全面负责。作者介绍、前言、前四章和附录由张兆庆和乔如良研究员译校，第5、6章由刘旸博士翻译，第7、11、12章由连瑞琦副研究员翻译，

第8、10章由吴承勇副研究员翻译，第9、13、14章由冯晓兵副研究员翻译。译者自知水平有限，译文中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

感谢机械工业出版社组织翻译这部巨著，感谢李伯民老师仔细阅读译稿，提出许多宝贵意见，并对译稿做了大量编辑加工。

译者

2003年11月25日

前 言

现代体系结构的编译器设计

影响人们对世界理解的主要方面之一是描述它的方法，人们往往借助于语言中的概念表述来传达他们的理解。在使用计算机语言时这更为明显。计算机科学家使用的语言影响着问题描述到最终实现的算法方法。LISP程序员解决问题的方法与IBM 370汇编程序员的方法就很不相同。

可见语言在应用设计中具有强烈影响，而高级语言具有内在的高效优点，语言研究的主要目标是开发人类更容易理解的计算机语言。尽管语言研究获得的成果使之更容易使用，但是在产品应用的开发中未被广泛采用。主要原因很简单：有效性——从这些语言写的代码产生的可执行程序对于产品使用太慢。而且，如果一个问题描述超出了计算机本机指令，将这些描述映射到指令集则变得更加困难。

如果我们曾经有过这样的实际语言，先进编译器技术将成为克服它们固有性能缺陷的基础工具。换句话说，编译器优化是使用高级语言的基本保证技术。数据依赖是基本的编译器分析工具，用来优化现代机器体系结构上的程序，因为它能使编译器对不同的代码段是否访问相同的或不同的存储单元进行推断。这样可以用它来确定一个给定的程序是否可以并行化，或者可以更加频繁地重用在寄存器和高速缓存中的数据。至今初级编译器课程中很少讲授依赖分析。这样，大多数大学生计算机科学主修课从不讲述。

本书的一个主要目标是集中在一册书里对数据依赖作广泛的介绍，它可以同样由从业人员和学生用于学习关于数据依赖及其对重要优化问题的应用，如并行化和编译器的存储分层结构管理。虽然在20世纪60年代编译器早期研究人员就提出了数据依赖，大多数有说服力的依赖应用是在使用循环和数组的情况下。这些结构本质上是重复计算，而重复计算提供了最适宜的优化场所。扩充依赖到支持数组和循环是本书的关注点。

这本著作介绍的理论基础是基于循环依赖的。它包括基于依赖的变换的正确性论述和依赖测试的详细过程。说明怎样扩展依赖去处理循环嵌套中的控制流以及跨越整个程序的过程。本书也讨论怎样能用依赖来回答现代计算机系统编译中的众多重要问题，包括支持不同类型体系结构（例如，向量、多处理器、超标量）的并行化，存储层次结构的编译器管理，带指令级并行性的机器的指令调度。最后，介绍一些不大为人们熟知的应用，包括硬件设计、数组语言的实现以及消息传递系统的编译。

除了基本理论，本书还应用依赖处理真实编译器优化中的实际问题。通过介绍一些有效的实现算法，以及我们从结合研究和商用实现的经验中获得的认识，达到上述目的。只要有可能我们就用例子来传授这些认识，经常用图形化的依赖关系描述来传授对讨论中的问题的直观理解。本书介绍的大多数算法是基于我们工作中已经构造的实现。设计的这些算法已达到很高的精度，不需要再花运行时间就可以将它们放在编译器中实际使用。最后，每章包含一些材料，按照我们自己的经验，讨论我们介绍的和已经付诸实现的东西之间的关系，包括优点和缺点。

由于本书将理论与实践融合一体，既适合作为学校的教科书，又可以作为产业界从业人员的参考书。我们仅假定读者了解大学的初级编译器课程，以及具有Hennessy和Patterson的《Computer Organization and Design: The Hardware/Software Interface》水平的机器设计原理。过去几年，我们在Rice大学开设了一门一学期的研究生课程，内容涵盖本书的所有材料。然而我们相信这些材料也适宜包含在一门大学高年级课程中。本书是按指导风格写成的，使读者能获得足够的见解，容易去理解介绍的概念。另外，书中包含为了帮助学生更清楚地思考那些基本问题的讨论和设计的习题。

为了符合商用编译器作者的需要，书中包含对依赖测试和变换算法的详细介绍。这样做的主要理由是可以让实际编译器开发者避免过去20多年我们自己在实现中遇到过的陷阱。例如，第3章中的依赖测试的细节如果从首要的原理推导，那么往往很难精确地得到正确结果。因此在可能时，我们尽力介绍完整的算法。使用书中包含的材料，我们已帮助一些公司在商业产品中实现依赖测试、向量化和并行化。我们确信这些策略在实践中是有效的。

本书是在Rice大学一个为期20年的研究项目的产物，该项目为向量和并行计算机系统研发基础的编译技术。在1979年开始这个研究项目时，我们相信源-源翻译器对向量机的支持才是必要的，而不是基于依赖的编译器。理由是基于实验：依赖实现需要的编译时间对实用来说太长了，并且它们的输出通常可以通过简单的检查加以改善。我们认为在产品编译器中太长的编译时间需求是不能容忍的，但对只做一次的源-源翻译器来说是很好的。此外，可以让有经验的程序员调整源-源翻译器的输出，使之达到更佳的性能。我们研究的最令人满意的结果之一，在于发现我们最初的设想何等错误——依赖不仅对产品编译器是有效的，而且比起我们最初的猜想，它是更加强有力的工具和可用的理论。任何现代优化编译器已将依赖作为基本构件，并且优化的结果不仅应用于向量机（它们做得极为出色），而且也应用于标量机，甚至应用到硬件设计中。

因为机器设计的不断进步，人们对几年前看起来似乎过时的论题（例如向量化），现在重新发现了它们的重要性。向量化方法对改善VLIW和超标量机的性能还是有用的，办法是在最内层循环提供额外的指令级并行性。然而，由于更加重要的原因这本书是适时的。因为处理器和存储器性能之间的距离增加了，在现代体系结构上必须实施的多数优化与存储访问有关。依赖提供一个关于存储访问的合理框架，它将继续增加有用性。

虽然我们打算覆盖许多研究人员的重要工作，但是我们自然将注意力集中在过去二十几年里作者和同事们于Rice大学做过的工作上。总之，我们的目标是将我们从该领域的经历中获得的综合知识付印。因此不应该将本书看成是文献的详尽的综述，而是开发基于依赖的编译器的实用指南。为表达清楚，有时不得不牺牲一些技术细节。我们的总目标是给读者充分的直观知识，使其在编译技术这个引人入胜的领域中能有效地工作。

内容概述

本书由14章组成，它们的内容在下面各段中概述。材料的核心包含在前9章中；余下各章集中于基本材料的扩充和在不同的问题领域的应用。

第1章，高性能体系结构对编译器的挑战，是对现代计算机体系结构所做的综述和分类，并讨论对每一类体系结构提出的主要编译挑战。重要的主题包括流水线并行性，向量指令，异步处理器并行性，超标量指令和VLIW指令，以及存储层次结构管理。引入依赖概念作为保证并行性安全使用的机制。

第2章, 依赖: 理论与实践, 讨论依赖的基本概念, 以及它的若干性质, 包括方向向量和距离向量。主要的目标是证明一些基本定理, 它们确立维持依赖的变换的正确性, 特别是在循环嵌套中。这一章以一个样例向量化算法结束, 算法说明依赖的有用性, 并用作后面讨论向量化和并行化的模型。

第3章, 依赖测试, 提供对引用偶之间测试依赖的系统介绍。包含对下标分类、单下标测试和耦合下标组中依赖测试的讨论。这部分材料强调在可能的地方彻底地消除一个依赖, 并得到尽可能接近的依赖性质, 如方向向量。

第4章, 初等变换, 覆盖精确依赖分析的基本变换, 包括循环正规化, 标量数据流分析, 表达式传播和替换, 归纳变量替换, 以及标量重命名。

第5章, 提高细粒度并行性, 集中于需要支持向量指令和VLIW或超标量处理器的内循环并行性。这一章探讨对第2章中介绍的分层并行代码生成过程的变形和扩展。特别将重点放在循环交换、标量扩展、结点分裂, 数组重命名和向量化过程中的循环倾斜。

第6章, 开发粗粒度并行性, 探讨对称多处理器的代码生成策略, 在一致共享存储系统中利用异步并行性。这种机器的主要问题是寻找充足大并行性粒度, 以补偿较高的任务启动和同步的代价。这个代价是必须交换一个并行循环到最外层合法位置, 而不是向量化需要的最内层位置。这一章探讨循环交换的使用、数组私有化、循环对齐和代码复制、循环倾斜和各种索引集分裂策略, 以达到在原始程序中寻找可用并行性的目的。

第7章, 处理控制流, 探讨在程序的分析和变换中由分支引入的复杂性。它深入地讨论两个重要的策略。第一个策略是if转换, 这是一种通过将控制流分支下的所有语句转换成条件赋值语句来消除控制流的机制。为支持向量化引入的if转换, 是重写条件语句为向量语句所需要的。第二个策略是使用控制依赖边, 它们是从条件语句到执行时依赖于它们的那些语句的边。这一章证明如果数据依赖和控制依赖都得到遵从, 那么程序的含义便得到维持。最后, 该章说明控制依赖如何适应标准的变换算法, 包括并行代码生成算法。

第8章, 改进寄存器的使用, 说明依赖(正确地讲扩展到包含输入依赖)是怎样的一种有效方法, 用来探测处理器的寄存器中数据重用的可能性。这一章介绍标量替换, 本质上它是将下标变量引用赋给一个寄存器。另外还论述改善各层重用的变换, 包括展开和压紧、循环交换、循环对齐和循环合并。

第9章, 管理高速缓存, 越过简单的数据重用, 探讨改善带有高速缓存存储层次结构机器性能的变换。虽然大多数改善寄存器重用的变换也能增强高速缓存的重用, 但高速缓存存储器更加复杂, 因为它们比典型的寄存器集合要大许多, 并且是在若干个字的块中处理数据。这些不同为一些变换提供了机会, 如分段循环嵌套使它在适合装在高速缓存的数据集上进行迭代, 以及在内循环中引起跨距为1的访问的循环交换。这一章还探讨软件预取——使用显式指令, 将数据块在需要用它们之前从存储器移到高速缓存中。

第10章, 调度, 论述几种基于依赖的方法, 通过编译时指令布置来改善超标量机器和VLIW机器的性能。主题包括表调度、踪迹调度、软件流水线和向量操作链接。

第11章, 过程间分析和优化, 讨论扩展编译器分析(包括依赖分析)的策略到整个程序。这一章介绍分析几个重要的过程间问题的算法, 包括副作用、别名和常数传播。然后说明如何将副作用分析扩展到数组子段上。其他主题包括过程间优化(如内联替换和过程克隆), 以及过程间分析和优化的管理。

第12章, C语言和硬件设计中的依赖, 应用本书中介绍的分析策略到两个新的问题领域。第一个领域是应用依赖测试和程序变换优化C程序。第二个领域是将依赖应用到硬件设计上, 包括加速设计模拟的方法和从高层抽象规格说明综合低层硬件的方法。

第13章, 编译数组赋值, 其中的材料涵盖的方法为Fortran 90中数组赋值语句在标量机和具有定长向量寄存器机器上的实现。主要主题是将数组赋值语句转换成不需要无限制的临时存储的标量循环。

最后一章, 编译高性能Fortran, 应用依赖分析从高性能Fortran生成有效的消息传递代码, 高性能Fortran是Fortran 90的变体, 它包含说明如何在一可伸缩并行计算机的存储器中布局数组数据的设施。主题包括根据拥有者计算规则的计算划分和通信生成及优化。

这十四章包含的材料, 可以用几种不同的方法组织成多个课程。作为一门高年级的大学生课程, 第2章至第7章提供并行化中有关问题的合理的完整的论述。作为集中于单处理器优化的课程, 可以跳过第5章中的某些材料(5.1节、5.2节和5.7~5.9节除外, 这几节涵盖重要的变换), 第6章(6.2节和6.3节除外), 以利于包含第8章和第9章。另一方面, 熟悉并行化的读者可能想了解其他的应用, 包括存储层次结构管理, 这方面的内容集中在第8章到第10章, 以及第12章到第14章。如前所说, 我们已成功地在Rice大学开设的一个学期的研究生课程中讲授本书中的所有材料。

我们力求使本书成为自含的, 只假设读者熟悉编译器和机器设计的基础。这种期望必须包含第4章中关于数据流分析(4.4节)的某些材料, 它们可能会包含在一门基础编译器课程中。我们感觉到在书中包含这些材料是重要的, 所以你能在依赖和变换理论的上下文中看到它们。我们希望在使本书具有可读性和包含针对编译课程的高年级大学生和实际编译器编写者的主题上已获得成功。

每章的结构和特色

我们尽力使每章结构一致。每章包含一个引言, 在开始论述详细的技术之前, 提供主题的概述。引言通常用例子说明一章将要回答的问题。

技术材料按指导的风格介绍, 包括用依赖图说明许多例子。使用变换“前和后”的代码序列描述各种变换。我们介绍程序变换的完整算法, 使实践者根据这些材料开发一个编译器的实现变得简单明了。多数情况下, 这些算法是在我们自己的研究和商用系统中已实现的直接变体。为有效地处理大程序, 我们力求在这些实现中保证算法有可接受的渐进的复杂度。算法是用直观的类Algol表示法表示的, 这种表示法对规格说明非常有用。然而, 我们增加了某些特殊的构造, 用于在元素集合上的迭代(例如, for each循环), 这有助于我们回避说明集合实现的细节。

每章的末尾是一个小结, 回顾这一章涵盖的要点。随后是实例研究, 介绍我们在真实实现中的材料, 以及有关策略有效性的实验论据。这里, 你将可以找到有关产品编译器需要的设计折衷处理方案的材料。最后一节是历史评述与参考文献, 回顾相关的文献, 讨论一章中介绍的概念的由来和发展, 具体参考文献的引文可以在本书的末尾找到。

在每一章的结尾是少量习题, 这是针对书中内容为我们的研究生课程设计的。这些习题的范围从对材料的简单练习到实现作业和研究问题。

辅助的在线材料

与本书关联的网页 (www.mkp.com/ocma/) 包含勘误表。

致谢.

本书是在Rice大学20年研究的产物,而这项研究又依赖在其他学术机构多年做的相关研究工作。本书本身的发展过程已有10年并使用了6种不同的字处理系统。如此大量的工作必然要依靠两位作者以外的更多人的工作,我们要感谢许多人,他们以自己的工作和思想对本书做出了贡献。

列在这张名单前面的是Rice大学过去的博士生们,他们的研究确定了本书的大部分内容。学生们的论文材料直接包含在各章中,他们是Vasanth Bala、David Callahan、Steve Carr、Keith Cooper、Ervan Darnell、Chen Ding、Gina Goff、Mary Hall、Paul Havlak、Kathryn McKinley、Allan Porterfield、Carl Rosene、Jerry Roth、Linda Torczon、Ajay Sethi和Chau-Wen Tseng。特别要感谢贡献习题的人们:Chen Ding、Kathryn McKinley和Jerry Roth。同样重要的是众多的研究生、大学生以及研究和技术人员,他们对PFC、ParaScope、D系统和Ardent Titan编译器的开发做出了贡献。这些人中,我们要特别感谢协助领导了这些开发项目的技术人员:Vikram Adve、David Callahan、Keith Cooper、Mary Hall、Seema Hiranandani、Steve Johnson、Kathryn McKinley、John Mellor-Crummey和Linda Torczon。

另外,在开发这个材料的过程中与杰出的同事们密切地交流使我们获益匪浅。在开发PFC的过程中,IBM的Randy Scarborough花了大量的时间与我们一起工作,提供给我们作为一位有阅历的业界编译器开发人员的很多见解和观点。Ben Wegbreit在Ardent Titan编译器开发过程中给我们带来许多令人兴奋的讨论,Steve Wallach在他的Convex向量化编译器开发过程中与我们交流,导致对我们的方法的很多改进,包括我们对C的关注。

其他应当特别提到的是那些对优化和依赖的理论与实践基础做出贡献的研究人员。这些研究人员(我们不受约束地汲取了他们的工作成果)包括Leslie Lamport、David Kuck、Utpal Banerjee、Michael Wolfe、Ron Cytron、John Cocke、Jack Schwartz、Frances Allen、Susan Graham、Monica Lam以及其他很多人。

没有IBM、国家科学基金会、国防部高级研究计划局以及能源部(通过Los Alamos计算机科学研究所)的经费支持,就不能完成本书的研究工作。我们很幸运有一支强大的程序管理员队伍,他们不仅帮助指导研究,还提供有力的精神支持。这些管理员包括Horace Flatt、Fred Ris、Bill Harris、Kamal Abdali、Rick Adrion、Gil Weigand、Bob Lucas、Frederica Darema和John Reynnders。

本书写作的一个重要部分是用于研究生程度的课程。我们非常感谢那些学生和指导老师,他们忍受由于最初版本中错误带来的麻烦,并对我们造成的许多错误提出反馈意见。由于他们提出的改进意见,使本书成为非常优秀的著作。

本书的出版得到了Morgan Kaufmann的编辑们令人惊叹的帮助。Emilia Thiuri在本书准备出版的过程中提供一贯的和有力的支持。Edward Wade耐心和持久地关注每个细节,对本书从内容到外观的卓越性是极为重要的。稿件编辑Ken DellaPenta完成了校正书中错误的出色工作,保证书的表述的一致性。其余制作人员——排版员Nancy Logan、校对员Jennifer McClain和索引编写员Ty Koontz——对最后的质量做了巨大贡献。我们还要对Rebecca Evans & Associates

公司的内部设计和Ross Carron Design公司的封面设计表示感谢，对Dartmouth Publishing出版社所绘制的精美插图表示感谢。

复审人员Tarek Abdelrahman、Benjamin Goldberg、Kathryn McKinley、Steven Carr、Allan Porterfield、Andrew Chien、Monica Enand、Rohit Chandra和Bill Appelbe对这册书的结构和内容的改进提出了许多有益的建议。深深地感谢我们的编辑Denise Penrose，没有他的耐心而又坚定的指导和积极的支持态度，不可能完成此书。

最后也是最重要的，我们要感谢我们的家庭，感谢他们的耐心和鼓励，以及他们带给我们的安定生活。我们的妻子Vicky Allen和Carol Quillen对我们难以置信地支持，即使这意味着我们必须长时间把注意力放在别处。当我们处于重大压力下时，她们保持在我们的周围。Jennifer和Caitlin的降生几次延缓写作进程，但是他们使生活更加愉快和满足。

作者简介

Randy Allen以优异成绩获得Harvard大学化学专业学士学位，在Rice（赖斯）大学获得数学科学硕士和博士学位。成为Rice大学研究员之后，Allen博士参加了业界编译器构造的实践活动。他经历了在Ardent Computers、Sun Microsystems、Chronologic Simulation、Synopsys和CynApps等公司的研究、高级开发以及管理工作。他本人以及和他人合作在各种学术会议和杂志上发表了15篇关于计算机优化、编译器重构和硬件模拟等方面的论文。他出任Supercomputing和Conference on Programming Language and Design Implementation等会议的程序委员会成员。目前，他是几家公司（包括IBM、Intermetrics、Microtes Research和Mentor Graphics）的优化编译器顾问，是Catalytic Compilers公司总裁和CEO。

Ken Kennedy是Rice大学计算工程的Ann and John Doerr教授和高性能软件研究中心（HiPerSoft）主任。他是电气和电子工程师学会（IEEE）、计算机协会（ACM）以及美国科学促进会协会（AAAS）的会士，自1990年起，他是美国工程院院士。从1997年到1999年，任美国总统信息技术顾问委员会（PITAC）副主席。由于他在拟定关于建立信息技术研究基金的PITAC报告中的领导作用，获得计算研究协会杰出贡献奖（1999）和RCI Seymour Cray HPCC Industry Recognition奖（1999）。Kennedy教授发表了150多篇学术论文，并指导34篇有关高性能计算机系统程序设计支撑软件的博士论文。他对高性能计算软件方面的贡献得到了公认，1995年他获得W.Wallace McDowell奖，这是IEEE Computer Society的最高研究奖项。1999年他被提名为ACM SIGPLAN程序设计语言成就奖的第三位接受者。