

计算机科学前沿技术

计算思维，多核，GPGPU，并行计算，虚拟化，IPv6
对等计算，可信计算，大数据，数据挖掘，商务智能
人工智能，机器学习，计算智能，信息检索，自然语言处理
集体智慧，云计算，物联网，服务科学，智慧地球

Where Art Meets Science and Academia Meets Industry, Innovation is Born

王伟 主编

清华大学出版社



II

谷歌校企共建实用精品课程建设项目资助
同济大学“十二五”规划教材建设项目资助

计算机科学前沿技术

王伟 主编

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是一本计算机科学的入门与提高教材,在力求保证学科广度的同时,还兼顾主题的深度,同时特别强调计算机科学的前沿性,既介绍计算机学科相关主题来龙去脉,也介绍国内外最新、最热门的前沿课题。本教材既涉及传统的诸如计算机网络、操作系统、人工智能这样的计算机传统研究领域,又涉及像云计算、物联网、智慧地球等这样的新兴热门研究领域。重点讲解这些最新计算技术在各个学科中的应用。既让读者对计算机新兴技术有一个宏观的把握,又通过各种案例的分析,指导读者将计算机最新技术应用到各自相关的专业和学科之中。

本书既适合作为高等院校计算机以及相关专业本科生教材或教学参考书,也可以供有意在计算机和信息学科方面发展的非计算机专业读者阅读。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算机科学前沿技术/王伟主编.--北京:清华大学出版社,2012.7
ISBN 978-7-302-28555-7

I. ①计… II. ①王… III. ①计算机科学—教材 IV. ①TP3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 067032 号

责任编辑:闫红梅

封面设计:王 伟

责任校对:焦丽丽

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm

印 张:31.75

字 数:683 千字

版 次:2012 年 7 月第 1 版

印 次:2012 年 7 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:59.00 元

产品编号:038963-01

编 委 会

编委会成员：

祝永新	张云泉	韩乃平	曹建农
张焕国	何炎祥	张文举	谢邦昌
曾大军	陈尚义	莫 映	刘传清
杨 博	王忠杰	甘绮翠	孙爱军

序 1

美国总统信息技术咨询委员会(President's Information Technology Advisory Committee, PITAC)2005年6月在给美国总统提交的报告《计算科学: 确保美国竞争力》(*Computational Science: Ensuring America's Competitiveness*)中明确阐述了计算科学的重要性。报告认为,虽然计算本身也是一门学科,但是其具有促进其他学科发展的作用。报告还认为,21世纪科学上最重要的、经济上最有前途的前沿研究都有可能通过先进的计算技术和计算科学而得到解决。这个提法是令人惊讶的,大大超出了计算机科学研究者的预料,对于计算机学科来说,这个论述很准确。

然而,目前国内外计算机科学的教育中还存在着两个主要的问题。其一是“狭义工具论”的问题,就是简单地将计算机作为工具使用。这种认识对计算机的教育非常有害,会使学生对计算学科的认识淡化,无助于计算机科学中核心思想与基础概念的掌握。美国著名学者 Peter Denning 教授在《伟大的计算原理》(*Great Principles of Computing*)一文中曾说许多非计算机专业的学生从来都没有体验过计算的愉悦——计算原理的相互影响以及问题有效解决的思维方式。其二是我们的学科已经越来越难以吸引到优秀的学生。尽管美国 *Computing Research News* 曾报导说在美国科学与工程领域中,计算机与信息科学专业毕业生的平均工资最高,但2001年以来,主修计算相关专业的学生人数却在不断下降。

由于计算科学的至关重要性与学生兴趣的下降形成鲜明对比,2006年美国国家科学基金会 NSF 率先启动了“扩大计算参与面”(Broadening Participation in Computing, BPC)计划,2007年接着启动了“大学计算教育振兴的途径”(CPATH)计划,投入巨资进行美国计算教育的改革。经过2007年和2008年的资助和项目实践,CPATH计划相关工作者认识到计算思维(Computational Thinking, CT)在计划中所起的重要作用,对在2009年申报的项目提出了更为具体的以计算思维为核心的课程改革。同时,2011年又启动了 CE21(Computing Education for 21st Century)计划,其目的是提高 K-14(是指将小学、中学和大学前两年的教育合在一起的统称)老师与学生的计算思维能力。

在我国,教育部高等学校计算机基础课程教学指导委员会对我国计算思维的教育非常重视,为新一轮计算机基础课程改革做了大量的前期准备工作,

分别在2010年5月的合肥会议上、7月的西安会议上和9月的太原会议上小范围地探讨了计算思维融入计算机基础课程以及以计算思维为核心的计算机基础课程教学改革问题。在2010年11月的济南会议和2011年6月的北京会议上,更大范围内讨论了以计算思维为核心的计算机基础课程改革问题。会议气氛热烈,与会者积极性高涨,对以计算思维为核心的计算机基础课程改革取得了共识。与此同时,从2010年开始,分别在上海交通大学、西安交通大学、南方科技大学和深圳大学等高校开始了全新的大学计算机基础课程改革试点工作。

目前,全国各高校已经掀起了大学计算机基础改革的高潮,纷纷将计算思维引入各自的大学计算机课程教学中,也陆续编写了一些全新的大学计算机基础课程教材,体例各异,风格不同,其内容规划亦不尽相同。同济大学的王伟老师根据他们学校的具体情况与长期的教学心得体会编写的《计算机科学前沿技术》一书正是在这样的一个大环境下的一本面向计算机通识教育的新型教材。如何吸引更多的学生加入到计算机学科中来,以及如何更好地普及计算思维,本书做了一个很好的尝试。本书向读者系统展示了计算机科学中的那些令人激动的前沿研究领域,通过大量引人入胜的图片和深入浅出的实例向读者叙述了计算机如何给人类的生活带来了巨大的变化。更重要的是,书中这些内容正是计算思维在不同计算机科学研究领域的具体体现。例如,“基于超级计算机的计算科学已经成为人类除理论科学和实验科学之外认识和研究世界的第三种手段”、“对于科学过程的每一个环节(观察、假设、实验和检验),机器学习都有相应的发展,我们相信它将导致科学方法中从假设生成、模型构造到决定性实验这些所有环节的、合适的、部分的自动化”、“面对海量数据的高速增长,从实验实证、理论分析和计算模拟三种研究模式基础上诞生了第四种研究模式——数据密集型科学发现”等,类似这样的说法在本书中还有很多,这些都很好地体现了计算机科学中无处不在的计算思维及其重要作用。

希望本书的出版能够为计算机学科的基础教育带来一缕春风!

陈国良

中国科学院院士

教育部高等学校计算机基础课程教学指导委员会主任

2011年11月30日

序 2

计算机科学是以数学和电子科学为基础、理论与实践相结合的一门新兴学科。计算机技术在各行各业的成功应用,体现了其先进的技术性;而围绕一些重大问题的理论研究,则有力地推动了计算机科学向深度和广度发展。

在计算机科学的发展早期,其研究方向主要集中在计算模型、计算机设计、高级语言和科学计算等方面。由于这个时期的应用主要是大量的科学计算,导致许多从事数学研究的人员转入计算科学领域。就当时情况来看,具备坚实的数学基础、懂得一些电子学知识的科研人员,是很容易掌握计算机的原理和设计方法的。如果还掌握了一些程序设计的技术,那他完全可以进入学科前沿。在计算机科学发展的早期,数学、电子学、高级语言和程序是支撑学科发展的主要专业基础知识。

20 世纪 60—70 年代是计算科学蓬勃发展的时期,面对学科发展中遇到的许多重大问题,发展了一大批理论、方法和技术。如形式语言与自动机、形式语义学、算法理论、并发程序设计、Petri 网, CSP 理论等。这一时期的发展有三个显著的特点:第一是学科研究和开发渗透到社会生活的各个方面,广泛的应用需求推动了学科持续高速发展;第二是经过大量的实践,人们开始认识到软件和硬件之间有一个相互依托、互为借鉴以推动计算机设计和软件发展的问题;第三是计算机理论和工程技术方法两者缺一不可,且常常是紧密地结合在一起的。大约在此后 20 年里,计算机原理、编译技术、操作系统、高级语言与程序设计、数据库原理、数据结构算法设计以及数理逻辑成为学科的主要专业知识基础。

从 20 世纪 80 年代起,针对集成电路芯片可预见的设计极限和一些深入研究中所遇到的困难,人们开始认识到学科正在走向深化。除了寄希望于物理学中光电子技术研究取得突破、成倍提高机器运算速度外,面对现实,基于当前的条件,人们更加重视理论联系实际和技术的研究。这方面的努力推动了计算机体系结构、并行与分布式算法、计算机基本应用技术、各种非经典逻辑及新型计算模型的发展,从而推出了并行计算机、网格计算和云计算等新兴概念,并带动了软件开发和程序设计方法技术的提高。

学科发展的动力来自科学理论与工程技术发展的驱动,也来自应用领域的需求牵引。今天,计算机科学与技术无论在广度还是在深度上都已经得到了极大的发展。随着计算机学科的不断应用普及与其他学科的渗透,多学科

交叉与融合成为促进计算机学科发展的一大动力。随着多学科的相互交叉与渗透,不断有新领域、新问题、新方法和新思路出现,跨学科、跨方向的创新理论与成果也层出不穷,多学科交叉与融合的计算机科学与技术学科新形态正在逐渐形成。

由王伟老师主编的这本《计算机科学前沿技术》一书分别从15个不同的研究领域介绍了该领域中最新的前沿技术,从某种意义上来说,在一定程度上反映了计算机学科的发展和演变过程,这对从事计算机科学领域的研究人员来说有着非常好的借鉴意义。同时,通过本书,读者还可以进一步体会和分析计算机科学与技术发展的方向和趋势,使读者能够在这个瞬息万变的时代赶上技术发展的步伐。最重要的是,该书的出版可以很好地吸引更多的优秀学生 and 研究人员加入到计算机科学与技术这个令人激动的研究领域中来,推动计算机学科的持续发展。

希望本书的出版能够对计算机学科的发展起到好的促进作用!

蒋昌俊

973 首席科学家

同济大学副校长

2012年1月3日

序 3

今天的时代,每家企业和科研院所都应当思考下面的问题:我们创造了什么?我们影响了什么?我们改变了什么?

IBM 公司是一个好的例子,从帮助地球人登上月球,到发明 UPC 编码和条形码扫描技术,从在线银行到计算机航空预订系统,从超级计算机到 Watson 这种自学习的人工智能系统,IBM 公司在基础研究和应用技术领域不断创新,引领信息科技走向变革,改变着我们的世界,也成就了自身的百年基业。可以说计算机科学与技术的发展史就是 IBM 公司的一部成长史。在 IBM 公司发展的 100 年历史上,曾经有 5 人获得诺贝尔奖,6 人获得图灵奖。从 1911 年公司创立以来,IBM 公司带领全世界先后进入主机时代、PC 时代、电子商务时代,以及今天的智慧地球时代。

2008 年 11 月,IBM 公司正式提出“智慧的地球”(Smarter Planet)计划。IBM 认为,智慧架构将逐渐成为国家、区域和城市之间竞争的基础,其核心观点是将物联网和互联网整合起来,人类可以以更加精细和动态的方式管理生产和生活,从而达到“智慧”状态。在此过程中,IBM 公司变得更有“生命感”了,它要给地球上每一个看似无序的“物件”全部嵌上智能的“大脑”和“心脏”。2011 年,IBM 超级计算机沃森在电视栏目“危险边缘”中战胜了两位人类冠军,在人工智能领域又树立了一座里程碑。如今,IBM 还有许多畅想正在逐步实现。IBM 公司正在利用先进的纳米技术和原子结构技术来创造新的设备 and 应用,研发出低成本高性能芯片,用于汽车、游戏机和电话以及超级计算机。新的计算机科学前沿领域在 IBM 实验室随处可见,成千上万的人正在共建“智慧的地球”。

在当前的信息时代和知识经济时代,计算机科学技术的发展很大程度上成为国民经济发展的动力,越来越渗透到国民生活的方方面面。中国的计算机科学和技术也是方兴未艾、日新月异,正处于一个挑战和机遇并存的时期。《计算机科学前沿技术》一书很好地记录了计算机科学技术发展的新趋势和新动向。该书选取了十多个计算机主要研究领域,详细介绍了国内外这些领域在研究、开发和应用等方面取得的进展,以及它们的未来发展趋势。这些内容基本上反映了国内外计算机科学技术工作者的研究进展,对学术研究和工业应用具有重要的参考价值。本书能够为企业界的技术主管和研发人员揭示未来计算机科学的发展方向,能够将高校教师和学生带到多个新的科学技术领

域,还能够启发立志创业的人士找到时代赐予的机遇。

本书在一定程度上回答了与计算机科学技术相关的企业和人都创造了些什么、影响了些什么以及改变了些什么。我相信这本书会使许多人受益,也祝愿编著者们能在计算机科学技术的发展中不断有新的心得和贡献。

毛新生

IBM 中国开发中心首席技术官兼创新工程院院长

2012 年 4 月 10 日

前 言

光阴似箭，一转眼进入 21 世纪十多年了。在 20 世纪，发展最快而且对人类生活影响最大的学科无疑是计算机科学与信息技术了。而在今天，计算机成了 21 世纪的一种象征。当代的社会，计算机科学与信息技术的应用已经渗透到社会生活的各个方面，已经成为推动社会进步的重要引擎，已被称为“计算机文化”和“计算思维”。

我国著名的研究学者，现任中国“计算机学会”理事长的李国杰院士在谈到计算机科学前沿技术的时候指出：“当前计算机科学的主要问题有三方面。首先是复杂性的问题。计算机科学的实质是动态的复杂性问题。一个芯片的晶体管有上亿甚至几十亿个，这个数目已和大脑里的神经元的数目一样多，如何保证这样一个复杂的系统能够正常地工作而不出现错误，这已不是一般的测量能够解决的问题了。另外一个问题就是功耗。根据摩尔定律，大约每隔一年半，芯片的性能翻一番，但是性能翻一番可能会造成功耗也翻一番。功耗越大，放热越多。所以，如何在提高性能的同时不增大功耗甚至减小功耗是当前计算机科学发展的重大问题。最后一个是智能化的问题。现在网上有很多信息，如何让计算机把这些信息变成人们所需要的知识。这是一件很难的事情。这不是说简单地使用一个网站搜索与输入的字符匹配的内容，而是说计算机要智能地将收集到的知识系统化，然后再提供给用户。”

因此，可以看到，所谓“前沿技术”是指高技术领域中具有前瞻性、先导性和探索性的重大技术，是未来高技术更新换代和新兴产业发展的重要基础，是国家高技术创新能力的综合体现。随着信息技术的不断发展和计算机应用水平的不断提高，“计算机科学前沿技术”的内涵不断地发展和变化着，人们的需求在不断地提高，对技术的革新也不断有更高的要求。

鉴于上述内容，本书的作者试图站在“巨人”的肩膀上，针对计算机科学这一令人激动的研究领域，遴选最能反映该学科的若干前沿技术，同时对该学科进行系统的总结与展望，形成我们心目中期待的这本全面反映“计算机科学前沿技术”(Frontier Technologies in Computer Science, FTCS)的书籍。

关于本书

国外大部分著名学府,包括 Stanford、MIT、牛津、剑桥等大学均开设了计算机信息前沿技术及其在各个学科中的应用课程,而像 IEEE-CS 和 ACM 这样的著名组织也在网上开发了相关课程并对外开放。而国内这方面相对滞后,其课程往往停留在理论阶段,讲述的内容也较陈旧。

本书是一本计算机科学的入门与提高教材,在力求保证学科广度的同时,还兼顾主题的深度,同时特别强调计算机科学的前沿性,既介绍计算机学科相关主题来龙去脉,也介绍国内外最新、最热门的前沿课题。本教材既涉及传统的诸如计算机网络、操作系统、人工智能这样的计算机传统研究领域,又涉及像云计算、物联网、智慧地球等这样的新兴热门研究领域。重点讲解这些最新计算技术在各个学科中的应用。既让读者对计算机新兴技术有一个宏观的把握,又通过各种案例的分析,指导读者将计算机最新技术应用到各自相关的专业和学科之中。该教材涉及的知识点和相关信息,计算机专业的读者应该了解和掌握,对非计算机专业的读者也有很大的好处。这一点已得到了国内许多计算机专业的教育人士和学者的认同。

另一方面,国内外涉及计算机前沿技术的知识往往分散在不同的杂志、期刊、著作以及互联网等媒介中,特别是由美国 ACM 主办的《美国计算机协会通讯》(*Communication of the ACM*)和“中国计算机学会”(CCF)主办的学术期刊《中国计算机学会通讯》,汇集了大量由国内外一线计算机专家和学者撰写的前沿资料。作者在阅读这些文章的时候受益匪浅,希望能够把这些宝贵的材料系统地汇集起来,让更多的读者能够了解到这些前沿知识。这是作者编写本书的另一个初衷。

本书的起源

本书由同济大学计算机科学与技术系的王伟老师编写,其素材来源于开设的“计算机科学前沿技术”课程的讲稿,该讲稿已在全校三届本科生中进行过试讲,涉及多个专业与多个年级的不同学生,效果不错,学生学习和试读后提出了一些宝贵意见。在此,对所有关心本书的学者、同仁、学生表示感谢。本书是对计算机科学这门学科进行通识教育的一种全新探索,望读者对本书的不足之处提出宝贵意见。作者希望能够在该教材初版的基础上每隔三年左右修订一个

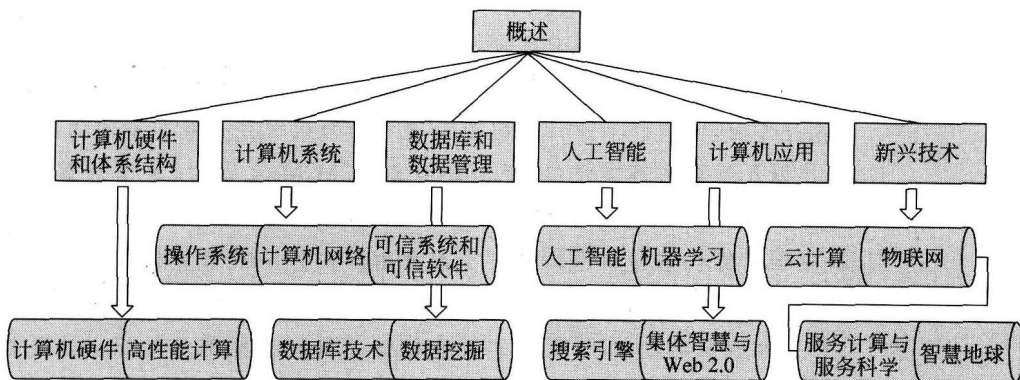
新的版本,不断更新学科的最新前沿内容,将该教材锤炼成计算机领域中的一本精品教材。

本书的特点

- 知识上系统全面,在广度和深度兼顾的情况下给读者介绍计算机科学最新的前沿技术;
- 内容上尽量做到通俗易懂,图文并茂,几乎每页都配有相关图片,能够最大限度地吸引读者对计算机科学的兴趣;
- 在每个专题中穿插计算机发展中的重大事件和著名人物,这些背景材料既能扩大读者的知识面,又能引起读者对计算机学科的强烈兴趣;
- 面向的读者较为广泛,既适合高等院校不同年级的学生,又适合广大的教师和科研人员;既适合计算机专业的从业人员,又适合非计算机专业的读者。

本书的组织

本书的组织是按照国际计算机学科普遍采用的一个分类标准,将计算机学科分为六大核心部分:计算机硬件和体系结构、计算机系统、数据库和数据管理、人工智能、计算机应用以及新兴技术。本书的具体组织结构如下图所示。



其中,第一部分包括计算机硬件的发展和高性能计算;第二部分包括操作系统、计算机网络新技术以及可信系统和可信软件;第三部分包括数据库技术的发展和数据挖掘及其应用;第四部分包括人工智能前沿和机器学习研究与发展;第五部分包括搜索引擎技术和集体智慧与 Web 2.0 技术;第六部分包括云计算、物联网、服务计算与服务科学,以及智慧地球。相信以上各个章节能够共同勾勒出计算机科学的前沿学科内容。

如何阅读

本书每个章节叙述一个独立的计算机研究领域,因此,读者既可以按照传统的方法一章

一章地顺序阅读,也可以任意跳到所感兴趣的章节直接阅读。

致谢

本书的写作、出版是在 IBM 大学合作项目书籍出版资助计划、谷歌校企共建实用精品课程建设项目、国家自然科学基金青年项目(61103068)以及同济大学“十二五”规划教材建设项目的大力支持下完成的。本书在编写过程中,参考和引用了大量国内外的著作、论文和研究报告。由于篇幅有限,本书各章节仅仅列举了主要的参考文献。作者向所有被参考和引用论著的作者表示由衷的感谢,他们的辛勤劳动成果为本书提供了丰富的资料。如果有资料没有查到出处或因疏忽而未列出,请原作者见谅,并请告知我们,以便再版时补上。

本教材的编写过程中特别参考了由美国 ACM 主办的《美国计算机协会通讯》、“中国计算机学会”(CCF)主编的《中国计算机学会通讯》刊物以及《中国计算机科学技术年度发展报告(2006—2010)》丛书等,很多内容直接选编于其中的文章并作了适当的修改。作者将这些文章和书籍在附录中一一列出,并做了相应说明。同时,作者还邀请了大量的学术界和工业界的专家加入到本书的编写中,参与本书编写的还有如下老师和研究人员。

- 上海交通大学微电子学院的祝永新教授为本书的第 2 章提供了部分材料,并对全章进行了审阅;
- 中科院软件研究所并行计算实验室的张云泉研究员对本书的第 3 章提供了部分材料,并对全章进行了审阅;
- 上海中标软件有限公司总裁韩乃平为本书的第 4 章提供了部分材料,并提出了部分建议;
- 香港理工大学的曹建农教授为本书的第 5 章提出了部分建议;
- 武汉大学的张焕国教授和何炎祥教授为本书的第 6 章提供了部分材料,并对全章进行了审阅;
- 甲骨文(Oracle)(中国)软件系统有限公司的资深企业架构师张文举博士对本书的第 7 章提供了部分建议,并对全章进行了审阅;
- 台湾辅仁大学统计资讯学系的谢邦昌教授为本书的第 8 章提供了部分建议,并对全章进行了审阅;
- 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能科学重点实验室的曾大军教授为本书的第 9 章提供了部分材料,并对全章进行了审阅;
- 微软亚洲研究院的刘铁岩博士为本书的第 10 章提出了部分建议;
- 百度公司技术管理部总监及技术委员会理事长陈尚义对本书的第 11 章进行了审阅,并提供了部分材料;
- IBM 中国开发中心的莫映老师撰写了本书第 12 章的内容;
- 南京工程学院的刘传清教授为本书的第 14 章提供了部分材料,并对全章进行了

审阅；

- 哈尔滨工业大学计算机学院的王忠杰副教授为本书第 15 章提供了部分材料；
- IBM 中国研究院的高级研究员杨博博士对本书的第 15 章进行了审阅和修订，同时也对第 14 章提出了修改建议；
- IBM 商业价值研究院院长甘绮翠女士和高级顾问孙爱军女士对本书的第 16 章进行了审阅，并提供了部分材料；
- 复旦大学软件学院的臧斌宇教授为本书的附录 B 提供了部分材料。

另外，同济大学计算机科学与技术系的庞瑞老师，博士生邓志刚、匡桂娟，以及硕士生吴煜祺对本书的初稿进行了部分校审。最后，还要衷心感谢清华大学出版社的所有工作人员。再次向上述老师和研究人员表示衷心的感谢！

苏轼在《稼说》一文中提出学习的主张“博观而约取，厚积而薄发”是我们多年计算机科学与技术工作的共鸣，其精髓就在勤于积累和精于应用。如果各位读者能够从中不仅学会“Know-how”，而且能够进一步学习和探寻计算机科学背后的“Know-why”，则本书的目的就达到了。

课程网站：<http://en.tjcities.com/index.php/works>

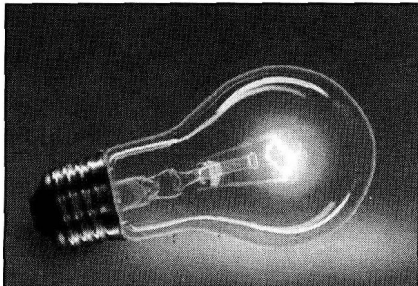
联系方式：FrontiersCS@gmail.com

微博：<http://weibo.com/willtongji>

作者谨识于

同济大学嘉定校区

2011 年 10 月 20 日



目 录

序 1	3
序 2	5
序 3	7
前言	9
关于本书	11

第 1 章 概述	1
1.1 计算机科学面临的问题	5
1.2 计算机学科概述	8
1.2.1 计算机学科的特点	8
1.2.2 基本学科能力	10
1.2.3 计算机学科的发展和分支学科的划分	10
1.2.4 计算机科学与其他学科之间的关系	13
1.3 计算机科学发展的趋势	13
1.4 小结	16
推荐阅读	16
问题与讨论	16

第一部分 计算机硬件和体系结构

第 2 章 计算机硬件的发展	19
2.1 计算机发展的历史回顾	21
2.1.1 早期计算机：机械式计算工具、机电式计算机	21
2.1.2 电子管、晶体管和集成电路	23
2.1.3 电子计算机的诞生	24
2.1.4 现代计算机发展历程	25
2.2 我国计算机发展史	26
2.2.1 第一代电子管计算机研制(1958—1964)	26

2.2.2	第二代晶体管计算机研制(1965—1972)	27
2.2.3	第三代中小规模集成电路计算机研制(1973—20 世纪 80 年代初)	28
2.2.4	第四代超大规模集成电路计算机研制(20 世纪 80 年代中期至今)	28
2.3	新型计算机的发展	30
2.3.1	DNA 计算机	30
2.3.2	量子计算机	31
2.3.3	光计算机	31
2.3.4	纳米计算机	32
2.4	CPU 和 GPU 的发展	33
2.4.1	CPU 的发展	33
2.4.2	多核计算的发展趋势	40
2.4.3	GPU 的发展	44
2.4.4	CPU 和 GPU 的融合	47
2.5	小结	50
	推荐阅读	50
	问题与讨论	50
第 3 章	高性能计算	51
3.1	高性能计算概述	54
3.1.1	什么是高性能计算	54
3.1.2	发达国家在高性能计算方面的发展	55
3.1.3	我国高性能计算的发展	58
3.2	世界各地超级计算中心的发展概况	62
3.3	高性能计算机的发展	64
3.3.1	从“走鹃”谈起	64
3.3.2	千万亿(10^{15})次系统研发	67
3.3.3	艾级超级计算机的机遇与挑战	67
3.4	高性能计算机关键技术与挑战	69
3.4.1	高性能计算机关键技术	69
3.4.2	超级计算机系统的挑战	70
3.4.3	超级计算机发展的技术路线	74
3.5	小结	75
	推荐阅读	75
	问题与讨论	76