

# 并行计算学科发展历程

陈国良 张玉杰

南京邮电大学计算机学院 南京 210023

国家高性能计算中心南京分中心 南京 210023

江苏省高性能计算与智能处理工程研究中心 南京 210023

**摘要** 计算科学已经与传统的理论科学和实验科学并列成为第三门科学,它们相辅相成地推动着人类科技的发展和社会文明的进步。21世纪科学和经济上的关键问题研究前沿,有可能通过熟练地掌握先进的计算技术并运用计算科学得到解决。高性能计算是一个国家综合国力的体现,是支撑国家实力持续发展的关键技术之一,在国防安全、高科技发展和国民经济建设中占有重要的战略地位。经过40多年的发展,围绕并行计算机、并行算法和并行程序设计,融合并行计算机体系结构、数值和非数值的并行算法设计及并行程序设计于一体,形成了并行计算(Parallel Computing)“结构-算法-编程-应用”完整的学科体系与系统课程框架。文中回顾了作者在并行计算学科的发展方面所做的工作,并对非数值计算中的计算方法和新型的非冯诺依曼结构计算机体系结构的研究进行了介绍。

**关键词**:并行计算;非数值计算;计算机体系结构;学科发展;高性能计算

**中图法分类号** TP399.9

## Development of Parallel Computing Subject

CHEN Guo-liang and ZHANG Yu-jie

School of Computer Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China

Nanjing Center of HPC China, Nanjing 210023, China

Jiangsu HPC and Intelligent Processing Engineer Research Center, Nanjing 210023, China

**Abstract** Computational science has become the third science in parallel with traditional theoretical science and experimental science. They complement each other and promote the development of human science and technology and the progress of social civilization. The research frontiers of key scientific and economic problems in the 21st century may be solved by computing techniques and computing science. High-performance computing is a manifestation of a country's comprehensive national strength, and it is one of the key technologies supporting the continuous development of national strength. It has an important strategic position in national defense security, high-tech development and national economic construction. Through more than 40 years of development, we have focused on parallel computers, parallel algorithms and parallel programming, integrating parallel computer architecture, numerical and non-numerical parallel algorithm design and parallel program design, forming parallel computing “architecture-algorithm-programming-application” disciplinary system and system curriculum framework. This article reviews the work we have done in the development of parallel computing, and introduces the calculation methods in non-numerical computing and the research of new non-von Neumann structured computer architecture.

**Keywords** Parallel computing, Non-numerical computing, Computer architecture, Subject evolution, High performance computing

## 1 引言

计算机科学研究与教育的有效发展要体现时代性和先进性,在立足于本学科前沿关键问题 and 应用研究的同时,也要积极促进多学科交叉融合发展。并行计算<sup>[1]</sup>课程于20世纪80年代初由中国科学技术大学创建,至今已有40多年历史,

先后经历了非数值计算的并行算法、新型非冯诺依曼计算机结构、并行计算及其应用、改革计算机基础课程的计算思维以及数据科学与大数据计算理论研究5个阶段。我们的主要研究领域为并行算法和高性能计算及其应用等,先后承担了国家863计划,即神经信息处理系统、合肥高新技术开发区智能决策系统、安徽省防灾减灾智能信息与决策支持系统、淮河流

到稿日期:2020-04-04 返修日期:2020-06-28

基金项目:南京邮电大学教学改革研究项目(JG00419JX67)

This work was supported by the Teaching Reform Research Project of Nanjing University of Posts and Communications (JG00419JX67).

通信作者:陈国良(glchen@njupt.edu.cn)

域防洪防污智能调度系统、曙光 3000 客户端集成环境的研究与开发、合肥网格节点及远程用户使用环境与工具研制、高效能计算应用支持软件框架体系研制;国家攀登计划,即神经网络计算理论及体系结构设计;国家 973 计划,即难解问题的高效实用算法及应用、无线传感网络的基础理论及关键技术研究;国家自然科学基金,即高性能计算专项基金、当代并行机的并行算法应用基础研究、面向重大应用领域的高效计算优化理论与技术、面向大数据的高性能云计算关键技术研究等 20 多项科研项目。

同时,我们积极参与国产计算机软硬件研制,包括:微程序控制火控计算机的研制,KD-30 异步通信 4060/4062 设计,SMP 机群上并行算法研究与实现,基于龙芯 2F 的国产万亿次高性能计算机 KD-50-I 的研制,面向行业应用的 KD-50-1-E 增强型万亿次高性能计算机的研制,基于龙芯 3 号的通信与数学库的研制,基于龙芯 3 号多核处理器的国产万亿次高性能计算机 KD-60 的研制,基于龙芯 3A 的并行机实验仪器研制,面向高通量应用的实验测试床 SD-2 的研制,基于龙芯 3 号多核处理器的国产高性能计算机 KD-90 的研制,基于龙芯处理器的国产普及型高性能计算机 SD-30 的研制以及基于龙芯的高性能大数据一体机研制。

我们长期的并行计算理论及软硬件研究取得了多项被国内外广泛引用、达国际先进水平的研究成果,发表论文 200 多篇,出版学术著作和教材 10 多部。其中,“并行选择算法”获得 1990 年国家教委科技进步三等奖,“并行算法排序和选择”获 1992 年国家教委学术著作二等奖,“非数值计算的并行算法”和“神经网络软件支撑环境的研究”获 1995 年国家教委科技进步三等奖,“图论问题的并行算法”获 1995 年国家教委科技进步三等奖,“神经信息处理系统”获 1996 年安徽省科技进步二等奖,“VLSI 计算理论与并行算法”获 1997 年安徽省科技进步二等奖,“神经网络理论及智能信息应用基础”获 1998 年国家教育部科技进步一等奖,“安徽省减灾防灾智能信息决策支持系统”获 2000 年中国科学院科技进步二等奖,《遗传算法及其应用》获 2000 年安徽省科技进步二等奖,“安徽省减灾防灾智能信息决策支持系统”获 2001 年国家科技进步二等奖,“高性能并行计算及其应用”获 2005 年首届浪潮高性能计算创新奖,“淮河防洪体系联合调度关键技术研究及应用”获 2008 年水利部大禹水利科学技术一等奖,“淮河防洪体系联合调度关键技术研究及应用”获 2008 年水利部淮河水利委员会特等奖,“基于自主龙芯 CPU 的个人高性能计算机研制及其基础软硬件”获 2014 年高等学校科学研究优秀成果奖(科学技术)二等奖,“多路处理器计算机教学实验箱”获 2014 年第三届高等学校自制实验教学仪器设备评选与优秀作品展示活动一等奖,“基于国产 CPU 的云计算大数据一体机”获 2017 年江苏省科技进步三等奖。

多年来,我们团队围绕并行算法的教学与研究,逐渐形成了“算法理论-算法设计-算法实现-算法应用”一套完整的并行算法学科体系<sup>[2]</sup>,提出了“并行机结构-并行算法-并行编程”一体化的并行计算研究方法,开创了我国非数值并行算法研究的先河,出版教材包括《逻辑设计手册》(科学出版社,

1972 年)、《晶体管开关电路的设计与应用》(科学出版社,1972 年)、《逻辑电路手册》(国防工业出版社,1978 年)、《互联网络结构分析》(科学出版社,1990 年)、《并行算法:排序和选择》(中国科学技术大学出版社,1990 年)、《VLSI 计算理论与并行算法》(中国科学技术大学,1990 年)、《并行图论算法》(中国科学技术大学出版社,1991 年)、《神经网络及其应用》(中国科大出版社,1992 年)、《并行算法的设计与分析》(高等教育出版社,1994 年)、《遗传算法及其应用》(人民邮电出版社,1996 年)、《并行计算-结构·算法·编程》(高等教育出版社,1999 年)、《并行算法的设计与分析》(高等教育出版社,2002 年)、《并行计算机体系结构》(高等教育出版社,2003 年)、《并行算法实践》(高等教育出版社,2004 年)、《并行算法的设计与分析第三版》(高等教育出版社,2009 年)、《并行计算-结构·算法·编程第三版》(高等教育出版社,2012 年)、《并行计算-结构·算法·编程》(高等教育出版社,2003 年)、《计算思维导论》(高等教育出版社,2012 年)以及《大数据计算理论》(高等教育出版社,2017 年)。

为响应国家教育部将并行算法的研究从深度向广度发展的号召,使得并行计算的研究与教学在各大院校普及,并行算法偏学术理论研究向教学和工程实验方向转变,我们除了按计划有步骤地在全国开展并行计算的普及培训外,还配合出版了面向 21 世纪课程教材和普通高等教育“十一五”国家级规划教材《并行计算系列丛书》,目前上述教材均已再版。2001—2008 年,在教育部高教出版社的主办下,全国各地举办了并行算法课程的培训班和讲习班等,包括:中国科学技术大学与贵州大学联合举办了全国并行算法研讨班(2001 年 7 月 28 日—2001 年 8 月 31 日);中国科学技术大学与西华大学联合举办了全国并行计算研讨班(2002 年 10 月 20 日—2002 年 10 月 29 日);中国科学技术大学与太原理工大学联合举办了全国并行计算讲习班(2004 年 8 月 11 日—2004 年 8 月 20 日);中国科学技术大学与大连理工联合举办了名师精品课程并行计算讲习班(2005 年 8 月 2 日—2005 年 8 月 8 日);中国科学技术大学与深圳大学联合举办了 2006 年并行计算国家精品课程教师培训班及课程教学研讨会(2006 年 7 月 31 日—2006 年 8 月 5 日);中国科学技术大学与苏州大学联合举办了 2008 年并行计算国家精品课程教师培训及课程教学研讨会(2008 年 7 月 27 日—2008 年 8 月 1 日)。此后,在全国其中的教师培训及课程教学研讨会就不再举行了,而是以全国各地大学的年轻教师进修代培和访问学者等形式进行,参与的大学包括安徽大学、合肥工业大学、广西大学、桂林电子科技大学、苏州大学、扬州大学、太原理工大学、西北大学、东北大学、西北工业大学、西华大学、厦门大学以及哈尔滨工业大学等。

为增进国际学术影响,我们积极奔走于东西方大学以进行学术交流。在普度大学、佛罗里达大学、俄亥俄大学、卡内基-梅隆大学、华盛顿大学、密苏里-堪萨斯大学、澳大利亚国立大学、格里菲斯大学、昆士兰大学、新南威尔士大学、新加坡国立大学、日本东京大学、京都大学、大阪大学、早稻田大学、帝国大学、日本东京农工大学、筑波大学以及东京电子通信大

学等进行学术交流合作与专题演讲。

我们积极筹备并行计算平台建设,营造了我国并行算法类的科研和教学基地,于1995年率先创建了我国第一个国家高性能计算中心,并分别于2007年、2009年、2012年和2014年成功研制了我国首台基于国产高性能通用处理器芯片龙芯单核、4核和8核的KD-50、KD-60和KD-90的万亿次系列高性能计算机。为了适应发展的需要,国家高性能计算中心(合肥)辐射到全国各地,先后建立了国家高性能计算宁波分中心(2002年)、蚌埠分中心(2003年)、南宁分中心(2006年)、苏州分中心(2008年)、深圳分中心(2009年)、南京分中心(2017年)及成都分中心(2019年)等。同时,2001年中国科学技术大学建立了安徽省部共建“高性能计算及应用”实验室;2012年深圳大学建立了“广东省普及型高性能计算机重点实验室”。2017年深圳正式成立了“大数据系统计算技术国家工程实验室”,该实验室以建设“高性能大数据计算平台”为目标,以开发大数据核心系统、典型应用、产业孵化为主线,最终建成我国领先的大数据创新创业技术服务基地,为我国云计算和大数据处理以及普适高性能计算提供了人才培养基地和基础设施。

为结合国家需求,促进国产CPU的发展,推广国产并行机应用,服务于国民经济建设主战场,我们相继开展了水科学与工程技术的研究,主要有:淮河流域水库调度、淮河行/蓄洪区调度、淮河水源污染排放调度;淮河流域气象定点、定时、定量预报等;桥梁安全监测工作,包括杭州湾大桥安全监测、宁波市桥梁安全监测、铜陵大桥安全监测、芜湖长江大桥安全监测等;石油勘探油藏模拟与页岩气监测,包括大庆油田、胜利油田、克拉玛依油田等;青藏铁路路基冻土分析等。

## 2 非数值计算中的计算方法

一个具体的应用问题,经过物理学家的物理建模后,由计算学家通过物理模型描述成一组偏微分方程,再转换为线性代数方程组后进行数值求解。在计算数学专业中的计算方法课程就专门地讲述了这些内容。数值计算中涉及的内容很多,从计算科学的角度,可以把它们分为矩阵运算、线性方程组的求解以及快速傅里叶变换等。非数值计算是相对于数值计算而命名的,它研究计算机中常用的一些操作方法,包括排序选择、搜索、匹配等。非数值计算中的并行算法基本设计策略包括:串行算法的直接并行化;从问题描述开始设计全新的并行算法;借用已有的算法;利用已求解问题和待求解问题两者之间的内在相似性来求解新问题<sup>[3]</sup>。中国科学技术大学率先在国内开展了此方面的研究,他们从排序和选择这两种基本操作的网络实现方法(排序和选择网络)入手,把研究领域逐渐扩展到了超大规模集成电路(VLSI)和并行图论算法两个方向,最终由中国科学技术大学出版社最早在国内出版了3本学术著作(《并行算法排序和选择》(中国科学技术大学出版社,1990年)、《VLSI计算理论与并行算法》(中国科学技术大学出版社,1990年)和《并行图论算法》(中国科学技术大学出版社,1991年)),并由台湾省儒林图书公司出版了繁体字版,当年在教育界和学术界颇有影响。

20世纪80年代中期,我们在分组选择网络、递归选择网络、双调选择网络等方面发表了一系列文章,当时在国内学术界可谓是“先声”;接着,在《计算机工程与应用》上发表了“并行排序算法”的长文(1984年)和“VLSI并行计算”的长文(1989年);并在《计算机研究与发展》连续两期刊登了非数值计算的并行算法(上、下)(1989年)的长文和并行图论算法(1991年)的论文等。

为了促进交叉学科中并行技术的发展,与时俱进,我们还及时与中国科学技术大学同事、安徽大学及合肥工业大学等高校广泛地开展了神经计算和演化计算方面的研究。我们结合研究申请了863项目(“神经信息处理系统和攀登计划”及“神经网络计算理论及体系结构设计”),具体研制了通用并行神经网络模拟系统GP2N2S2,并开展了神经计算及其在组合优化中的应用研究。

与此同时,我们还开展了演化计算、模拟退火算法以及遗传算法等方面的研究,在此基础上还出版了两部专著:《神经网络及其应用》和《遗传算法及其应用》。同时,我们还开展了组合数学图论计算、化学计算、生物计算和计算地学等的研究。

## 3 新型非冯诺依曼计算机体系结构

传统的冯诺依曼计算机结构是第一代计算机(电子管计算机)、第二代计算机(晶体管计算机)、第三代计算机(集成电路计算机)、第四代计算机(大规模超大规模集成电路)等的主流体系结构。与此同时也出现了一些所谓的先进计算机系统的新型结构,从20世纪70年代开始,我们相继开展了这方面的研究。

### (1)微程序控制器设计

1963—1964年期间,我们采用1951年Wilkes提出的微程序控制器技术<sup>[4]</sup>,设计了“八位运控模型”,并采用了自行提出的“寄存器传输操作语言”进行形式化描述,此举可谓当时国内计算机界的首创。

### (2)直接执行高级语言的计算机

1980年,我们与美籍教授朱耀汉先生共同研究了“直接执行的高级语言FORTRAN”机器,介绍了对标准FORTRAN语言所做的一些限制和补充,简述了该计算机体系结构,列举描述了典型的FORTEAN语言的直接执行过程,并自行提出了可重组结构与之配合<sup>[5]</sup>。

### (3)数据库计算机

20世纪80年代初,我们与美籍教授苏岳威先生共同研究了数据库计算机,提出了RDF查询语言到SQL语言的转换原理,并在此基础上实现了一个对用户透明的、建立在关系数据库之上的RDF搜索引擎,以提高其海量存储和查找效率<sup>[6]</sup>,并在1981年全国计算机体系结构会议上发表了论文。

### (4)光计算机

20世纪80年代初,我们与天津大学合作研究了光通信与光计算机原理,30年后上海大学金翊教授通过垂直偏振光、水平偏振光和无强光3个稳定的光状态表示信息的三值光计算机原理<sup>[7]</sup>,提出了基于光原理三值逻辑计算机。

#### (5) 生物计算机

20世纪80年代初,我们研究了基于字符串匹配原理的生物序列比对的生物计算机,在纳米计算模型上实现了DNA序列模体发现算法<sup>[8]</sup>。近期与深圳华大基因研究院研究了新一代序列测序的生物计算机。

#### (6) 可重构可变结构计算机

20世纪80年代初,我与陈永年教授研究了“可变结构计算机系统”及其结构中的资源间相互通信问题<sup>[9]</sup>。该文章发表在《电子计算机动态》杂志和《中国科学技术大学学报》上。

#### (7) 数据流计算机

1985年,我们根据MIT提出的数据流计算机概念,分析了曼彻斯特大学的数据流计算机,在国内分布式计算会议上发表了“数据流计算机体系结构解析”<sup>[10]</sup>一文。

#### (8) 神经计算机

20世纪90年代初,我们在研究神经网络在组合优化中的应用的同时,自行构建了基于Transputer阵列的“通用并行神经网络模拟系统(GP2N2S2)”<sup>[11]</sup>,提供了高级神经网络描述语言及其编辑和编译器的执行环境,实现了程序的自动化执行。

#### (9) Transputer 阵列机

20世纪90年代初,我们搭建了Transputer阵列机,在中国科学院计算技术研究所进行了组装、调试和运行,并在其上实现了通用的Rohoman应用平台。

#### (10) 量子计算机

2000年,我们在中国科学技术大学开展了量子计算研究,讨论量子计算机模型及其物理实现方案、量子计算过程、量子计算模型和量子并行算法,分析量子指数级存储容量和指数加速特征等,并在保密通信、密码安全等领域对量子信息技术进行了研究<sup>[12-13]</sup>。近期,中国科学技术大学潘建伟教授领导的团队正在研制量子计算机系统。

**结束语** 大数据、物联网、云计算和区块链是新一代信息技术发展中的华彩乐章。物联网使成千上万的网络传感器嵌入到现实世界中,云计算为物联网产生的海量数据提供了存储空间和在线处理,而大数据则让海量数据产生了价值,区块链促进信息、资金等大规模数据的互联互通,保障了生产要素在区域内有序高效地流通。高性能计算是广义上的并行计算,是支撑国家实力持续发展和确保国防安全的关键技术之一,将促进一些重大挑战问题的解决,如大飞机设计、全球气候预测、人类基因、油藏模拟、海洋环流、药物设计、超导材料等的发展。本文主要介绍了我们在并行计算学科发展过程中的成果和研究方向,同时,我们也呼吁国内更多的优秀团队来分享研究经验,我们也将继续开展并行计算理论和应用研究,为国民经济发展提供技术和人才支撑。

### 参 考 文 献

[1] CHEN G L, MIAO Q K, SUN G Z, et al. Layered models of par-

allel computation [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2008(7): 137-143.

[2] CHEN G L, SUN G Z, XU Y, et al. Methodology of Research on Parallel Algorithm [J]. Chinese Journal of Computers, 2008(9): 5-14.

[3] CHEN G L. Parallel Algorithms for Non-Numerical Computing [J]. Journal of Computer Research and Development, 1988(11): 30-46.

[4] WILKES M V. Automatic Calculating Machines [J]. Journal of the Royal Society of Arts, 1951, 100(4862): 56-90.

[5] CHEN Y N, HUANG K C, CHEN G L. The concept design of direct execution of high-level language FORTRAN computer [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1980(4): 47-54.

[6] LEI Y F, HUANG L S, CHEN G L. Principle of Converting RDF Query Language to SQL and Its Implementation [J]. Journal of Computer Research and Development, 2004(7): 214-220.

[7] JIN Y, HE H C, LV Y T. Principle of ternary optical computer [J]. Science in China (Series E), 2003(2): 111-115.

[8] SHEN Y F, CHEN G L, ZHANG Q F. Motif Finding Algorithm on Nanocomputing Platform [J]. Journal of Chinese Computer System, 2007(4): 61-65.

[9] REDDI S S, FEUSTEL E A. A Restructurable Computer System [J]. IEEE Transactions on Computers, 1981(1): 21-38.

[10] SU X B, CHEN G L. Design and analysis of Manchester data flow prototype [J]. Computer Engineering and Applications, 1987(10): 3-9.

[11] CHEN G L, XIONG Y. General-Purpose Parallel Neural Network Simulation System [J]. Journal of Chinese Computer System, 1992, 13(12): 16-21, 32.

[12] ZHONG C, CHEN G L. Quantum computing and its applications [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2002, 27(1): 83-86.

[13] YANG W, HUANG L S, LUO Y L, CHEN G L. Unconditionally Secure Quantum Oblivious Transfer [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(8): 1543-1547.



**CHEN Guo-liang**, born in 1938, is a member of Chinese Academy of Sciences, academic leader of non-numerical parallel algorithms in China, professor of Nanjing University of Posts and Telecommunications, Shenzhen University and University of Science and Technology of China. Director of national high performance computing center, and executive director of International High Performance Computing (Asia).