

21 世纪上半叶信息科学技术展望*

李国杰

(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

摘要 文章论述了科学技术发展的长波周期规律,重点讨论了推动信息科学技术发展的强劲需求和 20 年内现有信息技术的改进将遇到的难以逾越的障碍,并预见 21 世纪上半叶有望兴起一场以网络科学、交叉学科、计算思维和数据知识化为主要方向的信息科学革命。

关键词 信息科学技术,21 世纪上半叶,长波周期,基本创新,路线图,计算思维

DOI:10.3969/j.issn.1000-3045.2010.01.010



李国杰院士

1 科学技术发展的长波规律

上 世 纪 20 年代,前苏联经济学家康德拉季耶夫在分析了西方各国经济的大量统计数据后,发现从 1789 年开始,资本

主义国家的经济发展经历了 3 次以 50—60 年为周期的长波,各次长波分别与蒸气机、电力、铁路等重大技术革命联系在一起^[1]。美国著名经济学家熊彼特认为创新是经济发展的主要动力,他首先以“康德拉季耶夫周期”命名近代经济发展的长波,引起了经济学界的重视。尽管经济学界对形成经济长波

的原因和每次长波的起止时间还有分歧,也有些经济学家不承认有长波存在,但许多学者认同自 18 世纪末以来人类社会已经历了 4 次经济长波(长波周期有缩短的趋势),目前处在第五波。第一波从 18 世纪 80 年代开始,以纺织工业为主导,实现蒸汽化;第二波从 19 世纪 40 年代开始,以铁路、冶金为主导,实现铁路化;第三波从 19 世纪 90 年代末开始,以电力、化工、汽车为主导,实现电气化;第四波从 20 世纪 50 年代开始,以石油和电子等技术为主导,实现电子化;第五波从 20 世纪 90 年代开始,以网络和数字化技术为主导,实现数字化(见图 1)^[2]。

1975 年出版的德国经济学家门施的著作《技术的僵局》被公认为长波理论复兴的代表作。他明确区分了“基本创新”(Basic Innovation)和工艺创新,强调基本创新是推动经济增长最重要的动力,而经济停滞则是源于基本创新的匮乏。他收集的重要证据表明,基本创新的高峰发生于 19 世纪 20 年代、80 年代和 20 世纪 30 年代,恰恰处在经

* 收稿日期 2009 年 12 月 5 日

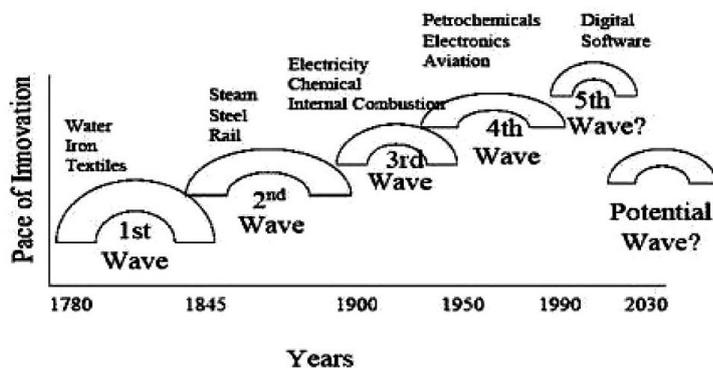


图1 康德拉季耶夫经济长波示意图

济长波的萧条期(见图2)^[9]。

最近的研究发现,产品创新和经济长波理论起源于马克思主义。马克思本人在《1857—1858年经济学手稿》中就指出了产品创新对于资本积累的重要性。1912年,一位名不见经传的荷兰马克思主义者范·盖尔德伦在一份荷兰社会主义杂志上发表文章,强调重大产品创新推动形成经济长波的上升期。1996年此文被译成英文,被公认为长波理论的起源。

本文不打算讨论经济学的长波理论,而是关注科技发展的长波规律。在做《中国至2050年信息科技发展路线图》战略研究时,笔者苦苦思索的一个问题是:为什么革命性的重大科学发现和技术发明往往是以簇聚的方式周期性地成群出现,而不是以涓涓细

流方式比较均匀地出现?比如上世纪30—40年代在信息领域出现了图灵、香农、冯·诺依曼、维纳、哥德尔等一批划时代的大家。随后不久发明了晶体管,奠定了当代信息科学技术的基础。自上世纪60年代发明硅CMOS平面工艺与激光通信以后,信息科学技术再也没有可称得上“基本创新”的重大发现与发明。Internet是上世纪的重大发明,德国人把Tim Berners-Lee评为仅次于爱因斯坦的全球20世纪第二位伟大的科学家,但不管是Internet还是Web,其中包含的科学问题还有待发现与探索。所谓经济长波实际上是一群革命性技术的消化吸收过程,当一项技术已经普及并进入大规模应用阶段时,由于各种工业标准与平台的建立,会形成较固定的技术路径依赖,主要的创新活动就变成渐进创新或工艺创新。目前,电子技术、计算机技术正在进入广泛普及阶段,也就是新的重大科学技术突破的酝酿期。科学技术本身是交织在一起的,单一领域很难取得根本性的突破,一个学科的重大突破往往会带动其他学科的突破,导致重大科学技术突破成群出现。

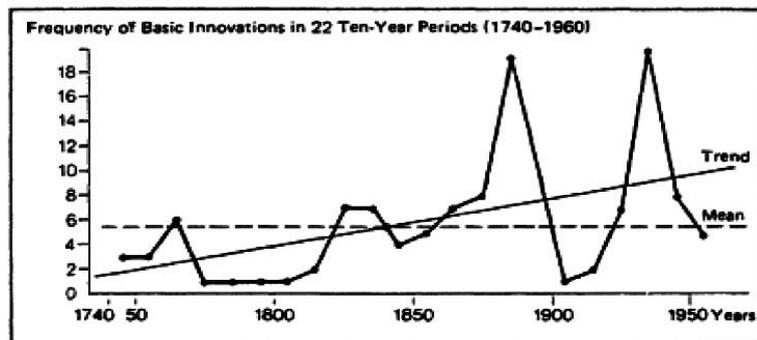


图2 1740—1960年基本创新的频率

有些学者强调信息科学技术的特殊性。他们认为以物理科学为主的发现与发明有周期性,信息科学技术不同于物理科学,可以连续几百年细水长流地高速发展,不会出现周期性的长波。笔者认为,信息科学技术是替



中国科学院

代与放大人的脑力活动而不是体力活动,可能存在与过去不同的发展规律,但一项革命性技术(包括信息技术)对社会的推动作用总是有限的,渐进式的技术改良对经济发展的作用更小。而人类的需求是没有止境的,强烈的需求必将促使在爆发第一次信息技术革命几十年后,再次出现重大科学技术突破。上一次基本创新的高峰期在上世纪40年代(图2),已经过去60多年(上世纪80年代曾有过小的高峰),现在已有大量的知识积累,按照长波规律的推测,本世纪20—30年代可能出现基本创新的高峰。

2 潜在需求是信息科学技术发展的强大动力

许多人认为科学发展的动力主要来自科学家的好奇心,重大的科学发现往往出自科学家的奇思妙想或灵机一动。社会上广泛流传苹果落地启发牛顿发现地心引力的“神话”就是这种见解的反应。但是,与个人的好奇心相比,社会的迫切需求可能是科学技术发展更强大的动力,信息技术尤其如此。

巴比奇设计早期的计算机是为了实现精密的对数表。第二次世界大战中,为了加速弹道计算,美国政府才出资支持研制电子管计算机。逻辑电路原理和电子管在20世纪初以前就出现了,为什么电子计算机等到40年代才问世? ENIAC的设计者的回答是“部分原因是在此之前没有这种迫切的需求”。Bell实验室投巨资支持晶体管的研究也是由于电子管交换机功耗太大又不稳定。信息领域这种需求激发的发明还可以举出很多。

那么,信息科学技术目前面临哪些需求的强劲推动呢?

众所周知,信息技术已进入广泛普及阶段,但目前的信息技术并不能实现广泛普及的目标,因为过去几十年,信息技术追求的

目标主要是高性能,而广泛普及更加需要低成本、低功耗、易使用的技术。用户使用信息产品有一个从满足基本需求到专业化和个性化的不断升级的过程,目前的用户大多数还处在满足基本需求和使用一般商品的水平,今后的信息产品要满足数以亿计的广大民众的个性化需求。通俗地讲,信息技术要实现从“高大全”向“低小专”(“专”是指个性化)的转变。这是一个巨大的技术挑战,我们必须清醒地认识到普及信息技术的艰巨性和长期性。普及信息技术可能比普及电力技术更困难,需要更长时间。所谓信息技术的广泛普及是指如同电力系统一样,用户只要知道电源插座在哪儿,其他都不用管。信息技术离这种普及还有很远的路要走。近十几年来,我国的数字鸿沟没有明显缩小。目前农村和城市每百人的个人电脑拥有量相差十几倍(47.2:2.7),广大农村信息基础设施的“最后一公里”问题远没有解决。缩小和消除信息鸿沟是我国的重大战略需求。

从生产力发展的角度来看,人类社会的发展历程是从农业社会到工业社会再进入信息社会。信息社会的高级阶段是U-社会,不仅任何人之间要能实现随时随地的通信,各种设备之间、设备与人之间也要做到随时随地通信联系,即无处不在的(Ubiquitous)通信。信息社会与工业社会的主要差别是在人类世界和物理世界之间出现了一个信息世界(Cyberspace),即形成了人类-信息-物理三元世界。因此,物理世界与信息世界之间的交互界面、人类世界与信息世界的交互界面就成为构建信息社会必须关注的科学技术问题。物理世界通过各种传感器系统获得源源不断的信息,联接各种物体的“物联网”的规模将大大超过连接人的互联网。微型传感芯片也将嵌入人体和大脑,监测人体内部机能。对这些嵌入式设备和传感器发送的海量信息进行存储、搜索、校对、汇总和分

析,将是 21 世纪信息领域最繁重的任务,也将提出大量过去没有碰到的科学技术问题。信息技术是人的智能的延伸,让信息设备善解人意,实现人机界面的智能化是人类不懈的追求,也是推动信息科学技术发展的强劲需求。

集成电路是现代信息社会的基石,人们希望越来越多的功能集成在一块芯片上,实现片上 Internet、片上实验室等。但基于 CMOS 的芯片技术已接近物理极限,急切期待颠覆性的新技术。自旋电子器件、纳米管和纳米线器件、量子点和量子纠缠功能器件、分子器件等变革性器件都已进入人们的视线。另一方面,未来芯片要汇集计算、存储、通信等多种功能,满足多品种、短设计周期等需求,同样需要寻求新的技术路线。

信息社会由大大小小的信息系统组成,系统越来越复杂,功能越来越多样化,但人们希望计算机等信息设备成本越做越低,功耗和体积越做越小,导致构建信息系统的科学技术出现重大变革。超级计算机的性能已达到 1 000 万亿次(Petaflops),但仍然满足不了科学计算的需求,用户希望超级计算机继续保持每 10 年左右性能提高 1 000 倍的升级速度。人类对存储容量和通信带宽的需求也没有止境,每个家庭都有 TB 级存储和 Gb 级通信带宽的潜在需求。

反映 20 世纪信息技术发展最主要的标志是摩尔定律。21 世纪信息技术的一个重要目标,就是使用户看见的信息系统,包括专业应用软件、解决方案和服务,也能够有效地产生规模效应,从而使得软件业和服务业也产生类似摩尔定律的走势。比如,同样功能和性能的软件开发成本平均每两年降低 50%,同样质量的服务所需成本每两年降低 50%。今后几十年内如果能够使得软件业和服务业也能做到按上述“摩尔定律”发展,无疑将会引发一场革命。

上世纪 40 年代, 香农提出了以信息熵和互信息量为基础的信息度量和信息传输理论,为 20 世纪通信技术的大发展奠定了基础。然而,面对现实世界中形形色色的信息现象(计算机病毒的流行,疾病的传播,金融风暴等等),香农的信息理论显得无能为力。探究网络现象产生的原因,深入思考网络现象的本质,发展交互科学(Science of Interaction),是人们研究网络科学的内在动力。

从上世纪 70 年代开始,数字技术已成为信息领域的主流技术。但是,模拟信号经离散化转化为数字信息以后,在许多应用问题中一定会遇到组合爆炸,数字计算机能精确处理的问题只是客观世界中很小的一部分问题(可形式化,有较低的计算复杂性的一类问题)。今后几十年内模拟计算应该成为受人重视的研究方向。我们在重视数字技术的同时,还需要探索模拟量处理的新途径以及数模混合处理的新方法。

类似的潜在需求还可以举出很多。信息技术的广泛应用和上述各种需求必将拉动信息科学技术突飞猛进地发展,需求就是力量,巨大的需求必将产生翻天覆地的巨大动力!

3 20 年内现有信息技术的改进将遇到难以逾越的障碍

笼统而言,科学技术的进步可分为两大类。一类是基本创新(Basic innovation),即划时代的重大技术发明,如蒸气机和内燃机、发电机和马达、电子计算机与集成电路、Internet 和 Web 等。基本创新往往形成全人类的通用技术平台,带动约半个世纪的经济长波。另一类是在现有通用技术平台上的技术改进,即应用创新或渐进创新(Incremental innovation)。应用创新也包括我们常说的集成创新(有些国外学者称为



中国科学院

Orthogonal innovation)。渐进的技术改进对提高效率和市场竞争力具有累积效应,其累进的总效果可能超过一次大的创新。因此我们不能忽视渐进创新,包括引进消化后的再创新。但是,现有技术平台的改进不是无止境的,经过几十年的努力后,这种改进就会遇到难以突破的本质性障碍。

以 CMOS 工艺为主的集成电路就是一个明显的案例。被评为材料科学领域 50 年间最大进展的“国际半导体技术路线图”(ITRS) 2008 年预测 2022 年以前的半导体工艺发展,已经不再仅仅是线宽的缩小,而是提出了 3 个发展方向:一是延续摩尔定律(More Moore),即继续等比例缩小 CMOS 器件的工艺特征尺寸,今后每 3 年左右线宽可缩小 30%(放慢了速度),2022 年微处理器工艺的特征尺寸目标是 16 纳米(半节距 16 纳米,物理栅长 6 纳米);二是扩展摩尔定律(More than Moore),即从 Geometrical Scaling 转向 Functional Scaling,着眼于一块芯片集成尽可能多的功能;三是超越 CMOS(Beyond CMOS),即探索非 CMOS 的新原理、新器件,如碳基纳米器件、自旋电子、单电子、量子、分子器件等。理论上二进制开关器件可做到 1.5 纳米工艺,开关速度可以快到 0.04 ps,但 CMOS 工艺做不到。22 纳米以下的工艺目前还不知道如何实现,IBM 等大公司已宣布不支持 22 纳米以下的 CMOS 工艺研究。现在,芯片性能倍增时间已从过去的一年半延长到两年半,到 2020 年左右,摩尔定律将不再有效,我们必须从 More than More 和 Beyond CMOS 中寻找新的出路,也就是说集成电路正在逐步进入“后摩尔时代”。

超级计算机的发展与集成电路有密切关系,采用 CMOS 器件,未来的艾级(Exaflops 即 10^{18} flops)计算机的功耗很难降到 10 MW 以下。IBM 已经有研制 Exa 级超

级计算机的计划,预计 2018 年左右推出,功耗可能会超过 100 MW。近 30 年来,每隔 11 年左右,超级计算机的性能提高 1 000 倍(处理器芯片性能提高 100 倍左右,系统规模提高 10 倍左右)。现在计算机界关心的一个问题是:2020 年以后,超级计算机还能不能继续保持 10 年 1 000 倍的发展速度?也就是问:到 2030 年前后,能不能造出具有泽级(Zettaflops, 10^{21} flops)性能的超级计算机?只在现有的技术基础上做小的改进,2030 年肯定做不出 Zetta 级水平的计算机,恐怕到 2040 年都不一定行。除了功耗限制外,系统的可靠性也是难以逾越的障碍。即使单核的平均无故障时间超过 100 年,在上千亿个核并行处理的条件下,每秒钟可能有数百个核或线程执行出问题。如果是通过设立检查点(Check point)调用历史记录来恢复,机器就只能全力以赴做故障恢复,不可能干正经事了。超级计算机的巨大规模对保证可靠性提出了本质性的挑战,必须有高效率的自诊断自恢复机制和变革性的容错技术。

Internet 和 Web 的大规模推广普及使人们忘记了建立 DARPA 网的初衷。Internet 网的设计者绝不会想到今天全球有十几亿人上网,互联网会成为不可或缺的信息基础设施,更不会想到音视频内容会成为网上的主要流量,需要保证实时的服务质量。互联网的开放宗旨和信任上网用户的原始假定也导致今天很难解决网络安全问题。为了使互联网有更高的带宽,更多的地址和更好的服务质量,近 20 年来科研工作者已经做了很大的努力,也取得了超出想象的进展。但是,从 IPv4 升级到 IPv6,主要是解决 IP 地址不足的问题,不可能从根本上解决互联网的安全和 QoS 问题。改变基础设施是一个漫长的过程,不能一蹴而就,必须巧妙地把渐进的演进、新旧网的重叠和革命性的突破有机结合起来。为了构造安全可信、高效方

便的信息基础设施,可能需要 10—20 年时间才能彻底突破 TCP/IP 协议的局限。进入“后 IP”时代是不可避免的发展过程,我们要么被动地等待,要么主动积极开展变革性网络结构研究,别无其他选择。

其他的信息技术,例如存储和显示等,大约 20 年之后也会遇到类似的技术壁垒。预计到 2030 年左右,传统的磁记录技术也将走到极限,新的原子级存储技术将逐步成为主流。在存储与显示领域,光子可能会逐步取代电子,成为主流的信息载体。

器件、系统、网络都出现难以逾越的“技术墙”,例如“功耗墙”、“可靠性墙”、“复杂性墙”等等,说明其中蕴涵一些本质性的科学问题,渐进性的小改进无济于事。要成数量级地降低功耗,就不能只靠一点一滴的精细电源管理,应当在理论的指导下进行,要像研究时间复杂性和空间复杂性一样,建立功耗复杂性理论。单个开关一次 0—1 变换理论上只消耗 $KT \ln 2$ 能量(K 是波尔兹曼常数 1.38×10^{-23} , T 是绝对温度),而现在的芯片中一个晶体管一次开关的功耗远大于 $10^6 KT$,至少相差 100 万倍,节能的余地很大。目前一个系统中可能超过 10^{15} 个开关,这些开关应如何控制才能实现耗能最小化是一个十分复杂的理论问题,不只是简单地宏观控制时钟和电源。本质上讲,能量的消耗是由于熵的减少,如果能实现可逆计算,就可能从根本上解决巨大功耗问题,这又涉及计算模型问题。总之,解决各种“技术墙”问题需要在信息科学上花大功夫。

经济学家的研究成果表明,基本创新对经济开始产生巨大影响往往要比重大技术发明延迟几十年,蒸气机、内燃机、电力技术都是如此。我们目前使用的通

用信息技术平台的基本创新大多是上世纪 60 年代以前发明的,新的基本创新呼之欲出。目前世界经济正处在第五长波的平顶期,2020—2030 年可能会处于第五长波的下降期。按过去几次长波的规律,长波的下降期正是基本创新的高峰期,上述“技术墙”将激励科研人员凝聚科研目标,可望取得重大科学技术突破。

4 21 世纪上半叶信息科学可望取得重大突破

就信息领域而言,20 世纪下半叶是以技术创新和产业大发展为标志的时代,信息科学本身并没有本质性的大突破。诚然,重大的科学发现和技术发明不可能按计划进度产生,历史上确有不少发现和发明源自偶然的机遇。但有心人越多,机遇也会更多。21 世纪上半叶有望兴起一场以网络科学、学科交叉、计算思维和数据知识化为主要方向的信息科学革命。在网络科学和智能科学取得重大突破以后,21 世纪下半叶基于信息科学突破的新的信息技术将取得比 20 世纪下半叶更大的发展(见图 3)^[4]。

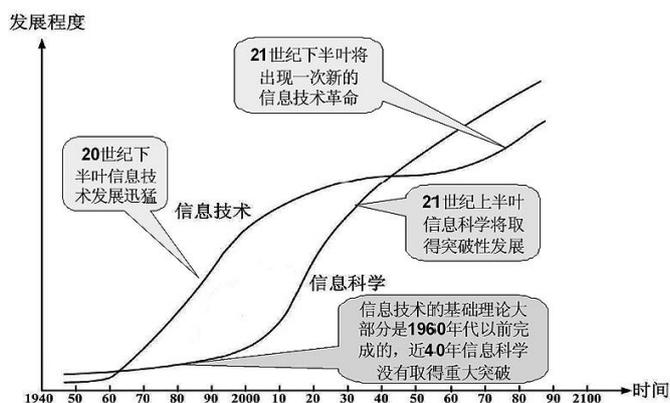


图 3 21 世纪信息科学技术发展态势猜想

无论是电信网、互联网,还是电力网、神经网络、生态网以及人类社会网等其他网络,表面的复杂现象之下隐藏着一些共同的规

律,如网络动态演化过程中的涌现现象等。目前的信息网络基础设施虽然规模很大,但缺乏坚实的理论基础。互联网发展的本质性障碍促使人们关注网络共性规律与机制的研究。针对互联网的 Web 应用,近年来已形成 Web Science(万维学)。万维学是网络科学的重要组成部分,旨在形成一套完善的构造和维护网络空间的理论和方法体系,目前开展的内容已包括网上群体动力学模型、社会网络模型、网络数学模型等。美国 NSF 近年来支持 Scientific Foundations for Internet's Next Generation (SING) 计划,开展有关互联网的基础研究。

网络科学是一门正在兴起的新学科,主要研究内容包括发现网络基本规律与机制、研究新的网络模型和构造新型网络算法等。网络科学的本质是研究网络组成单元之间的相互关系,美国 NSF 对 21 世纪基础研究的展望中强调交互科学 (Science of Interaction) 研究。今后算法研究的重点也将从单个算法转移到多个算法相互影响的研究。当共性的规律、模型、机制和算法基本形成后,网络科学将完成其融合的过程,形成相对稳定的学科方向和新的交叉学科分支,大约 20 年内网络科学将在分分合合中逐步发展成行。

随着信息科学技术的发展,以 Compu+X 或 X+info 形式出现的新型交叉学科层出不穷,如计算生物学、社会计算、生物信息学、空间信息学、纳米信息学等。各种科学与计算技术的结合都基于数学模型,建立计算模型要求有很深的数学背景。从方法论上讲,目前数学建模还是属于“黑客”水平。实验与模型的缠绕需要一种方法论和成熟的框架去组织数据和计算资源。新的交叉研究模式需要高明的控制机制,支持细粒度的不同种类的科学 workflow 集成到一个交织在一起的科学过程。目前我们还处于交叉科

学的初级阶段,往往只把计算当作一种工具或把其他学科当作信息技术的应用。今后的交叉科学可能既不是计算机学科也不是生物等原有学科,而是一门真正新的学科。今天,计算机科学对于生物学,已如同数学对物理学一样重要,计算机科学的思维方式将渗透到分子生物学的全过程,未来几十年内计算生物学可能成为生物学的主流之一。在所有交叉科学中,信息科学与脑科学及认知科学的交叉最值得关注,因为它可能引发信息表达与信息处理方式新的突破,基于脑与认知科学的智能技术将引发一场信息技术的新革命。最近美国 DARPA 提供了 490 万美元支持 IBM 和一些大学研制仿人脑的认知计算机,准备用纳米尺寸的元件模拟神经元突触,开发大小和能耗与人脑相似的系统。

未来的科学技术进步将表现出群体突破的态势,起核心作用的已不是一两门技术,而是由信息科学技术、生物科学技术、纳米科学技术、认知科学与智能技术、新材料科学与先进制造技术、航空航天技术、新能源与环保科学技术等构成的交叉科学技术群体,科学技术将进入到一个前所未有的群体集聚、协同进化的时代。

在各种交叉科学的研究中,基于高性能计算的模拟仿真技术正在成为不可或缺的纽带。过去流行的说法是“计算机模拟是实验和理论研究之外的第三条科研途径”,现在看来这种说法已不十分贴切。21 世纪的发展趋势是从计算机支持科学家做传统科学研究转向计算嵌入到科学研究的全过程 (very fabric of science),形成新的科研形式,即出现了“计算+传统科学=新科学”的新局面。被誉为计算机科学之父的 Richard Karp 在 2008 年中科院爱因斯坦讲座报告中发人深省地提出用“计算透镜”(Lens of Computation)理解各门学科,他指出:“算法

的世界观正在改变科学,包括数学、自然科学、生命科学和社会科学,计算机科学已处在科学论述和思想交流的中心。”

美国自然科学基金会副主任周以真教授 2006 年 3 月在 CACM 上发表一篇关于“计算思维”的重要文章(2007 年 11 月王飞跃的译文在《中国计算机学会通讯》上发表),对发展 21 世纪的信息科学有战略性的指导意义。她指出:计算思维是运用计算机科学的基础概念去求解问题、设计系统和理解人类行为,它采用抽象和分解来迎战庞杂的任务,通过约简、嵌入、转化和仿真等方法,把一个看似很困难的问题重新阐述成一个我们知道怎么求解的问题。计算思维利用启发式推理来寻找解答,在不确定的情况下做规划、学习和调度。计算机博弈理论正在改变经济学家的思维方式,纳米计算改变着化学家的思维方式,量子计算改变着物理学家的思维方式。计算思维至于明天就如同普适计算至于今天。

随着计算的普及和规模扩大,计算机的概念正在发生变化。计算机不再只是指单个客户机和服务器,现在我们应把整个数据中心甚至整个互联网看成一台庞大的计算机。如何形式化地描述这台巨大无比的计算机,需要全新的计算机结构理论。由于主频的提高受到功耗等限制,计算机界越来越重视各个层次的并行处理。多核芯片成为主流,对系统软件是一个巨大的挑战。未来 20 年并行编程模型和并行编程语言将是计算机领域最热门的研究方向之一;并行处理和智能化是信息系统设计最需要突破的核心技术,几十年来花的精力很多但进展不大,今后几十年必须啃下这两块硬骨头。

所谓服务业本质是处理海量数据和知识的产业,未来几十年知识本身将成为重要

的商品。数据是 21 世纪最丰富的资源,如同过去几个世纪人们从各种矿物中冶炼金属一样,今后人们将花大量的精力从海量数据中挖掘知识。Internet 也好,信息服务产业也好,将来的瓶颈都卡在计算机对语义的理解。当人类对人脑功能的认识取得突破后,信息产业一定有一次比发明集成电路和互联网更大的飞跃。为发展知识产业奠定技术基础应作为我们一项长期的科技任务。

信息科学还是一门年轻的科学,有人认为信息科学还处在“伽利略时代”,许多重要的信息科学基本理论问题并没有解决。我们还在从事伽利略那样的观察和总结工作,希望 21 世纪上半叶信息科学能进入“牛顿时代”。从长远来看,发展信息科学技术前景光明灿烂。

致谢 在做《中国至 2050 年信息科技发展路线图》战略研究过程中,从与徐志伟、郑厚植、侯自强、吴德馨、林惠民、郭光灿、陈润生、封松林、王飞跃、程学旗等学者的讨论中得到许多启发,有些观点已融合在本文中,特此致谢。

主要参考文献

- 1 康德拉季耶夫.经济生活中的长波.见现代国外经济学论文选第 10 辑.北京:商务印书馆,1986.
- 2 Fremann R et al. Principle Concepts of Technology and Innovation Management: Critical Research Models. U.S.A: IGI Publishing, 2008.
- 3 Mensch G. Stalemate in Technology: Innovations Overcome the Depression. U.S.A: Ballinger, Cambridge, Mass, 1979.
- 4 中国科学院信息领域战略研究组.中国至 2050 年信息科技发展路线图.北京:科学出版社,2009.
- 5 Wing M (周以真).Computational Thinking.CACM, 2006, 49(3): 33-35.



中国科学院

Information Science and Technology Outlook For the First Half of the 21st Century

Li Guojie

(Institute of Computing Technology, CAS 100190 Beijing)

In this paper, we firstly discussed the long-wave cycle of the scientific and technological development. Then we clarified the strong demands for information technology and predicted that the insurmountable obstacles will be encountered when incrementally improving the existing information technology in the next 20 years. Based on these analysis, we foresaw that a new information science revolution may emerge in the first half of the 21st century, the major directions of which will contain network science, interdisciplinary science, computational thinking and knowledge discover from huge amount of data.

李国杰 中科院计算技术所所长,兼任中国工程院信息与电子学部主任、中国计算机学会理事长等职。1985 年获美国普渡大学博士学位,1989 年任中科院计算技术所研究员,1995 年当选为中国工程院院士,2002 年当选第三世界科学院院士。主要从事并行处理、计算机体系结构、网络和人工智能等领域的研究,发表学术论文 100 余篇。近 20 年来,主要致力于曙光并行计算机研制和产业化,领导计算所研制成功龙芯 CPU,曾获国家科学技术进步奖一等奖、二等奖及首届何梁何利基金科技进步奖等。E-mail:lig@ict.ac.cn

资料窗

2009 年去世的中国科学院院士

姓名	性别	所在学部	当选时间	生卒时间
黄胜年	男	数学物理学部	1991	1932.02.10-2009.01.08
陈慰峰	男	生命科学和医学学部	1995	1935.11.22-2009.01.26
吴式枢	男	数学物理学部	1980	1923.05.27-2009.02.27
吴传钧	男	地学部	1991	1918.04.02-2009.03.13
林尚安	男	化学部	1993	1924.06.08-2009.03.17
钱令希	男	技术科学部	1955	1916.07.16-2009.04.20
汪家鼎	男	化学部	1980	1919.10.18-2009.07.30
梁守槃	男	技术科学部	1980	1916.04.13-2009.09.05
杨遵仪	男	地学部	1980	1908.10.07-2009.09.17
梁晓天	男	化学部	1980	1923.07.28-2009.09.29
娄成后	男	生命科学和医学学部	1980	1911.12.07-2009.10.16
贝时璋	男	生命科学和医学学部	1955	1903.10.10-2009.10.29
钱学森	男	数学物理学部	1957	1911.12.11-2009.10.31