

普惠计算之十二要点

徐志伟 李国杰

(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

摘要 三十年前IBM个人电脑批量上市,大大推动了计算机的普及。今天的计算机科学领域已经与三十年前大不一样了。什么是今后三十年计算机科学领域最大的本质挑战?它会推动什么样的基本性范式变革?最关键的产业问题是什么?最需要突破的科学问题是什么?本文提出普惠计算(以全民普及为目标的计算机科学研究和应用)以回答这些问题,并阐述普惠计算的十二个要点,即普惠计算针对计算机市场发展停滞的本质挑战而提出,它是今后三十年的基本趋势,具备高增值、低成本、可持续三个特征,其最显著的范式变革是人机物三元计算,最关键的产业问题是昆虫纲悖论,最需要突破的科学问题涉及三元计算科学、通用计算账户、高效海网云平台、信息生态系统、国民信息核算五个支柱。本文为计算机科学的科研选题和产业创新勾画机遇空间,并简要介绍相关的变革性前沿研究工作。

A Dozen Essential Issues of Computing for the Masses

XU Zhi-wei LI Guo-jie

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract Thirty years ago, the invention and volume shipment of IBM PC significantly enlarged the user population of computing. For the next thirty years, what is the most fundamental challenge of the computing field? What paradigm shift is needed? What is the most significant industrial problem? What are the most needed scientific breakthroughs? This article addresses these questions by discussing a dozen essential issues of computing for the masses. The most fundamental challenge is the computing market's growth stagnation. Computing for the masses is proposed to reverse this trend and should be a fundamental future direction. It has three features of value-augmenting, affordability, and sustainability. The most basic paradigm shift is human-cyber-physical ternary computing. The most significant industrial problem is the Insecta Classis paradox. Computing for the masses needs five pillars of science support, including ternary computing science, universal compute account, efficient sea-network-cloud computing platforms, information ecosystem science, and national information accounts. This article helps outline the problem space for future computer science research, with a discussion on related transformative research projects.

1 引言

三十年前,计算机发展史上出现了一个里程碑的事件,即IBM个人电脑批量上市,大大推动了计算机的普及。今天的计算机科学领域已经与三十年前很不一样了,需要研究新的产业问题和科学技术问题,包括:影响今后三十年的发展方向和趋势是什么?什么是计算机科学领域最大的本质挑战?需要什么样的基本性范式变革来应对这个挑战?这个范式变革需要解

决的最关键的产业问题是什么?最需要突破的科学问题是什么?综合起来,我们需要探索:什么样的变革性创新能够保持计算机科学与产业的发展活力,使它能够继续健康发展另一个三十年?

本文提出一个基本的学术观点:普惠计算(computing for the masses),即以全民普及为目标的计算机科学研究和应用(详细定义见第三节),就是这样的变革性创新,它有希望推动计算机科学与产业在2010-2040年继续保持三十年的健康发展。普惠计算不是空洞的口号,它具有鲜明的目标、特征、

范式、产业问题与科学问题。本文阐述普惠计算的十二个要点，为计算机科学的科研选题和产业创新勾画机遇空间，并简要介绍国内外近年新启动的相关的变革性前沿研究工作。本文还指出，今后十年是普惠计算变革性创新发生的十年。

2 计算机领域的本质挑战是发展失去活力

我们首先讨论普惠计算的第一个要点：普惠计算直面应对计算机科学与产业领域今后三十年的本质挑战。

计算机科学及其产业领域目前面临很多挑战。但是，什么是整个领域的最本质的挑战呢？是摩尔定律在2020年前后可能失效吗？是多核芯片带来的并行编程挑战吗？是功耗墙问题吗？是大数据挑战吗？是系统复杂度挑战吗？是产业垄断挑战吗？这些都是挑战，甚至是很大的挑战，但不是最本质的挑战。

计算机领域最本质的挑战是传统思维的计算机行业正在失去发展活力。

这个论断看起来十分荒唐。计算机领域是发展最快、变化最快的领域，新概念、新名词、新技术频繁地层出不穷，系统不断地需要升级换代。怎么能说发展正在失去活力呢？

我们用一个事实就可以驳倒所有这些雄辩。这些频繁的变化、所谓的发展和东西对经济社会有什么增值贡献呢？客观数据显示，贡献很小。贡献的一个具体指标是全社会购买计算机领域的产品和服务价值，即计算机市场，包括计算机与网络硬件、软件和服务。IDC与OECD统计数据显示，1961-1971年，全球计算机市场的年增长率为35.7%，1980-2000年的年增长率下降为11.8%，2000年到金融危机前的2008年，年增长率进一步降到了5.5%。再算上通货膨胀因素，计算机市场增长已接近停滞。如果这个趋势继续下去，2010-2040期间全球计算机市场的名义年增长率可能降到了1-2%，成为一个没有活力的产业。

市场增速变缓表面上看起来是经济社会需求减速，实际原因是带来高市场价值的创新技术、产品与服务的供给不足。1980-2000年全球计算机市场的快速增长得益于个人电脑、Web这样的变革性创新。今后30年的变革性创新是什么？我们并没有足够的科技供给积蓄。

普惠计算针对的本质挑战，就是要逆转这个发展

趋势，促使2010-2040期间计算机市场年增长率恢复到一个健康的发展水平，比如每年增长7%左右，每十年翻一番。

3 普惠计算是21世纪计算机科学的基本发展方向

如何逆转发展变缓趋势呢？我们的观点是需要突破计算机产业的传统思维，充分挖掘并满足广大民众对计算技术的消费需求（目前我们可能只挖掘了不到5%的潜力），并针对性地增加变革性创新的科技供给。因此，普惠计算是以高增值的全民普及（惠及85%以上的人口）为目标的计算机科学研究和应用。

有人会说，普惠计算已经初步实现了。中国已经有5亿网民，只要延续下去就行了，不需要变革性创新。

我们说，普惠计算远没有实现，变革性创新供给严重不足。

第一，惠及12亿人与5亿人上网有本质不同。

第二，必须大幅度提升民众使用计算技术的时间。据某著名芯片公司的市场调查，民众平均每天使用电脑的时间不到0.4小时，5亿人也就是每天2亿小时。普惠计算的目标是将12亿中国民众使用计算技术的时间提升到每天20亿小时，甚至100亿小时。这意味着民众大量使用计算技术，但大部分时间不是通过信息终端（微机、智能手机等）。只能通过信息终端才能使用计算技术，则意味着普惠计算尚未实现。

第三，每小时使用计算技术的价值也需要大幅度提升。普惠计算意味着超越技术层面，让计算进入广大民众生产生活的业务价值层面。我们在企业计算领域已经看到此种实例。IBM估计，它们提出的业务流程变换服务与业务资产等思路，能为计算机市场新增每年5000亿美元价值。

第四，普惠计算颠覆计算机发展史中的trickle down传统做法。传统的思维方式是，新技术从科学计算和企业计算等机构计算开始，然后再滴漏到消费者。普惠计算则以广大民众为起点，以民众的计算需求为第一负载（workloads），变trickle down为trickle up。普惠计算首先是e-People，而不是e-Business, e-Science, e-Government。根据IDC的统计数据，1997年全球服务器市场发展达到了665亿美元的顶峰，但95.7%都运行机构负载。普惠计算则要求，50%以上的服务器都运行民众负载。

综上所述，普惠计算是今后三十年计算机科学与产业应该选择的发展方向。普惠计算的成功实施有希望将中国计算机市场在2040-2050年增长到每年十万亿元规模。

普惠计算也是今后三十年的基本趋势。近年来，信息技术界最具活力的是面向广大民众的创新产品与服务，典型的例子包括苹果公司的新产品与服务，Google、Facebook、腾讯、淘宝、新浪微博等互联网服务。更多的前瞻研究讨论见第6节。

4 普惠计算具备高增值、低成本、可持续三个特征

普惠计算并不是给每一个公民装备一套低价格的

客户端设备（如千元上网电脑）和基本信息服务。这只是“信息贫困线”等级，是信息脱贫的指标，充其量只能带来一万亿元的市场增长。表1给出了普惠计算的2040年中国预测目标，包括12亿公民使用计算技术的五个价值等级以及各等级的人数。表1显示了普惠计算的高增值特征，即不仅用户从2亿人增长到12亿人，高价值等级的用户也显著增加。目前中国社会绝大部分计算用户尚在贫困线、商品和泛在价值等级，很少在更高的专业和个性化价值等级。专业价值的一个例子是美国的银行业，其人均年计算花费约为15000美元。笔者所知的花费最高的是美国能源部国家实验室的科学家，他们享受个性化计算服务（包括有计算专家专门优化他们的应用），其人均年计算花费约为3~10万美元。

表1 计算价值等级、各等级人数（百万）以及各等级年计算消费总额（亿美元）

价值等级	等级含义 及对应的人均年计算花费范围	2008年估计		2040年预测	
		人数	消费额	人数	消费额
个性价值	计算为特定用户提供个性化产品与服务 人均年计算花费>1万美元	3	300	13	3900
专业价值	专业领域成员所享受到的增值产品和服务 人均年计算花费=1000美元~1万美元	37	370	187	5610
泛在价值	在任何时间和地点通过任何终端享受计算 人均年计算花费=500~1000美元	47	235	200	4000
商品价值	批量提供给大用户群的标准产品或服务 人均年计算花费=300~500美元	26	78	200	2400
贫困线	每个公民应该享有的最低计算价值 人均年计算花费=150~300美元	87	131	600	3900
所有等级总计		200	1113	1200	19810

普惠计算的第二个特征是低成本计算（affordable computing），重点是要破除和降低认知障碍、成本障碍、控制障碍、易用性障碍四类障碍，从而数量级地降低总使用成本。

（1）认知障碍：普惠计算产品和服务需要呈现公民能够认识的生产生活价值，降低价值认知的成本。目前我们尚没有总结出很好的价值度量方法与指标。

（2）成本障碍：我们能让四川汶川的中学生在—堂生物实验课中每人自己动手做蛋白质折叠或药物筛选的计算实验吗？目前的系统需要将成本降低几个数量级才行。

（3）控制障碍：公民使用计算技术能否不被厂家控制或绑定，公民能否自主地消费并创造信息资产（数据、程序、服务）？能否像切换电视频道那样容易地切换厂商？

（4）易用性障碍：我们需要为公民的生产生活提供价值层接口，而不是计算工具接口。

普惠计算的第三个特征是可持续计算（sustainable computing），又称为绿色计算，其重点是数量级地降低能耗，减少资源消耗与污染。如第三节所述，中国用户使用计算的时间可能增加十倍到五十倍，负载（计算量等）可能增加一千倍，但我们没有一千倍的电力供能。我们能否将现有计算系统的能耗降低一千倍呢？

5 普惠计算体现人机物三元世界的范式变革

为了实现高增值、低成本、可持续的普惠计算，计算机科学与产业必须发生基本性的范式变革（paradigm shift）。这个范式变革就是人机物三

元世界，或三元计算。普惠计算需要让计算进入广大民众生产生活的业务价值层面，这意味着计算需要从赛博空间（cyberspace）进入人机物三元世界（the ternary human-cyber-physical universe）。一个计算过程不再局限于使用计算机与网络硬件、软件和服务，而是综合利用物理世界、赛博空间、人类社会的资源，通过人机物融合合作完成计算任务。三元计算之所以可能是基于一个科学事实：信息与计算不是赛博空间出现后才有的，早在计算机发明以前，物理世界和人类社会就充满了信息与计算。在物理学中，信息像物质、能量一样，是物理世界的基本要素。信息甚至可能转换为能量。

从计算产业角度看，要实现普惠计算与三元计算，需要突破的最关键的产业问题是昆虫纲悖论。欧盟最近一份报告指出，将来的信息世界可能会有上万亿个传感器^[2]。昆虫纲悖论是这样的现象：一方面，万亿级终端应该带来巨大的市场（目前十亿级的微机和手机已经带来了万亿美元的市场）。另一方面，目前的物联网、传感器网领域缺乏可拷贝的大批量的应用，而且人们也想象不出能拷贝上十亿份的批量应用。这是一个悖论，而没有批量就没有低成本。东京大学的坂村健教授提出了一个观察：其原因是传统信息系统好像哺乳动物纲（5千物种），而物联网领域更像昆虫纲（500万物种）^[1]。如何破解昆虫纲悖论是未来人机物融合的三元计算系统的巨大的挑战。

6 普惠计算需要突破五个支柱的科学问题

普惠计算最需要突破的科学问题涉及三元计算科学、通用计算账户、高效海网云平台、信息生态系统、国民信息核算五项内容，我们称为普惠计算的五个支柱：

(1) 三元计算科学

我们需要建立涉及人机物三元世界的计算科学。一个途径是拓展针对赛博空间的图灵计算模型。最重要的切入点是提出具体的、涉及人机物三元世界的、新的计算科学问题。如果只是采用传统问题，比如判定问题（decision problem），那么根据Church假说，我们不能超越图灵计算模型。美国DARPA的2009年红气球挑战看起来就是一类新的问题。我们也需要借鉴CAP定理的成功经验^[9]，研究人机物三元计算系统的系统定性计算性质关系，并进而转化为系统设计

计的定量指导。比如，私密性、正确性如何影响扩展性、响应时间？

(2) 通用计算账户

Web技术的成功有一个重要因素，就是通用统一的资源（resource）概念。一个Web资源可以通过其独特的URL被上亿用户使用。普惠计算要求对每个公民提供个性化服务，能否让上亿资源为一个公民服务呢^[7]？这需要每个用户有一个通用计算账户（universal compute account, UCA）。通用的含义是该用户使用他独特的UCA可获取他有权使用的所有资源，而不是被某个厂商绑定。

(3) 高效海网云平台

当用户通过他的通用计算账户进入一个人机物三元计算系统，他应该感受到一个高效率的计算平台，涉及海端（与人接口的客户端设备和与物接口的物联终端）、网络、云端（数据中心端、服务器端）。在用户使用计算系统的时间区间[0, T]，我们可用下列公式定义性能能耗效率（其中性能是计算速度）：性能能耗效率=（应用性能×应用所花能耗）/（系统峰值性能×系统总能耗）目前的客户端或数据中心的性能能耗效率普遍在0.1%到1%左右，有两个数量级的提升空间^[12, 14]。网络能耗也有1000倍的改善空间^[3]。

(4) 信息生态系统

计算技术行业正在出现第三次大的产业分工模式调整（见图1），从60年前的垂直分工模式，到30年前的水平分工模式，再到现在的端到端设计信息生态系统模式（ecosystem with end-to-end design）。苹果公司实践的所谓“乔布斯法则”^[8]是这种趋势的一个特例。我们需要研究并建立一套信息生态链科学（science of information ecosystem）。

(5) 国民信息核算

随着信息成为重要的资源和资产，我们需要借鉴经济学的国民经济核算体系的成功经验，建立一套国民信息核算体系，以便科学地统计、分析、评估、预测信息资源的利用及信息系统的建设和运维，并制定可行的信息政策。比如，有可能出现信息利息的宏观

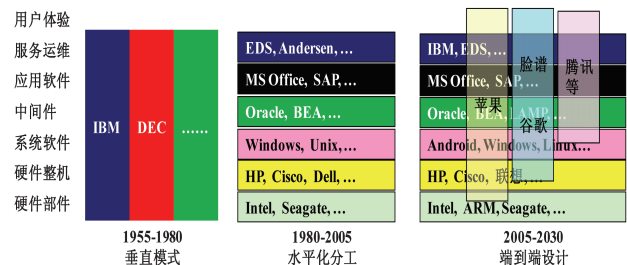


图1 信息技术产业的三种产业分工模式历史演变

调控工具，以及消除垃圾邮件的消息税机制。

7 相关前瞻研究工作

近年来，信息技术产业界大力开发面向广大民众的创新产品与服务。比如，苹果公司的 iPod、iPhone、iPad 及其配套的 iTunes、AppStore 等都是商品化产品，使得每个用户能方便地创造和使用个性化音乐库、应用库。很多成功的云计算系统也面向广大民众。

中国科学院在 2009 年发表了《中国至 2050 年信息技术发展路线图》报告，指出发展普惠泛在的信息网络是我国经济社会发展和科学研究的重要需求，并提出了人机物三元世界和信息技术普惠大众的思想^[16]。江绵恒在 2010 年提出海计算思想^[5]。中国科学院最近启动了未来信息技术先导研究，一个重要特点是人机物融合的信息技术以及海云计算技术^[13]。一个具体的面向广大民众的海云计算系统是中科院计算所正在研制的物联网电视，具备与人交互、云端协作和感知物理世界的功能。针对化解昆虫纲悖论，中科院计算所提出了可重塑处理器构想^[4]。

美国科学基金会（NSF）最近投资十亿美元，启动了“为可持续发展服务的科学、工程与教育”重大专项（science, engineering and education for sustainability, SEES）。人机物融合是信息技术研究的重要特点。欧盟未来新兴技术旗舰研究专项

（FET flagships）计划投资 20 亿欧元在 2013 年启动两个为期十年的未来信息技术研究项目。目前从数百个建议中筛选出了六个前期项目建议（pilots），大部分与人机物融合相关。

从科学观点与概念角度，美国学者 Karp 提出的计算透镜^[6]与 Wing 提出的计算思维^[10]都与三元计算相关。这三者的比较见^[15]。

本文的基本思想 computing for the masses 已于 2011 年 10 月在英文期刊发表^[14]。本文按十二个要点重新阐述了普惠计算，有利于中文读者理解普惠计算。本文还增添了英文稿 2010 年 5 月投稿以来的新内容，包括图 1、表 1、表 2、国内外新的相关进展等。

8 小 结

普惠计算是指以全民普及为目标的计算机科学技术的研究和应用。本文阐述了普惠计算的十二个要点，小结为表 2。从相关研究可以看出，很多创新研究项目才刚刚开始，今后十年是普惠计算变革性创新发生的十年。

致谢：本文部分工作得到了中科院先导研究专项“海云计算系统关键技术与系统研究”（XDA06010400）、广东省引进创新科研团队计划资助。

表 2 普惠计算的十二个要点小结

普惠计算要点	要点简要解释	研究实例
1. 逆转传统计算产业发展停滞趋势	普惠计算要应对的本质挑战。全球计算机市场的年增长率从 1961-1971 年的 35.7% 降到 1980-2000 年的 11.8%，再降到 2000-2008 年的 5.5%；2010-2040 年会降到 1-3% 吗？	纽约时报 2009 年 8 月 8 日报道：“信息技术的黄金时代是否早已终结了？”（Are the Glory Days Long Gone for I.T.?”）。
2. 21 世纪基本趋势	普惠计算的必要性和可行性	面向公众的创新产品和服务发展迅速。
3. 高增值计算	普惠计算的三个特征	美国 NSF 的 SEES 重大研究计划；GreenTouch 联盟试图将网络能耗降低 1000 倍。
4. 低成本计算		
5. 可持续计算		
6. 人机物三元世界	普惠计算的模式变革	中科院未来信息技术先导专项；欧盟 FET Flagships 计划；中科院计算所的物联网电视研究计划。
7. 昆虫纲悖论	普惠计算需要突破的关键产业问题	坂村健的昆虫纲观察；中科院计算所的可重塑处理器芯片研究。
8. 三元计算科学	普惠计算的五个科学技术支柱，尚在发展的早期。	江绵恒提出的海计算思想；中科院未来信息技术先导专项；苹果公司的端到端设计和生态系统思想（乔布斯法则）。
9. 通用计算账户		
10. 高效海网云平台		
11. 信息生态系统		
12. 国民信息核算		

参 考 文 献

- [1] Chapman A D. Numbers of living species in australia and the world(2nd ed.) [EB/OL].2009. <http://www.environment.gov.au/biodiversity/abrs/publications/other/species-numbers/index.html>.
- [2] A strategy for ICT R&D and innovation in europe: raising the game [R]. European Commission, 2009.
- [3] Greentouch [EB/OL]. <http://www.greentouch.org/>.
- [4] Guo Q, Chen T, Chen Y, et al. Effective and efficient microprocessor design space exploration using unlabeled design configurations [C] //IJCAI 2011.
- [5] 江绵恒. 城市化与信息化—中国发展的时代机遇 [C] //上海世博会信息化与城市发展论坛主旨演讲. 2010.
- [6] Karp R M. Understanding science through the computational lens [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2011, 26(4): 569-577.
- [7] Prahalad C K, Krishnan M S. The new age of innovation [M]. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [8] John sculley on steve jobs methodology [EB/OL]. [2011-10-6]. <http://www.cultofmac.com/63295/john-sculley-on-steve-jobs-the-full-interview-transcript/>.
- [9] Special issue on the growing impact of the CAP theorem [C] // IEEE Computer. 2012.
- [10] Wing J. Computational thinking and thinking about computation [J]. Phil. Trans. R. Soc. A, 2008, 366: 3717-3725.
- [11] Xu Z. Computing for the masses [C] //Keynote Speech at the 2nd NSF-NSFC Sino-USA Computer Science Summit. Washington D.C.(USA), 2008.
- [12] Xu Z. How green was my computing [C] //keynote speech at The 2011 IEEE/ACM International Conference on Green Computing and Communications. Chengdu(China), 2011.
- [13] Xu Z. Ternary computing for a human-cyber-physical universe [C] //keynote speech at NSF Workshop on US-China Collaboration in Computer Science and Sustainability. New Jersey(USA), 2011.
- [14] Xu Z, Li G. Computing for the masses [J]. Communications of the ACM, 2011, 54(10): 129-137.
- [15] Xu Z W, Tu D D. Three new concepts of future computer science [J]. Journal of Computer Science and Technology, 2011, 26(4): 616-624.
- [16] 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 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.