

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

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。

关键词：

A Dozen Essential Issues of Computing for the Masses

Zhiwei Xu Guojie Li

Abstract: The 21st century brings about a new era of computing, which features mass adoption and net services. These two trends pose new challenges and opportunities for computer science research and its applications. This article explores the user demand and discusses three issues: value intensity, low-cost architecture, and utilization of emergent properties.

Keywords: Computing for the Masses, low-cost architecture, value intensity, emergence

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计算机行业正在失去发展活力，发展开始进入停滞。

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、所谓的发展和新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，1980-2000 年，全球计算机市场的年增长率为 11.8%，但从 2000 年到金融危机前的 2008 年，全球计算机市场的年增长率降到了 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，实际上是带来高市场价值

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呢？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，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，即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。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。

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，有希望将中国计算机市场在 2040-2050 年增长到每年十万亿元 [1]。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，有望使中国计算机市场增长到每年超过十万亿元。一个专业价值的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的产品或服务 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。

- 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。

- 价格障碍：我们能让四川汶川的中学生在一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。
- 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？
- 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，计算机科学及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（cyberspace）、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，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。信息甚至可以转换为能量 [1]。

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。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 万物种），而物联网领域更像昆虫纲（500 万物种）。如何破解昆虫纲悖论是巨大的挑战。

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。

- 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。
- 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？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。
- 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）：
$$\text{性能能耗效率} = (\text{应用性能} \times \text{应用所花能耗}) / (\text{系统峰值性能} \times \text{系统总能耗})$$
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。网络能耗也有 1000 倍的改善空间 []。
- 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），从垂直分工模式到水平分工模式，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”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）。
- 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调控工具，以及消除垃圾邮件的消息税机制。

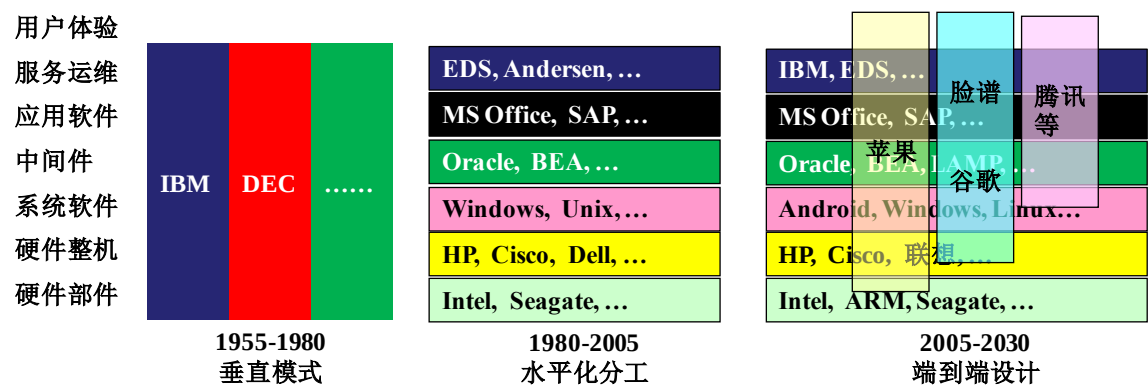


图 1. 信息技术产业的三种产业分工模式历史演变

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 年信息科技发展路线图》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[]。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。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。

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，简称 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。

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。

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. 价值倍增	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	普惠计算的五根科学技术支柱，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]

[3] S. Gilbert and N. Lynch, “Brewer's Conjecture and the Feasibility of Consistent, Available, Partition-tolerant Web Services”, SIGACT News 33, 2 (Jun. 2002), 51-59.

[4] C. K. Prahalad and M.S. Krishnan, The New Age of Innovation, McGraw-Hill, New York, 2008.

[5]

致谢：本文部分工作得到了国家 973 计划（2005CB321807）、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。



徐志伟 1987 年获美国南加州大学博士学位。现任中国科学院计算技术研究所研究员，主要研究方向为计算机系统结构和网络计算科学。



李国杰 1985 年获美国普度大学博士学位。现任中国科学院计算技术研究所研究员，主要研究方向为计算机系统结构和网络科学。