

信息科技：加速人一机一物三元融合

中国科学院信息科技战略研究组

2012 年 9 月 28 日

一、未来 5 至 10 年信息领域科技发展的新趋势新特点

信息科学技术将进入一个转折期，可能出现重大的技术变革，主要的征兆为：集成电路领域正在逐步进入“后摩尔时代”，科学家和产业界更多地从扩展摩尔定律（More Than Moore, MTM）和超越 CMOS（Beyond CMOS）中寻找新的出路，新型信息功能材料、器件和工艺不断出新；计算机逐步进入“后 PC 时代”，“Wintel”平台正在瓦解，多开放平台正在形成，新型终端已步入百姓生活；互联网进入“后 IP”时代已成为不可避免的发展趋势，发展新一代互联网技术，突破 TCP/IP 协议的局限是网络科学家努力的方向；物联网、云计算等技术的兴起促使信息技术渗透方式、处理方法和应用模式发生变革；大数据（big data）成为科学家和企业关注的焦点，正在改变科研方式和产业模式；网络与信息安全成为不可回避的重大技术和政治问题；人脑智能新机理发掘与智能信息科技的发展进一步促进对人类智能的深刻认识。

未来 5-10 年的信息领域科技发展表现出一些新趋势和新特点，值得我们关注。一是人机物三元融合将促进信息服务进入普惠计算（e-People）时代；二是数据密集型研究成为继实验科学、理论分析和计算机模拟之后的科研第四范式；三是移动通信正在向“移动宽带”演化，移动互联网、物联网、云计算将成为未来发展的主题；四是得益于脑与认知科学的发展，人工智能技术重新兴起，类脑计算机、类人机器人、脑机接口、人脑仿真技术发展迅速。

“十二五”时期是信息技术重大变革发生的孕育期，世界各国正

在抓紧战略布局，力求寻找突破口，以期赢得先机，如欧盟布局的信息科技“旗舰研究计划”（FET Flagships）等。在探索突破性技术的过程中，应用创新与技术集成创新是这一时期信息技术发展的主流模式。未来 5 年我国信息科技领域将主要围绕“云—网—端”三个层面开展研究，创建新的产业形态。未来 5-10 年是我国发展新一代信息技术的重要机遇期，切实加强前瞻性研究，着力构建完善的信息科技“生态系统”和信息产业发展的“价值链”，是实现我国信息科技和产业跨越式发展的关键。

（一）普惠计算引领走向人机物三元世界的范式变革

未来 10-30 年，信息技术的长远发展方向是普惠计算（computing for the masses，或 e-People）。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）进入人一机一物三元世界（the ternary human-cyber-physical universe），综合利用人类社会（人）、信息空间（机）、物理世界（物）的资源，通过云计算、物联网、移动通信、光子信息等技术支撑，协作进行个性化大数据计算。这是 21 世纪信息领域基本性的范式变革。在面向三元世界的计算中，计算过程不再局限于使用计算机与网络的硬件、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，通过人机物融合协作完成任务。

云计算是推动普惠计算的强大杠杆，将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。未来的普惠计算将以广大民众为起点，以民众的计算需求为第一负载，变 trickle down 为 trickle up。普惠计算首先是 e-People，而不是 e-Business、e-Science 和 e-Government。

从信息产业的角度看，要实现普惠计算与三元计算，需要突破的关键问题是“昆虫纲悖论”。昆虫纲悖论是这样的现象：将来的信息世界可能会有上万亿个传感器。一方面，万亿级终端应该带来远大于

PC 机和手机的巨大市场。另一方面，目前的物联网、传感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亿份的批量应用。没有批量就没有低成本，没有低成本产品就不会有巨大市场，这是一个悖论。东京大学的坂村健教授对此现象提出了一种比喻性的解释：传统信息系统好像哺乳动物纲（只有 5 万左右物种），而物联网领域更像昆虫纲（超过 500 万物种）。如何破解“昆虫纲悖论”是巨大的挑战，可能的发展方向是可重构、易配置的专业化个性化产品和服务。

一些国际学者已经观察到了人机物融合相关的大趋势。美国经济学家 Brian Author 最近提出了第二经济（second economy）的概念，指出由处理器、链接器、传感器、执行器以及运行在其上的经济活动，形成了人们熟知的物理经济（第一经济）之外的第二经济。第二经济的本质是为第一经济附着了一个神经层，使国民经济活动智能化。这是一百年前电气化以来最大的变化。他还估算了第二经济的规模，认为到 2030 年，第二经济的规模将逼近第一经济。信息的价值并不只是传统的硬件、软件和服务，信息技术融入人类社会和物理世界具有大得多的价值空间。为实现这些新价值，谷歌等公司采用了工业资本主义所没有的信息服务低成本社会化大生产模式，即让数以亿计的消费者免费为它打工，使得消费活动成为生产活动。

人机物融合与普惠计算已经出现一些科研、技术和应用实例。个人作坊利用信息系统和叠层制造（3D Printing）技术设计制造物理产品、欧盟“未来信息通信技术知识加速器”（The Future ICT Knowledge Accelerator）项目研究人类地球模拟器（Living Earth Platform）等都是典型的人机物融合计算的实例。我国正在开展的“智慧城市”建设也体现了人机物三元融合的趋势。未来 10 年内，人机物三元融合将使得信息科技沉浸式地渗透到实体经济和社会服务活动中。通过人机物闭环协作交互过程提升生产生活的智能化水平，实现造福我国 8 亿

人口的普惠计算。传统计算机科学将演变为人机物三元计算信息科学，传统信息技术将升级为海-网-云信息网络技术，出现新型的硬件、软件、应用模式、协议和标准。中国有可能在普惠计算（e-People）发展模式上走在世界前列，改变长期以来信息产业受制于人的局面。

（二）大数据（Big Data）分析已成为信息科技关注的重点

工业革命以后，以文字为载体的信息量大约每十年翻一番；1970年以后，信息量大约每三年就翻一番；如今，全球信息总量每两年就可以翻一番。2011 年全球被创建和被复制的数据总量为 1.8ZB (10^{21} Byte)，其中 75%来自于个人。麦肯锡全球研究院（MGI）预测，到 2020 年，全球数据使用量预计将暴增 44 倍，达到 35ZB ($1ZB=10^{21}$ Byte)。据 Gartner 公司调查估计，到 2015 年，采用大数据和海量信息管理的公司将在各项财务指标上，超过未做准备的竞争对手 20%。Reilly 公司断言：数据是下一个“Intel Inside”，未来属于将数据转换成产品的公司和人们。

实验发现、理论分析和计算机模拟是科学研究的三种范式。过去几十年，科学家们已经用计算机处理大量数据并进行模拟仿真。近几年，数字信息从各种各样的传感器、测试仪器、模拟实验室、文化娱乐企业和个人使用的数字终端中源源不断地涌出。超过传统数据库系统处理能力的海量数据（称为大数据）隐含巨大价值，已成为科技界和企业界高度重视的资源。在各行各业的大数据中，最值得研究的是规模呈指数级增长的数据，特别是传感数据和赛博空间数据。网络数据的背后是人，网络数据之间的相互关系其实是人的相互关系，因此，研究网络大数据需要与社会科学交叉，研究社会网络的涌现和发展规律是大数据研究的重要内容。

当今世界结构化数据增长率大概是 32%，而非结构化数据增长则是 63%。大数据的技术挑战主要是指非结构化数据。数据无处不在，但许多数据是重复的或者没有价值，未来的任务主要不是获取越来越

多的数据，而是数据的去冗分类、去粗取精，从数据中挖掘知识。几百年来，科学研究一直在做“从薄到厚”的事情，把“小数据”变成“大数据”，现在要做的事情是“从厚到薄”，要把大数据变成小数据。

尽管学术界已注意到大数据带来的机遇和挑战，但对大数据提出的科学挑战问题还没有形成共识。2007 年，已故的图灵奖得主吉姆·格雷（Jim Gray）在他最后一次演讲中描绘了科研“第四范式”（the fourth paradigm）的愿景。将大数据科学从第三范式（计算机模拟）中分离出来单独作为一种科研范式，是因为其研究方式不同于基于数学模型的传统研究方式。Google 公司的研究部主任 Peter Norvig 的一句名言可以概括两者的区别：“所有的模型都是错误的，没有这些模型反而增加你成功的机会（All models are wrong, and increasingly you can succeed without them）”。Petabyte 级（ 10^{15} byte）数据使我们可以做到没有模型和假设就可以分析数据。将有相互关系的数据丢进巨大的计算机机群中，统计分析算法就可以发现过去的科学方法发现不了的新模式、新知识甚至新规律。实际上，Google 的广告优化配置、战胜人类的“IBM 沃森问答系统”都是这样实现的，这就是“第四范式”的魅力！

2012 年 3 月 29 日，美国政府启动大数据研究和发展创新计划（Big Data Research and Development Initiative），6 个部门拨款 2 亿美元，争取增加 100 倍的分析能力从各种语言的文本中抽取信息。这是一个标致性事件，说明继集成电路和互联网之后，大数据已成为信息科技关注的重点。

过去几十年，信息科学技术和产业的发展主要是电子化和数字化。现在，数据为王的大数据时代已经到来，我们需要完成观念上的重大转变：将关注的重点真正落在数据（信息）上，计算机行业要转变为真正的信息行业。计算机要从追求计算速度转变为提高大数据处理能力，软件要从编程为主转变为以数据为中心。开展数据密集型研

究需要改变科研的组织结构和合作形式，形成有利于协作创新的“知识生态系统”。强调个人在单学科领域学术成就的“个人化科研范式”不再适合大数据研究，行会文化和过分细分的专业化教育也会阻碍大数据研究的发展。

大数据不仅是未来科学研究的一大特点，也是许多行业技术进步和企业发展的主要趋势。采用大数据处理方法，生物制药、新材料研制生产的流程会发生革命性的变化，可以通过数据处理能力极高的计算机并行处理，同时进行大批量的仿真比较和筛选，大大提高科研和生产效率。数据已成为矿物和化学元素一样的原始材料，未来可能形成数据“探矿”、数据“化学”等新学科和新工艺模式。大数据处理的兴起也将改变云计算的发展方向，云计算正在进入以 AaaS(分析即服务)为主要标志的 Cloud 2.0 时代。

现有的数据中心技术很难满足大数据的需求，需要考虑对整个 IT 架构进行革命性的重构。存储能力的增长远远赶不上数据的增长，设计最合理的分层存储架构已成为信息系统的关键。数据的移动已成为信息系统最大的开销，信息系统需要从数据围着处理器转改变为处理能力围着数据转。提高可扩展性成为信息系统最本质的需求，并发执行（同时执行的线程）的规模要从现在的千万量级提高 10 亿级以上。

（三）网络科学将成为 21 世纪的重要基础科学

每一个复杂系统（基因、社会等）内部都有一个网络，大数据的背后就是网络，因为数据之间的相互联系形成巨大的关系网络。数据网络和物理上构建的通信网络有一些共同的原理和理论基础。物理学是 20 世纪科学研究的主角，到 21 世纪，人们更关心 bit，网络科学将成为最基础的科学。近几年网络科学的研究成为科学界的一大潮流。2012 年 1 月，*Nature Physics* 上发表以发现互联网的 Power Law 闻名的科学家 Barabasi 的重要论文“The network takeover”，大胆地提出：网络科学将取代还原论和传统的复杂性科学。

互联网的发展已遇到本质性的困难，在 IP 协议的基础上修修补补已解决不了互联网的可扩展性、安全可控和质量保证等问题。新型互联网体系结构研究已成为各国关注的焦点，美、欧、日等发达国家都在研究发展“后 IP 网络”的系统结构和关键技术，如美国的数据命名网络（NDN）等。我国正在筹备建设未来互联网的大规模实验基础设施，中科院计算所已研制成功该实验平台的关键设备——可编程虚拟化路由器，为构建未来网络实验平台奠定了基础。

移动通信正在向“移动宽带”演化。3G 和 4G 蜂窝移动通信主要致力于室外的广域覆盖，难以解决室内的带宽容量问题，而且其建设和运维成本都很高。从经济性、空口效率、频谱利用率来看，室内最好用无线局域网。新一轮无线网络技术的竞争正在激烈进行。现有的互联网系统架构不能适应未来移动宽带网络的需求，美国国家科学基金会的未来互联网体系结构（FIA）重大项目中安排了“移动第一”（Mobility First）项目。未来移动宽带网络需要攻克的一大技术挑战是能耗问题。业界已出现 Green Touch 产学研联盟，其工作目标是将当前通信网络的能耗降低一千倍。

“大数据”与“移动宽带”给以光通信技术为主要手段的有线通信网络带来前所未有的压力，光通信技术如何满足未来网路的需求是信息技术发展的关键。美国 NRC 2012 年发表“光学和光子学：美国不可或缺的关键技术”报告，提出五项未来需求对光子技术的挑战，其中第一条即为：在 WDM 技术之后，如何低成本的满足下一个 10 年内 100 倍网络容量的增长。低功耗、超高速、大容量、透明光子网路是光通信发展的必然趋势。

在量子密码通信技术方面，我国已经跻身国际前列。量子通信的光纤量子密码技术在未来五年内有望获得国家机要部门的实际应用；空间量子密码技术仍处于探索和演示阶段；基于量子纠缠的量子通信和量子网络由于纠缠脆弱性而难以获得实际应用，仍然处于基础或应

用基础研究阶段。未来 5-10 年量子模拟有望取得重要突破，当前关键问题是研制具有相当规模的量子比特实验平台（例如 30 个比特）以及研制可实用的固态量子存储器等关键器件。普适量子计算机是量子信息领域中最核心、影响最深刻的研究课题。未来 5-10 年量子计算机的研制可望取得重要突破，为实用量子计算机的研制成功打下扎实基础。量子芯片、量子编程、量子测量以及量子芯片微纳结构材料等相关研究的开展将成为各国的战略必争点。

前欧盟委员会主席顾问 Jeremy Rifkin 在他 2011 年出版的新书《第三次工业革命》中指出：“纵观人类历史，新型通信技术与能源体系交汇之际，正是经济革命发生之时”。他预言分布式的可再生能源构成的“能源互联网”与现在的信息互联网互相融合，将为第三次工业革命奠定坚实的基础，这一观点已得到欧盟议会的认可。我们应从更高的角度看待智能电网和互联网在第三次工业革命中的作用。

（四）变革性的信息功能器件是新一代信息产业的基础

信息系统的性能、功耗、成本和可靠性在很大程度上取决于所采用的器件，只有信息功能器件取得变革性的突破，才能逾越信息技术面临的可扩展墙、功耗墙、可用性墙。

目前集成电路的主流 CMOS 技术为 22—65nm，据 ITRS 预测，到 2024 年最小线宽将达到 8nm 左右。在此期间 16nm 以下的器件所用的材料和结构会有较大的变革，国际上正在积极探索之中。目前只有 Intel 公司掌握 3D 晶体管技术，并已用于 22nm 工艺。如果我们不攻克 14-22nm 的新工艺，在后摩尔时代将失去发言权。

2007 年的 ITRS（国际半导体技术发展路线图）正式将以系统级封装（SiP）为代表的功能多样化道路列为半导体技术发展的新方向，称为扩展摩尔定律（MTM）道路，即将数字和非数字功能、硅和非硅材料与器件、CMOS 和非 CMOS 电路等集成在一个封装内，完成单片 SOC 不能实现的复杂功能。今后应重点关注异质器件和电路集

成的多功能系统封装和用于新型存储和逻辑器件、互联、封装的新材料和新技术的研究，重点设计降低功耗、提高可制造性、可靠性和可恢复性的新器件。

石墨烯晶体管比硅晶体管功耗低，运行速度快，可制作出性能优良的半导体器件。英国曼彻斯特大学两位科学家海姆和诺沃肖洛夫2004年制备出石墨烯，2010年就获得诺贝尔物理学奖（集成电路发明后42年才获得诺贝尔奖）。2011年4月7日IBM宣布研制成功主频155GHz的石墨烯晶体管。石墨烯的出现可能使摩尔定律得以延续，从硅时代转向碳时代。但也有学者认为石墨烯成为主流信息材料还需要很长的时间，CMOS可以维持到2050年。

在通信领域，光子集成器件将取代传统分立元器件，将多个光模块集成在一个光子集成芯片中，有望解决现有光通信器件中速度、稳定性等诸多问题，同时能耗可以为原来1/10。短距离有线通信将依赖于基于光子集成技术，USB、DSL、DisplayPort、HDMI等将被光传输线取代。硅光子技术可将电子芯片和光子纳米器件集成在一块基片上，提高电子芯片之间信息传输速率同时有效改善电互联能耗限制，使计算机芯片之间通过光脉冲（而不是电子信号）进行通信，突破了芯片之间不能很快传输大量数据这一瓶颈。通过嵌入处理器芯片的光通信，建立艾次级（ 10^{18} ）超级计算机的愿景将在不远的未来变成现实。由于最新技术将芯片的集成密度提高了10倍，使用这种技术制造出的单芯片交换服务器大小仅为0.5平方毫米，只有目前产品的十分之一，成为未来研制功能强大的艾次超级计算机的新期望。HP公司最新研究显示，这一技术在2017-2019年将成为计算领域的必须技术。

近年来，各种新型非挥发性存储器得到了迅速发展，如铁电存储器（FRAM）、磁存储器（MRAM）、相变存储器（PRAM）和阻变存储器（RRAM），其中相变型存储器和阻变型存储器的研发尤为活跃，

这将为未来 5 至 10 年研制更高能效的计算机和类似人类大脑信息处理方式的模拟计算机铺平道路。未来甚至可能会通过大大提高晶体管所能达到的功能密度，对电子科学的发展产生重大影响。由于存储器具有巨大的世界市场规模，我国存储器市场也达到 1800 亿元，因此，持续支持并加强新型存储器的研究对我国新一代信息产业的发展意义重大。

（五）叠层制造快速成型等信息技术将引发制造业的第三次革命

2012 年 4 月 21 日，英国《经济学人》杂志发表长篇封面文章：“第三次工业革命”¹。文章指出，日趋融合的许多非凡的科技成果，如叠层制造、智能软件、新材料、更加灵巧的机器人等，促使制造业面临一场数字化革命。制造业的数字化进程不仅会改变传统的产品制造模式，还将改变生产组织模式。过去的工厂以快速大量制造相同产品为理念，但随着生产少量多批次产品的成本日益下降，未来的工厂将会把精力放在处理大规模的消费者定制品的订单上面。劳动力成本因素将越来越不重要（一部 499 美元的 iPad，在中国的组装的成本只有 8 美元），先进制造业正在逐步回归发达国家。

未来 5-10 年，以泛在感知技术、人机交互技术、人工智能技术与先进制造技术的融合应用为支撑，通过增强机器对制造环境与自身状态的感知能力、增强机器设备对人的指令及行为的理解能力，实现生产制造过程中人和机器间的能力互补，对产品和环境变化的快速应变，将形成大幅度提高生产效率的新一代制造模式。长期以来，我国把信息电子产品制造业和信息服务业作为高技术产业，已给予较多的关注。现在看来，信息技术对传统制造业升级改造的推动应引起国家更多的重视，应从“第三次工业革命”的高度看待信息化和工业化的

¹ 《经济学人》封面文章“第三次工业革命”与本文第三节引用的 Rifkin 的新书的侧重点有所不同，前者强调叠层制造（3D Printing），后者强调分布式可再生能源与互联网的结合，但两者的共同点都是实现能源、制造、营销和物流的民主化，社会向分散和合作方向发展。叠层制造可能引起制造业的重大变革，但称为“第三次工业革命”有点夸张。

深度融合。

（六）智能技术将进入开花结果阶段

人工智能技术已经研究了 50 多年，这个曾多次未能实现预期目标的领域最近又重新兴盛起来。引起人工智能复兴的重要原因是采用了概率性程序技术，它在旧有 AI 的逻辑基础上加入统计概率的应用。2011 年 3 月在 *Science* 期刊上发表 Joshua B. Tenenbaum 等几位认知科学的权威学者联名写的长文“*How to Grow a Mind: Statistics, Structure, and Abstraction*”，阐明分层贝叶斯统计模型（HBM）在人类认知中关键作用，进一步推动了统计方法与传统逻辑推理的结合。智能技术开始进入开花结果阶段，人工智能技术在互联网环境下可以发挥更好的作用。未来 5-10 年，人工智能技术的发展和應用將進入又一个春天。

2011 年 2 月 14 日，IBM 的超级电脑“沃森”参加美国王牌问答节目《危险边缘》并赢得比赛。《危险边缘》是美国最流行的知识问答节目之一，题目涵盖了时事、历史、艺术、流行文化、哲学、体育、科学、生活常识等等，而且节奏极快。IBM 与 Nuance 公司共同宣布将开展一项研究计划，以探索和开发“沃森”计算系统在医疗保健行业的先进分析能力，并将之商业化。

信息科学技术的根本性突破可能要取决于脑科学的进展，一旦脑科学取得大的突破，必将引起信息技术的一场革命性变革。脑科学和神经科技是近 20 年内发展最快的学科之一，脑功能成像技术的进步大大加深了对人脑这个最复杂系统的了解。神经科学和信息学的合作和相互渗透，导致采用一种新的研究模式，即实验数据→数学理论→计算机模拟和预测→生物学实验验证→数学模型与验证后的理论，加快脑的研究进程。未来 5-10 年，脑机接口（brain-computer interface）和神经工程（Neural Engineering）将成为科研的热点领域。

（七）社会计算将成为新的研究热点

作为信息科学与社会科学的交叉学科，社会计算的重要性不言而喻。

喻。世界各国政府及研究机构均已将社会计算和面向网络化社会的研究提升到了国家战略高度。

在商业领域，IBM、微软、雅虎、惠普均成立了研究社会软件的社会计算研究中心。2010 年 Facebook 宣布启动社会计算项目，重点开发社会网络、社会媒体、社会搜索及协作环境的模型、算法与系统。近年来，社会计算的研究重心已转移到了社会系统的动态变化分析。2010 年美国国家科学基金会启动了“社会计算系统”项目，同时提出“社会化智能计算”的概念，该项目研究社会的可计算化问题，并致力于理解新兴社会现象的产生，鼓励设计能用于社会系统行为分析的有效计算方法。

通信与网络技术的进步极大地增加了社会个体间的交互频率，也使社会、经济及工程系统的复杂性急剧增加。为此，2011 年美国国家科学基金会启动“网络驱动的发现与创新”项目，致力从异构数据中发现知识并理解社会系统的复杂性。我国政府和科研机构也对社会计算予以高度重视，中国科学院 2008 年已启动有关社会计算的基础理论及原型系统的研发，通过理论与实践相结合的方式，探索并解决网络环境下的信息网络安全等基础科学问题。在未来 5 到 10 年内，伴随新科技革命的兴起，社会计算研究的问题的复杂性将进一步增长，亟需开发有效应对系统复杂性的计算方法。

二、建设创新型国家对信息科技的重大需求

（一）做强信息产业是国家的战略需求

信息产业不仅是我国的骨干支柱产业，对国民经济的发展影响很大，而且代表先进的生产力，带动各行各业的发展。根据世界银行对 120 个国家的计量经济分析，宽带服务每增长 10 个百分点，就会带来 1.3 个百分点的经济增长。技术对劳动生产率的贡献在信息技术应用中表现得最为显著。信息服务领域也是新增就业岗位的热点和风险投资的重点。在华申请专利前十名的外国公司基本上都是 ICT 公司。

只有信息产业与国际先进水平并驾齐驱，才表明我国进入了世界强国的行列。

信息产业强不强不只是涉及电子信息产品制造和邮电通信部门，更主要的是看信息技术应用的广度与深度。我国信息产业大而不强，根本在于应用落后。2007 年以来，我国在国际电信联盟统计的信息通信技术发展指数（IDI）和联合国统计的电子政务发展指数（EGDI）纷纷下滑，反映我国信息化发展速度慢于全球平均水平，与发达国家的差距有扩大的趋势，应引起我们高度重视。

我们必须看到，我国与全球一样，信息产品制造业特别是计算机产业正在失去发展活力，开始进入停滞阶段。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%（中国超过 20%），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 5.5%（我国也降到 10%左右），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，2010-2030 年期间全球计算机市场的名义年增长率可能降到 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。进入 21 世纪以来，信息领域并没有重大的变革性的技术突破，而且，我国还缺乏足够的科学技术储备。

从 2001 年算起，我国的战略机遇期已过了 11 年。总的来讲，过去 10 年里信息科技领域我国与国际先进水平的差距并没有明显缩小。有些领域，比如集成电路，近五年差距反而扩大了。必须着力提高自主创新能力，力求有所突破，到 2020 年才能明显缩小技术差距。今后 5-10 年是我国信息领域从跟踪转向突破性创新的难得机遇期，也是我国信息产业由大变强的难得机遇，一定不能再次错过机会。

（二）构建信息产业创新生态环境是“十二五”的重中之重

信息产业正在出现第三次大的产业分工模式调整，从垂直分工模式到水平分工模式，再到现在的端到端设计的信息生态系统模式（ecosystem with end-to-end design）。苹果公司实践的“乔布斯法则”是这种趋势的重要标志。长期以来，“Intel Inside”是掌握核心技术的标志，这是部件支配成品（部件主导型）的商务模式。近年来，成品支配部件的 Apple Outside 模式更受关注。所谓“核心技术”并不是企业成败的全部因素，关注“Outside”实际上是重视系统性的创新，产业链的创新。

必须清醒地认识到，我国有少量单项技术（大多数还没有规模产业化）可能世界领先，但总体来讲我国的信息技术还是以跟踪为主，离引领产业发展还有较大的距离。我们与国际先进水平的差距主要体现在我国始终没有形成自主可控的基础信息技术平台，这是我国必须面对的后发壁垒。所谓“后发壁垒”是指已有的软硬件平台对用户的“锁定”，国内企业只能在国外成熟的软硬件平台上开发应用，创新的空间较小。

计算机产业，不论是服务器、PC 机、移动终端还是应用软件都需要构建基础软件平台，都有软件兼容的问题。由于软件栈较厚，用户有较强的“路径依赖”。发展这一类产业后发优势少，后发壁垒高，我们还没有找到如何构建自主可控基础软件平台的出路，这是我国发展 ICT 产业的根本问题。构建信息产业创新生态环境是“十二五”的重中之重。

云计算和移动互联网应用软件对开发环境和操作系统有相当的依赖性，尽管与过去的 Windows 环境相比，目前国际上流行的开发平台具有一定的开放性，但开放程度有限而且今后的前途难以预料。云计算和移动计算的蓬勃发展又一次给我国信息产业带来机遇，我们拼死一搏有可能实现向高附加值产业的升级。但也可能使我国信息产

业的主体完全沦为代工产业，其地位还不如 PC 时代。国家应下定决心以云平台和移动互联网平台软件为突破口，组织最强的科研团队协同攻坚，争取“十二五”期间有所突破，“十三五”期间打开局面。

通过 10 年的努力，我国在 CPU 和基础软件方面已经有了一定技术积累，对于我国而言，CPU 和基础软件已经不是深不可测的禁区。再用 10 左右的时间，我们可以大大提高国防和政府部门信息基础设施的安全性和自主可控性，也有可能的主流芯片和基础软件市场上占有可观的一席之地。信心比黄金还重要，自信心是发展战略性新兴产业的前提，一定不能丢。我国集成电路的工艺水平与国外还有两代差距，中芯国际的研发投入不到台积电的 1/10。要改变我国微电子产业的落后局面，必须下决心构建国内的创新产业链，充分发挥国内巨大市场的优势（2011 年进口芯片达 1700 亿美元），坚决克服各省市分散投资的弊端，努力培育年销售额超过 50 亿美元的芯片制造企业和年销售额超过 10 亿美元的芯片设计企业。

近 10 年来，由于科技评价中过于强调“数字化”考评，使科研人员“只见树木、不见森林”，习惯于对技术细节的改进而缺乏判断宏观市场和洞察未来的眼光，导致科技界对产业发展难以做出战略性的重大贡献。大学和科研院所在创新生态环境中的定位是前瞻性研究，引领新的科研方向，开辟新的技术途径，而不是正确途径尚未选定时就做些修修补补的“优化”。

先进企业的科研力量已明显增强，再用过去的科研成果转化的思路去开展产学研合作，得不到企业的青睐。科研院所应与企业努力实现更深层次的战略合作，从企业的市场开拓中发现 5-10 年后可能引发大量市场需求的科学问题和技术壁垒。中科院计算所与华为公司签订的“十二五”战略合作协议，提出了致力于前瞻性研究的新合作模式，是一种有益的尝试，值得借鉴。

构建产业创新生态环境不仅是生产力各要素的优化组合，而且要

求生产关系做必要的改革。云计算是资源配置方式的制度创新，基于平台、开发工具等生产资料的分享，采取计算和存储等资源按使用收费，形成生产资源免费而人的劳动（服务）收费的新生产关系，改变了资本与劳动相互对立的格局。

（三）保障赛博空间安全、促进社会和谐是国家的当务之急

互联网正以超乎想象的速度在全球扩张，成为承载政治、军事、经济、文化的全新空间，成为影响社会稳定、国家安全、经济发展和文化传播的无形力量。美国军方认为：“21 世纪掌握制网络权与 19 世纪掌握制海权、20 世纪掌握制空权一样具有决定意义。”

在网络空间的战略博弈中，谁制定规则谁就掌握了先机。2011 年美国政府发布了《“赛博空间”安全政策评估报告》，确立了核、太空、“赛博空间”三位一体的国家安全战略，组建了战略层面的赛博空间司令部，制定了《“赛博空间”作战能力构想》路线图，并积极建设“国家网络靶场”，策划“网络风暴”系列演习。俄罗斯提出“网络军控”，力图遏制美国网络战能力的发展；英国宣扬“网络主权”意识；日本强调“信息安全是综合安保体系的核心”；韩国成立网络空间司令部。面对日趋激烈的赛博空间的角逐，我们必须以战略的眼光和全球的视角看待赛博空间的安全问题，发展战略制衡手段和战略威慑力量，捍卫“第五维国防边疆”的主权与安全。

“国家网络靶场”是美国测试各种网络研发项目的国家级资源，将为美国网络战能力带来本质性飞跃。通过该靶场，研究人员可以在具有代表性的网络环境中对各种信息保障工具进行定性及定量的评估，可复现各种复杂的大规模异构网络，在一个网络架构同时进行多个独立的测试，进而对全球规模的网络进行高置信度仿真，同时开发最新的网络测试技术，以科学的手段对网络进行严格的测试。

频发的网络事件充分反映了网络大数据环境下社会管理的复杂性，具体体现为信息传播的广泛性和快速性，网上群体行为演化的动

态性，网上以及网下行为虚实交互性等特点。这些特点说明依靠现有的管理方法和手段，已经不能很好地解决相关的社会管理问题。如何确定面向大量动态群体组织形态的社会管理模式，如何实现社会管理中虚实互动、政策及策略反馈调节，已成为国家有关重大决策时必须面对的问题。

大数据环境下，保障赛博空间安全和维护社会稳定是国家的当务之急，也是国家的重要战略需求。我们不仅要防止国外可能的网络攻击，清除网络上的不良信息，而且要探索网络环境下新的社会管理模式，实现社会和谐。中国科学院与网络安全部门应密切合作，在网络信息安全和社会管理领域做出独特的贡献。今后 10 年，我们需要充分融合社会学、心理学和信息科学等多科学知识，发展并完善网络信息安全和社会计算技术，保持国家和社会长治久安。

三、国家需要加强布局的信息科技战略重点

国家在“核心电子器件、高端通用芯片及基础软件产业”、“大规模集成电路制造技术及成套工艺”、“新一代宽带无线移动通信”等重大专项中，对突破我国信息科技发展的瓶颈和促进我国信息产业由大做强有重大作用的关键方向已做了布局。我国的自然科学基金、863、973 等科技计划对信息领域的基础性、前瞻性研究也安排了不少项目，公共财政的支持力度逐年增强。但由于全球信息科技和产业发展非常迅速，我国的科技计划多数是五年计划，决策周期较长，有些安排跟不上形势的变化，特别是对基础技术平台和交叉领域的布局还显得薄弱。我们认为，下面列出的 3 个基础技术平台和 7 个培育方是 2020 年以前需要加强布局的信息科技战略重点。

（一）基础技术平台建设

1、大数据处理的新理论、新方法和科学平台研究

处理大数据的困难不仅是数据量规模大，更大的挑战是有些领域的的数据规模增长很快（互联网上的数据增长速率也基本符合摩尔定

律), 而且绝大多数是非结构化的数据。网络数据具有多源异构、高噪声、涌现性等特征, 现有的数据处理理论与技术无法有效应对, 迫切需要研究适合不同学科、不同行业大数据处理的新理论、新技术和新方法, 在此基础上进一步抽象、归纳、总结大数据处理的共性规律和科学内涵, 为此, 迫切需要建立大数据研究的科学平台。

为了加强重大基础与交叉前沿科学研究, 中国科学院等单位已在规划国家高性能计算平台体系建设, 需要关注的领域包括气象数值模拟与预报、地震预报、药物设计、环境科学、材料科学、计算物理、计算化学、流体力学等, 特别关注计算任务的并行化和网络化。高性能计算平台可纳入大数据平台的规划, 统筹考虑。

大数据平台不只是简单地建一个数据中心, 也不仅仅是使用传统方法在超级计算机上处理生物信息、脑科学、天文物理、遥感、气象等领域的海量数据, 即使是线性复杂性的算法也难以对付 **Peta** 级以上的数据。目前的数据挖掘主要依赖先进的工具, 是工具依赖而不是数据依赖。大数据处理需要研究隐藏在数据本身中的规律和知识, 即 **data-nature** 问题。必须研究革命性的大数据处理系统结构和革命性的算法和软件。此项目至少应包含以下几方面的研究内容: (1) 如何应对数据指数级增长的挑战; (2) 如何科学合理地抽样采集数据即大数据的测量与感知理论; (3) 应对数据量指数级增长的处理平台体系架构; (4) 适合不同行业的数据挖掘分析工具和开发环境; (5) 以数据的内在共性为研究对象的数据科学研究。

大数据科学平台研究是跨学科的研究, 不仅与自然科学有关, 还涉及心理学、经济学、社会学等社会科学, 将发展成为一门新型交叉学科。探讨网络数据的产生、扩散的基本机制, 需要从社会、经济和技术层面探讨网络数据涌现的规律与价值度量方法。社会计算、生物计算、遥感分析、天文物理等数据处理中的部分带有共性的内容可以纳入大数据研究范畴。

2、云计算和宽带移动互联网的基础平台技术研究

未来 5-10 年我国信息领域最重要的工作之一是建立云计算和移动互联网的基础技术平台，或者说打造信息产业创新生态环境。

信息基础技术平台离不开微处理器和基础软件，这两年国防领域推广国产基础软硬件取得较大进展，以中国电子信息产业集团和中国电子科技集团为主，国产基础软硬件的产业链已初步形成。龙芯 CPU 在其中发挥了主导作用。但是，我们应摆脱传统的“基础部件主导型”的“inside”思维定势，应更多地从“系统主导型”和应用牵引的角度来做规划，实现应用带动基础软件，基础软件带动芯片的良性循环。

在云端服务器和存储器方面，国家还没有部署重大科技专项。863 的高性能计算机重点专项主要支持用于科学计算的 100 Petaflops 超级计算机研制。“十二五”国家支持云服务器和云存储器的科技计划的投入力度远远小于对超级计算机的投入。建议国家至少以发展超级计算机一样的力度支持云计算数据中心计算机系统的研制，其主要目标不是在 Linpack 计算速度上争取和保持世界第一，而是研制低功耗、低成本的高通量计算机。要花大力气研制云端操作系统等云基础软件平台，目前国际上还没有形成主流云操作系统。发展云端基础平台要真正做到以市场为导向、以企业为主体，产学研结合。

制定合适的频谱规划是发展移动宽带通信的关键。美国国家宽带计划已做出规划，未来 10 年提供 500MHz 频率供无线宽带使用（未来 5 年内提供 300MHz 频率，其中 120MHz 来自 UHF 电视频段）。我国目前分配的 TD-LTE 频率不合适，已经影响产业发展。建议以中立的第三方（比如中国科学院）牵头制定频谱管理政策，重新分配无线电频谱。加快数字化电视普及推广进度，尽快腾出优质频谱支持无线宽带通信。“十二五”期间，可致力于 60GHz 以上超宽带局域网(4Gb/s)的技术突破，这种室内网采用自适应波束成形，具有超强指向性，可以在多种干扰环境中工作。

3、集成电路基础器件的新原理、新材料、新结构、新工艺与新集成技术研究平台

为了攻克 3D 晶体管等新工艺，探索更远期的超越 CMOS 器件，应加强 CMOS 新工艺研究和新器件机理研究。新器件研究有两大趋势：一是在新材料基础上制作性能优异的 CMOS 器件，如高迁移率沟道 III-V 族材料和碳基纳电子材料等；二是发明新的信息处理技术，以取代面临极限的 CMOS 器件，如自旋电子、单电子、量子、分子和单原子器件等。我国有不少学者在从事纳米材料研究，但从事纳米器件研究的学者较少，今后在科技布局上应特别重视纳米器件。

目前研究的新材料包括 III-V 族、Ge、碳纳米管、纳米线、石墨烯、大分子、定向自组装材料、复杂的金属氧化物、自旋材料和界面材料等，预计 2018 年前后部分新材料将会得到应用。近几年国际上发展最快的是石墨烯，我国应高度重视石墨烯等新材料与相关器件的研究。

SiP 封装和嵌入式软件已成为影响 SiP 器件性能的基本因素，我国对 MTM 方式的新器件研究应予以高度关注，特别要重视 SiP 封装技术和嵌入式软件开发。

（二）7 个重点培育方向

1、下一代非易失性存储器

国际半导体技术路线图（ITRS）组织认为，2018 年左右新型存储器有望取代 SRAM 和部分闪存。目前国际上研究重点是磁存储器、阻变存储器、相变存储器。我国应重点研究开发 28nm 技术节点下低功耗、高速、高循环次数与高数据保持力的相变材料，研究高稳定与高成品率 1Gb PCRAM 芯片的 1D1R 工艺制程，实现一块芯片替代现有的 DRAM 数据存储与 FLASH 程序存储的基本存储模式，提升支持多核 CPU 嵌入式存储芯片的性能，增强我国消费性电子产品制造业的技术含量与市场竞争力。

2、片上光互联大规模并行处理芯片研发

在我国硅芯片集成，无论是在技术方面，还是资金投入和市场占有率等方面，与国际先进水平相比都处于劣势。我国不能简单地沿缩小特征尺寸的方向去死拼，而应着眼未来，将光 **internet** 技术引入系统集成芯片是值得重视的研发路线。将电子、光电子和光子器件融合起来，片上光互联大规模并行处理芯片技术可以将现有 **CPU**、**DSP** 的速度提高 **1000** 至 **50000** 倍以上，有可能成为汇集计算、存储、通信等多种功能的变革性芯片。这类系统芯片采用 **SIMD** 计算方式的阵列体系结构，所有处理单元每个周期执行同一条指令的“数组操作”，数组大小理论上没有限制，具有编程简单、高效与通用等优点，很适合做图像、图形处理，可在天基卫星观察、全方位全天候地球监测等领域广泛应用。

3、超高速光子网络与光子集成通信芯片技术研究

下一代超高速、超大容量光子网络技术是解决电子速率瓶颈的有效手段。重点发展新型超高速全光传输、超速全光 **3R** 中继、长距离传输光信号色散抑制、超高速全光交换与路由、超高速全光逻辑门、低噪声全光放大等关键技术。

光子集成芯片对超高速通信具有重要的意义，是解决目前信息通信系统高能耗的一条出路，同时也是未来光通信的主要增长点。应重视片上激光器、探测器、光二极管等光子集成芯片基础单元器件的研发；开展光子集成专用芯片研究，如相干光通信芯片、**FTTx** 专用芯片；**Tbps** 以上光收发机；开展超快光子集成传输线研究，取代现有 **USB**、**HDMI**、**DSL** 等电传输线，开拓短距离超高速传输的新途径。

4、量子计算和量子模拟

我国在量子密码通信方向已处于国际先进水平，但量子计算还未放到应有的地位，应集中相关力量，更积极主动地开展量子计算研究。建议统一布局开展以下相关研究：量子芯片研究，包括半导体量子芯

片、超导量子芯片、离子（原子）芯片、光子集成芯片等；量子编程的研究，量子软件的研究应与量子硬件研究同时进行；相关量子技术研究，包括量子测量、量子控制和量子反馈等。

美国物理学家理查德·费曼最早提出研究量子计算机的本意就是用计算机模拟量子系统的各种现象。量子模拟是量子计算机最有前景的应用领域，有望比普适的量子计算机更早实现，在科技布局上应摆在更优先的位置。

5、认知科学与智能科学

近几年国际上认知神经科学（Cognitive neuroscience）、计算神经科学（Computational neuroscience）、脑机界面和神经工程等交叉科学发展迅猛。智能科学的目标是在心智能力的启发下，发展一种连贯、统一、普遍的计算机制，并发展类脑智能机，包括类脑计算机、类人机器人等。未来 5-10 年应加强组织引导，协作开展与脑科学有关的认知科学与智能科学研究，重点研究内容包括：神经活动的基本过程、知觉信息的表达与处理、记忆的脑机制、学习过程中的信息处理、语言加工的认知机制、思维的认知机理、智力发育、情感系统、意识的脑机制、认知功能的计算建模与仿真等。

6、社会计算

未来 5-10 年应进一步加强社会计算研究，研究重点包括：复杂社会网络的理论分析，网络事件新闻热点的形成与传播规律，多源异构社会信息的精准实时获取，社会信息的深度理解与计算，大规模社会群体行为分析与建模，面向非常规突发事件的计算实验与决策支持，以及复杂社会系统的平行控制与管理。通过理论研究和实际应用相结合的方式，解决网络环境下所面临的社会安全问题，实现赛博空间的科学化管理，保障我国的网络信息安全以及社会和谐发展。

7、生物信息学

未来 5-10 年应继续加强这一交叉学科的研究，研究的重点包括

复杂生物网络和系统生物学，表观遗传学，非编码序列与非编码 RNA，干细胞研究等。这些方向都将产生海量数据，也必将提出新的数学与计算科学问题。

参考文献

- 中国科学院信息领域战略研究组. 2009. 中国至 2050 年信息科技发展路线图. 北京: 科学出版社.
- Hey T et al, 潘教峰/张晓林译. 2012. 第四范式: 数据密集型科学发现. 北京: 科学出版社.
- Rifkin J, 张体伟等译. 2012. 第三次工业革命. 北京: 中信出版社
- Xu Z-W, Li G-J. 2010. Computing for the Masses. *Communications of the ACM*, 54(10)
- The McKinsey Global Institute (MGI). 2011. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity.
- Anderson C. 2009. THE END OF THEORY: Will the Data Deluge Makes the Scientific Method Obsolete? *Wired Magazine*: 16(7).
- Barabasi A-L. 2012. The network takeover. *Nature Physics* 8,
- Arthur W. B. 2011. The Second Economy, *McKinsey Quarterly*.
- Boutang Y. M. 2011. *Cognitive Capitalism*. New York: John Wiley, .
- Hilbert M., López P. 2011. The World's Technological Capacity to Store, Communicate, and Compute Information. *Science* 332 (6025).