

海计算：物联网的新型计算模型

孙凝晖 徐志伟 李国杰

中国科学院计算技术研究所

关键词：信息技术 物联网 海计算

对信息技术新概念的认识

近几年，云计算、后IP网络、物联网、泛在网等各种信息技术新概念不断涌现，涵盖了信息技术的各个环节，包括信息的获取、传输、处理、集成与应用。下面简要阐述一下对这几个新概念的理解。

三元世界（Ternary Universe）中国科学院在2009年发布的《中国至2050年信息科技发展路线图》中总结并提出了“三元世界”的网络计算发展趋势，对理解网络计算的走势和上述信息技术的新概念提供了规律性本底。

三元世界是对计算的一种新理解和新的思维模式。今天计算机科学界提到“计算”系统，已经与一人一机组成的、分工明确的人机共生系统大不一样了。我们看到一个三元世界，即由计算世界（Cyber World）、物理世界（Physical World）、人类社会（Human Society）组成的人机物协同社会。它是一个多人（People）多机（Computers）多物

（Things）组成的动态开放协同工作的网络社会。计算机科学是研究人机物三元世界中计算现象这个共同主线的科学。

三元世界的本底有助于我们理解云计算、未来互联网（后IP网）、物联网、泛在网的新技术趋势，见下图。

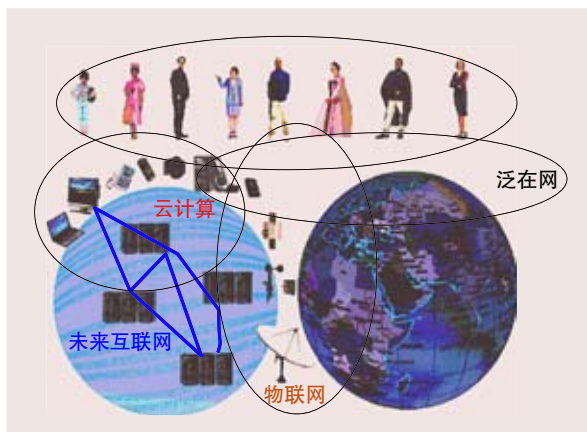


图2 从三元世界本底看云计算、未来互联网、物联网、泛在网四种技术趋势

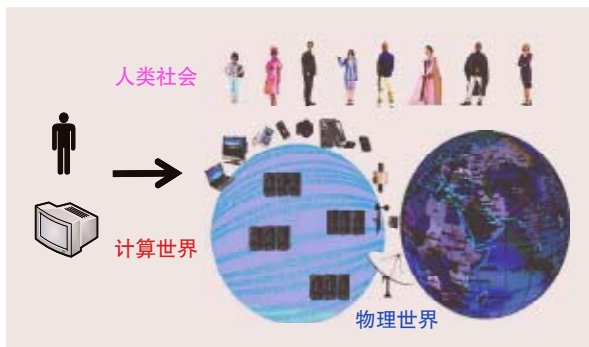


图1 “人机共生”到“人机物网络社会”的跃变

云计算 云计算为众多用户提供了一种新的高效计算模式，兼有互联网服务的便利、廉价和大型机的能力。它的目的是将资源集中于互联网上的数据中心，由这种云中心提供应用层、平台层和基础设施层的集中服务，以解决传统IT系统的零散性带来的低效率问题。云计算是信息化发展进程中的一个阶段，强调信息资源的聚集、优化、动态分配和回收，旨在节约信息化成本、降低能耗、减轻用户信息化的负担，提高数据中心的效率。

云计算强调由第三方提供集中式互联网服务，

表1 四种网络计算技术趋势比较

技术趋势	发展目的	影响范围	新的技术（思路）
云计算	为众多用户提供一种新的高效率的以服务为特征（XaaS）的计算模式，兼有互联网服务的便利、廉价和大型机的能力。	主要是服务端（数据中心）和客户端，也包括人机世界（使用模式和商业模式）。	AJAX客户端 REST服务 CAP定理 多租户集中服务 资源按需供给 虚拟化 海量数据处理
后IP（Internet Protocol）互联网	用原始创新方法使互联网更加灵活、性能更好、更加可控可信、成本更低。	主要是机机互联，也包括人机互联。	可编程网络 网络虚拟化 关联数据 个人网
物联网	实现物物互联，从而融合物理信息的感知、传输、处理、控制，提供高效智能的服务。	主要是物物互联，也包括物机交互和人机物世界。	精准感知 信息保真传输 智能处理与决策 忠实执行控制 IoT, CPS, 智能电网
泛在网	通过多种联网的智能人机交互设备，为个人和社会提供普惠（Universal）的、以用户为中心的、无所不在的信息服务和应用。	影响人人机交互、物机交互、网络系统结构、服务器与终端、应用等各方面，需要感知环境与内容	泛在联网设备 计算透镜 计算思维 低成本网络与终端 低功耗设备

是一种新的应用模式。云计算的主要影响范围是网络的边缘设备（客户端设备和服务端设备）与新兴的网络应用，重点是互联网服务端的数据中心。云计算的关键技术包括AJAX客户端、REST（Representational State Transfer）服务、CAP（Consistency, Availability, Partition Tolerance）定理、多租户集中服务、资源按需供给、虚拟化以及海量数据处理。云计算强调弹性资源服务、虚拟化、低成本、高效率、可扩展性。

云计算可为物联网、泛在网提供后端处理能力与应用平台。

后IP网络 互联网是基于TCP/IP协议来进行通信的网络，随着互联网的广泛应用，逐渐暴露出其在可扩展性、移动性、安全性、服务质量、可靠性等方面的本质性缺陷。过去10多年，业界采取演进式（Incremental）改进的发展策略，但这种方法不能从根本上解决互联网的诸多问题。因此，美国、欧盟和日

本等发达国家已经开展了对采用“从零开始（Clean Slate）”的革命式方法的未来互联网的研究，即后IP网络（Post-IP Network）研究。后IP网络研究涉及互联网设计的一些根本原则，如网络是否要继续采用分组交换，端对端原理是否要改变，路由和包转发是否要分开等等。

后IP网络有时也被称为未来互联网，强调对现有互联网的变革，尤其是强调摆脱TCP/IP（以及HTTP¹）协议的约束，使互联网更加灵活、性能更好、更加可控可信、成本更低。

后IP网络的主要影响范围是网络设备和边缘设备（路由器、客户端设备和服务端设备）、网络拓扑与网络应用。像过去发明的互联网和万维网技术一样，后IP网络可能产生未来信息化的网络基础技术。研究界已经提出的核心技术思路包括可编程网络（Programmable Network）、网络虚拟化（Network Virtualization）、关联数据（Linked Data）和个人网（Personal Net和Personal Cloud）等。

后IP网络可为云计算、物联网、泛在网提供更高效安全的网络基础技术。

物联网 物联网的目的是实现物物互联，从而融合物理信息的感知、传输、处理、控制，提供高效智能的应用服务。物联网强调对物理世界（包括自然界和人造物）的精准感知，感知信息的实时或及时传输、针对物理世界限制的处理与决策以及对物理世界的控制。

它与传统互联网的主要区别是包含了物物互联

¹ HyperText Transfer Protocol, 超文本传输协议

与物机互联，而不是局限于机机互联。它的主要影响范围是连接物理世界和计算世界的传感网与执行部件网、传输与处理物理信息的计算机和网络以及之上的物联网应用。物联网的主要技术方向包括物体标识（射频识别、UID）、精准感知技术、信息保真传输技术、智能处理与决策技术、微机电和微纳米控制技术。由于物联网涉及大量的“物”以及物理限制的客观性，这些技术需要特别考虑大规模系统与数据、及时处理、低成本、低能耗、物理耐久性以及复杂系统的涌现现象。已经提出的核心技术思路的代表包括IoT（Internet of Things）、智能电网、CPS（Cyber-Physical System）等。

泛在网 泛在网是指基于个人和社会的需求，实现人与人、人与物、物与物之间按需进行的信息获取、传递、存储、认知、决策、使用等服务，具有超强的环境感知、内容感知及智能性，为个人和社会提供无所不在的信息服务和应用。

当前的泛在网研究强调自然而无所不在的人机交互和物机交互，被学术界总结为5A（Any Time, Any Place, by Any Person, using Any Device, Connecting Any Objects）。中国科学院在《中国至2050年信息科技发展路线图》中提出的泛在信息网络系统（UINS，U-Information Network System）是指普惠、以用户为中心（User centric）、无处不在（Ubiquitous）的信息网络，反映了全面进入信息社会的长远目标。泛在网的主要技术包括：联网设备技术，从米级（Boards）、分米级（Pads）到厘米级（Tabs）甚至毫米或微米级（Dust）设备，三屏联动技术，用户中心（User-Centric）技术，背景意识（Context Aware）技术，位置定位与服务技术，智能空间技术，智能人机交互技术等。从长远看，计算透镜和计算思维的思想将推动我国建成惠及全民的泛在信息网络。

概括而言，云计算强调应用层信息的综合处理，是一种新的应用模式；物联网强调对物感知和物物互联，方便人类对物理世界的感知与控制，云计算可作为物联网后端处理与应用平台；而后IP网络强调对现在的互联网的变革，是未来信息化的网

络基础。泛在网是对未来信息社会的综合预见，是所有这些概念的集成。

物联网着重强调连接物理世界，是走向泛在网的重要一步。当前，物联网研究在感知端（物端）的计算与控制比较薄弱，很多操作需要通过网络传输在后台完成，既耗能又低效。面向拥有海量物体的物理世界，需要从计算模式角度进一步思考，这就引出了下面要阐述的“海计算”概念。

从计算模式的发展看物联网

物联网的研究现状呈现三个特点：（1）物联网概念还在继续发散，呈现出多样性，对物联网的期待还在增长，物联网概念还没有确定的定义；（2）各种各样的物联网应用正在被开发和实施，但主要采用自组网（ad hoc）方式，缺乏可批量应用的系统方法；（3）物联网技术目前主要被看成是其他技术的集成。物联网尚缺乏反映自身特色的，类比为互联网的TCP/IP技术、互联网服务的REST服务技术和Web 2.0的AJAX技术那样的基础技术。

我们试图从计算模型的角度去发现物联网与众不同的科学技术问题。

图灵奖获得者巴特勒·兰普森（Butler Lampson）从“*What is computing good for（计算用于何方）？*”的角度将信息技术分成三个时代，分别是模拟（Simulation），通信（Communication）和“长入”现实物质环境（Embodiment），从用计算机模拟现实世界开始，“计算”已逐步融入人类社会和物理世界。下面从计算模型的角度对这一观点加以阐述。

图灵机模型 将物理世界数字化后建立数学模型，通过计算和数据处理方法，对自然界存在的规律进行模拟仿真；计算类应用、数据处理应用都是遵循这样的计算模型。按照“输入-计算-输出”的过程，产生的所有结果都是可以预知的。这是一个计算世界（Computation World），是对人类认知的一种数字化，这个数字世界与人类社会、物理世界是正交的。

网络计算模型 通过移动数据的方式，将人

类社会中真实的工作与生活搬到网域空间（Cyberspace，也称赛博空间），其本质是通过互联网、上网本、智能手机、网络设备等手段实现人与人之间的通信，即Internet of People。这个空间与上述计算空间是有本质不同的：这里不存在“停机”问题；算法不是独立的，而是交互算法网络（a Network of Interacting Algorithms）；存在着“涌现”现象，即在混沌的网上世界中能产生新的知识与智能。网域空间可以看成是对人类社会的一个映射，社会计算、舆情分析都是通过对网域空间的计算来发现人类社会的规律。网域空间将信息化扩展到了人类社会。

海计算模型 通过在物理世界的物体中融入（Embodiment，也可称长入）计算与通信设备以及智能算法，让物体与物体之间能够互连，在事先无法预知的场景中进行判断，实现物与物之间的交互作用。其本质是让信息设备能隐形地融入到真实的物理世界而无处不在，将信息化扩展到物理世界。

海计算这个概念是中国科学院江绵恒副院长在2010年4月12日在北京国谊宾馆召开的中国科学院战略高技术十二五规划研讨会上提出的，十分形象。云计算是服务端的计算模式，而海计算代表终

端的大千世界的万物，海计算是物理世界的物体之间的计算模式。

海计算是物联网的一种新型计算模型

从计算模型的角度可以把物联网应用模式分成两大类。

模式一，感知模式

一方面通过强化传感器，使当前信息系统的信息获取能力的外延扩大，有效地感知物理世界；另一方面通过强化云计算和对传感数据的智能判定，使得基于信息的决策能力得到提高。所以，“感知中国”的本质是物联网感知模式的一种应用，实现的是物联网（Internet of Things），强调连接物理世界，是以信息世界（Cyber world）为中心的思维模式。当前，物联网应用最多的是基于传感器的监控类应用，本质上还是对图灵机模型的一种延伸，将输入扩展到物理世界，增加了新的数据来源。

数字电网和智慧电网、数字环保与智慧环保的本质区别也在于对电网或环境感知的灵敏性，及对

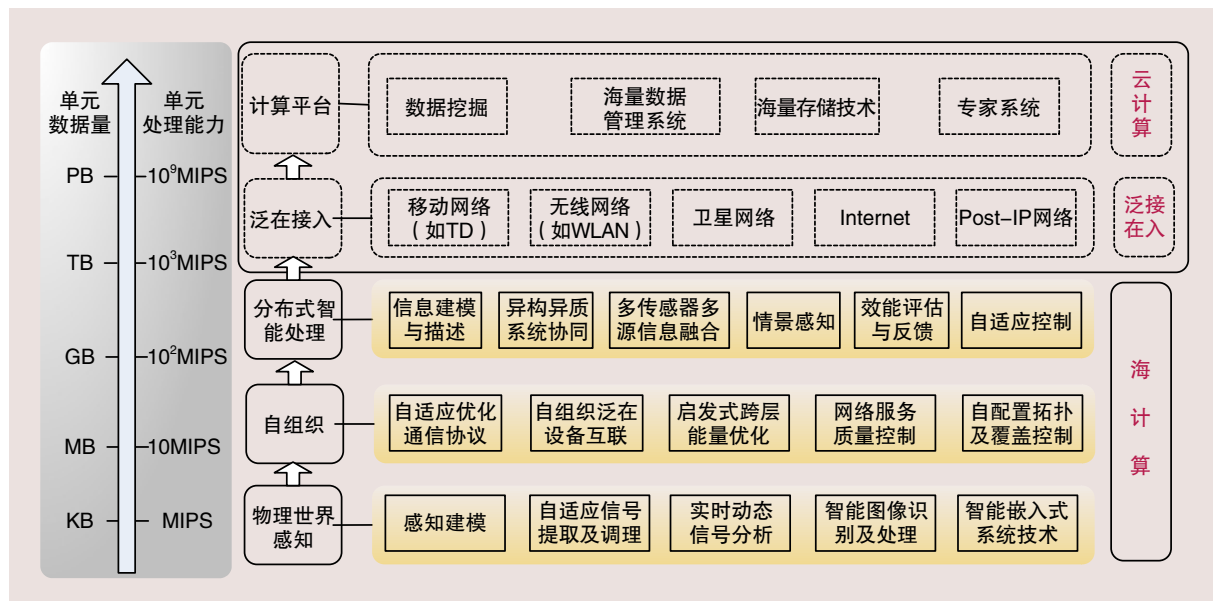


图3 物联网的技术结构

获取的电网或环境数据的智能判断。

模式二，海计算模式

一方面通过强化融入在各种物体中的信息装置，实现物体和信息装置的紧密融合，自然地（原生态地，Natively）获取物质世界信息；另一方面通过强化海量的独立个体之间的局部的即时交互和分布式智能，使物体具备自组织、自计算、自反馈的海计算功能。海计算的本质是物体与物体之间的智能交流，实现的是物之间的交互（Interaction of Things），强调物理世界的智能连接和物理性质涌现（Emergence），是以物理世界为中心的思维。

一个海计算系统包含多个互联的物体，其中可能有智能部件（信息系统）。但是，海计算模式具有如

下几个必备的特征，现在的物联网一般没有考虑到。

融入性（Embodiment） 信息装置融入到各种物体里面，传感器也是内嵌的。这个信息装置与物体具有相同的生命周期，是自我管理、自我维护的。

自主性 物体不只是被动地被控制，而具有一定的智能性和自主性（Autonomous and Autonomic）。

局部交互 海计算充分利用局部性原理（Locality Principle），物体与物体之间主要通过局部交互方式实现通信与互动。相对于感知模式中大量数据需要传输到云计算中心处理，局部的信息交互和数据综合更为节能高效。

群体智能 海计算模式物联网中的智能具有分布式和交互式（Interaction）的特征，而且是动态自组织的，智能算法无法预先知道结果，多个物体之

2010年10~11月CCF YOCSEF分论坛活动计划

10月11日 杭州

论坛：谁动了物联网的奶酪？

10月12日 重庆

报告会：粗糙集技术前沿

10月15日 成都

论坛：微软嵌入式技术研讨

10月17日 苏州

论坛：长三角论坛——科技世博

10月22日 沈阳

论坛：信息化与沈阳现代装备制造业的融合

10月23日 济南

报告会：视频图像的智能分析

10月24日 青岛

报告会：嵌入式技术应用

10月24日 深圳

论坛：深港产学研访问研讨

10月24日 上海

论坛：创意上海的新媒体和产业

10月30日 武汉

报告会：软件安全

11月5日 苏州

论坛：软件过程管理与改进

11月6日 济南

论坛：服务计算及其应用技术

11月11日 成都

论坛：计算智能

11月13日 大连

论坛：CCF YOCSEF助推大连IT校企合作

11月15日 杭州

报告会：数字城市管理的新思维

11月18日 上海

论坛：智慧教育与教育的信息化

11月20日 苏州

报告会：校企双赢，提升企业创新能力战略研讨

11月27日 西安

论坛：国产操作系统路在何方？

间通过内嵌智能算法之间的交互作用才能产生有效的智能判断。有些海计算应用在一个局域物联网中完成,可以没有云计算的支撑。更多的计算密集任务可以在专设的具有复杂功能的智能部件中完成。

这样的物联网空间可以自成体系,也可以与计算空间、赛博空间进行交互,但局域内的交互使与外部交互的数据量成数量级地减少。

简言之,海计算模式倡导由多个融入了信息装置、具有一定自主性的物体,通过局部交互而形成具有群体智能的物联网系统。这样的海计算物联网具有如下几个潜在的优点:

节能高效 充分利用局部性原理,可以有效地缩短物联网的业务直径,即覆盖从感知、传输、处理与智能决策、到控制的路径,从而降低能耗,提高效率。

通用结构 通过引入融入信息装置的“自主物体”,有利于产生通用的、可批量重用的物联网部件和技术,这是信息产业主流产品的必备特征。

分散式结构 与感知模式相比,海计算物联网更强调分散式(Decentralized)结构,较易消除单一控制点、单一瓶颈和单一故障点,扩展更加灵活。群体智能使得海计算物联网更加鲁棒,更能适应需求和环境的变化。

这种融入式计算设备与传统的嵌入式设备有什么区别呢?从嵌入式(Embed)到融入式(Embodiment)是一种渐进演变的过程,但是有本质性的区别。嵌入式系统是对物体进行数字化控制,给物体一个射频识别标签就是数字化过程,利用处理器操作一个状态机,达到自动控制的目的;融入式系统是对物体进行智能化控制,通过传感获得输入,通过多个融入式物体之间的自组织分布式的智能算法进行自动判定,是一种群体智能(Wisdom of Crows),系统的行为是设计者无法预知的,对预先不可知场景可实现实时地智能判断。

海计算模型中新的研究内容包括:融入式的新计算系统(包括硬件和操作系统)、自组织群体智能算法(Interaction of Crowd Intelligence)、内嵌式微型传感系统、自组织网络等。可能的原始性创

新如:保真保质的信息传输方法、交互智能的基本操作、适合海计算的指令系统、提供自主性的薄层的操作系统。

海计算应用实例

无人驾驶汽车就是一个典型的海计算应用,车与车之间、车与红绿灯之间、车与行人之间的情况需要通过即时的感知和交互式智能来判定。基于泛在感知的智能化机械加工需要在机床中融入能够感知和处理诸如压力、温度、位置等信息的智能装置,将智能赋予机床,因此海计算应该是机械加工行业发展物联网的一个方向。协调管理家庭中的各种设施智能家居系统也是一种海计算模型物联网的一个应用场景。

一些典型的智能目标监测与识别应用,如战场环境监测、智能交通、入侵检测等,对系统的实时性、准确性具有较高的要求,很难通过“分布式信息采集→云计算平台→反馈控制”这种架构来构建系统;而借助海计算技术,则可以充分挖掘终端节点的计算资源,实现智能实时感知和精确控制。■



孙凝晖

CCF理事。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体系结构、并行处理体系结构、分布式操作系统、性能评价及文件系统。

snh@ncic.ac.cn



徐志伟

CCF高级会员。2007年中国计算机学会王选奖获得者。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。

zxu@ict.ac.cn



李国杰

CCF理事长、本刊主编。中国科学院计算技术研究所所长。中国工程院院士。第三世界科学院院士。主要研究方向为计算机体系结构、并行算法、人工智能等。