

从普适计算、CPS到物联网： 下一代互联网的视界

刘云浩
香港科技大学

关键词：普适计算 CPS 物联网

人类的生命从没像现在这样长，人们也从来没有像今天这样轻易就能触摸到自己与时代的隔膜：不是因为身体的老化，而是面对排山倒海而来的新科技。十几年前非常时髦的“知识爆炸”这个词如今已很少有人提起，因为爆炸这个力度，还远远赶不上真实的场景。

24年前，家里亲人出差逾期未返，我和朋友历尽千辛万苦，在中关村邮局排队花4元1角打了一个18秒钟的国内长途电话终于确认平安；11年前一个久未联络的朋友偶然得知我的手机号码，拨通号码，就找到了当时远在南非的我，令他惊叹通信业的发展已到如此地步。但这些都比不上计算机与互联网技术带来的巨大冲击：坐在地球两端的人，一天聊上几百句，并未感到花了特别多的金钱或付出了额外的努力。

1965年戈登·摩尔提出那个著名定律的时候，人们不免大吃一惊，以至于摩尔本人后来也一再修改自己说过的话。现在他终于可以安心了，如今在计算机网络领域这个定律不仅成立，而且实际上互联网的用户数量已接近指数增长趋势，根本用不了18个月就能翻一番。保守的预测也认为2012年互联网用户数将超过18亿，占到全球总人口的30%左右。今天整理资料翻到后赵的石勒听汉书时，我意外联想到了关于2012年这个有趣的预计。如果保持这样的互联网上网用户的涨幅，IPV4地址很快就不够用了，幸亏我们已经提前想到了IPV6。大家大可以也说一句赖有

此耳，但转念一想其实有点杞人忧天，互联网用户无非是人口，地球上就这么多人。

猛地又意识到突破这个用户数其实并非笑谈。在计算科技与网络技术发展的今天，智能化以无与伦比的迅猛速度，延展和覆盖下来。每一个有功能的对象都可能成为互联网的连接对象。也许我们终将会把黑格尔的话改成：存在的，就是上网的。

在进入人类世界短短的20年里，互联网已渐渐成为人们日常生活的信息载体和平台，广泛参与到社会运行和人们的各种活动中。在学术界与工业界孜孜不倦地探求互联网走向的时候，其实还有一条不太显眼的探索主线从没有被放弃过，这就是马克·维赛尔（Mark Weiser）在互联网刚刚兴起的时候提出的普适计算（Pervasive Computing）。一般认为互联网代表着主流的网络计算模式，把人们的使用吸引在信息空间（Cyber Space）中，主要依赖桌面型计算获取服务与支持；普适计算则倡导发展可以广泛部署的微小计算设备，并在此基础上实现透明和智能的计算服务，又称为不可见计算（Invisible Computing）。如果说互联网计算此前一直崇尚人围绕着网络进行，那么普适计算则主张让微小系统形成的网络围绕着人运转。

普适计算的提出也是考虑到小型化或微型化成为计算机的发展趋势。各种小型计算设备如掌上电脑、智能手机、传感器、射频标签等

崭露头角。同时，无线技术的运用也使移动计算变得日臻成熟和普及。在这种趋势下，人们开始尝试突破桌面计算的模式，将计算和互联网技术普及到日常生活中。普适计算的目的是在日常生活的各种环境和场景中广泛部署微型化且具备一定计算能力的普适设备，并与已有的互联网技术结合，实现移动、无缝、透明和泛在的计算支持和服务。普适计算是人们摆脱计算设备对人类活动的束缚，将互联网推广到物理世界的初步尝试。

但是执着于普适计算的人们很快就吃到了苦头，由于普适计算设备大多是互联网上已有的各种计算系统的延伸和拓展，扮演探测和感知的角色，智能化程度相对低；而服务对象似乎主要是个体，比如移动互联、家居、医疗、导游等，找不到真正穿透国民经济发展的突破点，很快沦落到尴尬的地位：每个人看了演示都觉得不错，但哪一个应用也没能大规模推广。而民众更多的感觉就是麻烦。

无线传感器网络作为普适计算的一个实际延伸，数年前被加州大学伯克利分校的戴维·卡勒掀起一阵热潮之后，大鸭岛、斑马网、金门大桥监控、青岛海洋、火山与泥石流、精准农业、煤矿救援以及林业生态监控等一系列概念系统纷纷走入人们视野。作为人们对物理世界进行有效感知和探测的手段，传感器早已使用了多年，但是把传感器组成网络，形成智能化的自我协同、自我定位则是一个巨大的进步。在一个传感网中，大量的传感器等微型化计算设备自组织的联接在一起，将计算和服务从满足个人需要进一步延伸到制造、运输、能源、环境和建筑等国民经济生产领域，适应人们对探索、利用和管理物理世界的需求。

然而传感器网络和普适计算领域的工作并未真正受到主流互联网工作者的足够认同；严峻的事实是，主流的日子也并不好过。历史上各类技术的兴起，研究者与生产者对于用户来

说都有巨大的认知优势。然而在互联网面前这个优势荡然无存，经常是一个业余网友能把专业工作者在某一个小领域轻易甩开。

互联网的研究人员清楚地意识到自己必须不断地思考今后5年，甚至15年的下一代互联网是什么，才能维持一个短暂的科技领先地位。先是伊恩·福斯特（Ian Foster）10多年前提出了一个网格计算概念，很多人认为是阿拉丁的神灯。从20世纪90年代起世界各国不约而同地兴起了网格年。所谓网格，就是要通过整合大量漂浮在互联网上的异构计算设备的闲置资源，例如CPU和存储，形成虚拟计算集群为用户提供服务。大家随后欣喜地发现什么都可以叫做网格、教育网格、交通网格、电力网格，直到有人提出大网格概念。

在网格计算发展得轰轰烈烈时，计算机科学家们又面对一个对等计算（Peer-to-Peer, P2P）模式的挑战。相对于网格，对等计算简单而直白，把互联网上少量服务器服务大量客户端的现有模式，变成客户端也可以互相提供直接服务。与投入了上亿资金的网格相比，对等网眨眼间就招揽了百万、千万的用户。

就在网格计算步履维艰的时候，谷歌（Google）提出了云计算，强调用户不必知道互联网云端资源细节而可以直接享受计算服务的概念。实际上，云计算与网格计算相比并没有更大的转折。百度也提出了一个框计算，依我浅见像问答式的语义网（Semantic web）。代表国际领先水准的美国自然基金委员会也接连提出GENI（Global Environment for Network Innovations）和FIND（Future Internet Network Design）几个重大计划，以寻求下一代互联网的模式。在热炒了Internet2和Web 2.0之后，人们豁然发现在协议上追求一个更完善的互联网绝对是有必要的，但要称为“下一代”就太牵强了。

下一代互联网，是什么样子呢？

现实中，国民经济的发展对信息系统早已

提出了更高的要求。在经济的各主要领域，物理基础设施和信息基础设施的建设往往是分开进行的。一方面，人们不断地建设和完善周围的物理世界如机场、公路、建筑物、交通工具等；另一方面，人们也在不遗余力地发展数据中心、个人电脑、宽带网络等信息世界。两者是如此的割裂为两个次元。但现代经济的发展显然开始要求将计算技术拓展到整个人类生存和活动的空间，将人类的物理世界网络化、信息化，实现物理世界与信息系统的整合统一。

最先意识到这一点的是美国自然基金会，在近几年推出了Cyber-Physical Systems (CPS) 研究计划。CPS追求有效地联接诸如自动驾驶汽车、机器人、嵌入式医疗器械等物理设备，在物理设备和网络基础上，通过开发智能计算、通信、控制、新型传感技术，提供智能化的、快速响应的、满足用户需求的高质量服务，诸如结合传感器网络与移动通信技术的紧急救援与自动驾驶、建立车辆间网络辅助安全与自动化驾驶。CPS企图超越已有传感网各个系统自成一体、计算设备单一、缺乏开放性等缺点，更注重多个系统间的互联互通，并开发标准的互联协议和解决方案，同时强调与互联网进行联通，真正实现开放的、动态的、可控的、闭环的计算和服务支持。

真正打破这个僵局的场景出现在美国总统2009年1月28日与美国工商业领袖举行的“圆桌会议”上，奥巴马对IBM提出的“智慧地球”概念给予了非常积极的回应：“经济刺激资金将会投入到宽带网络等新兴技术中去，毫无疑问，这就是美国在21世纪保持和夺回竞争优势的方式”。智慧地球主张更透彻的感知，更全面的互联互通和更深入的智能化。奥巴马在一月份透露的经济振兴计划的核心就包括兴建高速公路等基础设施，对互联网宽带进行升级，对公共建筑物进行节能改造等内容。这个举措也使得物联网（Internet of Things, IoT）概念一举登上了网络大舞台。

什么是物联网，到今天并没有一个精准而公认的定义。按照我的理解，就是一个基于标准通信协议的计算机网络，让所有能够独立被寻址的对象都上网。物联网的出现必须归功于物流系统的现代化需要。现代物流系统希望利用信息生成设备，如无线射频识别（Radio Frequency Identification, RFID）、传感器，以及全球定位系统等种种装置与互联网结合起来而形成一个巨大网络。类似于条形码这种自动识别技术（Auto-ID），就是物联网的最初应用。除了物流领域，物联网还可以广泛应用在道路、交通、医疗、能源、家用电器监控等方面。物联网的发展将新一代信息化技术充分运用在各行各业之中，把诸如感应器、RFID标签等信息化设备嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、油气管道、商品、货物中，将它们普遍互联，并与互联网连接起来，形成“物联”。值得注意的是，物联网这个概念虽然来自于物流行业的需要，但是把它局限在物流领域里就显得视野太狭窄了。物联网无疑做到了十几年来人们一直想做的无线与有线在互联网上的有机融合；而潜在用户群一旦拓展到地球上所有的物体，摩尔定律竟然巧妙的继续有效了！

在这种意义上来说，下一代互联网的发展愿景立刻明晰起来。我们可以大胆假设下一代互联网将是物联化的互联网，或者称为“大物联网”。大物联网不仅局限于目前互联网中信息系统和设备的连接与组合，还将继承和极大地拓展大型计算、桌面计算、普适计算、CPS、物联网等计算模式的应用范畴，彻底地整合物理世界与信息系统，为未来人类建设统一的赖以生存的智能化环境。

大物联网的出现为传统互联网技术带来一场革命，未来世界的经济管理、生产运行、社会管理乃至个人生活等各种活动均会在大物联网之上进行。大物联网的突出特点表现在：

充分的互联互通和信息共享 地球上每

一个物体都可以嵌入包含其信息的可识别智能芯片或可以实现智能计算的信息化设备，使用无线及有线技术，通过大物联网与其他物体主动进行信息交换。这样，不但在物体和物体之间，用户和物理世界之间也智能地联结在一起。

突破虚拟和现实的界限 用户所面对的将是一个单一的世界——物联化的世界。这种智能化和泛在化的大物联网将遍布人类活动的整个空间，打破传统物理世界和信息系统的界限，将数据变成及时而有用的信息，让用户充分享用虚拟和现实世界的各种资源。

突破计算和服务的壁垒 大物联网中既存在着能力超级强大的中心计算机群，能够对整合网络内的人员、机器、设备和基础设施实施实时的管理和控制，也弥漫着各种各样的微型智能设备。计算资源和用户之间由于时空、地域以及设备差异所造成的壁垒和障碍将被打破，任何合法用户都可以在任何地点、任何时刻、对任何计算资源和服务的进行低成本地访问，实现所谓“A7”服务（Anytime Anywhere Affordable Access to Anything by Anyone Authorized）。

智慧型计算与服务 人们不需要关心实现计算的具体手段，也不用在意以何种形式获得计算和服务。大物联网将综合利用各种智能化设备获取人们的需要，满足用户个性化定制的需求。同时，大物联网也有效地支持诸如云计算、富互联网应用、注意力经济、个性化服务等多种新型的计算模式。这种智能型的服务模式将给人类带来巨大的经济效益，并创造出新的应用领域。人类可以以更加精细和动态的方式管理生产和生活，达到所谓的“智慧”状态，提高资源利用率和生产力水平，改善人与自然间的关系。

如果能确定物联网就是下一代互联网真正模型，那么发展大物联网就成为我国提升综合国力的宝贵契机：此时此刻全世界都在一个起跑线上。2009年8月7日，温家宝总理在视察中

国科学院无锡高新微纳传感网工程技术研发中心时强调，当计算机和互联网产业大规模发展时，我们因为没有掌握核心技术而走过一些弯路，在传感网发展中，要早一点谋划未来，早一点攻破核心技术。他还指出必须依靠科技创新和提高人才素质，培育新的增长点，在经济发展和科技创新上占领制高点，这样才能保证国家可持续发展能力和竞争力。而传感网显然就是大物联网目前可见的一个有效起点。

我国发展和推广大物联网的挑战主要源于现有的基础设施、系统架构、技术水平距离实现物联网的目标还有较大的差距：（1）应用基础薄弱，硬件、网络等基础设施信息融合度低，对传感器、RFID等新技术的应用不足；（2）标准化工作滞后，为了弥补应用标准与应用需求不匹配的差距，在很多领域不得不采用现有的国际标准或既有行业标准作为过渡。在标准化方面的滞后也严重影响着我国在国际上的话语权；（3）平台服务质量亟需改善，在大物联网发展依赖的信息平台、金融服务及交易平台以及物理平台等方面的发展水平较低；（4）安全及隐私壁垒。现在的互联网不能满足未来大物联网对安全及隐私保护的要求。同时，我国尚缺乏对构建大物联网涉及的敏感和隐私信息的保护、交易安全、信息系统安全、安全认证和审计、信任机制等问题的系统研究。

让历史告诉未来，永远都只能是雾里看花。当我们十年、二十年之后来看今天这些文字，也许充满了错误。但是，如果我可以有一句豪迈的话来结束这个小小探讨的时候，我想说，既然IPv6给每个尘埃一个独立的IP地址，现在可以认真地考虑把他们连起来了。■



刘云浩

香港科技大学计算机科学与工程系副教授。主要研究方向为传感器网络、对等网等。

liu@cse.ust.hk