

Internet——一个开放的复杂巨系统*

戴汝为** 操龙兵

(中国科学院自动化研究所系统复杂性研究中心, 北京 100080)

摘要 从系统学的角度, 剖析与揭示 Internet, 阐述 Internet 是一个开放的复杂巨系统, 处理 Internet 系统及其相关问题的方法论是综合集成法; 进而探讨采用开放的复杂巨系统理论对 Internet 中的有关问题进行研究的可行性; 最后, 从工程技术角度, 讨论利用综合集成法处理开放的复杂巨系统的体系结构问题, 以及面向 Agent 的开放巨型智能系统的设计模式.

关键词 Internet 开放的复杂巨系统 从定性到定量的综合集成法 超链接 动力学特性
开放巨型智能系统

1990 年, 钱学森院士等中国学者, 从系统科学的观点出发, 分析自然界和人类社会中的一些极其复杂的事物, 总结和提炼出用开放的复杂巨系统来进行描述; 并且指出, 在目前处理这种复杂系统的方法论只能是从定性到定量的综合集成法^[1]. 这套理论框架的提出, 开辟了开放的复杂巨系统这个新的科学领域. 近几年, 被称为“大规模”系统^[2]的研究在国际上受到越来越多的重视. 这种所谓的大规模系统与开放的复杂巨系统在系统复杂性上具有一定的相关性, 但是它们相关的研究只是局部与技术性的, 特别是缺乏一套有效的方法论指导与明确系统描述.

Internet 在国际上正被作为大规模系统的典型实例加以研究. 从系统科学的角度, 可以认为 Internet 是一个典型的、具体的开放的复杂巨系统实例; 分析清楚这个系统, 对于人们更具体地分析、研究与 Internet 有关的问题, 研究和处理开放的复杂巨系统问题, 提供了可供借鉴的途径.

1 开放的复杂巨系统的特性概述

钱学森^[1]等首次向世人公布“开放的复杂巨系统”(open complex giant systems)这一科学的新领域及其基本观点后, 学者们对人脑系统、人体系统、地理系统(包括生态系统)、社会系统等进行了研究, 认为它们无论在结构、功能、行为或演化方面都很复杂, 都是开放的复杂巨系统^[1,3].

开放的复杂巨系统具有以下特性^[4]:

(1) 系统与外部环境, 以及子系统之间存在能量、信息或物质的交换. 就系统与环境的关系而言, 开放表现为最复杂与常见的不可访问性的、不确定的、动态连续的环境类型.

(2) 从已经认识的比较清楚的子系统到可以宏观观测的整个系统之间层次很多, 甚至有

2002-08-14 收稿, 2003-01-10 收修改稿

* 国家自然科学基金重大基金资助项目(批准号: 79990580)

** E-mail: ruwei.dai@mail.ia.ac.cn

几个层次也不清楚;系统子系统或者组件的组成模式多种多样,有的甚至不清楚具体模式,或是一些基本模式的组合或变异体.

(3) 系统是由时空交叠或分布的组件构成的;肩负不同角色的组件间通过多种交互模式、按局部或者全局的行为法则(如社会理性原则等)平等交互,涌现出宏观与整体形态.

(4) 系统的组成、组件类型与状态、组件之间的交互,以及系统行为随时间不断改变;系统中子系统或基本单元之间的局部交互,经过一定的生命周期之后在整体上演化出一些独特的、新的性质,形成某些模式.

(5) 系统中基本单元或子系统的数目极其巨大,从成千上万甚至到数以亿计.

此外,许多开放的复杂巨系统,如与社会有关的巨型系统,还表现出人机共存(human-computer coexisted)的特点:在系统体系中存在人这个高级智能组件,人既是系统的组件,也是系统演化发展的关键因素;求解问题的复杂性不能仅靠机器处理,需要发挥人及其群体的常识知识与创造性.

开放的复杂巨系统理论刚诞生时并没有为广大的科技界所认识.此后,经过两次香山科学会议中来自各个领域的专家学者就多个领域进行了报告和相关的讨论,使大家对开放的复杂巨系统及其方法论有了进一步的理解和更深的认识.近些年来,关于开放的复杂巨系统的研究又有了较大的发展,这一理论及其方法论被纳入学科前沿,并且以宏观经济决策系统作为开放的复杂巨系统的具体事例,设立了国家自然科学基金重大项目“支持宏观经济决策的人机结合综合集成体系研究”,围绕这个项目正在进行大量的研究与综合集成体系支撑环境雏形系统设计工作.

钱学森院士谈到,人认识问题只能从具体事例入手,要从解决一个个开放的复杂巨系统问题开始^[5].对于确定要研究的开放的复杂巨系统,越接近人们的日常活动,与人的关系越密切,系统结构、行为、功能、演化越易于为人理解的系统,分析解决起来越容易为人所接受,这样的系统的研究对于促进人们对开放的复杂巨系统及其方法论的认识,推进开放的复杂巨系统的研究具有促进和示范作用.

2 以开放的复杂巨系统的观点探讨 Internet

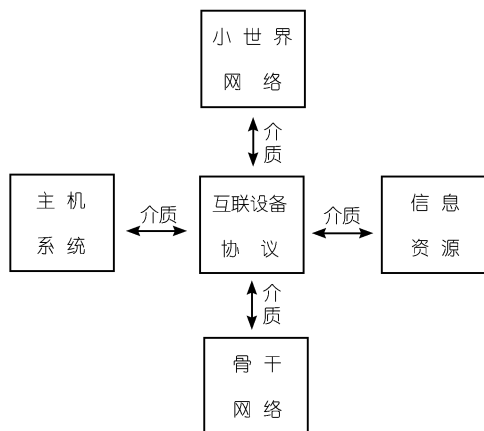


图 1 Internet 系统物理组成

Internet 是一个极其复杂的网络系统:只有从系统学的角度,才有可能认识和分析清其本质.

2.1 Internet 系统结构

从工程技术的角度看,可以认为 Internet 是由以下要素组成的一个五元变量组:

$\text{Internet} = \{\{\text{人、组织、机构}\}, \{\text{主机系统}\}, \{\text{互联设备, 协议}\}, \{\text{介质}\}, \{\text{信息资源}\}\}.$

这种结构分析方法突出了物理特点(如图 1),不利于从整体上把握 Internet 系统的本质.从系统学的角度,有必要尽量避免其技术细节,而抽取 Internet 中的主要因素加以研究. Internet 为用户提供的绝大部分的信息交互是通过 WWW 方式实现

的. 因此, 从分析万维网入手, 可以掌握 Internet 系统的本质. 这就是本文阐述 Internet 为开放的复杂巨系统的出发点, 而不打算从物理角度讨论其技术和实现环节.

Internet 作为一个大规模的复杂系统, 这里参照专为研究复杂系统而兴起的多智能体系统中的术语^[6]加以描述¹⁾. Internet 系统的组成可以抽象为一个由维度(dimension): 物理维(physical)、自我维(self)、社会维(social)与关系维(relational)组成的四维模型(见表 1).

表 1 Internet 系统的四维模型

物理维	主机、超链接、站点
自我维	人、组织、机构
社会维	社会政治、经济、意识形态
关系维	控制型、对等型、依存型、所有型

就物理维而言, 构成万维网的基本单元是节点所在的主机系统; 节点之间通过超链接机制互联. 于是 WWW 就可以看作由主机系统和超链接组成的集合体, 各主机系统之间通过超文本文档中的超链接联系起来²⁾. Internet 系统的组成环境包括自我维与社会维两个层次, 自我维表现为 Internet 系统的微观角度, 包括用户或组织、机构甚至国家或地区; 社会维指社会系统的宏观层次, Internet 构成并变革着社会经济系统、社会政治系统、社会意识系统. Internet 组件之间表现出控制、对等等多种关联与交互关系.

对 Internet 的拓扑结构的研究表明, 由于新的网页(节点)不断增加, 并与系统的本质与组成无关^[2]; 以及新网页不断链接到已经拥有大量连接的网页之上; 一个网页链接到其他 K 个网页上的概率呈幂律分布 $P(k) \sim k^{-r}$ ^[2], 而使 Internet 的拓扑结构表现出常见随机网络所罕见的尺度无关(scale-free)特性^[2, 7, 8].

2.2 WWW 自组织机制

万维网 WWW 通过超文本文档组织信息. 超文本是包含由一些词、短语、句子或小图片等作为超链接的指针的复合、非顺序、相互关联、具有非线性结构的文档, 为用户提供树状纵深型的相关主题的关联与联想, 符合人类思维方式与学习环境. 用户按键盘或点击鼠标可以进行横向或纵向相关资源的指针串的定位, 通过浏览器在本地激活目标信息. 由超链接指针串向纵深连接下去, 就组成了一个动态的非线性链表; 而众多超链接指针串的纵横深入就形成了难以计数的、动态变化的、彼此交融的信息链网, 这样就把 Internet 上看似孤立、杂乱的所有超文本信息组织在一起, 构成一张巨大的、遍及全球的动态互联网络.

虽然这些信息链深度不一, 主次难辨, 也无法区分起止点. 但是, 当就某一主题在 Internet 上搜索与之相关的网页时, 一些网页或所在的节点中的服务(具有关于本主题的内容较全面、更新较快、联接畅通性好等特点)是被访问次数最多的网页(或节点)之一, 成为该主题的权威网页(或节点); 另一些则是访问各信息链时经过次数最多的网页(或节点), 为中心网页(或节点)(这些网页具有指向权威网页的热链接或链接目录列表). Internet 上的这些权威或中心网页以更高的概率连接到其他网页上, 并进而自组织出现网页本地聚集效应^[8]. 这些实时演变的聚集群体构成了 Internet 的子系统, 子系统千姿百态、数量巨大, 子系统之间彼此交融、动态转换, 这个网络极强的自组织能力使其形成一个极为复杂却与尺度无关的人工演化网络^[9].

Internet 超链接的分布规律表明, WWW 通过这种超链接的信息存储组织结构极大地加强了信息的组织和搜索能力(Google³⁾搜索引擎充分利用 WWW 自组织机制而获得巨大成功), 形

1) 这种参照是基于二者之间的密切联系^[4], 第 4 节将讨论基于多智能体的开放巨型智能系统的问题
2) 这种简化一是由于主机系统、超文本文档和超链接是用户实现访问 Internet 时直接面对和操纵的关键要素, 二是也便于避开 Internet 中的诸多因素而抽出主要环节以认识其实质
3) www.google.com

成乱中有序、动态中的相对稳定。

2.3 Internet 系统动力学特性

Internet 是一个综合了连接网络的无论何时、何地、何人、何种形式、何种内容的信息,以不确定性的形式、不确定性的时间进行着不确定内容的动态交互作用形成的动态系统。这个系统完全具备了开放的复杂巨系统的动力学特征。

开放性: 构成 Internet 的主机之间、网页之间通过超文本、联接协议实现信息、数据与知识的实时增减、共享、搜索、传递或转移。对 Internet 而言,人既是用户,又是它的缔造者。在全球客户不确定、长期的、动态连接的自发努力下,Internet 的社会形态和智能逐步实现。人们在接入 Internet 获取大量知识、信息和服务的同时,还从中获得灵感、他人的经验与智慧,发展自己的知识、思维和能力,形成 Internet 自我与社会层上的趋同与本地聚集效应;并进而作用与改变着社会政治、经济、文化和意识形态。Internet 已经成为人类发展和进步的源泉和动力之一,并成为影响国家安全与发展战略的重要因素。可见,Internet 的形成与发展、智能的涌现是开放与交互的结果。

层次性: Internet 是由分布于世界上的难以计数个子网互联而成的,这些子网时大时小,拓扑结构灵活多样,所处的层次时深时浅,运行环境千姿百态,接入方式繁杂多变。就某个指定的网络而言,在 Internet 上具有所处层次的动态不确定性、连接模式的多样性和路由的动态随机性;但就 Internet 的拓扑结构而论,却是自组织而成的尺度无关的演化形态^[2,8,10]。构成 Internet 的主机、网络在这样复杂多样、层次交叠、动态多变中,进行信息、数据、服务之间的交互、转移、生灭,形成了 Internet 系统的动态、连续、不确定的系统状态。

从环境要素看,由人主导的与 Internet 密切相关的社会经济、政治和意识系统,因网络所在国家或地区的文明多样性,通过 Internet 交汇在一起,彼此冲击与作用,在碰撞中吸纳与演变,演化出本源与趋同等多种形态。从微观角度看,因个人或组织所处的社会背景的不同,人的知识、意识、行为等各具特色,千人千面。因此,整个 Internet 系统呈现出明显的层次动态变化与组件的多样性。

演化性: Internet 演化出的整体形态表明无法在设计时确定运行时的状态。尽管主机和网络的动态行为难以确定,接入、互联与交互内容和形式极其随机而复杂: Internet 上没有统一的指挥和调度,整个系统似乎处于混沌状态。但是,基于本地位置透明性与节点连接呈幂律分布的超链接互联机制,Internet 这个大规模网络表现出极强的自组织演化能力,涌现出反直觉的尺度不变性,这是现有的随机网络中难以见到的。Internet 的生长与积累、优先连接性使系统处于动态适应与调节,使得这个表面上处于无政府状态、不存在全局管理者或拥有者、由数以亿计的处于自发与平等地位的链接与用户所构成的巨型系统,在整体上表现出明显的自组织特性。多样性、竞争性与选择性的存在,使一些能够满足技术、应用和人类需要的形态得以不断强化,在整体层涌现出特征明显的模式与形态,如网页通过超链接自组织作用涌现出权威网页和中心网页的组织模式^[11], Web 网络中节点与年龄无关的呈幂律分布的连通性^[12,13],以及拓扑结构的尺度不变性,使得 Internet 系统动力学特性具有明显的反直觉与惊奇效应。而“小世界”网络现象的研究^[14]则反映了网站之间并不是一种随机链接关系,而是倾向于组成一个个紧密的“关系联盟”。这种长期的、不同形式与过程的演化发展的结果,使整个系统趋向更高级的有序化发展,自组织形成了一个动态、有机的整体,并涌现出整体性的行为和智能,从

而形成一个人工生态知识系统.

另一方面, Internet 在社会层出现如网络经济、全球化趋势加强、Internet 上强势文化、Internet 的局部失效的强健性与局部攻击的脆弱性等现象, 则是 Internet 系统复杂性在社会层面上的自组织突现, 是 Internet 系统在演化的过程中深刻地影响与改造社会政治、经济与意识形态所涌现出的形态与系统行为.

巨量性: 据估计, Internet 所链接的网络已超过 100 万个, 1 亿多台计算机连接在 Internet 上, 超过 10 亿用户使用 Internet, WWW 上每天新增的网页超过 100 万个, 这些以多种媒体表达的海量信息通过 10 亿以上的超链接松散地联系在一起. 目前, 整个 Internet 上的信息总容量已经难以估计.

面对 Internet 的发展, 已经不能进行常规的预测; IBM Almaden 研究中心的专家们认为有把握说的只有一句话, 那就是万维网 WWW 势不可挡的发展将继续对这一越来越庞大的网上信息库提出计算上的挑战^[11]. Internet 组件的巨量性, 使其构成巨型人工系统.

3 Internet 系统的研究方法 with 主要研究问题

前面说明 Internet 系统是开放的复杂巨系统, 那么如何研究 Internet 系统呢? Internet 中的哪些问题需要采用巨系统的观点加以研究呢?

3.1 Internet 系统的研究方法

前文已经提到, 尽管 Internet 中单元和子系统数目庞大、交互复杂、无集中控制; 但在整体上, Internet 是一个演化的人工生态系统. 在 Internet 产生和发展过程中, 几乎综合了全人类的、整个科学技术体系、古往今来的科学理论、数据和知识, 结合了人的知识、经验、直觉与智慧, 在其发展历程中体现了从定性到定量的综合集成的思想: 通过人机结合的形式, 根据需求, 制定目标, 大胆设想, 定性汇总, 建立模型, 实验检测, 发现问题(还包括随着对系统的了解的深入新增的需求, 目标和假设), 修正需求、目标和假设, 完善模型, 实践修正, 经过多次、多层次、反复的实践与补充, 逐渐形成了今天这样的形态, 而今天的形态还处于演化和发展之中. 可见, 这个动态的发展过程就是一个从经验、假设、半理论半经验逐步过渡到定量结果的认识、技术更新与系统演化的过程; Internet 是综合集成的结果, 是人类的一项大成智慧工程.

作为一个人机共存、人网合一的人工开放巨型系统, Internet 表现出很高的智能性与社会性, Internet 实质上是一个开放的巨型智能系统^[4, 15], 人的因素在这个系统的演化过程中扮演着主导角色. 研究这个系统, 有效的途径是采用从定性到定量的综合集成法, 就是把还原论与整体论结合起来的系统论的方法^[16].

3.2 Internet 系统的主要研究问题

Internet 作为一个开放的复杂巨系统, 特别是其与社会政治、经济与意识形态之间的密切联系, 突现出就有关问题进行系统研究的必要性. 在系统层次与社会层次方面的研究还有待开展. 目前 Internet 系统与社会层的主要研究问题包括但不限于以下方面:

3.2.1 Internet 系统的动力学特性 Internet 作为一个系统, 具有什么样的动力学特征? 这个问题已经引起物理学、数学、系统学等多个交叉学科的兴趣. 关于 Internet 系统所具有的即便失效强度达到不现实程度节点的通信也不受影响的难以预料的强健性与受主动攻击时的脆弱性^[9, 17]、拓扑结构的尺度不变性^[2]、用户增长与业务量发展中的“富者更富”现象^[2, 7, 10]、

“不可靠的组件形成可靠的系统”与“局部失效无关全局”的容错能力^[9]、极低的流行阈值导致的主动攻击的病毒极易大规模扩散^[17]、极强的自组织演化能力^[12]等, 尽管已经得到一些初步的认识; 但是, 关于 Internet 规律性的上述认识的正确性, 以及系统动力学规律的理论体系与计算机仿真研究^[18]等都还刚刚起步. 比如, 采用非线性和统计物理方法研究个别行为与大面积分布的 Internet 整体行为之间关系^[19]、Web 系统的直径^[20]、WWW 中存在的“小世界”网络的聚集倾向的研究^[13]; 又如, 作为人工知识生态系统, 是否存在像自然生态系统那样的优胜劣汰、适者生存的规律维持着个体与系统间的动态平衡、整个系统的“乱中有序”与“以不变应万变”的魔力呢? 人的在线角色又是如何平衡环境选择与 Internet 系统的动态适应呢? 系统动力学特性的研究对于具体技术发展与系统整体规律的把握无疑都是极为重要的.

3.2.2 Internet 与国家安全 Internet 的失效强健性与攻击脆弱性关系到系统物理与社会维的安全, 是 Internet 生长与演化的主要问题之一. Internet 的系统安全措施包括物理与社会两方面. 物理方面, 具有尺度不变性的 Internet 系统并不需要社会网络中病毒大规模流行所需的那样明显的“流行阈值”^[17], 从而加快了计算机病毒的传播速度与范围, 增加了系统不稳定性与预防难度. 因此, 应结合 Internet 的组织结构与机制研究如何阻止病毒的大范围传播, 防止系统局部攻击对整体的影响与防扩散机制等. 人为因素越来越成为 Internet 安全的主要问题, 其重要性关系到网络运行、国家战略与国防安全. 人为利用 Internet 进行蓄意窃听、窃取、攻击与诱导等, 已经构成正常工作与生活、经济发展、商业机密、国家战略与国防安全的高技术威胁. 应加紧从 Internet 组织机制角度研究网络窃听与反窃听、基于行为的攻击与主动防御等技术, 大规模网络的监视、管理与防御机制等.

3.2.3 Internet 与高新技术产业模式 Internet 已经成为科技创新与商业发展的用武之地, 经济全球化的依托平台. 企业加快工业化向信息化发展步伐, 适应网络经济突现的挑战与机遇, 必须主动研究 Internet 用户与服务的发展模式给企业信息化与全球化带来的商业运作模式与机会. 比如, 关于 Internet 的节点连接、用户增长与业务量发展、Web 拓扑结构与超链接分布、用户冲浪规律^[13,21,22]等研究中所发现的明显规律性, 为企业主动适应与发挥 Internet 特点, 立足高新技术, 构建自己的智能信息化平台、商业模式与发展战略提供了依据与成功的源泉. 当然, Internet 给国家与企业带来的机遇与问题还非常多, 急待研究.

3.2.4 Internet 计算问题 Internet 为开展无处不在的计算创造了条件, 可也带来了计算上的难度. 基于 Internet 的企业信息协作系统的智能化决策、多媒体信息检索与知识发现、路由的选择、高速宽带网络的建设、移动计算等, 都因 Internet 的系统复杂性而成为高技术竞争的焦点. 在这场关系国计民生的竞争中, 研究和适应 Internet 系统的动力学特点, 有利于主动寻找关键突破口. 比如搜索引擎的设计^[23], Google 充分利用 WWW 组织机制, 通过挖掘超链接中的隐藏的信息, 将搜索 Internet 看作民主投票, 根据网页被链接次数进行网站的排序; 如果是权威或中心网站, 则加权计分, 而使其成为 WWW 上规模最大、最准确、最快捷的搜索工具.

应该说, Internet 作为一个人工物理与社会系统, 还有众多的问题有待研究, 这些研究的开展对于抢占高新技术制高点、增强企业与国家竞争实力, 都具有重要性与紧迫性.

4 基于 Internet 的开放巨型智能系统

Internet 的发展与普及, 为设计大规模分布式系统以开展复杂巨系统的研究创造了技术与

环境条件;同时,由于它本身就是一个人网结合的极其典型的综合集成系统^[24],为解决其他的开放的复杂巨系统问题提供了可以使用或借鉴的系统思想、技术和平台.构建基于 Internet 的开放巨型智能系统,是处理开放的复杂巨系统问题的工程途径.具体地说,就是在从定性到定量的综合集成法的指导下,以 Internet 作为平台与技术基础,建设基于 Internet 的人机协作的网络研讨厅,发挥全球性的 Internet 基础设施、相关的人力资源与数据信息的综合优势,处理常规技术与环境下难以解决的开放的复杂巨系统问题^[4,25].

研究和解决开放的复杂巨系统的综合集成研讨厅就其实质而言,是将专家群体(各领域有关的专家)、数据和各种信息与计算机、网络等信息技术有机地结合起来,把各种学科的科学理论和人的知识结合起来,由这三者构成系统,这种类型的系统是基于 Internet 的.所说的综合集成研讨厅由研讨终端、中心研讨厅、研讨厅骨干网(Internet 或 WAN)、研讨厅管理服务系统、研讨厅信息资源库,以及分布各地的感兴趣的和相关的研讨群体和技术支持群体组成^[26].

网络研讨厅采用基于 Intranet/Internet 模式、多媒体技术、虚拟现实技术、数据与知识库(汇集以往的知识、现有的知识、研讨中得到的知识,即汇集各种相关的数据与信息,专业知识、经验知识等,以及数据库管理系统)、模型库(汇集模型、参数、算法、事例、现场建模等,以及模型库管理系统)、专家系统、决策支持系统、知识工程和情报分析技术;视频会议系统、多通道人机交互(如手写与语音输入)及信息家电等接入终端与技术;建立一个既有广泛的远程研讨人参加的、又有专家群体在中心研讨厅进行最终研讨决策的、大规律、分布式、自下而上递进式、人机动态交互性的研讨、决策体系,为决策的科学化与民主化提供支持.

近年兴起的多智能体(multi-agent)技术^[6,27]具有自主求解与运行时决策、宽而松散的粒度抽象、社会性交互机制、灵活的组织框架与演化机制、人与 Agent 的交互优势等,具有应付开放巨型智能系统复杂性的潜在抽象与计算机制,适于作为构建基于 Internet 的开放巨型智能系统的计算模式^[4].采用面向 Agent 的模式设计的综合集成研讨厅的探索表明,与常规的计算模式相比,具有适于建设大规模分布式系统、更大的灵活性、更快的响应性能和对网络性能的低需求等特性^[25].另外,由于诸如 Internet 的开放的复杂巨系统所具有的特殊复杂性,主流的面向 Agent 的抽象机制尚不足以处理这类系统的社会性.为此,我们提出了一种面向 Agent 的开放巨型智能系统的社会性抽象机制^[4,28],建立基于社会抽象的面向 Agent 的理论基础与设计方法、社会性交互机制、MAS 组织框架与 Agent 构件模式等面向 Agent 的开放巨型智能系统的分析与设计机制,将基于 Agent 的开放巨型智能系统建成一个多 Agent 社会,从而有可能开展人工生态知识系统(如 Internet)的计算机仿真与建立实用开放巨型智能系统的分析与设计体系.

5 结论

自从 20 世纪 90 年代初开放的复杂巨系统及处理这类系统的方法论提出至今 10 多年来,通过多个领域的专家的共同努力,从系统学角度,已经揭示出了社会系统、人体系统、地理系统、人脑系统等在系统本质上是开放的复杂巨系统.这些系统都从根本上与自然界密不可分,具有很强的自然演化发展的特点,不太容易让大家深入理解.而 Internet 系统基本上可以看作是人类在研究和改造自然的过程中为服务于人类而创造出来的具有网络智能的、全球最大的人工机器系统与特殊复杂的社会系统的结合物,这个系统汇聚着自然界和社会的过去、现在和未来,关系到人们的日常工作与生活,国家的战略与安全;又由于这个系统具有很强的技术性

和工程性, 比如容易为人们所认识和理解. 因此, 弄清楚这个系统的本质, 对于丰富开放的复杂巨系统理论体系与 Internet 的发展与利用都具有极其重要的意义; 但只有从系统学的角度, 才能认清和把握它的本质和规律, 即 Internet 系统是一个开放的复杂巨系统. 这个系统本质认识的确立对于更加生动、具体地理解、研究和应用开放的复杂巨系统理论, 具有示范和解析作用.

Internet 是一个演化而成的综合集成系统, 是人类的一项大成智慧工程, 可以采用系统论的观点, 应用从定性到定量的综合集成法从整体上分析和处理 Internet 以及相关的系统问题. 研究和解决其他的开放的复杂巨系统可以使用或借鉴 Internet 系统思想、技术和平台. 基于 Internet 构建面向 Agent 的综合集成研讨厅是处理开放的复杂巨系统的一个有效工程途径, 这种开放的巨型智能系统具有应付开放的复杂巨系统的特殊复杂性的潜力与机制.

参 考 文 献

- 1 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学的新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. 自然杂志, 1990, 13(1): 3~10
- 2 Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science, 1999, 286: 509~512
- 3 王寿云, 于景元, 戴汝为, 等. 开放的复杂巨系统. 浙江: 浙江科学技术出版社, 1996
- 4 戴汝为, 王 珏. 巨型智能系统的探讨. 自动化学报, 1993, 19(6): 47~64
- 5 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统. 模式识别与人工智能, 1991, 4(1): 5~8
- 6 Ferber J. Multi-agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence. Boston: Addison-Wesley, 1999
- 7 Albert R, Barabasi A L, Jeong H, et al. Power-law distribution of the world wide web. Science, 2000, 287: 2115
- 8 Albert R, Barabasi A L. Topology of evolving networks: Local events and universality. Physical Review Letters, 2000, 85: 5234~5237
- 9 Albert R, Barabasi A L, Jeong H. The Internet's Achilles heel: Error and attack tolerance of complex networks. Nature, 2000, 406: 378~382
- 10 Bak P. How Nature Works. New York: Springer-Verlag, 1996
- 11 Members of the Clever Project. Hypersearching the Web. Scientific American, 1999, 280(6): 54~60
- 12 Bianconi G, Barabasi A L. Bose-Einstein condensation in complex networks. Phys Rev Lett, 2001, 86: 5632
- 13 Huberman B A, Piroli P, Pitkow J E, et al. Strong regularities in world wide web surfing. Science, 1998, 280: 95~97
- 14 Adamic L. The small world web. In: ECOL'99 LNCS. Springer, 1996
- 15 戴汝为, 王 珏, 田 捷. 智能系统的综合集成. 浙江: 浙江科学技术出版社, 1995
- 16 钱学森. 创建系统学. 太原: 山西科学技术出版社, 2001
- 17 Pastor-Satorras R, Vespignani A. Epidemic spreading in scale-free networks. Phys Rev Lett, 2001, 86: 3200~3203
- 18 Cowie J, Nicol D M, Andy T. Ogielsky. Comp in Sci & Eng, 1999, 1: 42~50
- 19 Maurer S M, Huberman B A. Competitive Dynamics of Web Sites, Research Report, Xerox Palo Alto Research Center
- 20 Albert R, Jeong H, Barabasi A L. The diameter of the world wide web. Nature, 1999, 401: 130~131
- 21 Shrager J, Hogg T, Huberman B A. Observation of phase transitions in spreading activation networks. Science, 1987, 236: 1092~1094
- 22 Carlson J M, Doyle J. Highly optimized tolerance: Robustness and design in complex systems. Phys Rev Lett, 2000, 84: 2529~2532
- 23 Lawrence S, Giles C L. Accessibility of information on the web. Nature, 1999, 400: 107~109
- 24 操龙兵, 戴汝为. 集智慧之大成的信息系统. 模式识别与人工智能, 2001, 14(1): 1~8
- 25 操龙兵, 戴汝为. 综合集成研讨厅软件体系结构研究. 软件学报, 2002, 13(8): 1430~1435
- 26 Cao Longbing, Dai Ruwei. Human-Computer Cooperated Intelligent Information System Based on Multi-Agents. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(1): 86~94
- 27 Wooldridge M. Agent-based software engineering. IEE Proceedings on Software Engineering, 1997, 144(1): 26~37
- 28 Cao Longbing, Dai Ruwei. Social abstraction for Agent-based open giant intelligent systems. In: the 2002 International Conference on Intelligent Information Technology, September. Beijing, China. 2002. 22~25