软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华

王飞跃 [1,2]

摘 要 知识自动化是智能化、人机化、自动化等的有机融合. 从 Cyberspace、社会信号和默顿系统等的兴起这一时代特征为出发点, 讨论知识自动化的意义与相关发展问题, 从智能算法到知识机器人讨论其技术基础及趋势, 从软件定义的系统和流程探讨其与系统工程的内在关联, 从平行系统的角度阐述其在复杂控制和管理过程中的重要作用.

关键词 知识自动化, 知识机器人, 网络空间, 社会信号, 默顿系统, 平行系统, 平行控制, 社会物理网络系统

引用格式 王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华. 自动化学报, 2015, **41**(1): 1−8

DOI 10.16383/j.aas.2015.c000001

Software-defined Systems and Knowledge Automation: a Parallel Paradigm Shift from Newton to Merton

WANG Fei-Yue[1,2]

Abstract Knowledge automation is the organic integration of intelligentization, human-machine, automation etc. From the perspective of social signals and Merton systems, we address issues related to the significance and development of knowledge automation. Key topics discussed are technical foundation for smart algorithms and knowledge robots, software-defined systems and processes from the viewpoint of systems engineering, and the important role played by knowledge automation in parallel systems for the control and management of complex systems.

Key words Knowledge automation, knowledge robots, cyberspace, social signals, Merton systems, parallel systems, parallel control, cyber-physical-social systems

Citation Wang Fei-Yue. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(1): 1−8

何谓知识自动化? 为何知识自动化?

知识自动化最直接、最直观、最简单的定义就是: 知识工作的自动化[1]. 其实, 这只是把 "知识自动化" 的定义问题转化为 "知识工作" 的界定问题, 而且不能反映出知识自动化全部与本质性的内涵. 然而, 2013 年麦肯锡全球研究所发布《颠覆技术: 即将变革生活、商业和全球经济的进展》的报告[2], 预测了 12 项可能在 2025 年之前决定未来经济的颠覆性技术, 其中代表 "知识工作的自动化" 之智能软件系统位居第二, 列于 "移动互联网" 之后, "物联网和云计算" 之前; 这一分析预测使得 "知识自动化" 就是 "知识工作的自动化" 的认识一时风行于整个世界, 引起业内外的一片热议, 客观上推动并普及了知识自动化的理念和认识. 麦肯锡的报告对什么是 "知识工作" 也从三个方面作了简短的界定, 按照文献 [3] 的总结, 可以概括为: "所谓知识工作, 泛指那些需要专门知识、复杂分析、细致判断及创造性解决问题技巧才能完成的任务". 显然, 这差不多还是定义的转移再加文学上的描述, 但也确实反映了知识自动化领域目前的现状.

为什么需要知识自动化? 简洁的回答就是: 工业时代需要工业自动化, 知识时代必须知识自动化. 工业时代的发展在许多方面对人类的体力提出了 "非分" 的要求, 迫使人们必须依靠工业自动化的手段来 "补偿" 其体能上的不足, 才能够去实施、运营、维护各类大型或精密的系统和过程; 同理, 面临物联网、大数据、云计算、智能技术等, 正在迅速兴起的知识时代也对人类的智力提出了更高、更加 "非分" 的要求, 人们更需要借助知识自动化的方法来 "弥补" 其智能上的不足, 进而才能去完成各种层出不穷的不定、多样、复杂任务[4].

收稿日期 2014-11-01 录用日期 2015-01-07
Manuscript received November 1, 2014; accepted January 7, 2015
国家自然科学基金 "平行管理" (71232006) 和 "平行控制" (61233001) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China "Parallel Management" (71232006) and "Parallel Control" (61233001)
本文责任编委 刘德荣
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong
1. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190 2. 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术中心 长沙 410073
1. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190 2. Research Center of Military Computational Experiments and Parallel System, National University of Defense Technology, Changsha 410073

如文献 [3−4] 所指出的, 一项知识工作一般包含许多活动, 具有很强的不确定性、多样性、复杂性 (UDC: Uncertainty, diversity, complexity), 故与工业或制造自动化不同, 很难通过自动化完全取代人在其中的作用. 除了像打字、电话接线、银行柜台、机票登记等简单的任务可以通过计算机和软件代替人外, 多数情况下自动化工具只是减轻了人的工作量, 但仍需要人的合作才能完成整个的知识工作. 因此, 不论狭义的知识工作的自动化还是广义的知识自动化, 往往都不能完全把人替掉, 但却对人的技能和知识水平提出了新的要求. 目前, 实现知识自动化之主要方法和技术包括智能控制、人工智能、机器学习、人机接口、基于大数据的智慧管理等, 但从物理过程的自动化到虚拟空间里的自动化是培育和发展知识自动化的关键.

根据麦肯锡的报告, 目前各领域已有 2.3 亿余知识工作者, 占全球雇员的 9 %, 但雇用成本却是相应全球成本的 27 %. 该报告预计到 2025 年, 知识工作的自动化每年可直接产生 5.2 ∼ 6.7 万亿美元的经济价值, 不计自动化所带来的效率间接提高, 相当于额外 1.1 ∼ 1.4 亿个全职雇员的产出. 然而, 在此报告所预测的 12 项颠覆技术之中, 知识工作的自动化受到媒体关注的程度差不多是最低的, 与其在人人所关心的许多方面可能担当的主导角色十分不符, 如未来工作性质的改变、组织结构的改变、经济增长的驱动方式、提高生产力的途径等. 实际上, 就是在自动化专业人士之中, 由于过去主要关注的是物理过程的自动化, 较少有人重视甚至意识到知识工作的自动化之重要性; 特别是很多人认为这属于人工智能或计算机领域, 没有从建模、分析、控制、管理等过程自动化的角度系统性地将方法与应用有机地结合起来, 认清其知识自动化的本质[3]. 显然, 这一状态需要尽快改变, 中国学者可以在这方面发挥重要和引导性的作用.

近年来, 中国学者十分关注知识自动化这一新兴领域, 积极投入相关问题的讨论与研究[5−9]. 特别是在流程工业的知识自动化方面, 国家自然科学基金委员会信息学部多次组织相关学者举办了包括 "双清论坛" 在内的学术及战略研讨会, 初步形成流程工业知识自动化研究和应用的共识与规划. 国际上, 知识自动化的工作目前主要由相关企业推动, 关注市场需求、生产管理和产品功能; 学术界, 特别是控制领域, 还鲜有人参与讨论和研究. 然而, 知识自动化必将在智慧社会、智能产业、智能制造及所谓的 "工业 4.0"、"工业 5.0" 中起核心的作用, 我们必须关注相关的发展态势和趋势[10−15]. 一定程度上, 在知识自动化的研发上, 中国学者起步早、起点高, 希望能够尽快形成知识自动化的体系框架, 发展相关的理论、方法、算法系统, 并在实践中应用、验证、完善, 发挥实效.

本文将从 Cyberspace、社会信号和默顿系统的兴起这一时代特征为起点, 讨论知识自动化的意义与相关的科学问题, 从智能算法到知识机器人看其技术基础及趋势, 从软件定义的系统和流程探讨其与系统工程的内在关联, 从平行系统的角度研究其在复杂控制和管理过程中的重要作用. 本文的目的是抛砖引玉, 以期唤起更多学者关注知识自动化这一新兴的研究与应用领域.

1 时代的需求 : Cyberspace 和社会信号的涌现与挑战

可以从许多角度去审视知识自动化, 但本文认为, Cyberspace 的兴起和社会信号的涌现, 是当今时代对知识自动化之最大的需求.

过去一百多年, 工业自动化是利用物质和信息以 "人造" 方式建设物理世界的核心方法和技术之一, 而新兴的知识自动化将是利用智能算法构建物理世界和 Cyberspace 中各类 "人工" 的智慧组织、过程、产品之关键途径和工具. 从自动化的视角看, 第一次工业革命的特征是机械自动化, 第二次工业革命的特征是电气、电子自动化, 但本质还都是物理过程的自动化, 主要特色是利用自然科学的定律, 如牛顿定律等, 对过程进行精确地建模, 再实施控制, 落实设定的目标. 计算机和网络系统的兴起, 开始了虚拟空间里的信息过程自动化时代, 其特色是多数过程不再是物理实在的, 而是人为规定的 "人工" 流程, 如管理措施、法律程序、交易步骤等. 大型生产的企业资源规划 (Enterprise resource planning, ERP)、制造执行系统 (Manufacturing execution system, MES)、电子商务系统等, 实质上都是信息自动化, 只不过是人在系统之外, 相对而言自动化程度不高而已. 目前, 网络空间里的许多信息系统正向 "人" 在其中的智能自动化方向发展, 这一趋势必然导致对知识自动化的更高要求[3].

例如, 最新统计显示, 2014 年大多数网站, 尤其是中小网站的网络流量之 63 % ∼ 80 % 已经是互联网 "机器人 (Internet bots)" 产生的, 人类本身造就的流量已经不到 37 %, 而两年前这两个数据还平分秋色, 分别是 51 % 与 49 %. 这只是知识自动化最基本, 甚至可以说是最初等的体现形式, 但多数人无从感知 "人机" 之别, 表面上的 "人在其中", 实质上所引发的 "机进人退" 之速度不能不令人担心. 特别值得注意的是, 超过一半的互联网 "机器人" 流量是各色各样的 "恶毒 (Malicious)" 流量, 这使如何在 Cyberspace 里安全有效地实施知识自动化的任务变得更加迫切.

显然, 知识自动化是信息自动化的自然延伸与提高, 是 "人" 嵌在自动化之中的必然要求, 也是从物理世界的自动化控制转向人类社会本身的智能化管理的基础. 而且, 这一基础必须借助于虚拟空间里的自动化才能实现和完善, 否则, 就像一些简单的代数方程在实数空间中无解一样, 我们也难以单纯地在实际的物理空间中落实知识自动化, 进而实现能够动态变化、实时反馈的智能化企业和社会的管理[2]. 正因为此, 我们提出了以人为本、面向物理世界和 Cyberspace 融合的社会物理网络系统 (Cyber-physical-social systems, CPSS) 之概念[16].

其实, 作为自动化学科基础的控制论之本意就是社会控制与管理. 19 世纪初著名的法国科学家安培首次提出控制论一词时, 就把这一学科定义为国务管理的科学. 但正如钱学森在其《工程控制论》的开篇里所称, "安培企图建立这样一门政治科学的庞大计划并没有得到结果, 而且, 恐怕永远也不会有结果". 即使之前的《控制论》作者维纳也在其书中认为, 社会控制与管理的设想是 "虚伪的希望" 或 "过分的乐观"[17].

为什么钱学森和维纳当时会有这样的看法? 我们认为, 关键是因为 60 多年前, 这个世界还缺乏实时、有效、充分的社会信号和信息. 这是为什么长期以来控制论无法尝试其本源之要害, 也是知识自动化只有在今天才可能实现的原因: 知识自动化所需的知识信号, 必然是物理信号与社会信号的融合, 只有物理信号, 没有社会信号, 不可能实施知识自动化. 简言之, Cyberspace 为知识自动化提供了发展的基础设施与平台, 但社会信号为其发展提供了基本动机与动力.

工业时代, 各类传感器的出现使得物理信号的应用成熟、普及、深入, 更使得工程控制论在物理过程的自动化中发挥了极其重要的作用, 成为现代工业生产的支柱技术. 今天, 在基于互联网的 Cyberspace 里, 从社会媒体、社会网络、社会计算, 直到计算社会, 我们已经迅速地跨入了以社会事务信息为主体的 "大数据" 时代. 关于社会和政务的数据及信息, 现在不但充分、实时, 有时还出现 "超载" 现象. 这种情况下, 面向其本意的社会管理之 "控制论" 难道还是 "虚伪的希望"、"过分的乐观" 或 "恐怕永远也不会有结果" 吗? 现实已经给出肯定的答案: 希望是真实的, 乐观是有据的, 而且一定会有结果. 但 "果" 只能 "结" 在物理空间和虚拟空间 Cyberspace 融合的求解空间之中, 而且关键在于引入社会信号, 构建专业和社会性的知识传感网络, 认知和感知社会或企业等组织, 通过 CPSS, 实现智慧运营和管理, 其中知识自动化将发挥核心的作用[18].

虚拟的 Cyberspace 及其中的社会信号为我们带来很多挑战, 但也为自动化领域带来空前的机遇, 更使得知识自动化势在必行, 必将成为知识时代智能技术发展的必然趋势.

2 基础科学问题: 从牛顿到默顿的升华

我们可以从两个方面考虑知识自动化在现阶段所面临的科学问题, 一是其发展的主要空间 Cyberspace, 二是其发展的主要动力社会信号. 我们认为, 两方面的考虑可以归结为从牛顿系统到默顿系统的升华, 从以解析方法为基础的建模、分析、控制到以数据驱动为核心的描述、预估、引导.

显而易见, 目前虚拟空间 Cyberspapc 里的自动化之核心就是知识自动化. 一方面是已知或已约定的知识之自动化, 包括物理的、信息的、认知的, 另一方面是未知或无法规定的模式之表示及处理, 这两方面都直接或间接地涉及到人与社会之认知和行为的建模与分析问题. 此时, 由于 "自由意志" 存在, 除了自然科学中的牛顿定律等 "硬" 定理之外, 我们还必须依靠社会科学的一些 "软" 规律, 如默顿定律等, 再融入机器学习和人机交互等智能方法和技术, 间接地影响人的意识, 间接地改变行为模式, 从以 "知你为何" 为基础, 实现自动化, 转化到以 "望你为何" 为依据, 落实智能化, 促使希望的控制或管理目标得以实现[18].

为此, 我们首先需要理清作为社会信号之主体的社会系统, 具体而言就是社会物理网络系统 CPSS, 与作为物理信号之主体的传统物理系统之间的主要区别. 我们认为, CPSS 与物理系统之间的差别可用 "建模鸿沟" 来形象地表示: 随着系统复杂性的增加, 系统逐渐地从简单的物理系统向大型的信息系统, 再向复杂的 CPSS 过渡, 所涉及的关键信息也从物理信号, 到商务信号, 再到社会信号; 系统的行为越来越难以被精确地刻画, 相应的建模方法也从解析式的数学模型到仿真模型, 再到描述型的人工模型; 但实际行为与模型行为之间的差别也越来越大, 以至形成 "建模鸿沟" 的客观现象[5]. 实际上, 这一 "建模鸿沟" 是导致一些学者认为闭环反馈式的社会管理是 "虚伪的希望"、"过分的乐观" 以至 "恐怕永远也不会有结果" 的主要因素[17−18].

由于 "建模鸿沟", 迫使我们把注意力从利用可以控制系统行为的 "牛顿定律" 进行建模, 转向通过能够影响系统行为的 "默顿定律" 进行描述. 这里, "牛顿定律" 泛指可以通过解析的方式精确地描述系统行为的各类物理、力学、化学、生物等传统意义上的科学定律和公式, 当然也包含经典的牛顿定律等. 而 "默顿定律" 泛指以社会学家默顿命名的各种能够引导系统行为的 "自我实现预言", 即: "由于信念和行为之间的反馈, 预言直接或间接地促成了自

己的实现”[18−19]. 因为对于复杂的社会问题, 在许多情况下, 我们要“证实”的命题, 其实最后是我们影响甚至改变、构成、实现的命题, 非自然科学, 特别是物理数学里的因果关系, 而是心理学上的因果驱动关系. 简言之, “命题改变行为, 进而成真”. 半个多世纪来, 引导全球半导体事业发展的“摩尔定律 (Moore′s Law)”就是一个十分成功的“默顿定律”[18−19].

我们称其行为能够由“牛顿定律”控制的系统为“牛顿系统”, 其特征就是在给定当前系统状态与控制的条件下, 理论上系统下一步的状态便可通过求解方程而准确地获得, 从而系统的行为就可以被精确地预测. 因此, 对于“牛顿系统”, 建模的首要任务就是发现控制系统行为的“牛顿定律”, 据此直接设计相应的控制方法, 依此控制系统行为, 实行希望的目标. 现代工程控制理论与方法的成功, 主要就是针对这类“牛顿系统”. 显然, 对于牛顿系统, “行为建模”与“目标建模”是一致的: 由于“行为建模”的高度准确性, 只要系统本身可控, 完全可以通过对“行为模型”的分析达到对其控制的目的, 无需单独对目标进行建模. 换言之, 对于牛顿系统, “行为建模”可以隐含于“目标建模”之中, 合而为一.

我们称系统行为能够被“默顿定律”影响或指导的系统为“默顿系统”, 其特征就是: 即使给定其当前状态与控制的条件下, 理论上系统下一步的状态也无法通过求解而准确地获得, 从而系统的行为也就难以被精确地预测, 就连概率性描述也不可能, 有时甚至连统计描述也没有, 只有“人为”的假设或可能性描述. 因为这类系统包含“自由意志”, 本质上无法对其直接控制, 只能间接地影响[18].

对于“默顿系统”, 建模或描述的首要任务变为根据希望的目标去设计能够有效地影响或指导系统行为的“默顿定律”, 在此基础上建立围绕目标实现这一任务的人工系统, 从而直接或间接地影响“自由意志”, 改变行为模式, 进而通过实际系统与人工系统的平行互动, 促使实际系统运行在希望的目标之下. 如何创新社会管理, 特别面向 Cyberspace, 结合网络环境下虚拟社会特色的现代化社会管理, 就是研究这类“默顿系统”的首要任务.

与牛顿系统不同, 对于默顿系统而言, “行为建模”或“行为描述”与“目标建模”或“目标描述”是独立且不一致的: 由于“行为描述”高度依赖常识、经验、猜测、假定、希望等, 而且系统本身可以毫无理由地改变其行为, 甚至常常有目的、针对性地以在“进行或运行中 (On the fly)”的方式来改变其行为, 故很难通过对“行为模型”的分析达到对其行为的控制或管理目的, 因此必须单独对目标进行描述和建模, 以便决定如何进行情景和行为的分析、预判、归类、实验、评估等, 如何选择引导和管理的策略、计划、方案、步骤以及资源的组织、配置、调度、保障和监控的制度、实施、反馈、调节、质量、可靠性等. 所以, 对于默顿系统, “目标描述”无法再隐含于“行为描述”之中, 两者不能合而为一, 必须分离, 独立进行.

没有 Cyberspace 和以社会信号为主体的大数据之前, “建模鸿沟”在技术上很难克服. 现在, 大数据提供了填补“建模鸿沟”的原料, 而知识自动化又为跨越“鸿沟”提供了机制, 关键就是“行为描述”和“目标描述”的分离, 否则这些想法仍然无法实施. 问题是如何分离? 两者与控制器或管理器之间的关系如何? 界在何处? “行为模型”对于物理系统已经有非常成熟的方法, 但对于社会系统, 特别是 CPSS 系统, 量化的模型至今仍在探索, 目前可用的主要有社会网络和概率图模型. “目标模型”是一个崭新的课题, 可以看出人工智能和其他智能技术在此有很大的发挥空间. 无论如何, 知识表示和知识工程将在这些问题的解决中起重要作用, 但如何使其作用的方式动态化、自适应、反馈、闭环, 却是一个难题. 最后的目标就是实现从传统的控制模式到新型的知识管理范式之转移, 即从以解析方法为基础的建模、分析、控制, 到以数据驱动为核心的描述、预估、引导.

这就是从牛顿系统到默顿系统, 从牛顿定律到默顿定律的挑战, 也是实施知识自动化所要面对的核心问题. 我们必须加快研究如何利用社会信号来填充“建模鸿沟”, 弥补实际与模型之间的差别, “制造”各种各样的默顿定律, 像控制现代工业系统一样, 实现对特定社会系统的实时、反馈、闭环式的有效管理[18−19].

3 知识自动化: 从智能算法到知识机器人的系统转化

如何科学、准确地界定知识自动化的内容, 目前时机不成熟也没有必要. 文献 [3] 曾认为, 知识自动化绝对不是知识本身的自动产生, 但可以诱发知识的传播、获取、分析、影响、产生等方面的重要变革. 慕课 (MOOCs) 就是一个活生生的例子, 知识自动化必将在其今后的发展中起关键之作用. 实际上, 随着科技, 特别是智能技术的深入发展, 人们对知识本身的认知也会进化, 知识自动化虽然不是知识本身的自动产生, 但也会在知识的自动产生中发挥重要作用.

本文认为, 很大程度上, 知识自动化可以狭义地理解成为基于知识的服务 (Knowledge-based services, KBS), 与基于位置的服务 (Location-based services, LBS) 类似. 包括基于信息的服务 (Information-based services)、基于情报的服务

(Intelligence-based services), 以及基于任务的服务 (Task-based services)、基于决策的服务 (Decision-based services). 这里的关键是如何把信息、情报等与任务、决策无缝、准确、及时、在线地结合起来, 在时间和空间上, 实现 "所要即所需, 所得即所用". 显然, 在电子商务中获得成功应用的各种推荐系统, 可以在此发挥重要而有效的作用. 知识自动化的广义理解很难描述, 可以粗略地认为是一种以自动化的方式变革性地改变知识产生、获取、分析、影响、实施的有效途径.

知识自动化的历史可以追溯到古希腊亚里多士德的描述性知识和原始的形式逻辑以及工业革命之初英国布尔对其革命性的拓展[20]. 半个世纪前人工智能的正式提出, 以及随后而来的知识表示、专家系统、知识工程、智能系统等, 构成了知识自动化完整的进度发展历史. 知识自动化与人工智能中的知识表示和知识工程的关系是显而易见的, 但其与专家系统的更加内在且深刻的关系, 随着专家系统近乎彻底的消失而被一些现代学者所忽略.

有趣的是, 根据目前可以查到的文献, 无论是中文还是英文, "知识自动化" 作为一个学术的术语第一次出现在中国, 而且源于一次对人工智能英文术语的错误翻译. 1987 年, 《首都医学院学报》以 "知识自动化: 从文件服务员到知识服务员" 为题目, 发表了由秦笃烈摘译的国际上专家系统主要创始人和开拓者、美国著名的人工智能专家 Edward 于 1986 年在第五届世界医学信息科学大会 (MEDINFO - 86) 所作的主题演说: "AutoKnowledge: From File Servers to Knowledge Servers"[21]. 这是 "知识自动化" 一词第一次在中英文中首次出现. 尽管意指专家系统中的自主知识 AutoKnowledge 不能等于知识自动化 Knowledge automation, 我们还是应当庆幸这一 "正确" 的错误翻译, 毕竟它把知识自动化的历史虚虚实实地提前了 26 年.

知识自动化的历史, 保证了其丰富、多样、坚实的技术基础. 从大的学科人工智能、智能控制, 计算智能到具体的自然语言处理、数据挖掘、机器学习方法等, 形形色色各种各样的智能算法和智能技术都为实现知识自动化提供了依据和方法, 而物联网、大数据、云计算保障了实施知识自动化的环境设施的平台. 特别是近来兴起的智能手机和层出不穷的智能移动可穿戴装置, 更为落实知识自动化提供了有效手段.

然而, 我们应当以新的、时代的、更高的眼光重视知识自动化的技术基础. 一种可能的视角就是以智能算法和软件机器人为基础, 针对 Cyberspace 中的知识工作自动化的 "知识机器人". 回顾历史, 物理空间工业机器人的提出是因为虽然生产制造过程越来越复杂, 相应的任务也越来越多样、繁琐、费时、耗力, 由此催生了可编程、可重构, 具有多功能、多任务能力的 "智能机器" – 工业机器人的诞生. 实际上, 目前网络、计算、Cyberspace 过程中的许多基于特定知识的 "软件" 任务之复杂性质, 已经远远超过传统物理空间的生产制造任务, 我们为何不把研制各类 "知识机器人" 作为知识自动化的主攻方向, 系统性地实现从工业机器人和智能算法到基于软件的知识机器人之飞跃?

4 虚拟的实化: 软件定义的流程与系统

当前, 围绕网络而引发的科技正以巨大的冲击力影响着我们的生活和工作, 各种 "破坏性" 方法、技术不断涌现, 虚拟的 Cyberspace 变得越来越真实, 已成为我们生命世界真实的组成部分, 与传统的物理和心理世界同等重要.

近年兴起的软件定义的网络 (Software-defined networks, SDN) 技术, 代表硬件 "软化" 的另一方向, 但实质与虚拟的实化目标一致. SDN 打破常规网络构架和流程, 将网络的控制面 (Control plane) 与数据面 (Data plane) 分离, 并通过开放的软件定义 API 实现网络功能的灵活重构, 极大地改善了网络的扩展能力和灵活性, 成为信息通信领域的热议对象, 对下一代网络的发展有着重要的影响. 此项技术 2009 年经 MIT《技术评论 (Technology Review)》名以 SDN, 广而告之, 迅速风靡世界, 流行于网络、信息甚至许多其他与科技无关的领域, 大有软件定义一切 (SDX) 之势[22].

实际上, SDN 把网络的控制与转发功能分离, 同我们在默顿系统中把 "行为模型" 与 "目标模型" 分离异曲同工. 而且, 我们可以在知识自动化中拓展 SDN 的思想, 结合知识表示和知识工程, 构造各类针对特定领域和问题的软件定义的流程 (Software-defined processes, SDP) 和软件定义的系统 (Software-defined systems, SDS), 形成 SDP 体系 (Systems of SDP, SoSDP) 和 SDS 体系 (Systems of SDS, SoSDS), 使知识自动化的实施从 "无形" 到 "有形", 从一般到具体. 通过 SDP 和 SDS, 不但使常识、经验、猜测、假定、希望等形式化, 并使其组织、过程、功能等软件化, 变为可操作、可计算、可试验的流程和系统, 从而进一步深入复杂知识自动化系统的构想、设计、实施、运营、管理与控制.

同时, 软件定义的流程和系统, 特别是 SoSDP 和 SoSDS 将知识自动化与系统工程更加密切地联系起来. 系统工程的实质就是寻求有效的手段, 减少完成特定目标的不确定性, 化多样为归一, 使复杂变简单, 是一种应对 UDC 的有效方式. 利用系统工程的思想, 可以帮助我们构造知识自动化系统整个

生命周期的各类 “人工” 流程, 使相关的任务执行过程可描述、可度量、可验证, 进而使实现各项目标的途径和方式明确、经济、可靠, 为构造知识自动化的 SDP 和 SDS 打下坚实的基础. 这里我们强调流程的 “人工” 特性, 因为这些流程一般并不服从自然法则而具有 “必然性”, 易被环境改变, 从而具有 “权变性”[19, 22].

因此, 流程和系统的软件化将是知识自动化的核心技术之一. 基于业已成熟并不断推陈出新的智能技术, 加之从 C4ISRAF 转化到 DoDAF 和 TOGAF 后的系统工程架构体系, 特别是 DoDAF 所提供的各类模型 (Models)、视图 (Views) 以及衍生的观点 (Viewpoints) 等方法与工具, 由此可以方便地将人、社会、知识等因素纳入系统流程及相关的分析与决策之中, 灵活地处理各类复杂的 CPSS 问题, 为知识自动化的设计与实施奠定坚实的系统工程基础[11]. 号称第一本知识自动化的专著[23], 只是沿此方向的初步尝试, 而且并不十分成功. 总之, 有了 SDP 和 SDS, 知识自动化就能形式化、具体化; 以 SDP 和 SDS 为纲, 知识自动化的设想、设计、实施与实践就可 “纲举目张”.

5 平行控制与管理: 复杂到简单与 UDC 到 AFC

显然, 研究知识自动化的主要动机是面向复杂系统, 解决复杂问题, 其最迫切的任务是如何将复杂系统的 UDC 特征, 转化为智能系统的 “灵捷、聚焦、收敛 (Agile, focus, convergence, AFC)” 特性. 为此, 我们需要将知识自动化嵌入到基于 ACP 的平行控制与管理的框架和流程之中, 使复杂变为简单, 使 UDC 化为 AFC[24].

所谓 ACP 是指通过人工社会或组织 (Artificial societies/organizations)、计算实验 (Computational experiments) 和平行执行 (Parallel execution) 之有机组合, 将虚拟的 Cyberspace 变成我们解决复杂问题的新的、另一半空间, 同自然的物理空间一起构成求解复杂问题之完整的 “复杂空间”, 从而突破传统理念、方法及资源的约束. 这样做就像在数学里引入虚数的概念, 虚数成为数新的一半, 进而与实数共同组成复数, 形成新的数之空间: “复数空间”, 结果使许多过去无解的方程有解一样. ACP 由 “三步曲” 组成: 第一步, 利用人工社会或人工系统对复杂问题进行建模; 一定意义下, 可以把人工社会看成是软件定义的社会或一种 “科学化游戏”, 就是用类似计算机 “游戏” 的技术来建模; 第二步, 利用计算实验对复杂现象进行分析和评估; 一旦有了针对性的人工社会, 我们就可以把人的行为、社会的行为放到计算机里面, 把计算机变成一个复杂系统实验室, 进行 “计算实验”, 通过 “实验” 来分析复杂系统的行为, 评估其可能的后果; 第三步, 将实际系统与人工系统并举, 通过实际与人工之间的虚实互动, 以平行执行的方式对复杂系统的运行进行有效地控制和管理[25−26].

人工社会或人工系统可以看成是传统的数学或解析建模之扩展, 是广义的知识模型, 更是落实各种各样的 “灵捷性 (Agility)” 的基础. 计算实验是仿真模拟的升华, 是分析、预测和选择复杂决策的途径, 也是确保复杂情况下能够正确 “聚焦 (Focus)” 的手段. 平行执行是自适应控制和许多管理思想与方法的进一步推广, 是一种通过虚实互动而构成的新型反馈控制机制, 由此可以指导行动、锁定目标, 保证过程的 “收敛 (Convergence)”. 没有人工系统、计算实验、平行执行, 灵捷、聚焦、收敛就没有基础, 只能是空中阁楼[24]. 平行系统就是 ACP 方法中由实际系统和人工系统共同构成的系统: 实际与人工系统基于 ACP 组合互动之后, 将整合虚实子系统的资源和能力, 形成一个新的、整体功能和性能更加优越的新系统, 进而对实际系统进行有效的管理与控制, 使其具有 “灵捷、聚焦、收敛” 的 AFC 特性, 从而可以在各种复杂情况下完成既定的目标[11, 24, 27−28].

在平行系统的运行和操作中, 必然涉及许多需要专门知识、复杂分析、细致判断及创造性解决问题技巧才能完成的任务, 这正是目前知识自动化的核心内容. 因此, 知识自动化将是构建平行系统的技术关键. 实际上, 基于 ACP 的平行系统框架, 也为进行决策与管理的知识自动化提供了有效途径. 显然, 对于复杂问题, 我们需要不同情景下各种各样的人工系统, 以便形成充分完整的知识模型库和决策流程链, 提供知识自动化的基础.

具体而言, 人工组织及代理系统以数字化的形式承载了实际组织及系统的各种历史、经验、技能、感知、期望、过程、使命、目标等, 是一类 SDP 或 SDS, 主要涉及三方面的知识: 1) 描述 (Descriptive), 描述或记录组织、过程及案例的各种功能和状态; 2) 预测 (Predictive), 预测或设计在各种情况下未来可能或希望出现的状态; 3) 引导 (Prescriptive), 引导或控制各种资源情况尽可能地实现所希望的状态. 功能 2) 必须通过计算实验来落实, 此时, SDP 或 SDS 变为计算实验的载体, 通过充分的预测、分析、检验之后而聚焦. 功能 3) 则需通过平行执行来实施, 此时, 人工与实际之间的虚实互动、闭环反馈成为引导行动的机制, 促使整个平行系统向设定或涌现的目标收敛. 描述、预测、引导三方面的知识还是在整个过程中实施知识自动化的基础, 这一点非常重要. 因为如果不落实知识自动化, 将不可避免地对系统的操作者和使用者的素质和专业水平

提出很高甚至是过分的要求, 这既不现实, 也无必要, 更极其危险.

一般而言, 一个平行体系应当是面向特定任务的专用系统, 其中一个实际组织及系统可以对应多个不同的人工组织及系统; 实际与人工组合互动之后, 将形成一个更加有效的系统, 相应的整体功能和性能也应远超其子系统的功能和性能之合. 实际系统的真实工作人员可以操作人工系统, 人工系统的虚拟代理也可以在实际系统中担任角色; 真实工作人员可以伴生多个人工或软件代理或知识机器人, 推荐、协助其作出决策或执行任务. 实际与人工之间的互动, 可以同步, 亦可异步, 可视具体的应用背景和操作目标而定.

平行控制与管理的核心任务和目标是: 针对复杂系统的控制与管理, 构造实际系统和人工系统能够并行互动的平行系统; 目标是使实际系统趋向人工系统, 而非人工系统逼近实际系统, 进而借助人工系统使复杂问题简单化, 以此使复杂系统具有灵捷、聚焦、收敛的特性, 最终实现对其的有效控制与管理.

这里我们只是粗浅地描述了平行控制与管理的基本思路, 其完整的构建将是一个庞大的系统工程. 不久, 一个组织的能力, 在很大程度上可能不取决于其外在的物理形式如何, 而是由其伴生的内在人工组织之规模和水平所决定, 因为它们表征了组织的知识自动化水平, 决定了该组织的灵捷、聚焦、收敛的能力.

6 展望

表面上, 网路化极大地加速了系统的复杂程度, 应对复杂性, 特别是考虑到新生代的生活、学习、工作习惯和环境, 迫使我们转向并关注于知识自动化. 其实知识自动化的背后, 还有深刻的内在和时代的原因. 按照科学哲学家波普尔的观点, 我们生活的世界是由物理、心理和人工三个世界组成的共同体. 从地表到地下资源, 农业和工业社会已全面地开发了我们的物理自然世界和心理精神世界, 保障了人类的生存和发展. 互联网、物联网、云计算、大数据等理念和技术的到来, 开始人类向人工世界的进军. 今天, 深度开发数据和智力资源, 深化农业和工业的产业革命, 迈向智能产业, 已成为我们的时代使命. 在这一历史进程中, 基于大数据, 以数据驱动的知识自动化将是关键的核心支撑技术. 这一点, 从智能技术已成为目前社会的热点, 从欧美国家出笼的形形色色的科技发展战略规划, 特别是美国的先进制造计划和德国的 “工业 4.0” 策划之中, 已经昭然若揭.

我们必须从面向物理世界的工业自动化, 走向面向数据和 Cyberspace 的知识自动化, 这就是自动化领域的历史使命.

致谢与说明

本项工作得到国家自然科学基金委重点项目 “平行管理” (71232006) 和 “平行控制” (61233001) 的支持. 有关探索得到了王成红、柴天佑、桂卫华、郑南宁、孙优贤等老师的帮助和支持, 特表感谢. 本文写作始于 2013 年 10 月, 主要内容基于为 “双清论坛” 所准备的报告 “软件定义的流程与知识自动化”, 部分观点与内容已在[10−15] 发表, 特此说明. 本文的目的是抛砖引玉, 以期唤起更多学者关注知识自动化这一重要的研究和应用领域.

References

1 McKinsey Global Institute. Disruptive technologies: advances that will transform life, business, and the global economy [Online], available: http://www.mckinsey.com, June 6, 2013

2 Wang Fei-Yue. The destiny: towards knowledge automation — preface of the special issue for the 50th anniversary of Acta Automatica Sinica. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1741−1743
(王飞跃. 天命唯新: 迈向知识自动化 —《自动化学报》创刊 50 周年专刊序. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1741−1743)

3 王飞跃. 迈向知识自动化. 中国科学报. 2013. 12. 30(7)

4 王飞跃. 面向人机物一体化 CPSS 的控制发展: 知识自动化的挑战与机遇. 见: 2013 中国自动化大会暨自动化领域协同创新大会. 长沙, 2013.

5 Gui Wei-Hua, Liu Xiao-Ying. Fault diagnosis technologies based on artificial intelligence for complex process. *Basic Automation*, 2003, **9**(4): 1−6
(桂卫华, 刘晓颖. 基于人工智能方法的复杂过程故障诊断技术. 控制工程, 2003, **9**(4): 1−6)

6 Chai Tian-You, Ding Jin-Liang, Wang Hong, Su Chun-Yi. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(5): 505−515
(柴天佑, 丁进良, 王宏, 苏春翌. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法. 自动化学报, 2008, **34**(5): 505−515)

7 Chai Tian-You. Challenges of optimal control for plant-wide production processes in terms of control and optimization theories. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(6): 641−649
(柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战. 自动化学报, 2009, **35**(6): 641−649)

8 桂卫华. 流程工业知识自动化内涵探讨. 见: 第 113 期双清论坛 “流程工业知识自动化”. 长沙, 2014.

9 王成红. 关于本期双清论坛及其后述工作的几点思考. 见: 第 113 期双清论坛 “流程工业知识自动化”. 长沙, 2014.

10 王飞跃. 平行工业 5.0: 平时时代的智能制造体系. 见: 2015 年国家智能制造新年论坛. 北京, 2015.

11 王飞跃. 指控 5.0: 平行时代的智能指挥与控制. 指挥与控制学报, 2015, **1**(1)

12 王飞跃. 大数据与智能化情报: 情报 5.0 和平行情报系统. 见: "大数据与知识定制" 论坛. 北京, 2014.

13 王飞跃. 复杂性研究与智能产业: 平行企业和工业 5. 0. 见: 2014 控制工程师峰会. 上海, 2014.

14 Wang F Y. Scanning the issue and beyond: toward ITS knowledge automation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(1): 1−5

15 Wang F Y. Scanning the issue and beyond: computational transportation and transportation 5. 0. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2014, **15**(5): 1861−1868

16 Wang F Y. The emergence of intelligent enterprises: from CPS to CPSS. *IEEE Intelligent Systems*, 2010, **25**(4): 85−88

17 王飞跃. 从工程控制到社会管理: 纪念钱学森《工程控制论》发表 60 周年. 中国自动化学会通讯, 2014, **35**(4)

18 Wang Fei-Yue. A framework for social signal processing and analysis: from social sensing networks to computational dialectical analytics. *Scientia Sinica: Informationis*, 2013, **43**(12): 1598−1611
(王飞跃. 社会信号处理与分析的基本框架: 从社会传感网络到计算辩证解析方法. 中国科学: 信息科学, 2013, **43**(12): 1598−1611)

19 王飞跃. 系统工程与管理变革: 从牛顿到默顿的升华. 管理学家, 2013, (10): 12−19

20 Corcoran J. Aristotle′s prior analytics and Boole′s law of thought. *History and Philosophy of Logic*, 2003, **24**(4): 261−288

21 Feigebaum E A [著], 秦笃烈 [译]. 知识自动化: 从文件服务员到知识服务员第五届世界医学信息科学大会 (MEDINFO − 86) 主题演说摘要. 首都医学院学报, 1987, **8**(1): 68−69

22 王飞跃. 系统软件化与系统工程 5.0: 社会物理网络系统 + 平行系统 + 软件定义的系统. 复杂性与智能化, 2014, **10**(3): 1−2

23 Fish A N. *Knowledge Automation: How to Implement Decision Management in Business Processes*. New York: John Wiley & Sons, 2012.

24 王飞跃. 面向 Cyber-Physical-Social Systems 的指挥与控制: 关于平行系统军事体系的理论、方法及应用. 见: 第一届中国指挥与控制大会. 北京, 2013.

25 Wang Fei-Yue. Parallel system methods for management and control of complex systems. *Control and Decision*, 2004, **19**(5): 485−489, 514
(王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制. 控制与决策, 2004, **19**(5): 485−489, 514)

26 Wang Fei-Yue. Parallel control: a method for data-driven and computational control. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(4): 293−302
(王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法. 自动化学报, 2013, **39**(4): 293−302)

27 王飞跃. 面向跨域作战的计算实验与平行指挥控制系统. 见: 中国海洋发展与指挥控制论坛. 烟台, 2013.

28 王飞跃. 面向大数据和知识自动化的平行指挥与控制 — 灵捷、聚焦、收敛. 见: 中国海洋发展与指挥控制论坛. 南京, 2014.

王飞跃 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员, 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术中心教授. 主要研究方向为智能系统和复杂系统的建模, 分析与控制.
E-mail: feiyue.wang@ia.ac.cn
(**WANG Fei-Yue** Professor at the State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. He is also a professor at the Research Center of Military Computational Experiments and Parallel System, National University of Defense Technology. His research interest covers modeling, analysis, and control of intelligent systems and complex systems.)