



工程生态视野中的工业互联网

詹伟

中国科学院大学 应急管理科学与工程学院, 北京 100049

摘要: 从工程生态的视角出发, 探讨了工业互联网的演进历程及数据要素在其中发挥的关键作用。将工业互联网视为一个广义的生态系统, 深入分析了其人为建构性与生命自主性、复杂多样性与立体网络性等特征, 并进一步阐述了工业互联网所带来的巨大产业变革力量。鉴于工业互联网平台在现代产业链中占据的重要生态位, 建议基于工程生态论对工业互联网的安全问题进行深入思考, 以期推动工业互联网的持续健康发展。

关键词: 工程生态; 工业互联网; 生态思维; 数据要素; 工业互联网平台; 生态位

中图分类号: F40.6

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2025)01-0055-10

引言

工业互联网, 作为新一代信息技术与制造业深度融合的产物, 凭借其人、机、物的全面互联特性, 推动了新型工业生产制造体系与现代服务体系的构建, 成为第四次工业革命的重要基石。

当前研究已从生态视角对工业互联网展开了探讨, 主要聚焦于其对企业创新与价值创造的影响^[1-3]、生态体系与生态系统模型^[4-5]、平台生态对企业效率提升等方面的问题^[6-7], 为理解工业互联网及其作用积累了一定基础。但是, 目前的研究偏重企业微观层次, 缺少从工程生态视角进行的宏观考察。所谓工程生态视角, 就是将“工程”看作“生命体”, 把“工

程系统”看作是“广义生态系统”, 对“工程”的“动态生命”和“广义生态”进行全视野、跨学科的理论与实践分析和研究^[8]。工程生态研究是对我国工程和社会经济发展中“新行业”和“传统行业的新形态新机制”以及“工程集群”和“企业发展”的迫切需求的响应和反映^[9]。本文旨在从工程生态视角出发, 剖析工业互联网的基本特性及其推动产业变革的力量, 以期获得新的认知, 进而促进工业互联网的健康发展。

1 从互联网到工业互联网

互联网出现之前, 物与物联系是通过物理连接的

收稿日期: 2024-11-28; **修回日期:** 2025-01-24

基金项目: 中国工程院战略研究与咨询项目“工程生态论的理论体系和实践研究”(2024-XZ-69)

作者简介: 詹伟 (1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为智慧应急管理、工程项目管理。E-mail: weizhan@ucas.ac.cn

引用格式: 詹伟. 工程生态视野中的工业互联网[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(1): 55-64. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240147. CSTR: 32282.14.JES.20240147

Zhan W. On the Industrial Internet from the Perspective of Engineering Ecology[J]. Journal of Engineering Studies, 2025, 17(1): 55-64. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240147. CSTR: 32282.14.JES.20240147

方式, 形成物理世界的网络, 如道路网、运河网等, 承载了实物的交换。从1837年第一台有线电报机实现文字信息传输到以电报、电话等代表的通信技术迅速普及, 人类开启了现代通信网络的大发展。1969年, 小规模计算机互联网络初现雏形。20世纪90年代, 互联网开始得到广泛应用。目前, 全球网络技术的发展与建设正向着“融合、软硬分离、可定制、智能”的趋势发展与变革^[10]。互联网实现了计算机连接, 加快了人与人、人与物的信息传递、交互和共享, 推动了信息化进程。

互联网从最初的军事通信网络逐步发展成为全球范围内连接人、信息和资源的巨大网络, 促进了全球化的进程, 缩小了信息落差, 增进了国际联系, 推动了产业和社会的数字化转型。电子商务、社交网络促进了消费互联网和社交互联网的蓬勃发展, 改变了人们的生活方式和消费习惯。随着数据这一新型生产要素价值被不断发掘, 5G、人工智能、物联网、区块链等基础资源与技术迎来了空前的发展。在社会应用需求的驱动下, 互联网与传统行业深度融合, 催生出数字政府、电子商务、网络音视频、网络教育等一系列创新应用, 并日趋完善。

工业互联网并非互联网在工业领域的简单应用, 其蕴含着更为丰富的内涵与外延。它以网络为基础、平台为中枢、数据为要素、安全为保障, 既是工业数字化、网络化、智能化转型的基础设施, 也是互联网、大数据、人工智能与实体经济深度融合的应用模式, 同时也是一种新业态、新产业^[11]。工业互联网在汽车、电子、能源、农业等传统产业通过开展创新实践, 涌现了自动驾驶、5G+机器视觉、分布式能源、智慧农业等新的业态。

在工业互联网中, 数据通过不断地流动和转化, 支持着工业系统的生产力和可持续发展。正如碳循环对于生命体的生长和能量转换至关重要, 数据流转对于工业系统的优化运行和智能决策同样不可或缺。数据参与生产过程之后仍然存在, 多次使用后不仅没有损耗, 而且数据量可以进一步增加; 数据要素可以被多主体同时使用, 而且在不同场景的使用过程中可以不断积累, 甚至可能实现增值。这种非消耗性、非竞争性的特征打破了传统生产要素有限供给对生产发展

的限制, 使数据成为一种极具潜力的生产要素。数据要素可以发挥“乘数效应”, 推动传统生产要素的变革与重组, 对经济和社会发展起到倍增的作用。工业互联网平台不仅通过通信协议和接口实现工业设备和传感器之间的连接与交互, 起到“枢纽”的作用, 同时, 通过数据分析、资源共享、工业APP开发等, 形成信息、资源与知识的集聚, 推动协同生产方式和创新组织模式的涌现。

工业互联网正在推动生产方式的大变革, 具体表现在: 从流程驱动的生产制造向数据驱动的智能制造转变, 从相对封闭的企业供应链向开放的产业生态转变, 从低效的资源利用向高效的资源利用转变, 从单一的产品交付向全面的服务提供转变, 从被动的市场适应向主动的市场引领转变。在这种情况下, 工程生态中的人、人造物、环境之间的物理连接向万物互联发展, 而物理世界也映射到了网络空间形成了虚拟世界。面对日新月异的工程生态, 面对数据要素的异军突起, 迫切需要有新的思维方式, 以阐明工业互联网的生态属性, 为更加有效地发挥工业互联网的变革潜能提供理论支撑。

2 作为工程生态的工业互联网

一个生物体、种群、生活在一起的种群的集合(常称为群落)、生态系统或地球的整个生物圈都是生态学系统。生态系统由许多群落通过能量和资源利用而联合形成, 所有的生态系统彼此联合成为一个生物圈, 生物圈的不同部分是通过大气、水和生物体的运动彼此联系在一起^[12]。

机器、产品等人工物借助工业互联网, 不仅能感知外部环境, 实现与人类的交互, 还能在特定条件下实现“自主”运作。正如生物体的神经系统, 网络凭借数据的传输与交互, 使得万物互联成为现实。新的工程生态由人、人工物(涵盖物理世界的人工物及其数字世界的孪生体)与环境(包含自然环境、社会环境等)之间的关联与交互共同构建。工程生态系统由诸多工程个体(类似生物体)、工程或产业集群(类似生物群落), 以及工程系统(如城市, 可比拟为更复杂的群落)组成, 这些部分通过物资、能源和信息

的流动相互关联。工程生态系统与生物圈有着相似的特性,因而可以采用一般生态论的理论和方法来分析。随着工业互联网加速向其他产业融合,各类异质要素相互交织,形成了复杂的立体网络结构,促使物理世界、人类社会以及虚拟的数字孪生世界相互联动,这不仅开拓了人类认识世界的新维度,也呼唤着新的思维方式和研究范式来深入分析和理解这一工程生态。

工业互联网具有由多元异质“要素”和“成员”构成的工程生态系统的特征。

首先,从异质“要素”角度看,工业互联网实现了人、机、物全面互联,打破了原有工业系统的边界,将上游下游企业、控制系统、原材料、机器设备、产品以及管理人员通过网络连接和交互,对工业数据进行深度感知、采集、分析,以辅助智能化生产和管理决策。工业互联网集成了传感器、网络通信、大数据、云计算和云服务、人工智能等技术,传感器技术实现智能设备自感知、自识别,网络通信技术实现泛在网络互联互通,大数据技术实现对创新和决策有力支撑,云计算和云服务技术实现开放服务相辅相成,人工智能技术实现企业的提质增效。

其次,从异质“成员”角度来看,产业实体是核心成员,包括工业、农业、服务业等各行业企业实体,企业实体通过信息流、商流、资金流的价值流动过程实现产品、服务等价值增值;工业互联网的建设成员包括数字基础设施供应商、设备制造商、软件供应商、服务提供商等;支撑成员包括政府、金融机构、高校和科研院所,以及第三方开发者等。随着工业互联网应用的发展,还将会不断涌现出新的成员,进一步丰富平台的生态。

与自然生态中各群落间相互关联、群落内部物种边界模糊等特性相类似,工业互联网的出现促使企业组织趋向扁平化,企业边界也日趋模糊,进而使得不同企业形成了一个相互协作、相互依存的利益共同体。从工程生态视角来看,工业互联网具备“广义生态系统”特征。工业互联网通过网络互联、数据互通、标识解析等技术,实现人、机、物、系统等要素之间的自动协同和协作,形成高度集成、高度协同、高度智能的工程生态。工业互联网(平台)在设备端

或边缘端广泛连接着各类智能设备,诸如智能传感器、数控加工检测中心、智能机器人及AGV等,同时也连接着智能产品,例如自动挖掘机、智能网联汽车、自动驾驶轨道车等,这些均可统称为“智能体”或“网器”。这些“智能体”或“网器”大多具备自感知、自分析、自决策、自执行、自学习及自适应等功能,展现出显著的“类生命体”特征,是“工程生态”中的重要组成部分。以“复兴号”高速动车组为例,每列动车组设置2500余个监测点,智能化感知系统渗透至列车的每个“毛细血管”,通过传感器采集1500多项车辆状态信息。动车组高速运行期间,传感器每10s就会向“家”中上传一次数据。动车生产企业利用实时数据,并融合列车的制造履历数据等相关数据,应用大数据和人工智能算法,研发关键部件故障预测模型,能够对故障进行预测、预警,从而提供维护建议。这种基于大数据的运维模式,将传统被动式的故障后维修或定期修,变为了主动的预测性维护,从而能够有效降低列车故障率,更好地保障行车安全,提高运维效率^[13]。

3 工程生态视野中工业互联网的基本性质

3.1 “人为建构性”与“生命自主性”

工程生态视角下的工业互联网是人为建构性与生命自主性的辩证统一。所谓人为建构性,是指人类通过自己的认识和实践,对自然和社会进行改造和创造的能力。所谓生命自主性,是指生命体具有自我调节、自我组织、自我发展的能力,是生命体区别于非生命体的本质特征。

从宏观层面来看,工业互联网的“人为建构性”主要体现在国家战略部署和政府政策引导。工业互联网及其带来的新模式、新业态并非“野蛮生长”,政府通过制定的各项相关法律法规和标准规范,为工业互联网的发展提供了法治保障和技术支撑;《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》^[14]《“十四五”数字经济发展规划》^[15]《“十四五”信息化和工业化深度融合发展规划》^[16]《工业互联网创新发展行动计划(2021—2023年)》^[17]

等发展规划和计划,为工业互联网的发展提供了顶层设计和战略指引,对工业互联网的整体发展进行了系统性的规划和协同;政府发布的各项支持政策和措施,为工业互联网的发展提供了资金投入、人才培养、平台建设、示范推广等方面的支持。

从中观层面来看,工业互联网的“人为建构性”主要体现在区域协同高地的形成和行业平台设计的开发及运营。首先,全国30多个省市明确对工业互联网方向的政策支持,因地制宜推动工业互联网的发展。同时,长三角地区、粤港澳大湾区、京津冀地区、成渝地区、东北地区等依托区域特点及产业优势,分别为工业互联网的发展提供了发展支撑,对区域经济增长贡献显著。其次,跨行业跨领域工业互联网平台、面向重点行业和区域的特色型工业互联网平台快速发展,对各行业转型升级的赋能作用凸显,促进了各行业融合发展向更高水平迈进。

从微观层面来看,工业互联网的“人为建构性”主要体现在企业自身规划和构建。为迅速响应用户需求、提升服务品质,加强供应链管理、促进业务协同,增强透明度、优化管理效率,同时探索并拓展提供产品与服务的模式和范畴,以期实现高质量发展,企业亟需构建一个能够实现互联互通、信息共享且安全可靠的工业互联网平台系统。企业基于市场或自身的实际需求构建工业互联网平台时,仅靠单打独斗难以得到满意的结果,需要主动加强与政府部门和其他企业的合作,共同推动工业互联网的发展。

工业互联网智能化管理和自主决策能力带来越来越多的“生命自主性”。工业互联网通过引入人工智能、机器学习等技术,实现设备和系统的智能化管理,包括预测设备故障、优化生产计划等。这种智能化管理使得工业互联网系统能够自主学习和适应,提高生产效率和设备利用率。基于大数据分析和智能算法,工业互联网平台能够做出数据驱动的决策,优化生产流程,提高决策的准确性和效率。这种自主决策能力是工业互联网“生命自主性”的重要体现,使得系统能够在没有人工直接干预的情况下,自主应对各种生产和管理挑战。

连接在工业互联网上的“智能体”如企业内的智能AGV、智能机器人等通过边缘计算都具有自感知、

自决策、自执行的能力。“复兴号”高速列车不仅在运营速度、安全性、舒适度等方面达到了世界领先水平,更在智能化等方面实现了新突破。智能高速列车已经开始向着自动驾驶、自主回库、自主休眠、自动唤醒等智能化方向发展。2022年北京冬奥会期间,京张高铁的新型奥运版“复兴号”智能动车组,在保留原有智能功能的基础上,新增了智能行车功能,于全球范围内首次实现了350 km/h的自动驾驶。该动车组具备车站自动发车、区间自动运行、到站自动停车以及车门自动控制等一系列先进功能^[18]。

智能化制造在工业互联网的支持下,实现材料、设备、产品等生产要素与用户之间的在线连接和实时交互,逐步实现机器代替人生产,智能工厂不断涌现。例如,海尔沈阳冰箱互联工厂通过数字化集成开展设备互联,实现产品设计、工艺、制造、检验、物流等环节的智能化,并利用大数据开展大规模定制和个性化生产,订单交付周期由15 d缩短到7 d,产品研发周期缩短30%,产能提升1倍,人均产值提高30%^[19]。

生态系统具有自我调节的能力以应对环境变化,工业互联网生态系统同样具备这种适应性和韧性。借助于大数据分析、机器学习等技术,工业互联网能快速响应市场需求变化,自动调整生产计划,优化运营策略,增强对市场波动和外部冲击的抵御能力。

在工程生态视角下,人为建构性是工业互联网的基础和前提,是工业互联网的创造力和驱动力,是工业互联网的源头和动力。生命自主性是工业互联网的结果和目标,是工业互联网的智能性和效能,是工业互联网的价值和意义。人为建构性和生命自主性相辅相成,相得益彰,共同推动工业互联网的发展和进步。

3.2 “复杂多样性”与“立体网络性”

工业互联网(平台)连接了工程涉及的几乎所有“人、机、物、系统、组织”等生命体和类生命体,汇聚了“政、产、学、研、用、法(规)、(金)融、协(会)等”各个组织,集聚了工业企业的“人、财、物、产、供、销、存”全要素,实现了远程协同、远程监控、危险环境等多种特殊场景的应用,在

时空分布上“物理分散，逻辑集中”，具有明显的“复杂多样性”特征。

尽管“链”视角在工程互动研究中占据重要地位，强调供应链、生产链、服务链、创新链、价值链等，然而这一视角同样存在着局限性。若将这些链置于工程生态网络中进行深入剖析，往往能够催生新的见解与结论。多元互动不仅涵盖了“点”与“点”之间的相互作用，还囊括了“链”与“链”、“局部网”与“局部网”之间的互动，甚至进一步延伸至“点-链-局部网”直至整个“全网”的全方位、立体式互动。

工业互联网的网络性决定了其各主体之间绝非简单的线性关系，并且若是将单个工厂看作个体，个体内部就已存在多层次独立配置的物理网络，在研究个体与其他主体之间的关系时，使用平面网络难以将这种复杂的连接准确地刻画出来，借鉴自然生态中“个体-种群-群落”的概念能够更加直观地解释工业互联网的立体网络性。

工业互联网保障企业通过工业互联网平台进行连接，使得同类企业实现对资源、能力、信息等的互补和协作，形成产业链、价值链、创新链等；推进不同行业、不同领域、不同层次的企业实现对跨界数据、知识、技术等整合和利用，创造新的商业模式、新的产品形态、新的服务方式等。以中国商飞为例，在民用飞机的研制过程当中，从设计到制造，再到试飞，这几大环节形成了飞机的全生命周期，不同环节不仅需要不同部门的协同，而且机体供应商、系统供应商、零件及材料供应商、航空公司、试航机构都在协同范围之内。中国商飞构建基于工业云的飞机研制系统平台，推动全球近150个一级供应商之间进行数据交互，实现了基于统一数据源的设计、制造、供应一体化协同^[20]。

在工业互联网的推动下，应用多种场景进行探索，如生产工艺优化、多工序协同优化、多基地协同、产融结合等，这些多样化的应用场景体现了工业互联网在满足不同需求时的灵活性。工业互联网的多样性意味着不同的设备和系统可以相互补充和协作，提供灵活性和适应性，并在不同的工业环境中实现有效的监测、控制和优化，这种多样性优势可以使系统

更具弹性和适应能力，应对不同的需求和变化，这类似于生物种群中丰富的后代数量，即使某些个体受到威胁或遇到困境，种群整体仍然能够维持稳定。

4 工程生态视野中工业互联网的变革力量

工业互联网平台是工业智能化发展的核心载体，作为连接工业互联网各种异质要素的枢纽，构建了高效的数据采集、汇聚、分析的服务体系，建立了工业大数据的集成、分析、存储、管理的环境，支持了工业知识、技术和经验的集成，提升了设计、生产、运营等资源的优化配置效率，是一种新的平台生态系统。作为一种顺应未来创新发展的重要形式，工业互联网为数字创新涌现提供了绝佳的培育土壤与成长环境^[21]。

工业互联网带来大量直接产业，衍生诸多渗透产业，形成产业结构变革和经济形势发展，造成资源配置及市场需求改变，进而加剧了新兴产业和原有产业领域内同类工程（种群内部个体之间）的互助和斗争。近年来随着工业互联网的快速发展，各种类型的工程活动随之涌现，种群间的交互效率也逐渐提升。为了争夺有限的资源或市场，不同类型的工程活动间往往会展开激烈的竞争，诸如网络运营商、设备厂商、平台提供商等多方参与者均会涉足其中。然而，为了实现共同的目标或利益，这些参与方之间亦可能携手合作。工业互联网产业联盟的存在，便极大地促进了上述各方之间的交互与合作。此外，工业互联网还推动了第二产业与第三产业的共生与交互。例如，工业互联网服务平台依赖于制造业、电力行业等产业而得以存在和发展；同时，这些产业也亟需平台服务商提供长期稳定的服务，以满足其不断升级的需求。

在轨道交通行业中，中国中车作为“链长”，旗下拥有众多担任“子链长”角色的“主机厂”。以中车株洲电力机车有限公司为例，该公司每年面向产业链上游各类企业的采购额高达上百亿元。针对每个种类的部件，该公司通常都会选定2~3个达到技术门槛的供应商，通过竞争与合作的关系，形成了涵盖产业集群上中下游企业的发展“共同体”，为整个产业带来了强大的韧性与抗压能力。依托企业的工业互联网

平台, 产业链上的企业能够实现物流配送信息的畅通无阻, 进而构建起“多式联运”的物流通道。随着产品的销售, 供应链和物流保障产品体系得以及时构建, 使得轨道交通装备产业集群“融”合成为一个创新引领的新生态^[22]。

当工业互联网与传统行业发生碰撞, 赋能传统行业转型升级, 加速传统行业向数字化、网络化、智能化方向演化。工业互联网在推进网络技术与传统行业的深度融合过程中, 新的业态也会不断涌现。以农业为例, 工业互联网的发展推动了传统农业向智慧数字农业转型, 成为农业现代化的核心^[23]。通过数据汇集、智能算法以及数据的可信自由流动和价值再次挖掘, 工业互联网推动了资源的合理配置, 带动了农业生产方式、供给模式变革, 提升了农产品的价值。

以苏州太湖现代农业示范园为例, 一粒苏州太湖稻米, 被数字化赋能后产生了蝶变。园区以“从谷到仓”“从仓到米”“从米到产品”的价值流转为核心, 在原有加工产线基础上, 通过应用标识解析、区块链、物联网、云计算等技术, 采集、计算、应用各类质量控制要素, 构建起覆盖全产业链、全价值链的大米加工和产品质量控制体系, 从稻谷入场到加工出厂, 消费者可以扫码一键溯源^[24]。该体系通过数字品控, 推动了一、二、三产业的智能化改造, 并实现了全程质量监管。水稻从种植、生长、收割, 到加工、仓储、营销、质量监管等各个环节的数据, 均由数智平台记录、计算、分析和运用, 针对关键节点实施智能化改造, 提升了工作效率和产品质量。

然而, 新业态的涌现并非全然带来正面影响。例如在创新项目规划阶段, 需要进行大量的数据收集、分析和预测工作, 相较于传统方法需要投入更多的时间、人力和资金成本, 而且数据的准确性和可靠性也会受到各种因素的影响; 在示范阶段, 实现智能生产需要依赖各种先进的设备、技术和平台, 这些设备和技术的购置、维护和更新都需要较高的费用, 而且相应地对操作人员的技能和素质也有较高的要求; 运营服务阶段, 其带来的效益不一定能够覆盖投入的成本, 在进行各相关方的协调与沟通时可能会引发信息不对称、利益冲突等问题。

这一现象与自然生态领域新物种产生的情景极为

相似, 自然生态中新物种的出现会增加生态系统的多样性, 但也可能会破坏生态系统的平衡, 造成物种竞争、入侵、灭绝等问题。工程生态领域的“新物种”会对生态的结构和功能产生不同的影响, 这些影响可能是正面的, 也可能是负面的。对于“新物种”, 应充分判断和分析其特征、功能、与其他物种的关系等因素, 采取科学、合理、有效的措施进行人为干预, 维护工程生态的健康和可持续发展, 实现更高的经济效益和社会效益。

5 工程生态视野下工业互联网的健康发展

与自然生态中生物的互相依存关系类似, 工程生态系统也是由一个复杂的多主体相互关联而形成的系统, 生态系统的构建、生存以及未来健康的发展均非易事。工业互联网在快速发展的同时, 其面临的安全形势不容乐观, 既有来自互联网外部威胁, 又有工业系统内部安全与系统漏洞等问题。将工业互联网视作一个错综复杂的生态系统, 有助于更深刻地理解它所面临的安全挑战。在这个生态系统中, 各类“物种”——包括企业、技术、设备等——相互依存、相互作用, 共同编织成一张高度互联的网络。这张网络的稳定性和健康状况, 对于整个生态系统功能的发挥起着重要的作用。

在自然生态中, 物种的灭绝通常源于自然环境的剧烈变迁、生态位的消失、食物链的断裂, 或是病毒等因素的影响。在工业互联网生态中, “灭绝”可以被理解为某些产品、企业或业务模式因无法适应环境的变化、竞争的加剧或技术的迭代而退出市场。网络空间的计算机病毒、各种形式的网络安全威胁、网络攻击等展现出了前所未有的复杂度、组织化及频繁性, 可能将风险扩散到整个系统, 导致广泛的功能障碍。另外, 数据资产边界模糊、数据安全保障不足等问题也需要通过不断创新和完善主动安全防护机制应对工业互联网带来的各种挑战。

为加快构建可靠的工业互联网安全保障体系, 既要注重技术创新, 也要强化安全管理, 同时还要建立完善的安全生态, 从而为工业互联网的健康发展提供坚实的安全保障。首先, 需要紧跟工业互联网的发展趋势, 特别是在前沿技术和颠覆性技术方面实现自主

创新和可控。这包括但不限于物联网、大数据、人工智能等技术在工业领域的应用,确保这些技术的安全性和可靠性。其次,构建覆盖系统建设各环节的安全防护体系至关重要。这要求在设计、开发、实施和运维等各个阶段都融入安全理念和措施。例如,在设计阶段就要考虑潜在的安全风险,并采取相应的防范措施;在开发阶段进行代码安全审查和漏洞扫描;在实施阶段确保系统的安全配置和部署;在运维阶段持续监控系统状态,及时应对安全事件。最后,联合行业力量打造工业互联网安全生态也是必不可少的。这包括与政府、企业、研究机构和第三方安全服务商的合作,共同制定安全标准和规范,分享安全信息和最佳实践,开展安全培训和教育,以及建立应急响应机制等。通过这样的合作,可以形成合力,提高整个行业的安全水平和应对能力。

不仅如此,逆全球化趋势的出现可能对工业互联网生态系统产生不利影响,特别是可能导致关键产品或服务的供应中断,从而威胁到整个生态的稳定性和健康性。为了应对这一挑战,需要从维护生态总体稳定和健康的角度,充分发挥每类主体的积极性和特长,保证产业体系自主可控、安全可靠等问题。生态位的概念有助于识别各主体在生态系统中的独特位置和功能,以及它们之间的相互依赖关系。通过明确这些关系,可以更好地协调各主体的行为,避免重复建设或资源浪费,同时也能促进创新和合作,这些对于提升整个生态系统的韧性和安全水平至关重要。从宏观层面来看,需要强化政府和监管机构的作用,制定具有针对性的政策和标准,引导生态系统朝着更健康、更安全的方向发展。在中观层面,产业联盟和行业协会可以发挥桥梁作用,连接不同主体,促进信息共享和经验交流。通过建立合作伙伴关系,可以增强产业链的协同效应,提高整体竞争力。在微观层面,企业自身需要加强内部管理,提升产品质量和服务水平,同时也要关注供应链的安全性,建立多元化的供应商网络,以降低单一来源风险。

6 结语

工业互联网作为新一代信息技术与制造业深度融

合的产物,正在推动全球工业体系向数字化、网络化、智能化方向加速演进。本文从工程生态的视角出发,深入探讨了工业互联网的演进历程、基本特性及其对产业变革的深远影响。通过将工业互联网视为一个广义的生态系统,本文揭示了其人为建构性与生命自主性、复杂多样性与立体网络性等核心特征,并分析了其在推动生产方式变革、优化资源配置、促进产业协同等方面的巨大潜力。

首先,工业互联网的“人为建构性”体现在国家战略、区域协同和企业实践等多个层面,政府通过政策引导和资金支持,推动了工业互联网的快速发展;企业则通过构建互联互通的平台系统,提升了生产效率和服务质量。与此同时,工业互联网的“生命自主性”通过智能化管理和自主决策能力得以体现,系统能够自主应对生产和管理中的各种挑战,展现出类生命体的特征。其次,工业互联网的“复杂多样性”和“立体网络性”使其成为一个高度集成、高度协同的工程生态系统。它不仅连接了人、机、物、系统等多元异质要素,还通过数据流动和资源共享,推动了产业链、价值链和创新链的深度融合。工业互联网的立体网络结构使得企业之间的协作更加紧密,形成了跨行业、跨领域的协同创新生态。然而,工业互联网的快速发展也带来了新的挑战,尤其是在安全领域。工业互联网作为一个复杂的生态系统,面临着来自外部网络攻击和内部系统漏洞的双重威胁。为了确保工业互联网的健康发展,必须构建覆盖全生命周期的安全防护体系,强化技术创新和安全管理,并通过政府、企业、研究机构等多方合作,打造工业互联网安全生态。此外,工业互联网的广泛应用正在推动传统行业的转型升级,催生了大量新业态和新模式。然而,新业态的出现也可能带来一定的负面影响,如数据收集和成本增加、技术设备的更新需求等。因此,在推动工业互联网应用的过程中,必须充分考虑其潜在的风险和挑战,采取科学合理的措施进行干预和管理,以确保工程生态的可持续发展。

综上所述,工业互联网不仅是一种新型的基础设施和应用模式,更是一个复杂的工程生态系统。其人为建构性与生命自主性、复杂多样性与立体网络性等特征,赋予了它巨大的产业变革力量。为了推动工业

互联网的健康发展, 必须从工程生态的视角出发, 加强技术创新、安全管理和产业协同, 构建一个安全、可靠、高效的工业互联网生态系统, 助力全球工业体系迈向智能化、数字化的新时代。

致谢

本文是傅志寰院士主持的中国工程院战略研究与咨询项目“工程生态论的理论体系和实践研究”的阶段性成果之一, 在撰写过程中得到傅志寰院士、李伯聪教授、王大洲教授的指导, 也从课题组讨论中受到启发, 在此谨表衷心的感谢!

参考文献

- [1] 王水莲, 付晗涵. 工业互联网平台主导的创新生态系统价值共创机制: 以海尔卡奥斯为例[J/OL]. 科技进步与对策, 2024: 1-9. (2024-04-12). [http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=KJJB20240410005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ](http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=KJJB20240410005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ).
Wang S L, Fu H H. Value co-creation mechanism of innovation ecosystem led by industrial Internet platform: a case study of haier kaos[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-9. (2024-04-12). [http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=KJJB20240410005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ](http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=KJJB20240410005&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ).
- [2] 尚晏莹, 蒋军锋. 工业互联网时代的传统制造企业商业模式创新路径[J]. 管理评论, 2021, 33(10): 130-144.
Shang Y Y, Jiang J F. On the innovation path of traditional manufacturing firms' business model in the era of industrial internet[J]. Management Review, 2021, 33(10): 130-144.
- [3] 马永开, 李仕明, 潘景铭. 工业互联网之价值共创模式[J]. 管理世界, 2020, 36(8): 211-222.
Ma Y K, Li S M, Pan J M. Value co-creation model for industrial IoT[J]. Management World, 2020, 36(8): 211-222.
- [4] 程乐. 构建以数据流通为核心的工业互联网生态体系[J]. 人民论坛, 2024(15): 62-67.
Cheng L. Building an industrial Internet ecosystem with data circulation as the core[J]. People's Tribune, 2024(15): 62-67.
- [5] 赵敏, 刘俊艳, 朱锋先. 工业互联网生态系统模型研究与应用[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 53-61.
Zhao M, Liu J Y, Zhu D X. Research and application on industrial Internet ecosystem model[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(4): 53-61.
- [6] 梁艳杰, 刘冲. 工业互联网平台生态系统自组织过程及其协同机制研究[J]. 企业改革与管理, 2024(19): 74-76.
Liang Y J, Liu C. Research on the self-organization process and synergy mechanism of industrial Internet platform ecosystem[J]. Enterprise Reform and Management, 2024(19): 74-76.
- [7] 吕文晶, 陈劲, 刘进. 工业互联网的智能制造模式与企业平台建设: 基于海尔集团的案例研究[J]. 中国软科学, 2019(7): 1-1.
Lyu W J, Chen J, Liu J. Intelligent manufacturing and firm-level platform building in industrial Internet: A case study of haier[J]. China Soft Science, 2019(7): 1-1.
- [8] 李伯聪, 王楠, 傅志寰. 工程生态研究: 社会与时代的呼唤[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(5): 365-377.
Li B C, Wang N, Fu Z H. On engineering ecology: A call of the society and the times[J]. Journal of Engineering Studies, 2023, 15(5): 365-377.
- [9] 傅志寰, 李伯聪. 工程生态论: 探索建构工程研究的新范式[J]. 人民论坛·学术前沿, 2024(10): 4-16.
Fu Z H, Li B C. The theory of engineering ecology: Constructing a new paradigm of engineering studies[J]. Frontiers, 2024(10): 4-16.
- [10] 刘韵洁, 黄韬, 汪硕. 关于未来网络技术体系创新的思考[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(1): 38-45.
Liu Y J, Huang T, Wang S. Thoughts on innovation of future network architecture[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(1): 38-45.
- [11] 中国工业互联网研究院. 工业互联网创新发展成效报告2018—2021[R]. 北京: 中国工业互联网研究院, 2021: 1.
China Academy of Industrial Internet. Report on Innovation and Development of Industrial Internet 2018—2021[R]. Beijing: China Academy of Industrial Internet, 2021: 1.
- [12] 里克莱夫斯. 生态学(第5版)[M]. 孙儒泳, 等, 译. 北京: 高等教育出版社, 2004.

- Ricklefs R E. Ecology: The Economy of Nature[M]. 5th ed. New York: W.H. Freeman and Company, 2000.
- [13] 刘兰星. 高速动车: 数据驱动下的"智造" 新局[N]. 青岛日报, 2020-07-04(1).
Liu L X. High speed trains: A new era of "intelligent manufacturing" driven by data[N]. Qingdao Daily, 2020-07-04(1).
- [14] 国务院. 关于深化"互联网+先进制造业"发展工业互联网的指导意见[EB/OL]. (2017-11-27)[2024-10-01]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-11/27/content_5242370.htm.
State Council of the People's Republic of China. Guiding opinions on deepening the development of industrial internet through "internet + advanced manufacturing" [EB/OL]. (2017-11-27) [2024-10-01]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-11/27/content_5242370.htm.
- [15] 国务院. "十四五"数字经济发展规划[EB/OL]. (2021-12-12)[2024-10-01]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-12/12/content_5659699.htm.
State Council of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for digital economy development [EB/OL]. (2021-12-12) [2024-10-01]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-12/12/content_5659699.htm.
- [16] 工业和信息化部. "十四五"信息化和工业化深度融合发展规划[EB/OL]. (2021-11-30)[2024-10-01]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/30/content_5654915.htm.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for deep integration of informatization and industrialization[EB/OL]. (2021-11-30) [2024-10-01]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/30/content_5654915.htm.
- [17] 工业和信息化部. 工业互联网创新发展行动计划(2021—2023 年)[EB/OL]. (2021-01-13)[2024-10-01]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/13/content_5579669.htm.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Industrial internet innovation and development action plan (2021—2023) [EB/OL]. (2021-01-13) [2024-10-01]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/13/content_5579669.htm.
- [18] 奥运版"复兴号" 智能动车组正式亮相[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(2): 146.
The olympic version of the "Fuxing" intelligent EMU was officially unveiled[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(2): 146.
- [19] 沈阳海尔电冰箱有限公司. 海尔创新的互联工厂智能制造模式[EB/OL]. [2024-10-01]. http://www.aii-alliance.org/upload/202005/0506_152001_541.pdf.
Shenyang Haier Refrigerator Co. Ltd. Haier's innovative interconnected factory intelligent manufacturing model[EB/OL]. [2024-10-01]. http://www.aii-alliance.org/upload/202005/0506_152001_541.pdf.
- [20] 中国电子信息产业发展研究院信息化与软件产业研究所. 工业互联网平台赋能重点行业数字化转型方法论白皮书[R]. 2020.
Institute of Information Technology and Software Industry, China Center for Information Industry Development. White paper on methodology of digital transformation of key industries enabled by industrial internet platform[R]. 2020.
- [21] 杨姗. 平台生态系统中互补者生态位对数字创新的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
Yang S. Research on the influence of complementary niche on digital innovation in platform ecosystem[D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [22] 苏晓洲, 樊曦, 戴斌. 1 个"链长"和 6900 余家"链企"的故事[EB/OL]. (2023-07-25)[2024-12-15]. http://www.news.cn/fortune/2023-07/25/c_1129767491.htm.
Su X Z, Fan X, Dai B. The story of one "chain leader" and over 6900 "chain enterprises"[EB/OL]. (2023-07-25)[2024-12-15]. http://www.news.cn/fortune/2023-07/25/c_1129767491.htm.
- [23] 中国信息通信研究院. 中国智慧农业发展研究报告[R]. 2021.
China Academy of Information and Communications Technology. Research report on the development of smart agriculture in China[R]. 2021.
- [24] 苏建轩. 数字赋能, 为农业插上"智慧翅膀"[N]. 新华日报, 2023-09-22(31).
Su J X. Digital empowerment injects 'smart wings' into agriculture[N]. Xinhua Daily, 2023-09-22(31).

On the Industrial Internet from the Perspective of Engineering Ecology

Zhan Wei

School of Emergency Management Science and Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Highlights

Analyzing the Industrial Internet from the perspective of engineering ecology.

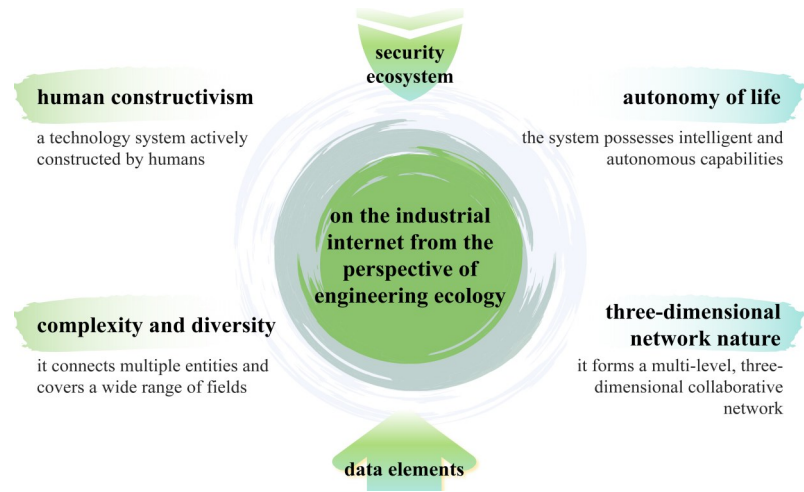
Emphasizing the core role of data elements.

Demonstrating the practical impact of the Industrial Internet on industrial transformation.

Proposing specific recommendations for building a security ecosystem.

Calling for new ways of thinking to address the complexity of the Industrial Internet.

Graphical Abstract



Abstract: Currently, a new round of technological revolution and industrial transformation is flourishing globally. Industrial internet, as a new ecology of the deep integration of new generation information technology and manufacturing industry, has become an important cornerstone of the fourth industrial revolution. In the face of the new requirements of promoting the high-quality development of industrial economy, it is also necessary to take the engineering ecology theory as a new paradigm of engineering research, and analyze the new ecology of the industrial Internet in order to obtain some new views and new thinking. Based on the theory of engineering ecology, the evolution of the industrial internet and the key role of data elements are discussed. The Internet has realized computer connection, accelerated the transmission, interaction and sharing of information between people and things, and promoted the informatization process. Industrial Internet is not a simple application of Internet in industry, but has richer connotation and extension. The industrial Internet has accelerated the evolution of the Internet of Everything era. In the new era, data has become the core element driving the vast majority of economic activities. The non consumptive and non competitive characteristics of data elements make them strategic resources for seizing the leading runway in the new era. The paper analyzes the industrial internet's characteristics such as generalized ecosystem, human constructiveness and life autonomy at the macro, meso and micro levels, complex diversity and the characteristics of the industrial network, as well as the relationships and characteristics of competition, cooperation, symbiosis, innovation, evolution, emergence, *etc.* The paper proposes that the industrial internet platform occupies an important niche in the industrial internet ecology and the chain leader firms occupy an important niche in the modern industrial chain. Emergency attention should be paid to thinking about industrial internet security based on engineering ecology. This paper analyzes the role and relationship of various subjects in the industrial Internet ecosystem, defines the niche of each subject, and gives full play to the enthusiasm and expertise of each type of subject. It provides a solution for improving the resilience and security level of the industrial chain supply chain, and ensuring the autonomy, controllability, safety and reliability of the industrial system. Consequently, engineering ecological thinking is needed for building an intelligent manufacturing development ecology and promoting high-quality development of the manufacturing industry. With the acceleration of the industrial Internet and the penetration of other industries, various heterogeneous elements have interwoven to form a complex three-dimensional network structure. The physical world, human society and the virtual digital twin world are interconnected, opening up a new level of human understanding of the world. It also requires new ways of thinking and research paradigms to analyze and understand engineering ecology.

Keywords: engineering ecology; industrial internet; ecological thinking; data elements; industrial internet platform; ecological niche