

引用格式:高锡荣,丁洪伟,张红超. 智能制造的生产成本属性异变及边际成本递减律[J]. 技术经济, 2024, 43(7): 125-141.

GAO Xirong, DING Hongwei, ZHANG Hongchao. Cost attribute aberration and declining marginal cost: An exploration in the scenario of intelligent manufacturing[J]. Journal of Technology Economics, 2024, 43(7): 125-141.

智能制造的生产成本属性异变及边际成本递减律

高锡荣, 丁洪伟, 张红超

(重庆邮电大学经济管理学院, 重庆 400065)

摘要: 智能科技革命驱动的智能制造,是新时期推进制造强国建设的不二选项。智能制造以工业智能体取代人力作业,采用“车间智能体+镜像网络”的单要素虚实融合生产模式,这将带来迥异于传统制造业的生产特征和成本属性,进而改变成本函数形态。比较研究发现,智能制造具有“高固定成本、弱可变成本”属性,并据此推导出随产量弱增长的弱成本函数,以及相应产生的边际成本递减规律。智能制造边际成本递减律,主要源于智能制造的单要素虚实融合生产模式对可变成本的冲淡与弱化效应。从政策层面,建议有序开展智能制造系统的众筹建造模式,积极推行智能制造系统的产能共享模式,尽早谋划智能时代产业工人的全新就业模式,大力引导消费者不断介入生产活动,实现消费者向“消产者”的身份转变。

关键词: 智能制造; 生产特征; 成本属性; 成本函数; 边际成本

中图分类号: F403.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-980X(2024)07-0125-17

DOI: 10.12404/j.issn.1002-980X.J24012610

一、引言

当前,智能科技革命正快速推动制造业由传统制造向智能制造转型。智能制造发端于技术密集型行业,之后逐步拓展至资本密集型行业,最终必将覆盖劳动密集型行业。为应对智能制造的转型大势,美、德等国相继发布《先进制造业战略计划》和《工业4.0战略计划实施建议》;中国也先后发布《中国制造2025》和《“十四五”智能制造发展规划》,将智能制造作为制造强国建设的主攻方向。显然,智能制造已经成为新时期应对国际竞争和实现高质量发展的不二选项。

智能制造的外在表象是“黑灯工厂”和“无人车间”,其本质是以工业智能体全面取代人力作业。随着人力全面退出作业岗位,制造业生产模式将由工业智能体全面主导,这将使得智能制造具有与传统制造迥异的生产特征,从而带来生产成本属性与成本结构的显著异变。在此情形下,传统的生产成本理论已经无法解释智能制造的成本属性异变,因而也就不再适用智能制造场景。

以往学术界对智能制造成本相关话题的探讨,仍然是从传统生产成本理论的视角进行的,如关于智能制造如何抑制成本粘性、智能制造成本的管控与优化、智能制造的成本核算方法等。这些探讨可能会丰富传统生产成本理论,但并未涉及智能制造场景下生产成本的根本性变化,亦未能建立真正适合智能制造场景的新型生产成本理论。

基于上述背景,当前亟待开展关于智能制造生产成本的专项研究,系统探究智能制造生产成本的属性异变及其内在机理,进而构建符合智能制造情景的新型生产成本理论。为响应上述学术诉求,特开展了本文的相关研究工作。

本文拟在界定智能制造相关概念的基础上,首先分析智能制造有别于传统制造的生产特征;其次从生产特征变化剖析智能制造有别于传统制造的生产成本属性;最后基于生产成本属性异变推导智能制造有别

收稿日期: 2024-01-26

基金项目: 国家社会科学基金后期资助项目“面向自立自强全民创新的大众创意训练研究”(22FGLB069);教育部人文社会科学研究项目“智能时代引领型国家创新体系的构筑机制研究”(20YJA790012)

作者简介: 高锡荣,博士,重庆邮电大学经济管理学院教授,硕士研究生导师,研究方向:智能制造;(通信作者)丁洪伟,重庆邮电大学经济管理学院硕士研究生,研究方向:智能制造;张红超,博士,重庆邮电大学经济管理学院讲师,研究方向:智能制造。

于传统制造的成本函数,并分析智能制造有别于传统制造的边际成本法则。本文可能的创新点:一是科学阐释智能制造的“高固定成本、弱可变成本”属性;二是从逻辑上导出智能制造的弱可变成本函数,洞悉智能制造成本随产量弱增长机理;三是分析智能制造的边际成本变化,得出智能制造的边际成本递减法则。

二、文献综述

(一) 智能制造相关研究

Wright 和 Bourne 于 1988 年出版《制造智能》一书,首次提出“智能制造”概念,我国工信部将智能制造定义为“基于新一代信息通信技术与先进制造技术深度融合,贯穿于设计、生产、管理、服务等制造活动的各个环节,具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能新型生产方式”。近年来,不少学者先后提出了智能体^[1]、数字孪生智能车间^[2]、智能工厂^[3]等概念。在智能制造技术方面,臧冀原等^[4]列出了包含工业机器人、智能传感、工业网络平台等在内的 27 项智能制造关键技术清单,Borangiu 等^[5]将车间物理实体虚拟成实物镜像。

智能制造在资源配置效率^[6]、生产协同水平^[7]、智能制造技术^[8]等方面迥异于传统制造,智能制造能够实现生产过程数据的状态感知、实时分析、自主优化决策、人机交互融合与动态精准执行^[9]。智能制造与传统制造的根本区别,是为制造系统安装上“机器大脑”及其“感知网络”,推进机器智能对人类智慧的替代^[10],制造设计更突出客户需求导向,产品加工过程柔性化、智能化^[11];本质上,智能制造是信息技术与制造业务高度匹配的制造模式^[12],智能制造将分布于制造全过程并承载着信息和知识的隐形数据显性化^[13],将生产方式由大批量的单一生产转变为大规模的个性化智能生产^[14]。

(二) 生产成本相关研究

生产成本源于马克思在《资本论》中对经济活动基本细胞“商品”的剖析,即生产成本是生产商品所耗费的不变资本和可变资本的价值之和。一般而言,不同产业或行业对生产成本的定义不尽相同,生产成本构成也存在些许差异,如农业的生产成本构成为物质与服务费用、人工成本和土地成本^[15],煤炭业的生产成本构成为煤炭勘探成本、开采成本和原材料费用等^[16]。

生产函数的设定对生产成本函数的推导具有重要影响,大多以柯布-道格拉斯(C-D)生产函数、或常数替代弹性(CES)生产函数、或超越对数生产函数等为基础来进行改进,例如,马克卫等^[17]基于 C-D 函数构建的数字经济生产函数;刘庆林和王明晖^[18]构建的非位似 CES 生产函数;孙红军和赵祚翔^[19]基于超越对数构建的随机前沿分析模型。生产成本函数多以产量或生产要素投入量作为自变量,例如陈林^[20]构建的超越对数成本函数模型;樊茂清^[21]提出的国民经济部门生产成本函数。

边际成本方面,基于资源稀缺性约束的假设前提,曼昆提出了边际成本递增规律,在实体经济情景下,生产边际收益递减且边际成本递增^[22],徐海龙^[23]认为其核心原因是“生产拥挤”,即可变生产要素投入量超过了与固定生产要素的最佳配比数值,造成生产效率下降。有形要素的使用服从边际收益递减和边际成本递增规律,而无形要素的使用服从边际收益递增和边际成本递减规律^[24],网络经济即是边际成本递减、边际收益递增的新经济业态^[25]。《零边际成本社会》的作者 Rifkin 认为未来在物联网上生产并相互分享能源和实物的边际成本接近于零,章安辰和裴平^[26]也指出,不能僵守非互联网时代资源稀缺性约束的假设前提,盲目照搬边际成本递增规律,要认识到非互联网时代经济学“边际革命”的局限性。

(三) 智能制造成本相关研究

智能制造通过变革制造业生产运作方式,进而改变生产要素形态和生产成本变化规律。具体表现上,一是以“机器换人”作为载体,导致劳动力成本占总生产成本的比例显著降低^[27];二是个性化需求的设计、服务成本增加,传统生产成本(直接人工、直接材料和制造费用等)占总成本比例降低^[28];三是资产专用性降低,极大降低了转产成本^[6]。高可变成成本历来是传统制造的普遍现象,而在智能制造成本文献中,低可变成成本^[29]与高固定成本^[30]开始出现,此种成本属性最早出现于信息产业^[31],如互联网^[32],其产品边际收益递增^[33],生产需初始投入大量的高智力^[34],但在运作环节可低成本复制^[35],具有边际成本递减、且不断趋近于零的特点^[25]。在智能制造成本函数构建方面,当前相关工作较为有限,冯毅萍等^[36]提出了一种适应智能

制造生产模式的多要素生产成本模型, Wang 和 Gao^[37]建立了一种面向智能制造组织的多尺度成本数据模型。总体而言,智能制造出现的此种成本新属性与智能制造成本研究现状,更加凸显了智能制造成本研究的重要性与迫切性。

(四) 现有文献评述

从现有文献的研究状况看,存在的问题主要有三个方面:一是大多文献视角集中在资源配置效率、协同效应、智能制造技术等方面,鲜有文献从基本生产模式变化的视角切入,因而对智能制造完全不同于传统制造的生产特征缺乏深入刻画;二是已有文献虽然对边际成本递增规律是否适用于类物联网产业场景提出了质疑,但未认识到相关产业,如智能制造带来的生产要素融合特征(即单要素化),因而难以提出有说服力的理性论证;三是已有文献对智能制造的成本特征进行了初步的探究,但更多的只是进行了局部性的调整,且成本分析的基本框架未能突破传统制造业范畴。

三、智能制造相关概念界定

(一) 智能制造

智能制造是将智能技术融入制造中,以工业智能体为核心要素、以虚实融合网络为运作平台的生产模式。工业智能体基于新一代信息通信、工业人工智能与先进制造等技术,具备感知能力、智慧能力、生产能力。虚实融合网络的作用是连接工业智能体并将实体制造场景映射至镜像网络空间,以便实现工业智能体之间的高效协同与镜像制造。基于虚实融合网络平台的智能制造运作流程如图 1 所示。

(二) 智能车间

智能车间亦称车间智能体,是由一系列工业机器人构成的智能生产线。车间智能体中的工业机器人可根据生产需要灵活实现部件重组,进而支撑多产品生产转换。基于智能车间,可构建超越人类水平的智能制造系统,其构建过程需经历“类人-人化-超人”三个发展阶段,类人阶段以条件触发式的感知、执行为主要特征,人化阶段以输入训练式的学习、匹配为主要特征,超人阶段以自发能动式的决策、组织为主要特征。由此,可绘制基于智能车间的智能制造系统演化路径如图 2 所示。

图 2 中,无人化曲线、智能化曲线分别表示智能制造系统随等级提升,可取代人力数、可实现类人功能数的走向。随着人力岗位层级提升,胜任岗位所需能力越高^[38],可被取代人力数量越少,故无人化曲线减速上升;智能制造系统具有加速进化的特征^[39],故智能化曲线加速上升。本文将智能制造系统的智能化程度和无人化程度分别定义为 i 和 u_i , 见式(1)和式(2)。

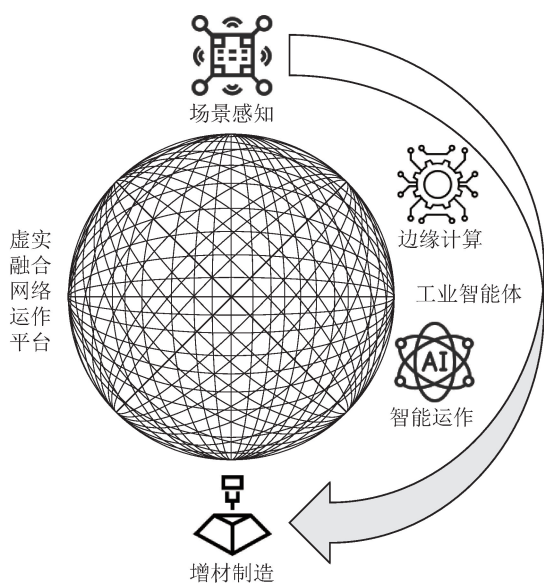


图 1 基于虚实融合网络平台的智能制造运作流程

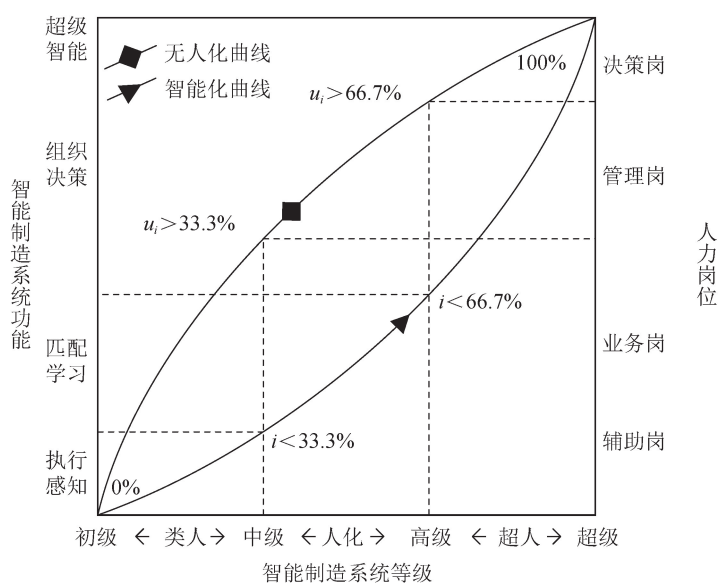


图 2 基于智能车间的智能制造系统演化路径

$$i = \frac{f_i}{f_{总}} \times 100\% \tag{1}$$

$$u_i = \frac{p_i}{p_{总}} \times 100\% \tag{2}$$

其中： f_i 为当前系统功能数； $f_{总}$ 为功能总数， $i \in [0, 100\%]$ ； p_i 为当前系统可取代人力数； $p_{总}$ 为人力总数； $u_i \in [0, 100\%]$ 。

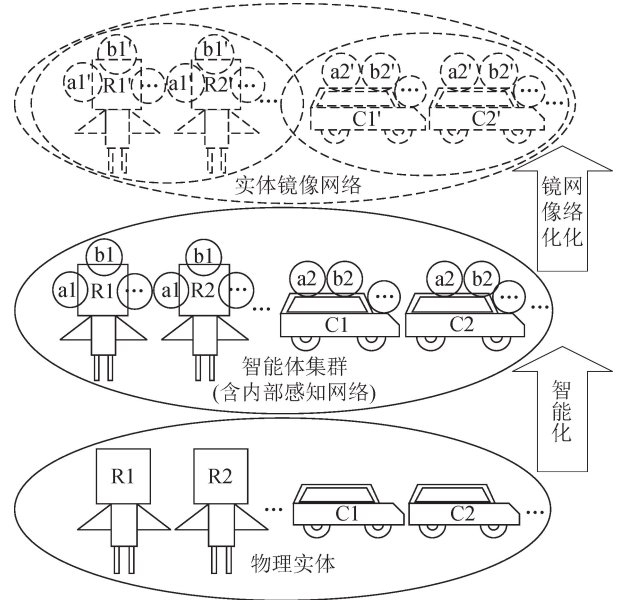
(三) 虚实融合网络

虚实融合网络，是融合网络空间与物理世界，贯穿异质网络维度，内含海量实体镜像及节点的多维异质网络。虚实融合网络的构建过程见图3。

第一步是智能化，辅以实体海量纳米传感器和处理单元，采集实体的各项特征信息并通过映射链路传输至网络空间；第二步是镜像化，在网络空间解析特征信息并重构形成实体镜像，实体与其镜像间通过映射链路交换实时数据实现即时同步；第三步是网络化，各实体镜像通过镜像节点间的链路连接，形成实体镜像网络，不同类型的实体映射形成不同维度的实体镜像网络，镜像节点可跨维度连接。

实体镜像存在内部感知网络，由其对应实体映射的海量感知节点构成，每类感知特征为一个网络维度，感知节点可跨感知维度连接。虚实融合网络的一般架构见图4。

实体以其镜像节点为基础，以节点间链路为核心，形成可互感的关系网络，故虚实融合网络是网络关系型产品，其产品形态为镜像节点，产品价值是基于镜像节点的连接能力，产品本质是联结关系。根据梅特卡夫定律，单一维度网络关系型产品的网络价值与其网络节点数的平方成正比，见式(3)。



R1、R2 分别表示机器人 1 与 2，C1、C2 分别表示汽车 1 与 2，a1、a2 分别表示机器人、汽车的 a 类感知特征节点，b1、b2 分别表示机器人、汽车的 b 类感知特征节点，R1'、C1'、a1'、b1' 等均表示镜像

图3 虚实融合网络的构建过程

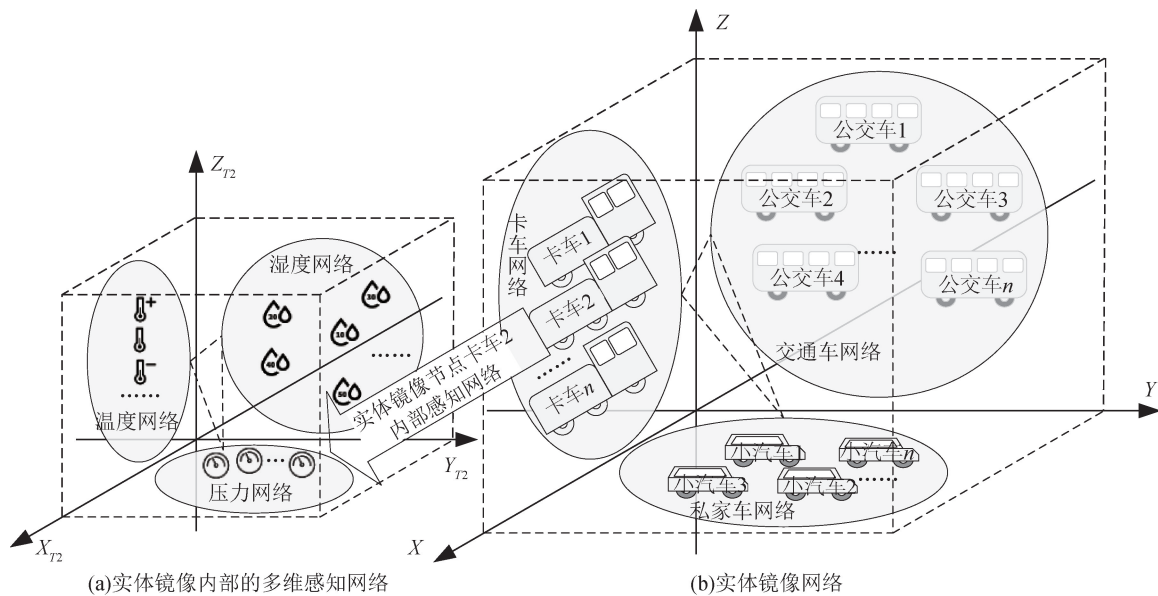


图4 虚实融合网络的一般架构

$$V=K_0N^2 \quad (3)$$

其中： V 为网络价值； K_0 为网络价值系数； N 为节点数量； N^2 实为 $N(N-1)$ ，意为 N 个节点与其余 $(N-1)$ 个节点的总连接数量，当 N 趋于正无穷大时，约为 N^2 。

若在某虚实融合网络中，假定实体类型数为 m_0 ，受空间位置等限制，为确保同类型实体均处于该维度镜像网络中，设第 i 种实体的镜像网络数量为 W_i （其中 $i \leq m_0$ ），则所有实体的镜像网络数量 r_1 如式(4)所示。

$$r_1 = \sum_{i=1}^{m_0} W_i \quad (4)$$

假定每个镜像网络的节点数量为 $N(N \geq 2)$ ，每个镜像的内部感知网络维度数为 r_2 ，则其感知网络数量也为 r_2 ，每张网络的节点数量为 $N^\alpha(N^\alpha \geq 2)$ 。以某镜像节点为基准节点，该镜像节点与同维度镜像节点产生的直接连接数为 $(N-1)$ ，通过镜像节点与感知节点产生的间接连接数为 $(N-1)r_2N^\alpha$ ，则所有镜像节点通过同维度网络连接产生的网络价值 $V_{\text{同}}$ 如式(5)所示。

$$V_{\text{同}} = r_1 K_0 N(N-1) r_2 N^\alpha \quad (5)$$

该镜像节点与异质网络维度镜像节点产生的直接连接数为 $(r_1-1)N$ ，通过镜像节点与感知节点产生的间接连接数为 $(r_1-1)Nr_2N^\alpha$ ，则所有镜像节点通过异质网络维度连接产生的网络价值 $V_{\text{异}}$ 如式(6)所示。

$$V_{\text{异}} = r_1 K_0 N(r_1-1) N r_2 N^\alpha \quad (6)$$

由式(5)、式(6)加总，可得该虚实融合网络的网络价值 $V_{\text{总}}$ 如式(7)所示。

$$V_{\text{总}} = K_0 r_1 r_2 N N^\alpha (r_1 N - 1) \quad (7)$$

当镜像节点数量 N 趋于无穷大时，如式(8)所示。

$$V_{\text{总}} = K_0 r_1^2 r_2 N^2 N^\alpha \quad (8)$$

对比式(3)、式(8)可知，较传统网络，虚实融合网络的网络维度数巨幅增加，总连接数呈海量级别，网络价值远大于传统单一维度的小节点数网络。

(四) 镜像制造

镜像制造，是指在镜像环境中开展设计、制造等生产活动的制造模式。包含两个部分：一是研发环节，在镜像环境中以数字化形式设计、优化产品原型，形成产品数字原型、数字模具；二是生产环节，通过先行在镜像环境中虚拟生产形成生产方案，再将生产方案应用于实体车间生产，即可打印出产品实体成品，并可通过在镜像环境中更换数字模具实现个性化定制。镜像制造模式示意如图5所示。

镜像制造是制造活动的远程映射，属于物理制造系统的数字孪生体，物理制造系统与其镜像系统相互映

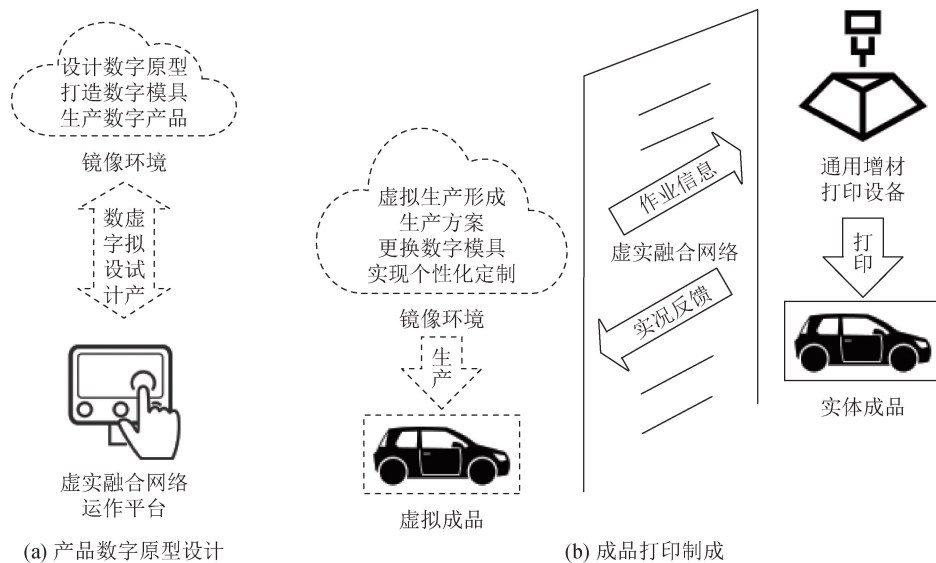


图5 镜像制造模式示意

射、实时互动。镜像系统是对生产场景的全息映射,可用于对生产活动进行远程监控和后台介入。镜像制造是基于“车间智能体+镜像网络”的虚实融合生产系统,而非纯虚拟的数字模拟。对生产活动的数字模拟与物理生产车间之间并无直接映射与互动关系,因而在功能上远不如实时互动的镜像系统。

四、智能制造的基本生产特征

(一) 高初始投入特征

一是智能化投入。假定工业机器人的组成部件数量为 $n_{件}$,为每个部件购置处理单元的均价为 $p_{芯}$,为所有部件购置纳米传感器的数量为 $n_{感}$,纳米传感器的均价为 $p_{感}$,则智能化的初始投入 $t_{智能化}$ 为

$$t_{智能化} = p_{芯}n_{件} + p_{感}n_{感} \tag{9}$$

二是镜像化投入。假定每个传感器的镜像化均价为 $p_{镜}$,则镜像化的初始投入 $t_{镜像化}$ 为

$$t_{镜像化} = p_{镜}n_{感} \tag{10}$$

三是网络化投入。假定建设单个物联网的均价为 $p_{网}$,根据实体类型将物联网分为 n_1 类,根据网络功能分为 n_2 类,根据网络空间位置分为 n_3 类,以此类推,物联网总数 $n_{网}$ 为

$$n_{网} = n_1n_2n_3 \cdots n_n \tag{11}$$

则网络化的初始投入 $t_{网络化}$ 为

$$t_{网络化} = p_{网}n_{网} \tag{12}$$

由式(9)、式(10)、式(12)加总,可得初始投入 T 为

$$T = p_{芯}n_{件} + (p_{感} + p_{镜})n_{感} + p_{网}n_{网} \tag{13}$$

其中:当 $n_{件}$ 、 $n_{感}$ 、 $n_{网}$ 均为极大的数值时,则令 $p_{芯}n_{件}$ 、 $(p_{感} + p_{镜})n_{感}$ 、 $p_{网}n_{网}$ 分别为 m_1 、 m_2 、 m_3 ,那么此三者之和也为一个充分大的数,即高初始投入。

(二) 无人生产特征

智能制造的本质是车间智能体取代人类,接管生产系统。智能制造的发展就是人类持续退出生产一线的过程。无人生产,即人类完全退出生产系统,车间智能体完全接管生产系统。

传统制造高度依赖人类。手工业经济时代,人类是全职劳动者,投入生产的脑力和体力均来自人类;工业经济时代,人类担任关键岗位,机床等生产工具的使用大幅减轻体力负担;近现代经济中,人类仍需在生产中担任要职,缺乏智能的生产工具并不能使人类从繁重的生产劳动中解放出来。经济时代演进中的人力岗位变迁如图 6 所示。

图 6 中,人力岗位的变迁随经济时代演进呈曲线下降趋势。在智能经济时代,当车间智能体具备优于人类的生产能力,那么该人力岗位将会被取代。单体能力上,车间智能体具有强大的感知与处理能力,生产能力远胜于人类;协作能力上,车间智能体依托虚实融合网络可实现多边零延迟高效协同,协作效率远优于人类。超级形态的智能制造系统可实现无人生产。

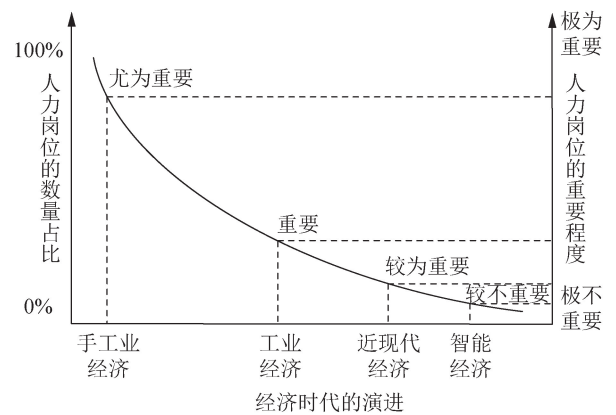


图 6 经济时代演进中的人力岗位变迁

(三) 镜像制造特征

智能制造具有现实与网络融合的“车间智能体+镜像网络”制造特征,即镜像制造特征。

传统制造依赖实体环境。一是产品研发消耗大量实物,成本高;二是研发工具不够智能,效率低;三是实体研发行为不可逆,容错率低;四是实体模具和生产工序无法更改,生产柔性低。镜像制造在镜像环境中进行数字化开发,高度智能,容错率高,无实物消耗;数字模具和生产工序动态更新,生产柔性高。镜像制造与传统制造的特征对比如表 1 所示。

(四) 增材制造特征

增材制造,是参照数字模具,使用可打印原材料逐层打印出产品实体,原材料耗损极低的加工方式。传统制造采用减材制造,是参照实体模具,通过不断切削打磨原材料直至仅剩成品部分,原材料耗损较高的加工方式。

智能制造采用增材制造,数字模具易创建、修改,实现个性化定制;减材制造每次加工都有原材料耗损,而增材制造的加工过程是在不断叠加可打印原材料,按需使用原材料,耗损几乎为零。增材制造与减材制造的特征对比如表2所示。

(五) 资产通用特征

资产通用,是指一套生产设备能够用于生产任意产品。

传统制造已购置的专用生产设备仅适用于生产单一或小类别产品,一旦停产或转产,只能停用或购置新的专用生产资产,资产专用性极高。而智能制造采用通用增材打印设备,若停产或转产,仅需更换产品的数字模具和生产数据,便可用于生产其他产品,实现资产通用。资产通用与资产专用的特征对比如表3所示。

智能制造采用车间智能体,可根据生产需要智能重组部件,通过学习掌握生产,通过生产验证总结,进而优化数据再学习,形成学习—生产—优化—再学习的自循环进化能力,逐步生产跨类别、跨行业产品,最终实现全产业产品的生产。

(六) 生产要素融合特征

手工业经济时代,劳动、技术要素来自人类,资本即生产工具;工业经济时代,大部分劳动、技术要素来自生产工具,小部分劳动、技术要素来自人类;智能经济时代,车间智能体融合劳动、资本、技术要素于一体,成为生产要素的唯一来源。经济时代演进中的生产要素变化如表4所示。

不妨定义车间智能体的使用量为单要素 X , $X = \text{车间智能体} \times \text{工时}$,智能制造的劳动要素、资本要素、技术要素投入量由 X 来表达, X 与三者量化关系为

$$X = X_L \quad (14)$$

$$X = X_K \quad (15)$$

$$X = X_A \quad (16)$$

其中: X_L 、 X_K 、 X_A 分别为智能制造的劳动要素、资本要素、技术要素投入量。投入一单位的单要素 X ,即为投入一单位的劳动要素 X_L 、或一单位的资本要素 X_K 、或一单位的技术要素 X_A 。

五、智能制造的成本属性异变

(一) 高固定成本属性

高固定成本,系指固定成本远远大于可变成本,或指智能制造的固定成本比重大于传统制造。此处定义固定成本比重如式(17)所示。

$$FC_{\%} = \frac{FC}{FC+VC} \times 100\% \quad (17)$$

表1 镜像制造与传统制造的特征对比

对比项目	传统制造	镜像制造
研发环境	实体环境	镜像环境
研发工具智能程度	低	高
实物消耗量	大	无
容错率	低	高
生产环境	实体环境	实体环境+镜像环境
生产柔性	低	高

表2 增材制造与减材制造的特征对比

对比项目	减材制造	增材制造
作业场所	传统车间	智能车间
作业工具	数控机床	车间智能体
作业参照物	实体模具	数字模具
原材料类型	传统原材料	可打印原材料
加工手法	切削、打磨	叠加、累积
成本效应	高原材料浪费	极低原材料浪费

表3 资产通用与资产专用的特征对比

对比项目	资产专用	资产通用
设备与产品数量比例	一对一	一对多
模具类型	实体模具	数字模具
加工方式	减材制造	增材制造
转产难度	极高	极低

表4 经济时代演进中的生产要素变化

生产要素	手工业经济	工业经济	智能经济
劳动	人力	人力+机器	车间智能体
资本	手工工具	机器	车间智能体
技术	人脑	人脑+机器	车间智能体

其中: $FC_{\%}$ 为固定成本比重; FC 为固定成本; VC 为可变成本。

传统制造的固定成本 $FC_{\text{传统}}$ 与可变成本 $VC_{\text{传统}}$ 如式(18)、式(19)所示。

$$FC_{\text{传统}} = C_{\text{设备设施}} \tag{18}$$

$$VC_{\text{传统}} = wL + vK \tag{19}$$

其中: $C_{\text{设备设施}}$ 为设备设施的成本; L 为劳动投入量; K 为资本投入量; w 为劳动价格即工资; v 为资本价格即利率。由式(17)~式(19)可得传统制造的固定成本比重 $FC_{\%}^{\text{传统}}$ 如式(20)所示。

$$FC_{\%}^{\text{传统}} = \frac{C_{\text{设备设施}}}{C_{\text{设备设施}} + wL + vK} \times 100\% \tag{20}$$

智能制造的固定成本 $FC_{\text{智能}}$ 如式(21)所示。

$$FC_{\text{智能}} = C_{\text{设备设施}} + C_{\text{智能化}} + C_{\text{网络化}} + C_{\text{镜像化}} \tag{21}$$

其中: $C_{\text{智能化}}$ 、 $C_{\text{网络化}}$ 、 $C_{\text{镜像化}}$ 为三化成本。由式(13),细化三化成本,可得式(22)。

$$FC_{\text{智能}} = C_{\text{设备设施}} + p_{\text{芯}}n_{\text{件}} + (p_{\text{感}} + p_{\text{镜}})n_{\text{感}} + p_{\text{网}}n_{\text{网}} \tag{22}$$

三化成本的取值范围参见表 5。

由表 5 可知,智能制造的固定成本巨幅增加。引入无人化程度 $u_i, u_i \in [0, 100\%)$, 可得智能制造的可变成本 $VC_{\text{智能}}$ 如式(23)所示。

$$VC_{\text{智能}} = wL(1 - u_i) + vK \tag{23}$$

由式(23)可知,智能制造的可变成本显著下降。

由式(17)、式(22)、式(23),可得智能制造的固定成本比重 $FC_{\%}^{\text{智能}}$ 如式(24)所示。

$$FC_{\%}^{\text{智能}} = \frac{C_{\text{设备设施}} + p_{\text{芯}}n_{\text{件}} + (p_{\text{感}} + p_{\text{镜}})n_{\text{感}} + p_{\text{网}}n_{\text{网}}}{C_{\text{设备设施}} + p_{\text{芯}}n_{\text{件}} + (p_{\text{感}} + p_{\text{镜}})n_{\text{感}} + p_{\text{网}}n_{\text{网}} + wL(1 - u_i) + vK} \times 100\% \tag{24}$$

其中: $n_{\text{件}}$ 、 $n_{\text{感}}$ 、 $n_{\text{网}}$ 均趋于无穷大,故 $FC_{\%}^{\text{智能}}$ 趋近于 100%。由式(20)、式(24),可得智能制造与传统制造的固定成本比重之比如式(25)所示。

$$\frac{FC_{\%}^{\text{智能}}}{FC_{\%}^{\text{传统}}} \approx \frac{C_{\text{设备设施}} + wL + vK}{C_{\text{设备设施}}} > 1 \tag{25}$$

由上述分析可知,智能制造的固定成本远高于可变成本,智能制造的固定成本比重高于传统制造。

(二) 弱组织成本属性

组织成本,指组织内部的人员管理成本和人员之间的信息成本。弱组织成本,系指因管理人员减少,组织层级减少,组织成本下降,或指组织成本远低于传统制造组织结构下的组织成本。组织成本 $C_{\text{组织}}$ 如式(26)所示。

$$C_{\text{组织}} = C_{\text{管理者薪资}} + C_{\text{信息传递}} + C_{\text{指令执行}} + C_{\text{信息延迟}} \tag{26}$$

其中: $C_{\text{管理者薪资}}$ 为人员管理成本,即支付给管理人员的薪资; $C_{\text{信息传递}}$ 为信息在组织层级间传递的成本; $C_{\text{指令执行}}$ 为指令在各层级不完全执行,导致执行效果的损失; $C_{\text{信息延迟}}$ 为信息延迟的成本。

传统制造的管理人员数量取决于生产一线的员工数量。生产扩大,生产一线员工增长,受管理幅度限制,基层管理人员和管理部门随之增长,进而有必要设置二级管理人员和管理部门,以此类推,生产规模再扩大,便需设置多管理层级,组织结构逐步形成金字塔。传统制造的金字塔型组织结构如图 7 所示。

基于图 7,设管理幅度为 r (r 为大于 1 的整数),组织层级为 n ,第一层级为生产一线员工,人数为 N_1 ,第二层级至第 n 层级为管理

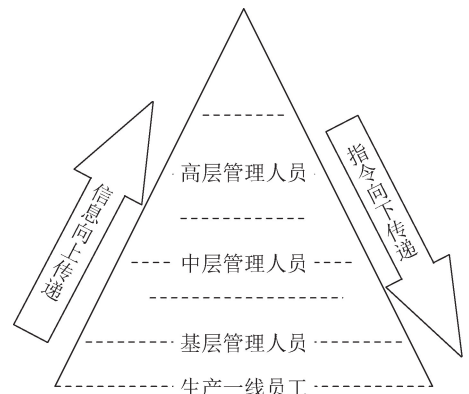


图 7 传统制造的金字塔型组织结构

人员,人数分别为 $N_2, N_3, \dots, N_{n-1}, N_n$ 。

(1) 当 $N_1 \in [0, r)$ 。此时组织层级 n 为 1, 无管理层级, 传统制造与智能制造的组织成本皆为零。

(2) 当 N_1 为大于等于 r 整数倍的数。由于 $n = \log_r(N_1) + 1$, 故各层级人数分别为 $N_1 = r^{n-1}, N_2 = r^{n-2}, \dots, N_{n-1} = r, N_n = 1$, 人员管理成本 $C_{\text{管理者薪资}}$ 为

$$C_{\text{管理者薪资}} = \frac{1-r^{n-1}}{1-r} s \quad (27)$$

其中: s 为管理者薪资均值。

设信息完全传输的价值为 I , 信息在层级间传递的摩擦系数为 μ , 则信息传递成本 $C_{\text{信息传递}}$ 为

$$C_{\text{信息传递}} = I [1 - (1-\mu)^{n-1}] \quad (28)$$

设指令完全执行的价值为 O , 指令在各层级执行的衰减系数为 σ , 则指令执行成本 $C_{\text{指令执行}}$ 为

$$C_{\text{指令执行}} = O [1 - (1-\sigma)^{n-1}] \quad (29)$$

设单位时间内的信息延迟成本为 c_i , 信息在层级间传递时间均值为 τ , 则信息延迟成本 $C_{\text{信息延迟}}$ 为

$$C_{\text{信息延迟}} = c_i (n-1) \tau \quad (30)$$

由式(27)~式(30), 可得传统制造的组织成本 $C_{\text{组织}}^{\text{传统}}$ 为

$$C_{\text{组织}}^{\text{传统}} = \frac{1-r^{n-1}}{1-r} s + I [1 - (1-\mu)^{n-1}] + O [1 - (1-\sigma)^{n-1}] + c_i (n-1) \tau \quad (31)$$

引入无人化程度 u_i , 则智能制造的生产一线人数为 $N_1(1-u_i)$, 令 $n = \log_r [N_1(1-u_i)] + 1$, 其中, $N_1(1-u_i)$ 取所有值中大于等于 r 整数倍的数, 可得智能制造的组织成本 $C_{\text{组织}}^{\text{智能}}$ 为

$$C_{\text{组织}}^{\text{智能}} = \frac{1-N_1(1-u_i)}{1-r} s + I [1 - (1-\mu)^{\log_r N_1(1-u_i)}] + O [1 - (1-\sigma)^{\log_r N_1(1-u_i)}] + c_i [\log_r N_1(1-u_i)] \tau \quad (32)$$

式(32)中, $C_{\text{组织}}^{\text{智能}}$ 随 u_i 增长而下降。当生产一线人数减少为最小值 r 时, 组织层级为 2, 管理人员为 1, 组织成本最小为 $(s + I\mu + O\sigma + c_i\tau)$, 远小于 $C_{\text{组织}}^{\text{传统}}$ 。

(三) 弱定制成本属性

定制成本, 指为满足客户个性化需求, 设计、制造产品产生的极难被产量分摊的成本。传统定制消耗大量实物, 导致定制成本极高。弱定制成本, 系指定制成本低于传统定制, 或指定制与批量单品的成本差异极小。

智能制造采用数字设计和数字模具, 较实体设计和实体模具, 成本极低。智能制造的定制成本 $C_{\text{定制}}^{\text{智能}}$ 为

$$C_{\text{定制}}^{\text{智能}} = C_{\text{数字设计}} + C_{\text{数字模具}} \quad (33)$$

其中: $C_{\text{数字设计}}$ 、 $C_{\text{数字模具}}$ 分别为数字设计和模具的成本, 产量为 1。传统制造的定制成本 $C_{\text{定制}}^{\text{传统}}$ 为

$$C_{\text{定制}}^{\text{传统}} = C_{\text{实体设计}} + C_{\text{实体模具}} \quad (34)$$

其中: $C_{\text{实体设计}}$ 、 $C_{\text{实体模具}}$ 分别为设计与模具消耗的实物成本, 产量为 1。由式(34)可得传统制造的批量单品成本 $C_{\text{批量}}^{\text{传统}}$ 为

$$C_{\text{批量}}^{\text{传统}} = \frac{C_{\text{实体设计}} + C_{\text{实体模具}}}{q} \quad (35)$$

其中: q 取值为较大的整数。三种制造模式的成本对比如表 6 所示。

由表 6 可知, 智能定制成本低于传统定制。由式(33), 可得智能制造的批量单品成本 $C_{\text{批量}}^{\text{智能}}$ 如式(36)所示。

$$C_{\text{批量}}^{\text{智能}} = \frac{C_{\text{数字设计}} + C_{\text{数字模具}}}{q} \quad (36)$$

由式(33)和式(36)可得智能制造的定制与批量单品成本之差 Δ 为

表 6 智能定制与传统批量、传统定制的成本结构对比

对比项目	传统批量	传统定制	智能定制
设计成本	高	高	低
模具成本	高	高	低
制造成本	高	高	低
产量	q	1	1
单品成本	低	高	低

$$\Delta = C_{\text{定制}}^{\text{智能}} - C_{\text{批量}}^{\text{智能}} = \frac{q-1}{q} (C_{\text{数字设计}} + C_{\text{数字模具}}) \quad (37)$$

式 (37) 中, 因 q 为较大的整数, 故智能制造的定制与批量单品成本差异极小。

(四) 弱耗损成本属性

耗损成本, 指切削、打磨原材料产生的生产工具与原料耗损成本。传统制造采用减材制造, 耗损成本极高。弱耗损成本, 系指改变切削、打磨等加工方式, 降低耗损成本, 或指远低于传统制造的耗损成本。

传统制造的减材耗损成本 $C_{\text{减材耗损}}$ 为

$$C_{\text{减材耗损}} = C_{\text{实体模具耗损}} + C_{\text{减材工具耗损}} + C_{\text{减材原料耗损}} \quad (38)$$

其中: $C_{\text{实体模具耗损}}$ 为实体模具耗损; $C_{\text{减材工具耗损}}$ 为减材制造工具耗损; $C_{\text{减材原料耗损}}$ 为减材制造原料耗损。智能制造采用增材制造和数字模具, $C_{\text{实体模具耗损}}$ 为零。智能制造的增材耗损成本 $C_{\text{增材耗损}}$ 为

$$C_{\text{增材耗损}} = C_{\text{增材工具耗损}} + C_{\text{增材原料耗损}} \quad (39)$$

其中: $C_{\text{增材工具耗损}}$ 为增材制造工具耗损; $C_{\text{增材原料耗损}}$ 为增材制造原料耗损。对比式 (38)、式 (39), 因为 $C_{\text{增材工具耗损}} < C_{\text{减材工具耗损}}$, $C_{\text{增材原料耗损}} < C_{\text{减材原料耗损}}$, 所以 $C_{\text{增材耗损}}$ 远低于 $C_{\text{减材耗损}}$, 故智能制造具有弱耗损成本属性。

(五) 弱转产成本属性

转产成本, 指转产带来的专用资产重置成本。传统制造的资产与产品高度绑定, 转产需重新购置专用资产, 转产成本极高。弱转产成本, 系指转产需重新购置专用资产的成本极低, 或指远低于传统制造的转产成本。

传统制造的转产成本 $C_{\text{转产}}^{\text{传统}}$ 为

$$C_{\text{转产}}^{\text{传统}} = C_{\text{专用实体设备}} + C_{\text{专用实体模具}} + C_{\text{专业技术人员}} \quad (40)$$

其中: $C_{\text{专用实体设备}}$ 为专用实体设备成本; $C_{\text{专用实体模具}}$ 为专用实体模具成本; $C_{\text{专业技术人员}}$ 为专业技术人员成本。智能制造转产仅需更换产品数据库, 故智能制造的转产成本 $C_{\text{转产}}^{\text{智能}}$ 为

$$C_{\text{转产}}^{\text{智能}} = C_{\text{产品数据库}} \quad (41)$$

其中: $C_{\text{产品数据库}}$ 为产品数据库成本。对比式 (40)、式 (41), 更换产品数据库的成本远低于重新购置专用实体设备的成本, 故智能制造具有弱转产成本属性。

(六) 弱要素协调成本属性

要素协调成本, 指异质或同质生产要素间的协同配合成本。弱要素协调成本, 系指生产要素间高度匹配、协同, 协调成本极低, 或指远低于传统制造的要素协调成本。

生产的本质是持续协调劳动、资本、技术三要素配合的过程。传统三要素相互独立, 劳动、技术来自人类, 资本即生产工具, 受生物和社会属性影响, 人与人之间高度配合受限, 生产工具因缺乏智能, 人类靠经验来生产, 无法与生产工具高度配合。同质要素与异质要素都存在配合障碍, 需协调以实现高度配合。传统制造的协调成本 $C_{\text{协调}}^{\text{传统}}$ 为

$$C_{\text{协调}}^{\text{传统}} = C_{LK} + C_{LA} + C_{KA} + C_{LKA} + C_{LL} + C_{KK} + C_{AA} \quad (42)$$

其中: C_{LK} 为协调 L 与 K 的成本, 以此类推。智能制造无异质要素, 仅有车间智能体单要素, 仅需协调单要素 X 。智能制造的协调成本 $C_{\text{协调}}^{\text{智能}}$ 为

$$C_{\text{协调}}^{\text{智能}} = C_{XX} \quad (43)$$

对比式 (42)、式 (43) 可知, 智能制造具有弱要素协调成本属性。

六、智能制造的成本函数构建与分析

(一) 智能制造的弱可变成本函数

智能制造成本 C 由可变成本 $VC_{\text{智能}}$ 、弱可变成本 $LC_{\text{智能}}$ 、固定成本 $FC_{\text{智能}}$ 构成, 如式 (44) 所示。

$$C = VC_{\text{智能}} + LC_{\text{智能}} + FC_{\text{智能}} \quad (44)$$

参考柯布-道格拉斯生产函数, 可得智能制造的生产函数如式 (45) 所示。

$$q = X_A X_L^\alpha X_K^\beta \quad (45)$$

其中： q 为产量； X_A 、 X_L 、 X_K 分别为技术、劳动、资本投入量； α 、 β 分别为劳动、资本要素的产出弹性系数， $\alpha > 0$ ， $\beta > 0$ 。传统成本函数中，可变成本来自劳动、资本、技术三要素的使用成本，传统制造的可变成本 $VC_{\text{传统}}$ 参见式(46)。

$$VC_{\text{传统}} = wL + vK \quad (46)$$

智能制造情景下，传统三要素被融合为单一要素——车间智能体，因此，智能制造成本函数中的可变成本主要来自车间智能体的使用成本。由式(45)、式(14)、式(15)、式(16)，可得智能制造关于 X 的生产函数如式(47)。

$$q = X^{1+\alpha+\beta} \quad (47)$$

智能制造关于 X 的可变成本 $VC_{\text{智能}}$ 如式(48)所示。

$$VC_{\text{智能}} = \xi X(q) \quad (48)$$

其中： ξ 为车间智能体的使用价格。

智能制造的弱可变成本 $LC_{\text{智能}}$ ，由组织、定制、耗损、转产、要素协调成本构成，参见式(49)。

$$LC_{\text{智能}} = C_{\text{组织}}^{\text{智能}} + C_{\text{定制}}^{\text{智能}} + C_{\text{增材耗损}} + C_{\text{转产}}^{\text{智能}} + C_{\text{协调}}^{\text{智能}} \quad (49)$$

根据智能制造的弱组织成本、弱定制成本、弱耗损成本、弱转产成本和弱要素协调成本属性，式(49)右端为趋于零的极小数，不妨取 $LC_{\text{智能}}$ 的渐近线为 m ， m 为充分小的正数，参见式(50)。

$$LC_{\text{智能}} = m \quad (50)$$

根据智能制造的高固定成本属性，不妨取 $FC_{\text{智能}}$ 的值为 M ， M 为充分大的正数，参见式(51)。

$$FC_{\text{智能}} = M \quad (51)$$

由式(48)、式(50)、式(51)，可得智能制造的生产成本函数如式(52)所示。

$$C = \xi X(q) + m + M \quad (52)$$

基于式(47)，可将式(52)变换为式(53)。

$$C = \xi q^{\frac{1}{1+\alpha+\beta}} + m + M \quad (53)$$

上式中，鉴于 $(\alpha+\beta) > 0$ ， $[1/(1+\alpha+\beta)] \in (0, 1)$ ，则 $C' > 0$ ， $C'' < 0$ ，据此，可绘制智能制造的成本曲线。智能制造与传统制造的成本曲线形态对比参见图8。

图8(a)传统制造成本曲线随产量先减速上升再加速上升；图8(b)智能制造成本曲线随产量向右上方上升，但上升速度随产量增加而逐步放缓，整体呈现出自左下方向右上方减速增长的弱可变态势。

(二) 智能制造的边际成本递减律

对式(53)求导，可得智能制造的边际成本 C' 为

$$C' = \frac{\xi}{1+\alpha+\beta} q^{-\frac{\alpha+\beta}{1+\alpha+\beta}} > 0 \quad (54)$$

式(54)中，因 $(\alpha+\beta) > 0$ ，故 $C' > 0$ ，即智能制造的边际成本大于零，表明智能制造的生产成本随产量增加。对式(54)求导，可得智能制造成本的二阶导 C'' 为

$$C'' = -\frac{\xi(\alpha+\beta)}{(1+\alpha+\beta)^2} q^{-\frac{1+2(\alpha+\beta)}{1+\alpha+\beta}} < 0 \quad (55)$$

式(55)中，因 $(\alpha+\beta) > 0$ ，故 $C'' < 0$ ，表明智能制造的边际成本随产量递减，简称边际成本递减。据此，可绘制智能制造的边际成本曲线如图9所示。

图9中，智能制造的边际成本曲线随产量向右下方下降，并无限趋近于零，但下降速度随产量增加而逐步放缓，整体呈现出自左上方向右下方减速下降的凸型曲线。

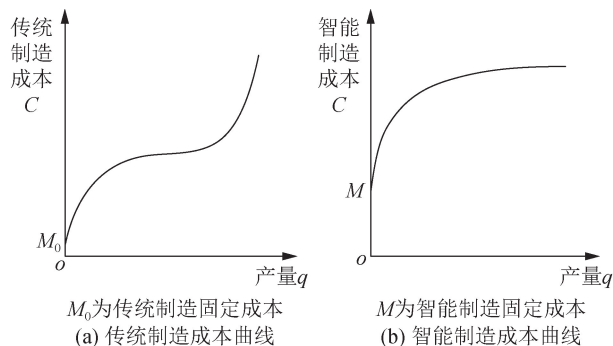


图8 智能制造与传统制造的成本曲线形态对比

(三) 智能制造边际成本递减溯源

智能制造的边际成本递减,与传统制造的边际成本呈 U 型变化的观点存在显著差异,本文认为有以下缘由。

(1)高固定成本冲淡效应。智能制造具有显著的高固定成本特征,高固定成本是单要素化的必然结果,单要素化程度越高,亦即机器化程度越高,高固定成本会冲淡可变成本的影响,使得可变成本重要性显著下降,固定成本越高,冲淡效应越显著。可变成本重要性的下降,导致边际成本重要性随之下降。在此情形下,平均成本的重要性将远远超过边际成本。基于式(53),可得智能制造的平均成本 AC 为

$$AC = \xi q^{-\frac{\alpha+\beta}{1+\alpha+\beta}} + \frac{m+M}{q} \quad (56)$$

对式(56)求导,可得智能制造平均成本的一阶导 $(AC)'$ 为

$$(AC)' = -\frac{\xi(\alpha+\beta)}{1+\alpha+\beta} q^{-\frac{1+(\alpha+\beta)}{1+\alpha+\beta}} - \frac{m+M}{q^2} < 0 \quad (57)$$

由式(57)可知,智能制造的平均成本随产量持续下降,因此边际成本必定随产量持续下降,即边际成本递减。

(2)单要素去拥挤效应。传统制造三要素相互独立,在特定的生产环境下,当其他要素不变,某一要素增加,从而导致该要素数量偏多,这种数量偏多叫拥挤。去拥挤效应,也是要素边际产出由偏导数变为全导数的效应。传统制造的要素边际产出 MP_L 为

$$MP_L = \frac{\partial q}{\partial L} > 0 \quad (58)$$

对式(58)求导,可得传统制造的要素产出二阶偏导 MP_{LL} 为

$$MP_{LL} = \frac{\partial^2 q}{\partial L^2} < 0 \quad (59)$$

式(59)中,要素 L 的边际产出递减,即边际收益递减,边际成本递增。智能制造具有生产要素融合特征,不存在要素拥挤问题,故智能制造的边际要素产出 MP_X 为全导数,如式(60)所示。

$$MP_X = (1+\alpha+\beta)X^{\alpha+\beta} > 0 \quad (60)$$

对式(60)求导,可得智能制造的要素产出二阶导 MP_{XX} 如式(61)所示。

$$MP_{XX} = (1+\alpha+\beta)(\alpha+\beta)X^{\alpha+\beta-1} > 0 \quad (61)$$

由式(61)可知,智能制造的单要素边际产出递增,即边际收益递增,边际成本递减。

(3)单要素去协调效应。去协调效应,就是不需要协调要素间配合的效应。传统生产活动需不断协调各要素相互配合,协调失灵会导致生产效率损失。智能制造具有生产要素融合特征,无须协调。智能制造的单要素去协调效应如图 10 所示。

图 10 中,传统制造必须在图 10(a)的三要素协调区才能开展生产,要素融合后,智能制造的单要素存在域即是生产域,实现去协调效应。

(4)增材制造去耗损效应。传统制造采用减材制造,生产中会产生大量实物耗损,这种产生实物耗损的现象就称为耗损效应;相反,智能制造采用增材制造,生产中无边角料等耗损产生,不存在耗损效应。增材制造的去耗损效应如图 11 所示。

(5)镜像制造去定制效应。传统制造定制生产带来高昂的一次性产线成本(包括产品设计图纸、模具、定制专用设备等),这种反规模生产带来高额定制成本的现象称为定制效应。传统制造定制属于实体定制,而智能制造定制属于镜像定制。镜像制造的去定制效应如图 12 所示。

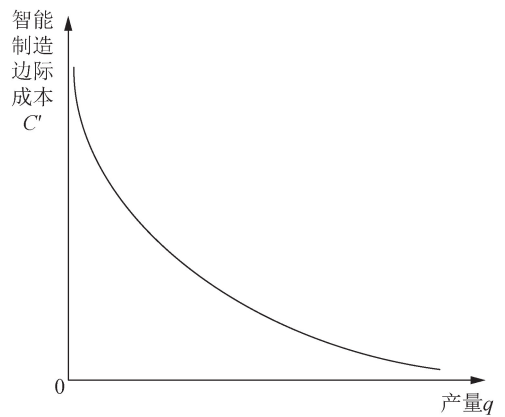


图 9 智能制造的边际成本曲线

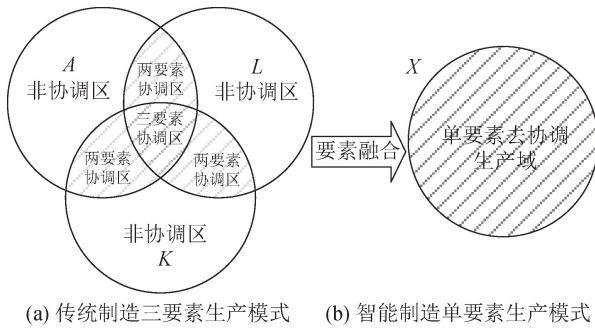


图 10 智能制造的单要素去协调效应

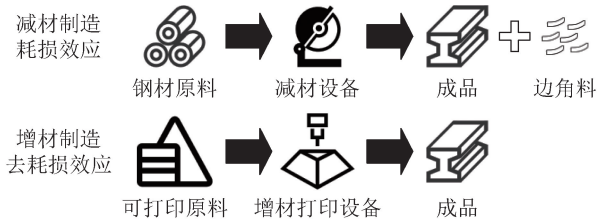


图 11 增材制造的去耗损效应

数字设计图纸和数字模具的修改成本趋近于零,专用减材制造设备被通用增材打印设备替代,定制成本显著下降,直至趋近于零。

(6)资产通用去转产效应。转产效应是因转产导致专用资产报废而产生的成本增加现象,转产效应来源于减材制造设备的专用性。而智能制造是数字化的增材制造模式,资产具有极高的通用性,转产不影响设备的继续使用,因此可以消除转产效应。资产通用的去转产效应如图 13 所示。

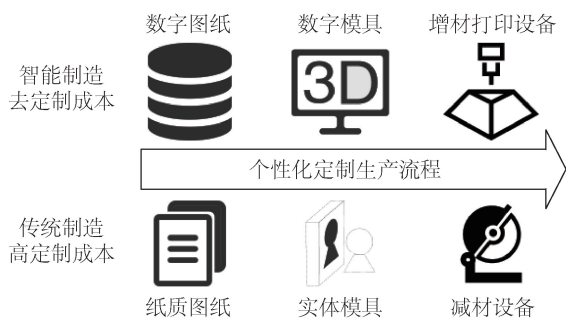


图 12 镜像制造的去定制效应

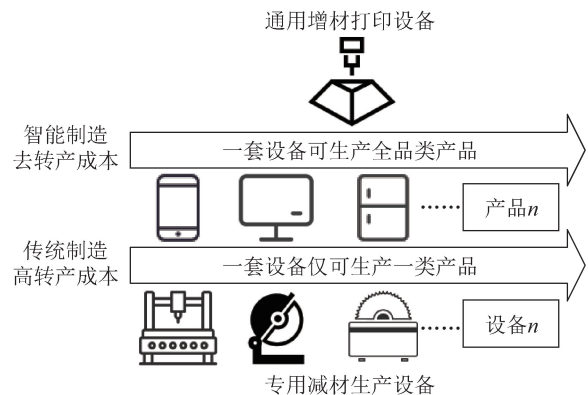


图 13 资产通用的去转产效应

(7)无人制造去组织效应。组织成本加速增长的现象称为组织效应。传统制造是由多层复杂组织实施的,组织层级随生产规模加速增长,具有极强的组织效应。而智能制造组织体系无限趋于扁平化和无人化,组织成本逐渐消失,从而可消除组织效应。无人制造的去组织效应如图 14 所示。

(四)智能制造成本函数计算示例

1. 相关参数赋值

车间智能体建造成本 M 赋值。根据智能制造系统投入爆炸效应^[40],车间智能体具有高固定成本特征,其成本规模远远大于传统车间的建造成本。在中国招标投标公共服务平台查阅“车间建设”项目中标公告,中标金额主要处于几千万元至几亿元范围内,平均而言,传统制造的车间建造成本为亿级水平,而智能制造车间建造成本远远大于传统制造。不失一般性,可设车间智能体的建造成本为万亿级水平,即可设 $M = 10^5$ 亿元。

要素产出弹性系数 α 与 β 、车间智能体使用价格 ξ 、弱可变成本 m 赋值。由前述分析可知,智能制造具有规模报酬递增特征,不妨设 α, β 之和为 2;车间智能体为生产设备,其使用价格 ξ 主要与建造成本和使用年限有关,可设车间智能体的使用价格计算公式如式(62)所示。

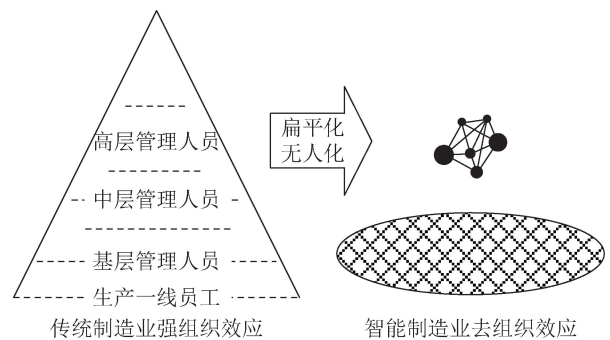


图 14 无人制造的去组织效应

$$\xi = \frac{M}{t_{\text{车间智能体}} \times 365 \times 24} \quad (62)$$

其中： $t_{\text{车间智能体}}$ 为车间智能体的使用年限。在固定资产使用年限上，胡凯和吴清^[41]将其设定为 14 年，赵善梅和吴士炜^[42]将其设定为 16 年，此处不妨取中间值 15 年，由式(62)可得使用价格 ξ 约为每单位工时 0.76 亿元。考虑到智能制造的弱可变成本充分小，不妨取 m 为 10^{-5} 亿元。

2. 成本函数表达

将各参数赋值代入，可得该智能制造系统的成本函数为

$$C = 0.76q^{\frac{1}{3}} + 10^5 + 10^{-5} \quad (63)$$

由式(63)可绘制该智能制造系统的成本曲线，如图 15 所示。

对式(63)求导，可得该智能制造系统的边际成本函数如式(64)所示。

$$C' = 0.25q^{-\frac{2}{3}} \quad (64)$$

由式(64)可绘制该智能制造系统的边际成本曲线，如图 16 所示。

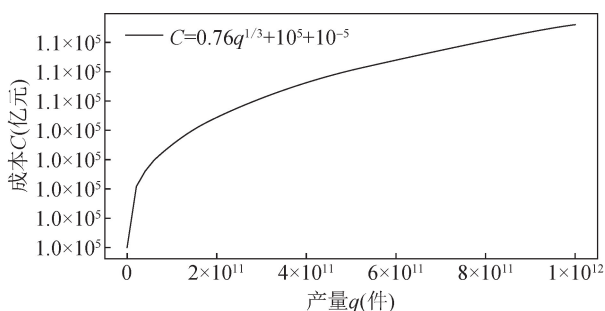


图 15 智能制造系统的成本曲线绘制

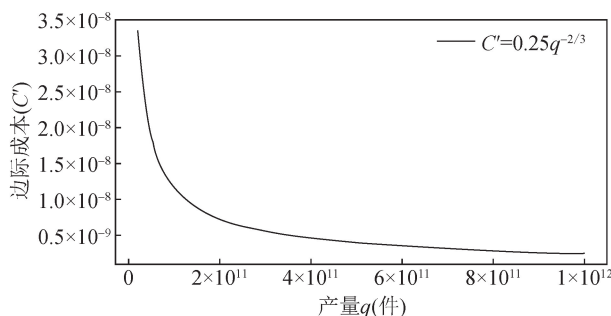


图 16 智能制造系统的边际成本曲线绘制

七、结论与政策建议

(一) 结论

面对智能制造迅猛发展的产业形势，以及智能制造生产成本属性显著异变的局面，本文以传统制造业为参照，比较研究了智能制造有别于传统制造的生产特征、成本属性和成本函数，为构建符合智能制造情景的新型生产成本理论框架奠定了一定的学术基础。论文的主要研究结论如下：

(1) 智能制造具有显著不同于传统制造的生产特征。传统制造主要采用“人+机器”的多要素实体车间生产模式，而智能制造则是采用“车间智能体+镜像网络”的单要素虚实融合生产模式。和传统制造相比，智能制造具有高初始投入、无人生产、镜像制造、增材制造、资产通用以及生产要素融合等鲜明特征。

(2) 智能制造具有显著不同于传统制造的成本属性。传统制造的成本主要源于强人力成本及强组织成本，因而具有强可变成本属性；而智能制造的成本主要源于智能车间高昂的初始建造成本，而源于人力成本及组织成本的可变成本被显著弱化。和传统制造相比，智能制造的生产成本属性异变主要体现在高固定成本、弱组织成本、弱定制成本、弱耗损成本、弱转产成本以及弱要素协调成本等方面。

(3) 智能制造具有显著不同于传统制造的成本函数。传统制造的成本函数属于随产量加速增长的强成本函数，而智能制造的成本函数属于随产量减速增长的弱成本函数。如果说传统制造的强成本函数导致边际成本递增，那么，智能制造的弱成本函数则呈现出明显的边际成本递减特征。

(4) 智能制造边际成本递减源于单要素虚实融合生产模式。具体来讲，一是高固定成本模式对可变成本的冲淡效应；二是单要素生产模式的去拥挤成本、去协调成本效应；三是增材制造模式的去生产耗损成本效应；四是镜像制造模式的去定制成本效应；五是资产通用模式的去转产成本效应；六是无人制造模式的去组织成本效应。

当然,要想完整地构建符合智能制造情景的新型生产成本理论体系,尚需进行更加系统的多维度研究。特别是要结合智能制造的生产实践,开展深入的量化分析、实证检验与案例剖析。可以预期,随着智能制造的不断发展,相关数据与案例的不断积累,将为进一步的系统研究提供更加丰富的素材支撑,智能制造新型生产成本理论体系将会逐渐成形和臻于完善。

(二) 政策建议

基于本文研究结果,特提出以下政策建议:

第一,针对智能制造的高初始投入、高固定成本特征,有序开展智能制造系统的众筹建造模式。智能制造系统的建造主要包括产线工业智能体群的配置,以及车间智能化、网络化和镜像化系统的构建,整体的初始投入水平远远高于传统制造系统,对建造资金的需求量极大,单家企业已经难以承受如此高昂的建造成本,因此有必要打破企业边界筹集建造资金。在此情形下,通过面向社会的众筹模式筹集建造资金,无疑将是破解智能制造系统高投入难题的可行途径。当然,众筹建造模式会涉及众多的利益主体,其有序开展必须要在政府部门的宏观指导下,分行业、分层次、分步骤地稳步推进。

第二,针对智能制造随产量减速增长的弱成本函数以及由此产生的边际成本递减律,积极推行智能制造系统的产能共享模式。智能制造的生产成本随产量增加而减速增长,其边际成本呈现持续下降的递减趋势,这将带来生产的平均成本随产量扩大而持续下降,进而表现出强烈的超规模经济性。在此情形下,单家企业将难以消化这样的超级产能,从而会带来产能的巨量闲置与浪费。因此,为充分消化智能制造系统的超级产能,就有必要积极推行智能制造系统的产能共享,即将智能制造系统的产能共享给全行业乃至全社会,必要时甚至可以开展产能的全球输出。产能共享不仅消化了过剩产能,而且还可通过超规模生产而充分降低平均成本。

第三,针对智能制造的“车间智能体”单要素生产模式,尽早谋划智能时代产业工人的全新就业模式。智能制造是采用以工业智能体替代产业工人的单要素生产模式,其终极形态是无人产线、无人车间乃至无人工厂,亦即在生产一线将不再需要产业工人。工业智能体对产业工人的替代,将会使得产业工人的位置不断地远离生产一线,进而从根本上改变传统的就业结构。当然,产业工人在生产一线失去的岗位,将会在远离一线的位置上得到弥补,甚至有可能产生比失去岗位更多的全新岗位。问题是失去老岗位的产业工人如何及时地适应新岗位,而这就需要劳动与人力资源部门提前谋划和尽早布局,通过技能培训、素质拓展和市场化匹配等方式,妥善解决智能时代产业工人的岗位转换问题。

第四,针对智能制造的弱定制成本特征,大力引导消费者不断介入生产活动。智能制造的生产活动是在产线车间的镜像网络上启动的,即首先是在车间镜像网络上进行数字产品的设计与虚拟制造,待数字产品确认后再由实体产线按照增材制造流程打印出实体产品。这种“镜像设计+增材制造”生产流程,为消费者介入生产活动提供了良好的客观条件,即消费者可以在车间镜像网络上设计自己满意的数字形态产品,之后再交由产线打印交货。如此,则可以完美地实现工业产品的消费者个性化定制,且又不会带来高昂的定制成本。同时,通过直接介入生产活动,消费者将会实现向“消产者”的身份转变。

参考文献

- [1] LIU C, LI Y, SHEN W. Integrated manufacturing process planning and control based on intelligent agents and multi-dimension features[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(9): 1457-1471.
- [2] TAO F, ZHANG M, CHENG J, et al. Digital twin workshop: A new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(1): 1-9.
- [3] IVANOV D, DOLGUI A, SOKOLOV B, et al. A dynamic model and an algorithm for short-term supply chain scheduling in the smart factory industry 4.0[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(2): 386-402.
- [4] 臧冀原, 刘宇飞, 王柏村, 等. 面向 2035 的智能制造技术预见和路线图研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4): 285-308.
- [5] BORANGIU T, MORARIU O, RAILEANU S, et al. Digital transformation of manufacturing. industry of the future with cyber-physical production systems[J]. Romanian Journal of Information Science and Technology, 2020, 23(1): 3-37.
- [6] 权小锋, 李闯. 智能制造与成本粘性——来自中国智能制造示范项目的准自然实验[J]. 经济研究, 2022, 57(4): 68-84.
- [7] 张强, 赵爽耀, 蔡正阳. 高端装备智能制造价值链的生产自组织与协同管理: 设计制造一体化协同研发实践[J]. 管理世界, 2023, 39(3): 127-140.

- [8] IMAD M, HOPKINS C, HOSSEINI A, et al. Intelligent machining: A review of trends, achievements and current progress[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2022, 35(4-5): 359-387.
- [9] ZHOU J, ZHOU Y, WANG B, et al. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 624-636.
- [10] 郭进. 传统制造业企业智能化的路径选择研究[J]. *人文杂志*, 2021(6): 69-78.
- [11] 刘玉书, 王文. 中国智能制造发展现状和未来挑战[J]. *人民论坛·学术前沿*, 2021(23): 64-77.
- [12] TAO F, CHENG J, QI Q, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 94(9): 3563-3576.
- [13] 宁朝山. 工业革命演进与新旧动能转换——基于历史与逻辑视角的分析[J]. *宏观经济管理*, 2019(11): 18-27.
- [14] 杨若凡, 刘军, 李晓军. 多方协同开展智能制造新工科人才培养的思考与实践[J]. *高等工程教育研究*, 2018(5): 30-34.
- [15] 赵军洁, 周海川. 乡村振兴战略下农业降成本的优化策略[J]. *宏观经济管理*, 2021(1): 37-43.
- [16] 王新利. 我国煤炭价格形成机制存在的问题与应对策略——基于资源外部性成本研究视角的分析[J]. *价格理论与实践*, 2016(12): 68-69.
- [17] 马克卫, 王硕, 苑杰. 数据资产核算应用研究: 理论与实践[J]. *中南财经政法大学学报*, 2023(5): 149-160.
- [18] 刘庆林, 王明晖. 产业数字化与企业规模经济效应——基于非位似 CES 生产函数的研究[J]. *山东大学学报(哲学社会科学版)*, 2023(5): 135-146.
- [19] 孙红军, 赵翔翔. 中国城市群高新技术企业全要素生产率的空间差异与动态演进[J]. *技术经济*, 2022, 41(12): 25-37.
- [20] 陈林. 自然垄断与混合所有制改革——基于自然实验与成本函数的分析[J]. *经济研究*, 2018, 53(1): 81-96.
- [21] 樊茂清. 中国产业部门产能利用率的测度以及影响因素研究[J]. *世界经济*, 2017, 40(9): 3-26.
- [22] 李鸿磊. 数字经济中的边际收益递增——基于用户资源型商业模式的经济学分析[J]. *山东大学学报(哲学社会科学版)*, 2023(4): 137-149.
- [23] 徐海龙. 创意要素与文化生产的“新边际规律”[J]. *首都师范大学学报(社会科学版)*, 2020(4): 180-188.
- [24] 肖曙光, 罗美, 张延平. 企业自愿性信息披露的决策机理差异性——基于不同时代与市场结构的比较研究[J]. *经济管理*, 2017, 39(6): 86-100.
- [25] 熊雯婕, 殷凤. 互联网金融发展提升了区域创新效率吗——基于空间杜宾模型的实证分析[J]. *技术经济*, 2020, 39(9): 73-81.
- [26] 章安辰, 裴平. 互联网金融与经济学“边际革命”[J]. *南京社会科学*, 2018(6): 26-32.
- [27] 张金若, 隆雨. “双循环”格局下制造业转型升级的成本核算与列报问题研究[J]. *苏州大学学报(哲学社会科学版)*, 2022, 43(1): 49-59.
- [28] 王蕾. 智能制造模式下的成本结构变动及其成本优化[J]. *唐山学院学报*, 2018, 31(3): 91-96.
- [29] KOCH M, MANUYLOV I, SMOLKA M. Robots and firms[J]. *The Economic Journal*, 2021, 131(638): 2553-2584.
- [30] ACEMOGLU D, RESTREPO P. The race between man and machine: Implications of technology for growth, factor shares, and employment[J]. *American Economic Review*, 2018, 108(6): 1488-1542.
- [31] 李怀, 高良谋. 新经济的冲击与竞争性垄断市场结构的出现——观察微软案例的一个理论框架[J]. *经济研究*, 2001(10): 29-37.
- [32] 但斌, 李文博, 石雨婷. 匹配水平影响下第三方平台多价值链的协同运作模型及仿真分析[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(3): 892-906.
- [33] 郭全中. 互联网平台经济反垄断的动因、现状与未来思路探析[J]. *新闻爱好者*, 2021(9): 26-30.
- [34] 徐放达, 王增涛. 高智力劳动力、知识扩散绩效对新创企业成长的影响机理研究[J]. *财经理论与实践*, 2021, 42(2): 106-111.
- [35] 孙智华. 全媒体视域下的公益传播——探索构建“人人公益”格局的可能路径[J]. *新闻爱好者*, 2022(12): 98-100.
- [36] 冯毅萍, 章途潮, 陈歆. 面向智能制造的多要素生产成本建模方法[J]. *化工学报*, 2020, 71(3): 1111-1121.
- [37] WANG A, GAO X D. A variable-scale data analysis-based identification method for key cost center in intelligent manufacturing[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022(7): 1-10.
- [38] 孙早, 侯玉琳. 工业智能化如何重塑劳动力就业结构[J]. *中国工业经济*, 2019(5): 61-79.
- [39] 李健旋. 中国制造业智能化程度评价及其影响因素研究[J]. *中国软科学*, 2020(1): 154-163.
- [40] 高锡荣, 任娇娇, 温平川. 智能制造系统的投入产出双爆炸效应分析[J]. *科技管理研究*, 2022, 42(15): 188-195.
- [41] 胡凯, 吴清. 制度环境与地区资本回报率[J]. *经济科学*, 2012(4): 66-79.
- [42] 赵善梅, 吴士炜. 基于空间经济学视角下的我国资本回报率影响因素及其提升路径研究[J]. *管理世界*, 2018, 34(2): 68-79.

Cost Attribute Aberration and Declining Marginal Cost : An Exploration in the Scenario of Intelligent Manufacturing

Gao Xirong, Ding Hongwei, Zhang Hongchao

(School of Economics and Management, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: Intelligent manufacturing driven by the revolution of intelligent technology represents the unequivocal choice for promoting the construction of manufacturing power in the new era. By replacing human labor with industrial intelligent agents and adopting the single-factor virtual-real fusion production mode of “workshop intelligent agent + mirror network”, intelligent manufacturing will bring vastly different production characteristics and cost attribute compared to traditional manufacturing, thereby changing the form of the cost function. Comparative research found that intelligent manufacturing exhibits attribute of “high fixed cost and weak variable cost”, leading to the derivation of a weak cost function that grows weakly with output, along with the corresponding declining law of marginal cost. The declining law of marginal cost in intelligent manufacturing mainly stems from the diluting and weakening effect of the single-factor virtual-real fusion production mode on variable cost. From the policy perspective, it is recommended to orderly carry out the crowdfunding construction mode of intelligent manufacturing system, actively promote the capacity sharing mode of intelligent manufacturing system, plan a brand-new employment mode for industrial workers in the intelligent era as soon as possible, and vigorously guide consumers to constantly intervene in production activities, so as to realize the identity transformation of consumer into “pro-consumer”.

Keywords: intelligent manufacturing; production characteristics; cost attribute; cost function; marginal cost