

颠覆性技术识别模型研究

——以工业机器人领域为例

曹悦 白晨 张英杰 张玄玄 张越 李妙钰
(中国科学技术信息研究所, 北京 100038)

摘要: 识别和监测潜在的颠覆性技术, 对于企业和国家在发展过程及未来规划中及时调整技术创新战略、规避风险具有重大战略意义。本文阐述颠覆性技术的概念及特征, 对比分析颠覆性技术的识别方法, 在技术特征和市场特征两个维度下以技术可行性、技术突破性、技术集成性、技术前沿性、技术影响力5个指标构建颠覆性技术评价指标体系, 建立基于层次分析法的颠覆性技术识别模型。以高端装备制造业中的工业机器人领域为例, 梳理产业技术概况, 对产业链上下游具有颠覆性潜力的技术进行识别, 分析其可能对产业带来的影响, 提出相应的政策建议。

关键词: 颠覆性技术; 技术识别; 模型构建; 层次分析法; 工业机器人

DOI: 10.3772/j.issn.1674-1544.2022.02.010

CSTR: 15994.14.issn.1674.1544.2022.02.010

中图分类号: F204

文献标识码: A

Research on Disruptive Technology Recognition Model

——Taking Industrial Robots as an Example

CAO Yue, BAI Chen, ZHANG Yingjie, ZHANG Xuanxuan, ZHANG Yue, LI Miaoyu
(Institute of Scientific and Technical Information of China, Beijing 100038)

Abstract: Identifying and monitoring potentially disruptive technologies is of great strategic significance for companies and countries to adjust their technological innovation strategies and avoid risks in the development process and future planning. By expounding the concepts and characteristics of disruptive technologies, comparing and analyzing the identification methods of disruptive technologies, the five dimensions of technological feasibility, technological breakthrough, technological integration, technological frontier, and technological influence are based on the two dimensions of technological characteristics and market characteristics. This paper constructs a disruptive technology evaluation index system, and establishes a disruptive technology identification model based on the analytic hierarchy process. Take the field of industrial robots in the high-end equipment manufacturing industry as an example, sort out the overview of industrial technology, identify technologies with disruptive potential in the upstream and downstream of the industrial chain, analyze their possible impact on the industry, and make policy recommendations.

Keywords: disruptive technology, technology identification, model construction, analytic hierarchy process (AHP), industrial robots

作者简介: 曹悦 (1994—), 女, 中国科学技术信息研究所研究实习员, 研究方向为科技资源管理; 白晨 (1980—), 女, 中国科学技术信息研究所副研究员, 研究方向为科技资源管理 (通信作者); 张英杰 (1979—), 男, 中国科学技术信息研究所副研究馆员, 研究方向为科技资源管理; 张玄玄 (1995—), 女, 中国科学技术信息研究所研究实习员, 研究方向为情报学; 张越 (1994—), 男, 中国科学技术信息研究所研究实习员, 研究方向为情报学; 李妙钰 (1996—), 女, 中国科学技术信息研究所研究实习员, 研究方向为情报学。

基金项目: 中国科学技术信息研究所创新研究基金青年项目“基于地平线扫描的技术识别方法研究”(QN2021-07)。

收稿时间: 2021年10月20日。

0 引言

技术是一种致力于创造某种制作或装配物质产品的工艺,依靠产业化应用实现,为经济社会发展服务。随着科学的发展、技术的突破和产业变革的快速演进,颠覆性创新持续涌现,以学科交叉融合和信息技术为代表的技术群体式发展推动了新产品、新需求和新业态的产生。在此背景下,以颠覆性技术为核心的创新活动对市场格局、商业模式、产业形态和社会发展带来了新的革命性影响,正逐步成为社会发展和提高国家竞争力的重要驱动力,受到全球各国的高度关注。颠覆性技术不是指单一的技术,一般是以某一技术为主导,多种技术跨学科、跨领域、跨国别作为辅助或支撑的具有复杂内在结构的技术群,能够改变现有技术范式、以意想不到的方式取代现有主流技术^[1]。其特点不仅在于技术本身的变革发展,还在于由其延伸产生的新产品、服务和功能能够推动产业和市场格局变革,带来破坏性和颠覆性影响。数码相机颠覆传统胶片行业等典型案例已经表明,谁能紧跟新技术的步伐,及时发现并抓住颠覆性技术的发展机遇,避免其伴生的不利影响,谁就能在竞争中抢占先机。

然而,由于颠覆性技术极具复杂性和不确定性,往往很难在其对市场产生重大影响之前加以预测。加强颠覆性技术识别方法研究,建立科学合理有效的识别模型,对潜在的颠覆性技术进行早期识别、预测和预警,具有重要的实践意义。目前,相关研究主要集中在理论层面,较少聚焦于某一产业领域的具体情况,如产业链上下游哪些技术可能具有颠覆性潜力、判定依据是什么、对产业会造成哪些影响、需要哪些政策扶持等,缺乏可操作性较强的识别和分析过程。基于此,本文首先分析颠覆性技术的概念特征,与其他技术概念进行辨析,确定关键技术特征和评判指标体系,然后构建一套融合文献调研、专家意见和层次分析法模型定性定量相结合的颠覆性技术识别模型,最后以高端装备制造业中的工业机器人领域为研究对象,对产业链上下游可能具备颠

覆性潜力的技术进行甄选识别,并针对产业影响提出相关的政策建议。

1 文献综述

1.1 颠覆性技术的概念特征

在寻找潜在颠覆性技术的过程中,首先需要对技术范畴进行界定。尽管技术一词被广泛使用,但其定义并不是那样明确。本文主要关注可能从根本上改变特定市场竞争参数的具体技术,即人工制品(如自动驾驶汽车)或创作过程(如3D打印)形式的技术^[2]。

颠覆性技术是在1995年由哈佛大学Christensen教授正式提出,常用来描述一种与持续性技术相对的、以意想不到的方式取代现有主流技术的技术,能够通过改变竞争基础来颠覆市场。根据Christensen教授对颠覆性技术概念及特征的描述,颠覆性技术与主流市场的成熟技术相比,往往从低端或边缘市场切入,且以简单、方便、便宜为初始阶段的特征,随着性能与功能的不断完善,最终取代现有技术,开辟出新的市场,形成新的价值体系^[3]。

在此基础上,后续学者的研究延伸和完善了颠覆性技术的概念及内涵,主要围绕技术创新和技术创新对市场、企业及产业的影响展开^[4]。技术创新强调技术发展本身的特性,既可能是技术迭代取得重大突破,或得到跨领域创新应用,也可能是技术组合集成。而技术创新对市场、企业及产业的影响主要体现技术市场竞争中起到的颠覆性作用。当一项技术进入新的市场,其核心性能可能落后于在位技术,不易受到关注和重视。但随着技术的发展,今天性能表现不佳的技术明天就可能满足市场,还可能在某项非核心性能上表现出优势,最终颠覆市场原有的生态环境^[5-6]。特别是,当某一领域内的现有技术被应用在新的领域,也可能带来颠覆性作用。这也解释了为什么一些管理良好的成熟企业在面对一项技术的出现时选择忽视,最终带来难以维持其市场地位的结果。

颠覆性技术是相对于持续性技术而言的,在

形态上更具有超越性、突变性、前瞻性和不确定性，在效能上更具备革命性和破坏性等特征^[7]。为更准确地理解颠覆性技术的概念特征，将颠覆性技术与其他常见的相关技术类别进行对比，包括突破性技术、新兴技术和“卡脖子”技术等，从不同维度来辨析不同技术的概念、特征、区别和联系（表1）。与突破性技术相比，颠覆性技术不但强调技术本身的创新，更强调技术在市场竞争维度的替代和颠覆作用。对于突破性技术是否属于持续性技术，学者之间尚未达成共识，但颠覆性技术与突破性技术之间存在着一定的包含和交叉关系，它们都可以是技术产生突破最终带来颠覆效应。与新兴技术相比，颠覆性技术更多强调的是对现有技术的取代和对现有市场的颠覆，具有明确的取代对象和最终结果。新兴技术作为能够同时满足技术和市场突破的技术创新，在后续研发和应用顺利的情况下，也可能发展成为颠覆性技术。与“卡脖子”技术相比，颠覆性技术同样具有较高的技术价值，且在产业价值链中占据着重要的位置，对产品价值起到重要的作用。在需求方被“卡脖子”时，颠覆性技术或能另辟蹊径起到替代作用，与“卡脖子”技术形成类似互补的关系。总体而言，颠覆性技术具有技术本身的发展特征和技术在市场中的应用特征。前者包括技术突破性和前沿性等，而后者包括能够引发产品替代、市场颠覆和产业结构变革等特征。

1.2 颠覆性技术的识别方法

颠覆性技术概念和特征等方面的理论成果，

为构建颠覆性技术识别体系奠定了基础。目前，国内外学者已从多种角度展开了针对颠覆性技术识别与预测的相关研究，识别方法多样且各具特色^[11]。大致可分为定性研究方法、定量研究方法和定性与定量相结合的研究方法，如表2所示。在实际应用中，颠覆性技术识别方法侧重于在宏观层面进行定性分析，包括德尔菲法、技术路线图法和情景分析法等，充分利用专家意见和知识经验得出共识性的结论，具有较大的主观性，且需要较多的人力、财力和时间^[12]。采用客观推导方法识别颠覆性技术的研究较少，主要是基于专利和论文等数据的文献计量法^[13]。通过研究现有技术的发展过程可以发现，一项新技术往往首先在时效性较强的会议中呈现出来，其次通过科学期刊论文探讨技术原理和工程技术特性，最后随着专利的普及而转化为实用型技术，逐渐转向应用，解决工程技术以及产业化相关的问题^[14]。在颠覆性技术的识别中，分析相关的专利和论文能够得到更加客观可靠的结论，但是这些数据源存在后向趋势，且更针对于技术本身的特性，缺乏对技术所处市场环境视角的讨论。

目前，定性定量相结合的技术识别方法已经受到国内外学者越来越多的关注，尤其是以颠覆性创新理论/案例分析为基础进行指标构建的方法，通常从颠覆性技术的特征出发，通过设计评价指标判断识别颠覆性技术。如孙永福等^[15]以技术突破性、产品替代性、市场广泛性、产业变革

表1 颠覆性技术与其他技术的区别和联系

技术类别	概念	特征	区别	联系
突破性技术	创新强度高且在技术层面产生重大突破，能够在一段时间内使产业结构发生重大变化，带来重大经济效益 ^[8]	持续性或非持续性，突破现有技术瓶颈	强调现有技术的突破式创新，以及技术发展障碍的克服	颠覆性技术与其构成包含交叉的关系，都可能产生颠覆效应
新兴技术	基于科学的具有创立或改造行业能力的创新技术 ^[9]	根本创新性、相对增长性、影响性和不确定性	强调技术创新和产业结构变革，但可能因多种因素而夭折	在后续研发和应用顺利的情况下，可能发展成为颠覆性技术
“卡脖子”技术	关键核心技术，一旦供给方“卡脖子”，需求方难以在短期内自主攻关，可能直接关系企业存亡、威胁国家经济安全 ^[10]	在技术价值链上位置较高、技术来源较少、突破难度较大	强调关键核心技术的垄断性和无可替代性，属于主流技术范畴	颠覆性技术或能与之形成类似互补的关系，起到替代作用

表 2 颠覆性技术常见识别方法对比

方法类别	方法	研究路线	优势	不足
定性研究方法	德尔菲法	邀请领域专家，开展多轮咨询和研讨，从专家研讨资料中进行分析总结	头脑风暴，融合多种观点	专家组构建存在难度，受专家领域知识主观影响较大
	技术路线图法	基于文献数据、目标市场数据，邀请相关专家进行技术路线的规划	多方协作，有利于信息和知识的交流，有利于识别潜在颠覆性技术	受专家的主观认识，以及制定者利益相关者的影响
	情景分析法	以用户需求为驱动，结合商业市场情况、技术竞争优势、市场营销情况进行行业情景分析	结合用户需求，有利于找准颠覆性技术的发展方向	用户需求多变，情景分析受市场变动影响较大
定量研究方法	文献计量法	检索相关领域专利、论文、政策等文献数据获取相关信息，通过文献计量分析或内容挖掘识别颠覆性技术	与颠覆性最相关的信息源，数据易于获得且相对客观，不受主观意识影响，保证权威性	数据源存在后向趋势，且更针对于技术本身的特性，缺乏对技术所处市场环境视角的讨论
定性定量相结合的方法	指标构建法	提出一系列可以反映颠覆性技术的评价标准，形成由这些标准构建的结构化评分模型	主观和客观相结合，结果更加精确	所获取的数据过于依赖被调查者或专家的背景知识，具有主观性和局限性
	层次分析法	将与颠覆性技术有关的元素分解成目标、准则、方案等层次，构建识别颠覆性技术的关键要素，通过权重计算进行识别	计算方法和流程科学，主客观相结合，系统、灵活、简洁	权重的确定受一定的主观意识影响

性 4 个一级指标和 12 个二级指标构建颠覆性技术评价体系，最终甄选出 26 项可能引发产业变革的颠覆性技术。Keller 等^[16]总结颠覆性技术的特征指标，包括技术性能突破、技术影响力、技术通用性、技术可行性、外部因素协调性以及到位技术成熟度等，并根据专家评分得到 Web 应用程序可能对 Microsoft 形成威胁，颠覆软件行业现有企业的结论。在这类识别方法中，层次分析法应用较为广泛，将与决策有关的元素分解成目标、准则和方案的层次。在此基础之上进行定性和定量分析的决策方法，具有系统、灵活和简洁等优点^[17]。傅耀威等^[18]运用熵值法和层次分析法对颠覆性技术评价体系指标进行验证，最终提出包含技术和产业模式革新、经济效益产能、商业模式和交叉领域引用、信息化社会交互、国内基础与研究进展 5 个方面的信息领域颠覆性技术评价体系。经过多年的发展，层次分析法又衍生出改进层次分析法和模糊层次分析法等，在学科、市场和行业研究中进行质量评价、预测分析等方面均发挥重要的作用。

总体来说，颠覆性技术识别的不同思想、理论和方法都具有其独特的适用范围和优缺点。由于颠覆性技术具有典型的后验性，很难在早期被

成功识别，通常只有在已经发生颠覆作用后才能得到充分认知，且对于识别预测的结果往往需要很长时间才能得到验证^[19]。因此，为提前做好应对颠覆性变化的准备，最好关注范围广泛的技术，尽管其中一些技术可能在未来被证实并不重要，但可以最大程度地避免错过可能具备颠覆性潜力的技术。综合上述分析，结合表 2 中各类颠覆性技术识别方法优势和不足的对比，考虑到颠覆性技术的特征是区别它与其他技术的重要依据，可以从颠覆性技术的特征出发，将特征转化为关键特征指标，再根据评价标准构建结构化评分模型进行计算，识别与预测对象的各项指标评分越高，其具有颠覆性的潜力越大。同时，考虑到层次分析法在确定颠覆性技术评价指标体系权重中具有不受样本量限制、定性与定量相结合的优势，且可以通过一致性检验保证专家意见的统一性，因此本文将选择层析分析法构建颠覆性技术的识别模型。

2 颠覆性技术识别模型构建

2.1 颠覆性技术关键特征指标的选取原则

考虑到上文对颠覆性技术特征的分析，只有当其最终被应用于某一商业模式时才能充分体

现其“颠覆性”，因此对颠覆性技术的识别与判断不应局限于技术本身而脱离了技术所应用的产品、市场和产业。在建立颠覆性技术识别模型时应从技术特征和市场特征两方面着手，既考虑技术本身的特征，也考虑技术与市场的关系及对产业的影响^[20]。综上分析，本文对颠覆性技术的概念和关键特征进行如下界定。

(1) 技术可行性。在目前的科学技术条件下，科学原理和投入应用可行是技术发展、成熟和应用的一切前提和基础。

(2) 技术突破性。具有某一方面超越、创新和突破能力，既可能是基础性、原理性的突破，也可能是因突破而带来更好的性能和效益。

(3) 技术集成性。具有集成创新能力，从既定的系统和技术体系中发展而来，可能形成技术的组合，也可能应用在跨学科、跨领域中，能够对产品性能和形态产生影响。

(4) 技术前沿性。技术处于发展的早期阶段或在相关产业领域刚刚出现。部分学者考虑到新技术具有高度不确定性，从出现到走向市场需要长期演化和发展，因此在对颠覆性技术进行识别时选择已有一定成熟度的技术。然而，本文的研究期望在早期就关注到具有颠覆性潜力的技术，

因此关注技术出现、发展以及成熟前的早期阶段，具有前沿性和前瞻性等特征。

(5) 技术影响力。具有影响效益，可能在产品性能、市场发展、产业结构等层次产生影响，有望引发产品与服务的更新换代，可能挤占原有的产品市场，或引发和培育出新的市场需求，推动与其相关产业的组织管理模式、产品制造生产模式、商业运行模式变革发展。

2.2 颠覆性技术识别方法及流程

参考郑国雄等^[21]构建的“卡脖子”技术甄选方法，并在其研究基础上对识别流程进行进一步精简，颠覆性技术识别流程如图1所示。首先确定某产业领域内的备选技术，然后根据颠覆性技术的特征确定评判指标，构建基于层次分析法的颠覆性技术识别模型，形成一套定性定量相结合的识别方法。

2.2.1 备选技术的确定原则

通过搜集各国家/地区相关技术预测报告、政府报告、企业调研报告、科学论文和专利等，圈定某产业领域内的备选技术，了解技术内涵以及所属产业链位置，保证后续分析的顺利进行。在此基础上，依托专家意见进行多渠道补充和筛选，梳理形成颠覆性技术的备选清单。

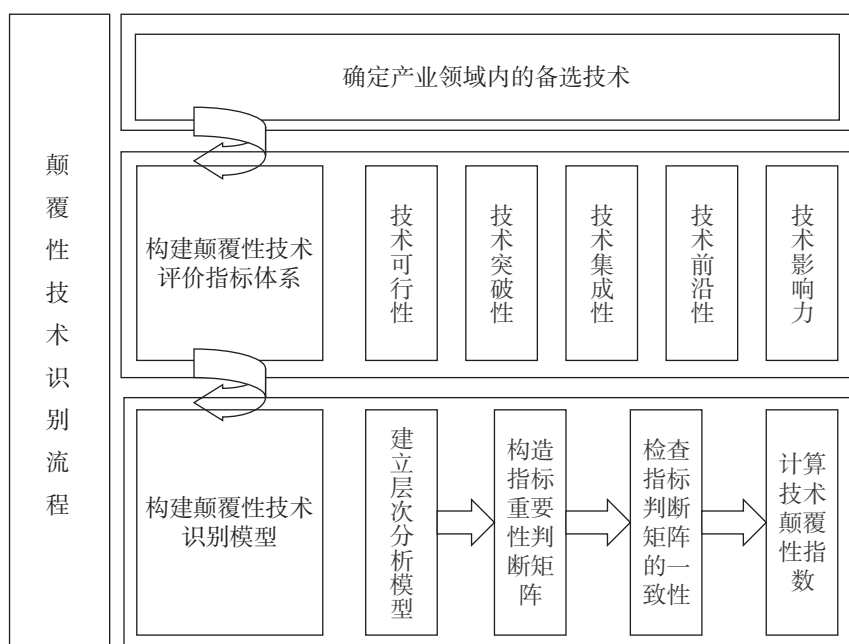


图1 颠覆性技术识别流程

2.2.2 颠覆性技术评价指标体系构建

紧扣上文概括的颠覆性技术概念和特征,以技术可行性、技术突破性、技术集成性、技术前沿性、技术影响力5个指标构建颠覆性技术评价指标体系(表3),并明确各个指标内涵,以便后续对备选技术进行评价。根据颠覆性技术指标体系及指标内涵,在专家意见的基础上对5个指标进行两两比较,判断各个指标对于识别颠覆性技术的重要性,并通过层次分析将难以完全量化的复杂系统进行定量与定性结合的综合分析,使颠覆性技术识别过程更加科学合理。

2.3 模型构建步骤

利用层次分析的原理,构建基于层次分析法的颠覆性技术识别模型,把特定问题拆解成多个独立的构成因素,并根据每一个因素的相互关系和从属关系在不同的层面上进行有序组合,重新得到一个拥有不同层次的模型以进行分析,即最底层(具体技术项目)相对于最高层(识别颠覆性技术)的权值比较^[22]。颠覆性指数的分析分为以下4个步骤。

步骤一:根据颠覆性技术的标准和技术创新的需求,建立一个识别筛选颠覆性技术的层次分析模型。该模型分为目标层O、指标层C和技术层T。最高层(目标层)O:颠覆性技术的识别;

中间层(指标层)C:判断一项技术是否具有颠覆性潜力的特征指标;最底层(技术层)T:备选技术。

步骤二:构造指标重要性判断矩阵。在确定各个层次上各个因素的权重时,采用一致矩阵法。对5个指标因素进行两两比较时,为减少不同属性因素之间进行比较的难度,使用相对值提高准确性。指标重要性判断矩阵的元素 c_{ij} ,表示第*i*个因素与第*j*个因素的比较结果,设定1~9标度,如表4所示,并构建指标判断矩阵 C_{ij} ^[23]。

步骤三:检查指标判断矩阵的一致性。如果指标重要性判断矩阵属于可接受的一致性或者是一致性矩阵,则可以自然回取对应于最大特征根 n 的归一化特征向量 $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$,且 $\sum_{i=1}^n w_i = 1$, w_i 表示第*i*个指标对于目标层颠覆性技术识别相对重要性的排序权值。如果一致性得不到满足,需要重新构造判断矩阵C,对 c_{ij} 加以必要的调整。使用其最大特征根对应的归一化特征向量作为权向量 W ,有 $AW = \lambda W$, $W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$,A的最大特征根为 λ 。由于连续地依赖于 c_{ij} ,因此 λ 比 n 大得越多,A的不一致程度越大。把与最大特征值对应的特征向量用作比较因子对上层中某个因子的影响程度的权重向量。采用 $\lambda - n$ 的值对矩阵A

表3 颠覆性技术评价指标体系

序号	指标	指标内涵
1	技术可行性	在目前科学技术条件下的技术可行程度
2	技术突破性	在某一方面超越、创新和突破的能力
3	技术集成性	技术组合或跨学科、跨领域应用的集成创新能力
4	技术前沿性	处于发展早期阶段或在相关产业领域“新”的程度
5	技术影响力	在产品性能、市场发展、产业结构等产生影响的能力

表4 指标重要性判断矩阵标度方法

标度	标度含义
1	表示两个因素同等重要
3	表示因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 稍微重要
5	表示因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 明显重要
7	表示因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 强烈重要
9	表示因素 <i>i</i> 比因素 <i>j</i> 极端重要
2、4、6、8	上述两重要性相邻判断值的中值
倒数	因素 <i>i</i> 与因素 <i>j</i> 比较的判断为 c_{ij} ,则因素 <i>j</i> 与因素 <i>i</i> 比较的判断 $c_{ji} = 1/c_{ij}$

的不一致性进行测量,定义一致性指标 $CI = (\lambda - n) / (n - 1)$, CI 越接近于 0, 一致性越令人满意。为了衡量 CI 的大小, 引入随机一致性指数 RI 。根据统计数值, 当 $n=5$ 时, $RI=1.12$ 。定义一致性比率为 $CR=CI/RI$ 。通常地, 当一致性比率 $CR < 0.1$ 时, 认为不一致程度在允许的范围内, 其一致性令人满意, 可以通过一致性检验, 可以将归一化特征向量用作权重。

步骤四: 对专家评分进行标准化处理以消除差异, 实现分数等值化, 以更好更科学地解释每一项技术在备选技术中的相对位置。标准化处理后的颠覆性指数由正负号和绝对数值两部分组成。正负号说明该项技术在备选技术中高于还是低于平均值, 绝对数值的大小说明其距离平均值的远近程度。标准化公式为: 标准分 = (原始分 - 原始平均分) / 原始分标准差。

由步骤三得到指标层 C 的 5 项因素 $C_1, C_2, \dots, C_5$, 对总目标层 O 的单排序权重为 $w_1, w_2, \dots, w_5$ 。技术层 T 层有 N 项技术, 每项技术对指标层 C 中因素为 C_j 的标准分为 $t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{nj}$ ($j=1, 2, 3, 4, 5$)。技术层 T 的第 i 项技术对总目标颠覆性技术识别的得分计算公式为:

$$T_i = \sum_{j=1}^5 t_{ij} w_j \quad i=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

最后对各专家给出的标准分进行数值平均, 得到对应技术的颠覆性指数。

3 工业机器人领域的颠覆性技术识别实证分析

3.1 工业机器人产业及技术概况

工业机器人是一种面向工业领域、辅助工业加工制造的智能制造装备。其一方面可以解放劳动力资源, 缓解低端劳动力短缺的问题, 降低企业运行成本, 提升工作效率; 另一方面为制造业带来模式、理念、技术等多层次的变革, 促进产业结构快速调整, 目前已广泛应用在汽车制造、3C 产品、金属机械、橡胶化工和食品饮料等工业生产领域。

根据对工业机器人领域专家的调研访谈结

果, 工业机器人产业链主要分为上游原材料及核心零部件、中游本体制造和下游系统集成及应用 3 个层面, 产业链结构如图 2 所示。产业链上游的产业价值最高, 核心零部件主要包括控制系统、伺服系统、减速器和传感器等, 涉及在传动、控制和人机交互等方面的各类技术^[24]。控制系统作为工业机器人的大脑, 指挥机器人按规定的程序运动, 记忆动作顺序、运动轨迹、运动速度等信息并发出执行指令。伺服系统根据指令, 通过电气、液压、气压等驱动形式的动力源, 支配执行机构运动。减速器保证伺服系统在合适的速度下运转, 根据各执行部位需要的速度精确控制转速, 提高机械本体刚性的同时输出更大的力矩, 保证动作的精确度。传感器是检测工业机器人运动位置、运动速度和工作状态的装置, 通过触觉、视觉、速度和位置等感应并向控制系统反馈。

产业链中游主要涉及本体相关核心技术。本体包括可抓持物体或执行其他运动操作的装置, 一般由基座、机械手、机械腕、机械臂和其他末端执行机构等部件组成, 还有一些具备行走结构。产业链中游价值受制于上游核心零部件, 而产业链下游涉及工业机器人系统集成技术。国内企业大多作为系统集成商集中在产业链的下游^[25]。

目前, 我国工业机器人核心零部件及本体产品在负载能力、工作范围、重复定位精度以及产品稳定性、可靠性、使用寿命等方面与国际一流产品相比存在较大差距, 相关技术被国外龙头企业垄断。这些发展瓶颈意味着技术突破或创新应用十分必要^[26]。而随着工业结构调整, 市场和行业对相关产品的需求不断增加, 当现有的技术无法使工业机器人产量和功能很好地满足市场需求, 也成为可能催生颠覆性技术出现的动力。因此, 本文以工业机器人领域作为研究对象, 识别其中可能具备颠覆性潜力的技术, 作为上文构建的颠覆性技术识别模型的验证, 以期为该领域的技术、市场与产业发展提供一定的参考。

3.2 颠覆性技术识别结果

综合研究报告和政府报告、企业调研报告、科学论文和专利等确定工业机器人产业颠覆性技

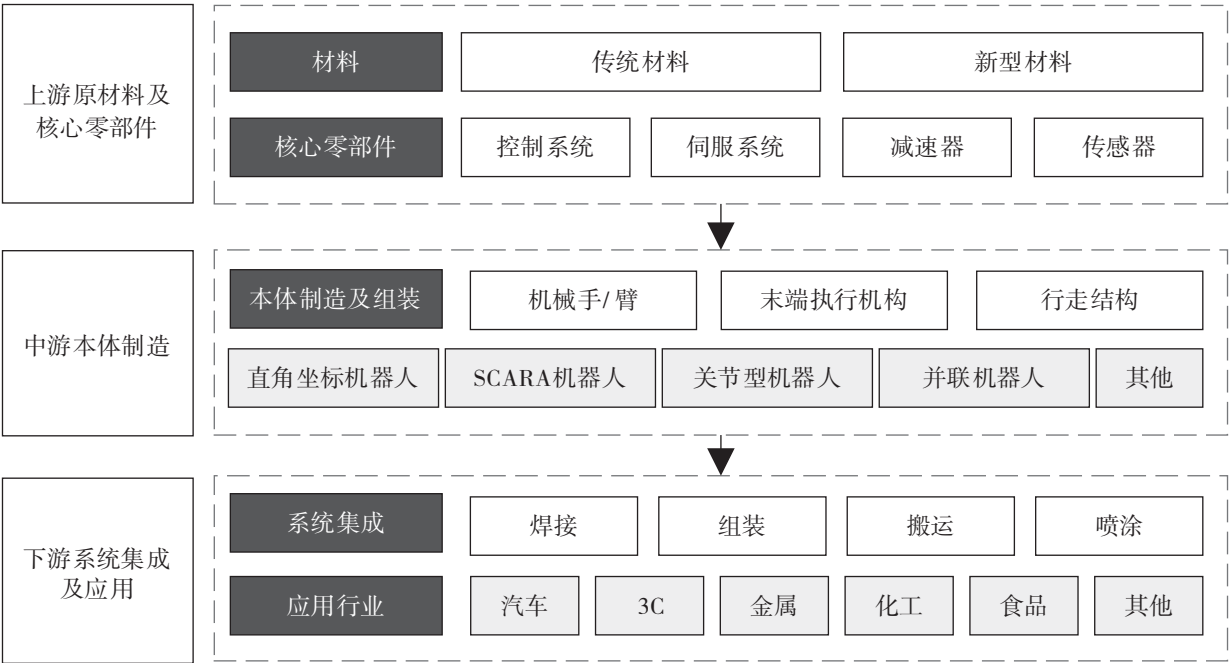


图2 工业机器人产业链结构

术的技术备选范畴。对收集到的技术信息进行整理，根据专家意见补充并对技术信息的准确性的确认，得到工业机器人产业备选颠覆性技术30项，主要涉及产业链上游和中游的精密制造、信息识别、传感控制和交互协同技术，如表5所示。

根据工业机器人领域专家对于产业的理解和意见，对评价颠覆性技术时技术可行性、技术突破性、技术集成性、技术前沿性、技术影

响力5个指标的重要性做出判断，并对表5中的技术进行各个指标的评分及标准化处理。对指标重要性判断矩阵进行计算，得到归一化特征向量 $W = \{0.371, 0.122, 0.061, 0.062, 0.384\}$ ， $CI=0.041$ ，一致性比率 $CR=CI/RI=0.037 < 0.1$ ，通过一致性检验。因此，各个指标的归一化权重如表6所示。结合每项技术的标准分，根据式（1）得出各项技术的颠覆性得分，按照算数平均值得到对应技术的颠覆性指数，如表7所示。

表5 工业机器人领域备选技术

序号	技术名称	所属产业链位置
1	碳纤维复合材料、可编织结构	产业链上游
2	RV减速器高端精密轴承制造技术	产业链上游
3	机器视觉系统及其标定、测精度等技术	产业链上游
4	基于视觉感知系统的三维环境重建技术	产业链上游
5	多传感器融合的智能感知算法	产业链上游
6	功能相近的传感单元的简化集成方式	产业链上游
7	无线网络通信、数据云端传输和互联互通	产业链上游
8	模糊控制、最优控制、神经网络控制等智能控制技术	产业链上游
9	以智能仓储和智慧工厂为代表的智能作业模式	产业链上游
10	基于感知系统的自主编程技术	产业链上游
11	人机协作、安全交互的共融机器人技术	产业链上游
12	语音识别与语音交互技术	产业链上游
13	用户友好型/远程临场交互	产业链上游
14	碰撞检测、免碰撞路径规划、最优化路径规划等智能移动技术	产业链上游
15	通用性软件平台的开发和实现	产业链上游
16	工业机器人故障检测系统	产业链上游

续表

序号	技术名称	所属产业链位置
17	基于生命/机电系统融合的新型感知技术	产业链上游
18	环境认知、行为决策、自主学习和自主移动等机器人自主行为技术	产业链上游
19	深度学习模型训练迁移学习技术	产业链上游
20	移动路径自动修正的方法及系统	产业链上游
21	即时定位与自主导航技术	产业链上游
22	工业机器人分布式控制网络	产业链上游
23	工业多机器人智能协作控制技术	产业链上游
24	动态非结构化环境中的运动规划算法	产业链上游
25	移动机器人的多环境适应技术	产业链上游
26	云计算、云服务、开放式控制的云计算技术	产业链上游
27	机器人转动关节制造技术	产业链中游
28	模块化机器人、可重构机器人以及微型部件等相关制造技术	产业链中游
29	机器人碰撞保护装置	产业链中游
30	机械手、机械臂、遥操作机械臂及末端执行器的精密制造技术	产业链中游

3.3 颠覆性技术的产业影响及发展建议

颠覆性技术可能在多个不同的维度产生影响。从工业机器人的产业链结构来看,市场主要参与者包括制造方和购买使用方。对于主要负责工业机器人各部件研发制造的制造方,可能具有颠覆性潜力且带来产业影响的技术主要涉及产业链上游和中游,包括上游基础材料加工制备技术、核心零部件精密制造的国产化、系统配套技术的创新,以及中游本体制造的硬件结构微观化等。对于购买使用方,工业机器人的使用可能对传统制造企业的人员管理结构与生产方式带来颠覆性冲击,尤其是随着低成本高效率的工业机器

人引入生产,操作灵活度和精度进一步提高,工业机器人可能取代制造业现有的部分人工操作。进一步分析表7中的识别结果,工业机器人领域潜在的颠覆性技术及其可能带来的产业影响主要表现在以下两个方面。

一是由工业机器人视觉感知、自主行为、工作模式等智能技术突破创新带来的颠覆效应,如表7中颠覆性指数排名第1、2、6和10位的技术。如颠覆性指数最高的机器视觉系统及其标定、测精度等技术。其技术的不断创新和突破可以不断增强机器的视觉精度和预判断能力,尤其是与多传感器融合形成智能感知系统,能够极大

表6 工业机器人领域颠覆性技术识别指标权重归一化处理

指标名称	技术可行性	技术突破性	技术集成性	技术前沿性	技术影响力
权重	0.371	0.122	0.061	0.062	0.384

表7 工业机器人领域颠覆性技术识别结果

排名	技术名称	颠覆性指数
1	机器视觉系统及其标定、测精度等技术	0.972
2	环境认知、行为决策、自主学习和自主移动等机器人自主行为技术	0.817
3	人机协作、安全交互的共融机器人技术	0.800
4	碳纤维复合材料及其制备、可编织结构	0.792
5	机械手、机械臂、遥操作机械臂及末端执行器的精密制造技术	0.680
6	以智能仓储和智慧工厂为代表的智能作业模式	0.669
7	通用性软件平台的开发和实现	0.539
8	RV减速器高端精密轴承制造技术	0.532
9	语音识别与语音交互技术	0.452
10	即时定位与自主导航技术	0.382

续表

排名	技术名称	颠覆性指数
11	基于视觉感知系统的三维环境重建技术	0.331
12	碰撞检测、免碰撞路径规划、最优化路径规划等智能移动技术	0.324
13	模糊控制、最优控制、神经网络控制等智能控制技术	0.312
14	深度学习模型训练迁移学习技术	0.200
15	移动路径自动修正的方法及系统	0.185
16	多传感器融合的智能感知算法	0.172
17	工业多机器人智能协作控制技术	0.098
18	模块化机器人、可重构机器人以及微型部件等相关制造技术	0.076
19	机器人转动关节精密制造技术	0.076
20	动态非结构化环境中的运动规划算法	0.059
21	云计算、云服务、开放式控制的云计算技术	0.040
22	机器人碰撞保护装置	0.019
23	基于生命/机电系统融合的新型感知技术	-0.056
24	移动机器人的多环境适应技术	-0.103
25	工业机器人故障检测系统	-0.138
26	无线网络通信、数据云端传输和互联互通	-0.164
27	基于感知系统的自主编程技术	-0.169
28	工业机器人分布式控制网络	-0.194
29	用户友好型/远程临场交互	-0.365
30	功能相近的传感单元的简化集成方式	-0.381

地提高工业机器人环境感知能力,从而替代现有工业机器人所使用的传感系统,可能造成产品的迭代,产生市场的颠覆作用。

二是工业机器人在未来性能、生产技术和生产成本上的优化,可能使中小型制造企业得到更多机会以进入市场,对以主营制造传统大型工业机器人的企业带来颠覆效应,如表7中颠覆性指数排名第3、4、5、7和8位的技术。产业链上游涉及的人机协作、安全交互的共融机器人技术,人与机器、机器与机器之间的协同智能操作能够以较低的成本提高工业机器人智能化水平,使大量没有实现工业自动化的中小制造企业进入工业机器人制造市场。此外,随着产业链上游核心零部件RV减速器高端精密轴承制造技术和产业链中游机械手、机械臂、遥操作机械臂及末端执行器的精密制造技术等技术的进一步发展,工业机器人的制作更加精密化、结构更加微型化,可以使其在满足作业要求的前提下在更多领域具有更大的应用空间,一旦进入新的领域或市场就可能对现有生态造成破坏性影响。

对于具有颠覆性潜力的技术,可以从技术、市场和产业角度给予政策支持。在技术层面,技术突破需从源头重视基础研究,尤其是科学体系和科学能力的建立,加大对基础研究人员的支持力度,鼓励以自由探索、原始创新和独辟蹊径的导向进行基础科学研究。超前布局一批颠覆性技术相关项目,持续推动核心零部件技术国产化,推动视觉感知、自主行为、工作模式等关键颠覆性技术攻关及向关键核心技术的转化实践。同时,需加强交叉学科研究,如工业机器人领域的基础研究涉及工程、电气与电子学科,并与计算机、机械、生物医学等学科群有密切的联系,需利用自身学科领域的优势机会并与其他学科有效结合,促进不同学科以及跨领域的交叉融合,为颠覆性技术的创新提供动力,并抓住创新机会,实现理论突破。在市场层面,技术创新需调动各类主体的积极性,通过创造良好的创新生态激发创新活力。在培养一批工业机器人领域领军企业的同时,推动更多中小型企业充分发挥创新主体作用,引导科研院所、高等院校与企业产

学研深度融合,促进科学、技术、产品及市场全链条的创新。围绕有序协同的产业组织对颠覆性技术的需求,建立健全工业机器人细分市场监管制度,形成有效公平的市场竞争。在产业方面,需要从源头抓起,从产业链下游逐步向产业链上游发展,不断进行强链、补链和延链,推动产业向价值链的高端位置布局。目前,国内工业机器人企业大多进行系统集成和生产经营,位于产业链下游,可替代性较高、利润空间较小,考虑到产业链上游减速器、伺服系统和控制系统等核心技术被国外龙头企业垄断的现状,需充分利用我国的市场优势,围绕核心产品整合资源,打造良好的产品生态,培育具有国际竞争力的自主国产化品牌,加强产业链上下游合作,为颠覆性技术产业应用提供更加广阔的空间。总体而言,在早期发现的同时,要及时掌握颠覆性技术的发展机遇,以更好地对颠覆性技术进行提前规划和全面布局,同时也离不开政府、企业、科研院所、金融机构的共同参与和相互助力。

4 结论与展望

尽可能早地关注到可能具有颠覆性潜力的技术,对于技术未来发展和布局起到关键的助推作用,因此对颠覆性技术识别方法的探索十分必要。本文结合颠覆性技术概念特征及国内外学者的相关研究成果,提炼出颠覆性技术5个维度的关键特征,即技术可行性、技术突破性、技术集成性、技术前沿性和技术影响力,并以此作为颠覆性技术的识别指标,具有一定的指标通用性和可拓展性。在此基础上,依靠专家意见构建一套基于层次分析法的颠覆性技术评价指标体系与识别模型,并以工业机器人领域产业链上下游涉及的技术作为研究对象进行实证分析,在对理论和模型进行验证的同时,立足于工业机器人产业具体情况,识别其中具有颠覆性潜力的技术,以期为解决实际问题提供参考。此外,本文构建的颠覆性技术识别模型的特色和优势在于可以通过简单、快速的计算得到识别结果,可行性和适用性较强。然而,在应用于其他领域时,评判标准的

确定仍需依赖于识别目标领域内的专家意见,该方法的有效性也有待进一步验证。同时,模型识别出的技术仅能作为潜在的颠覆性技术,是否能够成为颠覆性技术仍需要进一步实践的检验。结合目前颠覆性技术的研究现状,深刻理解颠覆性技术内在本质、外部特征,有待进一步研究构建全面、系统的识别与预测框架、指标体系和模型。未来可以融合科学论文、专利、市场、产业等多样化源数据,以更加客观的多元视角开展颠覆性技术识别体系构建研究,确保识别结果的全面性与有效性。

参考文献

- [1] 刘安蓉,李莉,曹晓阳,等.颠覆性技术概念的战略内涵及政策启示[J].中国工程科学,2018,20(6):7-13.
- [2] ERNSTSEN S K, THUESEN C, LARSEN L R, et al. Identifying disruptive technologies: horizon scanning in the early stages of design[C]//International Design Conference. Zagreb:Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2018: 1833-1844.
- [3] CHRISTENSEN C M. The innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail[M]. Cambridge: Harvard Business Review Press, 2013: 5-23.
- [4] 刘秋艳.基于科学论文和专利数据的颠覆性技术识别方法研究[D].北京:中国科学院大学,2017.
- [5] TELLIS G J. Disruptive technology or visionary leadership? [J]. Journal of product innovation management, 2005, 23(1): 34-38.
- [6] HUANG X, SOI G. Analysis of industry equilibria in models with sustaining and disruptive technology[J]. European journal of operational research, 2010, 207(1): 238-248.
- [7] 王志勇,党晓玲,刘长利,等.颠覆性技术的基本特征与国外研究的主要做法[J].国防科技,2015,36(3): 14-22.
- [8] LEIFER R, MCDERMOTT C, O'CONNOR C, et al. Radical innovation: how mature companies can outsmart upstarts[M]. Boston: Harvard Business School Press, 2000.
- [9] 卢文光,黄鲁成.基于产业化潜力评价的新兴技术特征研究[J].科技进步与对策,2011,28(22): 5-9.
- [10] 汤志伟,李昱璇,张龙鹏.中美贸易摩擦背景下“卡脖子”技术识别方法与突破路径——以电子信息产

- 业为例[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(1): 1-9.
- [11] 王超, 许海云, 方曙. 颠覆性技术识别与预测方法研究进展[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(9): 152-160.
- [12] 石慧, 潘云涛, 苏成. 颠覆性技术及其识别预测方法研究综述[J]. 情报工程, 2019, 5(3): 33-48.
- [13] 赵格. 基于多源异构数据的颠覆性技术识别[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [14] 蒋林杉. 萌芽颠覆性技术的识别与成长性判断[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [15] 孙永福, 王礼恒, 孙棕檀, 等. 引发产业变革的颠覆性技术内涵与遴选研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(5): 9-16.
- [16] KELLER A, HUESIG S. Ex ante identification of disruptive innovations in the software industry applied to web applications: the case of Microsoft's vs. Google's office applications[J]. Technological forecasting & social change, 2009, 76(8): 1044-1054.
- [17] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [18] 傅耀威, 相红, 宋阳, 等. 支撑智能社会的颠覆性技术评价体系构建[J]. 中国基础科学, 2020, 22(5): 59-66.
- [19] 张守明, 张斌, 张笔峰, 等. 颠覆性技术的特征与预见方法[J]. 科技导报, 2019, 37(19): 19-25.
- [20] 张佳维, 董瑜. 颠覆性技术识别指标的研究进展[J]. 情报理论与实践, 2020, 43(6): 194-199.
- [21] 郑国雄, 李伟, 刘溉, 等. 基于德尔菲法和层次分析法的“卡脖子”关键技术甄选研究: 以生物医药领域为例[J]. 世界科技研究与发展, 2021, 43(3): 331-343.
- [22] 刘梦明, 何文英, 李珂, 等. 联合使用德尔菲法与层次分析法构建某附属医院学科建设评价指标体系的研究[J]. 中国医药科学, 2019, 9(17): 18-22.
- [23] 阎凌宇, 程丽云, 李威君, 等. 基于AHP-联系熵的应急预案实施过程风险评估[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(2): 130-135.
- [24] 郭海燕. 工业机器人国内外行业发展现状概述[J]. 机电产品开发与创新, 2021, 34(3): 143-144, 154.
- [25] 刘媛, 姚缘, 钱琳. 工业机器人产业竞争情报分析[J]. 中国科技资源导刊, 2017, 49(6): 36-44.
- [26] 黄鲁成, 蒋林杉, 吴菲菲. 萌芽期颠覆性技术识别研究[J]. 科技进步与对策, 2019, 36(1): 10-17.

(上接第12页)

- [10] 杨鹤林. 康奈尔大学: 让研究者共享科学数据[J]. 中国教育网络, 2014(4): 32-34.
- [11] 覃丹. 英美社会科学数据管理与共享服务平台调查分析[J]. 图书情报工作, 2014, 58(16): 67-75.
- [12] FEDERER L M, BELTER C W, JOUBERT D J, et al. Data sharing in PloS one: an analysis of data availability statements[J]. PloS one, 2018, 13(5): e0194768.
- [13] PIERCE H H, ANURUPA D, EMILY S, et al. Credit data generators for data reuse[J]. Nature, 2019, 570(7759): 30-32.
- [14] 国家科技基础条件平台中心. 国家科学数据资源发展报告2018[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2019: 8.
- [15] 陈军, 李大博, 杨智君, 等. 计量科学领域科技项目数据汇交管理研究[J]. 中国科技资源导刊, 2021, 53(4): 83-89.
- [16] 全国科技平台标准化技术委员会. 科技计划形成的科学数据汇交 技术与管理规范: GB/T 39912-2021 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [17] LI X, CHENG G, WANG L, et al. Boosting geoscience data sharing in China[J]. Nature geoscience, 2021, 14(8): 541-542.
- [18] 庄倩, 何琳. 科学数据共享中科研人员共享行为的演化博弈分析[J]. 情报杂志, 2015, 34(8): 152-157.
- [19] 何琳, 常颖聪. 科研人员数据共享意愿研究[J]. 图书与情报, 2014(5): 125-131.
- [20] 国家计量科学数据中心. 平台介绍[EB/OL]. (2021-09-23) [2021-09-23]. <http://www.nmdc.ac.cn/ptjs/index.jhtml>.
- [21] 中国计量科学研究院. 国家计量科学数据中心项目数据汇交管理办法[Z]. 2020.
- [22] 赵华, 周国民, 王健. 基于元数据的科学数据属性特征分析[J]. 情报杂志, 2015, 34(7): 173-178.
- [23] 王维佳. 基于SWOT分析的数据科研环境下图书馆数据素养教育策略研究[J]. 图书与情报, 2017(5): 104-113.
- [24] 全国科技平台标准化技术委员会. 科技平台 资源核心元数据: GB/T 30523-2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.