

模块化视角下战略性新兴产业人才的 链式协同与梯度成长机制： 基于集成电路人才的混合方法研究

周锦来, 高中华

(中国社会科学院工业经济研究所, 北京 100006)

摘要: 集成电路产业发展对我国在国际竞争中获得战略主动权至关重要, 而集成电路人才是先进制程研发与产品良率的关键支撑。基于人才模块化视角, 全链条揭示集成电路人才的横向链式协同模式与纵向梯度成长路径。为此, 整合文本建模、生成树分析与质性研究等混合方法对集成电路产业的招聘信息、人才履历及其他文本数据进行分析。分析发现: 集成电路由集成电路设计、前道工艺、后道工艺三个模块构成, 分别具有精密集成、标准制程和线性工序的工作特征, 要求对应的人才具备博专兼具、精技熟工和严控精测的综合素养, 进而形成模块间横向的链式协同模式; 集成电路各模块人才表现出邻域融合、技艺精进与同域流动的差异化梯度成长路径, 需要嵌入式教育、师徒制度和技能认证等来助推模块内纵向的梯度成长路径。基于以上经验事实, 进一步发展出战略性新兴产业人才模块化的理论命题, 回应已有人才研究不足的同时, 为战略性新兴产业人才开发提供实践方向。

关键词: 人才模块化; 集成电路; 横向协同模式; 纵向成长路径; 战略性新兴产业

中图分类号: G350; G311

文献标识码: A

文章编号: 1005-0566(2025)04-0062-12

Modular perspective on talent chain collaboration and gradient growth in strategic emerging industries: a mixed-methods study of integrated circuit talent

ZHOU Jinlai, GAO Zhonghua

(Institute of Industrial Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100006, China)

Abstract: The development of the integrated circuit (IC) industry is essential for China to secure a strategic advantage in international competition, with IC talent serving as the critical support for advanced process R&D and product yield. This study, adopting a modular perspective on talent, explores both the horizontal chain collaboration model and vertical gradient growth paths of IC talent across the entire industry chain. By integrating text modeling, tree generation analysis, and qualitative research methods, the study examines recruitment data, talent resumes, and other textual materials from the IC sector. The findings reveal that the IC industry is composed of three modules: IC design, front-end processes, and back-end processes. Each module has distinct work characteristics—precision integration, standard processes, and linear procedures—requiring talents with a combination of broad expertise, technical proficiency, and

收稿日期: 2025-01-20 修回日期: 2025-03-19

基金项目: 研究阐释党的二十大精神国家社会科学基金重大项目“我国强化产业现代化人才支撑的实现路径与对策研究”(23ZDA065)。

作者简介: 周锦来(1997—), 男, 湖南长沙人, 中国社会科学院工业经济研究所助理研究员, 博士后, 研究方向为科技创新与产业人才。

通信作者: 高中华。

meticulous control. These requirements, in turn, foster a horizontal chain collaboration model among the modules. Additionally, IC talent within these modules follows differentiated gradient growth paths, such as neighborhood integration, skill refinement, and intra-domain mobility. These paths necessitate embedded education, mentorship systems, and skill certification to support vertical growth within each module. Based on these empirical insights, the study develops theoretical propositions on talent modularity within strategic emerging industries, addressing existing research gaps and offering practical guidance for talent development in these sectors.

Key words: talent modularity; integrated circuits; horizontal collaboration model; vertical growth path; strategic emerging industries

在全球产业格局加速重构与科技竞争范式深刻变革的背景下,战略性新兴产业已成为我国获取科技战略主动权、塑造国际竞争优势的核心领域。面对日益激烈的全球科技竞争和海外技术封锁加剧,我国产业发展模式正由“单点突破”向“全链协同”演进^[1]。在这一过程中,产业人才作为科技创新与高端制造的关键支撑,必须实现全链条协同发展,以精准匹配产业体系升级需求。然而,目前我国多个战略性新兴产业领域不仅面临人才总量不足的问题,还存在人才结构失衡、培养模式滞后等挑战,难以为产业链的高质量发展提供有力支撑。尤其是在集成电路、人工智能、航天工程等高技术壁垒行业,部分关键技术环节的人才供应存在“断链”与“断层”风险,制约了产业链的完整性与自主可控能力。这些产业高度依赖知识积累与技术突破,不仅整个产业链条对人才素养提出较高的要求,而且各个模块的人才都具有较高的专用性^[2]。在此背景下,精准识别并高效培养符合战略性新兴产业发展需求的人才,构建链式协同、梯度成长的人才体系,已成为提升我国产业竞争力、夯实科技自立自强基础的关键议题。

现有科技人才研究主要聚焦于供给端,侧重探讨科技人才的培养模式,普遍将人才视为一个同质化的群体,而对具体产业情境的刻画相对不足^[3]。这一研究范式忽略了产业人才的异质性与模块化特征,使得对人才作用机制的理解过于约化,难以建立情景化认识^[4]。以当前中美科技竞争最为激烈的集成电路产业为例,这个产业涵盖设计、制造、工艺优化、封装测试等多个环节,涉及数百道精密工序,并在实践中形成若干模块^[5]。各模块对人才的能力要求、培养路径及职业发展模式均存在显著差异,同时又通过链式协同关系

共同保障生产流程的高效运行。如果仅将这些人才视为同质化整体,必然会忽略集成电路产业内部的人才分工体系,难以有效指导人才培养与管理实践。基于此,急需将研究视角转向战略性新兴产业人才在全链协同中的关键作用,深入剖析人才协同模式与成长路径,为我国产业人才开发与科技产业突破提供实践方向。

本文将战略性新兴产业视为产业人才协同的复杂系统,并基于人才模块化视角^[6-7],以集成电路人才为例,深入探讨产业人才模块间的横向链式协同模式与纵向梯度成长路径。为此,通过网络搜索、现场访谈等方式采集集成电路相关的公开招聘数据、产业人才履历数据与访谈文本,并整合文本建模、生成树分析与质性研究方法等混合方法分析集成电路人才的多来源细粒度数据。通过解剖集成电路人才这一具有代表性的“麻雀”实现理论涌现,为战略性新兴产业人才开发提供理论启示与实践方向。

一、文献回顾与分析框架

(一)战略性新兴产业人才与模块化视角

战略性新兴产业人才是具有专门知识和技能、较高个人素养,在特定战略性新兴产业中从事研发与生产工作的个体^[8-9]。现有文献中对人才群体的分析往往将其视为同质化整体,重点关注人格、价值观、能力、心智和经历等总体特征^[10],进而总结出人才培养与成长的一般性规律^[11-12]。同时,此类研究通常将顶尖科学家^[13]、论文高被引学者^[14]等视为统一群体,探讨其基本特征或流动轨迹。然而,这一视角存在两方面不足。一是对人才的工作情境分析不够深入,而是直接聚焦人才应有的胜任力表现或者素养,进而形成一个素养清单。但恰如已有文献指出的,人才素养应结

合特定情境中的认知、工具和技能等要素,忽视工作情境的素养清单无法准确反映人才在实际工作中如何使用这些能力^[15]。二是忽视群体内部的异质性且不关注群体内部的协作分工^[16],这虽然适用于松散的群体,但对于具有分工协作关系的复杂人才系统,则无法有效刻画其内部结构,难以建立更全面的理论认识。

针对已有文献不足,本文借鉴“模块化”的概念发展出人才模块化的理论视角(见表1)。模块化概念源自复杂系统分解原理,强调将复杂系统分解为多个相对独立但相互联系的模块^[7]。这些模块内部能够独立运作,同时模块之间能高效协作,从而实现系统整体的最优化。在科技创新与产业发展相关研究中,部分文献关注技术模块化(如技术标准接口)^[17]、组织模块化(如平台型企业的生态协同)^[18],但这些研究往往将人才视为技术或组织模块的执行者,人才在系统中发挥的作用被黑箱化。而在战略性新兴产业发展中,人才往往成为最直接且最基本的支撑。尤其是在美国以“小院高墙”策略构建科技产业人才壁垒的背景下,有必要在现有研究的基础上,探讨产业链中的“人”及人才模块间的协作模式^[17]。与科技模块化、组织模块化视角相似,人才模块化是指依据工作内容将人才划分为若干模块,模块内部相似性较高而模块之间差异性较高。模块作为最基本的分析单元存在横向与纵向两种分析结构:横向上,

模块间的分工与协作实现工业产品的研发与生产;纵向上,模块内部的人才成长路径揭示了不同经历下的职业轨迹^[14]。鉴于战略性新兴产业人才协作的多模块特性,本研究将依托人才模块化框架分析战略性新兴产业的协同机制与成长路径。

(二)集成电路人才研究极其不足

集成电路人才作为一个具体产业类型的专门性人才,对于集成电路产业突围具有关键支撑作用^[19]。但已有文献更多关注关键设备、政策激励与创新生态等议题^[20-22],对人才在产业链中的具体作用关注不足^[23-24]。我国通过“芯片大基金”、地方产业布局等政策推动补链强链,但研究表明,集成电路人才数量低于阈值时,政策支持可能会对企业产生负面效应^[25]。这意味着要更充分发挥新兴举国体制优势,需要更快速高效培育产业人才。而从现有的少量集成电路人才文献来看,研究已认识到人才对集成电路产业的价值,重点探讨了培养模式落后、产教融合受阻等问题^[2,19,26],但对产业情境中的人才形态缺乏系统描述。在“是什么”尚未明晰的情况下,直接探讨“如何做”难以对齐理论与实践需求。

这一研究局限并非集成电路领域独有的现象,随着各个战略性新兴产业成为国民经济最关键支柱,过去将“人才”视为具备某种特征的群体的认识论已越来越满足实践需要^[27]。各个战略性新兴产业之间的人才特征具有较大差异,即同一个产业内部的人才也具有明显差别。学者汤之上隆^[28]指出恰如乐手间的精细分工与相互影响,集成电路各个职位的工作职责与能力需求存在明显差异。这意味着不仅要聚焦各个战略性新兴产业具体的产业端情境,更要打开人才系统的内部黑箱,逐块逐条分析战略性新兴产业人才的模块特征、协作模式与成长路径,进而以更高清更细粒的研究视野建立产业人才的整体认识。鉴于集成电路产业在战略性新兴产业中的典型性与代表性,本研究将以集成电路为例,以混合方法研究着手探究战略性新兴产业人才的具体形态与成长规律。

(三)本文研究分析框架

本文基于模块化视角,旨在深入探讨集成电

表 1 人才模块化分析与已有研究视角的差异

	人才群体分析	人才模块化分析
研究对象	面向分散的、同质化的群体,群体成员具有相似特征或共同属性,但并没有紧密的分工协作关系	面向分工协作关系的系统,系统成员具有共性,而且还有不同角色、功能、职能的划分
研究视角	主要从群体整体出发,探究群体成员的数量、质量、分布、属性等,关注群体的关键共性与基本特征	主要从系统条块出发,不仅关注各个模块间横向的协同关系,而且关注人才纵向的成长路径
代表性情境	对顶尖科学家群体展开分析	对战略性新兴产业人才展开分析
研究方法	以数据驱动为主,结合定性与定量研究方法融合多源数据,从各个维度揭示群体的共性特征	专家知识+数据驱动,运用专家知识对系统条块进行划分,随后结合定性与定量研究方法分析多来源细粒度数据,揭示条块协作机制

路人才的协同机制与成长路径。通过整合先期的文献资料与访谈发现,将集成电路产业划分为3个核心模块:集成电路设计、前道工艺与后道工艺。在横向维度上,逐一分析每个模块的工作特征与人才素养,揭示模块间的链式协同模式;在纵向维度上,则分析各模块的人才职业路径与成长实践,探索集成电路人才的梯度发展路径。

为支撑该研究,本文采用混合研究方法对多来源的细粒度人才数据进行分析。首先,通过收集30余篇公开技术文献与行业报告,初步掌握集成电路设计、前道工艺与后道工艺的基本情况。其次,基于文本建模方法,从25家国内集成电路企业的1144条人才招聘信息中提取各个模块的岗位描述,对每个模块的工作特征与人才素养进行建模分析。同时,通过对中关村集成电路

产业园5名园区领导(A1~A5)、8名企业领导(B1~B8)的访谈,进一步探讨集成电路人才的工作特征与开发实践,工作特征与开发实践,访谈对象与内容详见表2。最后,通过某公开网站收集了来自京津冀、长三角和珠三角3个集成电路产业发展较为突出地区的30989名产业人才的履历数据。所有数据均由个人自愿发布,且网站已对信息进行了匿名处理。所收集的数据仅包括工作履历相关字段,且无法与具体个体直接对应,确保了研究的匿名性和数据的隐私性^[29-30]。通过分析这些履历数据,进一步揭示集成电路人才的职业路径与成长轨迹。结合质性研究与量化数据,本文构建了一个多维度的人才模块分析框架,为集成电路产业的人才发展提供理论支持与实践指导^[31]。

表2 面向中关村集成电路产业园展开的访谈

访谈编号	访谈者对象	访谈内容	访谈记录字数
第一次访谈	A1 - 男 - 产业园区某部门主任; A2 - 男 - 产业园区某部门负责人; B1 - 男 - 某集成电路产业咨询公司副总	了解集成电路产业特征与我国集成电路人才现状,了解中关村集成电路产业园企业现状	3.6 万字
第二次访谈	A3 - 男 - 中关村某人才协会会长, A4 - 男 - 中关村某人才协会成员	了解集成电路行业人才供给与需求现状	1.5 万字
第三次访谈	A5 - 男 - 产业园区某部门成员; B2 - 男 - H 企业部门副总; B3 - 男 - I 企业技术团队主管; B4 - 男 - I 企业资深工程师; B5 - 男 - J 企业技术团队主管; B6 - 男 - K 企业招聘团队成员; B7 - 男 - L 企业产品团队主管; B8 - 男 - M 企业产品团队主管	了解各个集成电路企业的人才现状与需求,了解他们的团队协作模式与人才培育路径,了解我国集成电路人才发展面临的关键痛点难点与堵点	5.3 万字

二、人才模块化的横向维度:集成电路人才的链式协同模式

基于人才模块化的横向维度,本研究结合文本建模与质性研究方法对招聘和访谈数据进行交叉验证分析,发现集成电路设计、前道工艺和后道工艺三个模块分别具有精密切成、标准制程和线性工序的工作特征,相应的人才需具备博专兼具、精技熟工和严控精测的综合素养,从而形成横向链式协同(见图1与表3)。

(一)集成电路设计模块:精密切成—博专兼具

集成电路设计的工作特征在于精密切成。其主要任务是利用电子设计自动化(EDA)工具,在纳米级硅片上布局数十亿晶体管,实现性能—功耗—面积(PPA)的动态平衡。在摩尔定律接近物理极限的背景下,设计面临热密度约束与电磁兼容性挑战,既需提升计算能力,又需确保信号完整性与系统稳定性。因此,集成电路设计以方法学

创新为导向,遵循“需求分析—方案设计—验证反馈—优化迭代”的非线性开发逻辑。整个设计过程以最小可行产品(MVP)原则为基础,通过多轮原型验证逐步收敛技术方案:从系统级架构设计到电路实现,最终生成符合工业标准的版图文件。对招聘数据的工作内容分析表明,集成电路设计主要集中在定制电路设计(76.35%)、完成方案验证(54.07%)与进行仿真验证(34.23%)等具体活动。尽管这些活动的工作组件相对稳定且统一,但组件选择及其组合模式呈现高度动态性。集成电路设计人才需在工艺约束与创新需求间寻找平衡。当然,设计创新并非无序发散。集成电路设计团队普遍采用创新聚焦策略,如访谈对象所述:“实际上公司内不同团队关注的芯片产品也比较集中,有的做车载比较多,有的做通信比较多,团队间差别比较明显(A1)”。这种定向进化机制既保障了技术纵深发展,又避免了方向过度分散。

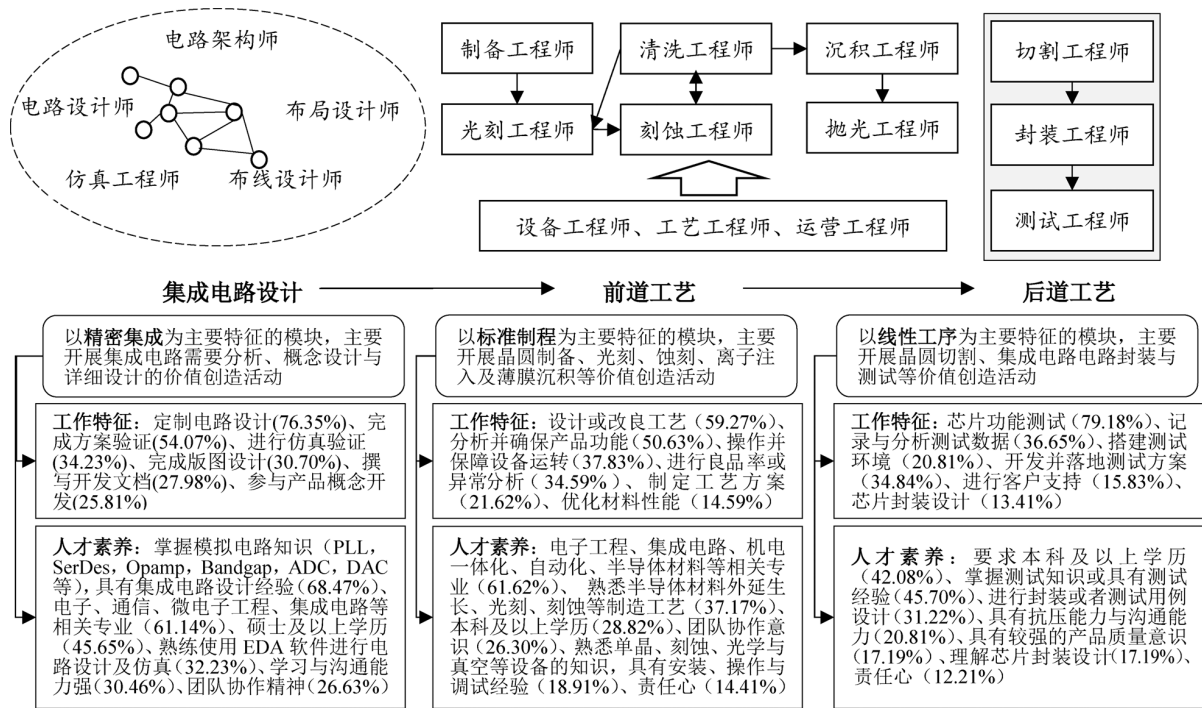


图 1 基于招聘数据的集成电路人才链式协同机制

注：本文基于某招聘网站集成电路设计职位 368 条、前道工艺职位 555 条、后道工艺 221 条招聘信息进行分析。其中，工作特征、人才素养分别来自对招聘信息中的“工作内容”和“能力要求”文本的分词、排序与语义还原分析。图中每个条目后括号中的数字指代存在该语义的职位数占该阶段职位数的比例。

表 3 基于访谈数据的集成电路人才模块特征

模块	工作特征	典型例证	人才素养	典型例证
集成电路设计	精密集成	设计方面没有太多的硬件“卡脖子”，主要是设计师团队灵感的碰撞与技术方向的落实（B3）各自工作一段时间后就会碰头，聊一聊进展并重新明确方向，将客户需要的各个功能模块以设计图的形式集成到一块板子上（B1）	博专兼具	需要学习很多模块知识，尤其是微电与模电这些方面，对于这些基本知识有系统性了解（A3）
		实际上公司内不同团队关注的芯片产品比较集中，有的做车载比较多，有的做通信比较多，团队间差别比较明显（A1）		我们这个行业还是有一定的流动性，这些工程师需要不停地积累自己的项目经验，对业务建立比较全面的认识（B7）
前道工艺	标准制程	投入很多，需要建设大型产线，工作过程要求非常严格，各个流程下的具体操作都需要遵循一般化的标准，没有自由发挥的空间（A4）	精技熟工	光课本知识肯定是远远不够的，员工进来的时候有一个培训期，会手把手教他们做项目，慢慢地有一个融会贯通的过程（B2）
		实际上各个制造环节需要有精细的操作，很多工程师达不到这个要求与操作的紧密程度，需要在产线上慢慢磨练与成长（B2）		制造职位上的员工是最重要的人才，他们有可能只会在制备、光刻或者清洗某个工序专精一门，但是他们的技艺是独属于那个环境内，也是我们最稀缺的（A2）
后道工艺	线性工序	精度要求非常的苛刻，必须要保障良品率，短时间的训练只能保证基础水平，同样的产线良品率的差异主要是工程师引起的（B1）	严控精测	目前有些单位制造职位上的人才被挖走了，这些职位上员工的不可替代性太高了，最终会影响整个产线都无法准时生产（B8）
		任务相对单调，都是重复同样的流程，每天都是线性任务，工作强度相当大（B2）		那些工序做得好的可以真正叫做大师，人家可能学历水平一般，但是他们掌握了核心的工艺流程，只有他们才能胜任那个劳动要求（B4）
		一些工厂采取计件制，这样能够提高员工的工作积极性，保持较高的生产效率（B2）		经过简单的训练就要上手，基本上工厂喜欢熟手，来了就能直接干活，所以最好有一些经验（A2）
		搞封装的需要跟着活走，要是厂里的活完了就要等新的活，人员的流动性比较高（B7）		需要服务不同的客户，任务存在一些差异，甚至有一些突发状况，要有一些能够快速复用的方案（B2）
				对人才的需求也区分具体的职位，搞开发测试和方案设计的需要一定的技术含量与科班背景（B3）

集成电路设计的高精度集成特性决定了人才需具备博专兼具的素养——既要在垂直领域具备深厚专长，又需具备跨学科知识整合能力，

以将不同方向的知识、概念和经验融入设计工作。在团队协作模式下，集成电路设计通常由电路架构师、电路设计师、布局设计师、布线设计师、

仿真工程师等多角色共同完成。由于各角色的边界相对模糊,每位成员不仅要承担自身职能,还需参与整体设计的规划与论证。因此集成电路设计不仅要求人才掌握模拟电路知识(PLL, SerDes, Opamp, Bandgap, ADC, DAC等),具有集成电路设计经验(68.47%),并且需要具有电子、通信、微电子工程、集成电路等相关专业知识(61.14%)。此外,集成电路设计要求人才能够从系统架构的全局视野深入到晶体管级的物理实现,在此过程中熟练使用电子设计自动化(EDA)工具(32.23%),并在客户需求、技术性能、成本约束等多重条件下优化设计方案。团队内部还需依赖高效的协作与沟通,以最大化整合各成员的知识与经验,确保整体设计的创新性与可行性。

(二)前道工艺模块:标准制程—精技熟工

作为集成电路的物理实现模块,前道工艺承担着将设计版图转化为硅基器件的关键任务。相较于集成电路设计模块的创新导向,前道工艺以标准制程为特征,即通过千余道精密工序的稳定复现,在纳米尺度上精准构建器件结构。标准制程不仅体现为一套广泛接受的规范化与标准化生产体系,更依赖设备参数标定、材料特性控制与流程规范稳定等多维度的全要素控制,以确保产品的质量、一致性与可靠性。在这一框架下,前道工艺人才的核心任务在于制程稳定性维护与渐进性改良,确保产线在高效运作的同时实现工艺优化与缺陷纠偏。从具体活动来看,设计或改良工艺(59.27%)、分析并确保产品功能(50.63%)、操作并保障设备运转(37.83%)、进行良品率或异常分析(34.59%)等主要工作内容均反映了这一特点。这种工作特征塑造了独特的人才培养模式,要求工程师在实践中不断提升与产线的契合度,以精进工艺操作。如有访谈对象便指出“实际上各个制造环节需要有精细的操作,很多工程师达不到这个要求与操作的紧密程度,需要在产线上慢慢磨炼与成长(B2)”。

标准制程的高精度与稳定性决定了前道工艺人才需具备精技熟工的综合素养,即能够将隐性且高度特定的技术知识深度融入产线实践。这一

能力范式源于晶圆制造的全流程特性——从晶圆制备到抛光,需经过切割、光刻、蚀刻、清洗等数百乃至上千道精密工序的严格串联。每道工序既是独立技术模块,又需在上下游环节实现纳米级精度衔接,由此形成高度异步协作体系。在此逻辑下,前道工艺的工序专精分工尤为突出,如制备工程师聚焦材料处理,光刻工程师专攻图形转移精度,清洗工程师确保晶圆洁净度。每一岗位的人才不仅需掌握特定工艺窗口的核心参数控制,还需具备设备操作认证及异常诊断能力,以确保产线稳定运行。从对招聘信息的结果来看,前道工艺人才往往就读于电子工程、集成电路、机电一体化、自动化、半导体材料等相关专业(61.62%)、熟悉半导体材料外延生长、光刻、刻蚀等制造工艺(37.17%)并具备本科及以上学历(28.82%)。此外,要求前道工艺人才熟悉单晶、刻蚀、光学与真空等设备的知识,具有安装、操作与调试等实践导向的能力(18.91%)。这一能力结构决定了前道工艺人才需要经历长期的产线浸润,在实践中不断优化工艺操作,逐步将理论知识转化为工艺直觉。由于培养周期长、替代成本高,关键岗位人才的稀缺性尤为突出。正如访谈对象所述:“有些单位制造职位上的人才被挖走了,这些职位上员工的不可替代性太高了,最终会影响整个产线都无法准时生产(B8)”。

(三)后道工艺模块:线性工序—严控精测

集成电路后道工艺具有线性工序的工作特征,其表现为工序序列的不可逆性与操作流程的重复性。该工作流程涵盖晶圆切割、封装测试等终端环节,通过标准化作业流程的严格序列执行,实现芯片产品的最终形态转换与质量验证。从具体工作活动来看,后道工艺人才主要负责开展芯片功能测试(79.18%)、记录与分析测试数据(36.65%)、搭建测试环境(20.81%)等集成电路测试活动,同时包括开发并落地测试方案(34.84%)、进行客户支持(15.83%)等现场支持活动。除此之外,后道工艺还包含芯片封装设计(13.41%)等相关活动。这些工作内容具有流程刚性与场景柔性的矛盾特征,往往工作内容相对重复,随着项目变化作业环

境会相对复杂。在作业过程中,各个任务的独立性较强,但模块内人才之间的互动频率相对较低,“任务相对单调,都是重复同样的流程,每天都是线性任务,工作强度相当大(B2)”,这也构成了线性工序的工作特征。

线性工序特征对后道工艺人才提出了严控精测的综合素养要求。严控精测指在精密制造过程中,针对关键质量指标和高精度测量环节实施系统性管控的素养。这种素养要求的形成源于后道工艺的双重特性。一方面,后道工艺对从业者的职业特质具有一定要求。从招聘数据分析结果来看,后道工艺人才需要具有抗压能力与沟通能力(20.81%)、较强的产品质量意识(17.19%)、责任心(12.21%)。这表明,后道工艺人才需要具备持续性的细节管控能力,能够在高强度重复作业中保持质量稳定性。另一方面,后道工艺具有任务强度高和场景迁移性强的双重挑战。人才需要构

建模块化的技术复用体系,形成可迁移的解决方案库。如有访谈对象表示,后道工艺人才“需要服务不同的客户,任务存在一些差异,甚至有一些突发状况,要有一些能够快速复用的方案(B2)”。因此,在人才要求上,后道工艺人才一般要求本科及以上学历(42.08%),能够掌握测试知识或具有测试经验(45.70%),以支撑其进行封装或者测试用例设计(31.22%)。

三、人才模块化的纵向维度:集成电路人才的梯度成长路径

基于人才模块化的纵向维度,探究集成电路各模块人才的梯度成长路径。综合生成树分析与质性研究方法,分析人才履历、访谈文本发现:集成电路设计、前道工艺与后道工艺人才分别表现出邻域融合、技艺精进与同域流动的成长路径,分别需要通过嵌入式教育、师徒制度和技能认证等实践来促进其发展(见图2和表4)。

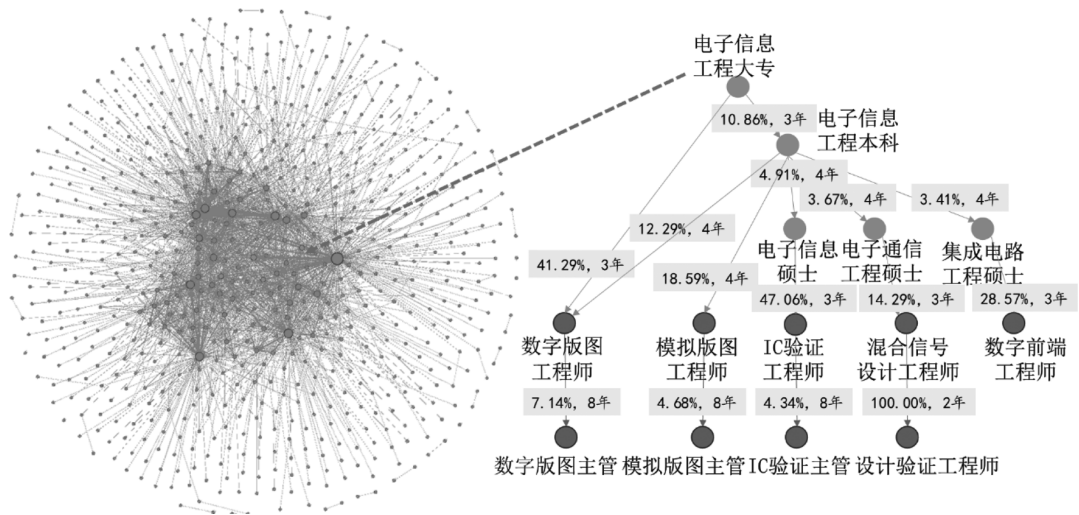


图2 基于履历数据的集成电路人才梯度成长路径

注:图左的网络分析中涵盖30 989名产业人才的成长路径,图右为图左集成电路设计模块某个局部和放大图,线条上标示了职业迁移概率与平均迁移时间,如“电子信息工程大专→电子信息工程本科”箭头上标示的“10.86%,3年”,代表集成电路设计模块中具有电子信息工程大专学历背景的人才有10.86%的个体继续在电子信息工程本科阶段学习,在大专阶段的平均学习年限是3年。以上仅列示局部主要路径。

(一)集成电路设计模块:邻域融合—嵌入式教育

集成电路设计人才的职业发展呈现邻域融合的特征,其成长路径要求构建多学科知识体系并通过系统性整合形成全局性技术认知。从整个模

块的职业流动来看,该群体职业流动轨迹揭示出“高等教育奠基—职业实践深化”的双重驱动机制:在学术培养阶段,设计人才通过电子信息工程、电子科学与技术、微电子科学与工程等学科的交叉渗透,逐步完成从基础理论到专业能力的知

识迭代。多学科背景的叠加效应使其能够突破单一学科边界,形成集成电路设计的整体性思维框架,这为后续知识资本的复合增长奠定了基础。而在职业实践阶段则呈现动态能力建构特征。集成电路设计人才需要不断转变自身的角色,通过在不同团队中的不同职位进行实践掌握最前沿的电路架构与芯片设计知识,最终在电路设计的综合职位上实现知识资本的转化。如有访谈对象指出“我们在不同的项目团队里角色会不太一样,你可能在这家公司是做这个工作的,在另一家公司会有一些差异,最后有全面认识(B7)”。这种“角色迁移—知识增值”的良性循环,构成了知识资本的多维积累过程。这个成长模式的内在逻辑体现在:以高层次学位教育构建初始知识资本,继而通过企业内外部岗位流动实现能力跃迁。结合教育与实践的双重作用,最终塑造出具有跨领域整合能力的复合型设计人才,这也从机制层面解释了

该模块高学历集聚现象的形成动因。

为有效培养邻域融合的集成电路设计人才,推动“学科交叉—项目驱动”的嵌入式教育是有有效的人才开发实践。嵌入式教育强调突破传统学科壁垒,通过重构知识体系与教学场域,实现技术素养与工程能力的协同发展。“传统意义上以课程为中心的培养模式没办法培养出比较优质的设计人才,他们必然是需要有比较复合的背景和项目经验(A2)”。一方面,嵌入式教育强调学术知识模块化重组,以工程牵引为核心,通过整合微电子科学、产品设计方法论等异质学科,提升学习者对技术生态的全局认知能力;另一方面,嵌入式教育突出产业要素场景化植入,将企业正式项目嵌入培养全流程,形成“理论认知—实践反馈”的闭环学习系统。这种人才开发实践不仅能加速知识资本的复合积累,更能催化设计思维从线性递进向系统集成的整体转变。

表4 基于访谈数据的集成电路人才成长路径

模块	成长路径	典型例证	开发实践	典型例证
集成电路设计	邻域融合	我们还是更加喜欢项目经验丰富一些的,过去的经验让他们对设计有一个整体的概念,在新项目中很快就能上手(B7)	嵌入式教育	传统意义上以课程为中心的培养模式没办法培养出比较优质的设计人才,他们必然是需要有比较复合的背景和项目经验(A2)
		实际上我们很多人本科不是学微电,各种背景的人都有,反而是这些复合背景的人更能理解电路设计的整体应该是怎么样的(B3)		我们单位与一些高校建立了合作关系,包括双方的人才培养与交流,为他们的学生提供实训机会,效果还是比较突出的(B5)
		我们在不同的项目团队里角色会不太一样,你可能在这家公司是做这个工作的,在另一家公司会有一些差异,最后有全面认识(B7)		北京许多高校的学生都会参与到我们这个合作平台上,能够提供实习机会,当然这种合作能够让学生在实训过程中得到提高(A5)
前道工艺	技艺精进	他们十几年甚至几十年都待在这个公司,而且主要干的就是这个方向上的事,成为这一个职位的专家(A2)	师徒制度	最好的模式还是师带徒,很多东西就是需要手把手地教,才能让这些员工快速上手(B1)
		这也是在产线上磨炼出来的,在职位上待久了那一个职位可能就非他不可了(B3)		我所知道的基本上都是师带徒的方式,一个成熟的师父能够打造出一个很好的团队(B6)
		这种老师傅比较多,他们可能就是专精于光刻或者刻蚀里面的一个小环节,一直待在台积电这种制造企业(A3)		这个制度算是能够加速这个过程最有效的方式,当然各个企业的师徒制度存在差异,本身也在不断完善的过程中(A1)
后道工艺	同域流动	主要是跟着项目走,需要到不同的单位进行测试与调试,虽然工作环境还是有一些差异,但任务的性质差别不突出(A2)	技能认证	目前最主要的问题就是需要有技能认证,虽然有些公司有一些尝试,但基本上都是落在内部,影响力不是非常突出(A2)
		总的来说搞封装的人流动性比较大,很多时候在园区内的各个厂之间流动(B1)		这块人才的流动性比较大,他们的能力评价也比较主观,需要有一些客观的评价体系(A2)
		这些测试方案积累下来后相对成熟一点,他们在不同客户那里跑,但工作内容基本稳定(B2)		完善技能认证能够解决这些员工一个很大的问题,提高他们的工作效率(B5)

(二)前道工艺模块:技艺精进—师徒制度

前道工艺人才的职业发展呈现出技艺精进的成长路径,其核心机制表现为在特定技术领域内的持续技能积累与工艺诀窍的沉淀。这一梯度路径的形成,依赖于“练习—反思”这一循环往复的

过程,使个体能够逐渐成长为某一特定工艺环节的技术专家。前道工艺人才的教育背景具有显著的多学科分布特征,涵盖光学、材料、化工、机械、微电子等多个领域。这表明,前道工艺模块人才具有多元专精的特点,通过材料工程、光学技术等

领域的专业训练,前道工艺人才构建了基础的技术认知框架,为后续的技能迭代和技术创新奠定了多样化知识基础。然而,核心素养的构建主要发生在职业实践中。在实际的工作过程中,前道工艺人才需要在光刻、刻蚀、薄膜沉积等特定工序中进行长期的技术深耕。通过“练习—反思”机制的不断循环,逐步掌握并精通纳米级制程的关键技艺。如某访谈对象所述:“他们十几年甚至几十年都待在这个公司,而且主要干的就是这个方向上的事,成为这一个职位的专家(A2)。”因此,前道工艺人才的发展可以概括为“宽口径,深发展”——即人才知识基底较宽,但真正的技术深耕和能力提升主要依赖于在生产线上工艺实践中的纵深式成长。

前道工艺人才的技艺精进路径与师徒制度的人才开发实践形成结构性契合。作为企业核心的知识治理机制,师徒制度通过构建“导师—学徒”的技术共生关系,促成隐性知识与技能的有效传递。在这一制度下,导师不仅承担教育者的角色,依托自身多年的工艺实践经验,系统总结并提炼纳米级制程参数优化、设备异常诊断等隐性知识,从而加速学徒的成长过程。同时,导师还需扮演教练的角色,通过示范和引导,帮助学徒在自主反思中提升技艺。师徒制度的有效性关键在于师徒关系的构建。为此,企业应当设立双轨制的绩效考核体系,既考核导师的知识转移效果,又评估学徒的成长进度,以此确保知识传递的高效性。通过这种制度牵引,规避师徒制度的形式化困境,提升隐性知识与技能传递效率。

(三)后道工艺模块:同域流动—技能认证

后道工艺人才成长路径具有同域流动的特征,即随着项目的开展与推进在相同性质的领域中流动,具有“人随项目走”的特点。其中,最核心的职位是FAE现场应用工程师、FAE技术支持工程师等,该类职位通过为客户提供定制化技术方案与全周期产品支持,在保障客户产品效能最大化的过程中实现人才进阶。后道工艺人才成长路径具有职业化与外部化的双重特性。前者表现为

通过系统化的职业教育或本科教育,逐步掌握半导体材料特性、封装工艺流程等专业知识体系,并在项目实践中形成可迁移的技术解决方案复用能力;后者则是生产安排的动态性导致的人员流动率较高,即便是稳定性岗位也需应对跨项目调度挑战,这就要求从业者持续提升跨组织协调能力与职业身份调适能力。如有访谈对象指出,后道工艺人才“主要是跟着项目走,需要到不同的单位进行测试与调试,虽然工作环境还是有一些差异,但任务的性质差别不突出(A2)”。这些描述都反映了后道工艺人才区别于其他模块人才的成长路径。

技能认证作为支撑同域流动成长路径的关键模式,通过建立标准化素养评估框架实现了双重价值传导。该体系以职业素养量化评价为核心,针对后道工艺领域构建职业身份锚定系统,其运作逻辑包含3个递进层次:基础层确立切割、封装等工序的专项技能标准;应用层形成技术路线的能力认证图谱;发展层打通跨项目流动的职业通道。从实践效能看,技能认证既作用于个体职业发展维度,通过可视化的能力坐标引导人才建立持续精进的技术迭代意识,也在行业管理维度破解高流动性带来的评价失准问题,借助职业信用背书降低跨组织流动成本。这种结构化的人才开发模式,恰如有访谈对象指出,“这块人才的流动性比较大,他们的能力评价也比较主观,需要有一些客观的评价体系(A2)”。认证体系通过赋予技术能力社会通行性,使人才在项目迁移中同步完成职业资本积累,形成流动性与专业性正向强化的良性循环。

四、结论与讨论

(一)结论:经验发现与理论命题

基于产业人才模块化视角,本研究整合文本建模、生成树分析与质性研究方法等方法对多来源细粒度的集成电路人才数据展开分析发现:集成电路由集成电路设计、前道工艺、后道工艺3个模块构成,分别具有精密集成、标准制程和线性工序的工作特征,要求对应的人才具备博专兼具、精

技熟工和严控精测的综合素养,进而形成模块间横向的链式协同模式;集成电路各模块人才表现出邻域融合、技艺精进与同域流动的差异化梯度成长路径,需要嵌入式教育、师徒制度和技能认证等来助推模块内纵向的梯度成长路径。基于这一经验发现,本文将理论化为战略性新兴产业中的人才模块化命题。

战略性新兴产业的人才模块化分工是复杂科技产业系统动态演化的结果。基于模块化理论的任务可分解性原则,集成电路产业可以划分为设计、前道工艺、后道工艺等人才模块,其工作特征呈现“宽域—窄域”连续体分化:设计模块需协调架构设计、算法优化与 EDA 工具集成形成精密集成的特征,因此要求人才能够博专兼具以应对系统级不确定性;工艺模块聚焦于光刻参数微调与缺陷率控制的标准制程,因此人才需要精技熟工实现工序稳定性。这种任务属性与素养结构的结构性匹配形成人力资本配置的底层逻辑——宽域工作特征驱动广度工作素养,即通过知识重组推动创造性涌现;窄域工作特征则塑造深度工作素养,借助程序化经验降低操作误差。进一步地,模块间的链式协同效率取决于双接口机制的适配性:知识接口(如设计规则库、工艺知识图谱)依赖广度素养人才的抽象编码能力,将隐性经验转化为可迁移协议;流程接口(如标准作业程序、异常处理手册)则需深度素养人才的情境嵌入性,将局部知识固化为可执行指令。这一集成电路的经验发现,同样可以用以解释其他战略性新兴产业的人才模块横向链式协同模式。基于以上分析,提出以下命题。

命题 1:战略性新兴产业的人才模块化分工中,工作特征(宽域—窄域)与综合素养(广度—深度)形成结构性匹配,进而通过知识接口与流程接口实现横向链式协同。

战略性新兴产业人才梯度成长路径在模块间具有差异性。集成电路设计模块的跨领域协同需求形成人才的探索式成长路径,其核心在于通过领域融合以增强创新创造能力;前道工艺与后道

工艺模块的工序稳定性要求则催生利用式成长路径,依赖技艺精进与同域流动提升可靠性。这种“综合素养要求—梯度成长路径”的结构性匹配源于模块任务属性的差异化:广度素养要求人才建立跨领域认识以降低系统复杂性,对应探索式学习的认知重构机制;深度素养则依赖程序化经验以提升操作精度,契合利用式学习的经验强化机制。而与两种梯度成长路径相匹配,存在嵌入式与具身式两种风格的人才开发实践。探索式人才梯度成长路径需要嵌入式开发实践以加速其知识整合效率,如集成电路设计人才便需要理论知识与企业项目深度结合的培养模式。而利用式人才梯度成长路径需要具身式开发实践,通过隐性知识传递强化技能深度,如集成电路前道工艺人才需要以师徒制度缩短成长周期。基于以上分析,提出以下命题。

命题 2:战略性新兴产业人才所处模块的综合素养要求(广度—深度)与梯度成长路径(探索式—利用式)形成结构性匹配,需要分别以嵌入式与具身式人才开发实践加速人才梯度成长过程。

(二)理论贡献

首先,本文从产业情境出发,以混合方法研究剖析多来源细粒度数据,全方位揭示了集成电路人才的具体形态与成长路径,回应了已有文献对于集成电路人才研究关注的不足。已有文献更多关注集成电路的产业发展与技术创新^[21,32],而对人才协同机制关注尚不够深入。少量文献提到要重视集成电路人才的培养,但对集成电路人才的价值创造情境缺乏深入探究^[33]。本文综合文本建模、生成树分析与质性研究方法等方法,对多来源细粒度数据展开分析,揭示了集成电路设计、前道工艺与后道工艺之间的链式协同模式与梯度成长路径。这弥补了已有文献对于集成电路人才产业需求端关注的不足,为后续研究深入探究集成电路人才提供了理论基础。

其次,本文基于对集成电路人才规律的经验剖析,实现了对战略性新兴产业科技人才的理论涌现。已有文献侧重从政府政策、高校教育等方

面探究科技人才的培育实践^[27],但对于战略性新兴产业科技人才开发这一理论问题缺乏理论建构^[9]。本研究通过剖析集成电路产业这一具体案例,在总结各个模块工作特征与人才素养的同时,对相应的梯度成长路径与人才开发实践加以提炼。这一经验研究对于从微观视角描绘产业协作过程,为后续特定产业人才形态与开发实践研究作出增量贡献。

最后,本文发展出人才模块化视角,并以集成电路人才为目标呈现了这一视角的理论进路,发展出战略性新兴产业人才模块化的理论命题。已有文献往往将研究对象视为一个同质化的群体,而忽视了人才系统内部的差异性尤其是分工协作过程^[2,29]。面对以集成电路为代表的人才协作情境,本文发展出人才模块化视角,逐一剖析不同模块的情境性特征,并以此为出发点厘清产业中的人才模块化关系,全景式呈现集成电路人才与价值创造过程高度融合的理论图景。在当前文献中人才研究空前热情但理论研究有待发展的情况下,为后续研究提供了新思路。

(三)实践启示与研究展望

本文发现为集成电路人才开发具有实践启示。本文为集成电路人才开发提供了实践启示。首先,集成电路不同模块间的工作特征差异导致人才素养与成长路径的差异。具体来说,集成电路设计人才需通过高阶学位教育掌握前沿科技知识并了解技术需求,结合较长时间的项目经历,完成复合知识的获取、整合与转化;前道工艺人才则侧重于在工作过程中通过反思与实践积累内隐知识,以逐步满足任务需求;后道工艺人才则面临职业化与外部化的双重挑战,需要在职业流动中逐步掌握所需技能。其次,针对不同价值创造阶段的集成电路人才,需制定差异化的人才开发实践以引导其成长。设计人才应采取嵌入式教育实践,将学位教育与工作内容结合,实现多场域知识的整合;前道工艺人才可以通过师徒制度加速技能积累,培养高技能专才;后道工艺人才则应建立完善的技能认证制度,提升其职业适应性。最后,

本文提出的产业人才模块化框架对其他战略性新兴产业的人才培养具有借鉴意义。由于同一产业内不同模块间的人才素养要求与成长路径存在显著差异,应深入分析各模块的工作特征与人才需求,识别人才断链断层薄弱环节,并建立相应的科技人才开发实践。

当然,集成电路人才及其他战略性新兴产业人才的协同模式和成长路径并非一成不变。随着科技变革各个产业将迎来更加颠覆性的科技变革。这意味着,当科技奇点到来后,各个战略性新兴产业中的人才协同模式和成长路径需要动态调整,以适应技术进步与产业需求的快速变化。为了应对这一转型,后续的研究可以进一步探索“科技—人才—产业”之间的共演机制,探究人才如何在相互作用中推动战略性新兴产业的创新与发展。

参考文献:

- [1] 吕鲲, 罗星雨, 靖继鹏. 融合 CFDP 和 CPM 分析的关键核心技术识别及其路径分析:以芯片光刻领域为例[J]. 图书情报工作, 2024,68(16): 75-89.
- [2] 马立超, 路超, 唐潇风. 共生理论视角下工程科技创新人才培养的产教融合困境:以集成电路行业为例[J]. 科学管理研究, 2023,41(1): 121-128.
- [3] 张洋, 黄子莹, 朱嘉麒. 青年科技人才画像及鉴识方法研究[J]. 情报学报, 2024,43(11): 1283-1296.
- [4] 张潇月, 刘金亚, 赵昆华. 我国生物学领域科研数据重用实践的用户画像与服务启示[J]. 现代情报, 2024,44(6): 33-44.
- [5] 曲永义, 李先军. 创新链赶超:中国集成电路产业的创新与发展[J]. 经济管理, 2022,44(9): 5-26.
- [6] STURGEON T J. Modular production networks: a new American model of industrial organization[J]. Industrial and corporate change, 2002,11(3): 451-496.
- [7] 魏江, 黄学, 刘洋. 基于组织模块化与技术模块化“同构/异构”协同的跨边界研发网络架构[J]. 中国工业经济, 2014(4): 148-160.
- [8] 杜谦, 宋卫国. 科技人才定义及相关统计问题[J]. 中国科技论坛, 2004(5): 137-141.
- [9] EVA G, NICKY D, TOMÁS F G. What is the meaning of ‘talent’ in the world of work? [J]. Human resource management review, 2013,23(4): 301-304.
- [10] RODERICK I S, ADAM D G. Egalitarianism makes

organizations stronger: cross-national variation in institutional and psychological equality predicts talent levels and the performance of national teams[J]. *Organizational behavior and human decision processes*, 2015, 129(7): 80-92.

[11] YU K Y T. Influencing how one is seen by potential talent: organizational impression management among recruiting firms. [J]. *The Journal of applied psychology*, 2019, 104(7): 888-906.

[12] VLAD V, ARNO H, CHARLES M V. Recognizing the important role of self-initiated expatriates in effective global talent management[J]. *Human resource management review*, 2015, 25(3): 280-286.

[13] 胡泽文, 屈静, 周西姬. 世界顶尖科学家获奖年龄与授奖时滞的周期演变特征:以诺贝尔奖得主为例[J]. *图书馆论坛*, 2022, 42(12): 48-56.

[14] 孙康, 司月芳. 基于高被引华人科学家流动的城市网络空间演化分析[J]. *世界地理研究*, 2023, 32(9): 109-119.

[15] SARA L R, TAMARA L G, KENNETH G B. The very separate worlds of academic and practitioner periodicals in human resource management: implications for evidence-based management[J]. *The academy of management journal*, 2007, 50(5): 987-1008.

[16] 杨勇, 肖伟伟. 城市人才生态系统运行机理与政策仿真研究[J]. *科学学研究*, 2023, 41(7): 1197-1210.

[17] 卢艳秋, 施长明, 王向阳. 基于模块化理论的复杂产品知识管理模型研究[J]. *情报理论与实践*, 2021, 44(11): 143-149.

[18] 曹虹剑, 罗能生. 高新技术产业组织模块化及其对中国的启示[J]. *自然辩证法研究*, 2010, 26(4): 51-55.

[19] 管开轩, 余江, 周建中, 等. 高水平科技自立自强下我国集成电路人才培养“痛点”与对策[J]. *中国科学院院刊*, 2023, 38(2): 324-332.

[20] 郑赛硕, 王学昭, 陈小莉. 共性技术识别方法构建与实证研究:以集成电路行业为例[J]. *图书情报工作*, 2021, 65(15): 130-139.

[21] 梅建明, 邵鹏程, 王石宇. 产业政策何以激励集成电路企业创新:基于创新意愿与政策协同视角[J]. *经济学家*, 2024(9): 53-62.

[22] 张贝贝, 尹西明, 陈泰伦, 等. 后发企业与创新联合体共演驱动产业关键核心技术持续突破的机制研究[J]. *科研管理*, 2024, 45(8): 83-94.

[23] 刘建丽, 李先军. 基于非对称竞争的“卡脖子”产品技术突围与国产替代:以集成电路产业为例[J]. *中国人民大学学报*, 2023, 37(3): 42-55.

[24] 渠慎宁, 杨丹辉, 兰明昊. 高端芯片制造存在“小院高墙”吗:理论解析与中国突破路径模拟[J]. *中国工业经济*, 2023, 423(6): 62-80.

[25] CHEN Q L, WANG T C. Government support, talent, coupling of innovation chain and capital chain: empirical analysis in integrated circuit enterprises[J]. *Chinese management studies*, 2022, 17(4): 883-905.

[26] 牛媛媛, 王天明. 产业政策驱动的大学发展三螺旋环境创建研究:以国产光刻机装备产业发展为例[J]. *科研管理*, 2023, 44(2): 14-20.

[27] NICKY D. The psychology of talent management: a review and research agenda[J]. *Human resource management review*, 2013, 23(4): 272-285.

[28] 汤之上隆. 失去的制造业:日本制造业的败北[J]. 北京:机械工业出版社, 2015, 32.

[29] 隗玲, 黄茜, 郭景芸. 学术履历差异对论文产出跨学科性影响研究:以图书情报领域核心作者为例[J]. *现代情报*, 2024, 44(6): 136-144.

[30] 沈科杰, 黄焕婷, 化柏林. 基于公开履历数据的人物知识图谱构建[J]. *数据分析与知识发现*, 2021, 5(7): 81-90.

[31] 李月琳, 孙劲松, 潘正源. 以质性研究方法为基础的信息行为理论体系构建[J]. *中国图书馆学报*, 2024, 50(6): 75-84.

[32] 朱宇婧, 陈芳, 赵萍, 等. 融合美国商业管制清单和专利的技术链关键路径识别研究:以 EDA 软件领域为例[J]. *图书情报工作*, 2023, 67(21): 89-99.

[33] 余东升, 胡善姣, 邹雪城, 等. 研究型大学集成电路人才培养的难点及破解策略:华中科技大学集成电路设计与集成系统专业教改案例研究[J]. *高等工程教育研究*, 2022(3): 52-59.

(本文责编:润 泽)