

基于比较分析的人工智能技术创新路径研究

房超¹, 李正风^{1,2}, 薛颖¹, 尤政¹

(1. 清华大学高技术实验室, 北京 100084; 2. 清华大学社会科学学院, 北京 100084)

摘要: 人工智能 (AI) 技术已在经济社会发展和国防建设中获得广泛应用, 但在灵活性、可解释性、鲁棒性和安全性等方面存在待改进提高之处, 亟需加强研究以获得创新发展。本文在对 AI 技术和 AI 产业进行概念界定的基础上, 运用比较分析的研究方法, 选取核能、光伏技术与 AI 技术在基础理论、技术发展和技术市场应用方面展开比较分析, 进而探索 AI 技术创新的普遍规律和有效路径。研究发现, AI 技术的发展模式将由“内卷式”转向“演化式”发展; 融合式发展是 AI 技术创新的优选路径, 可通过民用研究成果直接转化为军用、军民协同创新、军用需求牵引民用需求的“三步走”发展路线来实现。针对 AI 技术深度融合发展的目标, 研究提出了构建新型研发机构、加大资金支持力度、重视人才队伍建设、开展伦理研究等对策建议。

关键词: 人工智能; 技术创新路径; 内卷式; 演化式; 融合发展; 比较分析

中图分类号: T-09 **文献标识码:** A

Research on Innovation Path of Artificial Intelligence Technology Based on Comparative Analysis

Fang Chao¹, Li Zhengfeng^{1,2}, Xue Ying¹, You Zheng¹

(1. Lab for High Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Social Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Currently, artificial intelligence (AI) technology has been widely applied in socio-economic development and national defense construction; however, it still requires improvement in terms of flexibility, interpretability, robustness, and security. This study defines AI technology and AI industry and subsequently compares AI technology with nuclear and photovoltaic technologies from the aspects of basic theory, technology development, and market application, aiming to explore an effective path for AI development and innovation. The study reveals that the development of AI technology is bound to shift from an involution to evolution mode and integrated development is an optimized path for AI technology innovation in China. Specifically, a three-step development route should be adopted, including direct transfer of civilian achievements to military use, military-civilian coordinated innovation, and promoting civilian use based on military development. To promote deep integration of AI technology, new research institutions should be established, financial support be increased, talent training be promoted, and ethical research be conducted.

Keywords: artificial intelligence; technological innovation path; involution mode; evolution mode; integrated development; comparative analysis

收稿日期: 2020-05-22; 修回日期: 2020-07-06

通讯作者: 尤政, 清华大学教授, 中国工程院院士, 研究方向为智能微系统; E-mail: yz-dpi@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“广东军民融合发展战略研究”(2018-GD-5)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

人工智能(AI)技术诞生于20世纪50年代,已发展成为当前最前沿、最热门的高新技术之一,在第四次科技革命中处于核心地位,成为未来综合国力较量的重要方面。美国、俄罗斯、欧盟、日本等国家和地区高度重视AI技术的发展,积极制定相关战略和规划,加强技术研究与开发[1~4]。

近年来,我国推出了多项战略和政策,加强顶层布局为AI发展指明方向,支持AI技术快速健康发展。在这一过程中,需遵循技术发展客观规律,寻求适合国情的AI技术创新路径。当前亟待解决的重大难题是研究新时期举国体制下AI技术的发展创新模式和优选路径,探索与之相适应的投资政策、人才机制、项目管理制度和绩效考核体系。

AI作为一项颠覆性新兴技术,对其发展规律的系统化研究尚不充分。为此,本文运用对比分析方法,选取相对成熟的核能、光伏技术与AI技术进行对比,从基础理论、技术发展和技术市场应用模式3个方面展开论述,梳理AI技术特有的发展规律和创新路径,提出推动我国AI技术创新发展的措施与建议。

二、AI技术和产业的概念界定

(一) AI技术概念界定

国家标准化管理委员会将AI定义为[5]:利用数字计算机或者数字计算机控制的机器模拟、延伸和扩展人的智能,感知环境、获取知识并使用知识获得最佳结果的理论、方法、技术及应用系统。

依据这一定义,可将AI理解为通过特定技术手段使机器“模仿”人的智能。按照“模仿”能力的成熟程度,AI技术可以分为弱AI、强AI和超AI等阶段[6]。弱AI指擅长于单一方面的AI,基本处于计算和感知的智能水平。强AI指能够进行思考计划、解决问题、抽象思维、理解复杂理念、深度学习等操作,在各方面能和人类处理水平类似的AI。超AI指在几乎所有领域都比人类处理能力更强的AI,如科学创新、通识和社交技能等。目前AI技术处于弱AI阶段[7,8],要从弱AI阶段发展到强AI阶段,需要在基础前沿、核心技术等方面

取得重大突破。

AI的核心技术包括:机器学习、计算机视觉、知识工程、自然语言处理、语音识别、计算机图形学、多媒体技术、人机交互技术、机器人、数据库技术、可视化技术、数据挖掘、信息检索与推荐等。得益于高等院校、科研机构和企业对AI核心技术方面取得的进展,AI技术逐渐具备智能化、广泛性、高效性和全球化的特征,在经济社会发展中的作用将越来越重要。也要注意,AI核心技术还存在灵活性不足、可解释性弱、鲁棒性差等问题,对未来AI技术的发展构成了严峻挑战。

(二) AI产业概念界定

产业是一个复杂的经济系统,包括管理、技术、人员、生产、市场、资源和信息等多类要素[9]。目前,AI产业概念界定通常有广义和狭义两种方式,相关要素的含义与表现形式不尽相同。从广义角度看,AI产业指通过AI技术的深度广泛应用,促进技术集成与商业模式创新,推动重点领域智能产品创新,带动重点行业智能化升级,形成智能驱动、人机协同、跨界融合的产业发展新形态。从狭义角度看,AI产业指群体、团队、个人针对AI基础理论、技术、系统、平台以及基于AI技术所推出产品和服务的研发、生产、销售等一系列经济活动的集合[10]。本文研究是基于AI产业的狭义概念来开展的。

AI产业是一个结构性体系,从产业链各阶段的供给和依赖关系来看,从上到下依次分为基础层、技术层和应用层(见图1)。基础层主要提供数据或计算能力支撑,如芯片、传感器、生物识别等。技术层主要进行关键技术研究和相关应用,依托运算平台和数据资源进行海量识别训练与机器学习建模,开发面向不同领域的应用技术,如语音及自然语言处理、计算机视觉和机器学习等。应用层主要是在细分行业场景中应用,核心在于AI技术的商业化,利用AI技术提供产品、服务和解决方案[11]。

(三) AI技术与AI产业的关系

新兴产业是通过前沿技术不断发展进而经工程化、产业化而形成的,科技创新是新兴产业发展的重要动力[12,13]。AI产业作为重要的新兴产业之

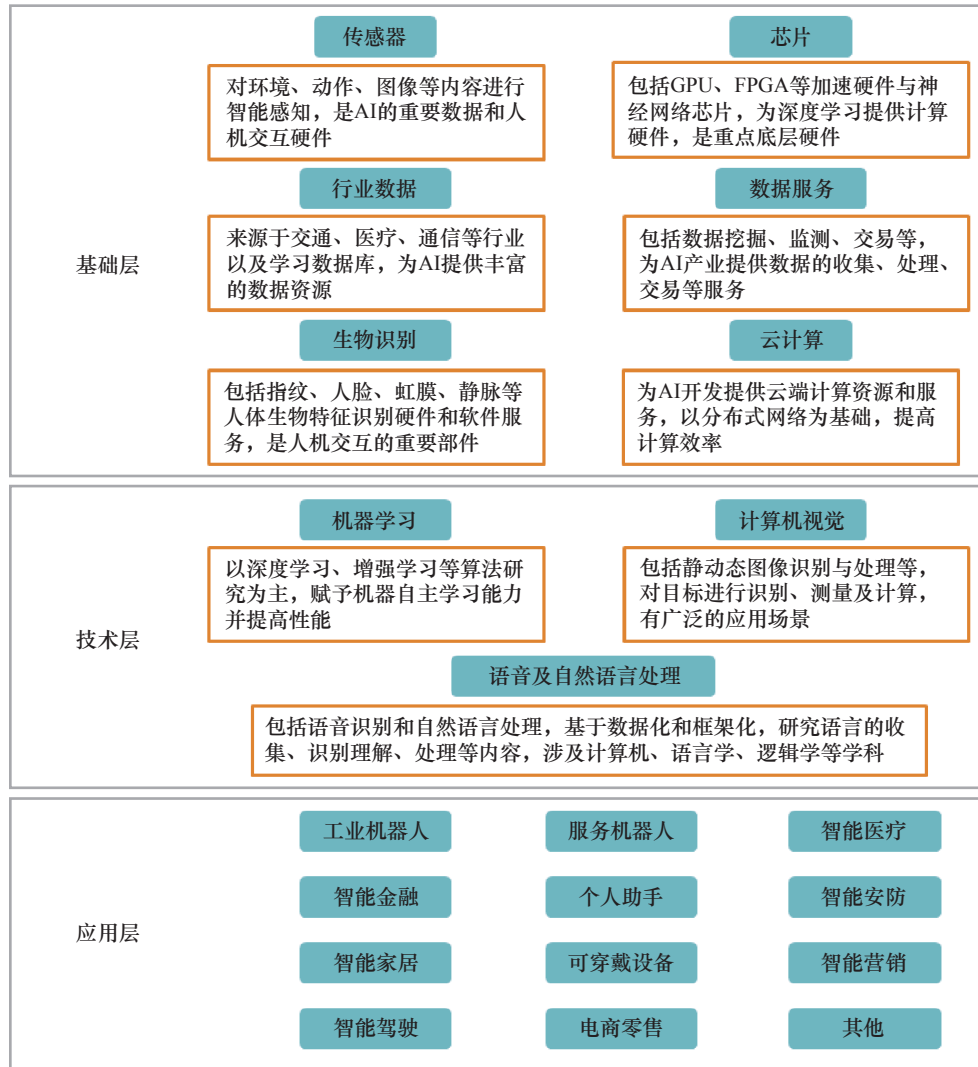


图 1 AI 产业结构图 [10]

注：GPU 表示图形处理器；FPGA 表示现场可编程门阵列。

一，与 AI 技术的关系阐述如下：AI 技术是推动 AI 产业发展的重要内核；AI 产业的发展趋势是以 AI 关键技术为核心，向上向下分别辐射带动 AI 产业结构基础层和应用层的发展；AI 产业的整体发展程度受限于 AI 核心技术的发展创新能力，促进 AI 关键技术创新发展是必然的选择。

目前我国 AI 产业发展整体形势仍落后于欧美发达国家，探索符合国情的 AI 技术创新发展路径，通过“以技术促产业”模式推动我国 AI 产业快速发展，具有重大现实意义和深远战略价值。

三、基于比较分析的 AI 技术发展规律初探

技术发展通常表现为以基础理论为先导、以

市场需求为拉动，旺盛的市场需求促使技术不断升级和优化。通过分析基础理论突破与市场需求生成对于技术发展的影响，有助于加深对技术发展规律的认识和理解。由于 AI 技术起步较晚，本文将之与发展较为成熟、应用广泛的核能和光伏技术进行对比分析，研究各自的发展特点以探索 AI 技术发展的普遍规律。

(一) 核能技术

1. 基础研究进展

核能技术基础理论主要是在科学家实验研究的基础上，通过分析实验现象并总结推理而得到的。1919 年，英国物理学家卢瑟福用 α 粒子轰击氮原子核的方式获得了质子，第一次实现了原子核的人工

转变。1939年，诺贝尔物理学奖获得者费米提出链式反应原理，为和平使用原子能奠定了理论基础。目前，核能技术经过较长时间的研究已经具备了充分的理论基础。

2. 技术发展情况

以基础理论为基石，核能技术的发展受到国防军事需求的强力牵引，逐步具备了完善的技术能力，已被视为成熟的技术领域。美国1940年启动的“曼哈顿工程”是核能技术研究的经典模式。此后，美国、苏联、英国、法国的原子弹相继爆炸成功，我国分别于1964年、1967年成功爆炸第一颗原子弹和氢弹。

3. 技术市场应用

核能技术最初定位于国防军事领域应用，如1933年匈牙利物理学家齐拉德发表了相关论著，提出核能开发可用于国防军事领域。第二次世界大战结束后，依托扎实的核能技术研究基础，科学家迅速将核能应用转向和平用途，如1954年苏联建成的世界上第一座5 MW实验性石墨沸水堆（奥布宁斯克核电站），是核能技术在民用市场领域应用的重要标志。

综上，核能技术基础理论研究充分，技术研究扎实，以国防军事应用需求为起点，带动民用需求的蓬勃发展，是20世纪高新技术发展的典型范例。

（二）光伏技术

1. 基础研究进展

太阳能电池的工作原理是光生伏特效应，1839年由法国科学家贝克雷尔在实验中发现。该原理的发现推动了光伏技术的研究和产业的发展。随着理论研究的深入，科学家发现多种材料具备光伏效应。例如，1877年Adam和Day研究了硒的光伏效应，1904年Hallwachs发现铜与氧化亚铜结合在一起具有光敏特性，1932年Audobert和Stora发现硫化镉具有光伏现象，1941年奥尔在硅上发现光伏效应。

2. 技术发展情况

光伏技术发展至今，常见的太阳能电池包括硅太阳能电池、III-V族太阳能电池、铜铟镓硒太阳能电池、碲化镉太阳能电池、有机太阳能电池和染料敏化太阳能电池等。近年来，随着新材料的不断研发，光伏技术研究呈现多样化趋势，发现了越来越多的新型电池材

料（如钙钛矿、石墨烯等）。但新型太阳电池的技术研究也面临着一些问题。例如，钙钛矿太阳电池相较于众多新型太阳电池，具有成本低、效率高的优势，但在有毒金属替代、电池长期稳定性、大面积太阳电池制备工艺等方面存在不足，这对产品商业化提出了挑战[14,15]。因此，光伏技术虽然具备较好的理论基础，但在先进材料研发和制备方面还存在短板，技术研究略显薄弱，不同技术方向的研究水平也参差不齐。

3. 技术市场应用

光伏技术的市场应用模式与核能技术类似，也是以军用需求为起点，随后带动民用需求发展。1958年，美国第一个由光伏电池供电的卫星“先锋一号”发射入轨，是光伏技术早期应用于军用品的标志。1962年，配备了14 W太阳能电池的商业通信卫星Telstar发射入轨，成为太阳能电池在民用市场应用的开端。

综上，与核能技术类似，光伏技术的基础理论研究充分，在技术市场应用中也是起始于国防军事领域，并以此带动民用需求发展。受限于新材料研究水平，光伏技术的各子方向研究水平参差不齐。

（三）AI技术

1. 基础研究进展

不同于核能和光伏技术，AI技术发展初期并未具有完备的基础理论。1936年，英国人艾伦·图灵创立了自动机理论，可以视作AI概念的起源。1956年，约翰·麦肯锡、明斯基、罗切斯特和香农等首次提出了AI技术定义。在AI技术的发展过程中，针对某一领域的方法研究远远多于基础理论研究。AI的早期基础理论定位于“思想”“概念”，并没有提出充分的原理性解释[8,16]，更加注重某些具体领域的方法研究；基础理论研究薄弱，存在很多需要进一步探索的未知领域。一般认为，AI技术的基础理论存在一定的缺失和不完备，尚未达到核能、光伏技术的研究水平。

2. 技术发展现状

AI技术的发展与核能、光伏技术也有很大的不同。AI技术目前还处于弱AI阶段，虽已在众多领域应用，但限于技术本身不足而导致技术的可信

赖度不高, 尚未在国防等“高精尖”领域获得广泛应用。在常规的民用领域 AI 技术得到了广泛应用, 且更新迭代速度很快。目前 AI 技术处于出常规技术较好而高端技术发展不足的局面。

3. 技术市场应用

AI 技术应用的发展经历了 3 次浪潮 [6], 代表性的节点和应用均产生于民用市场领域。例如, 1973 年日本开发的 Webot 1 机器人是第一个基于智能软件的人形机器人, 可以播放音乐; 1980 年日本开发的 Webot 2 机器人可以与人沟通、阅读乐谱并演奏电子琴; 1997 年国际商业机器公司 (IBM) 开发的“深蓝”击败了国际象棋冠军; 2006 年法国阿尔德巴兰机器人公司研发了智慧机器人 Nao。从需求方面看, 鉴于国防领域需求场景的特殊性, 如数据少、边界不确定、环境复杂和高实时响应等, AI 技术在国防领域中的应用还存在一些问题。整体来看, AI 技术的市场应用有别于核能、光伏技术, 目前仍以民用需求为主; 受技术水平所限, 在未来很长一段时间内民用领域的应用要比军用领域更广泛。

(四) 比较分析结论

通过与核能、光伏技术在基础理论研究、技术发展情况和技术应用市场模式的发展规律进行对比 (见表 1), 可以发现 AI 技术具有以下发展规律。

(1) AI 技术在基础理论研究方面相对匮乏 [16], 尽快打牢基础理论研究是推动未来 AI 技术成熟发展的重要方面。创新是信息技术发展的灵魂和核心, AI 技术的快速持续创新是其发展的必经之路。

(2) 与核能和光伏技术类视, AI 技术也具有军民两用的潜力, 军民市场协同发展是未来发展的必然方式。限于 AI 高端技术发展不足、军民市场

需求对 AI 技术存在显著差异化, 探索 AI 技术在军民市场应用中的特色创新发展路径, 是 AI 技术的重点发展方向。

四、AI 技术创新的路径

(一) “演化式”发展是 AI 技术发展的必然选择

基于基础理论发展不充分, 技术层面以弱 AI 为主, 民用市场巨大、军用市场需求明显但实际应用偏少的现状, 我国 AI 技术发展须采用独特的创新路径。为此, 本文采用“内卷式”和“演化式”发展的概念来进行阐述。“内卷式”指通过在有限领域内投入大量既有技术来获得总产量增长的方式 [17]。“内卷式”通常表现为技术的复制、延伸和精细化发展, 在发展过程中存在效率提升有限的困境。“演化式”发展重在技术本身的发展与突破, 并通过应用领域扩张带来新的社会效益。

目前, AI 技术表现为“内卷式”的发展方式, 如常规技术发展较好、高端技术发展不足、技术价值和影响力未充分展示。AI 的某些技术 (如语音识别、图像识别) 已在社交、翻译、安保、医疗等领域获得广泛应用, 但其鲁棒性不高、可解释性不强等问题并未得到根本性改善, 应用场景也受到了制约。这种现象一方面源于技术突破本身存在难度; 另一方面由于国内民用市场规模巨大, 仅仅将弱 AI 用于某些特定市场及其细分市场就可以使技术拥有方获得较大收益, 导致深入研究 AI 技术缺乏动力。“内卷式”发展的高收益是短暂的, 随之而来的市场竞争将削弱收益 [18]。只有加强革新与创造, 采取注重非特定市场与“非舒适区”市场应用的“演化式”技术发展模式, AI 技术才能保持旺盛的技术生命力。

表 1 核能、光伏和 AI 技术研究对比

类别	核能技术	光伏技术	AI 技术
基础理论研究	充分	充分	不充分
技术发展情况	扎实	不同技术参差不齐	常规技术较好, 高端技术发展仍有不足
技术应用市场	军用市场规模大且是技术应用的起点; 民用市场的技术应用已被带动, 发展规模大	军用市场规模大且是技术应用的起点; 民用市场的技术应用已被带动, 发展规模大	民用市场规模大且是技术应用的起点; 军用市场需求大但技术应用尚未被带动

（二）融合发展推动 AI 技术“演化式”发展

为促使 AI 技术发展走出“舒适区”、从“内卷式”发展转变为“演化式”发展，需要有新的外部环境驱动因素。相比于民用需求，军用需求“高精尖”特点更加突出，市场特征差异明显。要在强 AI 和超 AI 领域有所突破，仅仅依靠民用市场需求是无法实现的，需要通过军用需求加以牵引。军用场景应用要求 AI 技术具有边界不确定性、博弈强对抗性、响应高实时性、环境高复杂性与信息不完整性等战场特性，相应的装备应满足可靠性、可维修性、可测试性、安全性与环境适应性等多方面要求，而这正是从弱 AI 向强 AI 和超 AI 发展进阶的引路标。可以认为，以军用需求为牵引来实现 AI 技术融合式发展，成为当前克服 AI 技术创新困难、保证创新活力的优选路径。

也要注意，AI 技术面向军民市场的发展模式，相比核能、光伏技术有所不同。核能、光伏技术的市场应用模式首先服务于国防军事领域，而后带动民用领域应用；从军用市场向民用市场转移的技术壁垒相对较低，较易打破军民产业边界，实现技术在军民领域的“演化式”发展。由于军民市场需求差异性明显，AI 技术在军用需求和民用需求之间的相互转化阻碍较大；强化军用需求牵引，打破军民产业边界，才能实现 AI 技术的“演化式”发展。

立足国情，实现 AI 技术融合发展可以采用“三步走”路线。第一步，民用技术成果根据军用市场的特殊需求，与需求应用场景进行匹配，实现民用成果直接转化为军用应用。例如，智能安防技术的民用市场发展相对成熟，但军用场景尚未深入开发；通过这种转化，不仅可以扩大技术的应用范围，还可以初步考验常规弱 AI 技术的成熟性与可靠性，快速定位技术短板。第二步，新兴 AI 技术，如智能安全技术应通过军民协同创新和联合攻关予以突破，促使具有强 AI 特征和军民两用属性的通用 AI 技术诞生；第三步，针对军用的高需求，由军方针对特殊需求保障必要投入，开展民用领域难以开展或不愿开展的高端技术研究，推进超 AI 技术的研制与产品化；阶段性地向民用领域转移研究成果，探索形成“军用牵引民用”的发展格局，如生物智能、智能微系统是可能的技术应用方向。

五、对策建议

（一）顶层布局，构建新型研发机构

构建在民用和军用领域具有领导力和资源调配能力的新型研发机构，建议由国务院和中央军事委员会联合引导并支持。鉴于 AI 技术的多元化与“群智”的特点，本着高效与务实的原则，采取“顶层统筹、军民协同、各有侧重、群策群力”的项目运行模式，使 AI 的基础理论研究能够自由探索，使高端技术研究能够有良好的团队进行集中攻关；有效协调军用与民用市场需求，使得新型研发机构的运行符合 AI 技术创新的基本特征和发展规律。

（二）拓宽渠道，加大资源保障力度

AI 技术融合发展需要有稳定的经费支持渠道，建议采用“科研经费+市场效益”驱动模式。在民用成果转化为军用时，设立国家科技领域重大专项，通过科研经费形式进行资源保障。在军民协同创新和军用牵引民用阶段，相关研究成果向民用领域转化时，考虑引入行业内的国有或民营企业，由民用产品专项培育基金予以定向支持。

（三）重视人才，推动融合型人才队伍建设

目前 AI 领域的领军人物和团队集中在国内外的知名科研院所和重点企业，但 AI 技术融合发展需要构建多源融合的人才团队以更好集中力量开展科研攻关。人才队伍建设需依托相关科研机构实体，初期可采用“双聘制”模式引进先进人才和团队，明确人员的权利和义务；团队建设逐步成熟后可引入定向培养机制，培育核心团队和领军人物，打破现有人才引进僵局。另外，做到“同工同酬”，吸引军队人才与地方人才联合攻关；发挥各自优势，真正做到军民协同创新。在人才队伍建设过程中，同步建立体现差异化的考评机制。

（四）协同发展，开展伦理研究

AI 技术在民用场景应用的伦理规范研究已有所发展，但由于军用场景应用起步晚于民用，当前对军用场景应用的伦理规范研究还有所缺失。关注 AI 技术在军民市场应用时的伦理规范协同发展，在

现有伦理规范研究成果的基础上,就责任归属、震慑性与毁伤性权衡等具有军用特殊性的伦理规范问题开展研究。

参考文献

- [1] Navigli D. The research of artificial intelligence technology and application [J]. *Artificial Intelligence*, 2016, 3(1): 1-9.
- [2] Yu B, Kumbier K. Artificial intelligence and statistics [J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2018, 19(1): 6-9.
- [3] 蔡亚梅. 人工智能在军事领域中的应用及其发展 [J]. *智能物联网技术*, 2018, 1(3): 41-48.
Cai Y M. Application of artificial intelligence in the military field and its development [J]. *Technology of IoT & AI*, 2018, 1(3): 41-48.
- [4] 张涛, 龚文全, 颜媚. 2018年全球主要国家人工智能政策动向及启示 [J]. *信息通信技术与政策*, 2019 (6): 81-83.
Zhang T, Gong W Q, Yan M. Artificial intelligence policies overseas 2018 and suggestions [J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2019 (6): 81-83.
- [5] 中国电子技术标准化研究院. 人工智能标准化白皮书(2018版) [R/OL]. (2018-01-24) [2020-02-01]. <http://www.cesi.ac.cn/images/editor/20180124/20180124135528742.pdf>.
China Electronics Standardization Institute. White paper on artificial intelligence standardization 2018 [R/OL]. (2018-01-24) [2020-02-01]. <http://www.cesi.ac.cn/images/editor/20180124/20180124135528742.pdf>.
- [6] 曹秋生, 伍尚慧, 王勇. 人工智能军事应用分类探讨 [J]. *电光系统*, 2017 (4): 1-7.
Cao Q S, Wu S H, Wang Y. Discussion on categorization of military application of artificial intelligence [J]. *Electronic and Electro-optical Systems*, 2017 (4): 1-7.
- [7] Yang X L, Wang Z, Pan H J, et al. Ontology: Footstone for strong artificial intelligence [J]. *Chinese Medical Sciences Journal*, 2019, 34(4): 277-280.
- [8] 白彤东. 从中国哲学角度反思人工智能发展 [J]. *中州学刊*, 2019 (9): 104-109.
Bai T D. Rethinking the development of artificial intelligence from the perspective of Chinese philosophy [J]. *Academic Journal of Zhongzhou*, 2019 (9): 104-109.
- [9] 黄茂生, 王新华, 王俊鹏. 产业系统的构成及其要素分析 [J]. *大众科技*, 2005 (11): 252-253.
Huang M S, Wang X H, Wang J P. Analysis on the composition and elements of industrial system [J]. *Popular Science & Technology*, 2005 (11): 252-253.
- [10] 向阳. 人工智能发展三大重点 [J]. *中国投资*, 2018 (5): 86-87.
Xiang Y. Three key points of artificial intelligence development [J]. *China Investment*, 2018 (5): 86-87.
- [11] 邓子云, 何庭钦. 区域人工智能产业发展战略研究 [J]. *科技管理研究*, 2019 (7): 32-43.
Deng Z Y, He T Q. Research on regional development strategy of artificial intelligence industry [J]. *Science and Technology Management Research*, 2019 (7): 32-43.
- [12] 张军. 要素成本、科技创新与产业结构升级 [J]. *证券市场导报*, 2019 (11): 24-31.
Zhang J. Factor cost, science and technology innovation and industrial structure upgrading [J]. *Securities Market Herald*, 2019 (11): 24-31.
- [13] 李晓华, 曾昭睿. 前沿技术创新与新兴产业演进规律探析——以人工智能为例 [J]. *财经问题研究*, 2019 (12): 30-40.
Li X H, Zeng Z R. The cutting-edge technological innovation and the evolution law of the emerging industries: Taking artificial intelligence as an example [J]. *Research on Financial and Economic Issues*, 2019 (12): 30-40.
- [14] 高志强, 袁碧玉, 张兴业. 钙钛矿太阳能电池的研究及商业化尝试 [J]. *电池技术*, 2019, 43(6): 1060-1062.
Gao Z Q, Yuan B Y, Zhang X Y. Perovskite solar cell research and commercialization [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2019, 43(6): 1060-1062.
- [15] 降戎杰, 张雅洁, 郭强, 等. 钙钛矿薄膜制备技术及其在大面积太阳能电池中的应用 [J]. *微纳电子技术*, 2019, 56(8): 602-606.
Jiang R J, Zhang Y J, Guo Q, et al. Perovskite film preparation technology and its application in large-area solar cells [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2019, 56(8): 602-606.
- [16] 孟昊博. 强人工智能时代什么时候到来? 如何到来 [J]. *互联网周刊*, 2015 (5): 66-68.
Meng H B. When will the era of strong artificial intelligence come? How to come [J]. *China Internet Week*, 2015 (5): 66-68.
- [17] 黄宗智. 华北的小农经济与社会变迁 [M]. 北京: 中华书局, 2000.
Huang Z Z. Small-scale peasant economy and social changes in North China [M]. Beijing: Zhonghua Book Company, 2000.
- [18] 彭慕兰. 大分流: 欧洲、中国及现代世界经济的发展 [M]. 史建云译. 南京: 江苏人民出版社, 2003.
Pomeranz K. The great divergence: Europe, China, and the making of the modern world economy [M]. Translated by Shi J Y. Nanjing: Jiangsu People's Publishing Ltd., 2003.