

工业智能的关键技术

式进行编程学习，深度学习方法使机器人能够进行复杂计算，完成智能学习功能。如欧姆龙发布了世界上首个全图像化协作机器人，用户只需简单拖拽，1 分钟即可掌握工作流程。多机协作方面，机器人能够进行经验共享与协同作业。如谷歌基于机器学习和云计算，在云端建立数据库存储机器人执行任务的经验，形成集中式技能模型，提升学习效率和任务执行能力。



图 24：人机协作机器人(左, 西门子; 右, 谷歌)

（二）通用技术突破与工业化适配成为解决四类应用问题的关键

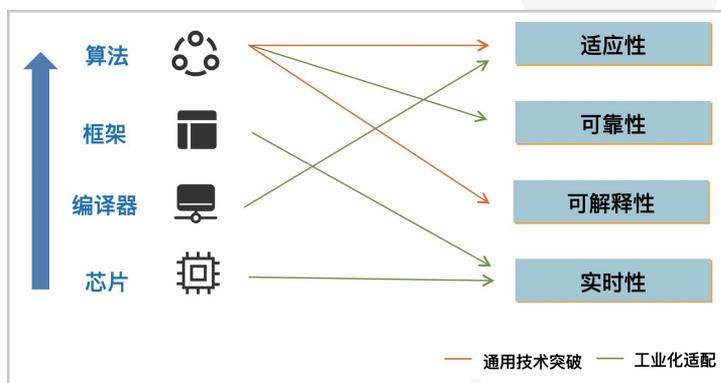


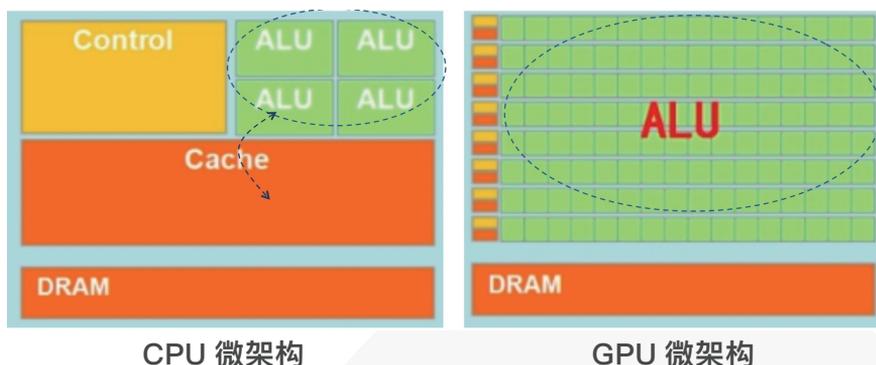
图 25：技术与解决四类问题的对应关系

1. 芯片：基于 FPGA 的半定制化芯片有望成为工业智能核心底座

工业问题的复杂性导致深度学习应用具有极高的算力要求，必须通过 AI 芯片解决。深度网络所需的矩阵运算量极大，通用 CPU 博而不专，无

法满足算力需求。一方面，CPU 架构中负责计算的区域 (ALU) 占用面积较小，缓存和控制单元占据大量空间。另一方面，ALU 与内存交互过于频繁，限制了总体吞吐量，并需要大量能耗。使用 CPU 进行深度网络运算将导致较大的耗时与功耗，提高计算成本，限制了在工业领域的应用。

工业智能的关键技术



FPGA 能满足算力与实时性要求，同时兼具功耗比低、价格可控和灵活性高等相对优势。将 FPGA 与 CPU、GPU 进行峰值浮点运算和算法运行时间的对比可以看出，FPGA 的算

图 26: CPU 与 GPU 架构对比

力远高于 CPU，略低于 GPU，而算法运行时间远小于 CPU 和 GPU，具有较大的优势。与 ASIC 芯片相比，FPGA 的研发成本低、设计周期短，同时具有多任务灵活处理的优势，而与 GPU 相比，FPGA 具有更高的功耗比。

FPGA 能够提高机器人感知与处理性能、节省能耗，并已逐步融入机器人操作系统中。机器人的感知与处理环节犹如人“眼”和“脑”。在感知环节中，通过 FPGA 和 CPU 运行 SIFT、SURF、SLAM 算法的加速比与能耗比可以看出，FPGA 能提高感知帧率，让感知更加精准，并且 FPGA 运行功耗较低，可使计算持续多个小时。在处理环节，以 CNN（卷积神经网络）计算过程为例，与 CPU 相比，FPGA 具有更高的速度和极低的计算能耗，使深度学习实时计算更容易在端侧执行。

进一步，FPGA 正逐步融入机器人 ROS 中，为其未来在机器人的应用普及奠定了基础。如美国 Sandia 国家实验室的机器人手臂 Sandia Hand 使用 FPGA 进行数据预处理；日本的研究人员提出了 ROS-Compliant FPGA 设计，使 ROS Node 可以直接运行在 FPGA 上；ROS 运营机构 Open Source Robotics Foundation 发现机器人开发者对 FPGA 融入 ROS 的需求逐步提升。

图 27: CPU、GPU 及 FPGA 相关性能对比 来源：公开资料整理

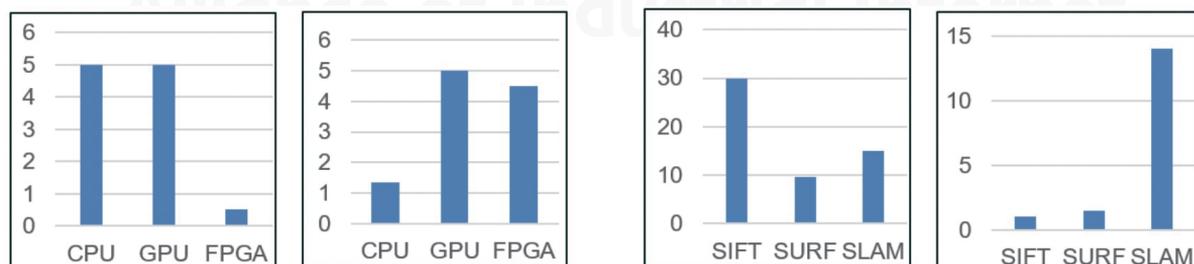


图 27-1: 算法耗时对比 (毫秒, 左) 与峰值浮点对比 (TFlops, 右)

图 27-2: FPGA 与 CPU 感知算法加速比(左)和节能比(右)

工业智能的关键技术

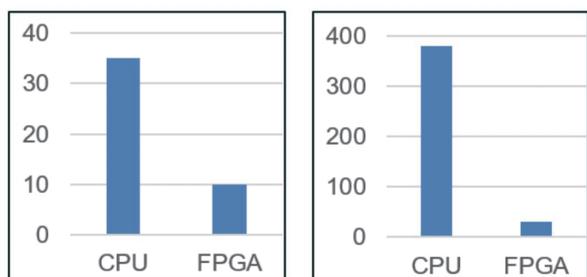


图 27-3: CNN 计算耗时 (毫秒,左) 与计算能耗对比 (焦,右)

除 FPGA 外,微处理器 (MPU) 在工业领域的发展也值得关注。MPU 算力强大,能够满足通用性的工业 AI 推理需求,例如瑞萨电子根据工业控制的具体需求,推出 RZ/G2 系列 MPU 产品,该系列主要面向工业与楼宇自动化领域。还具有协同、控制 FPGA 从而重构系统的能力。所以,未来可能形成通用 AI 功能使用 MPU、专用化 / 实时性 AI 功能使用 FPGA 的协同局面。

2. 编译器：高兼容性编译器满足工业适应性需求

工业领域存在适应性问题,对编译器需求较为迫切。如各个框架底层实现技术不同,不同软件框架开发的模型相互转换存在困难,而且工业领域存在大量的实体与模型,模型表达不统一,不同框架下的模型存在交互需求。此外,软件框架开发者和计算芯片厂商需要确保软件框架和底层计算芯片之间良好的适配性。工业领域终端设备 (芯片) 种类繁多,需要通过中间语言 IR 实现前端与后端硬件的解耦。

通用编译器群雄相争,兼容性编译器可能成为工业应用未来趋势。英特尔、亚马逊、谷歌、Facebook、华为、阿里和 Khronos Group 等企业和机构基于各自优势与竞争考虑打造了相应编译器或模型表示规范。但目前业界并没有统一的中间表示层标准,模型底层表示、存储及计算优化等方面尚未形成事实标准,仍处于群雄相争的局面。初步判断,未来兼容性的编译器可能成为趋势,其能不断扩展框架支持种类,满足复杂的工业需求。

3. 框架：实时性需求推动端侧推理框架成为未来发展重点

训练框架方面, Tensorflow、Caffe 等框架已能满足工业训练应用需求。例如 GE 的贝克斯公司基于 TF, 利用深度学习算法进行震动预测、设备预测性维护、供应链优化和生产效率优化。阿里工业大脑全面支持 TensorFlow、Caffe 等架构,已广泛参与到新能源、化工、重工业等不同制造领域。INDICS 平台基于 Tensorflow 进行轴承预测,并开发了基于 INDICS 平台的算法建模工具平台。

推理框架方面,端侧推理框架无法满足工业终端计算需求,需定制化开发。现阶段工业领域云侧推理基本采用 TensorRT,一方面由于现有云侧推理框架种类较少,而 TensorRT 对各训练框架兼容性较强,基本能够满足云端推理需求;另一方面,工业云端芯片基本为英

工业智能的关键技术

伟达，TensorRT 底层对其做了多方面优化。但随着工业终端智能化功能与计算需求的不断提升，端侧推理框架需求较为紧迫，华为、谷歌、腾讯、百度和苹果等企业已经开发出主要面向手机端的推理框架，极大地提升了移动终端的计算智能能力，未来具备向工业领域渗透可能性。比如华为 MindSpore 框架支持包括手机、摄像头、自动驾驶等场景的推理需求，满足端边云全场景 AI 的计算需求。

4. 算法：通用技术领域突破与定制化算法研究是关键

工业智能应用面临的四个关键问题中，实时性问题、软硬件与模型适应性问题可通过芯片、架构与编译器的发展来解决，而可靠性、可解释性、数据与场景适应性则需依靠算法层面的研究解决。场景定制化算法、基础研究深化、前沿技术创新有望成为解决前述三个问题的三大利器。针对可靠性问题，需要将通用算法与工业机理、知识、实际场景结合，研发针对工业场景定制化的算法；针对可解释性问题，人工智能可解释性相关研究早已出现，深度学习具备可解释基础，技术透明化必会实现。根据公开资料显示，21 世纪以来，机器学习可解释性相关文献数量逐年递增，算法透明化的研究不断开展，并取得了一定的进展。而通过深度学习识别人脸图像的可视化过程可以看出，计算过程由边角→五官→面部，完全符合人类的认知逻辑，说明算法本质并非黑箱，具备可解释的基础。随着深度学习算法研究的持续开展，技术透明化在未来有可能实现。针对适应性问题，迁移学习的“触类旁通”通过从已学习的任务中转移相关知识，解决新任务数据缺乏的问题；生成对抗网络（GAN）等能够合成训练数据，增强算法“自力更生”的能力。总之，前沿技术创新或可打破深度学习类算法对大数据限制，实现已有知识、模型的场景化迁移。从更长远来看，随着类脑智能的发展，通用智能时代的到来或许能从根本上解决此类问题。

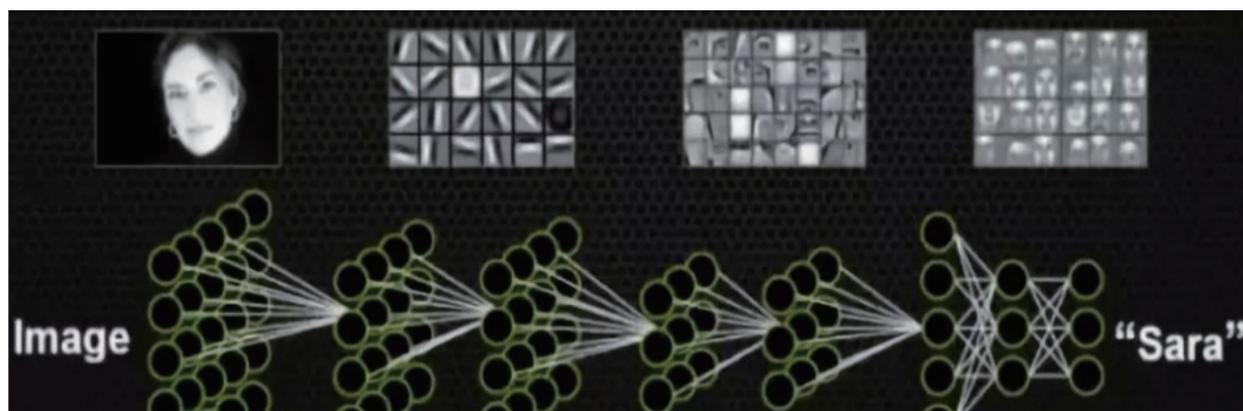


图 28：深度学习图像处理步骤可视化

工业智能支撑产业

（一）工业智能形成“两横一纵”的支撑产业格局

当前，工业智能产业视图体现“两横一纵”的格局，横向为包括芯片、编译器、框架、算法的基础技术和包含各类工业智能细分场景解决方案的融合应用，纵向为包含研究机构、产业联盟、咨询服务机构的周边服务。ICT企业、研究机构及相关行业协会三类主体为工业智能提供通用技术支撑；在应用层面，装备/自动化与软件企业、制造企业、ICT企业和初创企业四类主体通过应用部署与创新实现工业智能价值。



图 29：工业智能产业视图

1. ICT、研究机构与行业协会提供算力算法支持，成为工业智能重要支撑

三类主体现阶段提供通用关键技术能力，以“被集成”的方式为工业智能提供基础支撑。主要包括三类：

一是ICT企业，提供几乎涵盖知识图谱、深度学习的所有通用技术研究与工程化支持，如谷歌、华为、阿里等在知识图谱算法研究领域开展研究；英伟达、AMD、英特尔、亚马逊、微软、

工业智能支撑产业

赛灵思、莱迪思、美高森美、海思等开展GPU、FPGA等深度学习芯片研发；微软、Facebook、英特尔、谷歌、亚马逊、华为等开展了深度学习编译器研发；谷歌、亚马逊、微软、Facebook、苹果、SkyMind、华为、腾讯、百度等开展深度学习框架研究；谷歌、微软等开展了可解释性、前沿理论算法研究。

二是研究机构，主要提供算法方面的理论研究，如加州大学、华盛顿州立大学、马克斯-普朗克研究所、卡耐基梅隆大学、蒙彼利埃大学、清华大学、中科院、浙江大学等在知识图谱算法研究领域开展研究；蒙特利尔大学、加州大学伯克利分校等开展了深度学习框架研究；斯坦福大学、麻省理工、以色列理工学院、清华大学、南京大学、中科院自动化所等开展了深度学习可解释性与相关前沿理论算法研究。

三是行业协会，提供相关标准或通用技术支持，如OMG对象管理组织提供统一建模语言等企业集成标准的制定，为知识图谱的工业化落地奠定基础；Khronos Group开展了深度学习编译器研发。

2. 应用主体面向实际业务领域发挥应用创新作用

类主体以集成创新为主要模式，面向实际业务领域，整合各产业和技术要素实现工业智能创新应用，是工业智能产业的核心。

目前应用主体主要包括四类：

一是装备/自动化、软件企业及制造企业等传统企业，面向自身业务领域或需求痛点，通过引入人工智能实现产品性能提升，如西门子、新松、ABB、KUKA、Autodesk、富士康等。

二是ICT企业，依靠人工智能技术积累与优势，将已有业务向工业领域拓展，如康耐视、海康威视、大恒图像、基恩士、微软、KONUX、IBM、华为云、阿里云等。

三是初创企业，凭借技术优势为细分领域提供解决方案，如Landing.ai、创新奇智、旷视、Element AI、天泽智云、Otosense、Predikto、FogHorn等。

四是研究机构，依托理论研究优势开展前沿技术的应用探索，如马萨诸塞大学、加州大学伯克利分校等在设备自执行领域开展了相应探索。

工业智能支撑产业

(二) 工业智能通用技术产业发展趋势各异

1. ICT 巨头称霸深度学习框架、编译器与芯片市场，工业适配化发展程度不一

目前来看，ICT 巨头在深度学习框架、编译器与芯片等通用技术领域占据绝对统治地位，但工业领域延伸及适配化发展程度并不统一。现阶段端侧推理框架主要由五大 ICT 巨头企业主导，初步判断，华为、百度更可能在工业领域发力。

苹果 CORE ML 深度学习框架目前仅支持 IOS 系统，且苹果并未有向工业领域延伸的趋势。Facebook Caffe2go 与腾讯 NCNN 深度学习框架目前仅为手机端提供优化，且仅支持 CPU。谷歌 TensorFlow Lite 深度学习框架现阶段首先支持安卓和 IOS，同时在工业领域应用普及度也较高。华为 AI 计算框架 MindSpore、百度 Paddle-mobile 深度学习框架支持包括 ARM、NPU、GPU 等多种硬件平台，且重视在工业领域的延伸 / 合作，更可能在工业领域发力。

编译器市场格局尚不清晰，英特尔及亚马逊可能成为工业领域选择。现阶段编译器并未产生面向领域的发展趋势，英特尔的 nGraph，亚马逊深度定制的 NNVM TVM 框架、华为 MindSpore 软件栈初步具备兼容 ONNX 等其它编译器或模型格式的能力。工业领域深度学习芯片的技术门槛极高，市场格局稳定，赛灵思 (Xilinx) 和英特尔 (Intel) 未来可能主导。

目前 FPGA 市场主要有两大阵营，一是以 Xilinx 和 Intel 为代表，占据近 90% 的市场份额，专利超过 6000 项，涉及工业自动化、机器视觉、机器人、监控等多个工业领域。另一阵营是以 Lattice 和 Microsemi 为代表，占据近 10% 的市场份额，专利约 3000 项，重点布局汽车行业、人机界面与接口等传统领域。较高的技术门槛阻隔了其它厂商，Xilinx 和 Intel 企业阵营占据市场优势，工业领域布局广泛，有可能成为未来主导。

2. 研究机构成为深度学习算法研究主力，理论研究弱化，可解释性和相关前沿算法研究火热

深度学习理论研究趋于平稳，应用落地成为关键。Google 学者 François Chollet、人工智能顶级学者李飞飞、微软亚研院、AI 顶级学者郑宇、地平线创始人余凯等均认为深度学习理论研究主流架构会收敛，较难有革命性理论突破，目前瓶颈在于技术与传统行业的对接。

工业智能支撑产业

而现阶段算法研究呈现两大主要趋势，一是算法可解释性研究，斯坦福大学开展了基于树正则化的可解释性研究，美国德州农工大学开展了迁移法解决深度学习可解释性问题，南京大学则提出RNN可解释性方法。二是相关前沿算法研究，国内外顶尖研究机构如麻省理工、以色列理工学院、清华大学、中科院自动化所纷纷开展对胶囊网络、迁移学习、(深度)强化学习和生成式对抗网络等深度学习相关的前沿算法研究。

(三) 工业化与智能化双向渗透成为两类核心路径

1. 装备自动化、软件及制造企业围绕设备、产品及业务需求提升智能化水平

装备自动化、软件及制造企业面向设备、产品性能提升的需求或自身业务发展痛点，围绕 AI 技术的供给主线不断寻求与 AI 结合的路径，目前，这些企业发展工业智能主要有两种方式。一是部分需求迫切、实力雄厚的领域巨头企业通过合作并购 AI 技术公司，实现智能化升级。例如发那科与 AI 初创企业 Preferred Networks 合作，增强机器人的智能化水平。GE 收购 AI 初创公司 Bit Stew Systems 和 Wise.io，以打造人工智能实力。埃斯顿收购美国高科技公司 Barrett Tech30% 股权，拓展 AI 机器人和微伺服系统领域。二是通过人才引进及成立相应研究机构，提升企业综合竞争力。如西门子成立中央研究院并推动“Vision 2020”计划，发展人工智能和机器人技术，并构建了用于自身融资管理的工业知识图谱平台。富士康、新松等成立 AI 研究院，加快人工智能研究和成果产业化落地。

2. ICT 企业及研究机构依靠技术积累，向工业领域进行能力输出

信息技术企业及研究机构凭借 AI 技术基础，不断丰富面向工业场景的应用服务能力，同时加强与制造企业合作，通过推出工业智能解决方案或前沿技术产业化向工业领域进行能力输出。信息技术企业凭借技术及数据服务能力将已有业务向工业领域延伸。例如阿里云工业大脑平台将开放钢铁、水泥、化工、光伏、电力等行业知识图谱，使开发者快速响应，实现特定业务场景下人工智能的诉求。华为了构建用于供应链及零部件管理的工业知识图谱。海康威视的主营业务为视频监控领域，2014 年进入工业领域，开发深度学习质量检测产品应用于 3C 制造、金属加工等领域。微软 Azure 基于机器学习实现设备的远程监控与预测性维护。研究机构注重技术创新，成为前沿技术产业化的孕育者。例如麻省理工学院进行意念控制机器人的研究，电波识别的精确度已高达 90%，对未来人机协作技术产生重大影响。伯克利机器人 DexNet2.0 搭载深度学

工业智能支撑产业

习系统，通过对虚拟数据库中 10000 个具备不同特征的三维物体进行学习，可以迅速对物体进行预判并选择合适的方案抓取各种不规则形状的物体，德国某企业已致力于产业化应用。

3. 初创企业成为重要的解决方案提供商，装备成为主要切入领域

初创企业凭借技术与资金优势成为细分领域重要的解决方案提供商。一是大数据技术初创企业为中小垂直领域企业提供知识图谱解决方案。依靠数据处理及 AI 技术优势，帮助人力、时间成本高的中小企业释放企业数据价值。如明略数据发布明智系统 2.0，为工业等垂直领域提供完整解决方案，网感至察建立了工业产品服务的知识图谱，提升产品管理的洞察力。二是装备领域成为初创企业深度学习应用的主要切入领域，吸引大量投资。装备领域是技术资金双密集行业，初创企业具有先天优势，且产品上市快，投资回报率较高。例如，智能检测系统方面，创新奇智专注于提供 AI+B2B 企业服务，应用人工智能技术打造智能质检等解决方案，融资过亿；Landing AI 目前集中于企业 AI 质量检测应用，获 1.75 亿美元投资。物流机器人、协作机器人方面，旷视全资收购艾瑞思机器人，发力制造业，打造智能仓库；Element AI 为全球制造物流和机器人等领域企业提供 AI 解决方案，获 1.02 亿美元融资。设备预测维护、运营管理优化、财务管理方面，FogHorn 通过打造资产性能优化、运营智能化和预测性维护解决方案，完成 3000W 美元融资；C3IoT 提供基于 AI 的预测性维护、运营管理等服务，实现 1.1 亿美元融资。

推动工业智能发展措施及建议

人工智能技术是一项以应用为导向、持续发展的科学技术，我们需要立足当前人工智能与工业制造融合发展变革的关键时点与历史性机遇，有效聚合各领域企业、高校与科研机构并形成合力，以融合创新为主线，共同推进关键技术和产品的创新、部署与应用，推动深化开源开放的创新模式，以应用引领产业链整体性突破，实现向价值链高端水平跃升。

（一）应用引领，促进复制推广与模式创新

一是强化应用创新探索与场景挖掘。鼓励产业界及各领域头部企业进行创新探索，通过创新大赛等方式引导资本与新技术产品的对接，形成一批工业人工智能新场景、新模式。二是树立标杆应用。在钢铁石化、装备制造、电子制造等应用较为成熟的领域，引导大型国有企业、民营企业和互联网企业等合作打造解决方案，形成一批可信、可靠、成熟有效的行业工业人工智能标杆应用。

（二）推动重点方向与关键领域的技术产品突破

一是推进人工智能通用技术的研发突破。围绕人工智能关键算法、硬件与系统，推动企业与科研院所加快通用技术产品研究，提高技术的可解释性、场景迁移性和软硬件适配性。二是强化面向工业领域专用的人工智能技术研究。针对工业领域实时性、可靠性要求，通过工业侧与 AI 技术侧的企业及科研院所实现工业适配性芯片、框架、算法及产品的协同研发与实验测试。三是合理引导人工智能前沿理论成果向工业领域快速转化。通过建设工业智能创新中心、孵化器、加速器等各类工业智能创新孵化平台，推动前沿技术的应用测试与展示体验。

（三）营造支撑有力的要素保障与发展环境

一是完善资本市场支撑环境。鼓励国家、各省(市)设立专项资金(基金)，并引导整合社会各类资金，通过创投模式培育发展人工智能与传统产业融合创新催生的大量新技术、新业态、新模式。二是推进复合型人才培养与队伍建设。开展分类型、分等级推进工业智能阶梯形人才队伍的培育工作，加强企业员工的再培训，做好工业智能化变革下新旧动能的承接工作。三是促进创新载体与机制构建。引导成立工业人工智能产业联盟与协会，搭建工业人工智能公共服务平台，开展应用评估评价、技术标准制定与验证，打造合作共赢的利益共同体。