

基于第三代人工智能（神经符号 AI），发展机器人拆解智能化技术的建议

编者按：报废产品回收利用产业是绿色低碳循环发展的重要领域。由于人口结构、劳动力转移、劳动力供需、工资调整等因素，我国低劳动力成本的比较优势发生了根本性的转化，依靠人工为主的拆解方式将难以为继，因此，具有进一步创新生产模式、提高生产效率、降低人力成本的迫切需求。借助人工智能、物联网、大数据、云计算等信息技术，未来集约化、规模化的报废产品回收利用产业必然要从人工拆解、机械化拆解向自动化、智能化拆解方式转变。拆解生产线系统的发展经历了从工业化流水线手工拆解到精细化拆解线，亟待向柔性、混流、智能拆解转型升级！

2021 年国务院《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》（国发〔2021〕4 号）中提出，“建立健全绿色低碳循环发展的经济体系，使发展建立在高效利用资源、严格保护生态环境、有效控制温室气体排放的基础上，确保实现碳达峰、碳中和目标，推动我国绿色发展迈上新台阶”。

在双碳目标的推动下，我国新能源汽车产销量至今已经连续 8 年位居全球第一，而且，我国动力电池产业链完整，全球 70% 的产能在中国。但是，从全生命周期产业链的角度来看，动力电池前端制造和后端回收利用的发展不均衡、不匹配，技术水平前高后低，如果动力电池得不到规范处理将会造成严重的环境安全风险和战略性矿产金属资源的“卡脖子”问题。作为锂离子动力电池的关键材料，钴资源在世界上的分布极不平衡，我国储量 8 万吨左右，仅占全球总储量的 1.14%，镍、锂等金属也非常稀缺，对外依存度高达 90% 以上。在我国缺钴少镍的资源背景下，新能源汽车产业的发展面临钴、镍、锰、锂等战略性矿产金属资源匮乏的瓶颈，循环利用就成为资源保供和绿色低碳发展的重要措施。截至 2022 年，我国纯电动汽车销量为 536.5 万辆，同比增长 81.6%；纯电动汽车保有量 1045 万辆，占新能源汽车总量的 79.78%；累计退役动力电池超过 20 万吨（约 25GWh），据推算，2025 年我国需要回收的退役动力电池容量将达到 137.4GWh，超过 2021 年的 5 倍，回收利用市场规模逾千亿元。

3C 产品方面，手机具有较大的拆解回收再利用价值，以手机为例，根据测

算，在每 1 亿部废旧手机中，大约含有 1600 吨的铜、35 吨的银、3.4 吨的黄金、1.5 吨的钯金。我国每年更新的手机数量约在 2~4 亿部，回收利用市场规模 60~70 亿元。退役 3C 产品的回收拆解一方面有利于高值电子元器件的再利用，另一方面可以避免直接焚烧、填埋带来的环境污染。

拆解自动化是指报废产品拆解装备系统在无人或少量人的直接参与下，通过自动检测、信息处理、分析判断、操纵控制，实现预期拆解目标的工业过程。相比人工拆解，自动化能够代替长时间、重复性体力劳动，同时也能更好地应对危险工作环境中的安全问题，在 3C 产品、动力电池、电动汽车的拆解中有广阔的应用前景。然而，非结构化的拆解环境和拆解过程的不确定性一直是拆解自动化面临的重大挑战。自动化拆解系统的设计，通常用于解决结构化环境中固定对象的拆解问题，无法处理复杂动态拆解场景下的多种类报废产品拆解的问题，在实际的工业场景下往往使用受限。例如，2016 年苹果公司开发了一条年拆解能力 120 万部 iPhone 6 的自动拆解线，但无法适用于其它手机机型和品牌。

拆解过程的不确定性

报废产品在拆解过程中存在多种不确定性，这些不确定性可归纳为拆解对象的复杂性、拆解目标的多样性和拆解深度的不确定性。

(1) 拆解对象的复杂性。不同品牌型号的同类产品在结构方面呈现的复杂性，如主要结构、零部件数量和位置、几何约束、连接方式、连接类型、连接状态等；同一品牌、同一型号产品在零部件配置、数量方面的不一致性。

(2) 拆解目标的多样性。源于市场对报废产品的零部件和材料具有多样化的回收利用需求，使其拆解方法（保护性或破坏性拆解）、拆解成本、回收利用价值、环境影响等方面具有不确定性。

(3) 拆解深度的不确定性。报废产品的品质状况、结构和材料方面的复杂性使其拆解工艺规划具有不确定性。涉及拆解顺序规划、拆解作业规划、拆解作业参数等方面的不确定性。

近年来，人工智能的飞速发展为解决不确定性问题带来新的思路，可以适应复杂、精细、动态场景以及人机协作的智能拆解作业方式正成为本领域的研究前沿。与自动装配流水线中的机器人不同，动态的、非结构化的拆解环境决定了拆解机器人不能通过预先编程来完成拆解任务。机器人拆解的智能化需要满足自主

性、可解释性和稳健性要求。自主性要求机器人能够根据实际情况自主选择合适的拆解动作顺序，在适应非结构化、不确定环境的同时保证高效率；可解释性要求让人理解机器人在做什么、以及为什么这样做，确保人与机器人可以协作，并在机器人需要的时候提供协助；稳健性要求确保机器人拆解的高成功率。

神经符号人工智能

人工智能已经经历了两代的发展，每一代的发展都有自身的优势和劣势。第一代是基于符号推理的人工智能，通过定义符号和规则来表达知识和逻辑，从而提出知识工程、专家系统等一系列方法。这一类符号推理的方法可以看作是高级心智活动的模型，具有可解释性和稳健性，但是往往过于依赖人工定义的符号，应用范围受限。第二代是基于神经网络的人工智能，这类方法的本质是，针对问题设计相应的神经网络模型，然后通过收集高质量、低噪声的大数据并从中训练出网络模型的参数。这类方法在图像识别、自然语言处理等方面应用广泛、成果显著，但是因过于依赖数据，是不可解释的“黑箱”，逐渐触及到发展的瓶颈。因此，很多研究人员开始关注第三代人工智能，将第一代人工智能的逻辑推理优势与第二代的强大感知优势结合起来，提出了**神经符号人工智能（AI）**的概念。神经符号人工智能是将高级推理（通过符号逻辑系统实现）与低级感知（通过神经网络实现）紧密结合起来，通过融合符号逻辑系统的推理能力和神经网络系统的感知、学习能力，形成感知、学习、决策、控制“知行合一”，训练与推理“训推一体”的第三代人工智能框架，协调融合完成复杂的任务。

基于神经符号 AI 的机器人拆解智能化技术

报废产品的状态复杂多变，而且拆解目标的多样性和拆解深度的不确定性，使报废产品在拆解过程中存在多种可能性，很难通过专家定义的方式将所有的拆解状态符号化。尤其是在人机协作的背景下，要求系统在动态、非结构化拆解环境中进行实时规划，形成恰当的行动方案，对可解释性和稳健性提出了更高的要求。因此，将神经符号 AI 的原理应用于报废产品的拆解任务中，通过融合逻辑推理系统和神经网络系统，使其能够从视觉等高维感知信息中自主推断出符号表征。此外，通过结合拆解知识图谱，上层的符号推理系统可以为底层的感知控制提供上下文，系统无需建立通用复杂的感知控制模块，只需要根据当前上下文在有限的范围内进行检测识别和抽象，很大程度上降低了神经网络的学习难度。

基于神经符号 AI 发展机器人拆解智能化技术的关键，是构建一套基于神经符号 AI 的拆解机器人具身智能控制架构。通过引入神经谓词¹，将视觉、力觉信息和机器人位姿等连续空间状态映射到符号状态，自主选择并执行动作原语²，自主完成拆解任务，形成一个拆解任务的推理决策与机器人运动感知控制紧密结合的机器人拆解闭环控制系统，支持动态、非结构化拆解环境下的机器人实时拆解任务与运动规划。

基于神经符号 AI 的机器人拆解智能化技术，通过其自主性、可解释性、可学习性、可扩展性，为解决非结构化环境下拆解过程中的不确定性问题，实现报废产品的自主、可信、稳健拆解指明方向。

发展机器人拆解智能化技术的保障措施

以制造业高端化、智能化、绿色化发展为导向，攻克和掌握符合市场需求、实现机器人自主拆解的可信人工智能技术，构建安全可控的拆解智能化技术支撑体系和标准、专利、人才支撑体系，探索建立软硬件协同创新生态，推动我国机器人拆解智能化共性基础技术和重大前沿技术的自主发展，赋能绿色制造产业。

一是，建立创新、协调、绿色、开放、共享的神经符号 AI 社区。组织开展共性基础技术和前沿技术研究，推动基于神经符号 AI 的机器人拆解智能化技术创新体系建设；建立技术创新、应用示范、产业孵化无缝对接的成果转化新体制、新机制和向全行业扩散和转移的新途径，探索新型产学研用协同创新范式。

二是，实施标准、专利、人才战略。完善相关标准体系建设，规范拆解智能化中的信息感知、自主控制、系统协同、检测维护、过程优化等方面技术要求；培养吸引高层次创新人才，加强技术培训基地建设，培养高级专门技术人才。

三是，加强开展相关产业政策研究，拓宽多元化投融资渠道，推动相关价值链上各利益相关方的共同参与，提高绿色制造产业的智能化水平和科技创新能力。

¹ 神经谓词——既是符号逻辑系统中的谓词，也是一个概率神经网络。视觉、力觉等多模态信息和连续高维空间状态，经过神经网络的映射，得到逻辑推理所需的符号状态，直接驱动动作原语，避免了定义复杂的逻辑规则。

² 动作原语——是机器人任务规划问题中联系逻辑规划与机器人真实运动之间的桥梁，由若干条指令组成，用来实现某个特定的操作，通过一段不可分割的或不可中断的程序实现其功能。通过规划域定义语言，在逻辑规划空间中准确描述每个动作以及每个动作执行所需要的前提条件、执行动作后的状态、系统的初始状和目标状态。基于该描述，规划器在逻辑规划空间中通过推理，找出从目标状态到初始状态的动作原语序列，形成执行规划。