

题目：基于神经符号 AI 的动力电池多种类螺钉自主拆解技术研究

姓名：张晟旻

学号：121020910250

导师：陈铭（上海交通大学）、王志刚（英特尔中国研究院）

学校：上海交通大学（机械与动力工程学院）

专业名称：机械工程

申请学位：硕士

关键词：神经符号人工智能，动力电池，螺钉拆卸，属性分类，认知机器人

摘要：

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。

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。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。

论文针对非结构化拆解环境下动力电池的智能化拆解需求，围绕基于神经符号人工智能的自主拆解规划、基于属性的螺钉识别方法、多种类螺钉自主拆解机器人的实现等三个方面开展研究，为实现复杂动态拆解场景下的动力电池多种类螺钉自主拆解提供理论基础和技术支撑。主要内容和创新性成果如下：

(1) 针对非结构化环境下多种类螺钉拆解的不确定性问题，提出了融合“感知、学习、规划、执行、验证”为一体的神经符号人工智能框架，以动力电池上盖螺钉为对象，通过设计特定的动作原语、神经谓词和拆解任务规划算法，实现了多种类螺钉拆解任务的自主规划问题，从而更好地适应拆解对象的复杂性。

(2) 针对螺钉种类识别中需要大量人工标注数据集、泛化能力差的问题，提出了一种基于属性的螺钉识别方法，通过利用螺钉的属性信息来辅助识别过程，提高数据的使用效率。该方法包括了视觉分割模块、概念嵌入模块和逻辑推理模块，其中视觉分割模块使用 SAM 模型实现了对环境感知信息的提取；概念嵌入模块通过基于 VAE 的神经网络分类方法实现了对识别目标中各属性的概念提取；逻辑推理模块一方面实现了对螺钉种类的推理，另一方面，通过基于 Łukasiewicz 逻辑的神经算子将逻辑推理表达为可微分形式，实现了将拆解结果状态反向传播训练各模块。该方法通过充分利用物体的属性信息来辅助识别过程，避免反复的数据标注并能通过概念之间组合拓展到新的物体种类；通过可微分形式的多值逻辑推理神经算子建立了结果状态的反向传播，从而在拆解任务执行过程中不断对系统训练优化，实现“训推一体”的持续学习。

(3) 提出了一种多种类螺钉自主拆解机器人，包括移动机器人底盘、拆解协作机械臂、末端拆解执行器及旋具快换机构三部分，具备自主感知、自动规划和执行、自主学习等功能，根据不同的螺钉种类和拆解状态自动更换不同的拆卸套筒或旋具、灵活选择适当的位置完成拆解任务，适应非结构化环境拆解的不确定性。