

# 季华实验室

## 研究生联合培养项目需求表

联 培 项 目 编 号： FSNEU-2026-JHSYS-03

联 培 项 目 名 称： 强扰动状态下飞行机械臂接触作  
业柔顺控制研究

联 培 单 位： 季华实验室

项 目 负 责 人： 杨鹏

联 系 电 话： 17802008069

单 位 负 责 人： 赵明扬

联 系 电 话： 13909819832

东北大学佛山研究生创新学院

## 填表说明

- 1、 本表由联合培养基地填写，务必保证信息全面准确。
- 2、 联合培养基地每年 3 月前将本表交于东北大学佛山研究生创新学院，用于本年度接收联合培养研究生。
- 3、 一份需求表只能填写一个项目，且需求表上交后原则上不允许取消或更改。
- 4、 联培项目编号为：东北大学佛山研究生创新学院简称佛山研究生创新学院，简称代码-FSNEU、年份-202X、基地名称简称代码-XXX(美的集团中央研究院简称美的中研院，简称代码 MDZYY)、本基地本年度项目序号 X X，例如：  
FSNEU-2026-MDZYY-1。
- 5、 各栏目内容可续页。

东北大学佛山研究生创新学院联培基地项目需求表

项目编号	FSNEU-2026-JHSYS-03	项目名称	强扰动状态下飞行机械臂接触作业柔顺控制研究
联培课题方向	机器人智能控制		
所需研究生专业方向	机器人科学与工程、机械工程、控制工程、计算机技术、人工智能、软件工程等专业方向		
需求人数	1 人		
岗位要求	机器人科学与工程、机械工程、控制工程、计算机技术、人工智能、软件工程等相关专业		
项 目 简 介			
<p>一、项目背景：</p> <p>随着无人机与机器人技术的深度融合，具备主动作业能力的飞行机械臂系统，已成为高空、高危、非结构化环境中执行巡检、维修、装配等任务的前沿装备，在电力运维、基础设施建设等领域潜力巨大。然而，将其从“空中观测”推向“空中精准操作”，面临一个核心挑战：强扰动状态下的稳定、安全接触控制问题。</p> <p>飞行机械臂作业时，作为一个动态耦合的多体系统，承受着双重强扰动。一是外部环境扰动，如复杂气流、风载突变及接触时产生的未知力/力矩冲击；二是内部动力学耦合扰动，即机械臂运动与无人机飞行姿态之间强烈的相互干涉。这些扰动严重威胁系统稳定性与定位精度，导致传统基于位置或纯力跟踪的控制方法极易失效，造成接触力失控、目标损坏或系统失稳，无法实现安全、柔顺的交互作业。</p> <p>因此，研究强扰动状态下飞行机械臂接触作业的柔顺控制具有紧迫的理论与工程价值。本项目旨在面向实际产业需求，探索在未知环境干扰与</p>			

强内部耦合下，使系统能够智能“感知”并“适应”接触过程的新型控制方法。重点研究具备高鲁棒性与自适应能力的柔顺控制策略，以实现飞行平台抗扰动稳定与机械臂末端“刚柔并济”的精确力交互，最终完成类似人臂的稳健协调作业。该研究将推动飞行机器人完成从观测到操作的关键跨越，为高端智能装备发展提供核心技术支撑，并培养面向未来的产业创新人才。

## 二、研究现状：

当前，针对飞行机械臂系统的研究已取得初步进展。国内外学者在系统建模、轨迹规划、飞行与机械臂的协调控制等方面进行了大量探索。在控制层面，研究主要集中在基于精确模型或干扰观测器的镇定控制，旨在实现空中悬停、定点跟踪及简单的拾取-放置作业。部分工作通过设计分层控制器或引入视觉伺服，实现了在相对静态或弱扰动环境下的目标接近与轻度接触。然而，现有研究大多将飞行平台的抗扰镇定与机械臂的作业控制进行相对独立的处理，或仅考虑单一类型的扰动。对于飞行机械臂作为一个整体，在持续、复合的强扰动（如强风、动态负载、非结构化接触力）作用下，进行稳定且需要主动力交互的精细接触作业（如拧螺钉、插拔操作）这一复杂场景，其控制策略的研究尚不充分。系统的强非线性、强耦合性以及作业环境的不确定性，使得传统控制方法的性能急剧下降，暴露出鲁棒性不足、力控精度差等问题。

具体到接触作业的柔顺控制研究，在工业固定基座机械臂领域，阻抗控制、力/位混合控制等经典方法已较为成熟。近年来，自适应控制、基于学习的控制等方法也被引入以提升环境适应性。但这些策略的应用前提通常是基座固定或运动已知。将其直接迁移至基座（无人机）处于主动、不稳定运动状态的飞行机械臂系统时，面临根本性挑战：一是强扰动导致基座位姿和速度的实时剧烈变化，严重破坏了力控制所需的稳定参考框架；

二是扰动与接触力深度耦合，难以分离和补偿，极易引发力交互失稳。虽有少数研究开始尝试将阻抗控制理念与飞行控制结合，但其大多假设扰动有界或已知，或仅在仿真和受控实验室环境中验证，缺乏在真实强扰动工况下实现高性能、高鲁棒性柔顺交互的有效解决方案。因此，如何设计能够同时抑制强扰动并智能调节接触力的新型一体化柔顺控制架构，已成为该领域亟待突破的关键瓶颈。

### 三、关键性问题或技术：

1、强扰动与作业耦合下的系统一体化鲁棒稳定控制问题：需解决在持续风扰、动态负载及未知接触反作用力等多源强扰动作用下，飞行平台与机械臂动力学深度耦合所带来的失稳难题。关键在于设计不依赖于精确模型、能够实时估计并补偿复合扰动的控制架构，确保整个系统在作业全过程中的全局稳定性与抗干扰能力。

2、动态时变基座上的高精度柔顺交互控制问题：需攻克机械臂末端在持续运动、姿态快速变化的无人机基座（动态时变基座）上，实现与作业环境或物体安全、稳定且精确的力/位协调控制难题。发展新型自适应柔顺控制策略，使其能在线辨识环境参数、分离扰动与接触力，并动态调整阻抗特性，实现从自由空间运动到受限空间接触的平滑、稳定过渡与精确力交互。

3、多任务约束下的在线轨迹规划与动态性能优化问题：需研究在强扰动约束、机械臂作业路径约束、无人机避障与稳定性约束等多重约束条件下，满足柔顺接触作业需求的系统在线轨迹实时生成与优化方法。重点在于实现飞行平台与机械臂运动的自适应协同规划，在保证整体稳定与安全的前提下，动态优化作业轨迹，最大化任务执行效率与控制性能。

<b>四、预期目标：</b>  1. 提出一种融合干扰观测与自适应机制的一体化鲁棒柔顺控制架构，有效抑制复合扰动，保证系统稳定；  2. 建立动态时变基座下的高精度力/位混合控制方法，实现与未知环境的安全、稳定交互；  3. 搭建原理样机或仿真验证平台，在模拟风扰及典型接触任务中验证控制方法的有效性与优越性，为飞行机械臂在高动态环境下的可靠作业提供关键技术支撑。		
<b>项 目 负 责 人 项 目 经 历</b>		
<b>起止时间</b>	<b>项目名称</b>	<b>主要内容</b>
2026. 1– 2028. 12	复杂交互约束下多自由度刚柔耦合旋翼飞行机械臂柔顺控制研究	针对多自由度旋翼飞行机械臂系统中存在的结构柔性、关节柔性等“刚柔耦合”特性，研究其在与环境发生复杂接触交互时所面临的动力学建模与控制难题，实现含柔性环节的飞行机械臂在约束条件下的稳定、精确力位控制。
2023. 1– 2024. 12	作业型飞行机器人接触交互柔顺控制研究与试验评价研究	内容涵盖面向典型接触作业的柔顺控制算法设计以及包含稳定性、作业精度与鲁棒性在内的系统性试验评价标准制定。
2022. 1– 2023. 12	面向电力特种作业的无人机机械臂系统	面向电力绝缘子检测作业需求，开展专用无人机机械臂系统集成与应用技术研究。解决在强电磁干扰、复杂构型设备与非结构化场景下，系统的轻量化设计、电磁兼容、特种末端工具适配及作业任务规划等关键技术，实现电力绝缘子检测作业示范验证。

2022. 1- 2023. 12	一种用于电力作业的 飞行机器人控制方法 研究	研究新型集成化控制方法，融合环境感知、抗干扰飞行与机械臂柔顺作业控制于一体，提升飞行机器人在电力作业环境下的自主性与安全性。	
2021. 1- 2022. 12	作业型双臂飞行机器人关键技术研究 与实验验证	研制一套具有双臂协调作业能力的飞行机器人系统。内容包括双臂飞行机器人的动力学建模与耦合分析、双臂在飞行扰动下的协调轨迹规划与力分配策略，以及面向协同操作的双臂柔顺协同控制方法。	
工 作 计 划 安 排（2026. 7-2028. 4）			
序号	起止时间	阶段内容	工作量估计（天）
1	2026. 7- 2026. 12	围绕课题核心，系统梳理并总结国内外相关文献，明确强扰动与柔顺控制的技术瓶颈。完成飞行机械臂系统的动力学与接触力建模，确立研究的关键变量与总体技术路线。研究基于干扰观测与估计的复合扰动抑制方法，设计基础鲁棒控制器。	180
2	2027. 1- 2027. 6	构建飞行机械臂的半实物仿真或原理样机实验平台。开展面向接触作业的柔顺控制算法（如自适应阻抗控制）的理论推导与初步的数值仿真验证。	180
3	2027. 7- 2027. 12	集成并调试所提出的控制算法，在模拟风扰和接触场景下进行闭环测试与性能评估，优化算法参数。开展系统性的对比实验，充分验证控制策略的有效性与鲁棒性。	180
4	2028. 1- 2028. 4	全面整理研究数据与成果，撰写并完成硕士学位论文，准备答辩。	120