

同行专家业内评价意见书编号： 20250855145

附件1

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）
同行专家业内评价意见书

姓名： 李杰

学号： 22260018

申报工程师职称专业类别（领域）： 机械

浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）制

2025年06月04日

填表说明

一、本报告中相关的技术或数据如涉及知识产权保护、军工项目保密等内容，请作脱密处理。

二、请用宋体小四字号撰写本报告，可另行附页或增加页数，A4纸双面打印。

三、表中所涉及的签名都必须用蓝、黑色墨水笔，亲笔签名或签字章，不可以打印代替。

四、同行专家业内评价意见书编号由工程师学院填写，编号规则为：年份4位+申报工程师职称专业类别(领域)4位+流水号3位，共11位。

一、个人申报

（一）基本情况【围绕《浙江工程师学院（浙江大学工程师学院）工程类专业学位研究生工程师职称评审参考指标》，结合该专业类别(领域)工程师职称评审相关标准，举例说明】

1. 对本专业基础理论知识和专业技术知识掌握情况(不少于200字)

本人具备扎实的机械工程学科基础理论知识和系统的专业技术知识，并在机器人运动控制领域具有深入的研究与实践经验。在基础理论知识方面，系统地掌握了：工程力学（理论力学、材料力学），为机械结构的强度、刚度、动力学分析与设计奠定了坚实基础；机械原理与机械设计，精通机构运动学、动力学分析与常用机械零件的设计原理；工程材料与成形技术；互换性与技术测量；机械制造技术基础；控制工程基础（包括经典控制理论、现代控制理论基础），深入理解系统建模、稳定性分析、控制器设计（如PID、状态反馈）原理；机器人学基础，熟练掌握机器人运动学（正/逆运动学求解）、动力学（拉格朗日/牛顿-欧拉法建模）、轨迹规划（关节空间/笛卡尔空间规划）的核心理论。

2. 工程实践的经历(不少于200字)

针对盾构机在硬岩地层掘进时刀具磨损快、人工换刀风险高、效率低的痛点，我参与了来源于中铁装备的全断面掘进机刀盘刀具检测换刀机器人项目，主导开发一套狭小空间作业的六自由度液压机械臂运动控制系统，目标实现刀具自动识别、精准抓取、自主避障及快速更换，将单次换刀时间缩短至8分钟内，定位精度 $\leq \pm 1\text{mm}$ 。我们团队自主研发并装配搭建了一台盾构换刀机械臂样机，针对狭小空间内避障换刀的需求，对机械臂的轨迹规划和运动控制策略进行了相关研究。一方面，提出了一种针对狭小空间内机械臂避障轨迹规划策略，该策略首先对所有滚刀进行区域划分，采用三次样条插值法对不同区域的滚刀进行关节空间的轨迹规划，考虑了机械臂无碰撞的安全性以及机械臂运动的精确性及平稳性，并提出了基于NSGA

II算法的机械臂多目标轨迹优化策略，选取关节冲击与能量消耗为目标函数，选择经过中间位姿的两个时间为决策变量对轨迹进行优化。另一方面，提出了针对机械臂在实际作业中面临复杂的工况变化导致系统动态特性复杂化的自适应控制策略，分别为增益调度自适应位置建压双反馈位置控制策略以及自校正最小方差位置建压双反馈位置控制策略，从而有效应对机械臂系统的非线性和不确定性，实现高精度的轨迹跟踪。

3. 在实际工作中综合运用所学知识解决复杂工程问题的案例(不少于1000字)

在我参与的一个盾构换刀机械臂研发项目中，我们面临着一个复杂的工程挑战：设计并实现一套能在狭小空间内实现重载换刀的盾构换刀机械臂系统。该项目旨在解决传统盾构施工环境中人工换刀效率低、安全威胁大的问题。

1. 盾构换刀机械臂本体设计

盾构机内部靠近刀盘的位置能给换刀机械臂提供的安装空间十分有限，且出口狭小，而机械臂的运动范围需要能覆盖刀盘上所有的滚刀。针对狭小空间大范围作业的要求，我们团队设计了一台伸缩/折叠的复合臂结构，满足作业空间的覆盖；借助V-REP

仿真平台验证机械臂是否能无碰撞地到达滚刀更换的目标点，并确定各个机械臂关节所需的运动范围；通过Adams力学仿真分析的方法，确定各关节所需的输出力大小；根据作动器的运动范围及输出力要求开展产品选型或参数设计，并设计机械臂的结构和驱动方案；机械臂本体结构方案设计完成后，通过Ansys Workbench

有限元仿真分析软件对结构件强度进行校核，验证最终设计的换刀机械臂本体的承载能力；在Matlab Simscape

仿真平台中搭建仿真模型，求解机械臂在与障碍物不发生碰撞条件下末端点所能达到的所有

运动范围验证所设计的机械臂运动学参数是否合理:通过在V-REP

机器人仿真平台中调用无碰撞轨迹运动算法,求解得到机械臂无碰撞更换滚刀时,各关节所对应的关节空间轨迹。

根据换刀需求完成了盾构换刀机械臂样机的装配与搭建。我们采用D-

H参数法建立了机械臂的运动学模型,通过坐标系转换和齐次变换矩阵推导,实现了机械臂正逆运动学的计算。随后基于拉格朗日动力学方程对机械臂进行动力学建模,实现机械臂运动与力矩的映射关系。运动学与动力学模型的建立为后续机械臂轨迹规划与运动控制的分析提供了理论基础。

2. 盾构换刀机械臂轨迹规划

盾构换刀机械臂的安装空间为尺寸 $1\text{m} \times 1\text{m} \times 2.61\text{m}$ 的长方体,中心轴线位于盾构机刀盘三分之二圆周附近,12点钟方向。机械臂进行换刀作业时需要通过位于安装空间靠近刀盘一侧通径 0.65m ,长 0.39m 的闸门口伸出到所需更换的目标滚刀位置。我们对盾构换刀机械臂避障轨迹规划策略进行了研究,并根据不同滚刀位置提出分区域关节空间轨迹规划策略,换取不同区域滚刀时,机械臂需经过不同的中间位姿以满足避障需求,并通过插值运算得到各关节各个时刻的位姿。通过对比分析多种关节空间插值的机械臂轨迹规划方法的特点,最终选用三次样条插值法进行关节空间内的轨迹规划,确保了机械臂运动的平稳性和精确性。其次基于NSGA-

II算法对机械臂进行多目标轨迹优化,选取关节冲击与能量消耗为目标函数,选择经过中间位姿的两个时间为决策变量,建立约束方程,并进行求解,并验证了算法的有效性,优化后的三次样条插值曲线机械臂各关节角度波动幅度降低,同时运动过程中平均速度与加速度总体变小,机械臂关节冲击与能量消耗得到优化,提高了机械臂运动过程的平稳性。最后对更换不同滚刀所规划的轨迹进行碰撞检测,确保轨迹的可行性。经过验证可得,采用此优化后的轨迹规划策略可以在避障的条件下在规定时间内实现直径 8.8m 的土压平衡盾构机上所有的径向滚刀和边缘滚刀的更换。

3. 盾构换刀机械臂运动控制策略

盾构换刀机械臂主要由EHA(电静液作动器)驱动,我们根据其特性提出位置建压双反馈的位置控制策略,位置控制器采用PD控制,建压控制器采用大增益P控制,通过压力反馈加速动态响应、位置反馈保障稳态精度,显著改善了盾构换刀机械臂在启停、换向等瞬态工况下的控制性能。

盾构换刀机械臂在实际作业中面临复杂的工况变化,使得系统动态特性复杂化,对控制精度的影响机制难以明确。为解决上述问题,亟需引入自适应控制方法以实现参数的动态调节,通过动态调节控制器参数,提升系统的控制性能和鲁棒性,为机械臂在工况变化条件下实现轨迹跟踪及精确定位提供保障。因此,我们在位置建压双反馈控制策略的基础上分别提出了增益调度自适应位置建压双反馈位置控制策略以及自校正最小方差位置建压双反馈位置控制策略。增益调度控制策略根据系统的实时工况信息,动态调整PD控制器的参数,以使控制器始终匹配系统的最优工作点,从而实现在部分工况变化的情况下保持良好的定位精度。自校正最小方差控制策略通过在线估计系统参数并动态调整控制率,能够有效应对机械臂系统的非线性和不确定性,实现高精度的轨迹跟踪及精确定位,并对自校正最小方差位置建压双反馈位置控制策略进行仿真验证。仿真结果表明,在高温大负载的工况下,PD控制与自校正控制均会受到影响,定位误差、平均绝对值偏差以及最大偏差均增大,但是自校正控制受到的影响比PD控制小,且定位精度受到的影响很小。而使用PD控制,末端定位精度在高温大负载的工况下变化很大,证明了所提出的自校正最小方差位置建压双反馈控制策略的有效性。

4. 实验验证

最后,我们对盾构换刀机械臂样机进行整机的避障换刀动作实验。各个关节表现出不同的跟踪精度特性,跟踪(位置/角度)误差的绝对平均值分别为 1.745mm 、 0.147° 、 0.131° 、 0.261mm 、 0.475° 、 0.342° ,最大跟踪(位置/角度)误差的绝对值分别为 3.431mm 、 0.280° 。

、 0.319° 、 1.269mm 、 0.608° 、 0.745° 。各个关节的定位精度很高，关节1、关节4的定位误差分别在 -0.004mm – 0.004mm 与 -0.002mm – 0.002mm 的区间内，关节2、关节3、关节5和关节6的定位误差分别为 -0.006° 、 0.005° 、 -0.0015° 、 0.002° ，基本都接近传感器的最高分辨率。此时机械臂末端执行器的理论定位误差为 0.23mm 。实验结果表明机械臂能够在规定时间内完成滚刀的更换，同时机械臂能够能够根据轨迹规划得到的各关节位移曲线实现良好的轨迹跟踪达到避障的效果且机械臂最终的末端定位精度 $<1\text{mm}$ ，满足换刀需求。

这个项目不仅解决了实际工程问题，也为盾构换刀机械臂在工业环境中的设计及应用提供了有价值的参考方案。

(二) 取得的业绩(代表作)【限填3项, 须提交证明原件(包括发表的论文、出版的著作、专利证书、获奖证书、科技项目立项文件或合同、企业证明等)供核实, 并提供复印件一份】

1. 公开成果代表作【论文发表、专利成果、软件著作权、标准规范与行业工法制定、著作编写、科技成果获奖、学位论文等】

成果名称	成果类别 [含论文、授权专利(含发明专利申请)、软件著作权、标准、工法、著作、获奖、学位论文等]	发表时间/ 授权或申 请时间等	刊物名称 /专利授权 或申请号等	本人 排名/ 总人 数	备注
盾构换刀机械臂实验台 人机交互软件V1.0	计算机软件著作权	2025年02 月27日	2025SR0343 3733	2/5	

2. 其他代表作【主持或参与的课题研究项目、科技成果应用转化推广、企业技术难题解决方案、自主研发设计的产品或样机、技术报告、设计图纸、软课题研究报告、可行性研究报告、规划设计方案、施工或调试报告、工程实验、技术培训教材、推动行业发展中发挥的作用及取得的经济社会效益等】

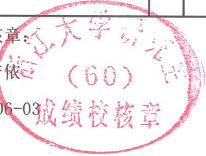
(三) 在校期间课程、专业实践训练及学位论文相关情况	
课程成绩情况	按课程学分核算的平均成绩： 84 分
专业实践训练时间及考核情况(具有三年及以上工作经历的不作要求)	累计时间： 1 年（要求1年及以上） 考核成绩： 82 分
本人承诺	
个人声明：本人上述所填资料均为真实有效，如有虚假，愿承担一切责任，特此声明！	
申报人签名： 	

浙江大学研究生院
攻读硕士学位研究生成绩表

学号：22260018		姓名：李杰		性别：男		学院：工程师学院		专业：机械			学制：2.5年				
毕业时最低应获：26.0学分				已获得：30.0学分				入学年月：2022-09			毕业年月：				
学位证书号：						毕业证书号：						授予学位：			
学习时间		课程名称		备注	学分	成绩	课程性质	学习时间		课程名称		备注	学分	成绩	课程性质
2022-2023学年秋季学期		研究生英语			2.0	免修	公共学位课	2022-2023学年冬季学期		新时代中国特色社会主义思想理论与实践			2.0	90	公共学位课
2022-2023学年秋季学期		工程技术创新前沿			1.5	90	专业学位课	2022-2023学年冬季学期		产业技术发展前沿			1.5	89	专业学位课
2022-2023学年秋季学期		研究生英语能力提升			1.0	免修	跨专业课	2022-2023学年春季学期		自然辩证法概论			1.0	74	公共学位课
2022-2023学年秋季学期		研究生英语基础技能			1.0	免修	公共学位课	2022-2023学年春夏学期		工程伦理			2.0	91	公共学位课
2022-2023学年秋冬学期		研究生论文写作指导			1.0	72	专业学位课	2022-2023学年春夏学期		制造物联网技术			2.0	78	专业选修课
2022-2023学年冬季学期		工程中的有限元方法			2.0	99	专业选修课	2022-2023学年春夏学期		高阶工程认知实践			3.0	85	专业学位课
2022-2023学年秋冬学期		科技创新案例探讨与实战			2.0	87	专业选修课	2022-2023学年春夏学期		人工智能制造技术			3.0	84	专业学位课
2022-2023学年秋冬学期		智能工业机器人及其应用			3.0	80	专业选修课			硕士生读书报告			2.0	通过	

说明：1. 研究生课程按三种方法计分：百分制，两级制（通过、不通过），五级制（优、良、中、及格、不及格）。

2. 备注中“*”表示重修课程。

学院成绩校核章：

成绩校核人：张梦依

打印日期：2025-06-03

中华人民共和国国家版权局 计算机软件著作权登记证书

证书号： 软著登字第14999931号

软件名称： 盾构换刀机械臂实验台人机交互软件
V1.0

著作权人： 浙江大学

软件开发： 李杰

权利取得方式： 原始取得

权利范围： 全部权利

登记号： 2025SR0343733

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。



2025年02月27日