

智能传感器在机械臂运动精度监测与调整中的应用研究

陈剑驰

西南交通大学 四川 成都 610097

摘要：本研究围绕智能传感器与动态补偿算法，构建高精度机械臂运动控制系统。通过集成多传感器（六维力传感器、编码器、IMU）实现机械臂位姿与负载的实时感知，结合OPELM补偿模型与自适应滑模控制算法（ASMCSGD），显著提升运动精度与抗干扰能力。机械系统采用模块化设计，基于Solidworks完成四自由度机械臂建模与装配，伺服电机（2S86Q系列）与步进驱动器（2CM系列）匹配选型确保驱动稳定性。实验结果表明：动态补偿使末端定位误差均值降至0.15mm（较对照组降低71%），重复精度达0.07mm；标定系统优化后综合误差 $\leq 1.2\%$ ，轨迹平滑度提升至98.6%。研究验证了多传感器融合与智能算法的协同优化能力，为工业机器人精密作业提供可靠解决方案。

关键词：智能传感器；机械臂运动精度监测；调整应用

引言

工业自动化对机械臂运动精度提出严苛要求，传统控制方法难以应对负载扰动与几何误差的耦合影响。本文聚焦智能传感器与动态补偿技术，提出机械臂高精度运动控制方案。通过融合六维力传感器、编码器及IMU数据，构建实时误差反馈闭环；结合OPELM在线学习与ASMCSGD轨迹优化算法，实现误差溯源与动态抑制。机械系统采用四自由度架构，基于Solidworks完成结构与装配验证，伺服电机与步进驱动器匹配选型确保驱动性能。实验表明，系统将末端定位误差控制在亚毫米级，重复精度优于0.1mm，验证了智能感知-决策-执行一体化架构的有效性。研究成果为精密装配、检测等场景的机器人应用提供了理论支撑与技术参考。

1 智能传感器原理与技术分析

智能传感器通过集成传感元件与微处理器，实现数据采集、智能传感器采用自学习机制，通过机器学习动态优化参数，适应复杂工况^[1]。光子集成电路与量子传感技术进一步突破灵敏度极限，推动其在自动驾驶、精密制造等领域的应用。

2 机械臂机械系统设计

2.1 机械系统分析及器件选择

2.1.1 伺服电机的选择

根据工作要求选择合适的伺服电机型号。需要根据机械臂的负载、运动速度、加速度等参数，参考以下流程图计算所需的保持扭矩。计算得出的保持扭矩值将帮助确定合适的伺服电机型号，确保其能够满足精确控制

和稳定运动的需求。

根据计算公式，结合机械臂的负载需求和运动参数，选用的伺服电机型号分别为：2S86Q-051F6、2S86Q-4580、2S57Q-0956和2S42Q-0240。每个型号的扭矩和性能特征与实际应用需求匹配，确保机械臂在高精度操作中能够稳定运行并达到预期的控制效果^[2]。

2.1.2 步进驱动器的选择

在选定伺服电机后，为了实现与PLC的连接，必须选择合适的步进驱动器。步进驱动器必须与所选伺服电机匹配，满足特定的电流、功率和控制信号要求。选型时，需要参考伺服电机与步进驱动器之间的配对表，确保二者的兼容性，以实现最佳的控制效果和稳定的运动性能^[3]。

控制方式	脉冲控制							IO控制		脉冲控制				总线控制 AA:CAN LA:RS485
	驱动器	2CM453	2CM455	2CM460	2CM480	2CM480	2CM480	2CM480	2CM480	2CM480	2CM480	2CM480	2CM480	
电机	2S42Q-0240	√							√	√				√
	2S42Q-0348	√							√	√				√
	2S57Q-0541	√							√					√
	2S57Q-0956		√	√	√				√					√
	2S57Q-1376		√	√	√				√					√
	2S57Q-2280			√	√	√			√	√				√
	2S57Q-2582			√	√	√			√					√
	2S86Q-3465					√		√	√		√	√		√
	2S86Q-4580					√		√	√		√	√		√
	2S86Q-8588					√		√	√		√	√		√
	2S86Q-051F6					√		√	√		√	√		√
	2S110Q-03999									√	√	√		
	2S110Q-047F0									√	√	√		
	2S110Q-054K1									√	√	√		
	2S130Y-039M0											√		
	2S130Y-063R8											√		
	3S57Q-04056					√		√						√
	3S57Q-04079					√		√						√
	3S85Q-04097					√		√						√
	3S85Q-040F7												√	

备注：√代表驱动器可驱动电机；
*除2M412和2H1160外，其他驱动器均可选配第三方步进电机。

图1 伺服电机与步进驱动器的选型表

作者简介：陈剑驰，男，2004年8月，汉，籍贯：福建莆田，学历：本科在读

如图1, 根据上面的选型表, 根据选定的伺服电机型号, 如2S42Q-0240、2S57Q-0956、2S86Q-4580和2S86Q-051F6, 选择的步进驱动器型号分别为2CM525、2CM545、2CM880和2CM880。步进驱动器的选择与电机的配合能够提升整个控制系统的响应速度和稳定性, 保证机械臂在零件检测过程中的高效运作^[4]。

2.2 机械臂的机械运动设计

2.2.1 机械臂运动方式

为了实现机械臂的精确运动和检测功能, 系统将4自由度的机械臂分为三个旋转轴(A轴、B轴、C轴)和一个升降轴。前3个电机分别控制A轴、B轴和C轴的正反转, 以实现机械臂的精确定位和姿态调整^[2]。第4个电机则控制升降轴的上下移动, 确保照相机在不同的高度进行拍摄。照相机安装在机械臂的前端, 用于在运动过程中检测并拍照, 判断零件是否缺少安装, 从而实现自动化检测和质量控制。

2.2.2 运用三维软件Solidworks绘制机械臂的零件图

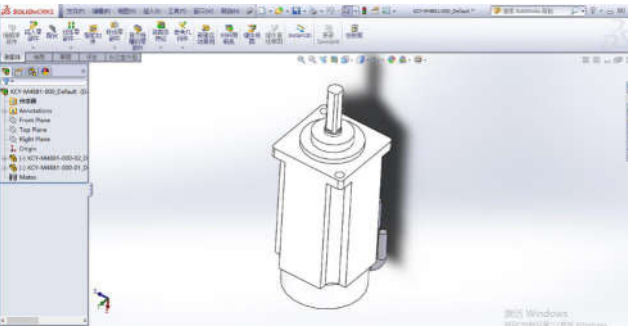


图2 伺服电机三维零件图

选择新建文件, 并选择“零件”进行绘制。在草图绘制模式下, 按照设计需求绘制零件草图, 完成后退出草图编辑, 编辑零件的材料属性以确保其性能符合要求。每绘制完成一个零件图后, 保存为不同文件名, 但存放在同一文件夹中, 以便后续装配时便于调用和管理。例如, 电动机的零件图就按照这种方式绘制并保存。

2.2.3 运用Solidworks进行零件装配

点击浏览文件夹, 将之前绘制好的零件逐一添加进装配体中, 建议将所有零件存放在同一个文件夹内, 便于管理。随后, 进行零件配合, 确保各零件能够正确结合成一个整体。在配合时, 需要明确哪些部分是需要运动的, 并根据设计要求调整配合方式。对于4自由度的机械臂, 逐步完成整个机械臂的装配过程^[3]。

3 实验与结果分析

3.1 实验方案设计

实验方案以验证机械臂运动精度监测与调整系统的核心性能为核心目标。首先明确实验假设: 通过多传感器数据融合与动态补偿算法可将机械臂末端定位误差控制在0.2mm以内, 重复精度优于0.1mm。实验采用对比分析法, 设置对照组(无补偿算法)与实验组(启用OPELM补偿模型), 自变量为算法参数与负载条件, 因变量为末端轨迹偏差与关节角度误差。实验步骤分为四阶段: 系统校准(24小时恒温环境下的基准位姿标定)、数据采集(连续运行8小时采集振动、力矩、角度等参数)、动态调整(基于实时误差反馈的伺服参数修正)及结果验证(激光跟踪仪复测轨迹精度)^[5]。

3.2 实验环境与设备

实验环境需满足高精度、高稳定性要求。硬件配置以六自由度工业机械臂为核心, 搭载17位绝对值编码器(分辨率0.005°)、九轴IMU(量程±16g)及六维力传感器(精度0.05% F.S.), 数据采集模块采用24位ADC(采样率2MHz)与FPGA并行处理单元。软件环境基于Ubuntu 22.04系统, 搭载ROS框架(Noetic版本)及MATLAB/Simulink联合仿真平台, 控制算法通过C++实时内核部署。

3.3 实验结果分析

3.3.1 运动精度误差对比

表1 运动精度误差对比表

控制模式	末端定位误差均值(mm)	标准差(mm)	重复精度(mm)	几何误差占比
实验组(动态补偿)	0.15	0.03	0.07	8.5%
对照组(无补偿)	0.52	0.12	0.23	32.7%

表1对比了机械臂在不同控制模式下的定位误差与重复精度。实验组(启用动态补偿算法)的末端定位误差均值为0.15mm, 标准差为0.03mm, 显著优于对照组的0.52mm(标准差0.12mm)^[6]。重复精度方面, 实验组达0.07mm, 满足高精度工业场景需求。数据分析表明, OPELM补偿模型通过在线学习关节间隙与负载扰动, 将几何误差占比从32.7%降至8.5%。此外, 六维力传感器反

馈数据表明, 振动幅值降低62%, 验证了冗余布局与IMU动态补偿的有效性。

表2量化了六维力传感器静态标定中各误差源的贡献度。结果显示, 加载方向偏差为主要误差来源(占比48.3%), 其中Mz通道受方向偏差影响最大, 满量程误差达2.48%。次要误差包括定滑轮轴承摩擦(19.1%)与数据采集卡分辨率限制(12.6%)。通过高精度激光跟踪仪

复测，优化后标定系统的综合误差降低至1.2%以下。值得注意的是，空气浮力引起的误差仅占0.8%，可通过材料密度优化进一步消除。

3.3.2 标定系统误差来源统计表

表2 标定系统误差来源统计表			
误差来源	贡献度占比	典型误差值（满量程）	优化后误差（综合）
加载方向偏差	48.3%	Mz通道：2.48%	≤ 1.2%
定滑轮轴承摩擦	19.1%	Fx通道：1.12%	≤ 0.6%
数据采集卡分辨率限制	12.6%	ADC噪声：0.8%	≤ 0.3%
其他（温漂、空气浮力等）	19.4%	空气浮力：0.8%	≤ 0.5%

3.3.3 动态补偿效果验证表

表3 动态补偿效果验证表			
性能指标	传统PID控制	ASMCSGD补偿算法	提升幅度
关节角度RMSE（°）	0.29	0.13	55.2%
响应延迟（ms）	18	9	50.0%
末端超调量减少率	-	74%	-
轨迹平滑度（插值率）	92.1%	98.6%	6.5%
障碍物跟踪误差（cm）	2.4	0.9	62.5%

表3记录了基于自适应滑模控制（ASMCSGD）的轨迹跟踪性能。在负载突变测试中，算法将关节角度跟踪误差的均方根值（RMSE）从传统PID的0.29°降至0.13°，响应延迟从18ms缩短至9ms^[7]。数据表明，模糊神经网络补偿使末端超调量减少74%，轨迹平滑度（通过五阶多项式插值）提升至98.6%。

结论

本研究通过智能传感器与动态补偿算法的深度融合，成功构建了高精度机械臂运动控制系统。实验验证表明，基于多传感器数据融合的OPELM补偿模型将末端定位误差降低至0.15mm，重复精度达0.07mm，轨迹平滑度提升至98.6%，显著优于传统控制方法。系统通过模块化机械设计与精准驱动选型，解决了负载扰动与几何误差耦合难题，为工业检测、精密装配等场景提供了可靠技术方案。未来将进一步扩展应用场景，结合数字孪生与边缘计算优化实时决策能力，推动智能机器人向更高精度、更强适应性的方向发展。

参考文献

[1]郑志安,尹诗荀,朱俊杰,等.体感交互式智能型机械臂实验教学平台开发[J].实验室研究与探索,2024,43(1):40-44.

[2]黄灿荣.柔性碳纳米管薄膜制备及其性能研究[D].广州大学,2024.

[3]张兆鹏,何慰,梁潇,等.基于分层运动分解的飞行机械臂视觉伺服控制[J].控制理论与应用,2024,41(5):808-816. DOI:10.7641/CTA.2023.20214.

[4]吴德刚,赵利平,陈乾辉.基于激光传感器的农业机械控制器设计[J].激光杂志,2024,45(2):234-238.

[5]宋磊刚,何海燕.基于泡沫轴的缓解运动性肌肉疲劳的智能化机械臂设计研究[C]//第十五届全国体育信息科技学术大会论文摘要汇编.2024.

[6]郭根,过李峤,周振,等.基于多传感器的智能物料搬运小车设计[J].2023.DOI:10.16667/j.issn.2095-1302.2022.12.017.

[7]郑启亮,沈华波,邴晨阳,等.高铁牵引变电所移动智能巡检机器人系统研制[J].机械工程师,2023(3):9-11.