

电子科技大学

UNIVERSITY OF ELECTRONIC SCIENCE AND TECHNOLOGY OF CHINA

学士学位论文

BACHELOR THESIS



论文题目 基于视觉伺服控制的六自由度机械臂
设计与实现

学 院 机械与电气工程学院

专 业 机械设计制造及其自动化

学 号 _____

作者姓名 _____

指导教师 _____

摘 要

随着制造业向柔性化、智能化和人机协作方向发展，机械臂需要同时具备较高的运动精度、柔顺交互能力和环境感知能力。传统机械臂系统多依赖固定轨迹和离线编程，难以适应目标位置变化和人机共域操作场景。视觉伺服控制能够利用图像特征构建闭环反馈，提高机械臂对动态目标的跟踪和在线调整能力；而全关节力控则能够改善机械臂在人机交互过程中的顺从性和安全性。因此，围绕机械臂本体、关节驱动、上位机控制和视觉伺服开展一体化设计与实验验证，具有较强的工程意义。

本设计面向视觉伺服与柔顺控制应用，完成了一套六自由度机械臂系统的设计与实现。机械本体部分以球腕构型为参考，根据工作空间、负载能力确定连杆参数，并通过工作空间分析、静力学仿真和运动学仿真完成结构校核；硬件部分设计了无刷电机驱动板和基于霍尔传感器阵列的输出轴绝对值编码器；底层控制部分基于磁场定向控制（FOC）实现关节驱动系统，并完成基本参数辨识、编码器非线性误差和齿槽转矩补偿等辨识与校准流程；上位机部分基于 CAN 总线和 ROS2 控制框架实现多关节状态反馈、轨迹控制、姿态重构和调试接口。在此基础上，本文提出了结合动力学模型、静态重力残差拟合和摩擦补偿的重力补偿方法，设计了末端负载在线辨识模型，并基于末端“眼在手上”相机构建了手部关键点识别与视觉伺服控制方法，实现对手掌中心的闭环跟踪。

实验结果表明，所设计机械臂的工作空间不低于 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ，末端带载能力达到 2.5 kg 以上，空载末端重复定位误差保持在 $\pm 0.012\text{ mm}$ 以内，均优于预期设计指标。重力补偿实验表明，机械臂即使在接近最不利伸展姿态下也能够保持在当前位置；零力拖动实验表明，末端在不大于 10 N 的外力作用下即可产生顺从运动。末端负载辨识实验中，三组不同负载的辨识误差均小于 10% 。视觉伺服实验表明，系统能够基于末端单目图像稳定跟踪手掌中心运动，识别帧率稳定在 30FPS 以上，对应视觉伺服控制频率达到 30 Hz 以上。综合来看，本文完成了从机械结构、关节驱动、上位机控制、柔顺控制到视觉伺服的完整系统设计与实验验证，为低成本高性能机械臂平台的进一步研究提供了基础。

关键词：机械臂，视觉伺服，FOC，力控，ROS2，手部跟踪

ABSTRACT

As manufacturing systems move toward flexible, intelligent, and collaborative production, manipulators must combine motion accuracy, compliant interaction, and environmental perception. Fixed-trajectory and offline-programmed systems adapt poorly to moving targets and shared workspaces. Visual servoing closes the loop with image features, while joint-level force control improves compliance and safety. Therefore, integrated design and experimental validation of the manipulator body, joint drive, upper-level control, and visual servoing system are of practical value.

This thesis presents a six-degree-of-freedom manipulator for visual servoing and compliant control. Its spherical-wrist mechanical structure is designed according to workspace and load-capacity requirements, and verified by workspace analysis, static simulation, and kinematic simulation. A brushless motor driver board and a Hall-sensor-array absolute output-shaft encoder are developed. The joint drive system is implemented using field-oriented control (FOC), with calibration for motor parameters, encoder non-linear error, and cogging-torque compensation. A CAN-bus and ROS2-based upper-level control system is built for joint feedback, trajectory control, pose reconstruction, and debugging. On this platform, a gravity compensation method combining the dynamic model, static gravity residual fitting, and friction compensation is proposed, an online end-load identification model is designed, and an eye-in-hand visual servoing method is implemented for closed-loop palm-center tracking.

Experiments show that the manipulator achieves a workspace no smaller than $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$, an end-effector load capacity above 2.5 kg , and a no-load repeatability error within $\pm 0.012\text{ mm}$. It can hold its posture even near the worst-case extended configuration, generate zero-force dragging under an external force no greater than 10 N , and identify three end loads with errors below 10% . Visual servoing experiments show stable palm-center tracking using monocular end-mounted images, with a recognition frame rate above 30 FPS and a control frequency above 30 Hz . Overall, this work completes the integrated design and experimental validation of the manipulator system.

Keywords: Manipulator, Visual Servoing, FOC, Force Control, ROS2, Hand Tracking

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	3
1.3 研究意义	6
1.4 本设计研究思路	6
第二章 六自由度机械臂总体方案设计	8
2.1 系统需求与技术指标	8
2.2 系统总体架构	8
第三章 机械臂硬件系统设计与实现	10
3.1 机械臂构型设计	10
3.1.1 系统参数选择与建模	10
3.1.2 工作空间可视化分析	14
3.1.3 静力学与运动学仿真	15
3.1.4 关节电机选型	18
3.2 驱动系统硬件设计	19
3.3 输出轴编码器设计	20
3.4 机械臂整体总装	23
第四章 机械臂控制系统设计与实现	25
4.1 关节电机控制系统	25
4.1.1 整体架构	25
4.1.2 电机参数辨识	26
4.1.3 非线性校准	32
4.2 总线通信与接口设计	36
4.2.1 总线负载率测试	36
4.3 ROS2 控制架构与软件实现	37
4.3.1 上位机总体架构	37
4.3.2 关节驱动接入与控制接口	38
4.4 重力补偿与零力拖动	39
4.4.1 关节状态获取与低通滤波	40
4.4.2 基于刚体动力学模型的偏置力矩计算	41

4.4.3 静摩擦与阻尼项的补偿思想	41
4.4.4 J_2 与 J_3 关节的静态重力修正与辨识	42
4.5 末端负载在线辨识	45
4.5.1 末端外载的等效建模	46
4.5.2 机械臂本体补偿力矩计算	47
4.5.3 单位外载响应的静力矩映射	47
4.5.4 残差构造与基线估计	48
4.5.5 基于最小二乘的载荷估计	48
第五章 基于手部跟踪的视觉伺服控制方法	50
5.1 视觉感知系统构建	50
5.2 相机标定与手部关键点提取	50
5.3 基于手部特征的视觉伺服控制流程	52
第六章 实验与结果分析	55
6.1 实验环境	55
6.2 基本运动性能实验	55
6.3 重复精度实验	57
6.4 重力补偿与零力拖动实验	59
6.5 末端负载辨识实验	61
6.6 视觉伺服实验	64
第七章 总结与展望	66
7.1 全文总结	66
7.2 未来展望	68
致 谢	70
参考文献	71
附录 A 电路原理图	74

缩略词表

英文缩写	英文全称	中文全称
CAN	Controller Area Network	控制器局域网
D-H	Denavit-Hartenberg	D-H 参数法
DoF	Degree of Freedom	自由度
FDM	Fused Deposition Modeling	熔融层积成型技术
FOC	Field-Oriented Control	磁场定向控制
HAL	Hardware Abstract Layer	硬件抽象层
LUT	Look-Up Table	查找表
PLC	Programmable Logic Controller	可编程逻辑控制器
ROS	Robot Operating System	机器人操作系统
SVPWM	Space Vector Pulse Width Modulation	空间矢量脉宽调制
URDF	Unified Robot Description Format	统一机器人描述格式
VLA	Vision-Language-Action model	视觉-语言-动作模型

第一章 绪论

1.1 研究背景

随着现代制造业向自动化、柔性化和智能化方向持续发展，工业机器人已经成为提高生产效率、保障作业安全和稳定产品质量的重要装备。其中，六自由度机械臂因其结构灵活、作业空间大、能够完成较复杂位姿调整等特点，被广泛应用于装配、搬运、检测、打磨和分拣等场景。相比传统人工操作，机械臂能够在重复性、危险性和高强度作业中保持更高的一致性，因此在智能制造体系中的地位愈发重要。

传统工业机械臂的发展可追溯至 20 世纪中叶开始逐渐兴起的工业自动化需求。美国 Unimation 公司于 1961 年在通用汽车生产线上安装了第一台工业机器人 Unimate，用于搬运和堆放高温压铸金属件 [1]。这一阶段的工业机械臂主要服务于汽车、焊接、搬运和喷涂等高重复性、高危险性工位，其核心目标是以高速度、高刚度和高可靠性替代人工完成固定流程作业。随着伺服驱动、传感器、控制器和离线编程技术的发展，传统工业机械臂逐步形成了以固定工位、预设轨迹、高负载和高节拍为主要特征的自动化装备形态。由于这类系统通常具备较大的运动范围和末端力矩，为保证安全，传统工业机械臂往往需要通过安全围栏、光栅和隔离工位等设施，将人的活动范围与机器人工作空间分离。

协作机械臂则是在传统工业机械臂基础上发展出的另一条技术路线，其目标不再只是用机器替代人工，而是使机械臂系统能够在共享工作空间中辅助人完成任务。1996 年，Michael Peshkin 和 J. Edward Colgate 在通用汽车装配现场观察到工人需要将约 22 磅的加热和冷却装置放入仪表板开口，任务费力且容易造成腰背损伤，因而提出一种用于协助而非替代工人的装置思路 [2]。随后，“Cobot”这一概念以美国专利 US5952796A 的形式公开，专利将其描述为可与人直接物理交互的通用操纵装置，并强调通过计算机控制的可变传动结构引导、重定向或约束操作者运动 [3]。由此，协作机械臂逐渐从智能辅助装置（Intelligent Assist Device, IAD）发展为面向人机共域作业的新型机器人系统。

从系统特征看，协作机械臂通常以取消或弱化安全围栏、关节一体化、拖动示教和力感知控制为主要特点。它借助关节力矩传感、电流估计、碰撞检测和安全控制算法实现对外部接触的感知，并通过轻量化结构、较低运动速度、功率和力限制等方式降低人机接触风险。相应地，协作机械臂在安全性、易部署性和可编程性方面具有优势，适合小批量、多品种、需要人工参与或频繁调整的应用场景；

但其速度、刚度、负载和绝对精度通常低于传统工业机械臂。因此，传统工业机械臂更适合高节拍、高负载和高可靠性要求的固定工位，而协作机械臂更适合强调人机安全、柔性部署和快速示教的场景。

“协作”并不单指单台机械臂本体与人之间的接触关系，而是指机械臂系统与人之间在同一个工作空间通过人机合作共同完成任务。完整机械臂系统通常包括机械臂本体、末端执行器、任务相关传感器、工装夹具、安全装置以及支撑其完成任务的其他辅助设备。ISO/TS 15066:2016 对协作工业机器人系统及其工作环境提出了安全要求，并补充了 ISO 10218 系列标准中关于协作运行的要求和指南 [4]。按照该标准体系，常见人机协作运行方式可概括为安全监控停止、手动引导、速度与间距监控、功率和力限制四类，如图1-1所示。

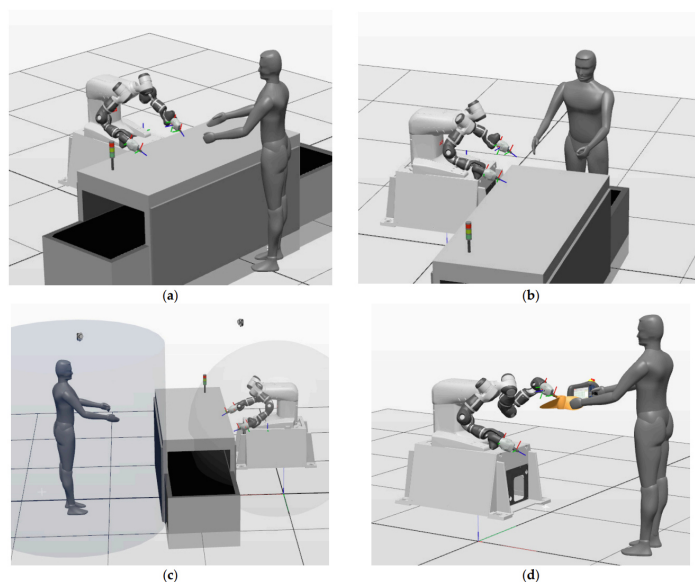


图 1-1 常见人机协作运行方式 [5]

其中，当前协作机械臂本体常见的安全实现更偏向功率和力限制，即从机械结构、驱动功率和控制策略上降低接触伤害风险。

经过长期发展，传统机械臂在正逆运动学、动力学建模、轨迹规划与伺服控制等方面已经形成较成熟的理论基础和工程方法。然而，在许多实际工业场景中，作业环境并非完全静态，目标物体的位置、姿态乃至周围障碍物都可能发生变化。此时，单纯依赖离线编程或预设轨迹的控制方式往往缺乏足够的环境适应能力，难以满足现代工业系统对高精度、高柔性和高自主性的要求。如何使机械臂具备更强的环境感知能力与在线调整能力，已成为机器人技术发展的重要方向。

视觉传感器具有非接触测量、信息维度丰富、成本相对可控等优点，能够获取目标的颜色、形状、位置等多种信息，是机器人感知系统中最重要传感器之一。将视觉信息引入机械臂控制闭环，利用图像或视觉特征误差直接修正末端运

动，即形成视觉伺服控制系统。与传统基于固定轨迹的机械臂系统相比，视觉伺服能够显著增强系统对未知环境和动态目标的适应能力，使机械臂具有更强的目标跟踪、误差修正和自主作业能力。

另一方面，从产业发展角度看，我国工业机器人整机性能不断提升，但在减速器、伺服驱动、控制器等关键环节仍存在一定的外部依赖。围绕机械臂本体、驱动系统、控制软件及感知算法开展自主设计和实现，不仅有助于提升多学科知识的综合运用能力，也具有一定的工程实践价值。因此，开展基于视觉伺服控制的六自由度机械臂设计与实现全流程研究，有利于我国机器人产业的全流程自主化，具有较强的理论意义和应用背景。

1.2 国内外研究现状

在机械臂本体研究方面，国内外针对六自由度机械臂的机构设计、运动学分析和动力学建模已经取得了较为成熟的成果。国外相关研究起步较早，在高精度减速器、高性能伺服驱动器、机器人控制器以及整机协同设计等方面积累了丰富的经验，形成了较成熟的产业生态。PUMA 560 作为早期六自由度串联工业机械臂的典型示例 [6]，其前三个关节主要用于实现末端三个位移自由度的定位，而后三个关节被特意设计成共轴构型（称为“球腕”），以便快速求解末端的旋转自由度，如图1-2所示。该类机械臂所体现的串联关节构型和球腕设计思路，对后续工业机械臂的结构设计产生了深远影响。相较之下，国内工业机械臂行业近年来虽发展迅速，已经形成了具有代表性的整机产品，例如遨博的 AUBO-i5、节卡的 JAKA Zu7 以及埃斯顿的 ER 系列等 [7-9]，但在部分核心零部件等领域仍需进一步加强自主研发能力。

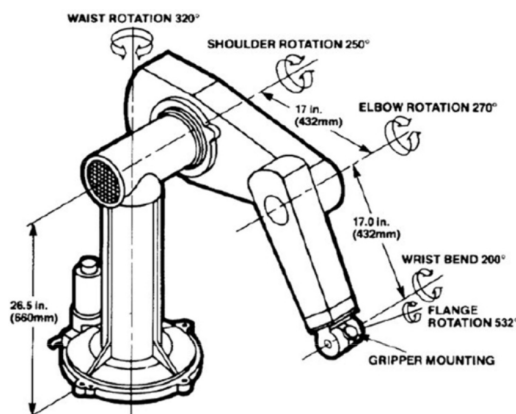


图 1-2 PUMA 560 机械臂构型图

在关节驱动与控制方面，早期的电驱动机械臂多采用开环非伺服结构，执行器以步进电机为主；而在需要连续轨迹、可变速度和更高动态性能的工业机械臂

中，则逐步转向带反馈的伺服驱动方案 [10]。以 PUMA 560 工业机械臂为例，其各关节采用带有编码器反馈的直流伺服电机 [11]。1972 年，Blaschke 等人提出磁场定向控制（Field-Oriented Control, FOC）思想 [12]，该方法标志着交流电机可以像直流电机一样实现磁链与转矩的近似解耦控制，成为后续高性能交流伺服电机的重要理论基础。到 1990 年前后，面向永磁同步电机的 FOC 控制器设计已经形成系统性的框架 [13]。随着微处理器、功率电子器件和高分辨率编码器的发展，永磁同步电机因其不需要电刷换向，能够实现长寿命、高功率密度、宽动态范围等优势逐步成为现代机器人关节的主流方案。近年来，工业级高性能伺服控制技术也开始出现在消费级机器人生态中，代表性开源项目有 Oskar 等人开发的 ODrive 项目 [14] 和 Benjamin 等人开发的 VESC 项目 [15]。

在安全人机交互和柔顺控制方面，Hogan 于 1985 年提出的阻抗控制理论为机器人在接触任务中统一描述位置误差、速度响应与交互力之间的关系奠定了基础 [16]。20 世纪 90 年代中后期，Peshkin 和 Colgate 提出协作机器人 Cobot 概念，将“与人协作而非隔离作业”作为机械臂设计的重要方向 [2, 3]。然而由于传感器和控制器性能等因素的限制，此时的工业机器人仍然局限于传统的位置、速度的刚性控制模式，柔顺性交互更多依赖末端力传感器、外部安全围栏和限位保护来实现。随着关节力矩传感器和高带宽伺服控制的发展，DLR 在 2000 年代推出的 Lightweight Robot 系统已将扭矩控制和阻抗控制作为面向人类环境的机器人的核心能力之一 [17]。进入 2010 年代后，KUKA 的 LBR iiwa 等量产协作机械臂进一步将七轴关节力矩传感、碰撞检测与阻抗控制接口产品化、标准化 [18]。近年来，Sami 等人利用动力学模型建立的末端外力观测器表现出良好的性能 [19]，以他参与研发的 Franka 的 Emika Panda 为代表的新一代协作机械臂强化了全关节力矩感知、碰撞反应与可调阻抗能力 [20]，说明接触力大小可调的阻抗控制已经从经典理论逐步发展为现代协作机器人必备的基础功能。

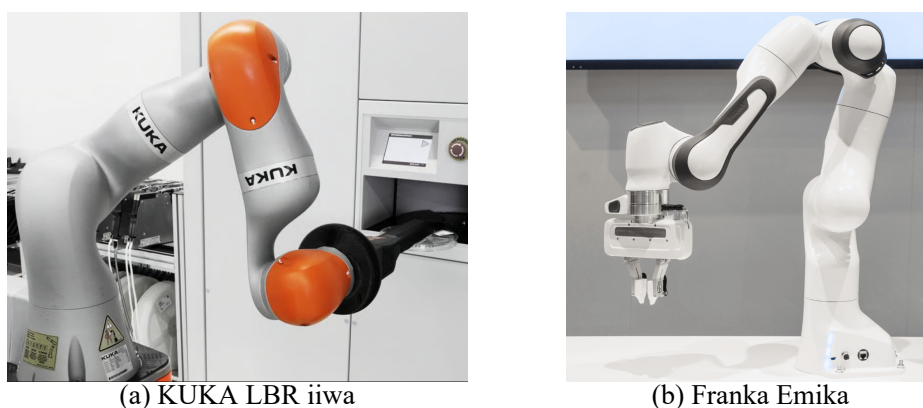


图 1-3 典型的七自由度协作机械臂

在机械臂控制系统方面，传统工业伺服领域中，可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controllers, PLC）长期占据着绝对优势，具有可靠性高、实时性强、抗干扰能力好以及便于与工业现场总线和自动化产线集成等特点。但随着机器人向高性能和多模态感知方向发展，传统 PLC 的开发灵活性和处理性能受到限制，因此消费级领域的机器人正逐渐转向基于 Linux 系统底层并能支持多种传感器和控制算法的中间件，例如机器人操作系统 ROS[21]。借助统一的消息通信机制、运动学描述接口和控制框架，研究人员可以更加高效地完成机械臂建模、仿真、状态可视化和控制接口开发，也能快速集成包括视觉传感器、激光雷达等多模态的传感器。因此，基于 ROS 进行机械臂控制系统设计已成为一种具有代表性的技术路线。

在环境感知和自主操作领域，基于视觉信息来控制机器人进行抓取的方案已经逐渐成熟，这方面的代表项目有 GraspNet[22] 等。然而，这些项目普遍难以单靠视觉信息来提取出目标的准确空间位姿，必须配合部分深度信息才能实现准确的重建。但是，同时配备视觉和深度传感器的 RGB-D 摄像头模组通常价格较为高昂，难以实现低成本高效部署。因此，有研究人员也对使用多个纯视觉传感器，或单个视觉传感器配合目标尺度这一先验信息来实现低成本位置估计的方案进行了探索，例如 AnyTeleop[23]，实验证明，单目方案固然与传统深度方案相比在任务完成时间和错误率上还有差距（如表1-1所示），但依靠单个 RGB 摄像头，同样可以完成基本的识别以及遥操作控制任务。

表 1-1 AnyTeleop 在不同相机配置下完成相同任务的时效对比 [23]

相机配置	完成时间/s	错误率/%
单个 RGB 相机	109s	28.1%
单个 RGB-D 相机	87s	21.8%
两个 RGB-D 相机	74s	12.5%



图 1-4 使用 AnyTeleop 进行手势遥操作 [23]

总体来看, 现有研究已经在六自由度机械臂的结构设计、控制算法以及感知算法等方面取得了大量进展, 但目前各种产品的软硬件规格和接口仍然百花齐放, 难以取得统一标准; 并且国外产品价格高昂、技术路线封闭不透明等问题, 仍然阻碍着我国工业级机械臂的自主化、国产化道路。

1.3 研究意义

本课题的研究意义主要体现在以下几个方面。

第一, 在工程应用层面, 带有接触力控制的成品协作机械臂系统普遍依赖于各关节末端安装的扭矩传感器来感知关节力矩, 增加了成本和系统复杂度。本设计利用现有的电机电流传感器来重构负载力矩, 同时提出了一种末端负载力估计方案, 实现了低成本高性能的柔顺控制效果。此外, 传统机械臂系统多依赖固定工位和预设轨迹, 对环境变化和目标偏移的适应能力有限。引入视觉伺服控制后, 机械臂能够利用实时图像进行在线修正, 提高目标跟踪和自主调整能力, 从而更好地适应复杂场景下的作业需求。

第二, 在系统实现层面, 本课题并非仅针对单一算法或单一部件展开研究, 而是围绕机械本体、驱动控制、通信架构、上位机软件和视觉方法开展完整设计。该过程涉及机械设计制造及其自动化专业所学习的机械原理、机械设计、控制理论、嵌入式系统、传感技术和软件开发等多方面知识, 具有较强的综合训练意义。

第三, 在研究价值层面, 本课题注重接口化、标准化的组件设计, 并将设计成果基本开源, 试图构建以国产芯片和自主设计驱动板为基础的通用控制与实验平台, 为后续开展更深入的自主化机械臂研究提供实验基础。

1.4 本设计研究思路

本设计以六自由度机械臂为研究对象, 围绕机械结构设计、电路系统设计、上位机控制器设计、视觉感知、样机制作与实验验证展开研究。

第二章从机械臂工作空间、带载能力、重复定位精度和视觉伺服响应频率等核心指标入手, 确定总体方案。在此基础上规划以机械本体层、关节驱动层、通信与接口层、控制逻辑层和视觉感知层五个部分为主体的系统架构, 明确各部分的技术路线。

第三章设计并装配机械臂的机械与电路硬件。根据工作空间要求, 确定机械臂各连杆尺寸并进行结构件建模, 在建模完成后进行仿真并结合带载能力确定各关节最大力矩, 选择适当的电机。然后设计基于磁场定向控制(FOC)的电机驱动

电路。此外，本设计提出一种基于霍尔传感器阵列的低成本旋转编码器方案，实现了对关节电机输出轴位置的精确传感。最后，将各构件加工完成后进行装配，装配过程中依据实际零件参数对模型参数进行校准。

第四章设计与实现机械臂的控制系统软件。本设计提出了一种层次化的关节电机控制软件系统，将硬件相关层与上层的设备抽象层、控制算法层、逻辑层和通信协议层完全解耦，实现了跨平台的软件架构。然后，设计关节驱动中的参数辨识、非线性校准等逻辑。在此之后，设计了基于 CAN 总线和 DroneCAN 协议的通信与接口层并进行了相应测试，然后设计基于 ROS 的上位机控制逻辑层，并提出了一种重力补偿和自适应末端负载辨识算法。

第五章设计基于单目 RGB 摄像头进行的手部跟踪与视觉伺服算法。明确视觉伺服模块的整体架构，然后在经过畸变校准的摄像头上利用 MediaPipe Hands 设计手部关键点识别逻辑，在能够准确识别到手部特征后，提出结合手部中心点与尺寸变换的六自由度跟踪算法。

最后，第六章通过实验来测试本设计所搭建机械臂的实际性能。本设计通过一组基本运动实验分别验证了关节控制系统的有效性、正逆运动学的准确性，然后通过重复精度实验验证机械臂的重复精度，通过重力补偿和末端负载辨识实验验证所提出的力控算法有效性，最后通过手部跟踪实验，验证了整体的视觉识别和闭环伺服控制架构均满足设计要求。

第二章 六自由度机械臂总体方案设计

2.1 系统需求与技术指标

本设计所设计的六自由度机械臂系统需要同时满足机械本体运动性能和控制与感知能力两方面需求。在机械本体方面，系统应具备完整的六自由度运动能力，能够覆盖典型实验场景下的三维作业范围，并具有一定的承载能力和重复定位精度。在控制与感知方面，系统应支持全关节力矩感知、基于动力学模型的阻抗和柔顺控制以及基于视觉信息的目标跟踪控制。

综合总体要求，本设计系统的主要技术指标可概括如下：

- (1) 机械臂工作空间达到约 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ ；
- (2) 末端执行器带载能力不小于 0.3 kg ；
- (3) 末端重复定位精度优于 $\pm 1\text{ mm}$ ；
- (4) 视觉伺服控制动态响应频率高于 10 Hz ；
- (5) 系统具备良好的扩展性，便于后续开展二次开发。

围绕上述指标，机械结构设计需要兼顾工作空间、承载能力和刚度要求；驱动系统设计需要保证电机输出能力、控制带宽和通信实时性；上位机与视觉系统设计需要保证信息处理效率和控制闭环稳定性。因此，本设计在总体方案设计阶段即需从机械、电控、软件和视觉等多个层面统筹考虑。

2.2 系统总体架构

本设计所设计的六自由度机械臂系统总体上可分为机械本体层、关节驱动层、通信与接口层、上位机控制层以及视觉感知层五个部分，其结构如图2-1所示。

机械本体层主要负责实现六自由度关节运动与末端执行器空间位姿调整。该部分包括各连杆、关节支撑结构、减速机构和末端安装平台等内容，是系统实现运动功能的物理基础。

关节驱动层主要负责各关节无刷电机的闭环控制。每个关节配置支持宽电压范围（DC12-60V）的独立驱动器，驱动器内部采用 ARM 架构的国产 32 位主控芯片结合 FreeRTOS 实时操作系统执行内层电流环、外层速度环和位置环控制，并完成参数辨识、状态采样、CAN 总线指令接收和状态上传等任务。

通信与接口层主要用于实现各驱动器与上位机之间的数据交互。本设计采用波特率为 1 Mbps 的 CAN 总线将多个关节驱动器串联起来，采用 XT30(2+2)PW 接口串联各节点，可兼顾实时性、布线简洁性与系统可靠性；通过 USB 转 CAN 适

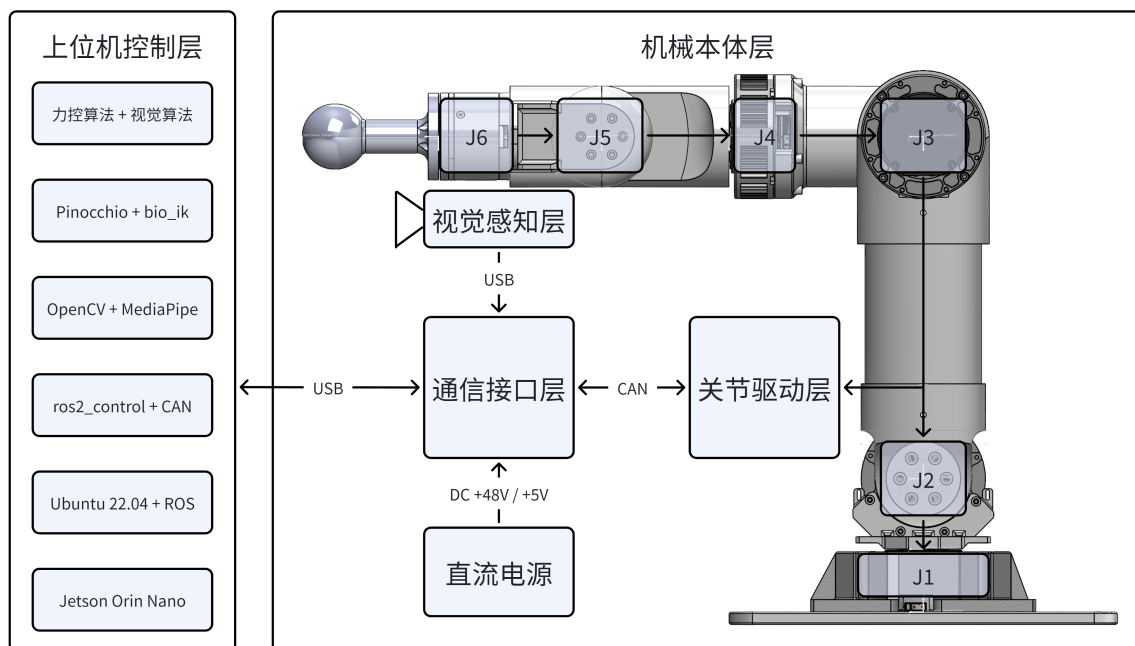


图 2-1 六自由度机械臂系统总体架构图

配器将驱动器与上位机相连，提供 ROS2 和 Python 的状态读取与控制接口，为实时控制与在线调试提供统一通信通道。

上位机控制层负责实现机械臂的高级控制逻辑，这部分实现在运行 Ubuntu 22.04 和 ROS2 Humble 的 Jetson Orin Nano 控制器上，包括关节命令下发、状态显示、模型解算、重力补偿、零力拖动及后续视觉控制指令输出等功能。实时控制部分以 PREEMPT_RT 内核配合 ros2_control 作为核心框架，结合 DroneCAN 协议的自定义接口实现整机控制。

视觉感知层主要由安装在机械臂末端的单目 RGB 摄像头构成，称为“眼在手上”架构，用于获取操作者手部的彩色图像。通过手部关键点提取、图像误差计算与伺服控制算法，可以输出机械臂末端速度修正指令，实现机械臂末端对手部运动的持续稳定跟踪。

上述五个部分相互配合，共同构成了一套从底层执行到上层感知与决策的完整系统架构。

第三章 机械臂硬件系统设计与实现

3.1 机械臂构型设计

机械臂本体设计是整套系统实现运动控制和视觉伺服功能的基础。根据课题任务要求，机械臂需具备六自由度运动能力，能够完成末端位姿调整、目标跟踪及后续扩展任务。为此，本设计首先依据机械臂工作空间需求，结合六自由度串联机械臂的典型结构形式，采用 D-H 参数法对机械臂的连杆关系和关节布局进行初步设计。通过对各连杆长度和关节运动范围的综合考虑，使机械臂在满足作业空间要求的同时，尽可能兼顾结构紧凑性与末端灵活性。

在结构实现方面，本设计以整体轻量化、便于加工装配和满足刚度要求为原则，对各关节连接件、连杆及安装支撑结构进行了设计。大部分结构件采用拓竹 PETG-Basic 材料以 3D 打印方式加工，其中受力较大的连杆（J2-J3）位置采用 3D 打印夹具配合 PVC 管件穿孔连接的方式增强结构强度。对于 3D 打印的结构件，在静力学仿真时以 PETG 材料的标准密度和 20% 填充率计算预估重量。

3.1.1 系统参数选择与建模

连杆参数的确定需要同时兼顾作业空间、结构紧凑性、末端姿态灵活性以及逆运动学求解的可实现性。本设计首先考察了市面上知名的六或七自由度协作机械臂连杆参数。考虑到本设计目标自由度为六个，因此对于七自由度产品，在考察时忽略其额外自由度，并将其折算为与本设计相近的串联构型。根据调研结果 [24-26]，对以下典型协作机械臂的连杆长度进行了整理，并计算出部分相邻连杆长度的比值，如表3-1所示。

表 3-1 典型协作机械臂连杆长度调研结果

型号	$J2'J3$ (mm)	$J3'J4$ (mm)	$J4'J5$ (mm)	$J5'J6$ (mm)	$J3'J4$ $/J2'J3$	$J5'J6$ $/J2'J3$	伸展高度 (mm)
UR3e	243.6	250.3	85.4	92.1	1.028	0.378	671.3
UR5e	425.0	414.2	99.7	99.6	0.975	0.234	1038.5
AUBO i5	408.0	376.0	102.5	94.0	0.922	0.230	980.5
珞石 ER3	391.8	220.0	146.0	186.7	0.562	0.477	944.5
珞石 ER7 Pro	437.5	211.1	202.5	208.1	0.483	0.476	1059.2
本设计	220.0	125.0	82.0	105.0	0.568	0.477	532.0

除工作空间与受力需求外，本设计在构型设计中还特别考虑了六自由度机械臂逆运动学的解析求解条件。**Pieper** 在其博士论文 [27] 中指出，当六自由度串联机械臂存在连续三个旋转关节轴线交于一点（球腕结构）或连续三个旋转关节轴线平行（平行结构）时，其位置与姿态子问题可以被适当解耦，从而可以求出解析形式的逆运动学解。这一结论后来常被概括为 **Pieper** 判据，其中球腕结构即为工业机器人中典型的前三轴（称为肩关节）决定腕心位置，后三轴（称为腕关节）控制末端姿态的构型。

结合现有产品的构型图可以看出，调研的几款协作机械臂虽然各连杆长度、伸展高度均不尽相同，但根据其主要自由度的连杆比值（如 J3-J4/J2-J3、J5-J6/J2-J3）可以分为以丹麦 **UR** 机械臂为代表的一组，和以珞石机械臂为代表的一组，如图 3-1 所示。通过结构分析，可以得知 **UR** 组的 2、3、4 轴关节旋转轴线平行，采用的是 **Pieper** 平行构型；而珞石组的后三轴（腕关节）旋转轴线交于一点，采用的是 **Pieper** 球腕构型。

进一步分析这两组构型可以发现，平行构型与球腕构型虽然都满足六自由度

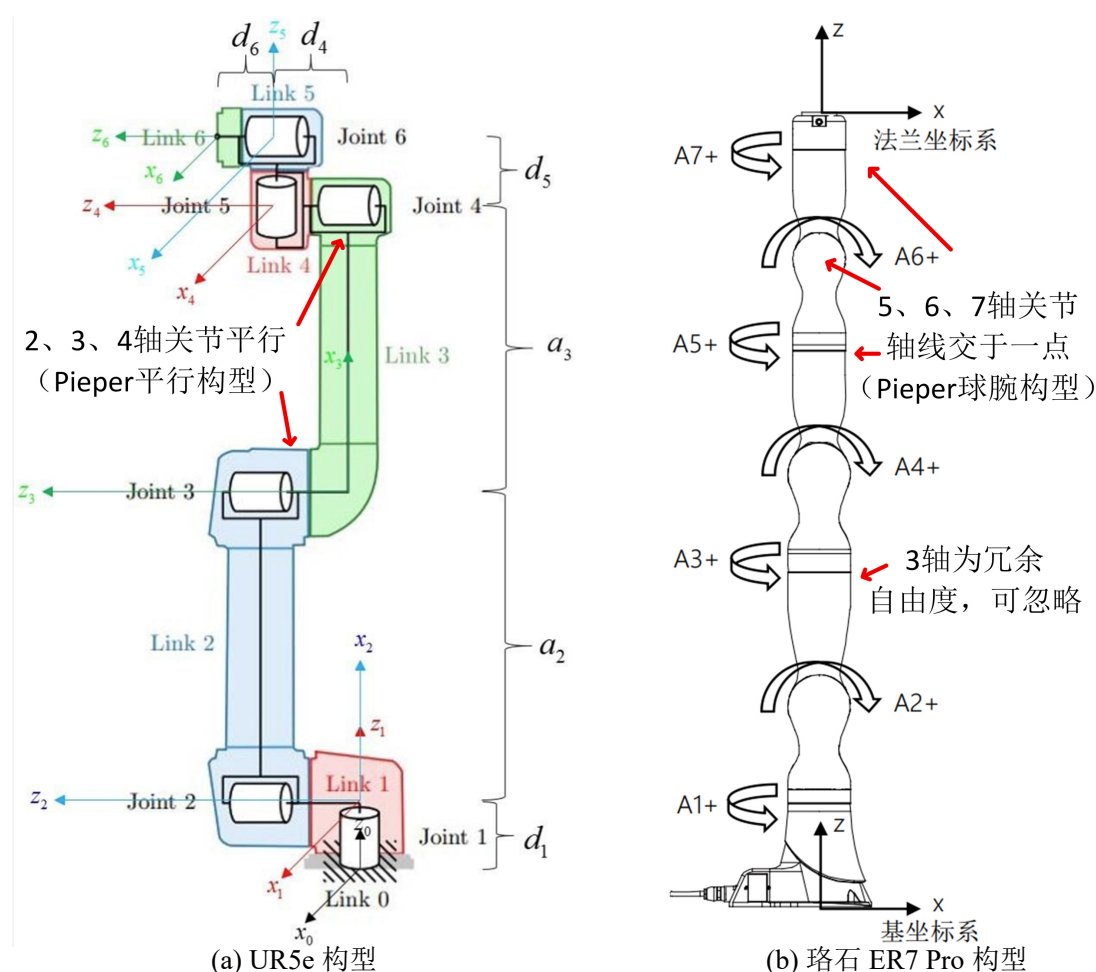


图 3-1 两种典型的 Pieper 构型对比图

机械臂解析逆运动学的基本条件，但其侧重点并不完全相同。对于 UR 组这类平行构型，其整体结构通常更加紧凑，前后臂段的质量分布也更有利于形成较小的整机包络，因此在协作机器人中具有更好的轻量化和近身操作优势。然而，这类构型在末端姿态变化较大时，腕部各轴之间的姿态耦合相对更强，末端执行器的方向调整往往需要前三轴与后三轴共同参与补偿，不利于将位置控制与姿态控制在结构层面进行清晰分工。

相比之下，珞石组所代表的球腕构型在后三轴处形成近似理想的姿态机构，其腕心位置主要由前三轴决定，而末端姿态则更多由后三轴独立调整。机械臂在保持腕心位置不变的条件下，可以利用后三轴实现较大的姿态重构范围，末端更灵巧，更适合抓取、装配和视觉引导等对末端朝向调整要求较高的任务。同时，球腕构型下末端工具坐标系的几何关系更直观，方便根据腕心位置和工具姿态分别建模求解，也更利于后续在视觉伺服中去规避奇异空间，因此本设计最终确定使用球腕构型作为参考。

在确定了以球腕构型组为参照进行连杆设计后，本设计首先根据目标工作空间选择了预期的最大伸展高度。为了避免受到关节完全伸展的奇异点影响，对于 0.5m 半径的工作空间，最大伸展高度应当稍大于 0.5m，因此最终确定以 0.532m 作为最大伸展高度。然后综合考虑球腕构型组各连杆的相对比值，乘以最大伸展高度后依次得到各连杆长度参数，如表3-2所示。根据连杆长度和电机布置位置进行整体装配体建模，装配体示意图如图3-2所示。

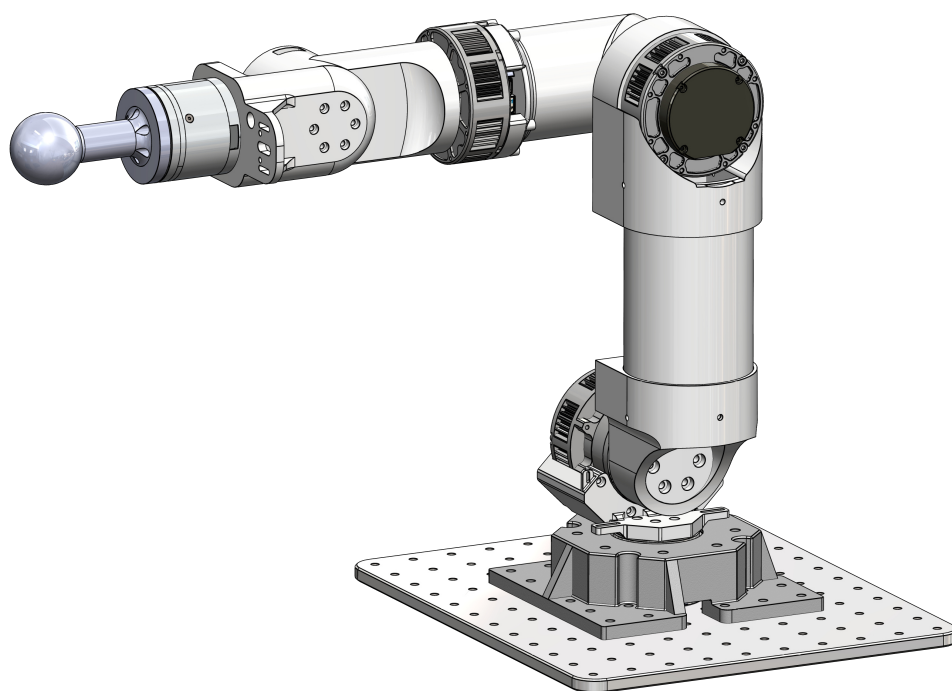


图 3-2 机械臂装配体示意图

表 3-2 机械臂主要连杆长度表

连杆区间	长度/mm	说明
$J2-J3$	220	大臂连杆
$J3-J4$	125	小臂连杆
$J4-J5$	82	腕部过渡段
$J5-J6$	105	末端安装段

为了严格遵循 Pieper 球腕判据，本设计将末端三个关节 $J4$ 、 $J5$ 和 $J6$ 设计为轴线交汇的腕部结构，这些关节的旋转轴线交于 $J5$ 的中心位置，如图3-3所示。

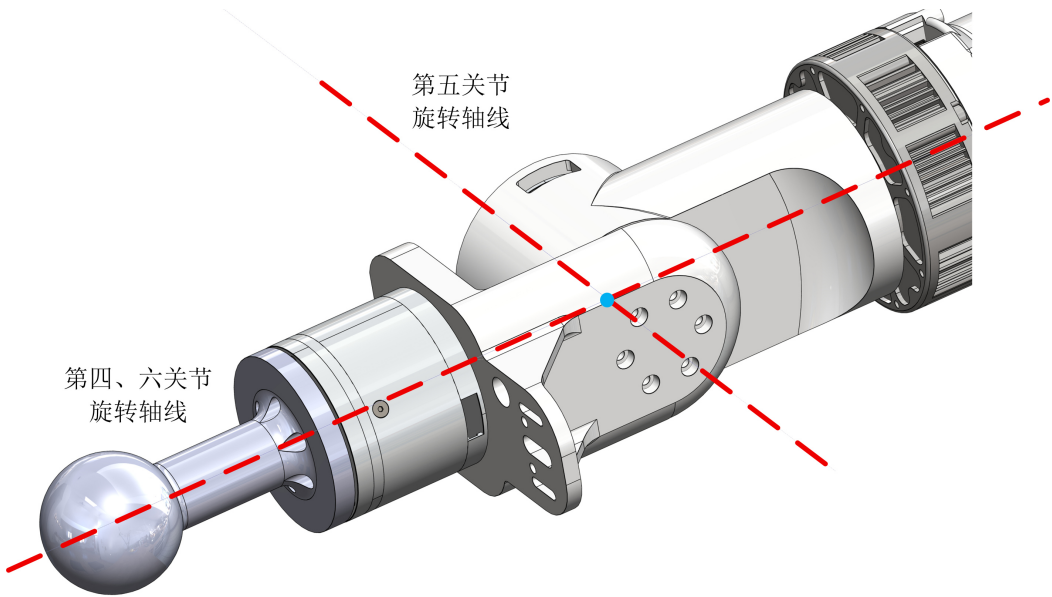


图 3-3 球腕结构示意图

设计完成后，综合考虑工作空间要求和安全余量，制定了各关节的最大旋转角度表，如表3-3所示。

表 3-3 关节最大旋转角度表

关节名	逆时针极限/ $^{\circ}$	顺时针极限/ $^{\circ}$
$J1$	-180.0	180.0
$J2$	-95.0	95.0
$J3$	-160.0	160.0
$J4$	-180.0	180.0
$J5$	-110.0	110.0
$J6$	-180.0	180.0

3.1.2 工作空间可视化分析

在构型设计完成后，需要首先验证该构型的末端工作空间是否满足设计目标。本设计使用 MATLAB R2025b 软件，通过在各关节限位范围内采样关节空间得到末端位置点云，再对点云进行包络面提取，得到工作空间的包络面并进行可视化分析，如图3-4所示。

为了直观的分析工作空间是否满足设计要求，本设计将工作空间分别投影到 XoY 平面和 XoZ 平面进行分析, 如图3-4(b)和3-4(c)所示。

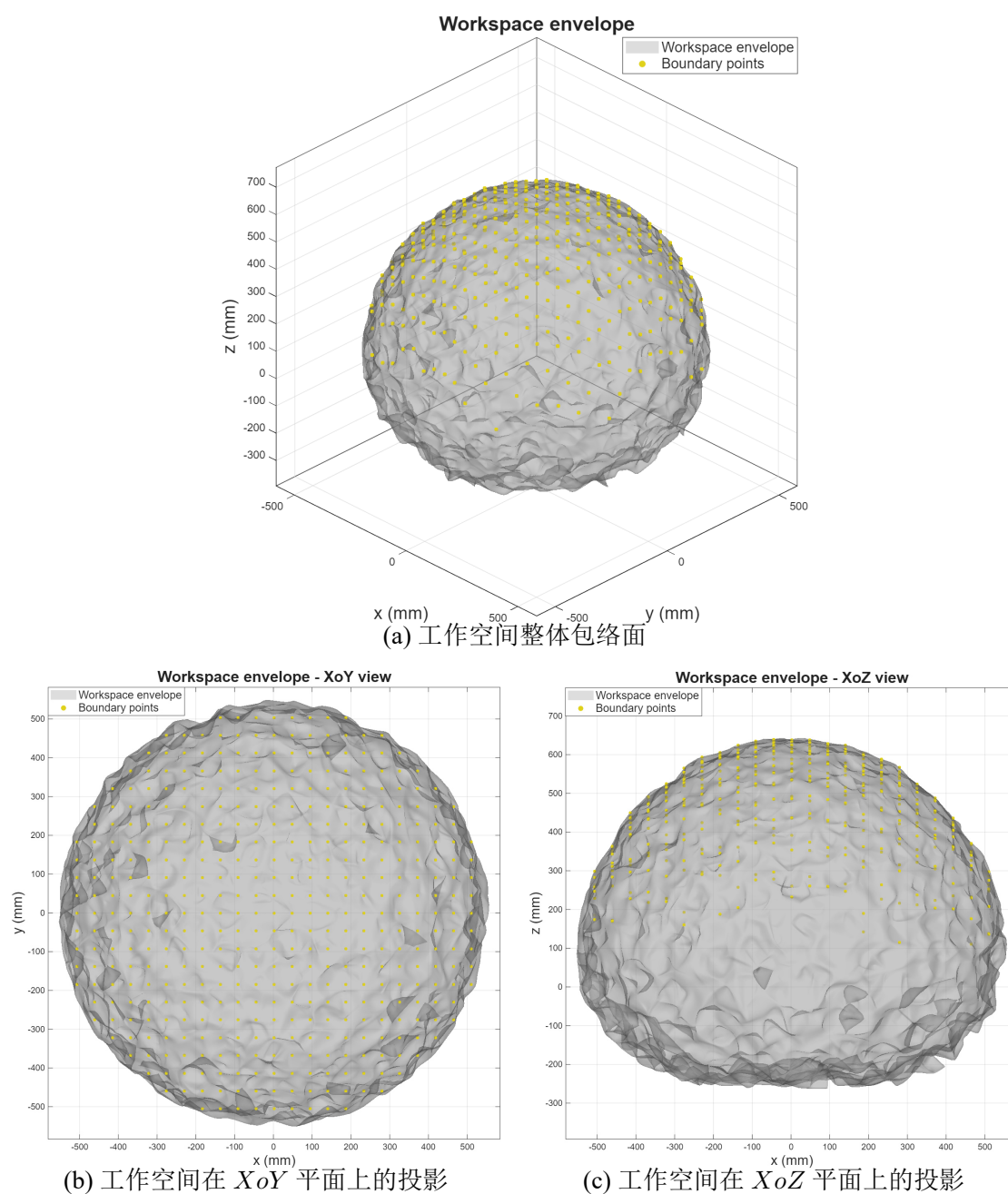


图 3-4 机械臂工作空间可视化分析结果

结合图3-4(b)和3-4(c)可知,机械臂的水平和垂直伸展范围极限均满足 $\pm 0.5\text{ m}$ 的设计目标。

3.1.3 静力学与运动学仿真

本设计结合末端设计载荷和各构件质量分布,使用 MATLAB R2025b 的 Robotics System Toolbox 工具箱计算机械臂各关节承受的力矩,使用 ANSYS Workbench 2025 R2 软件对单独构件进行静力学分析,使用 RoboDK 软件进行运动学仿真。

首先,在 MATLAB 中导入机械臂模型,将模型简化成连杆-关节的串联形式,其中圆柱体代表关节,圆柱体的轴线代表关节旋转轴线,如图3-5所示。能够得出在 $J2$ - $J3$ 连杆和 $J3$ - $J4$ 连杆均水平时,机械臂处于最大伸展水平位姿,也称为最不利构型 [28],此时存在底座最大倾覆力矩和肩关节最大弯矩。

在机械臂底座以底面朝下装配时,对于 $J1$ 关节,其主要承担的是沿轴线方向上的切应力而并非电机的扭矩,因此应当选择电机外壳和螺纹强度较高的型号;对于 $J4$ 关节,其力矩要求可略微大于主要承力的 $J5$ 关节;对于 $J6$ 关节,因其主要负责工具坐标系的自旋,因此当负载可等效为质点并加载在末端坐标系原点时, $J6$ 电机所受扭矩也可忽略不计,因此仅需要对 $J2$ 、 $J3$ 和 $J5$ 关节扭矩进行计算。

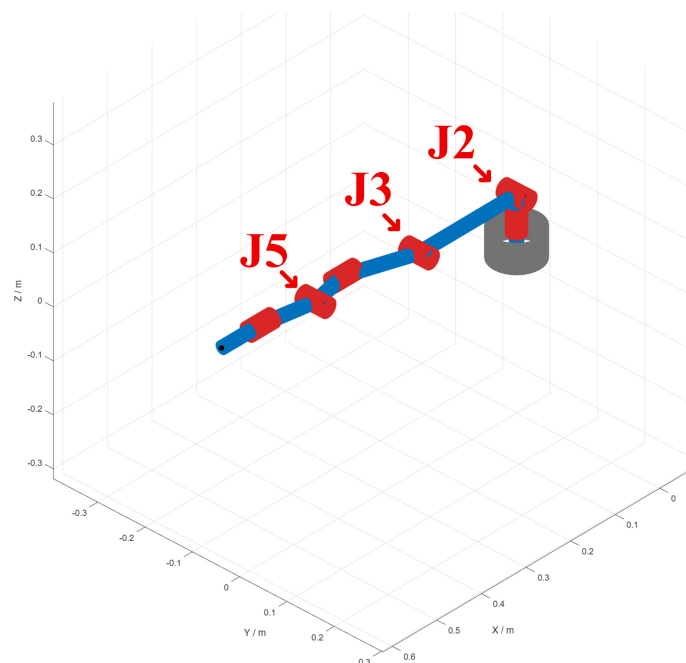


图 3-5 最大伸展水平位姿（最不利构型）示意图

此时,将负载等效为质点加载在末端坐标系的原点上,选取最大负载为 5 kg ,以 0.5 kg 为步进,作出 $J2$ 、 $J3$ 和 $J5$ 的关节扭矩随末端负载变化的示意图,如

图3-6所示。

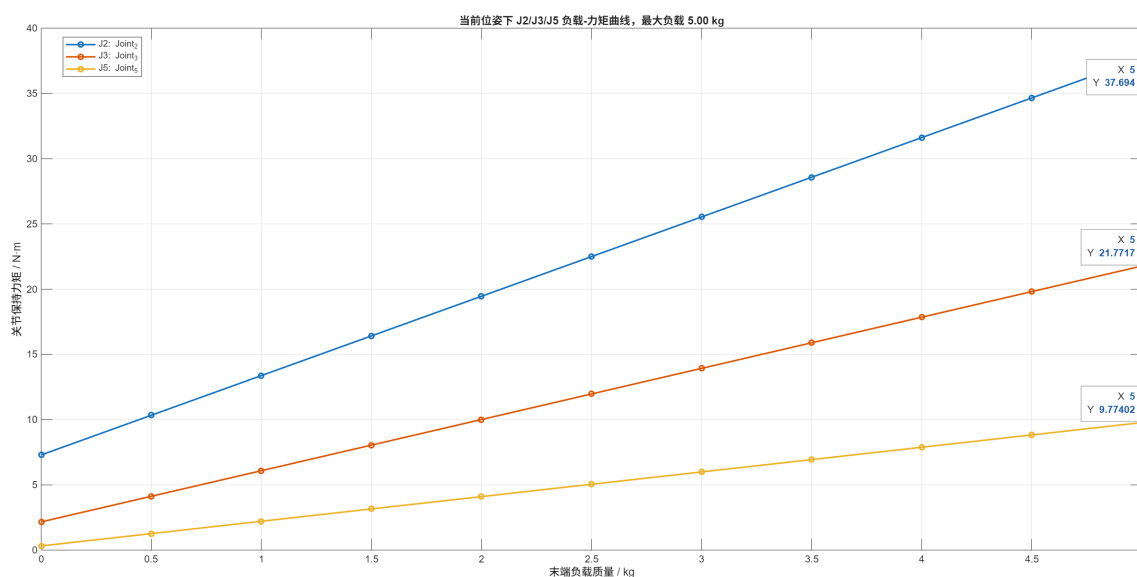


图 3-6 $J2$ 、 $J3$ 和 $J5$ 扭矩随末端负载变化示意图

由图可知，在负载 5 kg 时， $J2$ 所受力矩为 37.7 Nm， $J3$ 所受力矩为 21.8 Nm， $J5$ 所受力矩为 9.8 Nm。

针对关键承力构件，本设计采用 ANSYS Workbench 的静态结构模块进行静力学仿真分析，用于评估极限载荷工况下结构件的应力分布与变形情况。查阅资料 [29, 30] 分别得到 PETG Basic 材料和 PVC-U 管材的材料参数并分别导入 ANSYS，如表3-4所示。

表 3-4 PETG Basic 与 PVC-U 管材的材料参数表

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比	拉伸强度/MPa	剪切模量/MPa
PETG Basic	1250	2550	0.38	35	924
PVC-U	1450	3000	0.40	48	1050

通过力矩计算可知， $J2$ 、 $J3$ 和 $J5$ 关节所受扭矩较大，因此需对这几个关节的前后连杆、底座等进行强度校核。为提高计算效率并保证网格质量，在不影响整体受力传递的前提下对模型进行简化，去除螺纹等细节，保留关节安装面、连杆主体。电机和减速器整体采用在实际安装面上等效载荷的方式处理。仿真中将各构件的安装面设置为固定约束，只考虑该构件受上层结构的作用力和力矩，依次校核等效（von-Mises）应力和总变形，并与屈服强度对比，计算出最小安全系数。

为获得保守结果，选取机械臂最大伸展水平位姿作为典型静力学工况，末端负载按最大载荷 5 kg 等效为力矩，取安全系数为 2.0 进行计算。由于熔融层积成型技术（FDM）打印件存在各向异性，本设计采用 Z 向拉伸强度作为保守参考值。

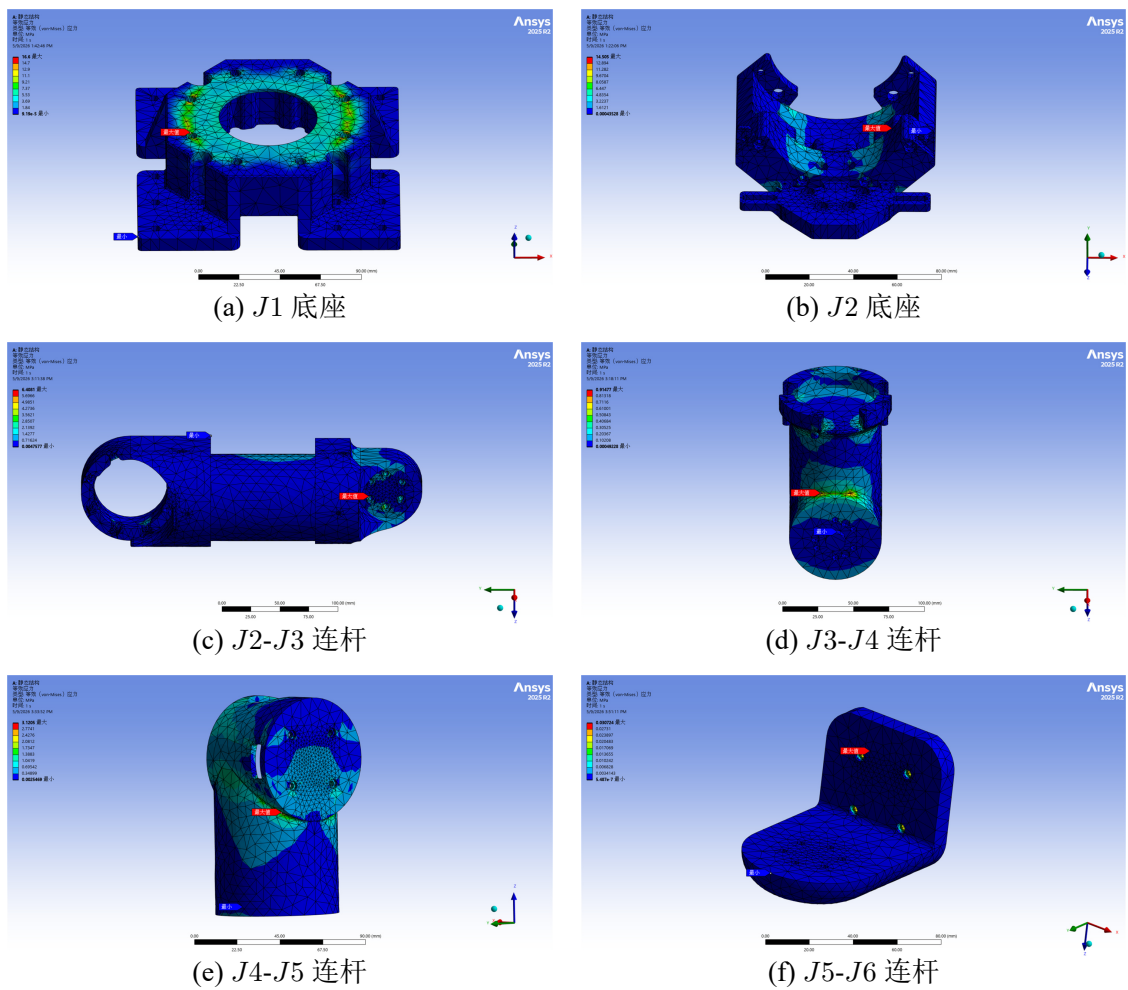


图 3-7 主要构件的 ANSYS 等效应力仿真云图

对主要构件依次进行仿真，得到等效应力云图如图3-7所示。整理数据得到仿真结果表3-5，分别计算出各构件安全系数均大于 2.0，证明强度满足设计要求。

表 3-5 ANSYS 静力学仿真结果表

构件	最大等效应力/MPa	最大变形/mm	材料屈服强度*/MPa	安全系数
J1 底座	16.6	0.40	35	2.1
J2 底座	14.5	0.12	35	2.4
J2-J3 连杆	6.4	0.48	48	7.5
J3-J4 连杆	0.92	0.02	35	38.0
J4-J5 连杆	3.12	0.15	35	11.2
J5-J6 连杆	0.03	0.01	35	>100

* 对于 3D 打印件，以 Z 向拉伸强度作为保守屈服强度参考值。

本设计采用 RoboDK 进行运动学仿真，将配置好关节限位的 URDF 模型导入 RoboDK 软件中，在工作空间内给定一组连续的期望位姿，系统能够平滑的依次运动到指定目标，如图3-8和3-9所示。仿真结果表明，当前六自由度串联构型能够覆

盖预期的前向抓取和姿态调整区域，其中肘部与腕部的组合运动可提供较好的末端姿态灵活性，且过程中无关节位置跳变，说明机械臂各连杆长度取值以及布局较为合理。

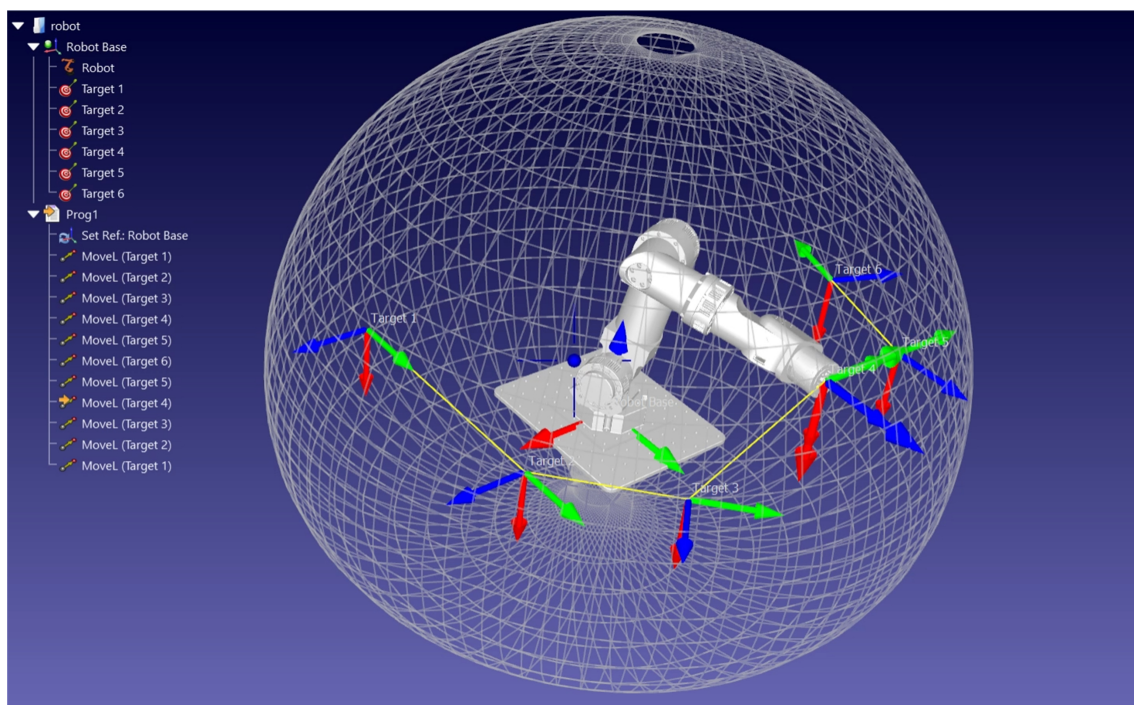


图 3-8 RoboDK 运动学仿真界面

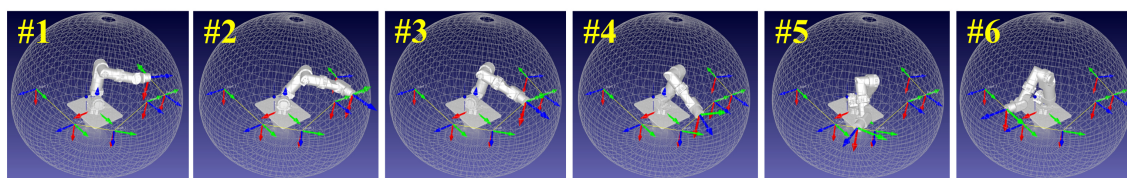


图 3-9 RoboDK 运动学仿真步骤

3.1.4 关节电机选型

关节电机选型以静力学仿真结果为基础，并综合考虑减速器传动能力、目标动态性能以及驱动器电流能力等因素。根据各关节在典型姿态下的受力情况（图3-5、3-6），本设计优先提高肩肘关节的输出力矩裕量，以保证机械臂在负载作用下仍具有较好的姿态保持能力和轨迹跟踪能力。

结合机械臂建模设计以及静力学仿真结果，各关节的设计输出力矩指标如表3-6所示。其中， J_2 与 J_3 处于主要承载位置，额定扭矩设计为 27Nm，最大扭矩可达 70Nm； J_1 负责基座回转，对低速大惯量工况的稳定性要求较高； J_4 至 J_6 则以姿态调整为主，因此为了尽量降低关节末端的转动惯量和重量，在保证紧凑性和响应速度的前提下适当降低力矩等级。

表 3-6 各关节设计输出力矩指标

关节	主要功能	额定扭矩/Nm	最大扭矩/Nm
J1	基座回转	7.5	22
J2	肩关节抬升	27	70
J3	肘关节摆动	27	70
J4	腕部俯仰	5.4	17
J5	腕部偏转	3.5	12.5
J6	末端回转	3.5	12.5

3.2 驱动系统硬件设计

本设计自主开发了用于无刷电机控制的驱动系统硬件。考虑到选用的各关节电机规格不同，开发了两款驱动板，如图3-10和3-11所示。驱动板经过多轮迭代优化后形成最终版，其最大输入电压为 60V，电流采样范围为 $\pm 33\text{A}$ ，额定工作电流为 10A。主控芯片选用雅特力科技的 AT32F403A，该芯片采用主频 240MHz 的 Cortex-M4F 内核，具备较强的实时运算能力，能够支持高频电流环控制任务。

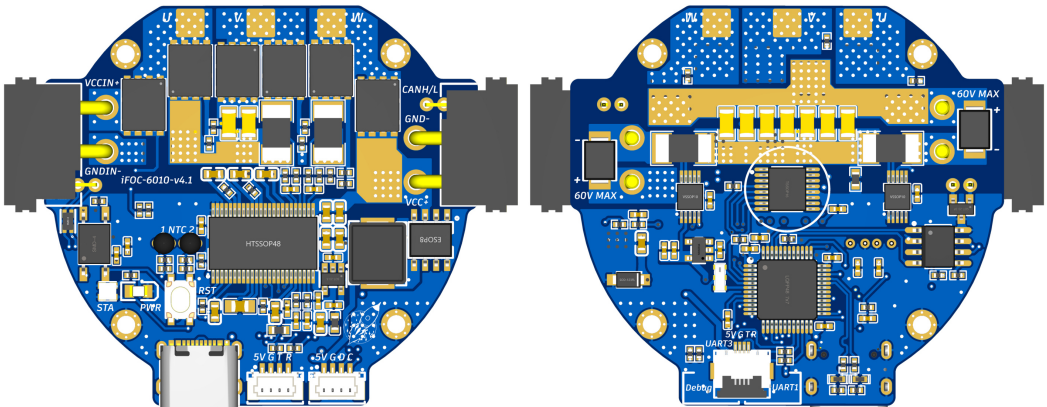


图 3-10 J1-J4 关节电机驱动板

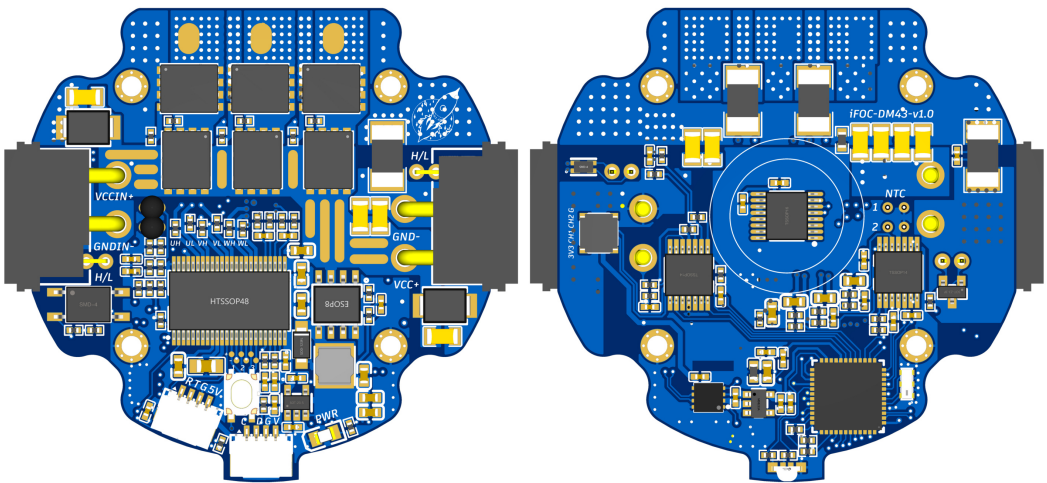


图 3-11 J5-J6 关节电机驱动板

在功率驱动部分，驱动板采用三相全桥逆变器结构，选用华羿微电子的 HYG053N10NS1C2 NMOS，其额定耐压 100V、最大过流 95A。驱动芯片采用 TI 公司的 DRV8303 栅极驱动芯片，其最大输入电压 65V，具有 1.7A 拉电流、2.3A 灌电流的驱动能力。在电流采样部分，本设计采用低侧采样方案，通过 2512 封装、最大热耗散功率 6W 的 5 mΩ 锰铜电阻进行分压，并结合放大倍数为 20 的电流采样放大电路实现电流信号反馈。根据欧姆定律计算，在 33A 电流条件下采样电阻的热功率约为 5.45W，处于热耗散功率允许范围内。针对多节点串联供电与大电流回路场景，驱动板在版图设计中还采用了导流铜条、大面积开窗灌锡以及电源/信号一体化接口等工程措施，以兼顾导通能力、装配便利性和结构紧凑性。

两种驱动板的原理图附于附录A-1(a)和A-1(b)中。

3.3 输出轴编码器设计

对于带减速箱的驱动器，特别是应用于机器人关节的驱动器而言，输出轴位置的绝对传感非常重要。用于检测转子电角度的传感器（称为主编码器）通常设置于减速箱之前，而减速后的输出轴累计转动角度一般由程序算法通过累加计数得到。这导致一旦驱动器下电，累加值清空，系统就会失去准确的输出轴角度。针对此问题，目前有两种较为常用的解决方案，一是存储下电前的累计位置，二是保持驱动板低压部分持续供电，由此实现持续的角度累加。对于方案一，若下电后输出轴被意外转动，则存储结果不可信；对于方案二，额外的备用电池既无法保证极端环境下的安全性，又对系统的维护提出了新的难题。基于此，本课题决定自主设计基于霍尔原理的空心编码器来实现输出轴绝对位置传感。第二编码器设置在电机减速箱之后、输出端之前，如图3-12所示。



图 3-12 第二编码器示意图

线性霍尔测量角度的原理是利用永磁体旋转过程中磁场方向的变化，在传感器端获得近似正弦和余弦关系的电压信号，再通过反正切恢复角度信息。如图3-13所示，常见的环形永磁体根据充磁方向的不同，可分为轴向充磁（a、b）和径向充磁（c、d）两类。针对角度检测的应用，由于环形磁铁与电机旋转轴同心，因而要想检测出沿轴线的旋转运动，磁场随角度的变化必须体现在环形磁铁的径向上。由此，只能选择径向充磁的环形永磁体作为角度检测的载体。

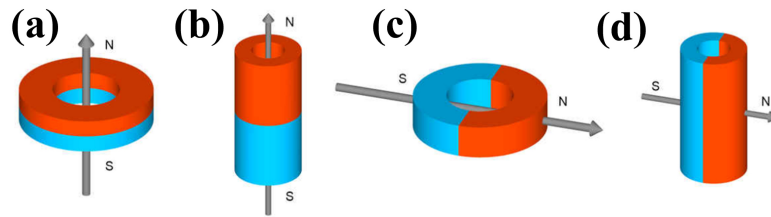


图 3-13 环形永磁体分类

根据径向磁铁的充磁特性可以得知，若线性霍尔传感器的检测面垂直于磁体法向方向，则磁体匀速旋转一圈，霍尔传感器的读数应当是一个均匀变化的类正弦曲线。此时再在与已有传感器检测面中点与圆心连线的 90 度位置上放置另一个相同的线性霍尔传感器，则其读数应当相对于原曲线发生相位移动，即类余弦曲线。根据反正切函数的定义可得，通过已知相位差的正弦和余弦信号输入，即可解出当前的磁体旋转角。因此，传感器布置如图3-14所示。

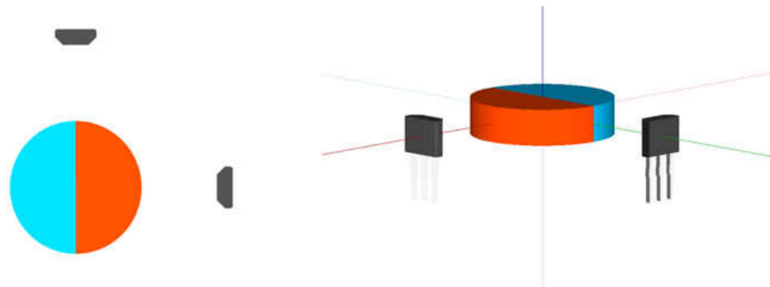


图 3-14 第二编码器传感器布局

由于传感器的一致性误差以及安装不平整、磁体与电机轴不完全同心等因素，两个传感器的读数在峰峰值、线性度上均可能有所差异，且该差异需要实际安装固定到电机输出端之后才能够稳定下来。因此，需要对传感器数据进行标定和预处理。处理方法通常可分为峰值标定、查找表标定以及峰值加查找表的混合标定[31]。其中，峰值标将信号归一化后代入反正切函数求角度；查找表标定则在若干已知角度处分别记录两个传感器的输出，不使用反正切函数，而是直接通过双输入单输出的查找表插值获得中间角度；混合标定先利用峰值归一化获得正余弦信号，求出角度后再以单输入单输出的查找表对误差进行补偿，同时解决了传感器

一致性误差和角度非线性误差的问题。

综合上述标定方法，本设计采用峰值校准加查找表修正的标定方式。首先，系统自动检测两路差分信号在完整转动过程中的峰值和谷值，并据此完成幅值归一化，使两路信号尽可能接近理想正交正弦波；然后，在已知角度位置处记录实际测量值与理想角度之间的偏差，生成角度查找表，对原始反三角函数解算结果进行补偿。该方法实质上结合了峰值标定与查找表标定两类思想 [31]，能够在不显著增加硬件复杂度的前提下，提高输出轴角度测量的准确性和一致性。

此外，本设计还采用了差分传感器阵列来降低测量噪声、提升角度测量精度。具体而言，编码器在圆周四边各布置一个霍尔传感器，相邻传感器在空间上构成 90 度夹角，对侧两个传感器形成一组差分通道，理论上受到相近的共模磁场扰动和电源噪声影响，其信号幅值相同、相位反向，传感器阵列和信号示意图如图3-15所示。这样，四个传感器可组合为两路相互正交的检测信号，将其送入差分放大器后，可抑制噪声叠加到采样路径上的共模分量，提高输出信号的抗干扰能力和幅值一致性。

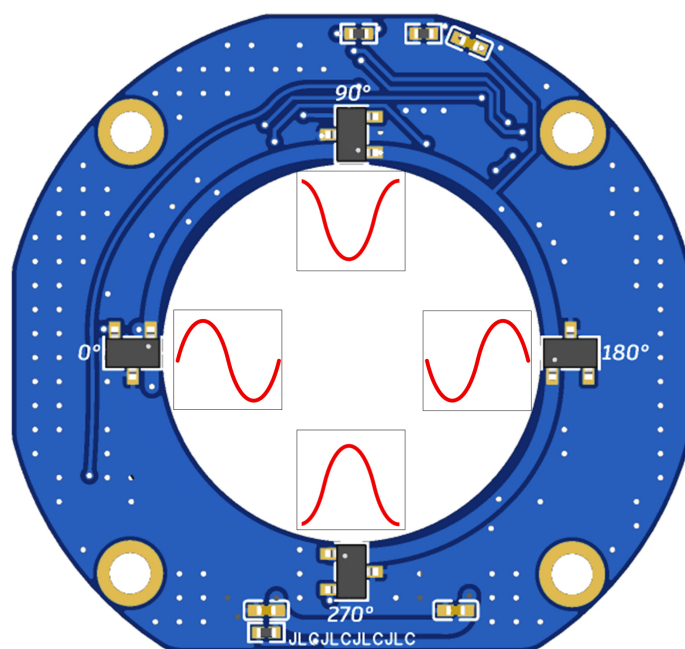


图 3-15 差分传感器阵列

3.4 机械臂整体总装

考虑到机械臂动力学性能与各构件实际质量密切相关,本设计在结构加工完成后,对各构件进行了逐一称重,各部件称量结果如图3-17所示,将实测重量按构件组合列成表格,如表3-7所示。再将结果分别回填至三维模型中,通过 SOLIDWORKS 的 Mass Properties 界面可进一步求得各连杆的质心位置和惯性矩等动力学参数,如图3-16所示,并结合导出的 URDF 描述文件,在上位机中建立准确的机器人模型。

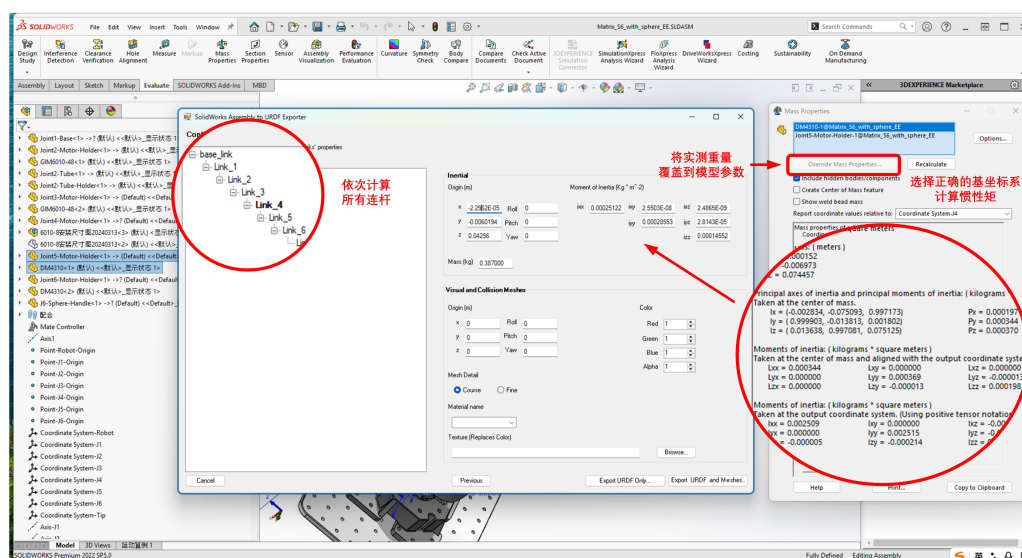


图 3-16 按实际重量计算运动学参数

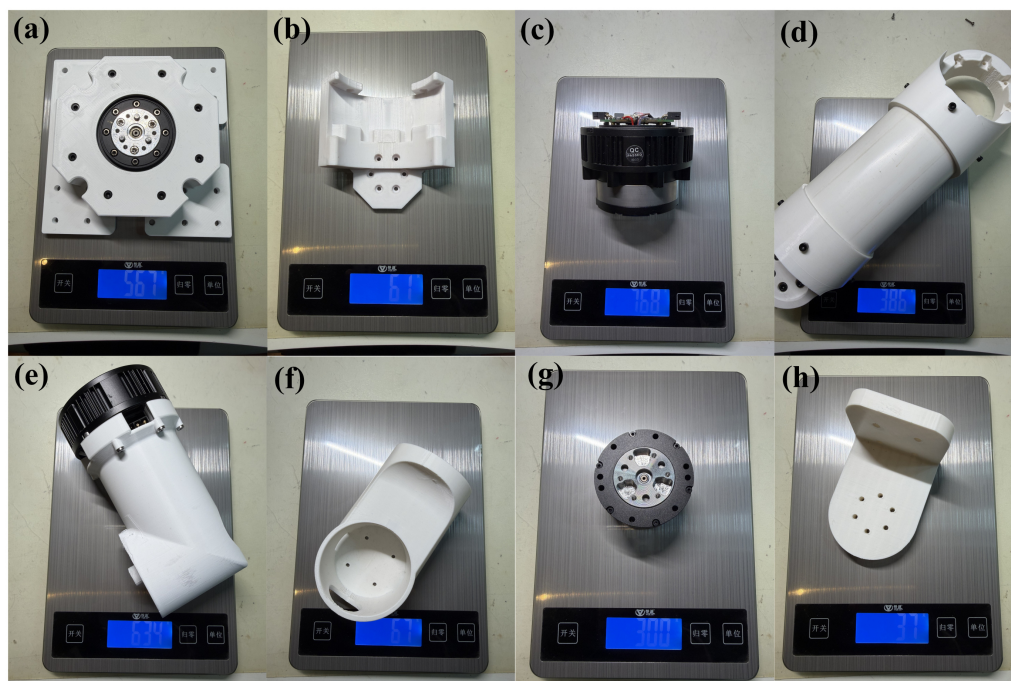


图 3-17 构件称量结果图

表 3-7 构件重量表

序号	构件名	重量 (g)	序号	构件名	重量 (g)
a	J1 电机和基座组合体	567	e	J4 电机和连杆组合体	634
b	J2 支撑座	61	f	J5 支撑座	67
c	J2、J3 电机	768	g	J5、J6 电机	300
d	J2-J3 连接件组合	386	h	J6 支撑座	37

整体总装按照由底向上的顺序进行。首先将各关节电机与支撑座组装到一起形成连杆组件，再将各连杆按顺序装配好，在螺纹连接处施加螺纹胶。整体总装完成后，需要对机械臂的运动进行初步调试，包括测试各关节在未通电时运动是否顺畅、是否有卡滞，检查各关节的输出轴旋转方向，检查各构件是否结合紧密，有无松动，若有松动需要重新装配。初步调试完毕后的机械臂整体如图3-18所示。

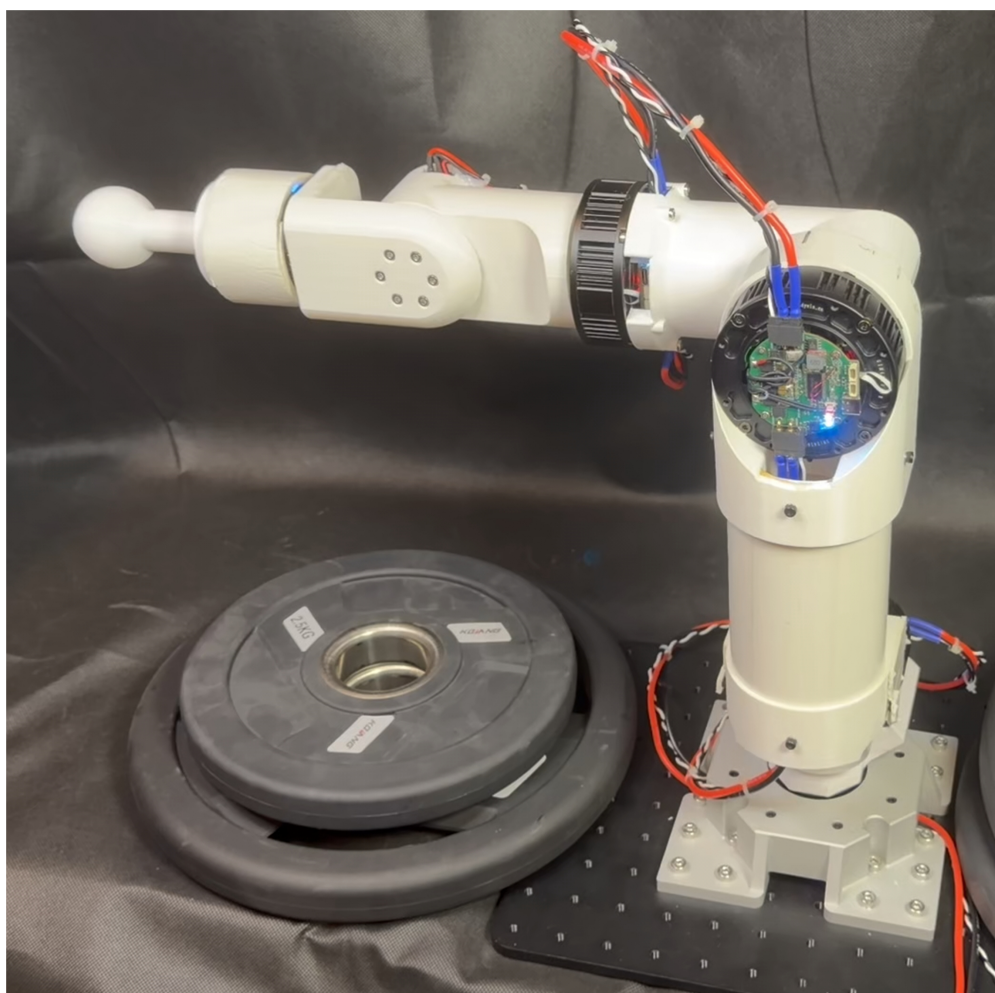


图 3-18 机械臂整体总装图

第四章 机械臂控制系统设计与实现

4.1 关节电机控制系统

4.1.1 整体架构

针对机械臂控制的高实时性、高柔顺性要求，本设计自主开发了一套关节电机嵌入式控制系统软件 [32]。

本设计将硬件相关的硬件抽象层（HAL）和硬件无关的逻辑和算法层拆分开来，通过 C++ 语言的虚函数和继承机制实现统一的接口，这套低耦合的方案不仅规避了移植到不同平台时繁琐的操作，对于上层调用者来说更能隐藏具体的实现细节，达到各模块相互解耦的效果。整体架构图如图4-1所示。

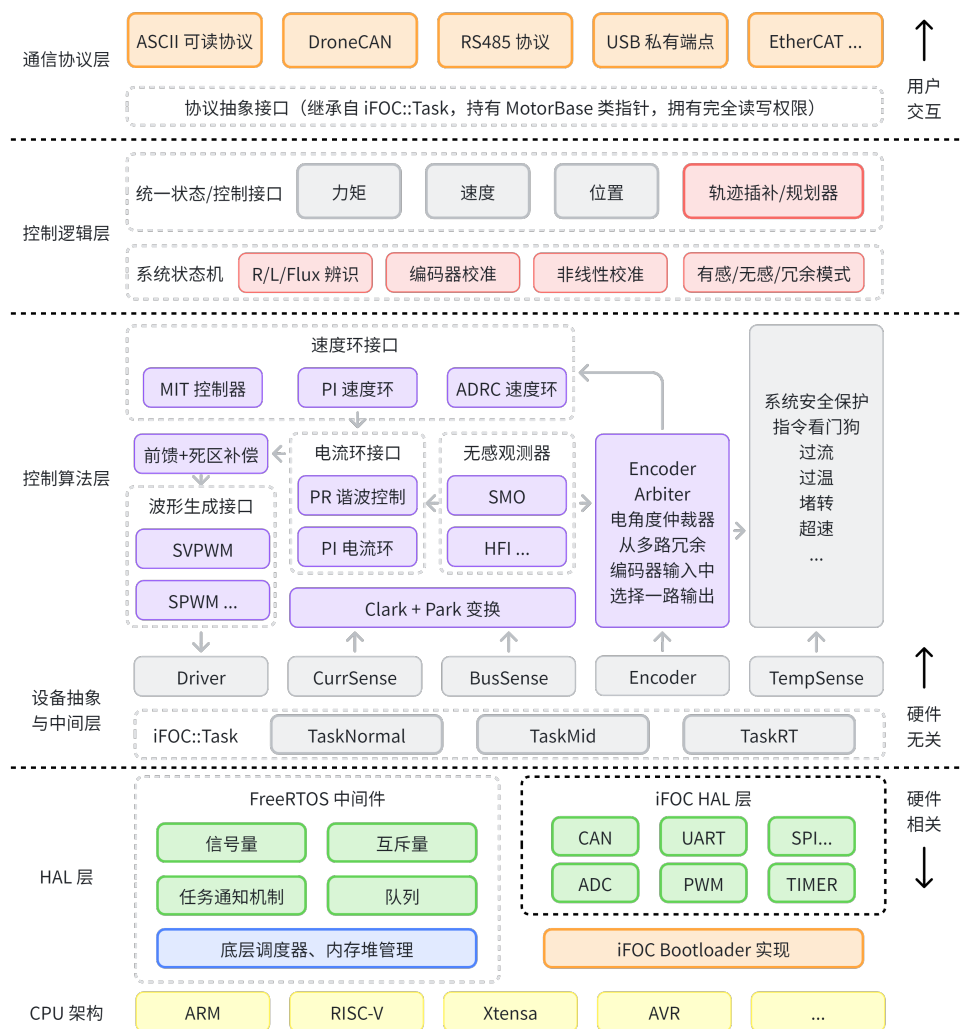


图 4-1 关节电机控制系统架构图

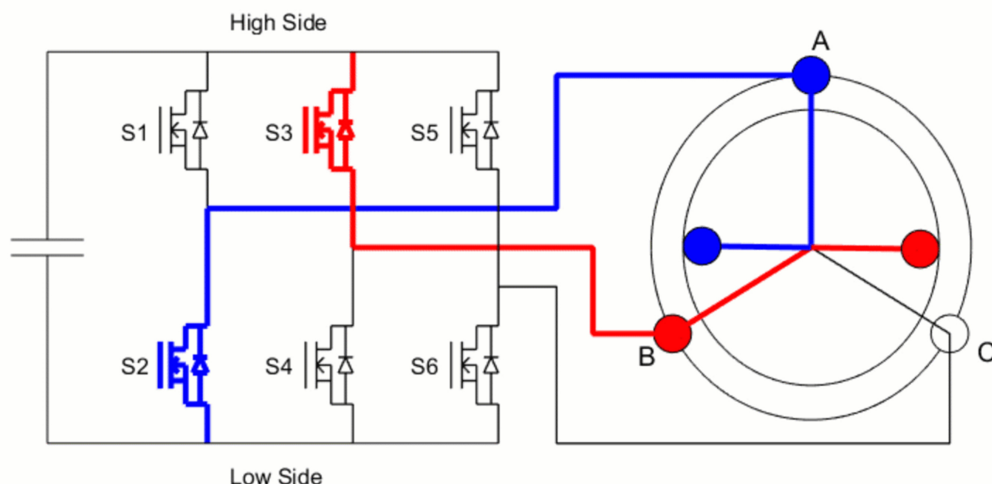


图 4-3 三相整流桥示意图

在图4-3中，此时上桥 S3、下桥 S2 开通，电流方向为 S3-B-A-S2，此时在 S2 的下桥臂进行电流采样，在达到预定测试时长后，系统记录该相对应的稳态电压差，并结合母线电压 U_{bus} 与目标电流计算相电阻。由于测试回路中电流路径跨越两相绕组，因此单次测得的等效电阻需要折半处理。在依次测试完试 U 、 V 、 W 三相后，单相电阻结果可以写为

$$R_s^{(n)} = \frac{1}{2} \left| \Delta u^{(n)} U_{bus} \right| \frac{1}{I_{cal}}, \quad n \in \{U, V, W\} \quad (4-2)$$

其中， $\Delta u^{(n)}$ 表示第 n 相测试结束时累计得到的占空比差值。三相测试完成后，再计算平均相电阻

$$\bar{R}_s = \frac{R_s^{(U)} + R_s^{(V)} + R_s^{(W)}}{3} \quad (4-3)$$

为防止电机三相不平衡或采样异常导致结果失真，系统还引入了一致性检查。若三相测试结果的最大值与最小值之差超过设定阈值，则判定存在相间不平衡，不写入最终参数；若平均结果超出允许范围，同样终止辨识并上报故障。只有在三相结果一致且落入有效区间时，系统才将 $\bar{R}_s$ 写入电机配置。

综合实现流程，电阻在线辨识步骤可概括为算法4-1。

二、电感辨识

在获得相电阻之后，本设计继续采用静止转子条件下的方波注入方法辨识绕组电感。与电阻辨识的稳态电流法不同，电感辨识关注的是电流对施加电压变化的响应斜率，因此本设计在单相测试回路中注入频率为 1 kHz 的双极性方波电压，并根据电流上升与下降过程的平均变化率反算电感值。

辨识时同样按 U 、 V 、 W 三相依次进行。对某一相测试时，系统在固定测试电压 U_{test} 与 $-U_{test}$ 之间周期切换，并分别累加方波正半周与负半周内的电流采样

算法 4-1: 相电阻在线辨识流程

输入: 标定电流 I_{cal} , 积分增益 K_i , 控制周期 T_s , 测试循环次数 N
输出: 平均相电阻 $\bar{R}_s$

- 1 初始化三相测试结果数组 $R_s^{(U)}$ 、 $R_s^{(V)}$ 、 $R_s^{(W)}$ 与 占空比补偿量 Δu ;
- 2 旁路常规波形发生与电流环任务, 使电机保持静止;
- 3 **foreach** 被测相 $n \in \{U, V, W\}$ **do**
- 4 配置桥臂导通路径, 仅保留被测相与参考相之间的测试回路;
- 5 置 $\Delta u \leftarrow 0$;
- 6 **for** $k \leftarrow 1$ **to** N **do**
- 7 采样当前相电流 i_k ;
- 8 按

$$\Delta u \leftarrow \Delta u + K_i T_s (I_{\text{cal}} - i_k)$$
 更新占空比补偿量;
- 9 输出对应桥臂占空比, 使实际电流接近 I_{cal} ;
- 10 根据

$$R_s^{(n)} \leftarrow \frac{1}{2} |\Delta u U_{\text{bus}}| \frac{1}{I_{\text{cal}}}$$
 计算第 n 相电阻;
- 11 关闭当前测试桥臂, 等待剩余电流衰减;
- 12 计算平均值 $\bar{R}_s \leftarrow (R_s^{(U)} + R_s^{(V)} + R_s^{(W)}) / 3$;
- 13 **if** 三相结果不平衡或 $\bar{R}_s$ 超出允许范围 **then**
- 14 上报电机相电阻异常, 终止辨识;
- 15 **else**
- 16 将 $\bar{R}_s$ 写入电机配置, 并标记相电阻有效;

值。根据电感电压方程

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (4-4)$$

可知, 只要测得电流变化率 di/dt , 即可得到电感估计值。结合离散实现, 系统先计算单相电流变化率

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_n \approx \frac{|I_{n,+} - I_{n,-}|}{NT_s} \quad (4-5)$$

其中, $I_{n,+}$ 与 $I_{n,-}$ 分别表示第 n 相在方波两个半周期内累计得到的电流量, N 为总测试循环次数, T_s 为控制周期。

进而可得到单相电感估计值

$$L_s^{(n)} = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{test}}}{\left. \frac{di}{dt} \right|_n}, \quad n \in \{U, V, W\} \quad (4-6)$$

式中的系数 1/2 同样来源于实际测试电流路径跨越两相绕组的结构。三相测试完成后，系统计算平均相电感

$$\bar{L}_s = \frac{L_s^{(U)} + L_s^{(V)} + L_s^{(W)}}{3} \quad (4-7)$$

并进一步将三相结果中的最大值和最小值分别写入 q 轴与 d 轴电感参数，用于后续控制与磁链辨识。若平均结果超出允许范围，则判定辨识失败，不写入参数。

从工程实现角度看，该方法的优点在于无需旋转电机，即可利用高频方波测试获得电流斜率信息。综合实现流程，电感在线辨识步骤可概括为算法4-2。

算法 4-2: 相电感在线辨识流程

输入: 测试电压 U_{test} ，控制周期 T_s ，测试循环次数 N ，方波频率约 1 kHz

输出: 平均相电感 $\bar{L}_s$

- 1 初始化三相电流累计量 $I_{n,+}$ 、 $I_{n,-}$ 及电感结果 $L_s^{(n)}$;
 - 2 配置方波注入参数，并使电机保持静止;
 - 3 **foreach** 被测相 $n \in \{U, V, W\}$ **do**
 - 4 配置桥臂导通路径，仅保留被测相测试回路;
 - 5 **for** $k \leftarrow 1$ **to** N **do**
 - 6 按 1 kHz 频率在 $+U_{\text{test}}$ 与 $-U_{\text{test}}$ 之间切换测试电压;
 - 7 采样当前相电流，并分别累加到正半周或负半周累计量中;
 - 8 输出对应桥臂占空比;
 - 9 按

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_n \leftarrow \frac{|I_{n,+} - I_{n,-}|}{NT_s}$$

计算电流变化率;
 - 10 再按

$$L_s^{(n)} \leftarrow \frac{1}{2} \frac{U_{\text{test}}}{\left. \frac{di}{dt} \right|_n}$$

计算第 n 相电感;
 - 11 关闭当前测试桥臂，等待剩余电流衰减;
 - 12 计算平均相电感 $\bar{L}_s \leftarrow (L_s^{(U)} + L_s^{(V)} + L_s^{(W)}) / 3$;
 - 13 **if** $\bar{L}_s$ 超出允许范围 **then**
 - 14 上报电机相电感异常，终止辨识;
 - 15 **else**
 - 16 将 $\max\{L_s^{(U)}, L_s^{(V)}, L_s^{(W)}\}$ 写入 q 轴电感，将 $\min\{L_s^{(U)}, L_s^{(V)}, L_s^{(W)}\}$ 写入 d 轴电感，并写入平均相电感 $\bar{L}_s$;
-

三、磁链辨识

永磁同步电机的磁链常数是电流环解耦、转矩计算与前馈补偿中的关键参数。若磁链估计不准确，将直接影响 q 轴电压模型和电磁转矩计算精度。系统参考文献 [35] 中 Wang 等人提出的在线全参数辨识思路，在已得到电阻与电感辨识结果的基础上，进一步使用稳态 q 轴电压方程对永磁体磁链进行在线估计。

该方法的基本思想是先通过在线辨识得到较准确的 R 、 L_d 与 L_q ，再对控制器输出的 dq 轴参考电压进行低通滤波，提取基波对应的直流分量，最终根据电机的电压模型反推出磁链值。对于永磁同步电机，其 dq 轴电压方程可写为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (4-8)$$

式中， u_d 、 u_q 分别为 d 轴与 q 轴电压， i_d 、 i_q 分别为 d 轴与 q 轴电流， ω_e 为电角速度， ψ_f 为永磁体磁链。

在磁链辨识阶段，本设计首先将电机加速到恒定电角速度 ω_e 附近运行，并在巡航阶段向电流指令中注入频率为 9 倍电角速度的正弦电流，即

$$\omega_{inj} = 9\omega_e \quad (4-9)$$

对应的注入电流可写为

$$i_{inj}(t) = \frac{1}{2} I_{cal} \sin(\omega_{inj} t) \quad (4-10)$$

其中， I_{cal} 为标定电流幅值。巡航阶段的参考电流可概括为

$$\begin{cases} i_d^* = -I_{cal} + i_{inj}(t) \\ i_q^* = I_{cal} \end{cases} \quad (4-11)$$

这样可以在维持电机稳定旋转的同时，引入可观测的高频电流分量，为磁链在线估计提供附加激励。

系统引入了比例谐振调节器（PR）对注入频率处的电流误差进行选择性与补偿。相比传统的比例-积分调节器，PR 控制器最大的优势就是在目标频率 ω_{inj} 附近通过谐振形成较高增益，能够以更低的相位误差跟踪正弦信号，因此很合用来跟踪准备注入的正弦目标电流。若采用连续域形式表示，其谐振环节可写为

$$G_{PR}(s) = K_r \frac{\omega_c s}{s^2 + \omega_c s + \omega_{inj}^2} \quad (4-12)$$

其中， K_r 为谐振增益， ω_c 为谐振带宽。本系统根据实时误差计算谐振补偿电压 $\Delta u_{q,inj}$ ，并将其直接叠加到 q 轴电压指令上，即

$$u_q^* \leftarrow u_q^* + \Delta u_{q,inj} \quad (4-13)$$

由此增强控制器对高频正弦注入电流的跟踪能力，减小注入电流幅值和相位误差对磁链辨识结果的影响。

当系统进入稳定运行状态后，电流微分项的平均值可近似忽略。此时对 dq 轴参考电压进行低通滤波，可得到

$$\begin{cases} u_{df}^* = Ri_{df} - \omega_e L_q i_{qf} \\ u_{qf}^* = Ri_{qf} + \omega_e L_d i_{df} + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (4-14)$$

其中， u_{df}^* 、 u_{qf}^* 表示低通滤波后的 dq 轴参考电压分量， i_{df} 、 i_{qf} 表示对应的电流直流量。由上式消去电阻项后，可得磁链估计式

$$\hat{\psi}_f = \frac{u_{qf}^* i_{df} - u_{df}^* i_{qf} - \omega_e L_d i_{df}^2 - \omega_e L_q i_{qf}^2}{\omega_e i_{df}} \quad (4-15)$$

其中， $\hat{\psi}_f$ 为在线辨识得到的磁链估计值。该式表明，磁链辨识本质上是利用稳态反电势项反算 ψ_f ，因此需要电机处于稳定状态，同时要求保证电阻、电感辨识结果精度。综合论文方法与本设计流程，可将磁链在线辨识步骤概括为算法4-3。

算法 4-3: 磁链在线辨识流程

输入: 已辨识的 R 、 L_d 、 L_q ，标定电流 I_{cal} ，目标电角速度 ω_e

输出: 磁链估计值 $\hat{\psi}_f$

- 1 初始化轨迹发生器、滑动平均滤波器和低通滤波器;
- 2 令电机加速至恒定电角速度 ω_e 并进入巡航状态;
- 3 计算注入角频率 $\omega_{inj} \leftarrow 9\omega_e$;
- 4 在每个控制周期内执行: ;
- 5 计算注入电流 $i_{inj}(t) = \frac{1}{2} I_{cal} \sin(\omega_{inj} t)$;
- 6 设置参考电流

$$i_d^* \leftarrow -I_{cal} + i_{inj}(t), \quad i_q^* \leftarrow I_{cal}$$

计算高频电流跟踪误差 $e_q \leftarrow i_q^* - i_q$;

- 7 由比例谐振调节器计算补偿电压 $\Delta u_{q,inj}$;
- 8 更新 q 轴参考电压 $u_q^* \leftarrow u_q^* + \Delta u_{q,inj}$;
- 9 对 i_d 、 i_q 、 u_d^* 、 u_q^* 进行滑动平均，得到 i_{df} 、 i_{qf} 、 u_{df}^* 、 u_{qf}^* ;
- 10 按

$$\hat{\psi}_f \leftarrow \frac{u_{qf}^* i_{df} - u_{df}^* i_{qf} - \omega_e L_d i_{df}^2 - \omega_e L_q i_{qf}^2}{\omega_e i_{df}}$$

计算瞬时磁链估计值;

- 11 对 $\hat{\psi}_f$ 进行低通滤波，得到最终磁链结果;
 - 12 **if** $0 < \hat{\psi}_f < 1$ **then**
 - 13 将磁链结果写入电机配置，并标记辨识有效;
-

4.1.3 非线性校准

一、编码器校准

由于编码器与永磁体的安装位置存在一定的偏心、感应平面和磁铁之间不完全水平等因素，编码器的读数也存在一定的非线性，这种非线性会对电角度传感带来周期性的误差，直观表现为电机在一个周期内可能存在多个固定的阻滞点，直接影响到控制精度和控制效果。本设计按顺序校准主编码器和输出轴编码器，依次使用电流环开环控制转子顺逆时针旋转指定角度，在此过程中对编码器误差进行记录，进而一次性得到编码器零偏误差和非线性查找表。

在主编码器校准过程中，系统首先利用恒定 q 轴标定电流将转子锁定到已知电角度参考位置，并在已完成极对数辨识的前提下，以恒定电角速度驱动转子缓慢旋转。若电机极对数记为 p ，每极对采样点数记为 N_s ，则单次主编码器非线性标定的总采样点数为

$$M = pN_s \quad (4-16)$$

本设计取 $N_s = 128$ ，即每跨越一个电角周期均采集 128 个离散样本。对第 k 个采样时刻，若参考电角度记为 $\theta_e^{(k)}$ ，则对应的参考机械角可写为

$$\theta_m^{*(k)} = \frac{\theta_e^{(k)}}{p} \quad (4-17)$$

若主编码器单圈原始测量角度记为 $\theta_{enc}^{(k)}$ ，则该采样点的周期性误差定义为

$$e^{(k)} = \text{wrap}(\theta_{enc}^{(k)} - \theta_m^{*(k)}) \quad (4-18)$$

其中， $\text{wrap}(\cdot)$ 表示将角度归一化到 $[-\pi, \pi)$ 或等价周期区间内。为减小摩擦、反向间隙和采样时序偏差对结果的影响，系统在顺时针和逆时针两个方向上分别完成一轮扫描，并对同一角度节点的误差采用圆周均值方式进行融合。这样可在保留周期误差信息的同时，提高误差曲线的对称性与稳定性。

在得到长度为 M 的原始误差序列后，系统进一步计算整个序列的平均零偏，并将其作为主编码器零点补偿量。若记平均零偏为 $\bar{e}$ ，则主编码器零偏可写为

$$\theta_0 = \bar{e} \quad (4-19)$$

随后，将各离散采样点的残差

$$e_r^{(k)} = \text{wrap}(e^{(k)} - \theta_0) \quad (4-20)$$

重新映射到单圈角度坐标下，并按固定窗口进行平滑，得到对应单圈机械角的非线性补偿查找表。设查找表共有 N_{lut} 个离散节点，运行时若编码器当前角度为 θ ，

则补偿后单圈角度可表示为

$$\tilde{\theta}_{enc}(\theta) = \theta - \theta_0 - \Delta\theta_{lut}(\theta) \quad (4-21)$$

其中, $\Delta\theta_{lut}(\theta)$ 为由查找表插值得到的非线性补偿项。该结果在驱动器内部写入非易失存储器, 并在启动后自动加载, 从而使主编码器在参与电角度换算时即可完成在线补偿。

对于输出轴编码器, 本设计采用相对主编码器的标定思路。其基本思想是: 在主编码器已经校准完成的前提下, 将主编码器所给出的减速前机械角视为中间参考, 再结合减速比换算得到输出轴理论角度, 并与输出轴编码器单圈实测角度进行比较, 从而建立输出端误差查找表。设减速比为 i , 主编码器多圈机械角变化量为 $\Delta\theta_m$, 则输出轴理论角度增量为

$$\Delta\theta_{out}^* = \frac{\Delta\theta_m}{i} \quad (4-22)$$

若输出轴编码器累计角度记为 θ_{out} , 则其相对误差可写为

$$e_{out} = \text{wrap}(\theta_{out}^* - \theta_{out}) \quad (4-23)$$

二、齿槽效应校准

齿槽转矩来源于永磁体与定子齿槽之间的磁导周期性变化, 即使在 q 轴目标电流为零或速度很低时, 电机输出转矩仍会随转子位置呈现周期性波动, 进而表现为低速爬行、微动不平滑以及力控时的纹波误差。为减小该影响, Piccoli 等人 [36] 提出了基于位置传感器的齿槽转矩标定与补偿方法, 其核心思想是建立转子位置到补偿力矩的映射表, 并在运行时按当前位置回放补偿力矩。本设计采用与该思想一致的查表补偿框架, 并结合绝对值编码器、位置闭环与双向采样流程完成齿槽效应校准。

本设计将一圈机械角划分为 N_s 个等间隔分段, 并在每个离散位置点测量维持静止所需的 q 轴电流。根据驱动软件实现, 查找表总点数为 1801, 对应有效分段数 $N_s = 1800$, 因此单步角度分辨率为

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{N_s} \quad (4-24)$$

若校准起始位置为 θ_0 , 则第 i 个采样点的目标机械角可写为

$$\theta_i^* = \theta_0 + i\Delta\theta, \quad i = 0, 1, \dots, N_s - 1 \quad (4-25)$$

在具体校准过程中, 系统首先切换到位置控制模式, 并记录当前单圈角度与多圈角度作为校准起点。随后驱动关节按离散角度点逐步前进, 在每个位置点处同时检查位置误差与角速度是否满足稳定条件。若记当前位置为 θ 、角速度为 ω ,

则稳定判据可写为

$$|\theta - \theta_i^*| < \varepsilon_\theta, \quad |\omega| < \varepsilon_\omega \quad (4-26)$$

其中, ε_θ 与 ε_ω 分别表示位置与速度阈值; 本设计默认取 0.1° 与 0.5 r/min 。当系统在该条件下持续保持一段时间后, 开始对 q 轴实测电流进行平均。若在单个节点累计 M 个采样值, 则顺时针扫描时第 i 个节点的补偿电流估计为

$$I_{q,\text{cw}}(i) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M i_q(k) \quad (4-27)$$

完成顺时针整圈扫描后, 本设计再按相反方向对同一组离散位置点重复测量, 得到逆时针扫描结果

$$I_{q,\text{ccw}}(i) = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M i_q(k) \quad (4-28)$$

采用双向扫描的目的在于减弱静摩擦、反向间隙以及控制滞后对单向测量结果的偏置影响。随后, 将两次扫描结果取均值, 可得到每个角度节点的齿槽补偿电流

$$I_{q,\text{cog}}(i) = \frac{I_{q,\text{cw}}(i) + I_{q,\text{ccw}}(i)}{2} \quad (4-29)$$

在生成最终查找表之前, 本设计进一步对上述离散结果执行局部滑动平均平滑, 并根据校准起始单圈角度对表项进行循环偏移, 使查找表坐标与绝对值编码器零位保持一致。设平滑窗口包含 $2h + 1$ 个点, 则可写为

$$\tilde{I}_{q,\text{cog}}(i) = \frac{1}{2h + 1} \sum_{k=-h}^h I_{q,\text{cog}}((i + k) \bmod N_s) \quad (4-30)$$

得到补偿表后, 再将首末点闭合为周期函数, 供运行时按机械角周期查表使用。最终得到的补偿表如图4-4所示。其中, 横轴为转子机械角度, 纵轴为在该机械角度保持静止所需的额外电流, 即为补偿项。

齿槽补偿通过 q 轴电流前馈的形式作用到电流环路中, 运行时系统根据绝对值编码器给出的单圈角度 θ 进行周期查表, 并将对应补偿量叠加到 q 轴电流误差中, 其等效形式可表示为

$$i_q^* \leftarrow i_q^* + \tilde{I}_{q,\text{cog}}(\theta) \quad (4-31)$$

这样即可在电流环调节前预先抵消由齿槽效应引起的周期性附加转矩, 改善低速平顺性和微小力矩输出一致性。综合论文方法与本设计实现流程, 齿槽效应校准步骤可概括为算法4-4。

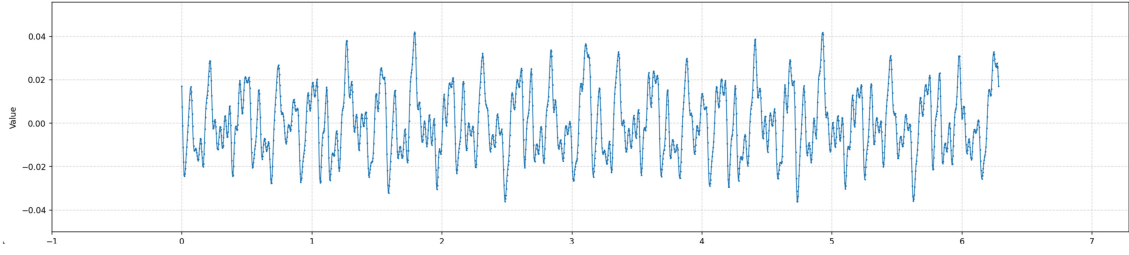


图 4-4 齿槽转矩补偿查找表

算法 4-4: 齿槽效应在线校准流程

输入: 分段数 N_s , 稳定判据 ε_θ 、 ε_ω , 稳定保持时间 T_{hold} , 节点平均采样数 M

输出: 齿槽补偿查找表 $\tilde{I}_{q,\text{cog}}(\theta)$

- 1 关闭当前齿槽补偿功能, 切换到位置控制模式;
- 2 记录当前单圈角度 θ_0 与多圈角度起点, 初始化顺时针映射 $I_{q,\text{cw}}$ 和逆时针映射 $I_{q,\text{ccw}}$;
- 3 **for** $i \leftarrow 0$ **to** $N_s - 1$ **do**
 - 4 设置目标位置 $\theta_i^* \leftarrow \theta_0 + i\Delta\theta$, 其中 $\Delta\theta = 2\pi/N_s$;
 - 5 维持位置闭环, 直到同时满足

$$|\theta - \theta_i^*| < \varepsilon_\theta, \quad |\omega| < \varepsilon_\omega$$
 并持续 T_{hold} ;
 - 6 连续采样 M 个 q 轴电流值, 计算

$$I_{q,\text{cw}}(i) \leftarrow \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M i_q(k)$$
- 7 **for** $i \leftarrow N_s - 1, N_s - 2, \dots, 0$ **do**
 - 8 设置目标位置 $\theta_i^* \leftarrow \theta_0 + i\Delta\theta$;
 - 9 重复稳定判定与 q 轴电流平均过程, 得到

$$I_{q,\text{ccw}}(i) \leftarrow \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M i_q(k)$$
- 10 **for** $i \leftarrow 0$ **to** $N_s - 1$ **do**
 - 11 计算双向均值

$$I_{q,\text{cog}}(i) \leftarrow \frac{I_{q,\text{cw}}(i) + I_{q,\text{ccw}}(i)}{2}$$
 并执行循环滑动平均平滑, 得到 $\tilde{I}_{q,\text{cog}}(i)$;
- 12 根据起始单圈角度对查找表执行循环偏移, 并闭合首末点使其满足周期性;
- 13 将查找表写入非易失存储, 恢复齿槽补偿使能状态;
- 14 运行时按当前位置 θ 周期查表, 并将 $\tilde{I}_{q,\text{cog}}(\theta)$ 叠加到 q 轴电流给定中;

4.2 总线通信与接口设计

由于机械臂包含多个关节驱动节点，若采用点对点独立布线方式，将会增加系统线束复杂度和维护成本。为提高系统集成度和工程可用性，本设计采用标准 CAN 总线作为底层通信方式，将多个关节驱动器串联成统一控制网络。CAN 总线具有实时性较好、抗干扰能力强、布线简洁和工程应用成熟等优点，适合用于多电机协同控制场景。

在本设计中，总线波特率设置为 1 Mbps，并将各驱动器的状态帧与控制帧分别压缩到标准 CAN 帧中，每帧数据长度为 8 字节。对标准数据帧进行估算后，单帧比特数可表示为

$$B = 47 + 8 \times 8 = 111 \quad (4-32)$$

其中 47 比特对应帧头、控制场、CRC、ACK 与帧尾等固定字段。若系统包含 6 个关节节点，控制回路频率为 500 Hz，则理论总线负载率约为 66%，低于通常采用的 80% 可靠性阈值，因此能够满足多关节机械臂实时通信需求。这说明该通信方案在当前系统规模下仍具备一定带宽余量。

在上位机接口方面，本设计采用 C/C++ 语言开发底层通信接口，用于完成指令下发、状态接收和节点管理等功能，并基于 DroneCAN 协议实现节点固件在线更新、参数增删改查以及实时控制。为提高系统的可扩展性与可维护性，本设计还基于 ROS2 框架开发了机械臂控制接口和支持包，使各关节驱动节点能够接入统一的控制框架中。除此之外，针对前期原型验证和快速开发需求，系统还提供了基于 Socket 通信的 Python 接口，便于在上位机中进行功能验证和辅助调试。

4.2.1 总线负载率测试

为了进一步验证上述总线通信方案在实际运行中的可靠性，本设计在上位机通信链路中加入总线统计功能，并计划对多关节同步控制状态下的总线负载率进行测试。测试时，总线采用 DroneCAN 协议，机械臂 6 个关节驱动器均接入同一 CAN 网络；各关节驱动器以 500 Hz 频率分别上报 8 字节状态帧，同时上位机以 500 Hz 频率分别向各关节驱动器发送 8 字节控制帧。因此，在理想情况下，系统每秒包含 6×500 帧状态反馈和 6×500 帧控制指令，合计约 6000 帧 CAN 数据帧。

测试统计以 1 s 为时间窗口，由上位机在底层接收、协议解析和控制发送链路中累计数据。统计量包括一秒内接收的总帧数 `fps`、一秒内接收错误帧数 `error_fps`、错误帧占总接收帧数的百分比 `error_rate_pct` 以及总线负载率 `bus_load_pct`。其中，接收错误既包括 CAN 硬件接口返回的接收异常，也包括 DroneCAN 协议层解析过程中出现的 CRC 校验错误、帧长度异常、传输片段数量

异常等错误。错误率按式 (4-33) 计算：

$$\text{error_rate_pct} = \frac{\text{error_fps}}{\text{fps}} \times 100\%. \quad (4-33)$$

总线负载率按统计窗口内实际收发 CAN 帧占用的总比特数与总线标称比特率计算，其基本形式为

$$\text{bus_load_pct} = \frac{\sum_{k=1}^n B_k}{R_b T} \times 100\%, \quad (4-34)$$

其中， B_k 为第 k 帧根据帧格式和数据长度计算得到的总比特数， R_b 为 CAN 总线波特率， T 为统计窗口长度。按照底层 CAN 帧的标识符类型、8 字节数据长度和协议开销为依据计算 B_k ，该测试工况下的参考负载率约为

$$\eta_{\text{ref}} = \frac{6000 \times 111}{1 \times 10^6} \times 100\% = 66.60\%. \quad (4-35)$$

4.3 ROS2 控制架构与软件实现

为了实现机械臂整机控制、模型管理和多接口协同，本设计基于 ROS2 构建了上位机软件系统。上位机软件主要由关节驱动接入功能包和机械臂描述与规划功能包组成，前者负责底层 CAN 通信、DroneCAN 协议解析、关节驱动节点管理以及 `ros2_control` 硬件接口封装，后者负责机械臂 URDF/SRDF 模型、MoveIt 运动规划配置、控制器配置和启动流程组织。两类功能包的分工如表4-1所示。

表 4-1 上位机 ROS2 软件功能划分

组成部分	主要内容	作用
关节驱动接入功能包	CAN 通信后端、DroneCAN 主节点、驱动节点参数管理、硬件接口、Python 辅助接口	将多个关节驱动器抽象为 ROS2 标准关节资源，实现状态读取、命令下发和调试接入
机械臂描述与规划功能包	URDF/Xacro 模型、SRDF 语义描述、MoveIt 规划配置、控制器映射、RViz 与启动文件	提供统一机器人模型、运动规划组、可视化界面和真实/仿真运行入口

4.3.1 上位机总体架构

从数据流向看，上位机控制链路可以分为反馈链路和命令链路。反馈链路中，各关节驱动器通过 CAN 总线上传节点状态、参数信息和运动反馈，上位机完成协议解析后，将关节位置、速度和力矩组织为 `ros2_control` 状态接口；随后由关节状态发布者输出 `/joint_states`，再由 `robot_state_publisher` 根据 URDF 模型计算 TF 树，从而在 RViz 和 MoveIt 中实现机械臂姿态重构。命令链路中，MoveIt

或上层控制程序生成关节轨迹目标，轨迹控制器通过 `FollowJointTrajectory` 动作接口接收目标并在控制周期内插补，再经硬件接口转换为关节驱动器可执行的位置、速度、力矩或混合控制命令。

这种结构的核心优点在于将硬件通信细节与上层运动规划解耦。`MoveIt`、重力补偿程序和后续视觉伺服模块只需要面向标准关节接口工作，而不需要直接处理 CAN 帧、节点号、驱动器参数和单位换算。底层驱动器更换通信后端或调整关节标定参数时，只需修改运行配置与关节映射配置，上层模型和规划流程可以保持不变。

4.3.2 关节驱动接入与控制接口

关节驱动接入功能包位于底层关节驱动器与 ROS2 控制框架之间。运行时，系统通过配置文件选择 CAN 通信后端，支持 USB-CAN 适配器和 Linux SocketCAN 两类接入方式；本设计实际配置的总线波特率为 1 Mbps，DroneCAN 主节点 ID 为 126。通信层启动后，上位机首先完成 CAN 设备初始化，然后启动协议主节点和接收线程，对驱动器的节点心跳、设备信息、参数表和运动反馈进行持续维护。

在节点管理方面，上位机不直接依赖易变化的节点 ID，而是依据各关节驱动器的唯一标识与机械臂关节名建立绑定关系。关节映射配置中记录了 $J1$ 至 $J6$ 对应的驱动器唯一标识、零位偏置、减速比、方向反转关系以及带减速关节的扇区标定参数。其中， $J2$ 和 $J3$ 采用 6 : 1 减速结构，上电后需要结合单圈角度和当前扇区确定输出轴所在分支；其余关节按照直接驱动或等效直接驱动方式完成零位换算。通过这种方式，即使驱动节点 ID 在总线中发生变化，只要唯一标识不变，上位机仍能重新完成关节绑定。

关节状态在上位机内部统一转换为 ROS2 常用的国际单位制。设 q 为 ROS2 侧关节角度， θ_m 为驱动节点侧参考角度， N 为减速比， s 为方向系数， q_0 和 θ_{m0} 分别为初始化时的关节角度与驱动节点角度，则反馈换算关系可写为

$$\begin{aligned} q &= q_0 + s \frac{\theta_m - \theta_{m0}}{N}, \\ \dot{q} &= s \frac{\omega_m}{N}, \\ \tau_q &= sN\tau_m. \end{aligned} \tag{4-36}$$

其中， ω_m 和 τ_m 分别为驱动节点侧速度与力矩反馈， $\dot{q}$ 和 τ_q 为 ROS2 侧关节速度与关节力矩。对应地，当上层控制器下发关节目标时，上位机按逆向关系生成驱

动器目标:

$$\begin{aligned}\theta_m^* &= \theta_{m0} + sN(q^* - q_0), \\ \omega_m^* &= sN\dot{q}^*, \\ \tau_m^* &= s\frac{\tau_q^*}{N}.\end{aligned}\tag{4-37}$$

上述换算使上层控制器始终工作在机械臂关节坐标系下，而底层驱动器仍可使用自身的输出端参考系执行控制命令。

硬件接口向 `ros2_control` 导出位置、速度和力矩三类状态接口，并支持位置、速度、力矩以及 MIT 混合控制命令接口。对于常规轨迹控制，系统主要使用位置命令接口，由关节轨迹控制器对六个关节的位置目标进行插补并下发；对于重力补偿和零力拖动等需要柔顺性的功能，系统可进一步使用力矩或 MIT 混合接口，在位置、速度、力矩和阻抗参数之间建立组合控制关系。为了避免控制器切换时产生突跳，上位机会在激活硬件接口时先同步当前关节状态与命令值，并在命令模式切换时对相关关节启用或关闭闭环控制。

控制器配置方面，真实硬件运行时的控制器管理器更新频率设置为 500 Hz，并加载关节状态发布器和六关节轨迹控制器。轨迹控制器接收 $J1$ 至 $J6$ 的关节位置命令，并读取位置、速度状态用于状态反馈；同时禁止部分关节目标，以保证每条轨迹均覆盖完整机械臂关节集合。系统还保留了面向单关节或多关节调试的前馈命令控制器，便于在整机联调前验证底层驱动链路。

除 ROS2 接口外，本设计还提供了面向 Python 的辅助调用接口。该接口通过本地 Socket 或 TCP 通道访问上位机后端，可完成电机列表查询、参数读取与写入、运动状态订阅以及位置、速度、力矩、MIT 目标下发等操作，并可将关键调试量发送至上位机波形显示工具。该接口主要服务于早期原型验证和参数调试，使单关节测试、多电机联动测试和标定结果检查不必完全依赖完整 ROS2 启动流程。

4.4 重力补偿与零力拖动

对于多自由度机械臂而言，在无外部支撑情况下，各关节需要持续承受重力作用所引起的力矩。若不对该部分力矩进行补偿，机械臂不仅难以保持姿态，还会使人工拖动和交互操作变得困难。因此，本设计在完成机械臂结构建模和参数标定后，进一步研究了基于动力学模型的重力补偿方法。

本设计利用根据实测质量参数构建的 URDF 模型，在上位机中实时计算当前姿态下各关节所需的重力补偿力矩。为实现这一过程，系统在 ROS2 环境中读取机械臂当前关节角度，并通过 Pinocchio 动力学库加载 URDF 模型、计算关节重力项，再将对应力矩通过总线下发至驱动器。这样，各关节即可在原有控制基础上

叠加补偿力矩，从而抵消重力造成的静态负载。

本设计所提出的重力补偿算法主要面向机械臂低速运动或静止保持场景。该算法利用刚体动力学模型补偿关节重力项及其低速偏置项，以减小驱动器在重力方向上的持续输出负担，并提高关节在不同构型下的支撑能力与拖动顺滑性。考虑到实际样机的质量参数、质心位置、安装偏差以及末端负载难以与理论模型完全一致，本设计在基于模型的偏置力矩计算基础上，进一步引入了面向 $J2$ 与 $J3$ 关节的静态重力修正模型，并通过最小二乘方法对修正参数进行辨识。

从控制结构上看，本设计的重力补偿算法主要包含以下四个层次：

- (1) 关节状态获取与低通滤波；
- (2) 基于刚体动力学模型的偏置力矩计算；
- (3) 面向 $J2$ 与 $J3$ 关节的静态重力残差拟合修正；
- (4) 在最终力矩指令中叠加静摩擦补偿与阻尼项。

在此基础上，本设计进一步实现了零力拖动功能。零力拖动的目标是在机械臂保持姿态稳定的同时，使操作者仅需施加较小外力即可推动末端运动。其本质是在重力补偿基础上，降低人为拖动时系统的等效操作阻力。通过将关节驱动器置于混合控制模式，并结合实时重力补偿力矩，可以实现机械臂在松手后保持当前位姿、在施加微小外力时顺从移动的效果。

4.4.1 关节状态获取与低通滤波

设机械臂共有 n 个关节，其关节位置、速度与实测力矩分别记为

$$\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_n]^\top, \quad \dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n]^\top, \quad \boldsymbol{\tau}_m = [\tau_{m,1}, \dots, \tau_{m,n}]^\top. \quad (4-38)$$

为降低速度测量噪声及电流反算力矩中的高频波动，本设计对关节速度和实测力矩分别采用一阶低通滤波器。对任意待滤波信号 x_k ，其离散形式写为

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + \alpha_k (x_k - \hat{x}_{k-1}), \quad (4-39)$$

其中

$$\alpha_k = 1 - e^{-2\pi f_c \Delta t_k}. \quad (4-40)$$

式中， $\hat{x}_k$ 为第 k 个采样时刻的滤波结果， x_k 为原始测量值， f_c 为低通滤波截止频率， Δt_k 为相邻两次采样的时间间隔， $\alpha_k \in [0, 1]$ 为对应离散采样周期下的滤波增益。

据此可分别得到滤波后的关节速度与实测力矩：

$$\hat{\dot{\mathbf{q}}} = [\hat{\dot{q}}_1, \dots, \hat{\dot{q}}_n]^\top, \quad \hat{\boldsymbol{\tau}}_m = [\hat{\tau}_{m,1}, \dots, \hat{\tau}_{m,n}]^\top. \quad (4-41)$$

滤波后的速度不仅用于诊断输出，也用于后续偏置力矩计算与摩擦方向判断；滤波后的力矩则用于静态样本筛选和模型辨识。

4.4.2 基于刚体动力学模型的偏置力矩计算

机械臂的关节空间动力学可写为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}, \quad (4-42)$$

其中， $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 为惯性矩阵， $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$ 为科氏力与离心力项， $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ 为重力项， $\boldsymbol{\tau}$ 为关节驱动力矩。

在低速重力补偿场景中，本设计不直接使用完整逆动力学中的加速度项，而是计算偏置力矩

$$\boldsymbol{\tau}_b = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \hat{\dot{\mathbf{q}}})\hat{\dot{\mathbf{q}}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{b}(\mathbf{q}, \hat{\dot{\mathbf{q}}}), \quad (4-43)$$

其中 $\boldsymbol{\tau}_b$ 表示由模型计算得到的关节偏置力矩。当机械臂近似静止时，有

$$\hat{\dot{\mathbf{q}}} \approx \mathbf{0}, \quad (4-44)$$

因此可进一步近似为

$$\boldsymbol{\tau}_b \approx \mathbf{g}(\mathbf{q}). \quad (4-45)$$

因此， $\boldsymbol{\tau}_b$ 可以被理解为本设计在静态或准静态状态下的模型重力补偿基线。

4.4.3 静摩擦与阻尼项的补偿思想

在实际样机中，仅依靠模型偏置力矩并不足以完全抵消负载与机械阻力。为此，本设计进一步考虑静摩擦项和阻尼项。首先，对每个关节建立双向静摩擦表：

$$\boldsymbol{\tau}_f^+ = [\tau_{f,1}^+, \dots, \tau_{f,n}^+]^\top, \quad \boldsymbol{\tau}_f^- = [\tau_{f,1}^-, \dots, \tau_{f,n}^-]^\top. \quad (4-46)$$

根据滤波后的关节速度方向，第 i 个关节的摩擦补偿取值定义为

$$\tau_{f,i} = \begin{cases} \tau_{f,i}^+, & \hat{q}_i > 0, \\ \tau_{f,i}^-, & \hat{q}_i < 0, \\ 0, & \hat{q}_i = 0. \end{cases} \quad (4-47)$$

为抑制低速振荡并提高交互稳定性，本设计采用当前位置保持、零刚度与有限阻尼的方式构造接口参考量，即

$$\mathbf{q}_{\text{ref}} = \mathbf{q}, \quad \dot{\mathbf{q}}_{\text{ref}} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{K}_p = \mathbf{0}, \quad \mathbf{K}_d = \text{diag}(k_{d,1}, \dots, k_{d,n}), \quad (4-48)$$

其中 $k_{d,i}$ 为各关节的阻尼增益。此时，阻尼项的作用是抑制关节速度，而不是替代重力矩本身。

在引入 $J2$ 与 $J3$ 的拟合修正项后，本设计最终的关节力矩补偿指令写为

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{cmd}} = \boldsymbol{\tau}_b + \Delta\boldsymbol{\tau}_{23} + \boldsymbol{\tau}_f, \quad (4-49)$$

其中 $\boldsymbol{\tau}_{\text{cmd}}$ 为最终补偿力矩， $\Delta\boldsymbol{\tau}_{23}$ 为仅作用于 $J2$ 和 $J3$ 的静态重力拟合修正项， $\boldsymbol{\tau}_f$ 为静摩擦补偿项。若仅考虑 $J2$ 与 $J3$ 的静态拟合修正，则有

$$\Delta\boldsymbol{\tau}_{23} = [0, \Delta\tau_2, \Delta\tau_3, 0, \dots, 0]^\top. \quad (4-50)$$

4.4.4 $J2$ 与 $J3$ 关节的静态重力修正与辨识

在串联机械臂中， $J2$ 与 $J3$ 关节通常承担大臂、小臂及末端执行器的主要重力矩，因此对连杆质量参数误差、质心位置误差、末端负载未准确建模、线缆与安装附件引入的附加偏置，以及减速器及传动系统的迟滞与机械耗散最为敏感。若只采用统一比例系数对模型力矩进行修正，则难以描述随姿态变化而变化的误差。因此，本设计将模型与实测之间的差异表示为姿态相关的残差函数，并对该残差进行单独辨识。

一、静态重力结构的物理启发

对于平面二连杆近似系统，在静态条件下， $J3$ 关节的重力矩通常可写为

$$\tau_{g,3} \sim c_3 \cos(q_2 + q_3), \quad (4-51)$$

而 $J2$ 关节的重力矩通常可写为

$$\tau_{g,2} \sim c_{21} \cos q_2 + c_{23} \cos(q_2 + q_3). \quad (4-52)$$

这说明， $J3$ 的静态重力项主要受 $q_2 + q_3$ 影响，而 $J2$ 的静态重力项则由 $\cos q_2$ 与 $\cos(q_2 + q_3)$ 两部分叠加构成。因此，当连杆质量、质心或末端负载存在误差时，模型残差天然呈现出姿态相关的非线性变化，而不是单一线性倍数关系。

二、残差模型的建立

记第 k 个采样时刻下， $\tau_{m,2}^{(k)}$ 与 $\tau_{m,3}^{(k)}$ 分别为 $J2$ 和 $J3$ 的实测关节力矩， $\tau_{b,2}^{(k)}$ 与 $\tau_{b,3}^{(k)}$ 分别为由刚体动力学模型计算得到的偏置力矩。则可定义残差为

$$r_2^{(k)} = \tau_{m,2}^{(k)} - \tau_{b,2}^{(k)}, \quad r_3^{(k)} = \tau_{m,3}^{(k)} - \tau_{b,3}^{(k)}. \quad (4-53)$$

为同时吸收质量误差、质心误差以及零位相位误差，本设计采用如下残差模型。对 $J2$ ，有

$$r_2 = a_1 \cos q_2 + a_2 \sin q_2 + a_3 \cos(q_2 + q_3) + a_4 \sin(q_2 + q_3) + b_2. \quad (4-54)$$

对 $J3$, 有

$$r_3 = a_5 \cos(q_2 + q_3) + a_6 \sin(q_2 + q_3) + b_3. \quad (4-55)$$

式中, q_2 与 q_3 分别为 $J2$ 与 $J3$ 的关节角, $a_1, \dots, a_6$ 为待辨识参数, b_2 与 b_3 为常值偏置项, r_2 与 r_3 分别为 $J2$ 与 $J3$ 的模型残差。

采用上述正余弦同时建模的原因在于

$$A \cos \theta + B \sin \theta = R \cos(\theta - \phi), \quad (4-56)$$

其中

$$R = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad \phi = \text{atan2}(B, A). \quad (4-57)$$

因此, 式 (4-54) 与式 (4-55) 本质上等价于若干个带相位偏移的余弦项叠加, 能够在保持参数线性可辨识的同时, 吸收安装零位误差与模型相位误差。

为了保证残差主要体现重力模型误差, 而不是动态项或摩擦瞬态, 本设计仅选取近静止样本用于拟合。设滤波后的 $J2$ 与 $J3$ 关节速度分别为 $\hat{q}_2$ 与 $\hat{q}_3$, 则样本筛选条件写为

$$|\hat{q}_2| < \varepsilon_v, \quad |\hat{q}_3| < \varepsilon_v, \quad (4-58)$$

其中 ε_v 为静止判断阈值。

此外, 为保证实测状态与模型输出来自同一姿态附近, 还需对两路话题数据进行时间同步, 仅保留满足

$$|t_m - t_b| < \varepsilon_t \quad (4-59)$$

的样本, 其中 t_m 为实测关节状态时间戳, t_b 为模型偏置力矩时间戳, ε_t 为时间同步容差。

三、最小二乘辨识模型

对 $J2$, 将 N 组样本堆叠为矩阵形式:

$$\mathbf{y}_2 = \begin{bmatrix} r_2^{(1)} \\ r_2^{(2)} \\ \vdots \\ r_2^{(N)} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\theta}_2 = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ b_2 \end{bmatrix}, \quad (4-60)$$

并构造回归矩阵

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} \cos q_2^{(1)} & \sin q_2^{(1)} & \cos(q_2^{(1)} + q_3^{(1)}) & \sin(q_2^{(1)} + q_3^{(1)}) & 1 \\ \cos q_2^{(2)} & \sin q_2^{(2)} & \cos(q_2^{(2)} + q_3^{(2)}) & \sin(q_2^{(2)} + q_3^{(2)}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos q_2^{(N)} & \sin q_2^{(N)} & \cos(q_2^{(N)} + q_3^{(N)}) & \sin(q_2^{(N)} + q_3^{(N)}) & 1 \end{bmatrix}. \quad (4-61)$$

则 J_2 的辨识问题可写为

$$\mathbf{y}_2 = \Phi_2 \boldsymbol{\theta}_2 + \boldsymbol{\varepsilon}_2, \quad (4-62)$$

其中 $\boldsymbol{\varepsilon}_2$ 为残差误差项。

同理，对 J_3 有

$$\mathbf{y}_3 = \begin{bmatrix} r_3^{(1)} \\ r_3^{(2)} \\ \vdots \\ r_3^{(N)} \end{bmatrix}, \quad \boldsymbol{\theta}_3 = \begin{bmatrix} a_5 \\ a_6 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad (4-63)$$

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} \cos(q_2^{(1)} + q_3^{(1)}) & \sin(q_2^{(1)} + q_3^{(1)}) & 1 \\ \cos(q_2^{(2)} + q_3^{(2)}) & \sin(q_2^{(2)} + q_3^{(2)}) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(q_2^{(N)} + q_3^{(N)}) & \sin(q_2^{(N)} + q_3^{(N)}) & 1 \end{bmatrix}, \quad (4-64)$$

$$\mathbf{y}_3 = \Phi_3 \boldsymbol{\theta}_3 + \boldsymbol{\varepsilon}_3. \quad (4-65)$$

四、最小二乘解及其理论依据

最小二乘辨识的目标是求解

$$\boldsymbol{\theta}_2^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_2} \|\Phi_2 \boldsymbol{\theta}_2 - \mathbf{y}_2\|_2^2, \quad (4-66)$$

$$\boldsymbol{\theta}_3^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}_3} \|\Phi_3 \boldsymbol{\theta}_3 - \mathbf{y}_3\|_2^2. \quad (4-67)$$

当 $\Phi_2^\top \Phi_2$ 和 $\Phi_3^\top \Phi_3$ 满秩时，其解析解分别为

$$\boldsymbol{\theta}_2^* = (\Phi_2^\top \Phi_2)^{-1} \Phi_2^\top \mathbf{y}_2, \quad (4-68)$$

$$\boldsymbol{\theta}_3^* = (\Phi_3^\top \Phi_3)^{-1} \Phi_3^\top \mathbf{y}_3. \quad (4-69)$$

若样本分布不足或矩阵条件较差，则可使用 Moore-Penrose 伪逆写成

$$\boldsymbol{\theta}_2^* = \Phi_2^\dagger \mathbf{y}_2, \quad \boldsymbol{\theta}_3^* = \Phi_3^\dagger \mathbf{y}_3. \quad (4-70)$$

最小二乘方法的理论依据在于，若误差项满足

$$\mathbb{E}[\boldsymbol{\varepsilon}] = \mathbf{0}, \quad \text{Cov}(\boldsymbol{\varepsilon}) = \sigma^2 \mathbf{I}, \quad (4-71)$$

则根据 Gauss–Markov 定理，普通最小二乘估计是线性无偏估计中方差最小者。对于实际系统而言，虽然误差中仍会混入少量迟滞、摩擦与电流估算误差，但在采样点和姿态覆盖充分的前提下，最小二乘方法仍能够稳定给出一组具有明确物理意义的静态重力修正系数。

五、运行时补偿形式

完成辨识后，系统即可得到 $J2$ 与 $J3$ 的静态重力修正量：

$$\Delta\tau_2(q_2, q_3) = a_1 \cos q_2 + a_2 \sin q_2 + a_3 \cos(q_2 + q_3) + a_4 \sin(q_2 + q_3) + b_2, \quad (4-72)$$

$$\Delta\tau_3(q_2, q_3) = a_5 \cos(q_2 + q_3) + a_6 \sin(q_2 + q_3) + b_3. \quad (4-73)$$

修正后的补偿力矩可写为

$$\tau_{c,2} = \tau_{b,2} + \Delta\tau_2(q_2, q_3), \quad \tau_{c,3} = \tau_{b,3} + \Delta\tau_3(q_2, q_3), \quad (4-74)$$

对应的全关节向量形式为

$$\boldsymbol{\tau}_c = \boldsymbol{\tau}_b + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta\tau_2(q_2, q_3) \\ \Delta\tau_3(q_2, q_3) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4-75)$$

最终下发至执行器的力矩指令为

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{cmd}} = \boldsymbol{\tau}_c + \boldsymbol{\tau}_f. \quad (4-76)$$

其中， $\boldsymbol{\tau}_b$ 为模型计算得到的原始偏置力矩， $\boldsymbol{\tau}_c$ 为经 $J2$ 与 $J3$ 静态重力辨识修正后的补偿力矩， $\boldsymbol{\tau}_f$ 为速度方向相关的静摩擦补偿项， $\boldsymbol{\tau}_{\text{cmd}}$ 为最终下发至执行器的控制力矩。

4.5 末端负载在线辨识

本设计的负载辨识目标，是在机械臂末端悬挂未知物体后，在线估计该物体在重力方向上的等效载荷大小，并将其用于后续的末端负载补偿。机械臂自由度 $n = 6$ ，则可设机械臂全关节变量为

$$\mathbf{q} \in \mathbb{R}^n, \quad \dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n, \quad (4-77)$$

在辨识状态下，机械臂由位置控制器保持在当前姿态附近静止，从而满足静力学近似条件。此时，未知外载可等效为作用于末端某一固定点、方向竖直向下的集

中力，其大小为待辨识标量。

本设计采用“模型计算值与实测值残差反演”的方式实现在线辨识。其基本思想为：首先由机器人模型计算在当前姿态下机械臂本体所需的理论补偿力矩；随后将其与实际测得的关节力矩进行比较，并利用末端单位外力对各关节的静力矩映射关系，反推出未知负载的大小。末端负载辨识流程可总结如下：

- (1) 从当前机械臂状态进入负载辨识模式，并记录进入时关节位置 $\mathbf{q}_{\text{lock}}$ ；
- (2) 切换到位置控制器，使机械臂保持在 $\mathbf{q}_{\text{lock}}$ 附近；
- (3) 根据当前关节状态 $(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 计算机械臂本体理论补偿力矩 $\boldsymbol{\tau}_{\text{comp}}$ ；
- (4) 读取滤波后的实测关节力矩并进行预处理，得到 $\hat{\boldsymbol{\tau}}^{\text{meas}}$ ；
- (5) 在基线统计窗口内，计算并累计残差 r_i ，得到基线均值 $\bar{r}_i$ ；
- (6) 基线统计完成后，在当前真实姿态下计算单位外载响应 $\mathbf{h}(\mathbf{q})$ ；
- (7) 利用关节集合 $\mathcal{S} = \{2, 3, 4, 5\}$ 的残差增量和单位响应，求解最小二乘估计 $\Delta \hat{F}$ ；
- (8) 将 $\Delta \hat{F}$ 与参考外载叠加并限幅，滤波后得到平滑外载估计 $\hat{F}$ ；

4.5.1 末端外载的等效建模

设末端未知负载的等效重力大小为

$$F_{\text{ext}} \geq 0, \quad (4-78)$$

其作用方向在基坐标系下定义为

$${}^0\mathbf{f}_{\text{ext}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F_{\text{ext}} \end{bmatrix}. \quad (4-79)$$

本设计将该外力作用在末端参考连杆坐标系中的某一点。设末端参考坐标系记为 $\{e\}$ ，其相对于基坐标系 $\{0\}$ 的姿态由旋转矩阵 ${}^0\mathbf{R}_e$ 表示，末端局部作用点在 $\{e\}$ 中的坐标为

$${}^e\mathbf{p}_a = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix}. \quad (4-80)$$

则该外力在末端局部坐标系中的表达为

$${}^e\mathbf{f}_{\text{ext}} = ({}^0\mathbf{R}_e)^T {}^0\mathbf{f}_{\text{ext}}. \quad (4-81)$$

相应的局部力矩为

$${}^e\boldsymbol{\mu}_{\text{ext}} = {}^e\mathbf{p}_a \times {}^e\mathbf{f}_{\text{ext}}. \quad (4-82)$$

因此，施加在末端参考坐标系上的等效外部广义力可写为

$${}^e\mathbf{w}_{\text{ext}} = \begin{bmatrix} {}^e\mathbf{f}_{\text{ext}} \\ {}^e\boldsymbol{\mu}_{\text{ext}} \end{bmatrix}. \quad (4-83)$$

4.5.2 机械臂本体补偿力矩计算

为了从实测力矩中分离出外载影响，本设计首先利用 Pinocchio 与 URDF 机器人模型计算无外载时的理论补偿力矩。设该理论补偿力矩为

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{comp}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \in \mathbb{R}^n. \quad (4-84)$$

该项由两部分组成：

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{comp}} = \boldsymbol{\tau}_{\text{bias}} + \Delta\boldsymbol{\tau}_{\text{fit}}, \quad (4-85)$$

其中：

(1) $\boldsymbol{\tau}_{\text{bias}}$ 为由机器人刚体模型计算得到的关节偏置项，可理解为

$$\boldsymbol{\tau}_{\text{bias}} = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}), \quad (4-86)$$

其中 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$ 为科里奥利/离心项， $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ 为重力项。

(2) $\Delta\boldsymbol{\tau}_{\text{fit}}$ 为本设计在第 2、3 关节上额外叠加的静态重力拟合修正项，用于弥补模型参数误差带来的系统性偏差。

因此， $\boldsymbol{\tau}_{\text{comp}}$ 表示在当前姿态下机械臂本体理论上应承担的力矩，而不包含未知末端负载的影响。

4.5.3 单位外载响应的静力矩映射

为了将残差力矩映射为未知负载大小，本设计采用单位外力响应法。设在当前姿态 $\mathbf{q}$ 下，对末端施加单位外载

$$F_{\text{unit}} = 1 \text{ N}, \quad (4-87)$$

并由静力学模型计算对应关节力矩。记无外载时的静力矩为

$$\boldsymbol{\tau}^{(0)}(\mathbf{q}), \quad (4-88)$$

单位外载作用时的静力矩为

$$\boldsymbol{\tau}^{(1)}(\mathbf{q}). \quad (4-89)$$

则单位外载对各关节的力矩响应定义为

$$\mathbf{h}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}^{(1)}(\mathbf{q}) - \boldsymbol{\tau}^{(0)}(\mathbf{q}). \quad (4-90)$$

显然，若外载满足上述单标量建模，则其对关节造成的额外力矩近似满足

$$\Delta \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} \approx F_{\text{ext}} \mathbf{h}(\mathbf{q}). \quad (4-91)$$

这一步的物理意义是：在当前真实姿态下，先由模型回答“若末端竖直向下多受 1 N 外力，各关节会多承担多少力矩”，从而得到当前姿态相关的灵敏度向量 $\mathbf{h}(\mathbf{q})$ 。

4.5.4 残差构造与基线估计

为了抑制模型误差、摩擦静差以及零偏等系统性影响，本设计在进入辨识状态后先进行一段时间的基线统计，从而去除这部分残差对模型的影响。本设计选取对末端载荷更敏感的关节集合

$$\mathcal{S} = \{2, 3, 4, 5\}, \quad (4-92)$$

并对集合内每个关节定义当前残差

$$r_i = \tilde{\tau}_i^{\text{meas}} - \tau_{\text{comp},i}, \quad i \in \mathcal{S}. \quad (4-93)$$

在辨识状态开始后的基线统计窗口内，机械臂保持静止。本设计对残差做时间平均，得到基线残差均值

$$\bar{r}_i = \frac{1}{N_b} \sum_{k=1}^{N_b} r_i(k), \quad i \in \mathcal{S}, \quad (4-94)$$

其中 N_b 为基线统计窗口内的有效采样点数， $r_i(k)$ 为第 k 个采样时刻的关节残差。基线残差的作用在于，将模型不完美、未建模摩擦、安装误差以及空载偏置等缓慢变化项先吸收进去，使后续辨识更加关注挂载前后增加的那部分力矩。因此，在线辨识实际采用的残差增量为

$$\Delta r_i = r_i - \bar{r}_i, \quad i \in \mathcal{S}. \quad (4-95)$$

4.5.5 基于最小二乘的载荷估计

在当前姿态下，若外载满足单标量模型，则对每个参与估计的关节应近似满足

$$\Delta r_i \approx h_i(\mathbf{q}) \Delta F, \quad i \in \mathcal{S}, \quad (4-96)$$

其中 $h_i(\mathbf{q})$ 为第 i 个关节在当前姿态下的单位外载响应， ΔF 为相对于参考外载的未知增量。将所有参与估计的关节写成超定方程组，可得

$$\Delta \mathbf{r} \approx \mathbf{h} \Delta F. \quad (4-97)$$

由于 ΔF 为标量，其最小二乘解可直接写为

$$\Delta \hat{F} = \frac{\sum_{i \in \mathcal{S}} h_i(\mathbf{q}) \Delta r_i}{\sum_{i \in \mathcal{S}} h_i^2(\mathbf{q})}. \quad (4-98)$$

本设计还对可观测性较差的关节做了筛选。若某关节的 $|h_i(\mathbf{q})|$ 过小，则说明该关节在当前姿态下对末端竖直载荷不敏感，其观测值对辨识贡献有限，因此在实现中将其自动忽略，以避免不正确放大。若参考外载记为 F_{ref} ，则原始估计值更新为

$$\hat{F}_{\text{raw}} = \text{clip}\left(F_{\text{ref}} + \Delta \hat{F}, 0, F_{\text{max}}\right), \quad (4-99)$$

其中 $\hat{F}_{\text{raw}}$ 为未经滤波的原始外载估计， F_{max} 为允许的最大外载上限， $\text{clip}(\cdot)$ 表示限幅运算。

为减小测量噪声和离散扰动对辨识结果的影响，本设计对原始估计值采用一阶低通滤波。记滤波后的外载估计为 $\hat{F}(k)$ ，则离散滤波形式为

$$\hat{F}(k) = \hat{F}(k-1) + \alpha(k) \left[\hat{F}_{\text{raw}}(k) - \hat{F}(k-1) \right]. \quad (4-100)$$

其中，滤波系数 $\alpha(k)$ 由截止频率 f_c 与采样周期 $\Delta t(k)$ 决定：

$$\alpha(k) = 1 - \exp(-2\pi f_c \Delta t(k)). \quad (4-101)$$

第五章 基于手部跟踪的视觉伺服控制方法

5.1 视觉感知系统构建

为了使机械臂具备面向人机交互的在线感知与运动调整能力，本设计在机械臂末端安装单目 RGB 摄像头，并采用“眼在手上”的安装方式，使相机视角能够随末端运动而变化。与固定外部相机方案相比，该布置方式更便于保持手部目标位于视场中央附近，也更容易与机械臂现有的运动学链路建立统一关系。

在视觉数据获取方面，系统通过 GStreamer 读取末端 RGB 图像流，并通过 ROS2 接口将图像数据与机械臂状态信息进行统一管理。考虑到本设计采用单目视觉方案，控制过程不直接依赖深度图像或点云信息，而是依赖手部关键点在图像中的相对位置和尺度变化构建视觉误差。为提高系统稳定性，实验场景需尽量满足照明均匀、背景相对简单、单手输入且手部始终处于相机有效视场范围内等条件，从而降低遮挡、运动模糊和复杂背景对跟踪效果的影响。

5.2 相机标定与手部关键点提取

普通相机在成像过程中大致会产生两方面的误差，一方面来自相机感光元件本身的制造偏差，例如像素单元并非理想的正方形，或者传感器存在一定的倾斜、歪斜等问题；另一方面则来自镜头的制造和安装误差，所以实际镜头通常不完全符合理想的小孔成像模型，因此往往会产生非线性的径向畸变，这种畸变的直观表现是画面中的直线不直，或是产生类似鱼眼镜头的畸变效果。

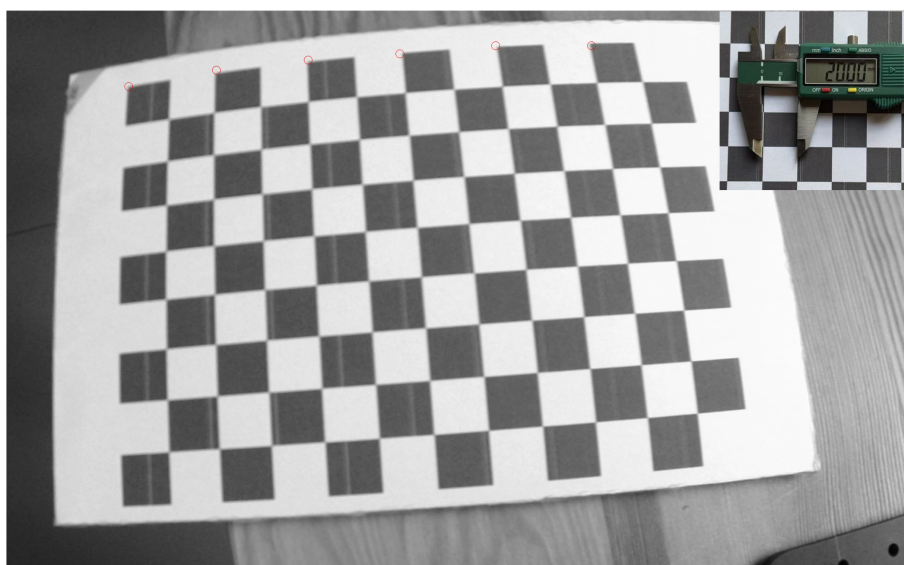


图 5-1 相机标定过程

在一些对图像坐标稳定性要求较高的应用例如尺寸测量、视觉 SLAM 和图像特征伺服中，需要获得较为精确的像素坐标与相机成像模型之间的对应关系。这些参数通常需要通过实验采集数据来拟合求解。这个求取相机成像参数的过程，就称为相机标定。本设计采用张正友平面标定方法 [37] 完成相机内参估计与径向畸变校正，得到焦距、主点位置和畸变系数等参数。采用 9x12 格、每格边长 2cm 的棋盘格标定板进行标定，如图5-1所示。

在完成标定与去畸变处理后，系统基于 MediaPipe Hands 框架对单帧 RGB 图像进行手部关键点提取，在单目图像输入条件下检测手掌区域，并提取出 21 个手部关键点，同时输出左右手类别和检测置信度信息 [38]。在多种光照环境下对识别效果进行测试，系统能够准确的识别出不同姿势下手部的关键点，识别帧率能够达到约 36FPS，如图5-2所示。

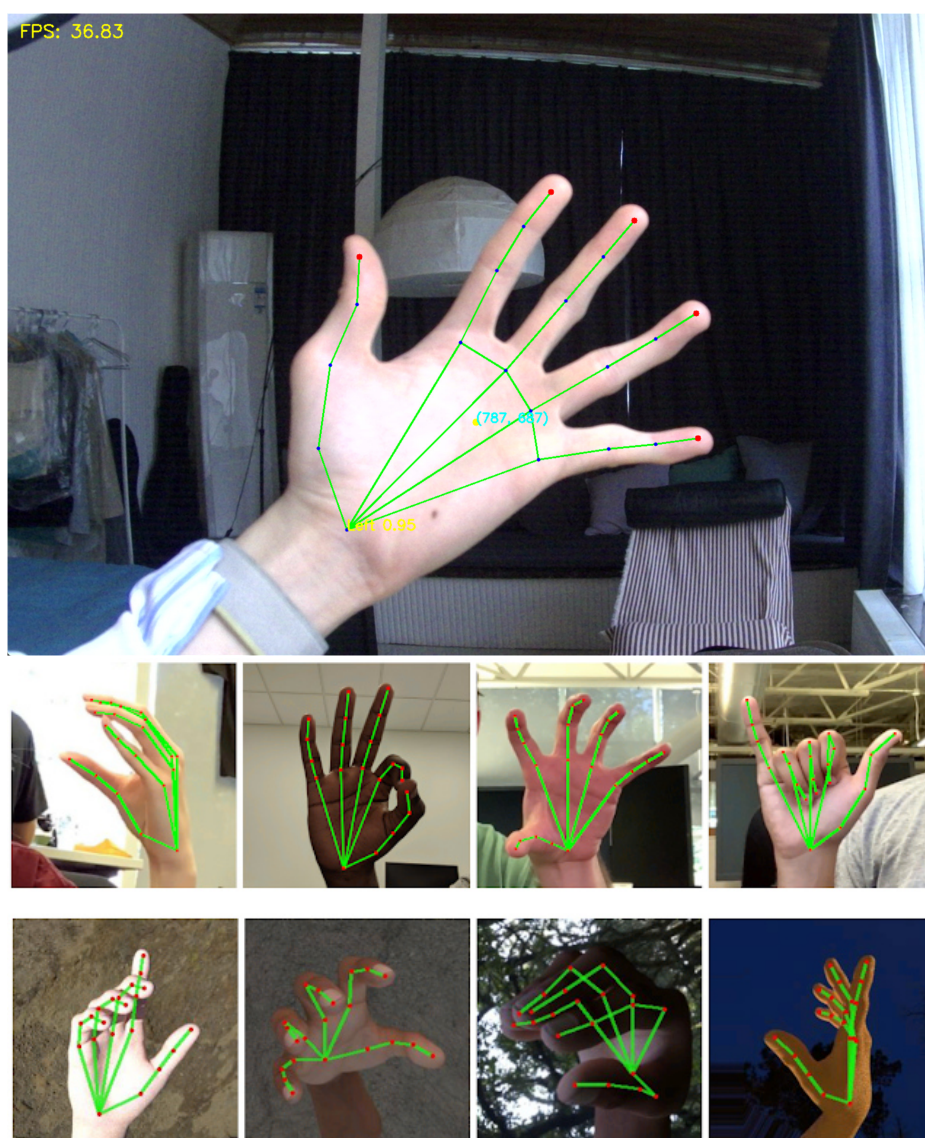


图 5-2 手部识别效果测试

5.3 基于手部特征的视觉伺服控制流程

本设计提出的手部跟踪流程可概括为“图像采集、手部关键点提取、视觉误差构建、控制决策输出、机械臂执行与反馈更新”五个步骤。摄像头挂载在机械臂的末端，如图5-3所示。



图 5-3 摄像头挂载位置

首先，RGB 摄像头实时采集操作者手部图像；其次，系统调用 MediaPipe Hands 提取单手 21 个关键点，并根据关键点的图像坐标构造用于跟踪的手掌中心与手掌尺度特征。若将手腕关键点及四个手指根部关键点的像素坐标分别记为 (u_i, v_i) ，其中 $i \in \{0, 5, 9, 13, 17\}$ ，则手掌中心可定义为

$$u_c = \frac{1}{5} \sum_{i \in \{0, 5, 9, 13, 17\}} u_i, \quad v_c = \frac{1}{5} \sum_{i \in \{0, 5, 9, 13, 17\}} v_i \quad (5-1)$$

为近似反映手部与相机之间的前后距离变化，本设计进一步将食指根部与小指根部之间的像素距离定义为手掌宽度特征：

$$w_c = \sqrt{(u_5 - u_{17})^2 + (v_5 - v_{17})^2} \quad (5-2)$$

若图像中心期望位置记为 (u^*, v^*) ，期望手掌宽度记为 w^* ，则视觉误差可写为

$$e_u = u_c - u^*, \quad e_v = v_c - v^*, \quad e_s = w_c - w^* \quad (5-3)$$

其中， e_u 与 e_v 分别反映图像平面横向与纵向偏差， e_s 反映手部相对远近变化所对应的尺度偏差。本设计考虑到单目相机无法直接得到深度信息且跟踪目标已知，因此利用手部真实尺寸先验建立粗略距离估计，结合现行国家标准 GB/T 16252-2023[39]、GB/T 10000-2023[40] 以及一项 2026 年发表的对中国青年女性三

维手部形态的研究 [41]，得到成年人掌骨处手宽均值为 82.338 mm、手长均值为 176.721 mm。本文取真实手掌宽度参考值为

$$W_0 = 80 \text{ mm} \quad (5-4)$$

在完成相机标定后，像素焦距 f_x 可由相机内参矩阵获得。根据针孔相机模型，物体在图像中的投影尺寸与其真实尺寸成正比、与距离成反比，因此可由手掌宽度像素值估计手部到相机的近似距离：

$$\hat{Z}_w = \frac{f_x W_0}{w_c} \quad (5-5)$$

其中， $\hat{Z}_w$ 为基于手掌宽度得到的单目距离估计值。考虑到手掌相对相机发生明显旋转时，像素宽度会因透视投影而减小，仅依靠 w_c 容易造成距离误判。因此，本设计进一步引入手部长度的尺寸比值作为有效性判据。若以手腕关键点 0 和中指指尖关键点 12 之间的像素距离近似表示手部长度的，则有

$$l_c = \sqrt{(u_0 - u_{12})^2 + (v_0 - v_{12})^2}, \quad R_c = \frac{l_c}{w_c} \quad (5-6)$$

参考真实尺寸比值可取为

$$R_0 \approx \frac{176.721}{82.338} \approx 2.15 \quad (5-7)$$

当 R_c 与 R_0 的偏差处于允许范围内时，认为手部姿态较适合进行尺度测距；当偏差过大时，则说明手部可能存在明显旋转、遮挡或关键点异常，此时降低尺度控制权重或暂停 Z 向距离更新。若期望跟踪距离记为 Z^* ，则距离误差可写为

$$e_Z = \hat{Z}_w - Z^* \quad (5-8)$$

对应的期望像素手掌宽度可由 $w^* = f_x W_0 / Z^*$ 得到。

在决策阶段，系统首先对关键点有效度和检测置信度进行判定，并对误差量进行低通滤波。考虑到本设计采用眼在手上的末端相机布置，图像横向偏差可近似理解为相机光轴在水平方向上的指向误差，因此优先映射为末端偏航角修正；图像纵向偏差可近似理解为相机光轴在竖直方向上的指向误差，优先映射为末端俯仰角修正。若将图像平面误差模长记为

$$r = \sqrt{e_u^2 + e_v^2} \quad (5-9)$$

则本设计采用内外两级 PID 控制器生成偏航与俯仰修正量：

$$(\Delta\psi, \Delta\theta) = \begin{cases} (PID_{u,out}(e_u), PID_{v,out}(e_v)), & r \geq r_{th} \\ (PID_{u,in}(e_u), PID_{v,in}(e_v)), & r < r_{th} \end{cases} \quad (5-10)$$

其中, $\Delta\psi$ 表示末端偏航角修正量, $\Delta\theta$ 表示末端俯仰角修正量, $PID_{u,out}$ 和 $PID_{v,out}$ 为大误差阶段的外环控制器, $PID_{u,in}$ 和 $PID_{v,in}$ 为目标点在中心附近时的内环控制器。外环参数相对平缓, 用于在目标距离图像中心较远时稳定靠近; 内环参数用于在目标进入中心附近后进一步减小稳态误差。对于尺度距离误差, 系统采用独立的 PID 环节生成末端 Z 向修正量:

$$\Delta z = PID_Z(e_z) \quad (5-11)$$

最后, 将上述偏航、俯仰和 Z 向修正量结合当前末端位姿转换为底层关节控制指令。机械臂执行相应动作后, 视觉系统继续获取下一帧图像, 重新计算误差并更新控制量, 从而形成连续的闭环控制过程。

手部运动跟踪策略的目标有二: 1) 使手掌中心尽量保持在图像中心附近; 2) 使手掌宽度维持在设定参考值附近。跟踪图像的平面移动, 可以使得 X - Y 轴得到跟踪, 而通过调节机械臂末端距离手掌的远近来闭环维持测量的手掌宽度, 则可以跟踪 Z 轴。结合机械臂硬件设计的球腕构型特点, 末端姿态调整相较于末端位置移动具有更好的灵活性, 因此控制策略优先利用末端偏航角消除横向图像误差, 利用末端俯仰角消除纵向图像误差, 并利用末端 Z 向进给运动修正尺度误差。

在每个控制周期内, 系统先根据 e_u 和 e_v 计算图像平面误差模长, 并依据阈值在外环 PID 与内环 PID 之间切换: 当目标偏离图像中心较远时, 外环 PID 输出相对平缓的偏航和俯仰修正量, 使末端视线方向逐步转向手部目标; 当目标进入中心附近后, 内环 PID 接管控制, 便于更精细地且更平缓地减小中心残余误差。与此同时, 尺度误差 e_s 独立作用于 Z 向距离调节, 当手掌宽度小于期望值时, 说明手部相对远离相机, 末端沿靠近方向修正; 当手掌宽度大于期望值时, 说明手部相对靠近相机, 末端沿远离方向修正。

在实际控制过程中, 当某一姿态修正量超过设定限幅, 或逆运动学求解判断该目标位姿不可达时, 控制器采用积分限幅的方式, 不再继续累积该方向误差, 避免积分饱和导致后续运动突变。当系统下一拍指令位置接近奇异区时, 对于俯仰方向受限的情况, 系统采用末端 Z 向小步长位移作为补偿; 对于偏航方向受限的情况, 系统优先采用末端横向小步长位移补偿, 若横向位移同样不可达, 则再采用 Z 向位移进行辅助补偿。为抑制图像噪声和控制振荡, 系统在输出前进一步引入误差死区、输出限幅和一阶低通滤波机制; 当检测置信度低于阈值或手部关键点暂时丢失时, 系统停止更新视觉修正量, 并保持在当前位置不继续追踪, 以避免机械臂因误检测而发生突变运动。

第六章 实验与结果分析

6.1 实验环境

为验证所设计六自由度机械臂系统的可行性与控制效果，本设计搭建了包含机械臂样机、关节驱动器、上位机控制平台、末端 RGB 摄像头以及配套软件环境在内的实验系统。整体实验在普通光照的室内环境中进行，如图6-1所示。

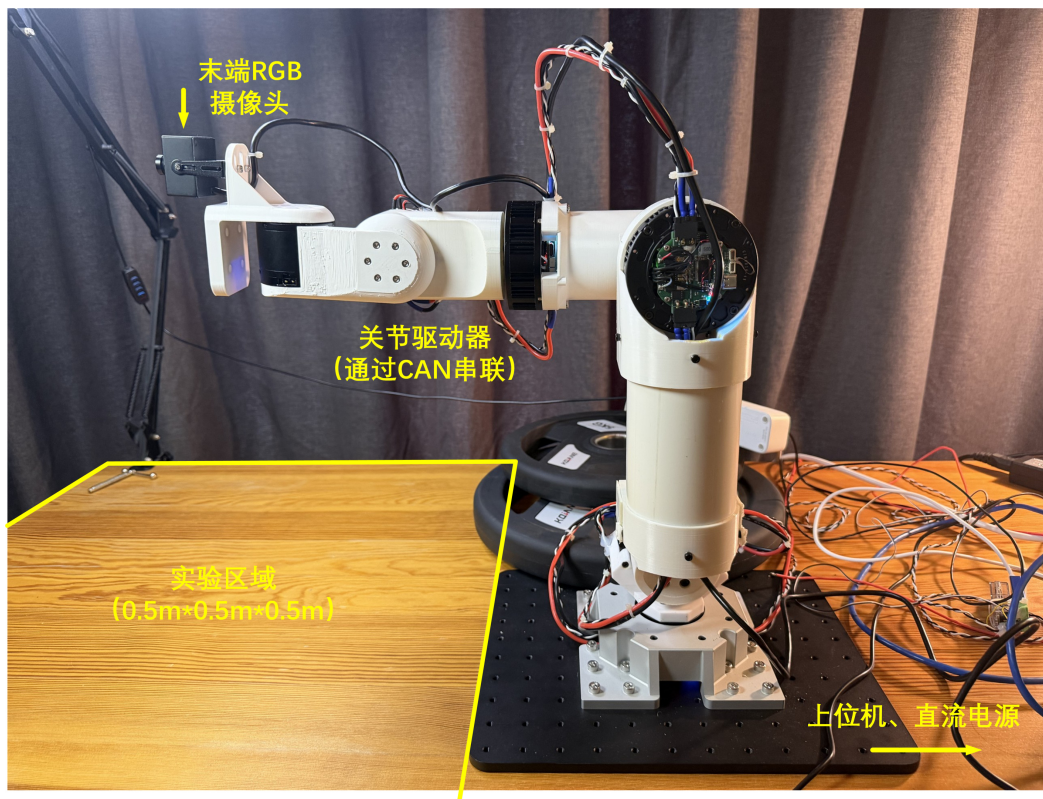


图 6-1 实验环境图

6.2 基本运动性能实验

一、多电机联动实验

在多电机联动实验中，系统通过一根 CAN 总线串联多个关节驱动器，实验中将总线最末端的电机定义为测试电机，将测试电机置于电流控制模式并设置给定电流为 0，将其余电机置于位置控制模式。实验中用手自由转动测试电机，通过 500Hz 频率的控制命令，读取测试电机的单圈绝对值角度并赋值给其余的电机，实现多关节主从控制，实验环境如图6-2所示。实验结果表明，多关节主从控制过程平稳，总线通信无明显错误与丢包现象，说明本设计所设计的驱动器通信方案能够支撑多自由度机械臂系统的实时控制需求。

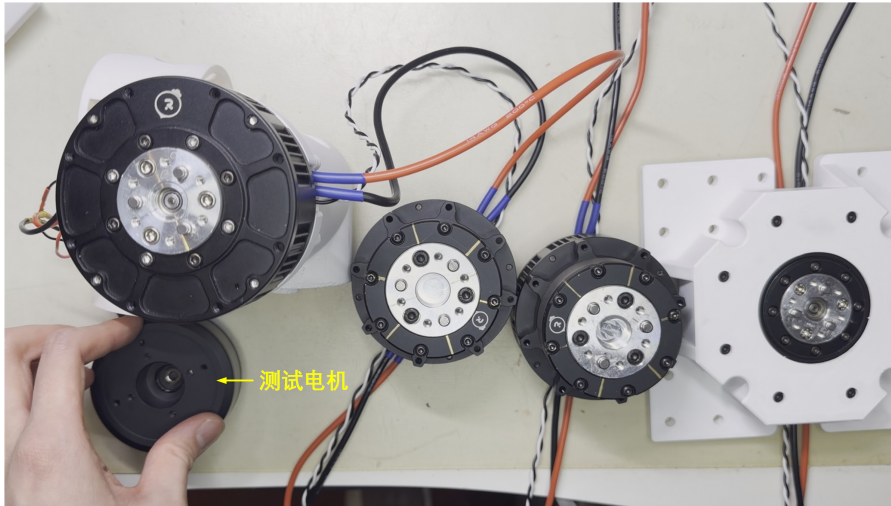


图 6-2 多电机主从控制实验

二、整机标定与姿态可视化实验

在整机标定与姿态可视化实验中，机械臂完成总装后，依据 URDF 模型中定义的原点姿态对各关节角度误差进行零位标定，并将减去零位误差后的位姿信息实时回传到上位机。分别在 Pinocchio Meshcat 和 ROS2 MoveIt 两种上位机中比较机械臂实际姿态与上位机模型重构姿态，可以看到两者基本一致，如图6-3和6-4所示。本实验说明前文中建立的结构模型、关节定义关系及状态回传链路准确。



图 6-3 在 Pinocchio Meshcat 中验证姿态可视化正确性

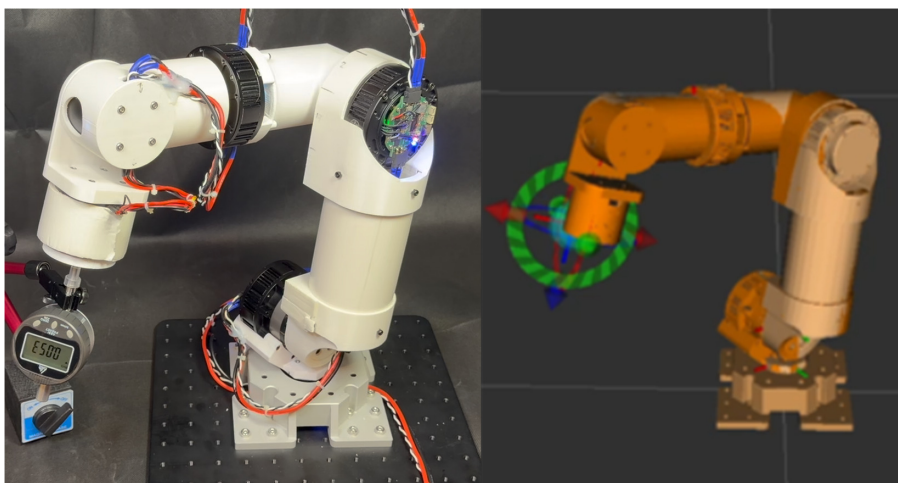


图 6-4 在 ROS2 MoveIt 中验证姿态可视化正确性

三、位姿运动和笛卡尔运动实验

在位姿运动和笛卡尔运动实验中，机械臂能够根据给定的整体位姿或末端在笛卡尔空间下的位移增量进行运动。位姿运动实验中，机械臂由 1 号位姿开始，经过连续的平滑运动到达最终 5 号位姿，整个运动过程如图6-5所示。

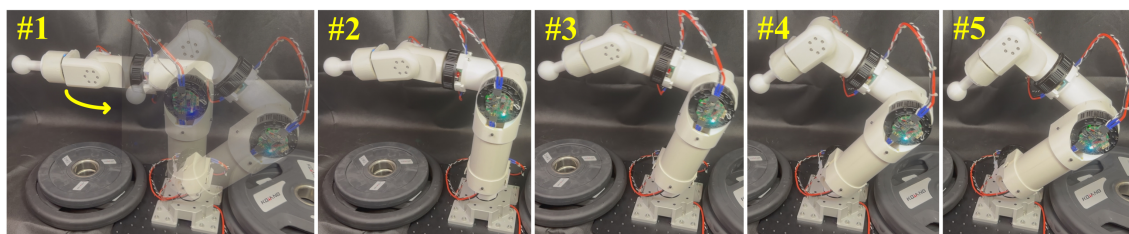


图 6-5 位姿运动实验

笛卡尔运动实验中，将机械臂末端坐标系建立在末端球体的顶点 P 上，选择一个远离奇异点的初始位置，控制末端绕 P 点旋转，使用视频记录并叠加多帧照片得到图6-6(a)。然后，控制末端沿直线 L 匀速运动，如图6-6(b) 所示。整个运动过程中，机械臂运动平滑无抖动，且能够严格按照末端笛卡尔坐标系进行运动。

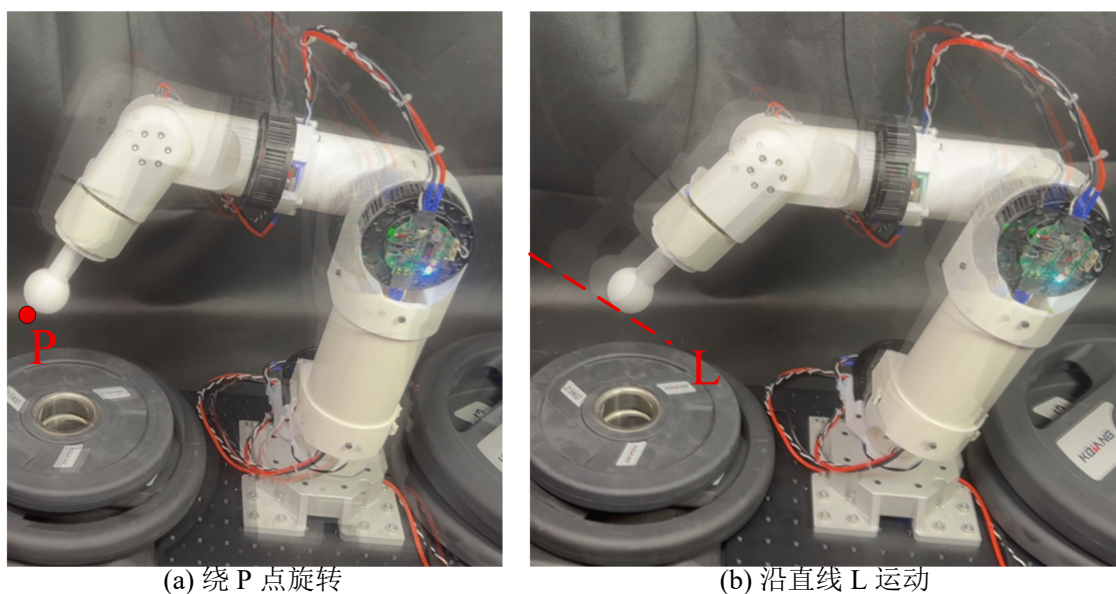


图 6-6 笛卡尔运动实验示意图

上述实验结果表明，本设计所设计、装配的机械臂系统已具备基础运动能力，底层驱动、总线通信、力学模型与上位机控制程序之间能够形成一致的控制闭环。

6.3 重复精度实验

为进一步评估机械臂末端在重复到位过程中的稳定性，本设计开展了重复精度实验，测试环境如图6-7所示。实验测量仪器采用三量 JD09 数显千分表，其测量

精度为 0.001 mm，量程为 0–12.7 mm。轨迹规划器采用 ROS2 MoveIt OMPL。控制层采用力矩前馈配合位置速度混合控制，控制频率设置为 500 Hz。

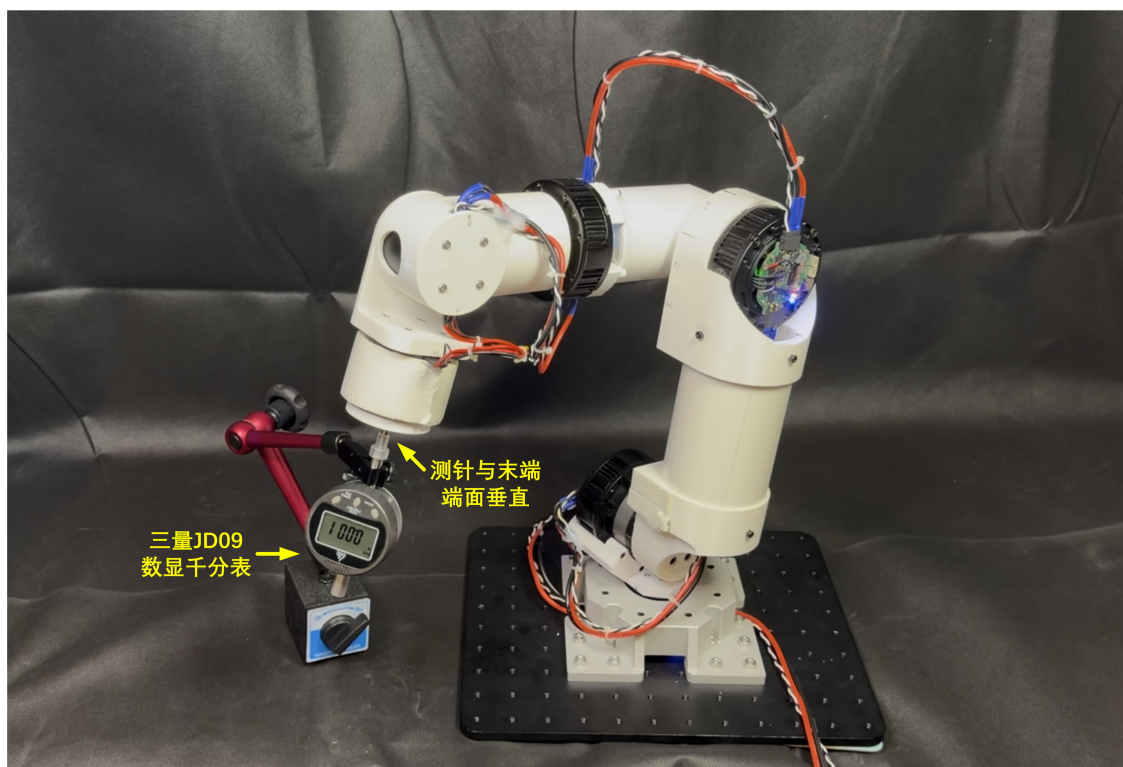


图 6-7 重复精度实验环境

实验开始前，系统先控制机械臂到达一个预设姿态。随后，调整千分表表座，使千分表测针与机械臂末端端面保持垂直接触，并记录此时的千分表读数。完成初始调整后，系统继续控制机械臂在直立姿态和预设姿态之间多次往返。每次机械臂返回预设姿态并稳定后，系统记录一次千分表读数。整个实验连续进行了六次，以此评估机械臂末端在同一目标姿态下的重复到位一致性。

实验测得的六次读数如图6-8所示。根据实验数据，第 1 次至第 6 次的千分表读数分别为 0.045 mm、0.062 mm、0.054 mm、0.052 mm、0.061 mm 和 0.063 mm。六次读数的平均值为 0.057 mm，最大值与最小值之差约为 0.018 mm，整理成表格如表6-1和图6-9所示。



图 6-8 重复精度测试千分表读数（从左到右分别为第 1-6 次到位）

表 6-1 机械臂重复精度实验测量结果

到位次数	千分表读数/mm	相对平均值偏差/mm
1	0.045	-0.012
2	0.062	0.005
3	0.054	-0.003
4	0.052	-0.005
5	0.061	0.004
6	0.063	0.006
平均值	0.057	—
误差峰峰值	0.018	—

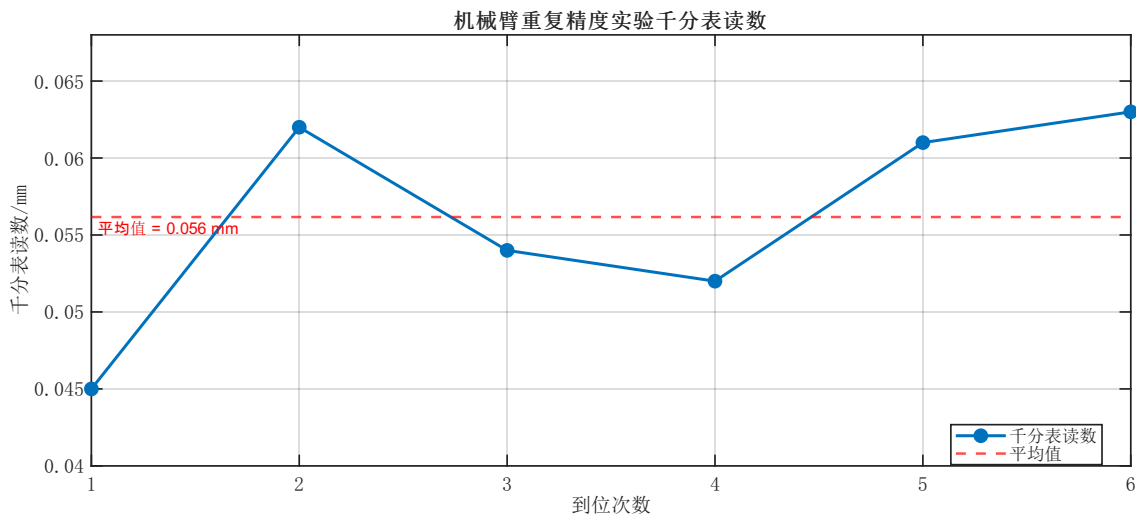


图 6-9 机械臂重复精度实验测试结果

综合实验结果可以看出，六次测量值均集中在较小范围内，相对平均值的误差保持在 $\pm 0.012 \text{ mm}$ 以内，说明机械臂在该测试工况下具有较好的重复到位稳定性。结合末端重复定位精度优于 $\pm 1 \text{ mm}$ 的设计目标可以看出，本次重复精度测试结果已经大大优于既定设计目标，满足设计要求。这也说明本设计所采用的轨迹规划与控制方法能够较好地保证机械臂末端重复运动的一致性。

6.4 重力补偿与零力拖动实验

在验证机械臂的基础运动功能和精度后，进一步开展了重力补偿与零力拖动实验，着重评估系统动力学模型的准确度以及提出的非线性拟合方法的有效性。实验过程中，将机械臂置于纯力矩控制模式，根据当前位置实时计算并下发力矩指令 τ_{cmd} ，如下式。

$$\tau_{\text{cmd}} = \tau_b + \Delta\tau_{23} + \tau_f, \quad (6-1)$$

其中 $\Delta\tau_{23}$ 为仅作用于 $J2$ 和 $J3$ 的静态重力拟合修正项, τ_f 为静摩擦补偿项。

在重力补偿实验中, 当各关节上电并进入力矩控制模式后, 系统根据实时姿态对重力项进行补偿。首先从一个初始位置 (图6-10(a)) 开始, 用手握住机械臂末端并轻轻向上抬起, 经过位置 (b) 和 (c) 抬升到图6-10(d) 所示位置并松手, 机械臂末端能够保持在原有位置, 证明重力补偿有效。

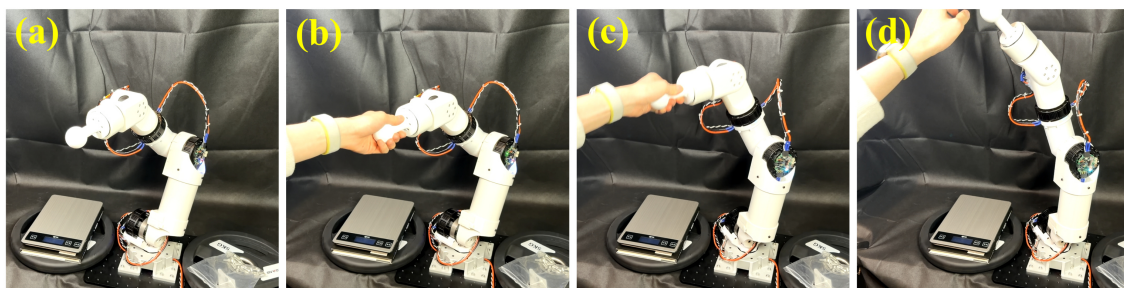


图 6-10 重力补偿实验一

然后, 为了测试机械臂靠近最不利位姿 [28] 时的重力补偿效果, 以图6-11(a) 为初始位置, 用手将机械臂末端经过位置 (b) 和 (c) 拖动到图6-11(d) 所示位置并松手, 此处机械臂的肩关节已经大部分伸展, 接近最不利位姿。松手后, 机械臂末端能够保持在原有位置, 证明重力补偿有效。

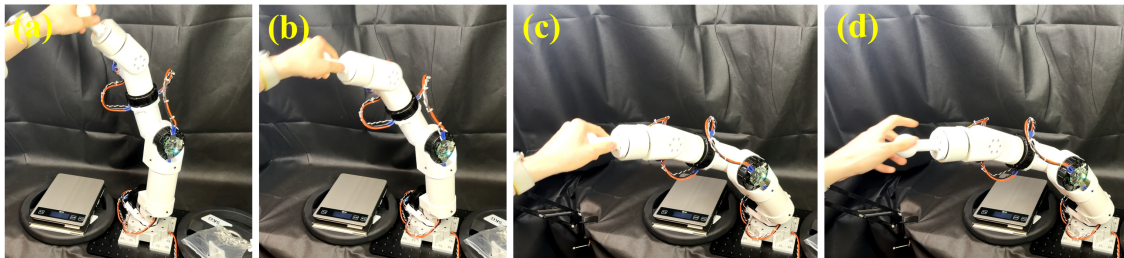


图 6-11 重力补偿实验二

在零力拖动实验中, 操作者在初始位置 (图6-12(a)) 使用食指向纸张内部方向轻触末端, 然后马上松手, 该载荷可近似为一个微小的冲击载荷。从图6-12(b)(c)(d) 可以看出, 在冲击载荷卸载后, 机械臂末端仍向冲击方向滑行了一段距离, 证明机械臂即使在处于不利位姿时, 也能补偿各关节所受力矩和摩擦力, 实现零力拖动。

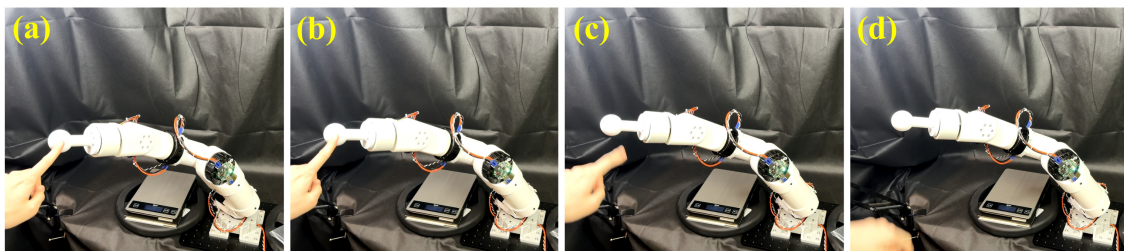


图 6-12 零力拖动实验一

为了量化能够使末端产生运动的最小外力，本实验准备了一个 100g（产生的重力约为 10 N）的挂载物（称量结果如图6-13(a) 所示），并将其挂载在机械臂末端，然后松开手。根据图6-13(c) 和 (d) 可以看出，松开手后，负载使得末端下沉，由此可得出能够使末端产生运动的最小外力约为 10 N。

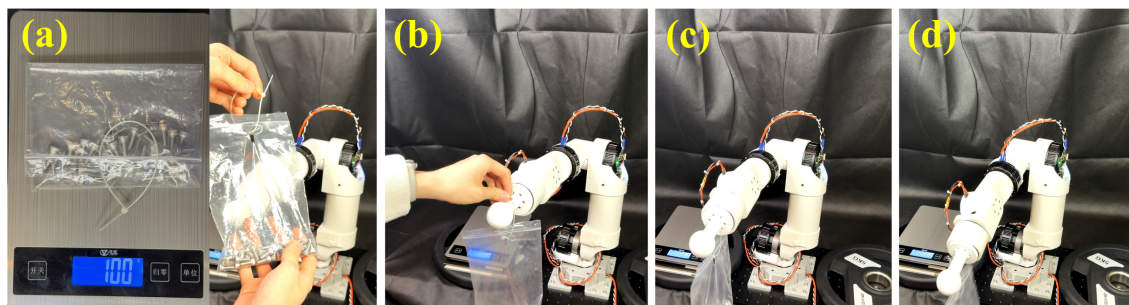


图 6-13 零力拖动实验二

6.5 末端负载辨识实验

为了验证所提出的末端负载在线辨识模型的可行性，在末端负载辨识实验中，首先使用位置控制器锁定机械臂的位置，此时由于各关节静摩擦的影响，机械臂的保持力矩同时包括模型力矩和各关节的残差项。系统首先对这部分残差进行采样，残差通过低通滤波器后进行累计，该过程持续 0.5s。此时，在机械臂末端挂载上重量未知的待测物，测量值收敛后系统将自动进入附加外载荷的重力补偿模式。实验取当地重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ，选取不同待测物重复三次实验。

第一次实验，选取重量为 565 g 的重物，所受重力约为 5.537 N。挂载示意和称量结果如图6-14所示。



图 6-14 末端负载辨识实验一

末端估测力如图6-15所示，在 $T = 21\text{ s}$ 时加载，系统的上升时间约为 3.5 s ，在 $T = 35\text{ s}$ 后测量结果收敛，测量值为 5.821 N （误差约为 5.13% ）。

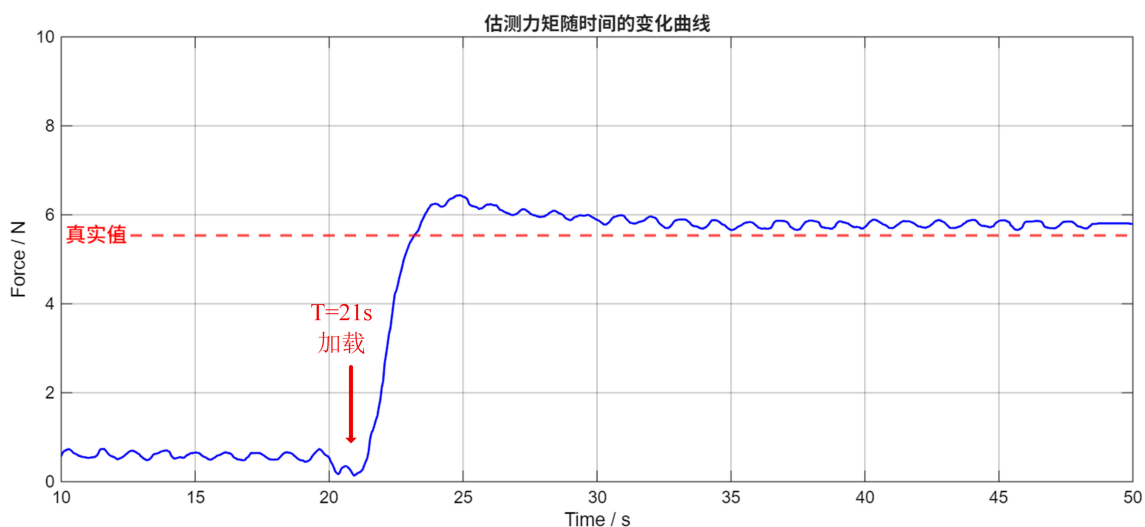


图 6-15 末端负载辨识实验结果图一

第二次实验，选取重量为 338 g 的重物，所受重力约为 3.312 N 。挂载示意和称量结果如图6-16所示。由于该均质物体的接触面为环状，因此可以将其等效为作用线在柱面中心横截面上的质点。

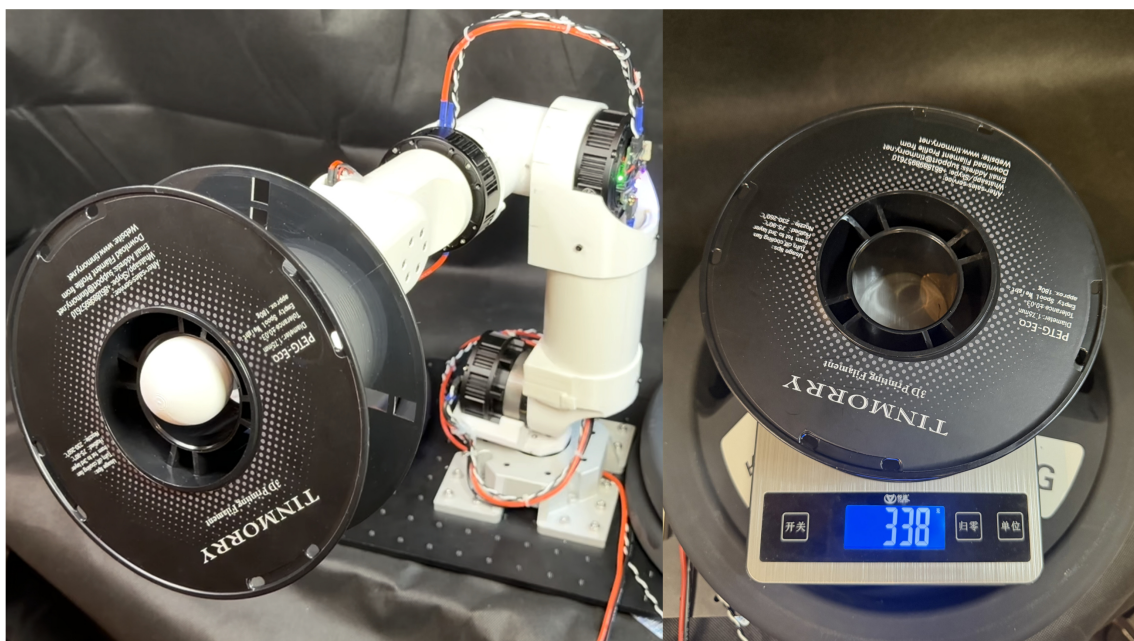


图 6-16 末端负载辨识实验二

末端估测力如图6-17所示，在 $T = 1\text{ s}$ 时加载，系统的上升时间约为 2.5 s ，在 $T = 10\text{ s}$ 后测量结果收敛，测量值为 3.593 N （误差约为 8.48% ）。

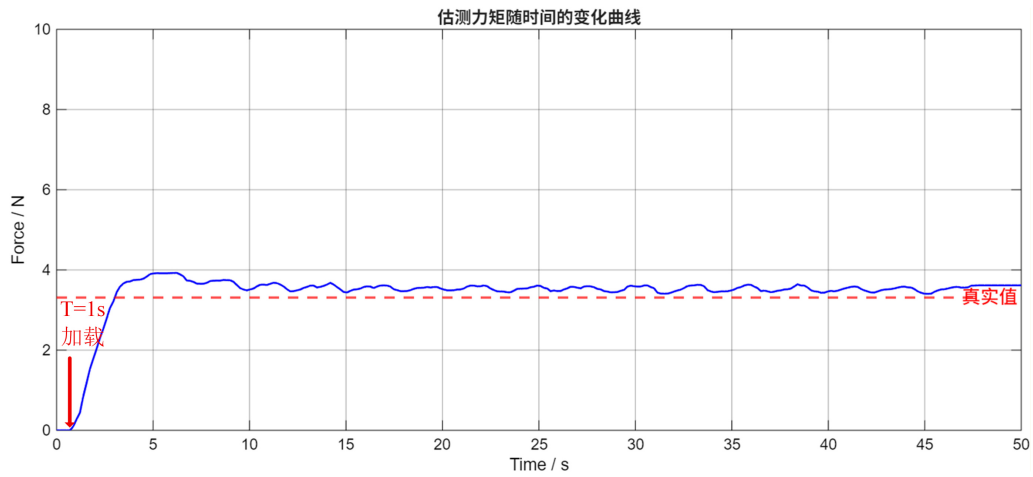


图 6-17 末端负载辨识实验结果图二

第三次实验，选取 2.5 kg 的杠铃片，所受重力约为 24.5 N，如图6-18所示。

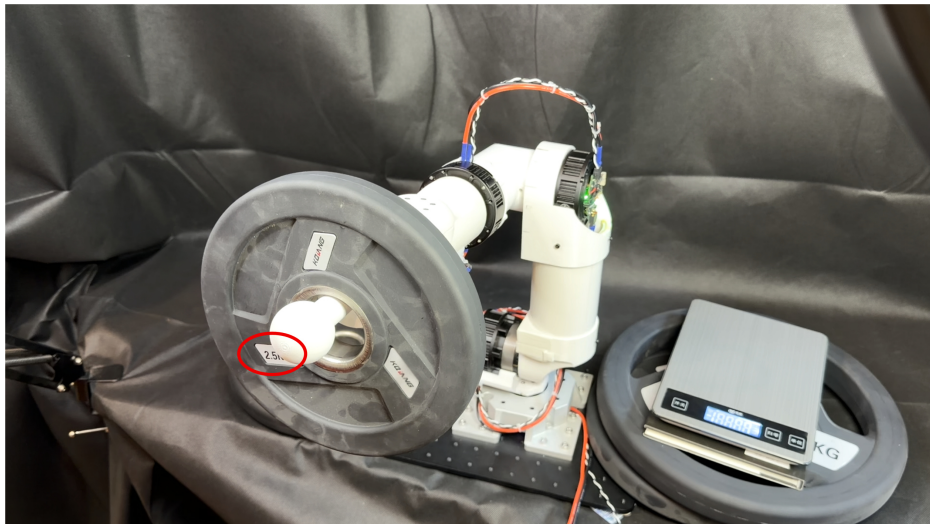


图 6-18 末端负载辨识实验三

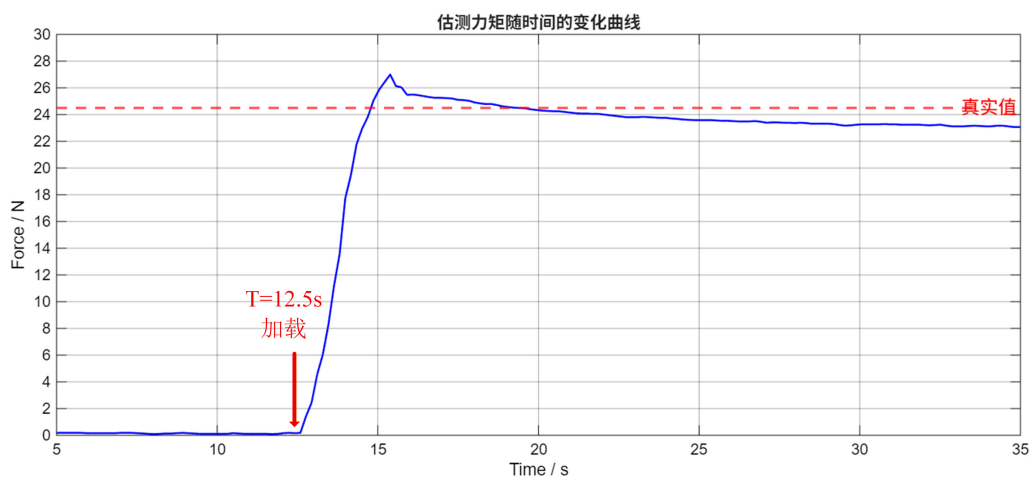


图 6-19 末端负载辨识实验结果图三

末端估测力如图6-19所示，在 $T = 12.5\text{ s}$ 时加载，系统的上升时间约为 2.5 s ，在 $T = 30\text{ s}$ 后测量结果收敛，测量值为 23.025 N （误差约为 6.02% ）。

将实验结果整理成表，如表6-2所示。由该表可知，末端负载辨识的误差能够小于 10% ，分析其误差来源，可能是由于关节静摩擦等因素导致残差项未能被完全去除。

表 6-2 末端负载辨识实验结果表

实验序号	真实重力值/N	估测重力值/N	误差/%
1	5.537 N	5.821 N	5.13 %
2	3.312 N	3.593 N	8.48 %
3	24.500 N	23.025 N	6.02 %

6.6 视觉伺服实验

在视觉伺服实验中，系统设置为闭环位置-速度-力矩混合跟踪模式，根据挂载在机械臂末端的单目普通 RGB 摄像头的图像反馈，实现闭环跟踪手掌中心，使得手掌中心恒定在图像视野中心，并能够动态保持手掌与机械臂末端的相对距离基本不变。实验环境如图6-20所示，将机械臂末端与手掌实际中心点 P 的相对距离保持在约 30 cm ，且手掌中心点投影到成像平面上的点 P' 基本处在图像中心。

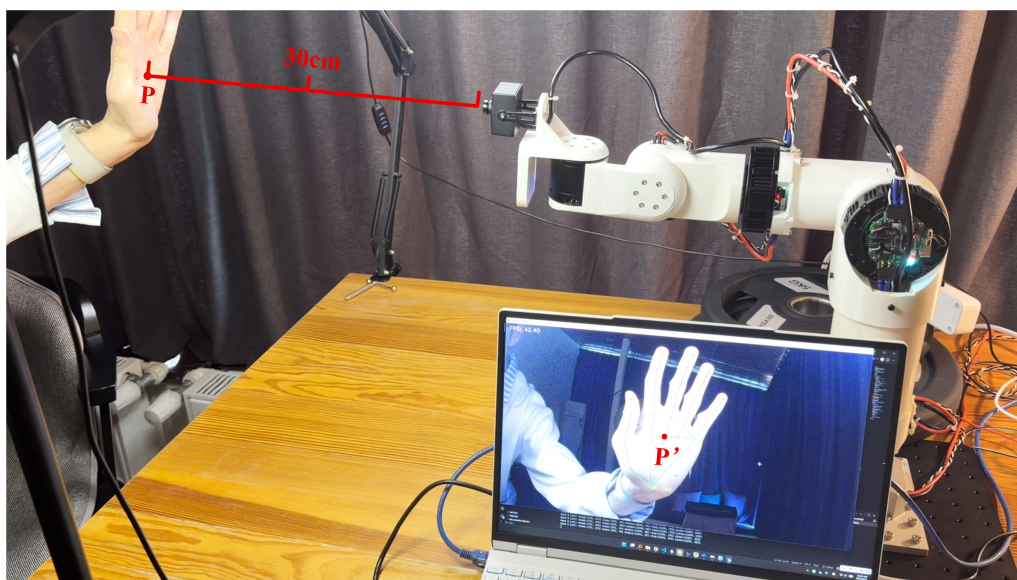


图 6-20 视觉伺服实验环境

开启视觉伺服模式，将手掌移动到不同的位置，实验证明，机械臂末端能够稳定跟踪手掌中心的空间运动，且识别帧率稳定在 30 FPS 以上，换算为控制频率为 30 Hz 以上，满足设计目标，如图6-21所示。



图 6-21 视觉伺服实验图示

第七章 总结与展望

7.1 全文总结

本设计围绕带有全关节力控的视觉伺服六自由度机械臂开展研究，针对机械臂在复杂环境下对自主感知、柔顺控制的需求，提出了一种低成本、高精度的机械臂整体硬件设计，并在此基础上开发了电路硬件、嵌入式和上位机软件，在联调完成后，设计实验对前期提出的技术指标进行了验证。实验证明，本文设计的机械臂性能指标已经全面优于设计目标。本设计最终达到的技术指标如下。

- (1) 机械臂工作空间不低于 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$;
- (2) 末端执行器带载能力达到 2.5 kg 以上（目标： 0.3 kg ）;
- (3) 末端重复定位精度达到 $\pm 0.012\text{ mm}$ （目标： $\pm 1\text{ mm}$ ）;
- (4) 视觉伺服控制动态响应频率达到 30 Hz 以上（目标： 10 Hz ）;
- (5) 零力拖动最小外力阈值不大于 10 N ;
- (6) 末端负载辨识误差小于 10% 。

本设计的主要工作和结论如下。

第一，完成了机械臂的机电硬件设计。本设计首先对现有协作机械臂进行了调研分析，结合工作空间、末端姿态灵活性和解析逆运动学求解需求，确定了以 Pieper 球腕构型为参考的六自由度串联机械臂方案，并完成了连杆尺寸、关节限位和整体装配结构设计。通过 MATLAB 工作空间分析验证了机械臂水平和垂直方向均可覆盖约 0.5 m 的设计范围；通过静力学力矩计算、ANSYS 强度校核和 RoboDK 运动学仿真完成了结构可行性验证，关键构件安全系数均大于 2.0 。硬件方面，设计了基于 AT32 主控的无刷电机驱动板和基于霍尔传感器阵列的输出轴绝对值编码器，为后续动力学建模和整机控制提供了硬件基础。

第二，完成了一种通用的电机驱控系统的软件开发与控制程序设计。本设计提出了一种面向关节驱动器的分层软件架构，将硬件抽象层、设备抽象层、控制算法层、控制逻辑层和通信协议层相互解耦，使同一套控制框架能够适配不同主控平台 and 不同规格关节电机。在控制算法方面，系统以磁场定向控制（FOC）为核心，实现了多种控制接口，并设计了电机参数在线辨识与校准流程。通信与上位机方面，构建了基于 CAN 总线的多关节通信链路，并进一步接入 ROS2 控制框架，实现关节状态读取、轨迹控制等接口。实验表明，该控制系统能够支撑 500 Hz 级多关节协同运动，为机械臂整机控制提供了稳定的软件基础。

第三，提出了一种重力补偿算法。本设计基于实测质量参数建立机械臂 URDF

模型，并利用 Pinocchio 动力学库实时计算各关节在当前姿态下的刚体动力学偏置力矩。考虑到实际样机存在连杆质量误差、质心偏差、安装误差、摩擦和传动迟滞等因素，本文在模型重力项基础上进一步针对主要承力的 $J2$ 和 $J3$ 关节建立静态重力残差模型，使用正余弦基函数和最小二乘方法辨识姿态相关修正项，并叠加静摩擦补偿与阻尼项形成最终力矩指令。实验结果表明，机械臂在普通姿态和接近最不利伸展姿态下均能够在松手后保持当前位置，说明所提出的重力补偿方法能够有效抵消机械臂自重影响；在此基础上实现的零力拖动功能能够在约 10 N 外力作用下产生顺从运动，充分验证了机械臂的柔顺控制潜力。

第四，提出了一种末端负载在线辨识模型。本设计将末端未知负载等效为作用于末端固定点、方向竖直向下的单一标量外力，并利用当前关节姿态下单位外载引起的关节力矩响应建立静力矩映射关系。辨识过程中，系统首先在位置保持状态下统计空载残差基线，然后在挂载未知负载后计算实测力矩残差增量，并选取对末端竖直载荷较敏感的关节集合构成超定方程，利用最小二乘方法估计负载增量，最后通过可观测性筛选、限幅和一阶低通滤波提高辨识结果的稳定性。实验中分别对约 5.537 N、3.312 N 和 24.500 N 的末端载荷进行测试，辨识误差分别为 5.13 %、8.48 % 和 6.02 %，均小于 10 %，说明该方法能够在不额外增加末端力传感器的条件下实现低成本负载估计。

第五，提出了一种基于手部识别模型的视觉伺服控制方法。本设计首先完成末端 RGB 相机的内参标定与畸变校正，然后利用 MediaPipe Hands 在单目图像中提取 21 个手部关键点，并以手腕和四个指根关键点的平均位置定义手掌中心，以食指根部和小指根部之间的像素距离定义手掌宽度特征。在此基础上，本文引入手掌宽度先验、相机像素焦距和手部长宽比较验，建立单目条件下的粗略距离估计方法；同时根据手掌中心相对图像中心的误差构造横向和纵向视觉误差，并通过内外两级 PID 控制将其映射为末端偏航和俯仰修正，将尺度误差映射为末端 Z 向修正。该方法避免了对深度相机和三维点云的依赖，能够利用低成本 RGB 相机实现手部中心跟踪和相对距离保持。

第六，设计了一系列实验，对机械臂整机性能和关键算法进行了验证。其中，基本运动实验依次验证了多电机联动、整机姿态标定、模型可视化、位姿运动和笛卡尔运动功能，表明底层驱动、总线通信、机械模型和上位机控制程序能够形成一致的控制闭环；重复精度实验验证了机械臂在同一目标姿态下的重复到位能力，空载末端重复定位误差保持在 ± 0.012 mm 以内，明显优于 ± 1 mm 的设计目标；重力补偿与零力拖动实验验证了动力学补偿和柔顺控制效果；末端负载辨识实验验证了所提出在线辨识模型的可行性；视觉伺服实验表明系统能够基于末端 RGB 图像稳定跟踪手掌中心运动，识别帧率稳定在 30FPS 以上，对应视觉伺服控制频率

达到 30 Hz 以上。综合实验结果可知,本设计所搭建的六自由度机械臂系统在工作空间、负载能力、重复定位精度、柔顺交互和视觉伺服响应等方面均达到或优于预期指标。

7.2 未来展望

尽管本设计已经完成基于视觉伺服控制的六自由度机械臂系统的主要平台搭建与基础验证工作,但围绕整机性能提升和上层控制算法优化,仍有多个方向值得继续深入研究。

首先,机械臂的本体结构可进一步优化。

- 1) 当前机械臂的主要结构件均为 3D 打印制造,通过静力学仿真可知,虽然上层连杆的强度远超设计要求,但承力较大的部件如 J_1 、 J_2 底座等,其安全系数在载重 5 kg 情况下已接近 2.0,而在此情况下主要承力关节仍留有很大的冗余量。由此说明,可以采用金属 CNC 加工等方式逐步从底座开始替换结构件,以便于扩展更大的载重范围和保证带载情况下的重复精度。
- 2) 当前机械臂为六自由度设计,奇异空间较大,不利于末端的灵巧操作。可以借鉴人体手臂的仿生结构,设计冗余自由度,提升机械臂的避障和操控能力。
- 3) 可以加入主动控制的末端执行器,例如夹爪、灵巧手等,配合指尖力传感和全关节力控,能够实现更加多元的交互操作。

其次,机械臂关节驱动系统可进一步迭代优化,提升控制频率与精度,并有必要结合第二编码器进行冗余安全保护。

- 1) 本文设计的驱动系统采用波特率为 1 mbps 的 CAN 总线互联。通过 4.2.1 节总线负载率测试可知,在 6 关节、500 Hz 控制频率下,总线负载率已接近安全极限。如果后续需要加入冗余自由度,则势必无法保证控制频率,并且 500 Hz 的控制频率对于高精度的实时力控应用仍然捉襟见肘。因此,有必要在下一版驱动系统中使用速率更高的通信协议,考虑到当前的两线互联接口是成本和空间取得平衡后的结果,现成可使用的物理层协议有 RS485 等;若考虑拓展到四线全双工接口,则可以选择 EtherCAT 等先进通信协议。
- 2) 为了保证通信频率,驱动系统将力矩、速度、位置等状态信息取半精度或标幺化后的值紧凑排列到 8 字节的 CAN 总线反馈帧中,并且在控制帧中,同样基于以上考虑对 K_p 、 K_d 等参数做了标幺化。这种处理方式会损失部分控制精度,特别是在末端到位后的微调过程中,不管是状态信息还是

控制信息，都可能出现跳变，从而导致控制精度降低。

3) 当前的第二编码器仅用于上电后的初始角度扇区判定，没有充分利用经过 4.1.3 节非线性校准后提升的精度。未来可以结合第二编码器的读数，实现消除减速器齿隙、编码器失效的冗余安全保护等更多功能。

4) 结合成本和体积考虑，当前受到较大力的关节 J_2 、 J_3 采用了二级减速器设计。在调试中发现，这种减速器的齿隙和内部摩擦力都比较大，虽然本文对此提出了针对性的拟合和补偿算法，但相比直驱或一级减速方案，该设计仍然影响了控制效果。因此后续的开发中，有两种方案：一是考虑换用扭矩能够达到要求的一级减速电机，二是在输出端采用法兰式扭矩传感器，以规避静摩擦力的影响。

再次，机械臂的上层控制算法仍有很大开发空间。

1) 尽管当前已经实现较为准确的接触力控制算法，但其实现方式主要是通过修改力矩前馈项进行的被动抵消。由于 500 Hz 控制频率的限制，现在暂时还不能将位置-速度混合控制算法中的 K_p 和 K_d 项下放到上位机层来控制。因此，下一步有必要结合驱动系统设计上的更新，提升控制频率和反馈精度，实现高精度、高带宽力控。

2) 当前的控制算法仅部分使用到多模态信息。未来希望能够结合末端触觉信息，实现力反馈、触觉、图像的多模态融合控制。同时，有必要结合当下的人工智能技术，在已经搭建好的平台上探索视觉-语言-动作（VLA）模型的应用。

随着这些工作的逐步推进，本设计所设计的六自由度机械臂系统有望从实验验证平台进一步发展为具有更高自主性的综合机器人系统。

致 谢

这里填写致谢内容。

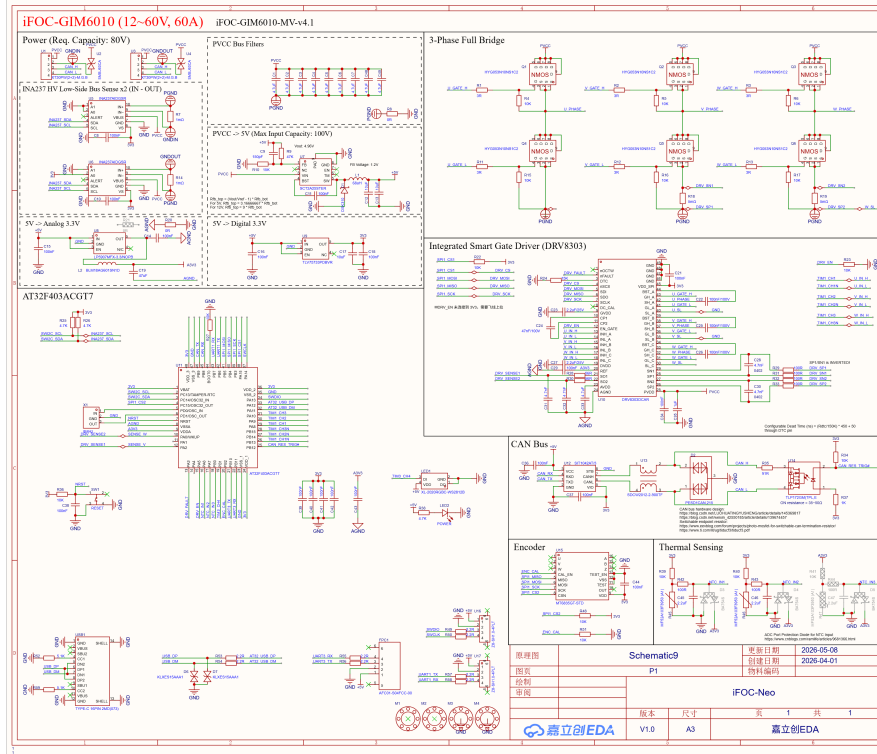
参考文献

- [1] International Federation of Robotics. History of Industrial Robots[EB/OL], 2026. <https://ifr.org/robot-history>.
- [2] J. Van. Mechanical Advantage: Two Northwestern University Engineers Are Developing Cobots – Machines That, Unlike Robots, Cooperate with Workers without Displacing Them[EB/OL]. Chicago Tribune, 1996 12. <https://peshkin.mech.northwestern.edu/cobot/chitrib/jonvan.html>.
- [3] J. E. Colgate, M. A. Peshkin. Cobots[P]. US Patent 5,952,796, 1999 9. <https://patents.google.com/patent/US5952796A/en>.
- [4] International Organization for Standardization. ISO/TS 15066:2016 Robots and Robotic Devices – Collaborative Robots[S]. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2016. <https://www.iso.org/standard/62996.html>.
- [5] C. Taesi, F. Aggogeri, N. Pellegrini. COBOT Applications—Recent Advances and Challenges[J]. Robotics, 2023, 12(3): 79.
- [6] J. J. Craig. Introduction to Robotics: Mechanics and Control[M]. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [7] AUBO Robotics. AUBO-i5 Collaborative Robot[EB/OL], 2026. <https://www.aubo-robotics.cn/en/product/aubo-i5/>.
- [8] JAKA Robotics. JAKA Zu 7 Collaborative Robot[EB/OL], 2026. <https://www.jaka.com/en/products/zu7/>.
- [9] ESTUN Automation. ER Series Industrial Robots[EB/OL], 2026. <https://en.estun.com/?product=er-series-industrial-robots>.
- [10] W. B. Gevarter. Robotics and Artificial Intelligence: A Survey[R], 1982. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir82-2479.pdf>.
- [11] A. Jokić, M. Bogić, B. Kovačević. A Review of Control Methods for the PUMA 560 Robot Manipulator[J]. Electronics, 2020, 9(6): 972.
- [12] F. Blaschke. The Principle of Field Orientation as Applied to the New Transvektor Closed-Loop Control System for Rotating-Field Machines[J]. Siemens Review, 1972, 39(5): 217–220.
- [13] M. T. Wishart, R. G. Harley. Controller Design for Applying Field-Oriented Control to the Permanent Magnet Synchronous Machine[J]. Electric Power Systems Research, 1990, 18(1): 1–7.
- [14] ODrive Robotics. ODrive High Performance Motor Control[CP/OL], 2026. <https://github.com/odriverobotics/ODrive>.

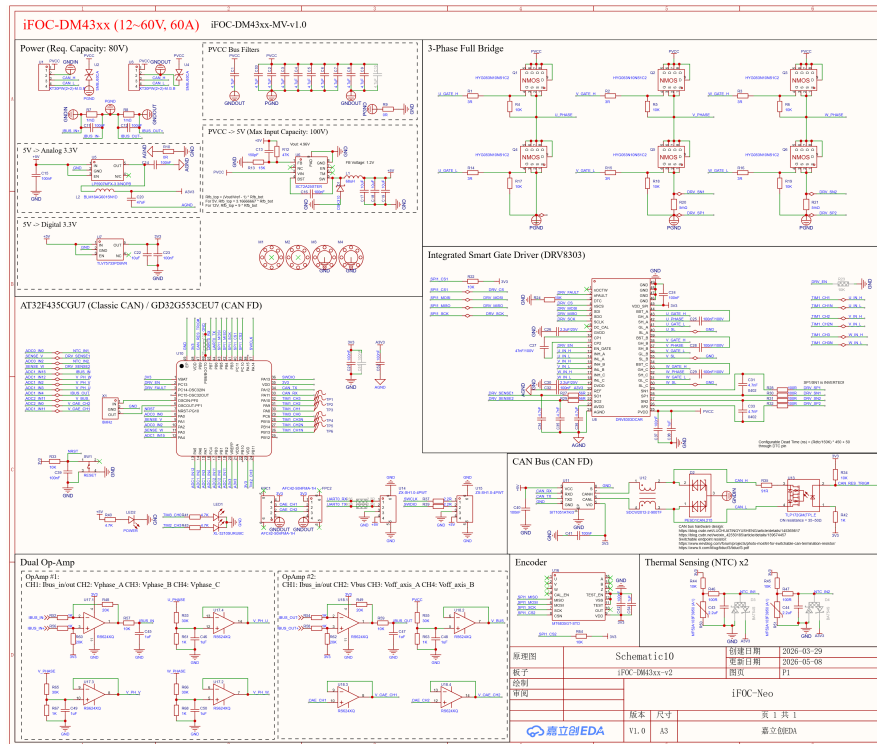
- [15] Benjamin Vedder. VESC firmware[CP/OL], 2026. <https://github.com/vedderb/blde>.
- [16] N. Hogan. Impedance Control: An Approach to Manipulation. Part I—Theory[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1985, 107(1): 1–7.
- [17] A. Albu-Schäffer, S. Haddadin, C. Ott, et al. The DLR Lightweight Robot: Design and Control Concepts for Robots in Human Environments[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2007, 34(5): 376–385.
- [18] KUKA. LBR iiwa[EB/OL], 2026. <https://www.kuka.cn/zh-cn/products/robotics-systems/industrial-robots/lbr-iiwa>.
- [19] S. Haddadin, A. Albu-Schäffer, G. Hirzinger. Soft-tissue injury in robotics[C]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010: 3426-3433.
- [20] Franka Robotics. Franka Emika Panda Product Manual[EB/OL]. Franka Robotics, 2026. https://download.franka.de/documents/Panda_Product_Manual_V1.2_EN.pdf.
- [21] M. Quigley, K. Conley, B. Gerkey, et al. ROS: an Open-Source Robot Operating System[R]. ICRA Workshop on Open Source Software, 2009. <https://www.robotics.stanford.edu/~ang/papers/icraoss09-ROS.pdf>.
- [22] H.-S. Fang, M. Gou, C. Wang, et al. Robust grasping across diverse sensor qualities: The graspnet-1billion dataset[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2023.
- [23] Y. Qin, W. Yang, B. Huang, et al. Anyteleop: A general vision-based dexterous robot arm-hand teleoperation system[c]. *Robotics: Science and Systems (RSS)*, 2023. <https://roboticsproceedings.org/rss19/p015.html>.
- [24] Universal Robots. Universal Robots ROS2 Description Repository[EB/OL], 2026. https://github.com/UniversalRobots/Universal_Robots_ROS2_Description.
- [25] Aubo Robotics. AUBO Robot Description Repository[EB/OL], 2026. https://github.com/AuboRobot/aubo_description.
- [26] UFACTORY. xArm Robot Description Repository[EB/OL], 2026. https://github.com/xArm-Developer/xarm_ros.
- [27] D. L. Pieper. The Kinematics of Manipulators Under Computer Control[D]. Stanford, CA: Stanford University, 1968. https://ftpmirror.your.org/pub/misc/bitsavers/pdf/stanford/Stanford_CS_TR_Collection_2025-12-12/PDF/1968/CS-TR-68-116.pdf. Ph.D. Thesis; Stanford Artificial Intelligence Project Memo 72.
- [28] E. Shammas, A. Wolf, H. Brown, et al. New joint design for three-dimensional hyper redundant robots[C]. *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)* (Cat. No.03CH37453), vol. 4, 2003: 3594-3599 vol.3.

- [29] Bambu Lab. Bambu Filament Technical Data Sheet V3.0: PETG Basic[EB/OL]. Technical data sheet, 2025. https://store.bblcdn.com/s1/default/cb94589bf7994fdbf833badefae9cd/Bambu_PETG_Basic_Technical_Data_Sheet.pdf.
- [30] Vinidex Pty Ltd. PVC Properties[EB/OL]. Online technical resource. <https://www.vinidex.com.au/resources/technical-resources/material-properties/pvc-properties/>.
- [31] M. Morse. Linear Hall-Effect Sensor Angle Measurement Theory, Implementation, and Calibration[R]. Dallas, TX: Texas Instruments, 2021.
- [32] Xin Zhong. iFOC - High Performance Field Oriented Control System[CP/OL], 2025. <https://github.com/Matrixchung/iFOC>.
- [33] T. D. C. Busarello, A. Bubshait, O. V. S. R. Varaprasad, et al. A comprehensive methodology of field-oriented control design with parameter variation analysis for interior permanent magnet synchronous machine drives[J]. IEEE Access, 2025, 13: 89524-89541.
- [34] W. Leonhard. Microcomputer control of high dynamic performance ac-drives—a survey[J]. Automatica, 1986, 22(1): 1-19.
- [35] Y. Wang, W. Liao, S. Huang, et al. A Robust DPCC for IPMSM Based on a Full Parameter Identification Method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(8): 7695–7705.
- [36] M. Piccoli, M. Yim. Anticogging: Torque Ripple Suppression, Modeling, and Parameter Selection[J]. The International Journal of Robotics Research, 2016, 35(1–3): 148–160.
- [37] Z. Zhang. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330–1334.
- [38] F. Zhang, V. Bazarevsky, A. Vakunov, et al. MediaPipe Hands: On-Device Real-Time Hand Tracking[J]. arXiv preprint arXiv:2006.10214, 2020: 1–5.
- [39] 国家标准化管理委员会. GB/T 16252-2023: 成年人手部尺寸分型 [S], 2023. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=6DE16314F086E873A15D70A5467B8EFF&>.
- [40] 国家标准化管理委员会. GB/T 10000-2023: 中国成年人人体尺寸 [S], 2023. <https://openstd.samr.gov.cn/bzgk/std/newGbInfo?hcno=B19DCCA575D9406856ABF87A511EE11F>.
- [41] Y. Zhai, Y. Bian, Y. Shen, et al. 3D Scan-Based Classification of Chinese Young Female Hand Morphology[J]. Scientific Reports, 2026, 16(1): 13491.

附录 A 电路原理图



(a) J1-J4 关节电机驱动板原理图



(b) J5 和 J6 关节电机驱动板原理图

图 A-1 关节电机驱动板原理图