



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

工业机器人机械臂末端抖动抑制方法研究

Research on the Terminal Jitter Suppression Method of Industrial
Robot Manipulator

学 院 智能制造学院
专 业 自动化
班 级 21 自动化（专升本）1 班
学 号 21404060110
姓 名 杨立泽
指导教师 张兴会 范其明
职 称 教 授 副教授
完成时间 2023 年 06 月 02 日

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计

工业机器人机械臂末端抖动抑制方法研究

Research on the Terminal Jitter Suppression Method of Industrial
Robot Manipulator

学 院 智能制造学院
专 业 自动化
班 级 21 自动化（专升本）1 班
学 号 21404060110
姓 名 杨立泽
指导教师 张兴会 范其明
职 称 教 授 副教授
完成时间 2023 年 06 月 02 日

天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：

2023年5月26日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：

2023年5月26日

摘 要

汽车制造是一个庞大而复杂的工程，需要遵循一定的技术要求，根据设计图纸，汽车的某些零件经过焊接、冲压、喷漆、动力总成等复杂工艺，最终组合并连接起来的过程。在整个汽车制造过程中，装配工作不仅周期长而且对劳动量的需求也很大，工业机器人可以很大程度上提高了汽车装配的数字化水平和汽车的装配质量。

工业机器人在研发时用结构参数来定义机器人形态，所得出的性能数据为理论值，而组装后由于在装配、加工及长时间的零部件磨损等情况下会导致实际轨迹与理论轨迹不一致，而 ARTS 通过 AI 算法结算出杆长、零位、减速比等结构参数误差。补偿回控制器，从而使得控制器以实际结构模型来控制机器人运动。所以借助高精度的激光跟踪仪测量设备来提高工业机器人的定位精度，从而使其可以在一些复杂且精度要求较高的领域完成工作任务，提高工作效率和工作质量。

在实际应用过程中，考虑到一些不确定的外部因素干扰了工业机器人的轨迹跟踪控制问题，提出了一种基于机械臂动力学模型的神经网络滑模控制方法，其控制目标是稳定、快速、准确地接近机器人控制器规划的轨迹，使得每个关节能够接近预期轨迹。采用 RBF 神经网络逼近动力学模型参数，在 Simulink 中进行仿真分析，仿真结果表明，基于神经网络滑模控制的控制策略能够有效补偿模型的非线性，并具有较强的泛化能力和适应能力，为六轴工业机械臂轨迹跟踪控制以及抖动抑制提供了一种有效可行的方法。

关键词：工业机器人；激光跟踪仪；定位精度；轨迹跟踪；抖动抑制

ABSTRACT

Automobile manufacturing is a large and complex project, need to follow certain technical requirements, according to the design drawings, some parts of the car through welding, stamping, painting, powertrain and other complex processes, and finally combined and connected process. In the entire automobile manufacturing process, the assembly work is not only long cycle but also the demand for labor is also large, industrial robots can greatly improve the digital level of automobile assembly and the assembly quality of automobiles.

Industrial robots use structural parameters to define the robot form during research and development, and the performance data obtained is theoretical, and after assembly, due to assembly, processing and long-term wear of parts, the actual trajectory will be inconsistent with the theoretical trajectory, and ARTS uses AI algorithms to settle structural parameter errors such as rod length, zero position, and reduction ratio. Compensates back to the controller, allowing the controller to control the robot movement with the actual structural model. Therefore, with the help of high-precision laser tracker measurement equipment, the positioning accuracy of industrial robots is improved, so that it can complete work tasks in some complex and high-precision fields, and improve work efficiency and work quality.

In the actual application process, considering that some uncertain external factors interfere with the trajectory tracking control problem of industrial robots, a neural network sliding mode control method based on the dynamic model of the robotic arm is proposed, and its control goal is to stably, quickly and accurately approach the trajectory planned by the robot controller, so that each joint can approach the expected trajectory. The simulation results show that the control strategy based on neural network sliding mode control can effectively compensate for the nonlinearity of the model, and has strong generalization ability and adaptability. It provides an effective and feasible method for trajectory tracking control and jitter suppression of six-axis industrial robotic arm.

KeyWords: industrial robots; laser tracker; positioning accuracy; trajectory tracking; jitter suppression

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景	1
1.2 抖动问题研究现状	1
1.3 主要研究内容	2
1.4 主要章节安排	3
第 2 章 硬件系统选型与应用	5
2.1 工业机器人控制系统的基本结构	5
2.1.1 工业机器人选型	5
2.1.2 工业机器人的技术特点	8
2.2 API 激光跟踪仪测量系统的基本结构	9
2.2.1 激光跟踪仪的选型	9
2.2.2 激光跟踪仪的技术特点	11
2.3 本章小结	12
第 3 章 工业机器人末端抖动特征获取	13
3.1 工业机器人自身精度校准	13
3.2 工业机器人末端抖动信号测试	20
3.2.1 工业机器人姿态准确度检测	20
3.2.2 工业机器人轨迹准确度检测	23
3.3 工业机器人末端抖动信号分析	25
3.4 本章小结	29
第 4 章 工业机器人末端抖动问题解决方案	30
4.1 机械臂系统描述	30
4.2 控制系统设计	31
4.3 模拟仿真分析	33
4.4 本章小结	37
第 5 章 总结与展望	38
参考文献	40
致 谢	1
附 录	42
附录 1: 工业机器人 50 个点程序	
附录 2: Simulink 程序	

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景

制造业是国民经济的主体，是国家的基础，是民族复兴的工具，是强国之基。智能制造是制造业（包括战略性新兴制造和传统制造业）实现全面创新升级的主要技术路径。随着中国制造业的不断发展壮大，为了建设无人工厂，正逐步向生产设备网络化、无纸化生产单据、无人化生产现场、生产数据可视化、生产过程透明化的方向发展。以工业机器人为代表的智能生产装备是推动智能化、无人化制造的主力军。随着人口的逐渐减少，中国对自动化工业机器人的需求越来越大。目前，工业机器人正朝着轻量化、高精度、高效率的方向发展，国产工业机器人已广泛应用于我国制造业的各个领域，这在很大程度上推动了我国工业机器人的发展。

由于工业机器人的位姿是在其工作空间中进行的，因此所有位置都由驱动关节的电机获得。通常工业机器人的重复定位精度非常高，可以达到 0.01 毫米，但是绝对定位精度会有几毫米的误差，这对工业机器人的精度有很大的影响。工业机器人的定位需要通过运动学模型来确定末端执行器的位置，这不可避免地会有一些外部因素（如：结构间隙、传动部件间隙、运行过程中的磨损、末端执行器负载变化、环境影响、位置控制和检测等原因）影响工业机器人的位置精度。从而导致工业机器人控制系统使用的运动学模型与真实的运动学模型不同。这导致工业机器人定位时执行器的理论位置与执行器的实际位置之间存在误差值。因此，如何解决工业机器人的位置精度是当下非常关注的问题。

1.2 抖动问题研究现状

随着对工业机器人的研究重视程度越来越高，在提高工业机器人精度影响因素的研究过程中，许多专家学者都有自己的想法和见解。

1954 年美国发明家 George Charles Devol 成功研制了世界第一台工业机械臂^[1]，并应用于汽车生产线。在之前的研究过程中就已经发现，机械臂末端的抖动在工作条件下会严重影响机械臂末端的轨迹精度和运动稳定性。在工作条件下，有很多造成机械臂末端抖动的影响因素。对于串联机械臂的振动问题，目前已有部分学者取得了一定的研究成果。Joonyoung Kima^[1]等人对焊接工业机械臂末端抖动进行了研究，利用加速度传感器测量了机械臂末端在 DZV 轨迹下的抖动的信号，并在建模时考虑了由于非刚性齿轮箱所带来的关节柔性，这增加了理论分析的精度，同时提出了 Scurve 轨迹优化、鲁棒性消振整形器和动态消振整形器等方法改进了适用于多自由度工业机械臂振动抑制的前输入整形器。并

通过实验与仿真的方式验证了效果。该工作指出机械臂的抖动主要受控制方面的影响，并解决末端抖动提出了思路。

在国内针对机械臂末端振动导致精度下降的问题也有较深入的研究。有学者认为模态共振是引起机械臂末端振动的主要因素。高国华^[2]等人通过搭建连续体机械臂实验平台对机械臂进行了约束实验模态分析，研究发现机械臂末端的振动主要受机械臂结构的一阶固有频率的影响。朱春霞^[3]等人通过一种利用虚拟样机仿真技术对并联机械臂进行数值模态分析，通过对比数值模型的动态特性参数与外力激振频率同样认为机械臂末端振动位移和结构的模态共振有关但是仅仅研究了机械臂结构的动态特性，没有分析足够全面的影响因素。也有学者考虑到机械臂结构上的几何误差是影响末端振动的主要因素。焦国太^[4]等人对工业串联机械臂的谐波减速器结构参数误差，各运动关节的驱动输出标定、连杆弹性变形以及关节柔性等因素对工业机械臂末端执行器位姿精度的综合影响进行分析与研究，但是只通过数值仿真手段进行误差补偿而没有用实验验证研究结果。庄未^[5]等人以三自由度机械臂为研究对象，指出由于机械臂关节处谐波减速器的应用，使得机械臂关节具有柔性特性，在机械臂运行时将不可避免的造成振动，通过将行波理论和关节旋转变换矩阵相结合，对运动状态下的机械臂振动力矩进行了预测。同时机械臂末端的残余振动也是不可忽略的因素之一。

1.3 主要研究内容

在现代汽车数字化装配技术中，由于激光跟踪仪的测量精度越来越高，技术越来越成熟，借助激光跟踪仪辅助测量和校准的工业机器人技术在我国汽车制造领域得到了广泛的应用。

在汽车零部件装配、焊接等装配过程中，由于激光跟踪仪测量精度高、测量尺寸范围大等优点，激光跟踪仪在许多情况下被用作测量工具，与工业机器人一起进行加工作业，如在利用工业机器人及弧焊平台组成的系统对汽车零部件进行拼接、组装时，有必要利用激光跟踪仪的测量来定位和调整工业机器人终端执行工具的姿态。

由于工业发展对高效率、高精度等方面的需求，精度已成为衡量工业机器人性能的重要指标，而对于多自由度串联工业机器人来说，精度对其整体性能也具有重要意义。目前，大多数工业机器人的定位精度已经达到了很高的水平，但工业机器人的末端轨迹精度较低是不可避免的。

因此，运行过程中的变形和操作后的残余抖动是不可避免的。残余抖动会降低工业机器人的定位精度和控制稳定性，影响其工作效率和质量。因此，研究激光跟踪仪对于辅助测量工业机器人的定位精度，对提高汽车制造和汽车装配质量具有重要意义。同时，还可以加速我国在汽车制造和汽车装配领域的技术发展，也具有重大的现实意义。

针对上述分析，由于现有研究没有对六轴工业机器人末端抖动问题进行具体的描述，本文将结合本研究中六轴工业机器人末端抖动问题、现象描述、问题分析、原因探索及解决方法进行全面的分析。本研究的目的是探讨在工作条件下机械臂末端抖动产生的原因以及减少或消除抖动的方法。由于机械臂是一个由机械臂本体、伺服电机、减速器、控制器等系统共同参与运行的复杂机电系统，机械臂末端抖动的原因非常复杂。通过对国内多个机械臂的调查观察，发现这些机械臂在运行过程中存在明显的抖动现象，特别是在做直线运动时，末端抖动更为明显。这种机械臂运行过程中的抖动严重影响机械臂末端的跟踪精度。造成机械臂在运行过程中末端抖动的因素有很多。

通过对机械臂末端抖动现象的观察，针对工业机器人末端抖动现象，可以提出两种机械臂抖动原因进行检测和分析。

第一种产生抖动的原因是由于机械臂控制参数和机构设计的原因造成机械臂末端抖动。在这种情况下，需要从机器人结构设计、执行器选择、传动系统等方面入手，优化机器人的设计和组成，以减少机器人末端的抖动，并提高机器人的稳定性和精度。

另一种产生抖动的原因是由于机械臂自身联合驱动系统的不稳定输出引起的机械臂末端的受迫振动。由于机械臂在工作时，机器人控制器提前生成运动轨迹和控制，控制器控制驱动电机实时输出计算出的扭矩和角度，同时考虑驱动系统的负载变化、加速能力、运动插补和响应延迟。目前控制系统难以将运动轨迹与目标轨迹完美匹配，这就造成了驱动系统的输出振动，并通过机械臂的大臂和小臂放大了振动幅度。

1.4 主要章节安排

本文将对工业机器人末端抖动问题进行研究，探究工业机器人末端抖动的原因，并针对上述潜在的问题因素进行实验验证。具体的研究方法是根据上述提出的假设，通过分析机械臂末端抖动的现象和信号特征，制定相应的验证实验，来证明假设的合理性。排除不合理的猜想后，可以得到正确的猜想。所做的主要工作如下：

第一章为绪论部分，讲述了工业机器人机械臂末端抖动问题的研究背景和意义，对工业机器人机械臂末端抖动国内外研究现状进行了综述，并介绍了本文的研究目的和研究内容。

第二章主要介绍了工业机器人和激光跟踪仪的的机械部分组成、机械参数以及技术特点。

第三章主要采用激光跟踪仪对工业机器人末端抖动特征进行获取，并验证猜想一的合理性。研究对象为 ER3B-6 型号的六轴串联型工业机器人，通过 API 激光跟踪仪对工业机器人进行结构参数校准。校准由于工业机器人自身控制参数和机构设计的原因造成机械臂末端抖动。实验通过测量机器人末端执行器的位置和姿态变化，可以确定机器人系统中存

在的振动源，并优化机器人系统的控制参数和结构设计，从而提高机器人系统的精度和性能。

其次对校准完成后的工业机器人进行性能测试，为了检测校准完成后工业机器人的姿态轨迹性能是否有改善，利用 API 激光跟踪仪对工业机器人进行性能测试。在不同速度和负载下通过测量机器人在执行任务时的位置和姿态变化，分析机器人末端的运动稳定性和抖动情况，获取机器人的运动稳定性和抖动情况数据。接着，对比校准前后的数据，分析机器人系统中存在的振动源和影响因素，并评估校准效果。

第四章将在第三章中获取的机械臂末端抖动特征信号及工业机器人进行性能测试中所发现的引起起机械臂末端抖动原因上提出解决方案，以达到提高机械臂末端轨迹精度的目的。

第 2 章 硬件系统选型与应用

本章主要对实验中所用到的硬件系统进行选型，介绍了 ER3B-6 型工业机器人的组成、原理及其技术参数。详细介绍了 API 激光跟踪仪的组成、原理，分析了激光跟踪仪的测量原理以及激光跟踪仪技术特点。

2.1 工业机器人控制系统的基本结构

工业机器人主要由本体，包含机械外壳部分、伺服电机、减速机构和电控，包括伺服驱动器和控制系统两部分组成，其作用是利用工业机器人末端的执行快换工具代替人手完成不同的任务（搬运、码垛、焊接、喷涂等）。目前主流的工业机器人有四大家族，包括：瑞士 ABB 机器人、德国库卡 KUKA 机器人、日本发那科 FANUC 机器人、日本安川 YASKAWA 机器人。

2.1.1 工业机器人选型

六轴串联机械臂可实现多种运动工况与人机协作，并适用于多种行业的工作要求，是广泛应用在制造业、生活、医疗及教学中的一种通用性机械臂^[6]。

本文以埃夫特智能设备有限责任公司生产的六自由度串联式工业机器人 ER3B-6 为研究目标，进行了实验和理论分析。机械本体由底座部分、大臂、小臂部分、手腕部件和本体流水包部分构成，一共有 6 个伺服电机，能够驱动 6 个关节的运动，从而达到各种运动的目的。此型号工业机器人的特点是：动作灵活性高；工作空间大；能够很好地绕开障碍；结构紧凑；占据面积也比较小；关节上相对运动构件易于密封防尘，被广泛用于机床上下料、取件、弧焊、喷漆等。它在中国的工业生产上得到了普遍地使用，并能反映出当前国内商用机器手臂设备的技术水准。

为此，本文选取了一种新型的六轴机械臂进行了实验和理论分析。其机构为一组可转动或多组可转动的铰链，且铰链间的轴心互相平行或正交。连接件一头与支架相连，一头为自由状态，可装配多种加工设备，完成相应的工作。铰链的功能就是让两根互相连接的连杆做一个相对移动。该铰链的驱动方式为模块式，由伞齿轮、同步齿型皮带及谐波减速机组成。该机构的各个铰链由一台伺服电机带动，并由 ES-1 控制器来完成机构的动作，并以 X 轴、Y 轴、Z 轴的转动及运动来完成机构的位置。

ER3B-6 型工业机器人具有动作灵活，工作空间范围大、且动作灵活结构紧凑、占地面积小等优点。广泛应用于机床上下料、拾取、弧焊、喷漆等行业。因此，本文选择六轴系列机械臂作为研究对象^[7]。

工业机器人由埃夫特 ER3B-6 工业机器人本体，如图 2-1 所示；ES-1 机器人控制柜，如图 2-2 所示；示教器部分，如图 2-3 所示。



图 2-1 工业机器人本体图

表 2-1 工业机器人本体标准规格表

序号	项目	参数
1	轴数	6
2	最大运动范围	628mm
3	最大负载	3kg
4	重复定位精度	$\pm 0.02\text{mm}$
5	最大运动速度	J1 轴 $230^\circ / \text{sec}$
		J2 轴 $230^\circ / \text{sec}$
		J3 轴 $250^\circ / \text{sec}$
		J4 轴 $320^\circ / \text{sec}$
		J5 轴 $320^\circ / \text{sec}$
		J6 轴 $420^\circ / \text{sec}$

表 2-1 工业机器人本体标准规格表（续表）

序号	项目	参数
6	最大运动范围	J1 轴 $\pm 167^\circ$
		J2 轴 $+90^\circ / -130^\circ$
		J3 轴 $+101^\circ / -71^\circ$
		J4 轴 $\pm 180^\circ$
		J5 轴 $\pm 113^\circ$
		J6 轴 $\pm 360^\circ$
7	腕部最大允许扭矩	J4 轴 4.45Nm
		J5 轴 4.45Nm
		J6 轴 2.2Nm
8	腕部最大允许惯量	J4 轴 0.27g m^2
		J5 轴 0.27kg m^2
		J6 轴 0.03kg m^2
9	数字量输入端子	8 个
10	数字量输出端子	8 个
11	通信方式	TCP/IP、Modbus-TCP
12	最大活动半径	593mm
13	重复精度	$\pm 0.02\text{mm}$
14	防护等级	IP40
15	环境温度	$0\text{-}45^\circ\text{C}$
16	相对湿度	40%~90%
17	大气压力	86KPa~106KPa
18	本体质量	27kg

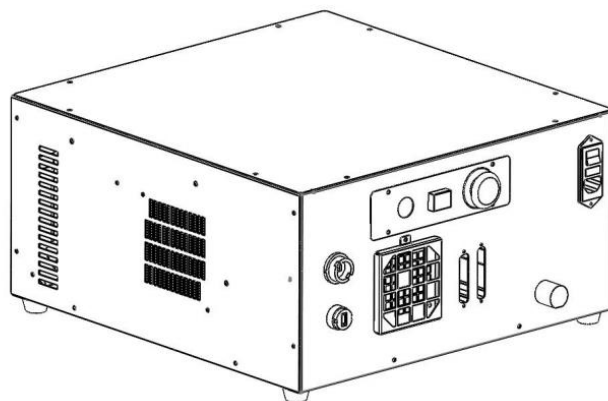


图 2-2 ES-1 控制柜示意图



图 2-3 工业机器人示教器示意图

2.1.2 工业机器人的技术特点

1. 超高速运行

重量轻的机械臂配上高功率、高转速的伺服电机，可以带来卓越的加速与快速的操作。该系统能够根据载荷及机械臂的位姿，在缩短运行周期的同时，提高了系统的整体性能

2. 广泛的工作范围

在延长最大延长距离的同时，每根轴线的转动幅度也随之增大。扩大后的移动距离转化成更大的有效工作空间，具有最小的死区和更多的灵活性。

3. 环境保护

两种不同类型的轴心均具有双重密封性，而且其电气接口具有良好的防水性能，整体的保护级别达到 IP40。

4. 高力矩

高功率的伺服电机，加上一个坚固的机械臂结构，可达到优异的腕部扭矩和载荷。

5. 集成功能

感应器和电磁阀门采用了一个标准的内置式空气动力管路和一个室内电缆。为便于附加线路，管道或设备的安装，配有衬垫和水龙头。

6. 节省空间

机械臂设计只需要占用很小的地面空间。可以在“高密度”应用中安装多个机器人，同时不会影响性能。

7. 编程灵活性

具有两种编程方法，一是利用机器人示教器编程，二是利用电脑来完成程式设计。

2.2 API 激光跟踪仪测量系统的基本结构

激光跟踪仪主要由本体、测量软件包，包含机械外壳部分；马达；编码器；冷却系统；集成式水平、重力传感器；工业级高速采集芯片；激光头等组成，其作用是将激光照射到接触测量目标物的目标靶球上，然后经目标反射的激光返回发光源，从而确定目标的三坐标位置的光学测量仪。激光的发光源在追踪来自目标的反射光的同时，移动发光部和接收器，读取到的三维坐标一般会传送到运算软件，计算出尺寸值、角度、几何公差等数据。目前，国际上只有瑞士 Leica、美国 API 和 FARO、德国 PI miCos 四家公司生产销售激光跟踪仪。

2.2.1 激光跟踪仪的选型

1. 系统组成

如图 2-4 和 2-5 所示，工业机器人测量系统（ARTS）由工业机器人测量软件、激光跟踪仪、测量夹具、靶球等设备组成。



图 2-4 激光跟踪仪示意图



图 2-5 激光跟踪仪设备部件组成

2.6D 激光跟踪仪测量系统介绍

本文介绍了一种 6 维激光跟踪系统,它可以同时测量被测量物体 6 个自由度的 X、Y、Z 以及俯仰,侧摆,滚转等运动信息。6 维跟踪系统主要包括:3 维跟踪头,STS 六维传感器,控制器以及一套线缆。比如:把一个共同的靶子放在一条直线上,该系统就会以立体追踪的方式输出 X、Y、Z 坐标。将一只 STS 型六维传感装置置于激光前方时,该装置会以六维方式进行追踪,产生三个 X、Y、Z 姿态以及三个旋转角度。这样,API 激光跟踪器就可以依据用户在现场的应用情况和被测对象的情况,很容易就可以选用各种检测方法来进行检测。

3. 测量原理

激光跟踪仪发射的激光通过一个万向镜面到达目标。干涉激光也可用作跟踪器的参考轴线。通过安装在追踪器中的两个轴线定位检测器来检测回波的激光。由定位检测器发出的信号,由追踪器微处理器进行处理后,再送至追踪器的随动伺服电机,由随动伺服电机来实现对目标的实时追踪。

即在目标物上设置反射镜,由追踪头发射的光经过反射镜反射后再回到追踪头上,随着目标物的运动,追踪头通过调节光线的指向来实现对目标物的定位。而反射回来的光线,则会被探测系统捕捉到,从而确定对方的方位。简而言之,一个在空间中移动的点被对其进行静态或动态地追踪,并在同一时间内对其进行定位。该仪器具有两个旋转的角度测量装置,构成了一套完整的球面坐标测量体系。

4. 激光跟踪仪技术参数

表 2-2 激光跟踪仪技术参数表

激光跟踪仪主要参数	
设备型号	Radian Pro
工作特性	ADM&IFM 双激光 (3D 或 6D)
测量范围 (直径)	40m/100m/160m (0m 起, 无测量死程)
水平转角	640°
垂直转角	-59° ~ ±79° (±138°)
数据输出速率	1000 点/秒
全程 3D 空间精度	10 μm +5 μm/m
IFM 精度	0.5 μm/m
IFM 测距分辨力	0.08 μm
ADM 精度	10 μm 或 0.7 μm/m*
ADM 测距分辨力	0.5 μm
角度精度	3.5 μm/m
角度分辨力	0.018°

表 2-2 激光跟踪仪技术参数表（续表）

激光跟踪仪主要参数	
最大角速度	180° /秒
最大角度加速度	180° /秒 ²
水平仪精度	2 秒
水平仪测量范围	±2°
可视范围	30°（对角线）
主机尺寸	177mm×177mm×355mm
主机重量	9.0kg
控制箱尺寸	110mm×177mm×355mm
控制箱重量	3.2kg
通讯协议	以太网
激光特性	Class II IEC60825-1 安全激光
电源电压	110/220V±10%
功率	100W
工作温度	-10℃~+45℃
相对湿度	0~95%**
海拔高度	-700m~3000m

2.2.2 激光跟踪仪的技术特点

1. 大范围测量

Radian Pro 激光跟踪仪具有超大范围的测量能力。水平方向 640° 和垂直方向 -59° 至 +79°（±138°）的角度测量范围和长达 160 米的线性测量范围，是其他任何激光跟踪仪无法匹及的大尺寸测量的理想装备，在制造业和科研机构的各个领域发挥着举足轻重的作用。

2. Self-Diagnostics 自我诊断功能

精确计量需要仪表在多种工作条件下都能维持良好的工作状况，因此对仪表本身在多种工作条件下的工作状况有较好的认识。通过 Self-Dagnostics 的自诊断功能，可以让 Radian Pro 激光跟踪器在工作过程中，将自己的工作状况，直接呈现在操作员面前，完全排除了微震、温度升高、发光强度不足等工作造成的干扰。

3. 难以比拟的便携性

Radian Pro 激光跟踪仪体积小，便于携带。它的组成部分中，激光头仅重 9 千克，长 355 毫米，宽 177 毫米仅是传统激光跟踪仪的四分之一，在便于携带和易于使用等方面远远超过同类产品。

4. I-Vision 靶球自动锁定功能

I-Vision 功能使 Radian Pro 激光追踪器实现对目标球体的自动追踪和锁定。在测试过程中,操作人员可以全神贯注地盯着被测物体,不用担心断光不断光的问题。拥有 I-Vision 能力的 Radian Pro 激光追踪器可以自动瞄准目标,即使是在没有光线的情况下,它也会在第一时间找到目标,然后用激光瞄准目标。I-Vision 的特点是 30 度以上的工作距离,使你可以轻松地进行测量。

5. Shake to Drive 靶球召唤功能

Radian Pro 激光跟踪仪可实现多目标球形检测。在操作者要让跟踪仪从一个目标球移动到另一个目标球工作的时候,只要拿着新的目标球,对准激光跟踪仪晃动一下,激光跟踪仪的智能测量系统就会自动地识别出新的目标,然后把激光束射向新的目标,进行追踪测量,这才是真正的人性化操作,让你可以更容易地应付测量任务。

6. Multi-SMR 多靶球识别功能

RadianPro 激光跟踪仪具有多个目标的识别能力,一台跟踪器可以利用多个目标来工作,并且可以根据连续的光线来方便地进行目标之间的转换,从而达到了智慧测量的目的。

2.3 本章小结

本章介绍了通过建立激光跟踪仪对工业机器人抖动测量与校准的硬件进行了选型,其中包括工业机器人选型、激光跟踪仪选型、对所需硬件型号进行了详细描述,介绍了各硬件模块的特点。

第 3 章 工业机器人末端抖动特征获取

随着自动化技术的不断发展，工业机器人在现代制造业中起着越来越重要的作用。拥有性能良好的工业机器人是保证产品质量和生产效率的关键因素之一。由于各种因素的影响，如机器人本身精度、传感器精度等，机器人运行中常常存在误差和偏差。机器人的位姿准确度和轨迹准确度难以保证。因此，如何有效地检测机器人位姿准确度成为了研究的热点之一。

3.1 工业机器人自身精度校准

在了解机械臂末端工作原理的基础上，本章将对所研究的工业机器人进行结构参数校准，确定机械结构参数，提高机器人定位精度和运动控制的准确性。检测机械臂末端抖动状况，从而获得机械臂末端抖动的振动信号特征，避免机械臂自身结构参数对末端抖动造成影响。基于信号采集理论，对机械臂末端的抖动信号进行了系统的测量和处理。

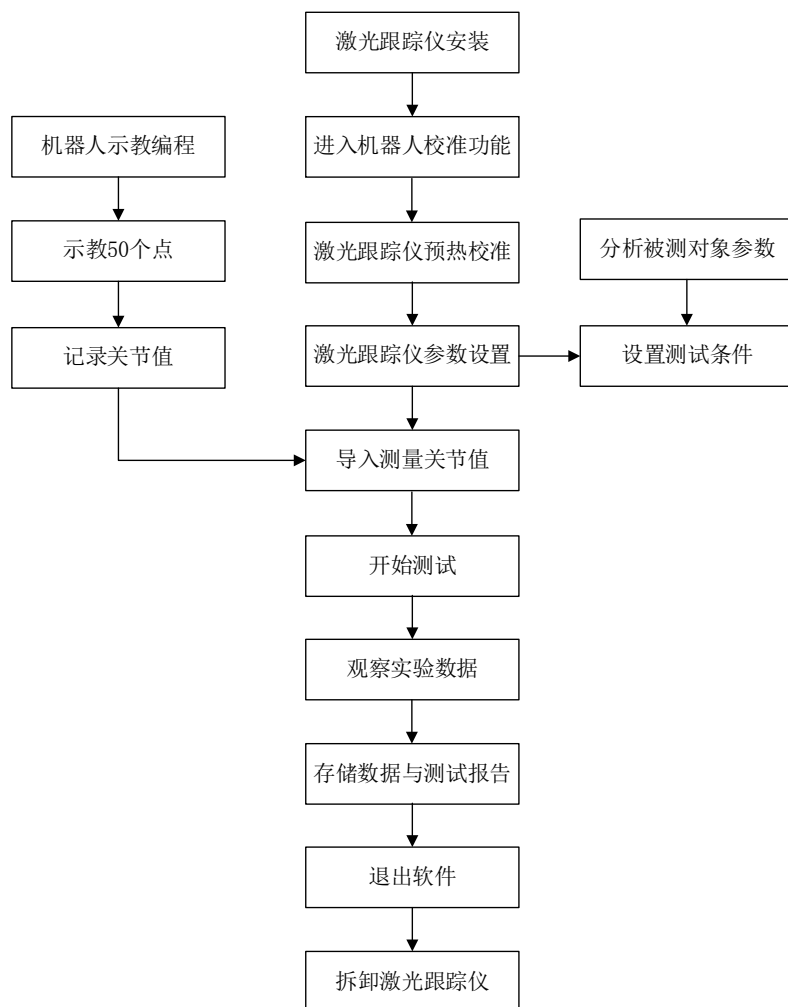


图 3-1 机器人姿态修正流程图

1. 机器人精度测试原理

机器人有一个坐标系，激光跟踪器也有一个坐标系。通过收集一些点位，两个坐标系拟合了矩阵关系。在建立矩阵关系后，激光跟踪仪能够从跟踪器的相对位置读取数据，并计算出点位置的精度偏差。通过五轴或六轴旋转的几何方法，可以测试机器人的末端精度，计算目标球末端的 TCP 值，测量 TCP 点精度。机器人姿态修正流程图如图 3-1 所示。

2. 机器人精度测试过程

在机器人示教编程过程中，必须保证激光束集中到 TCP 靶球中心，使用示教器的“轴操作键（X、Y、Z、A、B、C）”，分别改变机械臂的各个轴的位姿，保证每一个示教点的位姿都会发生改变。

此次试验将从机器人零点、连杆长度、电机减速比这几个方面进行测试，分析造成工业机器人抖动的原因，为后续抖动抑制做铺垫。

工业机器人示教程序见附录 1：工业机器人 50 个点测试程序。

表 3-1 工业机器人 50 个测试点的关节值

序号	X	Y	Z	A	B	C
1	135.12	8.37	-8.18	-8.93	-78.56	-45.85
2	81.88	-7.23	1.65	4.34	-77.26	-110.61
3	75.68	-14.64	14.66	8.28	-84.06	-107.33
4	68.12	-2.39	-3.04	10.38	-77.56	-119.97
5	53.13	7.76	-15.43	2.94	-71.37	-136.61
6	36.51	19.72	-27.08	-2.5	-77.57	-154.31
7	13.96	32.27	-35.88	3.27	-71.97	-183.7
8	12.73	13.19	-10.75	-7.04	-55.46	-178.15
9	21.8	4.87	-19.22	0.84	-65.15	-181.18
10	34.35	1.7	-5.61	-5.52	-77.38	-169.83
11	53.42	12.91	-16.56	4.17	-83.13	-143.26
12	58.85	1.26	-26.4	-1.13	-49.11	-129.9
13	72.72	17.6	-36.29	7.95	-58.48	-124.09
14	102.83	13.97	-10.9	-0.21	-82.38	-88.84
15	117.36	-4.34	-24.83	5.54	-51.35	-73.71
16	129.46	19.86	-37.84	2.07	-67.26	-62.36
17	148.97	26.06	-19.38	-1.14	-88.14	-43.96
18	158.35	33.47	-35.27	-6.75	-70.74	-27.11
19	149.85	8.64	-31.49	-20.98	-60.3	-3.7

表 3-1 工业机器人 50 个测试点的关节值（续表）

序号	X	Y	Z	A	B	C
20	124.76	17.22	-27.04	-11.47	-70.74	-56.44
21	105.84	3.28	-28.85	-3.32	-48.65	-75.41
22	81.31	26.57	-33.69	7.75	-73.76	-108.7
23	70.72	0.68	-6.62	10.62	-80.42	-125.65
24	46.37	11.12	-19.17	3.21	-81.32	-156.94
25	41.05	-0.82	-0.27	9.26	-87.35	-161.67
26	33.79	-10.94	-8.89	18.34	-64.9	-174.19
27	14.28	14.49	-30.48	17.92	-75.93	-181.25
28	8.37	7.22	-7.62	9.44	-62.02	-193.36
29	2.77	24.92	-32.47	2.34	-74.72	-197.01
30	-3.45	38.83	-9.03	-9	-55.65	-193.73
31	19.1	8.42	-18.56	6.41	-73.65	-181.88
32	44.51	19.44	-33.69	12.31	-61.1	-151.86
33	56.45	2.94	-45.36	7.17	-27.49	-151.88
34	82.3	12.93	-24.32	1.56	-70.8	-113.31
35	108.94	29.71	-40.05	10.19	-68.53	-88.1
36	126.18	11.26	-21.12	2.37	-77.61	-71.96
37	164.14	34.56	-29.6	-10.66	-85.02	-27.53
38	151.77	18.24	-36.24	-8.24	-63.7	-37.65
39	151.69	8.05	-26.9	1.91	-75.8	-36.11
40	144.16	17.08	-19.33	3.91	-71.72	-30.24
41	128.27	14.47	-30.3	1.01	-59.51	-52.08
42	94.51	-5.44	-20.24	-11.44	-59.38	-89.79
43	77.11	15.29	-34.46	-18.39	-56.05	-107.42
44	55.32	28.9	-38.28	-0.23	-66.78	-139.26
45	35.38	14.19	-16.35	-10.83	-71.75	-165.7
46	48.85	4.21	-23.77	-5.83	-59.8	-147.8
47	63.89	1.55	-24.96	4.99	-52.69	-127.62
48	82.74	13.43	-22.86	9.45	-78.86	-117.22
49	103.29	31.61	-31.07	15.32	-86.57	-89.24
50	106.37	25.6	-21.8	8.32	-83.59	-92.51

机器人示教编程完成后，对示教程序进行模拟测试，确保激光束集中到 TCP 靶球中心。并将这 50 个测试点的关节值填入测试软件中。如表 3-1 为工业机器人 50 个测试点的关节值。

以真实的机器人正向运行方向为依据，遵守右手定则（4 个手指是运动方向，大拇指所指即为轴向），并与如图 3-2 所示相联系，就可以对其进行判断。

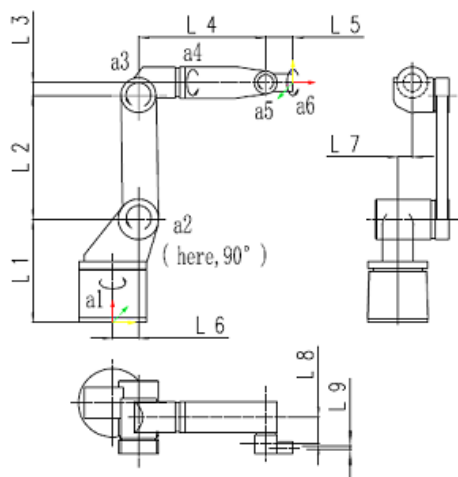


图 3-2 工业机器人模型图

从机器人厂商或示教器中获取“测试条件”中所需要的配置参数，将机器人杆长，理论减速比等数据填入试验条件一栏中，如图 3-3 所示。

测试条件							
名称	SixAxis_01	测试点数	50	暂停(s)	2	<input type="checkbox"/> I0同步	
L1(mm)	367.5	L2(mm)	295.486	L3(mm)	37.0063	L4(mm)	295.512
L5(mm)	78.5	L6(mm)	0.2231	L7(mm)	0.6216	L8(mm)	0
L9(mm)	0	h(4,5)	0	h(4,6)	0	h(5,6)	0
底座坐标系	X向右	<input type="checkbox"/> h(4,5)	<input type="checkbox"/> h(4,6)	<input type="checkbox"/> h(5,6)			<input type="button" value="执行校准"/>
序号	名称	轴向	参考零位	校准	理论值	校准	
1	1轴	向上	0	<input type="checkbox"/>	81	<input type="checkbox"/>	
2	2轴	朝外	0	<input checked="" type="checkbox"/>	101	<input checked="" type="checkbox"/>	
3	3轴	朝外	0	<input checked="" type="checkbox"/>	-63.4615	<input checked="" type="checkbox"/>	
4	4轴	向右	0	<input checked="" type="checkbox"/>	-68.9655	<input checked="" type="checkbox"/>	
5	5轴	朝外	0	<input checked="" type="checkbox"/>	-65	<input checked="" type="checkbox"/>	
6	6轴	向右	0	<input type="checkbox"/>	40.625	<input checked="" type="checkbox"/>	

图 3-3 测试条件

启动机器人和激光跟踪仪设备，让机器人沿着规定路径进行运动。通过激光跟踪仪采集数据，包括机器人末端的位置和姿态信息，同时记录机器人各个关节的角度信息。将采

集得到的数据导入计算机软件中,进行数据处理和分析,重新获得机器人的结构参数。如表 3-2 和表 3-3 所示为工业机器人的结构参数,包含各轴零位修正值、减速比修正值、连杆修正值。

表 3-2 校准前工业机器人结构参数 1

名称	零位修正值(°)	减速比修正因子	原减速比值	修正减速比值
1 轴	0	0.999985	81	81.0012
2 轴	-0.0983396	1.00074	101	100.926
3 轴	0.150081	0.998697	-63.4615	-63.5443
4 轴	0.627316	1.00135	-68.9655	-68.8727
5 轴	-0.111746	1.00034	-65	-64.9777
6 轴	0	1.00015	40.625	40.6187

表 3-3 校准前工业机器人结构参数 2

名称	原杆长(mm)	修正杆长(mm)
L1	367.5	367.5
L2	295.486	295.565
L3	37.0063	37.1213
L4	295.486	296.103
L5	78.5	78.5
L6	0.2231	0.219241
L7	0.6216	0.442244

表 3-4 校准前精度误差对比

名称	校准前(mm)	校准后(mm)
最大值	0.928432	0.169773
平均值	0.494275	0.0801722
有效值	0.537295	0.0892182

如图 3-4 所示为校准前精度误差图,等待示教的 50 个测试点测试完成后,系统会自动计算校准结果。横坐标是点数,纵坐标是每一点的误差值,其中绿色折线为校准前误差,紫色折线为校准后误差。

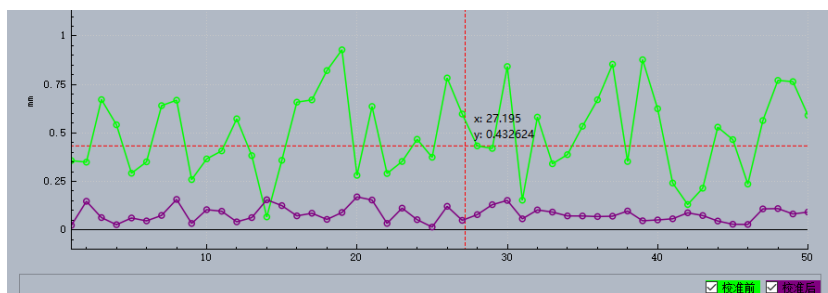


图 3-4 校准前精度误差图

如图 3-5 所示为点位空间分布图，50 点在空间中所处位置。

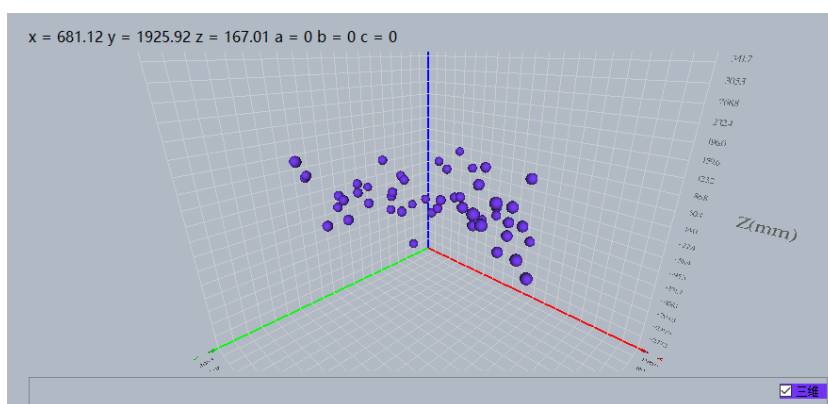


图 3-5 点位空间分布图

根据测量数据可以发现，机器人结构参数的误差对机器人末端执行器的位置和姿态有很大的影响。通过测量软件重新计算机器人结构参数值，将工业机器人的零位、减速比校正系数、减速比和杆长值补偿给控制器。启动机器人和激光跟踪仪设备，让机器人沿着规定路径进行运动。激光跟踪仪对 50 个测量点重新进行数据处理和分析，并重新获得机器人的结构参数。

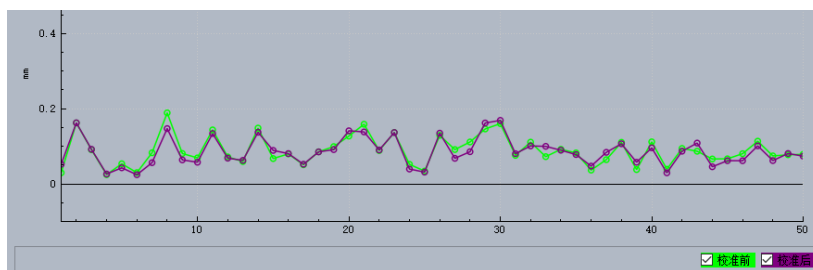


图 3-6 校准后精度误差图

由图 3-6 可以看出，经过补偿校准后的机器人末端的抖动状况有了明显的好转，校准前后的的波形几乎保持一致。

表 3-5 校准后的工业机器人结构参数 1

名称	零位修正值(°)	减速比修正因子	原减速比值	修正减速比值
1 轴	0	1.00027	81.0012	80.978
2 轴	-0.0407595	1.00048	100.926	100.952
3 轴	0.0276727	1	-63.5443	-63.4613
4 轴	0.0126733	0.999836	-68.8727	-68.9768
5 轴	-0.0174075	1.00013	-64.9777	-64.9915
6 轴	0	1.00004	40.6187	40.6236

表 3-6 校准后的工业机器人结构参数 2

名称	原杆长(mm)	修正杆长(mm)
L1	367.5	367.5
L2	295.565	295.564
L3	37.1213	37.1749
L4	296.103	296.176
L5	78.5	78.5
L6	0.219241	0.218053
L7	0.442244	0.6216

表 3-7 校准后精度误差对比

名称	校准前(mm)	校准后(mm)
最大值	0.188979	0.169003
平均值	0.0885592	0.0855087
有效值	0.0965681	0.0932252

由表 3-5、表 3-6、表 3-7 校准后的数据结果可以看出，机器人的各轴零位修正值、减速比修正值、连杆修正值的误差大约在 0.01 左右，与校准前的数据结果比较机器人系统的精度和性能有了很大的提高，末端抖动基本得到抑制。

通过对校准前后的测量数据对比分析可知，机器人结构参数的误差对机器人末端执行器的位置和姿态有较大影响，具体来说：各轴零位修正值偏差会导致机器人在运动时存在不对称性，使得机器人末端执行器的位置偏离理论值，减速比修正值偏差会导致机器人旋转角度的误差，进而影响机器人的姿态，连杆修正值偏差会直接影响机器人的工作空间和精度。

3.2 工业机器人末端抖动信号测试

姿态精度是指在相同的方向上，一个指定姿态与实际姿态的误差。位姿准确度包括位置准确度和姿态准确度两部分，位置准确度是指指定位置与实际到达位置的差值；姿态精度是指指令的姿势与实际到达目标点位姿的平均值之间的差异。

3.2.1 工业机器人姿态准确度检测

1. 检测目的：

在机器人末端加装反射器（靶球），用来实时地获取工业机器人在三维空间中的位置和姿态信息。采用激光跟踪仪对其位置进行测量，并与机器人控制系统给出的位置进行比较，以评估机器人位姿的准确度。

2. 准备工作

- （1）将激光跟踪仪安装在实验室内合适的位置，并校准。
- （2）将工业机器人放置在测试区域内，并连接激光跟踪仪和 PC 端的测量软件。
- （3）使用示教器控制工业机器人进行一系列位姿变换的动作，如旋转、平移等，确保机器人可以正常运行。

3. 检测方法

在实验过程中，使用了一种基于轨迹跟踪的方法，将指令位姿和实际位姿进行比较。先通过工业机器人控制系统下发一组位姿指令，然后让工业机器人按照指令执行任务。同时，通过激光跟踪仪实时记录工业机器人的实际位姿与指令位姿进行比较。最终，将激光跟踪仪测量得到的位置坐标与机器人控制系统给出的位置坐标进行比较，计算出机器人的位姿误差，从而进一步分析其位姿准确度。

此次实验参照标准《GB/T 12642-2013/ISO 9283:1998 工业机器人性能规范及其试验方法》进行试验准备。

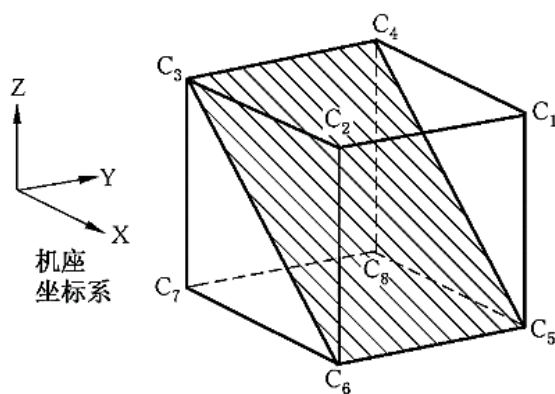
4. 检测步骤

在工业机器人末端执行器上安装了反射器（靶球）如图 3-7 所示。将激光跟踪仪固定在一个已知位置，并将其激光束与工业机器人上的反射器相连。这样，在工业机器人执行任务的过程中，激光跟踪仪可以实时地记录反射器的位置和姿态信息，并计算出工业机器人的实际位姿。为了测试工业机器人的位姿准确度，首先对激光跟踪仪进行预热校准。待激光跟踪仪上的绿色指示灯常亮后代表预热校准完成。

其次通过示教器对工业机器人进行编程，如图 3-8 所示，在机器人工作空间中找出一个立方体，顶点用 C1~C8 表示；根据工业机器人所处的工作环境，在立方体中选用一个合适的工作平面，在此次实验中选取平面 C3-C4-C5-C6，在平面上选择五个测量点 P1~P5，位于测量平面的对角线上，测量点距离顶点为对角线的 10%。



图 3-7 靶球位置示意图



平面 (c) $C_3-C_4-C_5-C_6$

图 3-8 工作空间中的立方体

通过示教器编程，在工具坐标系下移动工业机器人的关节轴，保证在移动过程中激光跟踪仪发射出的激光束不能与工业机器人上的反射器（靶球）断连，否则无法将工业机器人位姿点数据反馈给激光跟踪仪。同时还要保证五个测量点都是在同一个位姿角度，每移动到一个测量点后都需要在示教器上记录当前位姿数据，直到五个测量点的数据采集完成。

工业机器人程序如下：

MJOINT (wz1, v500, fine, tool0) ;

DWELL (18) ;

MJOINT (wz 2, v500,fine, tool0) ;
 DWELL (18) ;
 MJOINT (wz 3, v500,fine, tool0) ;
 DWELL (18) ;
 MJOINT (wz 4, v500,fine, tool0) ;
 DWELL (18) ;
 MJOINT (wz 5, v500,fine, tool0) ;
 DWELL (18) ;

表 3-7 为测量位姿点的坐标数据，并将其填写到测量软件中。

表 3-7 位姿测量点坐标数据

位姿	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	A(°)	B(°)	C(°)
P5	-36.22	428.1	480.89	176.85	175.91	2.06
P4	-6.45	418.8	413.24	176.85	175.91	2.06
P3	115.67	354.69	359.07	176.85	175.91	2.06
P2	176.58	357.33	405.24	176.85	175.91	2.06
P1	133.86	333.33	527.03	176.85	175.91	2.06

如图 3-9 所示为测量位姿点在空间中的位置分布。

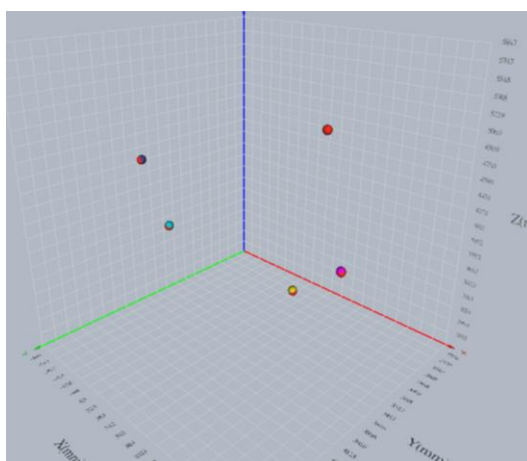


图 3-9 工作空间中的测量点分布图

待位姿数据填写完成之后需要将工业机器人运行模式切换至自动运行，同时点击测量软件的开始测试按钮，激光跟踪仪依次自动瞄准到 3 个 TCP 靶球的位置，如果没有瞄准，激光跟踪器测量头的绿色聚焦孔指示灯会变成红色指示灯。此时需要重新聚焦并重新测量，

观察 TCP 靶球。测量软件会将激光跟踪仪记录下的测量点的实际位置和姿态信息数据进行误差计算。

3.2.2 工业机器人轨迹准确度检测

1. 检测目的:

本文提出了一种利用激光跟踪仪对工业机器人轨迹准确度进行检测的方法。通过将激光跟踪仪固定在测量区域内,监测工业机器人末端执行器的运动轨迹。通过采集得到的数据进行计算和分析,得出机器人轨迹的精度和误差范围。

2. 准备工作

- (1) 将激光跟踪仪安装在实验室内合适的位置,并校准。
- (2) 将工业机器人放置在测试区域内,并连接激光跟踪仪和 PC 端的测量软件。
- (3) 使用示教器控制工业机器人进行一系列位姿变换的动作,如旋转、平移等,确保机器人可以正常运行。

3. 检测方法

本实验采用激光跟踪仪对工业机器人的轨迹进行检测,可以实现对工业机器人运动轨迹进行实时监测。首先将激光跟踪仪安装在一个固定的位置,并标定坐标系。然后将工业机器人末端执行器移动到测量区域内,启动工业机器人的轨迹运动。激光跟踪仪会自动捕捉并记录末端执行器的运动轨迹,以及其相应的坐标和轨迹姿态信息。最后,通过对得到的数据进行处理和分析,可以得出机器人轨迹的精度和误差范围。

此次实验参照标准《GB/T 12642-2013/ISO 9283:1998 工业机器人性能规范及其试验方法》进行试验准备。

4. 检测步骤

在工业机器人末端执行器上安装了反射器(靶球)如图 3-10 所示。将激光跟踪仪固定在一个已知位置,并将其激光束与工业机器人上的反射器相连。这样,在工业机器人执行任务的过程中,激光跟踪仪可以实时地记录反射器的位置和轨迹姿态信息,并计算出工业机器人的实际轨迹姿态。为了测试工业机器人的轨迹准确度,首先对激光跟踪仪进行预热校准。待激光跟踪仪上的绿色指示灯常亮后代表预热校准完成。

通过示教器编程,在工具坐标系下移动工业机器人的关节轴,保证在移动过程中激光跟踪仪发射出的激光束不能与工业机器人上的反射器(靶球)断连,否则无法将工业机器人位姿点数据反馈给激光跟踪仪。同时还要保证五个测量点都是在同一个位姿角度,每移动到一个测量点后都需要在示教器上记录当前位姿数据,直到轨迹测量点的数据采集完成。



图 3-10 靶球位置示意图

工业机器人轨迹测量程序如下：

```
MJOINT (gj1, v500,fine, tool0) ;
```

```
DWELL (5) ;
```

```
MJOINT (gj2, v500,fine, tool0) ;
```

```
DWELL (5) ;
```

如图 3-11 所示为测量轨迹点在空间中的位置分布。

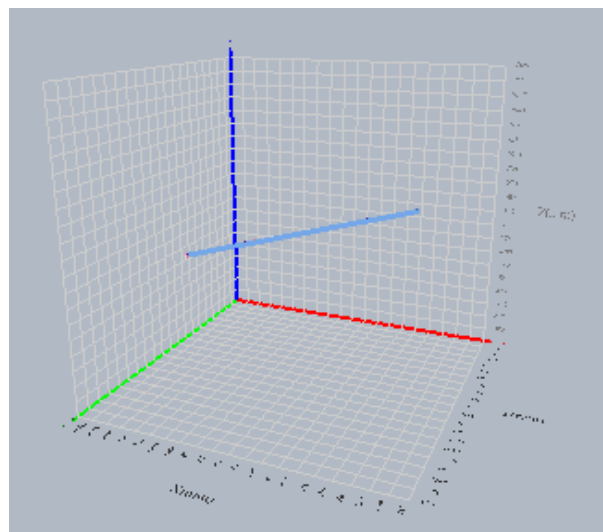


图 3-11 工作空间中的测量点分布图

表 3-8 为测量轨迹点的坐标数据，并将其填写到测量软件中。

表 3-8 轨迹测量点坐标数据

轨迹描述	名称	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	A(°)	B(°)	C(°)
直线轨迹 (E1-E2)	起始位姿	-101.5	432.41	466.13	176.85	175.91	2.06
	到达位姿	304.33	258.99	557.24	176.85	175.91	2.06

待轨迹测量点数据填写完成之后需要将工业机器人运行模式切换至自动运行，同时点击测量软件的开始测试按钮，激光跟踪仪依次自动瞄准到 TCP 靶球的位置，如果没有瞄准，激光跟踪器测量头的绿色聚焦孔指示灯会变成红色指示灯。此时需要重新聚焦并重新测量，观察 TCP 靶球。测量软件会将激光跟踪仪记录下的测量点的实际位置和轨迹数据进行误差计算。

3.3 工业机器人末端抖动信号分析

1. 工业机器人姿态准确度实验数据分析：

实验结果表明，通过工业机器人姿态准确度检测实验，能够有效地检测机器人位姿误差，并能够提供较为精确的数据支持。

机械臂反复运行 30 次，得到的空载测试结果如表 3-9 所示，带载测试结果如表 3-10 所示。

表 3-9 空载状态下的指令位姿测量结果数据

位姿	APp(mm)	APa(°)	APb(°)	APc(°)	RPI(mm)	RPa(°)	RPb(°)	RPc(°)
P5	0.415	-0.004	-0.002	0.005	0.025	0.004	0.002	0.004
P4	0.346	0.008	0.002	0.014	0.022	0.004	0.003	0.003
P3	0.431	0.076	-0.026	0.003	0.019	0.004	0.002	0.003
P2	0.367	0.068	-0.002	0.003	0.020	0.004	0.003	0.003
P1	0.502	0.039	0.006	-0.001	0.022	0.005	0.002	0.003
Max	0.502	0.076	-0.026	0.014	0.025	0.005	0.003	0.004
Min	0.346	-0.004	0.002	-0.001	0.019	0.004	0.002	0.003
Avg	0.412	0.039	0.008	0.005	0.022	0.004	0.002	0.003
Rms	0.416	0.049	0.012	0.007	0.022	0.004	0.002	0.003

表 3-10 带载状态下的指令位姿测量结果数据

位姿	APp(mm)	APa(°)	APb(°)	APc(°)	RPI(mm)	RPa(°)	RPb(°)	RPc(°)
P5	0.491	-0.034	-0.001	-0.001	0.029	0.004	0.004	0.006
P4	0.559	-0.021	0.008	0.008	0.025	0.003	0.004	0.003
P3	0.589	0.055	-0.005	0.003	0.030	0.007	0.003	0.003
P2	0.520	0.052	0.025	0.002	0.025	0.005	0.002	0.003
P1	0.468	0.023	0.033	-0.001	0.028	0.006	0.003	0.004
Max	0.589	0.055	0.033	0.008	0.030	0.007	0.004	0.006
Min	0.468	-0.021	-0.001	-0.001	0.025	0.003	0.002	0.003
Avg	0.525	0.037	0.014	0.003	0.028	0.005	0.003	0.004
Rms	0.527	0.039	0.019	0.004	0.028	0.005	0.003	0.004

其中：APp 为位姿准确度；APa,APb,APc 分别为位姿 a 角、b 角、c 角的位姿姿态准确度；RP1 为位姿重复性；RPa,RPb,RPc 分别为位姿 a 角、b 角、c 角的位姿姿态重复性。Max 为位姿指标中的最大值；Min 为位姿指标中的最小值；Avg 为位姿指标中的平均值；Rms 为位姿指标中的有效值。

表 3-11 空载、带载数据结果对比分析表

项目	空载状态	带载状态
位姿准确度 单位：(mm)	平均值：0.412、最大值：0.502 最小值：0.346 有效值：0.416	平均值：0.525、最大值：0.589 最小值：0.468、有效值：0.527
位姿姿态准确度 (Apa、Apb、Apc) 单位：(°)	平均值：0.039、0.008、0.005 最大值：0.076、-0.026、0.014 最小值：-0.004、0.002、-0.001 有效值：0.049、0.012、0.007	平均值：0.037、0.014、0.003 最大值：0.055、0.033、0.008 最小值：-0.021、-0.001、-0.001 有效值：0.039、0.019、0.004
位姿重复性 单位：(°)	平均值：0.022、最大值：0.025 最小值：0.022、有效值：0.022	平均值：0.028、最大值：0.030 最小值：0.025、有效值：0.028
位姿姿态重复性 (Rpa、Rpb、Rpc) 单位：(°)	平均值：0.004、0.002、0.003 最大值：0.004、0.002、0.003 最小值：0.004、0.002、0.003 有效值：0.004、0.002、0.003	平均值：0.005、0.003、0.004 最大值：0.007、0.004、0.006 最小值：0.003、0.002、0.003 有效值：0.005、0.003、0.004

通过收集的工业机器人在带载和空载状态下用激光跟踪仪测量的位姿实验,实验数据包括位姿准确度数据、位姿姿态准确度数据和位姿姿态重复性数据。共有 900 个数据样本,其中 450 个样本是机器人空载状态下的数据,另外 450 个样本是带载状态下的数据。通过初步统计分析发现,随着载荷的增大,机器人的位姿精度越差。

首先对位姿准确度数据、位姿姿态准确度数据、位姿重复性、位姿姿态重复性数据进行了描述性统计分析,结果如表 3-11 空载、带载数据结果对比分析表所示。

从上表可以看出,带载状态下机器人的位姿准确度数据、位姿姿态准确度数据、位姿重复性、位姿姿态重复性数据都明显低于空载状态。

通过以上分析结果,可以得出以下结论:

- (1) 带载状态下机器人的位姿精度较低,与空载状态相比均值增加了约 0.784 倍。
- (2) 载荷和位姿准确度之间存在中度负相关,即随着载荷的增加,机器人的位姿准确度降低。

2. 工业机器人轨迹准确度检测实验数据分析:

机械臂反复运行 30 次,得到的空载状态下的轨迹测量结果数据如表 3-12 所示,带载状态下的轨迹测量结果数据如表 3-13 所示。

表 3-12 空载状态下的轨迹测量结果数据

轨迹	ATp (mm)	Ata (°)	Atb (°)	Atc (°)	RTp (mm)	Rta (°)	RTb (°)	RTc (°)	AV (%)	RV (%)	FV (m/s)
1	0.488	1.101	0.361	0.529	0.020	9.337	3.522	4.854	-0.258	0.010	0.015

表 3-13 带载状态下的轨迹测量结果数据

轨迹	ATp (mm)	Ata (°)	Atb (°)	Atc (°)	RTp (mm)	Rta (°)	RTb (°)	RTc (°)	AV (%)	RV (%)	FV (m/s)
1	0.645	1.722	0.161	0.684	0.044	15.327	1.754	5.947	-0.320	0.007	0.026

其中: Atp(mm): 轨迹精度; RTp (mm): 轨迹重复定位精度; AV (%): 轨迹速度准确度; RV (%): 轨迹速度重复性; FV; (m/s): 轨迹速度波动;

根据激光跟踪仪测量到的数据,发现工业机器人在带载和空载状态下的轨迹精度、速度准确度和重复定位精度都受到了载荷的影响。

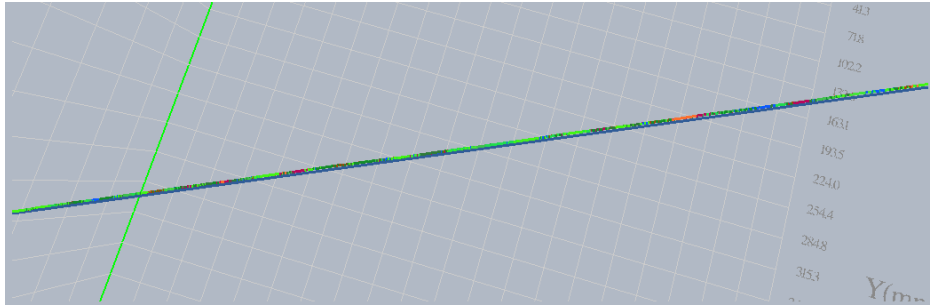


图 3-13 空载状态机器人在空间内运行轨迹图

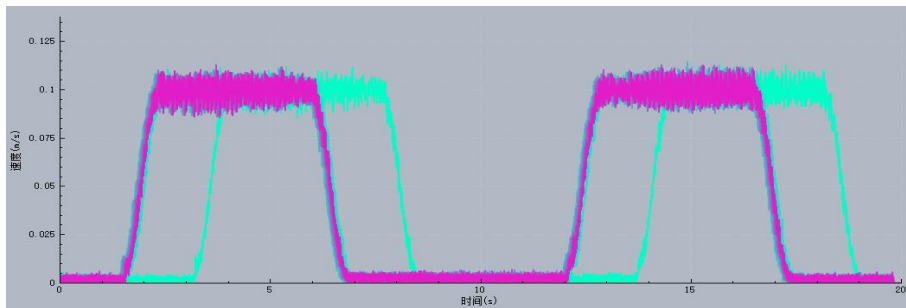


图 3-14 空载状态机器人末端运行速度图

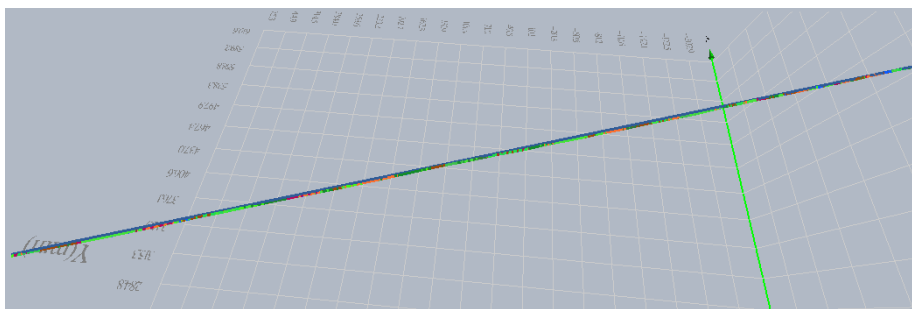


图 3-15 重载状态机器人在空间内运行轨迹图

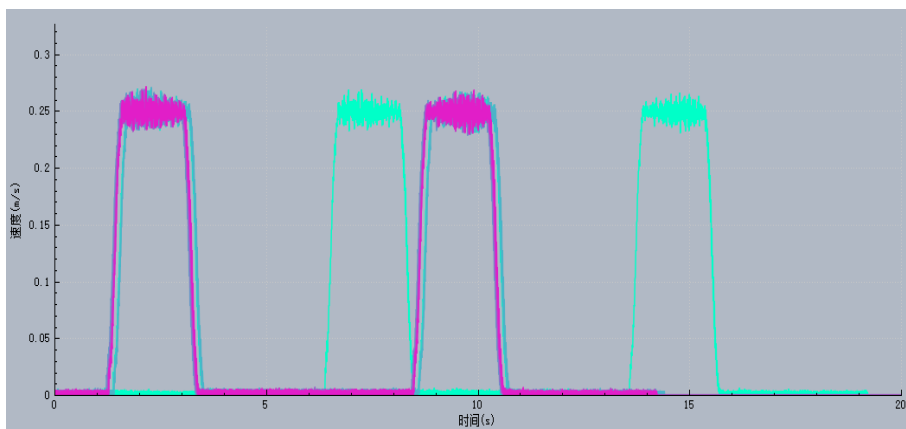


图 3-16 重载状态机器人末端运行速度图

具体来说,当载荷增加时,机器人的轨迹精度变得更差。在空载状态下,机器人的轨迹精度相对较高,平均误差为 0.488mm。而当载荷达到一定程度后,机器人的轨迹精度会急剧下降,比如在最大载荷下,平均误差可能高达 0.645mm。这是因为载荷的质量会增加机器人的惯性,从而导致机器人难以控制其运动轨迹。同时,载荷的存在也会引起机器人的结构强度变化,使机器人的关节出现形变而进一步影响轨迹精度。

随着载荷越大,机器人的轨迹速度准确度也越差。这是因为机器人在带有重载的情况下,需要承受更大的惯性力和阻力,从而降低了其加速度和速度能力。这进一步影响了机器人的轨迹速度准确度。

最后,根据测量结果表明,载荷的增加也会降低机器人的轨迹重复定位精度。这是因为载荷的存在会导致机器人结构的形变,从而使得机器人在多次执行相同任务时无法准确重现先前的轨迹,从而降低了其重复定位精度。

综上所述,载荷是影响工业机器人轨迹精度、速度准确度和重复定位精度的重要因素。在实际应用中,需要根据具体情况选择适当的载荷范围,以保证机器人的运动轨迹精度和性能表现。

3.4 本章小结

本章主要介绍了基于激光跟踪仪的工业机器人自身精度校准、姿态准确度检测和轨迹准确度检测实验。

首先使用激光跟踪仪对机器人进行自身结构参数校准,通过实验验证了在第一章主要研究内容中提出的猜想一。其次使用激光跟踪仪对机器人末端进行定位和跟踪,并采集姿态数据和轨迹数据。然后,通过误差分析法计算机器人姿态误差和轨迹误差,并提出了相应的评价指标。

在姿态准确度检测方面,通过比较实际测量值和期望值来评估机器人姿态准确度。实验结果表明,在不同的运动状态下,机器人姿态误差存在一定的波动,需要进一步优化控制算法和传感器精度等因素。

在轨迹准确度检测方面,将机器人轨迹划分为一个小段,并计算对应的轨迹误差,最后得到全局轨迹误差。实验结果表明,机器人轨迹误差主要受到机器人末端速度和加速度等因素的影响,需要协调机器人运动规划和控制算法来提高轨迹准确度。

第 4 章 工业机器人末端抖动问题解决方案

针对外部环境中存在的不确定因素对其运动轨迹的影响,本项目拟采用神经网络和滑模控制相融合的控制策略,以实现系统稳定、快速和精确地使系统达到各运动机构所需运动轨迹为控制目标。本项目拟采用基于多个 RBF 神经网络的多个模块进行建模,研究基于多个模块的 RBF 神经网络的建模算法,提出一种基于多目标规划算法的六坐标机构运动轨迹的精确建模算法,解决六自由度工业机器人的轨迹跟踪控制及抖动抑制问题,基于 Simulink 软件进行数值模拟和实验验证。

4.1 机械臂系统描述

在一台工业机器人中,每一根轴线上都有一个独立的执行器,用于推动其各个自由度。从控制论的观点来看,工业机器人系统是一类多变量的复杂非线性系统,系统中的每个控制任务本身,就是一个动力学任务的研究过程。机械臂的动力学方程是由机器人各关节角度的一、二阶导数与各关节的驱动力矩之间的关系^[8]。

为了对机械臂所受的力、力矩、关节角度、角速度、角加速度进行理论和仿真,建立了机械臂的动力学数学模型。执行器需要为机械臂提供足够的作用力和力矩来驱动机械臂动作。为了让机器人能更好地执行某些操作,系统必须要通过对每一个伺服电机所需的驱动功率进行计算。在此基础上,可以根据机械臂的外界载荷计算出机械臂最大负载。

根据拉格朗日法^[9],机械臂的动力学模型最终可写成:

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_d = \tau \quad (4-1)$$

其中, $q \in R^n$ 为机械臂的关节角位移, $\dot{q} \in R^n$ 为机械臂的关节角速度, $\ddot{q} \in R^n$ 为机械臂的关节角加速度, $M(q) \in R^n$ 为机械臂的惯性矩阵, $C(q, \dot{q}) \in R^n$ 表示离心力和哥氏力, $G(q) \in R^n$ 为机械臂的重力矩阵, $\tau_d \in R^n$ 为因末端载荷改变产生的干扰力矩, $\tau \in R^n$ 为总的控制力矩。

考虑到机械臂建模误差的存在,因此:

$$\begin{cases} M(q) = 1.3M_0(q) \\ C(q, \dot{q}) = 1.3C_0(q, \dot{q}) \\ G(q) = 1.3G_0(q) \end{cases} \quad (4-2)$$

机械系统的动力学特性:

$\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ 是一个斜对称矩阵

$$x^T (\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q}))x = 0 \quad (4-3)$$

惯性矩阵 $M(q)$ 是一个对称正定矩阵,存在正数 m_1 、 m_2 , 满足如下不等式:

$$m_1 \|x\|^2 \leq x^T M(q)x \leq m_2 \|x\|^2 \quad (4-4)$$

在实际应用中, $\forall q \in R^n$, $G(q) \in R^n$ 总是有界的。

4.2 控制系统设计

1. 滑模变结构控制器设计

工业机器人是一种高性能、高效率的、能够有效改善产品品质的自动化装备,在企业中的使用日益增多。由于工业机器人具有高度的非线性和多变量时变特性,因此对其控制提出了更高的要求。在完成作业过程中,一般都会有一条特殊的路径,以保持某种精确的轨迹。但常规 PID 控制存在着易受外部环境的影响、动力学性能不佳、鲁棒性差等问题。

近年来,机械臂在现代工业中得到广泛的应用^[10]。在实际生产中,多采用机械臂的姿态和作用力的复合控制。机械臂系统具有非线性、不确定性、多变量及强耦合等特征^[11],容易受到参数变化、外界干扰以及其他不确定性的影响。如何实现对机器人手臂的精确控制,已成为当前工程实践中急需解决的问题。

滑动模态控制器是一种应用广泛的非线性控制方式,它利用滑动曲面对系统进行稳定控制。其特点是对外界扰动不敏感。该方法的基本思想是:在该模型中,当该模型的状态轨迹达到一个预定的水平时,该模型将根据自身的特点达到一个稳定的水平,从而使该模型更加稳健。通常情况下,滑动模态的控制器是一个连续的和连续的两个部分。在这两种方法中,不连续函数被用于对未模型化的动力学和不确定性进行有效地压制,并在控制器的设计中发挥着至关重要的作用。

在此基础上,提出了一种基于滑动模态的机器人手臂运动轨迹控制方法。滑动模式控制器响应速度快,鲁棒性好,能有效地抑制手臂末端的振动。

设机械臂的期望轨迹为 $q_d(t)$, 实际运动轨迹为 $q(t)$ 。得到机械臂的轨迹跟踪误差为:

$$e(t) = q(t) - q_d(t), \quad \dot{e}(t) = \dot{q}(t) - \dot{q}_d(t) \quad (4-5)$$

选用线性滑模面:

$$s = \dot{e} + \alpha e \quad (4-6)$$

其中 α 为常数矩阵且 $\alpha = \alpha^T > 0$

滑模控制的趋近律选择指数趋近率:

$$\dot{s}(t) = -\varepsilon \operatorname{sgn} s - ks \quad (4-7)$$

结合上述式子,得到控制力矩为:

$$\tau_1 = M(q)(-\varepsilon \operatorname{sgn} s - ks + \ddot{q}_d - \alpha(\dot{q} - \dot{q}_d)) + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + \tau_d \quad (4-8)$$

机械臂在利用滑模控制过程时，其中的符号函数会引起控制力矩的抖振变化。同时，机械臂的模型也不是精确的，有模型误差存在，因此，引入变量 \dot{q}_r 和 q_r 使：

$$q_r = \dot{q} - s = \dot{q}_d - \alpha e, \dot{q}_r = \ddot{q} - \dot{s} = \ddot{q}_d - \alpha \dot{e} \quad (4-9)$$

使滑模控制部分的控制力矩转变为：

$$\tau = M_0(q)\dot{q}_r + C_0(q, \dot{q})q_r + G_0(q) - ks - f(x) \quad (4-10)$$

2. 神经网络控制器设计

在实际生产中，由于工作环境的差异，使得机械臂在操作过程中所承受的负载是不断改变的。由于连杆、质量、重心、摩擦力等因素的不确定，难以精确获取机构的动态模型，造成了巨大的建模偏差，进而影响了机构的控制效果。针对此问题，提出了一种基于 RBF 神经网络的机器人操作臂的建模方法。

RBF 神经网络是一种基于径向基函数的神经网络。该网络具有较高的非线性逼近能力和收敛速度，能够有效地处理多变量输入和输出。对多个参数均有很好的拟合效果，且其收敛性好。本文采用 RBF 神经网络的逼近特性对建模误差和外部载荷改变引起的干扰进行逼近，将逼近结果作为滑模控制器新的开关增益，避免滑模控制器本身增益切换时带来的振动。

设定 $f(n)$ 包括建模误差和外部干扰项。在实际工作中， $f(n)$ 项是未知的。RBF 神经网络具有较强的自学习能力，能够以任意精度近似各种复杂非线性函数和不确定项，因此将 RBF 神经网络用于逼近未知项 $f(n)$ 。

采用 RBF 神经网络逼近 $f(n)$ ，则 RBF 神经网络的估计输出值为：

$$f(x) = W^T h(x) \quad (4-11)$$

其中， $W = [\omega_1, \omega_2 \cdots \omega_m]$ 表示 RBF 神经网络的权值向量的估计值； $h(x) = [h_1, h_2 \cdots h_m]^T$ 表示为高斯函数，表示为：

$$h_j(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_{ij}^2}\right), j = 1, 2, \cdots, m \quad (4-12)$$

其中， $x = [x_1, x_2 \cdots x_m]$ 表示输入信号； m 表示隐含层的数量； $c_j = [c_{j1}, c_{j2} \cdots c_{jm}]$ 表示中心点向量； $b_{ij} = [b_1, b_2 \cdots b_m]^T$ 表示径向基函数的基宽。

神经网络的权值更新率为：

$$\dot{W} = sh(x) \quad (4-13)$$

其中， s 表示滑模面的变量， $h(x)$ 表示隐含层的高斯函数。

RBF 神经网络由输出层、隐含层、输入层组成^[12]。其结构如图 4-1 所示。

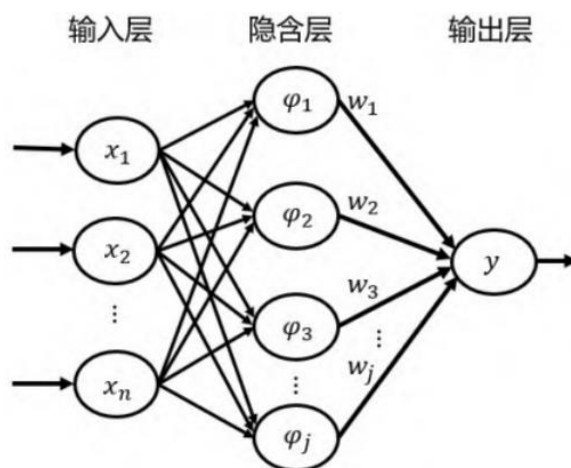


图 4-1 RBF 神经网络结构

针对该问题，本文采用 RBF 与滑模控制器相结合的方式，对机器人手臂的末端振动进行了有效的抑制，通过仿真进行了验证。

滑模控制通常是利用其开关增益控制系统的建模误差和外部扰动，但是开关增益通常为确定值，不能根据外部的环境进行及时的调整，在控制过程中控制器自身产生高频的振动现象。如果运用 RBFNN 控制使得传统滑模控制器能够随着外部变化设计出动态调整的可变估计值，实现对整个系统进行有效的控制^[13]。控制系统结构图如图 4-2 所示：

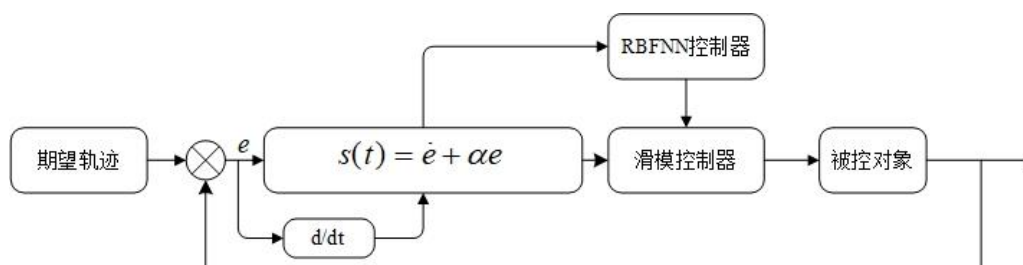


图 4-2 控制系统结构图

4.3 模拟仿真分析

在不同的负载下，通过模态仿真模拟得出了在不同的情况下，关节一、二对机器人的抖动有很大的影响^[14]。利用 MATLAB 中的 Simulink 环境进行仿真。二关节平面机械臂具有 4 个物理参数^[15]，其参数为：

$$\begin{aligned}
 M_0(q) &= \begin{bmatrix} p_1 + p_2 + 2p_3 \cos q_2 & p_2 + p_3 \cos q_2 \\ p_2 + p_3 \cos q_2 & p_2 \end{bmatrix} \\
 C_0(q) &= \begin{bmatrix} -p_3 \dot{q}_2 \sin q_2 & -p_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ p_3 \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix} \\
 G_0 &= \begin{bmatrix} p_4 g \cos q_1 + p_5 g \cos(q_1 + q_2) \\ p_5 g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4-14}$$

取 $p = [p_1, p_2, p_3, p_4, p_5] = [2.9, 0.76, 0.87, 3.04, 0.87]$, $g = 9.8$ 。建模误差为 $\Delta M = 0.3M_0$, $\Delta C = 0.3C_0$, $\Delta G = 0.3G_0$;

神经网络参数：神经网络选用五个输入层；七个隐含层；一个输出层，网络的初始权值为 0，神经网络的输入 $x = [e, \dot{e}, q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d]$ ，高斯函数的中心矢量^[16],

$$c = 0.1 \times \begin{bmatrix} -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \\ -1.5 & -1 & -0.5 & 0 & 0.5 & 1 & 1.5 \end{bmatrix}; \tag{4-15}$$

基函数的宽度 $b = 10$ 。系统的初始状态为 $[q_1, \dot{q}_1, q_2, \dot{q}_2]^T = [0, 0, 1, 0]^T$ ，两个关节角的期望轨迹分别为 $q_{1d} = \sin 3t$, $q_{2d} = \cos 3t$ 。仿真时间为 3 秒，步长为 0.01 秒，关节的初始力矩为 0。

为此，本文采用两自由度机器人作为模拟实验的对象，来检验所提出的方法的正确性。Simulink 程序框图如图 4-3 所示。

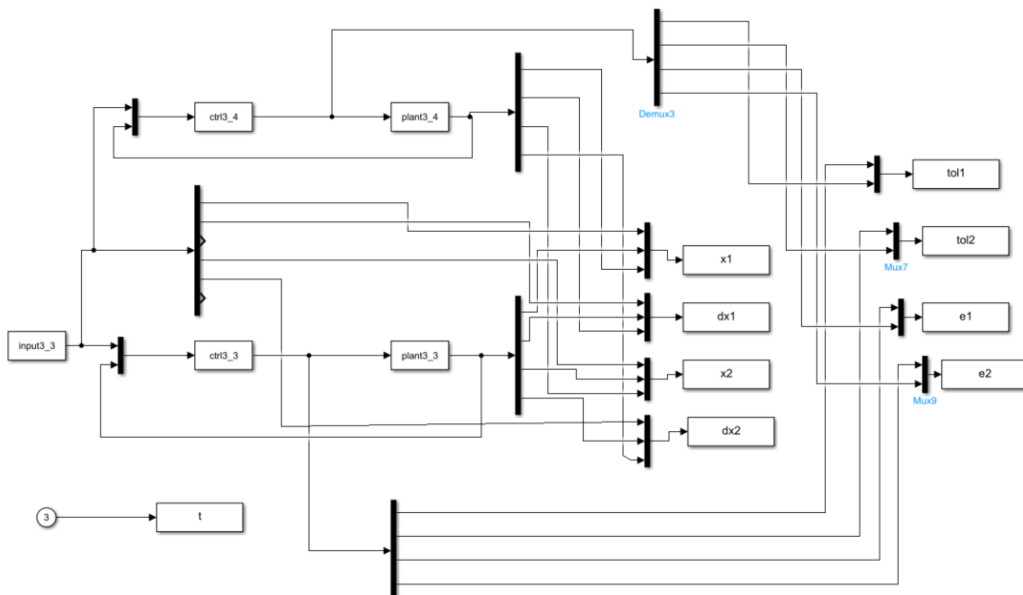


图 4-3 Simulink 程序框图

为不失一般性，引入高频和低频的扰动力矩 $\tau_d=5\sin(t)+0.5\sin(20\pi t)$ 。如图 4-4、4-5、4-6、4-7 分别为二关节机械臂与基于不同滑模面的神经网络控制方法作用下的位置跟踪曲线图、速度跟踪曲线图、输入力矩曲线图和位置跟踪误差曲线图。仿真结果如图所示：

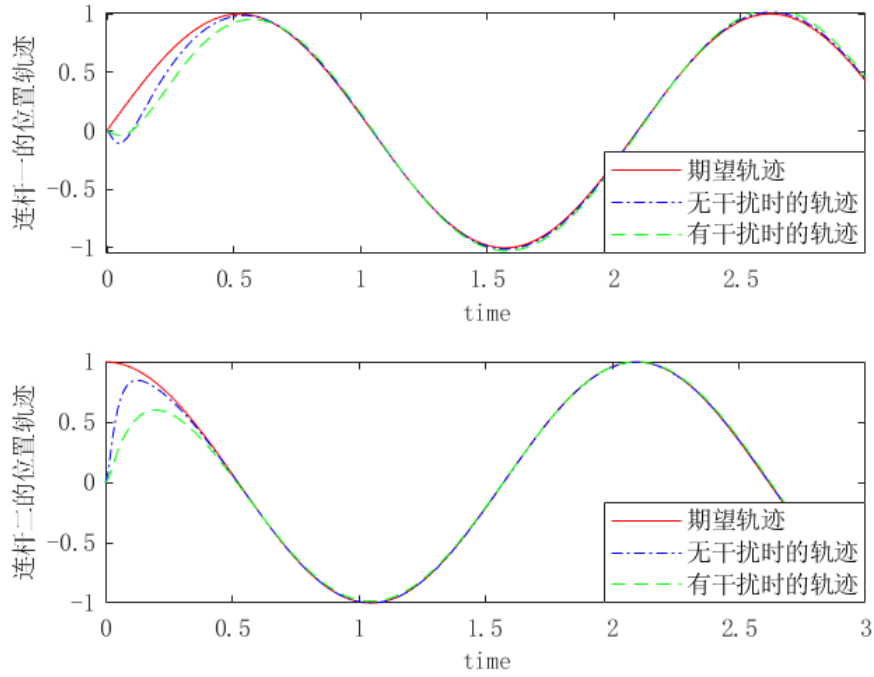


图 4-4 两连杆的位置跟踪曲线

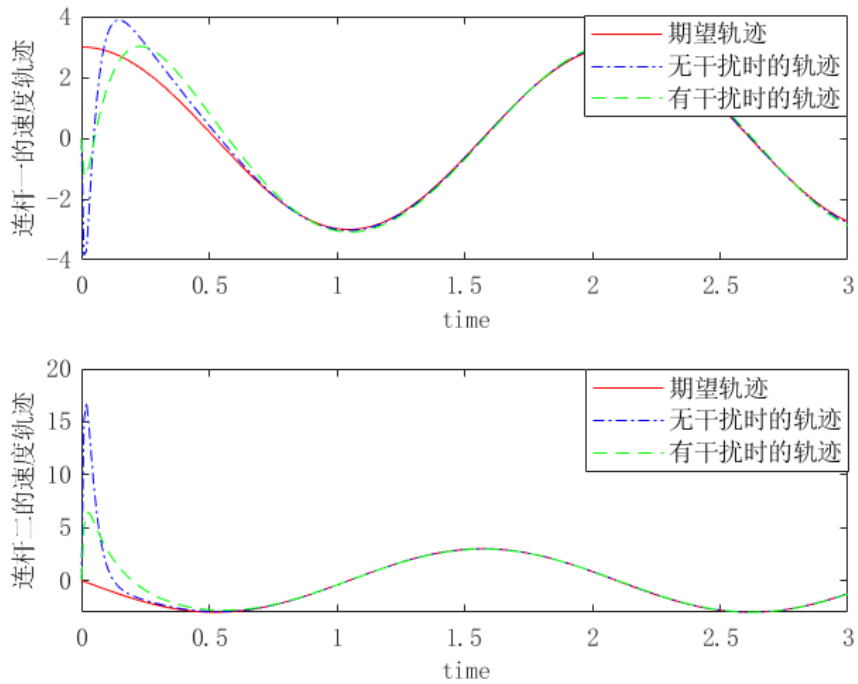


图 4-5 两连杆的速度跟踪曲线

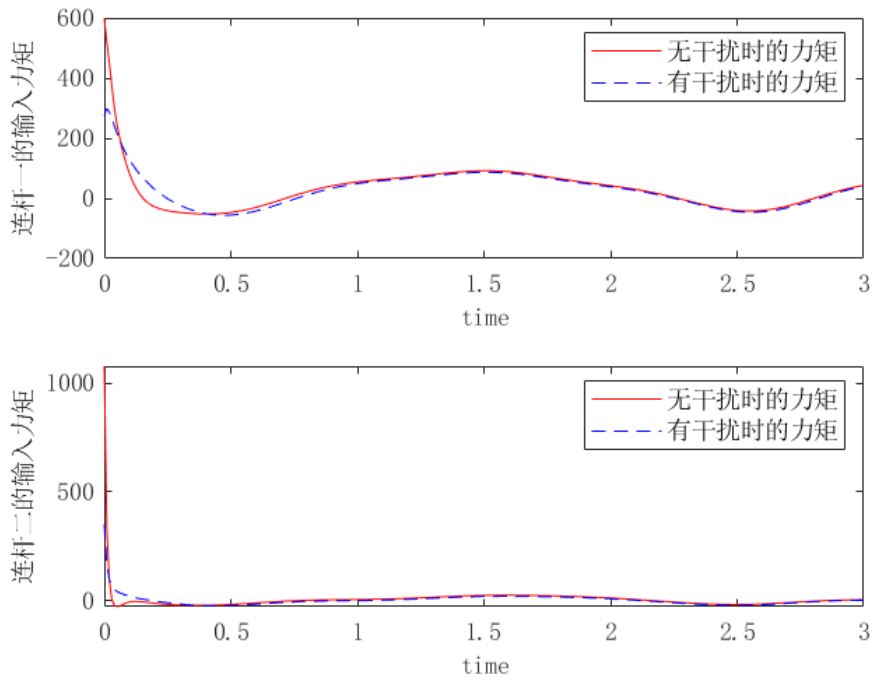


图 4-6 两连杆控制力矩输入对比曲线

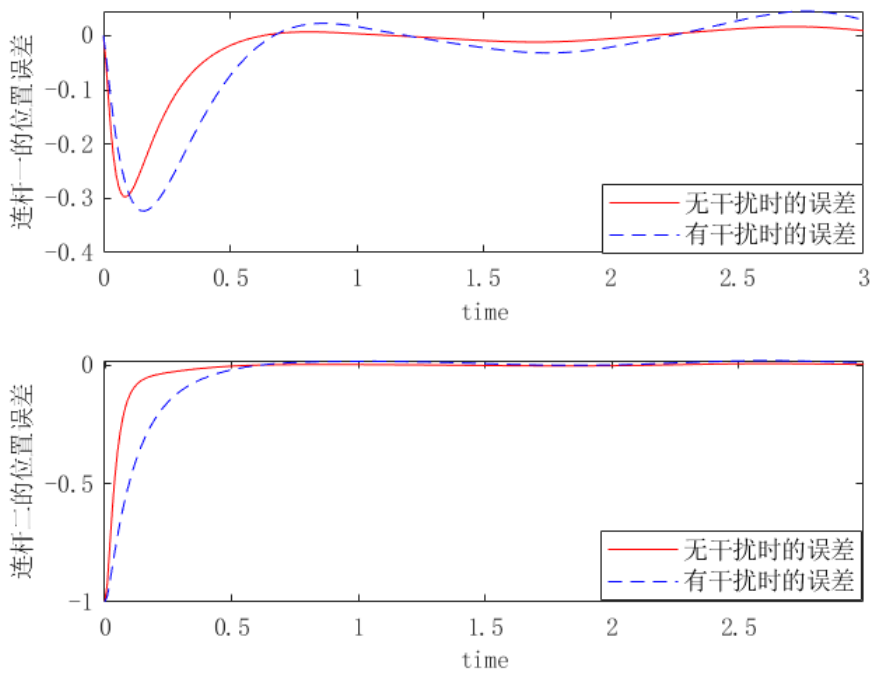


图 4-7 两连杆的位置误差对比曲线

在此基础上，结合各控制策略各自的优势，实现了对被控系统的高精度、高稳定性的控制。在终端负载改变，产生新的扰动扭矩时，采用滑模控制部分能迅速地将系统的运动轨迹调整到预定的运动轨迹。

从仿真结果可以看出，该控制方法在干扰力矩较大时，跟踪目标轨迹所需时间较少，精度较高，控制转矩平滑且后半段趋于稳定。

对于具有非线性系统的机械臂的控制，采用了上述控制方法。从仿真结果可以看出，无论外界干扰大小如何，该控制方法对机械臂的跟踪期望轨迹都有显著的影响，实现了高精度的跟踪效果。不仅所需时间短，而且控制输入转矩非常平稳，且后半段趋于稳定。从控制效果观察，机械臂末端负载引起的干扰越大，控制效果越显著。因此，可以广泛应用于工业机器人的控制。避免了建模误差和干扰矩的缺点，能有效地控制不同范围内的干扰。

4.4 本章小结

利用神经网络滑模控制智能算法，跟踪轨迹和速度都能够快速的追踪到期望的轨迹，跟踪精度较高。根据力矩输入曲线对比图中可以看出，在很短时间内就趋于稳定，可以对系统的建模不确定性和外部干扰进行有效的控制。

第 5 章 总结与展望

1. 总结:

激光跟踪器是一种高精度、大范围的空间探测仪器，其使用范围广泛。尤其是在车辆生产中，工作强度大，对检测手段的需求大，就显得更加重要了。即使利用了激光跟踪仪辅助测量标定的机器人技术，已在国内的汽车生产中获得了广泛的应用。由于工业机器人在生产实际应用中目前还面临着一些问题，如：标定精度较差，不稳定等。所以，开展利用激光跟踪仪辅助测量机器人的位置精度提升技术的研究，对于提升汽车数字化组装的品质具有非常重大的现实意义。

本课题以我国汽车制造业为应用背景，针对目前存在的问题，提出了一种新的解决方案，即利用激光追踪器实现位置校正，并利用神经网络来实现运动轨迹的精确校正，从而实现运动轨迹的精确测量。其工作内容包括：

(1) 阐述了 Radian Pro 型激光跟踪系统的构成和测量原理，对该系统的硬件部分进行了简要的描述；对激光跟踪器的工作原理进行了分析；

(2) 将埃夫特智能设备有限责任公司生产的六自由度串联式工业机器人 ER3B-6 的结构参数作为优化对象，利用激光跟踪技术，根据已有的 ER3B-6 的结构性能参数，对其结构性能参数进行了再一次的优化，从而消除了由于自身的控制参数出现偏差而造成的抖动现象。

(3) 对校准完成后的工业机器人进行性能测试，在不同负载下通过测量机器人在执行任务时的位置和姿态变化，分析机器人末端的运动稳定性和抖动情况，获取机器人的运动稳定性和抖动情况数据，分析机器人系统中存在的振动源和影响因素。

(4) 针对具有未知模型和存在外部扰动时六轴工业机器人的运动轨迹跟踪问题，以实现机器人运动轨迹的快速稳定跟踪为目的，利用机器人运动学模型分块逼近，设计了一种神经网络的末端滑动模态自适应控制器。

2. 展望:

利用激光跟踪技术是实现工业机器人精确校准的关键技术。本文对机器人控制参数优化、机器人姿态修正技术、机器人末端抖动抑制等问题展开了深入的研究和讨论，在有些方面已经有所改进，但有一些问题还有待于深入的分析和研究，总的来说可以总结为：

(1) 工业机器人的位置精度较低，通过对其控制参数的优化，可以使工业机器人的位置准确度得到一定的提升，但仍然需要将机器人的位置偏差问题纳入到机器人的运动学和动力学研究中，对机器人的位置偏差进行建模，并对机器人的运动轨迹进行实时的校正。

(2) 虽然在工业机器人末端抖动问题解决方案一章节中进行了很多仿真测验工作，但是因为实验环境的限制，得到的结论并没有能够实际地运用到实际中去，所以接下来还需要进一步地探讨该方法在实际中的运用。

(3) 为了进行检测，在帮助机器人提升位置精度的同时，还需要考虑到激光跟踪仪的误差，特别是对于汽车的生产现场，因为生产现场的温度会发生改变，现场的模具、机器人平台等都会发生变形，从而对激光跟踪仪的检测造成很大的影响。所以有必要对由于热效应而引起的材料形变进行深入的探讨与研究。

参考文献

- [1] 徐鹏飞. 六轴串联机械臂末端抖动因素及解决方法研究[D]. 河北工业大学, 2020.
- [2] 高国华, 李炼石, 夏齐霄, 等. 连续体机械臂振动特性研究[J]. 振动.测试与诊断, 2018,38(01):182-189.
- [3] 朱春霞, 朱立达, 刘永贤, 等. 基于 ADAMS 的并联机器人振动特性仿真及结构优化[J]. 系统仿真学报, 2008(14):3721-3725.
- [4] 焦国太, 冯永和, 王锋, 等. 多因素影响下的机器人综合位姿误差分析方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2004(04):435-442.
- [5] 庄未, 刘晓平. 运动状态下柔性关节机器人振动环境预测[J]. 北京邮电大学学报, 2009,32(05):99-103.
- [6] 陶子航, 齐敏中, 季俊辉. 一种六自由度轻型机械臂的设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2017,30(06):78-79.
- [7] 徐鹏飞. 六轴串联机械臂末端抖动因素及解决方法研究[D]. 河北工业大学, 2020.
- [8] 贾东明. 基于迭代滑模算法的机械臂控制[D]. 郑州大学, 2011.
- [9] 贾华, 刘延俊, 王雨, 等. 六轴机械臂神经网络自适应终端滑模控制[J]. 西安交通大学学报, 2022,56(11):21-30.
- [10] 史超. 柔性机械臂的多时间尺度滑模控制[J]. 控制工程, 2020,27(09):1560-1565.
- [11] 赵兴强, 刘振, 高存臣. 机械臂自适应神经网络滑模控制器设计[J]. 控制工程:1-6.
- [12] 董君, 陈立. RBF 神经网络算法的非线性积分滑模控制机械臂运动轨迹误差研究[J]. 中国工程机械学报, 2018,16(02):106-110.
- [13] 赵兴强, 刘振, 高存臣. 机械臂自适应神经网络滑模控制器设计[J]. 控制工程:1-6.
- [14] 沈国栋. 考虑关节柔性的六自由度串联工业机器人动力学建模与末端抖动抑制[D]. 山东大学, 2020.
- [15] Lu N, Ma L, Hua X. Nonsingular fast terminal sliding mode control based on neural network with adaptive robust term for robotic manipulators with actuators[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022: 01423312221093152.
- [16] Hamedani M H, Zekri M, Sheikholeslam F, et al. Recurrent fuzzy wavelet neural network variable impedance control of robotic manipulators with fuzzy gain dynamic surface in an unknown varied environment[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2021, 416: 1-26.

致 谢

写到这里，忍不住想起了这段简短的致谢语，这不仅代表着毕业设计的相关工作处于收尾阶段，也是意味着在天津中德应用技术大学校园生活的结束，更是标志着新生活的开始。

在这短短的几个月里，从选定研究项目，到筹备工作，再到设计构思，再到最终的结稿，都离不开张兴会老师和范其明老师的精心指导。在这段时间里，导师们给了我很多关于毕业设计方面的建议，同时也给我提供了很多宝贵的学习机会。导师的教导使我获益良多，但是最令我感动的还是导师对我的信赖。不管什么时候，导师都会倾听我对这些问题的见解，并在此基础上给出一些宝贵的建议，给我的论文选题和研究给予了极大的帮助，您是我学习的榜样和楷模。

能够写出如此精彩的文章，是我初到天津中德应用技术大学时所不敢想的事情，首先，我要感谢我的父母，是你们一直在背后默默支持我，尊重我的每一个选择，给予我正确的人生指导。其次我要向王莉老师，李云龙老师，王敏老师、孙鹏老师等在我学业道路上给予我帮助的老师表示衷心的感谢。经过两年多的努力，我不但有了很大的进步，而且在自主学习能力方面也有了很大的提高。最后，我还要感谢顾浩、张万鑫等在我求学道路上给予我帮助的师兄师弟们，感谢你们对我大学学习生活中给予的帮助和理解。感谢屈绿锋学长在毕业论文上对我细微的帮助，没有你的协助，我的论文设计不会这么顺利完成。

任重而道远，我会不断地寻找答案，义无反顾的坚持自己的信念和理想一路前行。

谢谢！

附 录

附录 1: 工业机器人 50 个点程序:

```
MJOINT (pp1, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp2, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp3, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp4, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp5, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp6, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp7, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp8, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp9, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp10, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp11, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp12, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp13, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp14, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp15, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp16, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp17, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp18, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp19, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp20, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp21, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
MJOINT (pp22, v50, fine, tool0);
DWELL (3);
```

MJOINT (pp23, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp24, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp25, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp26, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp27, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp28, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp29, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp30, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp31, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp32, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp33, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp34, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp35, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp36, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp37, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp38, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp39, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp40, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp41, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp42, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp43, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;
MJOINT (pp44, v50,fine, tool0) ;
DWELL (3) ;

```
MJOINT ( pp45, v50,fine, tool0) ;  
DWELL (3) ;  
MJOINT ( pp46, v50,fine, tool0) ;  
DWELL (3) ;  
MJOINT ( pp47, v50,fine, tool0) ;  
DWELL (3) ;  
MJOINT ( pp48, v50,fine, tool0) ;  
DWELL (3) ;  
MJOINT ( pp49, v50,fine, tool0) ;  
DWELL (3) ;  
MJOINT ( pp150, v50,fine, tool0) ;  
DWELL (3) ;
```

附录 2: Simulink 程序

input3_3 输入函数

```
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = input3_3(t,x,u,flag)
switch flag,
case 0,
[sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
case 1,
sys=mdlDerivatives(t,x,u);
case 2,
sys=mdlUpdate(t,x,u);
case 3,
sys=mdlOutputs(t,x,u);
case 4,
sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
case 9,
sys=mdlTerminate(t,x,u);
otherwise
DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 6;
sizes.NumInputs = 0;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1; % at least one sample time is needed
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [0 0];
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
sys = [];
function sys=mdlUpdate(t,x,u)
sys = [];
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
qd1=sin(3*t);
d_qd1=3*cos(3*t);
dd_qd1=-9*sin(3*t);
qd2=cos(3*t);
d_qd2=-3*sin(3*t);
dd_qd2=-9*cos(3*t);
sys(1)=qd1;
```

```

sys(2)=d_qd1;
sys(3)=dd_qd1;
sys(4)=qd2;
sys(5)=d_qd2;
sys(6)=dd_qd2;
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
sampleTime = 1; % Example, set the next hit to be one second later.
sys = t + sampleTime;
function sys=mdlTerminate(t,x,u)
sys = [];

```

ctrl3_4 控制函数:

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = ctrl3_4(t,x,u,flag)
switch flag,
case 0,
[sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
case 1,
sys=mdlDerivatives(t,x,u);
case 2,
sys=mdlUpdate(t,x,u);
case 3,
sys=mdlOutputs(t,x,u);
case 4,
sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
case 9,
sys=mdlTerminate(t,x,u);
otherwise
DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes
global node c b Fai
node=7;
c=0.1*[-1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5;
-1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5;
-1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5;
-1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5;
-1.5 -1 -0.5 0 0.5 1 1.5];
b=10;
Fai=10*eye(2);
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 14;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 4;
sizes.NumInputs = 10;

```

```

sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 0; % at least one sample time is needed
sys = simsizes(sizes);
x0 = 0.1*ones(1,14);
str = [];
ts = [];
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
global node c b Fai
qd1=u(1);
d_qd1=u(2);
dd_qd1=u(3);
qd2=u(4);
d_qd2=u(5);
dd_qd2=u(6);
q1=u(7);
d_q1=u(8);
q2=u(9);
d_q2=u(10);
e1=q1-qd1;
e2=q2-qd2;
de1=d_q1-d_qd1;
de2=d_q2-d_qd2;
e=[e1;e2];
de=[de1;de2];
s=de+Fai*e;
qd=[qd1;qd2];
dqd=[d_qd1;d_qd2];
ddqd=[dd_qd1;dd_qd2];
z1=[e(1);de(1);qd(1);dqd(1);ddqd(1)];
z2=[e(2);de(2);qd(2);dqd(2);ddqd(2)];
for j=1:1:node
h1(j)=exp(-norm(z1-c(:,j))^2/(2*b*b));
h2(j)=exp(-norm(z2-c(:,j))^2/(2*b*b));
end
for i=1:1:node
sys(i)=h1(i)*s(1);
sys(i+node)=h2(i)*s(2);
end
function sys=mdlUpdate(t,x,u)
sys = [];
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
global node c b Fai
qd1=u(1);

```

```

d_qd1=u(2);
dd_qd1=u(3);
qd2=u(4);
d_qd2=u(5);
dd_qd2=u(6);
q1=u(7);
d_q1=u(8);
q2=u(9);
d_q2=u(10);
e1=q1-qd1;
e2=q2-qd2;
de1=d_q1-d_qd1;
de2=d_q2-d_qd2;
e=[e1;e2];
de=[de1;de2];
s=de+Fai*e;
qd=[qd1;qd2];
dqd=[d_qd1;d_qd2];
ddqd=[dd_qd1;dd_qd2];
W_f1=[x(1:node)]';
W_f2=[x((node+1):(node*2))]';
z1=[e(1);de(1);qd(1);dqd(1);ddqd(1)];
z2=[e(2);de(2);qd(2);dqd(2);ddqd(2)];
for j=1:1:node
h1(j)=exp(-norm(z1-c(:,j))^2/(2*b*b));
h2(j)=exp(-norm(z2-c(:,j))^

```

plant3_3 无误差模型函数:

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = plant3_3(t,x,u,flag)
switch flag,
case 0,
[sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
case 1,
sys=mdlDerivatives(t,x,u);
case 2,
sys=mdlUpdate(t,x,u);
case 3,
sys=mdlOutputs(t,x,u);
case 4,
sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
case 9,
sys=mdlTerminate(t,x,u);
otherwise
DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));

```

```

end
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes
global p g
p=[2.9 0.76 0.87 3.04 0.87];
g=9.8;
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 4;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 4;
sizes.NumInputs = 4;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 0; % at least one sample time is needed
sys = simsizes(sizes);
x0 = [0 0 0 0];
str = [];
ts = [];
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
global p g
M0=[p(1)+p(2)+2*p(3)*cos(x(3)) p(2)+p(3)*cos(x(3));
p(2)+p(3)*cos(x(3)) p(2)];
V0=[-p(3)*x(4)*sin(x(3)) -p(3)*(x(2)+x(4))*sin(x(3));
p(3)*x(2)*sin(x(3)) 0];
G0=[p(4)*g*cos(x(1))+p(5)*g*cos(x(1)+x(3));
p(5)*g*cos(x(1)+x(3))];
dq=[x(2);x(4)];
F=0.2*sign(dq);
told=0;
tol=u(1:2);
dataM=0.3*M0;
dataV=0.3*V0;
dataG=0.3*G0;
M=M0+dataM;
V=V0+dataV;
G=G0+dataG;
S=inv(M)*(tol+told-V*dq-G-F);
sys(1)=x(2);
sys(2)=S(1);
sys(3)=x(4);
sys(4)=S(2);
function sys=mdlUpdate(t,x,u)
sys = [];
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
dq=[x(2);x(4)];

```

```

q1=x(1);
q2=x(3);
sys(1)=x(1);
sys(2)=x(2);
sys(3)=x(3);
sys(4)=x(4);
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
sampleTime = 1; % Example, set the next hit to be one second later.
sys = t + sampleTime;
function sys=mdlTerminate(t,x,u)
sys = [];

```

plant3_4 有误差模型函数:

```

function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance] = plant3_4(t,x,u,flag)
switch flag,
case 0,
[sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes;
case 1,
sys=mdlDerivatives(t,x,u);
case 2,
sys=mdlUpdate(t,x,u);
case 3,
sys=mdlOutputs(t,x,u);
case 4,
sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u);
case 9,
sys=mdlTerminate(t,x,u);
otherwise
DAStudio.error('Simulink:blocks:unhandledFlag', num2str(flag));
end
function [sys,x0,str,ts,simStateCompliance]=mdlInitializeSizes
global p g
p=[2.9 0.76 0.87 3.04 0.87];
g=9.8;
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 4;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 4;
sizes.NumInputs = 4;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 0; % at least one sample time is needed
sys = simsizes(sizes);
x0 = [0 0 0 0];
str = [];

```

```

ts = [];
simStateCompliance = 'UnknownSimState';
function sys=mdlDerivatives(t,x,u)
global p g
M0=[p(1)+p(2)+2*p(3)*cos(x(3)) p(2)+p(3)*cos(x(3));
p(2)+p(3)*cos(x(3)) p(2)];
V0=[-p(3)*x(4)*sin(x(3)) -p(3)*(x(2)+x(4))*sin(x(3));
p(3)*x(2)*sin(x(3)) 0];
G0=[p(4)*g*cos(x(1))+p(5)*g*cos(x(1)+x(3));
p(5)*g*cos(x(1)+x(3))];
dq=[x(2);x(4)];
F=0.2*sign(dq);
told=5*sin(t)+0.5*sin(20*pi*t);
tol=u(1:2);
dataM=0.3*M0;
dataV=0.3*V0;
dataG=0.3*G0;
M=M0+dataM;
V=V0+dataV;
G=G0+dataG;
S=inv(M)*(tol+told-V*dq-G-F);
sys(1)=x(2);
sys(2)=S(1);
sys(3)=x(4);
sys(4)=S(2);
function sys=mdlUpdate(t,x,u)
sys = [];
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
dq=[x(2);x(4)];
q1=x(1);
q2=x(3);
sys(1)=x(1);
sys(2)=x(2);
sys(3)=x(3);
sys(4)=x(4);
function sys=mdlGetTimeOfNextVarHit(t,x,u)
sampleTime = 1; % Example, set the next hit to be one second later.
sys = t + sampleTime;
function sys=mdlTerminate(t,x,u)
sys = [];

```

plot3_3 画图函数：

```

close all;
figure(1);

```

```

subplot(211);
plot(t,x1(:,1),'r',t,x1(:,2),'-b',t,x1(:,3),'-g');
xlabel('time');ylabel('连杆一的位置轨迹');
subplot(212);
plot(t,x2(:,1),'r',t,x2(:,2),'-b',t,x2(:,3),'-g');
xlabel('time');ylabel('连杆二的位置轨迹');
figure(2);
subplot(211);
plot(t,dx1(:,1),'r',t,dx1(:,2),'-b',t,dx1(:,3),'-g');
xlabel('time');ylabel('连杆一的速度轨迹');
subplot(212);
plot(t,dx2(:,1),'r',t,dx2(:,2),'-b',t,dx2(:,3),'-g');
xlabel('time');ylabel('连杆二的速度轨迹');
figure(3);
subplot(211);
plot(t,tol1(:,1),'r',t,tol1(:,2),'-b');
xlabel('time');ylabel('连杆一的输入力矩');
subplot(212);
plot(t,tol2(:,1),'r',t,tol2(:,2),'-b');
xlabel('time');ylabel('连杆二的输入力矩');
figure(4);
subplot(211);
plot(t,e1(:,1),'r',t,e1(:,2),'-b');
xlabel('time');ylabel('连杆一的位置误差');
subplot(212);
plot(t,e2(:,1),'r',t,e2(:,2),'-b');
xlabel('time');ylabel('连杆二的位置误差');

```