

分类号 TP242

密 级 公开

UDC 621

学校代码 10500

湖北工业大学

硕士学位论文

(全日制专业学位)

题 目：SCARA 机器人的结构设计与运动控制算法研究

英文题目：The structure design of SCARA robot and research
on motion control algorithm

学位申请人姓名：夏添

申请学位学科专业：机械工程

指导教师姓名：张铮 教授

二〇一六年六月

分类号 TP242

密 级 公开

UDC 621

学校代码 10500

湖北工业大学

硕士学位论文

题 目 SCARA 机器人的结构设计与运动控制算法研究

英文题目 The structure design of SCARA robot and research
on motion control algorithm

研究生姓名（签名）

指导教师姓名（签名） 职 称 教授

申请学位学科名称 机械工程 学科代码 085201

论文答辩日期 2016.5.23 学位授予日期 2016.6.30

学院负责人（签名）

评阅人姓名 石端伟 评阅人姓名 李刚炎

年 月 日

湖北工业大学

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖北工业大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

摘 要

针对工业自动化领域应用较为广泛的小型装配机器人，本文参照工业机器人标准设计了一款 SCARA 机器人，该机器人具有四个自由度可以在平面内完成装配作业，具有较好的实用性和商业性。

本课题调研了国内外工业机器人发展现状及趋势，阅读了大量参考文献，重点规划了 SCARA 机器人机械结构本体设计和结构优化设计，设计出一套完整的机器人结构。

首先，对 SCARA 机器人做了机械结构设计和重要零部件的选型计算；并利用 SolidWorks 软件对其机械手的大臂和小臂进行应力学仿真分析。

其次，对 SCARA 机器人 3 号关节和 4 号关节的耦合运动做了解耦分析；解析了 SCARA 机器人的运动学方程，并研究分析了在关节空间下和直角坐标下的轨迹规划，通过 Matlab 建立 SCARA 机器人模型验证了五次多项式插值和抛物线插值算法。

最后，介绍了常用的几种运动学控制方法，并对基于 SCARA 机器人模型的反演自适应控制算法进行了研究分析和 Matlab 仿真，取得了较好的控制效果，为该理论在实际应用中的发展起到了一定的推进作用。

关键词： SCARA 机器人的设计, 关节解耦，反演自适应

Abstract

Aiming at small-scaled assembled robot which applied widely in the field of industrial automation, this paper takes standard of industrial robot as reference to design a robot “SCARA”. It is equipped with four degrees of freedom which can accomplish assembling in the plane, and has great practicability and commercial value.

This paper researches the state and trend of development for the industrial robot at home and abroad. Having read a large number of relevant reference documentations and planning “SCARA” robot from Mechanical Structure Ontology design to Control System design, it proposes a set of well completed solution to robot.

Firstly, it has done Mechanical Structure Design and important components’ Selection Calculation for “SCARA” robot. And it uses SolidWorks software to make Stress Mechanics emulation analysis on big arm and small arm of mechanics.

Secondly , Analysis of SCARA robot joint with 3rd and 4rd joint coupling motion and “SCARA” robot’s Kinematics Equation; What’s more, it has done analysis and research on trajectory planning in the space of joints and Cartesian coordinate system. Building model of “SCARA” robot via Matlab proves the calculation of Five Degree Polynomial Interpolation and Parabolic Curve Interpolation.

Finally, after describes several common kinematic control method , it studies and makes Matlab emulation on “SCARA” robot model’s Inversion Adaptive Control Algorithm. It acquires great control effect, which plays certain progressive role in the practical application of this theory.

Key words: Design of “SCARA” robot, Decoupling of joints, Inversion Adaptive Control Algorithm

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
目 录	III
第 1 章 引 言	1
1.1 课题研究背景与意义	1
1.2 国内外工业机器人研究现状与发展趋势	2
1.3 研究内容及意义	4
1.4 本章小结	5
第 2 章 SCARA 机器人的机械结构设计	6
2.1 SCARA 机械手设计总体规划	6
2.1.1 SCARA 机械手基本参数设计	6
2.1.2 机械手传动方案比较	7
2.2 SCARA 机械手关键零部件的设计与计算	8
2.2.1 电机及滚珠丝杆花键的计算与选型	8
2.2.2 旋转轴驱动电机的计算和选择	9
2.2.3 滚珠丝杆花键的计算和选择	11
2.2.4 滚珠丝杆花键驱动电机的选择与计算	15
2.3 同步齿形带的设计和选型	17
2.3.1 关节 3 的同步带选择	17
2.3.2 关节 4 的同步带选择	20
2.4 SCARA 机器人大小臂结构受力分析	21
2.4.1 大臂的受力分析	21
2.4.2 小臂的受力分析	23
2.5 本章小结	24
第 3 章 SCARA 机器人的关节解耦及轨迹规划	25
3.1 SCARA 机器人 3 号关节和 4 号关节的运动解耦分析	25
3.2 轨迹规划	27

3.2.1 直角空间运动规划	28
3.2.2 关节空间运动规划	30
3.2.3 基于 Mat lab 的 SCARA 机器人轨迹仿真	32
3.3 本章小结	34
第 4 章 SCARA 机器人的运动控制算法研究	36
4.1 工业机器人常用控制方法和策略	36
4.2 基于 SCARA 机器人的反演自适应模糊控制研究	38
4.3 SCARA 机器人状态的动力学模型	39
4.3.1 SCARA 机器人状态的动力学模型分析	39
4.4 SCARA 机器人反演自适应模糊控制器设计及稳定性分析	40
4.4.1 SCARA 机器人控制器的设计	40
4.4.2 SCARA 机器人反演滑模控制设计	40
4.4.3 SCARA 机器人的自适应模糊控制设计	41
4.5 稳性分析	42
4.6 SCARA 机械手的仿真	44
4.7 本章小结	49
第 5 章 总结与展望	50
5.1 总结	50
5.2 展望	50
参考文献	51
致 谢	54

第1章 引言

1.1 课题研究背景与意义

工业机器人是一种集多学科先进技术于一身的高性能自动化、多功能操作机。它依靠自身的控制系统和驱动力完成自动执行工作，它既可以按照规定的动作进行工作，也可以接受人类的指挥，现代的工业机器人新增了人工智能和自治特性，拥有视觉、触觉等智能，还可以实现自主判断、逻辑思维、自主工作等功能^[1-3]。

工业机器人是人类首个开发使用程序控制的自动化重要装备。一般来说，人们会根据需要预先编制好工作程序，工业机器人只需要按照指令，沿着事先规定的路线运送零件和半成品，或者是把零件和半成品从一个指定的空间运送到另一个指定的空间即可。由于工业机器人能卓有成效地用于机床、熔炉、冲床、生产线、焊机、装配、加工(热加工、机械加工)等方面，因此具有良好的经济效益，在工业领域，前景十分广阔^[4-5]。

装配机器人(Assembly robot),是一种为装配作业而设计的工业机器人，装配机器人按照用途分为多种不同类型如图 1.1 所示。

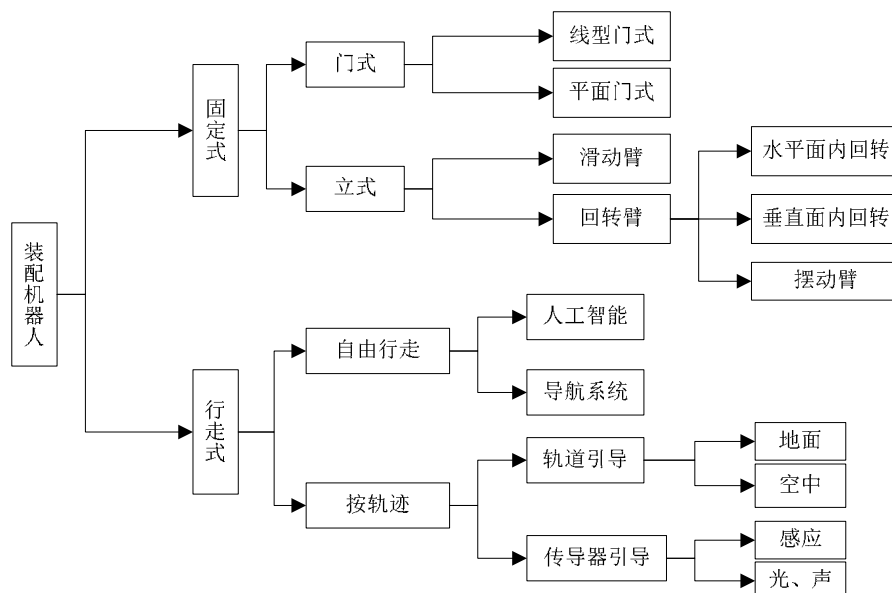


图 1.1 按照用途划分装配机器人的种类

装配机器人由控制器、末端执行机构、操作机和传感系统组成。其控制器为了实现运动控制和编程一般采用多处理器协同工作，提高运算处理能力；末端执行

机构可以设计成各种手腕和手爪以适应不同装配对象的作业要求；操作机的结构种类较多，主要分为直角、水平、圆柱和多关节等类型；传感系统主要用来获取装配机器人与作业环境和装配对象之间相互作用的信息^[6-7]。

应用较为广泛的装配机器人有两种，一种是出现在 1978 年的可编程通用装配操作手即 PUMA(Programmable Universal Manipulator for Assembly)机器人；另一种是平面双关节型机器人即 SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm)机器人。区别于普通机器人，装配机器人主要用于各种电器的制造，所以要求具备高精度、工作范围小、柔顺性好，可以兼容其他系统使用等特点^[8]。

SCARA 机器人回转臂类似于人臂，在手部水平方向施加一个力后，大臂会稍微旋转，顺从的移位，这种位移对弹性变形的力量有吸收作用使得其在水平移动时有较大的柔顺性。SCARA 机器人的这种特性，最适合使用于装配作业，不仅可以防止歪扭倾斜，又可以修正装配时的偏心，结合点承担了装配的主要作用力，稳定性好。也就是说，即使机器人定位不够准确也能保证装配的可靠性^[9-10]，SCARA 机器人是目前应用较多的工业机器人类型之一。

1.2 国内外工业机器人研究现状与发展趋势

1948 年诺伯特·维纳在其著作《控制论》里首次提出自动化工厂的概念^[11]，阐述了机器人和控制体系互相结合的发展规律，为机器人的控制理论奠定了基础。

20 世纪 50 年代初期，位于美国伊利诺州的阿贡实验室研发了第一代遥控式机械手来操作放射性材料，避免了科学家受到辐射的侵害。同时代的乔治·德沃设计研发了一台可以通过程序控制的工业机器人样机，并提出技术方案，随后申请了专利。两年之后随着串联机构在工业领域的广泛使用，其系统误差的长期累积和空间定位精度低等因素促使人们第一次提出了示教再现的编程模式，并运用数控技术和机械臂的结合制造出了第一台工业机器人，它的出现和新的编程理念使得重复定位精度远超绝对定位精度，其意义影响深远。1962 年，美国万能自动化公司研制了一台名为 Unimate 的机器人，它采用极坐标式结构，动作灵活、伸缩自如。而早在 4 年前，恩格尔伯格和乔治·德沃尔创立了第 1 家机器人公司 Unimation，恩格尔伯格因而被称为机器人之父^[12-14]。

1968 年，日本川崎公司开始学习美国公司先进的机器人制造技术，结合本国机器人产业发展的前景开发出了一系列成本低廉，实用性较好的机器人，为日本的工业和制造业领域发展提供了极大的动力和推动作用，促使日本的工业制成品以物美价廉而畅销全球市场。

从 1970 年开始,机器人应用开始在各工业领域掀起一波又一波浪潮。1973 年,ASEA 公司(现在的 ABB)推出了世界上第一个微型计算机控制、全部电气化的工业机器人 IRB — 6,为了满足弧焊的要求,它可以进行连续的路径移动。1978 年,日本教授牧野洋设计出了具有 4 个自由度的可选择柔顺装配机械手(SCARA)^[15]。

1979 年 Unimafion 公司推出了一系列带有触觉、力觉和视觉的 PUMA 工业机器人,它的出现把机器人技术带入了智能化的时代,使得机器人技术的发展和时代要求紧密的结合在一起。

20 世纪 80 年代,随着汽车制造业的崛起,工业机器人开始以 20%~40%的速率高速发展,机器人技术开始在汽车工业生产中推广普及,这使得整个机器人技术在现代工业生产领域变得越来越重要。1984 年机器人在全球各国的数量从最开始的不足 10 万台,稳步上升到 1990 年接近 30 万台,其中带有嗅觉、视觉、触觉的高性能机器人成为了新研发机器人中的主要对象,并且促进了机器视觉技术和传感器检测技术的稳步成长。1985 年美国的两家公司率先开始在工业机器人领域使用交流伺服技术,使得自动化控制装备性能进一步提升。随着装配机器人在机器人领域所占比重越来越大,提高机器人的质量和效率问题成为了各国机器人研究领域关注的重点。20 世纪末,柔性装配线研发成功,以日本为代表的各国开始广泛发展机器人产业,就此装配机器人开始进入蓬勃发展的阶段^[16-18]。

21 世纪以来,机器人在各国开始大范围的投入使用,各国政府都加大了对机器人产业的投资力度。美国政府从 2011 年开始先后投入 7000 万美元发展本国的机器人技术和先进制造技术,并制定了“先进制造业国家战略计划”,力图使美国的制造业重新占领市场高点。韩国在 2014 年提出到 2018 年完成机器人产业的投资翻两倍,机器人公司的数量增加一倍的目标。欧盟则联合其下属的 180 个公司和科研机构一起推出家用机器人研究计划“SPARC”。同年,英国政府也提出机器人战略 RAS2020,目标是在 2025 年使整个英国机器人产值在 1200 亿美元左右。

我国的工业机器人研究始于 1960 年,先后发展了 50 多年,经历了从模仿到自主创新的各个阶段。1972 年,我国立足于开发自己的第一代工业机器人,进入 80 年代后,机器人研究与开发和国家政策有机结合。86 年国家高新技术研究发展计划正式提出,我国在机器人领域取得一系列重大科研成果,并结合国内产业链的实际情况陆续研制出一批工业机器人;如今以新松为代表的一批国内企业开始推出自己品牌的机器人并逐步在市场推广。时至今日,我国在机器人技术某些领域已接近国际前沿水平,但是在很多方面也面临着不少问题。国产机器人产品较为低端、主要以三轴和四轴机器人为主,主要用于搬运和码垛作业等。而高端制造业的机器人则长期受到国外的品牌的占据。由于机器人的关键制造技术和控制

技术等核心问题没有解决使得我国的机器人发展受到制约，加之国内的生产机器人规模较小，使得国产机器人的生存空间受到了挤压。2015 年 3 月国务院正式印发《中国制造 2025》推动中国制造业特别是高端制造业的发展，其中智能装备和机器人技术作为今后重点支持的方向，这为提升国产机器人的质量和服务做好了铺垫^[19-21]。

1.3 研究内容及意义

本课题研究的 SCARA 机器人是平面关节型机器人中应用最为广泛的一种机器人，其应用价值和机器人技术对我国工业化大背景具有非常重要的意义。本文立足于独立设计一款 SCARA 机器人本体，使产品可以在工业领域有较大的市场价值。主要对 SCARA 机器人的机械结构进行设计和优化，并对设计结构中的大臂和小臂进行应力学仿真，以检验其机械结构的合理性和力学可靠性。此外对 SCARA 机器人运动学进行分析，研究其机械结构在运动时的各关节变量之间的数学关系；分析 SCARA 机器人在关节空间中的轨迹规划问题，并用 Matlab 验证 5 次多项式插补和抛物线过渡插补。接着对 SCARA 机器人优化设计中的 3 号关节和 4 号关节进行了解耦分析，把丝杆的合成运动分解到两个电机的运动中；最后研究了 SCARA 机器人的运动控制算法并设计反演自适应模糊控制器，建立 SCARA 机器人动力学模型，通过 Matlab 验证其算法在轨迹跟踪控制方面的可靠性。

本文的主要章节安排如下：

第一章：阐述该课题的背景及意义，综述国内外 SCARA 机器人研究发展现状及基本概况，引述本课题主要研究内容及意义，整体介绍本文具体的章节安排。

第二章：对 SCARA 机器人进行机械结构设计，确定技术标准要求，比较不同的传动方案，确定最终方案；接着对设计中重要零部件进行计算和选型；最后对机械结构中的主要承重臂(大臂和小臂)进行应力学仿真，分析其结构的稳定性和力学的可靠性。

第三章：对 SCARA 机器人 3 号关节和 4 号关节的耦合运动做了解耦分析；此外研究了 SCARA 机器人在关节空间下的轨迹规划，并在 Matlab 上仿真以验证 5 次多项式插补和抛物线轨迹插补曲线的平滑特性。

第四章：论述了几种常用的机器人运动控制算法，并对 SCARA 机器人反演自适应模糊控制进行研究，概述轨迹跟踪控制的意义及反演设计的方法，依据 SCARA 机器人的动力学模型，进行反演自适应模糊控制器设计并分析其稳定性，最后利用 Matlab 对 SCARA 机械手进行仿真验证，验证其控制系统对不确定性因素和外界

干扰下具有良好的跟踪效果。

第五章：总结了本课题所取得的主要研究成果，并概述了本文的主要研究内容和结果，进一步提出了今后要解决的问题和工作。

1.4 本章小结

本章介绍了工业机器人的研究背景和发展现状，并重点阐述了 SCARA 机器人在国内外工业上的应用和作用，叙述了本课题研究的主要内容及意义，并归纳了本文的主要章节安排及内容。

第2章 SCARA 机器人的机械结构设计

2.1 SCARA 机械手设计总体规划

1978 年日本山梨大学牧野洋教授发明了一种平面四关节机器人即 SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm, 选择性顺应装配机器手臂), 该机器人拥有三个旋转自由度和一个垂直方向的自由度如图 2.1 所示, 可以在平面内快速定位完成指定的装配作业^[22]。

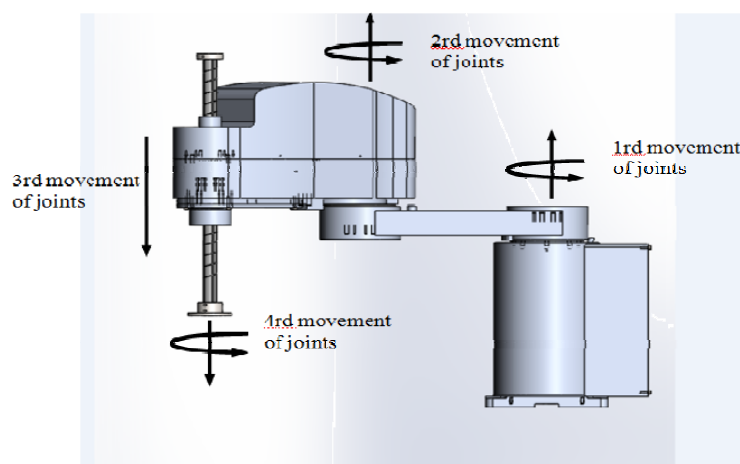


图 2.1 SCARA 机器人示意图

SCARA 的主要职能是搬取零件和装配工件, 特别适合装配印刷电路板和电子零部件、搬动和取放集成电路板等工作, 被广泛应用于塑料工业、汽车工业、电子产品工业、药品工业和食品工业等领域^[23]。

SCARA 机器人大多采用四自由度结构, 这是由于装配操作对姿态的要求只需要绕 Z 轴转动, 故一般是由四个关节组成, 另一个具有线性移动的特性。

2.1.1 SCARA 机械手基本参数设计

结合本课题研究的对象, 初步拟定 SCARA 机器人技术参数如表 2.1 所示。

表 2.1 SCARA 机器人技术参数

项目	参数
额定/最大负载 (KG) :	5/10
轴数:	4

J1 和 J2 重复定位精度	$\pm 0.05\text{mm}$
J3 重复定位精度	$\pm 0.01\text{mm}$
J4 重复定位精度	$\pm 0.005\text{mm}$
一轴工作范围：	$\pm 152^\circ$
二轴工作范围：	$\pm 147.5^\circ$
三轴工作范围：	180mm
四轴工作范围：	$\pm 360^\circ$
一轴最大速度：	7170mm/sec (J1+J2)
三轴最大速度：	1100mm/sec
四轴最大速度：	6500 deg/sec
一轴额定功率	400 Watts (多摩川电机)
二轴额定功率：	400 Watts (多摩川电机)
三轴额定功率：	200 Watts (多摩川电机)
四轴额定功率：	200 Watts (多摩川电机)
安装方式	桌面安装
本体重量 (KG)：	约 20
适用行业：	汽车、硬盘驱动、医疗、实验室自动化、消费产品、电信、药店、太阳能、半导体、电子
周围湿度：	10 - 80% (非冷凝)
周围温度：	5- 40 deg C

2.1.2 机械手传动方案比较

参考《国内典型工业机器人图册》，比较目前同类型 SCARA 机器人的本体设计，初步选用下述方案：

采用减速电机给机器人关节提供驱动力，以便使其精度，传动比和工作效率达到较高的标准，此外尽量采用标准件，便于安装和采购。

各关节采用减速电机和同步带传动，精度高，传动比大，结构紧凑。

移动选择同步带传动，传动精度高，结构紧凑，传动比恒定，传动功率大，效率高，但负载有限且安装要求高。

对于整体设计而言，由于机器人小臂末端线速度和转动惯量较大，运动中会

产生较大的冲击和振动，同时，三四关节要完成绕 Z 轴的回转运动和沿 Z 轴方向的直线运动，所以应该尽量减轻自重，使其结构紧凑，传动高效，达到缓冲减震又兼顾耦合运动的效果，所以三四关节是 SCARA 机器人的设计重点，最后确定同步齿型带和滚珠丝杆花键配合使用，以实现第三移动轴（Z 轴）的垂直运动和旋转运动。

各关节的传动方案最终确定如下：

- 1 轴（大臂回转）：伺服电机 1 谐波减速器 大臂。
- 2 轴（小臂回转）：伺服电机 2 同步齿形带 谐波减速器 小臂。
- 3 轴/4 轴（直线+旋转）：伺服电机 3/4 同步齿形带 滚珠丝杆花键 主轴。

2.2 SCARA 机械手关键零部件的设计与计算

2.2.1 电机及滚珠丝杆花键的计算与选型

目前机器人常用的驱动装置主要有四种：步进电机、直流伺服电机、交流伺服电机和液压伺服马达。其性能特点和应用场合参考表 2.2。

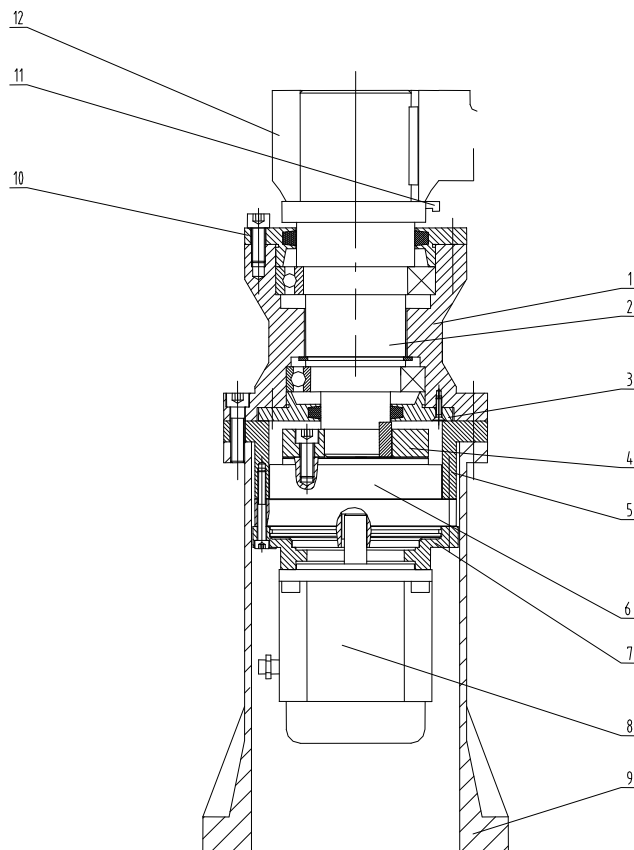
表 2.2 初选电机的性能对比

电机名称	性能特点	应用场合
步进电机	结构简易，价格便宜；可以实现自锁功能，转矩恒定，没有误差积累，定位特性良好，在控制领域运用较为广泛	小型机器人和低功率的关节机器人
直流伺服电机	调速稳定，启动转矩大，相对功率大，快速响应，结构复杂，价格较为昂贵，需要微型计算机与转换电路结合产生数字驱动信号，电刷放电对实际工作有影响	各类数字控制系统中的对驱动装置的转速有较高的控制要求和精度的装备
交流伺服电机	结构简单，运行可靠，维修方便，价格较贵，调速性能较好，响应速度快，编码器兼容绝对式和增量式两种，精度很高，可以输出较大的启动功率。	各类数字和运动控制系统
液压伺服马达	可以承受较大的负载，运动比较平稳，没有滑动的现象产生，可以提供较大的功率，定位精度不逊于同类电机。但费用较高，常出现漏油。	大功率机械装备

参考本课题技术要求和设计用途主要是装配作业，负载较小，要求整机重量轻、体积小且作业范围不大的特点，SCARA 机器人关节驱动全部选用交流伺服电机。

2.2.2 旋转轴驱动电机的计算和选择

根据 SCARA 机器人技术参数表 2.1 的设计要求和规范，粗略限定各个部分的质量为：机座 20Kg，大臂质量 m_1 15Kg，小臂质量 m_2 10Kg，手腕质量 m_3 3Kg。SCARA 机器人 1 号轴的设计方案如图 2.2 所示。



- 1—支座；2—连接轴；3—轴承端盖；4—减速器输出连接法兰；
5—减速器支座；6—RV 减速器；7—电机法兰；8—1 轴伺服电机；
9—底座；10—轴承端盖；11—位置检测器；12—大臂

图 2.2 SCARA 机器人 1 轴设计图

(1) 大臂驱动电机及减速器的选择计算

根据图 2.2，假设机器人大小臂及手爪相对于各自重心的转动惯量分别是 J_{G1} 、 J_{G2} 、 J_{G3} ，由平行轴定理求得第一关节的转动惯量为：

$$J_1 = J_{G1} + m_1 l_1^2 + J_{G2} + m_2 l_2^2 + J_{G3} + m_3 l_3^2 \quad (2-1)$$

式中： m_1 、 m_2 、 m_3 ：——大臂、小臂、手腕的估计质量；

l_1 、 l_2 、 l_3 ：——分别为大小臂及手爪到关节 1 的距离，其值依次是 125mm、425mm、625mm。由于 $J_{G1} \ll m_1 l_1^2$ 、 $J_{G2} \ll m_2 l_2^2$ 、 $J_{G3} \ll m_3 l_3^2$ ，故 J_{G1} 、 J_{G2} 、 J_{G3} 在这里忽略不计，从而轴的等效转动惯量为：

$$J_1 = m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 \quad (2-2)$$

由上式计算得到 J_1 轴的等效转动惯量是 $3.21\text{Kg}\cdot\text{m}^2$ ，机器人大臂从 $\omega_0 = 0$ 到 $\omega_1 = 540^\circ / \text{s}$ ，所需时间 $\Delta t = 1\text{s}$ ，则启动转矩为

$$T_1 = J_1 \times \dot{\omega}_1 = J_1 \frac{\omega_1 - \omega_0}{\Delta t} \quad (2-3)$$

上式计算可得 $T_1 = 30.3\text{N}\cdot\text{m}$ ，考虑摩擦力矩 J_{G1} 、 J_{G2} 、 J_{G3} ，假定 $T_1 = 35\text{N}\cdot\text{m}$ ，取安全系数为 1.5，那么谐波减速器的最小输出转矩为 $T_{\min 1} = 1.5T_1 = 52.5\text{N}\cdot\text{m}$ 。（假定谐波减速器传动效率为 0.9）据此选择日本 HarmonicDrive 谐波减速器 CSF-25-80-2UH 型号，减速比为 80，满足要求，其性能参数见表 2.3。

表 2.3 CSF-25 型号性能参数

减速比	额定转矩 $\text{N}\cdot\text{m}$	瞬间最大转矩 $\text{N}\cdot\text{m}$	峰值转矩 $\text{N}\cdot\text{m}$
80	63	255	137

伺服电机需要输出的力矩为

$$T_{out} = \frac{T_{\min 1}}{i \eta} \quad (2-4)$$

由上式可得 $T_{out} = 0.73\text{N}\cdot\text{m}$ 根据计算参数选择日本多摩川电机，型号为 TS4609N7185，额定转速为 3000r/min，额定功率为 400w，额定转矩为 $1.27\text{N}\cdot\text{m}$ 。

(2) 小臂驱动电机及减速器的计算和选择

与大臂的计算类似，忽略 J_{G2} 和 J_{G3} ，所以绕第二关节轴的等效转动惯量为

$$J_2 = m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 \quad (2-5)$$

由上式计算得到 J_2 轴的等效转动惯量为 $2.98\text{Kg}\cdot\text{m}^2$ ，机器人小臂从 $\omega_0 = 0$ 到 $\omega_1 = 540^\circ / \text{s}$ 所需时间为 $\Delta t = 1\text{s}$ ，则启动转矩为

$$T_2 = J_2 \times \dot{\omega}_2 = J_2 \frac{\omega_1 - \omega_0}{\Delta t} \quad (2-6)$$

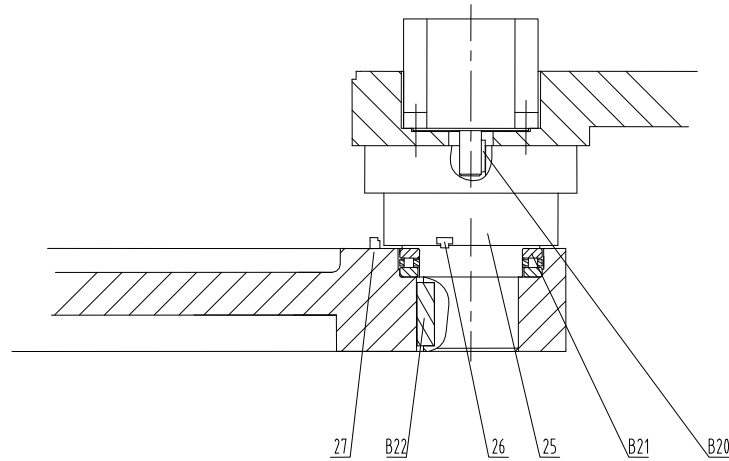
考虑运动中摩擦力矩及 J_{G2} 、 J_{G3} 的影响，取 $T_2 = 8.94\text{N}\cdot\text{m}$ ，安全系数为 1.5，则谐波减速器的最小输出转矩 $T_{\min} = 1.5T_1 = 13.41\text{N}\cdot\text{m}$ 。据此选择日本 HarmonicDrive 谐波减速器 CSF-17-50-2UH 型号，减速比为 50，满足要求，其性能参数见表 2.4。

表 2.4 CSF-17 型号性能参数

减速比	额定转矩 $\text{N}\cdot\text{m}$	瞬间最大转矩 $\text{N}\cdot\text{m}$	峰值转矩 $\text{N}\cdot\text{m}$
50	16	70	34

同样由式子(2-4)计算得出 $T_{out} = 0.29\text{N}\cdot\text{m}$ ，据此选择日本多摩川电机，型号为 TS4609N7185，额定转速为 3000r/min，额定功率为 400w，额定转矩为 $1.27\text{N}\cdot\text{m}$ 。

综上所述，为了减少机器人的整体尺寸，2 轴采用伺服电机、摆针减速器、推力圆柱滚子轴承驱动方式，依据选型电机和尺寸配合关系，SCARA 机器人的 2 轴设计如图 2.3 所示。



25—摆线针轮减速器；26—传感器；27—位置检测器；
B20—键 5×20 ；B21—轴承 81113；B22—键 18×40

图 2.3 SCARA 机器人 2 轴设计图

2.2.3 滚珠丝杆花键的计算和选择

相比于传统的结构设计，新一代的 SCARA 机器人使用了滚珠丝杆花键由丝杆螺母、花键螺母、丝杆三部分组成。参考图 2.4 和图 2.5 可以直观看出，由于丝杆中的钢球在螺母与丝杆之间来回滑动，保证了其传动的高效性，与过去的滑动丝杆相比，其驱动扭矩仅占传统丝杆的三分之一。

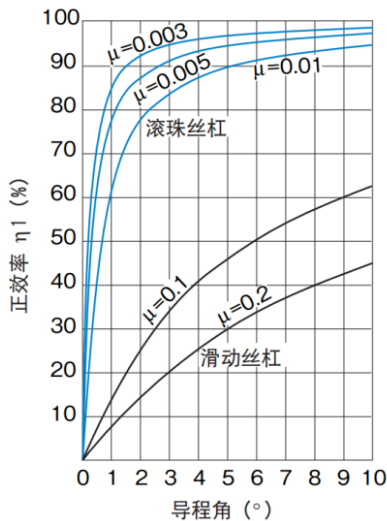


图 2.4 正效率(旋转 直线)

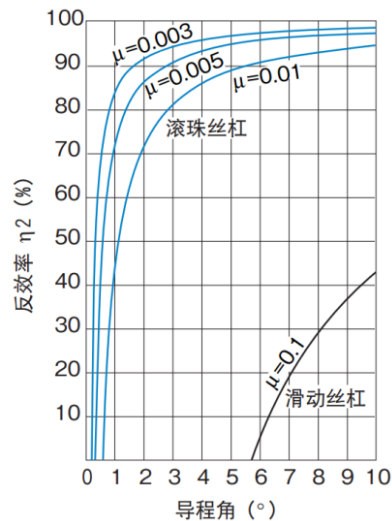
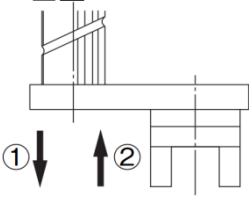
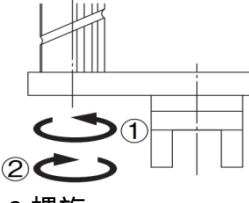
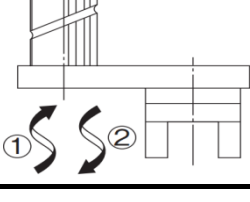


图 2.5 反效率(直线 旋转)

丝杆螺母和花键螺母分别位于滚珠丝杆的两端，其均通过同步齿形带与电机轴相连。由于滚珠丝杆花键为一体式结构，其绕 Z 轴的旋转运动和沿 Z 轴的往复直线运动需要独立分析，所以对该运动进行解耦分析会给 3、4 关节的运动控制提供必要的理论依据，其三种工作状态见表 2.5 所示。

表 2.5 滚珠丝杆滚珠花键单元三种工作状态

运动	动作方向	滚珠丝杆侧皮带轮	滚珠花键侧皮带轮	轴垂直方向 (速度)	轴旋转方向 (转速)
1.垂直 	垂直方向 往下	N_1	0	$V = N_1 g$	0
	旋转方向 0	(正转)		$(N_1 \neq 0)$	
	垂直方向 往上	$-N_1$	0	$V = -N_1 g$	0
	旋转方向 0	(反转)		$(N_1 \neq 0)$	
2.旋转 	垂直方向 0	N_1	N_2	0	N_2 (正转)
	旋转方向 正转		(正转)		$N_1 = N_2 \neq 0$
	垂直方向 0	$-N_1$	$-N_2$	0	$-N_2$ (反转)
	旋转方向 反转		(反转)		$-N_1 = -N_2 \neq 0$
3.螺旋 	垂直方向 往上	0	N_2	$V = N_1 g$	N_2
	旋转方向 正转		$(N_2 \neq 0)$		(正转)
	垂直方向 往下	0	N_2	$V = -N_1 g$	$-N_2$
	旋转方向 反转		$(-N_2 \neq 0)$		(反转)

由上表可知，当 $N_1 = 0$ 时，呈有固定导程的螺旋运动；当 $N_2 = 0$ 时，呈直线运动；当 $N_1 = N_2$ 时，呈旋转运动。

(1) 计算滚珠丝杆花键的负载

由于 3 轴是竖直安装，滚珠丝杆的负载力主要包括手腕和负载本身的重力和加速运动时产生的惯性力。如前所述，设手腕的质量为 $m_3 = 3kg$ ，负载重量为 $m_p = 10kg$ ，第 3 轴的运动直线加速度最大为 $a = 1g = 10m/s^2$ （加速到 $40mm/s$ 所用时间为 $4ms$ ），则机器人手腕加速度时产生的惯性力为

$$F_a = M ga = (m_3 + m_p)ga \quad (2-7)$$

手腕的重力为

$$G = M gg = (m_3 + m_p)gg \quad (2-8)$$

联立式子(2-7)和(2-8)可得丝杆轴所受的最大负载力为

$$F_m = K g(F_a + G) \quad (2-9)$$

参考式子(2-9)计算得出 $F_m = 280.3N$, 其中 K 为参考系数, 其与导轨类型有关, 见表 2.6, 这里取 1.1。

表 2.6 参考系数

导轨类型	参考系数
矩形导轨	1.1
燕尾导轨	1.4
三角形或综合导轨	1.15

(2) 计算滚珠丝杆花键的转速

设计要求 3 轴的直线运动速度 $V = 1100mm/s$, 假设丝杆导程 $P = 25mm$, 则丝杆的转速由

$$V = \frac{n}{60} P \quad (2-10)$$

得 $n = 2640r/min$ 。

(3) 螺母的选择

根据滚珠丝杆中钢球循环方式的不同, 丝杆螺母分为: 弯管式、循环器式、端盖式和弯管式, 这里选择弯管式, 它通过弯管让钢球进行循环, 钢球经过丝杆轴的沟槽滑入弯管, 接着滚进沟槽中, 循环往复^[24]。

(4) 计算滚珠丝杆花键的最大动载荷

根据负载力的大小, 可由下列式子计算出滚珠丝杆的最大动载荷:

$$F_Q = \sqrt[3]{L_0 f_w f_H F_m} \quad (2-11)$$

式中: L_0 为滚珠丝杆的寿命, 且 $L_0 = \frac{60n}{10^6} T$, 其中, T 为使用寿命, 普通机械取 $5000 \sim 10000h$, 这里取 $T = 1500h$; n 为丝杆的转速 (r/min) , 根据前述计算结果, 取 $n = 2640r/min$;

f_w ——载荷系数。参考表(2.7), 这里取 $f_w = 1$ 。

f_H ——硬度系数。当丝杆硬度 58HRC 时, 取 $f_H = 1.0$;当丝杆的硬度 55HRC 时, 取 $f_H = 1.11$;当丝杆的硬度 50HRC 时, 取 $f_H = 1.56$;当丝杆的硬度 45HRC 时, 取 $f_H = 2.4$;

F_m ——滚珠丝杆的最大工作载荷(N), 根据上述计算, $F_m = 195N$ 。

表 2.7 载荷系数

运转状态	f_w
平稳或轻度冲击	1.0 ~ 1.2
中等冲击	1.2 ~ 1.5
较大冲击或振动	1.5 ~ 2.5

代入以上数据, 可得滚珠丝杆的最大动载荷为 $2.6kN$ 。根据以上参数选择日本

THK 公司制造的 BNS2525 型号滚珠丝杆花键。丝杆总长度为 600mm，具体参数指标如表 2.8 所示。

表 2.8 BNS2525 性能参数(mm)

滚珠丝杆型号	轴外径 d	轴内径 db	导程 P_h	基本额定负荷 C_a / C_0a		滚珠丝杆尺寸				
						钢球直径 dp	沟槽谷径 dc	外径 D	法兰直径 D_1	全长 L_1
BNS 2525	25	18	25	9.1	19.3	26	22	$72_{-0.007}^0$	92	65
滚珠花键型号	C kN	C_a kN	静态容许力矩 M_A Ngn	C_r Ngn	C_{or} Ngn	外径 D_7	法兰直径 D_5	全长 L_2		
BNS2525	15.2	25.8	210	105	103	$62_{-0.007}^0$	78	71		

(5) 刚度的验算

由于滚珠丝杆的轴向直径较小，如果受到的轴向力超过其负荷最大值有可能会失稳。失稳时的临界载荷 F_k 应满足：

$$F_k = \frac{f_k \pi^2 EI}{Ka^2} \geq F_m \quad (2-12)$$

式中： f_k ——临界载荷(N)；

E ——钢丝材料的弹性模量，材料为钢， $E=2.1 \times 10^5 MPa$ ；

I ——按丝杆轴外径 d 确定的截面惯性矩， $I = \pi d^4 / 64$ ；

f_k ——丝杆支撑系数，其参考数值见表(2.9)；

K ——压杆稳定安全系数，取值在 2.5~4.0 之间；

a ——滚珠丝杆两端支撑件的距离，单位为 mm 。

表 2.9 丝杆支撑系数

安装方式	双推-自由	双推-简支	双推-双推	双推-单推
f_k	0.25	2	4	1

由此，依照下列式子(2-12)可以计算丝杆失稳时的临界载荷为

$$F_k = \frac{f_k \pi^2 EI}{Ka^2} \quad (2-13)$$

其中， $F_k = 24KN$ ？ $F_m = 195N$ ，综上所述，初选 THK 公司的 BNS2525 满足设计要求。

(6) 计算传动效率

滚珠丝杆的传动效率一般在 0.8~0.9，可由式子(2-14)计算得出：

$$\eta = \frac{\tan \lambda}{\tan(\lambda + \varphi)} \quad (2-14)$$

式中： λ 为丝杆的螺旋升角，可由式子(2-15)算出

$$\lambda = \arctan \frac{P_h}{\pi d_0} \quad (2-15)$$

φ 为摩擦角，一般取 $10'$ 。由此可以计算出滚珠丝杆花键的传动效率为 0.99。

2.2.4 滚珠丝杆花键驱动电机的选择与计算

由于负载力不大，因此 3 轴和 4 轴不采用减速器，由电机通过同步带直接驱动丝杆进行直线运动。3、4 关节的机械结构设计如图 2.5 所示。

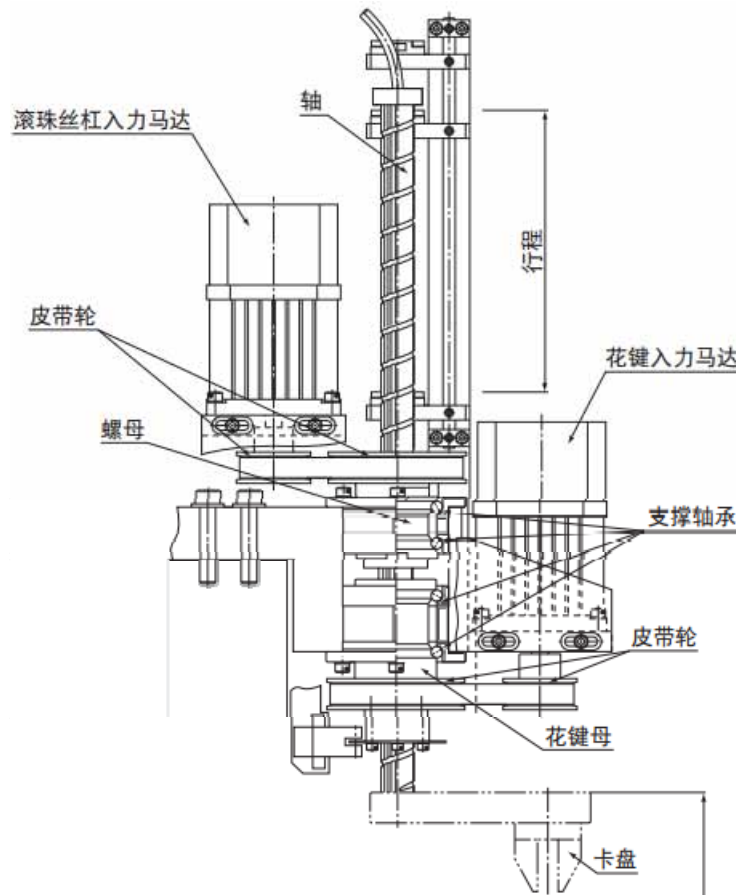


图 2.5 SCARA 机器人 3/4 关节的机械结构设计

根据技术指标要求，J3 关节垂直移动速度最高 1100mm/s，J4 关节转动速度最高 $6500^\circ/\text{s}=18.06\text{r/s}$ 。J3、J4 关节电机额定转速为 3000r/min。由上所述丝杠型号选用 THK BNS2525，导程为 25mm，则 1100mm 的移动速度需满足 44r/s 的转速。因此，J3 关节传动比为 1.13，J4 关节传动比为 2.77。由耦合运动式子(3-19)可得电机 3 转速 $N_3=110\text{r/min}$ ，电机 4 转速 $N_4=250\text{r/min}$ ，均小于其额定转速 3000r/min。

根据功率相等的原则，有式子(2-16)如下：

$$F_m V = T \omega \eta \quad (2-16)$$

式中： F ——轴向力；

T ——电机力矩；
 V ——直线运动速度；
 ω ——电机转速；
 η ——丝杆的传动效率；

又由式子

$$V = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2-17)$$

最终推导如下式(2-18)

$$T = \frac{F_m P}{2\pi\eta} \quad (2-18)$$

考虑同步带传动效率，安全系数为 2，则电机最小转矩 $T_{out} = 2T = 0.125Ng_n$ ，据此关节 3 和关节 4 电机选择日本多摩川公司生产的 TS4607N7185E200 型号电机，额定功率 3 轴为 200w，4 轴为 200w。

最终 J1、J2、J3、J4 关节电机参数如表 2.10 所示。

表 2.10 所选电机性能参数表

性能参数/安装尺寸	J1、J2 关节电机	J3、J4 关节电机
伺服电机型号	TS4607N7185	TS4609N7185
伺服驱动器型号	QX05NH/QX05NP	
法兰规格(mm)	60	60
额定功率(kw)	0.4	0.2
额定转矩(Nm)	1.27	0.64
额定线电流(A)	3.3	1.7
额定转速(r/min)	3000	3000
额定线电压(V)	200	200
刹车	带刹车	带刹车
油封	带油封	带油封
转子惯量 ($\text{kgm}^2 \times 10^{-4}$)	0.44	0.28
编码器类别	17 位绝对式	17 位绝对式
轴径 (mm)	14	14
机身长 (mm)	132.7	110.7

2.3 同步齿形带的设计和选型

为了减小机器人总体设计外形尺寸，使结构紧凑，3 轴和 4 轴均通过同步带传递运动与力矩，下面进行他们的选择与计算。

2.3.1 关节 3 的同步带选择

3 轴的电机型号为 TS4607N7185，功率为 200W，额定转速 3000r/min。传动比 $i=1.13$ ，同步带不仅改变传动方向的作用而且改变了输出力矩。

(1) 确定同步齿形带的计算功率

考虑到速度增减、功率的高低、载荷的大小和预紧力对带轮的影响，其功率计算公式为

$$P_d = K_A P \quad (2-19)$$

式中： K_A ——考虑载荷性质和运转时间的工况修正系数，其值见表 2.11，查表确定 $K_A=1.4$ 。 P ——传递的功率。

表 2.11 同步带的工况修正系数

载荷变化情况	瞬时峰值载荷及额定工作载荷	每天工作小时数/h		
		10	10~16	> 16
平稳	—	1.2	1.4	1.5
小	150%	1.4	1.6	1.7
较大	150%~200%	1.6	1.7	1.85
很大	250%~400%	1.7	1.85	2
大而频繁	450%	1.85	2	2.05

则同步带的计算功率为 $P_d = 280W$

(2) 选定带型和节距

参考圆弧齿同步带选型图 2.6，依据上述计算，功率 $P_d = 280W$ ，转速 $n_2 = 3000r/min$ ，据此可以选择 3M 同步齿形带，节距为 $P_b = 3mm$ 。

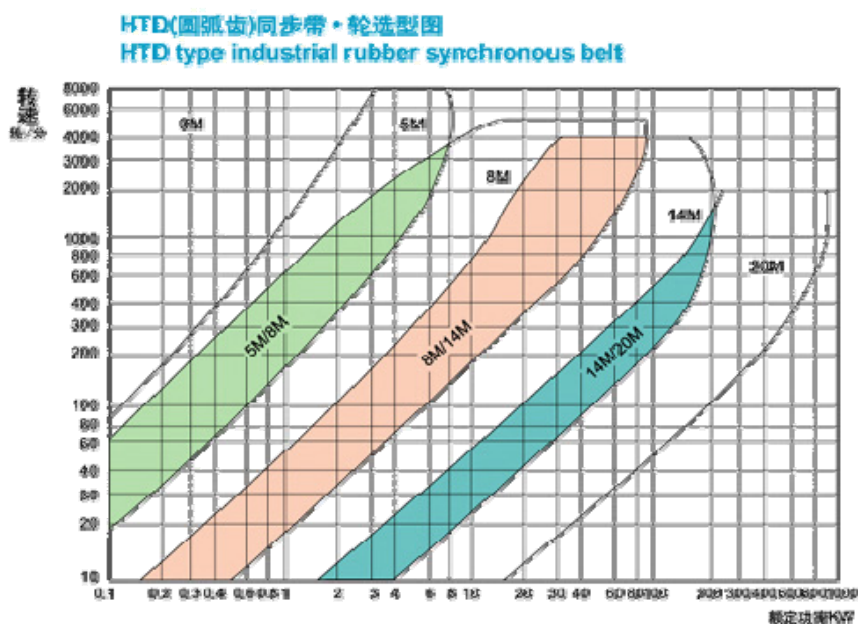


图 2.6 圆弧齿同步带选型图(来自 JB/T 7512.3-1994)

(3) 大小带轮齿数及节圆半径。

根据带轮转速 $n_2=3000\text{r/min}$ 和带型 3M ,根据表 2.12 可确定小带轮的最小齿数 $Z_{\min}=20$ 。此设计中，由于安装尺寸限制，3 轴选择小带轮齿数为 $Z_1=50$ 。

表 2.12 带轮的最小齿数

带轮转速 $/(r/min^{-1})$	带型 / Z_{\min}				
	3M	5M	8M	14M	20M
900	10	14	22	28	34
> 900~1200	14	20	28	28	34
> 1200~1800	16	24	32	32	38
> 1800~3600	20	28	36	—	—
> 3600~4800	22	30	—	—	—

则小带轮节圆直径为

$$d_1 = \frac{z_1 p_b}{\pi} \quad (2-20)$$

由上式可得 $d_1=47.8\text{mm}$ ，传动比为 1.13，根据式子(2-21)所示

$$z_2 = i \times z_1 \quad (2-21)$$

可得大带轮齿数为 57 则大带轮直径为 $d_2=54.4\text{mm}$ 。

(4) 同步带带速计算

$$v = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \times 1000} \quad (2-22)$$

有上式可得 $v=7.5m/s$ 。

(5) 初选中心距

中心距 C_0 满足下述条件

$0.7(d_1 + d_2) < C_0 < 2(d_1 + d_2)$ ，即 $71.6mm < C_0 < 204.4mm$ ，根据结构尺寸要求，确定 $C_0 = 93.5mm$ 。

(6) 带长及齿数确定

带长计算公式如下

$$L_0 = 2C_0 + \frac{\pi(d_1 + d_2)}{2} + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4C_0} \quad (2-23)$$

根据圆弧齿同步带长度系列查得，其节线长 $L_p = 350mm$ ，节线上齿数 $Z = 115$ 。

$$\text{同步带的实际中心距为 } a = \frac{M + \sqrt{M^2 - 32(d_2 - d_1)^2}}{16} \quad (2-24)$$

式中 $M = 4L_p - 2\pi(d_1 + d_2)$ 则中心距式子(2-24)可得 $a = 94.7mm$ 。

小带轮啮合齿数为

$$Z_m = \text{ent} \left[\frac{Z_1}{2} - \frac{P_b Z_1}{2\pi^2 C} (Z_2 - Z_1) \right] \quad (2-25)$$

由式子(2-25)可得 $Z_m = 20 \quad 6$ 。

(7) 基本额定功率

$$P_0 = \frac{(T_a - mv^2)v}{1000} \quad (2-26)$$

基本额定功率是各种带型对应于基准宽度 b_{s0} 的额定功率， T_a 为各带型的许用工作拉力， m 为宽度为 b_{s0} 的带单位长度的质量，各参数见表 2.13。

表 2.13 同步带的基准宽度、许用工作拉力和单位长度的质量

项目	带型						
参数	MXL	XXL	XL	L	H	XH	XXH
b_{s0}/mm	6.4	6.4	9.5	25.4	76.2	101.6	127.0
T_a/N	27	31	50	245	2100	4050	6400
$m/(kg \cdot m^{-1})$	0.007	0.01	0.022	0.096	0.448	1.484	2.473

由上式(2-26)可得基本额定功率为 $0.18kw$ ，满足设计要求。

(8) 求带宽

同步带带宽计算公式如下式(2-27)

$$b_s \geq b_{s0}^{1.14} \sqrt{\frac{P_d}{K_L K_Z P_0}} \quad (2-27)$$

其中： K_z ——啮合系数，因 $Z_m=6$ ，取 $K_z=1$ ；

K_L ——带长系数，按表可查得 $K_L=1$ ；

b_{s0} ——带基准宽度，查表确定 $b_{s0}=6\text{mm}$ ；

根据上式，要求带宽 $b_s=8.6\text{mm}$ ，取 $b_s=11\text{mm}$ 。

(9) 作用在轴上的力

紧边张力

$$F_1 = \frac{1250P_d}{v} \quad (2-28)$$

可得 $F_1=46.7\text{N}$ 。

松边张力

$$F_2 = \frac{250P_d}{v} \quad (2-29)$$

可得 $F_2=9.4\text{N}$ 。

最终根据以上计算参数选取日本 UNITTA 公司的 336-2GT 型号同步带。

2.3.2 关节 4 的同步带选择

4 号轴同步带电机也为 TS4607N7185 型，功率为 200W，额定转速 3000r/min，传动比 $i=2.77$ 。计算步骤和 3 轴类似，小带轮齿数选为 37，则小带轮节圆直径参照式子(2-20)得 $d_1=23.55\text{mm}$ ，由传动比 $i=2.77$ 可得大带轮齿数为 103 直径为 65.2mm。同步带带速计算由式子(2-14)得到 $v=3.7\text{m/s}$ ，中心距同样满足 $0.7(d_1+d_2)<C_0<2(d_1+d_2)$ ，即 $62.1\text{mm}<C_0<177.6\text{mm}$ ，据此确定中心距 $C_0=100.8\text{mm}$ 。带长根据公式(2-23)计算可得 $L_0=344.6\text{mm}$ ，根据圆弧齿同步带长度系列查得其节线长 $L_p=350\text{mm}$ ，节线上齿数 $Z=115$ ，同步带的啮合齿数由式子(2-25)得 $Z_m=12/6$ 。当齿数为 37，转速为 3000 时，基本额定功率为 0.16kw。所求带轮宽度由式子(2-27)可得 $b_s=22\text{mm}$ 。由上述计算参数选择日本 UNITTA 公司的 484-2GT 型号同步带。

最终确定 J3 和 J4 号关节带轮选型及参数如 2.12 表所示。

表 2.12 J3、J4 关节带轮选型及参数

带轮选型	齿数	宽度 mm	外径 mm	中心距 mm	带 (型号)	传动比
J3 大带轮	50	11	54.4	94.7	UNITTA 336-2GT	1.13
J3 小带轮	57	11	47.8	94.7	UNITTA 336-2GT	1.13
J4 大带轮	103	22	63.79	100.8	UNITTA 484-2GT	2.77
J4 小带轮	37	22	23.05	100.8	UNITTA 484-2GT	2.77

2.4 SCARA 机器人大小臂结构受力分析

由于 SCARA 机器人是平面型关节机器人，在实际运用中其大臂和小臂作为不可或缺的重要部件承担着绝大部分关键零部件重量，如果强度不高，不仅影响着定位和重复精度，而且会使整个机器人机械系统的抖动增加和稳定性丧失，所以对其进行力学分析相当必要，该机器人的大小臂均可简化成悬臂梁进行结构分析，大小臂材料如图 2.7 均采用 2014 合金，采用 Solid Works 软件进行模拟受力分析，具体情况如下：



属性	数值	单位
弹性模量	7.3e+010	牛顿/m ²
泊松比	0.33	无量纲
抗剪模量	2.8e+010	牛顿/m ²
密度	2800	kg/m ³
张力强度	165445000	牛顿/m ²
屈服强度	96000000	牛顿/m ²
屈服强度	96000000	牛顿/m ²
热膨胀系数	2.3e-005	1/K
热导率	160	W/(m·K)
比热	960	J/(kg·K)
材料疲劳比率		无量纲

图 2.7 SCARA 机器人大小臂材料

从图 2.7 中可得知其弹性模量为 $7.3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ，屈服强度为 96Mpa，通过 SolidWorks 中提供的 Simulation 模块进行力学分析，其中应力-应变云图能直观的表现出构件的破坏程度和结构出现应力集中的部分，为找出构建的薄弱部位提供依据。位移云图可以查看零件在外力状态下某一点的位移，对优化零件结构提供可靠的参考价值，变形太大超过设计标准会对机械结构的稳定性和实用性造成不良影响。

2.4.1 大臂的受力分析

依据上述分析和模型简化，参考表 2.1 中 SCARA 机器人设计标准和实际工作环境要求，初步估算负载为 30Kg，则大臂端受力为小臂自重与负载之和，在 Simulation 中的仿真受力分析如图 2.8 至 2.10 所示：

模型名称: 大臂 01mm1
 分析名称: 案例 1
 结果类型: 静应力分析 应力1
 显示比例: 323.878

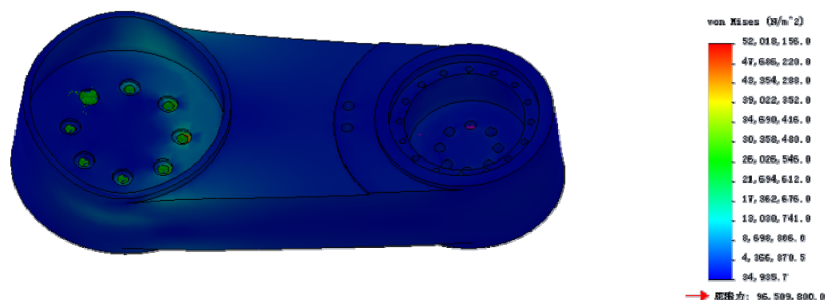


图 2.8 大臂受力分析应力云图

模型名称: 大臂 01mm1
 分析名称: 案例 1
 结果类型: 静应力分析 应变1
 显示比例: 323.878

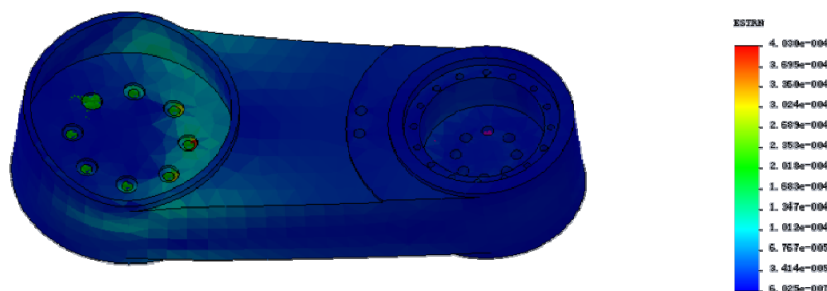


图 2.9 大臂应变云图

模型名称: 大臂 01mm1
 分析名称: 案例 1
 结果类型: 静应力分析 位移1
 显示比例: 323.878

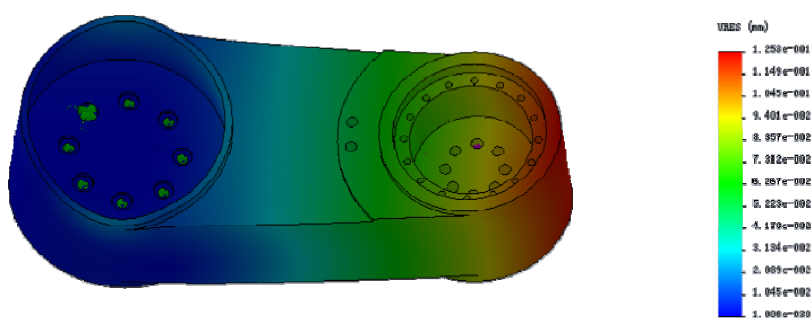


图 2.10 大臂位移云图

分析应力图 2.8、2.9 和 2.10 可知零件最大应力为 52MPa，屈服强度为 96MPa，该零件最大可承受应变为 4.030e-004，通过分析满负载情况下最大应变为 1.32e-003 小于最大可承受应变，零件最大位移为 1.253e-001mm，均满足设计要求。

2.4.2 小臂的受力分析

假定负载为 10Kg，小臂在 SolidWorks 中的受力分析如图 2.11 至 2.13 所示。

模型名称: 小臂2Femal
分析名称: 应力 2
分析类型: 静态应力分析 静态力 应力1
显示比例: 107.697

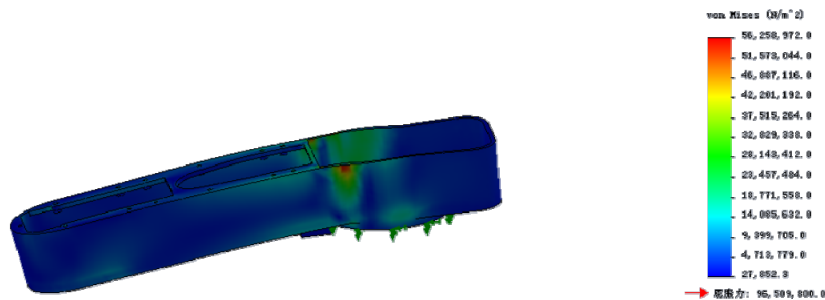


图 2.11 小臂应力云图

模型名称: 小臂2Femal
分析名称: 应力 2
分析类型: 静态应力分析 静态力 应力1
显示比例: 107.697

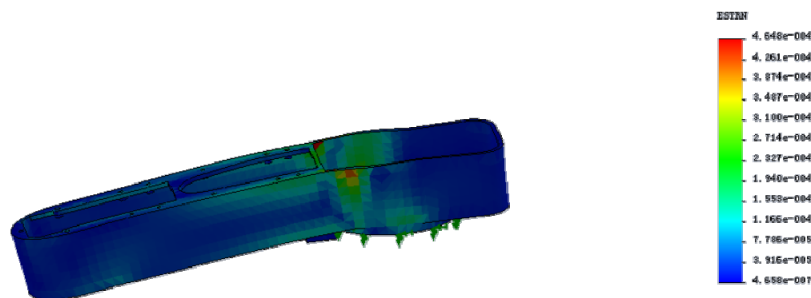


图 2.12 小臂应变云图

模型名称: 小臂2Femal
分析名称: 应力 2
分析类型: 静态应力分析 静态力 应力1
显示比例: 107.697

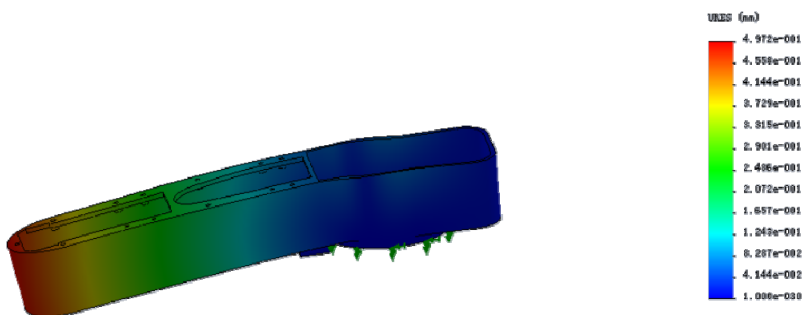


图 2.13 小臂位移云图

由图 2.11、2.12 和 2.13 可知该零件最大应力为 56MPa，屈服强度为 96MPa，最大可承受应变为 4.648e-004，最大应变为 1.32e-003 最大位移为 1.253e-001mm，

均满足设计要求。

2.5 本章小结

本章针对 SCARA 机器人的设计要求和技术参数按步骤设计了一款机器人，首先选择了合理的传动方案，并对关键的零部件进行了设计和计算，确定零件选型结构和型号，并对 SCARA 机器人的 1 号臂和 2 号臂进行了应力学分析，以验证设计的合理性和可靠性。

第3章 SCARA 机器人的关节解耦及轨迹规划

3.1 SCARA 机器人 3 号关节和 4 号关节的运动解耦分析

由于 SCARA 机器人的运动学已经相当的成熟，本文在这里不做探讨，参考文献[32]中的运动学正解得到式子(3-1)和运动学逆解(3-2)以便下文使用式子如下：

$$\begin{cases} x = l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ y = l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ z = d_3 + d_4 \\ \theta = \theta_4 \end{cases} \quad (3-1)$$

式中： $s_1 = \sin \theta_1, c_1 = \cos \theta_1, s_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2), c_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ ，其中 l_1 是 1 号关节长度； l_2 是 2 号关节长度； θ_1 是 1 号关节和 X 轴夹角； θ_2 是 2 号关节与 1 号关节夹角； d_4 是末端执行机构初始纵坐标； d_3 是末端执行器纵坐标； θ_4 是执行器旋转夹角。

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos \frac{bx \pm y\sqrt{x^2 - b^2 + y^2}}{x^2 + y^2} \\ \theta_2 = \arccos \frac{(x^2 + y^2) - l_1^2 l_2^2}{2l_1 l_2} \\ d_3 = d_1 - z \\ \theta_4 = \theta \end{cases} \quad (3-2)$$

在实际的工作和运动中为了使得 SCARA 机器人的 3、4 关节减轻重量、结构紧凑，采用的是滚珠丝杆花键来完成垂直方向和水平面内的旋转运动，由于该结构的运动方向取决于两个电机的耦合运动。即丝杆螺母同步轮和花键螺母同步轮配合动作，而 SCARA 机器人运动学逆解求得竖直方向变量 L_3 和关节 4 转角 θ_4 之后，还要求解出电机 3 的转角 ϕ_3 和电机 4 的转角 ϕ_4 [33]。

(1) 竖直方向上的运动解耦

参考表 2.5 所示，滚珠丝杆花键的三种工作状态可以得到垂直方向上运动是由丝杆和花键的运动合成，由于滚珠丝杆带轮的正反转会产生丝杆沿竖直方向的上下运动，花键螺母同步轮旋转的正反运动会产生丝杆的向上向下的螺旋运动。

参考图 3.1 所示，这里设定向上为正方向，则 $N_1 > 0$ 时， y_1 的方向向下，与正方向相反，取负。如式子(3-3)所示。

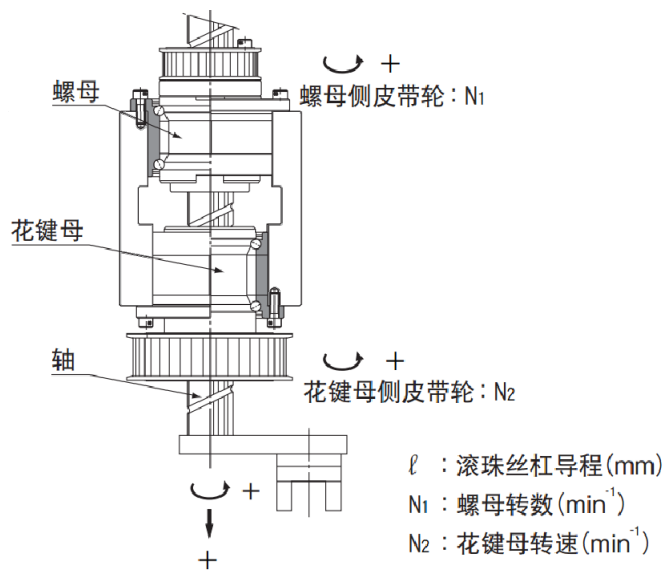


图 3.1 滚珠丝杆花键结构

$$z_1 = -\frac{\phi_3}{i g^3 60} g \quad (3-3)$$

同理， $N_2 > 0$ 时， y_2 的方向向下，与正方向相同，如式子(3-4)所示。

$$z_2 = \frac{\phi_4}{j g^3 60} g l \quad (3-4)$$

则竖直方向上合成运动的表达式，如式子(3-5)所示。

$$L_3 = z_1 + z_2 = \left(\frac{\phi_4}{j} - \frac{\phi_3}{i} \right) g \frac{1}{360} \quad (3-5)$$

其中 z_1 为电机 3 驱动滚珠丝杆螺母旋转在丝杆垂直方向的运动； z_2 为电机 4 驱动花键螺母同步轮旋转在丝杆垂直方向上的运动； ϕ_3 为电机 3 的转角； ϕ_4 为电机 4 的转角； i 为电机 3 至丝杆螺母的减速比， j 为电机 4 至花键螺母的减速比， l 为丝杆的长度。

(2) 旋转运动的解耦

旋转运动仅由花键螺母运动产生，但是花键螺母产生的是竖直方向上的螺旋运动，所以需要丝杆螺母转动以抵消竖直方向的移动。其旋转角度可由式子(3-6)表示：

$$\theta_4 = \phi_4 / j \quad (3-6)$$

由式子(3-5)和(3-6)可以求解得出：

$$\begin{cases} \phi_3 = \left(\theta_4 - \frac{L_3 g^3 60}{1} \right) g \\ \phi_4 = \phi_3 g j \end{cases} \quad (3-7)$$

这样关节 3 号电机和关节 4 号电机的转动角度 ϕ_3 和 ϕ_4 与运动学逆解的 θ_3 和 L_3 关系如式子(3-7)所示。

3.2 轨迹规划

机器人轨迹规划的本质就是利用数学原理对各个关节在运动过程中的位移、速度和加速度进行运动规划，基本分为三种：

(1) 关节空间轨迹。在该空间下运动，每个关节的转动变量可以直接在关节空间中进行描述，求解方便，运动高效。

(2) 直角空间下的直线轨迹。即在笛卡尔空间下的直线运动，它比较直观，计算量较大。

(3) 直角空间下的曲线轨迹。该空间下的轨迹需要有明确的函数表达式来描述曲线运动的轨迹。

确定机器人在路径中躲避障碍物和沿特定路线行走是运动中必须要考虑的。通过区分是否有无障碍约束和路径约束，把控制方式分为四种，如表 3.1 所示。路径只是机器人所经过的若干点，而轨迹是在时间顺序下走过的路径点。

表 3.1 机械手控制方式

项目	有障碍约束	无障碍约束
有路劲约束	无碰撞路径规划+在线路径跟踪	路径规划+路径跟踪
无路劲约束	位置控制加在线障碍检测和壁障	位置控制

机器人的轨迹规划一般都是在起始点和终止点之间确定一条轨迹曲线并生成若干曲线上的插补点，插补点的数量对轨迹的精度有着重要的影响，目标位置一般是在机床坐标系中给出的。已知空间内的任意一点坐标后，均可通过运动学逆解求解出相应的关节变量。

在给定空间中两点的位置之后，其运动轨迹会有多条，例如，在满足两个端点的位置和姿态约束的条件下，机器人末端执行器可以走一条经过两端点的直线(直线轨迹)；也可以走一条过两点的光滑弧线(圆弧曲线)，而机器人轨迹控制即控制机械手走按照先后顺序依次走完全部目标轨迹。因此，如何确定合适的目标轨迹和控制机械手跟踪目标轨迹的准确性是需要主要研究的两个方面^[34-36]。

给定目标轨迹的方式有两种：

(1) 示教再现方式。示教再现方式是由用户操作机器人按照规定轨迹运动并定时记录下各关节变量的值和手部姿态的位置、速度及加速度等数据存入控制器中，计算出该路径的位移时间函数表达式；再现时提取插补点产生序列动作。控制机械手运动的方式有两种，一种是 PTP 控制，这种控制只考虑从一点到另外一点，不用考虑途中所走过的路径。另一种是 CP 控制，这种控制模式必须对目标的坐标进行连续控制和记录，相当于用手抓住机器人手部按照规定轨迹运动，这种控制

方式需要消耗较大的存储资源。具体轨迹如图 3.2 所示。

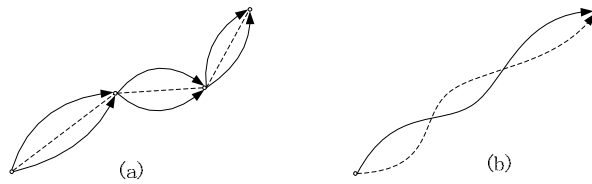


图 3.2 PTP 控制 (a) 和 CP 控制 (b)

----- 示教点和示教路径； ———— 再生轨迹举例

点位控制在焊接行业应用的较为普遍，连续路径控制则主要是用于弧焊、喷漆等作业。PTP 控制偏重于示教过程中记录点的位置和姿态，对于两点之间的路径一般不予考虑。在工厂实际应用中，常常要求指定两点之间具体的路径，例如是直线、圆弧或者是任意的轨迹，这时通常采用 CP 控制，其示教方式分为两种，其一是在示教路径记录若干点的姿态和位置信息，使末端执行器尽可能去“模拟”示教时的运动；另一种是在两示教点中采用直线或圆弧插补的方式指定轨迹的类型^[37]。

(2) 数控方式。数控方式在数控机床中应用较多，是把目标轨迹通过数值数据表示出来，这些数据是根据工作任务的需要设置的。

3.2.1 直角空间运动规划

由于直角空间(即笛卡尔空间)轨迹规划需要对机器臂的每个关节不断的求解，导致计算量大，同时由于直角空间并不是一一对应于与关节坐标空间，导致在直角空间进行轨迹规划时存在奇异点，但是在该空间进行下行轨迹规划能够让用户直观清楚的看到机械手的轨迹。目前比较常用的笛卡尔空间插补算法分别是空间直线插补和平面圆弧插补算法。

(1) 直线插补算法

直线插补算法是已知机械手运动的起始点 $A(x_0, y_0, z_0)$ 和目标点 $B(x_m, y_m, z_m)$ 的位姿坐标，如图 3.3 所示，要求机器手按照插补序列由 A 点运动到 B 点。

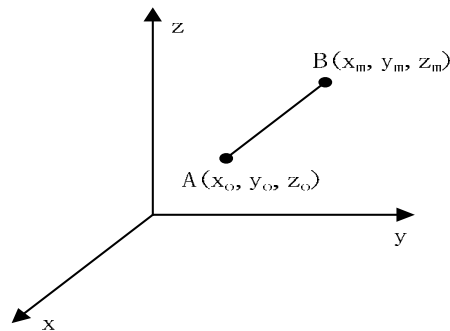


图 3.3 直角坐标空间直线插播

插值步骤如下：

设轨迹的更新周期为 Δt ，插补时间为 T ；

A、B 两点之间的距离：

$$L = \sqrt{(x_m - x_0)^2 + (y_m - y_0)^2 + (z_m - z_0)^2} \quad (3-8)$$

直线插补序列中需要插补的总次数： $N = T / \Delta t$ ；

每一次插补 X,Y,Z 方向的插补增量为：
$$\begin{cases} \Delta x = (x_m - x_0) / N \\ \Delta y = (y_m - y_0) / N \\ \Delta z = (z_m - z_0) / N \end{cases}$$
，推导出直线插补

第 i 个插补序列的坐标值为：
$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + i\Delta x \\ y_{i+1} = y_i + i\Delta y \\ z_{i+1} = z_i + i\Delta z \end{cases}$$
，其中 $i = 0, 1, 2, \dots, N$ ；

(2) 平面圆弧插补

已知空间任意不在一条直线上的三点为起始点 $P_1(x_1, y_1)$ ，中间点 $P_2(x_2, y_2)$ ，终点 $P_3(x_3, y_3)$ ，可知平面中不在同一条直线上的三点确定一个圆弧，如图 3.4 所示：

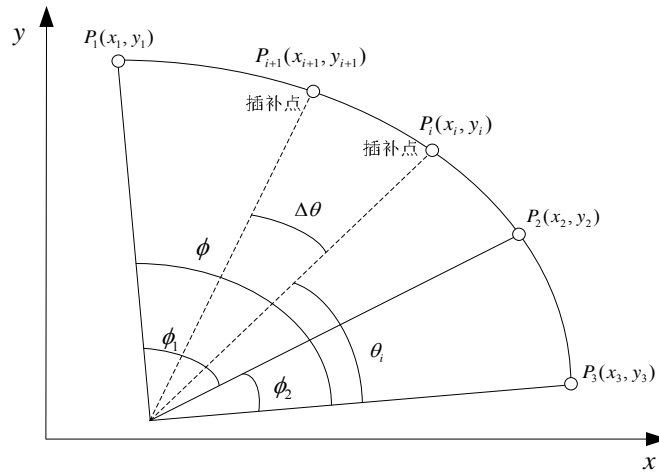


图 3.4 圆弧插补示意图

圆弧插补的计算过程与直线插补类型类似，具体步骤如下。

计算出圆弧的半径 R 。

计算出圆心角 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 的大小，其中：

$$\begin{cases} \phi_1 = \arccos \frac{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 - 2R^2}{2R^2} \\ \phi_2 = \arccos \frac{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2 - 2R^2}{2R^2} \\ \phi = \phi_1 + \phi_2 \end{cases} \quad (3-9)$$

t_s 时间内角位移量 $\Delta\theta = t_s \frac{v}{R}$ 。

总插补数 N 为 $\phi / \Delta\theta + 1$ 的整数部分。

对 P_{i+1} 点的坐标，有

$$\begin{aligned} x_{i+1} &= R \cos(\theta_i + \Delta\theta) \\ &= x_i \cos \Delta\theta - y_i \sin \Delta\theta \end{aligned} \quad (3-10)$$

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= R \sin(\theta_i + \Delta\theta) \\ &= y_i \cos \Delta\theta + x_i \sin \Delta\theta \end{aligned} \quad (3-11)$$

由 $\theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta$ 可判断是否到插补终点。只要 $\theta_{i+1} \leq \phi$ ，就继续插补下去。故平面圆弧位置插补为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i \cos \Delta\theta - y_i \sin \Delta\theta \\ y_{i+1} = y_i \cos \Delta\theta + x_i \sin \Delta\theta \\ \theta_{i+1} = \theta_i + \Delta\theta \end{cases} \quad (3-12)$$

3.2.2 关节空间运动规划

基于上述讨论，不管采用示教再现还是数控方式，都要在基于一些基本准则的前提下，参考目标轨迹不同的要求情况，生成点到点之间的轨迹。例如：所生成的目标轨迹应该是连续的、平滑的，此外还要保证各个关节和手部的轨迹、速度和加速度曲线也是连续的。在关节空间中，各个关节的单独运动会影响机器人末端执行机构的合成运动，所以对各关节的轨迹规划有着较高的精度要求，应该尽量避免在运动过程中出现误差积累，确保末端执行机构的定位精度。关节空间和直角空间之间的相互转换计算量比较庞大，计算过程较为复杂，当两个端点之间的运动路径不受任何约束而只关心两点的位置姿态时，使用关节空间的规划方法要显得便捷许多，这些端点中依次分为起始点、终点和机器人在运动过程中所必须经过的过渡点，这里尤其需要确保的是在过渡点的前后整个运动轨迹的路径位移、速度和加速度曲线没有发生突变保证轨迹的连续性和光滑特性。所以在用 SCARA 机器人运动学逆解把上述三种路径点的参数转换为关节变量之后，需要针对每个关节找到一条平滑的函数曲线经过若干这些路径点，同时保证这些函数曲线在每段路径内走过的时间相同。

如图 3.5 所示，某关节在 t_0 时刻的关节位置为 q_0 ，经过一段时间后预期在 t_f 时刻到达关节位置 q_f 。关节运动的时间函数轨迹曲线可以有多条，参考下图轨迹 1—3，可以从图中清楚地看到，机器人选择走轨迹 1 和轨迹 3 都会产生较大的波动和震荡，这对于轨迹规划而言是不利的，而依照轨迹 2 运动的，则整个运动轨迹

会比其他两条轨迹要平滑许多，这对于延长机器人关节的使用寿命和整体的定位精度都是非常有效的。因此，在关节空间轨迹规划中应该选择类似轨迹 2 的运动曲线来进行插值和规划。

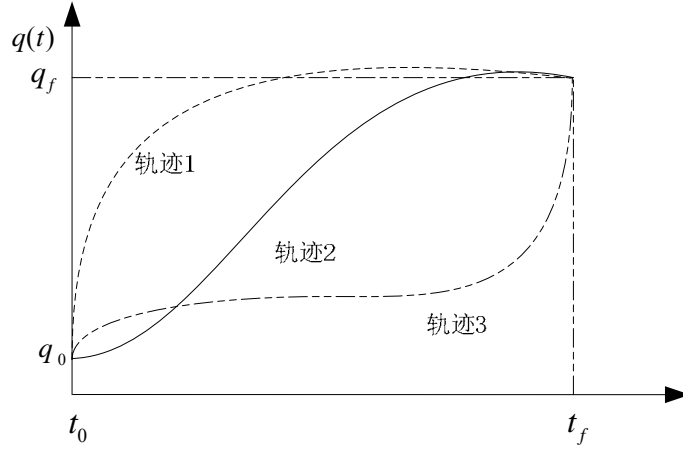


图 3.5 关节空间的运动轨迹

轨迹规划有多项式、摆线函数、样条函数插值等多种方式，这里推荐使用一种 5 次多项式插值方法。

设 SCARA 机器人手端在点 r_0 和 r_f 间运动，参照运动学逆解式子(3-9)可以求得对应的关节变量为 q_0 和 q_f 。取其中一个关节变量 q_i 作为 ξ ，则其初始表达式和终止表达式如式子(3-8)：

$$\xi(0) = \xi_0, \quad \xi(t_f) = \xi_f \quad (3-8)$$

以这两时刻速度和加速度作为边界条件，可表示为

$$\dot{\xi}(0) = \dot{\xi}_0, \quad \dot{\xi}(t_f) = \dot{\xi}_f \quad (3-9)$$

$$\ddot{\xi}(0) = \ddot{\xi}_0, \quad \ddot{\xi}(t_f) = \ddot{\xi}_f \quad (3-10)$$

为了简单化处理问题，以时间 t 作为可变系数，建立了 5 次多项表达式，如式子(3-11)

$$\xi(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (3-11)$$

其中的待定系数可求出如下：

$$a_0 = \xi_0 ;$$

$$a_1 = \dot{\xi}_0 ;$$

$$a_2 = \frac{1}{2} \ddot{\xi}_0 ;$$

$$a_3 = \frac{1}{2t_f^3} \left[20\xi_f - 20\xi_0 - (8\dot{\xi}_f + 12\dot{\xi}_0)t_f - (3\ddot{\xi}_0 - \ddot{\xi}_f)t_f^2 \right]$$

$$a_4 = \frac{1}{2t_f^4} \left[30\xi_0 - 30\xi_f - (14\xi_f^g + 16\xi_0^g)t_f + (3\xi_0^g - 2\xi_f^g)t_f^2 \right]$$

$$a_5 = \frac{1}{2t_f^5} \left[12\xi_f - 12\xi_0 - (6\xi_f^g + 6\xi_0^g)t_f - (\xi_0^g - \xi_f^g)t_f^2 \right]$$

当 $\xi_0^g = \xi_f^g = 0$, ξ_0 、 ξ_f 、 ξ_0^g 、 ξ_f^g 满足如下关系

$$\xi_f - \xi_0 = \frac{1}{2}(\xi_0^g + \xi_f^g)t_f \quad (3-12)$$

当 $a_5=0$, 这时 $\xi(t)$ 变为四次多项式。此时联立四次多项式和直线插补求解, 可得多种光滑轨迹。如图 3.6 所示, $\xi(t)$ 的起始位置 ξ_0 为静止状态, 经加速度、匀速、减速, 最后在 ξ_f 处停止。令加减速时间为 Δ , 接着设中间辅助点为 ξ_{02} , ξ_{f1} : 首先让 $\xi_{01} = \xi_0$, $\xi_{f2} = \xi_f$ 连接 ξ_{01} , ξ_{f2} , 在连线上取 ξ_{02} , ξ_{f1} 。

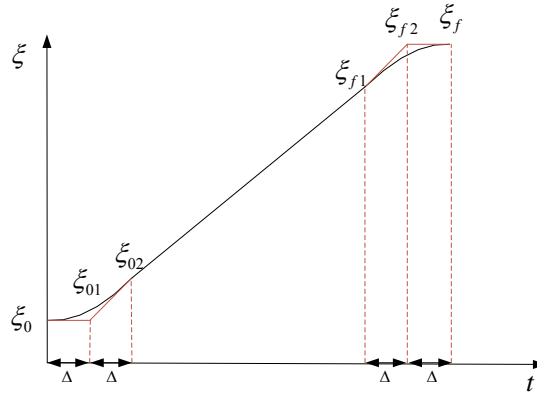


图 3.6 目标轨迹的形成

$0 < t < 2\Delta$ 为加速区, $2\Delta \leq t \leq t_f - 2\Delta$ 为匀速区, $t_f - 2\Delta < t < t_f$ 为减速区。在点 ξ_0 、 ξ_{02} 、 ξ_{f1} 、 ξ_f 处的加速度为零, 则在 ξ_0 和 ξ_{02} 之间的轨迹及 ξ_{f1} 和 ξ_f 之间的轨迹均可写成关于 t 的四次多项式。如果对点 ξ_0 、 ξ_{02} 、 ξ_{f1} 、 ξ_f 处没有加速度要求, 那么该两段轨迹均可用三次多项式表示。

在保证机器人手部位置的轨迹是一条平滑路径的前提下, 再通过运动学逆解求解出各个关节的关节变量、速度、及加速度的变化规律。这里使用 q_0 表示起始点的姿态, q_f 表示终点的位姿, 这两点之间的路径轨迹要光滑平稳。一个位姿通常需要 6 个坐标变量 $\xi(t)$ 来实现, 先用上述在关节坐标下的轨迹曲线生成法生成坐标变量, 再用机器人运动学正解求出对应的各关节姿态信息^[38]。

3.2.3 基于 Matlab 的 SCARA 机器人轨迹仿真

Robotic Toolbox 是一套基于 MATLAB 的机器人工具箱, 它可以提供 1500 多个关于机器人运动学和动力学的常用函数, 方便用户直接使用, 使得抽象的机器人学变得直观、好理解。机器人的工具箱提供的功能函数有很多种, 本文只对涉及

到机器人运动学和轨迹规划常用的一些函数作简要的说明。本文所研究的 SCARA 机器人关节空间下的运动轨迹规划仿真,都需要建立 SCARA 机器人的数学模型。调用工具箱中的 Link 函数,它的基本形式如下式子。

$L = \text{link}([\alpha \ A \ \theta \ D \ \sigma \ \text{offset}], \text{CONVENTION})$

CONVENTION——可以选择标准模式(standard)或者修饰模式(modified)。

α ——扭转角。

A ——杆件长度

θ ——关节角。

D ——横距

σ ——关节类型,填 0 代表关节类型,非 0 代表移动关节。

根据参考文献[32]中 SCARA 机械手的 D-H 参数表构建机械手模型,参考表 2.1 中 SCARA 机器人技术参数,初步拟定参数 $d_3 = 100\text{mm}$,新建机械手模型程序如下:

```
L1=link([0 0 0 372 0], 'mod');
L2=link([0 250 0 0 0], 'mod');
L3=link([0 200 0 0 1], 'mod');
L4=link([0 0 0 -100 0], 'mod');
r=robot({L1 L2 L3 L4}, '湖工-SCARA机器人');
drivebot(r);
```

由此程序得到 SCARA 机械手的三维模型和关节角度及坐标姿态控制框分别如下图 3.7 和图 3.8 所示。

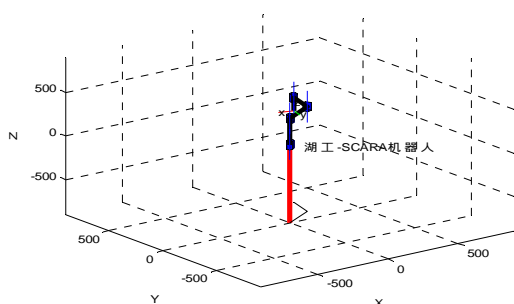


图3.7 SCARA机器人仿真模型

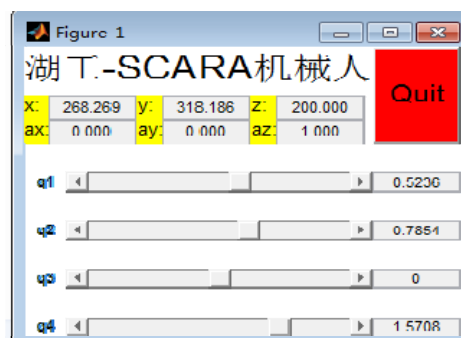


图3.8 SCARA机器人控制框

由上述模型可得四个关节在起始点的关节变量为 $q_0 = [0.3489 \ 0.8722 \ -100 \ 0]$, 新取坐标点在原有坐标基础上沿 Z 轴下降 50mm, 且 SCARA 机器人的末端执行器坐标系 3 轴与机床坐标系 3 轴对应平行, 则由运动学逆解求得目标点位姿对应的关节角 $q_1 = [0.785 \ 0.174 \ -150 \ 0.262]$ 。设定目标从起始点到终点的运行时间为 5s, 每间隔 10ms 做一次插值运算, 可以分别求得各关节在五次多项式插值和抛物线过

渡插值函数下的位移、速度和加速度曲线，如图 3.9 和 3.10 所示^[39]。

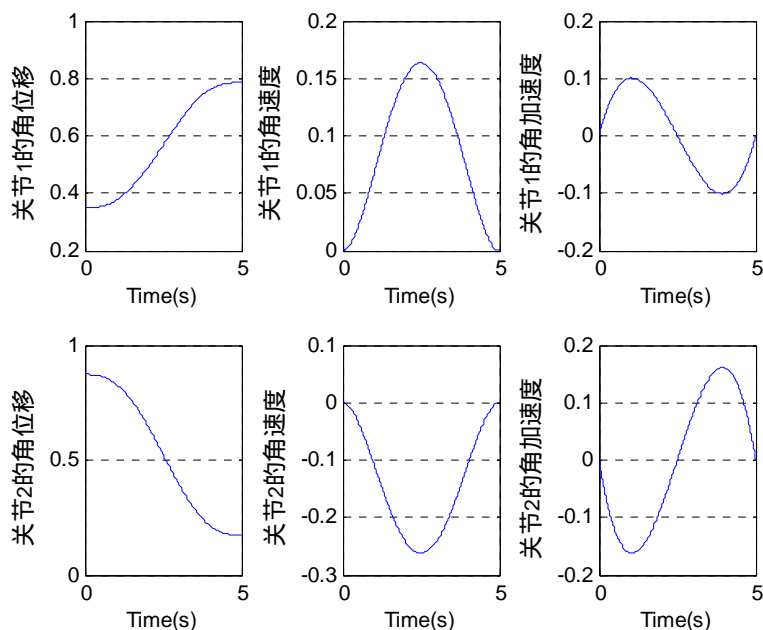


图 3.9 五次多项式插值的关节 1 和关节 2 角位移、角速度、角加速度轨迹规划

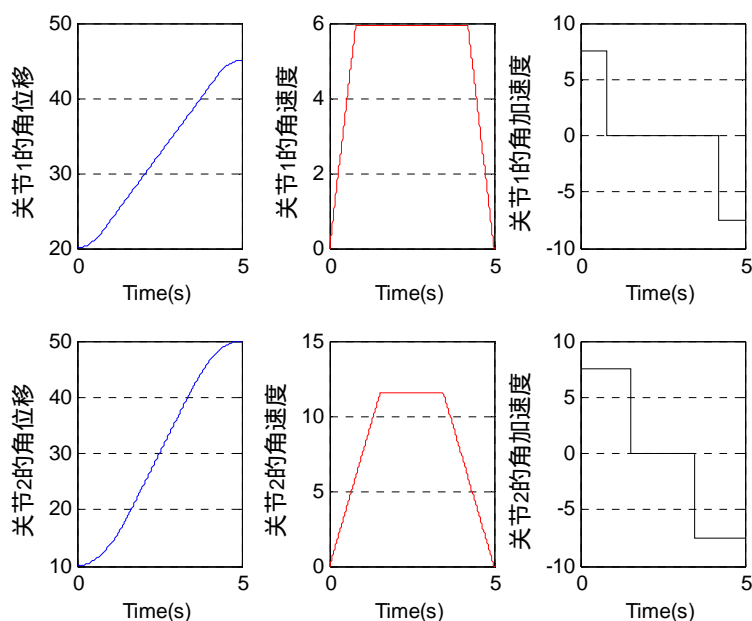


图 3.10 抛物线过渡直线插补关节轨迹

分析图 3.9 和 3.10 可知 5 次多项式插值和抛物线过渡插值的位移都是光滑连续无冲击的曲线，其中 5 次多项式插值的速度、加速度也是一条光滑的曲线。

3.3 本章小结

本章针对滚珠丝杆花键的使用重点研究和分析了 SCARA 机器人 3、4 关节的耦

合运动；并对 SCARA 机器人关节空间下的轨迹规划特别是五次多项式插值算法和抛物线过渡插值算法做了分析和探讨,并通过 Matlab 进行了插补轨迹的仿真验证。

第4章 SCARA 机器人的运动控制算法研究

4.1 工业机器人常用控制方法和策略

机器人是一个比较繁琐的非线性不确定性系统，该系统不仅自身特性随着时间变化而改变，而且子系统间相互关联、互相影响，其动力学模型还具有多输入和多输出的特点。

应用较为广泛的工业机器人运动控制方法有变结构控制、模糊控制、PID 控制、鲁棒控制、自适应控制和神经网络控制等。其中每一种控制方法的应用范围和效果不尽相同，如变结构控制可以比较方便的解决系统模型的不稳定性，自适应控制随着时间的推移可以不断对系统参数做出修改以适应新环境的变化，鲁棒控制对非结构不确定性的补偿有较好的应用，神经网络算法则可以实现在线建模和前馈补偿，提高控制精度，接下来简要概述几个本文用到的控制方法^[40-42]。

(1) 变结构控制

变结构控制是对具备不定性机器人动力学系统进行控制的常用方法，变结构系统本身是一种非连续反馈调节控制系统，其主要特点是他在一种开关曲面上建立滑动模型，称为“滑模”。

变结构控制的理论原理是在控制系统中，有一个处于特殊的超越曲面，通过控制器中参变量的不断切换，驱使整个系统的状态都不断逼近该曲面，在该曲面的平衡点所有的状态轨迹都无限趋近于零，使得整个系统达到稳定态。

变结构控制本身是一种解决控制的不连续性问题非线性控制方法，只用确定它的最大界线范围，就可以对模型的轨迹准确追踪。

变结构控制设计比较简单，便于理解和应用，具有较好的鲁棒性，主要表现在滑模运动方程对外界的抗干扰能力强。在选择合适的高强度无衰减控制信号后，系统都会渐进的不受外界任何扰动影响的到达滑模面，但正因为要在控制过程中频繁的不断切换控制器，系统会在零点附近产生抖振的现象，导致稳态降低，严重还会产生振荡。

(2) 模糊控制方法

模糊控制实际是上是抽离出人的模糊化思维过程，通过“控制经验”来进行控制操作。它拥有高度非线性逼近特性，用于解决系统中高阶和滞后的难题。在机器人的模糊化控制中，直接读取电机编码器中的精确量，然后把这些值模糊化

处理后输入系统，再依照事先定好的模糊化规则对其进行推理，得到输出的控制量转化成为机器人可以识别的精确量进行操作。但是由于机器人系统比较复杂，它拥有多个输入变量，这会给模糊控规则的制定带来巨大的工作量，总而导致该算法应用受到限制。其模糊控制的主要框架如图 4.1 所示。

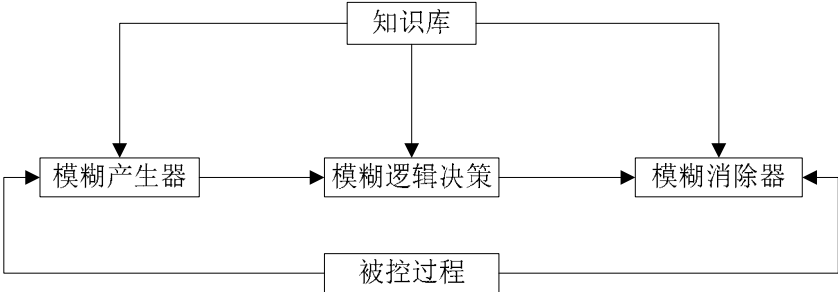


图 4.1 模糊控制系统结构图

(3) 自适应控制

自适应控制是机器人动力学模型中应用较为普遍的一种方法，由于机器人模型中常常考虑到关节间摩擦阻力、齿轮间隙和增益的非线性以及负载变化和冲击扰动等问题的影响，采用自适应控制来解决以上问题会使整个控制性能大大改善。该方法类似于达尔文的“自然进化理论”，强调随着系统内在环境和外在环境的改变，自主做出反应，自动决策并执行策略，使得系统的特性指标保持在最优状态。但是当系统非参数无法确定时，增益调节性能下降，难以获得理想的控制效果，其工作原理图如图 4.2。

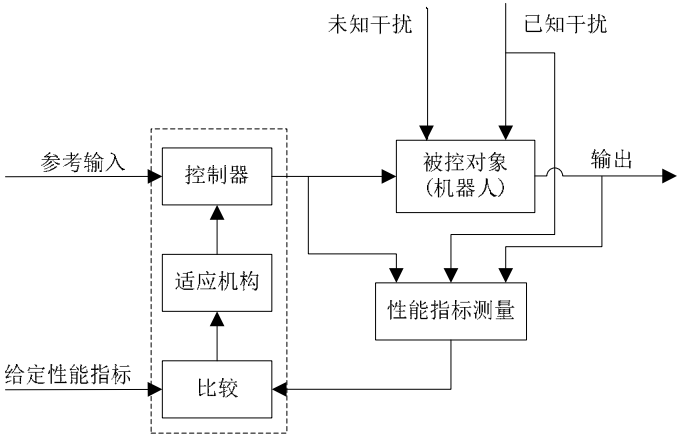


图 4.2 自适应控制原理图

(4) 鲁棒控制

鲁棒控制(robust control)的研究始于 20 世纪 50 年代。系统的鲁棒性就是指系统在某种特定条件下的稳定特性。

为了促使不确定性对系统的负面作用将至最小，设计鲁棒控制器，可以忽略其他因素仅考虑不确定性变量的最大边界值即可，其控制器可以对结构和非结构

不确定性同时补偿。机器人的不确定分为两大类别：模型误差 d 和不确定的外部干扰 Δ 。鲁棒控制器的固定特性，使得它对时间变化显得尤为敏感，因此该控制方法的实时性较好，设计过程也比较简单。

(5) 反演控制设计方法

“反演”最初是物理学里面的概念，指的是空间中力反向规律，体现了微观粒子的对称性。由于机器人系统自身的复杂特性和非线性特点给机器人的控制设计带来了一定的难度，为了把一个复杂的系统简化，在控制系统中引入了反演的设计方法。本着“倒退”的基本思路，以系统阶数为最大分解数，将整个系统分为若干个子系统，并通过所设计的中间虚拟控制量来控制，当所有子系统的李雅普洛夫函数判别该系统处于稳态时，此时达到最优控制效果。反演控制的方法可以和以上提及的一种甚至多种控制方法相互结合，以达到对系统最佳控制方案

[43-45]。

4.2 基于 SCARA 机器人的反演自适应模糊控制研究

本文以 SCARA 机器人作为实验对象，依照反演控制器的设计为载体，并结合自适应控制、模糊控制、变结构控制和鲁棒控制的控制方法，研究反演自适应模糊控制算法在 SCARA 机器人的轨迹跟踪控制方面的应用。通过提供四个不同关节的驱动力矩，得到各关节位置、速度等一系列状态变量的理想轨迹值。

反演（backstepping）设计方法，常和李雅普诺夫型自适应律结合使用，其本质思想是静态补偿，在反演方法中为每个分离的系统设计中间虚拟控制量，通过后边子系统的虚拟控制以期使得前面的子系统能够进入稳定状态的效果，并一直“倒退”至整个系统，最终达到系统控制律设计。滑模变结构控制由上文可知具备完全鲁棒性，即对参数变化和外界干扰具备某种不变性，它可以削弱随机干扰和负载变化对系统控制性能造成的影响，这对提高系统可控性能有着积极地作用。但是在滑动模态下往往容易受到测量误差、系统延迟及系统惯性等因素的干扰，使得控制产生抖动。为了使抖动的影响尽可能趋近于零，提出了利用反演控制方法设计机器人控制器，可以有效地改善系统动态性能；将滑模控制中的切换函数设计引入虚拟控制中，可实现具有滑模控制特性的反演控制，削弱了抖振，实现对不确定干扰和建模误差的自动跟踪；以期在不确定性系统的鲁棒性或自适应性方面取得了不错的轨迹跟踪效果^[46-47]。

4.3 SCARA 机器人状态的动力学模型

4.3.1 SCARA 机器人状态的动力学模型分析

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + d = \tau \\ y = q \end{cases} \quad (4-1)$$

上式为 SCARA 机器人动力学模型，其中 $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ 分别为 SCARA 机器人的角度，角速度和角加速度， $M(q) \in R^{n \times n}$ 为惯性量， $C(q, \dot{q}) \in R^{n \times n}$ 为向心力和哥氏力矩， $d \in R^n$ 为外界扰动， $\tau \in R^n$ 为输入控制力矩， $y \in R^n$ 为输出向量。

假设系统参数是未知但有界的，且系统具有以下特性：

(1) 惯性矩阵 $M(q)$ 是正定对称矩阵，且 $M(q)$ 有界，即存在

$$\sigma_0 > 0, \sigma_0 \in R, 0 < M(q) \leq \sigma_0 I ;$$

(2) 惯性矩阵 $D(q)$ 和向心力和哥氏力矩 $C(q, \dot{q})$ 存在以下关系：

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

为了应用反演 (backstepping) 方法，定义 $x_1 = q, x_2 = \dot{q}$ ，将式 (4-1) 写为：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = M^{-1}(x_1)\tau - M^{-1}(x_1)C(x_1, x_2)x_2 - M^{-1}(x_1)d \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4-3)$$

上式中， $M^{-1}(x_1)$ 和 $C(x_1, x_2)$ 都是非线性光滑的未知函数。反演自适应模糊控制的主要目的是通过相互切换不同子系统的模糊控制器，并不断调整模糊控制器参数向量，最终让被控对象的跟踪误差收敛到趋近于零，减小控制系统的抖振，使关节向量尽可能好地跟踪指定的关节角位移量以期达到 SCARA 机器人的轨迹跟踪控制要求^[48-50]。

4.4 SCARA 机器人反演自适应模糊控制器设计及稳定性分析

4.4.1 SCARA 机器人控制器的设计

传统的反演控制器是由自适应模糊控制和滑模控制律两部分组成。其控制设计的主要步骤是把母系统分割成若干个具有李雅普诺夫 (Lyapunov) 函数和中间虚拟控制量的子系统, 并最终递推至整个系统, 直到整个控制率的设计完成。为了控制系统的控制目标具有较好的跟踪效果, 使系统参数随着被控对象参数自动发生变化, 系统的参数自适应律是设计的首要步骤^[51-53]。整个反演自适应模糊系统控制结构如图 4.3 所示。

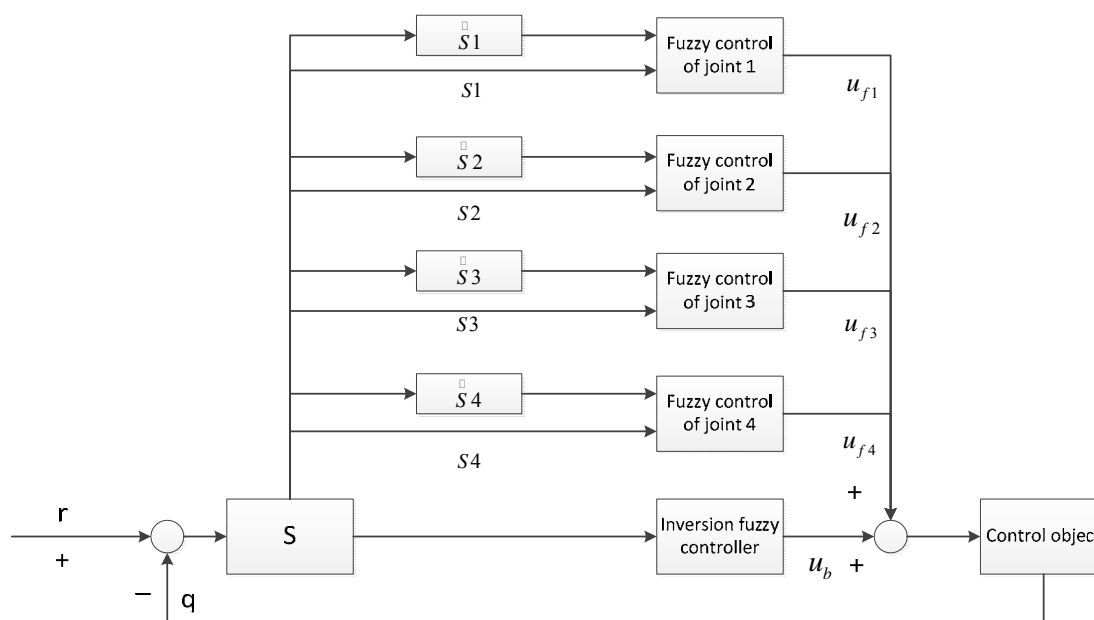


图 4.3 反演自适应模糊控制系统结构

4.4.2 SCARA 机器人反演滑模控制设计

假设 y_d 是期望角度, 同时 y_d 存在二阶导数特性。控制目标为 y 跟踪指令轨迹 y_d 。定义误差为

$$z_1 = y - y_d \quad (4-4)$$

α_1 为 x_2 的估计, 定义误差

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (4-5)$$

通过选取 α_1 , 使 z_2 趋近于零。则

$$\overset{g}{z}_1 = \overset{g}{x}_1 - \overset{g}{y}_d = \overset{g}{x}_2 - \overset{g}{y}_d = z_2 + \alpha_1 - \overset{g}{y}_d \quad (4-6)$$

取虚拟控制项为

$$\alpha_1 = -\lambda_1 z_1 + y_d^g \quad (4-7)$$

其中 $\lambda_1 > 0$ 。

针对式 (4-3) 中第一个子系统，取 Lyapunov 函数为 $V_1 = \frac{1}{2} z_1^T z_1$ 则

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1^T \dot{z}_1 = z_1^T (\dot{y} - \dot{y}_d) = z_1^T (\dot{x}_1 - \dot{y}_d) = z_1^T (\dot{x}_1 - \dot{y}_d) = z_1^T (x_2 - \dot{y}_d) \\ &= z_1^T (z_2 + \alpha_1 - \dot{y}_d) = -\lambda_1 z_1^T z_1 + z_1^T z_2 \end{aligned} \quad (4-8)$$

如果 $z_2 = 0$ ，则第一个子控系统稳定。

控制率的设计，由式 (4-3) 和式 (4-5) 得：

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = -M^{-1}Cx_2 - M^{-1}d + M^{-1}\tau - \dot{\alpha}_1^g \quad (4-9)$$

取控制率为

$$\tau = -\lambda_2 z_2 - z_1 - \varphi \quad (4-10)$$

针对式子(4-3)中的第二个子系统，取 Lyapunov 函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^T M z_2$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \frac{1}{2} z_2^T M \dot{z}_2 + \frac{1}{2} z_2^T M \dot{z}_2 + \frac{1}{2} z_2^T \dot{M} z_2 \\ &= -\lambda_1 z_1^T z_1 + z_1^T z_2 + z_2^T M (-M^{-1}Cx_2 - M^{-1}d + M^{-1}\tau - \dot{\alpha}_1^g) + z_2^T C z_2 \\ &= -\lambda_1 z_1^T z_1 + z_1^T z_2 + z_2^T (-C\alpha_1 - M \dot{\alpha}_1^g + \tau) - z_2^T d \\ &= -\lambda_1 z_1^T z_1 + z_1^T z_2 + z_2^T (f + \tau) - z_2^T d \end{aligned} \quad (4-11)$$

其中 $f = -C\alpha_1 - M \dot{\alpha}_1^g$ 。

把控制率式 (4-10) 代入可以得到如下结果

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -\lambda_1 z_1^T z_1 + z_1^T z_2 + z_2^T (f - \lambda_2 z_2 - z_1 - \varphi) - z_2^T d \\ &= -\lambda_1 z_1^T z_1 - \lambda_2 z_2^T z_2 + z_2^T (f - \varphi) - z_2^T d \end{aligned} \quad (4-12)$$

4.4.3 SCARA 机器人的自适应模糊控制设计

由 f 的表达式可见， f 包含了机器人系统的建模信息。假设 φ 为用于逼近非线性函数 f 的模糊系统，通过单值模糊化、乘积推理机和重心平均反模糊化。

假设模糊系统是由 N 条模糊规则构成，第 i 条模糊规则表达形式可以写成：

R^i : IF x_1 is μ_1^i and \dots and x_n is μ_n^i , then y is B^i ($i=1,2,\dots,N$) 其中 μ_j^i 为 x_j ($j=1,2,\dots,n$) 的隶属函数。

则模糊系统的输出为：

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_i \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j)}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j)} = \xi^T(x) \theta \quad (4-13)$$

其中 $\xi = [\xi_1(x), \xi_2(x), \dots, \xi_N(x)]^T$, $\xi_i(x) = \frac{\prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j)}{\sum_{i=1}^N \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j)}$, $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]^T$ 。针对 f 的

模糊逼近，采用分别逼近 $f(1)$ 和 $f(2)$ 的形式，相应的模糊系统设计为：

$$\varphi_1(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_{1i} \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j)}{\sum_{i=1}^N \left[\prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j) \right]} = \xi_1^T(x) \theta_1 \quad (4-14)$$

$$\varphi_2(x) = \frac{\sum_{i=1}^N \theta_{2i} \prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j)}{\sum_{i=1}^N \left[\prod_{j=1}^n \mu_j^i(x_j) \right]} = \xi_2^T(x) \theta_2 \quad (4-15)$$

定义 $\phi = [\varphi_1, \varphi_2]^T = \begin{bmatrix} \xi_1^T & 0 \\ 0 & \xi_2^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \xi^T(x) \theta$

其中 $\xi^T(x) = \begin{bmatrix} \xi_1^T & 0 \\ 0 & \xi_2^T \end{bmatrix}$, $\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$ 定义为最优逼近常量 θ^* ，对于任意小的给定

常量 $\varepsilon (\varepsilon > 0)$ ，如下不等式成立： $\|f - \Phi^*\| \leq \varepsilon$ 。令 $\tilde{\theta} = \theta^* - \theta$ 。设计自适应控制率为

$$\dot{\tilde{\theta}} = r(z_2^T \xi^T(x))^T - 2k\tilde{\theta} \quad (4-16)$$

4.5 稳性分析

对于整个系统，取 Lapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} z_1^T z_1 + \frac{1}{2} z_2^T M z_2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} = V_2 + \frac{1}{2\gamma} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} \quad (4-17)$$

其中 $\gamma > 0$ 。则

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{V}_2 - \frac{1}{\gamma} \theta^T \dot{\theta} = -\lambda_1 z_1^T z_1 - \lambda_2 z_2^T z_2 + z_2^T (f - \xi(x)\theta) - z_2^T d - \frac{1}{\gamma} \theta^T \dot{\theta} \\ &= -\lambda_1 z_1^T z_1 - \lambda_2 z_2^T z_2 + z_2^T \xi(x)\theta^* + z_2^T (\xi(x)\theta^* - \xi(x)\theta) - z_2^T d - \frac{1}{\gamma} \theta^T \dot{\theta}\end{aligned}$$

则

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq -\lambda_1 z_1^T z_1 - \lambda_2 z_2^T z_2 + \|z_2^T\| \|\theta^*\| \|f - \xi(x)\theta^*\| + z_2^T (\xi(x)\theta^* - \xi(x)\theta) + \|z_2^T\| \|\theta^*\| \|d\| - \frac{1}{\gamma} \theta^T \dot{\theta} \\ &\leq -\lambda_1 z_1^T z_1 - \lambda_2 z_2^T z_2 + \frac{1}{2} \|z_2^T\|^2 + \frac{1}{2} \varepsilon^2 + \theta^T \left[(z_2^T \xi(x))^T - \frac{1}{\gamma} \dot{\theta} \right] + \frac{1}{2} \|z_2^T\|^2 + \frac{1}{2} \|d\|^2\end{aligned}$$

将自适应率式 (5-16) 代入上式, 得

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq -\lambda_1 z_1^T z_1 - \lambda_2 z_2^T z_2 + \|z_2^T\|^2 + \frac{1}{2} \varepsilon^2 + \theta^T \left\{ z_2^T \xi(x)^T - \frac{1}{\gamma} [\gamma (z_2^T \xi(x))^T - 2k\theta] \right\} + \frac{1}{2} d^T d \\ &= -\lambda_1 z_1^T z_1 - \lambda_2 z_2^T z_2 + z_2^T z_2 + \frac{1}{2} \varepsilon^2 + \frac{2k}{\gamma} \theta^T \theta + \frac{1}{2} d^T d \\ &= -\lambda_1 z_1^T z_1 - (\lambda_2 - 1) z_2^T z_2 + \frac{k}{\gamma} (2\theta^{*T} \theta - 2\theta^T \theta) + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d\end{aligned}\quad (4-18)$$

由 $(\theta - \theta^*)^T (\theta - \theta^*) \geq 0$ 得 $2\theta^{*T} \theta - 2\theta^T \theta \leq -\theta^T \theta + \theta^{*T} \theta^*$, 代入上式有

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq -\lambda_1 z_1^T z_1 - (\lambda_2 - 1) z_2^T z_2 + \frac{k}{\gamma} (-\theta^T \theta + \theta^{*T} \theta^*) + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d \\ &= -\lambda_1 z_1^T z_1 - (\lambda_2 - 1) z_2^T z_2 + \frac{k}{\gamma} (-\theta^T \theta - \theta^{*T} \theta^*) + \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d\end{aligned}\quad (4-19)$$

由 $(\theta + \theta^*)^T (\theta + \theta^*) \geq 0$ 得 $-\theta^{*T} \theta - \theta^T \theta^* \leq \theta^{*T} \theta^* + \theta^{*T} \theta$,

则 $\theta^{*T} \theta = (\theta^{*T} - \theta^T)(\theta^* - \theta) = \theta^{*T} \theta^* + \theta^T \theta - \theta^{*T} \theta - \theta^T \theta^* \leq 2\theta^{*T} \theta^* + 2\theta^T \theta$

即

$$-\theta^T \theta - \theta^{*T} \theta^* \leq -\frac{1}{2} \theta^{*T} \theta^* \quad (4-20)$$

则

$$\begin{aligned}\dot{V} &\leq -\lambda_1 z_1^T z_1 - (\lambda_2 - 1) z_2^T z_2 + \frac{k}{\gamma} \left(\frac{1}{2} \theta^{*T} \theta^* \right) + \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d \\ &= -\lambda_1 z_1^T z_1 - (\lambda_2 - 1) z_2^T M^{-1} M z_2 - \frac{k}{2\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d\end{aligned}\quad (4-21)$$

取 $\lambda_2 > 1$, 由于 $M \leq \sigma_0 I$, 即 $-M^{-1} \leq -\frac{1}{\sigma_0} I$, 则

$$\dot{V} \leq -\lambda_1 z_1^T z_1 - (\lambda_2 - 1) z_2^T M^{-1} M z_2 - \frac{k}{2\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d \quad (4-22)$$

定义 $c_0 = \min \left\{ 2\lambda, 2(\lambda_2 - 1)\frac{1}{\sigma_0}, k \right\}$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\frac{c_0}{2} (z_1^T z_1 + z_2^T M z_2 + \frac{1}{\gamma} \theta^T \theta) + \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d \\ &= -c_0 V + \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d \end{aligned} \quad (4-23)$$

由于干扰 $d \in R^n$ 有界, 则存在 $D > 0$, 满足 $d^T d \leq D$, 则

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\frac{c_0}{2} (z_1^T z_1 + z_2^T M z_2 + \frac{1}{\gamma} \theta^T \theta) + \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d \\ &= -c_0 V + \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{1}{2} d^T d \end{aligned}$$

由于干扰 $d \in R^n$ 有界, 则存在 $D > 0$, 满足 $d^T d \leq D$, 则

$$V \leq -c_0 V + \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{D}{2} = -c_0 V + c_{v_{\max}} \quad (4-24)$$

其中 $c_{v_{\max}} = \frac{2k}{\gamma} \theta^{*T} \theta^* + \frac{\varepsilon^2}{2} + \frac{D}{2}$ 。解方程式 (4-24) , 得

$$V(t) \leq V(0) \exp(-c_0 t) + \frac{c_{v_{\max}}}{c_0} [1 - \exp(-c_0 t)] \leq V(0) + \frac{c_{v_{\max}}}{c_0} , \quad \forall t \geq 0 \quad (4-25)$$

其中 $V(0)$ 为 V 的初始值, 定义紧集 $\Omega_0 = \left\{ X | V(X) \leq V(0) + \frac{c_{v_{\max}}}{c_0} \right\}$, 则

$$\{z_1, z_2, \theta\} \in \Omega_0。$$

得到结论为: V 有界, 且闭环系统所有信号有界, 因此该反演自适应模糊控制系统可以达到稳定, 并渐进逼近滑模面。

4.6 SCARA 机械手的仿真

由第 2 章的设计可知, 1 号关节和 2 号关节的耦合运动决定 SCARA 机器人在 X-Y 平面内的运动, 且 3 号关节在垂直方向的移动决定其 Z 轴方向的移动, 所以本课题值探讨这 3 个关节的轨迹跟踪模型及输入信号的控制。通过利用 Simulink 和 S 函数进行控制系统的设计, 其中关节的理想轨迹由光滑的 3 次曲线函数做为信号输入, 用 S-Function 模块表示, 反演自适应模糊控制器输入信号使用 ctrl 模块表示, SCARA 机器人模型设计使用 plant 模块表示, 控制结构如图 4.4 所示。

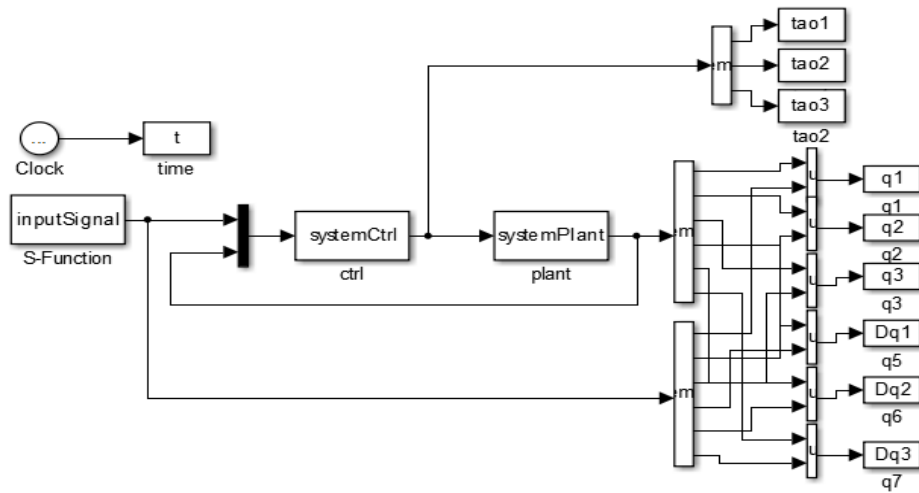


图 4.4 MATLAB/Simulink 控制系统仿真

其被控对象为：

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + d = \tau \\ y = q \end{cases} \quad (4-26)$$

其中机械手的惯性矩阵 $M(q)$ 和向心力和科氏力矩 $C(q, \dot{q})$ 均通过 SCARA 机器人拉格朗日动力学模型建立，其拉格朗日动力学模型在参文[54-59]中有详细叙述，在此不再赘述。

$$M(q) = \begin{bmatrix} M(q)_{11} & M(q)_{12} & M(q)_{13} \\ M(q)_{21} & M(q)_{22} & M(q)_{23} \\ M(q)_{31} & M(q)_{32} & M(q)_{33} \end{bmatrix} \quad (4-27)$$

$$M(q)_{11} = m_1 l_{c1}^2 + (l_1 + l_{c2}^2 + 2l_1 l_{c2} \cos(x_2)) \times m_2 + (l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + 2l_1 l_2 \cos(x_2) + 2l_1 l_{c3} \cos(x_3) + 2l_1 l_{c3} \cos(x_2 + x_3)) m_3 + J_1 + J_2 + J_3$$

$$M(q)_{12} = (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(x_2)) m_2 + (l_2^2 + l_{c3}^2 + l_1 l_2 \cos(x_2) + 2l_2 l_{c3} \cos(x_3) + l_1 l_{c3} \cos(x_3 + x_2)) m_3 + J_2 + J_3$$

$$M(q)_{13} = (l_{c3}^2 + l_1 l_{c3} \cos(x_2 + x_3) + l_2 l_{c3} \cos(x_3)) m_3 + J_3$$

$$M(q)_{21} = (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(x_2)) m_2 + (l_2^2 + l_{c3}^2 + l_1 l_2 \cos(x_2) + 2l_2 l_{c3} \cos(x_3) + l_1 l_{c3} \cos(x_3 + x_2)) m_3 + J_2 + J_3$$

$$M(q)_{22} = m_2 l_{c2}^2 + (l_2^2 + l_{c3}^2 + 2l_2 l_{c3} \cos(x_3)) m_3 + J_2 + J_3$$

$$M(q)_{23} = (l_{c3}^2 + l_2 l_{c3} \cos(x_3)) m_3 + J_3$$

$$M(q)_{31} = (l_{c2}^2 + l_1 l_{c2} \cos(x_2)) m_2 + (l_2^2 + l_{c3}^2 + l_1 l_2 \cos(x_2) + 2l_2 l_{c3} \cos(x_3) + l_1 l_{c3} \cos(x_3 + x_2)) m_3 + J_2 + J_3$$

$$M(q)_{32} = (l_{c3}^2 + l_2 l_{c3} \cos(x_3)) m_3 + J_3$$

$$M(q)_{33} = m_3 l_{c3}^2 + J_3$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
C_{11} &= -(l_1 l_{c2} m_2 \sin(x_2)) + l_1 l_2 m_3 \sin(x_2) + l_1 l_{c3} m_3 \sin(x_2 + x_3) x_5 - (l_2 l_{c3} m_3 \sin(x_3) + \\
& l_1 l_{c3} m_3 \sin(x_2 + x_3)) x_6 \\
C_{12} &= -(l_1 l_{c2} m_2 \sin(x_2)) + l_1 l_2 m_3 \sin(x_2) + l_1 l_{c3} m_3 \sin(x_2 + x_3) (x_1 + x_2) - (l_2 l_{c3} m_3 \sin(x_3) \\
& + l_1 l_{c3} m_3 \sin(x_2 + x_3)) x_6 \\
C_{13} &= -(l_2 l_{c3} m_3 \sin(x_3)) + l_1 l_{c3} m_3 \sin(x_2 + x_3) (x_4 + x_5 + x_6) \\
C_{21} &= (l_1 l_{c2} m_2 \sin(x_2) + l_1 l_2 m_3 \sin(x_2) + l_1 l_{c3} m_3 \sin(x_2 + x_3)) x_4 - l_2 l_{c3} m_3 \sin(x_3) x_6 \\
C_{22} &= -l_2 l_{c3} m_3 \sin(x_3) x_6 \\
C_{23} &= -l_2 l_{c3} m_3 \sin(x_3) (x_4 + x_5 + x_6) \\
C_{31} &= (l_2 l_{c3} m_3 \sin(x_3) + l_1 l_{c3} m_3 \sin(x_2 + x_3) x_1 + l_2 l_{c3} m_3 \sin(x_3) x_2 \\
C_{32} &= l_2 l_{c3} m_3 \sin(x_3) (x_4 + x_5) \\
C_{33} &= 0
\end{aligned}$$

l_1 是关节 1 连杆的长度, l_2 是关节 2 连杆的长度, l_3 是关节 3 连杆的长度, l_{c1} 是关节 1 到关节 1 连杆重心的距离, l_{c2} 是关节 2 到关节 2 连杆重心的距离, l_{c3} 是关节 3 到关节 3 连杆重心的距离。 m_1 是关节 1 连杆的质量, m_2 是关节 2 连杆的质量, m_3 是关节 3 连杆的质量, J_1 是关节 1 连杆的转动惯量, J_2 是关节 2 连杆的转动惯量, J_3 是关节 3 连杆的转动惯量, x_1 至 x_3 是系统给定的运动角度, x_4 至 x_6 是跟踪角度。

取系统参数为

$l_1 = 0.144$, $l_2 = 0.144$, $l_3 = 0.241$, $l_{c1} = 0.072$, $l_{c2} = 0.072$, $l_{c3} = 0.098$, $m_1 = 1.738$, $m_2 = m_1$, $m_3 = 2.529$, $J_1 = 4.65e-2$, $J_2 = 4.65e-2$, $J_3 = 1.12e-1$ 。外界扰动取 $d = [0.32 \sin t \ 0.32 \sin t \ 0.32 \sin t]$ 。系统初始状态为 $x(0) = [1, 1, 0, 0]^T$ 。

设计参数 $\lambda_1 = 50$, $\lambda_2 = 80$, $k = 2.0$, $\gamma = 2.0$, 期望轨迹为光滑曲线 $y_d = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3$ 。

$$\begin{aligned}
& \text{取模糊隶属函数为 } \mu F_i^1 = \exp \left[-0.5 \left(\frac{x_i + 1.25}{0.6} \right)^2 \right], \quad \mu F_i^2 = \exp \left[-0.5 \left(\frac{x_i}{0.6} \right)^2 \right], \\
& \mu F_i^3 = \exp \left[-0.5 \left(\frac{x_i - 1.25}{0.6} \right)^2 \right], \quad (i = 1, 2, 3, 4)。
\end{aligned}$$

仿真结果如图 4.5 到 4.8 所示。

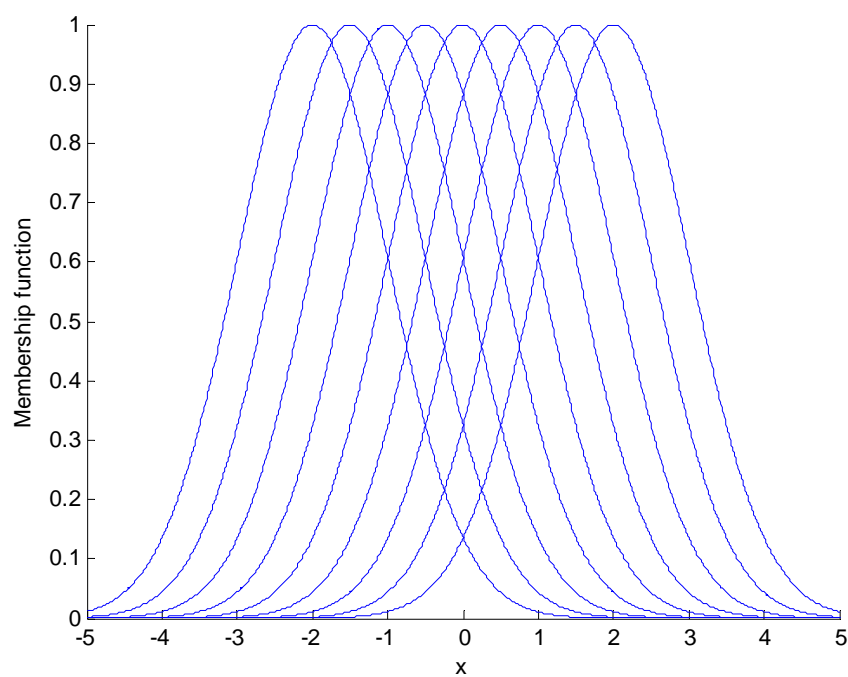


图 4.5 模糊系统的隶属函数设计

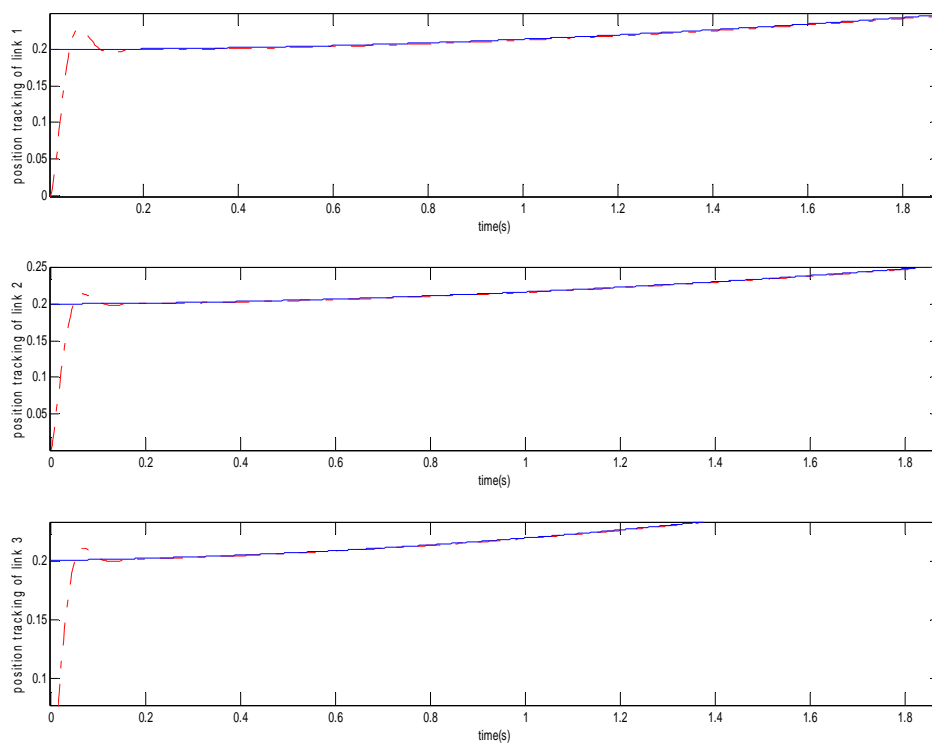


图 4.6 SCARA 机械手的位置跟踪轨迹

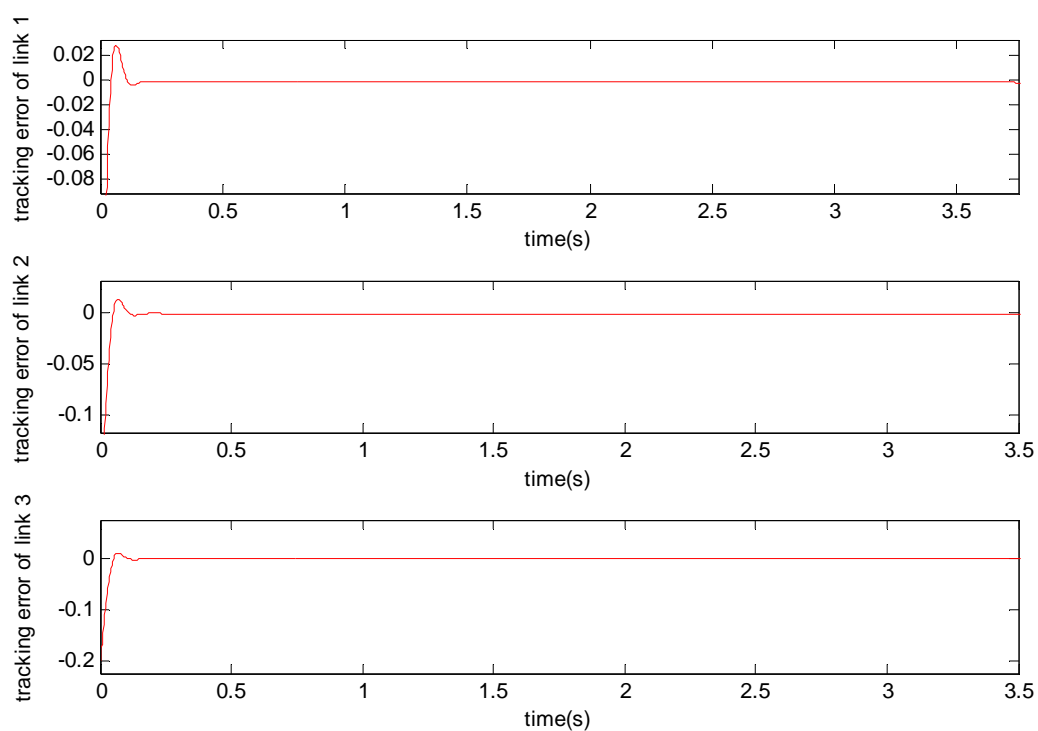


图 4.7 SCARA 机械臂跟踪误差分析

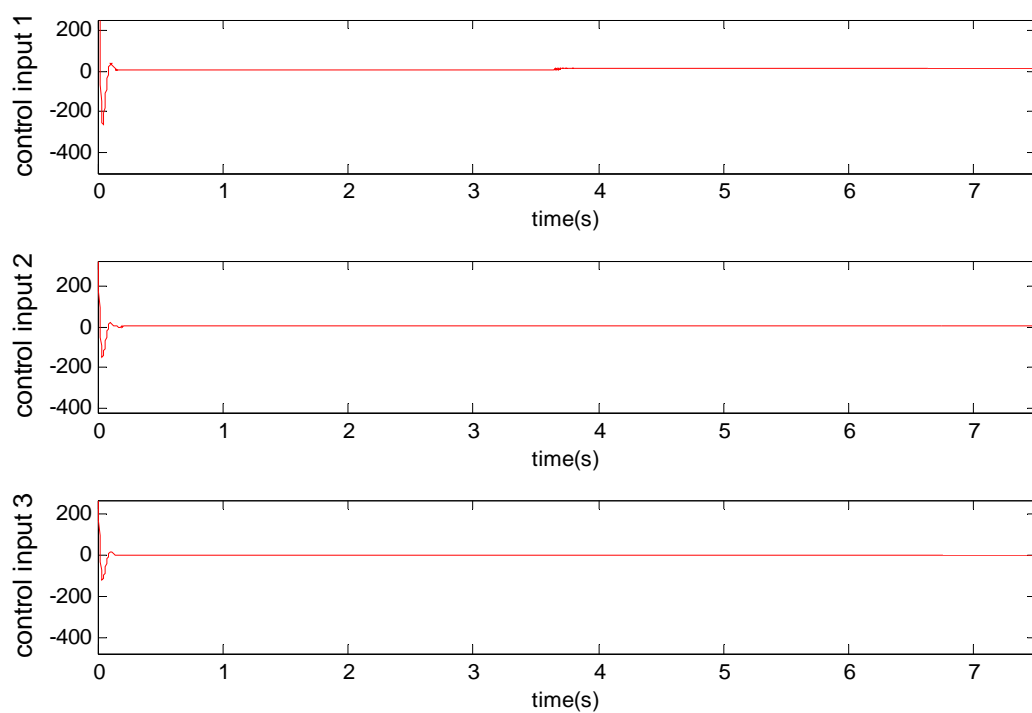


图 4.8 SCARA 机械臂控制器输入信号

仿真结果如图 4.6、图 4.7 和图 4.8 所示，位置跟踪轨迹在 0.2s 后就与曲线基本

拟合且误差不断逼近零值，响应时间短、跟踪效果好，且控制信号输入的振动在 0.2s 后基本趋于平滑稳定，以上结果表明在未知系统建模误差和不确定干扰的情况下，反演自适应模糊控制在 SCARA 机器人模型上取得了明显较好的控制效果。

4.7 本章小结

本文针对 SCARA 机器人系统设计了反演自适应模糊控制器，构造了 Lyapunov 函数，有效的解决了建模误差和外界扰动对系统的干扰，证明了该控制系统具有较好的鲁棒性和跟踪效果，并对控制信号的输入结果做了分析，实验结果表明该控制方法在提高 SCARA 机械系统动态性能和滑块控制特性方面控制效果良好。

第5章 总结与展望

5.1 总结

本文按照 SCARA 机器人设计参数相关的机器人设计标准设计了一款四关节平面型 SCARA 机器人，并对其机械结构中的 3、4 关机的耦合运动进行了解析；在此基础上研究了 SCARA 机器人在关节空间下的运动规划和反演自适应模糊控制算法。

本文的主要研究内容如下：

(1) 分析了工业机器人的应用背景，探究了 SCARA 机器人在国内外发展的过程和现状，阐述了本文的研究内容和意义，为开发一套完整的机器人产品确定了设计方案。

(2) 以机器人设计标准为参考设计了 SCARA 机器人机械结构并对其中的关键零部件进行了计算和选型，最后利用 SolidWorks 对大臂和小臂的进行了应力学分析和校核。

(3) 依照 SCARA 机器人的运动学方程，对重点的 3 号关节和 4 号关节的机械结构中的耦合运动做了解耦分析；此外研究了 SCARA 机械手在关节空间下的轨迹规划问题。

(4) 探讨了工业机器人常见的几种运动控制算法和策略，针对 SCARA 机器人结合反演自适应模糊控制算法设计了控制器，并对其跟踪算法进行了 Matlab 仿真验证，实验表明跟踪效果良好，有助于该理论的进一步探究。

5.2 展望

由于时间较为仓促，本课题所设计的 SCARA 机器人结构有待进一步优化和分析，比如对 SCARA 机器人的定位精度优化设计和添加视觉处理等方面的结构设计还有待做出探讨；其次在降低机器人本体自重和机械结构的稳定性方面还有研究。

此外，基于 SCARA 机器人的反演自适应模糊控制算法没有实际应用在设计系统中，这也是本课题一个非常值得的继续研究方面。

参考文献

- [1] 蒋刚, 龚迪琛, 蔡勇, 刘念聪, 张静. 工业机器人[M]. 成都:西南交通大学, 2011.
- [2] 魏巍. 机器人技术入门[M]. 北京:化学工业出版社, 2014.
- [3] 张涛. 机器人引论[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [4] 宋伟刚, 柳洪义. 机器人技术基础[M]. 北京:冶金工业出版社, 2015. 1-20.
- [5] 韩建海. 工业机器人[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2009. 50-52.
- [6] 李团结. 机器人技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2009.
- [7] 肖南峰. 工业机器人[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [8] 许果, 王峻峰, 何岭松. 一种基于 SCARA 机器人机械结构设计[J]. 机械工程, 2005, 04: 65-67.
- [9] 程汀. SCARA 机器人的设计及运动、动力学研究[D]. 合肥工业大学, 2008.
- [10] Urrea, Claudio; Kern, John. Trajectory Tracking Control of a Real Redundant Manipulator of the SCARA Type[J]. JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING & TECHNOLOGY, 2016, 11(1): 215-226.
- [11] 李明. 机器人[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2012.
- [12] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 09: 1-13.
- [13] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2013, 07: 963-972.
- [14] 蔡自兴, 郭璠. 中国工业机器人发展的若干问题[J]. 机器人技术与应用, 2013, 03: 9-12.
- [15] 孙英飞, 罗爱华. 我国工业机器人发展研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12: 2912-2918+3031.
- [16] 旗瀚科技. 2016 年中国机器人产业发展形势剖析[EB/OL].
- [17] 爱普生机器人, 中国市场领风骚[J]. 伺服控制, 2015, Z4: 6-7.
- [18] 张红霞. 国内外工业机器人发展现状与趋势研究[J]. 电子世界, 2013, 12: 5+7.
- [19] 桂仲成, 吴建东. 全球机器人产业现状趋势研究及中国机器人产业发展预测[J]. 东方电气评论, 2014, 04: 4-10.
- [20] 梁文莉. 快速增长的中国机器人市场——2012 中国工业机器人市场统计数据[J]. 机器人技术与应用, 2014, 03: 2-7.
- [21] 梁波. 中国机器人技术和产业调查[J]. 高科技与产业化, 2015, 03: 60-65.
- [22] 李渤. SCARA 机器人多领域联合仿真与结构优化研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [23] 王金娥, 罗生梅. 机电一体化课程设计指导书[M]. 北京:北京大学出版社, 2012. 223-233.
- [24] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [25] 宋伟刚. 机器人学—运动学、动力学与控制[M]. 北京:科学出版社, 2007.
- [26] 张红. SCARA 机器人小臂结构特性分析[D]. 天津大学, 2008.
- [27] 高东强, 杨磊, 韩昆, 张希峰. SCARA 机械手的轨迹规划及运动学分析[J]. 机械设计与制造, 2015, 01: 269-272.

- [28] Al, Mashagbeh, Mohammad;Khamesee, Mir, Behrad. Virtual performance evaluation of an industrial SCARA robot prior to real-world task[J]. MICROSYSTEM TECHNOLOGIES-MICRO-AND NANOSYSTEMS-INFORMATION STORAGE AND PROCESSING SYSTEMS, 2015, 12(12): 2605-2609.
- [29] 毛燕,徐晓宇,高峰. SCARA 机器人的结构动态设计与改进[J]. 机械,2007,07:56-58.
- [30] 杨成文,张铁. 基于 ADAMS 的 SCARA 机器人运动学仿真研究[J]. 机床与液压,2011,21:118-120+114.
- [31] 张皓钧. SCARA 机器人运动学参数与视觉标定研究[D].哈尔滨工业大学,2013.
- [32] 方健. SCARA 机器人运动控制器设计及应用研究[D].吉林大学,2007.
- [33] 胡杰, 张铁. 基于 SCARA 机器人的运动学分析及关节解耦[J]. 机床与液压, 2011, 39(21): 28-31.
- [34] 高静. 类 SCARA 并联机器人最优轨迹规划[D].河北工业大学,2014.
- [35] 孟飞武. 面向制鞋涂胶的 SCARA 机器人结构设计与研究[D].安徽理工大学,2015.
- [36] 杨成文. 平面关节机器人研制及其轨迹规划[D].华南理工大学,2012.
- [37] CHEN Yuzhen,XIE Fugui,LIU Xinjun,ZHOU Yanhua. Error Modeling and Sensitivity Analysis of a Parallel Robot with SCARA(Selective Compliance Assembly Robot Arm) Motions[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2014,04:693-702
- [38] 赵彬,刘振宇,邹风山,蒋哲文. 单臂 SCARA 真空手运动学建模与仿真[J]. 机械设计与制造,2014,08:183-185.
- [39] 左富勇,胡小平,谢珂,朱秋玲. 基于 MATLAB Robotics 工具箱的 SCARA 机器人轨迹规划与仿真[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2012,02:41-44.
- [40] 许阳. 基于 CPAC 的六自由度开放式机器人控制系统的开发[D].广东工业大学,2013.
- [41] 孟凡轮. SCARA 机器人及其远程控制系统的研究[D]. 深圳:哈尔滨工业大学, 2008.
- [42] 张家驹. 基于视觉伺服的 SCARA-Tau 并联机器人研究[D].南京航空航天大学,2012.
- [43] Yoshimura, T. Design of a simplified adaptive fuzzy backstepping control for uncertain discrete-time nonlinear systems[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF SYSTEMS SCIENCE, 2015, 46(5): 763-755.
- [44] 王耀南. 机器人智能控制工程[M]. 北京:辞学出版社, 2004.
- [45] 雨宫好文. 机器人控制入门[M]. 北京:辞学出版社, 2001.
- [46] 刘金琨. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [47] 蔡自兴. 智能控制[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [48] Xu Chuansong, Wang Yongchu, Yang Guanlu. Backstepping Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control of Multi-joint Robot[J]. ELECTRICAL AUTOMATION, 2011, 33(2): 28-31.
- [49] Mohammad Mahdi Azimi•Hamid Reza Koofgar. Adaptive fuzzy backstepping controller desihn for uncertain underactuated robotic systems[J]. Springer Science, 2014, 79(5): 1457-1468.
- [50] 徐传忠, 王永初, 杨冠鲁. 多关节机器人的反演自适应模糊滑模控制[J]. 电气自动化, 2011, (2): 28-31.
- [51] Thomas, Bräunl. Embedded Robotics—Mobile Robot Design and Application with Embedded Systems[M]. Berlin:Spring-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

- [52] 郑剑飞,冯勇,郑雪梅,杨旭强. 不确定非线性系统的自适应反演终端滑模控制[J]. 控制理论与应用,2009,04:410-414.
- [53] 弋艳丽. 基于反演自适应的板球控制的设计[D].河南科技大学,2015.
- [54] 李晓刚,刘晋浩. 基于反演设计的码垛机器人神经网络自适应控制[J]. 包装工程,2012,01:80-85.
- [55] Sung-Hua Chen, Li-Chen Fu. Observer-based backstepping control of a 6-dof parallel hydraulic manipulator[J]. Control Engineering Practice, 2015, (36): 100-112.
- [56] Jorge, Angeles. Fundamentals of Robotic Mechanical Systems[M]. New York:Springer-Verlag, 2004.
- [57] 崔敏其. SCARA 机器人的拉格朗日动力学建模[J]. 机械设计与制造,2013,12:76-78.
- [58] Bounar, N ;Boulkroune, A ;Boudjema, F ;M'Saad, M ;Farza, M. Adaptive fuzzy vector control for a doubly-fed induction motor[J]. NEUROCOMPUTING, 2014, 154(2): 756-769.
- [59] Theodorakopoulos, Achilles ; Rovithakis, George, A. Guaranteeing preselected tracking quality for uncertain strict-feedback systems with deadzone input nonlinearity and disturbances via low-complexity control[J]. AUTOMATICA, 2015, 54(10): 135-145.

致 谢

匆匆岁月，转眼即逝，从进入大学校园到离开这里已经过去七年的时光，在这里我结识了不少良师益友，他们在我学习和成长的过程中给予我许多的帮助和关心，使我受益颇多，特别是我的父母，一路走来不断地支持和鼓励我，我才可以顺利完成学业。

研究生学习的这三年里，我遇到过不少的麻烦和挫折，面对专业方向的变动，我的基础知识不够牢靠，有过灰心和失望的时刻，但是实验室的老师和师兄们对我无私的帮助，不断的鼓舞我的学习热情和兴趣，使我这三年的学习生活显得尤为充实和快乐，也让我对进入工作岗位充满了信心。

如今我已从当年那个刚进校门不知所措的少年，成长为一个有责任有担当的亲年。在这里我要感谢导师张铮教授，感谢三年来您对我孜孜不倦的教诲和学习上的帮助，论文中的相关工作在您的指导下得以顺利的完成，在此向您致以最崇高的感谢。

同时感谢师兄陶兴鹏、曾论；师姐王婵，对我研究工作和求职过程中的帮助。感谢同学杨帆、肖哲、李秋实、向严严、杨林杰和伍义刚，作为同届研究生，大家在学习和生活中互相勉励互相帮助，对我能力提高起了很大的帮助。感谢李绍军、鲁志军、魏雄杰和王顺帆师弟在实验室里对我项目研究的协助。此外，还要特别感谢在论文写作中对我有所帮助的校友夏云同学和学妹佃晓洲同学。

最后，再次感谢我的父母和亲人无私的帮助与爱，让我能在求学之路上稳步向前，他们朴实而简练的话语促使我不断的前进，衷心的感谢您们！

夏添

二零一六年六月于湖工