

北京信息科技大学

毕业设计（论文）

题目： 多自由度表取机械臂建模与仿真

学 院： 机电工程学院

专 业： 机器人工程

学生姓名： 宋耀辰 班级/学号： 机器人 1802/2018010089

指导老师/督导老师： 马飞

起止时间： 2022 年 2 月 21 日至 2022 年 6 月 10 日

马飞

2022.05.31

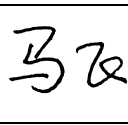
毕业设计（论文）任务书

学院：机电工程学院

专业：机器人工程

班级：机器人 1802

学生情况		指导教师情况			题目类型	
姓 名	学 号	姓 名	职 称	单 位	理工专业	文、管、经专业
宋耀辰	2018010089	马飞	讲师(高校)	机械电子工程	理论研究 <input type="checkbox"/>	理论研究 <input type="checkbox"/>
					科研开发 <input type="checkbox"/>	应用研究 <input type="checkbox"/>
					工程设计 <input checked="" type="checkbox"/>	调查研究 <input type="checkbox"/>
题 目	多自由度表取机械臂建模与仿真			是否实物型毕设	是 <input type="checkbox"/> 否 <input checked="" type="checkbox"/>	
主要内容 以及 目标	(毕业设计应完成的主要内容，设计任务达到的目标) (1) 完成表取机械臂的方案论证和机械设计； (2) 完成机械臂电机选型； (3) 完成机械臂机器人学建模和机电系统建模； (4) 完成表取仿真实验；					
成果 形式	(毕业设计完成具体工作量；成果形式；验收方式) (1) 完成机械臂电机搭建图纸一套。 (2) 完成机械臂运动学建模（详细代码）。 (3) 完成机械臂机电系统仿真模型和测试结果。 (4) 毕业论文。					
基本 要求	(对完成设计任务方面的具体要求：对理工专业应提出设计技术参数、数据及来源、调试所用仪器设备等) 按毕设指导书要求完成毕业设计。					
实习 调研 要求	(对部分有实习环节的专业，提出实习或调研的具体要求，包括调研提纲、实习时间、地点和具体内容要求；文、管、经专业提出对论文论点有关论据、数据和素材的搜集要求) 调研国内外相关设备和论文。					

主要参考文献	(指导教师提供有关参考资料、工具书、期刊论文等) [1] 刘沛文 六自由度协作机械臂建模与仿真[D].北京信息科技大学,2021 [2] 李东方 面向搬运任务的七自由度空间机械臂运动规划[D].北京信息科技大学,2021 [3] 杨淞.一种六自由度机械臂的运动控制系统设计[D].上海:上海交通大学,2014.02. [4] 张鹏.行星采样机械臂的结构设计与轨迹规划[D].江苏科技大学,2016. [5] 刘杰.行星采样机械臂的设计与分析[D].江苏科技大学,2013. [6] 陈引生.月壤采样机械臂设计及动态特性研究[D].哈尔滨工业大学,2009.		
主要仪器设备或开发环境	(根据毕业设计题目情况需要,各学院统一填写要求) 计算机 MATLAB/Simulink/Simscape		
毕业设计(论文)开始日期	2022. 02. 21	毕业设计(论文)完成日期	2022. 06. 10
毕业设计(论文)进度计划(起止时间、工作内容)			
(指导教师对毕业设计(论文)的进度计划提出要求,至少详细到前期、中期和答辩阶段) 前期阶段:完成系统整体方案论证,完成机械臂机械系统设计,包括电机的选型计算,完成电机搭建图; 中期阶段:根据设计图纸和设计要求,完成机电系统仿真模型,根据仿真要求,完成仿真试验; 答辩阶段:完成论文			
指导教师(签字): 指导教师(签字):			年 月 日 年 月 日
学院毕业设计(论文)领导小组审查意见: <div style="text-align: center;"> 组长(签字): 年 月 日 </div>			

摘要

随着 21 世纪的到来，世界人口数目激增，地球的环境容纳量是有限的。所以，探索适宜人类居住的第二星球是十分必要的。谁率先在外太空行星的研究上取得成果，谁就占领了未来生活的制高点。世界上不同国家和机构纷纷研究出探测器登陆行星。这时，安装在行星探测器上的表取机械臂，作为一种科学有效载荷，就发挥着重要作用。尽管目前行星机械臂的研究已经非常深入，但是对其在 Simscape 下的机电系统建模仿真存在一定的研究空缺。并且考虑到成本与安全性问题，运用和实际相一致的设备参数在 Simscape 中预进行先仿真是一种严谨的措施。

本文根据实际太空探测器上安装的机械臂的功能及要求，设计一套空间表取机械臂。首先对表取机械臂在 SOLIDWORKS 中进行简单的结构设计，并进行构型分析和电机选型，之后在 MATLAB 中，运用改进 D-H 参数法建立机械臂运动学模型，用 Robotics Toolbox 工具箱加以验证，求出雅可比矩阵和工作空间，完成机器人学分析。最后根据任务要求，基于 Simscape 的机电系统建仿真，近似模拟机械臂对行星空间土壤的抓取、搬运等功能，对末端执行器进行合理轨迹规划，设置一系列目标点。最终完成目标重物抓取，并平稳的摆放至指定区域的可视化仿真。

关键词：表取机械臂；Simscape；机电系统建模；Robotics Toolbox；轨迹规划

Abstract

With the advent of the 21st century, the world's population has soared and the earth's environmental capacity is limited. Therefore, it is necessary to explore a second planet suitable for human habitation. Nowadays, different countries and institutions around the world have been working on probes to land on planets. Thus, Sampling manipulator installed on the planetary probes, as a scientific payload, plays an important role. Although the research of planetary manipulator has been very in-depth, modeling and simulation of its Mechatronics systems based on Simscape is less explored. And considering the cost and security issues, it is a rigorous measure to perform pre-simulation in Simscape using equipment parameters consistent with the real scenario.

In this paper, we proposed and designed a set of sampling manipulator according to the actual functions and requirements of the robotic arm mounted on a space probe. Firstly, the Mechanical structure design, configuration analysis and motor selection of the sampling manipulator are carried out in SOLIDWORKS. Secondly, the kinematic model of the robotic arm is built in MATLAB using the modified D-H parameter method, verified with the Robotics Toolbox for MATLAB, and the Jacobi matrix and workspace are derived to complete the robotics analysis. Finally, according to the requirements of the mission, we simulated the electromechanical system based on Simscape. Specifically, We made the end-effector carry out reasonable trajectory planning along a series of pre-set target points, which approximately simulated the function of the sampling manipulator to grab and carry soil in the outer space environment. In conclusion, Experimental results show that a good visual simulation effect of grabbing and placing the target weight smoothly into the designated area. This paper reveals the validation of the experiment carried out in Simscape both in virtuality and reality.

Keywords: Sampling manipulator; Modeling of Mechatronic Systems; Simscape; Robotics Toolbox; Trajectory planning

目录

摘要（中文）	I
（英文）	II
第一章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 文献综述	1
1.2.1 国外表取机械臂研究现状	1
1.2.2 国内表取机械臂研究现状	4
1.3 论文研究内容	5
第二章 机械臂构型设计与电机选型	7
2.1 机械臂构型设计	7
2.2 电机转速的确立	8
2.3 电机转速的确立	9
第三章 机器人学分析	14
3.1 机械臂的运动学理论分析	14
3.1.1 机械臂位置与姿态描述	14
3.1.2 DH 参数法运动学模型建立	14
3.2 机械臂正运动学	16
3.3 机械臂逆运动学	18
3.3.1 逆运动学理论分析	18
3.3.2 选取最优解	20
3.3.3 机械臂逆运动学代码验证	21
3.4 工作空间分析	21
3.5 雅可比分析	22
第四章 机电系统建模	26
4.1 机械臂物理模型的导入	26
4.2 减速步进电机模块建模	27
4.3 模型综合测试	29
第五章 表取机械臂的路径规划	35
5.1 机械臂工作路径节点及抓取策略分析	35
5.2 五次多项式插值理论	40
5.3 表取机械臂关节空间规划	41
5.4 笛卡尔空间直线插补规划	44
第六章 机械臂机电系统抓取仿真	47
6.1 基于 Matlab 机器人 RTB 工具箱的可视化仿真与分析	47
6.2 基于 Matlab 机器人系统工具箱及 Simscape 的可视化仿真与分析	50
第七章 总结与展望	58
参考文献	59

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

从古至今，人类对于地外文明就充满了好奇。自上世纪 70 年代，以美国苏联为首的科技强国，开始对火星、月球的探索，取得了辉煌成果。发现地球的卫星及地外行星具有大量稀有资源。随着我国科技与航天航空事业的进一步发展，对外太空行星的探索也成为我国当前科学研究的重要热点。如对外宇宙的探索还需要运用很多技术，通过对这种技术的研发与运用，就能够促进科技的快速发展。而我国作为世界大国，通过进行包含火星在内的行星探索，不但能够增加对宇宙的了解，同时还能够促进太空科技、人工智能、机器人技术以及其他领域科技的迅速发展，从而帮助我们抢占了太空技术的制高点，进一步提升了我国的综合科学技术水平。

随着世界人口数量的日益激增，地球的环境承载力在不久的将来将会到达上限。因此，探索外太空适宜人类的居所和查找外星生命存在的痕迹，是十分有必要的。然而外太空行星具有相当恶劣环境，许多星球路途遥远，以目前的技术到达星球需数十年，让人类直接探索的危险性和成本性是不可预见的。这就需要太空探测车代替人类，先登陆外太空表面，进行一系列探测。传统意义上，表取机械臂安装于月球与火星探测器上，便于探测器进行采集、抓取样本的工作，并收集材料送回至地球。如今，机械臂功能更加丰富，装载有各种探测器，承担起在寻找外太空生命、稀缺资源的责任。

要完成这些科学目标，需要设计一款类似手臂的机器人，携带一些科学仪器用来取样及分析，表取机械臂就是一种能配备采样分析仪器，并完成定位探测任务的有效装置^[1]。因此，表取机械臂经常成为宇航局和太空实验室的关键仪器。通过机械臂装载的仪器就能够完成宇宙行星的土壤、岩石分析等科学目标。表取机械臂的设计与研究不仅为我国空间行星工程采样探测做先期的基础技术研究，其技术同样也可以应用在其他领域，比如考古挖掘、深海探测、开采矿产资源等不适合人类实地考察探测的领域^[2]。

本文研究的目的是根据探测器上机械臂的功能及要求，设计一套空间采样表取机械臂系统安装在车体上，用来实现对空间土壤的采样、加热、抛弃等功能。根据任务要求，需要对末端执行器进行合理轨迹规划，设置一系列目标点。

1.2 文献综述

在行星表面探测作业时，称载科学载荷的机械臂作为高精尖设备，被国内外很多机构相继研究，并广泛应用于星球探测作业中，通过爪子，挖掘铲，Spectrometer, Microscopic Imager 等仪器，完成探测、定位、采样、搬运等作业任务。美国、日本、苏联、欧盟国家这些科技大国的太空研究机构，都在不同时期采用漫游车搭载机械臂的方式进行行星表面的探测^[1]。其中以美国为首，在此领域研究较早，科技成果最为丰富，采集的数据也呈现多样化。

1.2.1 国外表取机械臂研究现状

自从 1997 年 Rocky7 登陆火星以来，国外太空表取机械臂取得了一些列科研成果、空间机械臂已经实现了目标物抓取、挖掘、倾倒、摆放，检测识别等功能。作为美国第一台送上太空行星的探测车，Rocky7 上装载的机械臂是所有后续表取机械臂设计的鼻祖。机械结构很简单仅有两自由度，质量约为 700 克，位于漫游车的头部，能够深入行星土层 10cm 的程度。如图 1.1 所示。该机械臂带有二自由度的铲子机构，用于挖掘或者运输样品。机械臂有 3 种功能：挖掘、倾倒以及获取探测器数据。



图 1.1 Rocky7 上的机械臂

2003 年，搭载了由 Autonomous Solutions 公司设计的五自由度机械臂的漫游者号火星探测器成功登陆火星，如图 1.2 所示。机械臂臂展 1m，重量仅 4.2kg，五个关节电机均采用瑞士 maxon 公司的直流伺服电机。机械臂肩部的两个关节分别用于水平横向移动和竖直方向提拉。肘部的一个关节，完成机械臂提拉。腕部的 Turret 提供俯仰和旋转这两个功能，分别对应两个驱动器驱动。该机械臂携带四种科学载荷：Microimager, proton ray spectrometer, Musbauer spectrometer 和 planetary rock grinding tool。多种科学仪器以 Turret 为中心对称分布，装配在手臂的末端。2004 年，机械臂跟随机遇号和勇气号探测器成功着陆完成任务，对探究宇宙文明献出很高的参考价值。



图 1.2 火星车 5 自由度机械臂

2008 年美国“凤凰号”火星探测器在火星表面着陆；该探测器上的机械臂拥有 4 个自由度，展开全长约为 2.4 m，其设备可长期忍耐火星极其严峻的温度环境，机械臂末端执行器包含 Digging shovel, thermal analyzer, electrochemical analyzer MECA^[3]。

2011 年 11 月份，作为世界首辆核动力推动的火星车，好奇号携带了充足的燃料成功登陆火星，足以在火星维持工作数 10 年，好奇号的工作任务是寻找火星上的生命痕迹，旨在发现火星维持生命的可能性。好奇号的机械臂(图 1.3 所示)臂长是勇气号和机遇号之和，全长约 2 米，可以装载约 30 千克重的高精尖仪器作为载荷，用于挖掘洞穴、粉碎沙块，岩石。传承着 Spirit 号和 Opportunity 号机械臂的 5 个自由度关节型构型设计，最后一个关节也是通过旋转来选择探测需要的工具，但是相较于之前的探测器，携带了更多仪器。

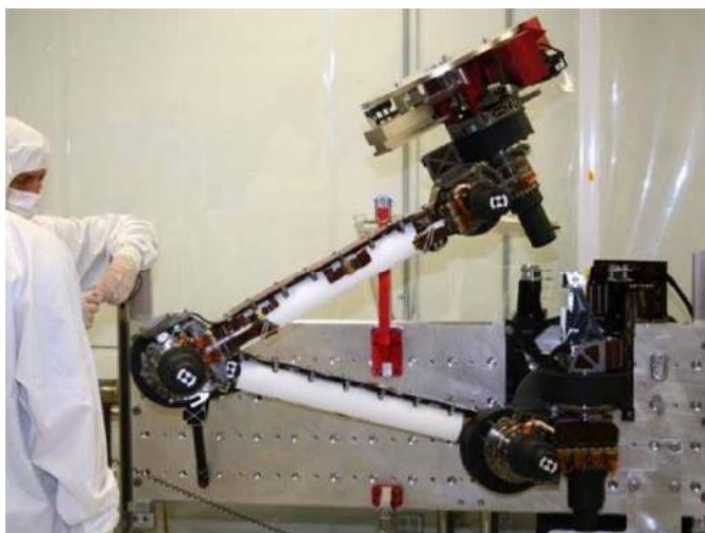


图 1.3 好奇号搭载的机械臂

2018 年 11 月 27 日,洞察号火星探测器随着宇宙神 5 号火箭着陆到火星。洞察号上的仪器配备的机械臂 (IDA) (如图 1.4) 长 2.4 米, 用于选择合适位置, 部署地震仪和热流探头。洞察号作业时, 该手臂将地震仪和热流探头部署在火星表面上。前者通过运用地震学与测地调查对火星内部进行深入探测, 来观测火星地震进而研究火星的内部结构, 获得火星地表深处岩石结构, 让人们了解亿年前火星的形成及期间的地貌变化过程。后者用于监测火星内部热活动, 测量火星的温度, 用于对火星上过去生命特征进行探测。综合而言, “洞察号”将通过各类仪器探测深埋在火星内部的信息, 来解决类地行星形成的基本问题。



图 1.4 洞察号上的机械臂工作场景

2020 年 3 月 5 日, NASA 公布新一代火星车: 毅力号,它装载的机械臂 (如图 1.5) 与好奇号高度相似, 毅力号的机械臂全长约 2.1m, 手臂使用 5 个精细设计的关节。机械臂的末端执行器安装了一个灵巧机械手。然而, 毅力号上的机械臂总质量高于往期探测器上的机械臂, 由于承载多套科学仪器和 1 台用于近距离成像的相机, 拥有超过 45 公斤的科学有效载荷能力。其主要目的在于寻找火星存在生命的迹象, 探索火星远古时期生存环境^[4]。通过机械臂上承载的科学仪器, 寻找可能的生物标记物, 将样本通过机械臂抓取取、存储起来。进而评估火星对人类未来搬迁的可宜居性。其次, 目的在于探究火星地质演变过程, 重点研究火星表面环境, 寻找这些岩石环境中是否有微生

物生存的迹象。该款机械臂通过强大的岩石钻取功能,将样本收纳到样本箱。

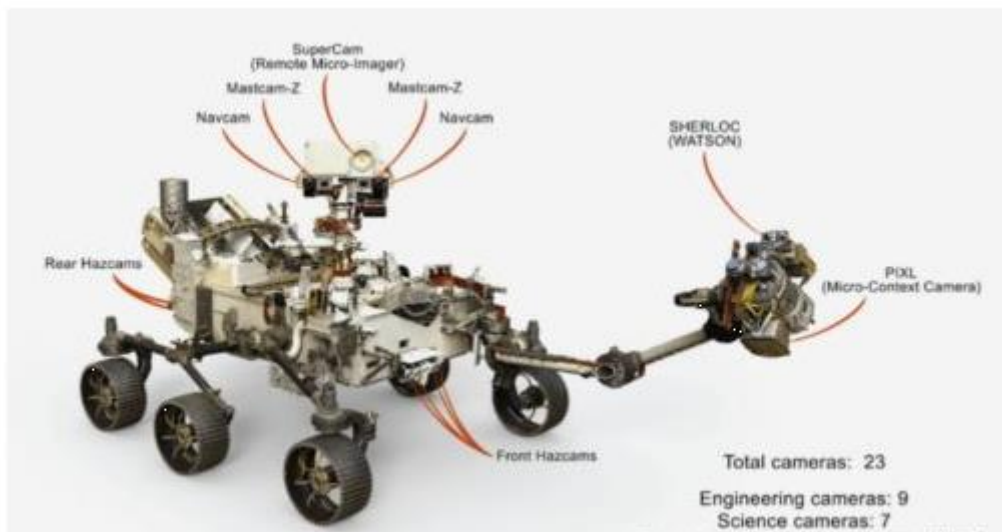


图 1.5 毅力号装载的机械臂工作场景

1.2.2 国内表取机械臂研究现状

国内表取机械臂的研究,相比国外起步较晚,21 世纪刚刚开启此项目的研发。目前中国共进行 5 次探月工程,全部成功着陆月球,奔向火星计划进行两次,仅成功登陆一次,就是 2020 年的祝融号。

2013 年 12 月,玉兔号探测器乘坐嫦娥三号火箭成功登陆月球,据此,我国成为美国、苏联后第三个成功将探测器送上月球的国家。搭载在玉兔号探测车前端 3 个自由度机械臂(图 1.6 所示),长 0.6m,重 3.5Kg,定位精度 $\pm 2\text{mm}$ 以内,能耗低 5w,末端携带了钻孔和打磨等采样设备,此次探测目的主要是分析月壤元素^[5]。

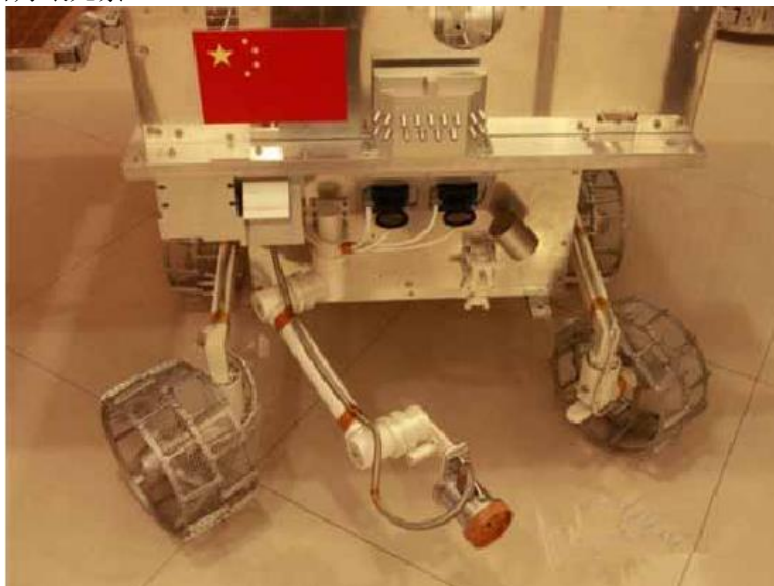


图 1.6 玉兔号前端机械臂

2016 年冬季,神舟十一号火箭船在中国空间实验室,基于天宫二号的机械臂操作系统(如图 1.7),实现了轨道环境下人机协同维修任务,首次完成理论轨道识别、传递信息、抓取小球等检测,并成功实现旋拧螺钉维修试验项目,如图 1.7 所示。

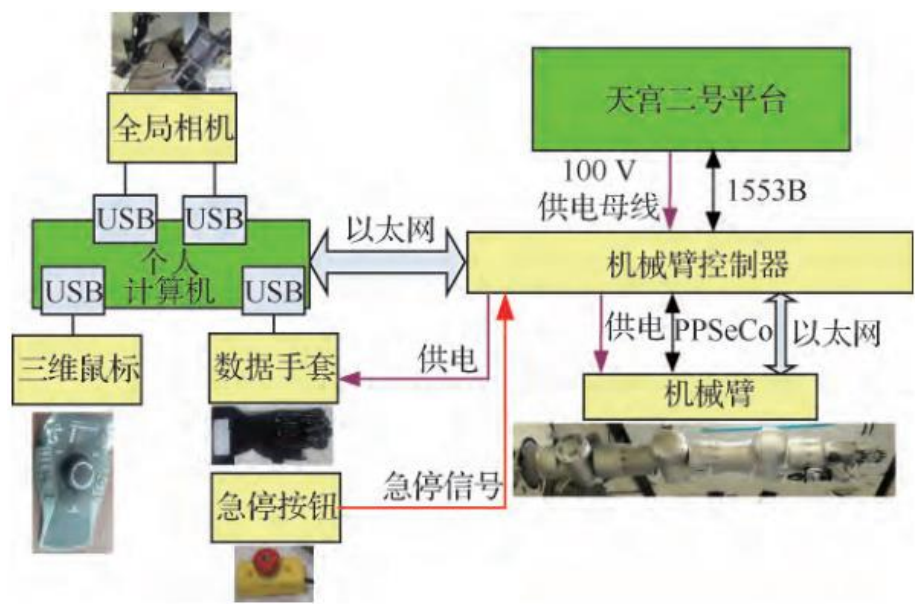


图 1.7 天宫二号空间机械臂系统

1.3 论文研究内容

本课题以四自由度表取机械臂为研究对象，主要研究表取机械臂在执行抓取任务时的轨迹规划及抓取仿真的方法。其中表取机械臂系统结构如图 1.8 所示。由于整个毕业设计全程以 Matlab 程序和 Matlab 机器人工具箱及系统工具箱仿真的形式进行，不涉及实体结构，故大大简化了机械设计部分及刚度的过程；也忽略了各臂杆的有限元分析。为方便计算研究，假设基座状态为固定基座，故基座的运动对系统造成的扰动可忽略不计；本文涉及末端执行器对于目标物体的识别、抓取及释放的过程；假设机械臂的全部连杆均为质量均匀分布的圆柱刚体。所涉及的研究内容包括表取机械臂的构型设计、电机选型、机器人学研究、运动轨迹规划、机电系统建模仿真。基本研究内容如下：

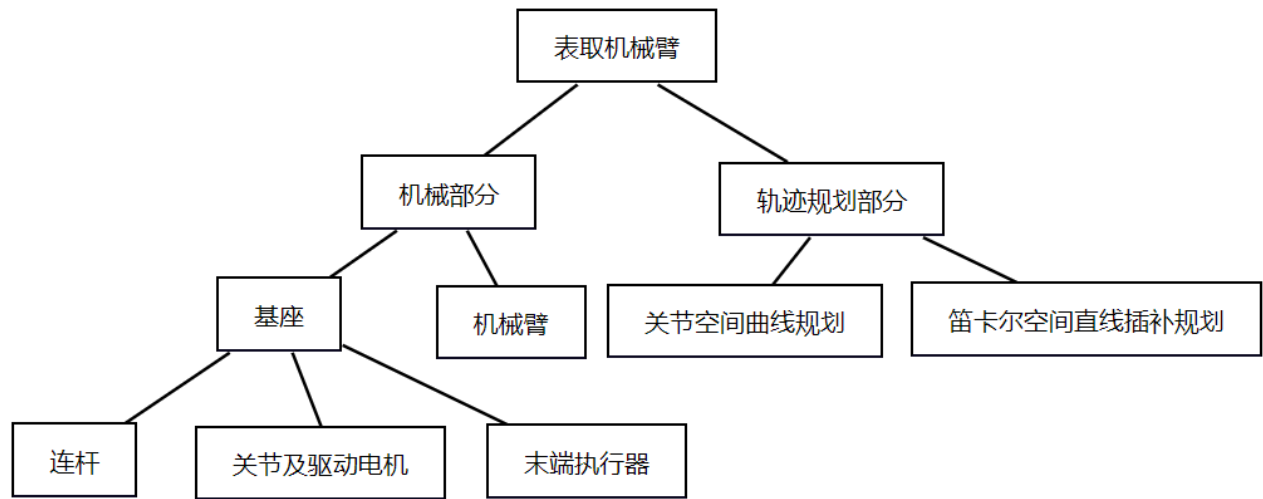


图 1.8 表取机械臂系统结构框图

(1) 表取机械臂的方案论证和机械设计

要完成行星探测采样的任务，机械臂需要具备折叠、伸展、抓取和搬运姿态，这就需要机械臂构型的准确设计，以满足不同的位姿需要。本项目选定了 4 自由度的关节型机械臂，将肩关节、肘关节和腕关节这三个关节设计为互相平行，第一个腰关节垂直于后三个关节。前三个关节决定了末端执行器的位置，腕关节决定了其姿态。

(2) 完成机械臂电机选型

根据机械臂构型及自由度分布，为了简化控制难度，确定选用步进电机控制机械臂。根据静力学知识，计算各关节极限扭矩。根据各关节电机参数，选定行星减速箱，并将转速比与电机转矩转速匹配。

(3) 机械臂机器人学建模和机电系统建模

构建四自由度机械臂的运动学模型，描述相邻连杆之间的变换关系以及各连杆关节和末端执行器的位姿、角速度、线速度和角加速度。得到运动学正解和逆解方程，并推导出机械臂的雅可比矩阵，利用蒙特卡罗方法分析了工作空间。之后在运动学模型基础上，在 Simscape 中建立机电系统模型，得到表取机械臂 Simulink 仿真模型。在此基础上对机械臂在 Simscape 下搭建的步进电机的稳定性和准确性进行测试分析，并以上述分析为基础准备之后的空间机械臂轨迹规划、抓取实验。机电系统建模是将各仿真系统模块化，力求反映实际工作情况。满足“高内聚 低耦合”的设计标准，即不同模块之间关系越少越好，同一模块封装起来，这样系统很稳定。

(4) 完成机械臂轨迹规划与表取仿真实验

在搬运抓取任务中，设置起始点、预备点、目标抓取点和目标物摆放点。综合运用关节空间规划和笛卡尔直线插补规划完成抓取仿真。并根据目标物、放置平台的位置及机械臂自身结构，进行机械臂轨迹的最优化规划，确保空间机械臂在整个任务周期内轨迹平滑性和连续性。通过示波器观察各个步进电机随时间变化的关系。得到各关节笛卡尔空间、关节空间的位置变化图像及各关节电机转矩曲线。将仿真测试结果的实验值假设为实际值，与理论值对比，得出结论。

第二章 机械臂构型设计分析与电机选型

机械臂的整体自由度分布是根据机械臂所要完成的任务来进行选择的，本项目任务是模拟太空表取机械臂抓取采样的工作，经过多方论证，大多机械臂采用四自由度，所以该表取机械臂采用四自由度构型设计。由于机械臂自由度数目较低，所以结构比较简单，本项目的重点设计内容就放在了电机选型以及大臂小臂两者的长度设计。电机选型及臂长确定都需要实际计算，首先进行机械臂数学建模，在 MATLAB 下设定初始长度后，仿真分析机械臂工作空间。得到机械臂运动模型之后，得到最优杆长。

2.1 机械臂构型设计

机械臂的大臂小臂长度借鉴美国 NASA 火星车洞察号上机械臂的长度，手臂的两个管状部分是由铝合金材料制成。大臂长约 1 米，而前臂长 0.87 米。延伸到极限，臂可以到达距离着陆器 2 米的区域。

文本设计的表取机械臂是应用在 60kg 级重型行星探测车上，因此机械臂的结构设计、质量属性和能量损失等参数都要求严格计算的，如表 2.1 所示。通过多方考察，机械臂的末端夹爪质心到电机旋转轴距离 L_1 认为的设定为 100mm，臂杆 4 与夹爪整体质心到关节 4 中心长度为 83mm，臂杆 3、4 与夹爪整体质心到关节 3 中心长度为 612mm，臂杆 2、3、4 与夹爪整体质心到关节 2 中心长度为 964mm，臂杆 1、2、3、4 与夹爪整体质心到关节 1 中心长度为 92mm，将机械臂摆放到最危险位置，即水平伸长放置状态。加上待抓取负载重量，负载质量假设为 3kg，末端施加 3kg 物体的力，运用理论力学的方法，将机械臂看作连杆，计算出每个电机在静载情况下的最大极限力矩。由于太空表取机械臂在外太空作业时，尺寸及重量对工况影响很大，任何微小质量变化也会影响实际精度。而重量主要由材料相关，采用较轻材料可降低整体负载，进而降低电机负荷，故本机械臂采样铝合金 6061 材料。机械爪末端执行器采样抓取式设计，这样设计控制难度低，这种结构满足采样对象为月球火星土壤和表面岩石的要求，同时大大降低对机械爪的冲击。

表 2.1 机械臂设计参数

参数	数值	描述
自由度(DOF)	四个旋转关节	中空结构设计
伸展距离	半径约 2m 范围	定位精度 $\pm 5\text{mm}$
质量	约为 12kg	含电子载荷
材料	铝合金 6061	臂杆及手爪部分
减速器	一级减速	行星减速器
末端执行器抓取力上限	50N	抓取式

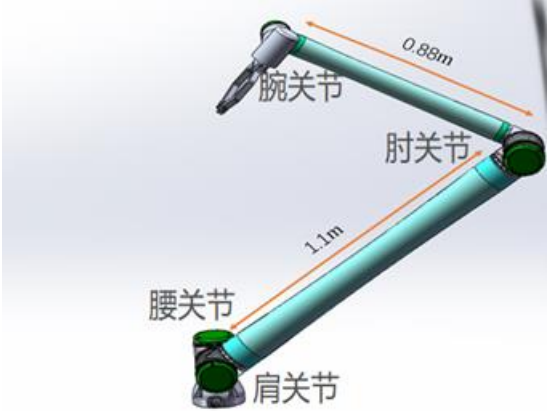


图 2.1 机械臂关节分布图

机械臂总质量 12.1kg，展开长度 2.1m，选电机顺序：由上而下，先算爪部电机扭矩，末端的电机型号确定了，电机的质量也就确定了。加上电机重量后，依次算前端关节所需力矩，所以再根据上面的质量算取力矩依次选取下面的电机电机的选取主要依靠两个主要因素，转速与转矩。

转矩的分析边界依据为：将机械臂摆放到最危险位置，即水平伸长放置状态。加上待抓取负载重量，负载质量假设为 3kg，末端施加 3kg 物体的力，运用理论力学的方法，将机械臂看作连杆，计算出每个电机在静载情况下的最大极限力矩。之后将得出的极限力矩，按照一定倍数放大，除以 0.6，得到动态力矩。这个最终参数是实际选择的电机力矩参数的经验值。

2.2 电机转速的确立

转速的分析边界依据为：运动控制中，由从笛卡尔空间反推的。在笛卡尔空间测出机械臂工作的运动的末端执行器沿着 xyz 三个方向的平移和转动速度，用雅各比矩阵逆乘，反推到四个关节空间的角速度。并将得数值画出各关节角速度曲线图。

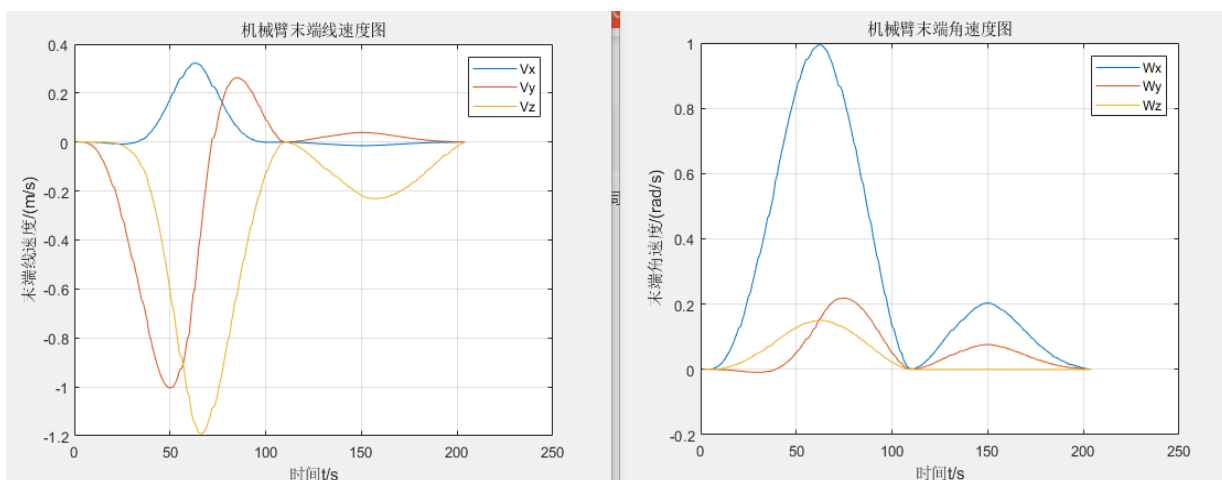


图 2.2 机械臂末端执行器线速度与角速度

由图得到机械臂实际运动过程中末端最大移动线速度为 -1.2m/s，最大移动角速度为 1rad/s。通过自编雅可比求解代码，可以算出各关节角速度及绘制出各关节速度图。

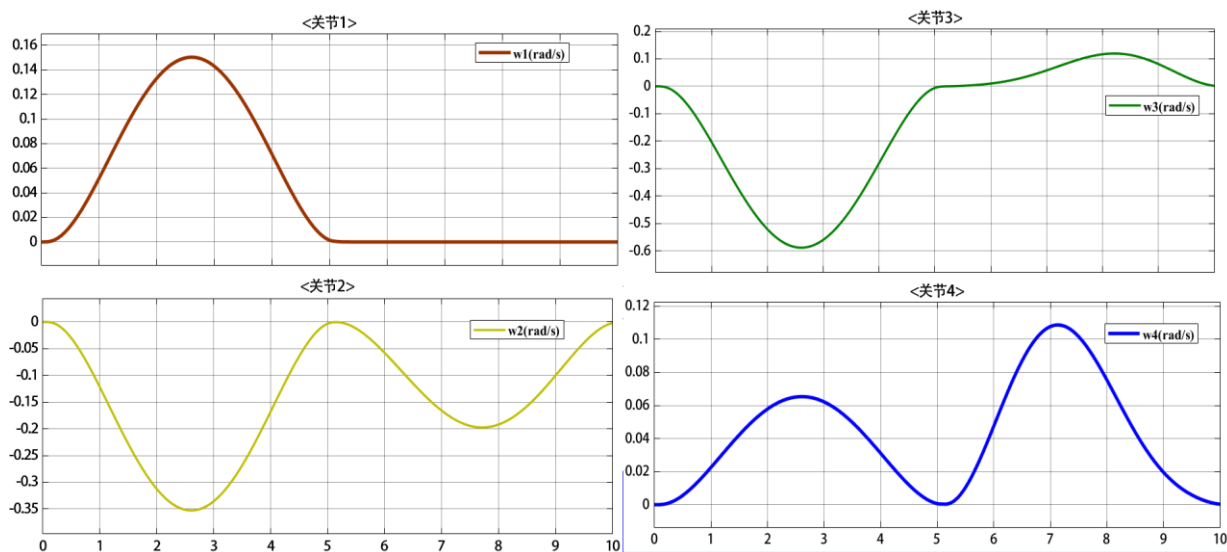
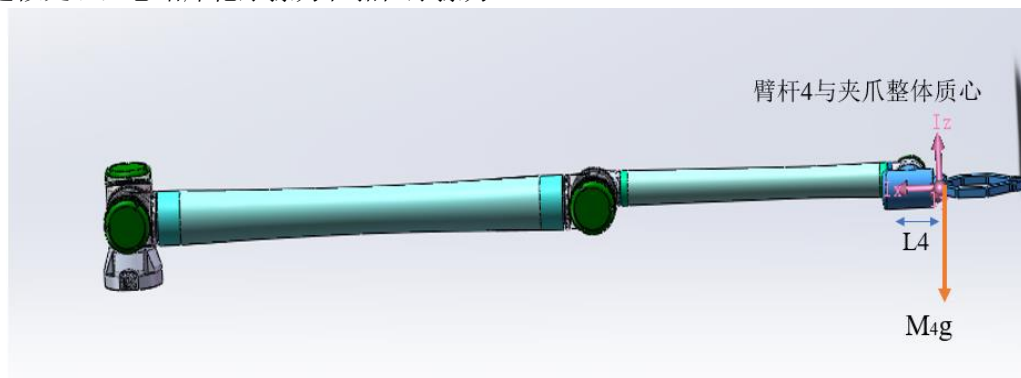


图 2.3 各关节角速度曲线

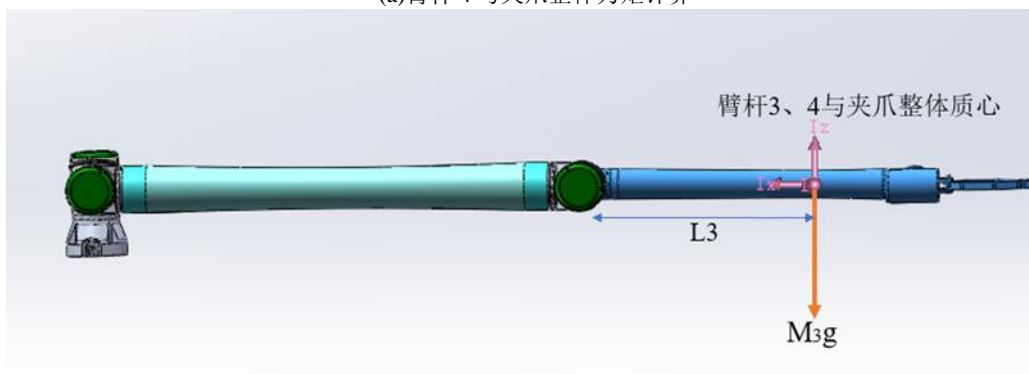
2.3 电机转矩的确立

初选定抓取 3kg 质量的物体，机械臂的材料按照铝合金 6061 来计算，运用理论力学中静力学

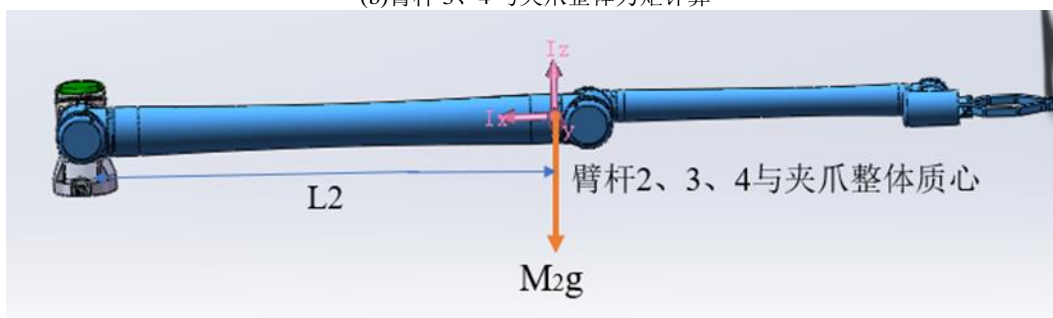
的知识，各关节处电机的极限静力受力分析与有效力臂长如图所示，其中臂杆的重心按照各关节的中心近似处理，忽略库伦摩擦力和黏性摩擦力。



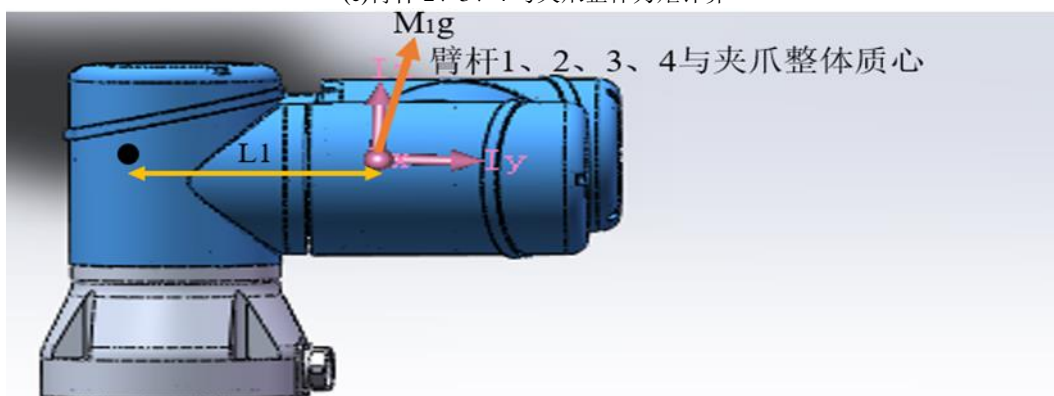
(a)臂杆 4 与夹爪整体力矩计算



(b)臂杆 3、4 与夹爪整体力矩计算



(c)臂杆 2、3、4 与夹爪整体力矩计算



(d)臂杆 1、2、3、4 与夹爪整体力矩计算

图 2.4 各关节极限受力分析图

电机 5（主要是控制机械手的开合及物体的抓取）：

考虑到机械手能够抓紧物体不掉落，初步假设物体与机械手之间的静摩擦系数为 0.2，物体的

质量为 3kg 地球上的静摩擦力

$$F_{f_{\text{地}}} = \mu mg_{\text{地}} = 0.2 * 3 * 9.8 = 5.88\text{N}$$

地球上的关节力矩:

$$M_{1_{\text{地}}} = F_{f_{\text{地}}} L = 5.88 * 0.1 = 0.588\text{N.m}$$

L 表示电机旋转轴中心到所抓取物体中心的距离 0.1m (初选定为 0.1m)

爪子夹取转动的角速度选为 $W_5=0.1\text{rad/s}$, 则爪子转速 $n_5=0.955\text{r/min}$ (考虑到实际, 机械手开合也有摩擦, 选择一个型号略微大一点的电机)。

行星齿轮箱选用 maxon 公司的 GPX 42 UP Ø42 mm, 1 级, 该减速器减速比为 5.3:1, 减速器质量 0.4kg。

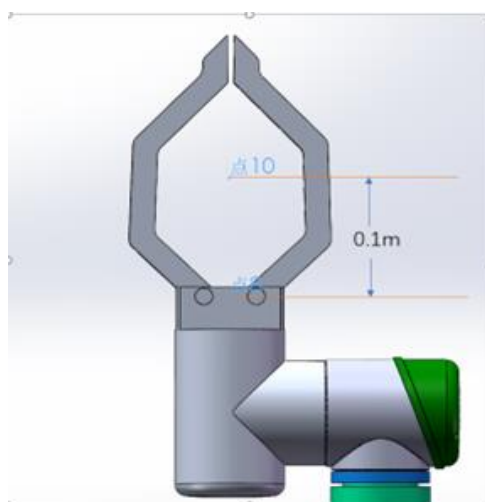


图 2.5 转距 L 测量图

电机转速为 $N_5 = n_5 * i = 0.955\text{r/min} * 5.3 = 5.06\text{r/min}$, 此转速为电机静态转速乘以放大系数 1/0.4, 得到电机的动态转速, $N_5 = 5.06/0.4 = 12.65\text{r/min}$ 。

电机力矩: 地球上: $M_{\text{电 } 5_{\text{地}}} = 0.588/5.3 = 0.111\text{N.m}$ 。

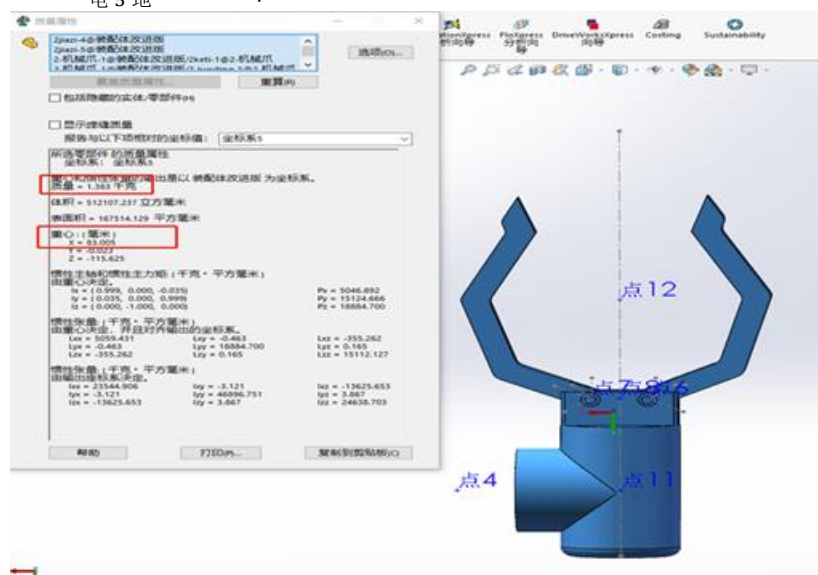


图 2.6 夹爪质心属性

选取较大转矩, 来自地球的测试值, 乘以放大系数 1/0.4, 得到电机动态力矩, $M_5' = 0.2775\text{N.m}$
电机选取 maxon 公司的步进电机 RE 50, 它的额定转矩 0.42N.m, 额定转速 4620r/min, 符合控制要

求。电机质量 1.1kg。

电机 4: $F_{4地} = M_{4g地} = (1.383 + 0.4 + 1.1) * g_{地} = 2.883 * 9.8 = 28.3N$ 。

力臂长就是 x 方向中心长度, 即 83mm, 地球上关节 4 关节力矩为:

$$M_{4地} = F_{4地} L_4 = 28.3 * 0.09 = 2.55N.m$$

可知关节 4 角速度最值是 0.11rad/s, 即 $N_4 = 1.05r/min$ 。

行星齿轮箱选取 maxon 公司的行星齿轮箱 GPX 52 A Ø52 mm, 1 级, 减速比是 6.6:1, 减速器质量 0.54kg。电机转速为 $N_4 = n_2 * i = 1.05r/min * 6.6 = 6.93r/min$, 此转速为电机静态转速乘以放大系数 1/0.4, 得到电机的动态转速, $N_4' = 6.93/0.4 = 17.325r/min$ 。

地球上的电机力矩: $M_{电4地} = 2.55/6.6 = 0.39N.m$, 选取较大转矩, 来自地球的测试值, 乘以放大系数 1/0.4, 得到电机动态力矩, $M_4' = 0.975N.m$, 电机选取 maxon 公司的 IDX 56 L, 56 mm 步进电机, 它的额定转矩 1.1N.m, 额定转速 3440r/min, 电机质量 0.23kg, 符合控制要求。

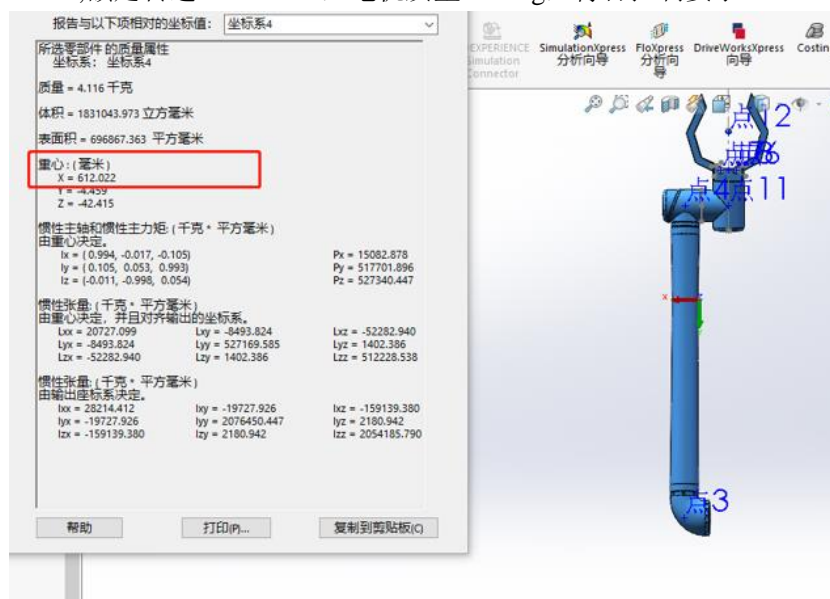


图 2.7 臂杆 4 与夹爪质心属性

电机 3: 将机械手与第四个关节臂和关节及电机看成整体, 总质量为 $(0.23 + 0.54 + 1.1 + 0.4 + 4.116) = 6.386kg$, 力臂长度为质心到关节 3 的距离 $L_3 = 0.612m$,

$F_{3地} = M_{3g地} = 6.386kg * g_{地} = 6.386kg * 9.8N/kg = 62.58N$,

地球上关节 3 处力矩为:

$$M_{3地} = F_{3地} L_3 = 62.58 * 0.612 = 38.3N.m$$

将机械臂运动过程的笛卡尔速度反推到关节 3 的角速度。并将得到的数值画出图, 可知关节 3 角速度最值是 0.11rad/s, 即 $N_3 = 1.05r/min$ 。

行星齿轮箱选取 maxon 公司的行星齿轮箱 GPX 52 UP Ø52 mm, 减速比是 83:1, 减速器质量 0.92kg, 电机转速为 $N_3 = n_3 * i = 1.05r/min * 83 = 87.15r/min$, 此转速为电机静态转速乘以放大系数 1/0.4, 得到电机的动态转速, $N_3' = 87.15/0.4 = 218r/min$ 。电机力矩: 地球上: $M_{电3} = 38.3/83 = 0.46N.m$

选取较大转矩, 来自地球的测试值, 乘以放大系数 1/0.4, 得到电机动态力矩, $M_3' = 1.15N.m$ 。

电机选取 maxon 公司的 IDX 56 L, 56 mm 步进电机, 它的额定转矩 1.55N.m, 额定转速 3440r/min, 电机质量 0.23kg, 符合控制要求。

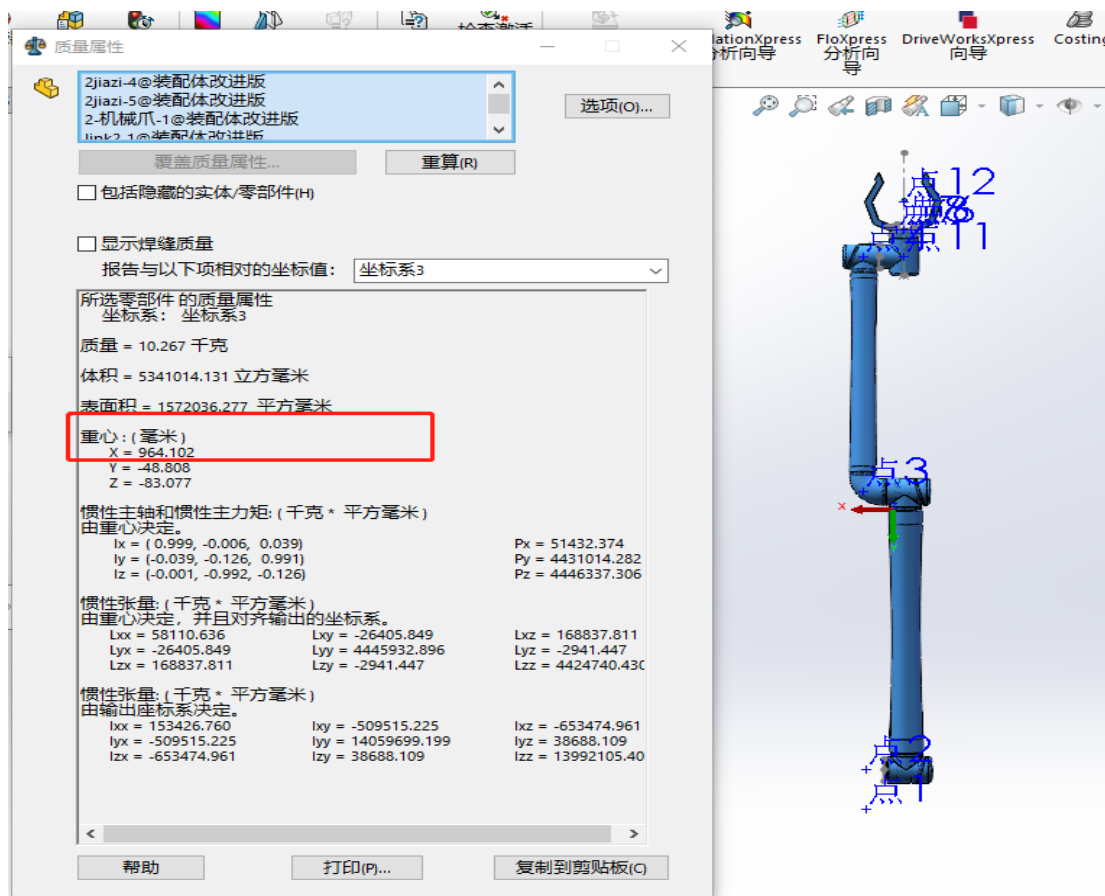


图 2.8 臂杆 3、4 与夹爪

将上方机械臂外壳和电机及减速器看成整体, $10.267+0.4+1.1+0.54+0.23+0.92=13.687\text{kg}$
力臂长度为质心到关节 2 的距离 $L_2=0.964\text{m}$,

$$F_{2_{\text{地}}} = M_{2_{\text{地}}} * g_{\text{地}} = 13.687\text{kg} * g_{\text{地}} = 13.687\text{kg} * 9.8\text{N/kg} = 134.13\text{N}$$

地球上关节 2 处力矩为:

$$M_{2_{\text{地}}} = F_{2_{\text{地}}} L_2 = 134.13 * 0.964 = 129.3\text{N.m}$$

将机械臂运动过程的笛卡尔速度反推到关节 2 的角速度。并将得到的数值画出图, 可知关节 2 角速度最值是 0.35rad/s , 即 $N_2=3.34\text{r/min}$ 。

行星齿轮箱选取 maxon 公司的行星齿轮箱 GP 81 A Ø81 mm, 减速比是 308:1, 减速器质量 3.7kg。电机转速为 $N_2=n_4*i=3.34\text{r/min}*308=1029\text{r/min}$, 此转速为电机静态转速乘以放大系数 1/0.4, 得到电机的动态转速, $N_2'=1029/0.4=2572\text{r/min}$ 。电机力矩: 地球上: $M_{\text{电}2_{\text{地}}}=129.3/308=0.46\text{N.m}$ 。选取较大转矩, 来自地球的测试值, 乘以放大系数 1/0.4, 得到电机动态力矩, $M_2'=1.15\text{N.m}$ 。

电机选取 maxon 公司的 IDX 56 L, 56 mm 步进电机, 它的额定转矩 1.55N.m, 额定转速 3440r/min, 电机质量 0.23kg, 符合控制要求。

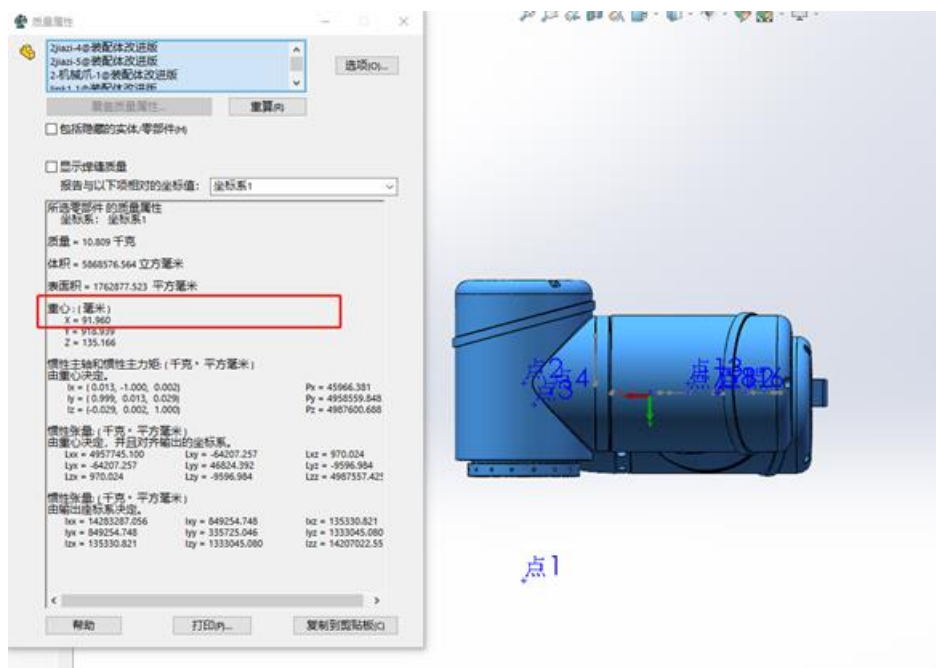


图 2.9 臂杆 2、3、4 与夹爪质心属性

将上方机械臂外壳和电机及减速器看成整体总质量为：

$$10.81 + 0.4 + 1.1 + 0.54 + 0.23 + 0.92 + 0.23 + 0.23 + 3.7 = 18.16\text{kg}$$

力臂长度为质心到关节 1 的距离 $L_5=0.92\text{m}$ 。

$$F_{1\text{地}} = M_1 g_{\text{地}} = 13.687 * g_{\text{地}} = 18.16 * 9.8 = 178\text{N}。$$

取摩擦系数为 0.2，地球上关节 1 处力矩为：

$$M_{1\text{地}} = F_{1\text{地}} L_1 * 0.2 = 178 * 0.92 * 0.2 = 33\text{N.m}。$$

将机械臂运动过程的笛卡尔速度反推到关节 1 的角速度。并将得到的数值画出图，可知关节 1 角速度最值是 0.15rad/s ，即 $N_5=1.43\text{r/min}$ 。行星齿轮箱选取 maxon 公司的行星齿轮箱 GP 62 A Ø62 mm，减速比是 100:1，减速器质量 1.54kg。

电机转速为 $N_1=n_1*i=1.43\text{r/min}*100=143\text{r/min}$ ，此转速为电机静态转速乘以放大系数 1/0.4，得到电机的动态转速， $N_1'=143/0.4=358\text{r/min}$ ，电机力矩：地球上： $M_{\text{电}1\text{地}}=33/100=0.33\text{N.m}$ 。选取较大转矩，来自地球的测试值，乘以放大系数 1/0.4，得到电机动态力矩， $M_1'=0.825\text{N.m}$ 。

电机选取 maxon 公司的 RE 65 Ø65 mm，直流步进电机，它的额定转矩 0.84N.m，额定转速 2960 r/min，电机质量 0.21kg，符合控制要求。

计算分别得到关节 1 关节极限力矩为 33N/m，关节 2 力矩为 129.3N/m，关节 3 为 38.3N/m，关节 4 为 28.3N/m，末端夹爪关节 5 极限力矩为 0.6N/m。

第三章 机器人学分析

表取机械臂的运动学部分，是后续雅可比分析，工作域求解的前提，对机器人轨迹规划也有着重要作用。本篇论文参考美国 NASA 洞察号火星探测器上的机械臂，四个关节均为旋转类型的关节。本章在第一部分中首先通过改进 D-H 参数法，构建机械臂各相邻连杆之间的齐次变换矩阵和变换关系，求解出表取机械臂的正运动学模型，并运用解析封闭的逆解方法，将已知的末端矩阵反求得到各关节的角度变量，运用最小二乘法筛选出一组最优解；随后，利用雅可比理论，求解得出表取机械臂各关节角度与末端运动速度之间的映射关系；最终以机械臂运动学数学模型为基础，运用基于随机抽样的蒙特卡洛法，对表取机械臂进行工作域分析^[6]。

3.1 机械臂运动学理论分析

3.1.1 机械臂位置与姿态描述

机器人的运动学是以机械臂工具坐标系相对于基座固定参考系的空间关系基础，研究机械臂末端执行器的位置与姿态，和各关节角度变量之间的关系^[7]。本文研究的机械臂机构是开环串联型机械臂，通过分析各连杆的相对位置、速度和加速度变化，可使末端执行器达到不同的空间位姿、速度和加速度，从而完成期望的工作要求。

常用得位姿表述方式有四元数法，旋量法，欧拉角和齐次变换矩阵法这几种。本文采取的齐次变换矩阵法来描述机械臂位置与姿态。当描述一个坐标系相对于另一个坐标系的关系时，包含位置和姿态两个概念，即位姿。想要表述一个机器人在三维空间中的位姿，需要用到一种属于三维欧几里得的其次变换矩阵 ${}^A T_B$ ，这个 4×4 的矩阵反映了相邻坐标系之间位置和姿态的相互关系。

$${}^A T_B = \begin{pmatrix} {}^A R_B & {}^A P_B \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

其中 ${}^A R_B$ 是 3×3 的旋转矩阵，表示 B 坐标系相对于 A 坐标系之间的旋转变换关系，象征着机械臂的姿态。9 个元素组成的旋转矩阵仅存在六个约束，即三个单位列向量互相垂直正交，故只含有 3 个自由度，表示关于三个坐标轴的旋转。而 ${}^A P_B$ 为 B 坐标系相对 A 坐标系在 XYZ 轴方向的偏移量，为 3×1 的列向量，象征着机械臂此时的位置。综上， ${}^A T_B$ 是一个三行四列的齐次变换矩阵，共包含 6 个自由度，即 xyz 轴方向的旋转及平移。可以很好的表达坐标系之间的位姿关系。

3.1.2 DH 参数法运动学模型建立

对机械臂进行 D-H 参数法运动学模型建立时，首先要依据 D-H 法建立连杆坐标系，先建立各关节的 x、z 轴，z 轴的方向是指向转动方向的，向 Z_{i-1} 与 Z_i 轴做公垂线，便得到 X_{i-1} 轴。接着确定各坐标系的坐标原点位置。本项目的表取机械臂四个关节均为移动关节，采用的是改进 D-H 参数法，将关节变量用 q 表示。相邻关节连杆坐标系示意图如图 3.1 所示。其中 θ 为关节转角，是相邻坐标系 x 轴之间的夹角， α 为连杆扭角，是相邻 z 轴的夹角。d 为连杆偏距，是相邻 x 轴之间沿着 z 轴方向的距离，a 为连杆长度，是相邻 z 轴之间沿着 x 轴方向移动的距离。空间中三维连杆的坐标系变化，只需要进行四次变换。因为当后一个坐标系的 z 轴与前一个坐标系的 x 轴垂直且相交时，四次变换就可以确定两个坐标系的相对位置与姿态。首先将 O_{i-1} 坐标系下的 Z_{i-1} 轴，绕着 X_{i-1} 轴旋转 α_{i-1} 度，使得 Z_{i-1} 与 Z_i 两轴平行。接着将 O_{i-1} 坐标系原点沿 x 轴移动 a_{i-1} 个距离，使得 Z_{i-1} 与 Z_i 两轴重合。第三步是绕着 z 轴旋转 θ_i 度，使得 X_{i-1} 与 X_i 两轴平行。最后沿着 z 轴移动，使得 O_{i-1} 与 O_i 两坐标系重合。

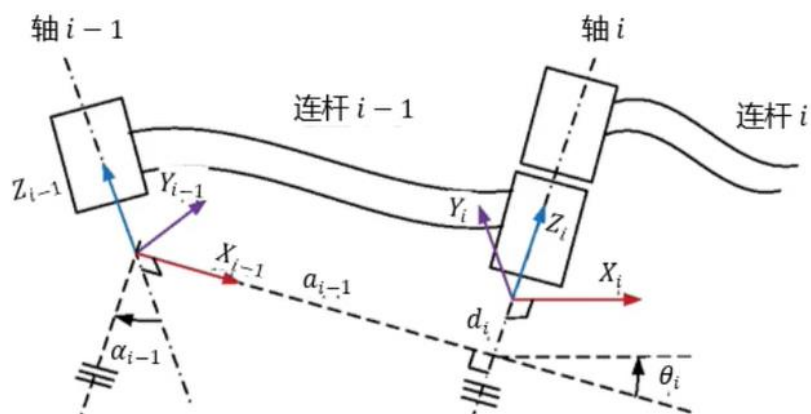


图 3.1 相邻关节连杆坐标系示意图

四轴机械臂需要建立四个关节坐标系和一个基坐标系，根据坐标系之间的转角和距离关系，建立基于改进 DH 法的机械臂关节坐标系如图 3.2 所示，并设计出表取机械臂改进型 D-H 参数表如下表 3.2 所示。

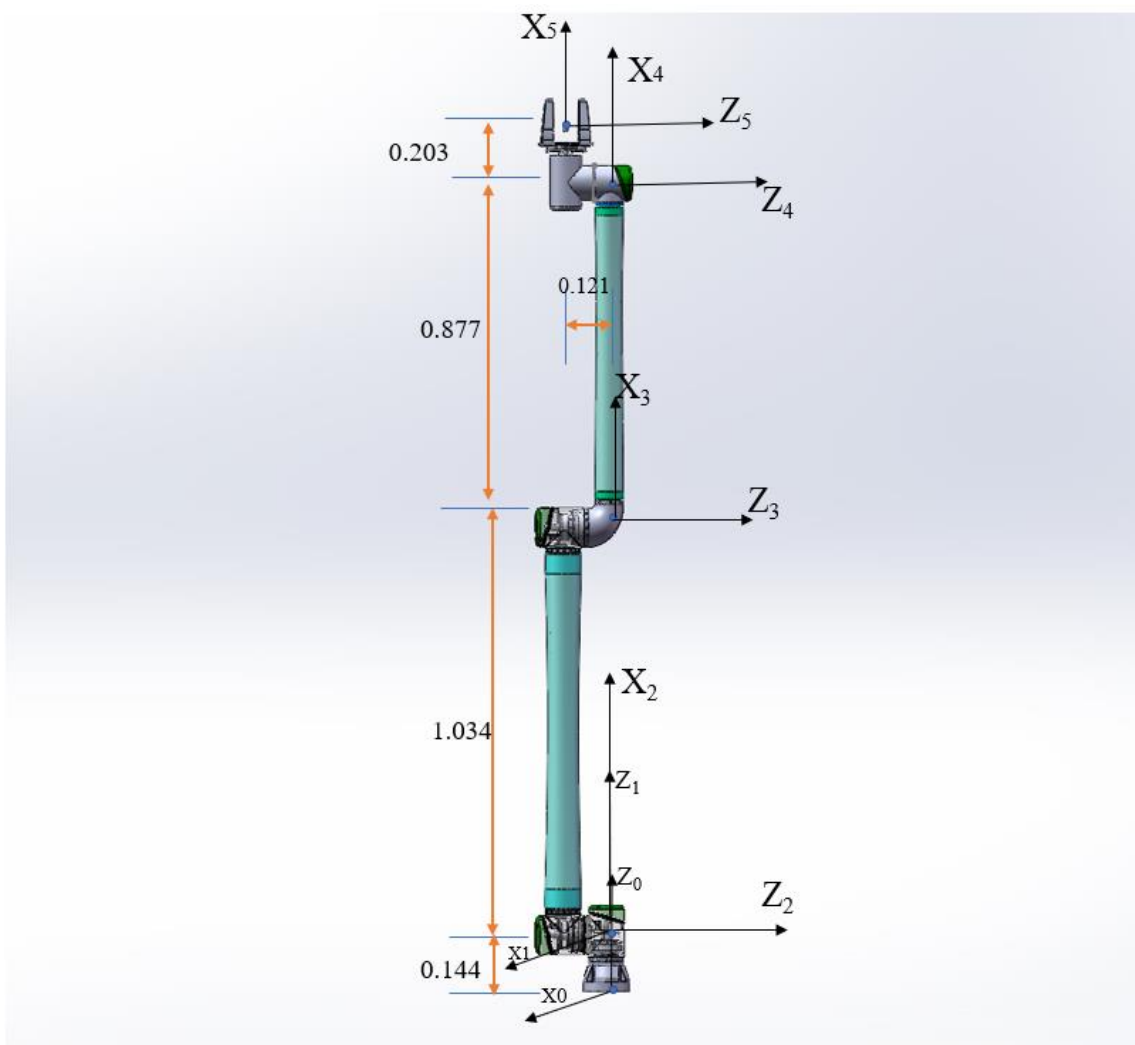


图 3.2 表取机械臂模型及关节坐标系

表 3.1 表取机械臂改进型 D-H 参数表

连杆	α_{i-1}	a_{i-1}/m	变量 θ_i	d_i/m	关节范围
1	0°	0	$\theta_1(-90^\circ)$	0	$(-360^\circ, 360^\circ)$
2	-90°	0	$\theta_2(-90^\circ)$	0	$(-90^\circ, 90^\circ)$
3	0°	$a_2(1.034)$	θ_3	0	$(-180^\circ, 180^\circ)$
4	0°	$a_3(0.877)$	θ_4	0	$(-360^\circ, 360^\circ)$
tool	0°	0.203	0°	0.121	/

根据表 1 所列出的 D-H 参数, 运用机器人工具箱^[8]中 Link 函数, 对表取机械臂进行建模。其 Matlab 程序如下:

```
a2=1.034;a3=0.877;
L(1)=Link('d',0,'a',0,'alpha',0,'offset',pi,'modified');
L(2)=Link('d',0,'a',0,'alpha',-pi/2,'offset',-pi/2,'modified');
L(3)=Link('d',0,'a',a2,'alpha',0,'offset',0,'modified');
L(4)=Link('d',0,'a',a3,'alpha',0,'offset',0,'modified');
robot_m=SerialLink(L,'name','Robot-MDH');
q0=([0 0 0 0]);
```

表取机械臂的抓取中心位于第四坐标系上方 203mm, 沿着 x 轴偏移 121mm 处, 故需再添加一条确定工具坐标系的指令。

```
robot_m.tool=transl(0.203,0,0.121);
```

模型建立后, 输入 robot_m.teach 可以绘制该机械臂的简易模型, 同时包含控制面板, 拖动滑块可控制对应关节发生变化并显示机械臂末端的位置。这种方式对于实际的多连杆机械手的运动演示非常有益^[9]可以更好的了解学习该机械臂, 如图 3.3 所示。

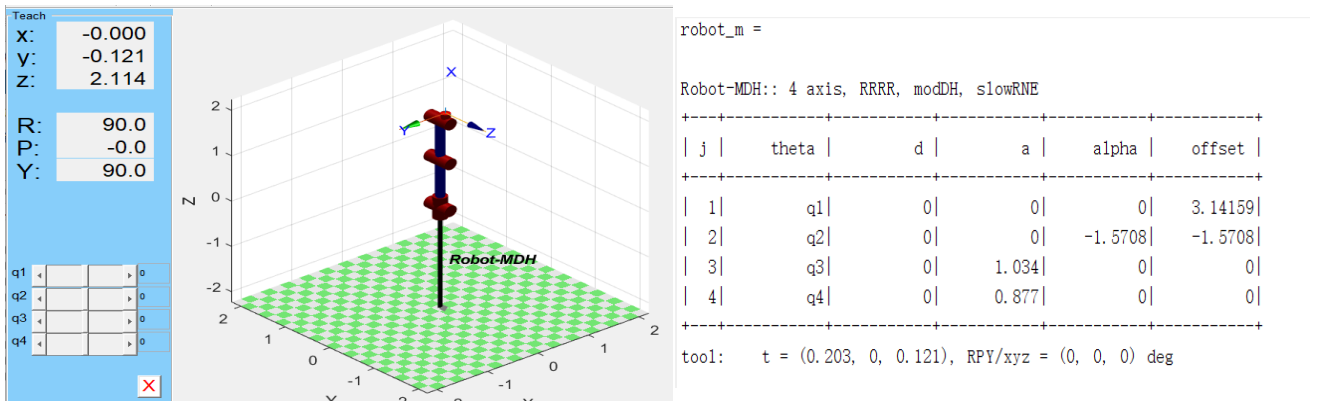


图 3.3 MATLAB 机器人工具箱建模

3.2 机械臂正运动学

机械臂正向运动学(Forward Kinematics), 就是通过机械臂中各关节角度, 来求取末端执行器位姿。机械臂中相邻两关节的位姿关系用转换矩阵 ${}^{i-1}_iT$ 表示:

$${}^{i-1}_iT = Rot_x(\alpha_{i-1}) * Trans_x(a_{i-1}, 0, 0) * Rot_z(\theta_i) * Trans_z(d_i) \quad (3-2)$$

从起始位置开始，连续右乘齐次变换矩阵，即相对于自身上一个连杆坐标系变换，最终算出末端执行器的位姿其展开式如下：

$${}^{i-1}_iT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

对于该表取机械臂，代入 DH 参数后，各关节坐标系之间的齐次变换矩阵为：

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s(\theta_2 - \frac{\pi}{2}) & -c((\theta_2 - \frac{\pi}{2})) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ {}^2_3T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & a_2 \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_4T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & a_3 \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^4_tT = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

得到末端执行器的位姿为：

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T \quad (3-4)$$

$${}^0_4T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

其中各个符号的展开如下：

$$n_x = \frac{1}{2}[(c_1 s_2 - c_2 s_1)c_{34} + (c_2 c_1 + s_2 s_1)s_{34} + s_{12}c_{34} + c_{12}s_{34}] \\ n_y = \frac{1}{2}[(c_2 c_1 + s_2 s_1)c_{34} - s_{34}(s_2 c_1 - s_1 c_2) - c_{12}c_{34} + s_{12}s_{34}] \\ n_z = c_{234} \\ o_x = \frac{1}{2}[(c_{12}c_{34} - s_{12}s_{34}) - c_{34}(c_1 s_2 - c_2 s_1) - s_{34}(c_1 c_2 - s_1 s_2)] \\ o_y = \frac{1}{2}[s_{12}c_{34} + c_{12}s_{34} - (c_1 s_2 - c_2 s_1)c_{34} - (c_2 c_1 + s_2 s_1)s_{34}] \\ o_z = -s_{234} \\ a_x = -s_1 \\ a_y = c_1 \\ a_z = 0 \\ p_x = a_3 s_{23} c_1 + a_2 c_1 s_2 \\ p_y = a_2 s_1 s_2 + a_3 s_{23} s_1 \\ p_z = a_3 c_{23} + a_2 c_2$$

由于机械臂在初始状态下，各关节变量均为零，转换矩阵的求解过程也比较简单。在其他一般状

态下,求解会略微复杂。通过调用笔者编写的正运动学函数 `Forward_Func` 来对机器人正运动学验证,四个关节角都设置为初始值零度,如图 3.4。

将机器人的正向运动学公式编写成函数,方便控制的时候调用。

```
th=[0 0 0 0];
T_func=ForwardK_Func(th);
T0_t=T_func*transl(0.203,0,0.121)
```

```
T0_t = 4x4
    0    1.0000    0    0
    0    0    1.0000    0.1210
    1.0000    0    0    2.1140
    0    0    0    1.0000
```

图 3.4 正运动学验证图

机器人工具箱可以帮助用户省去较为繁琐的计算过程在 Matlab 中建立的表取机器人模型,利用 `fkine` 函数进行求解。其指令为:

```
q0=[0 0 0 0];
```

```
T=robot_m.fkine(q0)
```

得到转换矩阵为

$${}^0T_{tool} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -0.121 \\ 1 & 0 & 0 & 2.114 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

因此,正运动学函数求解的末端矩阵与机器人工具箱得到的一致,至此验证了正运动学建模的准确性^[10]。

3.3 机械臂逆运动学

3.3.1 逆运动学理论分析

实际工程项目中,目标物体的位置通过机械臂末端的相机测出 x 、 y 、 z 三个方向基于基坐标的位置量,将得到的位置坐标,通过数学运算,可以求出来机械臂末端变换矩阵,即机械臂末端相对于基座的变换矩阵,也就是机械爪抓取点要到达的位置姿态,此时通过逆运动学,可以求解各个关节对应的角度,能让末端达到这个要求的位置姿态,最终实现精准抓取。逆运动学就是已知工具坐标系的位姿,反求出关节变量的值。机器人逆解分为解析解和数值解,解析解又分为封闭解法与几何法。

对于 4 轴机器人的解析解来说,通常要借助以下两个准则来求解:

- (1) 三个关节轴线相交与一点;
- (2) 三个关节轴线相互平行;

根据观察,此机器人最后三个关节轴线相互平行,满足准则 1,故可以采用解析法求解运动学逆解。

(1) 求 θ_1

将矩阵 0T_1 取逆后左乘 (3-3) 方程的两边,得到方程:

$${}^0T_1^{-1}(\theta_1) {}^0T_4 = {}^1_2T(\theta_2) {}^2_3T(\theta_3) {}^3_4T(\theta_4)$$

$$\begin{bmatrix} c\theta_1 & s\theta_1 & 0 & 0 \\ -s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^1_4T \quad (3-6)$$

$$\begin{bmatrix} n_x c\theta_1 + n_y s\theta_1 & o_x c\theta_1 + o_y s\theta_1 & a_x c\theta_1 + a_y s\theta_1 & p_x c\theta_1 + p_y s\theta_1 \\ n_y c\theta_1 - n_x s\theta_1 & o_y c\theta_1 - o_x s\theta_1 & a_y c\theta_1 - a_x s\theta_1 & p_y c\theta_1 - p_x s\theta_1 \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^1_2T(\theta_2) {}^2_3T(\theta_3) {}^3_4T(\theta_4)$$

令方程 (3-6) 中两边矩阵的第二行第四列 (2, 4) 的元素对应相等,得到方程:

$$-s_1 p_x + c_1 p_y = 0 \quad (3-7)$$

利用三角代换：

$$p_x = \rho \cos \phi, \quad p_y = \rho \sin \phi \quad (3-8)$$

其中， $\rho = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$ ； $\phi = \text{atan2}(p_y, p_x)$ 。把式（3-8）代入式（3-7）中，可以得出 θ_1 有一个解：

$$\theta_1 = \text{atan2}(p_y, p_x) \quad (3-9)$$

求解关节角度的数学计算过程，不采用arcsin或arccos函数，因为arcsin函数的值域是 $[-\pi/2, \pi/2]$ ，arccos函数值域是 $[0, \pi]$ ，无法囊括机械臂各关节转动的角度。若采用解析封闭解求解机械臂关节的角度，最合适的表述方式是四象限反正切函数 $\text{arctan2}^{[11]}$ 。

（2）求 θ_2

令方程（2-6）中两边矩阵第一行第四列（1，4）和第三行第四列（3，4）的元素对应相等，可得到两个方程：

$$p_x c\theta_1 + p_y s\theta_1 = a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) + a_2 s\theta_2$$

$$p_z = a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 c\theta_2$$

当关节角 θ_1 求完之后，就默认 θ_1 是已知量了。令 $p_x \cos \theta_1 + p_y \sin \theta_1 = d$

$$d - a_2 s\theta_2 = a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \quad (3-10)$$

$$p_z - a_2 c\theta_2 = a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) \quad (3-11)$$

对式子（3-10）和式子（3-11）两边求平方和得

$$a_2^2 + d^2 + p_z^2 - 2a_2(ds\theta_2 + p_z c\theta_2) = a_3^2 \quad (3-12)$$

可以推导出：

$$ds\theta_2 + p_z c\theta_2 = \frac{a_2^2 + d^2 + p_z^2 - a_3^2}{2a_2} \quad (3-13)$$

$$\text{令 } p = \frac{a_2^2 + d^2 + p_z^2 - a_3^2}{2a_2} \quad \text{则 } p_z c\theta_2 + ds\theta_2 = p$$

可以得出 θ_2 有两个解：

$$\theta_2 = -\text{atan2}(d, p_z) + \text{atan2}\left(p, \pm \sqrt{d^2 + p_z^2 - p^2}\right) \quad (3-14)$$

（3）求 θ_3, θ_4

θ_2 得到后，根据公式（3-10）可以计算得出 θ_3 ：

$$a_3 \cos \theta_2 \sin \theta_3 + a_3 \sin \theta_2 \cos \theta_3 = d - a_2 s\theta_2 \quad (3-15)$$

$$a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) = d - a_2 s\theta_2 \quad (3-16)$$

$$a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) = \pm \sqrt{1 - (d - a_2 s\theta_2)^2} \quad (3-17)$$

$$\theta_3 = \text{atan2}\left[(d - a_2 s\theta_2), \pm \sqrt{(a_3)^2 - (d - a_2 s\theta_2)^2}\right] - \theta_2 \quad (3-18)$$

根据矩阵两边第三行第一列和第三行第二列相等，可得：

$$\cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = n_z, \quad \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) = -o_z$$

$$\begin{aligned} \text{令 } k &= -\text{atan2}(o_z, n_z) \\ \theta_4 &= -\text{atan2}(o_z, n_z) - (\theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \quad (3-19)$$

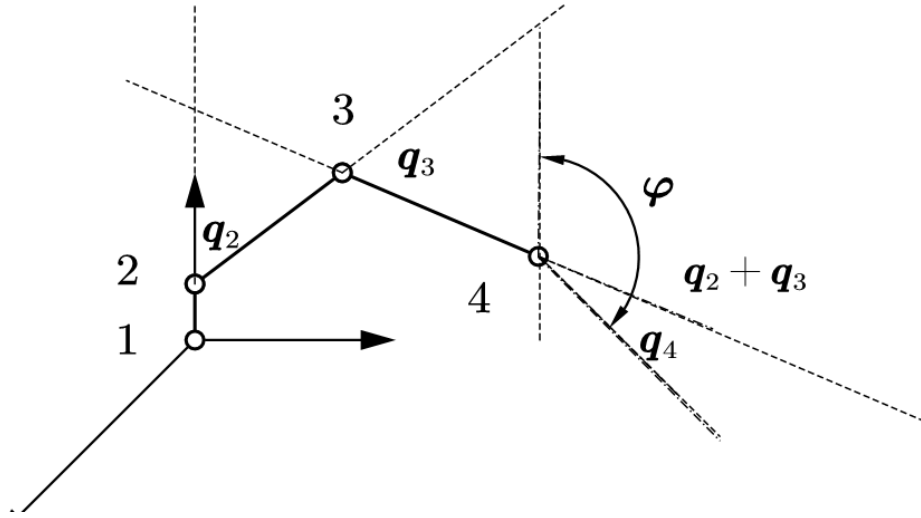


图 3.5 各关节角几何关系

关节角的关系如下，其中有 θ_1 一组解、 θ_2 有两组解、 θ_3 和 θ_4 有四组解

表 3.2 逆解角度分布

θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
th1	th2(1)	th3(1,1)	1
		th3(1,2)	2
	th2(2)	th3(2,1)	3
		th3(2,2)	4

3.3.2 选取最优解

根据以上各个 θ 角的求解结果，可知基于一个末端执行器的位姿，最多可以求得 4 组不同的关节角度。这对应的机械臂四种不同位形，即末端位置相同的情况下，产生多种不同各关节角度的组合。并且在实际情况中，关节的运动范围有一定限制，导致机器人的工作空间虽然满足一些位姿，但并不能驱动关节运动到需要的角度。因此，从效率和提升控制效果的角度出发，需要基于某种原则来对所求的 4 组解进行挑选和甄别，只保留一组最优解。

本文采用距离最小的原则进行挑选，运用最小二乘法，即先预设目标角度为最优解，再对比每组解与目标解的角度误差，选择使各个关节运动位移最小的解为最后的最优解。公式如下，其中 i 为关节号， $q_n(n=1,2,3,4)$ 为 4 组解， q_{best} 表示当前最优解^[12]。

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^6 (q_n(i) - q_{best}(i))^2 \right) \quad (3-20)$$

3.3.3 机械臂逆运动学代码验证

如上图所示，当机械臂四个关节角实际值分别为 90° , 60° , 45° , 30° 时，调用自己逆解函数 My_ikine, 得到四个关节输出的解 thout, 这四个数值与实际机械臂关节角度一致。

将机器人的逆向运动学编写成函数，方便控制的时候调用。

求解逆向运动学模型时，将当前的关节角度也输入，用于判断解的选择。将机器人的逆向运动学编写成函数，方便控制的时候调用。

```
th=[pi/2 pi/3 pi/4 pi/6];
T04=ForwardK_Func(th);
[thout]=My_ikine(T04,th)
```

```
thout = 1x4
1.5708    1.0472    0.7854    0.5236
```

图 3.6 逆解验证

用机器人工具箱逆解函数 `ikunc` 同样可以验证出逆解自编函数的准确性，因此，自编的正逆运动学代码适用于该构型的表取机械臂。

```
31 disp('工具箱反解')
32 the_ik = robot_m.ikunc(T)
33
34
35 disp('自编反解')
36
37 [thout]=My_ikine(T_func);
```

命令行窗口

```
工具箱反解

the_ik =

    1.5708    0.7854    0.5236    0.0000

自编反解

qik =

    1.5708    0.7854    0.5236   -0.0000
```

图 3.7 基于工具箱逆解验证

3.4 工作空间分析

利用之前求得的正运动学转换矩阵，就能获得机械手末端的运动范围，即为工具坐标系末端在空间中可达到的点的集合，其表达式可以表示为：

$$F(x,y,z) = \begin{cases} X = a_3 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cos\theta_1 + a_2 \cos\theta_1 \sin\theta_2 (0^\circ \leq \theta_1 \leq 360^\circ, -90^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ) \\ Y = a_2 \sin\theta_1 \sin\theta_2 + a_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \sin\theta_1 (-90^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ, -180^\circ \leq \theta_3 \leq 180^\circ) \\ Z = a_3 \cos(\theta_2 + \theta_3) + a_2 \cos\theta_2 \quad (-90^\circ \leq \theta_2 \leq 90^\circ, -180^\circ \leq \theta_3 \leq 180^\circ) \end{cases} \quad (3-21)$$

运用蒙特卡洛算法可以在 Matlab 中绘制出该机器人的运动空间，如图 3.8，3.9 所示。蒙特卡洛方法以概率和统计学理论为基础，是一种十分重要的随机模拟计算方法，在经济学、量子热力学、空气动力学等诸多领域应用较为广泛。在绘制机器人工作空间过程中，该方法主要通过允许在关节空间范围内，反复迭代，生成足够多的关节变量，表达式如下，`rand` 是 0 到 1 之间的随机数，此过程生成 q_{min} 到 q_{max} 之间随机数。

$$q = q_{min} + rand * (q_{max} - q_{min})$$

最后通过正项运动学计算出机械臂相应的末端坐标，并绘制在三维坐标系中，进而逼近实际的工作空间。

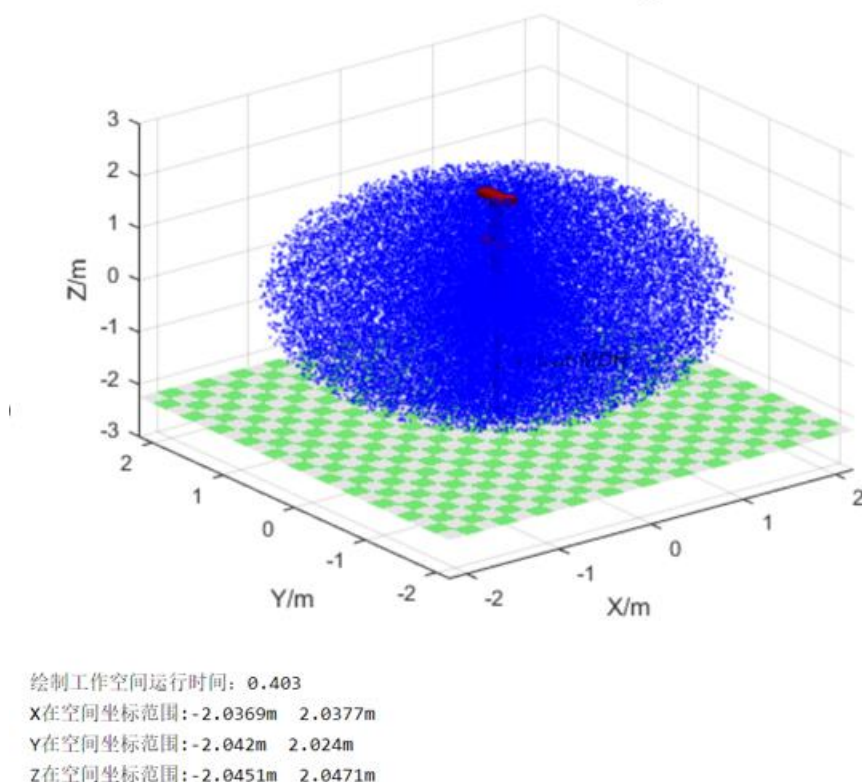


图 3.8 表取机械臂工作空间

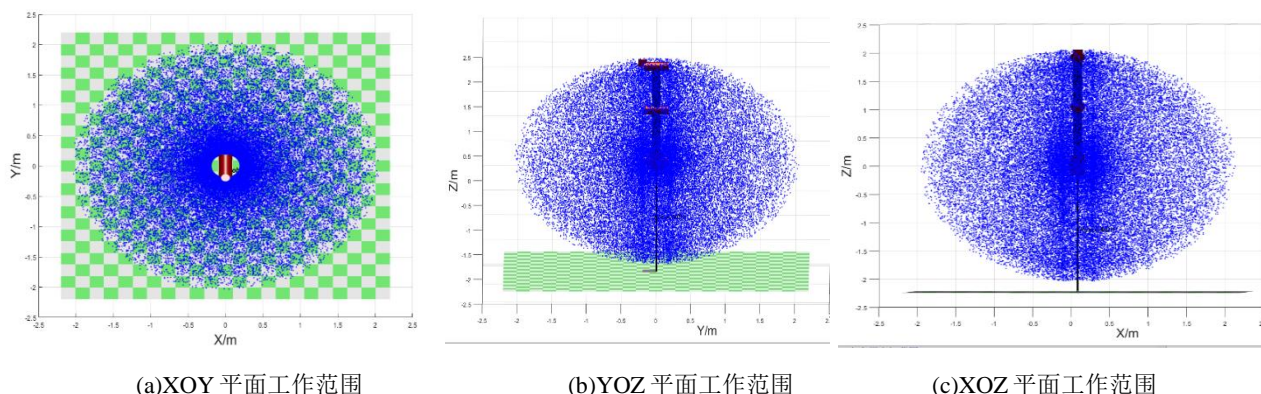


图 3.9 表取机械臂在 XOY、YOZ、XOZ 平面的工作范围

根据蒙特卡洛算法求得的运动空间图形可知，这款机械臂末端执行元件的运动空间为一个球体，在 XOY、YOZ、XOZ 三个平面投射图中，都显示出工作域是一个半径为 2m 左右的圆形。

3.5 雅可比分析

该表取机械臂属于串联开环结构，各连杆之间都有相对运动发生。要规划和分析机械臂的运动，需要研究线速度和角速度表示方法。机器人运动学解决的是关节空间与末端工具空间之间位置映射联系。本章通过雅可比相关理论，推导机械臂关节空间与末端执行器之间的速度映射关系。主要求出机械臂雅可比矩阵和对表取机械臂进行速度分析。

3.5.1 雅可比理论

当关节坐标中发生一定的变化，末端执行器也会产生一定的变化，正运动学研究的是通过各关节角度的变化，对机械臂末端位置与姿态的影响。相应的，机械臂的雅可比矩阵，研究的是各关节速度的变化如何影响末端执行器的速度。雅可比矩阵将各个关节的转速与末端执行器的线速度、

角速度联系在一起。对于 N 个关节的串联机械臂来说，雅可比矩阵是一个 $6 \times N$ 的矩阵，矩阵的行反映笛卡尔空间下 xyz 方向下的角速度和线速度，无论关节数目，均为 6 个。矩阵的列与机械臂的各个关节相对应，机械臂有几个自由度，雅可比就有几列。因此，可以将雅可比矩阵看成关节空间的速度向笛卡尔空间中速度的映射。

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}$$

其中 $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ ，表示执行器在笛卡尔空间下的 6 种速度，包括平移和旋转， $\dot{\mathbf{q}} = (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3, \dots, \dot{\theta}_N)^T$ ，是关节空间下各关节的速度。显然 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 是一个 $6 \times N$ 的矩阵。要求一个机械臂的雅可比矩阵，要求出末端执行器的速度矢量。对于机械臂连杆运动，我们需要先找出线速度和角速度之间的关系。图 3.10 为相邻连杆和其坐标系中的速度矢量。

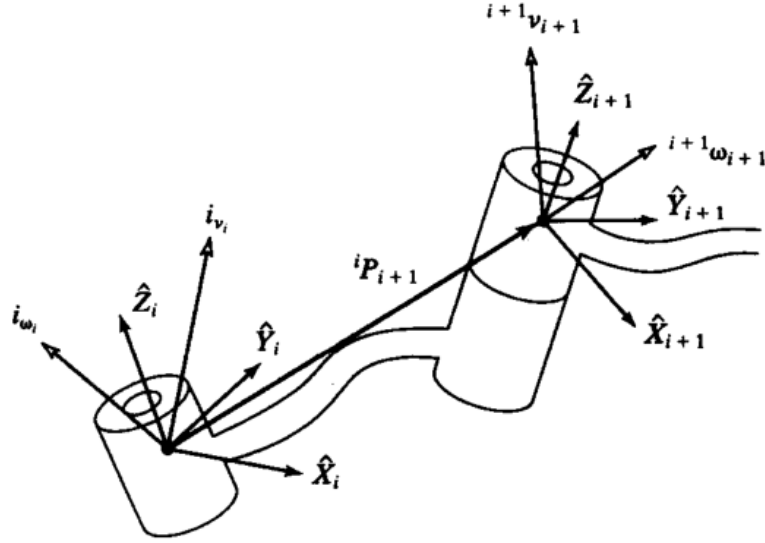


图 3.10 速度矢量

对于旋转关节，关节之间的速度关系为：

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\mathbf{w} &= {}^{i+1}\mathbf{R}_i^T \dot{\theta}_{i+1} \mathbf{z}_{i+1} \\ {}^{i+1}\mathbf{v} &= {}^{i+1}\mathbf{R}_i^T (\dot{\theta}_i \mathbf{p}_i + \dot{\theta}_i \mathbf{w}_i \times \mathbf{p}_i) \end{aligned}$$

移动关节之间的速度关系为：

$$\begin{aligned} {}^{i+1}\mathbf{w} &= {}^{i+1}\mathbf{R}_i^T \dot{\theta}_i \mathbf{w}_i \\ {}^{i+1}\mathbf{v} &= {}^{i+1}\mathbf{R}_i^T (\dot{\theta}_i \mathbf{p}_i + \dot{\theta}_i \mathbf{w}_i \times \mathbf{p}_i) + \dot{d}_{i+1} \mathbf{z}_{i+1} \end{aligned}$$

其中： $\dot{\theta}_{i+1} \times \mathbf{z}_{i+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_{i+1} \end{bmatrix}$ ， $\dot{d}_{i+1} \times \mathbf{z}_{i+1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{d}_{i+1} \end{bmatrix}$

通过这些公式，可以计算出最后一个连杆的线速度 ${}^4\mathbf{v}$ 和角速度 ${}^4\mathbf{w}$ ，这是在工具坐标系下的速度，相对于固定坐标系左乘 ${}^0\mathbf{R}_4$ 后即可得到基坐标系下的速度。

3.5.2 雅可比运用与计算

运用雅可比矩阵的相关理论，下面计算表取机械臂的雅可比矩阵。首先写出各关节之间的旋转矩阵，可以参考之前正运动学中的转换矩阵。

$${}^0_1R = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1_2R = \begin{bmatrix} c(\theta_2 - \frac{\pi}{2}) & -s(\theta_2 - \frac{\pi}{2}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -s(\theta_2 - \frac{\pi}{2}) & -c(\theta_2 - \frac{\pi}{2}) & 0 \end{bmatrix}$$

$${}^2_3R = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 \\ s_3 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_4R = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 \\ s_4 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

首先进行第一次迭代运算，因为 0 坐标系为基座， 0w 和 0v 为零矩阵， 0_1R 将 0_1R 转置即可得到关节 1 的速度矢量

$${}^1_1w = {}^0_1R {}^0_1w + \dot{\theta}_1 \times {}^1_1Z = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix}$$

$${}^1_1v = {}^0_1R ({}^0_1v + {}^0_1w \times {}^0_1P) = \mathbf{0} \quad (3-22)$$

继续进行迭代可以求得后面各关节的速度

$$\text{关节 2: } {}^2_2w = \begin{bmatrix} -s(\theta_2 - \frac{\pi}{2})\dot{\theta}_1 \\ -c(\theta_2 - \frac{\pi}{2})\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad {}^2_2v = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-23)$$

$$\text{关节 3: } {}^3_3w = \begin{bmatrix} -s(\theta_2 + \theta_3 - \frac{\pi}{2})\dot{\theta}_1 \\ -c(\theta_2 + \theta_3 - \frac{\pi}{2})\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 \end{bmatrix} \quad {}^3_3v = \begin{bmatrix} 1.034\dot{\theta}_2s_3 \\ 1.034\dot{\theta}_2c_3 \\ 1.034\dot{\theta}_1c(\theta_2 - \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

$$\text{关节 4: } {}^4_4w = \begin{bmatrix} c(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)\dot{\theta}_1 \\ -s(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4)\dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad {}^4_4v = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1c(\theta_2 + \theta_3 + 2\theta_4) + 0.877\dot{\theta}_2s_4 + 0.877\dot{\theta}_3s_4 \\ -\dot{\theta}_1s(\theta_2 + \theta_3 + 2\theta_4) + 0.877\dot{\theta}_2c_4 + 0.877\dot{\theta}_3c_4 \\ \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4 + 0.877\dot{\theta}_1s_{23} \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

如此可以得到关节 4 坐标系下的速度关系式：

$$v^4 = \begin{bmatrix} {}^4_4v \\ {}^4_4w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c(\theta_2 + \theta_3 + 2\theta_4) & 0.877s_4 & 0.877s_4 & 0 \\ -s(\theta_2 + \theta_3 + 2\theta_4) & 0.877c_4 & 0.877c_4 & 0 \\ 0.877s_{23} & 1 & 1 & 1 \\ c_{234} & 0 & 0 & 0 \\ -s_{234} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (3-26)$$

公式 (4.5) 中 6×4 的矩阵即为关节 4 坐标系下的雅可比矩阵 $J(\theta)^4$ ，该矩阵是以关节为变量的函数。对于基坐标系下的， 4_4v 和 4_4w 左乘 0_4R 后得到 v^0 ：

$$v^0 = \begin{bmatrix} {}^0_0v \\ {}^0_0w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1s_4 - 0.877s_1s(\theta_3 - \theta_2) & 0.877c_1c(\theta_3 + \theta_2) - s_1 & 0.877c_1c(\theta_3 + \theta_2) - s_1 & -s_1 \\ -s_1s_4 - 0.877c_1s(\theta_3 + \theta_2) & 0.877s_1c(\theta_3 + \theta_2) + c_1 & 0.877s_1c(\theta_3 + \theta_2) + c_1 & c_1 \\ c_4 & -0.877s_{23} & -0.877s_{23} & 1 \\ 0 & -s_1 & -s_1 & -s_1 \\ 0 & c_1 & c_1 & c_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

其中 6×4 的矩阵即为基坐标系下的雅可比矩阵 $J^0(\theta)$ ，与 $J^4(\theta)$ 之间相差 0_4R 。现验证所求雅可比矩阵的正确性，因为 $\theta = [\pi/2 \ \pi/3 \ \pi/6 \ 0]$ 状态具有一般性，我们选取此状态求雅可比矩阵。将已知参数代入之前求得的矩阵，可以得到

$$J^0(th) = \begin{bmatrix} -1.7725 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.517 & 0 & 0 \\ 0 & -1.7725 & -0.877 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-28)$$

运用 Matlab 中机器人工具箱 jacob0 函数，可以得到 SCARA 机械臂在 th 值状态下相同的雅可比矩阵，如图 3.11 所示，证明已经求得的结果是正确的。

```
>> th=[pi/2 pi/3 pi/6 0]

th =

    1.5708    1.0472    0.5236         0

>> robot_m.jacob0(th)

ans =

    1.9755    0.0000    0.0000    0.0000
    0.1210   -0.5170   -0.0000   -0.0000
    0.0000   -1.9755   -1.0800   -0.2030
         0     1.0000     1.0000     1.0000
         0    -0.0000    -0.0000    -0.0000
    1.0000     0.0000     0.0000     0.0000
```

图 3.11 雅可比验证

第四章 机电系统建模

此章节主要讲述如何将 SOLIDWORKS 中建立的表取机械臂模型，通过插件导入至 MATLAB 中，并通过 Simscape 下搭建的电机模型，驱动机械臂进行仿真实验。Simscape 是将根据经验值得到的机器人参数，代入至 Simscape 中，将 Simscape 反馈的电流、转矩等实时测试曲线与理论值对比，并观测是否超出额定值。仿真力求反映实际情况，各参数均按照实际参数设定，是进行实体实验前的重要基石。

4.1 机械臂物理模型的导入

经过研究，得出两个方案，都可以实现 SOLIDWORKS 三维模型导入至 MATLAB 的 Simscape 中，第一个方式是用 XML 文件格式导入。在 MATLAB 中下载 Simscape Multibody Link 这个插件，使得 MATLAB 与 SolidWorks 之间生成接口。然后依次点击 Tools-Simscape Multibody Link-Export-Simscape Multibody 并等待零件转化结束，得到与各个零件对应的 STEP 文件和 xml 文件^[13]，如图 4.1 所示。

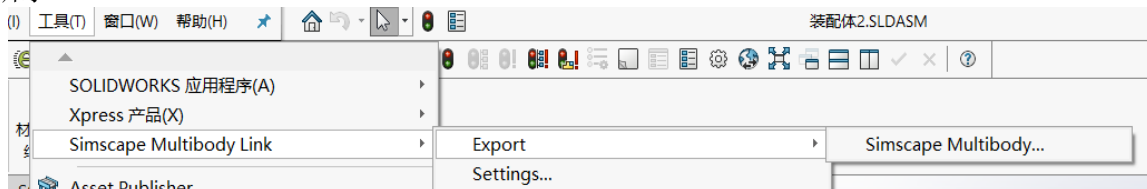


图 4.1 SOLIDWORKS 中生成的接口

第二种方式是在用 URDF 文件格式导入。URDF 是 Unified Robot Description Format 的缩写，是一种官方的机器人统一描述格式，此类文件可以定义机器人的关节和连杆的各项参数。在 Solidworks 中安装 sw_urdf_exporter 插件，在表取机械臂模型的对应位置建立各连杆坐标系，并进行相关设置后，可以输出机械臂模型的 URDF 文件。机械臂刚体树节点设置如图 4.2 所示。

Idx	Body Name	Joint Name	Joint Type	Parent Name(Idx)	Children Name(s)
1	link2	waist_joint	revolute	base_link (0)	link3 (2)
2	link3	shoulder_joint	revolute	link2 (1)	link4 (3)
3	link4	elbow_joint	revolute	link3 (2)	link5 (4)
4	link5	gripper	revolute	link4 (3)	left (5) right (6) tool (7)
5	left	left_joint	revolute	link5 (4)	
6	right	right_joint	revolute	link5 (4)	
7	tool	tool	fixed	link5 (4)	

图 4.2 机械臂刚体树节点关系图

第二种的建模方式是如今大多数研究会选用的手段，尽管 XML 文件格式导入的方式有操作简捷快速、占用内存小等诸多优点。但是对于复杂的机械模型，凸显出了弊端。面对复杂的物理建模系统，物理模型之间坐标系旁多复杂。Xml 格式是自动识别机械臂关节与坐标系的关系的，本文研究的机器人的 CAD 三维模型较为复杂，包含了较多与连杆、关节这种机械臂关键因素无关的元素，如电机、减速器、齿轮、传感器等。因此在导入 MATLAB 后，所形成的 Simscape 模型包含了过多与研究内容无关的模块，和大量复杂、混乱的连接。表取机械臂导入后，经常出现关节与坐标系错位的现象，误差较大。而 URDF 格式文件的方式，是使用者自行设置各关节坐标与关节的关系，导入之后模型很完整，各关节与坐标系之前位置整齐。

在制作机械臂 URDF 文件时，需要保证建立的连杆坐标系与机器人学中建立的一致，保证末端执行器位置和姿态不变。

最后在 MATLAB 同一工作路径下中建立新的 m 文件，输入如下代码：

```
sychaha=importrobot('syc11.urdf');
```

```
showdetails(sychaha);%显示连杆间父子关系
```

```
show(sychaha,'Frames','on','Visuals','off');
```

```
sychaha=smimport('syc11.urdf');
```

即可生成 Simscape 模型，稍微调整模块的位置和连线即可得到如下的物理连线图。

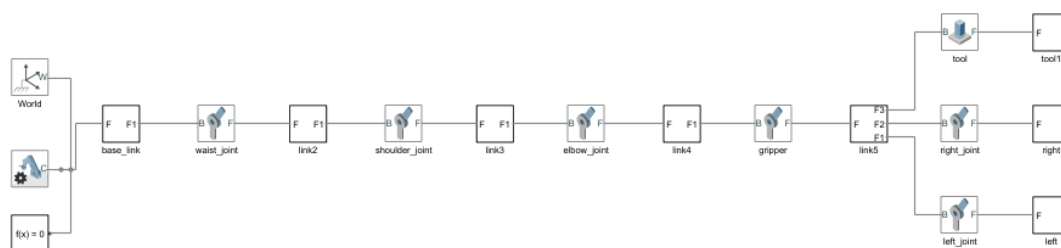


图 4.3 导入 MATLAB 形成的机械物理域连线图
将上方 simscape 模型直接运行，可以得到静止的机械臂模型。

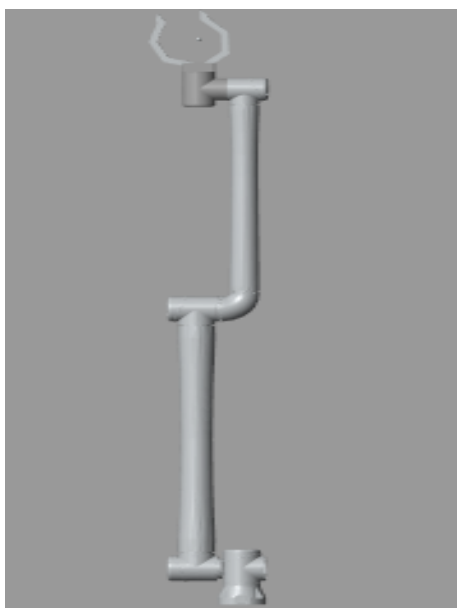


图 4.4 导入原 SolidWorks 模型得到的 Simscape 表取模型

4.2 减速步进电机模块建模

4.2.1 步进电机原理

步进电机以脉冲信号作为控制信号，脉冲信号的一个上升沿对应着一个电机角位移，角位移的大小由电机参数之一步距角决定。也就是一个脉冲对应着一个步进角。脉冲的个数等于输出单位个角位移的次数，从而准确控制机械臂各关节角度。通过准确控制脉冲的频率，即可控制电机转速，从而实现调速。在正常情况下，电机的转速、定位位置只取决于工作时间内脉冲信号的频率和脉冲数目。步进电机的驱动器 **Stepper** 接受来自外界的控制信号。

在本文的研究内容中，所选用的步进电机驱动器有三个输入端口，分别接受 PWM 波形式的激励信号、反转控制电信号和 REF 接地信号；有四个输出端口，分别对应步进电机的 (A+)、(A-)、(B+)、(B-) 四个端口（即为四相步进电机）。步进电机驱动器内部设置如下：仿真模式为步进，

使能阈值电压和反转阈值电压均为 2.5V，输出电压为 5V，步进模式为整步运行方式。在步进电机模块中，设置步距角设为 1° 。只有驱动器使能端接收到高于自身阈值电压的信号后，则步进电机才会启动工作。当驱动器使能端输入高于自身阈值电压的信号并且反转端输入低于反转阈值电压的信号时，步进电机正转，保持驱动器使能端输入高于自身阈值电压的信号，反转端也输入高于自身阈值电压的信号时，步进电机反转。

4.2.2 减速步进电机模块搭建

在确定了电机的原理和用法之后，需要考虑添加减速器模块并连接在步进电机之后，使仿真效果尽可能地接近实际情况。在实际机械臂关节电机控制时，步进电机输出都端连接减速器输入端，减速器输出端就是实际的机械臂关节。电机减速器承担的是降低步进电机输出轴转速，以更低的转速传输给关节，并放大电机输出的转矩的作用。在添加减速器模块后，减速步进电机模块整体的步距角将随着减速比的改变而改变。为尽量简化模型并提升控制效果，选择采用现实中常见的行星齿轮箱来模拟减速器部分，在该模块中，默认行星齿轮为主动件，太阳轮为从动件。通过设置行星轮与太阳轮的齿数比即可设定减速模块的减速比^[4]。在本文的研究内容中，各个减速步进模块的减速比是参考实际机器人中的减速步进电机选型来进行设置的。如电机 2 的减速比为 100，则电机步距角设置为 1° 的同时，行星齿轮的减速比设置为 100。参考的电机选型结果如下表。

表 4-1 电机型号

关节	电机型号	步进角	减速比	额定转矩	额定转速	减速器	电源输入
1	RE 65	0.025°	40	0.84	2960	GP 62 A Ø62	DC24V±10%
2	IDX 56 L	0.01°	100	1.55	3440	GP81A Ø81	DC24V±10%
3	IDX 56 L	0.05°	20	1.55	3440	GPX 52 UP Ø52	DC24V±10%
4	IDX 56 L	0.1°	10	1.55	3440	GPX 52A	DC24V±10%
5	RE 50	0.5°	2	0.42	4620	GPX 42 UP Ø42	DC24V±10%

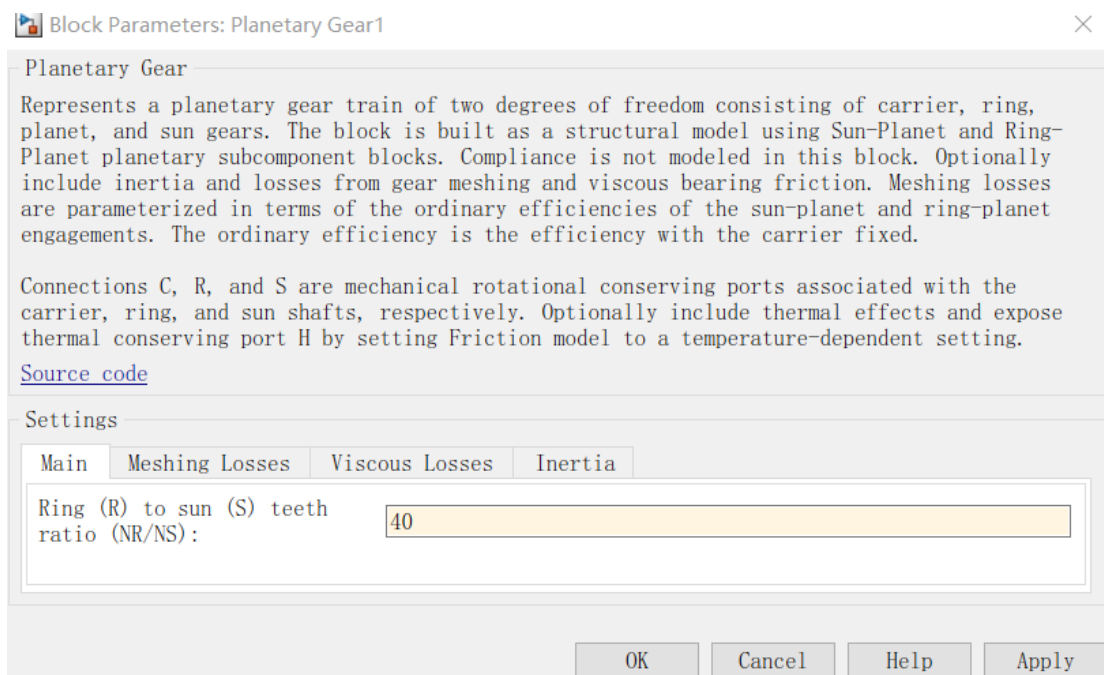


图 4-5 减速电机 1 的减速比设置

在参考了 MTALAB 官方文档提供的例程之后，将脉冲控制信号连接电压源转化为步进电机驱

动器的输入，并在电机的输出端添加旋转自由端，在减速齿轮的输出轴后添加旋转位移传感器。最后单个减速步进电机模块的连接效果如下。

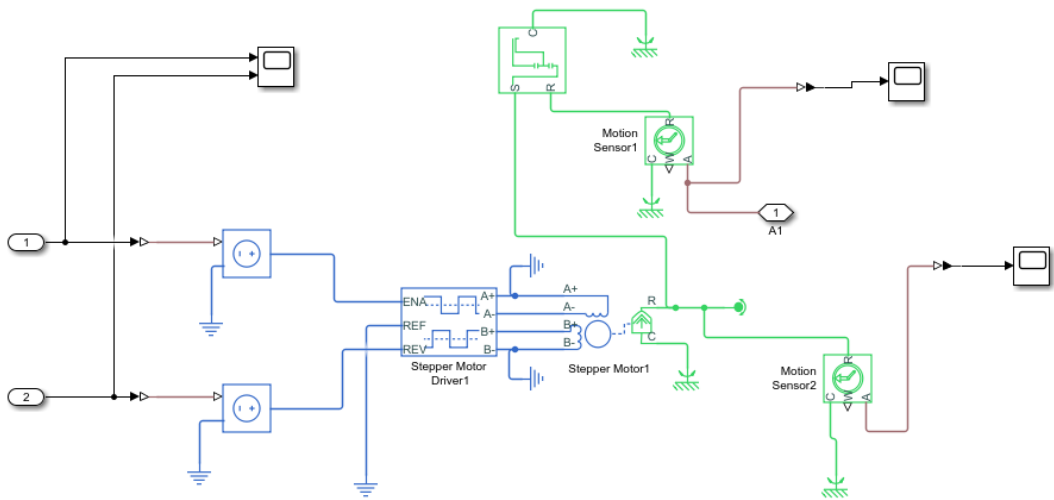


图 4.6 减速步进电机模块整体建模效果

4.3 模型综合测试

4.3.1 电机模型性能测试

将搭建好的减速步进电机模块与关节进行连接，并测试是否能实现对关节转动的控制。以关节 1 为例，设置输入信号如下图 4.7，即反转信号设为 0，使能端输入高于阈值电压的信号，令电机正转。在 1s 的周期内给予步进电机共 10 个脉冲。在电机输出轴连接减速器之前与之后分别连接示波器，观察响应曲线。在减速比为 40 的情况下，理论上能够实现 0.025° 的角位移。关节的输出信号如下图，能做到机械臂角度与电机角度成减速比关系，且步进角数值准确，符合预期。

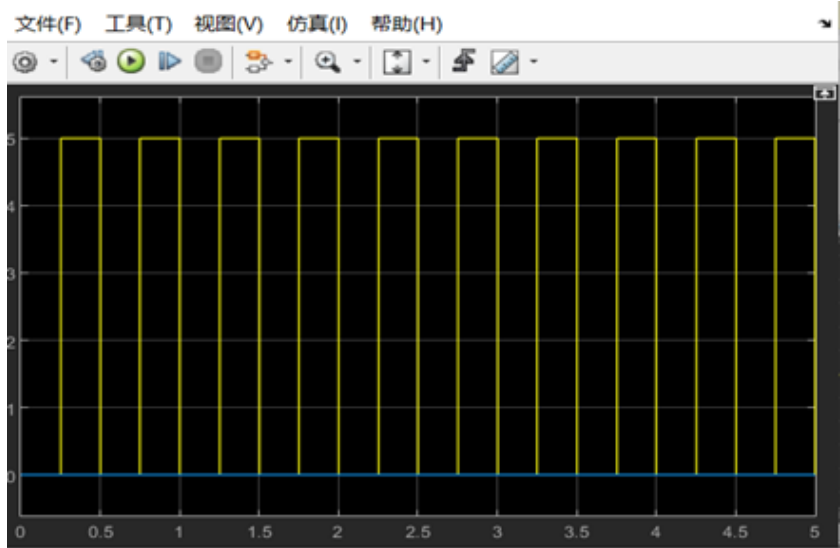


图 4.7 输入信号

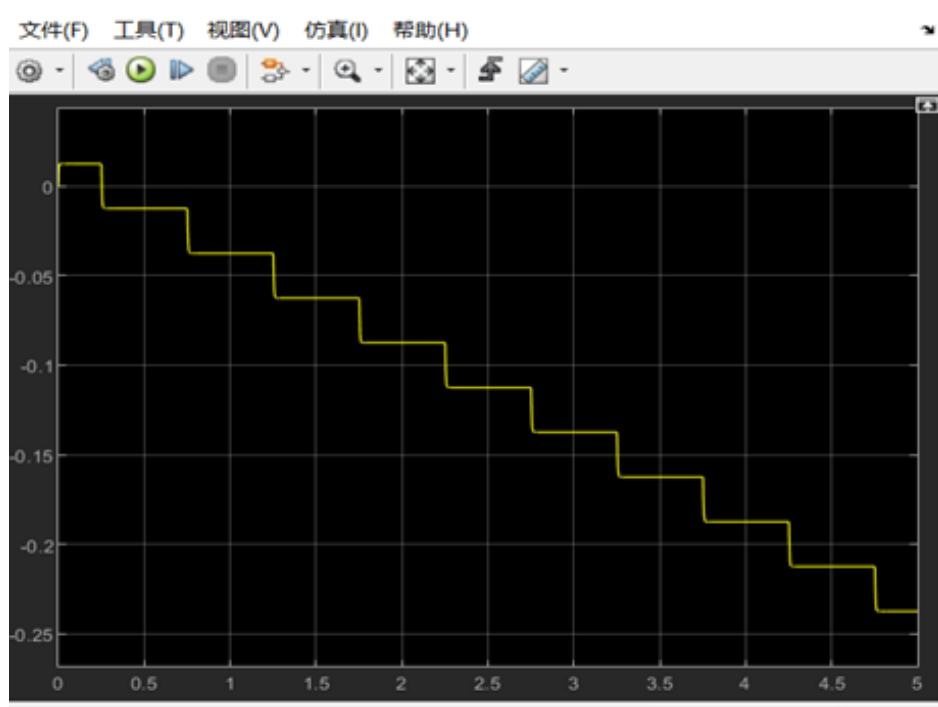


图 4.8 测试用输出信号，连接减速器前

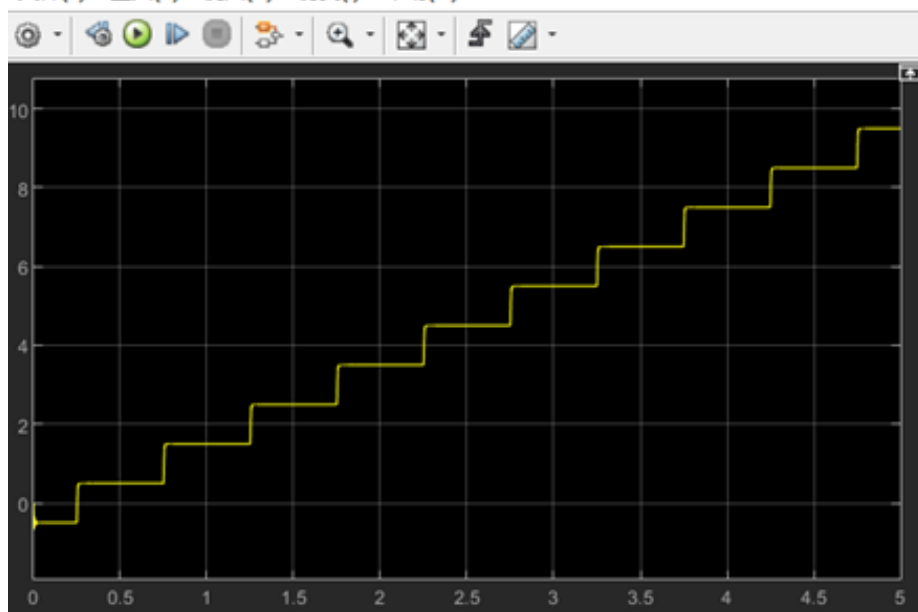


图 4.9 测试用输出信号，连接减速器后

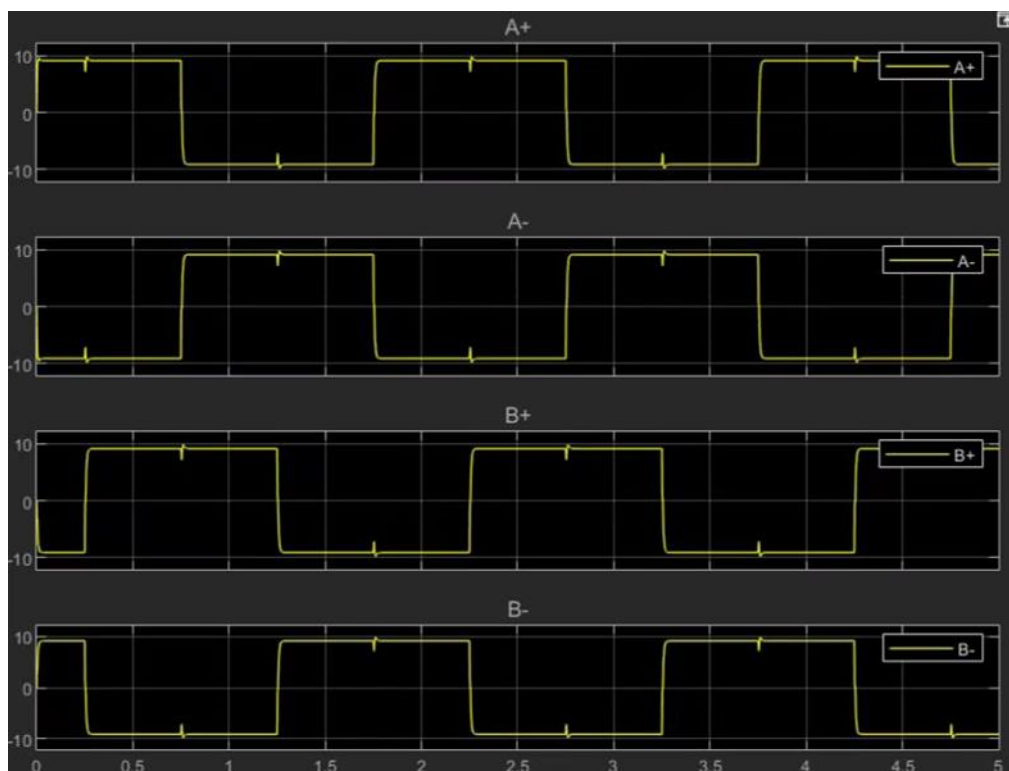


图 4.10 A+、A-、B+、B- 四相电流图

提取四相步进电机四个端口电流曲线，输出如图 4.11 所示。A、B 端口之间相位相差 180 度，同一端口的不同正负极之间相差 360 度。说明搭建的减速步进电机模块能够实现对关节的转动控制，并且没有超出，满足真实情况下于是对整体模型进行封装，留出机械臂四个臂杆关节和两个夹爪关节的驱动信号输入端口，和他们对应的角位移及转速信号输出端口。同时对六个减速步进电机模块进行封装，留出六个使能脉冲信号的输入端口、六个反转电压输入端口及相应的输出端口，最后整体的封装和连接效果如下^[15]。

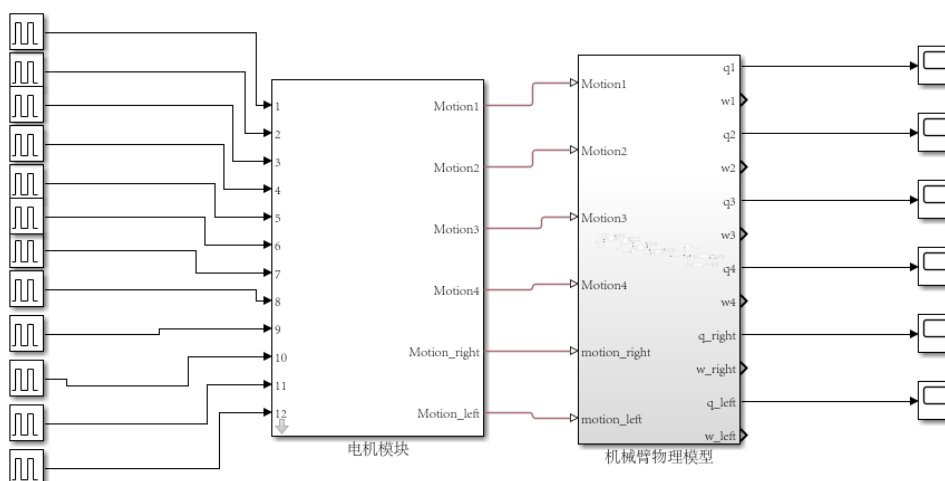


图 4.11 机电系统整体封装效果图

4.3.2 电机模型稳定性测试

在对系统进行封装之后，将输入的脉冲信号设置为阶跃信号，以此测试机电系统模型整体的稳定性，测试过程如下。

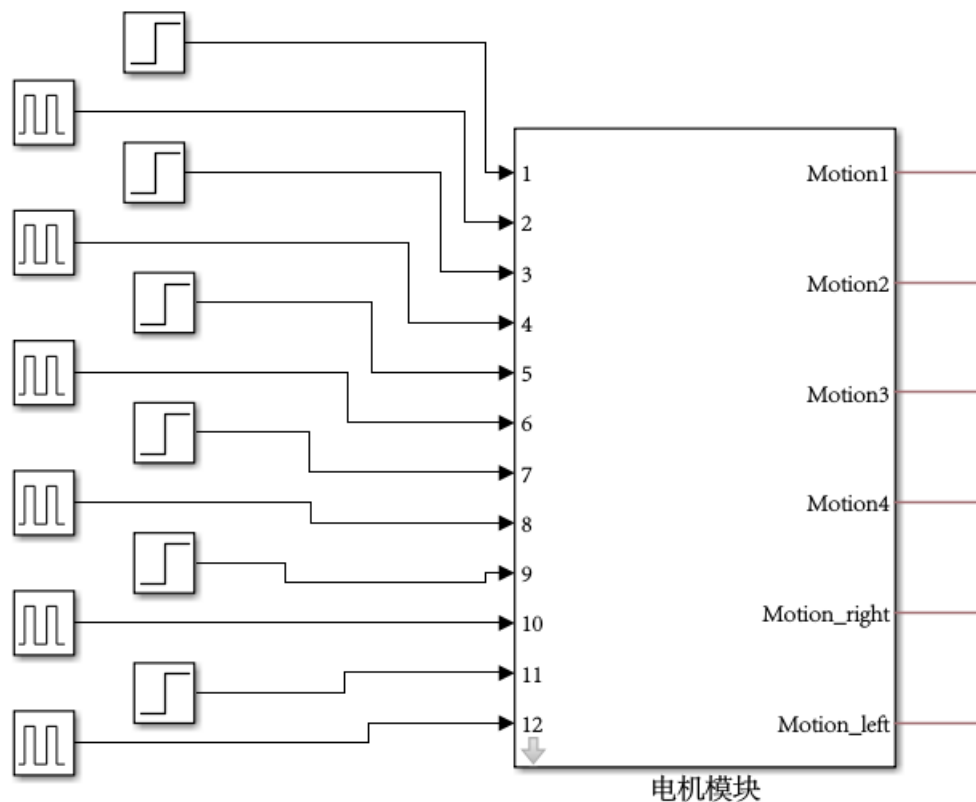
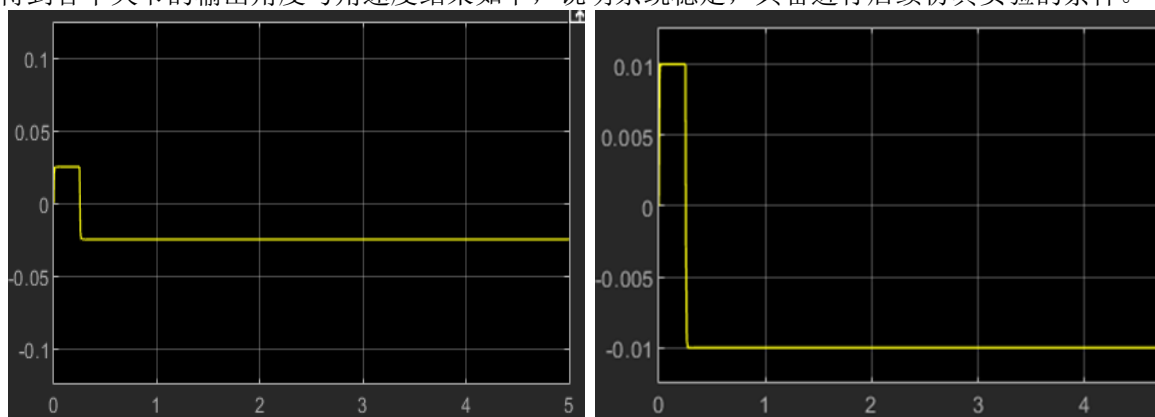


图 4.12 阶跃信号输入测试

得到各个关节的输出角度与角速度结果如下，说明系统稳定，具备进行后续仿真实验的条件。



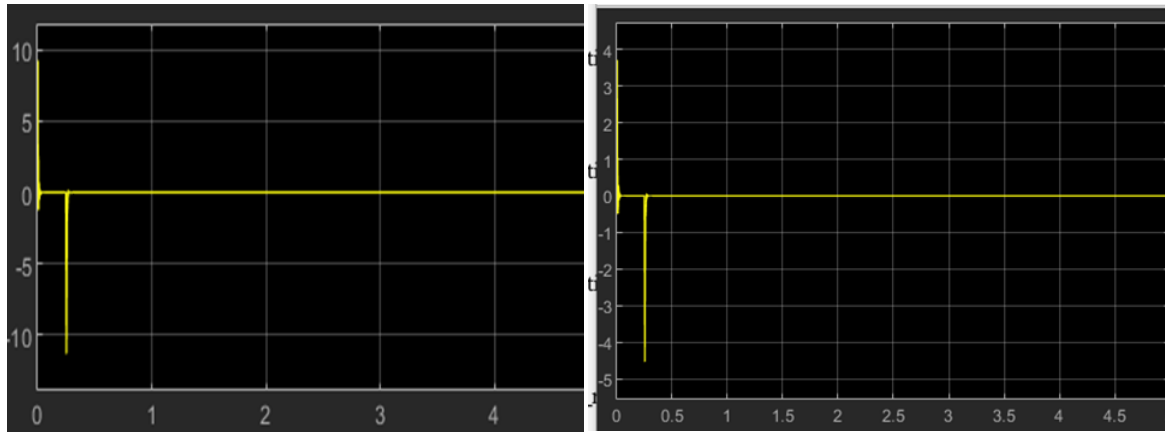


图 4.13 关节 1、2 的阶跃信号响应

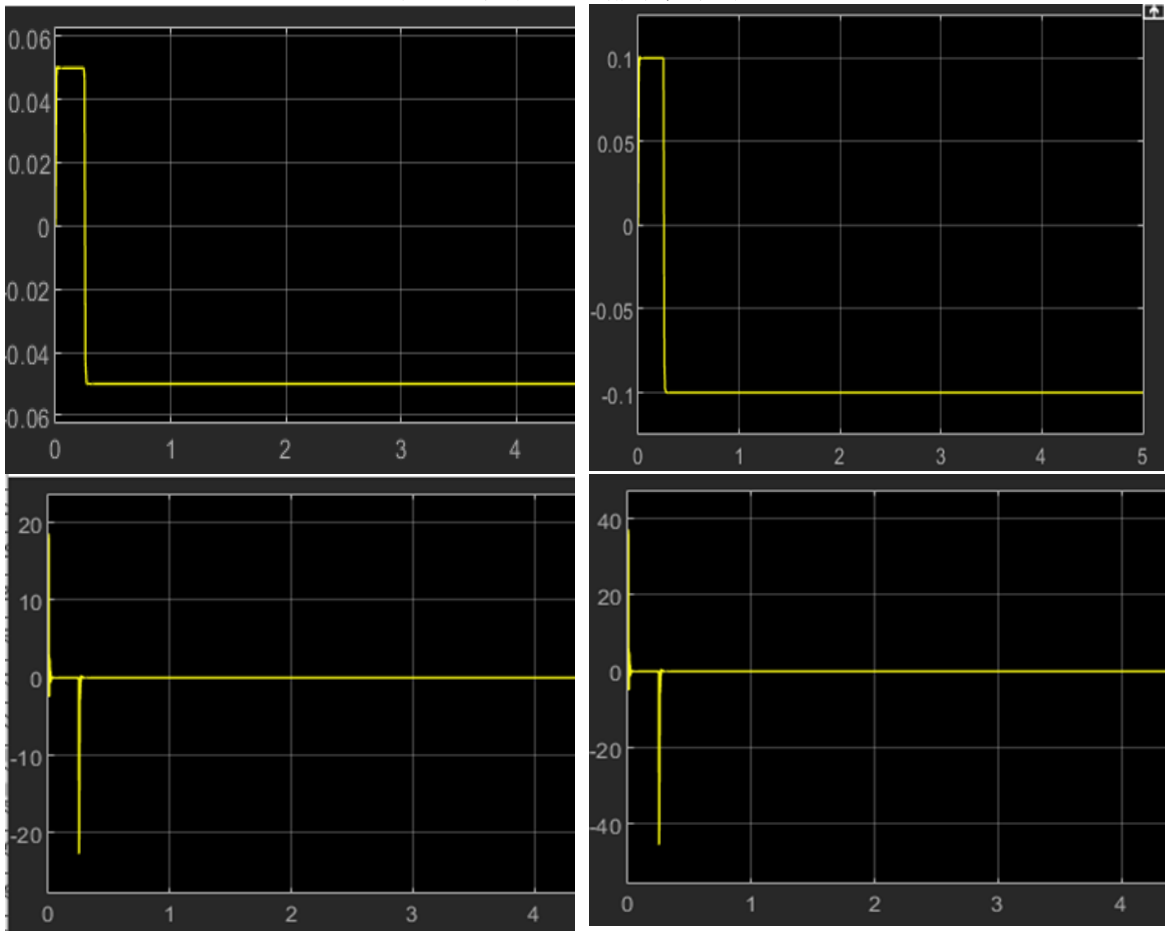


图 4.14 关节 3、4 的阶跃信号响应

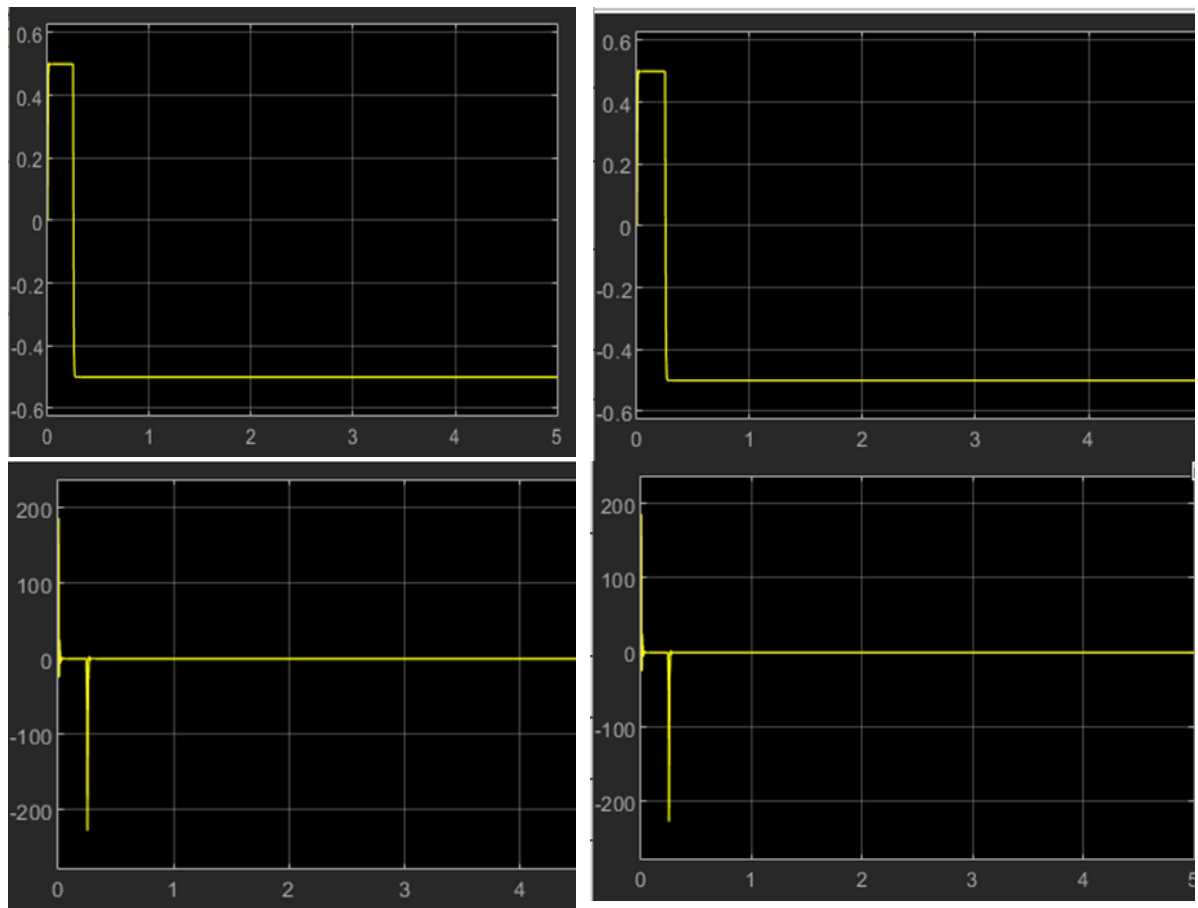


图 4.15 机械爪左爪、右爪的阶跃信号响应

第五章 表取机械臂的轨迹规划

根据表取机械臂的工作特点，本文选取常见的取放零件运动，用来近似模拟月球表取采样机械臂在宇宙空间完成抓取月壤，采物品的业务要求。即机械臂从初始姿态启动，将传送带上的零件搬运到指定位置放置，最后回到最初状态，并对这项工作进行轨迹规划。

运动规划的任务是设计机器人执行器即机械臂操作运动的指令函数，这种随时间变化的指令函数主要包括两类：一类是点到点的运动，如将部件从一点搬运到另外一点；另一类是沿着一段连续的曲线运动，如拟合一段焊缝的操作。本项目采用点到点的规划，给定起始点与终止点，让机械臂精准运动到目标位置抓取物体，并放置到指定区域，最终返回初位置。

5.1 机械臂工作路径节点及抓取策略分析

以表取机械臂的基座底部中心建立基坐标系(Base frame)，机械爪夹持中心点建立工具坐标系 (Tool frame)。通过在 SOLIDWORKS 里设置基座底部中心点与原点重合（如图 5.1），使得在 Simscape 里，基坐标系与大地坐标系(Station frame)重合。

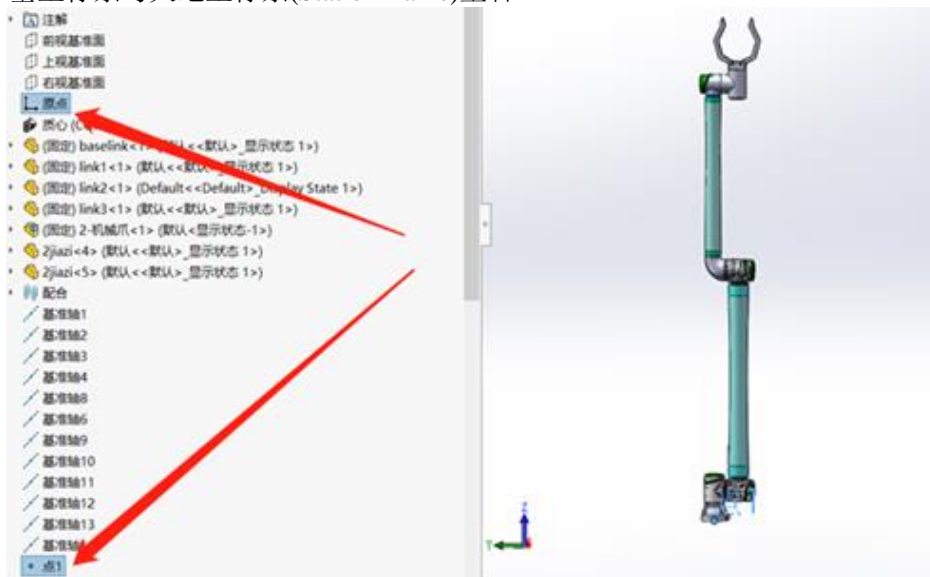


图 5.1 基坐标系与大地坐标系位置重合

设需要抓取的零件质量为 3kg，在基坐标系的（1.2765，0.4079，-0.9034）处，放置零件处位于（0.5472，1.2387，0.6656）处。机械臂从初始位置经过关节空间规划移动到预备位置，接着通过笛卡尔空间直线插补的方式运动到抓取位置，之后通过关节空间规划将零件搬运到指定圆盘位置，将零件放好后，最后回到初始状态。仿真整体抓取的末端轨迹图和规划图如图 5.2、5.3 所示。

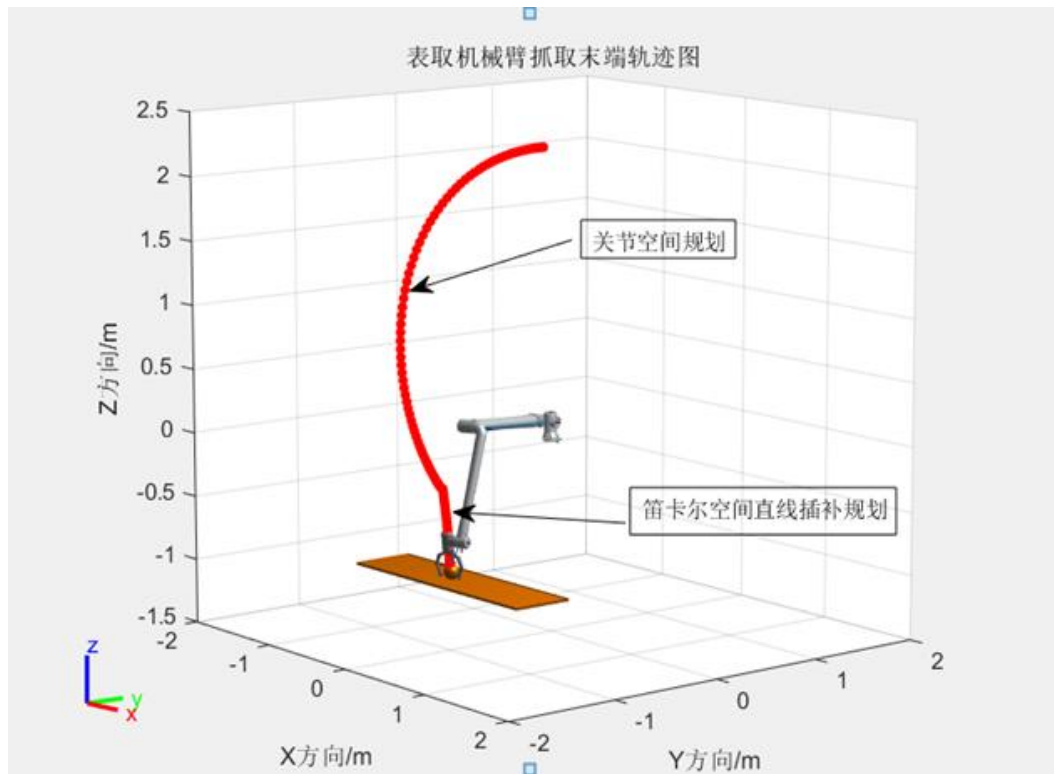


图 5.2 机械臂抓取过程末端轨迹图

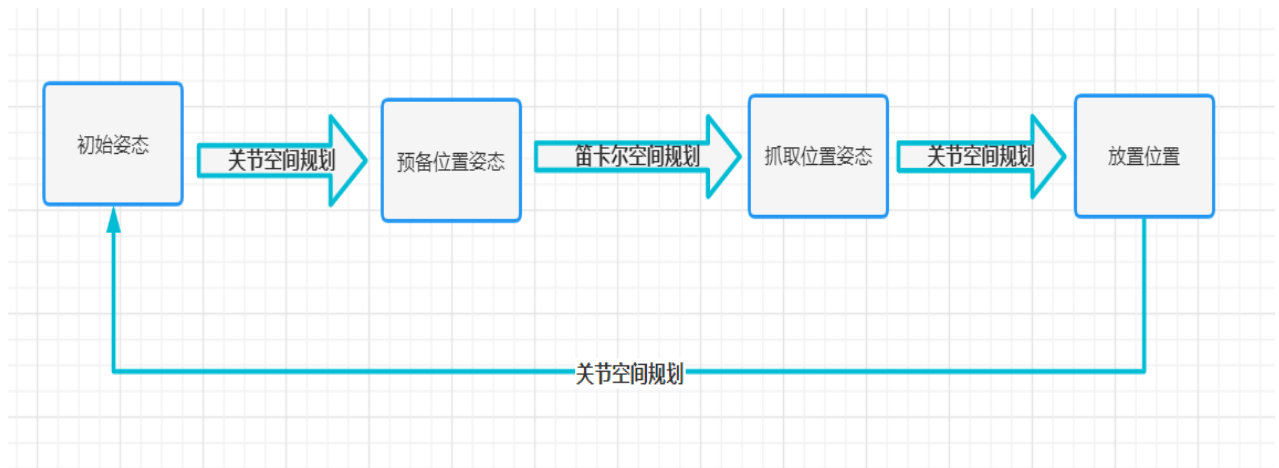


图 5.3 整体机械臂规划逻辑图

抓取的数学意义是使得机械臂的工具坐标系(Tool frame)和目标物体坐标系 (Goal frame)，即 ${}^B_T T = {}^B_G T$ 。各关节空间位置图如下所示。

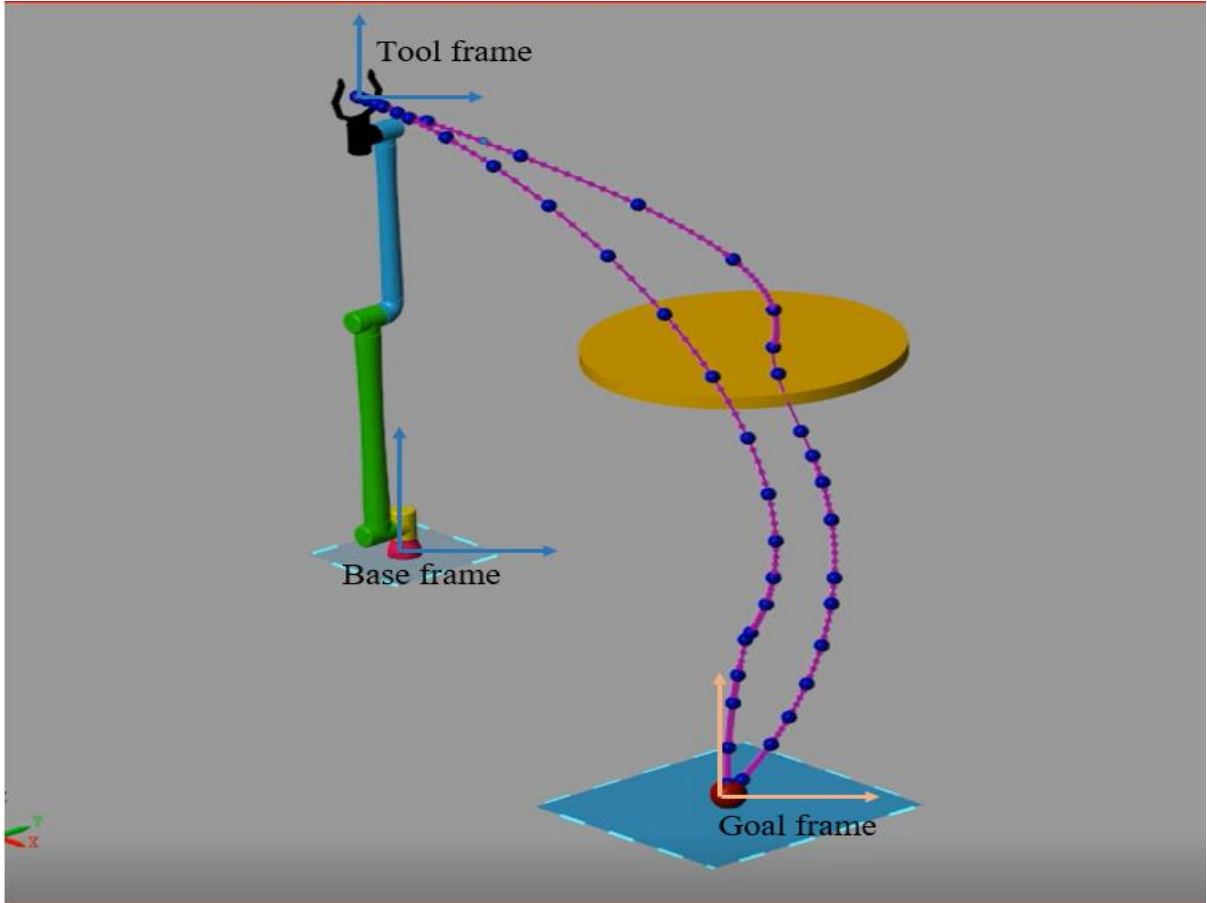


图 5.4 机械臂空间坐标位置图

腕点坐标系就是机械臂的各关节的坐标系， ${}^0_4 T = {}^0_w T$ ，腕点坐标系与工具坐标系的变换矩阵为：

$${}^w_T T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0.203 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0.121 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

目标零件对于基座坐标系的变换矩阵为：（基座坐标系到目标零件）

$${}^B_G T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1.2765 \\ -1 & 0 & 0 & 0.4079 \\ 0 & 1 & 0 & -0.9034 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

夹持时目标零件对于机械爪末端夹持点的变换矩阵：

$${}^T_G T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

通过转换矩阵的连乘性质，可以反求出 ${}^0_4 T$ ：

$$\begin{aligned} {}^S_G T &= {}^B_G T = {}^B_w T {}^w_T T {}^T_G T \\ {}^0_4 T &= {}^B_w T = {}^B_G T {}^T_G T^{-1} {}^w_T T^{-1} \end{aligned} \quad (5-1)$$

将之前的转换矩阵带入（5-1）式求得：

$${}^0_4T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1.3975 \\ -1 & 0 & 0 & 0.6109 \\ 0 & 1 & 0 & -0.9034 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由求得的转换矩阵 0_4T 可知，夹取时机械臂末端在基坐标系的（1.3975, 0.6109, -0.9034）处。根据自己编写的逆解公式，可以反推出机械臂在抓取零件时的关节空间变量为表 5.1 所示。

表 5.1 机械臂抓取时关节空间坐标

	θ_1/rad	θ_2/rad	θ_3/rad	θ_4/rad
1	0.4014	-1.5984	-1.1716	0.4313

此时机械臂姿态如图 5.5 所示。

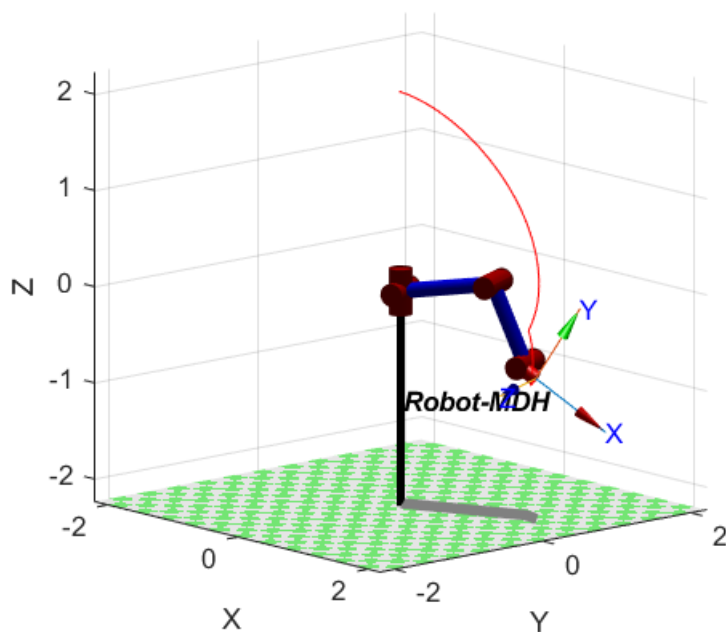


图 5.5 机械臂抓取姿态

用相同的方法求得机械臂在即将放置零件时的关节坐标如表 5.2 所示，

表 5.2 放置时各关节坐标

	θ_1/rad	θ_2/rad	θ_3/rad	θ_4/rad
1	1.2277	-0.3832	-1.5404	0.3528

此时机械臂姿态如图 5.6 所示。

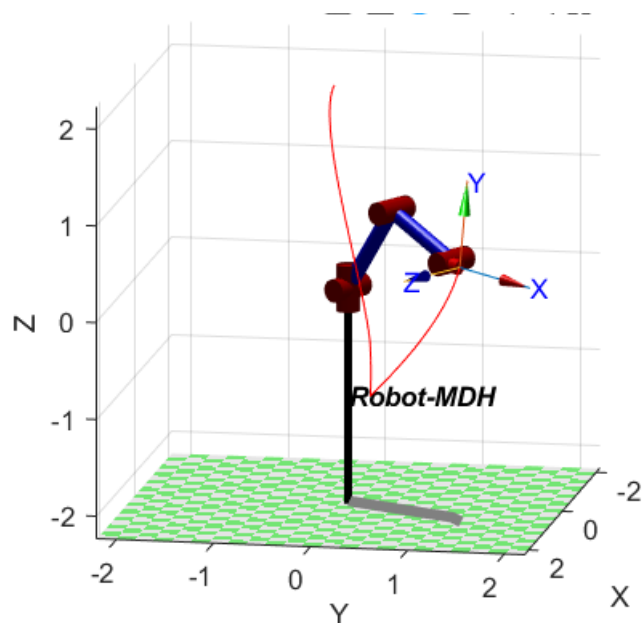


图 5.6 机械臂放置姿态

至此我们已经确定了机械臂的初始位姿和抓取、放置零件时的位姿，整个抓取过程中各节点的关节变量如表 5.3 所示：

表 5.3 机械臂各节点的关节坐标

状态	θ_1/rad	θ_2/rad	θ_3/rad	θ_4/rad
初始位置	0	0	0	0
预备位置	0.4014	-0.9425	-1.5708	0.1745
抓取位置	0.4014	-1.5984	-1.1716	0.4313
放置位置	1.2277	-0.3832	-1.5404	0.3528
末位置	0	0	0	0

5.2 五次多项式插值理论

由于三次多项式只能对初末点的位置速度信息进行约束，缺少初末加速度的控制，使得机械臂运行过程中加速度非连续，易造成加速度跳变，而机械臂的加速度在运动过程中直接影响了力学信息，当运动轨迹更为严格，对初末位置的加速度有一定要求时，需要用更高阶的多项式对路径进行插值。构建五次多项式： $\theta(t)=a_0+a_1t+a_2t^2+a_3t^3+a_4t^4+a_5t^5$ ，可以列出以下六个方程：

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta(0)=a_0=\theta_0 \\ \theta(t_f)=a_0+a_1t_f+a_2t_f^2+a_3t_f^3+a_4t_f^4+a_5t_f^5=\theta_f \\ \dot{\theta}(0)=a_1=\dot{\theta}_0 \\ \dot{\theta}(t_f)=a_1+2a_2t_f+3a_3t_f^2+4a_4t_f^3+5a_5t_f^4=\dot{\theta}_f \\ \ddot{\theta}(0)=2a_2=\ddot{\theta}_0 \\ \ddot{\theta}(t_f)=2a_2+6a_3t_f+12a_4t_f^2+20a_5t_f^3=\ddot{\theta}_f \end{array} \right. \quad (5-2)$$

6 个方程可以解出 6 个未知数：

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0=\theta_0 \\ a_1=\dot{\theta}_0 \\ a_2=\frac{\ddot{\theta}_0}{2} \\ a_3=\frac{10(\theta_f-\theta_0)}{t_f^3}-\frac{4\dot{\theta}_f+6\dot{\theta}_0}{t_f^2}+\frac{\ddot{\theta}_f-3\ddot{\theta}_0}{2t_f} \\ a_4=\frac{15(\theta_0-\theta_f)}{t_f^4}+\frac{7\dot{\theta}_f+8\dot{\theta}_0}{t_f^3}+\frac{3\ddot{\theta}_0-2\ddot{\theta}_f}{2t_f^2} \\ a_5=\frac{6(\theta_f-\theta_0)}{t_f^5}-\frac{3(\dot{\theta}_f+\dot{\theta}_0)}{t_f^4}+\frac{(\ddot{\theta}_f-\ddot{\theta}_0)}{2t_f^3} \end{array} \right. \quad (5-3)$$

将解得的各多项式系数带入后，可以获得机械臂在关节空间下五次多项式的插值函数模型。采用先前推导的五次多项式插值法理论，对表取机械臂在关节空间进行实际轨迹规划，保持机械臂在初末位置加速度平稳过渡。选取状态 0 到状态 1 进行轨迹规划，建立 4 个关节的运动多项式：

$$\begin{aligned} \theta_1 &= a_{10} + a_{11}t + a_{12}t^2 + a_{13}t^3 + a_{14}t^4 + a_{15}t^5 \\ \theta_2 &= a_{20} + a_{21}t + a_{22}t^2 + a_{23}t^3 + a_{24}t^4 + a_{25}t^5 \\ \theta_3 &= a_{30} + a_{31}t + a_{32}t^2 + a_{33}t^3 + a_{34}t^4 + a_{35}t^5 \\ \theta_4 &= a_{40} + a_{41}t + a_{42}t^2 + a_{43}t^3 + a_{44}t^4 + a_{45}t^5 \end{aligned} \quad (5-4)$$

对于从状态 0 到状态 1，为保证机械臂启动和停止运行时的稳定性，并避免过大的驱动力矩输入，我们定义初始和终止位置的速度、加速度均为 0。故 4 个关节的初末位置、速度和加速度分别为：

$$\begin{aligned} \theta_{10} &= 0, \theta_{1f} = 0.4014, \dot{\theta}_{10} = 0, \dot{\theta}_{1f} = 0, \ddot{\theta}_{10} = 0, \ddot{\theta}_{1f} = 0, \\ \theta_{20} &= 0, \theta_{2f} = -0.9425, \dot{\theta}_{20} = 0, \dot{\theta}_{2f} = 0, \ddot{\theta}_{20} = 0, \ddot{\theta}_{2f} = 0, \\ \theta_{30} &= 0, \theta_{3f} = -1.5708, \dot{\theta}_{30} = 0, \dot{\theta}_{3f} = 0, \ddot{\theta}_{30} = 0, \ddot{\theta}_{3f} = 0, \\ \theta_{40} &= 0, \theta_{4f} = -0.1745, \dot{\theta}_{40} = 0, \dot{\theta}_{4f} = 0, \ddot{\theta}_{40} = 0, \ddot{\theta}_{4f} = 0. \end{aligned}$$

假定运动时间为 $t_f = 5s$ ，通过之前推导的公式 (3.8)，可以解出四个关节运动轨迹五次多项式中的 6 个未知数：

$$\begin{aligned} a_{10} &= a_{11} = a_{12} = 0, a_{13} = 0.0321, a_{14} = -0.0096, a_{15} = 0.0008 \\ a_{20} &= a_{21} = a_{22} = 0, a_{23} = -0.0754, a_{24} = 0.0226, a_{25} = -0.0018 \\ a_{30} &= a_{31} = a_{32} = 0, a_{33} = -0.126, a_{34} = 0.0377, a_{35} = -0.003 \end{aligned}$$

$$a_{40} = a_{41} = a_{42} = 0, a_{43} = -0.014, a_{44} = 0.0042, a_{45} = -0.0004$$

将上面解得的系数带入建立好的多项式 (3.9) 中, 可以得到三个关节的角位移轨迹拟合多项式:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= 0.0321t^3 - 0.0096t^4 + 0.0008t^5 \\ \theta_2 &= -0.0754t^3 + 0.0226t^4 - 0.0018t^5 \\ \theta_3 &= -0.126t^3 + 0.0377t^4 - 0.003t^5 \\ \theta_4 &= -0.014t^3 + 0.0042t^4 - 0.0004t^5\end{aligned}\quad (5-5)$$

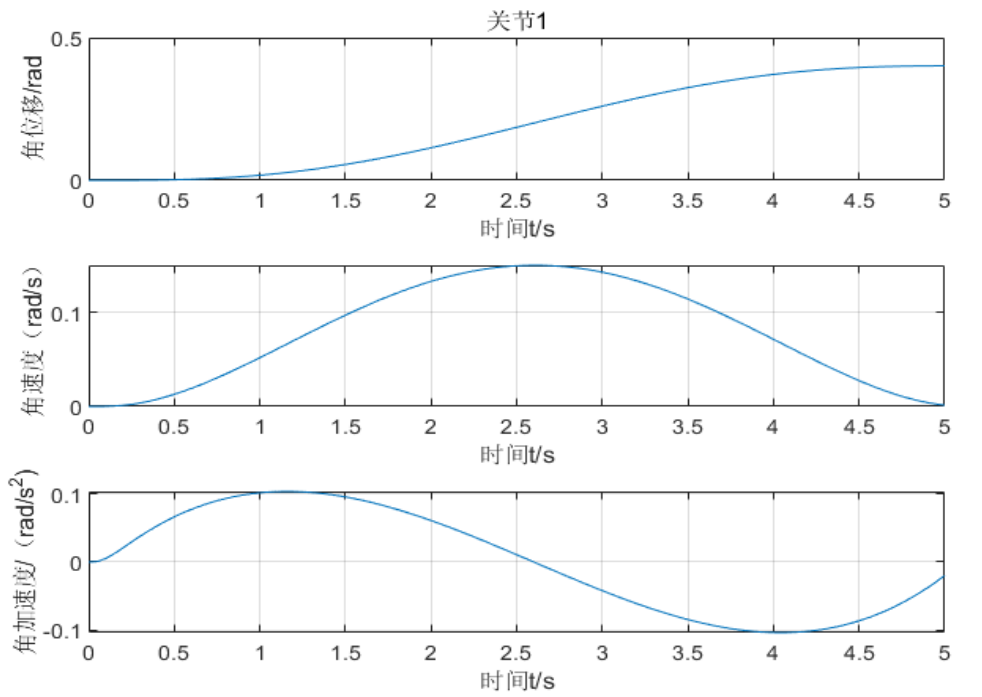
其一阶导数、二阶导数为角速度、角加速度的表达式分别为:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}_1 &= 0.0963t^2 - 0.0384t^3 + 0.004t^4 \\ \dot{\theta}_2 &= -0.2262t^2 + 0.091t^3 - 0.009t^4 \\ \dot{\theta}_3 &= -0.378t^2 + 0.1508t^3 - 0.015t^4 \\ \dot{\theta}_4 &= -0.042t^2 + 0.0168t^3 - 0.002t^4 \\ \ddot{\theta}_1 &= 0.1926t - 0.1152t^2 + 0.016t^3 \\ \ddot{\theta}_2 &= -0.4524t + 0.273t^2 - 0.036t^3 \\ \ddot{\theta}_3 &= -0.756t + 0.4524t^2 - 0.06t^3 \\ \ddot{\theta}_4 &= -0.084t + 0.0504t^2 - 0.008t^3\end{aligned}\quad (5-6)$$

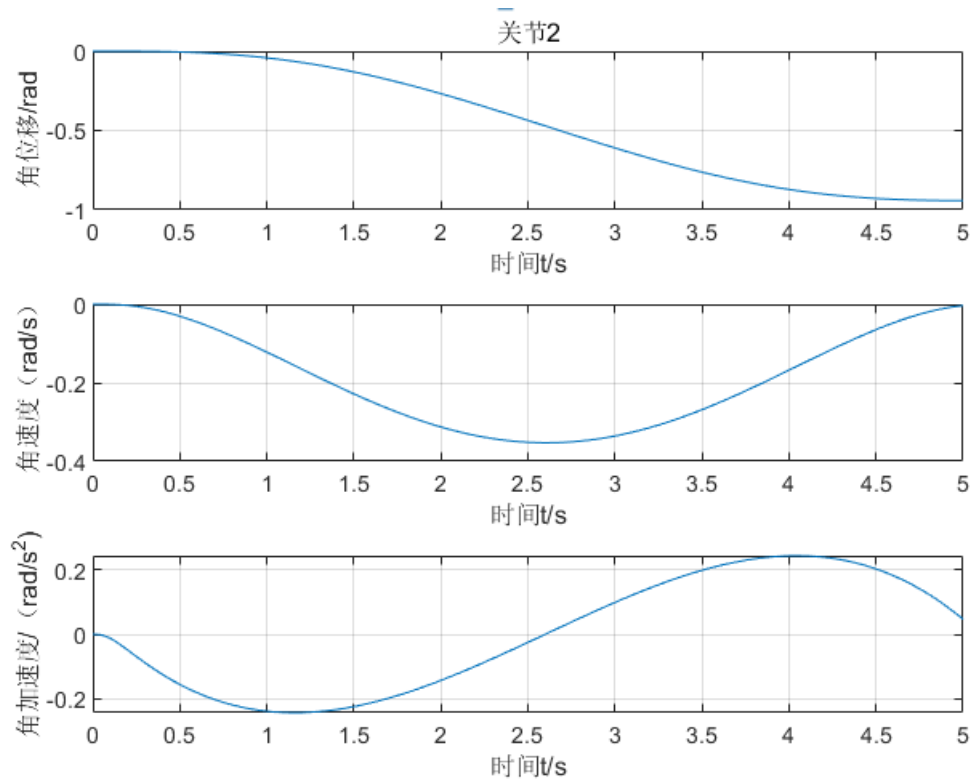
5.3 表取机械臂关节空间规划

在知道机械手的起点和终止点后, 我们已经通过逆向运动学求得对应的关节空间的角度矢量, 接下来需要拟合一个函数方程使各关节经过所需中间节点并最终到达目标点, 且每段路径需要各关节同时达到目标点, 以实现期望的位姿。

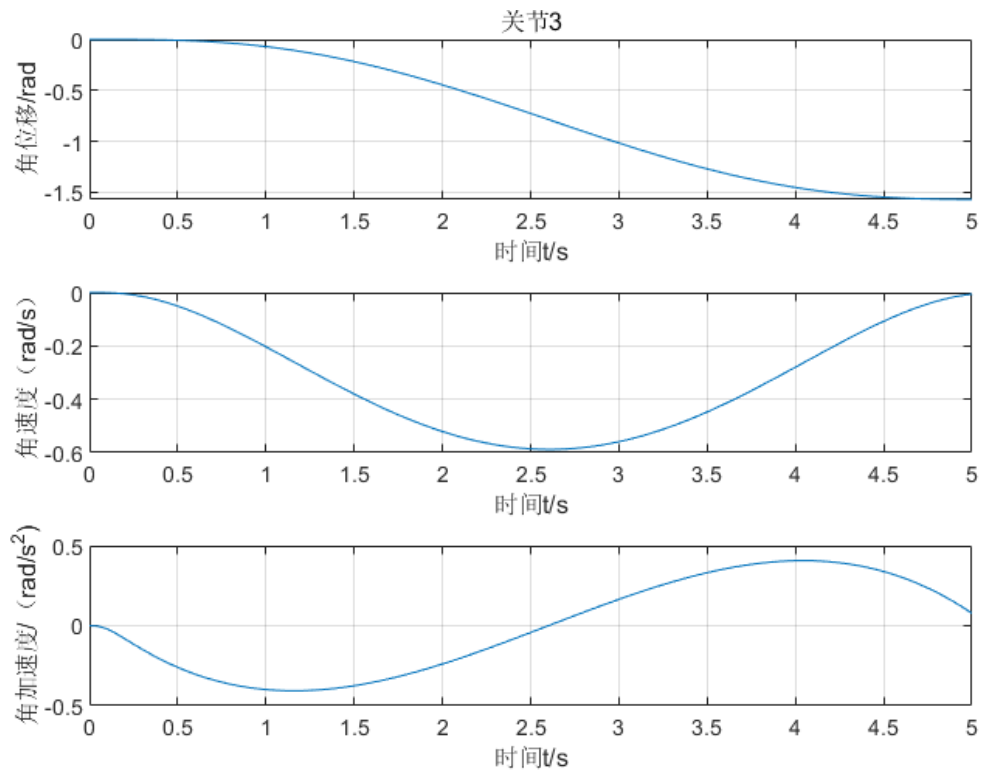
对于机械臂的关节空间轨迹规划, Matlab 机器人工具箱提供了 `jtraj` 函数, 该条指令实现关节空间的五次多项式的插值运算, 其语句为: `T=[0:0.05:5];[q qd qdd]=jtraj(q0,q1,T)`, `T` 为时间序列, `q`、`qd` 和 `qdd` 分别为初始关节位置 `q0` 运动到目标关节位置 `q1` 过程所有插值点关节位移、速度和加速度的集合。对于机械臂从初位置到预备位置过程中, 相邻两节点之间采用五次多项式插值, 插值时间均选择 2s, 可以得到整个工作过程机械臂各关节的位移、位移的一阶导---速度和二阶导---加速度图像, 如图 5.7 所示:



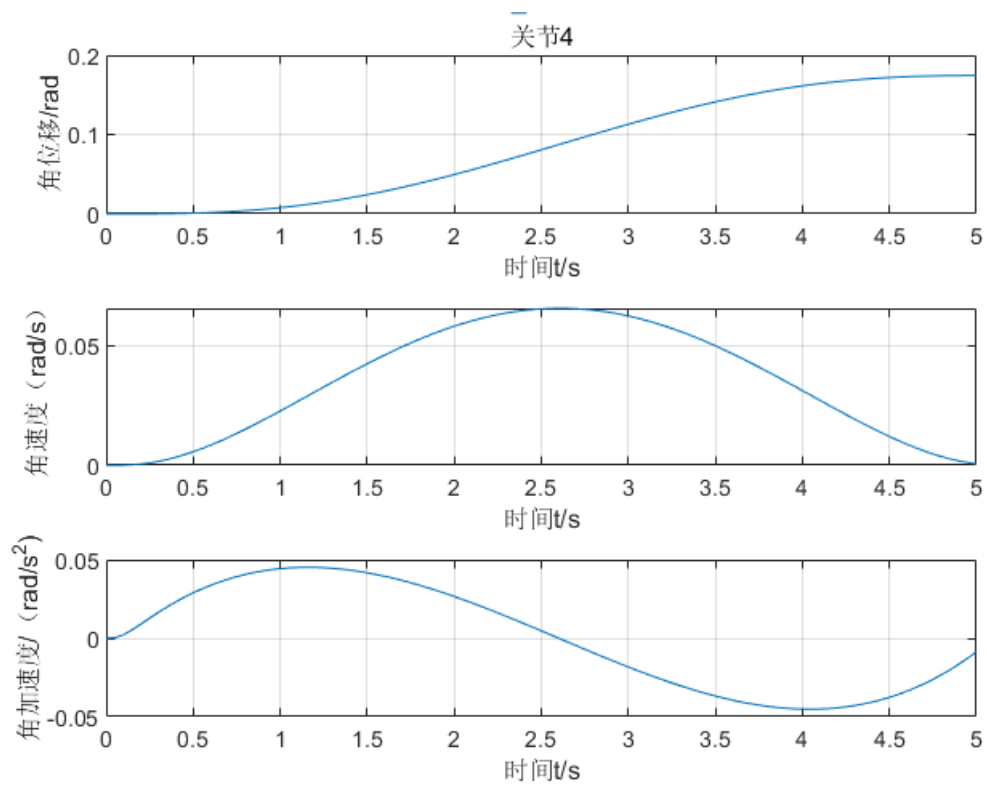
(a) 关节 1



(b) 关节 2



(c) 关节 3



(d) 关节 4

图 5.7 关节空间的轨迹规划

该过程机械臂末端在笛卡尔空间 XOZ 平面中的轨迹图为：

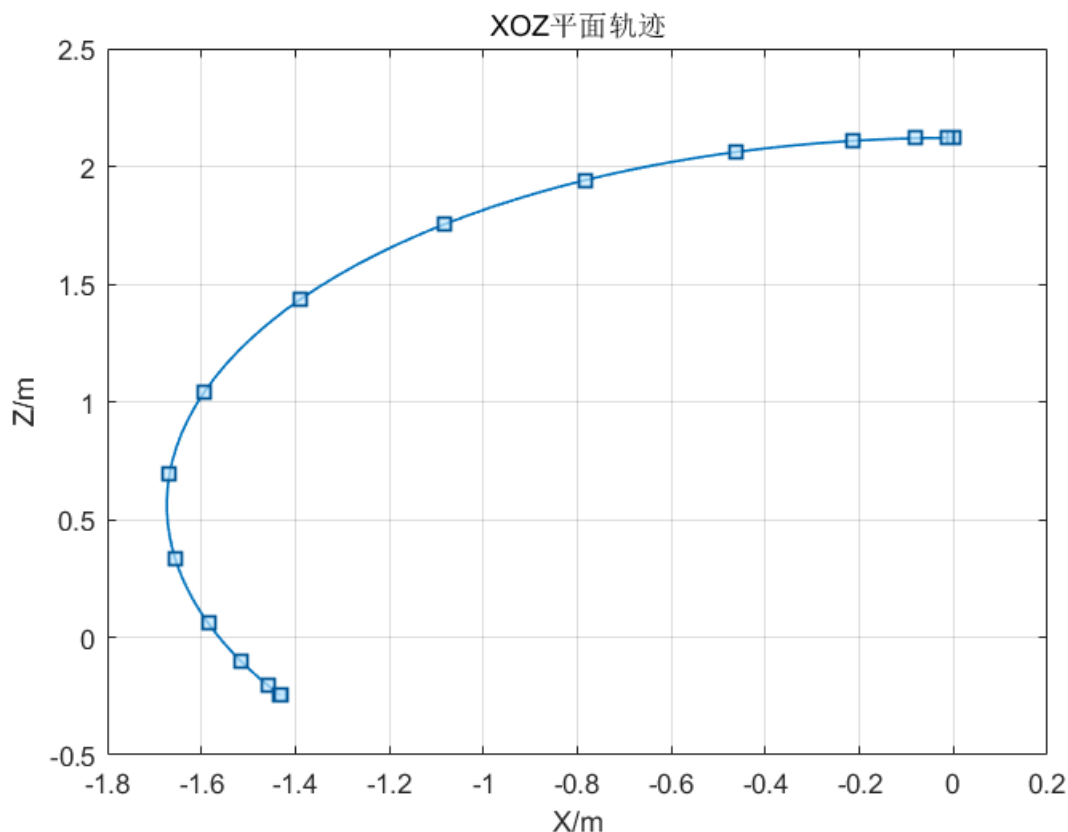


图 5.8 XOZ 平面轨迹

5.4 笛卡尔空间直线插补规划

笛卡尔空间进行运动规划用于精准规划，比关节空间规划更运算量更大，求解时间长，适用于短距离规划。本项目机械臂靠近抓取点直线抓取的过程采用该方法。机械臂的运动轨迹实际工作中完全是由关节空间的运动控制，所以欲运用笛卡尔空间的运动规划，必须先通过逆向运动学转换为关节空间的运动规划，才可以用于实际的操作。同时，运动规划还必须考虑工作空间的奇异点和避障等问题。笛卡尔空间直线轨迹规划算法的思路是，已知直线起始点与期望点的位姿，随着时间的推移，求各个轨迹插补点的位姿。在本文的研究内容中，由于机器人从预备位置到抓取位置过程中，末端执行器姿态不变，只有沿着 z 方向向下的移动，因此不需要考虑姿态插补。通过安装在末端的视觉双目相机，可以获取轨迹始末两点 S 、 T 相对于基础坐标系的坐标姿态，认为假定直线运动速度为 v ， t 为插补的单位时间，也是相邻点的时间间隔，可以求出直线轨迹段的长度 L ，单位时间间隔内的单位移动距离 d 以及插补点总个数 N 如下：

$$L = \sqrt{(x_f - x_0)^2 + (y_f - y_0)^2 + (z_f - z_0)^2}$$

$$d = v \times t$$

$$N = \frac{L}{d} + 1 \quad (5-7)$$

相邻插补点三个基础方向的单位增量与三个轴插补点实时坐标值如下：

$$\Delta x = \frac{x_f - x_0}{N}$$

$$\Delta y = \frac{y_f - y_0}{N}$$

$$\Delta z = \frac{z_f - z_0}{N} \quad (5-8)$$

$$\begin{aligned} X_{i+1} &= x_i + i\Delta x \\ Y_{i+1} &= y_i + i\Delta y \\ Z_{i+1} &= z_i + i\Delta z \end{aligned} \quad (5-9)$$

其中： $i = 0, 1, 2 \dots N$ 。

从预备位置到抓取位置运用笛卡尔空间中的五次多项式插值理论，运用机器人工具箱中的 `tpoly` 函数，从而实现控制末端执行器沿着 Z 轴负方向移动 0.6 的五次多项式轨迹规划，空间轨迹如下图所示 5.9 所示。该段轨迹只有 z 方向移动，x，y 方向保持不动。

笛卡尔空间直线插补轨迹图

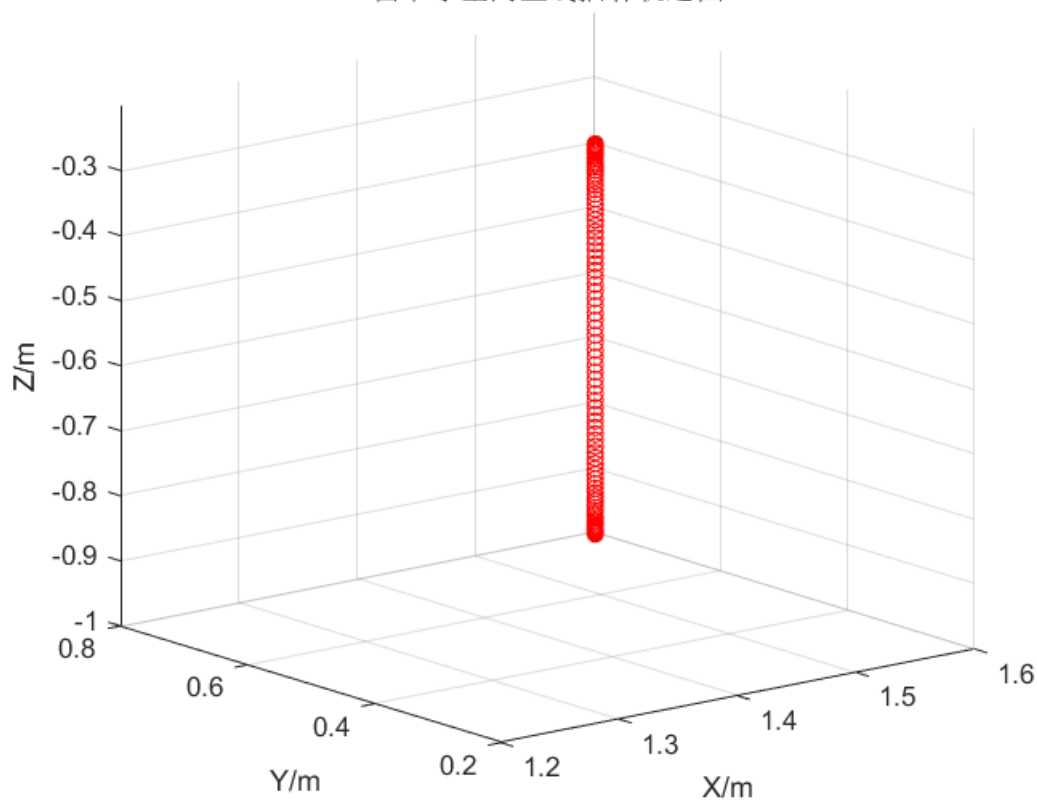


图 5.9 末端执行器笛卡尔直线插补空间轨迹图

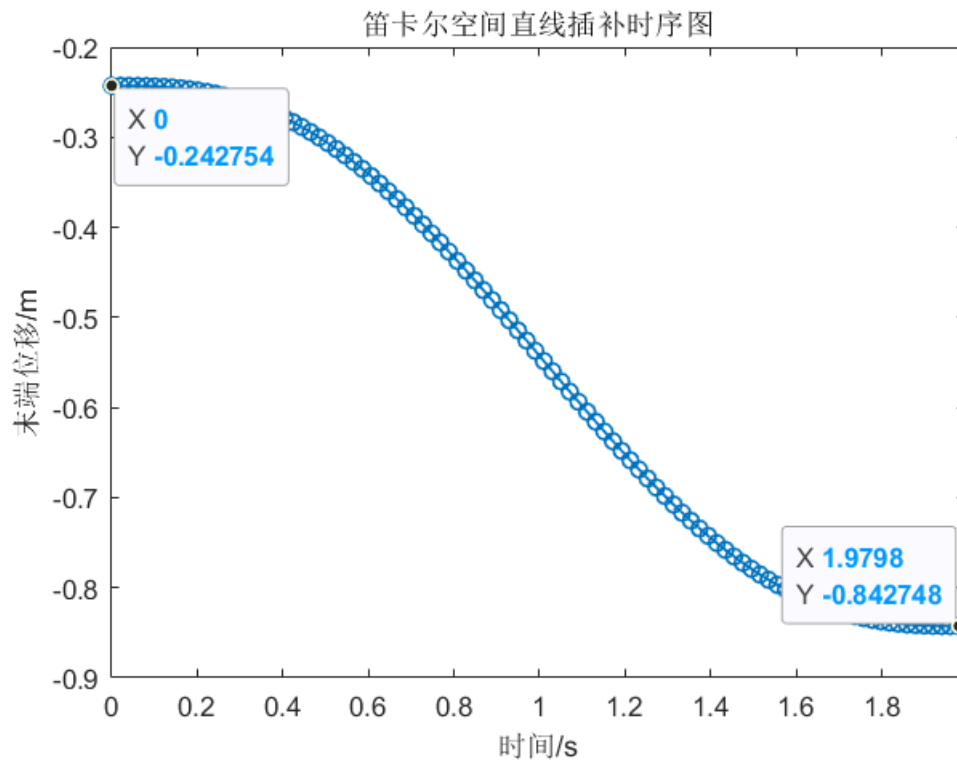


图 5.10 末端执行器笛卡尔直线插补时序图

由图 5.10 知，此过程机械臂末端执行器随着时间变化，呈现出五次多项式平滑曲线，达到了良好的控制。

第六章 机械臂机电系统抓取仿真

6.1 基于 Matlab 机器人 RTB 工具箱的可视化仿真与分析

MATLAB 机器人 RTB 工具箱使用机器人学的方法来分析机器人，优点是将机器人模型转化为数学模型，用数学方法控制机械臂，数值计算快捷高效，但是可视化效果较差，如图 6.1 所示，各个关节均以棍棒形式呈现，可视化效果缺乏逼真性。由于机械臂抓取仿真验证任务对可视化效果要求较高。机器人工具箱经过 D-H 法建模后，用普通 plot 函数画出的机械臂无法突出其形状外观特性，仿真中不能明显看出轨迹规划过程中，连杆之间运动状态及干涉情况。所以改用另一个方式，通过 plot3d 函数，可以将 SOLIDWORKS 中设计的 model3d 机械臂模型导入至 MATLAB 中，这个工具箱与 ARTE 工具箱类似，要求使用者提供标准 DH 参数，各连杆分别输出为 STL 格式文件，在导出过程中需要保证每个连杆的三维模型的坐标系与 DH 参数构建的连杆坐标系一致，并将含有 STL 文件的路径添加到 MATLAB 中，加载 stl 文件。建立过程如图 所示。stl 文件命名规则必须是从 link0~linkn，link0 代表基座，linkn 代表末端执行器。将该表取机械臂用标准 D-H 创建参数模型，用 plot3d 函数在 MATLAB 中可视化机械臂三维模型，如图 6.1 所示，模型更加直观立体，轨迹规划仿真更真实。

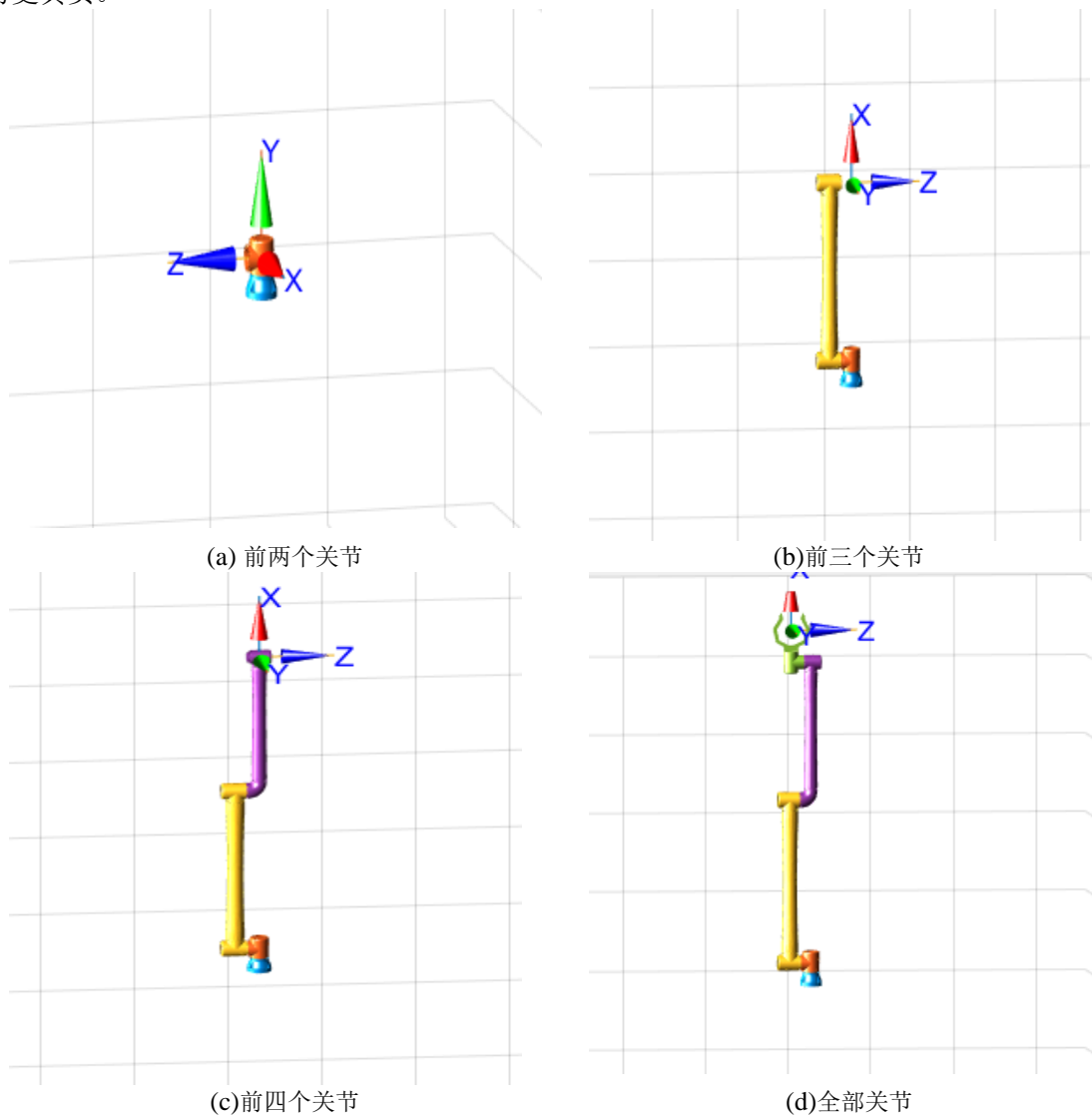


图 6.1 各关节连杆坐标系与 DH 参数建立的一致

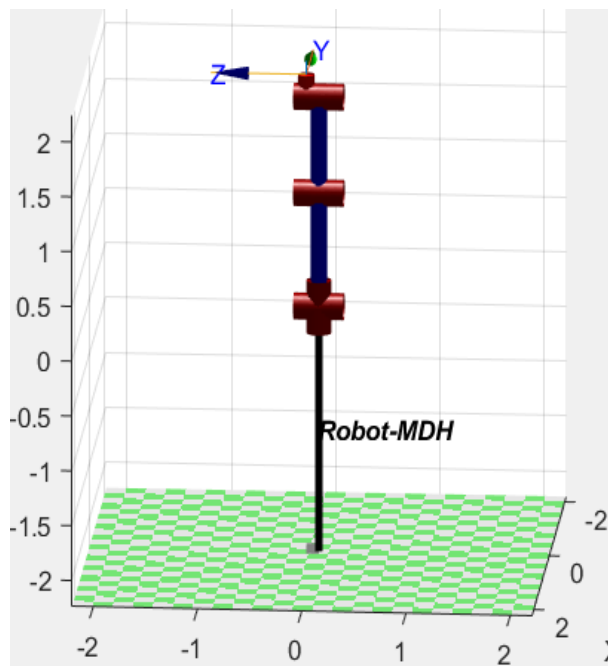


图 6.2 机器人工具箱 plot 函数绘制的机械臂

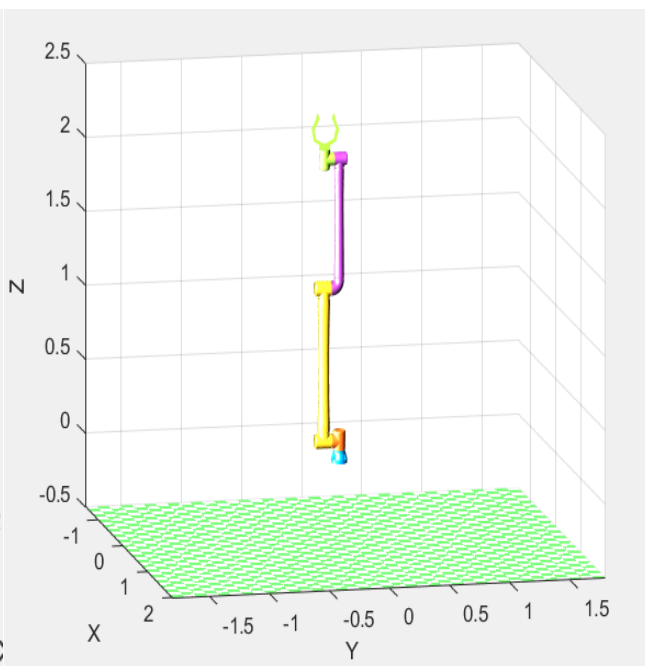


图 6.3 teach3d 函数实现示教效果的 3D 可视化

机器人 RTB 工具箱普通 plot 函数与 teach3d 绘制的对比图如上图 6.2、6.3 所示。综合运用上述轨迹规划和抓取策略，实现下图所示仿真实验。抓取共分为四部分，分别为初始姿态，预备姿态，抓取姿态和放置姿态。将四个位置的参数用 MATLAB 的代码对机械臂进行控制。进行仿真实验，并记录四个关键姿态如图 6.4 所示。机器人系统工具箱支持通过对象创建虚拟碰撞环境。例如圆柱体，球体，长方体等等。使用 collisionSphere 命令，可以创建圆柱体，近似模拟真实行星表面环境，位置远低于机械臂水平面，待机械臂向下运动抓取。collisionBox 指令可以创建长方体，近似物体的摆放平台，实际情况中为探测车的收纳箱，此位置一般与目标物体位置相对设计，所以在仿真中机械臂转动了 180 度。假定机械臂在初始零位状态，即垂直朝上。机器人基座安装的位置就是行星探测器上表取机械臂的基座安装位置。真实情况是机械臂向下抓取行星土壤，并收集到采纳箱中。仿真任务是将目标重物从一个圆柱体上抓取，并搬运到另一个平台上，保持这个过程平稳运行。

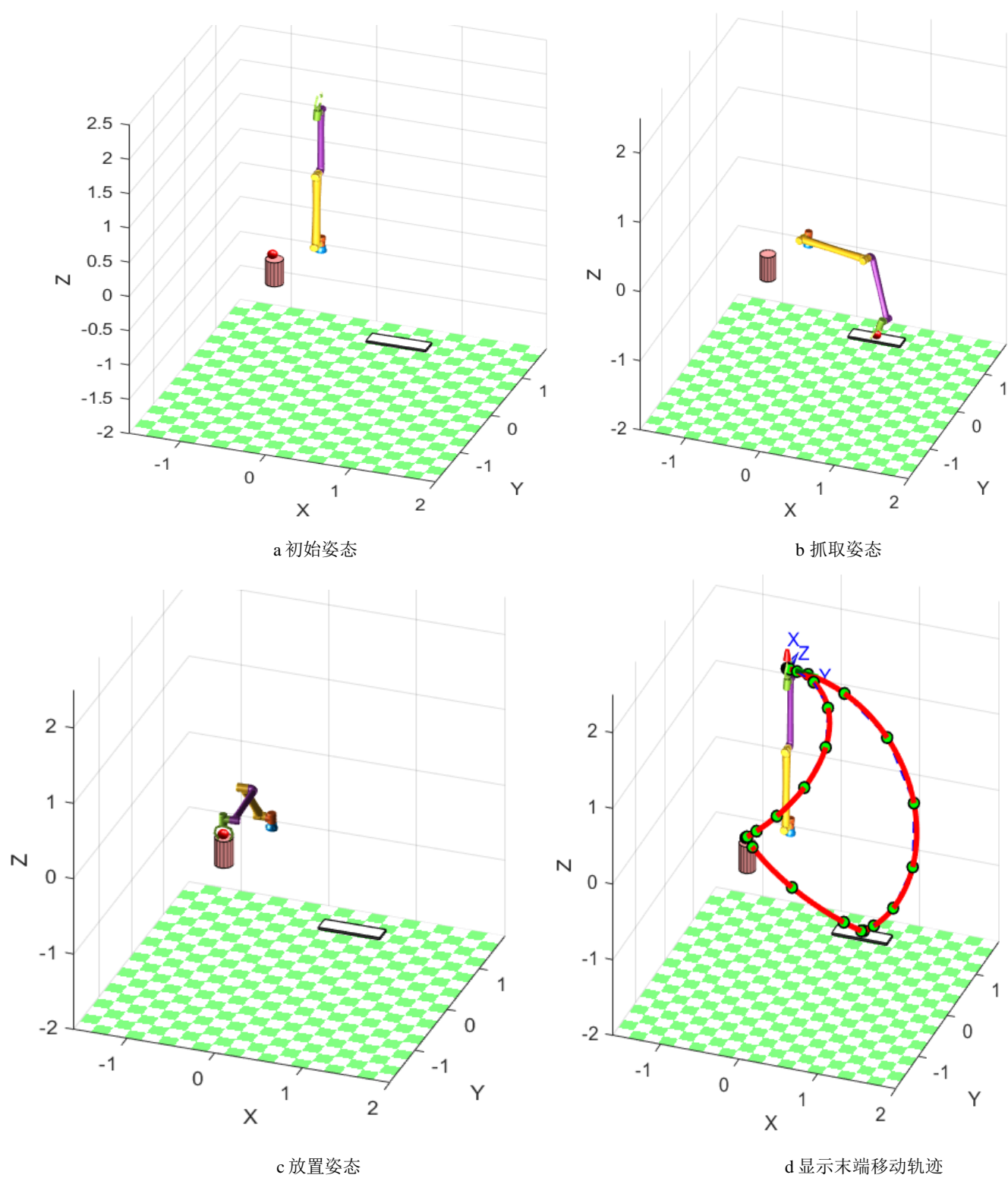


图 6.4 机械臂抓取各状态仿真图

6.2 基于 Matlab 机器人系统工具箱及 Simscape 的可视化仿真与分析

在 MATLAB 中安装 Robotics System Toolbox 或 Simscape Multibody 扩展工具箱后，支持 Simscape 导入模型。而 Simscape 又支持 URDF 文件类型导入模型。URDF 是 Unified Robot Description Format（统一机器人描述格式）的缩写，是很常用的机器人描述格式，此类文件可以定义机器人的关节和连杆的各项参数。因此，基于机器人系统工具箱创建机器人的仿真模型的流程是，先在 SOLIDWORKS 中安装 sw_urdf_exporter 插件，再将表取机械臂模型的对应位置建立连杆坐标系，进行相关设置后，可以输出机械臂模型的 URDF 文件。此文件可以导入 MATLAB 的 Simscape 中，查看模型比例参数是否有错误，最终运用工具箱逆解进行抓取。

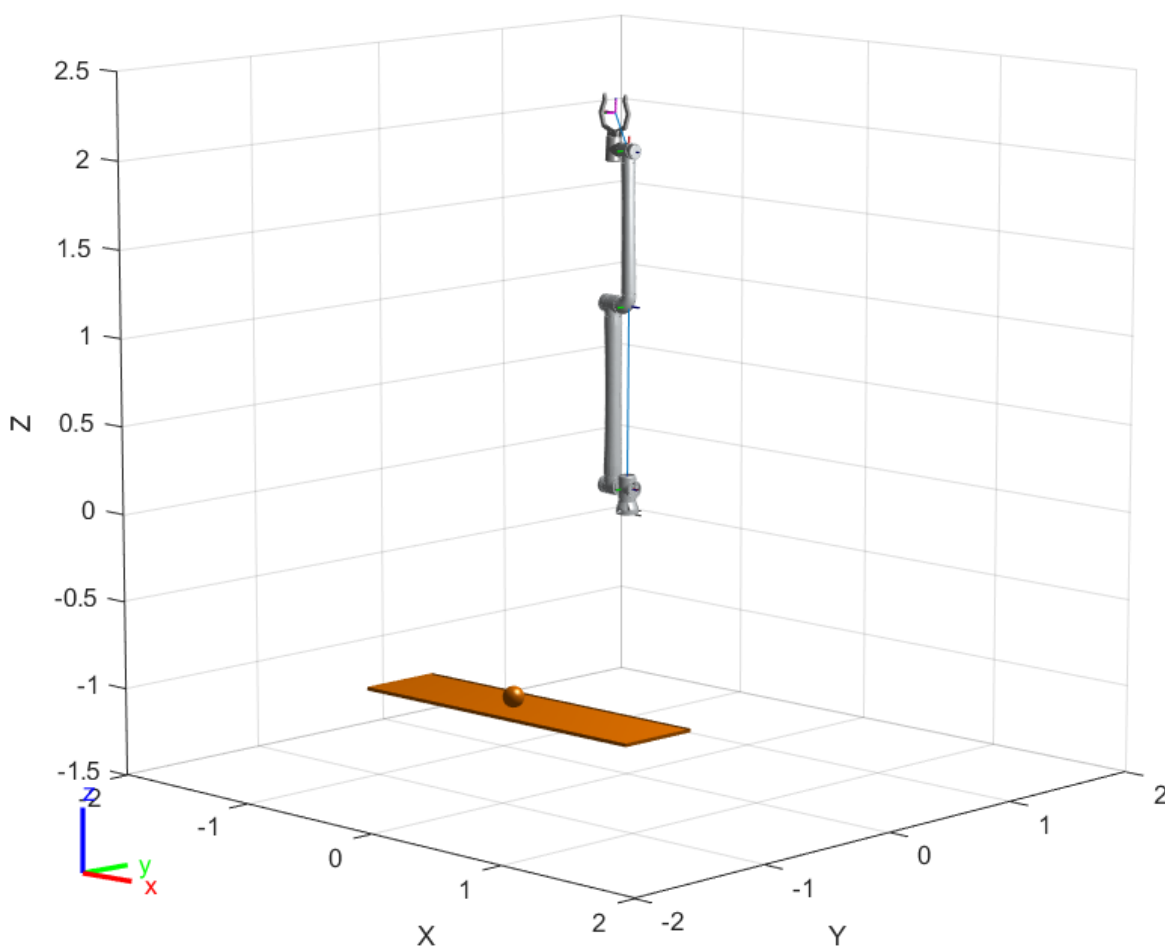


图 6.5 表取机械臂刚体树模型

在机器人系统工具箱中展示形式为刚体树模型，其模型展示效果如图 6.5 所示。Simscape Multibody 力求反映真实情况下的物理模型，保证与实体机械臂各方面的参数保持一致。若测试输出曲线的数值超出额定值，则电机需要重新选型，如果仿真测试值与理论值一致，则验证了标称参数的准确性。做仿真的意义，就是在成为产品之前，把经验值确认，作为实际仿真的先前测试。Simscape Multibody 建立和模拟机械系统，为 3D 机械系统提供多体仿真环境，同时以 MATLAB 的数据处理和图形显示功能作为基础，使计算、仿真、分析等过程一次性完成，使仿真分析效率更高^[16]。本文利用该扩展包进行可视化仿真，将导入的机械臂 CAD 模型经过相关设置，就可以对机械臂运动按照预先规划的方式可视化仿真，输出关节运动参数，并显示轨迹曲线，仿真模型为图 6.6、

6.7 所示。为提高可视化仿真效果，对机械臂颜色进行适度调整，效果如图 6.8 所示。

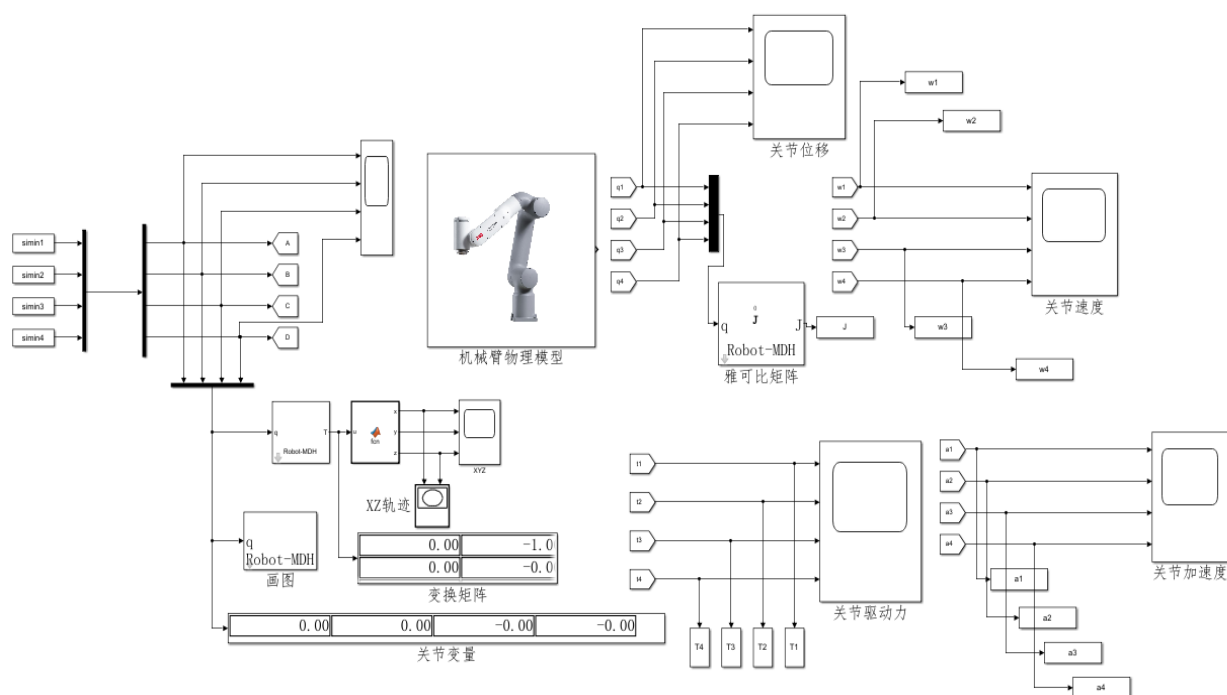


图 6.6 机电系统仿真模型

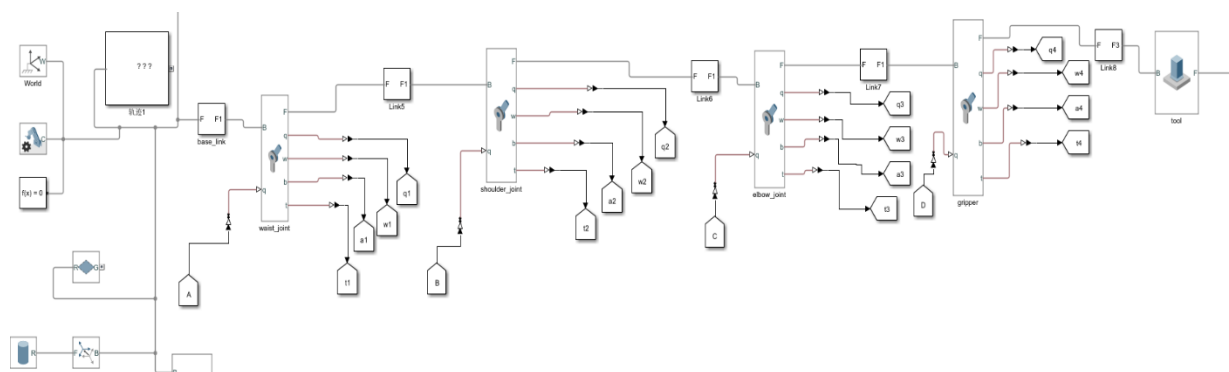


图 6.7 机电系统物理模型内部图

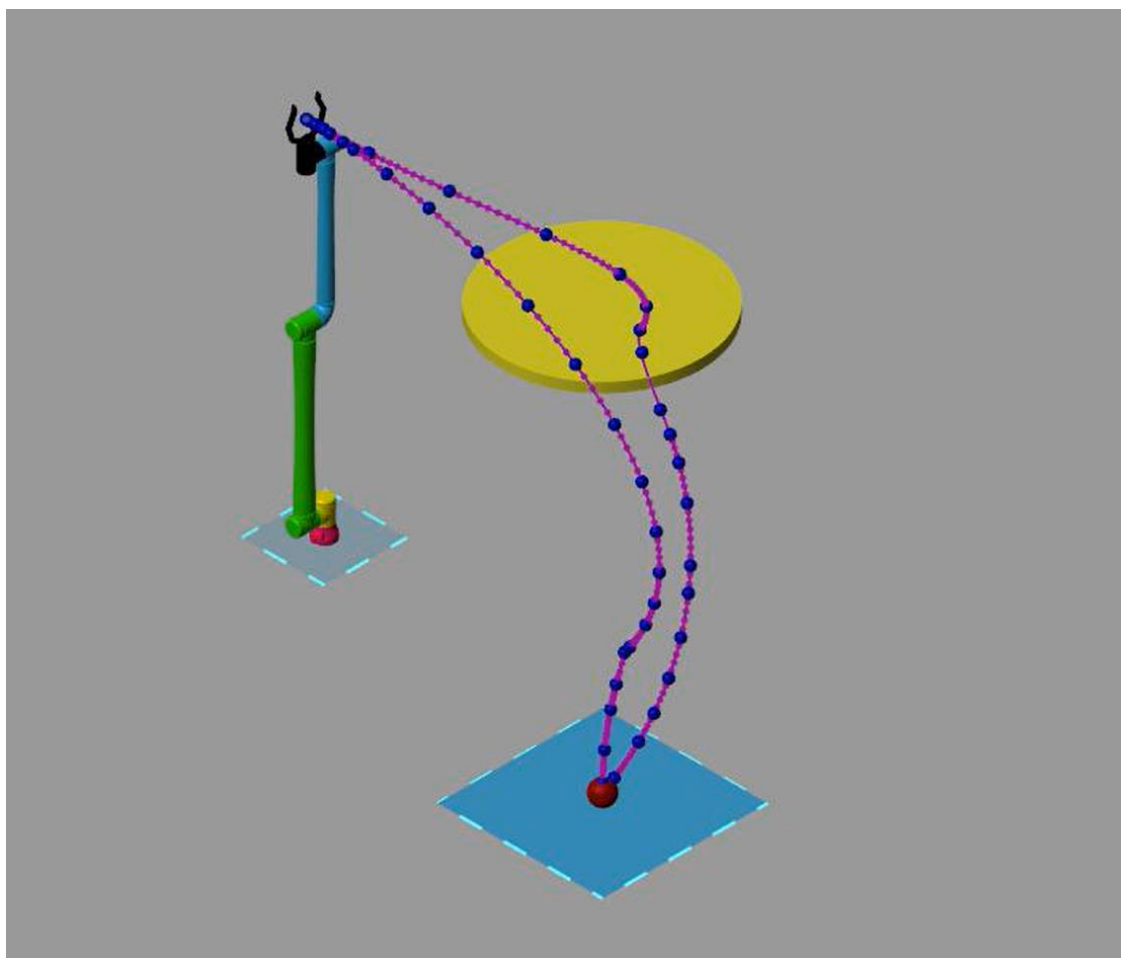


图 6.8 Simscape 中机械臂仿真效果图

表取机械臂仿真抓取过程中，各关键路径点抓取姿态如图 6.9 所示。各电机步进角度输出曲线如图 6.10 所示。可见本文仿真电机的电流、转矩曲线都在额定范围内，机械臂抓取精准，整体仿真比较理想。

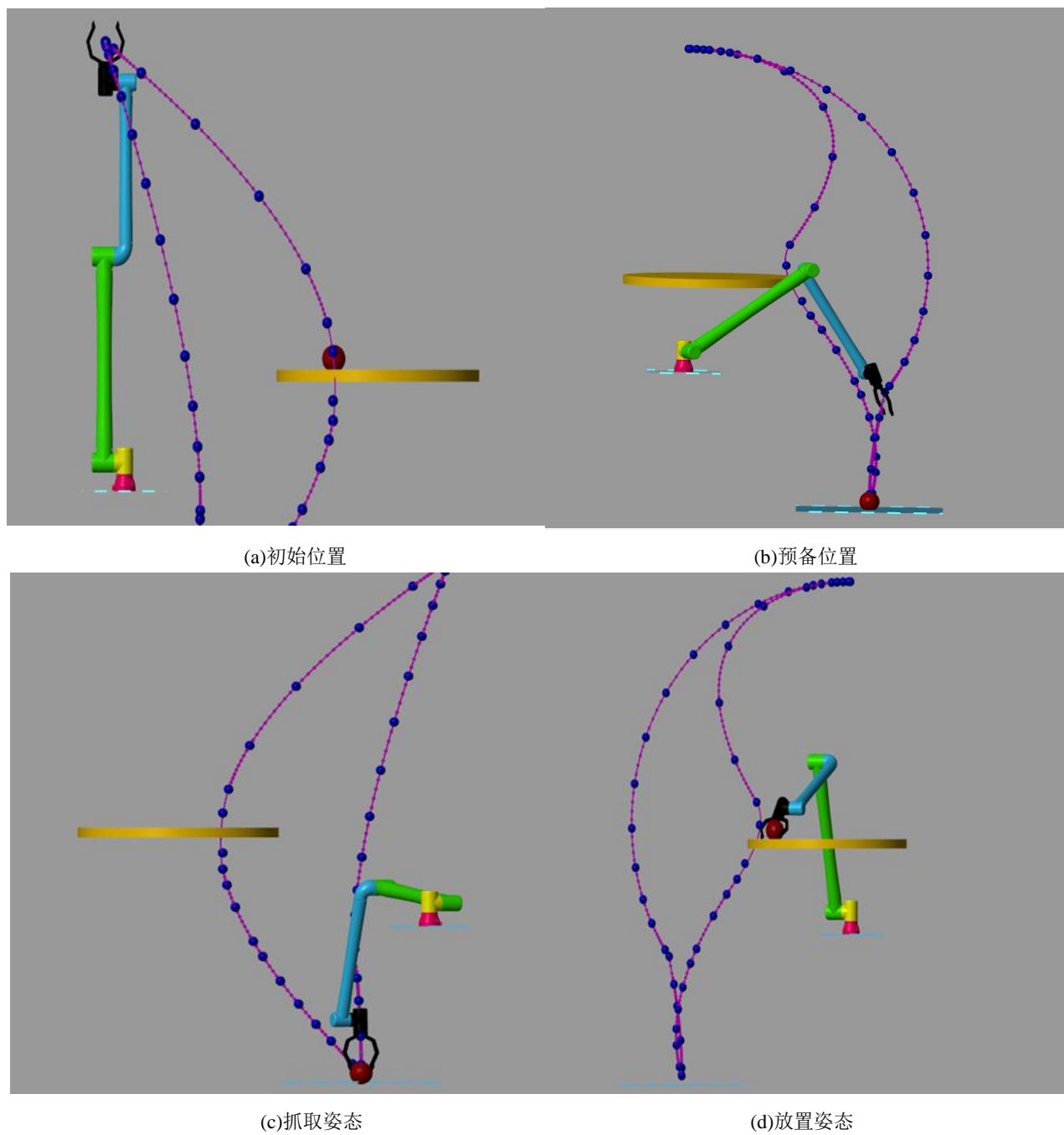
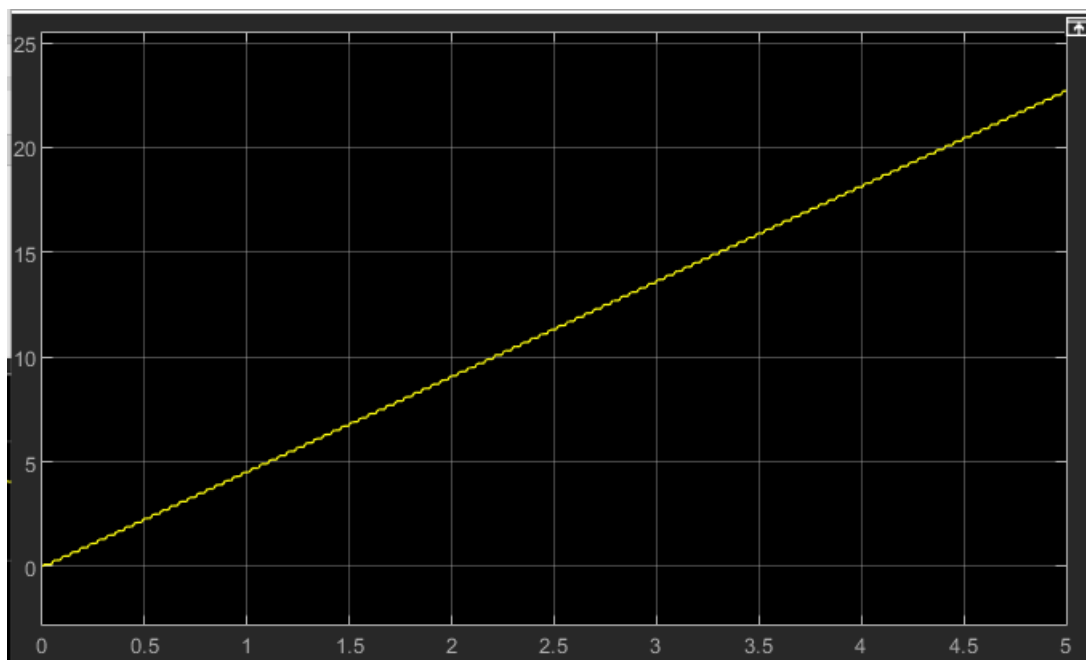
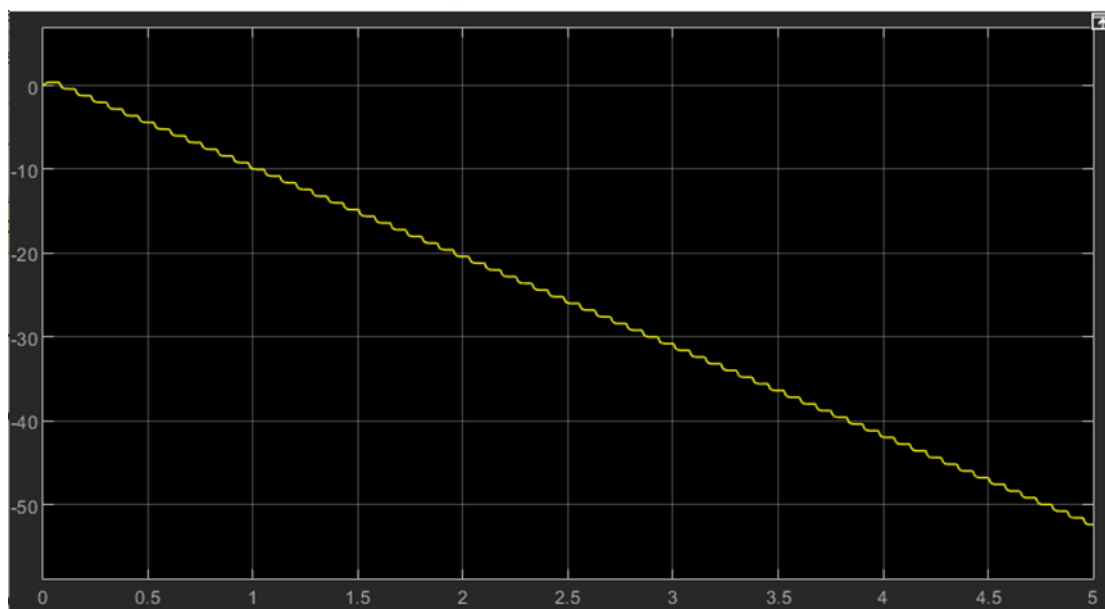


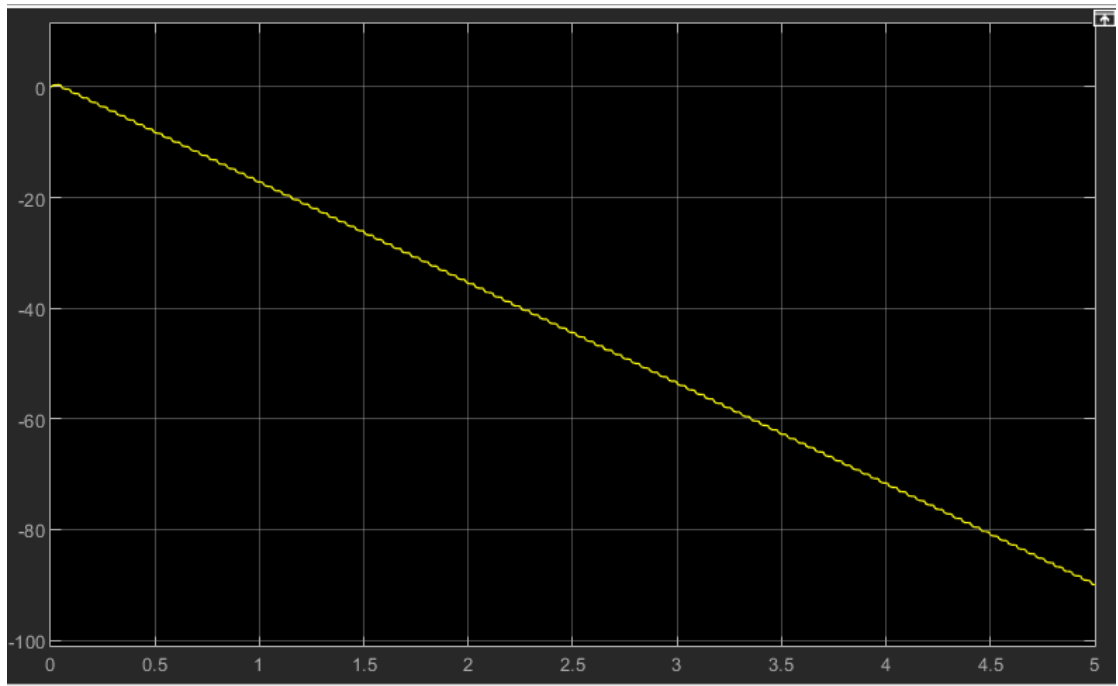
图 6.9 Simscape 仿真关键位置姿态图



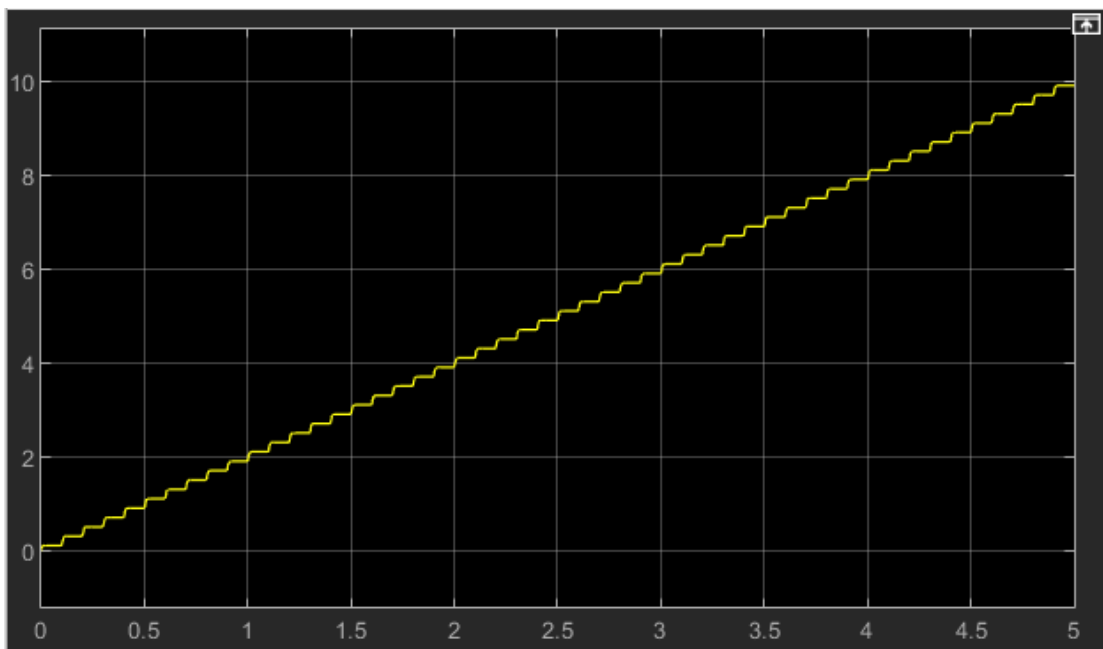
(a)关节 1 电机角度控制



(b)关节 2 电机角度控制



(c)关节 3 电机角度控制



(d)关节 4 电机角度控制

图 6.10 关节空间规划阶段 各关节电机曲线图

模拟示波器输出机械臂工作时笛卡尔空间位置变化图像、关节空间的变化图像如图 6.11、6.12 所示。

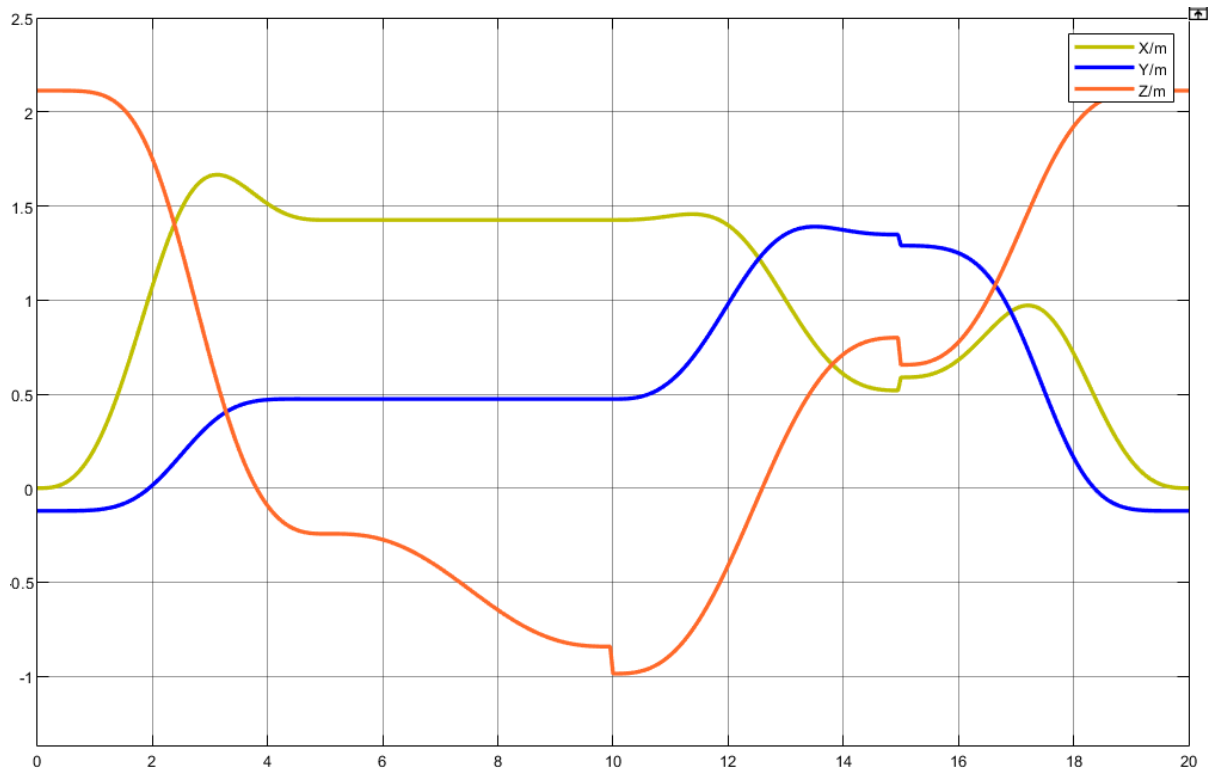


图 6.11 笛卡尔空间

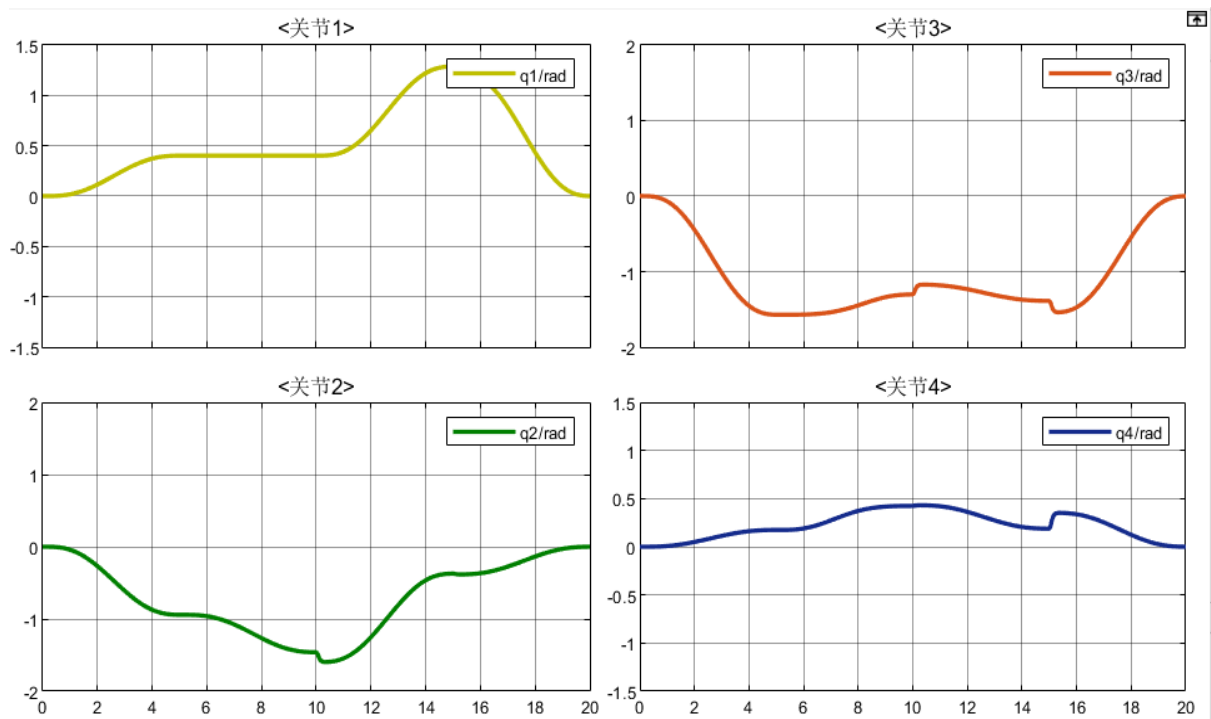


图 6.12 关节空间

轨迹在 XOZ 平面投影如图 6.13 所示。各关节转矩如图 6.14 所示。各关节电机的转矩均在额定值内，且关节空间、笛卡尔空间位置变化曲线表明仿真过程机械臂振动很小，消振情况良好。仿真的测试值 d 先前计算的的经验值。机械臂满足预期，可以较为准确的抓取轻质量目标物体，并放到指定区域。因此，此次仿真得到的物理模型具有反映真实情况的特性，保证与实体机械臂各方面的参数保持一致，可以投入真实生产。

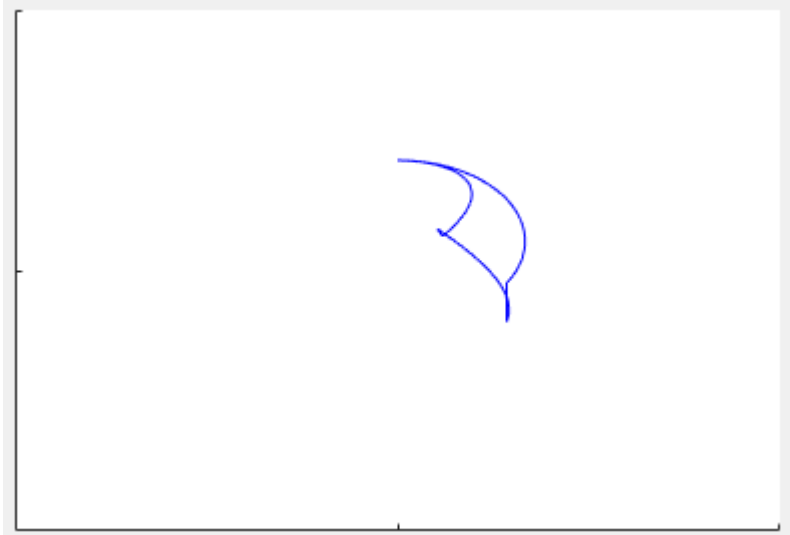


图 6.13 XOZ 平面轨迹

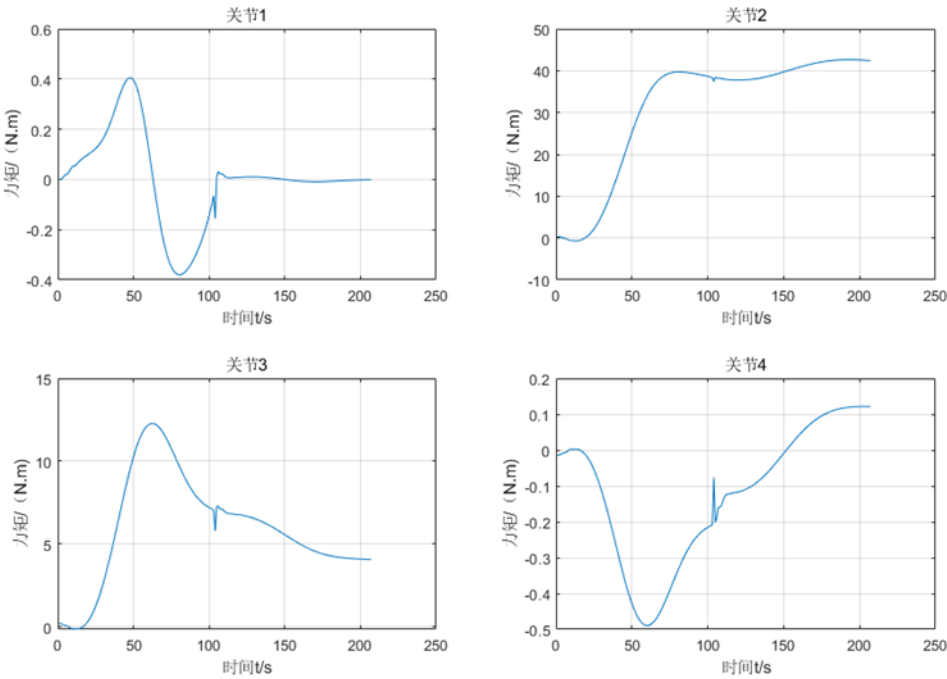


图 6.14 各关节转矩图

第七章 总结与展望

7.1 总结

本文通过三种不同软件环境，实现同一种抓取仿真实验。传统机器人 RTB 工具箱是运用机器人学这种数学方法，来控制物理现象。借助 Matlab 平台，运算速度快。机器人系统工具箱可以清晰展示各关节刚体树模型关系，并定义各刚体运动状态，缺点是输出曲线观测较为困难。基于 Simscape 的机电系统平台，是通过跟实体模型一样的数值设定步进电机参数。机电系统建模力求反映真实情况下的物理模型，保证与实体机械臂各方面的参数保持一致，需要将实际电机的参数加入至仿真系统中。并且依托 Simulink 环境下，可以进行各模块的封装，并且囊括了几何图形、颜色、质量和惯量属性，通过示波器可以很直观的观察个各种曲线。本文仿真电机的电流、转矩曲线都在额定范围内。可以说在线上难以接触实物时期，机器人工具箱与 Simscape 二者的仿真是理论与实际的关系。

7.2 展望

本项目由于时间短暂，只通过理论力学的静力学知识，得到了各关节力矩。缺乏对机械臂动力学研究，导致各关节的质心、惯性张量的计算准确性存在偏差，最终导致了各关节极限力矩计算缺乏准确性。对于机械臂的避障方法，常用的有 RRT、人工势场法等。机械臂抓取过程实施避障策略较为复杂，为降低难度，本机械臂通过获取目标物位置后，未加入适当算法，而是直接启动关闭夹爪动作指令。本项目采用的是步进电机，缺点是力矩损失太大，用步进电机来控制机械臂，机械臂各关节的转动速度有一定的限制，这直接制约了末端执行器的运动速度，所以本项目的机械臂关节的转动速度被控制的很慢。步进电机存在一个速度阈值问题，即高于某个转速，步进电机力矩损失激增，则不能选用步进电机。在未来对的工作中，将继续深入研究此项目，探究出步进电机的速度阈值，并尝试加入直流伺服电机等其他类型电机，并在抓取过程中加入适当避障算法，对缺憾进行改进。

致谢

随着毕业设计的完成，本科四年就这样结束了。这个毕设代表了四年里所学知识的结晶。首先要感谢我的导师马飞老师，给了我很多指导。论文选题内容精心设计，让毕设与实际工程问题紧密结合。毕设过程中给我指明了电机选型思路，机械臂抓取策略的探讨。再到最后毕设答辩阶段，帮我解决毕设困难，无时无刻不体现着严谨负责的态度。

最重要的是，要感谢我的父母多年来对我生活上无微不至的照顾以及学业上不求回报的投入和支持。是父母的抚养与教育，让我有机会继续自己的求学之路。

特别的，我还要感谢大二学术英语课的张敏老师，首先我在她精彩的课堂中学会了很多学术英语的知识。也十分崇拜老师可以创作出很多优秀的论文，在学识上让我望尘莫及，更为可贵的是，张老师是一位完全没有架子、三观很正也能跟学生谈心的好老师，我原本是一个思想幼稚、悲观胆小的学生，这几年我无数次找到张老师求助，我认为即使是最有耐心的人，在被问到无数问题后也会放弃。但老师从未放弃过我这个学生，她努力通过与我聊天中，潜移默化的塑造我的人生观、世界观。希望我变成一个独立，心智成熟、对社会有价值的人。她的坚持和善良，十分触动我。在学习和为人等诸多方面，都是我的榜样。作为英语老师，却做了很多分内之外的事情，这份无私的付出我会永远记得。在短暂的人生中，遇到这样优秀善良的老师，真是一件很幸福事。感谢您在我自我怀疑和逆境时，给了我面对苦难的勇气和解决困难的动力！

回顾四年时光，遗憾真的很多，有许多还没来得及做的事情，希望未来研究生期间可以努力实现。

参考文献

- [1] 李斌. 月球车车载机械臂的研究进展及关键技术探讨[J]. 机器人技术与应用, 2008(3):4.
- [2] 刘杰. 行星采样机械臂的设计与分析[D]. 江苏:江苏科技大学.2013.
- [3] 子力. 美"凤凰"探测器登陆火星(下)[J]. 中国航天, 2008(9):38-41.
- [4] 庞征. 好奇号降临火星[J]. 太空探索, 2012(09):16-19.
- [5] 吴伟仁, 周建亮, 王保丰, 等. 嫦娥三号"玉兔号"巡视器遥操作中的关键技术[J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(4):425-440.
- [6] 崔玉洁, 张祖立, 范磊. 基于蒙特卡洛方法的采摘机械手工作空间分析[J]. 农机化研究, 2007(12):3.
- [7] 徐海乔. 巷道喷浆机械手轨迹规划与自动控制研究[D]. 中国矿业大学;中国矿业大学(江苏), 2019.
- [8] P. Corke. A Robotics Toolbox for MATLAB[J]. IEEE Robotics and Automatiom Magazine, 1996, 3(1):24-32.
- [9] 谢斌, 蔡自兴. 基于 MATLAB Robotics Toolbox 的机器人学仿真实验教学[J]. 计算机教育, 2010(19): 140-143
- [10] 李硕, 刘相权, 黄民, 等. 基于虚拟环境的拣选机器人设计和仿真实现[J]. 北京信息科技大学学报: 自然科学版, 2021, 36(3):6.
- [11] 陈赛旋. 协作机器人零力控制与碰撞检测技术研究[D]. 中国科学技术大学, 2018.
- [12] 任建新、黄民、刘相权、黄小龙. 基于 Visual Studio 与 V-REP 的货物拣选机器人联合仿真[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2020, 34(8):8.
- [13] 杨淞. 一种六自由度机械臂的运动控制系统设计[D]. 上海交通大学, 2014.
- [14] 崔徐佳, 高守玮, 余盈宽. 基于 MATLAB/Simulink 的二相混合式步进电机的建模与仿真[J]. 工业控制计算机, 2015, 28(06):76-77.
- [15] 陆继山, 冯广斌, 孙华刚, 张云峰. 基于 AMESim/RecurDyn/Simulink 的自动供输弹系统机电液一体化联合仿真[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(07):188-192.
- [16] 陈爱波, 宁淑荣, 陈五一. 基于 MATLAB 与 SolidWorks 的六自由度机器人联合建模仿真[J]. 机电技术, 2014(06): 57-60