

硕士学位论文

基于阻抗控制的机器人力控制技术研究

**RESEARCH ON ROBOT FORCE
CONTROL BASED ON IMPEDANCE
CONTROL**

丁润泽

哈尔滨工业大学
2018 年 6 月

国内图书分类号：TP241.3
国际图书分类号：621

学校代码：10213
密级：公开

工学硕士学位论文

基于阻抗控制的机器人力控制技术研究

硕 士 研 究 生：丁润泽

导 师：高会军教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科：控制科学与工程

所 在 单 位：航天学院

答 辩 日 期：2018 年 6 月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TP241.3

U.D.C: 621

Dissertation for the Master's Degree in Engineering

RESEARCH ON ROBOT FORCE CONTROL BASED ON IMPEDANCE CONTROL

Candidate:	Ding Runze
Supervisor:	Prof. Gao Huijun
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Specialty:	Control Science and Engineering
Affiliation:	School of Astronautics
Date of Defence:	June, 2018
Degree-Confering-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

主从式机器人作为机器人研究中的一个重要研究领域，在航天、核废物处理、医学手术等领域有着广泛的应用。在主从式机器人的研究中，在保证从机械手可以跟随主操作手运动的同时，将从手受到的接触力反馈到主手能够极大的提高主从式机器人的操作体验。控制主操作手输出期望的力信号，需要用到力控制方法。本文基于实验室的“主从式手术机器人”课题，对于基于阻抗控制的机器人主操作手力控制进行了仿真与实验研究。

首先，本文对于实验平台中所使用的 Delta 主操作手机构进行了适当的简化并建立了坐标系。接着进行了运动学分析，建立了 Delta 主操作手的正逆运动学模型。然后利用 MATLAB 与 ADAMS 联合仿真的方式所建立的模型进行了验证。利用虚功原理的方法对 Delta 主操作手进行了动力学分析，并利用 ADAMS 与 MATLAB 对于模型的正确性进行了验证。

其次，对于基于位置的阻抗控制方法进行了分析，将其运用到之前所建立的机器人模型上进行力控制仿真实验。利用 SIMULINK 搭建了仿真模型，测试了阻抗控制算法在阶跃信号、斜坡信号、正弦信号下的跟踪情况，并进行了变环境仿真实验。对于阻抗控制算法的跟踪性能进行了分析，验证了其对于力跟踪的有效性并明确了其不足。针对阻抗控制对于动态信号跟踪效果差、环境参数变化时震荡大的不足，利用自适应阻抗控制算法对控制系统的性能进行改善并进行了稳定性分析，进行了与阻抗控制的对比仿真实验。

最后，本文对于整个实验系统进行了介绍，利用实验平台对算法进行实验验证。设计实验验证了阻抗控制在力控制中的有效性，设计阻抗控制与自适应阻抗控制对比实验，证明了自适应阻抗控制算法在动态信号跟踪以及环境发生变化时的优越性。

关键词：力跟踪；力控制；阻抗控制；自适应控制

Abstract

Master-slave robot is an important research field in robotics. It has been widely applied in aerospace, nuclear waste disposal, medical surgery and other fields. In the study of the master-slave robot, the operation experience of the master - slave robot can be greatly improved by feeding the contact force from the slave robot to the main hand under the condition that the slave robot can follow the motion of the master robot. To control the master robot's tracking of the desired force, impedance control is needed. Based on the laboratory's "master slave type endoscopic robot" project, the force tracking control of the robot's master robot is simulated and experimentally studied in this paper.

First of all, this paper simplifies the Delta master robot used in the experiment platform and establishes the coordinate system. Then kinematics analysis is carried out, and the forward and inverse kinematics model of Delta master robot is established. Then, the model is verified by MATLAB and ADAMS co-simulation. The dynamics of Delta master robot is analyzed by virtual work principle, and the model is simplified.

Secondly, the position based impedance control method is analyzed and applied to the previous robot model for force control simulation experiments. The simulation model is built with SIMULINK, and the tracking situation of the classical impedance control algorithm under the step signal, the slope signal and the sinusoidal signal is tested, and the simulation experiment of the variable environment is carried out. In view of the insufficiency of the impedance control for the poor dynamic signal tracking result and the great fluctuation when the environment changes, the adaptive algorithm is used to improve the performance of the control system. The stability of adaptive impedance control is analysed, and the contrast simulation experiment with the impedance control is carried out.

Finally, the whole experimental system is introduced, and the algorithm is verified by experiments. The designed experiments verify the effectiveness of impedance control in force tracking. The contrast experiment between the impedance control and the adaptive impedance control shows that the adaptive impedance control can better track the dynamic signal and the control effect is better when the environment changes.

Keywords: force tracking, force control, impedance control, adaptive control

目 录

摘 要.....	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 力觉主手设备的国内外研究现状	2
1.2.1 力觉主手设备的国外研究现状.....	2
1.2.2 力觉主手设备的国内研究现状.....	7
1.3 力控制方法的研究现状	8
1.3.1 基本力控制方法.....	8
1.3.2 先进力控制方法.....	11
1.4 本文研究的主要内容.....	12
第 2 章 Delta 机器人运动学建模	13
2.1 引言	13
2.2 Delta 机器人总体结构分析.....	13
2.3 Delta 机构的运动学分析	14
2.3.1 Delta 机构的简化	14
2.3.2 Delta 机构的运动学逆解分析.....	15
2.3.3 Delta 机构的运动学正解分析.....	17
2.4 Delta 机构的运动学验证	19
2.4.1 Delta 机构的逆解验证.....	19
2.4.2 Delta 机构的正解验证.....	22
2.5 本章小结	23
第 3 章 Delta 机器人动力学建模	24
3.1 引言	24
3.2 动力学求解方法介绍.....	24
3.3 速度与加速度关系的分析	25
3.3.1 Delta 机器人雅克比矩阵的求取	25
3.3.2 Delta 机器人速度关系的求取.....	28

3.3.3 Delta 机器人加速度关系的求取	29
3.4 Delta 机器人动力学模型的建立	29
3.4.1 基于虚功原理的动力学方程	29
3.4.2 Delta 机器人动力学模型	31
3.5 Delta 机器人动力学模型验证	31
3.6 本章小结	32
第 4 章 Delta 机器人的力控制策略研究	33
4.1 引言	33
4.2 基本阻抗控制策略	33
4.2.1 基于位置的阻抗控制策略	35
4.2.2 期望阻抗参数对控制系统性能影响的分析	37
4.3 阻抗控制仿真实验研究	38
4.4 自适应阻抗控制	42
4.5 自适应阻抗控制仿真	49
4.6 本章小结	50
第 5 章 Delta 机器人力控制实验研究	51
5.1 引言	51
5.2 基于 Delta 主操作手的实验平台介绍	51
5.2.1 控制器与传感器选型介绍	52
5.2.2 驱动元件选型介绍	53
5.3 实验步骤	54
5.4 实验研究	54
5.4.1 阻抗控制力控制效果实验	54
5.4.2 自适应阻抗控制正弦信号跟踪实验	55
5.4.3 阻抗控制与自适应阻抗控制对比实验	55
5.5 本章小结	56
结 论	57
参考文献	59
攻读硕士学位期间发表的论文及其他成果	64
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限	65
致 谢	66

第 1 章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

随着科学发展的不断进步,机器人领域的理论与技术有了长足的发展,应用领域也越来越广,对机器人功能的需求也越来越多样化。越来越多的机器人设备在工作的过程中要与环境进行相互接触^[1]。对于医疗机器人、打磨抛光机器人、装配机器人、以及各种力反馈设备来说,与环境的接触必不可少,若只是对机器人进行位置的控制,已经无法满足需求。机器人的力控制方法在这样的背景下不断发展。本课题以实验室课题“主从式手术机器人”为背景,主要进行主从式机器人主手力控制的研究。

在机器人众多的分支中,主从式机器人一直是一个重要的研究领域。在主从式机器人系统中,操作者与机器人的主手进行交互,从手根据主手的运动进行相应的运动。主从式机器人主要应用于手术机器人以及工作环境十分恶劣人类难以承受得情况下。主从式机器人以更高的精度、不易疲劳、可以在恶劣环境下工作等特点,在这些领域起了很大的作用。上世纪 50 年代,Goertz^[2]在其研究的核废料处理机器人中,首次提出了具有力觉的主操作手的概念。主从式机器人的从手根据主手的运动情况进行实时的运动,主操作手可以看作操作者与从手之间的媒介。而当从手与环境相接触产生了相互作用力时,对于操作者来说,主手成为了操作者力觉感知的桥梁。主操作手可以向系统传递运动信息,同时可以输出力的信息。这样使主从式机器人的操作者拥有了一种力觉临场感^[3],更方便操作者对机器人进行操作。与计算机键盘、机器人操纵杆或者示教器等作为人机交互输入的方法相比,用主操作手可以使操作者不用转换思维就可以进行操作。操作方法十分直观,对于充分发挥人的感官信息处理能力具有很好的效果,可以提高操作者的操作效率以及操作过程的安全性。可见,对于主从式机器人主手力控制的研究是一个十分有意义的研究领域。

具有力觉的主操作手主要有两个任务,其一为将接收到的力信号转化为力输出,其二为运动信息的传递。力信号的输出可以转化为怎样通过高性能的控制算法对机器人主操作手进行有效的力控制使其能达到要求的问题。本文主要进行机器人主手力控制方法的研究。

1.2 力觉主手设备的国内外研究现状

1.2.1 力觉主手设备的国外研究现状

Millman 与 Clogate^[4] 提出了对于主从式机器人力觉主手的设计准则即低惯量、低摩擦、高刚度。低惯量使机器人在小力输出的时候能保证更好的敏感度使操作者能更容易的操作主手。低摩擦使主手开始运动所需要的力阈值尽可能降低，同样方便操作者的操作。要求系统具有高刚度在于，如果主手刚度过低会使主手无法模拟高刚度的力输出情况。同时，低刚度会降低系统的共振频率，容易对系统的稳定性产生影响。绝大部分的主手设计都遵循了这个原则。

1989 年，Masao Inoue^[5] 等人研制出了一种主从式机器人系统。其主手采用了串联结构，如图1-1所示。这种主操作手有 6 个自由度，类似直角坐标系，采用了三套互相垂直的导轨来实现平动，同时通过三个旋转轴来实现三个自由度的转动。这种操作手的优点在于实现了运动的解耦，缺点在于系统过于复杂。

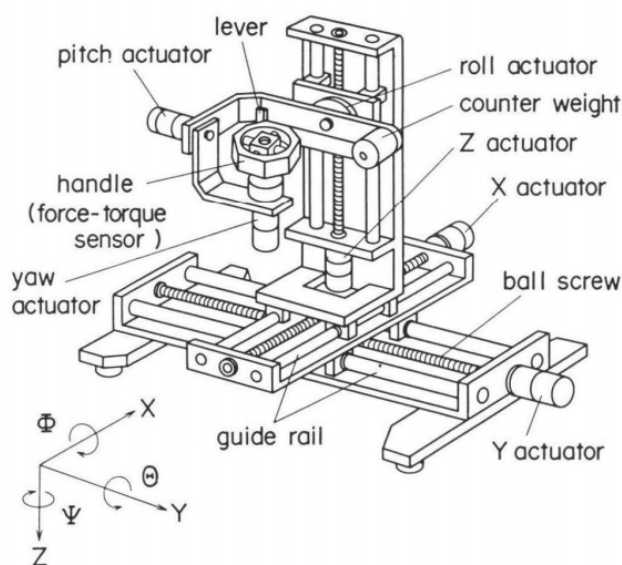


图 1-1 Masao Inoue 等人研制的主操作手示意图

1993 年，Matsuhira^[6] 等人研制了一种新型的力觉主手。这种主手利用了双缩放原理进行设计。其原理在于，主手与从手结构一样，但是主手按照一定的比例进行缩放，称为 Twin Pantograph Mechanism (TPM)。其主手示意图如图1-2所示。通过缩放设计，主操作手在制作得更小巧、质量更轻的同时，为操作者提供了更大的操作空间。该主操作手同样有 6 个自由度。通过臂上的三个关节实现了在三维空间内的平动，在手腕处设置了交叉的俯仰、偏航、滚转轴实现了三个自由度的转动。

主手可以在 200-200-200mm 的空间内进行运动并且可以输出最大为 25N 的力。三个根据主操作手的运动按照空间坐标的比例将其换算到从操作手的运动空间进行从手的控制。

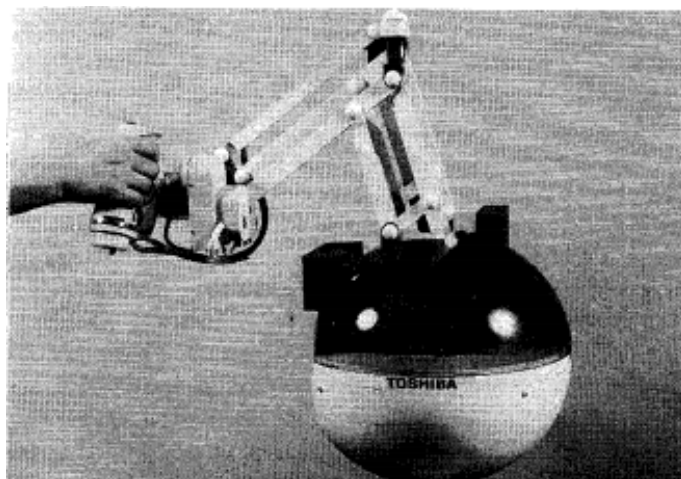


图 1-2 TPM 主操作手示意图

德国航天中心 (DLR) 研制了一种七自由度的串联型力反馈设备 DLR LWR3^[7]。LWR3 由七个关节组成，每个关节都安装有两个光电编码器与一个力矩传感器。光电编码器用来检测机器人关节转动的角度，力传感器用来检测机器人关节处的力矩。在得到关节处的转动角度和力矩信息后，通过机器人的雅可比矩阵就可以得到机器人末端的位置与力的大小。这种机器人的最大特点是其所有关节都是可拆卸的，使用者可以根据自己的需求重新组装，选择与需求相对应的自由度。当机器人处于 7 自由度的情况下时，DLR 机器人的工作空间与一个人手臂的运动空间差不多，在机器人末端处可以输出三个自由度的力以及三个自由度的力矩。其末端最多可以输出 100N 的力，最大的力矩为 $20N \cdot m$ 。DLR LWR3 机器人如图1-3所示。

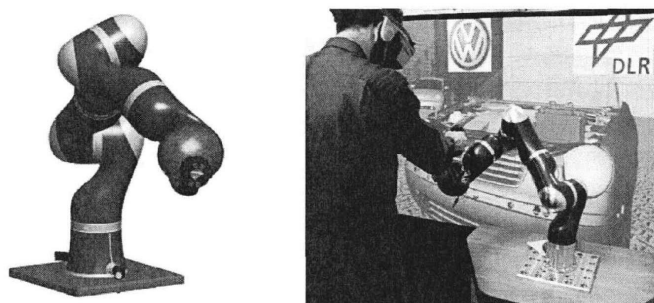


图 1-3 DLR LWR3 机器人

随着力觉主手的不断发展，并联机器人机构逐渐被运用到力觉主手当中。并联

型机器人具有一系列特点使其非常适合应用在主操作手之中。并联机器人末端的惯量可以设计的较小、刚度较高还可以进行快速的运动^[8]，比较符合主操作手的设计要求。在这种情况下，并联型的主操作手不断出现。

1998年，韩国KAIST大学的Ki Young Woo^[9]等人研制出了一种并联型的6自由度力觉主手KAIST-I。这种主手的设计基于五杆的并联机构并且使用了装有谐波减速器的直流伺服电机，具有紧凑的结构、较大的工作空间以及高刚度，通过主动补偿的方法提高了由于机械传动系统存在而减少的背向驱动性。主手末端可在 $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的空间内进行运动。

2001年，韩国汉阳大学的Lee^[10]等人研制出了一种6自由度的主手结构。该主手主要由三组缩放机构组成。这种主手设计在最下面的关节安装了电位计来测量摆动的角度，可以输出最大25N的操作力，工作空间为一个直径40厘米的球体。为了达到更好的效果，通过分析对于机构的设计参数进行了优化。通过对于输出指标的分析，得出了相对应于每个驱动器所承担的负载。

2002年，Birglen^[11]等人研制出了一种新型的球形三自由度力觉主手结构命名为SHaDe，意为Spherical Haptic Device。这种力觉主手结构如图1-4所示。从图中可以看出，该主手的设计十分简洁，操作者的手放在球形主手的内部，这样能给操作者带来更加真实的操作感并且。由于使用了球形设计，这种主手装置只有三个转动自由度，与传统的串联或者并联方式的设计相比，单就转动自由度来说，球形设计的工作空间得到了很大的提升。球形设计同样在满足机构低惯量低摩擦的同时保证了很好的可操作性。



图 1-4 球形主操作手示意图

对于力觉主手的研究近些年越来越受到重视，许多大学与研究所都展开了关于

力觉主手方面的研究工作。Van der Linde R.Q 等人研制了一种高性能的力觉主手设备命名为 HapticMaster, 其具有 $0.08m^3$ 的工作空间, 并且具有很高的位置控制精度与力敏感度。2006 年, 美国西北大学的 Faulring^[12] 等人研究研制了一种协作机器人主手, 基于 6 自由度并联机构。美国卡内基梅隆的 Berkelm^[13] 等人研制出了一种基于磁悬浮的力反馈系统。美国 Southern Methodist University 的 Hurmuzlu^[14] 研制出了一种具有力反馈功能的外骨骼装置。意大利 Perpetual Robotics Lab 的 Raspolli^[15] 研制出了一种用于心血管手术的模拟系统。

除了各个高校与研究所对力觉主手的研究外, 国外也出现了一些成熟的商业化力反馈产品。



图 1-5 ForceDimension 系列产品

瑞士洛桑理工学院的 Clavel 提出的 Delta 机构^[16] 在提出后被迅速用于力觉主手的设计之中。瑞士 Force Dimension 公司以 Delta 机构为基础, 开发了数款力觉设备, 广泛应用于医疗手术等领域。Force Dimension 公司的产品主要有 Sigma、Omega、Delta 三个系列。如图1-5所示,1-5 a)、1-5 b)、1-5 c)分别为 Sigma.7、Omega.7、

Delta.6 力觉主手。这些设备都至少可以提供三个平动自由度的力反馈，最高可提供 20N 大小的力，且都对重力进行了补偿。这些系列的机器人都以 Delta 机构来实现三个自由度的平动。对于不同的应用场合不同的需求，用户可以对于末端的转动自由度机构进行选择。这样的好处在于使一台设备通过更换末端的提供转动自由度的机构就可以实现在不同场合的使用。三个系列的不同点在于，Delta 系列的设备可以提供高精度的力/力矩反馈且工作空间较大。Omega 系列使用了刚度更高的材料同时提供了 USB2.0 接口，可以提供比 Delta 系列更大的力反馈，但是不能提供力矩的反馈，在可靠性需求较高的场合应用较多。Sigma 系列的设备综合了 Delta 系列和 Omega 系列的优势，是三个系列产品中最先进的。除了提供力觉设备，Force Dimension 公司还与其他研究机构合作，提供了名为 CHAI-3D 的开源软件平台。CHAI-3D 为一款专门用来为力觉设备进行软件开发的开源平台。利用 CHAI-3D 提供的功能可以方便地对力觉设备进行软件开发，用户可以在其提供的各种接口基础上进行开发，极大地方便了从业人员与从业者。Force Dimension 公司的设备与 DLR 研制的机器人不同，属于小型的桌面级力觉设备，在工作空间与力反馈的最大输出能力上有限，但是其灵活性以及精确性使其在力觉设备市场上大放异彩，在医疗手术、虚拟医疗仿真、虚拟现实娱乐等领域都有应用。

由美国 SensAble 公司研制的一种名为 Phantom 的力觉主手设备也是应用广泛的一款设备。与 Force Dimension 公司的系列产品采用并联式结构不同，Phantom 系列产品采用了串联式的结构，如图1-6所示。可以提供 3 个自由度的力输出与 6 个自由度的位置信息检测，但是不能进行力矩的输出。



图 1-6 Phantom Omni 力觉主手设备

1.2.2 力觉主手设备的国内研究现状

力反馈技术是一项需要技术积累、难度高的多学科交叉技术，我国起步较晚，还没有成熟的商品级力反馈设备出现，与发达国家相比还有很大差距。东南大学是国内开始进行力反馈设备研究最早的高校之一，其于 1993 年研制成功了六自由度力反馈机械臂^[17]，如图1-7所示。哈尔滨工业大学机器人研究所研制了一种具有力反馈功能的微操作机器人系统^[18]。如图1-8所示。

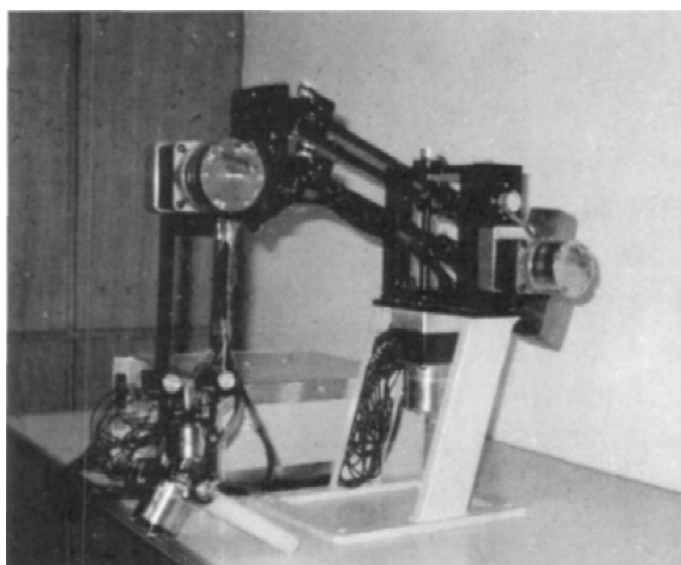


图 1-7 东南大学研制六自由度力反馈机械臂

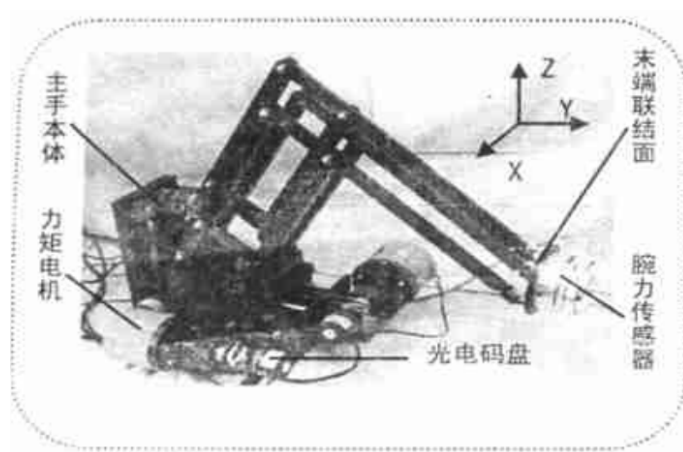


图 1-8 哈尔滨工业大学研制微操作机器人主手

总的来说，我国对于力觉设备的研究基本还处于实验室研究阶段，尚未有成熟的商业化产品进入市场。许多企业与科研机构在需要用到力觉设备时，大多数时

候选择从国外购买成熟的产品。但是前文介绍的各个系列产品虽然可以基本满足需要,但是价格昂贵,硬件与软件方面都进行了封装,技术进行了保密,用户只能使用由其提供的接口进行研究或者开发工作,这样力觉设备的研究收到了很大的限制。因此,我国对于力觉设备的研究还需要继续深入下去。

1.3 力控制方法的研究现状

机器人若是在空间内自由的运动而没有与环境接触,则为了确保机器人末端运动的位置精度,最需要关心的是机器人关节伺服系统的精度与性能以及机器人本身机构的刚度。而当机器人需要在工作过程中与环境进行接触或者要进行力输出时,仅仅满足机器人的末端运动位置精度就是远远不够的了,也要同时考虑机器人与环境的相互作用关系。对于机器人的力控制,目前普遍研究的控制方法可以分为基本力控制方法和与先进控制算法相结合的力控制方法。

1.3.1 基本力控制方法

基本的力控制方法可以分为刚度控制、阻抗控制、导纳控制以及混合力控制方法。对于机器人的力控制来说,最重要的还是通过机器人与环境接触而得到的相互作用力信号来得到控制机器人进行运动的输入信号,使机器人能够输出期望的位置与力。在力控制中,需要考虑的信息有位置、速度、加速度与力。不同的力控制方法主要是应用了不同的信号以及他们之间的关系来进行控制。

刚度控制可以在一定范围内对机器人的刚度进行改变,分为主动与被动两种方式。采用被动刚度控制的机器人在末端安装有包含弹簧的机械装置。这种方式的好处在于在控制方法的层面比较简单,不需要力传感器,在特定的任务中可以取得不错的效果。缺点在于只能针对特定的任务进行特定的设计,不具有通用性。相比较而言,采用主动刚度控制方法的机器人^[19-23]利用力传感器采回的力反馈信号来改变闭环系统的刚度,可以看作一个可以通过编程改变其刚度的弹簧。刚度控制如图1-9所示。其中部分1为控制器,部分2为被控系统。其中被控系统包括了机器人、与机器人末端接触的环境、速度反馈以及对于机器人非线性的补偿。刚度控制环提供了一个与位置误差成比例的力反馈。通过调整矩阵 K_p 的值,机器人可以表现出不同的机械刚度。刚度控制的稳定性也有许多学者进行了研究与讨论。Kazerooni^[24]等人分析了一般情况下的刚度控制稳定性,给出了稳定的条件,并在实际系统中进行了验证。在这之后,又有不同的学者进一步进行了研究了不同的机器人操作手的运动学稳定性条件^[25-27]。

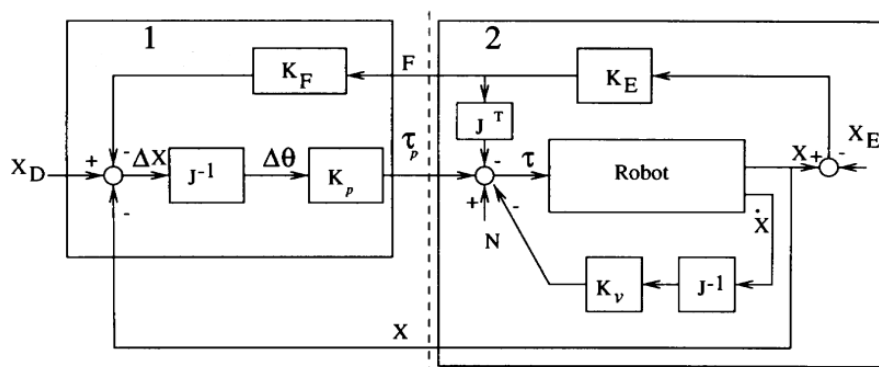


图 1-9 主动刚度控制框图

阻抗控制于 1984 年由 Hogan 提出^[28, 29]，其主要的思想为在进行机械臂的控制系统设计时，不仅要实现机器人末端对运动轨迹的跟踪，还要调节机械臂的机械阻抗。机械阻抗被定义为机械臂与环境的相互作用力与末端运动之间的比值，可以写作： $Z(s) = \frac{F(s)}{\dot{X}(s)} = Ms^2 + Bs + K$ 。其中的三个矩阵分别为期望惯性、阻尼、刚度矩阵。通过调节这些矩阵的值就可以改变机械臂的阻抗特性从而达到控制机器人末端与环境相互作用力的目的。在 Hogan 提出阻抗控制理论后，许多学者对阻抗控制进行了进一步的研究并且实现了各种形式的阻抗控制^[30-33]。阻抗控制基本形式的框图如图 1-10 所示。1988 年，Lawrence^[34] 给出了一般情况下阻抗控制的稳定性分析，并得到了各个阻抗参数的稳定边界。

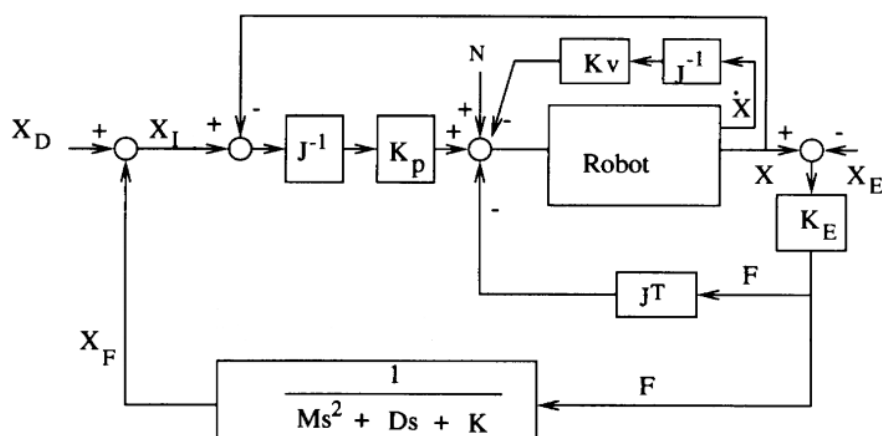


图 1-10 基本形式阻抗控制框图

导纳控制与阻抗控制相对应。在电路系统中，阻抗与导纳为互为倒数的关系，导纳控制与阻抗控制的关系也可以这样来描述。机器人导纳可以定义为机器人阻抗的倒数^[35]。当环境刚度已知时，导纳控制可以实现一个很好的力跟踪响应。其

稳态误差基本为零且具有超调量很小且响应时间很快的特点。导纳控制最基本的思想还是将一个运动控制系统作为基本的最优先考虑的对象然后通过调节导纳的参数来实现在受约束的环境里完成机器人的任务。Lawrence^[34] 同样给出了导纳控制在一般情况下的稳定条件。

1981 年, Mason^[36] 提出了力位混合控制的基本思想。Mason 将力与力矩和位置的信息放在一起进行考虑, 定义了两个互补的正交工作空间分别代表位移与力。基于 Mason 提出的力与位置混合控制的思想, 许多学者在这个基础上做了许多有意义的工作^[37-42]。1981 年, Raibert^[37] 等人首次在 Scheinman 机器人上证实了力位混合控制算法的有效性。力与位置混合控制算法的示意图如图 1-11 所示。在力位混合控制的过程中, 在同一时刻, 只能选择控制位置或者控制力。图中的 S 矩阵用来决定是进行力控制还是位置控制。 S 矩阵中的元素为 0 或者 1。当 $s_j = 0$ 时, 代表第 i 个自由度的关节进行的是力控制。若 $s_j = 1$ 代表这个自由度的关节进行的是位置控制。控制器将力矩信号 τ 发送给机器人使机器人进行运动。通过将力的控制与位置的控制分开在不同的子空间内进行设计, 实现了力控制与位置控制的解耦。这样的好处在于对于力控制与位置控制不同的控制性能要求可以同时达到。一般情况下, 力控制由于希望达到更小的稳态误差, 经常采用 PI 控制方法。位置控制由于希望有更快的响应时间, 经常采用 PD 控制的方法。力位混合控制的稳定性分析也有许多学者进行了讨论^[43, 44]。1992 年, Yabuta^[45] 采用李雅普诺夫直接法给出了非线性力位混合控制的稳定性分析, 并给出了基本情况下的稳定条件。

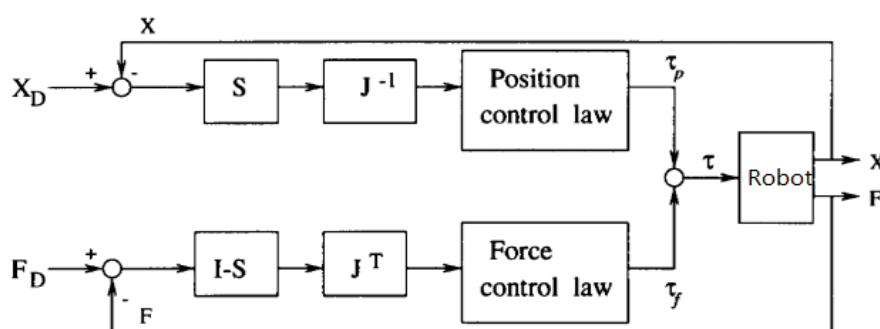


图 1-11 力位混合控制框图

1988 年, Anderson 和 Spong^[46] 提出了一种力位混合阻抗控制的方法, 将阻抗控制与力/位置控制纳入了一种控制策略当中。这使得在进行控制系统的设计时, 设计者可以通过选择需要的阻抗参数来获得更多的灵活性。在力控制与位置控制子空间中可以分别选取不同的阻抗参数来达到期望的控制效果, 使得在保证位置控制性能的同时一并实现对力信号的跟踪。力位混合阻抗控制的框图如图 1-12 所示。

其中 Z_{mp} 与 Z_{mf} 可以由使用者进行选择。与力位混合控制不同的是，力控制子空间和位置控制子空间输出的是位置信息。

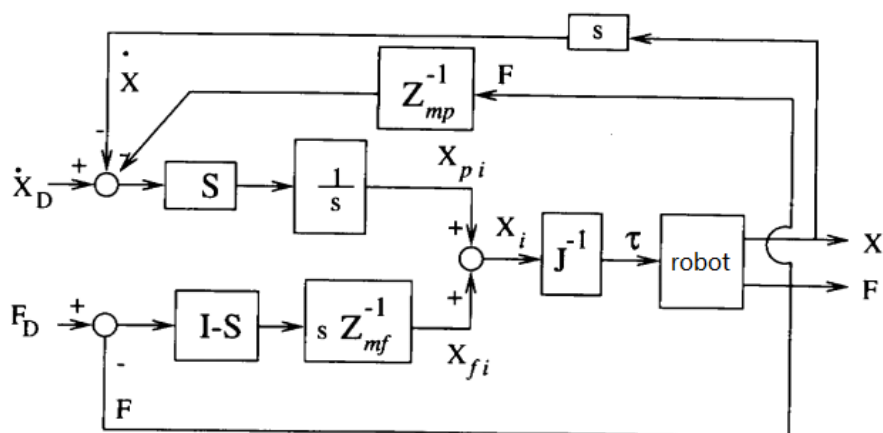


图 1-12 力位混合阻抗控制框图

1.3.2 先进力控制方法

机器人在遇到一些复杂的情况比如环境十分松散、有未知参数、有外部扰动时，机器人的力控制性能会受到影响，甚至有可能导致系统失稳。在未建模动态、传感器噪声、外部干扰等等不利因素存在的情况下如何保证机器人力控制的性能激发了众多学者的研究兴趣。先进力控制方法主要是指利用自适应控制理论、鲁棒控制理论等先进的控制理论与传统的力控制理论相结合，使机器人系统在有未知参数以及不确定的情况下保证精确的力跟踪效果。先进的力控制方法主要可分为自适应控制方法、鲁棒控制方法。

自适应力控制的基本目标为在机器人与环境存在未知参数或者参数发生变化时，保证控制系统能持续保持很好的控制性能。将传统的力控制方法与自适应律相结合一同组成控制器，在机器人与环境中存在未知参数时，保持系统的期望刚度、阻抗或者导纳参数。自适应阻抗控制方法大体上可以分为两种策略，一种为直接自适应方法，另一种为间接自适应方法。在间接自适应的方法中，对于机器人系统中的未知动态参数进行估计并且表示为显式参数用于控制系统中。间接方法的主要目标为使参数误差趋近于 0，因此，间接自适应方法需要对于机器人的模型以及环境的模型有非常精确的了解。在现实系统中，这一方法的实施受到诸多限制。由于实际系统中各种限制的存在，直接的自适应方法在机器人的力控制中使用的更为普遍。在直接自适应控制方法中，自适应策略用来直接调整控制器中的参数以达到使跟踪误差趋于 0 的目标。许多学者对于直接自适应方法与间接自适应方法都做

了深入的研究。Carelli^[47] 以及 Singh^[48] 等人将间接自适应方法应用到阻抗控制中。Colbaugh^[49] 以及 Jung^[50] 等人将直接自适应方法应用于阻抗控制。Seraji^[51] 将直接自适应方法应用于力位混合控制中。

鲁棒力控制的基本目标为在存在有界的不确定性的情况下, 保证系统鲁棒性并实现机器人的目标动态性能。鲁棒力控制的难点在于鲁棒控制律的设计。滑模控制方法也在这里被广泛地使用^[52]。鲁棒控制律一般在误差信息与输出反馈的基础上利用李雅普诺夫直接法进行设计。迄今为止对于力控制来说, 与鲁棒控制的结合主要有两种方式, 即鲁棒阻抗控制^[53] 以及鲁棒力位混合控制^[54]。

1.4 本文研究的主要内容

本课题的主要研究目的为以实验室中的主从式手术机器人为平台, 研究了阻抗控制与自适应阻抗控制在主操作手力跟踪控制中的应用, 以及具体控制方法在机器人中的实现。本课题的工作将主要分为以下几个方面:

(1) 首先, 主操作手的建模分析。对于机器人的控制来说, 运动学与动力学的分析是至关重要的。本课题将对于作为主操作手的三自由度 Delta 机器人进行了运动学与动力学的建模, 给出运动学正逆解的解法并利用虚功原理的方法对于动力学进行了分析并将采用 MATLAB/SIMULINK 与 ADAMS 联合仿真的方法对模型进行验证。

(2) 其次, 本课题将对基于位置的阻抗控制进行研究, 具体地对期望阻抗参数对于控制系统的影响进行分析。利用基于位置的阻抗控制理论搭建 SIMULINK 模型然后对 Delta 机器人进行仿真实验。同时本文还将对于阻抗控制的位置控制、对不同信号的跟踪性能以及参数变化的情况进行仿真实验, 期望能够验证经典的基于位置的阻抗控制的力跟踪效果并研究了其不足之处。

(3) 再次, 本文对于基于位置的阻抗控制的不足, 将采用间接自适应阻抗控制方法, 并将对其稳定性进行分析。之后本文将基于自适应阻抗控制方法搭建 SIMULINK 模型对 Delta 机器人模型进行了仿真实验, 在同条件下与阻抗控制的仿真结果进行比较, 通过仿真研究自适应阻抗控制在环境参数发生改变时的控制效果。

(4) 最后, 本文将利用主从式手术机器人的主手 Delta 机器人进行实物实验, 利用运动控制卡编写程序分别实现基于阻抗控制与自适应阻抗控制的控制系统。然后本文将设计实验研究阻抗控制与自适应阻抗控制对于力跟踪的效果并通过对比实验研究在环境参数发生改变时自适应阻抗控制的性能。

第 2 章 Delta 机器人运动学建模

2.1 引言

机器人的运动学分析对于机器人来说是至关重要的。建立了机器人的运动学模型之后，才能对机器人进行基本的位置控制。运动学模型主要包括两个部分，一个是逆解模型，另一个是正解模型。通过机器人的运动学逆解，可以通过控制电机转角让机器人运动到指定的位置上。在不添加其他的传感器的情况下，也可以通过机器人的运动学正解利用电机转角计算出机器人末端的位置。本章的主要内容为分析的 Delta 机器人的三维模型，建立了 Delta 机器人的运动学正解与逆解模型，并通过 MATLA/SIMULINK 与 ADAMS 进行联合仿真验证所建立模型的正确性。

2.2 Delta 机器人总体结构分析

Delta 机器人由 Clavel 于 1985 年提出并被快速的运用到了各个领域。Delta 机器人的主要优点在于结构简单，运行速度快，能够实现三维空间的平动。Delta 机器人由固定的静平台、主动杆、被动杆、动平台四部分组成，结构清晰一目了然。三个电机安装在静平台上，分别驱动三个主动杆进行运动，主动杆带动被动杆，被动杆带动动平台进行运动。被动杆由一个平行四边形组成，平行四边形的短杆中点通过一个转动副和主动杆连接，两端分别通过一个转动副与被动杆的长杆连接。被动杆与动平台的连接同理，通过 3 个转动副连接。由于被动杆是一个平行四边形，动平台受到三条被动杆的制约只能在三维空间内进行平动而无法进行转动。在 Delta 机器人的动平台上安装其他的执行器又可以更多的工作。ADAMS 中 Delta 机器人的模型图如图 2-1 所示。电机选用直流伺服电机。

本文所用的 Delta 机构基本情况如上文所述，计算自由度主要用到公式 2-1:

$$F = 6(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \quad (2-1)$$

式中 F ——自由度；

n ——构件总数；

g ——运动副总数；

f_i ——第 i 个运动副的自由度。

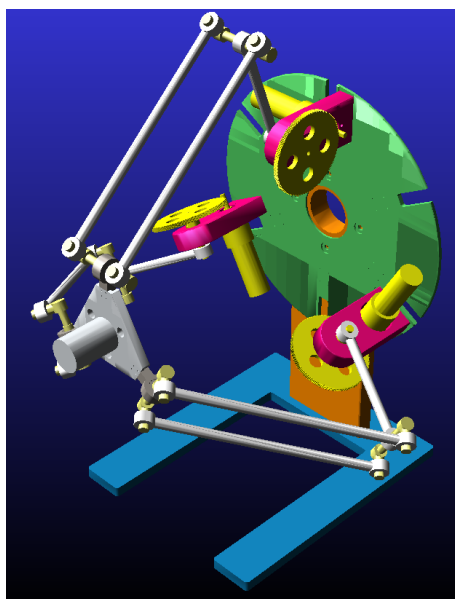


图 2-1 Delta 机构三维模型图

本文所述的 Delta 机构共有构件 11 个，静平台与主动连杆通过 3 个转动副连接，主动杆与从动杆之间通过 3 个转动副连接，被动杆上短杆和长杆之间通过 12 个转动副连接，短杆与动平台之间通过 3 个转动副连接。为了保证动平台的平动，从动杆为平行四边形，短杆上的 18 个转动副可以简化为 6 个虎克铰。平行四边形可以看做一个构件。这样机构的构件数减少为 $n = 8$ 。运动副包括三个转动副和 6 个虎克铰，所以运动副的数目为 $g = 9$ 。每个虎克铰有 2 个自由度，每个转动副有一个自由度，所以所有运动副自由度之和 $\sum_{i=1}^g f_i = 15$ 。这样整个机构的自由度由公式 2-1 可得， $F = 6 \times (8 - 9 - 1) + 15 = 3$ 。Delta 机构的三个支链相互制约，运动平台并不能转动，具有三个平动自由度。

2.3 Delta 机构的运动学分析

在分析了 Delta 机构能够进行什么样的运动后，接下来的任务是对其进行运动学的分析。机器人的运动学分析主要分为运动学正解与运动学逆解两部分。主要研究机器人的关节转动与末端动平台位置之间的关系。在分析之前，首先要对 Delta 机构的几何模型进行一些简化，方便分析。

2.3.1 Delta 机构的简化

由于 Delta 机构的动平台只能进行三维的平动并不涉及转动，可以将动平台的运动看做质点的运动。被动杆由一个平行四边形构成，可以将短杆与其上面的三

个转动副看成一个虎克铰，两根长杆看成一根。连接静平台与主动杆的转动副轴线与同一支链上虎克铰其中一组轴线平行，与另外一组轴线垂直。因此将每一支链向静平台中心移动动平台半径的距离并不会改变分析的结果。此时动平台缩为一个质点，设为 P 。 P 点的坐标即代表了动平台几何中心的坐标。简化后动平台的半径变为 $d = R - r$ 。

为了分析的方便，一些坐标系的建立是必要的。首先建立 $O-XYZ$ 坐标系，坐标系的原点 O 为静平台外接圆的圆心。 z 轴正方向竖直向上通过安装在静平台顶部的那一条支链。 y 轴的正方向为垂直于静平台所在的平面向外。 x 轴的正方向由右手定则可以确定。然后再分别在每个支链上建立一个坐标系，并命名为 $O-X_iY_iZ_i$ ($i = 1, 2, 3$)。其中 $O-X_1Y_1Z_1$ 坐标系与 $O-XYZ$ 坐标系重合，其它两个坐标系分别为 $O-XYZ$ 坐标系绕 y 轴旋转 $\pm 120^\circ$ 得到。这样建立坐标系的好处是，在对每个支链进行研究时，可以在支链坐标系下进行计算，然后再通过变换矩阵即可转换到 $O-XYZ$ 坐标系中。

2.3.2 Delta 机构的运动学逆解分析

上一节对 Delta 机构的几何模型进行了简化并建立了坐标系。本节主要进行 Delta 机构运动学逆解的分析。运动学逆解是指在已知机器人末端位置坐标以后，求解出机器人各个关节转角的过程。如果给定机器人的末端位置，就可以驱动关节电机转过相应的角度来完成控制任务。即已知 P 点坐标来求出每个电机对应的转角 φ_i ($i = 1, 2, 3$)。

如果要求解 φ_i ，可以将已知的 P 点坐标转换到每个支链的坐标系下，分别解出每个支链中主动杆转过的角度也就是电机转过的角度。将 P 点在 $O-XYZ$ 坐标系中的坐标转换为在 $O-X_iY_iZ_i$ 中的坐标可通过旋转矩阵来实现，如公式 2-2 所示：

$$\begin{bmatrix} x_{p_i} \\ y_{p_i} \\ z_{p_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_i & -\sin\beta_i & 0 \\ \sin\beta_i & \cos\beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (\beta_i = 0, \frac{2}{3}\pi, \frac{4}{3}\pi; i = 1, 2, 3) \quad (2-2)$$

P 点在支链坐标系中的位置坐标已知后，若能求得主动杆和被动杆交点位置的坐标 J_i ，则很容易通过几何关系得到 φ_i 。这样求解 J_i 成为了下一个目标。

Delta 机构的静平台通过三个转动副与主动杆连接，主动杆围绕转轴进行转动，有一个自由度。若不考虑主动杆转动时的约束，即主动杆可以绕轴进行 360° 的转动。这样的话，主动杆在运动过程中末端的轨迹是一个圆，圆心为转动副的中心。

分别在每一个支链的坐标系 $O - X_i Y_i Z_i$ 中研究主动杆末端的轨迹，则轨迹方程为：

$$(y_i - d)^2 + z_i^2 = L_1^2, (i = 1, 2, 3) \quad (2-3)$$

对于从动杆来说，两端可以看作以虎克铰分别与主动杆和动平台连接。在运动学逆解的分析中，已知的是动平台中心的位置坐标，可以看做被动杆的一段端点固定在了 P 点。由于虎克铰为两个自由度，被动杆可以以 P 点为圆心绕 Y_i 与 X_i 进行旋转。同样的先不考虑约束，假设被动杆在空间内可以进行自由的运动，则被动杆以 P 点为中心，另一端在空间中的轨迹为一个球面。轨迹方程为：

$$(x - x_{p_i})^2 + (y - y_{p_i})^2 + (z - z_{p_i})^2 = L_2^2 \quad (2-4)$$

由上述分析可知，主动杆与被动杆的交点 J_i 即为圆方程式 2-3 与球面方程式 2-4 的交点。为了得到交点 J_i 在坐标系 $O - X_i Y_i Z_i$ 中坐标，联立式 2-3 与式 2-4：

$$\begin{cases} (y_i - d)^2 + z_i^2 = L_1^2 \\ (x - x_{p_i})^2 + (y - y_{p_i})^2 + (z - z_{p_i})^2 = L_2^2 \end{cases} \quad (2-5)$$

注意到主动杆与从动杆的交点 J_i 在各自的支链坐标系中 x_{j_i} 都为零，这大大简化了计算。式 2-5 可以简化为：

$$\begin{cases} (y_i - d)^2 + z_i^2 = L_1^2 \\ x_{p_i}^2 + (y - y_{p_i})^2 + (z - z_{p_i})^2 = L_2^2 \end{cases} \quad (2-6)$$

联立两式化简可得：

$$\begin{cases} x_{j_i} = 0 \\ y_{j_i} = \frac{(d - A_i B_i) \pm \sqrt{1 + A_i^2 L_1^2 - (A_i d + B_i)^2}}{1 + A_i^2} \\ z_{j_i} = A_i y_{j_i} + B_i \end{cases} \quad (2-7)$$

其中

$$\begin{cases} A_i = \frac{d - y_{p_i}}{z_{p_i}} \\ B_i = x_{p_i}^2 + y_{p_i}^2 + z_{p_i}^2 + L_1^2 - L_2^2 - d^2 \end{cases}$$

通过式 2-7，在已知 P 点坐标的情况下，就可以求得 J_i 的位置坐标。根据静平台与主动杆之间的几何关系，很容易通过 J_i 点坐标得到对应主动杆也就是电机所转过的角度 φ_i 。这样便建立起来了 Delta 机构末端位置与电机转角之间的联系，方程式为：

$$\varphi_i = \arcsin\left(\frac{z_{j_i}}{L_1}\right), (i = 1, 2, 3) \quad (2-8)$$

需要注意的是，联立圆方程式 2-3 与球面方程式 2-4 得到的可能的解有八组，但是只有一组解是我们需要的。考虑到 $x_{j_i} = 0$ 不再变化，则可能的解减少为四组。

对于每一个支链来说，当支链向外弯曲而不是向内弯曲时更不容易产生干涉。为了保证各支链之间不发生干涉，应选取 $z_{j_i} = 0$ 比较大的解作为最后的解。这样便从八组解中确定出了一组解。

2.3.3 Delta 机构的运动学正解分析

运动学正解与运动学逆解为互逆的关系。运动学逆解已知机器人末端位置反推出电机的转角信息，而运动学正解是已知各个关节电机的转角信息推出机器人末端位置。运动学正解的用途在于，机器人的末端位置很难直接测量，而电机的位置信息是很好测量的，通过光电编码器即可实现。这样的话，在已知电机转角的情况下，通过运动学正解便可以很方便的知道机器人末端在笛卡尔空间坐标系下的位置情况。

针对本课题所使用的 Delta 机构，运动学正解就是已知主动杆与静平台之间的夹角 φ_i 然后去求解动平台中心 P 点坐标的过程。在求解运动学逆解的时候，需要先求出主动杆与被动杆的交点 J_i 作为桥梁。而在求解运动学正解的过程中， J_i 的求解依然非常重要。通过三角形的几何关系求出 J_i 在坐标系 $O - X_i Y_i Z_i$ 中的坐标，然后通过旋转矩阵转换到 $O - XYZ$ 坐标系中再进行接下来的计算，转换过程如式 2-9 所示：

$$\begin{bmatrix} x_{J_i} \\ y_{J_i} \\ z_{J_i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta_i & -\sin\beta_i & 0 \\ \sin\beta_i & \cos\beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x'_{J_i} \\ y'_{J_i} \\ z'_{J_i} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2-9)$$

J_i 通过几何关系的计算可以在坐标系 $O - X_i Y_i Z_i$ 表示为：

$$\begin{cases} x'_{J_i} = 0 \\ y'_{J_i} = d + L_1 \cos\varphi_i \\ z'_{J_i} = L_1 \sin\varphi_i \end{cases} \quad (2-10)$$

在运动学正解的求解过程中，相当于 J_i 点是已知不变的，而点 P 是变化中的需要求解的。由几何关系可得点 J_i 与点 P 的距离可表示为：

$$|J_i P| = \sqrt{(x_{j_i} - x_p)^2 + (y_{j_i} - y_p)^2 + (z_{j_i} - z_p)^2} = L_2 \quad (2-11)$$

联立式 2-9, 2-10, 2-11 整理可得：

$$\begin{cases} x_p^2 + (y_{j_1} - y_p)^2 + (z_{j_1} - z_p)^2 = L_2^2 \\ x_{j_2} x_p + (y_{j_2} - y_{j_1}) y_p + (z_{j_2} - z_{j_1}) z_p = 0.5(x_{j_2}^2 + y_{j_2}^2 + z_{j_2}^2 - x_{j_1}^2 - y_{j_1}^2 - z_{j_1}^2) \\ x_{j_3} x_p + (y_{j_3} - y_{j_1}) y_p + (z_{j_3} - z_{j_1}) z_p = 0.5(x_{j_3}^2 + y_{j_3}^2 + z_{j_3}^2 - x_{j_1}^2 - y_{j_1}^2 - z_{j_1}^2) \end{cases} \quad (2-12)$$

将式 2-12 中的后两式作差可得：

$$\begin{cases} x_p = A_1 y_p + B_1 \\ z_p = A_2 y_p + B_2 \end{cases} \quad (2-13)$$

其中

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(y_{j2} - y_{j1})(z_{j3} - z_{j1}) - (y_{j3} - y_{j1})(z_{j2} - z_{j1})}{(z_{j2} - z_{j1})x_{j3} - (z_{j3} - z_{j1})x_{j2}} \\ A_2 &= \frac{x_{j2}(z_{j3} - z_{j1}) - x_{j3}(z_{j2} - z_{j1})}{(z_{j2} - z_{j1})x_{j3} - (z_{j3} - z_{j1})x_{j2}} \\ B_1 &= 0.5 \frac{(z_{j2} - z_{j1})(x_{j2}^2 + y_{j2}^2 + z_{j2}^2 - x_{j1}^2 - y_{j1}^2 - z_{j1}^2) - (z_{j3} - z_{j1})(x_{j3}^2 + y_{j3}^2 + z_{j3}^2 - x_{j1}^2 - y_{j1}^2 - z_{j1}^2)}{(z_{j2} - z_{j1})x_{j3} - (z_{j3} - z_{j1})x_{j2}} \\ B_2 &= 0.5 \frac{x_{j3}(x_{j2}^2 + y_{j2}^2 + z_{j2}^2 - x_{j1}^2 - y_{j1}^2 - z_{j1}^2) - x_{j2}(x_{j3}^2 + y_{j3}^2 + z_{j3}^2 - x_{j1}^2 - y_{j1}^2 - z_{j1}^2)}{(z_{j2} - z_{j1})x_{j3} - (z_{j3} - z_{j1})x_{j2}} \end{aligned}$$

将用 y_p 表示的 x_p 与 z_p 代入到式 2-12 可得：

$$(1 + A_1^2 + A_2^2)y_p^2 + 2(A_1 B_1 + A_2 B_2 - A_2 z_{j1} - y_{j1})y_p + B_1^2 + (B_2 - z_{j1})^2 + y_{j1}^2 - L_2^2 = 0 \quad (2-14)$$

可以看出，式 2-14 是关于 z_p 的一元二次方程，容易解得：

$$y_p = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2-15)$$

式中

$$\begin{aligned} a &= 1 + A_1^2 + A_2^2 \\ b &= 2(A_1 B_1 + A_2 B_2 - A_2 z_{j1} - y_{j1}) \\ c &= B_1^2 + (B_2 - z_{j1})^2 + y_{j1}^2 - L_2^2 \end{aligned}$$

由式 2-13 可知 x_p , z_p 可由 y_p 表示。求出 z_p , x_p , y_p 也就很容易得到， P 点坐标可表示为：

$$\begin{cases} x_p = A_1 y_p + B_1 \\ z_p = A_2 y_p + B_2 \\ y_p = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \end{cases} \quad (2-16)$$

由式 2-15 计算出来的 y_p 由两个可能的解，末端执行器有两种可能的位置。这也与实际情况相符，在只知道电机转角的情况下，能唯一确定的只有主动杆末端的位置，而动平台位置有靠近静平台两杆之间夹角成锐角的情况和远离静平台两杆夹角成钝角的情况。在 Delta 机器人的正常使用过程中，动平台的位置一般在远离静平台的一侧，故应舍掉较小的 y_p 。

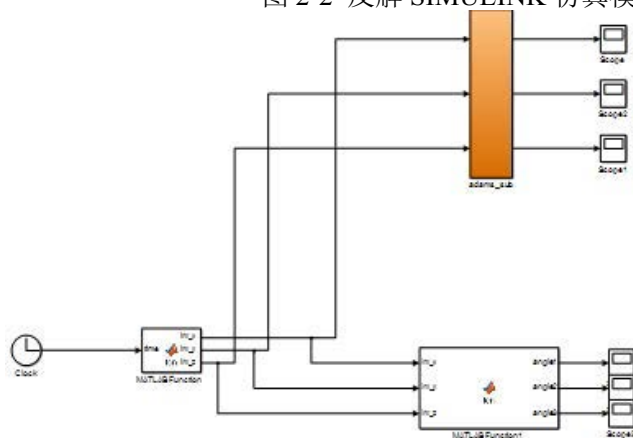
2.4 Delta 机构的运动学验证

上一节对于 Delta 机器人的运动学进行了分析，但是其正确性还需要验证。本节通过 MATLAB/SIMULINK 与 ADAMS 联合仿真来对建立的运动学模型进行验证。MATLAB 是由美国的 MathWorks 公司出品的商业数学软件，提供了数据可视化、算法开发、数据分析以及数值计算的高级计算语言和交互式环境。它将矩阵计算、数值分析、数据的科学可视化以及非线性动态系统的建模与仿真等很多非常强大的功能集成在一个视窗环境中，为科学研究、工程设计以及必须进行有效数值计算的众多科学领域提供了一种全面的解决方案。ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems), 是有美国 MSC 公司提供的一种虚拟样机分析软件。它采用了交互式的图形环境、零件库、约束库以及力库，可以创建完全参数化的机械几何模型，采用多刚体动力学中的拉格朗日方程方法作为其求解器的求解方法。它可以用来进行机械系统的静力学、运动学、动力学分析同时计算位置、速度、加速度以及力等数据。

2.4.1 Delta 机构的逆解验证

将建立的逆解模型搭建在 SIMULINK 中，仿真模型如图2-2所示。其中 ADAMS

图 2-2 反解 SIMULINK 仿真模型



模块的内部仿真图如图所示。

逆解是已知机器人末端位置的情况，反推机器人每个电机转动的角度的模型，对于逆解的验证，可以指定机器人的末端按照规划的轨迹运动一段距离，这样就可以得到机器人每个电机转动的转角的信息。在仿真实验中，通过比较本文所建立的运动学模型的输出与 ADAMS 模型的输出来验证逆解的正确性。设定机器人末

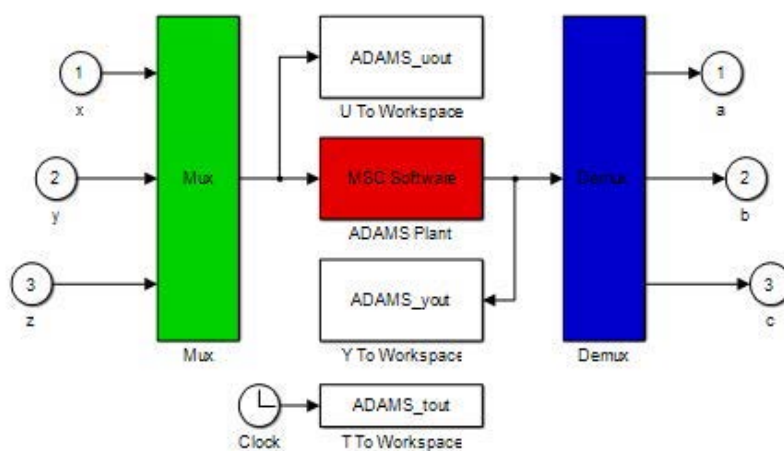


图 2-3 逆解模型 ADAMS 模块

端的运动轨迹为一个螺旋线，其方程可表示为：

$$\begin{cases} x = 30 \cos(4\pi t) \\ z = 30 \sin(4\pi t) \\ y = 120 + 10t \end{cases}$$

在仿真模型中，首先利用 MATLAB Function 生成螺旋线轨迹，然后分别输入 MATLAB Function 里面的逆解模型以及 ADAMS 模型中，MATLAB Function 与 Adams 模块分别输出一组电机角度的解，对两个模块输出的数据进行比较，就可以对给出的 Delta 机器人正解模型进行验证。为了区分方便，将 MATLAB Function 中生成的逆解模型的数据有黑色实线画出，将 ADAMS 模型中的数据用虚线表示。三个电机的电机转角随时间变化的关系分别由下面几张图表示。

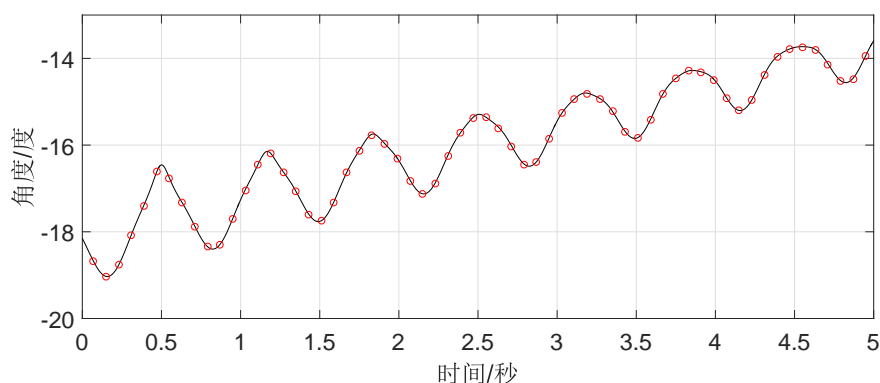


图 2-4 电机 1 逆解仿真

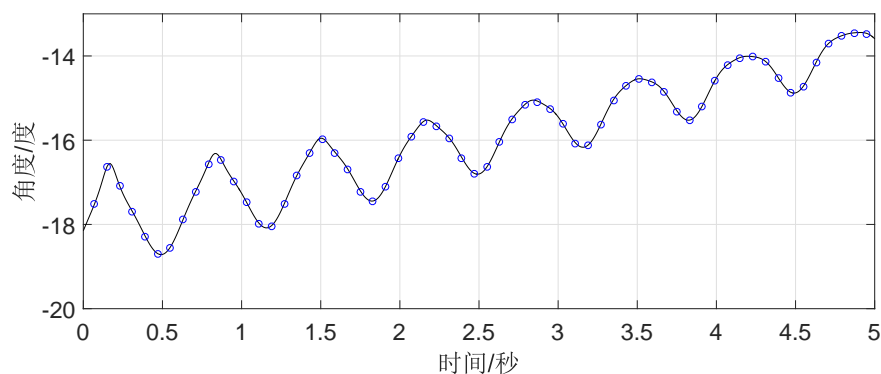


图 2-5 电机 2 逆解仿真

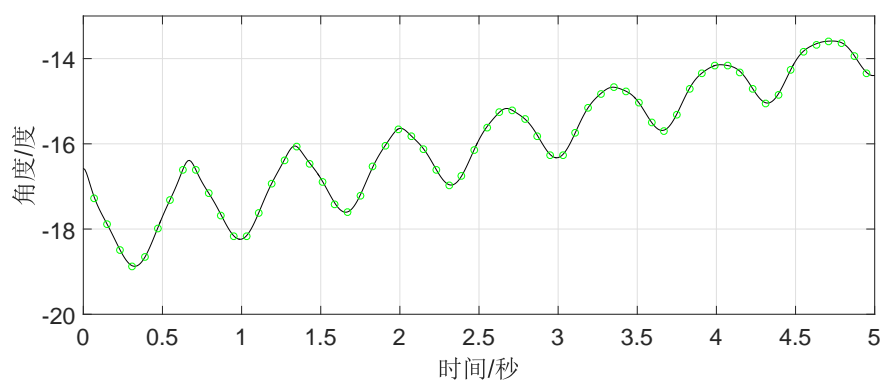


图 2-6 电机 3 逆解仿真

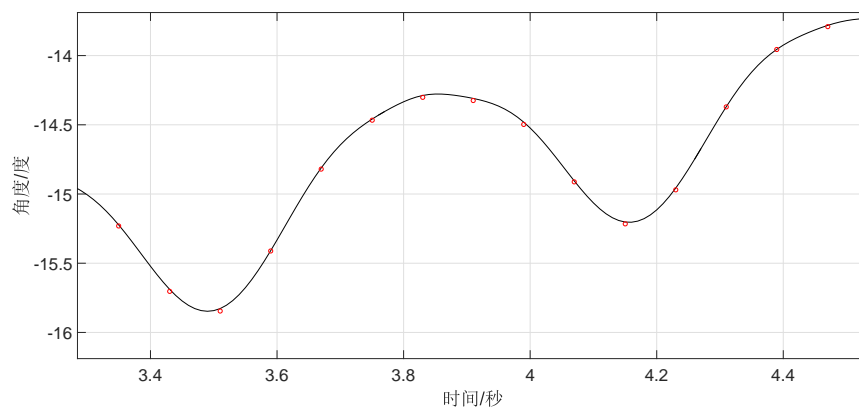


图 2-7 电机 1 逆解仿真局部图

从定性的角度看,电机的角度沿一个方向在震荡中不断增大,符合螺旋线的运动趋势。两个模型中的数据所生成的曲线基本重合。将电机 1 的逆解仿真图放大如图,可以看出两组数据并不是完全重合,但是相差小于 0.01 度,这可能是由于 MATLAB 与 ADAMS 的迭代误差造成的,可以看作两条曲线是重合的,从而验证了逆解模型是正确的。

2.4.2 Delta 机构的正解验证

在 SIMULINK 中利用 MATLAB Function 建立正解模型并与 ADAMS 模型的输出结果进行比较。SIMULINK 的仿真图如图所示。

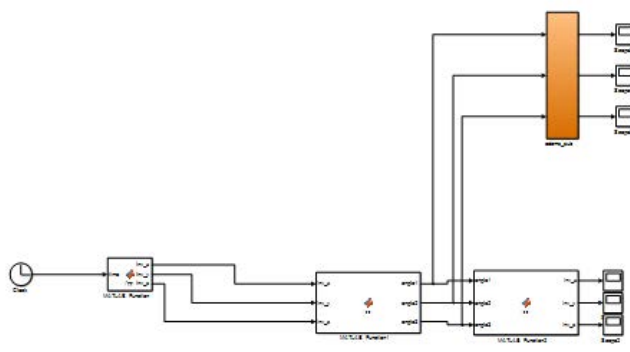


图 2-8 正解 SIMULINK 仿真模型图

与逆解的验证过程相反，在正解中是知道电机的运动情况求解机器人末端的位置运动情况。同样验证一条螺旋线轨迹。得到的正解仿真图形如图。

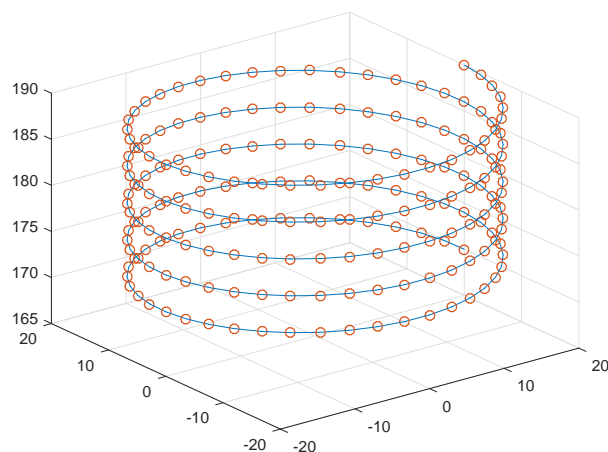


图 2-9 正解仿真图

图中，蓝色的实线为 MATLAB Function 里面的正解模型所画出的曲线，红色的虚线为 ADAMS 模型所画出的曲线。可以看出两者基本重合，验证了正解模型的正确性。

2.5 本章小结

本章首先对于 Delta 机器人主操作手的模型进行了简化,并根据接下来分析的需要建立了坐标系。然后对于 Delta 机器人的正逆解模型进行了推导。通过 MATLAB/SIMULINK 与 ADAMS 联合仿真的方式建立了仿真模型,并验证了 Delta 机器人正逆解模型的正确性。

第3章 Delta 机器人动力学建模

3.1 引言

机器人的动力学模型主要研究的是机器人的运动与机器人关节电机力矩之间的关系。动力学与运动学一样包括正动力学与逆动力学两个部分。上一章所建立的 Delta 机器人运动学模型为基本的位置控制提供了方法,但是这样对于机器人的力控制技术来说是十分不够的。为了实现机器人的力控制,机器人的动力学模型非常重要。在机器人动力学模型中,正向动力学主要用在机器人的仿真等方面,而逆动力学主要用于基于动力学模型的控制。本章主要对逆动力学模型的建立方法进行分析。

本文所研究的 Delta 机器人作为并联机器人的一种,由于有多个运动支链并且耦合,动力学模型比较复杂。本文在分析了 Delta 机器人的雅可比矩阵以及各个杆件运动的基础上,利用虚功原理作为 Delta 机器人动力学模型的求解方法,建立了 Delta 机器人的动力学模型。

3.2 动力学求解方法介绍

并联机器人由于其特殊的并联型结构以及强耦合性,动力学模型比较复杂。对于动力学模型建模,主要的研究方法有牛顿欧拉法、拉格朗日法、虚功原理法等方法。几种方法出发点与侧重点不一样,牛顿欧拉法主要从几何的观点出发来建立动力学方程。拉格朗日法利用能量的观点来建立动力学方程。尽管出发点、复杂度、方程的表达形式各有不同,但是都是基于虚功原理推导出来的。

牛顿欧拉法利用牛顿定律来分析机器人中力与运动之间的关系,利用欧拉方程来分析机器人中力矩与运动的关系。由于牛顿欧拉法要对机器人的每一个杆件都进行这样的分析,其递推的形式十分适合串联机器人动力学的求解,但是对于并联机器人动力学的求解并没有什么优势。而且牛顿欧拉法在建模过程中要对于机器人每个杆件的力、力矩、运动等信息进行分析,建模过程十分复杂。拉格朗日法从能量的角度出发,通过计算系统的动能与势能推导出机器人的动力学方程。拉格朗日法的优势在于建模过程中对于系统内部的内力不是很关心,只关心能量信息,这大大简化的建模的过程。但是,拉格朗日法也有其缺点即得到的动力学模型方程十分复杂,这给机器人的实时控制带来了困难。

力学原理中的虚功原理作为建立动力学模型的基础，同样可以用来直接对机器人进行动力学建模。由于 Delta 机器人的对称性，运用虚功原理直接进行动力学模型的建立，建模思路十分清晰且建模过程并不复杂。本章通过虚功原理对 Delta 机器人的逆动力学模型进行分析。

3.3 速度与加速度关系的分析

对于 Delta 机器人的动力学模型求解来说，需要在已知机构上各个部件的运动信息也就是各个杆件的速度、加速度、角速度、角加速度的基础上进行求解。可以看出，对于机构本体的运动信息的分析至关重要。Delta 机构的简化几何图如图3-1所示。

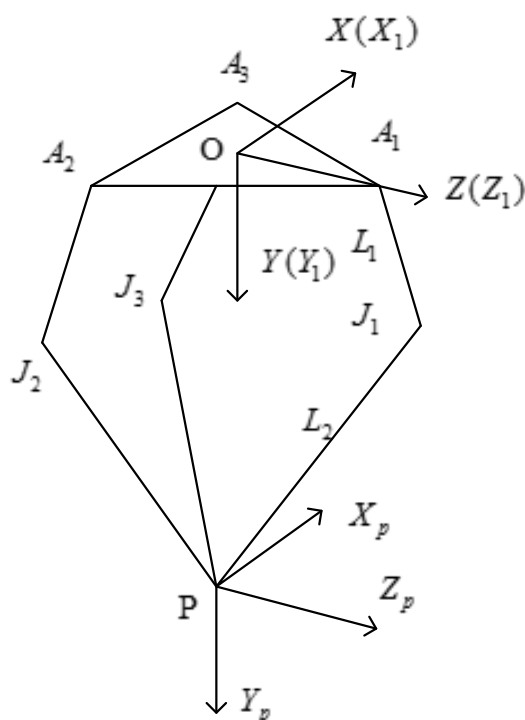


图 3-1 Delta 机器人简化几何模型

3.3.1 Delta 机器人雅克比矩阵的求取

对于机器人来说，除了对关节电机转动的角度与机器人末端在笛卡尔空间内运动位置的研究以外，速度关系也十分重要。机器人的关节空间电机旋转速度 $\dot{\mathbf{q}}$ 与机器人末端的速度 $\dot{\mathbf{v}}_p$ 之间的关系可以在已知电机角速度的情况下得到机器人末端在笛卡尔空间内运动的速度，这种关系可以表示为：

$$\dot{\mathbf{v}}_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \frac{\partial f_x}{\partial q_2} & \frac{\partial f_x}{\partial q_3} \\ \frac{\partial f_y}{\partial q_1} & \frac{\partial f_y}{\partial q_2} & \frac{\partial f_y}{\partial q_3} \\ \frac{\partial f_z}{\partial q_1} & \frac{\partial f_z}{\partial q_2} & \frac{\partial f_z}{\partial q_3} \end{bmatrix} \cdot \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J} \cdot \dot{\mathbf{q}} \quad (3-1)$$

式中, $\dot{\mathbf{v}}_p = f(\mathbf{q})$ 为 Delta 机器人的运动学正解模型, 这就是雅可比矩阵。

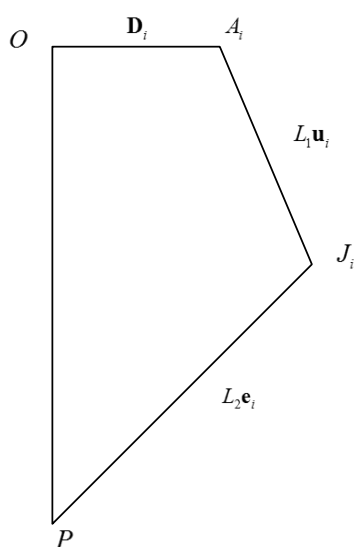


图 3-2 Delta 机器人单支链几何示意图

图3-2为 Delta 机器人单支链的几何示意图。由于 Delta 机器人三条支链的对称性, 可以针对单条支链进行分析然后将分析结果应用到每条支链上。在基坐标系中, 静平台中心到动平台末端点 P 可以通过向量形式写成:

$$\mathbf{D}_i + L_1 \mathbf{u}_i + L_2 \mathbf{e}_i = \mathbf{p} \quad (3-2)$$

其中, \mathbf{D}_i 为从点 O 到点 A_i 的向量, \mathbf{u}_i 代表的是沿着主动杆方向的单位向量, \mathbf{e}_i 代表的是沿被动杆方向的单位向量。式中所有的向量都在基坐标系中表示。为了求解 Delta 机器人的雅可比矩阵, 将式3-2对时间进行求导, 可以得到式3-3:

$$\mathbf{v}_p = \boldsymbol{\omega}_{1i} \times L_1 \mathbf{u}_i + \boldsymbol{\omega}_{2i} \times L_2 \mathbf{e}_i \quad (3-3)$$

其中, \mathbf{v}_p 为 Delta 机器人末端 P 在基坐标系下的速度, $\boldsymbol{\omega}_1$ 代表的是主动杆的角速度, $\boldsymbol{\omega}_2$ 代表的是被动杆旋转的角速度。其中, 主动杆的角速度很容易通过驱动元件旋转的速度获得, 而被动杆的角速度不容易求取。为了在式中消除被动杆的角速度项, 在式3-3等式两端同时点乘单位向量 \mathbf{e}_i 并利用向量混合积的性质可以得到:

$$\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{v}_p = \boldsymbol{\omega}_{1i} \cdot (L_1 \mathbf{u}_i \times \mathbf{e}_i) \quad (3-4)$$

将式3-4写成在各个支链坐标系下的形式可以表达为:

$$\mathbf{e}_i^i \cdot \mathbf{v}_p^i = \omega_{1i}^i \cdot (L_1 \mathbf{u}_i^i \times \mathbf{e}_i^i) \quad (3-5)$$

其中式中上标代表的是各个支链坐标系。Delta 机器人三个电机旋转角速度的向量可以写为：

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \omega_{11}^1 & \omega_{12}^2 & \omega_{13}^3 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

利用第二章中提及的旋转矩阵 \mathbf{R}_i ：

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \cos\beta_i & -\sin\beta_i & 0 \\ \sin\beta_i & \cos\beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

可以将末端速度在基坐标系中转化到各个支链坐标系中：

$$\mathbf{v}_p^i = \mathbf{R}_i \mathbf{v}_p \quad (3-7)$$

整理可将末端速度与关节空间的速度表示为：

$$\mathbf{J}_x \mathbf{v}_p = \mathbf{J}_q \dot{\mathbf{q}} \quad (3-8)$$

其中 \mathbf{J}_x 为：

$$\mathbf{J}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{e}_2 & \mathbf{e}_3 \end{bmatrix}^T \quad (3-9)$$

\mathbf{J}_q 为：

$$\mathbf{J}_q = L_1 \begin{bmatrix} \mathbf{u}_1^1 \times \mathbf{e}_1^1 \cdot \phi_1^1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{u}_2^2 \times \mathbf{e}_2^2 \cdot \phi_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{u}_3^3 \times \mathbf{e}_3^3 \cdot \phi_3^3 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

ϕ_i^i 为单位向量。

这样 Delta 机器人的雅克比矩阵可以表示为：

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_q^{-1} \mathbf{J}_x = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{e}_1^T}{L_1 (\mathbf{u}_1^1 \times \mathbf{e}_1^1) \cdot \phi_1^1} \\ \frac{\mathbf{e}_2^T}{L_1 (\mathbf{u}_2^2 \times \mathbf{e}_2^2) \cdot \phi_2^2} \\ \frac{\mathbf{e}_3^T}{L_1 (\mathbf{u}_3^3 \times \mathbf{e}_3^3) \cdot \phi_3^3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1^T \\ \mathbf{J}_2^T \\ \mathbf{J}_3^T \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

雅克比矩阵的逆在机器人系统中同样重要，可以表示为：

$$\mathbf{J}^{-1} = \frac{1}{\mathbf{J}_1 \cdot (\mathbf{J}_2 \times \mathbf{J}_3)} \cdot (\mathbf{J}_2 \times \mathbf{J}_3)(\mathbf{J}_1 \times \mathbf{J}_3)(\mathbf{J}_1 \times \mathbf{J}_2) \quad (3-12)$$

通过对 Delta 机器人雅克比矩阵的分析可以得到 Delta 机器人在不同情况下所产生的奇异点。当 $\mathbf{u}_1^1 \times \mathbf{e}_1^1 \cdot \phi_1^1 = 0$ 时，由式3-11可以看出此时雅克比矩阵并不存在。这种情况代表的几何意义为当主动杆与平行四边形结构组成的被动杆共线。当

$\mathbf{e}_1 \cdot (\mathbf{e}_2 \times \mathbf{e}_3) = 0$ 时, 可以看出雅克比矩阵同样不存在。这种情况代表的数学意义为代表被动杆方向的三个向量线性相关, 代表了三个被动杆共面或者其中两个被动杆平行的情况。在实际运用 Delta 机器人雅克比矩阵的过程中, 要注意避免奇异的情况发生。

3.3.2 Delta 机器人速度关系的求取

在求出 Delta 机器人雅克比矩阵的基础上, 可以求出各个杆件的速度, 为动力学模型的求解做准备。首先进行主动杆运动信息的求解。在各个支链坐标系中, 主动杆的速度与角速度可以写为向量形式:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1i}^i \\ \omega_{1i}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_{1i}^i \times L_1 \mathbf{u}_i^i}{2} \\ \omega_{1i}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{L_1}{2} \cos \varphi_{1i} \mathbf{J}_i^T \\ \frac{L_1}{2} \sin \varphi_{1i} \mathbf{J}_i^T \\ 0 \\ \mathbf{J}_i^T \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{v}_p \quad (3-13)$$

上式可以写为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{1i}^i \\ \omega_{1i}^i \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{1i} \mathbf{v}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{1iv} \\ \mathbf{J}_{1i\omega} \end{bmatrix} \mathbf{v}_p \quad (3-14)$$

其中, \mathbf{J}_{1iv} 、 $\mathbf{J}_{1i\omega}$ 分别表示主动杆质心速度以及主动杆角速度与机器人末端速度之间转换关系矩阵。同样的, 主动杆末端与被动杆的交点 \mathbf{B}_i 的速度可以表示为:

$$\mathbf{v}_{Bi}^i = \begin{bmatrix} 0 \\ -L_1 \cos \varphi_{1i} \mathbf{J}_i^T \\ L_1 \sin \varphi_{1i} \mathbf{J}_i^T \end{bmatrix} = \mathbf{v}_p = \mathbf{J}_{Bi} \mathbf{v}_p \quad (3-15)$$

式3-3可由式3-28表示为:

$$\mathbf{v}_p^i = \mathbf{v}_{Bi}^i + \omega_{2i}^i \times L_2 \mathbf{e}_i^i = 0 \quad (3-16)$$

将上式两边同时点乘 \mathbf{e}_i^i , 由于 $\omega_{2i}^i \cdot \mathbf{e}_i^i = 0$, 被动杆的角速度可以表示为:

$$\omega_{2i}^i = \frac{\mathbf{S}(\mathbf{e}_i^i)(\mathbf{R}_i - \mathbf{J}_{Bi})\mathbf{v}_p}{L_2} = \mathbf{J}_{2i\omega} \mathbf{v}_p \quad (3-17)$$

其中, $\mathbf{S}(\mathbf{e}_i^i)$ 为:

$$\mathbf{S}(\mathbf{e}_i^i) = \begin{bmatrix} 0 & -e_{iz}^i & e_{iy}^i \\ e_{iz}^i & 0 & -e_{ix}^i \\ -e_{iy}^i & e_{ix}^i & 0 \end{bmatrix}$$

上式矩阵中各个元素为向量 \mathbf{e}_i^i 在支链坐标系内各个轴的分量。被动杆质心的速度可以表示为：

$$\mathbf{v}_{2i}^i = \mathbf{v}_p^i - \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}_{2i}^i \times L_2\mathbf{e}_i^i \quad (3-18)$$

将式3-30代入式3-18可得：

$$\mathbf{v}_{2i}^i = \{\mathbf{R}_i + \frac{1}{2}\mathbf{S}(\mathbf{e}_i^i)\mathbf{S}(\mathbf{e}_i^i)(\mathbf{R}_i - \mathbf{J}_{B_i})\}\mathbf{v}_p = \mathbf{J}_{2iv}\mathbf{v}_p \quad (3-19)$$

将被动杆角速度以及质心速度写成与主动杆一样的形式可以得到：

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{2i}^i \\ \boldsymbol{\omega}_{2i}^i \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{2i}\mathbf{v}_p = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{2iv} \\ \mathbf{J}_{2i\omega} \end{bmatrix} \mathbf{v}_p \quad (3-20)$$

3.3.3 Delta 机器人加速度关系的求取

对于速度关系式3-3对时间求导可以得到：

$$\dot{\mathbf{v}}_p^i = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{1i}^i \times L_1\mathbf{u}_i^i + \boldsymbol{\omega}_{1i}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{1i}^i \times L_1\mathbf{u}_i^i) + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{2i}^i \times L_2\mathbf{e}_i^i + \boldsymbol{\omega}_{2i}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{2i}^i \times L_2\mathbf{e}_i^i) \quad (3-21)$$

主动杆质心加速度可以表示为：

$$\dot{\mathbf{v}}_{1i}^i = \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{1i}^i \times L_1\mathbf{u}_i^i + \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}_{1i}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{1i}^i \times L_1\mathbf{u}_i^i) \quad (3-22)$$

主动杆末端与被动杆连接处的加速度可以写为：

$$\dot{\mathbf{v}}_{B_i}^i = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{1i}^i \times L_1\mathbf{u}_i^i + \boldsymbol{\omega}_{1i}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{1i}^i \times L_1\mathbf{u}_i^i) \quad (3-23)$$

将式3-21两端叉乘 \mathbf{e}_i^i 可得：

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{2i}^i = \frac{1}{L_2}\mathbf{e}_i^i \times \{\dot{\boldsymbol{\omega}}_{1i}^i \times L_1\mathbf{u}_i^i + \boldsymbol{\omega}_{1i}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{1i}^i \times L_1\mathbf{u}_i^i) + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{2i}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{2i}^i \times L_2\mathbf{e}_i^i) - \mathbf{R}_i\dot{\mathbf{v}}_p\} \quad (3-24)$$

被动杆的质心加速度可以写为：

$$\dot{\mathbf{v}}_{2i}^i = \mathbf{R}_i\dot{\mathbf{v}}_p - \frac{1}{2}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{2i}^i \times L_2\mathbf{e}_i^i - \frac{1}{2}\boldsymbol{\omega}_{2i}^i \times (\boldsymbol{\omega}_{2i}^i \times L_2\mathbf{e}_i^i) \quad (3-25)$$

3.4 Delta 机器人动力学模型的建立

3.4.1 基于虚功原理的动力学方程

虚功原理是力学中的重要原理。其内容为：一个原为静止的质点系，若其约束是理想定长的，系统保持继续静止的条件为作用于系统上的主动力所做的虚功为零。虚功原理阐明，对于一个静态平衡的系统，所有外力的作用，经过虚位移，所作的虚功，总和等于零。虚位移指的是给定的瞬时和位形上，虚位移是符合约束条件的无穷小位移。设第 i 个质点的主动力由 \mathbf{F}_i 表示，在给定的状态下，第 i 个质

点的虚位移可由 $\delta \mathbf{r}_i$ 来表示, 则虚功原理可表示为:

$$\sum_{i=1}^N A = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_i \delta \mathbf{r}_i = 0 \quad (3-26)$$

上式为质点系的虚功原理方程, 由于机器人系统可以简化看作一个刚体系统, 刚体系统的虚功原理方程可以表示为:

$$\sum_{i=1}^N [(m_i \ddot{\mathbf{x}}_i - \mathbf{F}_i) \cdot \delta \mathbf{x}_i + (I_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times I_i \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{T}_i) \cdot \delta \boldsymbol{\phi}_i] = 0 \quad (3-27)$$

式中 m_i ——第 i 个刚体的质量;

I_i ——第 i 个刚体的转动惯量;

$\ddot{\mathbf{x}}_i$ ——第 i 个刚体的质心加速度;

$\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ ——第 i 个刚体的角加速度;

$\boldsymbol{\omega}_i$ ——第 i 个刚体的角速度;

\mathbf{F}_i ——施加在第 i 个刚体上的外力;

\mathbf{T}_i ——施加在第 i 个刚体的外力矩;

\mathbf{x}_i ——虚位移;

$\boldsymbol{\phi}_i$ ——虚位移;

为了使用虚功原理进行计算, 需要做如下假设:

- 将机器人的所有部分都视为刚体, 即忽略各个部件的弹性形变;
- 忽略各个轴承与铰链的摩擦;
- 主动杆和被动杆的质量均匀分布。

将机器人关节电机旋转角度 q 设为广义变量, 通过机器人的雅可比矩阵可以将式3-27中的虚位移转化为用广义变量表示的形式, 可以得到3-28;

$$\sum_{i=1}^N [\delta \mathbf{q}^T \mathbf{J}_{v,i}^T (m_i \ddot{\mathbf{x}}_i - \mathbf{F}_i) + \delta \mathbf{q}^T \mathbf{J}_{\omega,i}^T (I_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times I_i \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{T}_i)] = 0 \quad (3-28)$$

式3-28对于任意的 \mathbf{q} 都是成立的, 则式3-28可以写成:

$$\sum_{i=1}^N [\mathbf{J}_{v,i}^T (m_i \ddot{\mathbf{x}}_i - \mathbf{F}_i) + \mathbf{J}_{\omega,i}^T (I_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times I_i \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{T}_i)] = 0 \quad (3-29)$$

其中外部施加的力矩 \mathbf{T}_i 可以表示为电机驱动力矩 $\boldsymbol{\tau}$ 以及外部力矩, 根据上式 $\boldsymbol{\tau}$ 可以表示为:

$$\boldsymbol{\tau} = \sum_{i=1}^N [\mathbf{J}_{v,i}^T (m_i \ddot{\mathbf{x}}_i - \mathbf{F}_i) + \mathbf{J}_{\omega,i}^T (I_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times I_i \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{T}_i)] = 0 \quad (3-30)$$

3.4.2 Delta 机器人动力学模型

Delta 机器人的动力学模型可以写成全部用在电机空间中的力矩所表现的形式:

$$\tau_{\text{plat}} + \sum_{i=1}^3 \tau_{\text{act},i} + \sum_{i=1}^3 \tau_{\text{pass},i} = 0 \quad (3-31)$$

其中, τ_{plat} 代表动平台的贡献, $\tau_{\text{act},i}$ 代表每根主动杆的贡献, $\tau_{\text{pass},i}$ 代表每根被动杆的贡献。

由于 Delta 机器人的特性, 动平台只有平动而没有转动, 可以得到动平台的贡献为:

$$\tau_{\text{plat}} = \mathbf{J}^T m_{\text{plat}} (\ddot{\mathbf{X}}_n - \mathbf{G}_{\text{plat}}) \quad (3-32)$$

其中, $\mathbf{G}_{\text{plat}} = [0 \ 0 \ g]^T$, g 为重力加速度。

对于三个主动杆来说, 其运动只有转动没有平动, 其贡献可以表示为:

$$\tau_{\text{act}} = \mathbf{I}_b \ddot{\mathbf{q}} - \mathbf{G}_{\text{act}} - \tau \quad (3-33)$$

其中, τ 为电机驱动力矩, \mathbf{G}_{act} 可以由下式得到:

$$\mathbf{G}_{\text{act}} = L_1 \left(\frac{1}{2} m_{\text{act}} + m_c \right) g [\cos q_1 \quad \cos q_2 \quad \cos q_3] \quad (3-34)$$

每个从动臂的贡献可以由式3-30得到:

$$\tau_{\text{pass},i} = m_{\text{pass}} \mathbf{J}_{2iv} \mathbf{J} \dot{\mathbf{v}}_p + \mathbf{J}_{2i\omega} \mathbf{J} (\mathbf{I}_{\text{pass}} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{2i} + \boldsymbol{\omega}_{2i} \times \mathbf{I}_{\text{pass}} \boldsymbol{\omega}_{2i}) \quad (3-35)$$

最后可以得到 Delta 机器人的动力学方程为:

$$\tau = \mathbf{I}_b \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}^T m_{\text{plat}} \ddot{\mathbf{v}}_p - \mathbf{G}_{\text{act}} - \mathbf{J}^T \mathbf{G}_{\text{plat}} + \sum_{i=1}^3 \tau_{\text{pass},i} \quad (3-36)$$

3.5 Delta 机器人动力学模型验证

为了验证本章动力学模型的正确性, 在 MATLAB 中编写程序按照关节空间规划的运动算出机器人末端的运动信息, 然后带入动力学方程计算输出的力矩大小, 同时在 ADAMS 中定义驱动关节的 Motion 使其按照同样的关节空间规划来运动, 然后通过比较两者的输出结果来验证所建立的动力学模型是否正确。结果如图3-3所示。关节空间的规划如下式所示:

$$\begin{cases} \varphi_2 = 0.0014t^5 - 0.4973t^4 - 0.0998t^3 + 3.7653t^2 \\ \varphi_2 = 0.7653t^5 - 0.2154t^4 - 0.5876t^3 + 2.5t^2 \\ \varphi_3 = 0.2095t^5 + 0.1114t^4 - 4.216t^3 + 2.78t^2 \end{cases} \quad (3-37)$$

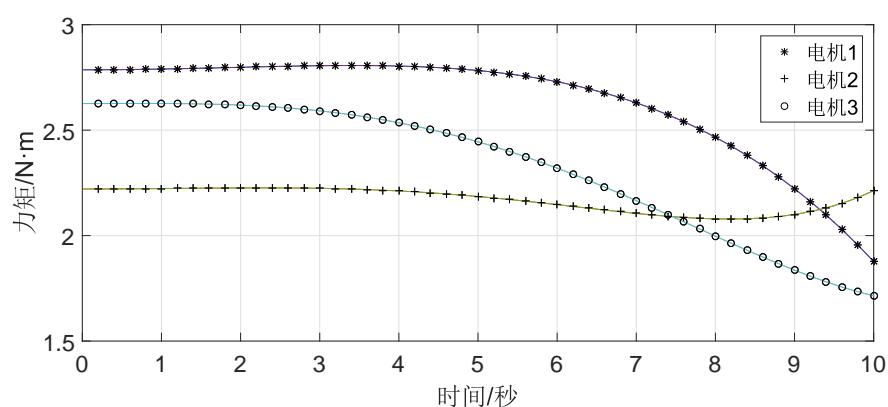


图 3-3 Delta 机器人动力学仿真结果

3.6 本章小结

本章针对 Delta 机器人的结构特点，首先将 Delta 机器人拆分成三条支链进行分析，利用向量的方法求出了 Delta 机器人的雅克比矩阵，紧接着对于一条支链内部各个杆件的速度、加速度、角速度、角加速度进行了分析，最后通过虚功原理对于 Delta 机器人的动力学模型进行了建模，并通过 MATLAB 与 ADAMS 的输出结果进行了验证。

第4章 Delta 机器人的力控制策略研究

4.1 引言

在主从式机器人系统中，机器人从臂跟随机器人的主臂进行运动。一般情况下，主臂负责与人进行交互。主臂在人的操作下进行运动，同时将运动信息发送给从端，从端跟随主端进行运动。同时从端将力信息反馈给主端，主臂给操作者一个力的反馈。对于主从式机器人的主臂来说，精确的力输出成为一项必不可少的条件。而机器人主手的力反馈可以通过机器人的力控制策略来实现。本章主要研究机器人的力控制策略，通过对阻抗控制与自适应阻抗控制的研究来实现机器人的力控制。

4.2 基本阻抗控制策略

阻抗控制由 Neville Hogan 于 1985 年提出，其中心思想为机器人在进行位置控制的同时还需要进行机器人自身阻抗特性的规划。机器人本身是一个实际的物理系统，而对于一个实际的物理系统来说，其本身的物理特性可以等效为质量块、阻尼以及弹簧组合而成的系统。这三个组成部分分别代表了系统的惯性、阻尼以及刚度特性，描述了关于刚体动力学的基本性质。阻抗控制类比了电路系统中电压与电流的关系，在电路系统中，在系统两端加一个输入电压，则系统会产生一个电流。电压与电流的比值被称为阻抗。同样的，在实际的机械系统中，给系统一个输入力，则系统会产生相应的运动。与电路系统相对应，系统的输出力可以类比为电压，运动可以类比为电流，则机械系统可以类比为阻抗。可以看出，对于实际的机械系统来说，其力与位置的动态关系可以通过其阻抗来转换。阻抗控制通过调整力与运动的动态关系来实现机器人在末端精确的力输出。也就是说，通过控制方法对机器人系统的阻抗进行调整，从而达到使机器人末端输出力的目的。对于基于位置的阻抗控制来说，其力与运动之间的阻抗关系可以表示为：

$$F(s) = Z(s)(X(s) - X_r(s)) \quad (4-1)$$

其中 $F(s)$ 为机器人末端与环境的接触力， $Z(s)$ 为期望的阻抗模型， $X(s)$ 为机器人末端的实际位置， $X_r(s)$ 为机器人的末端的期望位置。这样可以将机器人末端的位置控制与力控制纳入同一个框架中，同时对机器人末端的力与位置进行控制。

一个单自由度系统的阻抗模型可以通过质量块-阻尼-弹簧组成的系统来表示。系统的加速度、速度以及位置发生变化同时也会产生相对应的力。对于一个由质量块-阻尼-弹簧组成的系统来说，其动力学可以表示为：

$$f - c\dot{x} - kx = m\ddot{x}$$

其中 F 为接触力， c 为阻尼系数， k 为刚度系数。

整理并通过拉普拉斯变换转化到频域可得：

$$f(s) = (ms^2 + cs + k)x(s)$$

由此可以得到对于质量块-阻尼-弹簧系统来说，其力与位移之间的关系也就是阻抗可以表示为：

$$\frac{f(s)}{x(s)} = ms^2 + cs + k \quad (4-2)$$

同样对于一个单自由度机械系统来说，其阻抗可以用这样一个二阶的模型来表示。

对于阻抗控制来说，阻抗代表的是机器人末端接触力与期望轨迹与实际轨迹之间差之间的关系，其最普遍的形式由三种，数学表达式可以写为：

$$\begin{cases} M_d\ddot{\mathbf{X}} + B_d\dot{\mathbf{X}} + K_d(\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) = -\mathbf{F}_c \\ M_d\ddot{\mathbf{X}} + B_d(\dot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{X}}_r) + K_d(\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) = -\mathbf{F}_c \\ M_d(\ddot{\mathbf{X}} - \ddot{\mathbf{X}}_r) + B_d(\dot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{X}}_r) + K_d(\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) = -\mathbf{F}_c \end{cases} \quad (4-3)$$

其中， M_d ， K_d ， B_d 分别代表期望阻抗模型的惯性矩阵、刚度矩阵以及阻尼矩阵。 $\ddot{\mathbf{X}}$ ， $\dot{\mathbf{X}}$ ， \mathbf{X} 分别代表机器人的末端加速度、末端速度以及末端位置向量。 $\ddot{\mathbf{X}}_r$ ， $\dot{\mathbf{X}}_r$ ， \mathbf{X}_r 分别代表机器人末端的期望加速度、期望速度以及期望位置。 \mathbf{F}_c 代表机器人末端位置与环境的接触力。对于式4-3中的三个式子来说，其代表了三种不同情况的阻抗。第一个式子代表的是只考虑期望位置与实际位置的偏差的阻抗模型，相当于一个弹簧系统。第二个式子代表考虑了位置、速度偏差的阻抗模型相当于阻尼-弹簧系统。第三个式子考虑了位置、速度、加速度偏差，相当于质量块-阻尼-弹簧系统。

对于式4-3来说，由于没有参考力信号的输入，可以看作系统用运动来补偿了接触力，亦可以看作对外界环境的柔顺。为了实现对力的跟踪，可以引入一个力参考信号，并将其与机器人末端接触力作差，可以得到力误差信号 $\mathbf{F}_e = \mathbf{F}_r - \mathbf{F}_c$ 。将力误差信号取代接触力信号引入式4-3中，则新的阻抗模型可以表示为：

$$\begin{cases} M_d\ddot{\mathbf{X}} + B_d\dot{\mathbf{X}} + K_d(\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) = -\mathbf{F}_e \\ M_d\ddot{\mathbf{X}} + B_d(\dot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{X}}_r) + K_d(\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) = -\mathbf{F}_e \\ M_d(\ddot{\mathbf{X}} - \ddot{\mathbf{X}}_r) + B_d(\dot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{X}}_r) + K_d(\mathbf{X} - \mathbf{X}_r) = -\mathbf{F}_e \end{cases} \quad (4-4)$$

式4-4通过引入力误差，为力信号的跟踪打下了理论基础。在阻抗控制中，一般情况下与期望阻抗有关的三个矩阵 \mathbf{M}_d 、 \mathbf{K}_d 、 \mathbf{B}_d 都被设为对角矩阵，也就是说对于期望阻抗模型来说，其在各个自由度上是解耦的。这样对于机器人这样的复杂多自由度系统来说，可以降低到单个自由度来讨论其阻抗。只考虑一个自由度的情况，式4-4中的矩阵与向量都变为标量。考虑式4-4中第三个式子的情况，在单自由度的情况下，其表达式为：

$$m_d(\ddot{x} - \ddot{x}_r) + b_d(\dot{x} - \dot{x}_r) + k_d(x - x_r) = f_r \quad (4-5)$$

当机器人在空间自由运动时，也就是机器人末端与环境没有接触时，此时接触力 $f_c = 0$ ，此时由于没有接触，力控制没有意义，则 $f_r = 0$ 有

$$m_d(\ddot{x} - \ddot{x}_d) + b_d(\dot{x} - \dot{x}_d) + k_d(x - x_d) = 0$$

机器人为单纯的位置控制。当机器人与环境发生接触时，与环境发生了相互作用。此时，不能再将机器人本身看作一个独立的系统，而是应该将机器人与机器人末端所接触的环境一同纳入考虑的范围。对于环境来说，一般可以看作一个弹簧与阻尼构成的系统，系统结构的示意图如图4-1所示：

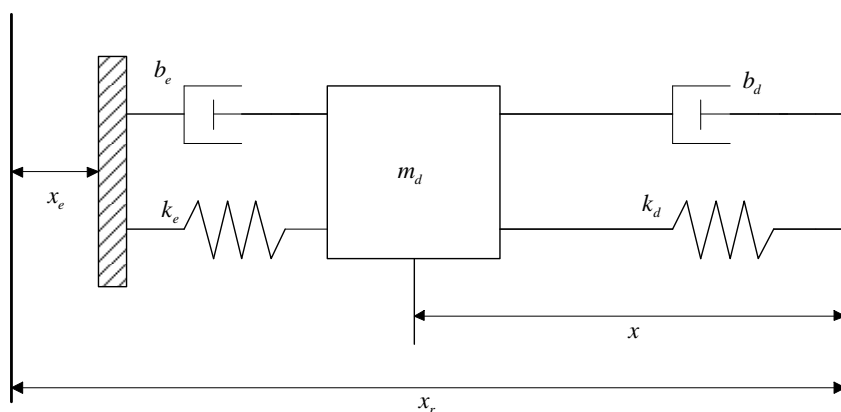


图 4-1 阻抗模型与环境接触示意图

4.2.1 基于位置的阻抗控制策略

在阻抗控制中，系统通过运动的变化来实现接触力的控制。对于式4-4的第三式，令 $\mathbf{X}_f = \mathbf{X} - \mathbf{X}_r$ ，则第三式可以写为：

$$\mathbf{M}_d \ddot{\mathbf{X}}_f + \mathbf{B}_d \dot{\mathbf{X}}_f + \mathbf{K}_d \mathbf{X}_f = -\mathbf{F}_e \quad (4-6)$$

对于基于位置的阻抗控制来说，其主要由两部分组成。一部分是负责运动控制的内环，一般由 PID 控制实现，另一部分是负责力控制的外环。机器人末端安装的力传

传感器采集末端的接触力信息，然后通过阻抗模型将力信息转化为末端的位置修正量 \mathbf{X}_f ，与参考位置信号 \mathbf{X}_r 一起作为运动控制内环的输入。内环控制电机进行运动，从而使机器人末端可以输出力。将式4-6作拉普拉斯变换可得到其频域表达式：

$$\mathbf{X}_f(s) = \frac{-\mathbf{F}_e(s)}{\mathbf{M}_d s^2 + \mathbf{B}_d s + \mathbf{K}_d} \quad (4-7)$$

则阻抗控制外环可由式4-7得到，如图4-2所示。

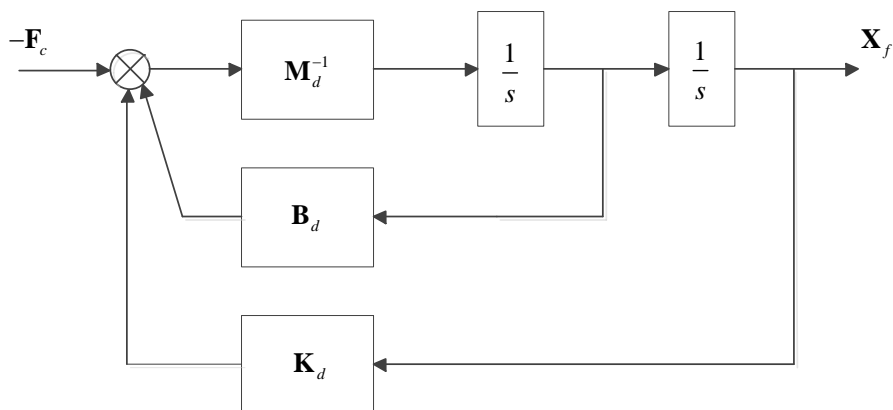


图 4-2 基于位置的阻抗控制外环示意图

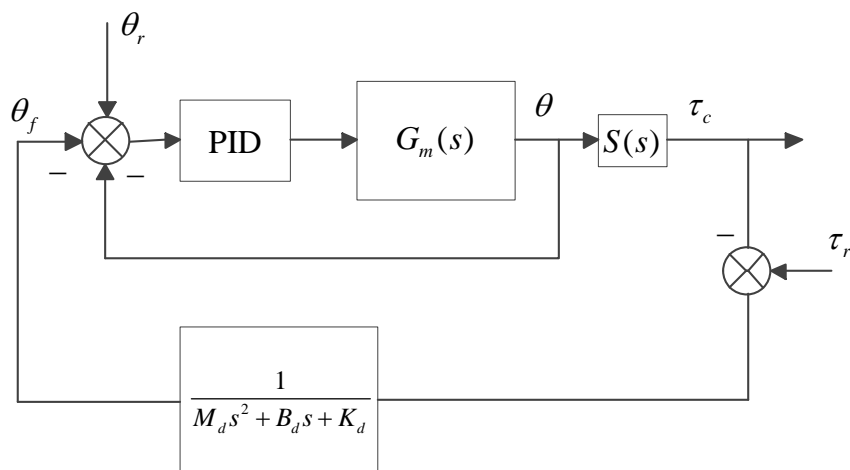


图 4-3 基于位置的阻抗控制单自由度示意图

如图所示，当 $F_c = 0$ 时，由于阻尼 B_d 的存在，位置修正量 X_f 在一段时间后会为 0，这样阻抗控制外环不再起作用，机器人变为位置控制模式。这充分说明了基于位置的阻抗控制将力控制与位置控制纳入了一个框架之中。为了实现力跟踪，基于上述的阻抗控制加入力参考信号 F_r 可以得到单自由度的基于位置的阻抗

控制，由图4-3所示。

图中为了表示方便，其中将力传感器检测的力与单个关节受到的力矩之间的转换关系用 $S(s)$ 表示，对于机器人末端产生的期望力矩分摊到每个关节上的力矩用 τ_r 表示。将期望力矩与接触力转换到单个电机的力矩作差在通过阻抗模型转换为电机旋转的角度量，就实现了单自由度的阻抗控制。

在对单自由度进行分析的基础上，继续分析多自由度机器人的阻抗控制。机器人末端的接触力通过力传感器采回后，通过期望阻抗模型转化为机器人末端在其笛卡尔坐标系下的位置修正量。此时的位置修正量并不能直接用来对电机进行控制，需要将其转换到关节空间中。这个过程可以通过机器人的运动学逆解实现。多自由度机器人的基于位置的阻抗控制框图如图4-4所示。

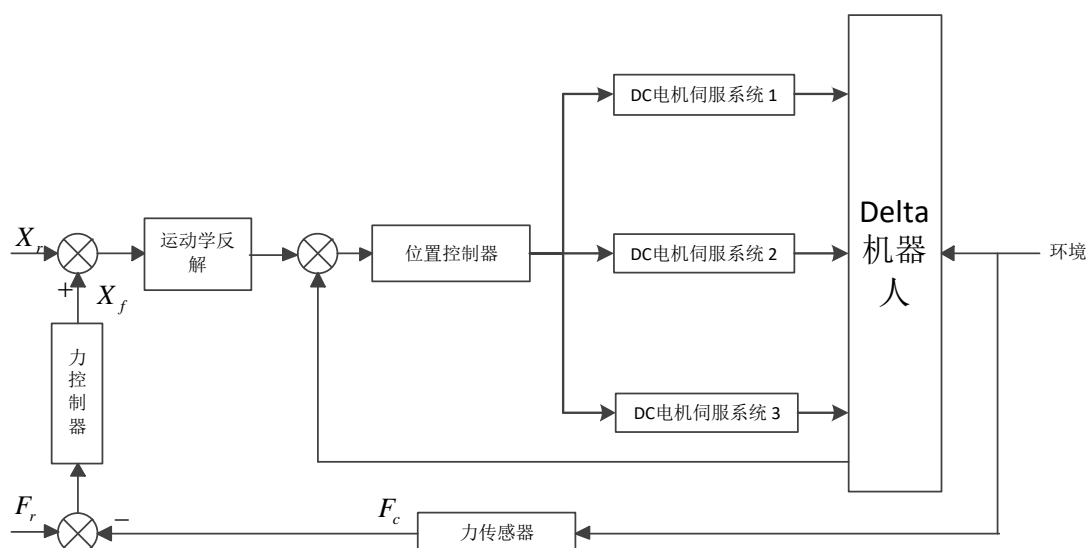


图 4-4 机器人基于位置的阻抗控制示意图

4.2.2 期望阻抗参数对控制系统性能影响的分析

基于位置的阻抗控制通过期望阻抗模型，实现力与运动的相互转化。也就是说期望阻抗模型的参数的选择对于阻抗控制来说至关重要。其中 m_d 为期望惯性，主要与系统的质量有关，在机器人运动加速度比较大的情况下或者系统遭受冲击时期望惯性的影响会比较明显。 b_d 为期望阻尼，对于机器人运行速度较大时的影响比较明显。 k_d 为期望刚度，刚度越大系统会表现出更强的类似弹簧的特性。阻抗模型可以用一个二阶系统来表示：

$$Z(s) = \frac{1}{m_d s^2 + b_d s + k_d} \quad (4-8)$$

写成常用的阻尼与固有频率的二阶系统形式有：

$$Z(s) = \frac{\frac{1}{m_d}}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4-9)$$

其中， $\xi = \frac{b_d}{2\sqrt{k_d m_d}}$ 为阻抗模型的阻尼比，由此可以看出，在适当的范围内，阻抗模型 b_d 越大，则系统的阻尼越大，系统越不容易震荡，越容易达到稳态。 $\omega_n = \sqrt{\frac{k_d}{m_d}}$ 代表期望阻抗模型的固有频率，有刚体系统的动力学可知，在频域内，系统对信号的响应会在大于固有频率的频段内快速衰减。可以看出，期望阻抗模型的固有频率与期望刚度成正相关，与期望惯性成反相关。可以看出，期望刚度与期望惯性参数的选取同样会影响系统的带宽。

考虑机器人的工作环境与工作目标，可以对期望阻抗模型参数的选择提供一些参考。比如机器人执行的任务为抛光打磨操作，要求系统不能有震荡且系统的刚度不能太大。此时应选取小一些的期望刚度来保证系统的刚度不至于对被打磨的工件造成影响，同时选取较大一些的期望阻尼参数来消除系统的震荡。对于主从式机器人的主操作手来说，由于要与操作者进行交互，希望对力信号进行快速的响应，则期望阻抗模型的期望惯性参数不能太大，而一定程度范围内的震荡只允许存在的。可以选取大一些的期望惯性参数与小一些的期望阻尼参数，这样虽然降低了系统的阻尼增加了系统的震荡，但是使系统对力信号的响应加快了。

4.3 阻抗控制仿真实验研究

前文对于基于位置的阻抗控制中期望阻抗参数的选取进行了定性的分析。对于期望阻抗参数的选取来说，应该在保证力控制外环以及整个系统的稳定性的情况下，兼顾系统的性能以及完成机器人目标任务所需要的要求来进行期望阻抗参数的选取。本文根据前文建立的机器人模型，利用基于位置的阻抗控制搭建 SIMULINK 仿真模型，针对不同的期望条件进行仿真实验，以期待能够对于期望阻抗参数对于机器人系统控制性能的影响有一定程度的探究。在机器人末端与环境接触的过程中，机器人与环境之间相互作用，产生相互作用力。机器人的动态特性可以利用阻抗控制调节期望阻抗参数来进行改变，但是环境的动态特性很难去改变。环境与机器人末端由于相互作用而产生的动态变化信息很难获取，只有位置变化可以通过机器人末端的运动信息得到，而环境的速度信息与加速度信息是很难得到的。对于刚度较大的环境来说，最重要的信息还是位置的变化情况。在仿真的过程中，结合实际情况的分析，假设机器人末端与环境之间的相互作用力只与刚度以及位置变化有关，进行关于 y 方向的仿真。

对于阻抗控制来说，在机器人末端与环境没有接触的时候，参考力信号相当于是驱动信号使机器人末端向环境进行运动。对于基于位置的阻抗控制来说，需要研究的重点是在机器人末端与环境接触以后的情况。由于阻抗控制是一种将力控制与位置控制纳入一个体系的控制方法，在机器人末端与环境接触后，机器人的力输出效果与位置输出都应该能满足要求。本文针对不同的输入信号进行了仿真实验研究。仿真实验以机器人末端的 y 轴为例，环境位置设置于 $y = 0.05m$ 处，微分方程的求解采用四阶龙格库塔方法。当输入信号为阶跃信号时，基于位置的阻抗控制力响应曲线与位置响应曲线如图4-5所示。力误差曲线与位置误差曲线如图4-6所示。可以看出，阻抗控制可以很好地实现对于阶跃信号的跟踪。在 $t = 1.3s$ 时基本上实现了对于位置的跟踪。在力响应曲线中，可以看出在最开始的一段时间内，力响应的输出为 0。这是因为机器人末端设置的初始位置为 0，而环境的初始设置为 $y = 0.05$ ，在于环境接触以前不会产生接触力，所以力响应输出为 0。可以看出阻抗控制对于力与位置都能进行很好的跟踪。

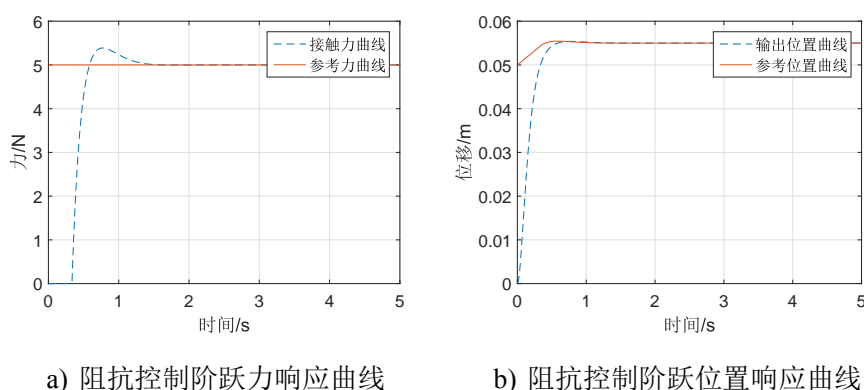


图 4-5 阻抗控制力与位置阶跃响应曲线

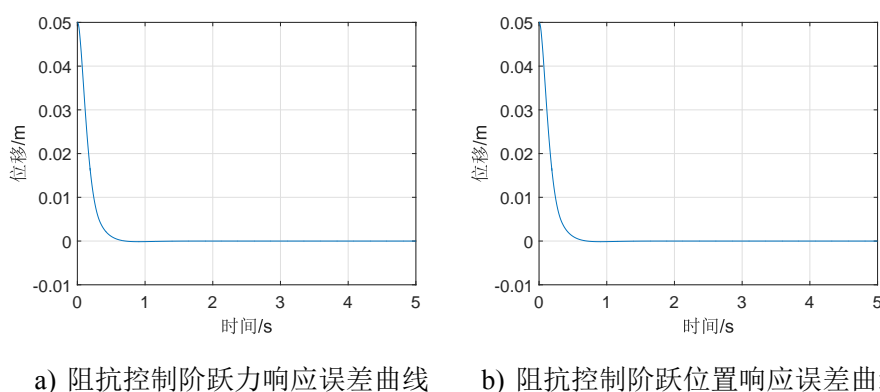


图 4-6 阻抗控制力与位置阶跃信号跟踪误差曲线

在实际情况中，有可能会出现输入参考力会不断加大的情况，所以本文加入

了对于斜坡信号的仿真。对于当输入信号为斜坡信号时，阻抗控制力响应曲线与位置响应曲线如图4-7所示。力误差曲线与位置误差曲线如图4-8所示。从阻抗控制斜坡信号响应的仿真结果可以看出，阻抗控制可以实现对参考力信号的跟踪，在 $t = 1.3s$ 时基本实现了对于输入信号的跟踪，但是存在一定的稳态误差。并且在最开始的阶段存在一定的超调。内环的位置控制可以很好的对输入信号进行跟踪，可以看出，由于跟踪的是斜坡信号，位置参考输入信号也基本上可以看作斜坡输入信号。在 $t = 0.4s$ 时基本上实现了对于位置输入信号的跟踪。从图4-8 a)可以看出，力跟踪响应的稳态误差为 $0.06N$ 。

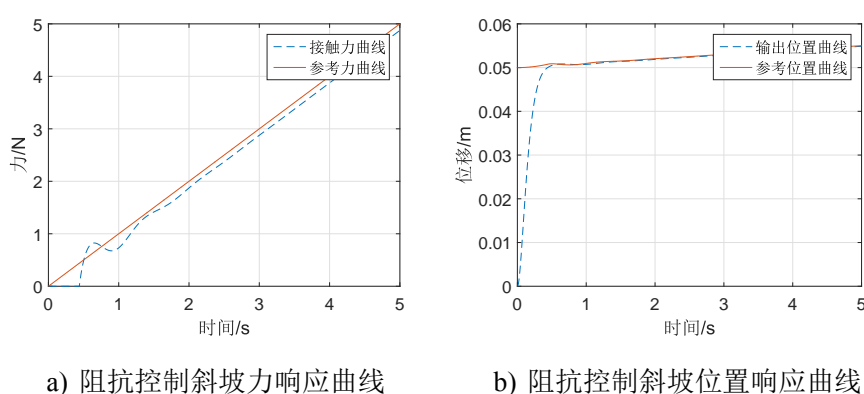


图 4-7 阻抗控制力与位置斜坡响应曲线

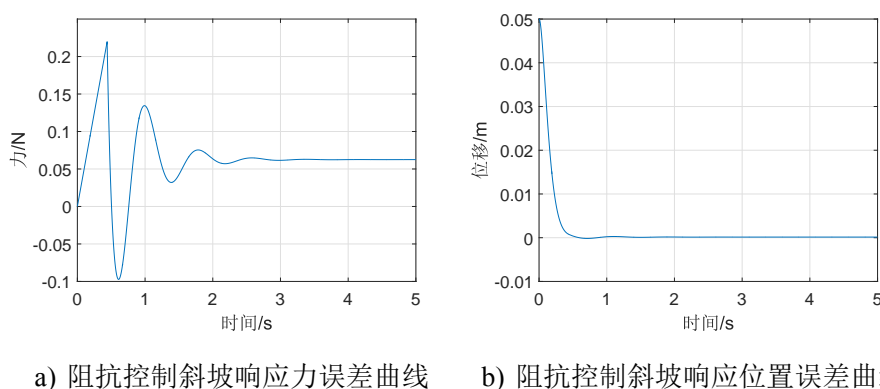
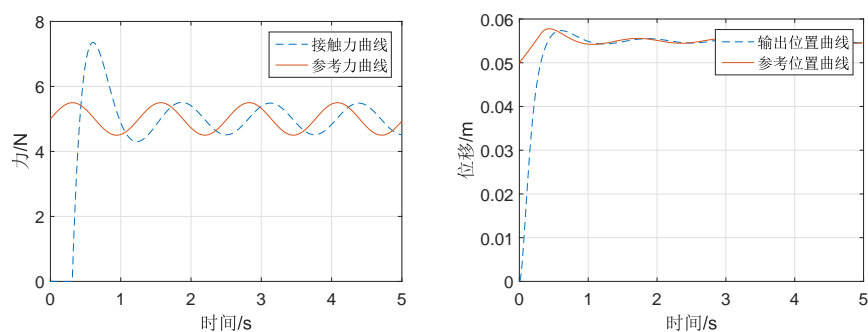


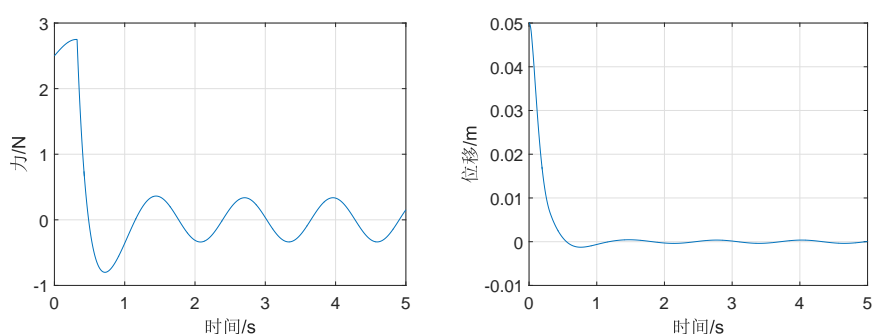
图 4-8 阻抗控制力与位置斜坡信号跟踪误差曲线

考虑到在实际机器人与环境接触的过程中，输入信号可能也会存在一些微小的变化，针对这种情况，本文又对小幅值的正弦信号进行了仿真。输入的参考信号为在 $5N$ 附近震荡的幅值为 $0.5N$ 的正弦信号。通过对于正弦信号的仿真可以看出，阻抗控制对于正弦信号的跟踪出现了很大的超调量而且出现了一定的滞后现象。可见阻抗控制对于力的动态跟踪性能较差。对于内环的位置控制来说，跟踪效果基本可以接受，在 $t = 0.45s$ 时实现了对系统的跟踪。



a) 阻抗控制正弦信号力响应曲线 b) 阻抗控制正弦信号位置响应曲线

图 4-9 阻抗控制力与位置正弦信号响应曲线

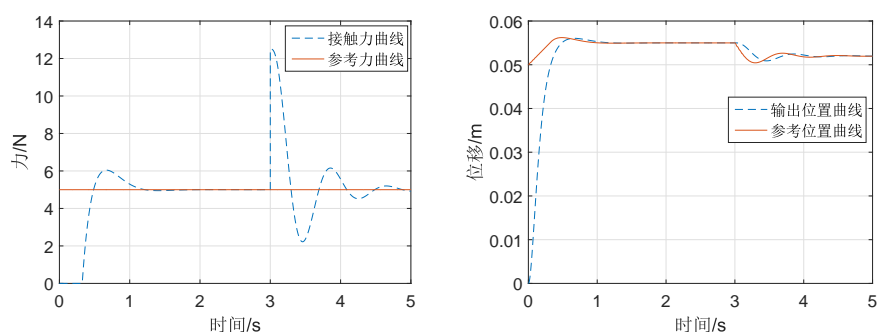


a) 阻抗控制正弦信号响应力误差曲线 b) 阻抗控制正弦信号响应位置误差曲线

图 4-10 阻抗控制力与位置正弦信号跟踪误差曲线

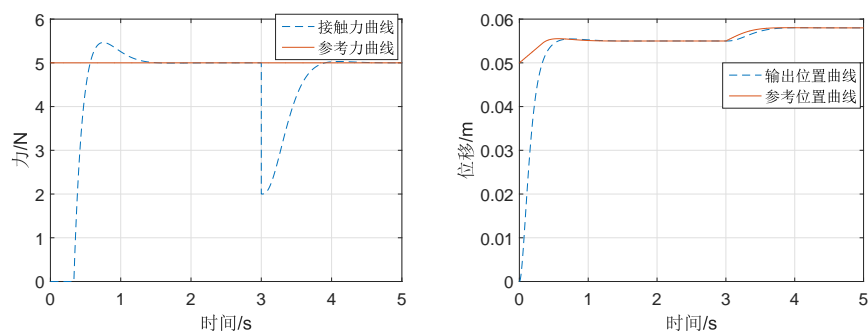
针对在实际过程中可能出现的环境的刚度发生突变的情况,本文进行了仿真实验,仿真结果如图4-10所示。环境刚度由偏柔性突变到偏刚性,具体数值由 1000N/m 突变到 2500N/m 。在仿真实验中,设置当 $t = 2\text{s}$ 时刚度发生突变。通过力响应曲线可以看出,本来在 $t = 1\text{s}$ 时力响应曲线已经稳定。在 $t = 2\text{s}$ 时由于刚度发生了突变,力响应曲线产生了巨大的跳变。通过位置响应曲线可以看出,稳态值发生了变化。由于环境刚度变大,环境产生的形变变小。除了环境的刚度发生变化,在实际的过程中,环境的位置也不是准确的,而且可能会发生变化。本文针对环境位置不准确以及环境位置可能发生变化的情况进行了仿真实验,如图4-12。在仿真中,环境位置在 $t = 2\text{s}$ 时发生了突变,环境位置由 $y = 0.05\text{m}$ 变化到了 $y = 0.053\text{m}$ 。由仿真结果可以看出,环境位置的变化会给力输出响应带来很大的突变。

通过以上仿真实验可以看出,基于位置的阻抗控制方法可以基本实现对力的控制,对于阶跃信号有不错的跟踪效果,能在较短的时间内跟踪上阶跃信号且很快达到稳定,超调量也在可以接受的范围内,基本没有稳态误差。在跟踪斜坡信号时也能较好地实现跟踪,阻抗控制系统可以很快地实现对斜坡信号的跟踪,存在一



a) 阻抗控制环境刚度突变力响应曲线 b) 阻抗控制环境刚度突变位置响应曲线

图 4-11 阻抗控制力与位置环境刚度突变响应曲线



a) 阻抗控制环境位置突变力响应曲线 b) 阻抗控制环境位置突变位置响应曲线

图 4-12 阻抗控制力与位置环境位置突变响应曲线

定的稳态误差但是稳态误差在可以接受的范围内。但是通过阻抗控制系统对于正弦信号的跟踪结果可以看出，阻抗控制对于动态信号的跟踪效果不好，开始时超调量较大，在跟踪达到稳态后，存在较大的滞后，基本上无法实现对正弦信号的跟踪。接下来，通过环境变化的仿真实验可以看出，基于位置的阻抗控制对于环境的参数变化敏感，当环境的参数发生变化时，力跟踪信号会发生很大的跳变，这样在环境会发生变化的情况下，基于位置的阻抗控制就会出现很大的局限性。将基于位置的阻抗控制与其他先进的控制算法相结合，才能在环境参数发生变化时，取得更好的跟踪效果。

4.4 自适应阻抗控制

考虑 n 个自由度的机器人的动力学模型的统一形式可以写为：

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) + \tau_f(\dot{q}) = \tau - \tau_e \quad (4-10)$$

式中 q, \dot{q}, \ddot{q} ——关节角度、角速度、角加速度向量；

$D(q)$ ——机器人的惯性矩阵；

$C(q, \dot{q})\dot{q}$ ——代表科里奥利力与离心力的 $n \times 1$ 维向量；

$g(q)$ ——代表重力的 $n \times 1$ 维向量；

$\tau_f(\dot{q})$ ——代表关节摩擦力的 $n \times 1$ 维向量；

τ ——代表关节驱动力的 $n \times 1$ 维向量；

τ_e ——代表关节干扰力矩的 $n \times 1$ 维向量；

为了简化计算，将机器人的科里奥利力与重力向量用一个新量 $h(q, \dot{q})$ 表示，即：

$$h(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q)$$

则式4-10可以表示为

$$D(q)\ddot{q} + C(q, h(q, \dot{q})) + \tau_f(\dot{q}) = \tau - \tau_e \quad (4-11)$$

将上式从关节空间转换到机器人末端的笛卡尔空间可得：

$$D^* \ddot{X} + h^* + F_f^* = F - F_e \quad (4-12)$$

其中， $D^* = J^{T-1} D J^{-1}$ ， $h^* = J^{T-1} - D^* \dot{J} J^{-1} \dot{X}$ ， $F_f^* = J^{T-1} \tau_f$ 。 J 为机器人的雅可比矩阵，是一个可逆的 $n \times n$ 方阵。

由于在机器人机械加工以及建模等过程中的误差，精确的 D, h, τ_f 不可能得到。在进行控制系统设计的时候，所使用的是名义系统模型。阻抗控制通过设置适当的阻抗参数，也就是期望惯性、期望阻尼以及期望刚度来实现机器人末端力与位置关系的调节。通过机器人的动力学模型，得到阻抗控制力的控制率，可以写为：

$$F = D^* V + h^* + F_e \quad (4-13)$$

上式中的输入 V 为：

$$V = \ddot{X}_r + M_d^{-1} [B_d(\dot{X}_r - \dot{X}) + K_d(X_r - X) - F_e] \quad (4-14)$$

在阻抗控制实际的使用过程中，还存在一个问题。由于环境的位置以及环境的精确刚度是未知的或者存在偏差，机器人末端的参考轨迹 X_r 在提前被设计好的情况下对于精确的力控制有一定的影响。

机器人末端在运动的过程中，可以将机器人的运动状态按照有没有与环境进行接触分为在自由空间内运动与在接触空间内运动。这样的话，机器人与环境接触变成了一个临界点。可以看出，对于阻抗控制来说，环境的位置也是十分重要的需要考虑的因素。将期望轨迹 X_r 用环境位置 X_e 代替，则位置偏差 $E = X_e - X$ ，则阻抗控制的表达式可以写为：

$$\mathbf{F}_r - \mathbf{F}_c = \mathbf{M}_d \ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{B}_d \dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}_d \mathbf{E} \quad (4-15)$$

由于三个期望矩阵都为对角矩阵，为了简化分析与运算，考虑单自由度的情况有：

$$m_d \ddot{e} + b_d \dot{e} + k_d e - f_c + f_r = 0 \quad (4-16)$$

在机器人末端与环境没有接触时，机器人在工作空间内可以看作自由运动，此时 $f_c = 0$ ，有：

$$m_d \ddot{e} + b_d \dot{e} + k_d e = -f_r \quad (4-17)$$

此时，由于没有接触，期望力 f_r 可以看作一种驱动力，其作用为使机器人末端向环境的方向运动，使机器人末端与环境发生接触。

在机器人末端与环境发生接触以后，此时 f_c 不再为 0。考虑式4-17，若期望刚度 $k_d = 0$ ，则不管环境怎样变化，不管环境在与机器人发生接触的过程中发生了多大的形变，只要期望速度与实际速度与期望加速度与实际加速度的偏差为 0，式4-17就可以达到 $f_c = f_r$ 的状态。这样阻抗控制对于环境的刚度不敏感，不管环境刚度 k_e 怎样变化，在理论上都可以达到力控制的目标。当机器人与环境发生接触后，式4-17变为：

$$m_d \ddot{e} + b_d \dot{e} - f_c = -f_r \quad (4-18)$$

假设环境给与机器人末端的反作用力只与环境的刚度有关的情况，则接触力可以表示为： $f_c = k_e(x - x_e) = -k_e e$ ，其中 k_e 为环境刚度。将接触力这样表示后，式4-18可以写为：

$$m_d \ddot{e} + b_d \dot{e} + k_e e = -f_r \quad (4-19)$$

尽管环境的刚度 k_e 是未知的，但是在一般情况下机器人是在一定的环境下进行工作的，可以根据机器人的工作环境有一个大概的估计同时选取适当的期望阻尼与期望惯性来得到好的控制效果。

在实际机器人的工作过程中，测量得到的环境位置并不是准确的，用 x'_e 来表示，真实的环境位置仍用 x_e 来表示。则环境位置的不确定性可以表示为：

$$\delta x_e = x'_e - x_e$$

则实际中的环境位置与机器人末端实际位置的差可以表示为：

$$e' = e + \delta x_e \quad (4-20)$$

将式4-17与4-19中的 e 用 e' 取代可得，当机器人末端在自由空间中运动时：

$$m_d \ddot{e}' + b_d \dot{e}' + k_d e' = -f_r \quad (4-21)$$

当机器人末端在接触空间运动时：

$$m_d \ddot{e}' + b_d \dot{e}' = f_c - f_r \quad (4-22)$$

经分析可以发现，若 $\delta e < 0$ ，代表估计的环境位置要比真实的环境位置更靠近机器人，机器人末端不一定会与环境发生接触。反过来讲，若 $\delta e > 0$ ，代表估计的环境位置要比真实得环境位置更远离机器人。此时若机器人末端运动在名义上的接触空间，则机器人一定与环境发生了接触。对于式4-22所示的控制律来说，若是环境为一平面，且期望力信号为一常量， x_e 为一常量， e' 同样也为一个常量。此时式4-22变为：

$$m_d \ddot{x} + b_d \dot{x} = f_c - f_r \quad (4-23)$$

可以看出，在环境为一平面的情况下，只要机器人末端的速度与加速度为 0，很容易达到力跟踪的状态。但是当期望力、环境位置发生变化时，则式4-22所示的控制律很容易出现力跟踪的稳态误差。例如当期望力信号 f_r 为一个斜坡信号时，会出现稳态误差。当期望力信号 f_r 为一个抛物线信号时，稳态误差会趋于无限大。鉴于在机器人的实际工作过程中，期望力的变化与环境的状态都是复杂的，上述控制律并不能很好的满足需求。本文采用了一种自适应方法来解决这一问题，自适应阻抗控制律可以写为：

$$m_d \ddot{e}' + b_d (\dot{e}' + \Omega) = f_c - f_r \quad (4-24)$$

上式中， Ω 根据力误差在线更新，其表达式为：

$$\Omega(t) = \Omega(t - \lambda) + \eta \frac{f_r(t - \lambda) - f_c(t - \lambda)}{b_d}, \eta > 0 \quad (4-25)$$

其中， η 为更新率， λ 为控制器的采样时间。

当新的自适应控制律应用到系统中以后，需要对系统的稳定性进行分析，看新的系统是否仍然是稳定的。将式4-25带入式4-24可得：

$$m_d \ddot{e}(t)' + b_d \dot{e}(t)' + k_e e(t) + b_d \Omega(t - \lambda) + \eta k_e e(t - \lambda) = -(f_r(t) + \eta f_r(t - \lambda)) \quad (4-26)$$

由接触力 $f_c = k_e(x - x_e)$ 可以得到：

$$x = x_e + \frac{f_c}{k_e} \quad \dot{x} = \dot{x}_e + \frac{\dot{f}_c}{k_e} \quad \ddot{x} = \ddot{x}_e + \frac{\ddot{f}_c}{k_e} \quad (4-27)$$

由上式可得， $e = x_e - x$ 可以表示为：

$$e = -\frac{f_c}{k_e} \quad \dot{e} = -\frac{\dot{f}_c}{k_e} \quad \ddot{e} = -\frac{\ddot{f}_c}{k_e} \quad (4-28)$$

上式表示的是真实的环境位置，含有不确定性的环境位置可以表示为：

$$e' = -\frac{f_c}{k_e} + \delta x_e \quad \dot{e}' = -\frac{\dot{f}_c}{k_e} + \delta \dot{x}_e \quad \ddot{e}' = -\frac{\ddot{f}_c}{k_e} + \delta \ddot{x}_e \quad (4-29)$$

将式4-28代入式4-26可得：

$$\begin{aligned} & m_d(\ddot{f}_r - \ddot{f}_c) + b_d(\dot{f}_r - \dot{f}_c) + k_e(f_r - f_c) + k_e\Omega(t - \lambda) \\ & = m_d\ddot{f}_r + b_d\dot{f}_r - m_dk_e\delta\ddot{x}_e - b_dk_e\delta\dot{x}_e - \eta k_e(f_r(t - \lambda) - f_c(t - \lambda)) \end{aligned} \quad (4-30)$$

令期望力与接触力的差为力误差，表示为：

$$\epsilon(t) = f_r(t) - f_c(t)$$

将其代入式4-30，则式4-30可以写为：

$$\begin{aligned} & m_d\ddot{\epsilon}(t) + b_d\dot{\epsilon}(t) + k_e(\epsilon(t) + b_d\Omega(t - \lambda) + \eta\epsilon(t - \lambda)) \\ & = m_d\ddot{f}_d + b_d\dot{f}_d - m_dk_e\delta\ddot{x}_e - b_dk_e\delta\dot{x}_e \end{aligned} \quad (4-31)$$

由式4-25可得 $b_d\Omega(t - \lambda)$ 可以写为：

$$b_d\Omega(t - \lambda) = b_d\Omega(t - (k - 1)\lambda) + \eta\epsilon(t - (k - 2)\lambda) + \dots + \eta\epsilon(t - 2\lambda) \quad (4-32)$$

假设 Ω 的初始值为 0，则上式中的 $\Omega(t - (k - 1)\lambda) = 0$ ，则式4-31可以写为：

$$\begin{aligned} & m_d\ddot{\epsilon} + b_d\dot{\epsilon} + k_e\epsilon + \eta k_e(\epsilon(t - (k - 2)\lambda) + \dots + \epsilon(t - \lambda)) \\ & = m_d\ddot{f}_d + b_d\dot{f}_d - m_dk_e\delta\ddot{x}_e - b_dk_e\delta\dot{x}_e \end{aligned} \quad (4-33)$$

令由于环境位置不确定性造成的接触力为：

$$\bar{a} = \bar{f}_e = k_e\delta x_e$$

则式4-33可以写为：

$$\begin{aligned} & m_d\ddot{\epsilon} + b_d\dot{\epsilon} + k_e\epsilon + \eta k_e(\epsilon(t - (k - 2)\lambda) + \dots + \epsilon(t - \lambda)) \\ & = m_d\ddot{\epsilon} + b_d\dot{\epsilon} \end{aligned} \quad (4-34)$$

其中， $\epsilon = f_d - \bar{f}_e$ 。

将式4-34作拉普拉斯变换可得关于 $\frac{\epsilon(s)}{\epsilon(s)}$ 的传递函数为：

$$\frac{\epsilon(s)}{\epsilon(s)} = \frac{m_d s^2 + b_d s}{m_d s^2 + b_d s + k_e + k_e \eta (e^{-(k-2)\lambda s} + \dots + e^{-\lambda s})} \quad (4-35)$$

当算法中含有时延 λ 时，系统的稳定性可以由式4-36所示的特征方程确定：

$$m_d s^2 + b_d s + k_e + k_e \eta (e^{-(k-2)\lambda s} + \dots + e^{-\lambda s}) = 0 \quad (4-36)$$

由于系统的采样频率很大，在不长的一段时间内，式4-36中的 k 就会达到一个很大的值。此时，若当 $0 < \lambda < 1$ 时， $|e^{-\lambda s}| \neq 1$ ，则式4-36中的表达式中的级数可以写为：

$$\sum_{k=1}^{\infty} e^{-k\lambda s} = \frac{1}{1 - e^{-\lambda s}} - 1 \quad (4-37)$$

将式4-37代入式4-36可得：

$$m_d s^2 + b_d s + k_e + k_e \eta \left(\frac{e^{-\lambda s}}{1 - e^{-\lambda s}} \right) = 0 \quad (4-38)$$

在系统的采样频率足够高的情况下，采样时间 λ 的值很小，远小于 1。在这种情况下，可以对上式进行一些近似简化处理。由 $e^{-\lambda s}$ 的泰勒展开可以得到， $e^{-\lambda s}$ 可以近似为由 $e^{-\lambda s} = 1 - \lambda s$ 。经过这样的简化以后，式4-38可以写为：

$$\lambda m_d s^3 + \lambda b_d s^2 + k_e \lambda (1 - \eta) s + k_e \eta = 0 \quad (4-39)$$

对于式4-39，用劳斯-赫尔维茨判据来判断稳定性可得：

$$\begin{array}{ccc} s^3 & \lambda m_d & k_e \lambda (1 - \eta) \\ s^2 & \lambda b_d & k_e \eta \\ s^1 & c_1 & 0 \\ s^0 & c_2 & 0 \end{array} \quad (4-40)$$

由此可以得到在 $m_d, b_d, \lambda > 0$ 的前提下，系统稳定的条件为：

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{b_d k_e \lambda^2 (1 - \eta) - \lambda \eta m_d k_e}{b_d \lambda} > 0 \\ c_0 &= \eta k_e > 0 \end{aligned} \quad (4-41)$$

为了使系统稳定，更新率 η 应该满足条件：

$$0 < \eta < \frac{b_d \lambda}{b_d \lambda + m_d} \quad (4-42)$$

在给出了机器人笛卡尔空间的自适应阻抗控制率以后，将其表示为电机关节空间控制律的表达形式，方便对机器人的电机进行控制。由式4-10机器人的动力学方程可以写为：

$$D(q)\ddot{q}(t) + \bar{h}(t) = \tau(t) \quad (4-43)$$

其中， $\bar{h}(t) = h(t) + \tau_f(t) + \tau_e(t) + (D - D)\ddot{q}(t)$ ， D 为机器人的惯性矩阵。则机器人的控制律可以写为：

$$\tau(t) = D u(t) + \bar{h}(t) \quad (4-44)$$

由上式可得 $\bar{h}(t)$ 可以表示为：

$$\bar{h}(t) = \tau(t) - D(q)\ddot{q}(t) \quad (4-45)$$

式4-44所示的控制律在实际由于控制器不可能即时的获得系统中的加速度等信息而中无法实现。也就是说，严格来讲系统的当前状态由于时延的原因是无法作为系统的反馈信息的。但是由于系统的采样时间很短，可以用系统上一个采样周期的状态来估计当前的状态。则式4-45的估计可以写为：

$$\hat{\bar{h}}(t) = \bar{h}(t - \lambda) = \tau(t - \lambda) D - (q)\ddot{q}(t - \lambda) \quad (4-46)$$

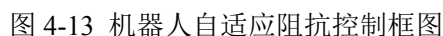
$$\boldsymbol{\tau}(t) = \boldsymbol{D}\boldsymbol{u}(t) + \hat{\hat{\boldsymbol{h}}}(t) \quad (4-47)$$

电机控制的输入量为电机的角加速度，可以通过控制电机的输入电流来实现。其输入表达式为：

其中 \mathbf{V} 为机器人末端的加速度。通过上述阻抗控制算法，在机器人末端笛卡尔空间的控制律 \mathbf{V} 可以写为：

其中第一个式子为机器人运动在自由空间时的控制律，第二个式子为机器人在接触空间时的控制律。机器人在关节空间的自适应阻抗控制律可以写为:

其控制框图如图4-13所示。



4.5 自适应阻抗控制仿真

上文阻抗控制的仿真验证了阻抗控制对于力控制的有效性，但是也暴露了阻抗控制的一些缺点：对于动态跟踪的效果不好，当环境参数发生改变时的跟踪效果受到很大影响。本文采用了一种自适应控制方法来提高阻抗控制的跟踪性能以及提高阻抗控制算法对于环境参数变化的抗干扰能力。对于自适应阻抗控制方法进行了仿真实验来验证自适应阻抗控制算法的有效性。

对于阻抗控制算法存在的对于环境位置变化敏感的问题，针对环境刚度发生变化以及环境位置发生变化两种情况对于自适应阻抗控制算法以及阻抗控制算法进行了对比仿真实验。在保证其他参数都相同的情况下对比两种算法的优劣。环境位置发生变化与环境刚度发生变化的仿真结果如图4-14与4-15所示。在环境刚度变化的仿真中，设置环境刚度在 $t = 3s$ 时发生突变。由图4-14可以看出，自适应阻抗控制算法相对于阻抗控制算法来说，对于环境刚度变化产生的力响应的突变明显减小。阻抗控制的力误差最大值达到 $7.3N$ 且震荡十分严重，而自适应阻抗控制的力误差峰值减小到了 $3.1N$ ，且自适应阻抗控制能够使系统更快地从震荡中恢复，更快地继续跟踪上参考力信号。在环境位置变化的仿真中，设置环境在 $t = 4s$ 时突变从 $y = 0.05m$ 变化到 $y = 0.053m$ 。可以看出，阻抗控制的力误差峰值为 $3Na$ ，自适应阻抗控制使力误差减小到了 $1.4N$ ，对于环境位置变化的力响应效果比单纯的阻抗控制有了很大的改善。

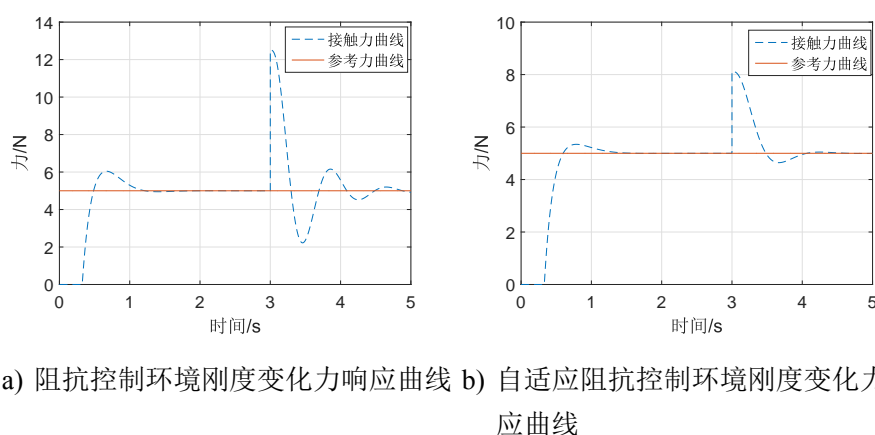
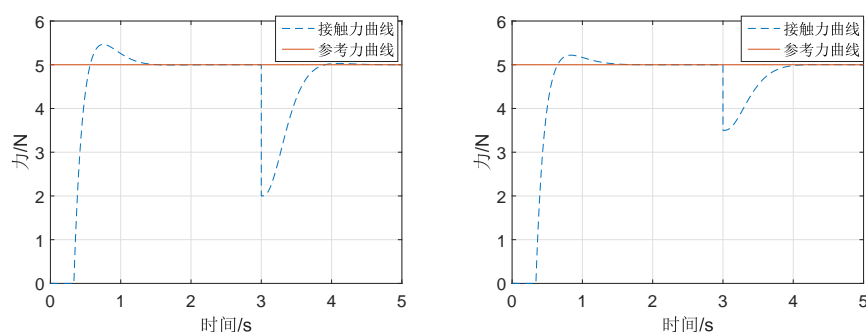


图 4-14 阻抗控制与自适应阻抗控制环境刚度变化对比

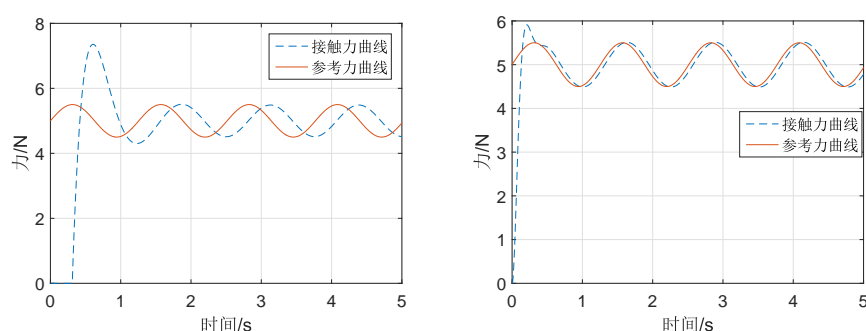
本文对于阻抗控制与自适应阻抗控制的动态跟踪性能也做了对比仿真实验。由上一节中对于阻抗控制正弦信号的仿真可知，阻抗控制对于动态的信号正弦信号的跟踪效果并不是很好，对于正弦信号的跟踪有一定的相位滞后现象。本章对于自适应阻抗控制的动态跟踪性能也做了仿真实验，结果如图4-16所示。从对比仿



a) 阻抗控制环境位置变化力响应曲线 b) 自适应阻抗控制环境位置变化力响应曲线

图 4-15 阻抗控制与自适应阻抗控制环境位置变化对比

真实实验的结果可以看出，自适应阻抗控制虽然使最开始响应的超调量有所增加，但是相位滞后的问题基本上消除了，极大的改善了阻抗控制对于正弦信号跟踪的滞后问题。



a) 阻抗控制正弦信号力响应曲线 b) 自适应阻抗控制正弦信号力响应曲线

图 4-16 阻抗控制与自适应阻抗控制正弦信号对比

4.6 本章小结

本章首先对于阻抗控制的基本原理进行了介绍并且对期望阻抗参数进行了分析，然后设计了自适应阻抗控制器并对自适应阻抗控制进行了分析，接着分析了自适应阻抗控制的稳定性，给出了更新率的取值范围。进而搭建了基于位置的阻抗控制的 SIMULINK 仿真模型，并对于阶跃信号、斜坡信号、正弦信号进行了仿真实验，验证了基于位置的阻抗控制的力控制效果以及不足之处。最后搭建了基于自适应阻抗控制的 SIMULINK 仿真模型，针对环境参数发生变化的情况进行了对比实验，证明了自适应阻抗控制算法相比于阻抗控制算法的优越性。

第 5 章 Delta 机器人力控制实验研究

5.1 引言

通关第二、三、四章的分析,本文建立起了关于机器人主手的模型并基于阻抗控制理论与自适应阻抗理论进行了仿真分析。但是由于所建立的机器人模型与实际的机器人系统之间的差别,仅仅在计算机上进行阻抗控制与自适应阻抗控制算法的仿真分析验证并不能代表其在实际系统中的性能。通过实际的实验研究,可以对之前阻抗控制与自适应阻抗控制的仿真结果进行实际的验证。

为了对于本文中进行的阻抗控制与自适应阻抗控制理论的仿真分析进行实际的验证,本文通过实验室主从式机器人的主操作手也就是三自由的 Delta 机器人作为对象进行了实验研究。整个实验系统主要由上位机、运动控制卡、机器人本体、电机与其上的光电编码器、力传感器几部分组成。本章中针对上文的理论分析,设计了实验并通过采集力传感器的数据。通过 MATLAB 强大的绘图功能对于实验采集的数据进行了处理并通过图形的形式展现出来。

5.2 基于 Delta 主操作手的实验平台介绍

整个的实验平台系统如图5-1所示。上位机主要负责外环力控制,而内环的直流电机位置控制主要由运动控制卡进行负责。Delta 机器人的运动学模型与动力学计算模型的解算也全部在上位机中完成。六个自由度的力传感器安装在 Delta 主操作手的末端,当机器人与环境进行相互作用后,力传感器将力信息进行采集并通过其 Ethernet 接口与上位机进行交互,将采集的力信号输入上位机。此时的力信号是在笛卡尔坐标系下的力信号。上位机在与力传感器进行交互的同时同样通过 Ethernet 接口与运动控制卡进行交互。运动控制卡在控制电机进行运动的同时,通过直流伺服电机上安装的光电编码器将电机所转动的角度信息采集出来。然后运动控制卡将电机的运动信息同样传递给上位机,上位机通过编码器提供的电机角度信息通过 Delta 主操作手的运动学模型解算出机器人末端的位置信息。上位机在得到 Delta 主操作手末端的位置信息与力信息后,利用力控制算法得到位置偏移量然后与运动控制卡进行交互,给运动控制卡位置运动的命令,运动控制卡接受到位置运动的命令后驱动直流伺服电机进行转动,电机带动机器人本体进行运动与环境进行相互作用。

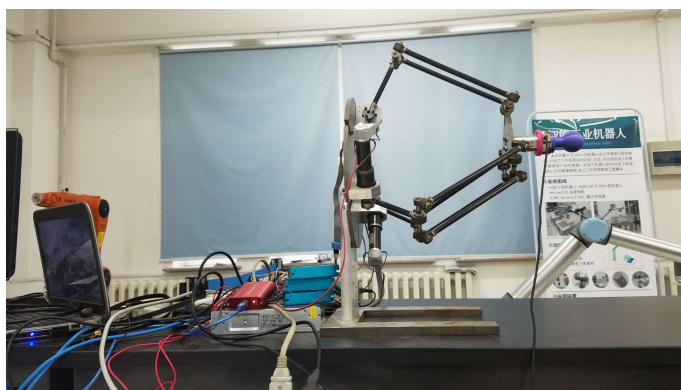


图 5-1 实验系统示意图

5.2.1 控制器与传感器选型介绍

为了保证机器人位置控制的精度，本课题选用了美国 Galil Motion Control 公司生产的型号为 DMC-4143 的四轴运动控制卡如图5-2所示。DMC-4143 运动控制卡是 Galil 公司最新一代的运动控制卡，其同时可以对四个电机进行控制。Galil DMC-4143 运动控制卡提供了多样的交互接口，可以通过 100BASE-T Ethernet 接口、扩展 RS232 接口或者 USB 接口与上位机进行数据的传输。其中通过 100BASE-T Ethernet 接口可以实现 100m 线缆的信号传输。同时还提供 8 个模拟量接口，最高频率达到 15MHz 的光电编码器接口。其采样周期最低可以达到 250 微秒，完全可以达到本课题的控制要求。

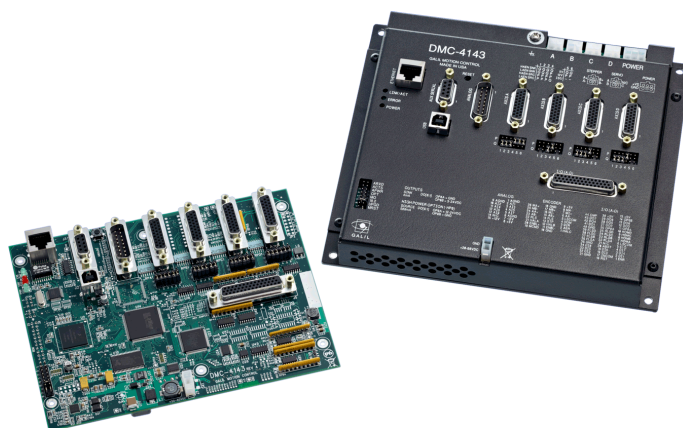


图 5-2 Galil DMC-4143 运动控制卡

为了保证力控制环的精度，本课题选用了美国 ATI Industrial Automation 公司生产的 Network Force/Torque Sensor System，可以进行三轴的力测量以及三轴的力矩测量，可以通过以太网、CAN 总线或者 EtherCat 接口与其他部件进行通信。力传感器如图5-3所示。



图 5-3 ATI 公司生产的力传感器

5.2.2 驱动元件选型介绍

课题采用瑞士 Maxon 公司生产的直流伺服电机作为驱动原件。由于本课题主要研究基于阻抗控制的力跟踪算法，由于要进行力输出，对于执行元件的力矩输出能力有了更高的要求。电机的后端安装有 Maxon 光电编码器从而能够进行电机转角的测量，前端安装有 Maxon 减速器，能够通过牺牲直流伺服电机的转速来达到增大电机力矩的目的。Maxon 电机型号种类繁多，在型号选择上应主要根据功率、额定扭矩、额定转速等电机参数来进行考虑与选择。

由第三章中进行的利用虚功原理对 Delta 主操作手的动力学模型进行分析的部分可列出 Delta 主操作手的虚功原理关系式。假定若只有一个关节的电机转动了很小的虚角度位移而保证其他关节电机不动，就能得到该位置下驱动关节所需要的力矩。通过这种方法可以得到 Delta 主操作手在操作空间中的任意位置电机驱动关节所需要的力矩大小。三个电机中，由于位于 Delta 主操作手顶部的电机承受来自重力的分量最大，所以以其来进行分析。这样得到的结果其他的两个电机一定也能满足力矩输出的要求。设置 Delta 主操作手末端在 XYZ 三个方向上最大输出力为 20N，即 $F_x = F_y = F_z = 20N$ ，考虑到电机以及机器人身上轴承等因素所带来的摩擦力的影响，取 $F_x = F_y = F_z = 30N$ 。运用上述的方法编写 MATLAB 程序对于整个空间内进行搜索，得出电机所需要输出的最大力矩为 $T_{max} = 6.6109N \cdot m$ 。

直流伺服电机的功率的计算可以通过式5-1来得到：

$$P = \frac{T \cdot 2\pi n}{60\eta} \quad (5-1)$$

其中 T 为电机的扭矩， n 为转速。电机的额定输出转矩应大于上述分析得到的所需要输出的最大力矩 T_{max} ，故取 $T = 7N \cdot m$ 。为了满足力输出的需要，选取功率为 60W 的 Maxon 电机，其型号为 RE30，产品编号为 310006。其额定转速为 $8590r/min$ ，

额定力矩为 $75.5mN \cdot m$ 。为了达到所需要的输出力矩，要选择合适的减速器来增大电机的输出力矩。本课题同样选取了 Maxon 公司生产的减速器，减速比为 111:1。这样执行元件的额定输出转矩为 $T = T_m \cdot i = 0.0755 * 111 = 8.3805N \cdot m$ ，满足本课题的需要。

5.3 实验步骤

对于 Delta 主操作手的实验，本课题对于实验进行了设计。主要是针对阻抗控制、自适应阻抗控制的力跟踪效果进行了实验验证并且对于环境参数改变的情况做的对比实验分析。Delta 主操作手力跟踪实验的步骤如下：

(1) 对实验系统进行检查，看系统是否存在问题。将控制器 Galil DMC-4143 运动控制卡以及力传感器与上位机进行连接并上电，检查上位机与 Galil 运动控制卡以及力传感器能否正常通信。

(2) 将机器人回零回到初始位置，以确保位置运动的准确性。

(3) 控制机器人运动到指定位置开始阻抗控制力跟踪实验。给定一个恒定的参考力矩进行跟踪。首先按照仿真实验的结果设置阻抗参数，观察力跟踪效果。然后根据实验效果以及前文分析的阻抗参数对系统的影响不断对阻抗参数进行调整，找到参数较好的一组结果。

(4) 研究自适应阻抗控制在正弦信号下的跟踪性能。

(5) 在同样的期望阻抗控制参数下，对比阻抗控制与自适应阻抗控制在环境发生改变时的跟踪性能。

(6) 将实验设备还原并关闭电源。

5.4 实验研究

实验研究主要分为 3 个部分，第一个部分为阻抗控制力控制效果实验，第二部分为自适应阻抗控制正弦信号跟踪实验，第三部分为阻抗控制与自适应阻抗控制环境位置变化对比实验。

5.4.1 阻抗控制力控制效果实验

在阻抗控制力控制效果的实验中，研究机器人 y 轴方向的力控制效果。在开始时将机器人固定到 $(0, 0.36, 0)$ ，考虑到末端动平台的尺寸，在 $y = 0.365$ 的位置放置环境。环境与机器人动平台的距离为 $0.005m$ 。给定机器人末端一个 $y = 0.005$ 的脉

冲信号,并给定要跟踪的力为恒值 $5N$ 。实验效果如图5-4所示。可以看出,阻抗控制在跟踪 $5N$ 的力信号时有 $1N$ 的超调量。在 $t = 2s$ 时基本实现了对于静态力信号的跟踪。证明了阻抗控制对力控制的有效性。

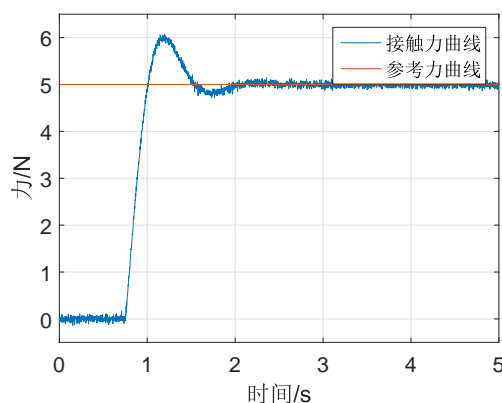


图 5-4 阻抗控制力控制效果实验

5.4.2 自适应阻抗控制正弦信号跟踪实验

在自适应阻抗控制跟踪信号的实验中,主要研究了本文使用的自适应阻抗控制算法对正弦信号的跟踪效果。其中期望正弦力信号的幅值为 $0.5N$,频率为 10 弧度/秒。如图所示,自适应阻抗控制有 $0.05s$ 的滞后,但基本实现了对于正弦信号的跟踪。

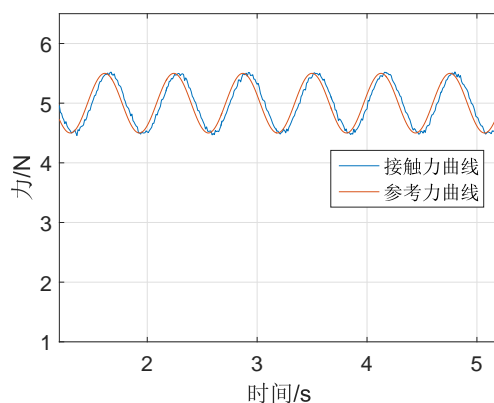


图 5-5 自适应阻抗控制正弦跟踪实验

5.4.3 阻抗控制与自适应阻抗控制对比实验

在阻抗控制与自适应阻抗控制对比实验,主要研究了系统在跟踪一个信号达到稳态后,环境位置发生突变后系统的跟踪性能。在实验中,环境为橡胶材质的靠

垫。实验开始时环境处于离机器人末端较近的位置并达到稳态，然后突然将环境向后移动 7mm 。实验结果如图5-6所示。可以看出，阻抗控制在环境刚度发生变化过程中力突变很大达到了 2.8N ，而阻抗控制的力突变较小只有 1.5N 。由于采用了自适应的方法，系统可以对环境的变化做出快速的反应。自适应阻抗控制算法在环境发生突变后，能很快地继续对力信号进行跟踪，而阻抗控制算法需要更长的时间。验证了自适应阻抗控制算法在环境参数发生改变时的优越性。

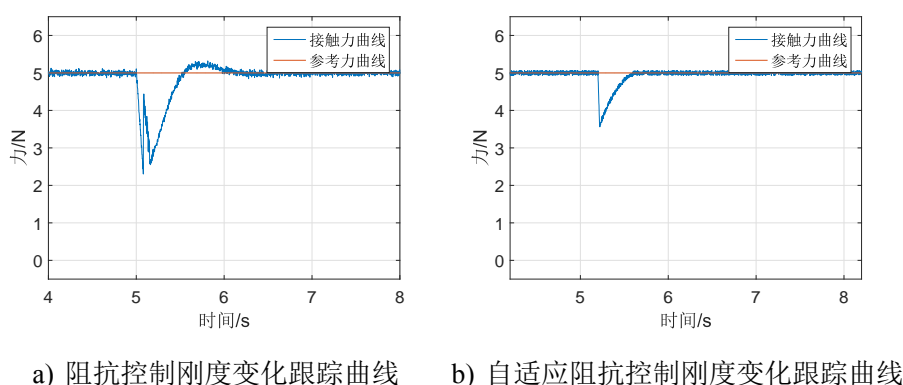


图 5-6 力响应曲线

5.5 本章小结

本章首先介绍了力跟踪实验系统的结构与工作原理，重点阐述了实验系统中各个部件之间的相互关系，紧接着给出了关于阻抗控制力跟踪实验的实验步骤与试验方法，在前文的理论分析与仿真实验的基础上，进行了阻抗控制的静态力跟踪实验、环境参数变化时的阻抗控制与自适应阻抗控制对比实验以及正弦信号跟踪的实验，对实验结果进行分析并得出了结论，对前文的理论分析与仿真实验进行了验证。

结 论

本文主要以实验室主从式鼻腔手术机器人为背景,对于主从式机器人主操作手末端期望力输出的方法进行了研究。主要目的是解决在主从式机器人主手末端输出特定大小的力过程中由于环境刚度与位置变化产生的控制问题。针对这一问题,在查阅了大量与机器人力控制以及主从式机器人主手控制有关的文献后,提出了本文的研究内容。本文的研究内容主要有:Delta 机器人主操作手的运动学、动力学分析与建模;基于位置的阻抗控制策略的设计分析与仿真;基于自适应阻抗控制策略的设计分析与仿真;基于 Delta 主操作手实验平台的实验验证。

本文的创新性研究工作主要可以总结为如下三点:

(1) 对于作为主操作手的 Delta 机器人,为了对于机器人的运动进行分析而建立了合理的坐标系,运用几何法进行了运动学建模。利用向量的方法对于 Delta 机器人的雅克比矩阵以及各个部件的运动都进行了分析,利用虚功原理法对于 Delta 机器人的动力学模型进行了建模,并利用仿真进行了验证。

(2) 利用基于位置的阻抗控制方法,给出了 Delta 主操作手末端力跟踪的力控制策略,对于期望阻抗参数的选取进行了定性的分析。利用 SIMULINK 搭建了 Delta 机器人模型与控制器模型,对于基于位置的阻抗控制策略进行了不同信号的跟踪仿真实验,研究了阻抗控制策略的效果与不足。

(3) 在基于位置的阻抗控制策略设计的控制器基础上加入了自适应方法设计了自适应阻抗控制策略。根据期望力与实际力的误差大小对于控制率进行调整。对于自适应阻抗控制率进行了稳定性分析并得出了自适应律更新率的取值范围。

虽然本文在上述三个方面做了一些工作,但是限于研究时间以及研究条件,在本文的基础上还有如下几个问题需要进行探讨:

(1) 本文所做的 Delta 主操作手的力跟踪研究,都是在机器人末端坐标系下一个自由度进行的研究。实验验证也只对垂直于 Delta 机器人静平台方向的运动进行了实验验证,并没有考虑耦合的问题。在接下来的研究中,可以将力跟踪扩展到同时对三个自由度的力信号进行跟踪,解决机器人耦合带来的问题。

(2) 由于实验条件所限,对于自适应阻抗控制策略的实验验证,由于没有可以模拟出环境刚度发生变化的实验条件,只做了环境位置突变条件下的实验验证。对于接下来的研究工作可以对于实验系统中的环境增加更多的设计,这样可以更好地对算法进行验证。

(3) 鉴于基于阻抗控制的力跟踪策略对于位置控制的要求很高，位置上的一点偏差可能会导致接触力有很大的波动，对于 Delta 机器人本体机械的设计与加工应该提出更高的要求。

参考文献

- [1] Mason M T. Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics, 2007, 11(6): 418–432.
- [2] Goertz R. Fundamentals of general-purpose remote manipulators[J]. Nucleonics (U.S.) Ceased publication, .
- [3] 刘海波, 席振鹏. 力反馈主手研究现状及其力控制方法研究 [J]. 自动化技术与应用, 2009, 28(3): 1–5.
- [4] Millman P A, Colgate J E. Design of a Four Degree-of-freedom Force-reflecting Manipulandum with a Specified Force/torque Workspace[C] // Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1991 : 1488–1493 vol.2.
- [5] Inoue M, Yamada K, Tanaka K-I, et al. Six-Axis Bilateral Control of an Articulated Slave Manipulator Using a Cartesian Master Manipulator[J]. Advanced robotics, 1989, 4(2): 139–150.
- [6] Matsuhira N, Asakura M, Bamba H, et al. Development of an Advanced Master-slave Manipulator Using a Pantograph Master Arm and a Redundant Slave Arm[C] // Intelligent Robots and Systems' 93, IROS'93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on : Vol 3. 1993 : 1653–1658.
- [7] Preusche C, Hirzinger G. Haptics in Telerobotics[J]. The Visual Computer, 2007, 23(4): 273–284.
- [8] 黄真. 并联机器人机构学基础理论的研究 [J]. 机器人技术与应用, 2001(6): 11–14.
- [9] Yoon W-K, Suehiro T, Tsumaki Y, et al. A Method for Analyzing Parallel Mechanism Stiffness Including Elastic Deformations in the Structure[C] // IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems : Vol 3. 2002 : 2875–2880 vol.3.
- [10] Lee J H, Eom K S, Suh I I. Design of a New 6-DOF Parallel Haptic Device[C] // Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164): Vol 1. 2001 : 886–891 vol.1.
- [11] Birglen L, Gosselin C, Pouliot N, et al. SHaDe, a New 3-DOF Haptic Device[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(2): 166–175.
- [12] Faulring E L, Colgate J E, Peshkin M A. The Cobot Hand Controller: Design,

- Control and Performance of a Novel Haptic Display[J]. The International Journal of Robotics Research, 2006, 25(11): 1099–1119.
- [13] Berkelman P J, Butler Z J, Hollis R L. Design of a Hemispherical Magnetic Levitation Haptic Interface Device[C] // Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Atlanta. 1996: 483–488.
- [14] Hurmuzlu Y, Ephanov A, Stoianovici D. Effect of a Pneumatically Driven Haptic Interface on the Perceptual Capabilities of Human Operators[J]. Presence, 1998, 7(3): 290–307.
- [15] Raspolli M, Avizzano C A, Facenza G, et al. HERMES: an Angioplasty Surgery Simulator[C] // Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 2005. World Haptics 2005. First Joint. 2005: 148–156.
- [16] Vischer P, Clavel R. Kinematic Calibration of the Parallel Delta Robot[J]. Robotica, 1998, 16(2): 207–218.
- [17] 宋爱国. 力觉临场感遥操作机器人技术研究进展 [J]. 机械制造与自动化, 2012, 41(1): 1–5.
- [18] 孙立宁, 荣伟彬, 刘品宽, et al. 主从式遥微操作机器人力反馈控制系统的研究 [J]. 机器人, 2002, 24(4): 346–351.
- [19] Salisbury J K. Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates[C] // Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes, 1980 19th IEEE Conference on: Vol 19. 1980: 95–100.
- [20] Salisbury J K, Craig J J. Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues[J]. The International journal of Robotics research, 1982, 1(1): 4–17.
- [21] Roberts R, Paul R, Hillberry B. The Effect of Wrist Force Sensor Stiffness on the Control of Robot Manipulators[C] // Robotics and Automation. Proceedings. 1985 IEEE International Conference on: Vol 2. 1985: 269–274.
- [22] Dégoulange E, Dauchez P. External Force Control of an Industrial PUMA 560 Robot[J]. Journal of Field Robotics, 1994, 11(6): 523–540.
- [23] Ishikawa H, Sawada C, Kawasa K, et al. Stable Compliance Control and its Implementation for a 6 DOF Manipulator[C] // Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on. 1989: 98–103.
- [24] Kazerooni H, Waibel B, Kim S. On the Stability of Robot Compliant Motion Con-

- trol: Theory and Experiments[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1990, 112(3): 417–426.
- [25] An C, Hollerbach J. Kinematic Stability Issues in Force Control of Manipulators[C] // Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on: Vol 4. 1987: 897–903.
- [26] An C H, Hollerbach J M. The Role of Dynamic Models in Cartesian Force Control of Manipulators[J]. The International Journal of Robotics Research, 1989, 8(4): 51–72.
- [27] Zhang H. Kinematic Stability of Robot Manipulators under Force Control[C] // Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on. 1989: 80–85.
- [28] Hogan N. Impedance Control: An Approach to Manipulation[C] // American Control Conference, 1984. 1984: 304–313.
- [29] Hogan N. Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part II—Implementation[J]. Journal of dynamic systems, measurement, and control, 1985, 107(1): 8–16.
- [30] Colbaugh R, Seraji H, Glass K. Impedance Control for Dexterous Space Manipulators[C] // Decision and Control, 1992., Proceedings of the 31st IEEE Conference on. 1992: 1881–1886.
- [31] Hogan N. Stable Execution of Contact Tasks using Impedance Control[C] // Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on: Vol 4. 1987: 1047–1054.
- [32] Kazerooni H. On the Robot Compliant Motion Control[J]. Journal of dynamic systems, measurement, and control, 1989, 111(3): 416–425.
- [33] McCormick W, Schwartz H M. An Investigation of Impedance Control for Robot Manipulators[J]. The International journal of robotics research, 1993, 12(5): 473–489.
- [34] Lawrence D A. Impedance Control Stability Properties in Common Implementations[C] // Robotics and Automation, 1988. Proceedings., 1988 IEEE International Conference on. 1988: 1185–1190.
- [35] Seraji H. Adaptive Admittance Control: An Approach to Explicit Force Control in

- Compliant Motion[C] // Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on. 1994 : 2705–2712.
- [36] Mason M T. Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1981, 11(6) : 418–432.
- [37] Raibert M H, Craig J J. Hybrid Position/Force Control of Manipulators[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1981, 103(2) : 126–133.
- [38] Cai L, Goldenberg A A. An Approach to Force and Position Control of Robot Manipulators[C] // Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on. 1989 : 86–91.
- [39] Craig J J, Raibert M H. A Systematic Method of Hybrid Position/Force Control of a Manipulator[C] // Computer Software and Applications Conference, 1979. Proceedings. COMPSAC 79. The IEEE Computer Society's Third International. 1979 : 446–451.
- [40] DeSantis R M. Motion/Force Control of Robotic Manipulators[J]. Journal of dynamic systems, measurement, and control, 1996, 118(2) : 386–389.
- [41] Chiaverini S, Sciavicco L. The Parallel Approach to Force/Position Control of Robotic Manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(4) : 361–373.
- [42] Vukobratović M K, Ekalov Y. New Approach to Control of Robotic Manipulators Interacting with Dynamic Environment[J]. Robotica, 1996, 14(1) : 31–39.
- [43] Fisher W D, Mujtaba M S. Hybrid Position/Force Control: a Correct Formulation[J]. The International journal of robotics research, 1992, 11(4) : 299–311.
- [44] Wen J T, Murphy S. Stability Analysis of Position and Force Control for Robot Arms[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1991, 36(3) : 365–371.
- [45] Yabuta T. Nonlinear Basic Stability Concept of the Hybrid Position/Force Control Scheme for Robot Manipulators[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(5) : 663–670.
- [46] Anderson R J, Spong M W. Hybrid Impedance Control of Robotic Manipulators[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1988, 4(5) : 549–556.
- [47] CARELLI R, KELLY R, ORTEGA R. Adaptive Force Control of Robot Manipulators[J]. International Journal of Control, 1990, 52(1) : 37–54.
- [48] Singh S K, Popa D O. An Analysis of Some Fundamental Problems in Adaptive

- Control of Force and Impedance Behavior: Theory and Experiments[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(6) : 912 – 921.
- [49] Colbaugh R, Seraji H, Glass K. Direct Adaptive Impedance Control of Robot Manipulators[J]. Journal of Field Robotics, 1993, 10(2) : 217 – 248.
- [50] Jung S, Hsia T C, Bonitz R G. Force Tracking Impedance Control of Robot Manipulators under Unknown Environment[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(3) : 474 – 483.
- [51] Seraji H. Adaptive Force and Position Control of Manipulators[J]. Journal of Field Robotics, 1987, 4(4) : 551 – 578.
- [52] Slotine J-J E. Sliding Controller Design for Non-linear Systems[J]. International Journal of control, 1984, 40(2) : 421 – 434.
- [53] Xu Q. Robust Impedance Control of a Compliant Microgripper for High-speed Position/force Regulation[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2015, 62(2) : 1201 – 1209.
- [54] Liu G, Goldenberg A. Robust Hybrid Impedance Control of Robot Manipulators[C] // Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on. 1991 : 287 – 292.

攻读硕士学位期间发表的论文及其他成果

（一）发表的学术论文

- [1] Wu B, Ding R, Zhong J, et al. Gravity and friction compensation algorithm for master manipulator based on genetic algorithm[C]// Chinese Association of Automation. IEEE, 2017:219-224. (EI 收录号: 20170603319973)
- [2] Lin W, Ding R, Wu B, et al. Sensor-less force estimation based man-machine interaction optimization[C]// Youth Academic Conference of Chinese Association of Automation. 2017:1206-1210. (EI 收录号: 20173204024146)
- [3] Lin W, Wu B, Ding R, et al. Precise and stable feedback for haptic device with exact dynamics and optimal estimation[C]// IECON 2017, Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2017:2899-2904. (EI 收录号: 20181905179559)

致 谢

本文是在本人导师高会军教授的悉心指导下完成的。高老师对待科学研究严谨的态度，对于探索真理热情的追求，对于工作的精益求精对我产生了深深的影响。高老师不仅是我学术科研上的领路人，更是我人生方向上的指引者。本文从选题到课题最终的完成，高老师在各个方面都给予了我大量的帮助，在高老师的指导与帮助下，本人的理论水平与科学素养有了质的提升。在此向高老师致以最诚挚的感谢！

同时，本人还要感谢实验室林伟阳老师在整个硕士研究生阶段以及硕士课题的完成过程中给予我的指导与帮助。林老师在机器人机构学、机器人运动控制、医疗机器人等领域有着深刻的理解以及不凡的造诣。林老师对待科研一丝不苟，对待学生认真负责，在本人完成硕士论文的过程中给予了我大量的帮助。在这里向林老师表达衷心的感谢。

感谢实验室的同学在研究生这两年内对我的帮助，非常荣幸自己能在一个氛围这么好的团队里工作与学习。

感谢我的父母对于我的支持、关心与照顾，这是我求学路上孜孜不倦的动力源泉。