

东南大学

硕士学位论文

基于阻抗控制的机器人柔顺性控制方法研究

姓名：杨振

申请学位级别：硕士

专业：控制理论与控制工程

指导教师：孟正大

20050601

## 摘 要

本论文来源于 863 高技术项目《仿人机器人柔顺性控制技术研究》的子课题,研究针对手臂模型未知和动态环境下的仿人机器人手臂柔顺性控制算法,根据不同任务在线控制仿人机器人手臂的柔性是本课题的重要实现目标之一。

本文主要对传统的阻抗控制算法、自适应阻抗控制算法作了仿真研究,并对上述两种算法作了多种环境条件下的比较研究,初步总结了阻抗参数的调节规则。通过仿真研究表明,合理的调整阻抗参数在实际力控制过程中至关重要,它可以有效地减少机械手与环境接触时的冲击力。本文探讨了将阻抗控制算法与神经网络逆系统方法结合的思想,利用神经网络逆系统的解耦能力实现对机械手的线性化,然后用阻抗控制算法对解耦线性化后的机械手系统实现控制的目的。文中亦对上述基于神经网络逆系统的阻抗控制算法作了仿真研究,仿真结果表明该算法的效果较理想。

最后,利用本实验室的 PA—10 机器人,实现了神经网络逆系统方法对机械手原模型的解耦控制。实验表明该算法可以很好的完成机械手的轨迹跟踪任务。

关键词: 机器人 阻抗控制 神经网络 逆系统 柔顺性控制

## Abstract

This article comes from a sub-task of 863 program—the research of compliance control techniques on apery robot. One of goals on the program is to study compliance control algorithms under the condition of unknown robot model and dynamic environment and to control the compliance of robot on line.

This article's task is as follows: The traditional impedance control and adaptive impedance control are researched by simulation and compares of their performance under much condition are done. How to adjust impedance parameters is presented preliminarily. It is important to adjust impedance parameters during the force control and it effectively reduce the force between the robot and the environment. Based on ANN inverse system method can overcome the difficulties of nonlinearities and strong coupling in multi-degrees of freedom robot system; with characters of simple structure and without knowing the controlled system's precise model, this method can be generalized to a class of MIMO nonlinear system in real field. This article discusses the algorithm on the combine of impedance control and ANN inverse system: firstly the robot system is linearized by the method of ANN inverse system, secondly the decoupling robot system is controlled by impedance strategy; this algorithm is called impedance control based on ANN inverse system. The new algorithm is simulated and its result is very well.

Finally, the neural network inverse system method is implemented on the PA—10 robot and the robot system is uncoupled. The experiment shows that this algorithm can make the robot track the trace very well.

**Key Words:** robot, impedance control, neural network, inverse system, compliance control

# 第一章 绪 论

## 1.1 问题的提出

随着科技的进步，机器人在生产自动化中越来越占有极其重要的地位。目前，工业机器人已广泛应用于生产自动化中，而绝大多数的工业机器人是按预先编制好的程序来进行工作，且仅限于对位置控制的，完成像喷漆、焊接等只需精确定位的操作任务是胜任的。但对于装配作业，如磨削工件表面、插入插销的动作发生了偏心、偏角、抓取柔软物体等机械手与环境发生接触的场合，就会出现许多问题。要么会因为接触力过大，损坏了工件；要么会因为接触力不够没有完成任务。出现问题的原因在于这类机器人没有感觉，而且缺少柔性。为了动作正确，则机器人就应使其动作响应外界条件的变化作相应的调整，如果此时采用位置控制机器人，工作将产生困难。要使机器人能对外界的变化产生响应，一般采用视觉、力觉传感器来感受外界的变化，然后将信息反馈给控制系统，使之根据外界的变化来控制机器人的动作。

柔顺性控制分为主动柔顺控制和被动柔顺控制两类。机器人凭借一些辅助柔顺机构，使其在与环境接触时能够对外部作用力产生自然顺应，称为被动柔顺控制；被动柔顺机构即利用一些可以使机器人在与环境作用时，能够吸收或存储能量的机构器件如弹簧、阻尼等而构成的机构<sup>[1]</sup>。机器人采用被动柔顺控制在作业中存在一些问题：（1）无法根除机器人高刚度与高柔性间的矛盾。（2）被动柔顺装置的专用性强，适应能力差，适用范围受到限制。（3）无法使机器人本身产生对力的反应动作，成功率较低等<sup>[2]</sup>。

机器人利用力的反馈信息采用一定的控制策略去主动控制作用力，称为主动柔顺控制。主动柔顺控制也称为力控制。机器人主动柔顺控制实现克服了被动柔顺控制的不足。因此，机器人的自主柔顺控制研究成果具有十分广阔的应用前景。

目前，许多发达国家把机器人技术，特别是智能机器人技术的研究列入国家研究计划，我国对此也非常重视。本论文课题就是来源于 863 高技术项目《仿人机器人柔顺性控制技术研究》的子课题。研究针对手臂模型未知和动态环境下的仿人机器人手臂柔顺性控制算法，根据不同任务在线控制仿人机器人手臂的柔性是本课题的重要实现目标之一。

## 1.2 国内外对力控策略的研究动态

到目前为止，将力控制应用于生产实践中的例子还比较少见，大多仍处于实验室研究阶段。产生这种状况的原因之一主要在于机器人与工作环境的接触会造成系统的不稳定（产生振荡），以至于像执行擦拭工件表面等这样简单任务都是相当困难的。从机器人实现依从运动的特点来看，控制策略主要集中在以下四大类：阻抗控制策略、力/位混合控制策略、自适应控制策略、智能控制策略。

### 1.2.1 阻抗控制策略

Hogan 提出的阻抗控制<sup>[3][4]</sup>作为其中的基本控制方法之一，在实现机器人顺应性控制中得到了广泛的应用。阻抗控制是通过调整机械手的阻抗参数，从而使力和位置满足某种理想的动态关系。它将力控制和位置控制纳入一个框架之内，用相同的策略去实现它们。因而它具有较少的任务规划工

作量；而且阻抗控制常基于简单的位置控制方法实现，对一些不确定性和干扰因素具有较强的鲁棒性。

但是阻抗控制是通过调整参考位置间接地实现力控制的，它的控制精度依赖于操作者对环境知识的精确了解。而在实际应用中,由于各种因素的影响,对环境的了解常常是很不精确或无法知道的,这导致了阻抗控制有很大的力误差,在许多力控制精度要求较高的场合无法应用,这是阻抗控制相对于力/位混合控制的一大缺陷。为了改变这个缺陷,融合阻抗控制与力/位混合控制的优点, Lasky 和 Hsia<sup>[5]</sup>提出了内外环控制策略,通过建立力误差二次型性能指标获得外环参考位置的修正律,机器人动力学模型的不确定性在内环中被具有较好鲁棒性位置控制算法补偿。Salisbury<sup>[6]</sup>定义了机械手末端力和位置的线性函数关系,通过选择刚度矩阵实现机械手在约束方向上的顺应性,但此方法不能保证全局动态稳定。Chan 和 Yao<sup>[7]</sup>等将滑模控制方法引入阻抗控制中,在滑动模态中包含了理想的阻抗关系,其力跟踪精度是建立在对环境精确的了解上的。Seraji 和 Colbaugh<sup>[8]</sup>提出了两种力跟踪策略,过多的可调参数给调试工作带来了麻烦,而且部分参数初值的选择因无据可循而不能保证机械手的初始稳定性。

Arail<sup>[9]</sup>等针对多机器人提出了虚拟阻抗的概念。在机器人与目标和障碍物之间定义了虚拟阻抗,利用虚拟阻抗产生虚拟力实现多机器人的协调控制。Nakabo<sup>[10]</sup>在虚拟阻抗的基础上提出了视觉阻抗的概念。即将视觉反馈信息与阻抗控制相结合,对机器人末端执行器的阻抗进行控制以完成特定的任务。Tsuji 等<sup>[11][12]</sup>针对冗余度机器人进行了通过视觉信息调节机械手和外部物体间的虚拟阻抗的研究。其特点是不仅在机器人末端产生一个视觉阻抗模型,同时利用冗余度机器人自运动的特性,使机器人关节生成阻抗特性。当机器人与环境接触时,环境对机器人的冲击力,导致对每个关节的冲击力矩。由于设计了关节阻抗,即在自运动空间产生一个运动,该运动在机器人每个关节的驱动力与冲击力矩相反,起到减少冲击的作用。

### 1.2.2 力/位混合控制策略

Mason 于 1979 最早提出同时控制力和位置的概念和关节柔顺的思想,其方法是对机器人的不同关节根据具体任务要求分别独立的进行力控制和位置控制。理论上讲,机器人力自由空间和位置自由空间是两个互补正交的子空间,在力自由空间进行力控制,而在剩余的正交方向上进行位置控制。此时的约束环境被当作不变的几何问题加以考虑,因而该方法明显具有一定的局限性。1981 年 Raibert 和 Craig 在 Mason 的基础上提出了力/位混合控制,即通过雅可比矩阵将作业空间任意方向的力和位置分配到各个关节控制器上,由于计算复杂,实施比较困难。H. Zhang<sup>[13]</sup>等人提出了把操作空间的位置环用等效的关节位置环代替的改进方法,但必须根据精确的环境约束方程来实时确定雅克比矩阵并计算其坐标系。

### 1.2.3 自适应控制策略

机器人为多自由度、时变、强耦合的复合体,系统本身的位姿随时而变,加上外部环境存在极大的未知性,有时无法确定。针对这一特点,众多学者进行了自适应方法的研究尝试。Chung Jack C.H., Leininger Gay G<sup>[14]</sup>直接在多任务坐标系系统中,用学习进行重力、动摩擦力和柔顺反作用力补偿,以插孔为目标,进行自适应实验;Kuc Tac-Yong 等<sup>[15]</sup>采用自适应学习的混合控制方法,进行了约束运动控制尝试,在逆动力学求解、收敛性及抗干扰方面获得满意的效果。Nicoletti G. M<sup>[16]</sup>用 Lyapunov 稳定理论,针对约束运动,对模型参考自适应 PID 控制的稳定条件和判据进行了研究。李杰、韦庆、常文森等<sup>[17]</sup>将阻抗控制下系统的闭环方程转化为力误差的微分方程,根据模型参考自适应控制(MRAC)的思想,用 Lyapunov 稳定性设计方法导出了渐近稳定条件下的一种自适应策略,使阻抗控

制中的力跟踪达到了较好的效果。这种方法计算量小,修正量可以在线进行计算;而且它可以将一些未知和不确定的因素包容于修正量中,因而此方法对补偿不准确和不确定性有一定的鲁棒性。

### 1.2.4 智能控制策略

上述三种策略各有优缺点,且大多处于理论探索和仿真阶段,无法寻找一策略彻底解决机器人力控制问题。另外机器人研究已进入智能化阶段,决定了机器人智能力控制策略出现的必然性。具有代表性的研究:Connolly 等<sup>[18]</sup>将多层前向神经网络用于力/位混合控制,根据检测到的力和位置由神经网络计算选择矩阵和人力约束,并进行了插孔实验;日本的福田敏男等<sup>[19]</sup>用四层前馈神经网络构造了神经伺服控制器,进行了细针刺纸实验,能将力控制到不穿破纸的极小范围。此后不久,又将之用于碰撞试验,取得了一定的成果,但机构简单,针对性强,尚缺少普遍性;Chia-Ju Wu, Ching-Huo Hung<sup>[20]</sup>提出了用神经网络学习机器人逆运动学,然后用 PID 调节器补偿由于网络学习时信息不足而产生的误差的方法,作者对该方法做了在环境已知和环境未知两种情况下仿真,未作实验。Xu Yangsheng 等<sup>[21]</sup>提出了主动柔顺和被动柔顺相结合的观点,研制了相应的机械腕,采用模糊控制的方法,实施插孔。从研究成果来看,智能控制仍处于起步阶段,尚未形成独立的控制策略,仅仅将智能控制原理如模糊和神经网络理论对以往研究中无法解决的难题进行新的尝试,仍具有一定的局限性。

## 1.3 本文拟采用的柔顺性控制策略

### 1.3.1 Hogan 的阻抗控制方法

Hogan 的阻抗控制算法将力和位置纳入统一的控制体系。因此,该控制器的设计调整不是依据机器人的位置,也不是力,而是依据输出阻抗。为了完成既定的任务,必须建立力、位置、速度的阻抗关系式。通过输入力矩值,使机器人输出位置和力,来实现设定的阻抗关系式。因此调节机器人的阻抗参数便是该算法研究的难点和重点之一。仿真中所用的机器人模型由于是非线性的,而且每个关节的力矩不仅与该关节的角度有关,还与其它的关节角存在耦合,这便为仿真过程中模型的建立制造了困难。

### 1.3.2 Seul 的阻抗控制算法<sup>[23, 24]</sup>

在 Hogan 开创性的工作以后,一些关于阻抗控制的问题期待得到解决,主要集中在:首先,由于机器人模型的不确定性而带来的位置跟踪误差应尽量最小化;其次,期望实现的力应具有直接被跟踪的能力(被跟踪的力可以时变);第三,将阻抗控制器用到不确定的环境刚度和环境位置时,应具有足够的鲁棒性。其实上述问题的产生主要来源于机器人模型的不确定性和环境的不确定性(诸如环境的刚度、位置)。

Seul 的算法较 Hogan 的算法更进一步,算法中不再要求建立机器人精确的动力学模型,只需要建立一个估计模型即可。1995 年,Seul 做了将控制器运用到未知环境的实验,用传感器得到的力信息经过处理来代替未知环境刚度,得到了只有对环境位置的估计精确度在一定界内时精确的力跟踪才能被保证的结论<sup>[25]</sup>。2002 年,Seul 将位置控制算法加入到阻抗算法中去,使用上一个采样点的力

矩补偿信息来抵消动力学方程的不确定性,这其中,机器人动力学方程中惯性矩阵估计量的选取至关重要,它需要满足一定的稳定性条件<sup>[26]</sup>。仿真中该模块的建立至关重要,我们不妨称之为延迟补偿模块。

Seul 将自适应方法引入到其阻抗算法中,选取合适的自适应增益以减小当跟踪不确定环境时所产生的力误差,我们不妨称其为自适应校正模块。从稳定性分析中得出,只有当自适应增益满足一定的关系时,才能保证优良的效果。所以,自适应增益的选取将是保证该模块性能优劣的关键。

### 1.3.3 基于神经网络逆系统的阻抗控制方法

该方法由本实验室提出,从仿真结果和对实际机器人的研究表明,对于位置控制该方法切实可行,它比 seul 的方法更进一步,由于算法中采用了戴先中教授提出的神经网络逆系统<sup>[27][28]</sup>方法,所以不需要机器人的动力学模型,转而从静态神经网络来逼近机器人逆动力学系统对应的静态非线性函数,用积分器来反映逆系统各变量之间的动态关系,使机器人原系统与逆系统组成一个与若干个独立的二阶积分线性子系统等价的复合系统,从而实现对机器人手臂的线性解耦,并在此基础上进行目标阻抗控制。该方法结构简单,易于工程实现,更符合实际的需要(因为机器人精确的动力学方程通常是比较难建立的)。实际上,该方法综合了智能控制及阻抗控制各自的优点。

## 1.4 本文的主要工作

本文研究的目的在于探讨多种柔顺性控制策略在机器人上的控制效果研究及控制算法在实际机器人上的实现。本课题中完成的工作有:

- 1、以平面两自由度机器人为研究对象,建立阻抗控制仿真平台,应用自适应阻抗算法理论估计了两自由度机械手的惯性矩阵并建立了该算法的仿真平台。研究了算法在多种未知条件下的性能。
- 2、对阻抗控制算法及自适应阻抗控制算法在力、位置上的控制性能作了分析比较。
- 3、初步提出了阻抗参数的调整原则。
- 4、提出基于神经网络逆系统的阻抗控制算法,并通过仿真证明了算法的可行性。
- 5、以本实验室的 PA-10 机器人为平台,实现神经网络逆系统解耦控制算法。

## 1.5 本文的安排如下

全文共分五章。第一章为绪论。第二章对阻抗控制算法及自适应阻抗控制算法的理论做了阐述。第三章对阻抗算法及自适应阻抗算法分别作了在多种条件下的仿真研究,并对两者的力控制性能作了分析比较研究。第四章系统介绍了神经网络阻抗控制算法并对其做了仿真研究,实现神经网络逆系统解耦控制算法。第五章是总结与展望。

## 1.6 本章小结

本章首先介绍了力控制的研究及应用背景。其次介绍了目前力控制算法的研究现状,目前主要的力控制策略主要集中在阻抗控制、力位混合控制、自适应控制和智能控制方法上。最后对三种本文所研究的算法作了较具体的介绍。

## 第二章 基于阻抗控制的机器人柔顺性控制策略

### 2.1 阻抗控制算法

自 1985 年 Hogan<sup>[3]</sup>系统的介绍了机器人阻抗控制方法以来, 阻抗控制方法的研究得到了很大的发展。这种方法主要是通过考虑物理系统之间相互作用而发展起来的。在操作过程中存在大量的机械功的转换, 在某些情况下机械手与环境之间的作用力和机械作用力可以忽略, 此时为了控制, 可以将机械手看成是一个孤立的系统, 把它的运动作为控制变量, 这就是位置控制。但最一般的情况下, 机械手与环境物体间的动态相互作用力既不是零也不能被忽略, 生产过程中大量的操作属于这一类型, 此时机械手不能再被看作是一个孤立的系统, 控制器除了要位置控制和速度控制还要能调节和控制机械手的动态行为。

阻抗控制方法是用目标阻抗代替实际的机器人动力学模型, 当机器人末端的位置  $\mathbf{X}$  和理想的轨迹  $\mathbf{X}_d$  存在偏差  $\mathbf{E}$  时, 即:  $\mathbf{E} = \mathbf{X}_d - \mathbf{X}$ , 机器人在其末端产生相应的阻抗力  $\mathbf{F}_{imp}$ 。目标阻抗一般为一个二阶系统, 其原理见图 2-1:



图 2-1 阻抗控制原理图

$$\mathbf{F}_{imp} = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} \quad (2.1)$$

上式中,  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{K}$  为机器人的阻抗系数;  $\mathbf{Z}$  为机器人的阻抗。两个自然系统的动态作用最重要的结果就是一个系统必须对另一个系统进行补偿, 如果一个系统是阻抗性质的, 另一个一定是导纳性质的。按 Hogan 的定义, 机器人同时具有阻抗和导纳的特性。也就是, 一方面若机器人末端存在偏差时机器人会产生阻抗力; 另一方面, 在机器人末端作用外力, 会使机器人末端产生偏差。

对几乎所有的操纵任务, 环境物体包括刚性和动态的约束条件, 以力为输入以及在响应中确定它们运动的环境物体被描述为导纳性质的, 也就是说, 外界环境仅具有导纳特性。对外界环境施加

作用力  $\mathbf{F}_{imp}$ , 它只会产生位移  $\mathbf{X} = \frac{\mathbf{F}_{imp}}{\mathbf{H}}$ 。导纳控制的原理见图 2-2:

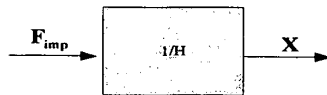


图 2-2 导纳示意图

在机器人与外界环境接触时, 机器人的阻抗控制方案见图 2-3:

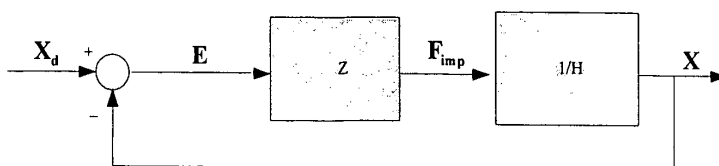


图 2-3 机器人阻抗控制示意图



该机器人的动力学方程为：

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_f(\dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} \quad (2.2)$$

上述表达式在笛卡尔坐标系的描述为：

$$\mathbf{D}^* \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{h}^* + \mathbf{F}_f^* = \mathbf{F} \quad (2.3)$$

当机器人与环境接触时作用在机器人末端的外力为  $\mathbf{F}_e$ ，这时机器人的笛卡尔坐标系的描述为：

$$\mathbf{D}^* \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{h}^* + \mathbf{F}_f^* = \mathbf{F} - \mathbf{F}_e \quad (2.4)$$

将 (2.1) 代入 (2.4) 得笛卡尔空间的控制力为：

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{h}^* + \mathbf{F}_f^* + \mathbf{D}^* (\ddot{\mathbf{X}}_d - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}(\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}) + \mathbf{K}(\mathbf{X}_d - \mathbf{X}) + \mathbf{F}_{imp}))$$

## 2.2 自适应阻抗控制算法<sup>[24]</sup>

### 2.2.1 算法前言

自适应阻抗控制算法的主要思想是在跟踪环境位置时，通过自适应增益来减小力误差，该算法不需要获得环境刚度的知识，所以无论对机器人动力学模型，还是对未知的环境位置或刚度该算法都有一定的鲁棒性。N 自由度的机器人关节空间的动力学方程如下：

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_f(\dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_e \quad (2.5)$$

其中  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$  是机器人的关节位置、速度、加速度向量； $\mathbf{D}(\mathbf{q})$  是  $\mathbf{n} \times \mathbf{n}$  对称正定惯性矩阵；

$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}}$  是  $\mathbf{n} \times 1$  哥氏力矩及向心力矩向量； $\mathbf{g}(\mathbf{q})$  是重力力矩； $\boldsymbol{\tau}_f$  是  $\mathbf{n} \times 1$  关节摩擦力； $\boldsymbol{\tau}$  是  $\mathbf{n} \times 1$  关节力矩； $\boldsymbol{\tau}_e$  是  $\mathbf{n} \times 1$  外部环境对机器人的作用力矩。为简化起见，我们设  $\mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q})$ ，于是 (2.5) 可写为：

$$\mathbf{D}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{h}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \boldsymbol{\tau}_f(\dot{\mathbf{q}}) = \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau}_e \quad (2.6)$$

机器人闭环系统满足以下阻抗关系式：

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} \quad (2.7)$$

### 2.2.2 力跟踪阻抗控制

自适应阻抗控制算法的结构图如图 2-4 所示：

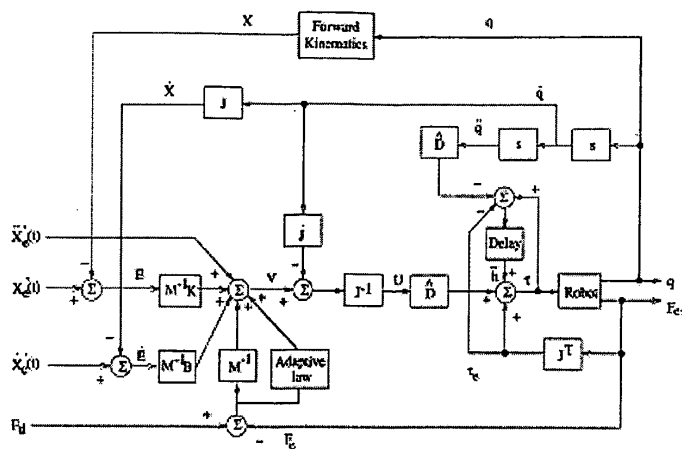


图 2-4 自适应阻抗控制算法的结构图

对(2.7)式中用 $\mathbf{X}_e$ 替换 $\mathbf{X}_r$ 且等式左侧 $\mathbf{F}_e$ 减掉期望的力 $\mathbf{F}_d$ , 则新的阻抗函数关系式为:

$$\mathbf{F}_e - \mathbf{F}_d = \mathbf{M}\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} \quad (2.8)$$

其中当  $\mathbf{X}_r = \mathbf{X}_e$  时  $\mathbf{E} = \mathbf{X}_e - \mathbf{X}$ ,  $\mathbf{X}_e$  是环境位置。为讨论的简化起见, 我们假设仅在一个方向上受力。令  $\mathbf{f}_d, \mathbf{f}_e, \mathbf{m}, \mathbf{b}, \mathbf{k}$  是矩阵  $\mathbf{F}_d, \mathbf{F}_e, \mathbf{M}, \mathbf{B}, \mathbf{K}$  的对应元素, 所以 (2.8) 式可写为:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{b}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}\mathbf{e} - \mathbf{f}_c + \mathbf{f}_d = \mathbf{0} \quad (2.9)$$

其中当  $\mathbf{e} = \mathbf{x}_c - \mathbf{x}$ , 控制算法是: 第一阶段当机器人向环境移动, 与环境尚未接触时的自由空间控制; 第二阶段当机器人末端与环境接触时的接触空间控制。在自由空间由于机器人与环境的接触力  $\mathbf{f}_c = \mathbf{0}$ , 由 (2.9) 式控制规律应为:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{b}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}\mathbf{e} = -\mathbf{f}_d \quad (2.10)$$

上式中  $\mathbf{f}_d$  是作为驱动力可使机器人对环境施加一个作用力。如果当环境的位置可精确知道, 设期望的力  $\mathbf{f}_d$  为 0, 则由 (2.10) 式可知机器人刚好与环境接触。在接触空间, 仔细分析阻抗关系式 (2.9) 可知, 设定刚度增益  $\mathbf{k} = \mathbf{0}$ , 对任意的环境刚度  $\mathbf{k}_e$  在  $\mathbf{f}_e = \mathbf{f}_d$  点将满足理想的状态稳定条件。因此, 对 (2.9) 式, 当机器人与环境接触时, 在力控方向设刚度增益  $\mathbf{k} = \mathbf{0}$ , 则 (2.9) 式为:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{b}\dot{\mathbf{e}} - \mathbf{f}_e + \mathbf{f}_d = \mathbf{0} \quad (2.11)$$

在位控方向上的刚度增益  $\mathbf{k}$  保持不变。机器人与环境的作用力我们可以看成弹簧的受力情况, 设  $\mathbf{f}_e = \mathbf{k}_e(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e) = -\mathbf{k}_e\mathbf{e}$ , 代入 (2.11) 式得到新的接触空间阻抗关系式:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{b}\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{k}_e\mathbf{e} = -\mathbf{f}_d \quad (2.12)$$

### 2.2.3 自适应阻抗控制

考虑到机器人实际的工作情况，我们只能得到环境位置的估计  $\mathbf{x}_e'$ ，它是不精确的。令  $\delta\mathbf{x}_e = \mathbf{x}_e' - \mathbf{x}_e$ ，以此来表示与精确环境信息  $\mathbf{x}_e$  的误差，当设计控制器时，可以用确定的值来代替。设  $\mathbf{e}' = \mathbf{e} + \delta\mathbf{x}_e$ ，对 (2.10)、(2.11) 式用  $\mathbf{e}'$  替换  $\mathbf{e}$  的到：

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{e}}' + \mathbf{b}\dot{\mathbf{e}}' + \mathbf{k}\mathbf{e}' = -\mathbf{f}_d \quad (\text{自由空间}) \quad (2.13)$$

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{e}}' + \mathbf{b}\dot{\mathbf{e}}' = \mathbf{f}_e - \mathbf{f}_d \quad (\text{接触空间}) \quad (2.14)$$

对机器人在自由空间的运动 (2.13)，文<sup>[23]</sup>的分析表明：当  $\delta\mathbf{x}_e < \mathbf{0}$  时，机器人末端不能保证一直与环境接触；当  $\delta\mathbf{x}_e > \mathbf{0}$  时，可以保证持续的接触。因此为了保证末端与环境能一直接触上，对  $\mathbf{x}_e'$  的估计应略大一些以始终获得  $\delta\mathbf{x}_e > \mathbf{0}$  来保证机器人能与环境接触上。对接触空间 (2.14)，设计以下的自适应阻抗方程来保证力误差的稳定性：

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{e}}' + \mathbf{b}(\dot{\mathbf{e}}' + \Omega) = \mathbf{f}_e - \mathbf{f}_d \quad (\text{接触空间}) \quad (2.15)$$

其中  $\Omega$  是依据力误差的自适应调整项，它用来补偿  $\mathbf{m}\ddot{\mathbf{x}}_e' + \mathbf{b}\dot{\mathbf{x}}_e'$  项。其表达式为：

$$\Omega(t) = \Omega(t - \lambda) + \eta \frac{(\mathbf{f}_d(t - \lambda) - \mathbf{f}_e(t - \lambda))}{\mathbf{b}} \quad \eta > 0 \quad (2.16)$$

其中  $\eta$  为更新率， $\lambda$  控制器的采样周期。由文<sup>[24]</sup>知：得到新的控制规律是稳定性的，且  $\eta$  必须满足：

$$0 < \eta < \frac{\mathbf{b}\lambda}{\mathbf{b}\lambda + \mathbf{m}}。$$

### 2.2.4 位置控制规律

结构框图 2-4 中提出的位置控制规律的基本思想是：使用以前的信息来抵消机器人高度复杂的不确定因素。机器人的动力学方程 (2.6) 可写为：

$$\hat{\mathbf{D}}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \bar{\mathbf{h}}(t) = \tau(t) \quad (2.17)$$

这里： $\bar{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{h}(t) + \tau_r(t) + \tau_e(t) + (\mathbf{D} - \hat{\mathbf{D}})\ddot{\mathbf{q}}(t)$ ，其中  $\hat{\mathbf{D}}$  是  $\mathbf{D}$  的估计值。选择控制规律：

$$\tau(t) = \hat{\mathbf{D}}\mathbf{u}(t) + \bar{\mathbf{h}}(t) \quad (2.18)$$

$$\text{由 (2.17),} \quad \bar{\mathbf{h}}(t) = \tau(t) - \hat{\mathbf{D}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}(t) \quad (2.19)$$

然而在实际控制中, 实时得到  $\tau(t)$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}(t)$  的值比较困难, 若使用上一采样时刻的值  $\tau(t-\lambda)$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}(t-\lambda)$ , 则控制规律在实际操作中比较容易实现。令  $\hat{\mathbf{h}}(t)$  为  $\bar{\mathbf{h}}(t)$  的估计, 它定义为:

$$\hat{\mathbf{h}}(t) = \bar{\mathbf{h}}(t-\lambda) = \tau(t-\lambda) - \hat{\mathbf{D}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}}(t-\lambda) \quad (2.20)$$

在每个采样周期里,  $\tau(t-\lambda)$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}(t-\lambda)$  可以较容易的保存。这时控制规律变成:

$$\tau(t) = \hat{\mathbf{D}}\mathbf{u}(t) + \hat{\mathbf{h}}(t) \quad (2.21)$$

$$\text{且 } \mathbf{u}(t) \cong \ddot{\mathbf{q}}(t) = \mathbf{J}^{-1}(\mathbf{V} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}) \quad (2.22)$$

这里:  $\mathbf{V} = \ddot{\mathbf{X}}$ ,  $\mathbf{J}$  为雅可比矩阵。由阻抗关系式, 得到  $\ddot{\mathbf{X}}$  为:

$$\mathbf{V} = \begin{cases} \ddot{\mathbf{X}}_e' + \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{F}_d + \mathbf{B}\dot{\mathbf{E}}' + \mathbf{K}\mathbf{E}')(\text{Position}) \\ \ddot{\mathbf{X}}_e' + \mathbf{M}'(\mathbf{F}_d - \mathbf{F}_e + \mathbf{B}(\dot{\mathbf{E}}' + \Omega))(\text{Force}) \end{cases} \quad (2.23)$$

控制规律变形为:

$$\tau(t) = \hat{\mathbf{D}}\mathbf{J}^{-1}[\mathbf{V} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\mathbf{q}}] + \tau(t-\lambda) - \hat{\mathbf{D}}\ddot{\mathbf{q}}(t-\lambda) \quad (2.24)$$

由文<sup>[24]</sup>该位控算法是稳定性的。文<sup>[26]</sup>中给出了  $\hat{\mathbf{D}}$  必须满足的条件:  $\hat{\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}$ , 且  $0 < \alpha < 2\rho$ ,

其中  $\rho$  为机械手惯性矩阵特征值的下界。

## 2.3 本章小结

力控制在机器人控制中是目前为止一种复杂的控制算法。特别是机器人与接触环境时, 由于要跟踪期望的轨迹的同时还要保持期望的力, 任务的难度可想而知。阻抗控制算法是近年来许多文献中广为研究的算法。通过设定阻抗函数, 由力、速度、位置的误差来实现该函数。自适应阻抗控制算法的主要思想是在跟踪环境位置时, 通过自适应增益来减小力误差, 该算法不需要获得环境刚度的知识, 所以无论对机器人动力学模型, 还是对未知的环境位置或刚度该算法都有一定鲁棒性。

### 第三章 阻抗控制算法的仿真研究

#### 3.1 前言

##### 3.1.1 仿真工具箱简介

任何高深的理论都要经过实践的检验才能成为人们改造自然的工具，控制理论也不例外。随着科学技术的发展，控制理论和系统的研究越来越重要。控制理论自四十年代作为一门独立的学科出现以来已经得到了迅速的发展。开始时控制系统的设计可以以纸笔等工具容易的计算出来，但随着科学技术的发展，系统的控制效果要求的越来越高，控制算法越来越复杂，控制器的设计也越来越困难，这样仅利用传统的计算方法纸、笔及计算器等简单的运算工具难以达到预期的效果。由于计算机技术的迅猛发展，控制系统的计算机辅助设计方法就很自然的出现了。

1980年美国的 Cleve Moler 博士研制的 MATLAB 语言对当今控制系统的仿真起着巨大的推动作用。MATLAB 语言使用方法简单，有丰富的矩阵处理能力，集成了大量的配套控制理论 CAD 工具箱。其中 MathWorks 公司推出的基于 MATLAB 平台的 Simulink 是动态系统仿真领域中最著名的仿真集成环境之一，它在各个领域得到广泛的应用，特别是控制系统研究人员的必备工具。Simulink 能够帮助用户迅速构建自己的动态系统模型，并在此基础上进行仿真分析；通过仿真结果修正系统设计，从而快速完成系统的设计。Simulink 集成环境的运行受到 MATLAB 的支持，因此 Simulink 能够直接使用 MATLAB 强大的科学计算功能。毫无疑问，Simulink 具有出色的能力，因此它在系统仿真领域中有着重要的地位。本文的仿真研究即是在 MATLAB/Simulink 软件环境中完成的。

##### 3.1.2 仿真中采用的机器人模型

由于要仿真试验的控制算法中有的要求使用精确的机器人动力学模型，但在实际的机器人上精确的动力学模型一般很难得到，所以为了便于比较 Hogan 的算法及 Seul 的自适应阻抗控制算法的不同长处，本章采用在机器人仿真研究中常采用的 2R 平面机械手模型，所有算法均在该模型下实验。机器人如图 3-1 所示：

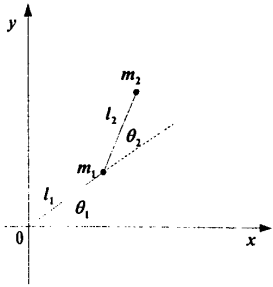


图 3-1 机械手示意图

假设该平面机械手的质量集中在连杆的末端。且其质量为：

$m_1 = m_2 = 1\text{Kg}$ ，连杆长度为： $l_1 = l_2 = 1\text{m}$ 。采用牛顿—欧拉

递推的方法建立该平面机器人的动力学方程：

$$D(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta) = \tau \quad (3.1)$$

其中：力矩向量  $\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$ ，关节角向量  $\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$ 。

$$\begin{aligned}\tau_1 &= m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \cos \theta_2 + (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 - m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_2^2 \\ &\quad - 2m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 + m_2 l_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2) + (m_1 + m_2) l_1 g \cos \theta_1 \\ \tau_2 &= m_2 l_1 l_2 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 + m_2 l_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2) + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \quad (3.2)\end{aligned}$$

整理 (3.1) 式可得到该平面机械手的惯性矩阵、离心力哥氏力矢量、重力矢量如下:

$$\begin{aligned}D(\theta) &= \begin{bmatrix} m_2 l_2^2 + 2l_1 l_2 m_2 \cos \theta_2 + (m_1 + m_2) l_1^2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos \theta_2 & m_2 l_2^2 \end{bmatrix} \\ C(\theta, \dot{\theta}) &= \begin{bmatrix} -m_2 l_2 l_1 \dot{\theta}_2^2 \sin \theta_2 - 2m_2 l_2 l_1 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \\ m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1^2 \sin \theta_2 \end{bmatrix} \\ g(\theta) &= \begin{bmatrix} m_2 l_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2) + (m_1 + m_2) l_1 g \cos \theta_1 \\ m_2 l_2 g \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}\end{aligned}$$

以上参数可以看出惯性矩阵是  $2 \times 2$  的对称矩阵, 并且可以验证它是正定的, 因此其逆是存在的。运用几何的方法可以建立图 3-1 机器人的运动学方程为:

$$\begin{cases} x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{cases} \quad (3.3a)$$

由以上 (3.3a) 式可求出其雅可比矩阵, 进而求出雅可比矩阵的逆及其导数阵:

$$\begin{aligned}J &= \begin{bmatrix} -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \\ J^{-1} &= \frac{1}{l_1 l_2 \sin \theta_2} \begin{bmatrix} l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_1 \cos \theta_1 - l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) & -l_1 \sin \theta_1 - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \\ \dot{J} &= \begin{bmatrix} -l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) & -l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix}\end{aligned}$$

### 3.1.3 仿真中的几点假设

机器人关节的耦合性、非线性等诸多问题, 导致了机器人控制系统研究的复杂性。为了简化问题, 突出本文研究的重点, 在仿真过程中作以下假设:

- (1) 当机器人与环境表面接触时, 假设环境表面是无磨擦的。
- (2) 将机器人末端与环境接触时的受力情况完全可以用弹簧的弹性形变来代替。

## 3.2 阻抗控制算法仿真实验研究

将上述 (3.1) 式中。令  $h(\theta, \dot{\theta}) = C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta)$ , 当机械手末端与环境接触时手臂动力学方

程可表示为:

$$\mathbf{D}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{h}(\theta, \dot{\theta}) = \tau + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_{\text{ext}} \quad (3.3b)$$

式中  $\theta$  为关节角矢量,  $\mathbf{D}(\theta)$  为惯性矩阵,  $\mathbf{h}(\theta, \dot{\theta})$  为包括离心、哥氏、重力和摩擦引起非线性关节力矩,  $\mathbf{J}$  为雅可比矩阵,  $\mathbf{F}_{\text{ext}}$  为作用在手臂末端的外力。机器人手臂的目标阻抗可由下式表示:

$$\mathbf{M}\mathbf{d}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\mathbf{d}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{d}\mathbf{X} = \mathbf{F}_{\text{ext}} \quad (3.4)$$

式中  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{K}$  分别为机器人手臂的目标惯性、阻尼和刚度矩阵,  $\mathbf{d}\mathbf{X} = \mathbf{X}_d - \mathbf{X}$  表示手臂目标位置和当前位置之间的位移。为实现上述目标阻抗, 应采用如下的控制规律:

$$\tau = \mathbf{D}(\theta)\mathbf{J}^{-1}[\ddot{\mathbf{X}}_d - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}\mathbf{d}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{d}\mathbf{X}) - \dot{\mathbf{J}}\dot{\theta}] - (\mathbf{J}^T - \mathbf{D}(\theta)\mathbf{J}^{-1}\mathbf{M}^{-1})\mathbf{F}_{\text{ext}} + \mathbf{h}(\theta, \dot{\theta})$$

在机器人手臂腕部需安装腕力传感器用来检测机器人末端环境的接触力, 仿真过程中用弹簧的弹性形变来代替, 其表达式为:  $\mathbf{F}_{\text{ext}} = \mathbf{K}_e(\mathbf{X} - \mathbf{X}_e)$ , 其中:  $\mathbf{K}_e$  为环境的刚度,  $\mathbf{X}_e$  为初始环境位置。阻抗控制算法的控制结构图如图 3-2 所示:

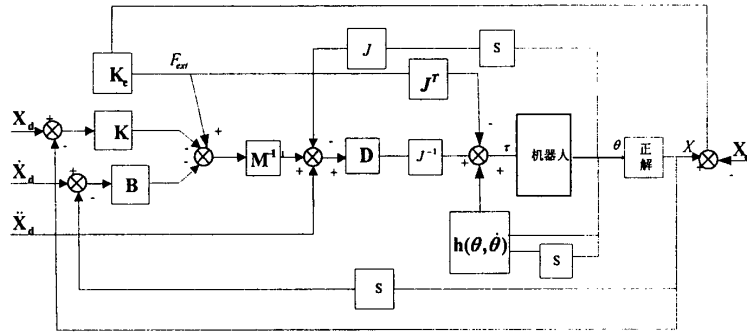


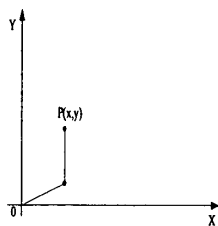
图 3-2 阻抗控制算法控制示意图

### 3.2.1 自由空间的位置跟踪仿真

#### 3.2.1.1 不同输入信号下的位置跟踪仿真

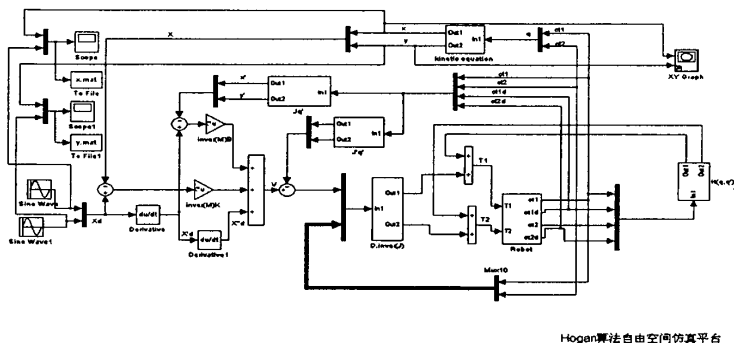
假设机器人的末端为  $P(x, y)$ , 关节 1 的起始位置为:  $\frac{\pi}{6}$ , 关节 2 的起始位置为:  $\frac{\pi}{3}$ , 关节 1、2 的起始速度均为 0。其初始位置如图 3-3 所示, 因此末端的初始位置为:  $P(\frac{\sqrt{3}}{2}, 1.5)$ , 要求机械手从如图所示的位置开始运动。此时手臂末端与环境的接触力为 0, 阻抗参数选取为:  $\mathbf{M} = \mathbf{I}$ ,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}.$$



3-3 机械手示意图

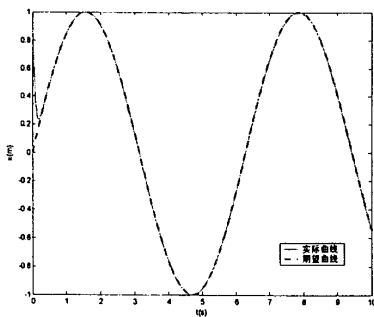
在 Simulink 下的仿真平台见图 3-4，仿真中采用定步长，龙阁库塔（ode4）算法。



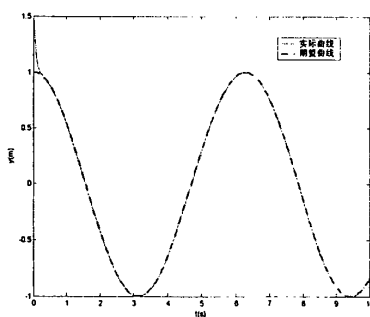
Hogan算法自由空间仿真平台

图 3-4 阻抗控制算法自由空间仿真平台

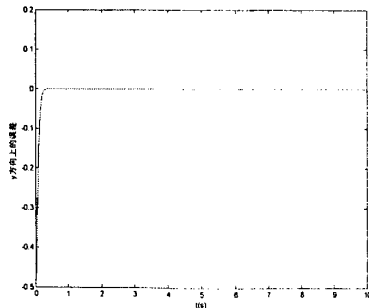
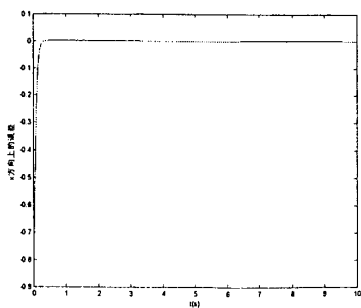
(1) 在机器人末端  $x$  方向上加入幅值为 1 的正弦信号  $x = \sin t$ ， $y$  方向上加入幅值为 1 的余弦信号  $y = \sin(t + \frac{\pi}{2})$ 。起始时间为 0 秒，仿真步长为 0.001 秒，仿真时间为 10 秒。机械手末端  $x$ 、 $y$  方向上的位置跟踪情况见下图 3-5:



(a)  $x$  方向上的位置跟踪情况

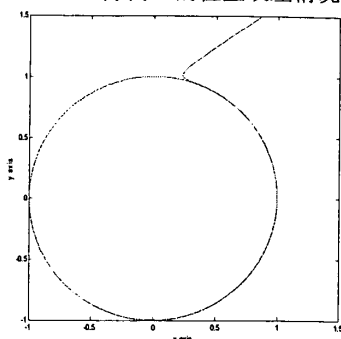


(b)  $y$  方向上的位置跟踪情况





(c) x 方向上的位置误差情况



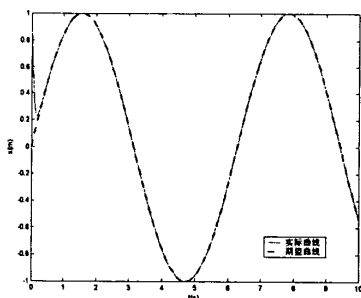
(e) 末端的运动轨迹

图 3-5 位置跟踪曲线

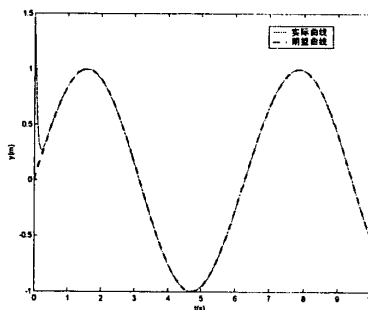
(d) y 方向上的位置误差情况

由上图可以看出在  $x$  方向上 0.35 秒,  $y$  方向上 0.3 秒末端位置已能跟踪上给定的信号。图 3-5 (e) 给出了机械手的末端在给定输入信号下平面内 10 秒的运动轨迹。

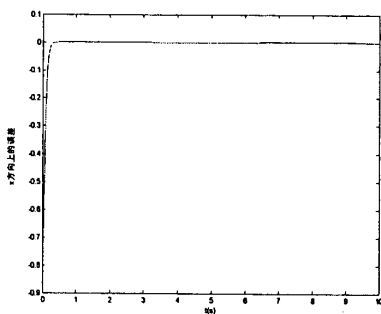
(2) 在机器人末端  $x$  方向上加入幅值为 1 的正弦信号  $x = \sin t$ ,  $y$  方向上加入幅值为 1 的正弦信号  $y = \sin t$ 。起始时间为 0 秒, 仿真步长为 0.001 秒, 仿真时间为 10 秒。机械手末端  $x$ 、 $y$  方向上的位置跟踪情况见下图 3-6:



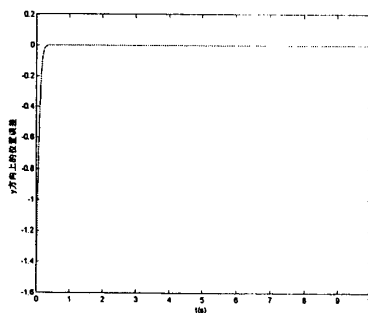
(a) x 方向上的位置跟踪情况



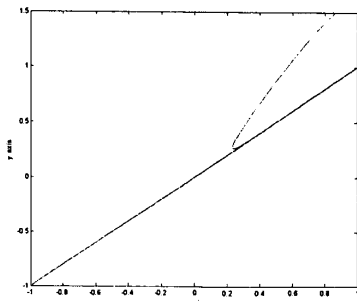
(b) y 方向上的位置跟踪情况



(c) x 方向上的位置误差



(d) y 方向上的位置误差



(e) 末端的运动轨迹

由上图可以看出在  $x$  方向上 0.38 秒,  $y$  方向上 0.38 秒末端位置已能跟踪上给定的信号。图 3-6 (e) 给出了机械手的末端在给定输入信号下平面内的运动轨迹。

图 3-6 位置跟踪曲线

(3) 在机器人末端  $x$  方向上加入斜率为 1 的斜坡信号  $x=t$ ， $y$  方向同时加入斜率为 1 的斜坡信号  $y=t$ 。起始时间为 0 秒，仿真步长为 0.001 秒，仿真时间为 2 秒。机械手末端  $x$ 、 $y$  方向上的位置跟踪情况见下图 3-7:

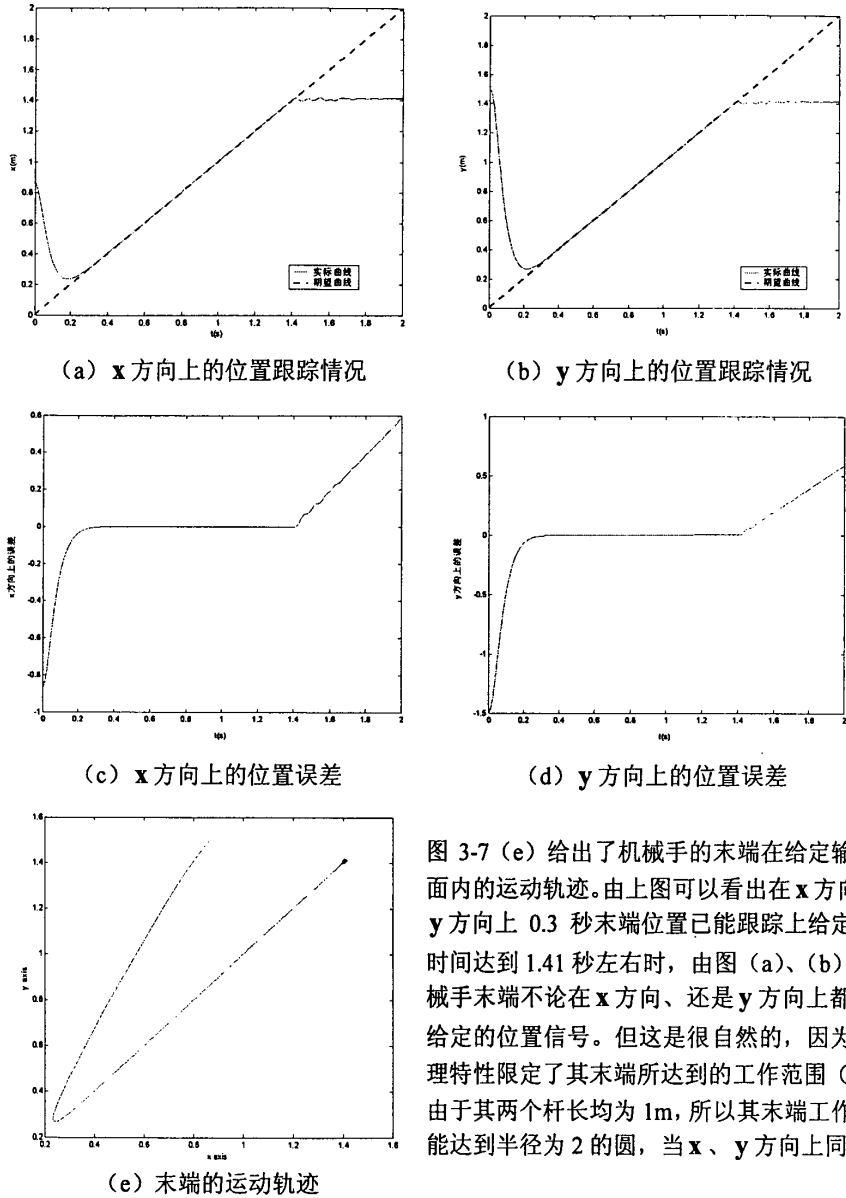
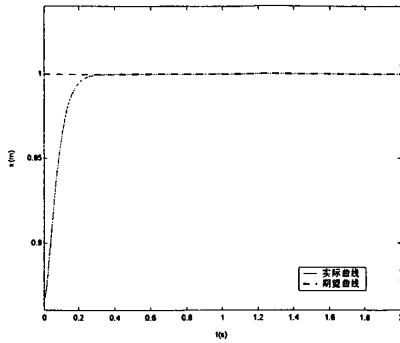


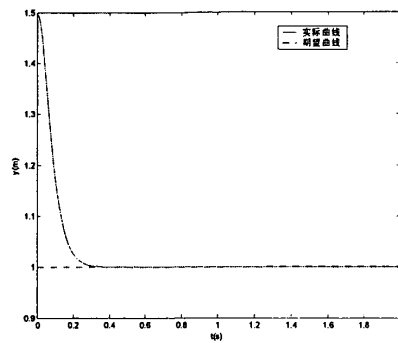
图 3-7 位置跟踪曲线

斜坡信号时，在这两个方向上达到最大值应为 1.414，仿真结果验证了数学上的分析。

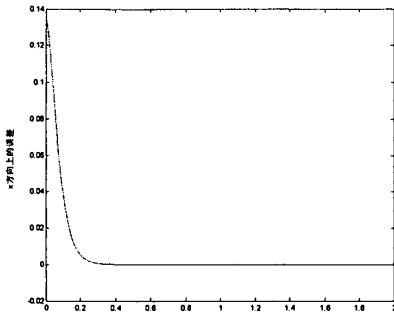
(4) 在机器人末端  $x$  方向上加入幅度为 1 的阶跃信号  $x=1$ ， $y$  方向输入相同的信号。起始时间为 0 秒，仿真步长为 0.001 秒，仿真时间为 2 秒。机械手末端  $x$ 、 $y$  方向上的位置跟踪情况见下图:



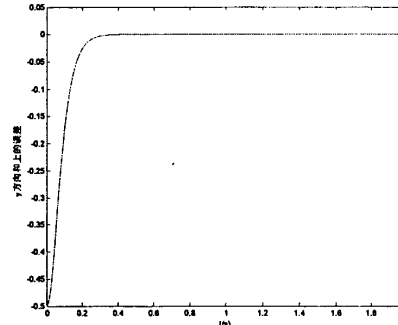
(a) x 方向上的位置跟踪情况



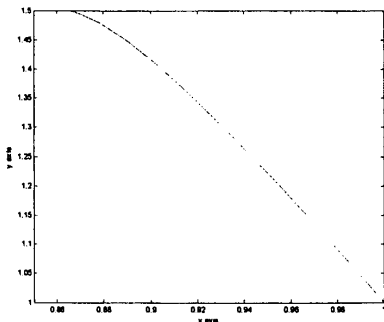
(b) y 方向上的位置跟踪情况



(c) x 方向上的位置误差



(d) y 方向上的位置误差



(e) 末端的运动轨迹

图 3-8 位置跟踪曲线

由图 3-8 可以看出在 x 方向上 0.32 秒, y 方向上 0.32 秒末端位置已能跟踪上给定的信号。图 3-8 (e) 给出了机械手的末端在给定输入信号下平面内的运动轨迹。

### 3.2.1.2 目标阻抗参数对控制性能的影响

本文仅以 x 方向为例, 研究阻抗控制算法中惯性、阻尼、刚度参数对位置控制性能的影响。机械手的位置及关节角仍同上节图 3-3 所示。在机器人末端 x 方向上加入幅度为 1 的阶跃信号  $x=1$ , y 方向输入相同的信号  $y=1$ 。起始时间为 0 秒, 仿真步长为 0.001 秒。

#### (1) 调整阻尼参数对位置跟踪的影响

我们保持参数  $M=I$ ,  $K=\begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$  不变, 将阻尼参数分别设置为 10、30、50、100 得到

阶跃信号的响应曲线见图 3-9 所示:

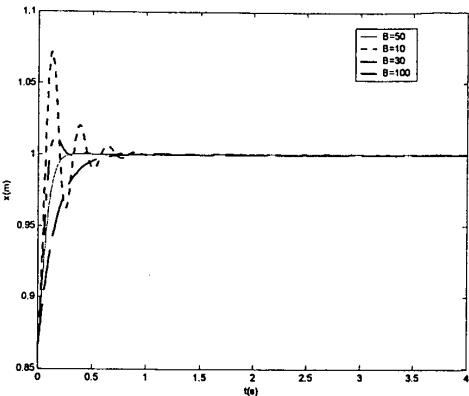


图 3-9 阻尼参数对位置跟踪的影响曲线

图 3-9 中的性能指标见表 3-1 所示:

B	稳态值	超调	稳定时间 (s)
10	1	7%	1.21
30	1	2%	0.42
50	1	0	0.32
100	1	0	1.17

表 3-1 图 3-9 的性能指标

由表 3-1 可以清晰的看出仿真所反映出的问题: 当存在超调时, 增大系统的阻尼参数  $B$  可以使阶跃响应曲线趋于平滑; 但当超调消失后, 增大  $B$  反而会使系统的阶跃响应速度减缓。对以上结果我们作以下分析: 由阻抗关系式 (3.4)

$$M d\ddot{X} + B d\dot{X} + K dX = F_{ext}$$

此为一个二阶系统, 在惯性、刚度参数分别为 1、625 的情况下, 可以计算出当阻尼参数为 50 时, 系统处于临界阻尼状态。所以才会出现表 3-1 中的结论。

(2) 调整刚度参数对位置跟踪的影响

保持参数  $M=I$ ,  $B=\begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$  不变, 将刚度参数分别设置为 300、625、1000、4000 得到阶

跃信号的响应曲线见图 3-10 所示:

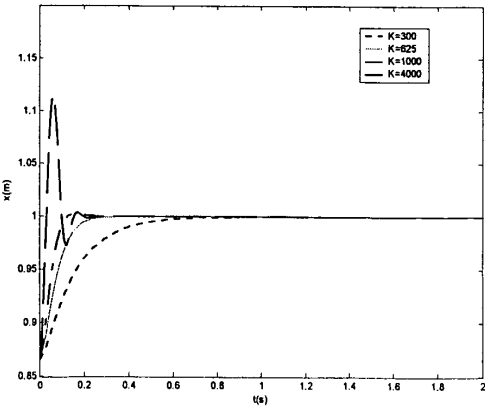


图 3-10 刚度参数对位置跟踪的影响曲线

图 3-10 中的性能指标见表 3-2 所示:

K	稳态值	超调	稳定时间 (s)
300	1	0	1.14
625	1	0	0.32
1000	1	0.24%	0.24
4000	1	11.5%	0.3

表 3-2 图 3-10 的性能指标

由表 3-2 及图 3-10 可以看出: 随着 K 的增大达到稳定的时间在减小; 但当 K 继续增大出现超调后, 响应曲线有震荡, 并且达到稳定的时间反而又增加了。由 (3.4) 知, 系统的极点表达式为:

$$s = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4MK}}{2M}, \text{ 当 } K=625 \text{ 时, 系统处于临界阻尼状态, 系统的极点当 } K \leq 625 \text{ 时均处于}$$

负实轴上; 当  $K > 625$  时, 系统的极点对称于实轴位于左半平面内, 并且 K 越大两极点距离负实轴越远, 即 K 越大系统的响应曲线震荡越剧烈。

### (3) 调整惯性参数对位置跟踪的影响

保持阻尼参数及刚度参数不变, 即  $B = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ,  $K = \begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$ , 将惯性参数依次作以下

调整: 分别设为 30、10、1、0.2, 得到系统阶跃信号的响应曲线为图 3-11:

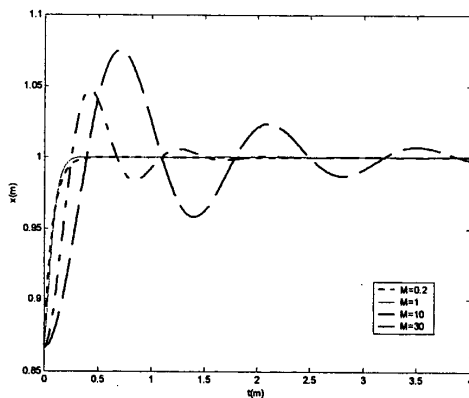


图 3-11 惯性参数对位置跟踪的影响曲线

图 3-11 中的性能指标见表 3-3 所示:

M	稳态值	超调	调节时间 (s)
30	1	6.5%	1.32
10	1	4.8%	0.6
1	1	0	0.32
0.2	1	0	0.59

表 3-3 图 3-11 的性能指标

由图 3-11 及表 3-3 可以看出, 随着 M 的减小, 系统的阶跃响应速度加快, 但当超调为零后, 惯性参数若继续减小, 调节时间会延长; 当惯性参数较大时, 响应曲线存在超调。为了分析以上出现的情况, 我们重新考虑一下阻抗控制的目的: 用目标阻抗代替实际的机器人动力学模型。惯性参数反映了机械手的加速特性, 当惯性参数较实际惯性大时, 表明机械手的惯性量较大所以位置达到稳态值的调节时间较长且有超调; 当惯性较实际惯性小时, 表明机械手的惯性量较小, 所以位置达到稳态值的调节时间也较实际惯性时长。

### 3.2.2 力约束空间下的力控制仿真

下面考虑当机械手末端与环境接触，且与环境的接触力不为 0 时的情况。如图 3-12 所示，

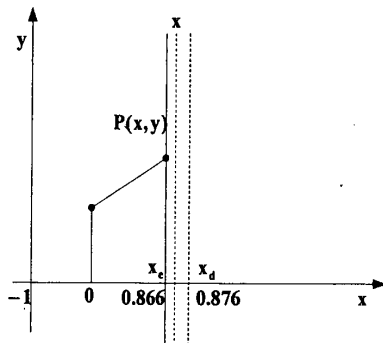


图 3-12 机械手位置示意图

力控仿真平台见下图 3-13 所示:

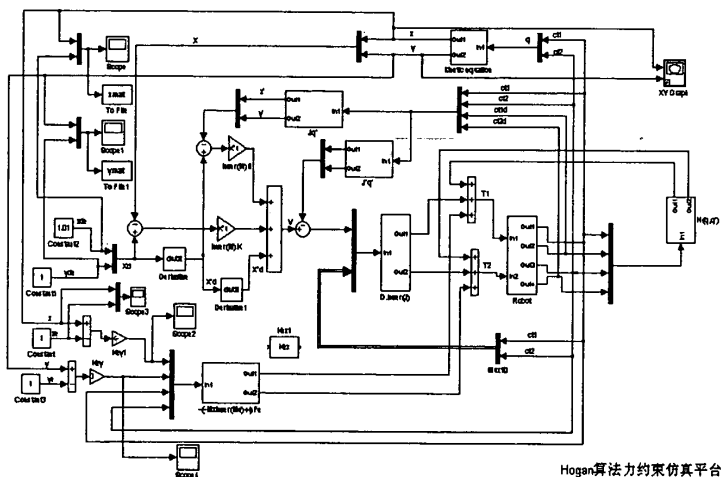


图 3-13 阻抗控制算法力约束仿真平台

#### 3.2.2.1 阶跃信号下的力跟踪仿真

(1) 为了说明问题, 仿真中只考虑了一个方向上的受力情况。设机械手的末端点  $P(x, y)$ , 关节 1 的起始位置为:  $\frac{\pi}{2}$ , 关节 2 的起始位置为:  $-\frac{\pi}{3}$ , 关节 1、2 的起始速度均为 0, 此时末端点的起始点为  $P(0.866, 1.5)$ , 末端点刚好与坐标为 0.866 的一面墙接触。对末端  $x$  方向上加入  $x_d = 0.876$  的阶跃信号,  $y$  方向上加入  $y_d = 1.5$  的信号, 环境信号 (即墙的位置)  $x_c = 0.866$ ,  $y_c = 1.5$ 。

阻抗参数取为:  $\mathbf{M}=\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{B}=\begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{K}=\begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$ , 环境刚度  $x$  方向上  $\mathbf{K}_{ex}=4000$ ,  $y$  方

向上的环境刚度设为 0。仿真结果见图 3-14 所示：

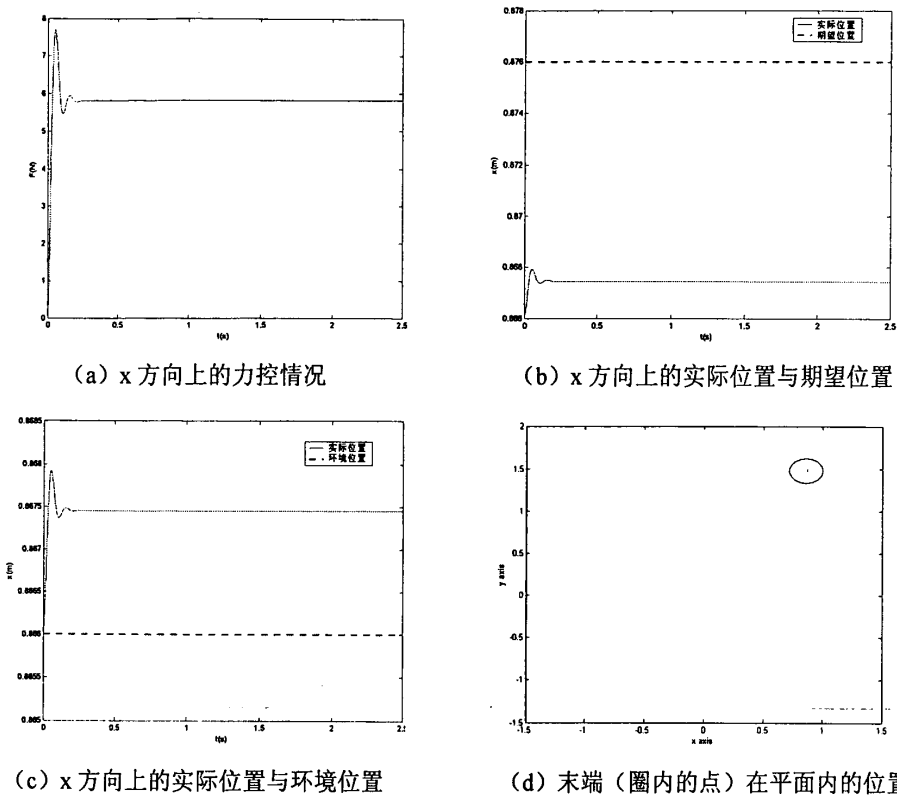
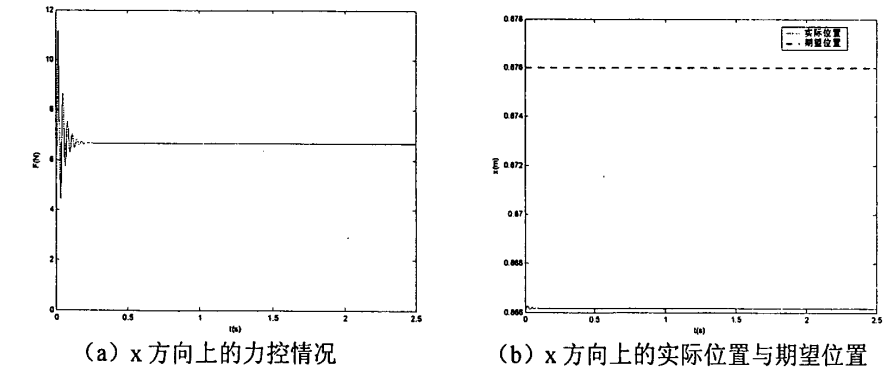


图 3-14 力和位置的仿真情况

从以上仿真结果 (a) 中可以看出，由于 x 方向上环境存在弹性形变，所以机械手末端在 x 方向上受到外力的作用，受力的峰值为 7.7N，上升时间为 0.031 秒，峰值时间为：0.053 秒，振荡次数为 4 次，在 0.265 秒后末端与环境的接触力可以稳定在 5.81N。算法在上述阻抗参数下将机械手的末端力控制在可以承受的值上。

(2) 变化环境刚度，令  $K_{ex} = 40000$ ，其他条件同 (1)，仿真结果见图 3-15 所示：



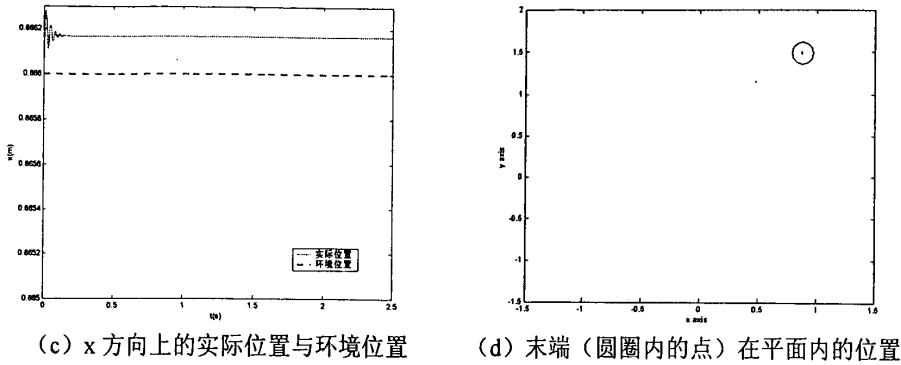


图 3-15 力和位置的仿真情况

由于环境刚度大大增加了，由以前的 4000 变为 40000，所以机械手末端接触到的环境硬度更大了，末端承受的力也相应会增加，从图 (a) 可以看出受力的峰值为 11.16N，上升时间 0.009 秒，峰值时间为：0.017 秒，振荡次数 9 次，力的稳定值也由以前的 5.81 增大到 6.658N。由上述数据可以看出，环境刚度的变化对力的峰值及稳定值是有较大影响的。当机械手与刚性较大的环境接触时，其末端所受的力会因环境刚度的增加而不断增大，以至于超出机械手对环境能正常工作所能承受的范围，从而会对机械手或者环境造成很大的损伤。因此要调节阻抗参数将末端力控制在一个可以承受的范围，以此来保证机械手的正常工作，这也是研究本课题的真实价值所在。

3.2.2.2 目标阻抗参数对力控制性能的影响

合理的调整阻抗参数，将机械手与环境的接触力控制在一个合理的范围内，是实现机械手正常工作的必要条件，下面将分步研究各阻抗参数的调整对末端受力的影响。环境刚度均设为  $K_{ex} = 4000$ ，输入信号条件同上节。

(1) 调节惯性参数对力控制性能的影响

阻抗参数保持  $B = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ， $K = \begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$  不变，调节惯性参数依次为 2、1、0.5、0.2，

得到系统的力响应曲线为图 3-16:

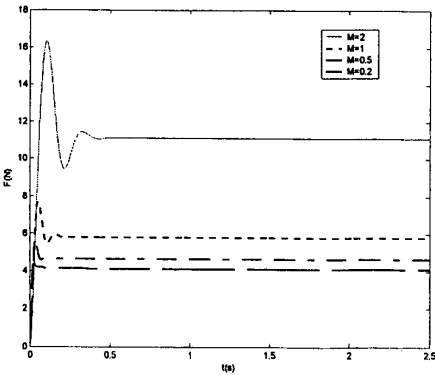


图 3-16 变化惯性参数对力控制性能的影响曲线

图 3-16 的性能指标见表 3-4:

M	峰值 (N)	稳态值 (N)	稳定时间 (s)
---	--------	---------	----------



2	16.34	11.117	0.48
1	7.7	5.81	0.265
0.5	5.593	4.614	0.15
0.2	4.38	4.135	0.13

表 3-4 图 3-16 的性能指标

由以上图表可以看出当惯性参数由大变小时，其力峰值及稳态值在减小，稳定时间逐渐减小。

由阻抗关系式我们分析以上出现问题的原因。对阻抗关系式 (3.4):  $Md\ddot{X} + Bd\dot{X} + KdX = F_{ext}$ ,

当惯性参数增大时，上述等式左侧在增大，所以力的瞬态值在增大，反之当惯性参数减小时，力的瞬态值在减小。这也同直观上的理解相吻合，当物体的惯性质量增大时，它所具有的惯性相应也会增大，所以当它与环境物体发生碰撞后产生的接触力也会加大，反之亦然。阻抗控制的目标就是：若由于原机械手自身的惯性参数等阻抗参数导致其末端与环境接触时产生的力较大，通过根据环境情况设定合理的阻抗参数，以此参数来代替原有机机械手自身的参数，达到合理的控制末端力的效果，从而一方面能使机械手顺利的完成任务，另一方面可以保护机械手和环境免受损伤。

## (2) 调解阻尼参数对力控制性能的影响

保持惯性参数、刚性参数  $M=I$ ,  $K=\begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$  不变，阻尼参数依次调节为：30、50、100、

200，得到系统的力响应曲线为图 3-17：

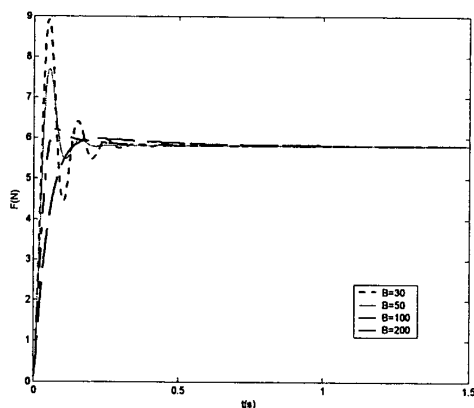


图 3-17 阻尼参数对力控制性能的影响曲线

图 3-17 的性能指标见表 3-5：

B	峰值 (N)	稳态值 (N)	稳定时间 (s)
30	8.923	5.81	0.48
50	7.7	5.81	0.265
100	6.21	5.81	0.83
200	5.975	5.81	1.2

表 3-5 图 3-17 的性能指标

在以上阻尼参数的取值下均可将力稳定在一个恒值上，但所获得的性能却不同。当阻尼较小时，得到的力峰值较大而且震荡次数较多，达到稳定的时间较长。当阻尼参数取 50 时，达到临界阻尼状态，这时达到稳定的时间较短；但若继续增大阻尼参数，使系统处于过阻尼状态，虽然会使获得的力峰值下降甚至去掉超调，但这是以稳定时间延长为代价的。

## (3) 调解刚度参数对力控制性能的影响

保持惯性、阻尼参数  $M=I$ ,  $B=\begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$  不变，将刚度参数依次调解为：400、625、1000、

3000 得到系统的力响应曲线为图 3-18:

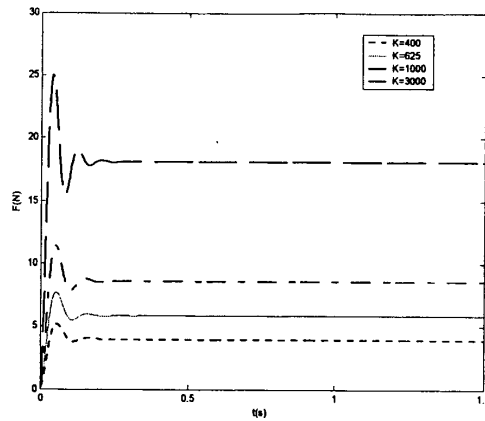


图 3-18 刚度参数对力控制性能的影响曲线

图 3-18 的性能指标见表 3-6:

K	力峰值 (N)	稳态值 (N)	稳定时间 (s)
400	5.16	3.918	0.228
625	7.7	5.81	0.265
1000	11.42	8.56	0.294
3000	18.4	13.275	0.31

表 3-6 图 3-18 的性能指标

由以上图表可以看出:当机械手末端的刚度不断增加,也就是说机械手末端越来越硬,当其与环境接触后,产生的接触力会越来越大,震荡的幅度也会越来越剧烈,从而调节时间会越来越长。所以调节末端的刚度参数非常重要,它不但可以使力控制在一个可以承受的值上,而且可以得到较合适的调节时间。

### 3.2.2.3 变化环境刚度对末端承受力的影响

我们设阻抗参数  $\mathbf{M} = \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$  不变,仅调节环境刚度,依次为

2000、4000、40000,得到系统的力响应曲线为图 3-19:

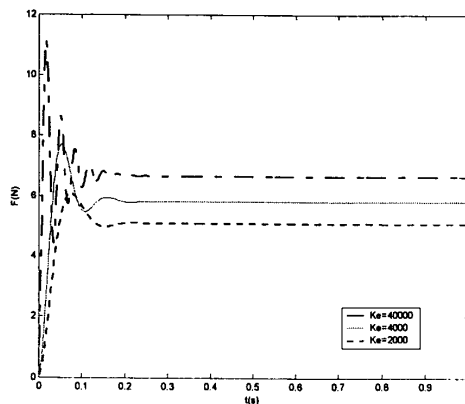


图 3-19 环境刚度对末端承受力的影响曲线

图 3-19 的性能指标见表 3-7:

$K_e$	力峰值 (N)	稳态值 (N)	稳定时间 (s)
2000	6.075	5.088	0.28
4000	7.7	5.81	0.265
40000	11.16	6.66	0.35

表 3-7 图 3-19 的性能指标

仿真结果表明: 当环境刚度不断增加时, 力稳态值是不断增加的, 即末端与环境的接触力是不不断增加的, 但形成这种情况的过程却是比较复杂的。当环境刚度不断增加时, 力峰值呈现的趋势是不不断增加。当机械手去碰一个越来越硬的物体时, 碰撞的瞬间产生的冲击力会越来越大。

3.3 自适应阻抗控制算法仿真实验研究

传统的阻抗控制算法虽然可以将机械手的末端力控制在一个允许的范围内, 但它必须要求建立机械手精确的动力学模型, 然而这一点在实际工程中是很难做到的。另外, 即使它可以将力控制在一个合适的范围内, 却不能稳定到期望的值上, 这无疑对力的精确控制产生困难。自适应阻抗控制的提出正是解决了上述控制算法的弊端, 它的最大成功之处在于不需要建立机械手精确的动力学模型, 只需要建立一个估计模型即可, 这大大降低了算法应用的条件, 更加贴合实际的工程需要。而且它对环境刚度的变化有一定的鲁棒性, 即对变化的环境刚度, 算法依然可以将接触力控制在期望的值上。

3.3.1 自适应控制算法惯性矩阵的估计技术

自适应算法的理论基础已在第二章具体介绍过了, 这里不再重述。这里只想说明的是如何运用文<sup>[26]</sup>的技术来估计本文所采用的  $\hat{D}$  的问题, 这是运用该控制算法的关键所在, 算法的实现无论在位控还是在力控上都将用到该值。由本文以上建立的 2R 机械手的动力学模型(3.1)式可得到该机械手的惯性矩阵为:

$$D(\theta) = \begin{bmatrix} m_2 l_2^2 + 2l_1 l_2 m_2 \cos\theta_2 + (m_1 + m_2) l_1^2 & m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos\theta_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 l_1 l_2 \cos\theta_2 & m_2 l_2^2 \end{bmatrix}$$
 且其质量为:

$m_1 = m_2 = 1Kg$ , 连杆长度为:  $l_1 = l_2 = 1m$ 。将这些参数带入到惯性矩阵中得:

$$D(\theta) = \begin{bmatrix} 3 + 2\cos\theta_2 & 1 + \cos\theta_2 \\ 1 + \cos\theta_2 & 1 \end{bmatrix}$$
, 由公式  $|\lambda I - D(\theta)| = 0$  可以计算出该惯性矩阵的特征值

为:  $\lambda = 2 + \cos\theta_2 \pm \sqrt{2}(1 + \cos\theta_2)$ , 由于  $\theta_2$  可以在  $-\pi$  到  $\pi$  之间取值, 所以其特征值的下界为:

$\lambda = 3 - 2\sqrt{2} = 0.172$ 。由文<sup>[26]</sup>  $\hat{D} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}$ , 且  $0 < \alpha < 2\rho$ , 其中  $\rho$  为机械手惯性矩阵特征值的

下界。因此,  $0 < \alpha < 0.344$ , 仿真中的  $\alpha$  就是在这个范围取得, 并且取不同的值将会有不同的控制性能, 通过仿真试验可以确定一个较好的  $\alpha$  值, 从而确定一个较好的惯性矩阵的估计值。

### 3.3.2 自由空间下的位置跟踪仿真

#### 3.3.2.1 不同输入信号下的位置跟踪仿真

仿真的初始条件与 3.2.1.1 节中一样。假设机器人的末端为  $P(x,y)$ , 关节 1 的起始位置为:  $\frac{\pi}{6}$ , 关节 2 的起始位置为:  $\frac{\pi}{3}$ , 关节 1、2 的起始速度均为 0。其初始位置如图 3-3 所示, 因此末端的初始位置为:  $P(\frac{\sqrt{3}}{2}, 1.5)$ 。起始时间为 0 秒, 仿真步长为: 0.001 秒。要求机械手从该点的位置开始运动。阻抗参数选取为:  $M=I$ ,  $B=\begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ,  $K=\begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$ , 控制器的设计中惯性矩阵的估计值取为:  $\hat{D}=\begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$ 。在 Simulink 下的仿真平台见图 3-20 所示, 为了与阻抗控制算法的性能对照, 加入的信号相同。

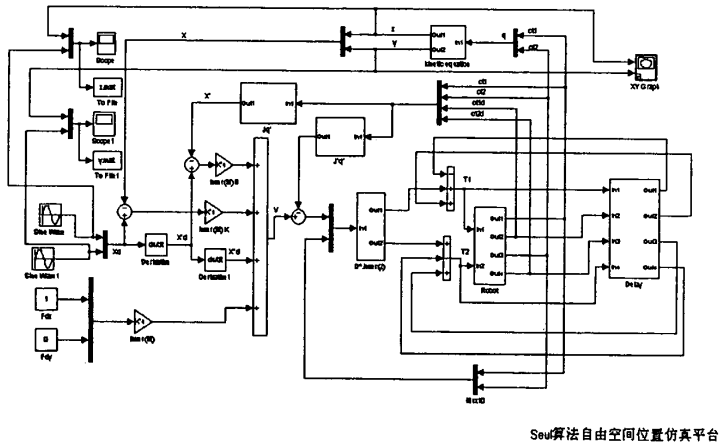
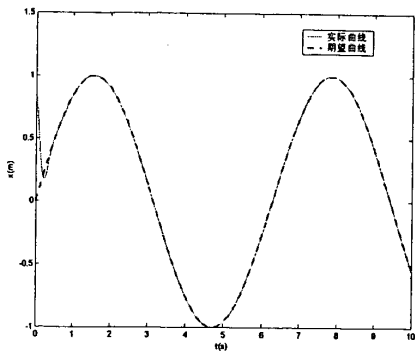
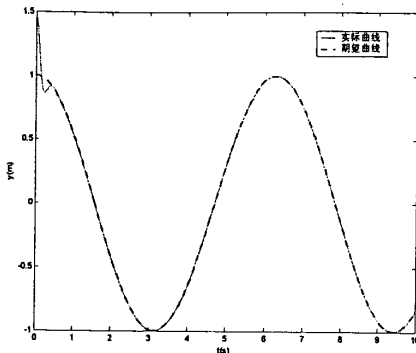


图 3-20 自适应阻抗控制算法位置仿真平台

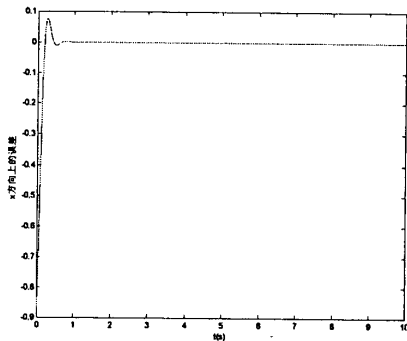
(1) 在机器人末端  $x$  方向上加入幅值为 1 的正弦信号  $x = \sin t$ ,  $y$  方向上加入幅值为 1 的余弦信号  $y = \sin(t + \frac{\pi}{2})$ 。起始时间为 0 秒, 仿真步长为 0.001 秒, 仿真时间为 10 秒。机械手末端  $x$ 、 $y$  方向上的位置跟踪情况见下图 3-21:



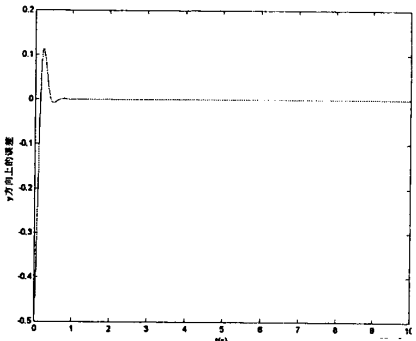
(a) x 方向上的位置跟踪情况



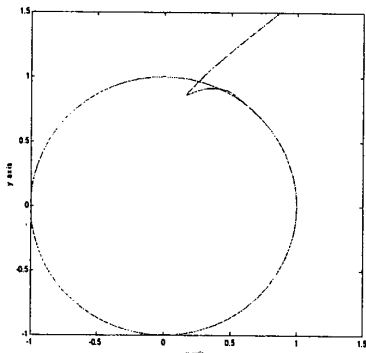
(b) y 方向上的位置跟踪情况



(c) x 方向上的位置误差



(d) y 方向上的位置误差



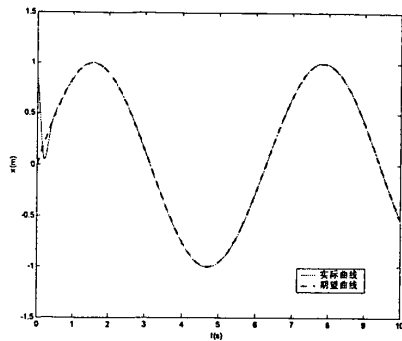
(e) 末端的运动轨迹

由上图可以看出在  $x$  方向上 0.65 秒， $y$  方向上 0.59 秒末端位置已能跟踪上给定的信号。图 3-21 (e) 给出了机械手的末端在给定输入信号下平面内 10 秒的运动轨迹。

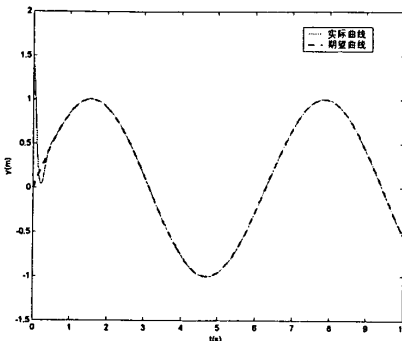
图 3-21 机械手位置跟踪曲线

(2) 在机器人末端  $x$  方向上加入幅值为 1 的正弦信号  $x = \sin t$ ， $y$  方向上加入幅值为 1 的正弦信号

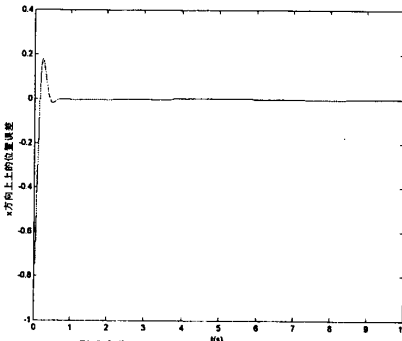
$y = \sin t$ 。机械手末端  $x$ 、 $y$  方向上的位置跟踪情况见下图 3-22:



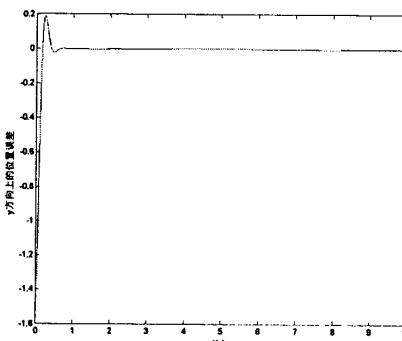
(a) x 方向上的位置跟踪情况



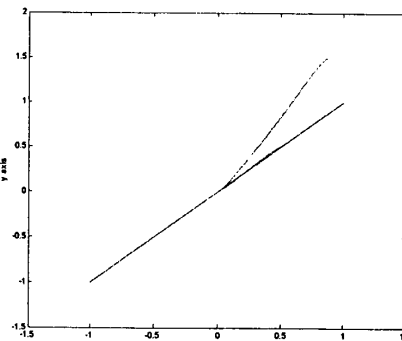
(b) y 方向上的位置跟踪情况



(c) x 方向上的位置误差



(d) y 方向上的位置误差

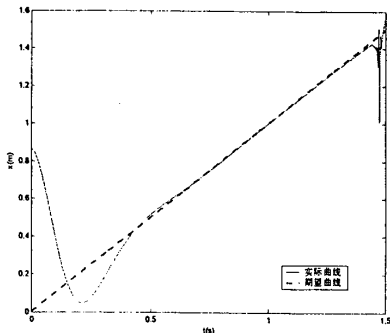


(e) 末端平面内的运动轨迹

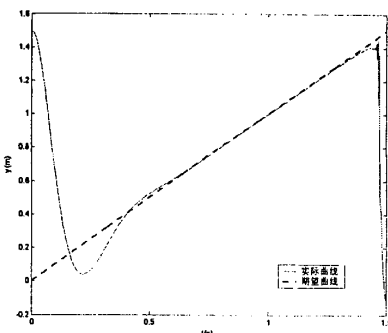
由上图可以看出在  $x$  方向上 0.66 秒,  $y$  方向上 0.68 秒末端位置已能跟踪上给定的信号。图 3-22 (e) 给出了机械手的末端在给定输入信号下平面内的运动轨迹。

图 3-22 机械手位置跟踪曲线

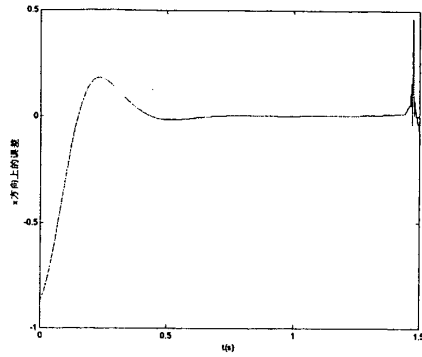
(3) 在机器人末端  $x$  方向上加入斜率为 1 的斜坡信号  $x=t$ ,  $y$  方向同时加入斜率为 1 的斜坡信号  $y=t$ 。仿真时间为 1.5 秒。机械手末端  $x$ 、 $y$  方向上的位置跟踪情况见下图 3-23:



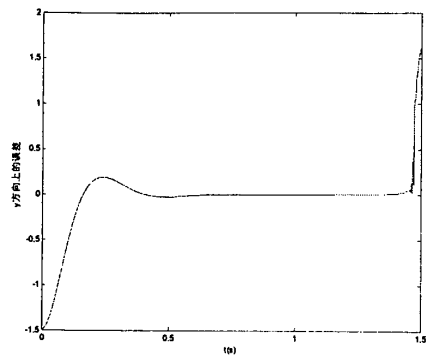
(a) x 方向上的位置跟踪情况



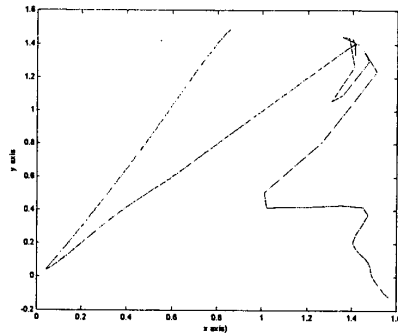
(b) y 方向上的位置跟踪情况



(c) x 方向上的位置误差



(d) y 方向上的位置误差

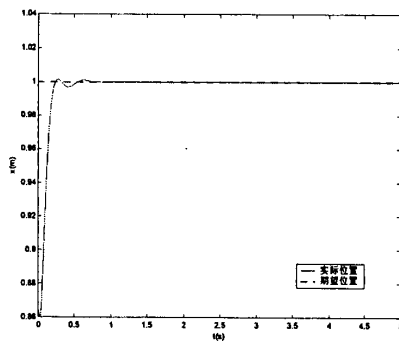


(e) 末端平面内的运动轨迹

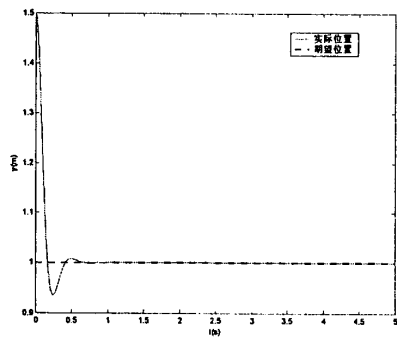
图 3-23 机械手位置跟踪曲线

图 3-23 (e) 给出了机械手的末端在给定输入信号下平面内的运动轨迹。由上图可以看出在  $x$  方向上 0.68 秒,  $y$  方向上 0.63 秒末端位置已能跟踪上给定的信号。当时间达到 1.41 秒左右时, 由图 (a)、(b) 可以看出机械手末端不论在  $x$  方向、还是  $y$  方向上都不能跟踪上给定的位置信号。其原因前文已经分析过, 这里不再重述。

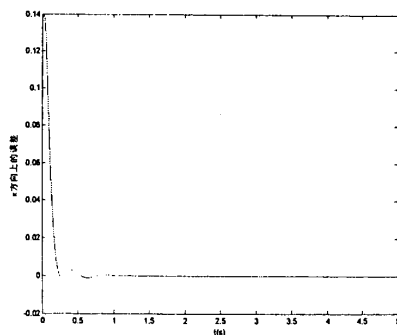
(4) 在机器人末端  $x$  方向上加入幅度为 1 的阶跃信号  $x=1$ ,  $y$  方向输入相同的信号。仿真时间为 5 秒。机械手末端  $x$ 、 $y$  方向上的位置跟踪情况见下图 3-24:



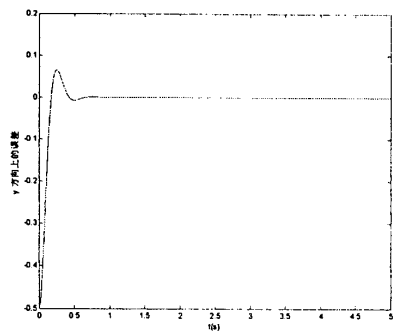
(a) x 方向上的位置跟踪情况



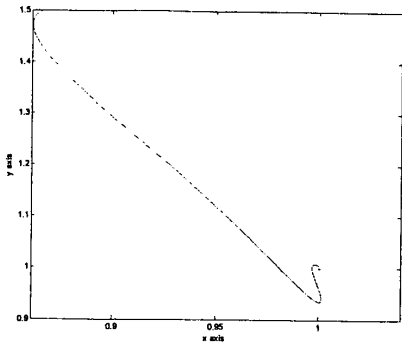
(b) y 方向上的位置跟踪情况



(c) x 方向上的位置误差



(d) y 方向上的位置误差



(e) 末端平面内的运动轨迹  
图 3-24 机械手位置跟踪曲线

下表是以 x 方向上加入阶跃信号为 1 的跟踪时间比较：

算法类型	跟踪上指定位置的时间 (s)
阻抗控制算法	0.32
自适应阻抗控制算法	0.72

表 3-8 跟踪时间性能比较

3.3.2.2 目标阻抗参数对控制性能的影响

同 3.2.1.2 节中的条件：仅以 x 方向为例，研究阻抗控制算法中惯性、阻尼、刚度参数对位置控制性能的影响。机械手的位置及关节角仍同图 3-3 所示。在机器人末端 x 方向上加入幅度为 1 的阶跃信号  $x = 1$ ，y 方向输入相同的信号。起始时间为 0 秒，仿真步长为 0.001 秒。

(1) 调整阻尼参数对位置跟踪的影响

保持参数  $M = I$ ， $K = \begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$  不变，将阻尼参数分别设置为 30、50、100、200 得到阶跃信号的响应曲线见图 3-25 所示：

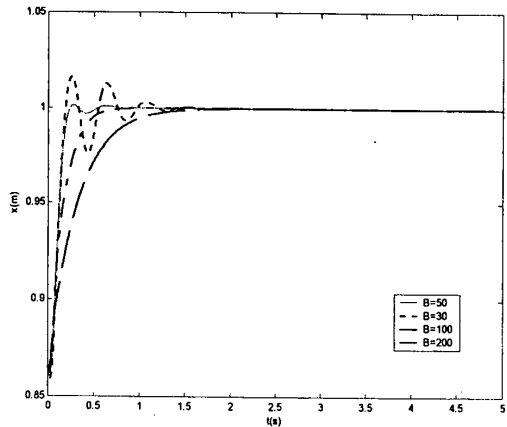


图 3-25 阻尼参数对位置跟踪的影响曲线  
图 3-25 中的性能指标见表 3-9 所示：

B	稳态值 (m)	超调	稳定时间 (s)
---	---------	----	----------



30	1.0016	1.85%	2.08
50	1.0016	0.33%	0.96
100	1.0016	0	0.82
200	1.0016	0	2.19

表 3-9 图 3-25 的性能指标

图 3-25 所反映出的问题同前文一致，当存在超调时，增大系统的阻尼参数  $B$  可以使阶跃响应曲线趋于平滑；但当超调消失后，增大  $B$  反而会使系统的阶跃响应速度减缓。其原因同前文也是一致的。

(2) 调整刚度参数对位置跟踪的影响

保持参数  $M = I$ ， $B = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$  不变，将刚度参数分别设置为 300、625、1000、2000 得到阶

跃信号的响应曲线见图 3-26 所示：

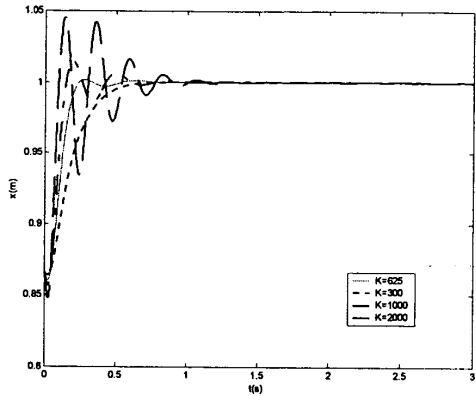


图 3-26 刚度参数对位置跟踪的影响曲线

图 3-26 中的性能指标见表 3-10 所示：

K	稳态值	超调	稳定时间 (s)
300	1.0033	0.0024	1.5
625	1.0016	0.0033	0.96
1000	1.001	0.0158	1.2
2000	1.0005	0.046	2.4

表 3-10 图 3-26 的性能指标

由表 3-10 及图 3-26 可以看出：在系统达到临界阻尼状态前，随着  $K$  的增大达到稳定的时间在减小，稳态值也在不断逼近给定值；在系统达到临界阻尼状态后，响应曲线有震荡，并且达到稳定的时间反而又增加了。其产生的原因同阻抗控制该情况下的分析一致。

(3) 调整惯性参数对位置跟踪的影响

保持阻尼参数及刚度参数不变，即  $B = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ， $K = \begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$ ，将惯性参数依次作以下

调整：分别设为 5、1、0.2、0.1，得到系统阶跃信号的响应曲线为图 3-27：

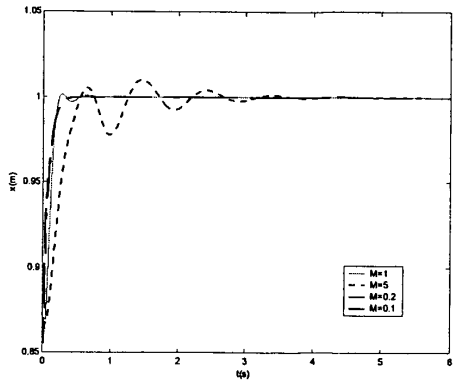


图 3-27 惯性参数对位置跟踪的影响曲线

图 3-27 中的性能指标见表 3-11 所示：

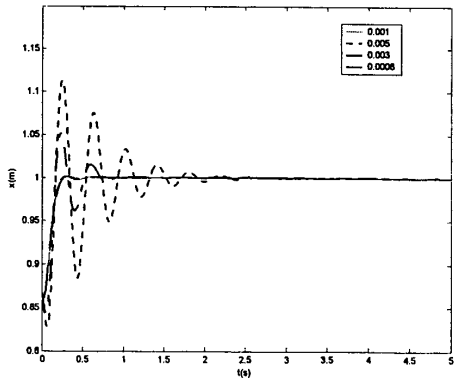
M	稳态值	超调	调节时间（s）
5	1.04	0.059	5.2
1	1.0016	0.0033	0.96
0.2	1.0001	0	0.9
0.1	1	0	0.82

表 3-11 图 3-27 的性能指标

由图 3-27 及表 3-11 可以看出，随着 M 的减小，系统的阶跃响应速度加快，调节时间减小。当惯性参数较大时，响应曲线存在超调，随着惯性的减小超调消失。

3.3.2.3 采样步长的设定对位置控制的影响

第二章中已经介绍了，算法本身对哥氏力、向心力、重力、摩擦力等除了惯性项的其他各项是不用建立模型的，仅需要通过延迟、依次迭代的方法来取得，这就要求下一次的值由上一次计算出的值代替。那么，要使跟踪响应快速准确，就必须有尽可能快的系统采样时间来保证，这样才能保证这种迭代是收敛的。下面是对不同采样周期的仿真研究。



3-28 采样步长对位控的影响曲线

图 3-28 中的性能指标见表 3-12 所示：

采样时间（s）	稳态值	超调	调节时间
0.005	1.0016	0.115	3.45
0.003	1.0016	0.0532	2.35

0.001	1.0016	0.0033	0.96
0.0008	1.0016	0.0029	0.87

表 3-12 图 3-28 的性能指标

有以上数据可以看出, 采样速度越快, 超调量越小, 达到稳定的时间响应也就越短。这正是迭代必须要求快速采样的原因所在。

### 3.3.3 力约束空间下的力跟踪仿真

下面研究当机械手末端与环境接触, 且与环境的接触力不为 0 时的力跟踪情况。如图 3-12 所示。同前文一样, 为了说明问题仿真中只考虑了一个方向上的受力情况。力控仿真平台见下图 3-29 所示:

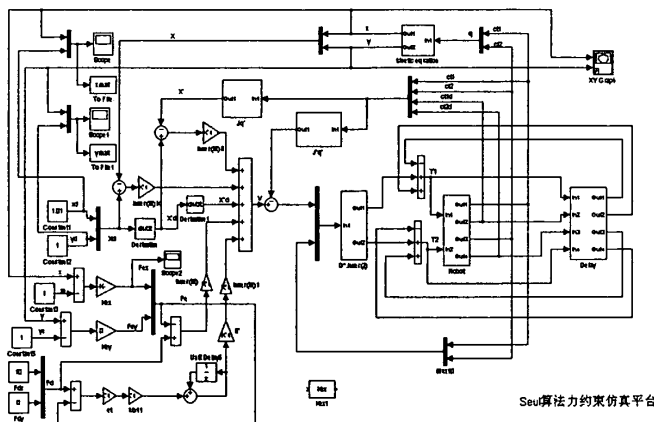


图 3-29 自适应阻抗控制算法力控仿真平台

#### 3.3.3.1 阶跃信号下的力跟踪仿真

设机械手的末端点  $P(x, y)$ , 关节 1 的起始位置为:  $\frac{\pi}{2}$ , 关节 2 的起始位置为:  $-\frac{\pi}{3}$ , 关节 1、2 的起始速度均为 0, 此时末端点的起始点为  $P(0.866, 1.5)$ , 末端点刚好与坐标为 0.866 的一面墙接触。对末端  $x$  方向上加入  $x_d = 0.876$  的阶跃信号, 机械手末端期望的接触力  $f_{dx}$  控制在 10N,  $y$  方向上加入  $y_d = 1.5$  的信号, 该方向上的接触力控制为 0。环境信号(即墙的位置)  $x_e = 0.866$ ,  $y_e = 1.5$ 。

阻抗参数取为:  $M = I$ ,  $B = \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ,  $K = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$ , 环境刚度  $x$  方向上  $K_{ex} = 4000$ ,  $y$  方向

向上的环境刚度设为 0, 采样时间  $T = 0.001$  秒, 自适应更新率  $\eta$  根据公式:  $0 < \eta < \frac{bT}{bT + m}$ , 可

得到:  $0 < \eta < 0.041$ , 这里取  $\eta = 0.02$ 。  $\hat{D} = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$ , 仿真结果见图 3-30 所示:

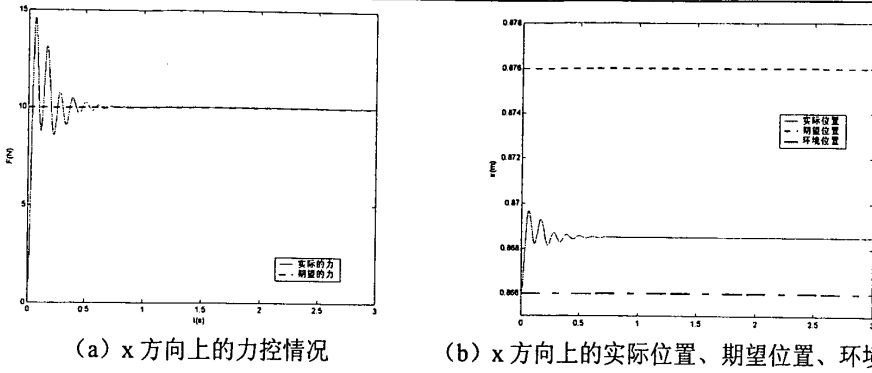


图 3-30 x 方向上的力跟踪及位置跟踪情况

从仿真结果图(a)中可以看出,机械手末端在x方向上受到外力的作用,受力的峰值为14.63N,上升时间为0.037秒,峰值时间为:0.061秒,振荡次数为11次,在0.74秒后末端与环境的接触力可以稳定的控制在10N上。图(b)给出了三条位置曲线,上面的一条为期望位置,中间的为机械手达到的实际位置,最下面的为环境位置。

需要指出说明的是:当机械手与环境接触时,机械手力控方向上刚度设为0,位控方向上的刚度不变。所以为了使系统在力控方向上处于临界阻尼或过阻尼状态,必须要求力控方向上的阻尼参数满足以下条件,即:由于在力控方向上

$$m\ddot{e} + b\dot{e} - f_c + f_d = 0$$

将  $f_c = k_e(x - x_e)$  代入上式得:  $m\ddot{e} + b\dot{e} + k_e e = -f_d$

为了获得较稳定的期望力,使其震荡较小,所以要使上述系统处于临界阻尼或过阻尼,即必须有:  $b \geq 2\sqrt{mk_e}$ 。所以选取的阻抗参数与前文介绍 Hogan 算法仿真时的参数不太相同。

### 3.3.3.2 目标阻抗参数对力跟踪性能的影响

(1) 调节惯性参数对力跟踪性能的影响

阻抗参数保持  $B = \begin{bmatrix} 200 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ,  $K = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$  不变,调节惯性参数依次为2、1、0.5,其他条件同上一节。得到系统的力响应曲线为图3-31:

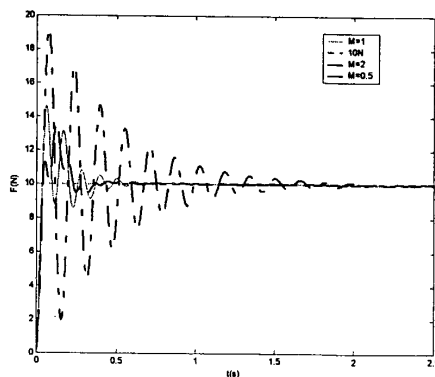


图 3-31 惯性参数对力跟踪性能的影响

图 3-31 的性能指标见表 3-13:

M	力峰值 (N)	稳态值 (N)	稳定时间 (s)
2	19.2	10	2.24
1	14.63	10	0.74
0.5	13.53	10	0.536

表 3-13 图 3-31 的性能指标

由以上图表可以看出当惯性参数由大变小时，其力响应趋势是力峰值在减小，震荡次数在减少趋于平缓，稳定时间逐渐减少，且均能稳定在期望的力上。

(2) 调节阻尼参数对力跟踪性能的影响

阻抗参数保持为： $M=I$ ， $K=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$ ，y 方向的阻尼参数保持 50 不变，调节 x 方向上

的阻尼参数，依次为：170、200、500，系统的力响应曲线为图 3-32:

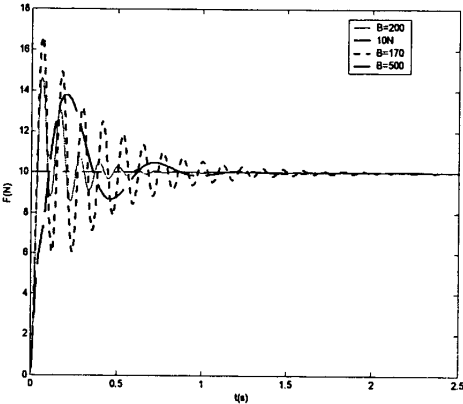


图 3-32 阻尼参数对力跟踪性能的影响

图 3-32 的性能指标见表 3-14:

B	力峰值 (N)	稳态值 (N)	稳定时间 (s)
170	16.6	10	1.95
200	14.63	10	0.74
500	13.8	10	1.28

表 3-14 图 3-32 的性能指标

在以上阻尼参数的取值下均可将力稳定在恒值 10N 上，但所获得的性能却不同。由公式： $b \geq 2\sqrt{mk_e}$ ，可以计算出系统的临界阻尼，应为  $b \geq 40\sqrt{10}$ 。当阻尼小于该值时，系统处于欠阻尼状态，得到的力峰值较大而且震荡次数较多。当阻尼参数大于该值时，达到过阻尼状态，这时达到稳定的时间较短；但若继续增大阻尼参数，虽然会使系统的力跟踪响应震荡频率下降，力峰值减小，但系统的稳定时间又延长了。

(3) 调节刚度参数对力跟踪性能的影响

该算法中当机械手末端与环境接触时，设定机械手力控方向的刚度为 0。本项目中主要研究机械手与环境接触时的柔顺力，所以保持 Seul 算法中的其他方面，不将力控方向上的阻抗参数 K 设定为

0，而是作为一个重要的调节参数。阻抗参数的选取为： $M=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ， $B=\begin{bmatrix} 600 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ，

$K=\begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$ ，环境刚度为： $K_e=\begin{bmatrix} 40000 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ， $\eta=0.02$ ， $\hat{D}=\begin{bmatrix} 0.1 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix}$ 。X 方向上期望

达到的接触力为 10N， $k_x$  依次取值为：1000、4000、10000 时的力跟踪曲线为：

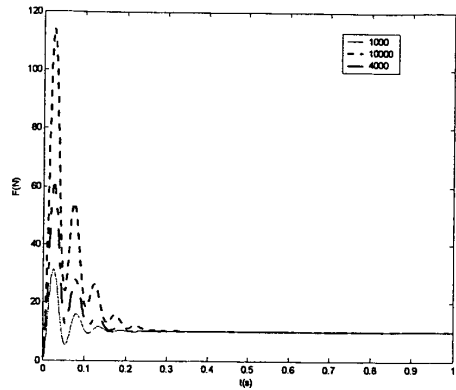


图 3-33 调节刚度参数对力跟踪性能的影响

$k_x$	力峰值 (N)	力稳定值 (N)	误差小于 0.02N 时的调节时间 (S)
1000	31.2	10	0.282
4000	60.4	10	0.305
10000	113.9	10	0.435

表 3-15 图 3-33 的性能指标

由上述图表可以看出，在设定的参数下机械手的刚度越大，机械手与环境接触时的接触力也越大，而且误差达到小于 0.02N 以下的调节时间也越长。

3.3.3.3 其他参数对力跟踪控制的影响

(1) 力控方向上环境刚度的变化对力跟踪的影响

阻抗参数取为： $M=I$ ， $B=\begin{bmatrix} 600 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ， $K=\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$ ，其他参数仍然保持 3.3.3.1 节中

的仿真参数，对环境刚度  $k_e$  取不同的值分别为：2000、4000、40000、80000，得到系统的力响应曲线为图 3-34：

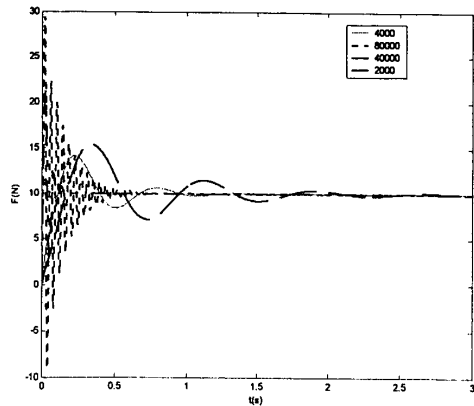


图 3-34 环境刚度的变化对力跟踪的影响

图 3-34 的性能指标见表 3-16

$k_e$	力峰值 (N)	稳定值 (N)	稳定时间 (s)
2000	15.4	10	2.83
4000	14.13	10	1.45
40000	21.25	10	0.227
80000	29.45	10	0.84

表 3-16 图 3-34 的性能指标

仿真结果表明：当环境刚度不断增加时，力稳态值是不变的，即末端与环境的接触力是可以稳定控制在一个恒定值上。当环境刚度不断增加时，力峰值呈现的趋势是先减小后又增加。稳定时间随着环境刚度的增加而不断减小后又增加，响应达到稳定的过程随着环境刚度不断增加而呈现出越来越剧烈的震荡。这里力控方向上阻尼参数选取为 600，能使在上述试验的所有刚度下，系统均处于过阻尼状态。

(2) 期望得到的末端力对力控的影响

仿真参数取 3.3.3.1 节中的仿真参数，末端期望的力  $f_d$  分别取为 1N、5N、10N、15N，系统的力响应曲线为图 3-35：

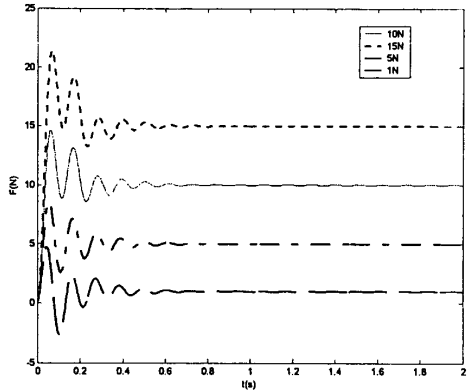


图 3-35 期望得到的末端力对力控的影响曲线

图 3-35 的性能指标见表 3-17 所示：

$f_d$ (N)	力峰值 (N)	稳定值 (N)	稳定时间 (s)
1	4.76	1	0.725
5	8.59	5	0.73
10	14.63	10	0.74
15	21.4	15	0.75

表 3-17 图 3-35 的性能指标

可以看出随着期望得到的机械手末端接触力的增加，力的峰值在不断增加，并且上升时间和稳定时间也在不断增加。由此看出，算法对合适的期望接触力都可以稳定跟踪上。仿真试验表明，在该设定的仿真参数下，可以跟踪的最大接触力为 1600N。

(3) 更新率  $\eta$  对力跟踪性能的影响

下面仅变化算法中自适应块的更新率  $\eta$ ，其他仿真参数同 3.3.3.1 节中的参数。由于前面分析了，更新率的范围在  $0 < \eta < 0.041$  之间，所以这里分别取为：0.001、0.01、0.02、0.04 加以研究。

系统的力响应曲线为图 3-36：

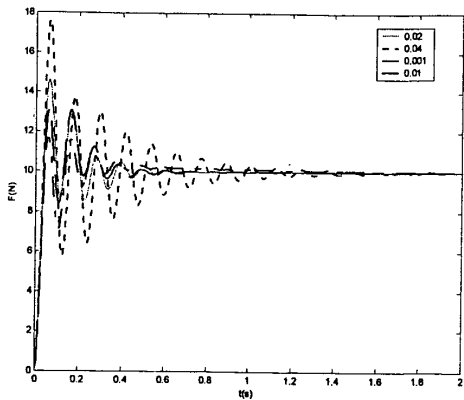


图 3-36 更新率 $\eta$ 对力跟踪性能的影响曲线

3-36 的性能指标见表 3-18 所示:

$\eta$	力峰值 (N)	稳定值 (N)	调节时间 (s) (误差小于 0.05N)
0.001	11.7	10	1.9
0.01	13.08	10	0.61
0.02	14.63	10	0.74
0.04	17.6	10	1.66

表 3-18 图 3-36 的性能指标

从上表可以看出随着更新率 $\eta$ 的增加,力峰值呈不断增加的趋势,但调节时间先不断减小再不断增加。从综合性能上看,在更新率取 0.01 的综合性能指标较好,这时调节时间短,力峰值也较小。仿真中还可以看出,虽然理论分析讲 $\eta$ 的范围在 0 到 0.041 之间,但当它等于 0.05 时,也可以做到精确的跟踪期望的力,但这时的调节时间较长。通过仿真试验可以确定:当 $\eta$ 调整为 0.06 时,系统已不能跟踪 10N 的力,呈现发散状态。

(4) 采样步长的设定对力跟踪控制的影响

对于采样步长对位置跟踪的影响,前文已经研究过了,下面仅就步长的设定对力跟踪性能的影响作讨论。仿真参数同 3.3.3.1 节中的参数,这里仅变化步长,分别为: 0.0015、0.001、0.0008,系统的力响应曲线为图 3-37:

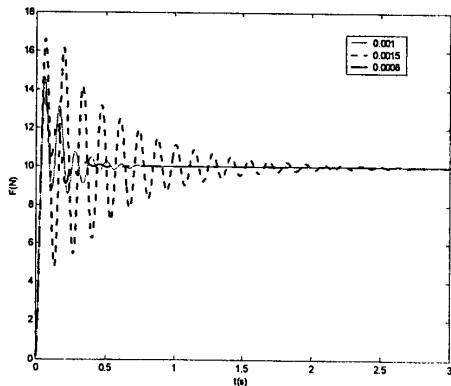


图 3-37 采样步长的设定对力跟踪控制的影响曲线

图 3-37 的性能指标见表 3-19 所示:

T	力峰值 (N)	稳定值 (N)	调节时间 (s) (误差小于 0.02N)
0.0015	16.6	10	2.57
0.001	14.63	10	0.74



0.0008	14.02	10	0.475
--------	-------	----	-------

表 3-19 图 3-37 的性能指标

由以上数据看出，当采样周期较大时力峰值较大，调节时间较长；当采样周期过小时，力峰值反而加大，且调节时间延长。一个比较合适的采样周期可以设为 0.001 秒。通过仿真试验证明，不同于位置跟踪时的情况，当  $T$  设为 0.002 秒时，系统不稳定，无法跟踪上设定的力。这说明力跟踪时对采样周期的选取将更加苛刻。这是因为算法中在证明自适应跟踪模块的稳定性和收敛性时，用到了近似公式： $e^{-Ts} \approx 1 - T$ ，该公式要求  $T \ll 1$ ，所以才会导致力跟踪对采样周期的要求比位置控制时更小。由此可以看出：自适应阻抗算法对采样时间的要求比较苛刻，在这一点上不如传统的 Hogan 阻抗控制算法；通过仿真表明调整阻尼参数可以使采样步长加大，如当阻尼参数加大到 600 时，采样步长可以为 0.005s。

(5) 惯性矩阵的估计值对力跟踪控制的影响

惯性矩阵变化范围的大小，反映了算法对模型不确定因素的鲁棒性。下面对其研究，仿真参数同 3.3.3.1 节中的参数。由于  $\hat{D} = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix}$ ，且  $0 < \alpha < 0.344$ ，分别取  $\alpha$  为：0.08、0.1、0.2、0.34，系统的力响应曲线为图 3-38：

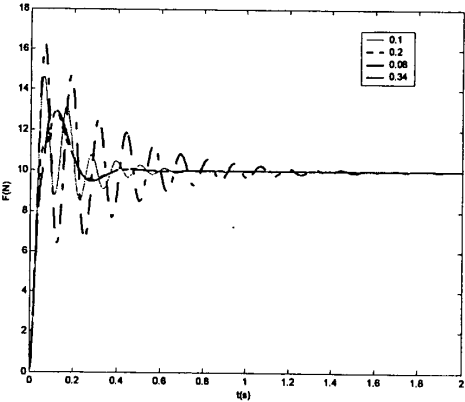


图 3-38 惯性矩阵的估计值对力跟踪控制的影响曲线

图 3-38 的性能指标见表 3-20 所示：

$\alpha$	力峰值 (N)	稳定值 (N)	调节时间 (s) (误差小于 0.05N)
0.08	16.2	10	1.58
0.1	14.63	10	0.74
0.2	12.92	10	0.5
0.34	13.03	10	0.51

表 3-20 图 3-38 的性能指标

由以上图表可以看出， $\alpha$  值过大或过小，力峰值都较大，而且调节时间相应也较大。 $\alpha$  为 0.2 时的性能指标较好，这时的力峰值小而且调节时间短。通过仿真可得到：当  $\alpha$  大于等于 0.4 或小于等于 0.05 时，系统均不能跟踪上给定的力，在这两个值的范围内可以正常跟踪。

(6) 当期望的末端力为 10，且环境刚度及 y 方向上的位置信号均是变化时的仿真

设期望得到的力  $f_d = 10$ ，x 方向上的阻尼参数为 600，取环境刚度  $k_e$  为：

$k_e = 40000 + 5000\sin(\frac{\pi t}{2})$ ，y 方向上跟踪的位置信号为： $y_d = 1.5\sin(t + \frac{\pi}{2})$ 。其它仿真参数同

§ 3.3.3.1 节中的参数。仿真结果见下图：

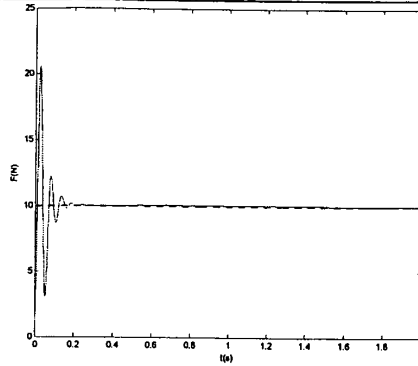


图 3-39 力控制曲线

可以看出经过 0.23 秒以后，机械手末端与环境的接触力已经控制在  $10 \pm 0.02\text{N}$  以内，结果反映了算法可以保持 x 方向的力的同时，实现 y 方向上的表面跟踪。

### 3.4 两种力控算法性能的仿真比较

以上介绍了传统的阻抗控制算法与自适应阻抗控制算法，并就这两种方法分别作了多种条件下的仿真研究，为了进一步比较它们的控制性能，理解各自的优劣势，下面专门对它们的某些性能作比较。

#### (1) 控制算法对不连续变化环境刚度的适应性比较

对变化刚度下的力控制性能反映了算法对未知环境知识的鲁棒性，设环境刚度的变化情况为：

$$\mathbf{k}_e = \begin{cases} 4000 & 0 \leq t < 2 \\ 10000 & 2 \leq t < 4 \\ 50000 & 4 \leq t \leq 6 \end{cases} \quad \text{自适应算法的阻尼参数为 } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 600 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}, \text{ 期望跟踪的力为 } 3\text{N, 其他}$$

均为 3.3.3.1 节中的参数。阻抗控制算法的阻抗参数取为： $\mathbf{M} = \mathbf{I}$ ， $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}$ ，

$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}$ 。这里的参数取值可以保证系统处于临界阻尼或过阻尼状态，并且是两种不同算

法均取得较好力控制效果时的参数取值。力响应曲线为图 3-40：

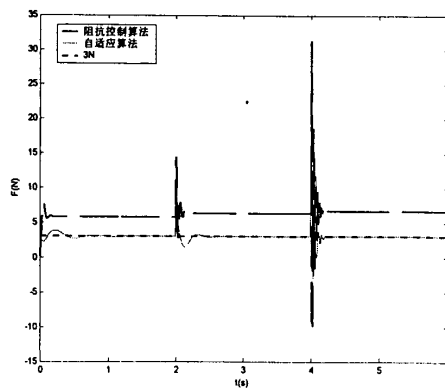


图 3-40 力响应曲线

表 3-21 列出了两个算法各自的性能指标：

$k_e$	力峰值 (N)	稳定值 (N)	调节时间 (s)
4000	7.7	5.81	0.3
10000	14.5	6.35	0.21
50000	31.36	6.68	0.3

(a) 阻抗算法性能指标

$k_e$	力峰值 (N)	稳定值 (N)	调节时间 (s)
4000	3.82	3	0.905
10000	7.5	3	0.54
50000	14.98	3	0.26

(b) 自适应阻抗算法的性能指标

表 3-21 性能指标

可以看出：

(i) 自适应算法具有较强的稳定性，对不同的刚度在经过一段时间的适应后都能稳定到给定的力上。

阻抗算法对不同的刚度虽然经过一段时间的调节后也可以控制接触力稳定下来，但稳定到达的值却不同。

(ii) 在各个刚度值上自适应算法的力峰值均较阻抗算法时小。

(iii) 阻抗算法的调节时间在前两个刚度值上较自适应算法短；而在刚度为 50000 时，自适应算法在调节时间上更优越，这是因为这时自适应算法的阻尼参数 600 可使得系统更接近临界阻尼状态的缘故。

(2) 控制算法对连续变化环境刚度的适应性比较

下面考察当环境刚度为连续变化的值时，各算法对力控制的情况。取环境刚度  $k_e$  为：

$k_e = 40000 + 5000\sin(\frac{\pi t}{2})$ ，自适应阻抗算法的期望力为 0N，其他参数均同本节（1）的参数。力响应曲线为图 3-41：

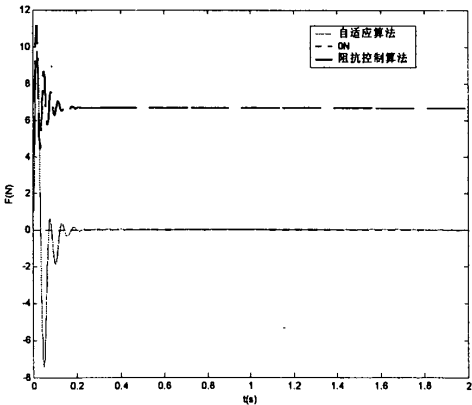


图 3-41 力响应曲线

表 3-22 列出了两个算法各自的性能指标：

算法类型	力峰值 (N)	力 稳 定 范 围 (N)	调节时间 (s) ( 误 差 小 于	振荡次数
------	---------	---------------	-----------------------	------

			0.02N)	
阻抗控制算法	11.175	6.64-6.67		10
自适应算法	9.8	0	0.25	5

表 3-22 性能指标

由图表可以看出：传统的阻抗算法无论在力峰值上还是在调节时间上的性能指标均不如自适应算法，自适应算法的振荡次数要远小于阻抗算法，说明其达到稳态值的过程相对平滑，对机器人末端及环境的损伤相对较小。

(3) 控制算法在力与位置垂直正交情况下同时跟踪控制的性能比较

在保持一个方向力控的同时完成另一个方向上的位置控制，是机械手顺利完成作业经常遇到的情况。下面就 x 方向上力控制的同时跟踪 y 方向上的位置展开讨论。仅改变期望输入 y 方向上的位置信号，将  $y_d$  设为  $y_d = 1.5\sin(t + \frac{\pi}{2})$ ， $f_d = 10$ ，其他参数同本节 (2)，环境刚度也是变化的。力响应曲线为图 3-42：

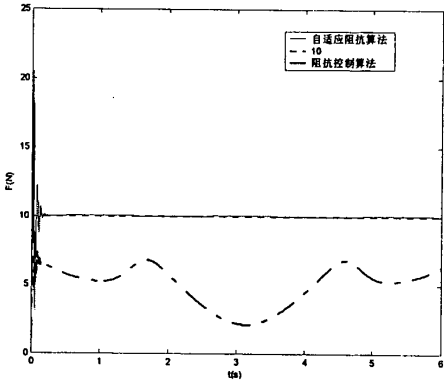


图 3-42 力响应曲线

表 3-23 列出了两个算法各自的性能指标：

算法类型	力峰值 (N)	稳定范围 (N)	调节时间(s)(误差小于 0.02N)
自适应算法	20.55	$10 \pm 0.02$	0.23
阻抗算法	11.175	2.11—6.785	

表 3-23 性能指标

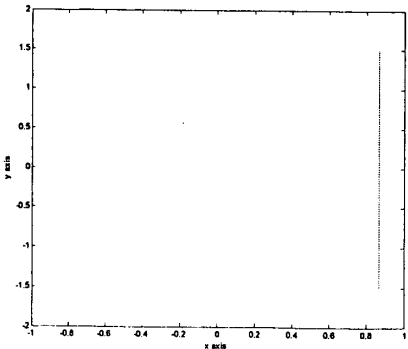


图 3-43 平面内的位置轨迹

由图 3-42 可以明显地看出自适应算法对给定的力 10N 的跟踪较好，能迅速的稳定在 10N 左右。而阻抗算法达到稳态后，力的振荡范围较大，很难控制在一个较小的范围内。总之，在该例条件较为复杂恶劣的情况下，即：在 x 方向上环境刚度连续变化的条件下，在该方向上力控制，同时 y 方向上跟踪不断变化的位置，自适应算法表现出了较强的稳定性，比阻抗算法的性能要好的多。上述两算法在 xy 平面内的位置轨迹见图 3-43：

### 3.5 阻抗参数的初步调整原则

当机械手与环境接触时,由于机械手的惯性总会对环境造成冲击,所以可能会造成机械手和环境的损伤。合理的调节阻抗参数会使机械手带有一定的柔性,从而达到减小机械手对环境冲击的目的,也尽量保护了机械手和环境。通过仿真实验,初步得到以下阻抗参数的调整原则:

(i) 对于阻抗参数  $\mathbf{M}, \mathbf{B}, \mathbf{K}$  来说,从以前的仿真可以看出他们在阻抗控制中所起的作用各不相同。其

中:由阻抗关系式:  $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} = \mathbf{F}_c$ , 在其他参数不变的情况下可以看出调整惯性参数  $\mathbf{M}$  可

以使接触力变大或减小,当  $\mathbf{M}$  增大时获得接触力的稳定值也越大,当  $\mathbf{M}$  减小时获得接触力的稳定值也越小。 $\mathbf{M}$  的调节不是可以任意选取的,它只能依照实际机械手惯性参数在一定的范围内调整,才能使系统稳定。仿真经验表明,所谓在一定范围内是指:机械手实际惯性矩阵对角线上元素的最大值设为  $a_1$ ,机械手实际惯性矩阵的最大特征值设为  $a_2$ ,  $\mathbf{M}$  对角线上元素值的取值范围应位于两最大值的最大值之内或附近调整。

(ii) 对于阻抗参数  $\mathbf{B}$  来说,由于它是阻尼参数,它的增大或减小一般不会使接触力的稳定值变化,

它的增大或减小只会使机械手与环境接触时的过程发生变化。一般来说,增大阻尼参数  $\mathbf{B}$ , 会使力响应的超调减小,力峰值显著下降;但过大的阻尼参数会使力响应达到稳定的时间变慢。这里所谓过大的阻尼参数是指:阻尼参数的取值远大于能使系统处于过阻尼状态时的阻尼参数值。

(iii) 阻抗参数  $\mathbf{K}$  是反映机械手刚度变化的量,它的调整直接反映了机械手在与环境接触时是呈现刚

的特性还是呈现柔的特性。一般来说,减小刚度参数  $\mathbf{K}$  会使机械手与环境的接触力变小,增大刚度参数会使机械手与环境的接触力变大。但刚度参数的调整要尽量使系统处于临界阻尼或过阻尼状态,这样才能既保证机械手与环境接触力的稳定值较小,又保证接触瞬间的力峰值较小。

(iv) 阻抗参数的确定虽然目前还未有一个准确定量的确定原则,但一般来讲依照阻抗关系

式:  $\mathbf{M}\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} = \mathbf{F}_c$ , 将阻抗参数设在使系统处于临界阻尼或过阻尼的状态是较理想的情况,

即:  $b_{ii} \geq 2\sqrt{m_{ii}k_{ii}}$  (其中:  $b_{ii}, m_{ii}, k_{ii}$  为  $\mathbf{B}, \mathbf{M}, \mathbf{K}$  的对角线上的元素)。通过仿真表明,当  $\mathbf{M}, \mathbf{K}$  确定后,  $\mathbf{B}$  的选取将影响到系统的力响应及力峰值的性能,并且将  $\mathbf{B}$  设在使系统处于临界阻尼或合适的过阻尼状态将能得到较好的性能指标(所谓合适的过阻尼状态是指:  $b_{ii} > 2\sqrt{m_{ii}k_{ii}}$ , 但  $b_{ii}$  又

不能取得太大,因为  $b_{ii}$  太大会使接触力达到稳定的时间过长)。

### 3.6 本章小结

本章主要对 Hogan 阻抗控制算法及自适应算法分别作了多种条件下的仿真研究,并对它们在相同条件下的控制性能作了分析比较。研究表明传统的阻抗算法的调节时间总体上较自适应阻抗算法快,但其控制精度性能却不如自适应算法;自适应控制算法在相对苛刻的条件下(环境刚度同另一方向上的位置同时变化)仍能保持相当精确的力控制,而且它能够跟踪到指定的力。因此它是适合在机械手动力学模型不精确、环境条件较复杂等情况下的力控制算法,具有较高的工程应用价值。

## 第四章 基于神经网络逆系统的阻抗控制算法

### 4.1 神经网络逆系统方法概述<sup>[30]</sup>

#### 4.1.1 逆系统的概述

逆的概念是一个具有普遍意义的概念。对于函数，有反函数；对于矩阵，有逆矩阵；而对于一个具有动态过程的系统，则有相应的逆过程，或称逆系统。从更一般的观点来看，这些关系都可被称作映射和逆映射的关系。若将原系统看作映射，所谓的逆系统就是由输出函数集到输入函数集的映射。显然，逆系统这个概念具有一定的普遍性，有比较明确的含义且易于理解，因此以构造逆系统而实现系统控制的逆系统方法必将具有在物理概念上清晰直观，在使用方法上简单明了的一些特点。逆系统方法作为反馈线性化方法中的一种是随着非线性控制理论的深入发展而自然被提出的，其基本思想可简单理解为如何根据被控系统的输出，寻找相应系统的输入的方法。在对于系统的可控性和可观性进行深入研究的基础上，系统的（向量）相对阶、左可逆性（函数可观性）、右可逆性（函数可控性、函数可重构性）等一系列重要概念不断被提出，从而丰富和发展了逆系统理论。并且，许多控制理论及其相关领域的基本问题都与系统的逆的概念有关。例如：控制系统的线性化与解耦、模型匹配等等。因此，对于逆系统理论或方法的研究具有重要的意义，许多专家和学者在这方面做出了巨大的努力。

对于一个  $p$  维输入  $u(t) = (u_1 \ u_2 \ \dots \ u_p)^T$ 、 $q$  维输出  $y(t) = (y_1 \ y_2 \ \dots \ y_q)^T$  的系统（线性或非线性） $\Sigma$ ，具有一组确定的初始状态  $x(t_0) = x_0$ ，其输入与输出之间满足某种关系，如可以用输入输出微分方程或状态方程来表示，或可以用传递函数（阵）来表示。如果从泛函分析的观点来看，这个系统的数学模型相当于一个由输入映射到输出的算子，且输出将由一组确定的初始状态和输入完全决定（即因果性，实际的物理系统所固有的特性）。记描述该因果关系的算子为  $\theta$ ，则有：

$$y(\cdot) = \theta(x_0, u(\cdot)) \text{ 或简写为 } y = \theta u \quad (4.1)$$

系统  $\Sigma$  的逆系统  $\Pi$  是指把系统  $\Sigma$  的期望输出  $y_d(t)$  作为系统  $\Pi$  的输入来产生系统  $\Sigma$  所需的控制量  $u_d(t)$  以驱动系统  $\Sigma$  产生期望的输出  $y_d(t)$ 。逆系统的定义如下：

定义 4.1：设系统  $\Pi$  是一个具有映射关系为  $u_d = \bar{\theta} y_d$  的  $q$  维输入、 $p$  维输出的系统，其中：输入  $y_d(t) = (y_{d1} \ y_{d2} \ \dots \ y_{dq})^T$ ，输出  $u_d(t) = (u_{d1} \ u_{d2} \ \dots \ u_{dp})^T$ ； $y_d(t)$  为取值于某个域内的任意给定的可微函数向量，并且在初始时刻  $t_0$  处满足一定的初始条件，如果算子  $\bar{\theta}$  满足：

$$\theta \bar{\theta} y_d = \theta u_d = y_d \quad (4.2)$$

则称系统  $\Pi$  为系统  $\Sigma$  的单位逆系统。相应地，系统  $\Sigma$  称为原系统。

定义 4.2: 设系统  $\Pi_\alpha$  为另一个具有映射关系为  $u_d = \bar{\theta}_\alpha \varphi$  的  $q$  维输入、 $p$  维输出的系统，其中：输入  $\varphi(t) = (\varphi_1 \ \varphi_2 \ \cdots \ \varphi_q)^T$ ，输出  $u_d(t) = (u_{d1} \ u_{d2} \ \cdots \ u_{dp})^T$ ； $\varphi$  为取值于某个域内的任意给定的连续函数向量，并且在初始时刻  $t_0$  处满足一定的初始条件，如果取  $\varphi(t) = y_d^{(\alpha)}(t)$ ， $\alpha(t) = (\alpha_1 \ \alpha_2 \ \cdots \ \alpha_q)^T$ ，即  $\varphi_i$  定义为  $y_{di}$  的  $\alpha_i$  阶导数，如果算子  $\bar{\theta}_\alpha$  满足下式：

$$\theta \bar{\theta}_\alpha \varphi = \theta \bar{\theta}_\alpha (y_d^{(\alpha)}) = \theta u_d = y_d \quad (4.3)$$

则称系统  $\Pi_\alpha$  为原系统  $\Sigma$  的  $\alpha$  阶积分逆系统，简称  $\alpha$  阶逆系统。

对于给定的系统  $\Sigma$ ，如果存在上述定义的单位逆系统  $\Pi$  或  $\alpha$  阶逆系统  $\Pi_\alpha$ ，则称系统  $\Sigma$  是可逆的系统。在非线性的情况下，系统的可逆性一般与系统状态  $x$  的位置有关；对于实际的物理系统中，状态  $x$  一般可选取系统的稳态工作点及其邻域直至整个工作区间，然后来判断系统的可逆性。由于实际的物理系统都是有界的，如果系统在某个域上处处是可逆的，则一般称其为可逆的系统。根据定义式 (4.3) 可知，复合算子  $\theta \bar{\theta}_\alpha$  所表示的复合系统将是具有线性传递函数关系的系统，其相当于  $\alpha$  个积分器的串联，从而实现了被控系统的线性化和解耦，满足  $\theta \bar{\theta}_\alpha : y^{(\alpha)} = \varphi$  的关系（其中， $\varphi$  为  $\theta \bar{\theta}_\alpha$  的输入， $y$  为输出）。

定义 4.3: 将  $\alpha$  阶逆系统  $\Pi_\alpha$  串接在原系统  $\Sigma$  之前一起构成的具有类似线性传递关系的复合系统  $\theta \bar{\theta}_\alpha$ ，称为  $\alpha$  阶伪线性复合系统，简称为伪线性系统。见图 4-1

将  $\alpha$  阶逆系统与原系统组成的复合系统称为伪线性系统主要有以下的原因：

- (1) 复合系统输入输出之间的关系仅在理论上讲是线性的，实际复合系统的却有可能是非线性的；
- (2) 复合系统的内部结构可能仍然是非线性关系，即还可能有某些变量之间的关系是非线性或是时变的。从理论上讲，只有当原系统本身是线性时，复合系统从内部结构到传递特性才能都是线性关系的；但是，由于实际的被控系统中存在内部参数的波动，工况的变化等因素，即使被控系统本身是线性的，构成的复合系统也只能是伪线性复合系统。

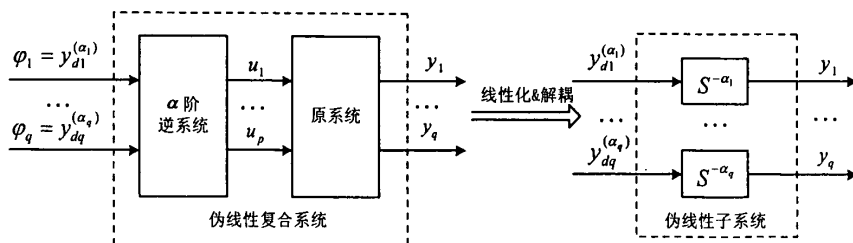


图 4-1: 基于  $\alpha$  阶逆系统的线性化和解耦

在给出逆系统和伪线性系统等基本概念之后，可以给出逆系统方法的原理。所谓逆系统方法就是通过构造工程可实现的  $\alpha$  阶逆系统将原系统补偿成为具有线性传递关系的且已解耦的伪线性复合

系统, 然后对已线性化或解耦的系统(子系统)设计附加闭环控制器进行综合的控制方法。复合控制系统的具体实现步骤如下:

- (1) 根据原系统求出其 $\alpha$ 阶逆系统, 并同时确定 $\alpha$ 阶逆系统的初始值;
- (2) 将 $\alpha$ 阶逆系统与原系统串连构成伪线性复合系统, 并将其实现为尽可能简化的和采用反馈结构的等价形式, 达到被控系统的线性化和解耦;
- (3) 将伪线性复合系统的各子系统作为被控对象, 根据设计目标与要求, 按照线性系统的各种设计理论, 设计出附加闭环线性控制器, 从而构成复合控制系统。

由以上的定义和分析可知, 逆系统方法实现的关键在于逆系统的构造, 一旦逆系统构造成功, 一个复杂的非线性系统控制器的设计问题就简化为线性系统控制器的设计问题; 特别是对于多输入多输出非线性系统, 通过构造 $\alpha$ 阶逆系统并与原系统复合构成伪线性系统可以实现对原系统的线性化和解耦, 从而达到分别对解耦后的各伪线性单输入单输出子系统设计闭环控制器的目的, 因此, 控制器的设计将大为简化。

#### 4.1.2 神经网络与逆系统的结合

对于函数可控的一般非线性系统, 在理论上, 依赖于它的精确数学模型的解析表达式和具体系统参数可以得到逆系统的解析实现形式。但对于实际的被控系统, 由于大多数工业过程往往呈现出很强的非线性或耦合性, 并且千差万别、错综复杂, 难以用精确的解析表达式进行描述; 即使建立起非线性系统的精确数学模型, 在大多数情况下, 具体求解右逆系统常常是相当困难的, 即使利用许多求解的技巧, 仍会有大量的右逆系统的解析解虽然存在但难以求出的情况。在实际工程中, 许多被控系统的精确数学模型和具体参数常常是无法获得的, 即使获得也往往是一种近似的模型, 不可能是被控系统的完全描述; 再加上实际系统内部参数随系统运行状态或周围环境变化而引起的波动, 导致解析逆系统的求解更加困难。

通过解析求解并构造逆系统的方法虽然在理论上是可行的, 但在实际实现过程中存在一定的“瓶颈”。所以, 只有寻求一种新的方法来突破传统逆系统方法的瓶颈, 才能使逆系统方法真正走向工程。因此, 研究能适用于较一般的多输入多输出非线性系统且易于工程实现的控制方法将具有十分重要的理论意义与应用价值。由于神经网络具有:

- (1) 可以以任意精度逼近任意复杂的静态非线性映射(函数);
- (2) 所有定量或定性的信息都等势地分布存储于网络内的各神经元, 故有很强的鲁棒性和容错性;
- (3) 可采用并行分布处理方法, 使得快速进行大量运算成为可能;
- (4) 可以自学习和自适应未知或不确定的系统。
- (5) 神经网络自身的结构和多输入多输出的特点, 使其易于应用到多变量系统的控制中, 且与其它逼近方法相比更经济。

等优点而引起人们的关注, 并成为工业过程中建立非线性模型的一个有力的工具, 为人们提供了一条新的思路 and 选择, 使它很快受到控制工作者的重视并且在控制领域已经取得了令人瞩目的进展。

如果能够将可实现系统的线性化和解耦的逆系统方法与具有对未知非线性静态映射(函数)逼近能力的神经网络相结合, 借助于神经网络实现解析逆系统中的非线性静态映射(函数)部分, 使神经网络与逆系统方法相结合, 构造出适合于工程应用的神经网络逆系统, 则可发挥两者之长。

如果解析逆系统的算子 $\bar{\theta}_\alpha$ (见式(4.3))的实现不采用传统意义上的显式解析表达式, 而是通过采用神经网络(动态或静态的)加上若干积分器(或微分器)来动态逼近, 其中: 神经网络仅用来逼近静态的非线性函数(映射); 积分器(或微分器)和部分状态反映系统的动态特性, 称可以构造出神经网络逆系统。



可以看出,神经网络逆系统的动态特性和静态特性相结合、神经网络与积分器(或微分器)以及系统状态各司其职的结构,有助于简化神经网络的内部结构,有助于实现动态的右逆系统。显然,神经网络逆系统以清晰的外在形式战了解析逆系统的一种物理实现。神经网络逆系统可以使逆系统方法突破需要系统精确数学模型、具体参数的瓶颈,从而对逆系统方法的理论研究与工程应用都将产生积极的影响;同时,为精确数学模型未知的非线性系统的线性化和解耦提供了一条有效的途径。

神经网络逆系统方法控制的基本思想(以神经网络逆系统的基本方法为例)是:将由静态神经网络(用来学习和逼近解析右逆系统中的非线性静态映射关系)加若干积分器或微分器组成的动态神经网络来构成连续系统的逆系统,实现对被控多输入多输出非线性系统的线性化和解耦。通过以上的分析可以看出,神经网络逆系统方法具有以下的特点:

(1) 保留了解析逆系统理论中比较成熟的线性化解耦原理、物理意义直观等特点,适用于一般形式的非线性系统(假定系统是函数可控的)。

(2) 结合了神经网络对未知非线性函数的逼近与学习能力,因而避免了解析逆系统方法过分依赖于系统的数学模型和求解逆系统显式表达式的困难(仅需要系统的阶数或相对阶)。

(3) 对线性化解耦后的各个子系统设计闭环控制器,不仅提高了系统的静、动态特性与抗干扰能力,也使得整个控制系统成为输出反馈的形式。

(4) 动态神经网络的结构简单,易于工程实现。

## 4.2 基于神经网络逆系统的阻抗控制算法

$$\text{机器人的动力学方程如下: } \mathbf{D}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) = \tau \quad (4.4)$$

由方程(4.4)可得,机器人的逆动力学方程可表示为:

$$\tau = \mathbf{D}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) = \mathbf{Q}(\ddot{\theta}, \dot{\theta}, \theta) \quad (4.5)$$

如果设  $\varphi = \ddot{\theta}$  ( $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]^T$  and  $\ddot{\theta} = [\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2, \dots, \ddot{\theta}_n]^T$ ) 为逆系统的输入,则逆

$$\text{系统可表示为: } \tau = \mathbf{Q}(\varphi, \int \varphi, \iint \varphi) \quad (4.6)$$

由此可得到一个特殊的逆系统——二阶逆系统。如果将它与机器人级联,即可消除关节间的相互作用,该复合系统等价于  $n$  个独立的二阶积分线性子系统(见图4-2)。

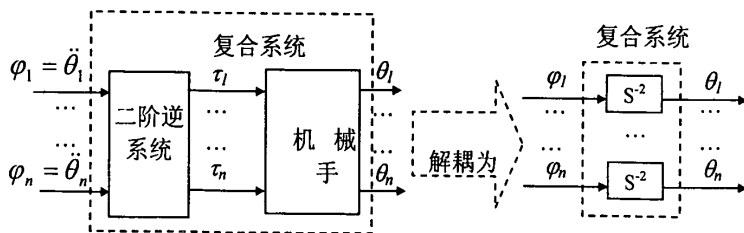


图 4-2. 基于二阶积分逆的去耦复合系统

去耦复合系统的相应的输入—输出关系近似为:

$$G_{ij}(s) = \frac{\theta_i(s)}{\varphi_j(s)} = \begin{cases} s^{-2} & (i = j) \\ 0 & (i \neq j) \end{cases} \quad i, j=1, 2, \dots, n \quad (4.7)$$

以上表明,如果成功构建二阶逆并将  $n$  关节的机器人解耦成  $n$  个独立的二阶积分线性子系统,则设计一个复杂的机器人跟踪控制器问题就被简化为设计一系列线性反馈调节器,对于已解耦关节

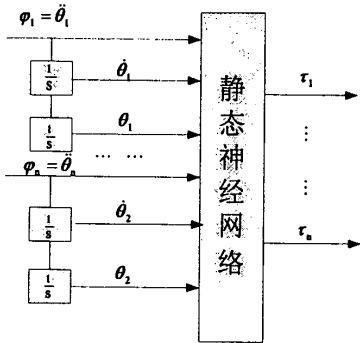
这是易于实现的。由此可知，建立复合控制器的关键是构建二阶逆。但由于机器人的模型通常是未知的，故很难得到机器人逆系统精确的数学模型。因此要求找到一个构建机器人二阶逆的实用方法以实现解耦控制。上一节介绍的神经网络逆系统方法正是解决该问题的好途径。

#### 4.2.1 用神经网络逼近机械手的逆动力学模型

通过以上的分析，可以看到由于机械手的逆动力学模型难以用解析的方法建立，所以采用神经网络来逼近其逆模型是一个较为自然的想法。其中的神经网络可选用 BP 网络、RBF 网络等任何一种静态神经网络，只要它能逼近非线性函数且训练容易即可，神经网络的训练算法可采用与所选网络结构相匹配的任何一种算法。理论上，隐含层具有 S 型激活函数的多层前向神经网络能以任意精度逼近任意非线性连续函数及其各阶导数，S 型激活函数即：

$$S(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (4.8)$$

神经网络逆模型的大致结构为下图 4-3 所示：



神经网络分为三层，由  $3n$  个输入， $n$  个输出和含有若干神经元的隐含层组成。当然根据神经网络的结构分解理论，图 4-3 的网络也可以分解成输入层不变而输出均对应一个力矩控制量的  $n$  个网络的形式，这时网络的中间隐含层的节点数可以适当减小。确定了大致结构之后，机械手动力学模型逆系统的能否成功构建完全取决于如何获取训练数据来训练神经网络。一般采取的方法是：在原系统的工作区域内，对原系统施加符合工况要求的各种不同的力矩输

图 4-3 神经网络逆模型结构图

入信号  $\tau$ （如白噪声、正弦等信号），同时对输入力矩  $\tau$  和位置  $\theta$  进行高速、高精度的采样以获取尽可能多的数据，然后采用高阶数值微分方法离线计算出  $\theta$  的导数  $\dot{\theta}$  及  $\ddot{\theta}$ ，颠倒输入输出次序（将  $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}$  作为神经网络的输入， $\tau$  作为神经网络的输出），获取神经网络训练数据组，并从中挑选出一部分对神经网络进行离线训练。将训练好符合要求的网络接入到图 4-2 中去以代替二阶逆系统，这样就完成了对机械手原系统的线性化解耦。

#### 4.2.2 控制算法

$$\text{机械手的运动方程为: } \mathbf{D}(\theta)\ddot{\theta} + \mathbf{V}(\theta, \dot{\theta}) + \mathbf{G}(\theta) = \tau + \mathbf{J}^T(\theta)\mathbf{F}_e \quad (4.9)$$

经解耦的系统成为伪单位系统(单位积分系统)，由此可得到以下模型：

$$\ddot{\theta} = \mathbf{u} + \mathbf{J}^T(\theta)\mathbf{F}_e \quad (4.10)$$

$$\text{由机械手笛卡尔空间与关节空间的加速度关系: } \ddot{\theta} = \mathbf{J}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\theta}) \quad (4.11)$$

$$\text{将 (4.11) 代入 (4.10) 得: } \mathbf{J}^{-1}(\ddot{\mathbf{X}} - \dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}) = \mathbf{u} + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_c \quad (4.12)$$

$$\text{由理想阻抗表达: } \mathbf{M}\ddot{\mathbf{E}} + \mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} = \mathbf{F}_c \quad (4.13)$$

$$\text{得: } \ddot{\mathbf{X}} = \ddot{\mathbf{X}}_d - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} - \mathbf{F}_c) \quad (4.14)$$

将式 (4.14) 代入 (4.12) 得:

$$\mathbf{u} = \mathbf{J}^{-1}[\ddot{\mathbf{X}}_d - \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{K}\mathbf{E} - \mathbf{F}_c) - \dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}] - \mathbf{J}^T \mathbf{F}_c \quad (4.15)$$

将式 (4.15) 代入 (4.10) 得:

$$\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{J}^{-1}[\mathbf{M}^{-1}(-\mathbf{K}\mathbf{E} - \mathbf{B}\dot{\mathbf{E}} + \mathbf{F}_c) + \ddot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{J}}\dot{\boldsymbol{\theta}}] \quad (4.16)$$

由此可以建立基于神经网络逆系统的阻抗控制算法控制结构框图, 见图 4-4 所示:

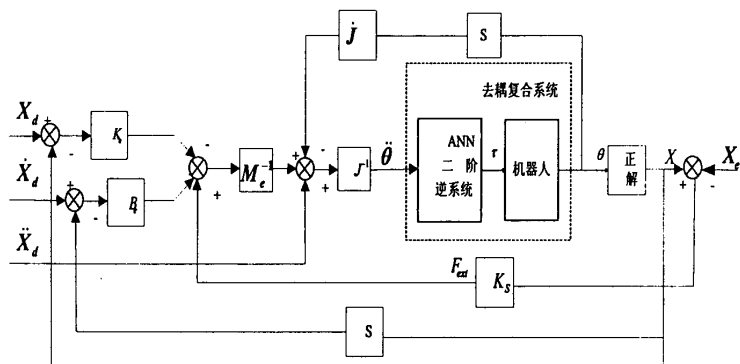


图 4-4 基于神经网络逆系统的阻抗控制算法控制结构框图

### 4.3 该算法的仿真研究

仿真所采用的机械手为 PUMA560 第 2、3 关节模型, 其动力学模型同第三章介绍的动力学模型类似, 只不过两连杆的质量这里分别为:  $m_1=15.91\text{Kg}$ ,  $m_2=11.36\text{Kg}$ ; 连杆长度分别为:  $L_1=L_2=0.432\text{m}$ 。在以下神经网络逆系统设计过程中, 假设系统模型时未知的, 仅知道机械手的初始工作点为: 初始位置分别为:  $\theta_1(0)=-\frac{\pi}{2}$ ,  $\theta_2(0)=0$ ; 两关节的初始速度均为:  $\dot{\theta}_1(0)=0$ ,

$\dot{\theta}_2(0)=0$ 。见下图:

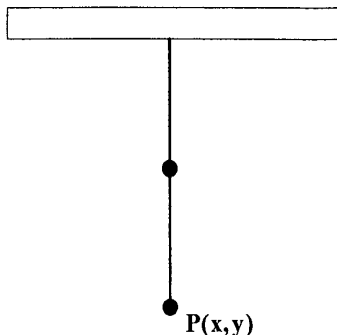


图 4-5 PUMA560 机械手示意图

PUMA560 机械手的神经网络逆系统由两个 6—10—1 的网络构成, 输入层均为两个关节的位置、速度、加速度, 输出层分别对应各个关节的力矩。确定了神经网络的结构之后, 逆系统辨识及网络训练过程如下:

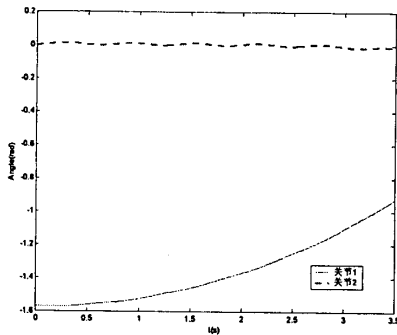
(1) 给机械手输入具有一定功率的白噪声信号 $(\tau_1, \tau_2)$ ，以 0.002 秒的周期采样控制力矩 $(\tau_1, \tau_2)$ 和相应的关节角位置 $\theta_1, \theta_2$ 。获得 20000 组输入输出数据。

(2) 用七点求导法离线计算输出 $\theta_1, \theta_2$ 的一阶、二阶导数，分别得到两关节的速度、加速度。重组以上数据得到训练数据集 $\{\ddot{\theta}_1, \dot{\theta}_1, \theta_1, \ddot{\theta}_2, \dot{\theta}_2, \theta_2, \tau_1\}$ 及 $\{\ddot{\theta}_1, \dot{\theta}_1, \theta_1, \ddot{\theta}_2, \dot{\theta}_2, \theta_2, \tau_2\}$ ，从中等间隔抽取 2000 组数据用于训练网络。

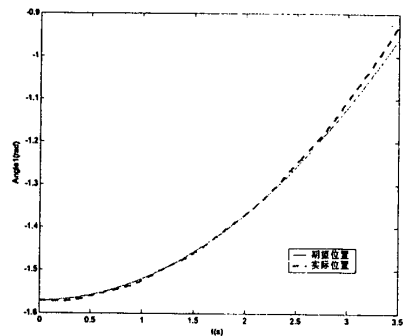
(3) 用变学习率的 BP 算法训练 5000 次。网络权值的平均误差分别能达到 0.00046、0.0005 左右。

### 4.3.1 位置控制仿真试验

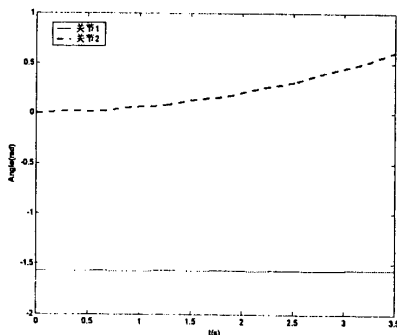
当逆系统训练好后，将之与机械手原模型串联构成复合被控系统，由图 4-6 系统对阶跃信号的仿真结果可见复合后的系统已呈线性化解耦的特性。



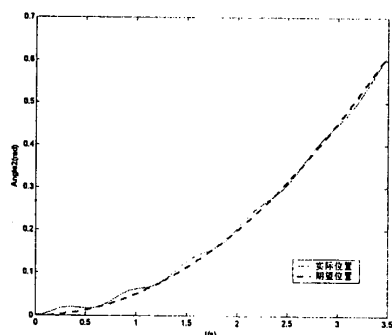
(a) 关节 1 输入 0.1，关节 2 输入 0 时的响应曲线



(b) 左图关节 1 的实际输出与期望输出曲线



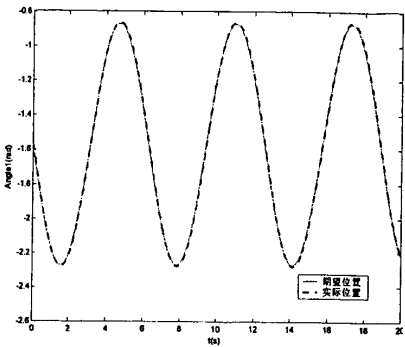
(c) 关节 1 输入 0，关节 2 输入 0.1 时的响应曲线



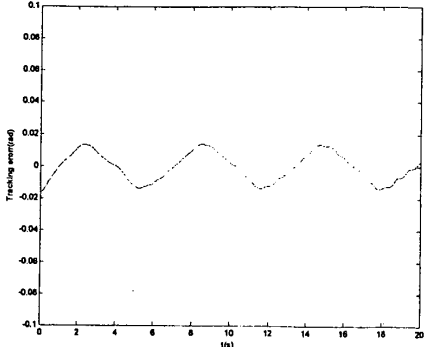
(d) 左图关节 2 的实际输出与期望输出曲线

图 4-6 神经网络逆系统与机械手原模型所构成的复合系统的阶跃响应

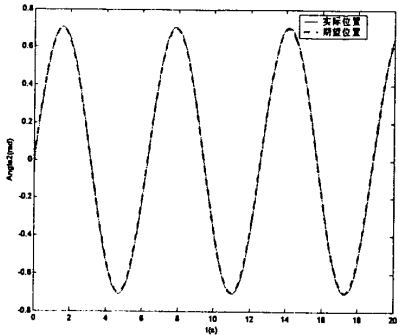
为了检验控制系统的跟踪性能，在神经网络逆系统和机械手所构成的复合系统前加入超前反馈控制器  $G(s) = 40 \frac{s+1}{0.008s+1}$ ，关节 1 的输入为： $\theta_1 = 0.7\sin(t + \pi) - \frac{\pi}{2}$ ，关节 2 的输入为： $\theta_2 = 0.7\sin t$ 。两关节的跟踪曲线见图 4-7：



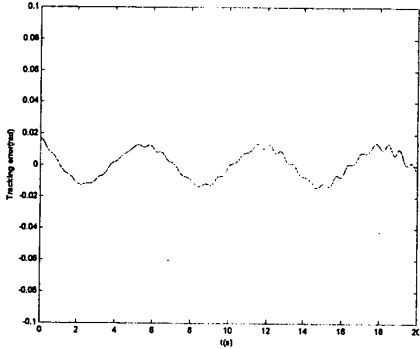
(a) 关节 1 的位置跟踪曲线



(b) 左图关节 1 的跟踪误差



(c) 关节 2 的位置跟踪曲线



(d) 左图关节 2 的跟踪误差

图 4-7 控制系统对正弦参考输入的跟踪特性

仿真结果显示系统良好的位置跟踪性能,表明对机械手系统的解耦成功并且轨迹跟踪控制是行之有效的。

4.3.2 力控制仿真试验

将机械手原系统成功解耦之后,把神经网络逆系统与机械手原系统组成的复合系统前加入阻抗控制算法,组成如图 4-4 所示的系统。机械手的初始位置为:  $P(0, -0.864)$ , 见图 4-8 所示。

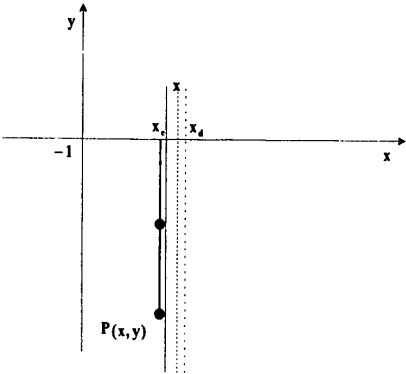


图 4-8 机械手与环境接触示意图

加入的位置信号  $x_d = 0.01$ ,  $y_d = -0.863$ , 环境位置为  $x_e = 0$ , 阻抗参数仍为:  $M = I$ ,

$$B = \begin{bmatrix} 50 & 0 \\ 0 & 50 \end{bmatrix}, K = \begin{bmatrix} 625 & 0 \\ 0 & 625 \end{bmatrix}。环境刚度 K_e = \begin{bmatrix} k_{ex} & 0 \\ 0 & k_{ey} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40000 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$
 仿真结果见下

图:

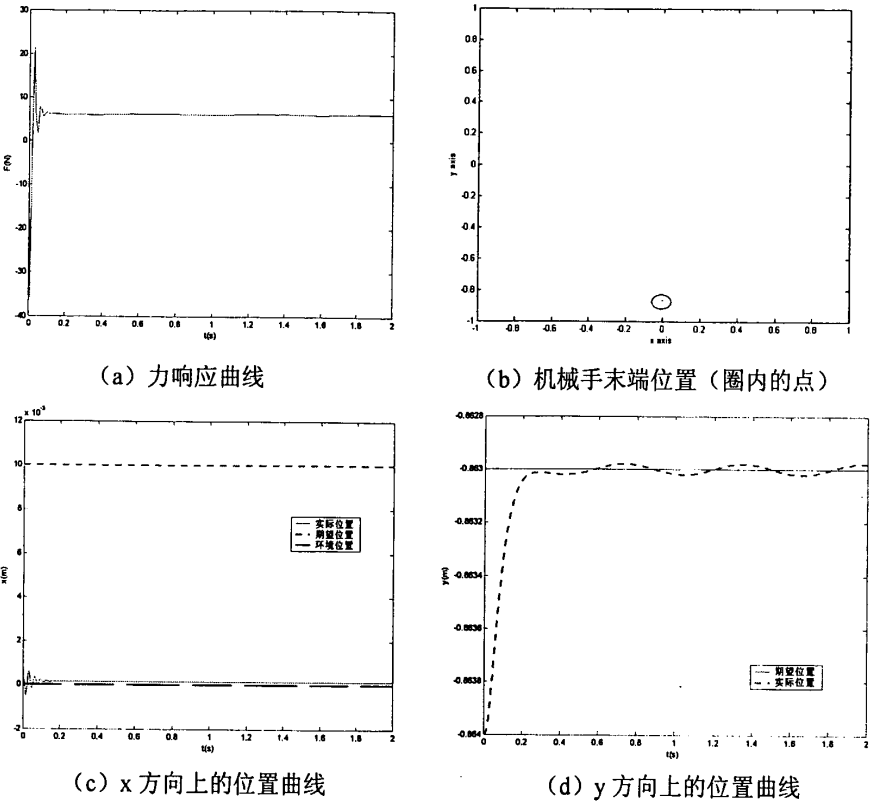


图 4-9 力和位置响应曲线

x 方向上的力响应在 0.2 秒后可以稳定地控制在 6.03—6.3N 之间，力峰值为：21.57N。下面讨论阻抗参数的调整对末端接触力的影响。

(1) 调整惯性参数对力控制的影响

所用参数同上，仅改变阻抗参数 **M**，分别设为：0.5、1、3，仿真结果如下：

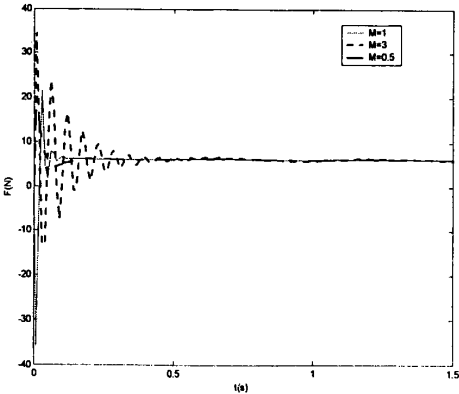


图 4-10 惯性参数对力控制的影响曲线

M	力峰值 (N)	力稳定值 (N)	稳定时间 (s)
0.5	20.23	6.05~6.3	0.25
1	21.57	6.03~6.31	0.2

3	34.72	5.8~6.5	0.7
---	-------	---------	-----

表 4-1 图 4-10 的性能指标

由以上图表可以看出，随着惯性参数的不断增大，力峰值不断加大，稳定时间不断增长，力稳定值的范围大体相当。力稳定值并没有象 Hogan 算法那样，力稳定值会随着惯性参数有较大的变化。究其原因，由 (4.16)  $\ddot{\theta} = J^{-1}[M^{-1}(-KE - B\dot{E} + F_c) + \ddot{X}_d - \dot{J}\dot{\theta}]$  式可以看出：，当系统进入稳态后有  $F_c = -KE$ ，即：末端受力的稳态值同惯性参数没有关系。而 Hogan 的阻抗控制算法则不同，当系统进入稳态后，力矩控制量的稳态值除了同阻尼参数无关外，同惯性参数、刚度参数都有密切的关系。

(2) 调整阻尼参数对力控制的影响

其他参数保持不变，阻尼参数依次调整为：30、50、100，仿真结果如下：

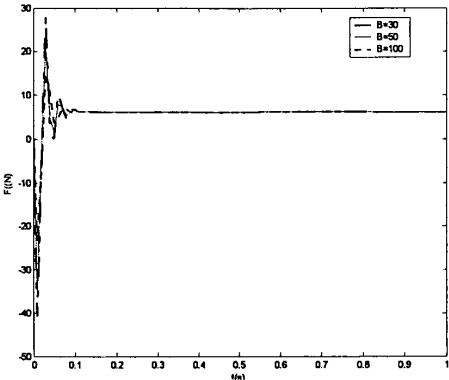


图 4-11 阻尼参数对力控制的影响

B	力峰值 (N)	稳态值 (N)	稳定时间 (s)
30	28.2	6~6.3	0.19
50	21.57	6.03~6.31	0.2
100	15.04	6~6.3	0.25

表 4-2 图 4-11 的性能指标

在以上阻尼参数的取值下均可将力稳定在一个恒定的范围上，但所获得的性能却不同。当阻尼较小时，得到的力峰值较大而且震荡次数较多。当阻尼参数取 50 时，达到临界阻尼状态，这时达到稳定的时间较短；若继续增大阻尼参数，使系统处于过阻尼状态，获得的力峰值会下降，稳定时间又延长。

(3) 调整刚度参数对力控制的影响

其他参数保持不变，刚度参数依次调整为：400、625、1000，仿真结果如下：

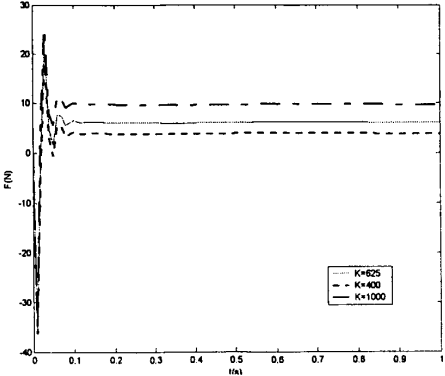


图 4-12 刚度参数对力控制的影响

K	力峰值 (N)	稳态值 (N)	稳定时间 (s)
400	19.3	3.83~4.08	0.17
625	21.57	6.03~6.31	0.2
1000	25.26	9.59~9.91	0.17

表 4-3 图 4-12 的性能指标

由以上图表可以看出：当机械手末端的刚度不断增加，也就是说机械手末端越来越硬，当其与环境接触后，产生的接触力会越来越大，震荡的幅度也会越来越剧烈。

## 4.4 神经网络逆系统方法在机械手解耦控制中的实现

### 4.4.1 试验平台及网络训练

为了验证神经网络逆系统方法对机械手的解耦控制，利用本实验室的现有条件作了算法的实现工作。试验平台为本实验室购买的日本三菱公司的 PA10-6CE 机器人，该机器人是一款比较优秀的六自由度机器人产品，它具有许多工业机器人及其他六自由度机器人所不具备的优点，比如重量轻（机器人本体的重量仅为 39 公斤，控制器的重量为 14 公斤）、负载大（为 10 公斤）、运动灵活，系统开发比较完善等，因此深受科研单位和高科技公司的青睐。PA10 机器人提供了一个基于其本身的运动板卡的动态链接库，可以在 VC++6.0 环境下对机器人进行编程控制，见图 4-13 中第 1 种控制结构（A standard system）。而且 PA10 机器人具有开放的控制结构，可以通过 ARCNET 网卡进行直接编程控制，见图 4-13 中第 2 种控制结构。本实验就是将 ARCNET 网卡替换原来的运动控制卡后的平台上实现的（即第二种控制结构）。

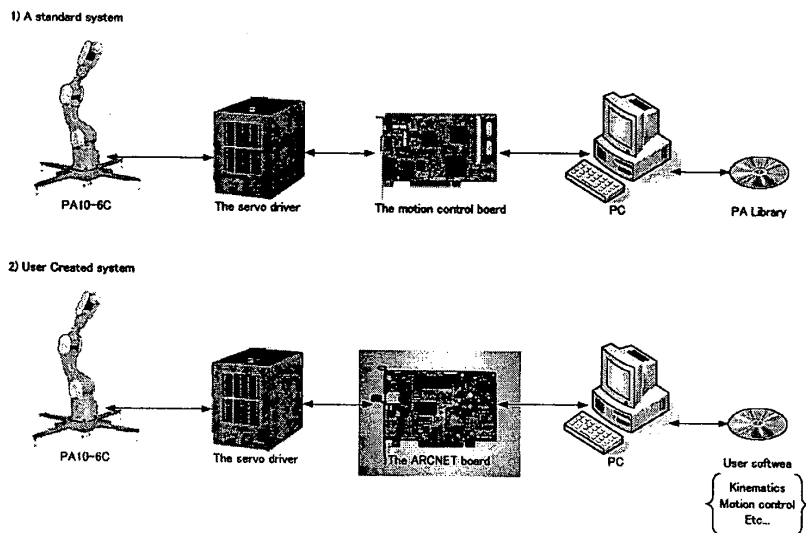


图 4-13 PA10 机器人控制体系结构图

选取 PA10-6CE 机器人的 3、5 关节作为试验控制对象，这两关节的初始位置及速度均为 0，对机械手的控制方式采用速度控制方式实现。神经网络的网络结构同仿真时一样，采取两个 6-10-1 的网络，输入层分别为两个关节的速度、位置、加速度，输出层为速度控制量。神经网络的结构确定后，逆系统的辨识及训练过程如下：

(1) 在机器人 3、5 关节的工作空间内，开环输入不同幅值周期为 800 毫秒的方波激励信号，以 0.002



秒的周期采样给定的速度( $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2$ )及相应的关节角( $\theta_1, \theta_2$ ), 获得 20000 组数据。

(2) 对关节角( $\theta_1, \theta_2$ )滤去高频噪声, 计算输出 $\theta_1, \theta_2$ 的一阶、二阶数值微分, 重组以上数据得到训练数据集 $\{\ddot{\theta}_1, \dot{\theta}_1, \theta_1, \ddot{\theta}_2, \dot{\theta}_2, \theta_2, \mathbf{X}_1\}, \{\ddot{\theta}_1, \dot{\theta}_1, \theta_1, \ddot{\theta}_2, \dot{\theta}_2, \theta_2, \mathbf{X}_2\}$ 。需要注意的是, 由于在实际采样中数据的噪声较大, 求出关节的速度、加速度后, 若有必要还必须对速度、加速度滤波, 否则会造成神经网络训练时网络的收敛较困难。

(3) 等间隔抽取 2000 组数据, 用变学习率 BP 算法训练 3000~5000 次。网络达到的平均权值误差为 0.02 左右。

#### 4.4.2 神经网络逆系统方法的控制效果

当网络训练好后, 将之与机械手原系统相串连构成复合被控系统, 在此基础上, 加入超前反馈控制器 $G_{ci}(s) = 10 \frac{s+1}{0.01s+1}$ , 构成完整的控制系统, 见图 4-14 所示:

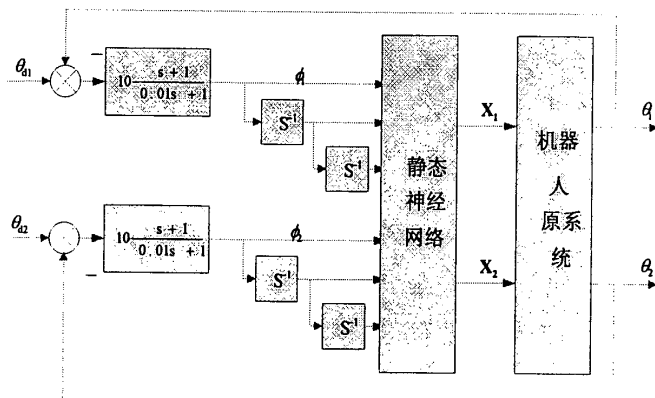


图 4-14 基于神经网络逆系统方法的二自由度机械手解耦控制系统结构图

(1) 对关节 3 (即 $\theta_1$ ), 关节 5 (即 $\theta_2$ ) 分别输入幅度为 40 度、0 度的阶跃信号, 控制系统的响应输出见图 4-15:

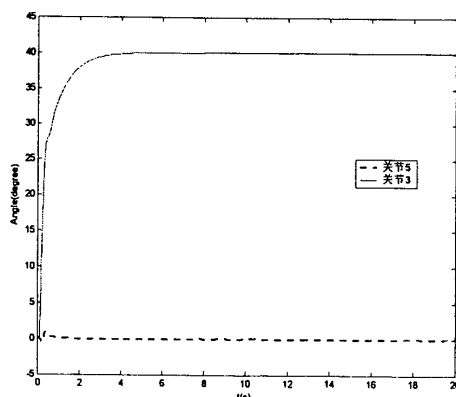


图 4-15 关节角位置的响应输出

由图可以看出, 在启动的瞬间 5 关节有一点动作, 但很快又回到 0 位, 其原因主要是由于网络

对逆系统的逼近没能足够精确所致。除此之外两个关节还是能达到解耦效果的。

(2) 对关节 3 (即  $\theta_1$ )，关节 5 (即  $\theta_2$ ) 分别输入幅度为 0 度、40 度的阶跃信号，控制系统的响应输出见图 4-16:

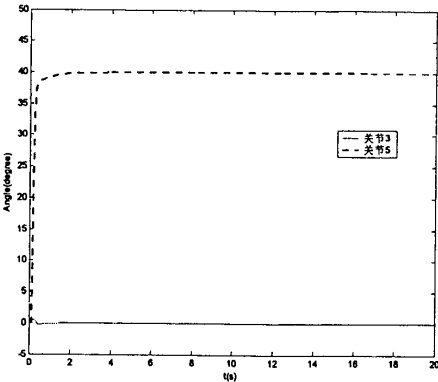


图 4-16 关节角位置的响应输出

(3) 为了进一步检验系统的轨迹跟踪效果，让系统跟踪变化较为缓慢的信号。给系统输入周期为 12.5 秒，幅值为 40 的正弦波期望信号，机械手系统 3 轴和 5 轴响应曲线为图 4-17，从响应曲线可以看出，除了波形的波谷和波峰存在波动外，曲线跟踪的较好，基本上和期望轨迹重合。

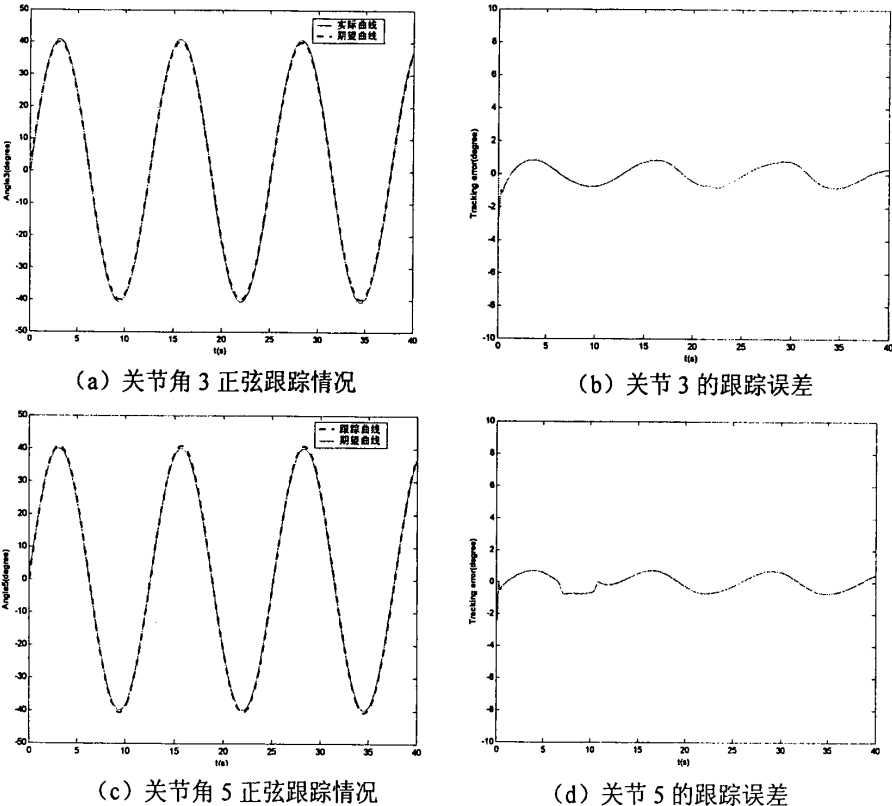


图 4-17 关节角正弦响应输出

从上面的位置跟踪图可以看出，神经网络逆系统与机械手所构成的闭环复合控制系统成功地对阶跃、正弦等信号的轨迹跟踪，虽然还有不小的误差，这主要是网络对机械手逆模型的逼近还没有足够精确有关，但这足以证明神经网络逆系统方法在实际工程中特别是在机械手解耦控制中

是有效、可行的。

## 4.5 本章小结

本章主要介绍了基于神经网络逆系统的阻抗控制算法。基于神经网络逆系统的阻抗控制算法首先利用了神经网络函数逼近的能力，构造机器人逆动力学的模型，而后将神经网络与机器人原模型串联组成去耦复合系统，在此去耦复合系统前加阻抗控制算法，就完成了该算法的设计工作。文中对该算法进行了仿真研究，表明算法在机械手与环境接触时能够起到有效地控制接触力的作用。本节最后利用本试验室 PA10—6CE 机器人的第 3、5 关节实现了神经网络逆系统方法对机器人的解耦控制。

## 第五章 总结与展望

自从 Hogan 于 1985 年系统的阐述了阻抗控制算法以来,国内外众多的机器人专家都曾致力于该方法的研究。机械手动力学力矩控制有精度高、速度快的优点,从本文的仿真研究中也可以看出上述优点,因此它是机器人学的热门研究领域。但因为该算法的实现必须要求控制器设计者知道机械手精确的动力学模型,所以致使该方法很难在工程实践中实施。

继 Hogan 对阻抗控制算法开创性的工作以后,Seul 提出了自适应阻抗控制算法。自适应阻抗控制算法比 Hogan 的算法前进了一大步——不需要机械手精确的动力学模型,它只需要机械手的估计模型即可,况且给出了惯性矩阵的估计算法和估计范围,使得该算法与工程实践应用的距离大为缩短。该算法的另一特色是可以做到精确的力跟踪,这是原始的阻抗控制算法所无法达到的。本文的仿真研究证实了上述结论的正确性。

通过研究阻抗控制算法及自适应阻抗控制算法的性能,本文提出了阻抗参数的初步调整规则。由于机械手系统高度复杂性,目前尚未有关于阻抗参数具体的调整原则。本文提出的原则只是在仿真研究中总结的一些初步的调整规则,具体、系统、科学的调整原则还要不断去探索、研究;但无论如何,科学的阻抗参数调整规则必将对阻抗控制算法在不同类型的机械手上成功应用起到有力的指导作用。

基于神经网络逆系统的阻抗控制算法是一种结合了神经网络逆系统理论及阻抗控制算法的新算法。本文对其算法的理论、仿真及神经网络逆系统在机械手解耦控制中的实现做了具体的论述。该算法的最大特点是不需要机械手的动力学模型,这与 Seul 的自适应阻抗控制算法相比与工程实践更近了一步。利用神经网络对机械手逆动力学模型的逼近至关重要。获得高精度的神经网络逆模型,实现对原机械手模型的线性化解耦是该算法必须要求的,它关系到阻抗控制算法的成功实现,因此要提高该算法的性能首先要提高网络的性能,即:网络对机械手动力学逆模型的逼近程度和网络的泛化能力。网络的逼近程度是指以训练好的神经网络代替机械手逆模型的精确程度,与之密切相关的就是神经网络的训练问题。采集到高质量的实验数据是网络训练的第一步,所谓高质量的数据是指能真实反映系统动态性能的、噪声较小的数据。通过仿真和实验表明:训练出性能优良的网络并不一定是权值误差最小的网络,因为如果网络达到的权值误差较小,很可能使得网络的泛化能力差,进而导致网络在实际的应用效果较差。所以神经网络的训练过程中,提高泛化能力和提高神经网络的权值误差精度是矛盾的两个方面,目前的解决办法大多要靠在实际工程及训练过程中的经验,通过训练出大量的网络来分析比较,筛选出性能优良的网络。若能有精确具体的网络训练规则、权值误差设计标准规则那当然最好,可以使网络训练有章可循,不过这只是研究努力的目标而已,达到这个目标要走的路还很远,这的确是一个比较困难的棘手的问题。

## 致 谢

时光荏苒，日月穿梭，转眼间近三年的研究生生活将成为过去。在这即将告别校园的时刻，我要特别感谢我的导师孟正大教授。孟老师严谨的治学，渊博的学识，深邃的思想，广阔的学术视野，为我营造了一种良好的学习和科研氛围，他循循善诱的教导和不拘一格的思路给予我无尽的启迪。授人以鱼不如授人以渔，置身其间，耳濡目染，潜移默化，使我不仅仅接受了全新的思想观念，树立了宏伟的学术目标，而且领会了基本的思考方式，掌握了通用的研究方法。这些都是我今后工作和生活中的宝贵财富。

我要感谢在硕士研究生学习期间，给予我很大帮助的康庆生博士、徐庆宏博士、王新博士、张浩博士以及本实验室的胡广、戴志勇、王清元、谢为国、郝婷等同学，他们渊博的知识和熟练的技术给予我的学习和研究以很大帮助。

最后，还要特别感谢对我有养育之恩的父母，淳朴善良的妻子和可爱活泼的儿子，正是他们给予学习、生活上的关心和支持，才使我能顺利完成学业；在我遇到困难的时候，他们的支持是我奋斗和前进的动力之源！

## 作者在学期间发表的论文清单

1. 《On the Research of Neural-Network-Based Dynamics for Robot》 第一作者 发于 2004  
International Conference on Dynamics, Instrumentation and Control, 2004 年 8 月
2. 《一种基于神经网络的机器人轨迹跟踪方法》 第二作者 《华中科技大学学报》2004 年增刊
3. 《半无限规划可行解的一个有效算法》 第二作者 《济南大学学报》 2003 年 第一期
4. 《基于阻抗控制的机器人柔顺性控制方法研究》 第一作者 东南大学自动控制系统论文学术月学  
术论文集 2004 年 11 月

## 参 考 文 献

- [1] Alan Pugh. International trends in manufacturing technology. Robot Sensors, UK: IFS Publication Ltd, 1986
- [2] 殷跃红 朱剑英 尉忠信《机器人力控制研究综述》南京航空航天大学学报 1997 第二期 220-230
- [3] Hongan N. Impedance Control An Approach To Manipulation: 'Part I-theory, Part II-implementation, Part III- Application. J Dyn Sys Meas Cont,1985:1-24
- [4] Kazerooni H, Houpt P K, Sheridan T B. Robust Compliant Motion for Manipulators. Part I: The Fundamental Concepts of Compliant Motion. Part II: Design Methods. IEEE J Robotic Automat, 1986,RA-2(2):83-105
- [5] Lasky T A, Hsia T C. On Force-tracking Impedance Control of Robot Manipulators. Proc IEEE Int Conf Robot and automation. Sacramento California-April, 1991: 274-280
- [6] lisbury J K.Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates. Proc 19<sup>th</sup> IEEE Conf Decision Contr,1980:95~100
- [7] Chan S P, Yao B, Gao W B, Cheng M. Robust Impedance Control of Robot Manipulators. Int J Robotice Automation,1991,6(4):220~227
- [8] Seraji H, Colbaugh R. Force Tracking in Impedance Control. Int J Robotics Research, 1997,16(1):97~117
- [9] Arait. Ohtah. Suzukit. Collision avoidance among multiple robots using virtual impedance[A]. In Proc.IEEE/RSJ Int. Workshop Intelligent Robot. Syst. [C]. 1989:479-485
- [10] Nakabo Y, Ishikawa M. Visual impedance using 1ms visual feedback system[A].In Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation[C],1998
- [11] Tsuji T, Akamatsu H, et al. Vision-based impedance control for robot manipulators[A]. In CD-ROM Proc. IEEE/ASME Int.Conf.Advanced Intelligent Mechatronics[C]. 1997.
- [12] Toshio T, Makoto K. Noncontact impedance control for redundant manipulators[J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1999. 29(2).
- [13] Zhang H, Paul R P. Hybrid control of robot manipulators. In: Proc of the IEEE Int Conf on Robotics and Automation
- [14] Chung J C H, Leininger G G. Task-level adaptive hybrid manipulator control. International Journal of Robotic Research, 1990, 9(3):63-73
- [15] Kuc Tac-Yong, Lee J S, Park B Y. Adaptive hybrid force and position learning control of robot manipulator. In: Proceeding of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1994,3(94CH3571-5):2057-2062
- [16] Nicoletti G M. On the stability of hybrid adaptive controllers for robotic manipulators. In: Proceeding of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics V2. Publ by IEEE, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, USA: 967-971
- [17] 李杰、韦庆、常文森等 《基于阻抗控制的自适应力跟踪方法》 机器人 1999 第一期: 23-29
- [18] Connolly, Thomas H, Pfeiffer Friedrich. Neural network hybrid position/force control. In: International Conference on Intelligent Robots and Systems 1993. Piscataway, NJ, USA: IEEE, IEEE Service Center, (IEEE cat n93CH 3213-6), 1993. 240-244
- [19] Toshio F, Takashi K, Masatoshi T, et al. Position and force hybrid control of robotic manipulator by neural network (1<sup>st</sup> Report: Application of neural servo controller to stabbing control). Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, CHEN/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers: Part C, 1990,

56(527): 1854-1860

- [20] Chia-Ju Wu and Ching-Huo Huang. A Neural Network Controller with PID Compensation for Trajectory Tracking of Robotic Manipulators. J. Franklin Inst. Vol.333(B). No.4.1996:523-537
- [21] Xu Yangsheng, Paul R P. Robotic instrumented complaint wrist .Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, 1992,114(1):120-123
- [22] Salisbury, J. K (1980) Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates. IEEE Proceedings, Conference on Decision and Control.
- [23] Seul Jung. T.C.Hsia and R.G. Bonitz. Force Tracking Impedance Control for Robot Manipulators with an Unknown Environment: Theory, Simulation, and Experiment. International Journal of Robotic Research. Vol.20, No.9, 2001:765-774
- [24] Seul Jung. T. C. Hsia and R.G. Bonitz. Force Tracking Impedance Control of Robot Manipulators Under Unknown Environment. IEEE Transaction on Control Systems Technology. Vol. 12. No. 3.2004: 474-483
- [25] S.Jung, T.C.Hsia. Neural network techniques for robust force control of robot manipulators. In Proc. IEEE Symp. Intelligent Control, Monterey, CA, Aug. 1995: 111-116
- [26] T.C.Hsia. Simple robust schemes for Cartesian space control of robot manipulators. Int. J. Robot. Automat. Vol. 9, No. 4.1994: 167-174
- [27]戴先中 孟正大 沈建强 阮建山 《神经网络 $\alpha$ 阶逆系统控制系统方法在机器人解耦控制中的应用》 机器人 2001 第四期: 363-367
- [28]何丹 戴先中 王勤 《神经网络广义逆系统控制》 控制理论与应用 2002 第一期: 34-40
- [29]熊有伦 《机器人学》 机械工业出版社 1993 年第一版
- [30]李春文、冯元琨 《多变量非线性控制的逆系统方法》 清华大学出版社 1991 年 8 月