



硕士研究生开题文献综述

## 并联机构及力伺服控制综述

### An Overview of the Parallel Manipulator and Force Control

姓 名： 高树华

学 号： SY1207123

指导教师： 樊锐 教授 王丹 博士后

北京航空航天大学机械工程与自动化学院

2013 年 12 月

# 并联机构及力伺服控制综述

## 摘要

现有数控机床的可靠性试验通常采用“经时试验”方法针对样机进行，消耗大量材料并耗费较长时间，导致实验成本高，不符合现在“绿色制造”的要求。根据并联机构刚度大、承载能力强与定位精度高的特点，采用并联加载设备模拟载荷加载进行可靠性试验具有重要意义。本文针对相关主题的国内外研究现状进行了分析与概述，介绍了并联机构的发展、加载设备的进展，并着重对并联机构的力控制系统进行了相关阐述。 [Hello,world!](#)

**关键词：**加载设备；并联机构；力控制

# An Overview of the Parallel Manipulator and Force Control

## Abstract

At present the reliability of computer numerical machine tools (CNC) is usually tested with actual machining process consuming a mass of specimen and a long time, which results in high testing cost and goes far from the standards of “Green Manufacturing”. Parallel mechanism comes with high rigidity, high load capacity and high positional accuracy, so it is significant and practical to adopt parallel mechanism to apply load on CNC for reliability test. This paper presents an overview of relative topics about the development of parallel manipulators and loading equipment, especially the force control system of parallel manipulators.

**Keywords:** loading equipment; parallel manipulator; force control

## 目录

1	力加载设备介绍及发展现状.....	1
1.1	加载设备简介.....	1
1.2	加载设备的分类.....	1
1.3	加载设备的应用现状.....	1
1.4	材料试验机的研究进展.....	2
2	并联机构的发展现状.....	2
2.1	并联机构概念及应用.....	2
2.2	并联机构的特点.....	3
2.3	并联机构控制方法简介.....	3
2.4	基于并联机构的多维复合加载设备研究现状.....	4
3	串联、并联机构力伺服控制的研究与进展.....	5
3.1	力伺服控制策略概述.....	5
3.1.1	阻抗控制.....	6
3.1.2	力/位混合控制.....	7
3.1.3	自适应控制.....	7
3.1.4	滑模控制.....	8
3.1.5	智能控制.....	8
3.2	并联机构力控制.....	9
4	并联机构的动力学建模与参数辨识研究现状.....	11
4.1	动力学建模.....	11
4.2	系统辨识.....	11
4.2.1	系统辨识的概念.....	11
4.2.2	机器人动力参数辨识.....	11
4.3	动力学模型简化.....	12
5	总结.....	13
6	参考文献.....	14

# 1 力加载设备介绍及发展现状

## 1.1 加载设备简介

加载设备常用于给承力零件、结构、机构施加力载荷,检验其承力性能。加载运动主要是根据反馈的力信号进行控制,这种伺服技术称为力伺服技术。在工业现场或者实验室,为了检验某系统或某零部件的可靠性、验证设计思路,或者为了检测某种材料的性能指标,通常需要对承载对象在静止或者按照特定的规律运动的情况下施加恒定的或者变化的载荷来模拟其真实或者极限的工作状态。而考虑到成本、时间,其他条件限制,采用合适的力加载设备能很好的满足这种需求。通常所说的力加载设备,可以通过被动力控制机构或者力伺服系统来实现对给定部件或者机构的力加载,来模拟承载对象在特定的环境下负载状态。

## 1.2 加载设备的分类

按照承载对象是否运动分为静止加载(主动加载)和随动加载两种[1],主动加载又称静止加载,承载对象多在静止情况,常用于材料实验或者重要结构部件的静力加载。随动加载,是指承载部件是运动的,由于承载对象的干扰,模拟器结构和控制设计都较复杂,分析和设计都相对困难,用于实现运动部件的加载[2]。

根据驱动方式的不同,加载设备可以分为机械式、气动式、电液式、电动式四种。机械式加载设备,通过阻尼装置、调节弹簧或者质量块等特定的机械结构来实现负载力模拟。这类加载设备控制简单,但是不能跟踪载荷变化,只能用与某种特定情况的加载,改变加载状态通常需要更换相应的加载元件。气动式是利用气动元件进行加载,这种加载设备反应快但负载能力较弱。电液式力加载设备采用电液结合,电液式力加载设备由于其负载能力强便于控制已经在加载领域有了广泛的应用。电动式加载系统,加载执行机构为力矩电机,这类系统小信号跟踪能力强、加载分辨率高,适合小载荷工作;系统特性稳定,受环境因素影响小;体积小、维护简便;工作噪音小、无污染,适合在实验室环境下使用。限于目前的电机性能,这类系统工作频带、输出幅值相对较低。

## 1.3 加载设备的应用现状

加载设备作为负载模拟、可靠性评定等重要装置,在多学科领域都有着广泛应用。特别是随着计算机、传感器和力伺服技术的发展,采用先进力控制策略,加载设备可以模拟极限工作环境并实现对高速运动承载部件的随动加载。

在材料实验领域,加载设备被广泛的用于拉压扭转实验加载、冲击疲劳试验等实验。

在仪器仪表领域,加载设备也用于单维和多维力传感器的标定。

在航空航天领域,力加载设备有广泛地应用,涉及有舵机加载,航空航天重要结构部件的疲劳加载、直升飞机转轴加载、起落架加载等等。

在农业工程中,通过联合收割机、拖拉机的变速箱和传动轴等部件的加载来模拟真实作业环境,来评定联合收割机的可靠性。

在汽车工业中,汽车发动机连杆、传动轴等重要结构部件加载、汽车座椅安全性加载等来评价结构部件的可靠性。

## 1.4 材料试验机的研究进展

目前,加载试验机主要应用于材料与各种零部件的性能测试。材料试验机作为一种单独的产品,诞生于二百多年前的西欧,是测定材料机械性能的常用设备之一,可对各种金属、非金属材料进行拉伸、压缩、弯曲等试验,测定材料的强度、塑性等指标。材料试验机作为测试材料、构件乃至整机疲劳寿命的设备,在航空航天、车辆、船舶、建筑、机械等领域,一直被广泛的应用与研究[3]。

常用的材料试验机多为液压驱动,是一种典型的非线性时变系统,无法建立精确的数学模型。工业控制采用最多的经典 PID 控制方法中,控制参数  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  在整个控制过程中是固定不变的,不能满足 PID 参数进行适时自整定的要求,因此多将经典的 PID 控制方法与自适应控制相结合,从而构成参数可自调整的自适应 PID 控制方法。对此, Feng Kaixin[4]等采用了自适应 PID 控制算法,陈智军[5]、张将府[6]等分别提出了将传统 PID 控制和模糊控制两种控制策略结合的模糊自适应 PID 控制方法,改善了原有的控制性能。此外,针对材料试验机的非线性时变特性,一些智能控制策略也被应用到其控制系统之中。姜万录[7]等人将滑模变结构控制策略应用到典型电液伺服控制系统中。沈军飞[8]介绍了可拓学理论在材料试验机控制系统的应用。李胜[9]等人提出了分级比例控制的方法。

## 2 并联机构的发展现状

### 2.1 并联机构概念及应用

结构中包含一个或多个并联机构的机器称为并联构型装备。只要是多自由度,驱动器分配在不同环路上的闭式多环机构均可称为并联机构[10]。

最早关于并联机构的设想出现在 1928 年,当时美国的 Gwinnett 设计了一种用于娱乐的并联机构[11],并申请了专利。1947 年,英国伯明翰 Dunlop 橡胶公司的工程师 Gough 设计了一种用于测试飞机轮胎承载特性的并联机构,并于五十年代初完成建造[12],如图 1 所示。Gough 的这项新发明就是后来成为众多学者研究对象的 Gough-Stewart 并联机构。

Hunt 于 1978 年将 Stewart 平台用作机器人机构[13],此后出现了多钟并联机器人;1994 年芝加哥国际机床博览会(IMTS' 94)上,美国 Ingersoll 铣床公司、Giddings & Lewis 公司和 Hexel 公司首次展出了称为“变异型”(VARIAX)的数控机床和加工中心并引起了极大的关注[14],如图 2 所示,掀起了并联机床的研究高潮。当前一些并联机床已经进入机床市场,说明并联机床的性能已达到商品机床的水平。此外并联机构还用于机器人误差补偿器、驾驶模拟器、天文望远镜调整平台、力传感器、加载试验机[15]等。

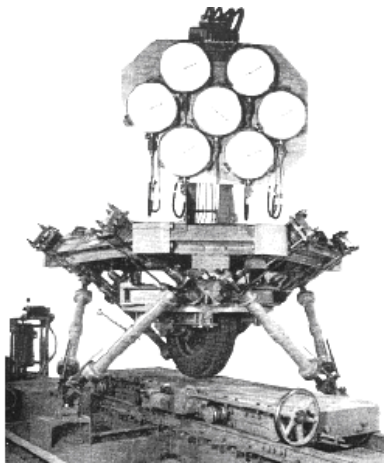


图 1 VARIAX 数控机床



图 2 Gough 设计的轮胎测试并联机构

## 2.2 并联机构的特点

并联机器人和传统工业用串联机器人在哲学上呈对立统一的关系,和串联机器人相比较,并联机器人具有以下特点:

- (1) 无累积误差,精度较高;
- (2) 驱动装置可置于定平台上或接近定平台的位置,这样运动部分重量轻,速度高,动态响应好;
- (3) 结构紧凑,刚度高,承载能力大;
- (4) 完全对称的并联机构具有较好的各向同性;
- (5) 工作空间较小,自身机构占地空间较大
- (6) 各支链闭环耦合,系统非线性较强,建模困难

根据这些特点,并联机器人在需要高刚度、高精度或者大载荷而无须很大工作空间的领域内得到了广泛应用,同时,针对并联机构的数学建模及控制策略等难点,国内外也展开了相应的研究,并取得了一定成果。

## 2.3 并联机构控制方法简介

由于并联机构是一类动力学特性随位形变化的系统,存在着错综复杂的耦合关系和严重的非线性,大量学者对其控制方法进行了研究。现有的并联机器人控制方法大体可分为两类:一类为基于模型控制。具体可以分为三种情况,第一,基于运动学动力学控制策略。假设末端执行器位移的微小变化与驱动器位移微小变化呈线性关系。其缺点是未考虑强耦合,非线性的动力学特性;第二,基于动力学模型的控制策略。依靠动力学逆模型求解出驱动器的力控制向量单独控制实施的条件是各驱动关节为解耦的,线性的。常用的算法 PD 策略, PID 和 PD+重力补偿;第三,基于性能的控制策略,自适应控制把每个独立关节当作子系统来考虑。如 Ghorbel 对 Rice Planar Delta[16]机器人的控制,以及 Burdet[17]等采用学习控制法对并联机器人的控制。由于大多数并联机构不能精确的得到操作臂的动力学参数,模型参数与



实际参数不匹配,必然会产生伺服误差。为此, Burdet 和 Honegger 等人曾试图采用自适应控制策略来实现并联机构的轨迹控制。然而,由于自适应控制要求实时辨识和修正模型参数,系统的实时性难以得到保证。另一类为非参数控制。有传统的 PID 反馈控制,以及模糊控制、神经网络控制、变结构滑模控制等智能控制方法。然而,智能控制方法在并联机器人的工程应用还存在很多问题有待解决,如模糊控制和变结构控制器的高频颤动现象;神经网络的隐层数量和隐层内神经元数的合理确定问题等。上述控制方法或因无法满足实时性要求,亦或因无可靠的硬件平台作为支撑,故大多难于付诸工程实际。

事实上,由于 PID 控制器参数整定方便、结构改变灵活,且对于大多数控制对象均能获得满意的控制效果,现有的工业机器人一般仍采用基于关节误差反馈信息的定增益 PID 调节器作为运控单元。但是,由于并联机器人为强耦合非线性系统,在高速运动时, PID 控制效果较差[18]。需要指出的是,以上方法都是从控制算法的角度考虑如何提高控制效果。实际上,探讨通过机械结构的轻量化减小关节之间的耦合作用,有效地改善系统的动态特性,同时采用商用控制器搭建控制系统,研究控制参数整定方法,实现机械手的高速运动控制,将是一件有很强现实意义[19]的工作。黄祯祥[20]等人引入智能控制方法将杆间耦合作用与负载扰动整合为一个对象,通过观测器对电机动力模型进行观测,并结合神经网络位置控制器对加速度进行控制,减小了各杆的位置跟踪误差与干扰信号对跟踪精度的影响。

崔泽[21]的文章提出了一种新的控制思路,不是以动力学建模为基础,将联合仿真的概念引入到机器人力控制领域。此方法直接得到机器人的虚拟样机模型而不需要推倒其烦杂的拉格朗日动力学方程。慈宇红[22]提供了基于模糊自适应 PD 的混合力/位置控制的避障算法,此方法对并联机构的力伺服控制有一定的借鉴作用。针对 Stewart 平台参数不确定性与干扰影响其轨迹跟踪精度的问题,李强考虑[23]了系统参数的不确定性,利用 Backstepping 方法结合滑模控制与自适应控制的优点,推导得到系统的多级自适应滑模控制器,以增强系统运行过程中对运动与力的跟踪性能。

## 2.4 基于并联机构的多维复合加载设备研究现状

随着国防与航空航天事业的发展,迫切需要研制高性能的多自由度加载设备。多维复合加载包括对被加载对象进行静态和动态的多维加载。静态多维加载设备可为材料多维负荷试验和部件校核提供重要实验数据,动态多维加载可为数控机床可靠性检测提供新的实验方法和手段,具有重大的意义。

静态加载适用于静态或者低速度、低加速度的准静态加载场合,其中加载力的控制多通过位置控制实现。吴乐彬[24]基于 Stewart 平台设计了一种静态加载设备,可以进行空间多维力加载,采用了模糊 PID 控制策略,并对目标对象进行了单自由度加载实验。唐静芳[25]等人研究了利用六自由度并联力加载系统对大型机械构件系统进行静态加载,实现在不同工况下的疲劳寿命测试试验,论文仅通过仿真验证了在被加载对象刚度变化,加载平台特性的变化。梁来雨[5]等人设计研究了液压驱动的超大型六自由度加载平台系统,用于对大型构件进行多维负荷整机加载,其平台机械结构如图 2 所示。其中,动平台采用柔性臂结构,以提供六个方向的输出力/力矩,通过建立液压缸轴向位移与轴向载荷的关系,将力加载的控制转化成对液压缸位置的伺服控制,并采用经典的 PID 控制策略。实验结果表明,在预加载力 100KN,频率为 0.8KHz 的交变力作用下,各支腿力误差低于 6%,满足实验误差要求。



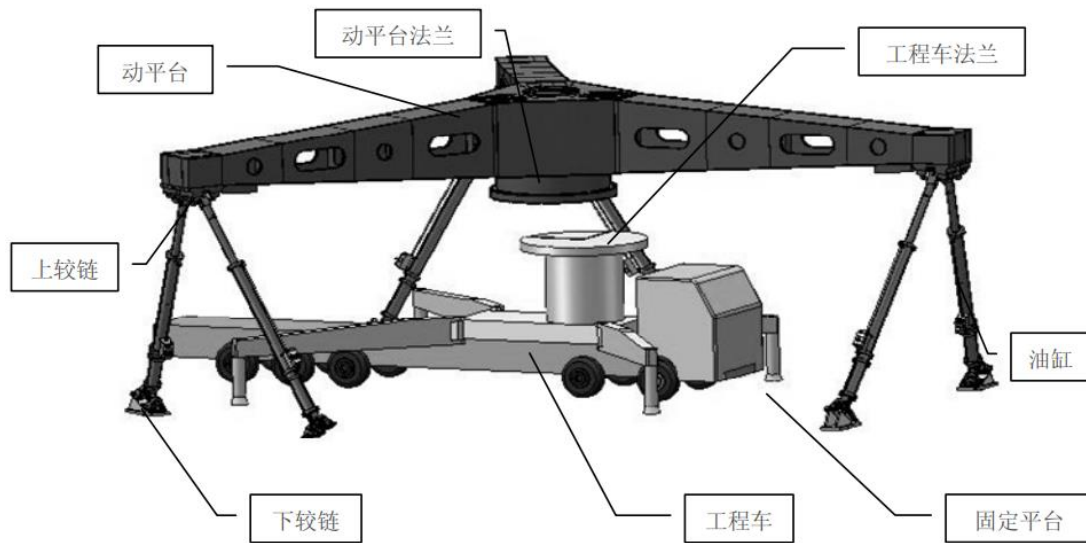


图 2 超大型六自由度力加载平台机械系统组成

动态加载应用于较高速度与加速度的场合，需要同时对位置与加载力进行闭环控制。现在主要的研究成果多集中于医疗康复机器人中。Takaiwa[27]设计了手腕康复设备，通过使用并联机构的六自由度实现跟踪患者手腕的复杂运动，同时使用阻抗控制方法实现对其的载荷控制。Satici[28]等将阻抗控制方法运用到脚踝康复设备中，即可适应脚踝的运动又可通过载荷控制实现患者的肌肉康复训练。Duan[29]等人基于 6-UPS 并联机器人，运用力位混合控制方法，设计提出了一种动关节康复设备。

### 3 串联、并联机构力伺服控制的研究与进展

#### 3.1 力伺服控制策略概述

机器人力控制是机器人研究的一个重要领域。成功应用于工业领域的机器人一般有两种操作模式：第一种，机器人操纵器在空间中做无约束运动，可以有效的跟踪空间的轨迹；第二种，机器人操纵器会与环境接触，在空间中的运动是有约束的。当机器与环境接触，即其运动在空间受到约束时，需要在控制机器人位置的同时，还要考虑机器人与约束环境之间交互作用力的控制[30]，例如基于并联机构的空间对接机构、零件快速拾取操作器以及本课题所研究的机床加载试验机等，均需要同时对其空间位置和环境接触力进行控制。

在机器人的研究中，要保证机器人在自由空间有较高的位置伺服精度就必须保证较高的位置伺服刚度和机械结构刚度；同时要使机器人在特定的环境中操作时可以对其产生任意的作用力就必须使其具有较高的柔性。这种柔性和刚性之间的矛盾是机器人研究的核心矛盾之一[31]。机器人能够对环境产生顺从的这种能力被称之为柔顺性(Compliance)。在机器人位置控制的基础上引入力反馈信号，构成力反馈闭环，主动地控制作用力，被称为主动柔顺性。因此，主动力控制也叫主动柔顺控制，本课题所研究的机床加载试验机的力伺服控制即属于主动柔顺控制。

串联和并联机器人力伺服控制的关键是合理处理力和位置控制之间的关系。

### 3.1.1 阻抗控制

Hogan[32]提出的阻抗控制, 在实现机器人顺应性控制与力伺服控制中得到了广泛的应用。阻抗控制的特点是不直接控制机器人与环境的作用力, 而是根据机器人端部的位置(或速度)和端部作用力之间的关系, 通过调整反馈位置误差、速度误差或刚度来达到控制力的目的。对于阻抗控制, MaPles 和 Becker 进行了总结:这类力控制不外乎基于位置和速度的两种基本形式。当把力反馈信号转换为位置调整量时, 这种力控制称为刚度控制; 当把力反馈信号转换为速度修正量时, 这种力控制称为阻尼控制; 当把力反馈信号同时转换为位置和速度的修正量时, 即为阻抗控制[33]。图 3 所示为基于位置的阻抗控制结构图。

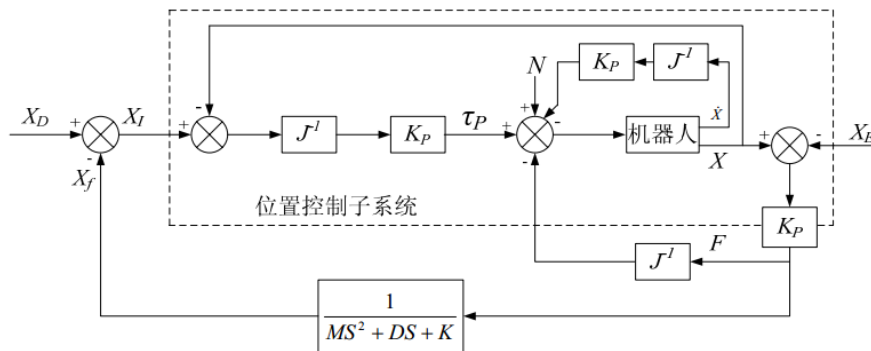


图 3 基于位置的阻抗结构控制图

阻抗将力控制和位置控制纳于一个框架之内, 用相同的策略去实现它们。具有以下优点: 它不需要精确的离线任务规划, 对自由运动和约束运动之间的转换具有很强的适应性; 对系统的不确定性和扰动具有较强的鲁棒性; 易于实现自由空间和约束空间之间的稳定过渡等。Hiroshi Wada[34]利用阻抗力控制算法设计了一种新的控制算法, 建立了单自由度机构的动力学模型, 证明这种方法可以很好的抑制外界的干扰。

阻抗控制的控制精度依赖于操作者对环境知识的精确了解, 但实际中环境往往无法精确得知, 因此阻抗控制多与其他控制策略结合使用。Lasky 和 Hsia[35]融合阻抗控制与力/位混合控制的优点, 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, 动力学模型不确定性在内环中被具有鲁棒性位置控制补偿。Ping-Lang[36]等人将阻抗力控制方法运用到膝关节外科手术的骨骼侧铣中。Seul[37]等人提出了一种力轨迹阻抗控制方法。Yao[38]等人提出了一种基于机器人阻抗特征的控制策略, 并且在 6 自由度机器人上进行试验验证。机器人的阻抗控制方法不仅运用于工业领域, 在医疗和仿生设计领域也有广泛的使用。徐国政[39]和孙洪颖[40]等人将阻抗控制方法运用到肢体康复机器人研制中。Kobayashi[41]和 Wang[42]等人将阻抗控制方法运用到灵动机器人手的研制当中。

由于阻抗控制可以明显改善经典 PID 控制对于高刚度对象大范围低频扰动适应能力差、幅值存在同频波动的情况, 使加载过程稳定性增强, 响应能力有较大提高, 所以阻抗控制成为并联机构力伺服控制的一个重要的方法。Babaci[43]较早地应用了自适应阻抗控制, 使用六自由度并联机构完成插孔试验, 取得了较好的效果。马昕[44]针对六自由度电液伺服并联机构提出了将阻抗控制方法引入基于位置的显力控制方案中, 结合对并联机构单自由度单液压缸的仿真研究, 论述了该控制策略的优越性并指出存在的问题。Sadjadian[45]针对三自由度并联机构采用了一种基于动力学模型的阻抗控制方法。Tsoi[46]将阻抗控制运用到三自由

度并联机构中,并且通过实验验证其可以很好的实现对力和位置的控制。Fatemi[47]改进了传统的阻抗控制方法,引入了权重参数使并联机构能够更好实现轨迹和力的跟踪。

### 3.1.2 力/位混合控制

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,其方法是对机构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。力/位混合控制的基本结构如图 4 所示。

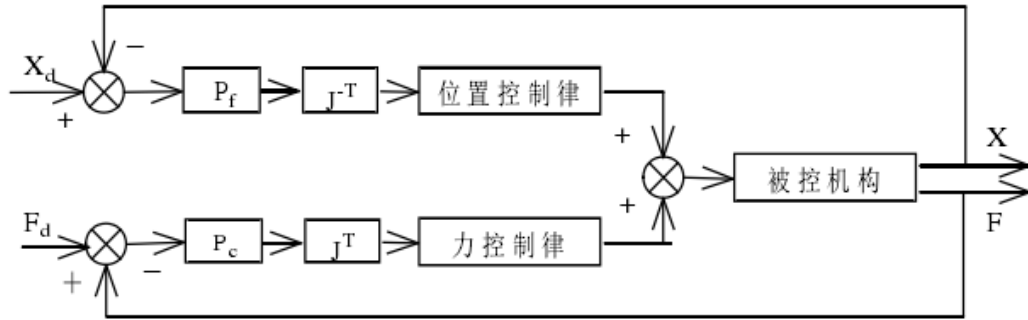


图 4 力/位混合控制的基本结构

国内外对力/位混合控制均进行了大量研究。Madani[48]提出了一种力位混合控制方法,即可控制末端执行器的运动轨迹,又可控制与之联系的接触力。慈宇红[49]将力位混合控制成功运用到机器人的避障控制领域内。邓国勇[50]提出采用混合力位移控制方法对人体脊柱三维运动模拟器进行加载。张也琛[51]提出了基于迭代学习方法的力位混合控制器设计。

国内外也有许多研究将力/位混合控制应用于并联机构的力伺服控制中。Kosuge[52]针对液压伺服驱动并联机构提出了力位混合力控制算法。Siciliano[53]针对拥有柔性铰链的并联机构进行了研究,利用奇异摄动理论将系统分为两部分:刚体运动的缓慢子系统与柔性运动的快速子系统,对于刚体子系统采用力/位混合控制,而对于柔性子系统则采用快速控制以稳定其变形状态。仿真结果表明其控制算法性能良好。沈辉[54]等人针对平面二自由度冗余驱动并联机构进行了力伺服控制研究,其根据该并联机构约束流形的几何特点,将逆动力学自然投射到形子空间与约束力子空间中,然后根据投射方程建立了一种渐近稳定的自适应力/位混合控制算法,并用仿真结果证明了其有效性。Touati[55]等人针对并联机构 MIMO 系统提出了基于神经网络的力位混合控制方法。张立勋[56]等人将力/位混合控制方法应用到绳索驱动并联机构控制系统当中,力回路用于控制绳的张力大小,位置回路用于实现末端轨迹跟踪,仿真结果表明该控制策略能同时力与位置控制的要求。

近些年来,王磊[57]等人提出一种适用于未知接触环境下的智能预测力控制算法,此算法可应用于阻抗控制模型和力/位混合控制模型。为了验证算法在形状和刚度均未知的接触环境下进行力跟踪的有效性,构建一个开放式的力控制平台,在不同跟踪速度,不同控制模型等条件下进行了实验研究,仿真结果表面其动态性能良好。

### 3.1.3 自适应控制

并联机构为多自由度、时变、强耦合且非线性的复合体,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,难以得到受控系统精确的控制模型,而现代控制理论应用的基础则是建立受控系统的数学模型,因此在处理并联机构的控制问题时将受到很大限制。自适应控制技术可以用来解决不确定的环境限制、干扰和未知的系统信息[58],因而在并联控制中也得到了较多应用。例如,无模型自适应控制方法可以解决控制器设计依赖受控系统数

学模型的问题[59], 而反推自适应控制在处理线性和某些非线性系统时, 在改善过渡过程品质方面表现出较大的潜力, 尤其在航空航天领域成功应用于飞机和导弹控制而备受关注[60]。

Han-gyoo Kim[61]应用自适应力控制策略, 设计了一种新型的力伺服控制的机械臂, 其中应用了神经网络控制和模糊逻辑控制, 结构显示其机构的稳定性和可操作性很强。Kuc Tac-Yong[62]等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。李杰、韦庆、常文森[63]等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, 对补偿误差、干扰和环境知识等不确定因素具有鲁棒性。

经典的工业 PID 控制也往往吸收自适应控制的优点, 在控制模型中融入自适应算法以构成自适应 PID 控制, 从而更好地满足并联机构的控制需求。杨灏泉[64]、段学超[65]等人均引入了自适应 PID 的控制策略。其中, 杨灏泉提出了一种具有输入、输出前馈补偿的模糊自适应 PID 控制策略, 段学超等人引入自适应交互算法解决 PID 参数的实时调整。Ryu[66]等人运用自适应控制策略思想推导得出一种有效的非线性摩擦补偿方法, 并且可以作为改进方法非常方便的运用到传统的 PID 算法中, 提高控制系统的性能。

#### 3.1.4 滑模控制

滑模控制也叫变结构控制, 系统的“结构”并不固定, 可以在动态过程中, 根据系统当前的状态有目的地不断变化, 迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动, 具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点。

Rasco[67]等人运用滑模控制研究了单自由度机器人与环境单边接触时的情况。许春山[68]等人提出一种自适应终端滑模变结构控制算法并将它应用到机器人位置控制系统中。Kreuter[69]提出了一种鲁棒滑模控制方法, 将此方法运用到伺服电机的速度和力控制当中, 可有效减小外界环境摄动对系统的影响。

在并联机构控制领域, 滑模控制近几年已成为热门研究方向。毕可义[70]针对非对称型并联机构 3 RRRP 设计了滑模控制算法, 该算法解决了滑模控制的震颤问题, 系统的鲁棒性好, 且系统抗干扰能力强, 对系统参数变化不敏感, 具有良好的跟踪性能, 实现了对该并联机构的高精度实时控制。朱彩虹[71]等人则针对以交流伺服电机驱动的并联机构机构 GPM200 设计了一种动态滑模控制算法, 仿真结果表明其算法鲁棒性好, 系统抗干扰能力强, 具有良好跟踪性能。邬燕忠[72]等人针对二自由度冗余驱动并联机构, 提出了并联机构的快速终端滑模控制(FTSMC)提高其鲁棒控制, 并利用 Lyapunov 函数证明了该控制系统的稳定性。仿真结果表明, 与采用普通滑模控制相比, 该控制系统具有状态响应速度快, 系统状态在有限时间内收敛到零的特点。Choi[73]等人则针对机构负载扰动的不确定性, 设计采用了滑模控制算法, 该系统具有较好的轨迹跟踪能力。

#### 3.1.5 智能控制

对于串、并联机构的控制, 其面临时变、强非线性、强耦合以及环境的不确定性, 并且同时引入位置与力负反馈, 给系统建模带来很大困难, 难以获得精确的系统模型。面对日益复杂的控制问题, 研究者们把传统控制理论与模糊逻辑、神经网络、遗传算法等人工智能技术相结合, 充分利用人类的控制知识对复杂系统进行控制, 逐渐形成了智能控制理论。智能控制不需要系统的精确数学模型, 具有自推理、自学习、自组织和较强的容错能力, 特别适



合于复杂的非线性时变系统等。

Xu Yangsheng[74]等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;殷跃红[75]等研究的智能力/位并环控制结构,将力控制大系统分解成相关子系统,将力/位并行输入,利用模糊神经网络进行综合,输出为位置量。能将力控制于 0.5N 的变化范围内,有效解决了碰撞和未知环境的约束等问题。高国琴[76]等针对 2-DOF 并联机器人,设计了一个二输入的模糊控制器,实现了对其无模型智能控制。

但目前智能控制多数尚处于理论研究与实验阶段,运用于实际工业控制的案例很少。由于其依赖先验经验,且收敛速度受初始参数影响很大,需要大量的计算推理,因此难以应用在实时控制之中。

在实际机器人的控制应用中,往往并不局限于某一种控制策略,而是多种控制方法结合使用,以期达到最好的控制效果。高道祥和薛定宇[77]等人以力/位混合控制为基础,利用自适应算法调节系统的未知参数,同时在参数自适应律中引入死区,使自适应控制器具有较强的鲁棒性能,而滑模控制消除了死区自适应律引起的参数误差 并且具有较强的干扰抑制能力。张庭[78]等提出了一种抓握力控制策略,在自由空间和约束空间中分别使用基于位置的阻抗控制和力跟踪阻抗控制,在过渡过程中使用模糊观测器切换控制模式,并且提出一种自适应滑模摩擦力补偿方法,得系统跟踪误差在有限时间内收敛。可见,多控制策略结合,在不同状态使用不同的控制策略,将成为机器人控制技术的发展趋势。

### 3.2 并联机构力控制

国内外学者关于串联机构力和力矩控制已经做了大量研究工作<sup>[1]</sup>,但作为并联力加载设备,国内外相关研究还比较少。考虑到并联机构的结构复杂性、多变量性、多自由度、多参数耦合的非线性等因素[58],既需要考虑如何将较成熟的串联机构力控制的相关理论应用到并联机构的力控制中,也需要有针对性对并联多维力加载设备的控制策略进行相关的设计改进等研究工作。

与串联机构和单维力控制相比,并联机构力控制领域研究的相关文献较少,很多研究者将串联力控制领域相关控制策略运用到并联机构控制其的设计中来,取得了一定的研究成果。

Antonio M. Lopes[79]设计了一种基于加速度的力阻抗控制的六维并联机械手,如图 5,控制部分由三个部分组成:内部 6 个单自由度的力控制器,阻抗控制器和外部力控制器(outter force controller)。其基本的控制思路是用位置限制力控制,而力控制基于阻抗控制。

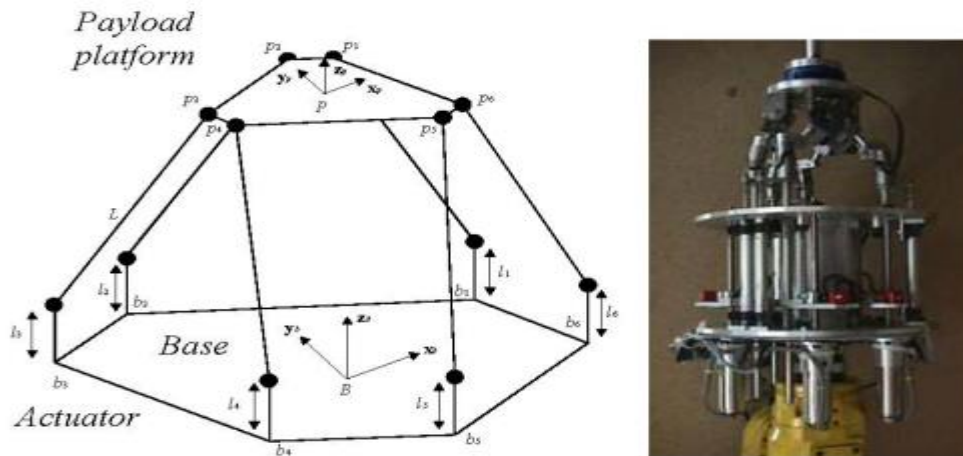


图 5 六自由度并联机械手

采用力阻抗控制在并联机械手上, 能实现接触力控制和运动力跟随, 但其实验中机械手与环境接触时产生的力尖峰和在机械手变加速度、变速运动造成力扰动对力加载设备来说都是很致命的问题。

David J. Gibling[80]使用了力/位置混合控制法对机构进行控制, 同时他也提出了力/位目标轨迹跟踪法应用于 Stewart 平台, 并进行了低速情况下的力控制仿真。运用该方法可以对 Stewart 平台进行动力学建模, 铰链点的力矩表达式如下, 通过此可以得到力控制的相关参数。

孔令富[81]在文章中研究了一种针对 6-dof 并联机器人的修正位置/力控制系统, 其根本是在现有并联机器人运动控制系统的基础上, 参照串联机器人力控制系统的研究成果, 在不改变机器人位置控制器的前提下实现力外环调节的修正位置/力控制。文中内容对改善并联机器人控制质量与性能大有益处。

经典的力控制理论虽然能够实现并联机构的力控制, 但无法满足并联力加载设备的高速度、高加速度随动加载的工作环境。为了进一步提高并联机构的力控制性能, 相关学者将根据并联机构的特点将智能控制的诸多方法引入到其力控制中。Babaci[82]等将模糊自适应控制应用到并联机构穿洞实验的力控制中, 并取得里一定的研究成果, 但对于不同的机构如何设计其模糊规则是要解决的问题。

单纯的智能控制方法在未知环境下要达到良好的力控制性能, 会增加控制系统设计的复杂程度且性能也欠佳。Steven [83]指出机构的动力学特性会造成力控制的不稳定和精确动力学模型的建立对于精确力控制的重要性, 文章 并将动力学模型和阻抗自适应控制应用到并联机构的力控制中, 提出了基于模型参考的自适应控制的广义力加载设备。

根据以上相关分析, 要实现并联力加载设备在承载对象高速、高加速度的情况下的变力加载, 精确动力学模型的建立是非常必要的。在此基础上设计基于模型参考的自适应算法, 既能降低控制算法设计复杂程度, 也能够满足控制要求。此外为了实现动力学模型的实时计算和参数的在线辨识, 控制系统的实时性也是很重要的一个问题[84]。



## 4 并联机构的动力学建模与参数辨识研究现状

### 4.1 动力学建模

机构动力学模型的建立是并联机器人机构研究的一个重要方面,是并联机器人机构进行动力学模拟、动态分析、动力学优化设计及控制的基础[85]。建立动力学模型的常用方法有:牛顿-欧拉(Newton-Euler)法、拉格朗日(Lagrange)法、达朗贝尔(d'Alembert)原理、虚功原理(Virtual Work Principle)法、Kane法、高斯(Gauss)法、旋量(对偶数)法、罗伯逊·魏登堡(Roberson-Wittenburg)法和影响系数(Influence Coefficient)法等。

李永刚[86]等人利用牛顿-欧拉法对 3RPS 并联机构进行了逆动力学分析,陈根良[87]等则基于广义坐标形式牛顿-欧拉法对空间并联机构的正向动力学问题进行了研究。隋春平[88]、Notash Leila[89]等则利用拉格朗日方法对柔性并联机构进行了动力学建模。Zhu Zhengli[90]和 Wu Jun[91]等人则利用虚功原理对不同的并联机构进行了动力学建模,并将模型应用到控制方案之中。Yang[92]和谢文建[93]采用 Kane 方法为六自由度电液伺服驱动并联机构建立动力学模型,此方法建模过程简单通用,适用范围较广。Yen[94]使用达朗贝尔原理为三平动自由度并联机器人建立动力学模型。Gallardo[95]采用旋量法为两自由度并联机构和 Stewart 平台建立动力学模型。

在经典的动力学建模方法之中,牛顿欧拉法概念清晰,方法直观易懂,可以同时求出主动驱动力与各关节的约束力,但是推导过程相对复杂,求解所需方程数目庞大。拉格朗日法以系统的动能和势能为基础,推导过程较牛顿欧拉法相对简单,能够得到简洁统一的动力学方程形式,但应用在并联机构动力学分析时,由于其各支链的耦合性,难以得到基于广义坐标的显式运动方程,往往需要通过分割成串联机构并附加约束来进行研究,过程复杂,且两阶求导计算量巨大。虚功原理与 Kane 方法则可以对并联机构整体进行分析,其关键是求解反映各关节速度关系的 Jacobian 矩阵,推导相对简单,并且方程中不出现导数,系数矩阵仅需要做矢量的点乘或者叉乘,通过基本代数方程即可求解,计算量小,非常适合计算机计算[96];其缺点则是不能求出各关节的约束反力,而且 Kane 方法没有明确的物理意义。

### 4.2 系统辨识

#### 4.2.1 系统辨识的概念

系统辨识是指利用测得的数据(如输入、输出数据)基于统计方法来求得目标系统的数学模型或者等效数学模型。辨识是控制理论的重要组成部分,它属于应用数学中的求逆问题。系统辨识包括两个方面:结构辨识与参数估计。如果模型结构已经给定,只是其参数尚未知,则系统辨识就变成参数估计问题。相对于白箱与黑箱模型,系统的参数估计又被称为“灰箱”模型[97]。

#### 4.2.2 机器人动力参数辨识

当串联、并联机器人应用于速度、加速度较大或者轨迹复杂、精度要求高的场合时,必须考虑系统的动力学影响,即在机器人的控制系统中引入动力学模型。在目前的串并联机器人控制方法中,除了智能控制可以实现无模型控制外,其余控制方法均是基于模型的控制算法。因此,系统模型是否准确是决定控制精度甚至控制可行性的关键。

当把动力学模型引入到控制策略中后,系统动力学模型的相关参数则需要尽可能精确的获得。动力学模型主要包括两类参数:惯性参数与摩擦力参数。而这些参数的获得,概括起来可以分为解体测量方法[98]、CAD 方法[99]以及整体辨识方法[100]。解体测量法是将机器人拆解后,对各部分进行测量,使用此方法,惯性参数中的质量容易测得,而质心位置和惯性张量值则难以测量,而关节弹性和摩擦力作用更无法测得;CAD 方法是利用目标机器人的 3D 模型进行相关参数计算,但考虑实际加工过程误差以及材料的不均性等,此方法得到的只是理论值;整体辨识方法则是给机器人一个特定轨迹,然后测量运动过程中的系统输入、输出以及状态数据等,从而根据一定辨识方法求得待辨识的动力学参数。系统整体辨识方案是在不解体情况下进行的,与机器人实际工作时的状态完全一致,因此辨识结果体现了机器人实际工作时的各种因素对动力学的作用,获得的是最能反映实际系统的模型[101]。

国内外对串联机器人的动力学参数辨识研究工作较多,而针对并联机器人的动力学参数辨识研究则相对较少。丛爽等[102]人利用加权最小二乘法(WLS)对冗余驱动的平面二自由度并联机构进行了参数辨识,首先利用拉格朗日方法建立了系统的动力学模型并建立了系统的非线性摩擦力模型,其中包含待辨识的惯性参数以及模型力参数,然后在给定的圆周轨迹下进行了离线辨识。Nidal Farhat 等[103]研究了 3RPS 并联机构的动力学参数辨识,利用 Gibbs-Appell 方程建立了系统的动力学模型,并将摩擦力分为线性与非线性两部分进行建模,然后利用非线性约束优化方法对系统进行了辨识,并与最小二乘法进行了比较。利用线性回归方法进行参数辨识时,前提是建立系统线性形式的动力学方程,对此 Jun Wu 等[104]人利用虚功原理推导了一种动力学方程线性化的方法。M. Gautier 等[105]对机器人基本惯性参数数值算法进行了研究, J. Swevers 等[106]则对辨识过程所需的轨迹优化进行了研究,提出了一种基于傅里叶级数的轨迹优化方法,并得到了较广泛应用。

由于并联机构的各支链闭环耦合结构,导致其较强的非线性,使得其运动学、动力学模型求解与控制算法均较为复杂,在一个伺服周期内需要大量的计算。因此,控制系统的实时性成为一个较为重要的研究问题。为提高并联机构控制系统的实时性,多对其动力学模型进行简化。

### 4.3 动力学模型简化

并联机构的动力学模型较为复杂,在目前研究中,对其动力学模型的简化多集中在对动平台所连接的连杆的直接简化上。

Alain Codourey[107]对 Delta 并联机构进行了研究,指出利用计算转矩法进行控制可以减弱并联机构各支链耦合的影响,但由于并联机构难以建立一个可用于实时控制的简化动力学模型,致使此方法在并联机构的应用上受到限制。随后,论文中提出了一种动力学模型简化方法,即忽略前臂的转动惯性力及关节的摩擦力、机构变形等,并将前臂质量分配到动平台与后臂上,从而得到了一种简化的动力学模型并将其用于计算转矩解耦控制。实验结果表明,可以实现 Delta 并联机器人的快速准确运动。

Alain Codourey 只是简单地将质量按照 1/3 与 2/3 的规则进行了分配,对此, Yangmin Li 等[108]引入了质量分配系数的概念,对其进行连续离散取值并比较当质量分配系数取不同值时的误差大小,从而得出适合特定并联机构的最小误差质量分配系数。针对其论文所研究的 3PRC 平移并联机构,得到的最佳质量分配系数为 0.58。

Jinsong Wang[109]等人针对 6UPS 并联机构提出一种动力学简化方案,通过对动平台及

支链惯性力和转动惯量的分解, 目标机构的动力学模型被分解为 18 个子部分。然后在匀速及加、减速情况下分别进行分析, 对驱动力贡献较小的部分被忽略。仿真结果表明, 逆动力学的计算效率提高了 34.3~74.01%。

## 5 总结

综上所述, 力伺服控制及并联机构已经成为人们研究的热点。各种形式的并联机构已经慢慢的从样机、概念, 逐渐形成了现有的产品, 为科技发展、技术进步提供了一个很好的平台。随着科学技术的发展, 并联机构已被广泛应用于航空航海、加工制造装配、轻工业和医疗器械等领域, 为其更广阔的发展开拓了道路。与机构形式相配合的控制方式也在二十世纪得到了前所未有的发展, 从传统的 PID 控制, 到目前流行的智能控制方式, 使得控制策略更加新颖, 组合形式更加多样, 为我们选择合适的控制策略奠定了基础。而力伺服控制作为控制的一种形式, 正在被越来越多的人所关注, 从文章可以看出, 很多设备在使用力伺服控制后将得到比位置伺服更好的效果。

当前串、并联机构的力伺服控制策略主要有阻抗控制、力/位混合控制、自适应控制、滑模控制与智能控制等, 其中目前研究较多的为阻抗控制与力/位混合控制。当前研究者多考虑将原用于串联机器人的较成熟力控制方法移植到并联机构的力控制上, 并根据并联机构自身的特性如无积累误差、大刚度、耦合性与非线性等进行相应的改进, 通常采用多控制方法结合使用的控制策略, 从而可以增强并联机构力控制的适应性与鲁棒性。例如自适应控制、智能控制等对并联机构非线性条件下力控制性能具有较好的改善作用。

但是并联机构的控制相对于串联机构更加复杂, 而其加载性能很大程度上要取决于并联机构的力控制, 即力伺服技术。相对于成熟的位置伺服技术, 研究和应用上还有很大的差距。特别是并联机构的力控制技术的研究的文献还比较少, 且大部分还处于实验室研究阶段, 还需要大量的实验研究工作。而作为力控制基础的系统数学模型如运动学、动力学模型, 适应于并联机构力控制的算法, 将成为研究的热点与难点。特别, 在复杂数学模型与复杂控制算法的情况下, 如何有效提高控制系统的实时性, 也是一个具有较大研究意义的方向。

## 参考文献

- [1] 朱伟. 电动负载模拟器控制方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- [2] 张菊丽. 舵机动态加载系统控制仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [3] 王建国. 材料力学性能测试与评价技术进展[J]. 工程与试验, 2008, 1-15.
- [4] Feng Kailin, Xing Jizhan, Wang Bin. Control system of a new multiple-point loading test machine for architecture component [A]. Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet), 2011 International Conference on 2011:162-165.
- [5] 陈智军, 蔡增伸, 施文康. 基于模糊自适应 PID 的材料试验机控制系统 [J]. 计算机测量与控制, 2005, (11): 1226-1229.
- [6] 张将府, 陶向阳, 汪雄海. 材料试验机的控制策略研究及实现 [J]. 机电工程, 2007, (09): 59-62, 73.
- [7] 姜万录, 董彩云, 张齐生等. 变结构控制方法在材料试验机中的应用[J]. 流体传动与控制, 2007, (04): 20-24.
- [8] 沈军飞. 材料试验机可拓控制的控制算法实现 [J]. 宁波工程学院学报, 2005, (04): 13-17.
- [9] 李胜, 朱发明, 裴翔等. 分级比例控制及其在材料试验机中的应用[J]. 机床与液压, 2003, (02): 14-15, 253.
- [10] Bradley J N. improved force control through visual serving: Proceedings of the American Control Conference[Z]. Washington: 1995A10-A14.
- [11] Gwinnett, J.E., "Amusement devices," US Patent No. 1,789,680, January 20, 1931.
- [12] Roselund, H.A. Means for moving spray guns or other devices through predetermined paths. US Patent No. 2,344,108, March 14, 1944.
- [13] Hunt, K.H., Kinematic geometry of mechanisms[M], Oxford University Press. 1978.
- [14] 言川宣. 机床结构的重大创新—Varix 机床问世[J]. 世界制造技术与装备市场, 1995, 1: 16-17.
- [15] Y. X. Su, B.Y. Duan. The Application of the Stewart Platform in Large Spherical Radio Telescopes[J]. Journal of Robotic Systems, 2000, 17(7): 375~383.
- [16] Ghorbel H D. Experimental validation of a reduced model based tracking control of parallel robots[J]. Proceedings of IEEE International Conference on Control Application. 2001: 375-382.
- [17] Burdet E R L C A. A trivial and efficient learning method for motion and force control[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2001: 14-487.
- [18] 刘宏伟. 基于螺旋理论的少自由度并联机构运动分析[J]. 制造业自动化. 2009, 31(7): 101-103.
- [19] 李占贤. 高速轻型并联机械手关键技术及样机建造[D]. 天津: 天津大学, 2004.

- [20] 黄祯祥, 郭延文, 廖剑霞, 周书. 六自由度虚轴机床神经网络位置伺服控制[J]. 农业机械学报. 2007, 38(4): 146-150.
- [21] 崔泽, 刘玉萍. 机器人力控制仿真试验与研究[J]. 计算机仿真. 2008, 25(2): 203-206.
- [22] 慈宇红, 弓洪玮, 袁俊英, 温淑焕. 基于模糊力控制算法的移动机器人避障控制[J]. 计算机仿真. 2009, 26(7): 220-223.
- [23] 李强, 王宣银, 程佳. Stewart 液压平台轨迹跟踪自适应滑模控制[J]. 浙江大学学报. 2009, 43(6): 1124-1128.
- [24] 吴乐彬. 基于电液伺服并联六自由度机构的广义负载模拟理论和实验研究[D]. 2010.
- [25] 唐静芳. 六自由度力加载系统的建模与仿真[D]. 2009.
- [26] 梁来雨. 超大型六自由度加载平台系统的研究与实现[D]. 华中科技大学硕士论文, 2011.
- [27] Takaiwa M., Noritsugu T. Development of wrist rehabilitation equipment using pneumatic parallel manipulator [A]. Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on 2005:2302-2307.
- [28] Satıcı A. C., Erdogan A., Patoglu V. Design of a reconfigurable ankle rehabilitation robot and its use for the estimation of the ankle impedance [A]. Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on 2009:257-264.
- [29] Daun Q. J., Daun B. Y., Daun X. C. Dynamics modelling and hybrid control of the 6-ups platform [A]. Mechatronics and Automation (ICMA), 2010 International Conference on 2010:434-439.
- [30] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 机械工业出版社, 1997:46~64, 187~222, 385~397.
- [31] 杨振. 基于阻抗控制的机器人柔顺性控制方法研究[D]. 东南大学, 2005.
- [32] 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.
- [33] 王耀南. 机器人智能控制[M]. 科学出版社, 2004:167~228.
- [34] Kazuhiro Kosuge Toshio Fukuda Hiroshi Wada. design of force controller based on frequency characteristics[J]. IEEE Xplore. 1994. 610-615:
- [35] 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.
- [36] Ping-Lang Yen, Cheng-Hsin Liu. Impedance force control for lateral milling of bone in total knee arthroplasty [A]. Systems, Man and Cybernetics, 2007. ISIC. IEEE International Conference on 2007:2960-2964.
- [37] Seul Jung, Hsia T. C. Force tracking impedance control of robot manipulators for environment with damping [A]. Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of



the IEEE 2007:2742-2747.

[38] Yu Yao, Qingjiu Huang, Yan Peng, etc. Hybrid position, posture, force and moment control with impedance characteristics for robot manipulators [A]. Mechatronics and Automation (ICMA), 2011 International Conference on 2011:2129-2134.

[39] 徐国政. 上肢康复机器人自适应控制理论与实验研究[D]. 2010.

[40] 孙洪颖, 张立勋, 李长胜. 卧式下肢康复机器人主动柔顺控制实验研究[J]. 高技术通讯, 2011, 21(6).

[41] Kobayashi D., Watanabe K., Kobayashi K., etc. Impedance force control of robot hand using pressure sensor [A]. SICE Annual Conference (SICE), 2011 Proceedings of 2011:1981-1984.

[42] Xuelin Wang, Yongguo Zhao, Xinjian Fan, etc. Active gripping impedance force control with dual fingers hand [A]. Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011 International Conference on 2011:4531-4534.

[43] Babaci S., Amirat Y., Pontnau J., etc. Fuzzy adaptation impedance of a 6 dof parallel robot: Application to peg in hole insertion [A]. Fuzzy Systems, 1996., Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on 1996:1770-1776 vol.3.

[44] 马昕. 六自由度并联机器人力控制系统的研究[D]. 2000.

[45] Sadjadian H., Taghiradf H. D. Impedance control of the hydraulic shoulder a 3-dof parallel manipulator [A]. Robotics and Biomimetics, 2006. ROBIO '06. IEEE International Conference on 2006:526-531.

[46] Tsoi Y. H., Xie S. Q. Design and control of a parallel robot for ankle rehabilitation [A]. Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2008. M2VIP 2008. 15th International Conference on 2008:515-520.

[47] Fatemi S. A., Majd V. J., Ebrahimpour M. R. Parallel force and position control with the aid of variable impedance model in robot manipulators [A]. Electrical Engineering (ICEE), 2012 20th Iranian Conference on 2012:952-956.

[48] Madani M., Moallem M. Hybrid position/force control of a flexible parallel manipulator [J]. Journal of the Franklin Institute, 2011, 348(6): 999-1012.

[49] 慈宇红, 弓洪玮, 袁俊英, 等. 基于模糊力控制算法的移动机器人避障控制 [J]. 计算机仿真, 2009, 26(7): 4.

[50] 邓国勇. 基于六自由度关节机器人的人体脊柱生物力学实验系统研究[D]. 2009.

[51] 张亚琛. 精密电子组装设备动力学建模和力/位置控制问题研究[D]. 2009.

[52] Kosuge K., Takeo K., Fukuda T., etc. Force control of parallel link manipulator with hydraulic actuators [A]. Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on 1996:305-310 vol.1

[53] Siciliano B., Villani L. Parallel force and position control of flexible manipulators [J]. Control



- Theory and Applications, IEE Proceedings -, 2000, 147(6): 605-612.
- [54] Shen Hui, Wu Xu-Zhong. Hybrid Position/Force Adaptive Control of Redundantly Actuated Parallel Manipulators [J]. ACTA AUTOMATICA SINICA, 2003, 29(4): 567-572.
- [55] Touati Y., Amirat Y., Saadia N. Artificial neural network-based hybrid force/position control of an assembly task [A]. Intelligent Systems, 2006 3rd International IEEE Conference on 2006: 594-599.
- [56] 张立勋, 刘樊, 王克义, 等. 三自由度绳牵引平面并联机器人力/位控制研究 [J]. 机械设计与研究, 2008, 24(3): 4.
- [57] 王磊. 开放式系统中基于智能预测算法的力控制实验研究 [J]. 机床与液压, 2008, 36(5): 9-14.
- [58] Weidong Chen Jun Luo Zhijun Li. Adaptive compliant force-motion control of coordinated non-holonomic mobile manipulators interacting with unknown non-rigid environments [J]. Neurocomputing. 2007: 1330-1344.
- [59] 侯忠生. 无模型自适应控制的现状与发展 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586-591.
- [60] 董文瀚, 孙秀霞, 林岩. 反推自适应控制的发展及应用 [J]. 控制与决策, 2006, 21(10): 1081-1086.
- [61] Han-gyoo Kim. A new interpretation of force and servo control of robot arms [M]. Osaka, Japan. 1991: 1623-1628.
- [62] 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.
- [63] 李杰, 韦庆, 常文森等. 基于阻抗控制的自适应力跟踪方法 [J]. 机器人, 1999, (1): 23-29.
- [64] 杨灏泉, 赵克定, 吴盛林. 液压六自由度并联机器人控制策略的研究 [J]. 机器人, 2004, 26(3): 5.
- [65] 段学超, 仇原鹰, 段宝岩等. 宏微并联机器人系统自适应交互 PID 监督控制 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 8.
- [66] Ryu Jee-Hwan, Song Jinil, Kwon Dong-Soo. A nonlinear friction compensation method using adaptive control and its practical application to an in-parallel actuated 6-dof manipulator [J]. Control Engineering Practice, 2001, 9(2): 159-167.
- [67] Rasco. Feedback stabilization and force control using sliding modes in a mechanical system subject to unilateral constraints [A]. Variable Structure Systems (VSS), 2010 11th International Workshop on 2010: 341-345.
- [68] 许春山. 机器人关节转矩力控制系统的关键问题研究 [D]. 2003.
- [69] Kreutzer U., Gerling D. Robust speed and force control of electrical drives using self-adjusting sliding mode [A]. Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on 2010: 1-6.

- [70] 毕可义,高国琴,韩亚锋. 基于步进电机驱动并联机器人的无震颤滑模控制研究[J]. 机床与液压, 2006, (9): 3.
- [71] 朱彩红,高国琴,陆晶等. 基于交流伺服电机驱动的并联机器人动态滑模控制[J]. 机械设计, 2007, 24(5): 3.
- [72] 郭燕忠,高国琴,严琴. 快速终端滑模控制在并联机器人中的应用[J]. 机械设计与制造, 2010, (4).
- [73] Choi Seung-Bok, Park Dong-Won, Cho Myoung-Soo. Position control of a parallel link manipulator using electro-rheological valve actuators [J]. Mechatronics, 2001, 11(2): 157-181.
- [74] Xu Yangsheng, Paul R P. Robotic instrumented complaint wrist. Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME, 1992,114(1):120~123.
- [75] 殷跃红, 慰忠信, 黄晓曦等. 智能机器系统力觉及力控制技术. 国防工业出版社, 2001:95~97.
- [76] 高国琴,宋庆,夏文娟.并联机构的动力学分析及其无模型智能控制[J].机械设计与制造,2011,(9):90-92.
- [77] 高道祥,薛定宇,陈大力. 机器人位置/力混合鲁棒自适应控制[J].系统仿真学报,2007,19(2):348-351.
- [78] 张庭,姜力,刘宏. 仿生假手抓握力控制策略[J].机器人,2012,34(2):190-196.
- [79] Antonio M Lopes F G A. Acceleration Based Force-Impedance Control of a 6-dof Parallel Robotic Manipulator[J]. IEEE Xplore. 2009.
- [80] David J Giblin M Z. Target Tracking Manipulation Theories for Combined Force and Position Control in Open and Closed Loop Manipulators[J]. Transactions of the ASME. 2007, 129: 326-334.
- [81] 孔令富. 6-DOF 并联机器人修正位置-力控制系统的研究[J]. 机器人. 1998, Vol. 20: 303-308.
- [82] S. Babaci, Y. Amirat, J. Pontnau .Fuzzy Adaptation impedance of a D.O.F Parallel Robot.application to pag in hole insertion[J].
- [83] Steven D. Eppinger and Warren P. Seering.Introduction to Dynamic Models for Robot Force Control[J].IEEE CDC 1987.
- [84] 孔令富 韩佩富 黄真等.并联机器人力控制算法实时并行处理[J].计算机工程设计.1998,vol19(6):26-29.
- [85] 刘善增,余跃庆,杜兆才等. 并联机器人的研究进展与现状(连载) [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007, (7): 7.
- [86] 李永刚. 基于牛顿-欧拉法的 3-rps 并联机构逆动力学分析 [J]. 航空学报, 2007, 28(5): 6.
- [87] 陈根良, 王皓, 来新民, 等. 基于广义坐标形式牛顿-欧拉方法的空间并联机构动力学正问题分析 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(7): 8.

- [88] 隋春平, 张波, 赵明扬, 等. 一种 3 自由度并联柔索驱动柔性操作臂的建模与控制 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(6): 6.
- [89] Notash Leila, Kamalzadeh Amin. Inverse dynamics of wire-actuated parallel manipulators with a constraining linkage [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(9): 1103-1118.
- [90] Zhu Zhenqi, Li Jinsong, Gan Zhongxue, etc. Kinematic and dynamic modelling for real-time control of tau parallel robot [J]. Mechanism and Machine Theory, 2005, 40(9): 1051-1067.
- [91] Wu Jun, Wang Jinsong, Wang Liping, etc. Dynamics and control of a planar 3-dof parallel manipulator with actuation redundancy [J]. Mechanism and Machine Theory, 2009, 44(4): 835-849.
- [92] Yang Chifu, Huang Qitao, Han Junwei. Computed force and velocity control for spatial multi-dof electro-hydraulic parallel manipulator [J]. Mechatronics, 2012, 22(6): 715-722.
- [93] 谢文建. 六自由度并联机器人的动力学建模及力控制研究[D]. 2004.
- [94] Yen Ping-Lang, Lai Chi-Chung. Dynamic modeling and control of a 3-dof cartesian parallel manipulator [J]. Mechatronics, 2009, 19(3): 390-398.
- [95] Gallardo J., Rico J. M., Frisoli A., etc. Dynamics of parallel manipulators by means of screw theory [J]. Mechanism and Machine Theory, 2003, 38(11): 1113-1131.
- [96] 张国伟, 宋伟刚. 并联机器人动力学问题的 Kane 方法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(7): 1386-1391.
- [97] Henrik Aalborg Nielsen, Henrik Madsen. Modelling the heat consumption in district heating systems using a grey-box approach. Energy and Buildings, 2006, 38 (1), 63-71.
- [98] 孙昌国, 马香峰, 谭吉林. 机器人操作臂惯性参数的计算[J]. 机器人, 1990, 12(2): 19-24.
- [99] 王树新, 张海根等. 机器人动力学参数辨识方法的研究[J]. 机械工程学报, 1999, 35(1): 23-26.
- [100] Jun Wu, Jinsong Wang, Zheng You. An overview of dynamic parameter identification of robots[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26: 414-419.
- [101] 耿令波. 工业机器人动力学参数辨识方法研究[M]. 南京航空航天大学硕士论文, 2013.
- [102] Weiwei Shang, Shuang Cong. Dynamic Identification of a Redundantly Actuated Parallel Manipulator[J]. Proceeding of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009, 1756-1761.
- [103] Notash Leila, Kamalzadeh Amin. Inverse dynamics of wire-actuated parallel manipulators with a constraining linkage [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(9): 1103-1118.
- [104] Jun Wu, Jinsong Wang. Dynamic formulation of redundant and nonredundant parallel manipulators for dynamic parameter identification[J]. Mechatronics, 2009, 19: 586-590.
- [105] M. Gautier. Numerical Calculation of the Base Inertial Parameters of Robots[J]. Journal of Robotics Systems, 1991, 8(4): 485-506.
- [106] J. Swevers, C. Ganseman. Experimental Robot Identification Using Optimized Periodic

Trajectories[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1996, 10(5):561-577.

[107] Alain Codourey. Dynamic Modelling and Mass Matrix Evaluation of the DELTA Parallel Robot for Axes Decoupling Control[C]. Intelligent Robots and Systems '96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference, Volume 3, 1211-1218.

[108] Yangmin Li, Qingsong Xu. Dynamic modeling and robust control of a 3PRC translational parallel kinematic machine[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2009, (25):630-640.

[109] Jinsong Wang, Jun Wu. Simplified strategy of the dynamic model of a 6-UPS parallel kinematic machine for real-time control[J]. Mechanism and Machine Theory. 2007, (42):1119-1140.