

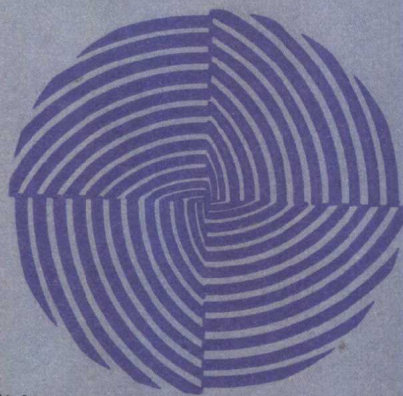
Series of Works by the Doctoral Advisers of Hebei University

河北大学博导书系

# 液压6-DOF并联机器人 操作手运动和力控制的研究

YEYA 6-DOF BINGLIAN JIQIREN CAOZUOSHOU YUNDONG HE LI KONGZHI DE YANJIU

主 编 王洪瑞



河北大学出版社

# 液压 6-DOF 并联机器人 操作手运动和力控制的研究

主 编 王洪瑞

副主编 王洪斌

主 审 黄 真

副主审 宋维公

河北大学出版社

责任编辑:马 力

封面设计:张志伟

责任印制:李晓敏

### 图书在版编目(CIP)数据

液压 6-DOF 并联机器人操作手运动和力控制的研究/  
王洪瑞主编. —保定:河北大学出版社, 2001. 8  
(河北大学博导书系)

ISBN 7-81028-763-X

I. 液… II. 王… III. 液压机器人-机器人控制  
IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 042843 号

出版:河北大学出版社(保定市合作路 88 号) 经销:全国新华书店

印制:河北新华印刷一厂 规格:1/32(880mm×1230mm)

印张:16.25 字数:320 千字 印数:1~2000 册

版次:2001 年 8 月第 1 版 印次:2001 年 8 月第 1 次

ISBN 7-81028-763-X/TP·37

定价:29.00 元

## 出版说明

值此河北大学八十周年华诞之际,《河北大学博导书系》与读者见面了。

八十年的风雨历程,使河北大学逐步成熟,渐入佳境。尤其改革开放二十多年,更使河北大学如浴春风,飞速发展。成就世人瞩目,展示方式丰富多彩。作为学校有机组成部分的河北大学出版社,为了向校庆献一份厚礼,更为了学校的超常发展,根据自己的特点和能力,决定编辑出版《河北大学博导书系》。

大学之“大”,不在其楼高院阔,而在它的文化创造能力、传播能力和影响能力。在河北大学范围内,博士生导师是肩负文化创造、传播和发挥影响力重任的主要力量。《河北大学博导书系》选取科研论文结集出版的形式,旨在总结以往的科研成就,展示目前达到的科研水平,以期向世人汇报河北大学的文化创造能力、传播能力和影响能力。

《河北大学博导书系》涉及内容广泛,从一个侧面说明了河北大学的综合性质;其中的每一本、每一篇论文,都是作者劳智费神的创造性结晶。相信读者阅读之后会有切身的感悟和体会。

在《河北大学博导书系》的编辑出版过程中,曾得到校领导的大力支持和悉心指导,也承蒙博士生导师们极力配合和积极参与,对此表示诚挚谢意。

河北大学出版社

# 前 言

并联机器人相对于串联机器人来说是一类全新的机器人,它具有刚度大、承载能力强、误差小、精度高、自重负荷比小、动力性能好、控制容易实现等一系列优点,与目前广泛应用的串联式机器人在应用上构成互补关系,因而扩大了整个机器人的应用领域。并联机器人可以作为航天上的飞船对接器、航海上的潜艇救援对接器;工业上可以作为大件的装配机器人、精密操作的微动器。可以预见这类机器人在新世纪里将有更加广泛的发展前景。

本书是在吸收国内外先进理论和经验的基础上,以燕山大学研制的国内第一台液压并联机器人实验室样机为对象,对并联机器人的控制模型控制系统的组成和所采用的控制策略等一系列问题进行分析研究。集中了近几年来我们对并联机器人控制理论研究的成果。全书共分八章。内容涉及并联机器人的发展概况,应用前景,动力学模型,计算机控制的硬件实现,最优控制、变结构控制、神经网络控制、模糊控制和位置/力控制等先进的控制策略。

第1章简述了并联机器人的发展概况和应用前景;第2章建立了并联机器人的运动学模型和动力学模型;第3章根据并联机器人所具有的特点,设计了一套相应的计算机硬件系统。

设计过程中,在满足系统设计要求的前提下,保证硬件系统的合理性与可靠性,同时也考虑到系统实现中的成本问题;第4章第5章分别从最优控制、变结构控制等角度对并联机器人进行了控制研究。在生命科学和人工智能的推动下,控制理论和自动化领域出现了提高控制系统智能化的强大趋势。为此我们将智能控制引入到并联机器人的控制中,在本书的第6章第7章分别采用了神经网络控制和模糊控制两种控制策略对并联机器人进行了控制研究。在第8章中对并联机器人的位置/力控制进行了深入的研究。

本人的博士生王洪斌为本书的编排、校对付出了辛勤的劳动,同时在本书的编写过程中得到了张克勤、卢国祥、侯增广、苏飞、李秋和马昕及在校研究生的协助,谨向他们致谢。

由于时间和水平的限制,疏漏不妥之处,盼请广大读者不吝批评指正。

王洪瑞

2001年3月

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	( 1 )
1.1 并联机器人的发展概况 .....	( 1 )
1.2 六自由度并联机器人结构简介 .....	( 3 )
1.3 并联机器人的应用前景 .....	( 5 )
1.4 机器人控制综述 .....	( 9 )
第 2 章 并联机器人系统 .....	( 11 )
2.1 6-SPS 并联机器人结构参数 及工作原理 .....	( 11 )
2.2 并联机器人运动学模型 .....	( 14 )
2.3 并联机器人动力学模型 .....	( 22 )
2.4 液压伺服系统及其数学模型确定 .....	( 35 )
2.5 轨迹规划一般方法介绍 .....	( 42 )
本章小结 .....	( 54 )
第 3 章 并联机器人计算机控制系统硬件结构 .....	( 56 )
3.1 计算机集中控制系统的硬件组成 .....	( 57 )
3.2 关键部件的选择及应用 .....	( 58 )
本章小结 .....	( 67 )
第 4 章 基于 LQ 理论的机器人运动控制的研究 .....	( 68 )



4.1	序言 .....	( 68 )
4.2	LQR 基本理论 .....	( 70 )
4.3	离散 LQ 最优控制的基本问题 .....	( 73 )
4.4	具有扰动补偿的离散 LQ 最优 轨迹跟踪控制 .....	( 80 )
4.5	加权阵的选择 .....	( 88 )
4.6	仿真研究及其结论 .....	( 90 )
	本章小结 .....	( 100 )
<b>第 5 章</b>	<b>基于变结构理论的运动控制的研究</b> ...	( 102 )
5.1	变结构控制理论概述 .....	( 102 )
5.2	轨迹跟踪离散变结构控制系统 (DVSCS)设计 .....	( 119 )
5.3	机器人轨迹跟踪单通道控制系统 仿真研究 .....	( 133 )
	本章小结 .....	( 149 )
<b>第 6 章</b>	<b>基于 CMAC 神经网络运动控制的研究</b> ...	( 151 )
6.1	CMAC 神经网络的基本原理 .....	( 151 )
6.2	系统综合 .....	( 164 )
6.3	系统仿真研究 .....	( 169 )
	本章小结 .....	( 173 )
<b>第 7 章</b>	<b>基于模糊自适应的运动控制的研究</b> ...	( 174 )
7.1	模糊逻辑系统的一般描述 .....	( 174 )
7.2	一种柔性结构的模糊控制器 .....	( 179 )
7.3	FS-FLC 并联机器人轨迹 跟踪控制 .....	( 184 )

7.4 并联机器人模型参考自适应 控制策略的研究·····	(197)
本章小结·····	(206)
<b>第8章 力控制方法</b> ·····	(207)
8.1 概述·····	(207)
8.2 机器人力控制基本方法·····	(211)
8.3 先进力控制方法·····	(224)
8.4 关于并联机器人力控制系统及其 仿真研究·····	(227)
8.5 六自由度六液压缸协调力控制·····	(262)
本章小结·····	(268)
<b>参考文献</b> ·····	(270)
<b>学术论文选集</b> ·····	(281)
卡尔曼滤波器在电子称量装置中的应用···	(282)
并联机器人轨迹跟踪变结构控制的研究···	(293)
RESEARCH FOR DECOUPLING OF THE SERIES MORE-LINK ROBOTS·····	(303)
TRAJECTORY CONTROL OF PARALLEL ROBOT BASED ON PREDICTIVE CONTROL THEORY·····	(324)
VARIABLE STRUCTURE MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL OF ROBOT·····	(344)
FORCE SENSING RESISTOR AND ITS APPLICATION TO ROBOTIC	

CONTROL .....	(359)
BH—1 灵巧手运动学和动力学建模研究.....	(369)
状态反馈鲁棒解耦控制器的设计 .....	(382)
高阶系统跟随低阶模型从模型取状态的 MRACS 设计方法 .....	(391)
步进电机控制系统在机器人误差补偿器中 的应用 .....	(401)
基于Stewart 平台的 6 维力传感器各向同性 的进一步分析 .....	(410)
DESIGN OF 6 - AXIS FORCE/TORQUE SENSOR BASED ON STEWART PLATFORM RELATED TO ISOTROPY .....	(422)
基于物体目标阻抗的多指手协调混合阻抗 控制的研究 .....	(436)
OPTICAL FIBER APPLICATION TO THE OBJECT RECOGNITION OF DEXTEROUS HAND .....	(450)
机械手指动态矩阵控制 .....	(459)
模型参考自适应在轧机两侧压下特性一致 控制中的应用 .....	(470)
并联机器人基于滑模理论的模糊控制 .....	(483)
一种非线性变结构控制器的设计 .....	(493)
光电脉冲编码器在并联机器人位移检测中 的应用 .....	(503)

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 并联机器人的发展概况

并联机器人的 Stewart 平台是 Gough 在 20 世纪 40 年代设计用于测量轮胎的. 1965 年, Stewart 发表了最早的有关六自由度平台的文章, 后又将这种平台置于飞机模拟装置中作为飞行模拟器<sup>[1]</sup>. 1972 年 Minsky 提出了将 Stewart 平台用于操作装置的运动结构<sup>[2]</sup>. 同时, 美国 NASA 等研究中心公布了六自由度平台的研究成果, 相继出现了装有六自由度运动平台的飞行模拟器<sup>[3]</sup>.

Hunt 教授在 1978 年建议采用这种机构作为机器人操作器<sup>[4]</sup>. 1979 年 MacCallion, H 与 Pham, D. T. 首次将该机构按操作器设计, 用于机器人的装配车间<sup>[5]</sup>; 随后 Marconi 设计了第一台商用六自由度并联操作装置 GADFLY<sup>[6]</sup>, Clavel 提出了一种空间三自由度适用于轻

载快速拾放作业的并联机器人 DELTA<sup>[7]</sup>,作为一种扩展, Picrrot 等人提出了一空间六自由度并联机器人 HEXA<sup>[8]</sup>,并在日本制造出了实验室样机. 美国的 Oregon 大学、法国的 INIRA 等都相继研制出了并联机器人样机.

80 年代中期, Stewart 平台在空间交会对接(RVD)仿真技术方面得到了应用,目前应用该机构进行 RVD 仿真的有美国、俄罗斯、欧空局、日本等国家和机构.

1994 年在美国芝加哥国际机床展览会上, G&L 公司展出了第一台利用 Stewart 平台机构的虚拟轴机床,到 1997 年欧洲国际机床展览会 EMO'97 上,就有英、美、德等国展出的虚拟轴机床多达 10 余台. 目前日本已有 10 多家公司和研究单位在生产和研制此类机床. 国外甚至已出现了虚拟轴机床的某些专用功能部件(如球关节)的生产厂,德国的 INA 公司可提供球铰,还可连同伸缩杆一起供货.

我国六自由度并联平台起步较晚,起先均出现在引进的六自由度飞行模拟器上,如 Boeing707、737、757 及 777 飞行模拟器和三叉戟飞机及 MD-82 飞机飞行模拟器<sup>[9]</sup>等,都用于民航飞行员的培训. 随后,以燕山大学为首的一批院校及科研单位先后建立了不同规格的平台机构,其中燕山大学着重于该机构在机器人操作臂方面的研究. 吉林工业大学、哈尔滨工程大学等着重于运动模拟. 清华大学于 1997 年底完成了我国第一台虚拟轴机床的研制<sup>[10]</sup>,另外有近 10 个高校和研究单位(如

东北大学和沈阳机器人研究中心)在进行虚拟轴机床的研究或研制.

## 1.2 六自由度并联机器人结构简介

六自由度并联机器人是以六自由度的 Stewart 平台作为其机构,它是用六个驱动杆将上、下两平台联接而形成的,如图 1-1 所示.驱动杆与上、下平台之间分别用虎克铰或球铰联接,六个驱动杆均可独立地自由伸缩,这样,上平台相对于下平台就可以完成空间六个自由度的运动.上平台正是通过这六个杆件的协调动作来实现其在空间的全自由度运动及操作.

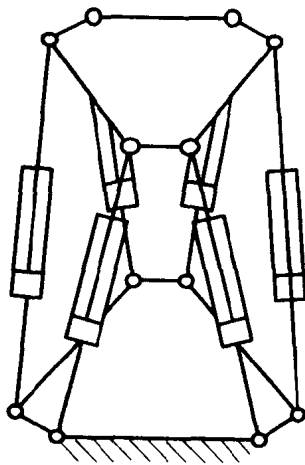


图 1-1 并联机器人结构简图

表 1-1 串联机构与并联机构性能对比

项目 \ 机构	串联机构	并联机构
刚 度	低;弹性相互叠加;杆件受到弯矩	高;刚性相互叠加;杆件只受拉力和压力
承载能力	低	高
误差传递	各杆件误差相互叠加	各杆件误差形成平均值
运动质量	大;一个杆件使跟随杆件加速;工件、工作台大部分都运动	小;各杆件运动自由;工件与工作台不动
动态性能	随各杆件尺寸的加大而变化	即使杆件尺寸较大,也具有较好的动态性能
工作空间	大	小
调 节	各杆件可单独调节,简单	同时调节各杆件,复杂
运动学正解	容易	复杂
运动学反解	复杂	容易
定位精度	低	高

目前应用的工业机器人大部分是串联结构的,即组成机器人的各杆件是由关节顺次联接成的一个开链式机构,这种机构本身存在着承载能力弱、刚度低、操作速度慢及精度不高等特点,因而限制了机器人技术在某些

领域内的应用<sup>[11]</sup>. 而并联机器人所采用的闭环机构与串联机器人的开链式机构相比, 正可以弥补其不足之处, 两种机构性能比较如表 1-1 所示. 从表中分析可知, 许多串联机构的优点正是并联机构的缺点, 而并联机构所具有的优点却恰恰是串联机构的缺点. 有些学者将其称为串联、并联的“对偶”关系(serial-parallel duality)<sup>[12]</sup>.

由于串联、并联机器人在结构及性能特点上的对偶关系, 因此它们之间在应用上不是替代关系而是互补的关系, 它们各自都有其特殊的应用领域. 同时我们也可以将这两种结构有机地结合起来, 以便充分发挥它们各自的优点, 以此来扩大机器人的应用范围.

## 1.3 并联机器人的应用前景

由于并联机器人本身具有串联式机构无法比拟的特点, 因此, 它的应用日益广泛, 应用的领域也在不断地扩展. 按并联机器人的工作特性, 将其应用分成三大类: 机器人操作器, 虚拟轴机床及运动仿真器.

### 1.3.1 并联机器人操作器

并联机器人可以在汽车总装线上安装车轮, 此时将并联机器人横向装于一个回转台上, 回转台可以绕垂直轴旋转, 车轮从侧面传递过来. 机器人夹钳夹住车轮, 将轮子的孔正对车轮, 并推进一个距离安装上车轮, 然后



将所有螺栓一次拧紧.这一过程不但减少了人力资源和装配时间,而且增强了安装的可靠性.此外,并联机器人还可以倒装在具有 X、Y 两方向的受控天车上,用于大件装配,如可用于汽车总装线上吊装汽车发动机.

并联机器人的另一个应用是作为飞船对接器的对接机构.两个航天器在宇宙空间进行交会对接时要进行多达 12 个自由度的轨道和姿态控制,涉及到许多相当复杂的理论和基础.飞船的对接要求上下平台中间都有通孔,以作为结合后的通道,它的上平台就成为对接机构的对接环,其上的导向片可以帮助两面飞船的对接;同时这个机构还完成主动抓取,对正拉紧,柔性结合,最后锁定卡紧等工作.因此,这个对接机构在交会对接时需要有机人的精确位置控制,航海上也有类似的应用,如潜艇救援中也用并联机构作为两者的对接器.

并联机器人也可以用于工业过程中的切削过程,如可用它进行玻璃的切割.另外也可用作喷漆、点焊机器人.对于许多地下工程,如土方挖掘,煤矿开采,也可用这种并联机构的机器人,并联机器人也可以用于钢坯的修磨<sup>[13]</sup>及轮船表面污垢的清理.

并联机器人也可用作微动机构或微型机构,其精度可达到微米级,这种微动机构发挥了并联机构的工作空间小但精度和分辨率极高的优点.如燕山大学研制的误差补偿器可以装于其他机器人的末端来进行误差补偿.此外这种微动机构也可用于眼科手术<sup>[14]</sup>和微细胞外科手术中的细胞操作.