

少自由度 并联机构研究与设计

李研彪 张征 孙鹏 编著



科学出版社

少自由度并联机构 研究与设计

李研彪 张 征 孙 鹏 编著

本书获浙江工业大学专著与研究生教材出版基金资助
(基金编号 20170107)



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍少自由度并联机构的最新研究进展和作者近年来从事相关研究工作的最新成果。本书提出了一种新型拟人机械腿机构和新型5-DOF气囊抛光机床；介绍了新型拟人机械腿机构、新型5-DOF气囊抛光机床和球面5R并联机构的运动学、动力学及设计方法等问题；定义了多项运动学与静力学传递性能评价指标，并给出这些运动学与静力学传递性能评价指标分别在工作空间内的分布情况；基于性能图谱的概率参数设计方法，给出了新型拟人机械腿机构和新型5-DOF气囊抛光机床的设计方案。

本书可作为高等学校机械工程类相关专业的研究生教材，也可供机械工程领域的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

少自由度并联机构研究与设计/李研彪，张征，孙鹏编著. —北京：科学出版社，2018.6

ISBN 978-7-03-057397-1

I. ①少… II. ①李… ②张… ③孙… III. ①空间并联机构-研究②空间并联机构-设计 IV. ①TH112.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第094584号

责任编辑：朱英彪 赵晓廷 / 责任校对：张小霞

责任印制：张 伟 / 封面设计：蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年6月第 一 版 开本：720×1000 B5

2018年6月第一次印刷 印张：10 7/8

字数：216 000

定价：80.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前 言

相对于串联机构, 并联机构具有结构紧凑、承载能力强、运动精度高和运动惯性小等优点, 在机械加工、仿生、军事、医疗、生物、航天和海洋工程等领域有着很好的应用。并联机构属于多自由度运动机构, 其结构参数较多且运动耦合, 因此并联机构的设计与控制比较复杂。并联机器人的结构学与运动学主要研究并联机器人的构型综合、运动分析、奇异位型、工作空间、灵巧度分析和位置校准等, 这些工作是实现机器人设计、控制和应用研究的基础。动力学分析及控制策略的研究主要是对并联机器人进行动力学分析和建模, 且利用各种可能的控制算法对并联机器人实施控制, 从而达到期望的运动轨迹和控制效果。

本书第一作者多年来一直专注于并联机构运动学性能、结构参数设计方法和动力学模型等问题的研究, 在并联机构学领域取得了一定的成果, 本书就是对相关成果的总结。全书共 8 章, 分别从少自由度并联机构的研究现状、拟人机械腿运动性能、拟人机械腿动力学分析、拟人机械腿全域性能分析、新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床和对应的方案设计、球面 5R 并联机构的运动学性能和动力学模型等方面进行详细阐述。此外, 本书广泛参考了国内外有关代表性论著, 对于他人的工作, 书中在引用时已做了标注, 在此向相关作者表示感谢。

本书内容相关的研究工作先后得到了国家自然科学基金项目 (51475424)、浙江省自然科学基金杰出青年项目 (LR18E050003)、浙江工业大学研究生教学改革项目 (2017102、2017302、2017303、2017114、2016129) 等的资助。本书获浙江工业大学专著与研究生教材出版基金 (基金编号 20170107) 和浙江省一流 A 类学科 (机械工程) 资助。

本书由浙江工业大学李研彪、张征和孙鹏编著。研究生刘毅、李景敏、郑超、冯帅旗、徐梦茹、罗怡沁、王林、郑航、王泽胜、秦宋阳和徐涛涛等为本书做了大量工作, 在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限, 书中难免存在疏漏和不妥之处, 敬请读者提出宝贵意见。

作 者

2018 年 1 月于浙江工业大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 少自由度并联机器人的研究现状	4
1.2.1 四自由度并联机器人的发展与应用	5
1.2.2 五自由度并联机器人的发展与应用	8
1.3 拟人机械腿的研究现状	9
1.4 5-DOF 气囊抛光机床的研究现状	13
1.5 本书内容安排	14
1.6 本章小结	15
参考文献	15
第 2 章 拟人机械腿的运动性能分析	22
2.1 方案设计	22
2.1.1 设计思想	22
2.1.2 髋关节机构原型	25
2.1.3 膝关节和踝关节机构原型	26
2.2 自由度分析	26
2.2.1 空间方位角的表示	26
2.2.2 空间机构自由度计算公式	27
2.3 位置分析	29
2.3.1 位置反解	29
2.3.2 位置正解	31
2.3.3 算例	33
2.4 工作空间分析	34
2.4.1 结构约束分析	34
2.4.2 工作空间形状分析	34
2.4.3 设计参数对工作空间的影响	38
2.5 运动学性能分析	39

2.5.1	雅可比矩阵的求解	40
2.5.2	雅可比矩阵分析	43
2.5.3	运动学性能评价指标	44
2.5.4	仿真分析	45
2.6	静力学分析	47
2.6.1	静力平衡方程	48
2.6.2	静力学性能评价指标	50
2.6.3	仿真分析	51
2.7	本章小结	53
	参考文献	54
第 3 章	拟人机械腿的动力学分析	57
3.1	动力学建模	57
3.1.1	运动影响系数概述	57
3.1.2	动力学模型的建立	60
3.2	拟人机械腿伺服电机模型预估	69
3.2.1	电机驱动结构简述	69
3.2.2	伺服电机转速预估	69
3.2.3	电机转速仿真	70
3.3	伺服电机转矩预估	71
3.3.1	空间机构静力学基础	71
3.3.2	伺服电机力矩预估模型	73
3.3.3	电机力矩仿真	74
3.4	控制器设计	75
3.4.1	迭代学习控制基础	75
3.4.2	自适应控制基础	77
3.4.3	自适应迭代学习控制理论分析	80
3.4.4	仿真	83
3.5	本章小结	85
	参考文献	86
第 4 章	拟人机械腿的全域性能分析	88
4.1	拟人机械腿的空间模型	88
4.1.1	拟人机械腿的模型简化	88

4.1.2 拟人机械腿的空间模型分析	89
4.2 拟人机械腿的全域性能评价	92
4.2.1 拟人机械腿的全域性能评价指标	92
4.2.2 拟人机械腿的全域性能图谱	93
4.3 拟人机械腿的参数优化	96
4.3.1 基于遗传算法的优化方法	97
4.3.2 尺寸设计的目标函数	97
4.3.3 遗传算法的仿真计算	98
4.4 拟人机械腿的三维建模	100
4.4.1 膝关节结构	100
4.4.2 胡克铰结构	101
4.4.3 装配体结构	101
4.4.4 拟人机械腿的方案实现	102
4.5 本章小结	103
参考文献	103
第 5 章 新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床	105
5.1 新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床布局特点	105
5.2 位置分析	107
5.2.1 位置反解	107
5.2.2 位置正解	109
5.2.3 算例	110
5.3 工作空间分析	111
5.3.1 结构约束分析	111
5.3.2 工作空间形状分析	111
5.3.3 设计参数对工作空间的影响	114
5.4 运动学性能分析	115
5.4.1 雅可比矩阵的求解	115
5.4.2 运动学性能评价指标的定义及其分布	116
5.5 静力学性能分析	118
5.5.1 力雅可比矩阵的求解	118
5.5.2 静力学性能评价指标的定义及其分布	119
5.6 本章小结	122
参考文献	123

第 6 章	新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床的方案设计 ·····	125
6.1	新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床的空间模型及全域性能指标·····	125
6.1.1	新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床的空间模型·····	125
6.1.2	新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床的全域运动学性能指标·····	127
6.1.3	新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床的全域力学性能指标·····	127
6.1.4	新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床的全域性能图谱·····	128
6.2	新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床的三维建模·····	129
6.2.1	新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床结构参数的选择·····	129
6.2.2	新型正交 5-DOF 并联气囊抛光机床的方案设计·····	130
6.3	本章小结·····	131
	参考文献·····	131
第 7 章	球面 5R 并联机构 ·····	133
7.1	球面 5R 并联机构位置分析·····	133
7.1.1	球面 5R 并联机构介绍·····	133
7.1.2	球面 5R 并联机构位置反解·····	134
7.1.3	自由度变化奇异分析·····	136
7.2	球面 5R 并联机构工作空间分析·····	139
7.2.1	工作空间分析·····	139
7.2.2	结构参数优化·····	141
7.3	球面 5R 并联机构运动学性能分析·····	145
7.3.1	速度传递性能评价指标·····	145
7.3.2	加速度传递性能评价指标·····	147
7.3.3	运动性能实例分析·····	148
7.4	球面 5R 并联机构动力学建模·····	149
7.4.1	广义惯性力的计算·····	150
7.4.2	广义外力的计算·····	155
7.4.3	动力学模型的建立·····	155
7.4.4	动力学实例分析·····	155
7.5	本章小结·····	158
	参考文献·····	159
第 8 章	总结与展望 ·····	162
8.1	总结·····	162
8.2	展望·····	164

第1章 绪 论

1.1 概 述

1955年, Gough^[1]发明了一种基于并联机构的6自由度 (degree of freedom, DOF) 轮胎检测装置, 如图 1.1 所示。十年后, Stewart 首次对 Gough 发明的这种机构进行机构学意义上的研究, 将其应用于飞行模拟器的运动装置, 且命名为 Stewart 机构^[2], 如图 1.2 所示。1978年, Hunt 首次提出将并联机构作为机器人操作器。1979年, MacCallion^[3]首次利用并联机构设计出了装配机器人。自此, 拉开了并联机构研究的序幕^[4,5]。

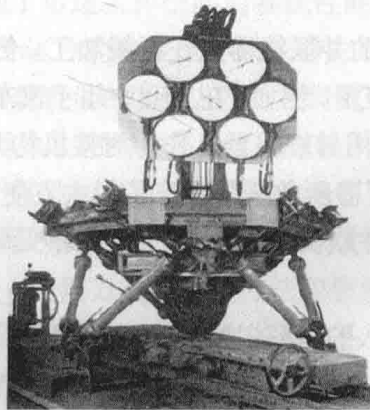


图 1.1 Gough 并联机构图^[1]

随着科学技术的发展, 人们已经认识到并联机器人的重要性, 相关研究受到了国内外很多学者的重视, 国际上著名的学者 Waldron^[6]、Roth^[7]、Clavel^[8]、Gosselin^[9]、Merlet^[10]、Angeles^[11]、Hunt^[12]、Duffy^[13] 和 Lee^[14] 等, 在并联机器人机构的位置分析、工作空间分析、特殊形位分析、机构综合、运动学和动力学等方面做了大量的工作, 取得了丰硕的成果, 并联机器人在运动模拟器、机床、微操作和传感器等领域得到了广泛的应用。虽然我国并联机构学方面的研究工作起步较晚, 但在广大机器人爱好者的努力下发展较快, 取得了显著成绩。国内并联机构学的学者主要有蔡鹤皋^[15]、黄真^[16]、孙立宁^[17]、汪劲松^[18]、熊有伦^[19]、蔡自兴^[20] 和高峰^[21] 等, 他们在并联机构学与技术方面取得了显著成绩, 为我国并联机器人

机构的研究奠定了良好的基础。

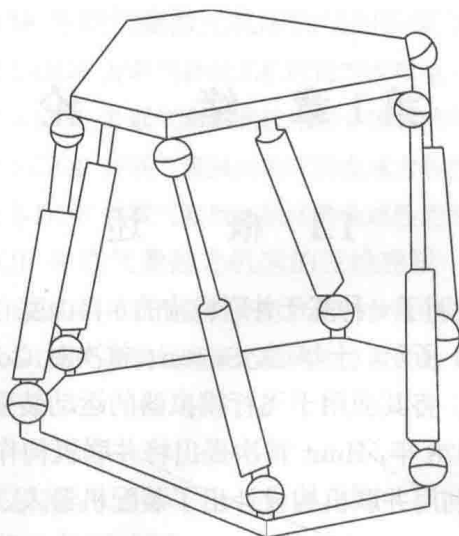


图 1.2 Stewart 并联机构^[2]

近 30 年来,越来越多的并联机器人在机械加工、仿生、军事、医疗、生物、航天和海洋工程等领域得到应用。例如,在工业中用于汽车总装线上的车轮安装及检测;在航天航海领域里,采用并联机器人作为对接机构具有很好的减振功能,为向空间工作站提供补给和进行潜艇救援等带来了很大方便;在医疗领域,可以代替人手完成精细手术等^[22-28]。并联机器人技术的不断深入研究,将为 21 世纪的人类文明做出更大的贡献。

国内外关于并联机器人的研究主要集中于结构学、运动学、动力学和控制策略等领域。其中,并联机器人的结构学与运动学主要研究并联机器人的构型综合、运动分析、奇异位型、工作空间和灵巧度分析以及位置校准等方面,这些内容是实现机器人设计、控制和应用研究的基础,因而在并联机器人的研究中占有重要的地位。动力学分析及控制策略的研究主要是对并联机器人进行动力学分析和建模,且利用各种可能的控制算法对并联机器人实施控制,从而达到期望的运动轨迹和控制效果。

运动学研究的内容包括位置分析和速度分析两部分。已知并联机构驱动关节的位置参数,求解机构动平台的所有可能的位置和姿态,称为运动学正解;若已知动平台的位置和姿态参数,求解机构驱动关节的位置参数,则称为运动学反解或运动学逆解。与串联机器人机构的运动学正反解相反,在并联机器人机构中,运动学反解容易,而正解却很复杂。到目前为止,并联机器人机构运动正解问题一直是运动学研究的难点之一。

机器人的工作空间是机器人操作器的工作区域,是衡量机器人性能的重要指标。并联机器人的一个最大弱点就是工作空间较小,同样的结构尺寸,串联机器人的工作空间比并联机器人要大。工作空间一般又可分为可达工作空间和灵活工作空间。对于并联机构工作空间的解析求解是一个非常复杂的问题,在很大程度上依赖于并联机构位置正解的结果,至今仍然没有完善的方法。同并联机构的位置正解一样,数值方法是分析并联机器人工作空间的一种常用方法。Cleary 和 Arai^[29]、Merlet^[30] 等通过给定动平台的位置姿态(简称位姿),采用离散关节空间,由位置正解分析逐点求出动平台位置,进而确定相应的位置空间。Gosselin^[31] 利用圆弧相交的方法,确定了六自由度并联机构在姿态固定情况时的工作空间,并给出了工作空间的三维表示。黄真等^[16] 把工作空间作为约束条件,采用优化手段来确定工作空间。汪劲松和黄田^[18] 利用最小章动角的新概念,定义了位姿空间、位置空间和姿态空间,运用集合论研究工作空间的组成和分解原理。高峰^[21] 考虑并联机构的对称性,利用相对无量纲机构建立了多种并联机构的空间模型,给出了工作空间容积的计算方法,首次比较详尽地绘制了可达工作空间的容积性能图谱。

并联机器人的动力学及动力学建模是并联机器人研究的一个重要分支,其中动力学模型是并联机器人实现控制的基础,因而在研究中占有重要的地位。动力学主要研究物体的运动和作用力之间的关系。并联机器人是一个复杂的动力学系统,存在严重的非线性,由多个关节和多个连杆组成,具有多输入和多输出特征,它们之间存在着错综复杂的耦合关系。现在分析机器人动力学特性的方法很多,有拉格朗日方法、牛顿-欧拉方法、高斯方法、凯恩方法和旋量方法等。有关动力学建模的研究,在串联机器人领域已经取得了很大的进展。然而,由于并联机器人的复杂性,目前的研究内容大都只涉及机构和运动学的各个方面,对于动力学的研究相对较少。Merlet^[30] 较早地开展了这方面的研究,在忽略腿部惯量影响的情况下建立了 Stewart 平台的动力学方程。Geng 等^[32] 对并联机器人的几何形状和惯性扰动做了简化假设,利用拉格朗日方法建立了并联机器人的动力学方程。Ji^[33] 考虑腿部惯量对 Stewart 平台的影响,建立了动力学方程。对于具有一般结构和惯量分布的 Stewart 并联机器人,Dasgupta 和 Choudhury^[34] 推导出完整的逆动力学方程,并利用牛顿-欧拉方法建立了一个高效的算法,运用此方法得出 6-UPS 型和 6-PSS 型 Stewart 机器人封闭的动力学方程,并能够很好地应用于并联机器人的动力学计算。Gosselin^[35] 指出由于机构结构的并联特点,并行计算方案可以很好地应用到并联机构的计算问题中。

在并联机器人控制领域,相对于并联机器人机构学理论研究,对于其控制策略的研究相对较少,有些方面还没有开展起来。常规 PID 控制对于大多数点位控制

应用是相当有效的,而对于轨迹跟踪控制问题则不适用。并联机器人的绝大多数应用是要求轨迹控制的,因此很少使用常规的 PID 控制。自适应控制和滑模控制都属于基于模型的控制方法,主要应用于高精度控制。这类基于模型的控制方法都要求在线计算逆动力学模型,而并联机器人包含多个运动链,逆动力学模型比较复杂,计算量很大。为了解决这个问题,许多研究在控制中采用简化的动力学模型。

并联机器人的机械结构设计问题^[36] 主要涉及具体结构的设计、制造和应用。在应用于并联机床方面,通过增加冗余运动链,可以增大结构的工作空间,避免奇异位型。在应用于触觉装置、传感器和微机电系统方面,则要考虑结构尺寸对具体结构设计的影响。在微尺度领域,需要考虑物理性质(重力、原子力和表面力等)的影响。目前已经成功制造出只有几毫米大小的并联机器人,且已经提出更小尺寸的并联机器人机构。机械结构设计还涉及关节和驱动器的设计问题。并联机器人中需要相对位移大、承载能力高的二、四自由度的高副关节。另外,柔性关节在微型并联机器人中也有应用。同样地,驱动器也需要多种形式,目前常用转动副驱动、螺旋副驱动和液压缸驱动。直线电机和球面电机也正在得到应用^[37]。

1.2 少自由度并联机器人的研究现状

随着并联机器人应用领域的扩展,很多实际操作任务不再需要空间六个自由度,在这种情况下如果再使用一般的六自由度并联机器人,势必增加不必要的成本。空间少自由度并联机器人的自由度数为 3、4 或 5,自由度数的减少使机构的运动副个数和杆件个数相应减少,机械结构更加简单,从而降低了设计、制造和控制的成本。另外,少自由度并联机构具有结构形式简单、作业空间大、运动学和动力学设计简单、承载能力强、对机械元件的制造及控制精度要求较低等优点。因此,少自由度并联机器人引起了国内外专家的重视。

20 世纪 80 年代以来,国内外很多学者对少自由度并联机器人进行了研究。美国、日本和加拿大等国的学者先后给出了少自由度并联机器人的一些构型^[38-42]。我国燕山大学、天津大学、北京航空航天大学、东北大学等高校的一大批学者也相继开展了这方面的研究工作,研制出多台新型样机^[28,43-47]。目前,关于少自由度并联机器人的研究开发和应用工作正日益广泛、深入地进行,许多研究成果已经用于生产和科研中。少自由度并联机器人机构的应用领域主要包括微动机构、并联机床、力传感器、主动式振动装置、医疗器械和天文望远镜等。少自由度并联机器人具有刚度高和动态性能好等优点,也可以用作步行器或爬壁机器人的步行机构。

1.2.1 四自由度并联机器人的发展与应用

目前,大多数研究工作主要集中于六自由度和三自由度的并联机构,对四自由度及五自由度并联机器人的研究相对较少。在实际应用中,许多场合需要提供多于三自由度而又比六自由度机构更简单的并联机构,如仿生、机械加工等领域。其中,四自由度并联机器人机构的类型较少^[48-50],多数是由不同支链结构组成的非对称并联机构。在实际应用中,根据运动特征,四自由度并联机器人可分为三转动一移动、一转动三移动和两转动两移动等种类。

1. 三转动一移动四自由度并联机器人

2001年,Zlatanov等^[51]提出了一种对称的四自由度并联机器人机构,具有三个转动自由度和一个沿 Z 轴的移动自由度,如图1.3所示。燕山大学的黄真教授提出了4-RPR(RR)并联机构,具有三个转动自由度和一个移动自由度。朱大昌和方跃法^[52]提出了一种4-RRCR型并联机器人机构,其支链中与定平台相连接的R副的轴线相互平行,与动平台相连接的C副和R副的轴线则全部相交于空间的一个公共点。

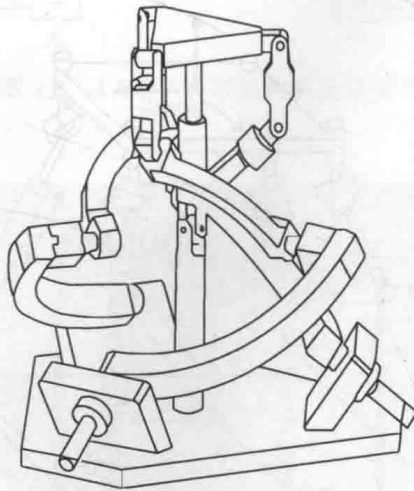
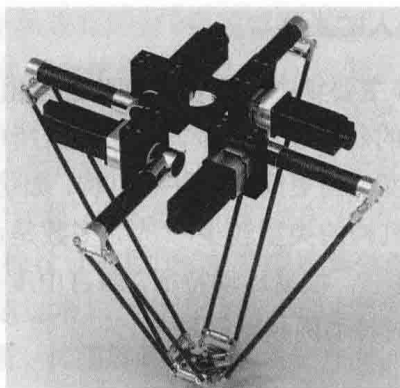


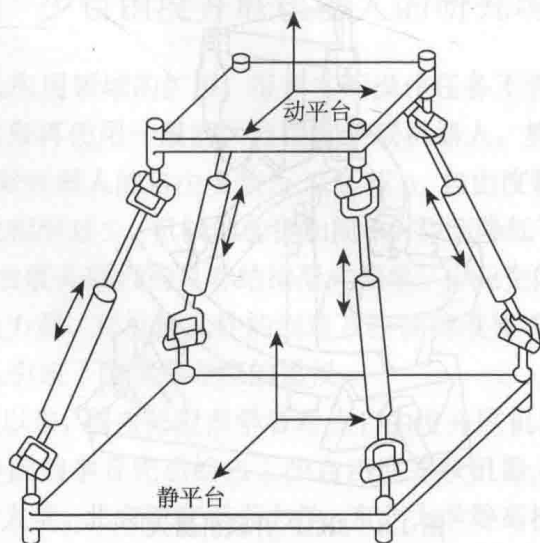
图 1.3 3R1P 并联机器人^[51]

2. 一转动三移动四自由度并联机器人

Pierrot和Company^[53]在1999年提出四自由度H4并联机构,如图1.4所示。这种机构是在原有Delta机器人的分支运动链中加装了一个与动平台垂直的转动副,从而在Delta机器人原有的三个移动自由度外又获得了一个转动自由度。

图 1.4 H4 并联机器人^[53]

燕山大学的赵铁石等^[54]提出了一种对称四自由度 4-UPU 并联机器人机构,如图 1.5 所示,可实现三个移动自由度和一个转动自由度的并联机构。山东理工大学的段建国等^[55]提出了一种 4-PTT 并联机器人机构,其具有运动灵活、工作空间大、承载能力强、装配工艺性好等优点。此外,马履中等提出了一些可实现三个移动自由度和一个转动自由度的并联机构^[56]。

图 1.5 4-UPU 并联机器人机构^[54]

3. 两转动两移动四自由度并联机器人

陈文家等^[57]提出了一种 2P2R 四自由度并联机器人,其动平台能够实现两个方向的移动和绕两个方向轴线的转动。马履中等开发了一种两转动两移动四自由

度振动平台^[58],如图 1.6 所示。Chen 等^[59]在 2002 年提出了一种可实现两个转动自由度和两个移动自由度的非对称并联机构,如图 1.7 所示。燕山大学的金振林和李研彪^[60]提出了一种新型 4-DOF 并联机械臂,如图 1.8 所示。天津大学的李永刚等^[61]提出了一种具有两转动两移动自由度的 2RPS-2UPS 四自由度非全对称并联机构,由定平台、动平台以及连接两个平台的四条支链组成,定平台和动平台均采用正四边形布局,四条支链中共有两种形式,分别为 RPS 结构和 UPS 结构。

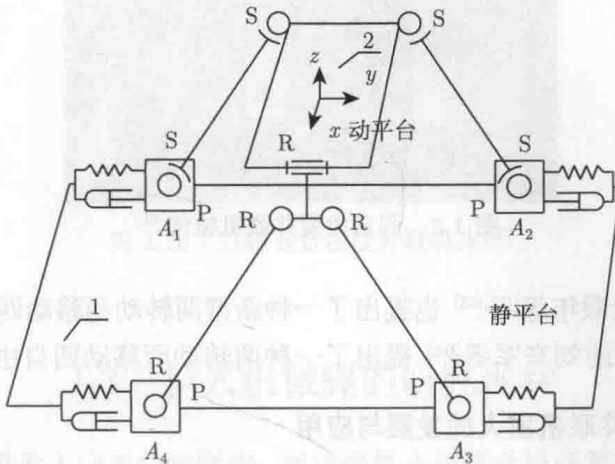


图 1.6 4-DOF 并联机构减振装置^[58]

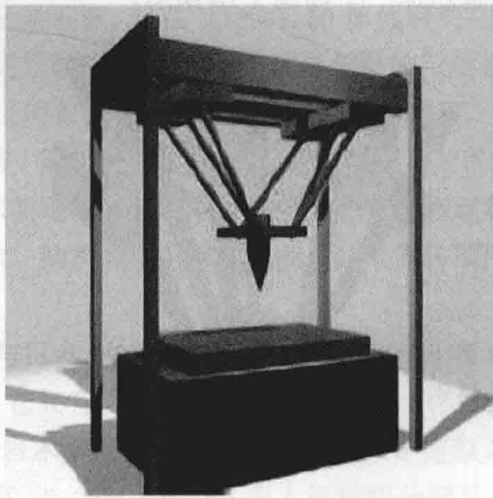


图 1.7 2P2R 四自由度并联机构^[59]

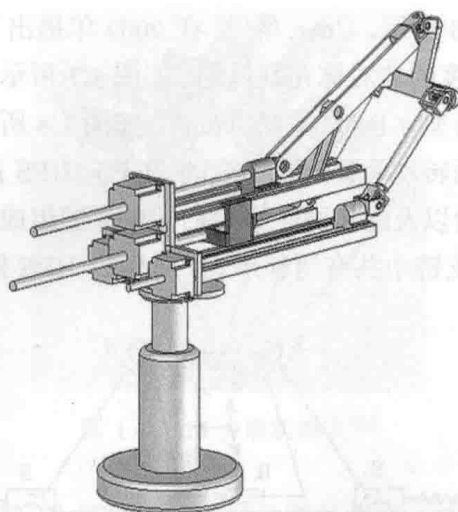


图 1.8 四自由度并联机械臂^[60]

集美大学的余顺年等^[62,63]也提出了一种新型两转动两移动四自由度并联机器人机构。清华大学的刘辛军等^[64]提出了一种两转动两移动四自由度并联机床。

1.2.2 五自由度并联机器人的发展与应用

目前,关于五自由度并联机构的研究主要集中在机床加工领域,燕山大学的赵永生等研制了五自由度并联虚拟主轴机床^[65],如图 1.9 所示;河北工业大学的高峰等研制了五自由度并联机床^[66],如图 1.10 所示。

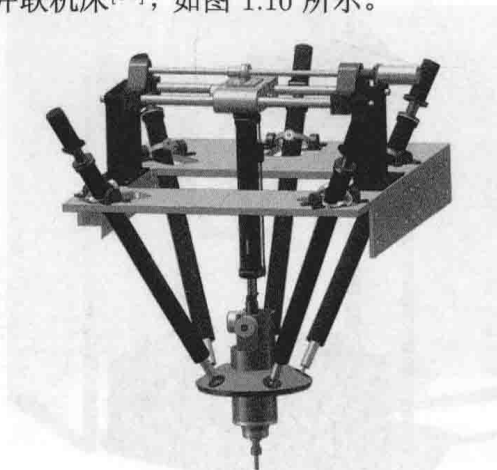


图 1.9 燕山大学并联机床^[65]

燕山大学的朱恩俊和黄真^[67]提出了一种 2-PPCR 对称五自由度并联机器人。江苏大学的马履中等^[68]提出了一种新型五自由度并联机器人机构,它有五个分支,

其中四个是 SPS 分支, 一个是 RRTR 分支, RRTR 分支可看成由五个转动副组成, 具有三移动两转动自由度, 可用于中医推拿操作机器人的设计。

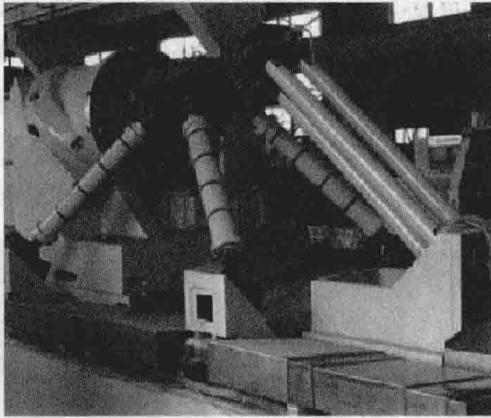


图 1.10 五轴五自由度并联机床^[66]

1.3 拟人机械腿的研究现状

目前, 拟人机器人向着结构紧凑、运动惯性小和运动灵活等方向发展。而拟人机械腿是拟人机器人能否实现仿人行走及步行质量好坏的关键, 它对整个机器人从结构到控制, 直至功能、质量和效率都有很大的影响。在拟人机械腿结构设计中, 关节及其驱动的设计又是关键。早在 20 世纪 60 年代后期, 日本早稻田大学就开始对拟人机器人的行走进行研究, 其 WL 系列是最早的双足拟人行走机器人^[69], 该拟人机器人的双腿均采用串联机构, 各腿具有五个自由度。WL12 型拟人机器人的腰部增加了两个自由度, 通过控制躯干的运动来平衡下肢的运动, 实现在位置路面情况下的行走, 可基本实现拟人下肢行走的自主控制, 但这种拟人机器人采用串联机构, 具有运动惯性大、结构复杂等缺点。此后, 世界各国广泛展开了对于拟人机器人的研究。

日本早稻田大学与日本 YKK 公司合作, 于 1995 年推出了完全人形结构的机器人 WABIAN-R^[70], 它具有信息交互能力, 能像人一样行走, 该机器人腿有六个自由度。在 1997 年, 日本本田公司相继推出 P2、P3 型拟人机器人^[71], 如图 1.11 所示。此类机器人具有 28 个自由度, 各拟人机械腿分别具有六个自由度, 没有腰关节。2004 年, 日本本田公司开发了新一代双足行走机器人 ASIMO^[72], 它可以快速行走, 强化了躲避障碍物的功能, 全身共有 34 个自由度, 增加了腰部旋转关节等, 各转动关节采用串联机构方式。ASIMO 机器人通过减少自由度的方法及采用