

并联机器人机构的运动
性能分析与智能控制

贺利乐 著

陕西科学技术出版社

并联机器人机构的 运动性能分析与智能控制

贺利乐 著

陕西科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

并联机器人机构的运动性能分析与智能控制 / 贺利乐
著. —西安: 陕西科学技术出版社, 2006. 7
ISBN 7-5369-4092-0

I. 并... II. 贺... III. ①机器人—机构运动分析
②机器人—智能控制 IV. TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 043231 号

出版者 陕西科学技术出版社
西安北大街 131 号 邮编 710003
电话 (029) 87211894 传真 (029) 87218236
<http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社
电话 (029) 87212206 87260001

印刷 陕西利达印务有限责任公司

规格 787 mm×1092mm 16 开本

印张 9.25

字数 180 千字

版次 2006 年 7 月第 1 版
2006 年 7 月第 1 次印刷

定价 20.00 元

版权所有 翻印必究

前 言

并联机构是一个集多领域新技术于一体的运动控制机构，由于其具有刚度重量比大、精度高、成本低和模块化等特点，因而其应用几乎涉及现代尖端技术的各个领域，如机器人、数控加工中心、运载工具模拟器、六维微调机构、空间位姿测量机、六维力矩测量器等。

在现有的并联机构中，一般多采用几个运动链（包括杆件和运动副）完全相同的结构形式，这种结构形式的优点是制造简单、运动分析和控制容易。近年来，在机构的支链结构中引入闭环结构，或者以闭环结构为基础进行并联机构的设计，已成为并联机构构型综合设计的有效手段和研究方向，而在驱动综合方面选用混合驱动也成为了一个重要的研究趋势。混合驱动机构是可控机构学的一个重要分支，是指多自由度闭链机构的某些输入运动由计算机实时控制的伺服电机驱动，而另外一些输入运动由常速电机驱动，这种混合形式的输入运动经一个多自由度机构（混合机构）合成为所需要的输出运动，能实现高精度运动输出，完成复杂的运动规律。

目前我国制造业面临着技术创新不足、设备升级缓慢等亟待解决的问题，而研究、开发和应用高性能、高精度、高柔性的并联构型装备技术是实验技术创新、产品升级的有效途径。而并联机构与智能控制的结合就构成了并联机器人或并联构型装备，故研究和开发新型的并联机构具有重要的理论意义和实用价值。

本书首先对一种典型的 2 自由度并联机构——混合驱动平面五杆机构——的运动学、动力学优化设计与仿真以及主、辅电机驱动功率之间的最佳匹配关系等问题进行了深入分析研究；然后对一种含五杆闭链的混合驱动 6 自由度并联机构的正运动学问题，工作空间及奇异性、实体模型运动仿真与机构杆件干涉分析、位姿精度综合方法以及 6 自由度并联机器人机构的智能控制等问题进行了较深入的研究，介绍了一些研究方法和所取得的研究成果。

本书在撰写过程中得到了西安理工大学刘宏昭教授的悉心指导和帮助，得到了西安建筑科技大学段志善教授的关心与支持，在此表示衷心感谢。

并联机构学领域的研究发展十分迅速，由于作者水平所限，加之时间仓促，因而书中错误与不足之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

作者

2006 年 3 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 并联机构的发展及应用现状	1
1.2 并联机构的理论研究概况	4
1.2.1 运动学分析研究	4
1.2.2 机构性能分析	5
1.2.3 动态性能研究	7
1.2.4 控制方法研究	10
1.2.5 并联机构的创新设计方法研究	11
1.2.6 并联机构的静刚度及承载能力研究	11
1.3 进行并联机器人机构研究的意义及本书的主要内容特点	12
第二章 2 自由度并联机构的运动学分析与仿真	14
2.1 混合驱动平面五杆机构正运动学分析	14
2.1.1 位移分析	15
2.1.2 正运动学速度分析	16
2.1.3 正运动学加速度分析	17
2.2 混合驱动平面五杆机构逆运动学分析	18
2.2.1 实现轨迹输出的位置分析	18
2.2.2 实现轨迹输出的速度分析	19
2.2.3 实现轨迹输出的加速度分析	20
2.3 运动学逆问题求解	20
2.4 运动仿真及相关分析	25
2.4.1 原动件输入运动规律对输出轨迹的影响	26
2.4.2 原动件初始位置对输出轨迹的影响	29
2.5 基于 Solidworks 的运动仿真	30
2.6 小结	32
第三章 2 自由度并联机构的动力学优化设计	33
3.1 基于 Kane 方法的混合驱动平面五杆机构动力学分析	33
3.1.1 Kane 方法简介	33
3.1.2 混合驱动五杆机构的动力学模型	34
3.2 实现“8”字形轨迹的优化设计	35
3.2.1 给定杆长时实现“8”字形轨迹的研究	35
3.2.2 优化设计算例	38
3.3 实现椭圆轨迹优化设计研究	40

3.3.1 工作空间与轨迹设计准则.....	40
3.3.2 实现一个椭圆轨迹的优化设计算例.....	41
3.3.3 实现一组椭圆轨迹的优化设计算例.....	46
3.4 小结.....	51
第四章 混合驱动 6 自由度并联机构运动学位置正解分析.....	52
4.1 概述.....	52
4.2 混合驱动 6 自由度并联机构的结构及性能特点.....	52
4.2.1 结构特点.....	52
4.2.2 动作原理及性能特点.....	53
4.3 混合驱动五杆机构不出现奇异位置的构型.....	53
4.4 混合驱动 6 自由度并联机构正运动学数学模型.....	53
4.5 基于改进遗传算法的 6 自由度并联机构正运动学求解.....	58
4.5.1 基于改进遗传算法的求解方法.....	58
4.5.2 实例计算验证.....	59
4.5.3 混合驱动 6 自由度并联机构正运动学求解.....	64
4.5.4 混合驱动 6 自由度并联机构运动学位置正解分析.....	67
4.6 混合驱动 6 自由度并联机构的逆运动学模型.....	69
4.6.1 逆运动学数学模型.....	69
4.6.2 逆运动学求解步骤.....	69
4.7 小结.....	69
第五章 混合驱动 6 自由度并联机构的工作空间及奇异性分析.....	71
5.1 概述.....	71
5.2 工作空间的形成及制约因素.....	71
5.2.1 工作空间的形成.....	71
5.2.2 工作空间的制约因素.....	72
5.3 工作空间的确定及其截面形状分析.....	75
5.3.1 基于边界极值搜索法的工作空间的求解.....	75
5.3.2 工作空间的截面形状分析.....	76
5.4 工作空间内有效圆柱体及其影响因素分析.....	80
5.4.1 有效圆柱体空间.....	80
5.4.2 影响工作空间的因素分析.....	81
5.5 奇异性分析.....	86
5.5.1 雅可比矩阵与机构的奇异性.....	86
5.5.2 基于遗传算法的并联机构奇异性分析.....	87
5.6 小结.....	90
第六章 混合驱动 6 自由度并联机构的实体建模与运动仿真.....	91
6.1 概述.....	91

6.2 并联平台机构的杆件制作及装配.....	91
6.2.1 五杆闭链各杆件的制作.....	91
6.2.2 制作空间并联平台的上、下平台.....	95
6.2.3 含五杆闭链的空间并联机构的装配.....	96
6.3 运动仿真与干涉性检验.....	97
6.3.1 建立伺服发动机.....	97
6.3.2 运动仿真过程.....	97
6.4 并联平台机构运动干涉性分析.....	98
6.4.1 上平台上下平动时的干涉性分析.....	98
6.4.2 上平台既有平动又有转动时的运动干涉性分析.....	105
6.5 小结.....	107
第七章 6 自由度并联机器人机构的位姿精度综合及智能控制.....	108
7.1 概述.....	108
7.2 基于模糊自适应遗传算法的并联机器人机构精度综合.....	108
7.2.1 精度分析的数学模型.....	108
7.2.2 精度优化综合的数学模型.....	110
7.2.3 模糊遗传算法的基本操作.....	110
7.2.4 精度综合实例.....	112
7.3 Stewart 并联机器人机构及其控制模型.....	114
7.4 Stewart 并联机器人的神经 PID 控制.....	116
7.5 Stewart 并联机器人的模糊控制.....	118
7.5.1 用 Matlab 工具箱构造 FIS 模糊控制器.....	118
7.5.2 并联机器人模糊控制仿真框图与程序调用.....	121
7.6 Stewart 并联机器人的 ANFIS 神经模糊自适应控制.....	122
7.7 Stewart 并联机器人的控制仿真.....	124
7.7.1 传统 PID 控制、神经网络 PID 控制和模糊控制对阶跃信号仿真比较.....	124
7.7.2 ANFIS 神经模糊自适应控制器对模糊控制仿真效果比较.....	125
7.7.3 ANFIS 神经模糊自适应控制器排除干扰效果分析.....	127
7.8 小结.....	130
参考文献.....	132

第一章 绪论

1.1 并联机构的发展及应用现状

机构的发展大致经历了从一杆到多杆、从平面到空间、从串联到并联的过程^[1]。

机器人的机械部分一般可以分为两种类型：串联机构和并联机构。串联机构的机器人是一种比较常见的机器人，目前大部分工业机器人都是串联机器人。如图 1-1 所示，就是一种常见的串联机器人机构。从外形上来看，这些机器人的构造和人的手臂相似，是由一系列刚性连杆通过一系列柔性关节交替连接而成的开式链。这些连杆就像人的骨架，分别类似于胸、上臂和下臂，工业机器人的关节相当于人的肩关节、肘关节和腕关节。操作臂的前端装有末端执行器或相应的工具，也常常称为手或手抓。手抓由两个或多个手指组成，手指可以“开”与“合”

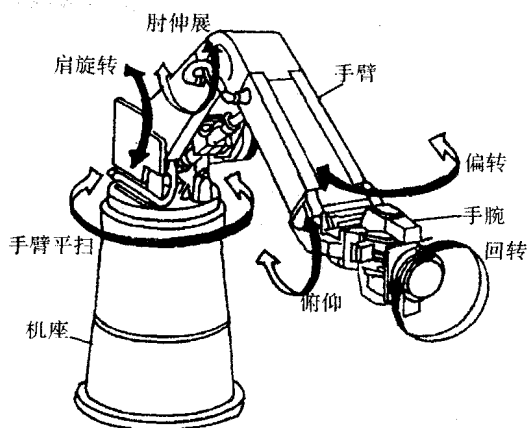


图 1-1 串联机器人结构示意图

实现抓取动作和细微操作。手臂的动作幅度一般较大，通常实现宏操作。

1965 年，Stewart 提出一种新型的 6 自由度的空间并联机构，它是由两个平台和六个并联的、可独立自由伸缩的杆件组成，伸缩杆和两个平台之间分别通过球铰 A, a 、 B, b 、 C, c 、 D, d 、 E, e 、 F, f 联结，如图 1-2 所示。从图中可见，如果将下平台作为固定平台，以伸缩杆的位移作为输入变量，则可以控制上平台（动平台）的空间位移和姿态。这种新型的 6 自由度的空间并联机构的面世引起了众多研究者的兴趣，人们对其进行了广泛的分析和研究，并称这种机构为 Stewart 平台或 Stewart 并联机构。

澳大利亚著名教授 Hunt 于 1978 年提出用 6 自由度的 Stewart 平台机构作为机器人机构，并进行了相关的分析和研究，随后经过科研人员近 30 年的研究、改进和发展，现已演变出不同运动学原理和结构的空间并联机构，并在许多科学研究和工业领域获得了应用。

并联机器人机构由于其机构本身的特点，与传统的串联机器人机构相比具有刚度大、承载能力强、响应速度快、误差小等特点，具体来说，具有以下优点^[2]：

首先，并联机构的上下平台由并行的杆件支撑，与串联式的悬臂梁相比，刚度大，

并且结构稳定。

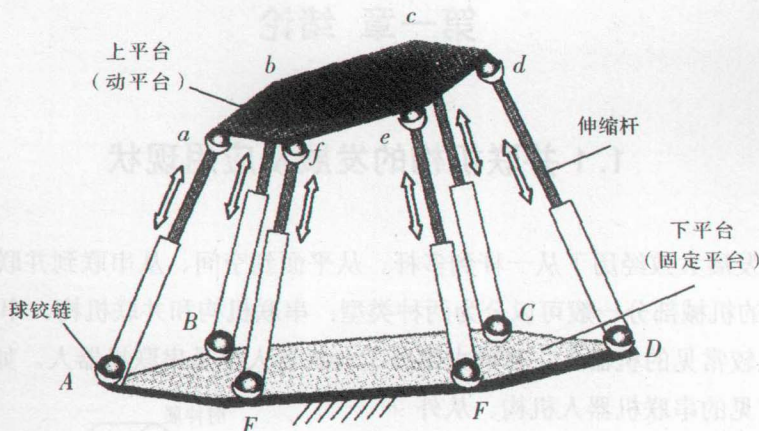


图 1-2 Stewart 并联机器人机构

其次，并联机构较串联机构在相同的自重或体积的情况下承载能力大得多。

再次，串联式末端件上的误差是各个关节误差的累计放大，因而精度比较低，并联式结构没有误差的累计和放大，所以误差小、精度高。

第四，串联式机器人的驱动电机和传动系统大都放在大小臂上，增加了系统的惯性，恶化了系统的动力性能，而并联式机器人机构的驱动部分很容易安装在机座上，从而减轻运动负荷，因而有较好的动力性能。

第五，在位置求解上，串联式机器人机构位置求正解容易，但是求反解十分困难，而并联机器人机构求位置反解却十分方便。由于机器人的在线实时计算是需要计算反解的，因而并联机器人的在线实时性很好。

从上述分析可看出，串联、并联机构在结构上和性能特点上不仅有鲜明的对比关系，此外，两者在正反运动学求解的难易上也有明显的对比关系，由于串联、并联之间在应用上不是替代作用而是互补关系，且因并联机器人有它的特殊应用领域。因此，可以说并联机构的出现，扩大了机器人的应用范围。所以国内外学者和机械制造行业对它的应用研究和开发都给予了高度重视。

并联机构在工业上的应用在国外已非常广泛，如德国汉诺威大学自行研制的用于汽车工业板材激光加工的并联机构，有五个自由度；不伦瑞克技术大学研制的“PAROS”6自由度并联机构，主要用于汽车车灯外轮廓的加工；该校还以并联机构制作了人体前臂的模型，此模型可有效地辅助医生判断骨骼状态是否正常，以及确定骨折后的手术方案；斯图加特技术大学开发研制的“SCARA”并联机构，其特点是采用了模块化的设计思想，整个结构分为：机架、线性驱动模块、并联机构模块、3轴模块和末端执行器^[3]。

在日本，进行并联机构理论与应用研究的单位主要有东北大学、东京大学、日立制作所、神户大学、大阪大学和日本机械技术研究所等。他们研制出的并联机器人有用

于半导体制造行业的 6 自由度微动机构^[4]、大深度地下开发用急曲掘进机^[5]、汽车驾驶模拟平台^[6]、柔性装配平台^[7]、6 自由度高速并联平台^[8]等。

我国对并联机构理论与应用的研究起步较晚,但发展得非常迅速。燕山大学于 1990 年研制出了我国第一台并联机器人试验样机,它由六个液压缸支撑和驱动,具有六个自由度。该校还于 1994 年研制出了一个并联微动机构——机器人误差补偿器^[2]。近年来,国内许多高等院校和科研院所如清华大学、燕山大学、天津大学、东北大学、中科院沈阳自动化研究所、北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、北京邮电大学、西安理工大学等单位均对并联机器人机构进行了广泛的理论分析与应用研究,并取得了一定的成果。

并联机构在工业上的一个特别突出的重要作用,就是作为并联机床或“虚拟轴机床”,如在 1994 年 9 月美国芝加哥国际制造技术展览会(INIS'94)上,美国 Giddings&Lewis 公司推出的并联式 Variax 加工中心,引起了整个机械制造业的关注,被称为是“21 世纪的机床”^{[9][10]}。除六杆虚轴机床外,德国 Stuttgart 大学、Hannover 大学还分别研制出了三杆虚轴机床,俄国 Lapic 公司也在 20 世纪 90 年代初推出了虚拟轴产品^[11]。此外,日本一些公司以及瑞士联邦技术学院、意大利 Comau 公司也相继推出了其研制的并联机床。

在航天中,并联机器人可以用作宇宙飞船的对接机构^[12],达到补给和人员交流的目的;还可以用作飞行模拟舱,用下平台作为支座,上平台模拟飞行器在空中 6 自由度的运动,用来训练飞行员,并模拟飞行器飞行时所遇到的各种故障,提高飞行员的应变能力。

在航海中,并联机器人可以用作如同航天中的对接器;还可用为海底机器人,从事高精度的海底设备的维修和安装。

并联机构的另一个重要应用是作为微动机构或微型机构。如用在眼科手术中的并联式微动机构,在生物工程中用于细胞操作的一种微动双指并联机构^[13],这类微动机构的特点就是用作微运动的杆件都是由压电元件驱动的,其工作空间很小,但精度和分辨率都非常高。

综合上述分析可知,目前并联机构的应用领域主要如下:

(1) 模拟运动

如飞行员三维空间训练模拟器,驾驶模拟器,工程模拟器,如船用摇摆台等;检测产品在模拟的反复冲击、振动下的运行可靠性;娱乐运动模拟台。

(2) 对接动作

宇宙飞船的空间对接,汽车装配线上的车轮安装,医院中的假肢接骨等。

(3) 承载运动

大扭矩螺栓紧固,短距离重物搬运,一些工程机械的工作装置。

(4) 金属切削加工

可应用于各类铣床、磨床、钻床或电焊机、切割机。

(5) 可用于测量机

用来作为其他机构的误差补偿器。

(6) 用于微动机构或微型机构

总之, 并联机构由最初的 Stewart 平台不断发展, 到今天已形成了一个庞大的体系, 随着相关理论和技术问题的不断解决, 并联机构的应用领域将不断扩大。

1.2 并联机构的理论研究概况

近年来, 随着并联机构应用的深入和研究手段的加强, 并联机构的分析研究已经成为机构学者的热门课题。各国学者争先在各类刊物上发表文章。他们的研究从低级机构到高级机构, 不断深入^[1]。总体而言, 对并联机器人机构在运动学分析、工作空间分析、奇异位形分析、动力学性能分析及控制方法等方面已取得了一定的研究成果。

1.2.1 运动学分析研究

运动学研究包括位置正解、逆解, 速度、加速度分析两部分内容。位置正解就是给定 6 根杆长, 确定平台的位姿; 位置逆解就是给定平台的位姿, 确定 6 根杆长。

(1) 并联机构的位置正解

在机构的运动分析中, 并联机构的位置正解分析是最基本也是最困难的。20 世纪 80 年代后期到 90 年代中期, 位置正解在 Stewart 平台机构研究领域处于核心的位置。在分析机构位置正解方面方法较多, 概括起来有迭代法、解析法、同伦算法和数学机械化方法。迭代法的特点是求解速度较快, 缺点是需要选取比较接近真实解的初始值, 其迭代过程既有可能发散又不易求得所有位置正解; 解析法的优点是不需选定初值, 可求出所有位置正解, 当机构位置正解所需求解的一元代数方程的次数不大于 4 时, 求解速度较快, 反之, 求解速度较低, 同时该方法还具有推导过程复杂、技巧性较强的缺点, 因而, 到目前为止, 数学上尚无完备的方法求其解析解^[14]; 同伦算法的优点是无需将位置正解的非线性方程组消元至一元代数方程, 也不需选取初值且可求得所有解, 缺点是求解速度很低; 数学机械化法的优点是在整个计算过程中不需要巧妙的构思和复杂的理论推导, 只需根据运算步骤按部就班地计算就可以得到结果, 从而使问题变得更加简单, 同时它还具有系统化、规则化的特点, 但这种方法对计算机速度和容量有较高的要求, 求解速度较慢。以上这些解法各有利弊, 但都不能完全满足高效实时的要求。

目前, 在并联机构位置正解这一研究领域, 许多学者正从多条途径攀登这一机构运

动力学的新高峰。第一条途径是通过解决较为特殊的并联机构,逐步向最一般的6-6台体机构迈进。现在除了6-5、6-6台体以外,所有其他类型的并联机构已全部解决^[1]。第二条途径是采用数值分析的方法。其中较为成功的方法有詹重禧法、区间分析法、不动点算法。这些方法对机构位置正解的分析都起了一定的作用,但是它们不能求出机构位置的全部正解,算法不稳定,求解速度慢。延拓法和Groebner基法可以求出机构位置的全部正解,但计算工作量大,实时性较差。第三条途径就是寻求一些新的分析方法和一些改进的位置正解分析方法^[15、16、17、18]。如文献[19]提出了一种新的求解方法,它是将正运动学问题分成两部分,第一部分是一个线性系统方程的求解问题,其形式简单,结构上非独立;第二部分是构造一个非奇异矩阵问题。此问题由一结构独立的方程描述,求解带有一定的非线性,这部分主要是用来确定第一部分中待定的参数。并且作者用此方法对几种模型成功地进行了计算。1991年Genghe Hayne等探索了用BP神经网络求解Stewart并联机器人机构的位置正解^[20];1994年饶青、陈宁新等针对6-6型Stewart并联机器人机构,利用机构的几何同性原理建立正解的基本方程,最后导出了一个20阶的一元位移输入输出方程,从而得到了封闭正解^[21];2001年,杨光、文富安^[22]提出了一种用于描述一般并联机构位姿的直角坐标法。

(2) 速度和加速度分析

在速度和加速度分析方面,1985年文献[23]首次研究了并联机构的影响系数问题,使得这方面的理论取得很大进展;1989年,文献[24]根据并联机构的特点,对位置逆解数学模型直接求导,建立了并联6-SPS机器人的一、二阶影响系数矩阵,解决了速度和加速度分析问题,所得的一、二阶影响系数矩阵形式简单统一,比较适用于计算机计算;1993年,文献[25]根据YS-I并联机构的特点,在速度和加速度分析过程中,以上平台虎克铰中心作为研究的关键点,首先通过对位置逆解显式直接求导建立该关键点与液压缸之间的关系,然后通过矢量运算得到液压缸输入与夹持器输出之间的一、二阶影响系数矩阵,此矩阵只与液压缸的单位矢量和夹持器中心到上平台虎克铰中心的位置矢量有关,使加速度求解的方法大为简化。因此,影响系数法是一种较好的机构分析法。文献[26]在对雅可比矩阵进行分析的基础上,给出了并联机器人加速度的各项性能指标,并从量纲的角度定义了并联机器人对称结构、线加速度和角加速度的各种各向同性和灵巧度指标。

1.2.2 机构性能分析

(1) 奇异形位分析

当并联机构处于某些特定的位形时,其雅可比矩阵成为奇异阵,行列式为零,这时机构的速度逆解不存在,机构的这种形位就称为奇异形位。此时,并联机构具有多余的

自由度,机构将失去控制。因此,进行奇异形位分析对并联机构的设计和应用具有重要意义。

在并联机构的奇异形位分析方面,国内外许多学者进行了较深入的研究。黄真^[27]、Fichter^[28]、Doik^[29]、Basu^[30]、Zlatanor^[31]、Gosselin^[32]和武田行生^[33]等学者采用速度或力的输入输出方程研究奇异形位存在条件;Merlet^[34]和Hao^[35]采用线汇与线丛原理对奇异形位进行了研究;Collins^[36]应用Clifford代数对这一问题进行了研究;赵新华^[37]介绍了一种并联机器人奇异形位分析计算的新方法,该方法以动平台瞬时运动为基础,建立位形奇异条件,在建立奇异形位方程中,避开了驱动关节,降低了计算量。而且对不同类型的并联机器人,用该方法可获得不同程度简化的奇异形位条件。

(2)工作空间与灵活度分析

工作空间是并联机构的工作区域,是衡量其工作性能的重要指标,根据操作器工作时的位姿特点,工作空间可分为可达工作空间和灵活工作空间。可达工作空间是指操作器上某一参考点可以到达的所有点的集合,它不考虑操作器的位姿。灵活工作空间是指操作器上某一参考点可以从任何方向到达的点的集合。

在工作空间分析方面,继Roth^[38]在1975年研究并联平台机构的运动几何学与性能关系之后,许多学者对这种机构的工作空间做了大量的研究工作。1981年Kumar和Waldron^[39]首先提出了可达工作空间和灵活工作空间的概念,利用螺旋理论建立了求取工作空间边界曲面的方法,并在此基础上发展了描述3自由度以及多自由度的并联式平台机构的工作空间边界表面曲线的算法。1982年,D. C. H. Yang和Lee Y. W.^[40、41]对工作空间的形状进行了详细的讨论,建立了判别工作空间内部空洞是否存在的准则,并建立了相应的算法,同时还利用扫描搜索的方法,研究了运动副无限制和运动副受限制时的工作空间问题,计算了工作空间体积,给出了工作空间的体积与杆长之和的三次方成正比的定理;同年,Cwia Kala和Lee^[42]利用优化理论,减少了计算过程中的计算量,提高了计算效率,使扫描搜索的方法更具有实用性,同时他们还解决了具有移动副、圆柱副等类型运动副的并联式平台机构的空间问题;1983年,Tsai和Soni^[43]提出了工作空间的新算法,该算法利用优化技术,解决了并联式平台机构执行件在任意平面内的工作空间问题。在国外学者深入研究的同时,国内学者和研究人员也做了大量的探索和研究,并取得了一定的成果。如张代昌、张小勇^[44]用虚位移原理导出了并联式平台机构的工作空间的边界条件,并推导出了边界表面的约束方程;陈宁新^[45、46]利用微分几何理论解决了执行件运动无限制的工作空间问题,得到了多于三个自由度的并联式平台机构的工作空间的参数表达式,提出了判别工作空间的内部孔洞是否存在的判别式和位置奇异点的概念,并研究了这种奇异点在工作空间的分布规律;张俞平^[47]在考虑球铰的运动限制及移动副运动有限制的情况下,对并联式平台机构的工作空间作了详尽的研究,并在位移正解优化的基础上,利用二次优化技术,较精确地求得了工作空间的边

界曲面：杨传岩^[48]对三角平台并联式机构工作空间的优化算法进行了研究；谢刚^[49]通过研究，对目前已知的一种工作空间的求解方法——“顶点空间法”——进行了推广，并引进了两个新概念——倾倒角和倾倒方向角，在此基础上推导出了奇异边界的解析表达式，求出了在奇异边界内由支撑杆伸缩所形成的工作空间边界的解析表达式。姜虹^[50]在考虑杆长、铰链和干涉三种约束条件下，求解了上平台呈任何机构可行姿态下的活动空间，得出了上平台倾角增大会使活动空间减小，铰链安装方向会对活动空间产生很大影响和干涉约束对活动空间几乎没有影响等结论；提出了“有效空间”和“有效圆柱体空间”的概念，并分析定义了衡量活动空间大小的指标。王奇志^[51]根据运动学正解的解析解对6自由度对称结构机器人的工作空间进行建模，并应用几何方法对其结构及运动规律进行了深入的分析，从而给出了工作空间一种有效的计算方法。

到目前为止，所有的工作空间的分析方法，都是针对具体的并联机构，结合其结构及运动性能特点，再附加上相应的约束条件建立起数学模型进而进行分析研究的。对于比较简单的平面并联机构，其工作空间可以解析表达，而对于空间并联机构的工作空间目前还只有数值解法^[52]。

当并联机构接近奇异形位时，其雅可比矩阵将成为病态矩阵，此时雅可比矩阵的逆矩阵精度降低，从而使得机构的输入与输出运动之间的传递失真，而衡量这种失真程度的指标就是灵巧度。Salisbury等^[53]提出了采用雅可比矩阵的条件数作为并联机器人机构的灵巧度，它是大于或等于1的实数。当条件数等于1时，机构处于最佳的运动传递性能，机构的这一形位被称为运动学各向同性；当条件数是无穷大时，机构处于奇异形位。由于矩阵的条件数能定量地表示矩阵求逆的精度和稳定性，因此用矩阵的条件数来表示并联机构的灵巧性比较合理^[54]。

空间并联机构的工作空间和灵巧度分析的主要难点在于空间并联机构的位置和姿态具有强烈的耦合性。

1.2.3 动态性能研究

并联机构动态性能分析与研究的内容，主要是在运动学分析的基础上进行动力学分析、位姿的动态测量及精度控制方面的分析与研究。

(1) 动力学分析研究

动力学主要研究驱动器作用在并联机构上的力与力矩以及它们所造成的运动，它是进行并联机构的运动控制和动态特性研究的基础。

国际上早期进行并联机构动力学研究的是Fichter，他在不计连杆的惯性和关节摩擦的前提下，推导出了Stewart机器人的动力学方程^[55]；Lee和Shah对3自由度并联机器人机构进行了动力学分析和建模^[56]，Do和Yang假定关节无摩擦，各支杆为不对

称的细杆的条件下,用 Newton-Euler 法对 Stewart 机器人进行了逆动力学分析研究^[57]; Geng 和 Liu 在简化了机构的几何和惯性分布后,推导出了并联机器人的 Lagrangian 方程^[58]; Dasgupta 和 Mruthyunjaya 通过对具有一般结构和惯量分布的 Stewart 型并联机器人的研究,推导出了其完整的逆动力学方程,利用 Newton-Euler 法建立了一个高效的算法,并应用到了 6-UPS、6-PSS 型并联机器人的动力学计算中^{[59][60]}; 中村仁房通过分析并联机器人机构的运动学特性,给出了机构输出力与各连杆关节作用力的平衡方程式^[61]; A. Codourey 先基于系统动能求出并联机器人的广义质量矩阵,再用虚功原理得到了结构简单、易于实时计算的逆动力学方程^[62]。

在国内,孔宪文首先导出了并联机器人构件 6 维惯性力矢量关于主动副速度、加速度的显式表达式,引入了与机构位形和质量分布有关的一、二阶惯性影响系数,进而用达朗伯原理建立起了机构的显式动力学方程^[63]。方跃法、黄真根据并联机器人的结构特点,假设其中新构件是刚体,各分支是弹性体,从而提出了刚体与弹性体在连接时的位移协调和力平衡条件,建立起了系统的弹性动力学模型,为机器人的进一步结构设计和弹性动力综合提供了必要的理论工具^[64]。郭祖华、陈五一以 6-UPS 并联机构的支链为研究对象,运用 D-H 方法建立了各构件的坐标系,推导出了各支链的运动学反解解析方程,然后用 Newton-Euler 法建立了并联机器人机构的动力学模型^[65],为支链中各构件支反力的求解和整个机构的动力学分析奠定了基础。方浩、冯祖仁采用自然正交补(NOC)法,结合 d'Alembert 虚功原理,推导出了不含约束力的 6 自由度并联机器人动力学模型,并将其写成机器人动力学模型的一般形式,从而证明了在广义力对应的广义坐标下,其惯性阵是对称、正定的^[66]。刘敏杰、李从心等根据 Stewart 平台的逆运动学特点,提出了一种新的并联平台动力学分析方法,即基于速度变换的坐标缩并方法。该方法能直接导出独立广义速度与非独立广义速度之间的解析变化关系而无须构造约束方程的 Jacobian 矩阵,也不必进行各种复杂的矩阵分解运算,既减少了计算量也避免了由矩阵分解引入的数值稳定性问题^[67]。刘敏杰、田涌涛等以 Stewart 并联机器人为研究对象,基于 Kana 法提出了一种适合建立并联机器人动力学方程的子结构 Kana 方法。即将机器人的各杆看作是独立的子结构,针对每个子结构建立各自的动力学方程,再根据子结构之间的约束关系构成系统的约束动力学方程,最后运用正交补法或 SVD 奇异值分解法消去子结构之间的约束,形成系统的动力学表达式^[68]。该方法与 Newton-Euler 法、Lagrange 方法及传统的 Kana 方法相比,整个推导过程简洁,计算效率高,适合于并行计算。

(2) 位姿精度的分析研究

并联机构的位姿精度是衡量其工作质量优劣的重要指标之一。并联机构的位姿误差是指实际位姿与期望位姿间的偏差。因而此偏差的大小就决定着位姿精度的高低。

目前,在并联机构的位姿精度研究上,主要体现在两个方面,即位姿误差分析与误

差识别算法, 位姿的动态测量与精度控制。

在已有的并联机器人的误差建模方法中, 广泛采用的是基于矢量代数的环路增量法^[69], 它比较粗略, 未能将系统中某些结构产生的误差(如铰链误差)考虑进去; 还有针对驱动器误差、铰链自身误差及铰链定位误差建模的输入输出方程的直接微分法^[70]。1993年 Jian Wang 和 Masory 分析了加工误差、安装误差和连杆偏置对机器人精度的影响、提出采用参数识别进行误差补偿^{[71][72]}。Ji Z、Li Z 通过安装内部冗余传感器来识别误差参数, 进而进行误差补偿^[73]。

在国内, 邹豪、王启义等从并联机构串联机构的运动学等效出发, 提出了并联机构位姿误差的放大因子分析法, 利用位姿误差因子对误差进行定量分析, 并指出可用于机构参数优化和机构精度分析^[74]。在对串联机器人机构操作位姿误差研究的基础上, 黄真、方跃法等首次提出了并联机器人操作器的随机误差的分析方法——影响系数法, 应用此分析方法可使得含有114个原始误差参数的6自由度机器人操作器的位姿误差传递矩阵具有简单而统一的表达式, 并给出了操作器位姿误差的统计分析法, 确定了操作器位姿误差的极限范围^[75]。乔俊伟、詹永麒等通过研究6-SPS 并联机器人机构的球铰间隙与并联平台位姿之间的关系, 推导出了位姿误差的综合表达式^[76], 为并联机器人结构设计和精度补偿提供了必要的依据。赵新华、解宁等通过相互垂直两个矢量的数量积来建立并联6自由度机器人平台机构的误差模型, 提出了一种新的误差识别算法^[77], 从而避免了传统算法中位置正解及循环迭代过程中求解误差参数而带来的一系列问题。在位姿的动态测量与误差补偿、精度控制方面, 吴江宁、左爱秋等认为为了提高并联机构平台的位置精度, 又不增加其制造成本, 应先按普通精度要求进行机加工, 安装好后, 再设法测量相关机加工误差和安装误差, 然后再通过软件补偿, 这样就可满足平台的位姿精度要求^[78]。黄真、方跃法等指出, 对并联机器人操作器的位姿精度有两种补偿方法, 即软件补偿法和硬件补偿法, 并开发出了并联机器人误差补偿器^[2]。赵明扬提出了一种采用辅助测量机构直接动态测量并联机器人运动平台位姿精度的方法^[79]。左爱秋、吴江宁等提出了一种基于立体视觉对并联机器人运动平台位姿进行检测的原理和方法^[80]。王旭永、王显正提出了以误差源对并联机器人位姿进行精度补偿和对不同误差源所导致的位姿误差进行综合补偿的方法^[81]。文献[82]提出了一种基于超声波测距原理的并联平台位姿的测量方法, 并以 Stewart 为例介绍了通过三角形法实现运动平台三维定位及运动学建模的方法, 给出了基于测量模型的平台位姿的表达式。

以上这些研究对促进并联机构的动态性能分析、系统结构设计及提高操作器的定位精度均有着重大意义。

1.2.4 控制方法研究

在对并联机构尤其是对并联机器人机构的运动控制研究的初始阶段,一般都是将已成熟的控制理论和方法移植到并联机器人机构上,但由于并联机器人机构具有模型复杂、系统非线性和耦合性强等特点,因此,使得以往的某些常规控制方法往往在实际中难以实现或得不到令人满意的控制效果。

国外,1993年C. C. Nguyen研究了Stewart平台关节空间中的自适应控制,控制算法由PD控制构成,此算法在低速条件下能够适应静态或动态的负载变化^[83]。Bryfogle在遥控操作系统中进行并联机器人力反馈控制的研究,主要是采用内外两个反馈回路进行控制,内环用固定增益的PID控制,外环用动力学模型进行前馈补偿^[84]。Queiroz针对并联机器人提出了基于Backstepping方法的控制器设计^[85]。Koditschek将6DOF并联机器人系统分为机械和电机两个子系统分别建立两个子系统的模型,再针对这两个子系统分别建立Lyapunov函数与控制器,然后在某些条件和中间虚拟变量的约束下,将两个控制器有机结合起来,得到整个系统的控制器,并且证明了闭环控制系统的全面指数稳定性^[86]。Kim对存在宽频扰动的并联机器人,利用滑模控制(SMC)加扰动补偿方法进行轨线跟踪控制,新设计的扰动补偿器被证明等效于一个与滑模函数有关的PD控制^[87]。Y. Ting通过研究Stewart并联平台在任务空间的控制方法,指出控制器的设计方法是将系统模型中与未知参数有关的项同已知的、可确定的项分离开来,得到只包含未知参数的参数灵敏度模型^[88]。M. Honegger提出在没有速度反馈的条件下,进行逆运动学前馈加非线性反馈控制的方法^[89]。但此方法缺乏有关稳定性的详细证明。Chung对液压驱动的Stewart平台进行了模糊控制方法和稳定性研究,指出模糊控制器输出的大小和符号主要由位置误差决定,而速度误差仅对控制输出的大小起作用,并用Popov稳定性判据证明了模糊系统的全局稳定性^[90]。田所諭(日)对液压驱动的并联机器人采用二级分级控制,上位机由计算机实现,完成平台位置、速度及加速度的算法指令及管理,构成一级控制;二级控制由单片机来担任下位机,负责对各液压缸子系统进行各种补偿校正控制,确保各缸子系统的动态性能达到一定的指标要求^[91]。

在国外学者研究的同时,我国的科研人员也进行了大量的有关并联机器人控制理论与方法的研究和探索。针对6自由度液压并联机器人,孔令富以液压主动关节为对象,建立系统的运动控制模型,根据作用于主动关节的等效力关系,提出了一种具有力补偿的自适应控制系统方案^[92]。杨小波、宗长富等针对6自由度液压汽车驾驶模拟平台的控制,提出了一种驾驶员体感模拟滤波算法,通过此算法可给模拟器运动系统提供运动驱动信号,使之按照该信号进行运动,从而为驾驶员提供逼真的运动感觉^[93]。宗长富、高越等提出了一种参数随输入信号改变的自适应滤波算法,以改进传统的滤波算法,并