



21世纪先进制造技术丛书

驱动冗余并联机床 性能分析及控制

· 吴 军 李铁民 王立平 著 ·



科学出版社

21 世纪先进制造技术丛书

驱动冗余并联机床性能分析及控制

吴 军 李铁民 王立平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统介绍了驱动冗余并联机床的参数辨识方法及控制技术。书中提出了驱动冗余并联机床的运动学标定方法,采用结构矩阵分析法建立了驱动冗余并联机床整机的静刚度理论模型,进一步利用商用有限元软件建立了刚度模型,并通过刚度实验检验了理论模型和有限元模型的正确性;建立了相对于基本动力学参数为线性化形式的动力学模型,研究了驱动冗余并联机床的动力学参数辨识方法;提出了冗余支链辅助回零策略及位置-力交换控制方法,并集成到驱动冗余并联机床数控系统中,最后通过机床轮廓误差实验、位置精度实验及切削实验评价这些方法的有效性以及驱动冗余并联机床的性能。

本书可作为机械制造及其自动化、机械电子工程等专业的教师、研究生和高年级本科生的教学参考书,也可供相关领域的工程技术人员提高数控机床分析及控制水平之用。

图书在版编目(CIP)数据

驱动冗余并联机床性能分析及控制/吴军,李铁民,王立平著. —北京:科学出版社, 2019.3

(21世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-060227-5

I. ①驱… II. ①吴… ②李… ③王… III. ①数控机床-性能-研究 IV. ①TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第292278号

责任编辑:裴育 纪四稳 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 封面设计:蓝正

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>

天津文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年3月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019年3月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:247 000

定价:85.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编 熊有伦(华中科技大学)

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 汉(华中科技大学)

王 煜(香港中文大学)

王田苗(北京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

王越超(中国科学院理化技术研究所)

冯 刚(香港城市大学)

冯培恩(浙江大学)

任露泉(吉林大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

江平宇(西安交通大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

李泽湘(香港科技大学)

李涤尘(西安交通大学)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

宋玉泉(吉林大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

张宪民(华南理工大学)

周仲荣(西南交通大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

查建中(北京交通大学)

柳百成(清华大学)

钟志华(同济大学)

顾佩华(汕头大学)

徐滨士(陆军装甲兵学院)

黄 田(天津大学)

黄 真(燕山大学)

黄 强(北京理工大学)

管晓宏(西安交通大学)

雒建斌(清华大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所)

谭建荣(浙江大学)

熊蔡华(华中科技大学)

翟婉明(西南交通大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

熊有伦

华中科技大学

2008年4月

前 言

作为新型数控加工装备,并联机床相对于传统机床具有许多优点,因此自并联机床问世以来,受到社会广泛关注,并经历了一个快速发展时期。目前,并联机床已由样机研发阶段逐渐向实用化和产业化阶段过渡,出现了众多结构形式各异的并联机床,并在一些领域得到了成功应用。然而,随着人们对并联机床的认识越来越深入,并联机床相关技术研究和开发工作的步伐逐渐趋于平缓。一方面,并联机床与传统机床相比表现出鲜明的特有优势,鼓舞着国内外众多研究机构和机床厂商坚持不懈地积极从事并联机床相关的研究工作;另一方面,经过几十年的研究,研究人员发现并联机床也存在一些缺陷,限制了并联机床的进一步应用。并联机床作为新型加工装备,可作为传统机床的重要补充,但大规模应用尚需时日。

限制并联机床实用化和产业化的原因众多,如理论研究与实际应用脱节、现有工艺水平及加工能力还无法满足要求、结构本身就存在“先天”缺陷等。从结构本身的“先天”缺陷方面看,较小的工作空间、有限的姿态能力和大量的奇异位形是并联机床的主要缺点。通过机构拓扑设计、结构优化,以及串并混联机构的运用等可以在一定程度上提高并联机床的工作空间和姿态能力,但是改进效果有限;针对并联机床工作空间中的众多奇异位形,可以首先搜索并联机床工作空间中的奇异位形,然后在轨迹控制中避开这些奇异位形。但是,在避开奇异位形时,缩小了机床的可用工作空间,降低了位姿实现能力,并且这种被动避开奇异位形的方法并没有从根本上解决并联机床动力学特性不均匀的缺点。最有效的解决方法是引入驱动冗余,并联机床采用驱动冗余方式不仅可以消除工作空间中的部分奇异位形,扩大工作空间,还可以提高机床刚度,优化输入力,降低机床关节内力,提高力传递能力,改善机床的性能。

虽然并联机床采用驱动冗余方式具有上述优点,但也增加了其理论研究和实际控制的难度。已有的关于驱动冗余并联机床的研究主要集中在机构的结构设计、奇异性分析和动力学建模方面,并且主要依靠对机构本身结构的优化来提高运动性能。在机床制造装配之后,可以通过标定来提高机床精度,而不需要改动机床硬件,因此标定是提高并联机床性能的一种简单有效的措施。但是,针对驱动冗余并联机床的运动学标定和动力学标定的实用化成果很少,阻碍了驱动冗余并联

机床精度的提高。另外,控制是开发并联机床的关键环节,决定着机床的运动品质。并联机床是高度非线性、强耦合的多变量复杂机电系统,广泛地存在延迟、时变等现象,使得被控量不能及时地反映系统状态,导致控制中难以同时兼顾高精度、快速性和稳定性。驱动冗余并联机床的控制更加复杂,在控制过程中需要对内力实时分配,并且不能采用传统数控机床的单支链回零方法。驱动冗余并联机床的高速高精度稳定控制是一项具有挑战性的课题。为了获得较高的运动品质,必须研究适合于驱动冗余并联机床的运动学和动力学参数辨识方法以及控制技术等,推动并联机床的实用化进程。因此,本书以作者近年来在并联机床的优化设计、动态特性分析及运动控制方面的研究成果为基础,系统论述驱动冗余并联机床的性能分析、参数辨识及控制方法。

全书共8章。第1章介绍本书的研究目的及意义、并联机床的国内外研究现状。第2章以一台平面驱动冗余并联机床为例,分析驱动冗余并联机床的工作空间、灵巧度、奇异性及刚度,并与对应的非冗余并联机床进行对比。第3章研究驱动冗余并联机床运动学标定技术,介绍最少参数线性组合的运动学标定方法,并以本书研究的驱动冗余并联机床的外部标定为例,说明误差建模、测量及误差补偿的详细步骤。第4章是静刚度建模部分,采用结构矩阵分析法建立整机的静刚度理论模型,进一步利用ABAQUS建立机床的有限元模型,最后通过刚度实验检验理论模型和有限元模型的正确性。第5章分别建立驱动冗余并联机床的刚体动力学模型以及考虑关键部件变形的刚柔耦合动力学模型。第6章研究驱动冗余并联机床的动力学参数辨识,并开展辨识实验研究。第7章研究驱动冗余并联机床的回零方法,提出机床冗余支链辅助回零策略,并集成到驱动冗余机床数控系统中。第8章研究驱动冗余并联机床的控制方法,提出位置-力交换控制策略并集成到数控系统中,通过轮廓误差实验、位置精度实验以及切削实验评价本书研究的驱动冗余并联机床的性能。

在本书撰写过程中,清华大学机械工程系汪劲松教授、刘辛军教授、唐晓强教授、关立文研究员、邵珠峰副研究员、张云副研究员在一些具体问题上给予了热情的帮助,并提出了宝贵的建议,在此表示感谢。还要感谢研究团队成员常鹏、吕亚楠、廖恒斌、贾石和刘大炜等,他们完成了本书部分内容的理论推导、仿真与实验工作。

由于作者水平所限,书中难免存在不足和疏漏之处,敬请读者不吝赐教。

作 者

2018年5月于北京清华园

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 并联机床的应用发展	1
1.2 并联机床动力学及控制研究状况	6
1.2.1 冗余机床动力学优化方法	6
1.2.2 冗余机床动力学参数辨识方法	7
1.2.3 并联机床的控制	8
1.3 本书的主要内容	10
参考文献	12
第 2 章 驱动冗余并联机床的性能分析	17
2.1 引言	17
2.2 运动学分析	17
2.3 冗余机床工作空间	21
2.3.1 位置工作空间	21
2.3.2 姿态工作空间	23
2.4 灵巧度分析	25
2.5 奇异性	26
2.5.1 微分运动分析	26
2.5.2 奇异位形分析方法	27
2.5.3 驱动冗余对正运动学奇异位形的影响	28
2.5.4 驱动冗余并联机床奇异性	29
2.6 刚性分析	32
2.6.1 力雅可比矩阵	32
2.6.2 刚度评价指标	33
2.6.3 驱动冗余对机构刚度的影响	36
2.6.4 驱动冗余并联机床刚度性能	36
参考文献	39

第3章 驱动冗余并联机床的运动学标定	41
3.1 引言	41
3.2 运动学标定原理	41
3.3 辨识方程	43
3.3.1 辨识方程的简化	43
3.3.2 最少参数线性组合的误差建模方法	44
3.3.3 驱动冗余并联机床外部标定的误差建模	47
3.4 测量	52
3.4.1 最少参数线性组合的测量方案设计方法	53
3.4.2 驱动冗余并联机床外部标定的测量方案设计	55
3.5 误差补偿	60
3.5.1 最少参数线性组合的分步误差补偿方法	60
3.5.2 驱动冗余并联机床外部标定的误差补偿	61
参考文献	64
第4章 驱动冗余并联机床的静刚度建模与实验	67
4.1 引言	67
4.2 刚度建模	67
4.2.1 坐标变换	68
4.2.2 滚动直线导轨滑台系统刚度模型	69
4.2.3 整机刚度模型	73
4.3 驱动冗余及非冗余并联机床刚度模型	74
4.3.1 驱动冗余并联机床整机刚度	74
4.3.2 非冗余并联机床整机刚度	77
4.3.3 驱动冗余并联机床和非冗余并联机床刚度比较	79
4.4 基于 ABAQUS 的刚度分析	81
4.5 机床部件对整机刚度的影响	85
4.5.1 曲柄厚度对整机刚度的影响	85
4.5.2 护板截面参数对整机刚度的影响	86
4.5.3 连杆结构对整机刚度的影响	89
4.5.4 轴承径向刚度及丝杠刚度对整机刚度的影响	90
4.6 刚度实验	93
4.6.1 实验原理及结果	93
4.6.2 刚度实验结果分析	95
参考文献	98

第 5 章 驱动冗余并联机床的逆动力学	100
5.1 引言	100
5.2 基于虚功原理的刚体动力学建模方法	100
5.2.1 偏速度矩阵和偏角速度矩阵	101
5.2.2 刚体上作用力等效规则	102
5.2.3 动力学模型	103
5.3 驱动冗余并联机床刚体动力学模型	104
5.3.1 运动部件偏速度矩阵和偏角速度矩阵	104
5.3.2 加速度分析	105
5.3.3 驱动冗余并联机床动力学模型	106
5.3.4 驱动力优化	108
5.4 动力学操作度	113
5.4.1 动力学操作度评价指标	113
5.4.2 驱动冗余并联机床动力学操作度	114
5.5 考虑杆件变形的动力学建模方法	115
5.5.1 连杆质心加速度分析	116
5.5.2 机构受力分析	117
5.5.3 驱动力优化	119
5.5.4 数值仿真	120
参考文献	124
第 6 章 驱动冗余并联机床的动力学参数辨识	127
6.1 引言	127
6.2 面向动力学参数辨识应用的动力学模型	127
6.2.1 基本动力学参数	127
6.2.2 线性化形式动力学模型	128
6.3 动力学参数辨识原理	130
6.4 两步辨识法	133
6.4.1 基本原理	133
6.4.2 激励轨迹优化的评价指标	133
6.4.3 惯性力有关的动力学参数辨识	134
6.4.4 摩擦力系数辨识	136
6.5 动力学参数辨识实验研究	136
6.5.1 辨识实验	136
6.5.2 验证实验	138

参考文献	139
第7章 驱动冗余并联机床的回零方法	141
7.1 引言	141
7.2 机床回零原理	142
7.3 驱动冗余并联机床回零	144
7.3.1 机床位形对回零的影响	144
7.3.2 回零策略	145
7.3.3 回零实验	149
参考文献	150
第8章 驱动冗余并联机床的控制	152
8.1 引言	152
8.2 驱动冗余并联机床位置-力控制	152
8.2.1 位置控制	152
8.2.2 位置-力控制	155
8.2.3 位置环控制器设计	157
8.3 驱动冗余并联机床位置-力交换控制	161
8.3.1 位置-力控制缺点	161
8.3.2 位置-力交换控制	161
8.3.3 位置补偿	163
8.4 驱动冗余并联机床动力学差分预测控制	166
8.5 控制策略实验研究	167
8.5.1 控制系统硬件组成	167
8.5.2 控制系统软件结构	170
8.5.3 动力学差分预测控制实验	174
8.6 驱动冗余并联机床性能评价	175
8.6.1 轮廓误差实验	175
8.6.2 位置精度实验	178
8.6.3 切削实验	180
参考文献	182

第 1 章 绪 论

1.1 并联机床的应用发展

从机构学角度看,多自由度联动机构可以分为串联机构和并联机构两大类。从装备研发角度,可以基于这两类机构分别开发加工装备。目前的加工装备主要采用串联机构实现多自由度联动,然而并联机构在高承载、低成本、结构紧凑、动态特性等综合性能要求高的场合更具优势,因此基于并联机构衍生出了一种新的加工装备——并联机床。并联机床实质上是机器人技术和数控机床技术相结合的产物,它同时兼顾了机器人和机床的诸多特性,是集多种功能于一身的新型机电设备。虽然其原型 Stewart 平台早在 1965 年就已问世,但真正引起关注则是在 1994 年美国芝加哥国际机床制造技术展览会上,美国 Ingersoll 公司和 Giddings & Lewis 公司首次展出了名为 HEXAPOD 和 VARIAX 的并联机床(图 1.1 和图 1.2),被誉为“机床结构的重大革命”和“21 世纪新一代数控加工设备”。之后,在 1995 年的欧洲机床展览会上,意大利 Comau 公司展出了基于 Tricept 型并联机构开发的去毛刺机器人。在 1997 年德国汉诺威机床展览会上机床厂商展出了多台并联机床。并联机床得到了国内外学术界和工业界的广泛关注。在我国,对并联机床的研究得到国家高技术研究发展计划、国家重点基础研究发展计划和国家自然科学基金等项目的资助。1997 年,清华大学与天津大学合作开发了我国第一台大型镗铣类纯并联构型机床——虚拟轴机床 VAMT1Y(图 1.3),此后清华大学开发了多种五轴联动并/混联机床(图 1.4),在样机结构设计技术、机床数控编程、动力学建模



图 1.1 HEXAPOD 机床

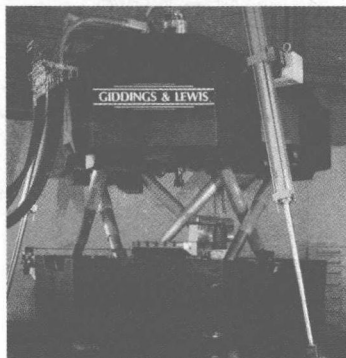


图 1.2 VARIAX 机床

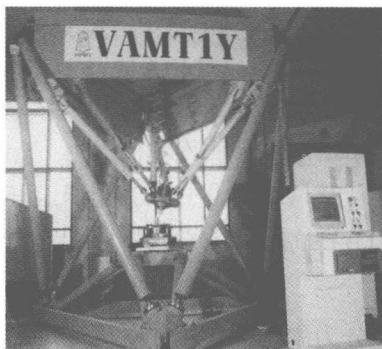


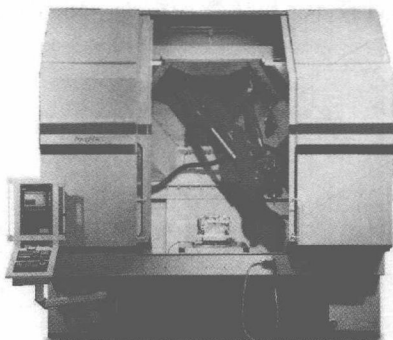
图 1.3 VAMT1Y 机床



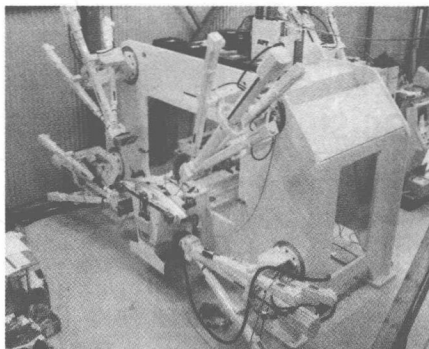
图 1.4 五轴联动并/混联机床

技术以及高精度控制等方面,取得了一系列创造性成果。

并联机床和基于串联机构的传统数控机床各有优点,根据需求设计兼具二者优点的混联机床,则具有更大的优势,拥有广阔的应用前景。近年来,基于少自由度并联机构功能部件的多自由度联动混联机床是装备行业研究的一个新方向,其主流趋势是将 2~3 自由度并联机构作为一种即插即用的功能模块——主轴头,这种主轴头摒弃了传统主轴头的缺点,具有结构紧凑、可重构能力强的优点,因此可根据用户需求搭建加工装备专机(如 5 坐标高速加工中心)或需要优势方向的制造系统(如飞机机翼、龙骨等铝合金结构件高速数控加工单元)。著名的 Tricept 机械手和 Sprint Z3 主轴头在航天、航空及汽车装备制造业中取得的巨大商业成功已经充分说明少自由度并联机构具有广阔的应用前景。图 1.5 为瑞典 Neos Robotics 公司开发的 Tricept 系列混联机床和机械手,主要用于飞机结构件和汽车动力传动装置高速铣削加工、汽车发动机装配等场合。图 1.6 为德国 DS Technology 公司开发的 Sprint Z3 主轴头以及集成该主轴头的飞机结构件高性能数控加工中

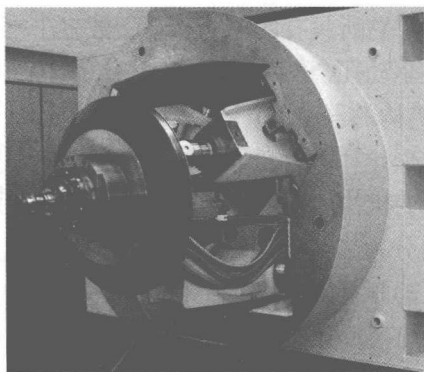


(a) Tricept845 并联机床

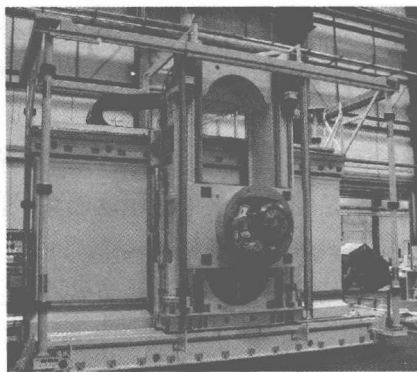


(b) Tricept 机构组成的飞机结构件加工单元

图 1.5 Tricept 系列混联机床和机械手



(a) Sprint Z3主轴头



(b) 五轴联动加工中心

图 1.6 Sprint Z3 主轴头及其构成的加工中心

心 Ecospeed。在该数控加工中心中, Sprint Z3 主轴头配置在可以沿 X 轴移动的立柱上, 并且可沿立柱上的线性导轨进行 Y 轴移动。配置的特点是所有运动都由刀具完成, 而工件是固定不动的, 这对大型飞机结构件加工非常有利。Ecospeed 数控加工中心具有加工效率和加工精度高、表面质量好等优点, 在许多飞机制造厂获得了应用。

相对于传统机床, 并/混联机床在理论上具有高承载、低惯量和高刚度等诸多优点, 因此始终得到学术界和工业界的重视, 研究人员发表了大量关于并/混联机床的学术论文。然而, 可实用化和产业化的并联装备还十分有限, 只有 Sprint Z3 主轴头^[1]以及 Tricept 机床^[2]等系列产品取得了成功, 这与人们对并联机床的期望相距甚远。其原因有很多, 其中一个主要原因是并联机床的工作空间小和奇异位形多。在奇异位形附近的区域, 机床的操作性能大幅度下降。与传统机床/机器人的奇异位形不同, 并联机床的奇异位形更加多样化, 在并联机床的某些奇异位形处, 机床将获得一个或多个自由度, 即在某些方向上的刚度将消失, 无法抵御外力; 或者失去一个或多个自由度。这两种情况下的奇异位形都会导致机床不可控, 并且在奇异位形附近的区域, 运动精度会下降。研究人员提出了多种搜索并联机构奇异位形的方法^[3], 以便在控制中避开这些奇异位形。由于奇异位形附近的区域, 机床的性能也较差, 所以在实际应用中机床不仅需要避开奇异位形, 还需要避开奇异位形附近的位形, 从而进一步减小了原本就不大的工作空间。

冗余是克服这些缺陷的一种行之有效的方案^[4,5], 逐渐被引入并联机构中。并联机构的冗余主要分为运动学冗余^[6]、驱动冗余^[7]和传感器冗余^[8]三种形式。对于一个并联机构, 如果它本身所具有的自由度数多于执行特定任务所需要的自由度

数,则该机构是运动学冗余的;相应地,如果它所具有的关节驱动器数多于末端执行器运动所必需的自由度数,则该机构是驱动冗余的;传感器冗余是指传感器的个数多于确定机构位形所需的最少个数(机构的自由度),可以用来避免运动学正解的不确定性或通过冗余传感器的信息减少计算,从而降低控制环的时间。驱动冗余只是增加了机构的驱动器数,而不改变机构的自由度,这类冗余在并联机构中应用较多。并联机构的驱动冗余又可以分为三种类型^[9]:第一类是在非冗余并联机构某些支链的被动关节处添加主动驱动器;第二类是在非冗余并联机构上添加具有主动驱动的运动学支链;第三类是前两种类型的组合,既驱动已有支链的被动关节,又添加额外的运动学支链。在非冗余并联机构中引入驱动冗余,可以消除非冗余并联机构工作空间中的部分奇异位形,从而增大并联机构的工作空间。此外,由于存在驱动冗余,可以采用适当的优化算法和优化目标对各个主动关节的驱动力进行优化分配,改善机构的性能。

目前,研究人员已经成功地应用驱动冗余来克服并联机构的奇异位形,增大有效工作空间,优化关节驱动力,改善整个工作空间中的刚度和驱动平稳性。例如,Zanganeh 和 Angeles^[10]提出了一种冗余并联机器人,它可以有效地克服 6 自由度 Gough-Stewart 平台的作业空间小和奇异位形多等缺点。韩国汉阳大学设计了驱动冗余的五副灵巧手^[11],并指出在灵巧手中使用一个冗余驱动器比不添加冗余驱动器或添加两个以上的冗余驱动器具有更大的夹持载荷能力。韩国首尔国立大学建造了可进行五面快速加工的 6 自由度并联机床 Eclipse I(图 1.7)和 Eclipse II^[12,13],其动平台具有空间大角度转动能力。德国开姆尼茨弗朗豪夫模具及成型技术研究所基于平面冗余并联机构^[14],开发了一台具有剪刀运动学形式的并联机床,其样机如图 1.8 所示。此外,国内一些单位也开发了冗余并联机床。清华大学^[15]

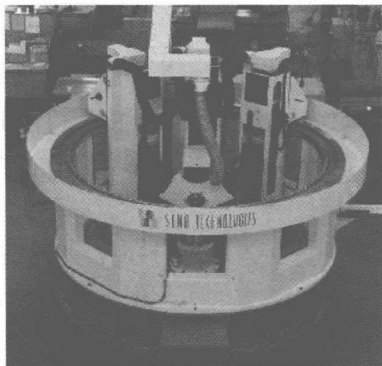


图 1.7 Eclipse I 并联机床

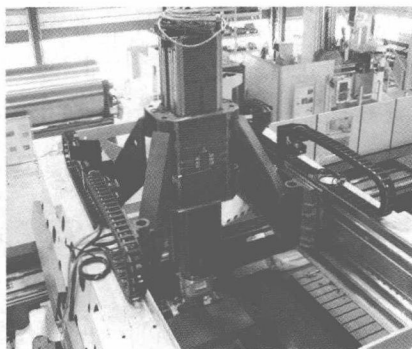


图 1.8 2 自由度驱动冗余并联机床

将一台五轴联动混联机床中并联机构的一个被动关节变为主动驱动,开发了驱动冗余并联机床(图 1.9)。燕山大学^[16]基于 6PUS-UPU 并联机构开发了一台五轴联动并联机床(图 1.10)。北京航空航天大学开发了具有两转动和一平动自由度的冗余并联机床^[17]。香港科技大学与国防科技大学^[18]合作,在一台平面 2 自由度并联机器人上增加一条冗余运动学支链,开发了驱动冗余并联机器人。



图 1.9 五面加工混联机床

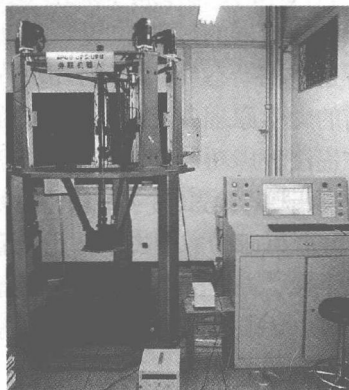


图 1.10 6PUS-UPU 并联机床

相对于传统的刚性连杆并联机构,一些学者提出使用绳索代替刚性连杆的绳牵引并联机构^[19,20]。但是,绳索的弹性降低了机构的刚性,而且工作过程中绳索必须始终处于拉伸状态,需要通过添加冗余绳索以保证机构的正常运动。正如 Ming 和 Kajitani 等^[21]指出的, n 自由度绳牵引并联机构必须至少由 $n+1$ 根绳索来牵引,因此绳牵引并联机构通常是驱动冗余的。绳牵引并联机构运动部件质量小,可以产生较高的速度和加速度,同时绳牵引并联机构具有较好的柔性和可操作性,更容易实现可重构和模块化,可以应用于对较重质量的刚性连杆并联机构不适合和对精度要求不太高的场合,如造船、大型射电望远镜的馈源舱^[22]、定位望远镜和体育场里的照相机系统等,另外还可以用于半导体等轻质量物体的高速装配。

并联机床作为并联机构的一个主要应用,正处于走向实用化和产业化的关键时期,集中力量解决其发展道路上的若干瓶颈问题,具有重要的意义。驱动冗余并联机床是解决当前并联机床实用化过程中若干问题的有效途径之一。因此,对驱动冗余并联机床的样机建造、动力学和控制等关键问题进行研究,对提高驱动冗余并联机床的研制水平,促进并联机床的工业应用具有重要意义。