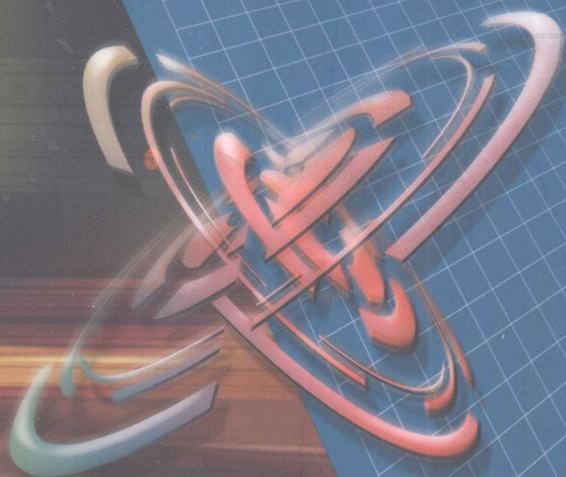


混联研抛运动机床 多柔体动力学及 控制技术研究

● 于淼 / 著



 吉林大学出版社

 吉林大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

混联研抛运动机床多柔体动力学及控制技术研究/于
森著. —长春: 吉林大学出版社, 2008. 12

ISBN 978-7-5601-3732-2

I. 混… II. 于… III. 数控机床—研究 IV. TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 193698 号

书名: 混联研抛运动机床多柔体动力学及控制技术研究
作者: 于森 著

责任编辑、责任校对: 沈广启

吉林大学出版社出版、发行

开本: 787 × 960 毫米 1/16

印张: 12.125 字数: 220 千字

ISBN 978-7-5601-3732-2

封面设计: 张沐沉

长春大学印刷厂 印刷

2008 年 12 月 第 1 版

2008 年 12 月 第 1 次印刷

定价: 28.00 元

版权所有 翻印必究

社址: 长春市明德路 421 号 邮编: 130021

发行部电话: 0431-88499826

网址: <http://www.jlup.com.cn>

E-mail: jlup@mail.jlu.edu.cn

内容简介

本书以多柔体动力学为理论基础,首次将多柔性系统动力学的建模方法引入混联研抛运动机床的动力学分析中,应用 Lagrange 方程建立了空间刚-柔耦合多体系统动力学模型,深入地研究了混联研抛运动机床的动力学特性.通过计算机仿真对混联研抛运动机床的振动模态、逆动力学和含间隙动力学等进行了分析,所得结果为实现混联研抛运动机床最优控制提供了有力的理论基础.本书主要研究内容有:混联研抛运动机床运动学分析、多柔体动力学模型建立、混联研抛运动机床的动力特性及试验研究、多柔体逆动力学分析、含间隙动力学研究和混联研抛运动机床开放式数控系统的软硬件设计与实现等.

本书可供高等院校有关专业的研究生、教师及从事机器人设计及应用和机械制造自动化的工程技术人员参考.

前言

混联研抛运动机床是针对模具自由曲面精加工自动化而研发的一种新型装备。由于该机床是一个包含多环闭链机构的复杂多体系统,故与传统的串联机构相比,建立动力学方程是较为复杂而困难的。本书主要以多柔体动力学为理论基础,深入地研究了混联研抛运动机床的动力学特性,所取得的主要的创新性成果有:首次将多柔性系统动力学的建模方法引入混联研抛运动机床的动力学分析中,应用 Lagrange 方程建立了空间刚-柔耦合多体系统动力学模型,分别列出了 3-PTT 并联机构和两关节串联机构自由状态的多柔体动力学方程,并根据 3-PTT 并联机构和两关节串联机构的铰接特点,得到空间约束 Jacobian 矩阵方程,进而建立了混联研抛运动机床多柔体动力学的总体控制方程。

在建立的混联研抛运动机床多柔体动力学模型的基础上,应用牛顿-拉斐逊数值计算方法求解微分-代数混合方程组,得到了 3-PTT 并联机构动平台、支杆、滑鞍各部件的运动轨迹、速度和加速度变化规律,以及串联机构的姿态变化曲线。在混联研抛运动机床的数学模型中施加一定大小和方向的激振力,通过计算机仿真对混联研抛运动机床的振动模态、逆动力学和含间隙动力学等进行了分析,所得结果为实现混联研抛运动机床最优控制提供了有力的理论基础。建立了一种基于 PMAC 和 IPC 的双 CPU 开放式数控系统,完成了机床的数控装置,并通过此数控装置对机床进行了初步的调试和试运行,实现了基本的运行要求。

本书较深入地介绍了混联研抛运动机床动力学的理论基础和具体应用问题,是作者在混联研抛运动机床多柔体动力学领域的研究成果的总结。本书的研究工作是在吉林大学机械科学与工程学院博士生导师赵继教授的悉心指导下完成的。同时还得到了吉林大学机械科学与工程学院的王义强教授、祝佩兴副教授、张雷教授、朱玉祥博士、谢哲东博士的大力支持和帮助。本书的出版是在吉林省科技厅项目“精密自动研抛加工模具自由曲面的虚拟轴专用机床研制”(吉科合字第 20000122 号)和吉林省科技厅项目“基于多智能体的串并联协调研抛控制系统”(编号:20080541)资金资助下完成的。

由于作者的水平和工作实践所限,书中可能会有不少错误和缺点,期望得到专家和读者的批评指正。

作者

2008 年 11 月于长春大学

目 录

第一章 绪 论	1
§ 1.1 模具自由曲面加工的研究现状	1
§ 1.2 虚拟轴机床的研究现状	3
1.2.1 虚拟轴机床的构型	4
1.2.2 运动学问题	9
1.2.3 动力学分析和控制	11
1.2.4 数控技术、关键零部件	12
§ 1.3 多柔体动力学的新进展	13
1.3.1 机构弹性动力分析(KED)	13
1.3.2 多柔体动力学的发展	14
1.3.3 多柔体动力学方程算法	15
1.3.4 多柔体逆动力学及控制策略	17
1.3.5 含间隙动力学研究	18
§ 1.4 本书的主要研究内容及意义	19
第二章 混联研抛运动机床运动学分析	21
§ 2.1 混联研抛运动机床结构	21
§ 2.2 混联研抛运动机床的机构自由度验证	23
2.2.1 螺旋理论	24
2.2.2 研抛机床具体自由度分析	28
§ 2.3 混联研抛运动机床位置分析	29
2.3.1 混联研抛运动机床并联机构位置正解分析	30
2.3.2 混联研抛运动机床串联机构位置正解分析	32
§ 2.4 混联研抛运动机床位置逆解分析	36
2.4.1 混联研抛运动机床并联机构位置逆解分析	36
2.4.2 混联研抛运动机床串联机构位置逆解分析	37
2.4.3 混联研抛运动机床位置逆解算例	40
第三章 混联研抛运动机床运动影响系数及运动分析	43
§ 3.1 运动影响系数	43
§ 3.2 混联研抛运动机床一阶影响系数及运动分析	45

3.2.1 混联研抛运动机床并联机构的一阶影响系数及运动分析	45
3.2.2 混联研抛运动机床串联机构的一阶影响系数及运动分析	46
§ 3.3 混联研抛运动机床的二阶影响系数及运动分析	49
3.3.1 混联研抛运动机床并联机构的二阶影响系数及运动分析	49
3.3.2 混联研抛运动机床串联机构的二阶影响系数及运动分析	50
第四章 混联研抛运动机床的多柔体动力学模型	53
§ 4.1 多柔体动力学模型	53
4.1.1 柔性体上任一点的位置向量	53
4.1.2 欧拉参数	54
§ 4.2 3-PTT 并联机构多柔体动力学模型	55
4.2.1 混联研抛运动机床的有限元模型	55
4.2.2 单个支杆的多柔体模型	56
4.2.3 动平台、滑鞍的动力学方程	62
§ 4.3 3-PTT 并联机构的空间约束和约束方程	63
4.3.1 虎克铰的空间约束方程	63
4.3.2 铰点 C_3 处移动副的空间约束方程	66
4.3.3 3-PTT 并联机构空间约束方程	67
§ 4.4 3-PTT 并联机构总体控制方程	70
§ 4.5 串联机构的动力学方程	71
4.5.1 串联机构的质量矩阵、广义力阵	71
4.5.2 串联机构的空间约束方程	74
第五章 混联研抛运动机床的动力特性及试验研究	77
§ 5.1 多柔体动力学方程组的数值计算方法	77
5.1.1 刚性微分方程组概述	77
5.1.2 微分-代数混合方程组的处理方法	79
5.1.3 非线性微分方程组的计算方法	81
5.1.4 误差校正	82
§ 5.2 混联研抛运动机床多柔体动力学仿真分析	84
5.2.1 混联研抛运动机床 3-PTT 并联机构运动学仿真分析	84
5.2.2 混联研抛运动机床串联机构运动学仿真分析	88
5.2.3 模态分析	90
§ 5.3 试验结果及其分析	93
5.3.1 JDYP51 型混联研抛运动机床数控系统的软、硬件设计	93

5.3.2 试验结果及其分析	97
第六章 混联研抛运动机床逆动力学研究	102
§ 6.1 3-PTT 并联机构的约束力	102
6.1.1 作用在刚体上的约束力	102
6.1.2 作用在柔体上的约束力	104
6.1.3 混联研抛运动机床关约束力(矩)仿真结果	105
§ 6.2 混联研抛运动机床多柔体逆运动学分析	108
6.2.1 混联研抛运动机床多刚体逆运动学	108
6.2.2 混联研抛运动机床多柔体逆运动学	109
§ 6.3 混联研抛运动机床多柔体逆动力学	110
6.3.1 混联研抛运动机床多刚体系统逆动力学	110
6.3.2 混联研抛运动机床多柔体系统逆动力学	111
6.3.3 混联研抛运动机床多柔体系统逆动力学仿真分析	112
§ 6.4 3-PTT 并联机构鲁棒轨迹跟踪控制	116
6.4.1 鲁棒轨迹跟踪控制器的设计	116
6.4.2 鲁棒轨迹跟踪控制仿真结果分析	117
第 7 章 混联研抛运动机床含间隙动力学研究	121
§ 7.1 含间隙的并联机构动力学模型	121
7.1.1 含间隙运动副的动力学模型	121
7.1.2 含间隙并联机构的间隙副模型	122
§ 7.2 含间隙的并联机构多刚体和多柔体动力学建模	125
7.2.1 含间隙的并联机构多刚体动力学建模	125
7.2.2 含间隙的并联机构多柔体动力学建模	126
§ 7.3 数值求解与讨论	128
7.3.1 数值结果分析	128
7.3.2 弹性补偿装置	132
第八章 开放式数控系统的硬件设计与实现	135
§ 8.1 数控系统的原理与结构	135
8.1.1 NC 系统基本组成及原理	135
8.1.2 CNC 系统的结构原理与工作过程	136
§ 8.2 JDYP51 型混联研抛机床 CNC 系统的硬件装置	139
8.2.1 PMAC 运动控制器	139
8.2.2 伺服系统的选择及装置	141

8.2.3 内置式 PLC 模块	143
8.2.4 位置检测元件	145
§ 8.3 基于 PMAC 的开放式数控系统的结构设计	147
8.3.1 数控系统的结构组成与工作原理	147
8.3.2 PMAC 运动控制器与伺服系统的控制连接	149
8.3.3 PLC 控制部分的连接	152
§ 8.4 系统硬件调试的功能选择与实现	153
8.4.1 伺服驱动的控制模式	153
8.4.2 双反馈系统的选择	154
第九章 开放式数控系统的软件研究	156
§ 9.1 CNC 系统软件结构及功能	156
9.1.1 CNC 系统的软件结构	156
9.1.2 CNC 系统的软件功能	157
9.1.3 CNC 系统的结构特点	159
§ 9.2 CNC 系统软件的功能实现	161
9.2.1 PLC 程序设计	161
9.2.2 插补处理	162
9.2.3 实时中断与多任务处理	165
§ 9.3 调试运行中若干问题的研究	166
9.3.1 系统调试设置	166
9.3.2 伺服系统的 PID 调整	167
第十章 结 论	170
参考文献	172
致 谢	184

第一章 绪 论

在机械制造系统的发展过程中,每一代设备的更新和革命,都给制造技术和生产带来一次飞跃和进步,使机械制造业的生产能力和产品质量大幅度提高、生产成本降低和生产周期明显缩短。但是,历代制造设备在结构方面一般均采用由床身、立柱、主轴箱和工作台等部件串联而成的非对称“C”型布局,这种布局使机床机构件机构复杂,受力和热变形不均匀、误差累积加大^[1]。

为了克服传统机床机构布局的固有缺陷,有效地降低重量和提高对生产环境的适应性,近十年来全球机床制造业都在积极地探索和研制新型制造设备与系统。其中最具代表性的是1994年问世的虚拟轴机床(Virtual Axis Machine Tool),它突破了传统机床的观念,是与机器人技术有效结合的产物。

虚拟轴机床发展至今已有10年,世界各国已经开发研制出多种结构构型的专用机床,有的已进入实用化阶段。总的说来,虚拟轴机床具有模块化程度高、易于重构,机械结构简单。但该机床也存在着明显的不足,即在刚度、精度以及作业空间等方面存在着明显的缺陷^[1]。因此,如何扬长避短地开辟虚拟轴机床的应用新天地,便成为该领域具有重要研究价值的战略选择。本课题组在虚拟轴混联机床的开发中,寻求和开拓其在模具曲面自动精加工中的新领域,充分利用弹性加工的特点,通过巧妙设计弹性研抛工具系统将其用于自由曲面的研抛加工中。本书所做的探索为拓展虚拟轴混联机床的应用领域开辟了新的道路。

§ 1.1 模具自由曲面加工的研究现状

模具自由曲面的精加工工序是模具加工的最后道工序,是直接影响模具质量好坏的最重要的一环,它占整个模具加工量的40%左右^[2],因此,备受国内外专家的重视。国外大多数模具厂家都采用模具设计、加工,甚至装配一体化,即模具CAD/CAM/CAE的一体化,利用模具CAD软件和反求工程进行设计,利用虚拟现实系统进行装配,发现干涉及时调整,在没有问题的条件下,才进行加工。在加工过程中,利用加工中心和CAD/CAM,把整个加工过程整合为一体,工件一次安装即可完成形状加工,从而保证了模具自由曲面的加工精度。然而,对于模

具自由曲面的精整加工仍是个世界难题,这主要是由于存在以下几方面的问题^[2]:

(1) 模具曲面的多样化和不规则性.在很多场合下,,模具的型腔表面都是三维不规则的自由曲面,由于这些曲面的形状各异,这给光整加工时的工具运动轨迹及进给带来很大的麻烦.既使用现代的数控加工技术来控制工具的运动,也会给数控程序的编制带来很大的困难,所以这是导致模具光整加工难以实现自动化的根本原因.

(2) 用于模具光整加工的工具的自适应性和柔性差.由于模具型面的特殊性,要求加工它的工具要有很好的自我调整的能力,即所谓的自适应性,要随着加工轮廓形状的改变而改变自己的运行轨迹,这就要求加工模具型腔的工具具有一定范围的可塑性,即柔性.但是现在模具加工多是采用刚性工具,其自适应性和柔性较差.

(3) 模具曲面的精度和粗糙度级等要求较高.这也是模具自身的特点决定的,模具作为加工工件的模型,它的精度和表面质量的高低直接决定了工件精度的好坏,也对自身的寿命、耐腐蚀性、耐磨性以及加工后能否顺利把工件从模具中取出都起到至关重要的作用.即使有些加工方法本身加工精度很高,但用在模具加工上,却由于在降低模具表面粗糙度的同时,很难保证工件的原始形位公差,结果也很难胜任.表 1-1 为国内外各种模具曲面的制造精度比较表.

表 1-1 模具曲面的制造精度比较

精 度	国 外 水 平	国 内 水 平
塑料模型腔精度	0.005 ~ 0.01 mm	0.02 ~ 0.05 mm
	Ra 0.10 ~ 0.05 mm(11 ~ 12)	Ra 0.20 mm(10)
压铸模型腔精度	0.01 ~ 0.03 mm	0.02 ~ 0.05 mm
	Ra 0.20 ~ 0.10 mm(10 ~ 11)	Ra 0.40 mm(9)
冷冲模尺寸精度	0.02 ~ 0.005 mm	0.01 ~ 0.02 mm
	Ra 0.20 mm 以下(10 以上)	Ra 1.60 ~ 0.80 mm(7 ~ 8)
锻模精度	0.01 ~ 0.03 mm	0.05 ~ 0.10 mm
	Ra 0.40 mm 以下(9 以上)	Ra 1.60 mm(7)
级进模步距精度	0.002 ~ 0.005 mm	0.003 ~ 0.01 mm

在我国尽管模具加工的大部分工序(车、铣、刨、磨、电火花、线切割等)已经实现了高度自动化,但模具的精整加工大部分仍依赖熟练工人的手工操作,这在一定程度上严重影响了我国模具的发展.手工加工虽然运动灵活,可以加工任何复杂的形状,但同时该方法的劳动强度大,生产效率低,产品的质量稳定性差,

已成为低成本、高质量和高效率制造的瓶颈,因此,研究一种用于模具曲面精加工的高效率、高柔性的研磨设备势在必行,虚拟轴机床的出现正好迎合了这一要求^[3-5]。

§ 1.2 虚拟轴机床的研究现状

自 18 世纪英国工业革命以来,机床历经了三个重要的发展阶段:

第一阶段是天轴集中传动。用机械动力代替人力,促使车削、铣削、磨削、齿轮加工等不同工艺方法相继出现,一直延续到 20 世纪 20 年代,形成了近代金属切削机床体系和机械制造业。

第二阶段是采用交流电动机驱动和齿轮变速。它导致机床机械化和自动化的迅速发展,出现了以汽车工业为代表的组合机床自动化生产线,使大批量生产的自动化水平在 20 世纪 60 年代达到了顶峰。

第三阶段是机床的数字控制。从 1954 年美国麻省理工学院研制成功第一台数控机床以来,经过半个世纪的发展,数控机床在制造业中已经普遍应用,成为当今机床工业的主流产品。

但是总的说来,它们的基本结构没有什么变化,一般都采用由床身、立柱、主轴箱和工作台等部件串联而成的非对称“C”型布局,这种布局使机床机构复杂,受力和热变形不均匀、误差累积加大。而虚拟轴机床(并联机床)彻底打破近两个世纪以来以笛卡尔坐标直线位移为基础的机床结构和运动学原理,将机床结构技术与机器人技术相结合,以空间并联机构(并联机器人)为基础,以软件取代部分硬件,以电气装置和电子器件取代部分机械传动,具有结构简单、传动链短、环境适应性好、技术附加值高等优点^[6-8]。

1994 年,在美国芝加哥国际机床展览会(IMTS'94)上,美国 Gidding & Lewis 公司首次展出了称为“六足虫”(Hexapod)和“变异型”(Variax)的数控机床与加工中心,引起各国机床研究单位和生产厂家的重视,它是一台采用 Stewart 平台为基础的 5 坐标立式加工中心,标志着机床设计开始采用并联机构,是机床结构重大改革的里程碑。此后,各主要工业国家都投入了大量的人力和物力进行虚拟轴机床的研究和开发。如美国 Ingersoll Milling 公司、Gidding & Lewis 公司和 Hexal 公司,英国 Geodetic Technology 公司,俄罗斯 Lapic 公司,德国 Mikromat 公司、亚琛工业大学、汉诺威大学、斯图加特大学,挪威 Multicraft 公司,瑞士 ETZH 和 IFW 研究所,瑞典 Neos 机器人公司,意大利 Comau 机床公司,丹麦 Braunschweig 公司,日本丰

田公司、日立公司、三菱公司, 韩国 SENA TECHNOLOGIES 公司等单位相继研制出不同结构形式的数控机床、激光加工机床和水射流机床、坐标测量机等基于并联机构的制造设备。

目前, 我国已有多家研究单位正在积极从事虚拟轴机床的研究工作, 已经研制出了数台结构形式各异的样机。其中清华大学于 1997 年与天津大学合作, 共同开发出我国第一台具有自主知识产权的大型镗铣类虚拟轴机床原样样机—VAMTTY, 之后又与昆明机床股份有限公司共同研制了 XNZ63 虚拟轴机床, 与江东机床厂联合开发了一台龙门式虚拟轴机床, 与大连机床厂联合研制了 DCB-510 五轴联动串并联机床; 哈尔滨工业大学与齐齐哈尔第二机床企业集团公司联合开发了 BJ-1 并联机床; 在 2001 年北京国际机床展览会上展出并进行了不锈钢 4Cr13 汽轮机叶片的实物切削加工, 赢得了参展各界的好评; 东北大学以钢坯修磨为实用目的, 研制了 DSX5-70 型三杆虚拟轴机床; 国防科技大学和香港科技大学共同研制了银河-2000 虚拟轴机床等。总的说来, 仅就学术研究而言, 我国在此研究领域的技术水平与国际先进水平相差不大^[9-12]。

1.2.1 虚拟轴机床的构型

关于虚拟轴机床(并联机床)构型的研究一直是人们关注的热点, 近年来许多学者提出了多种新机构构型, 并对机构的类型和构建方法进行了系统的讨论。按末端执行器运动自由度的数目并联机构可以分为 3 自由度、4 自由度、5 自由度和 6 自由度虚拟轴机床。20 世纪 90 年代中期出现的虚拟轴机床基本都是以 Stewart 平台(如图 1-1 所示)为基础, 一般为 6 自由度并联机构。Stewart 平台最先应用于飞行模拟器, 很快被推广到高速列车、船舶、坦克和汽车的动态性能试验、驾驶

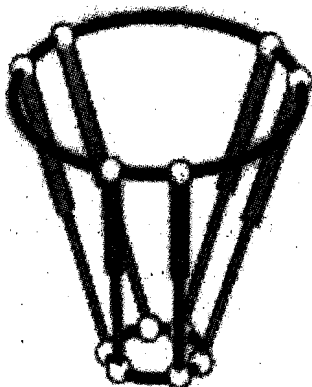


图 1-1 Stewart 并联机构

员培训以及公众娱乐设施项目、医疗设备、天文望远镜等许多领域。它可以弥补串联机器人刚度差、承载能力低的缺点,在发展初期引起了众多研究者的兴趣。将它应用于机床制造领域,是机床结构改革的一个突破。比如美国 Gidding & Lewis 公司研制的世界上第一台 Variax 型虚拟轴机床、德国 Mikromat 机床公司的欧洲第一台商业化的虚拟轴机床——6X Hexa 立式加工中心、俄罗斯 Laptic 公司的 TM-1000 型精密加工中心和 KHM-750 型 3 坐标测量机、美国 Hexel 公司的 Tornado 型 5 坐标加工中心和 P2000 型 5 坐标数控铣床以及我国哈尔滨工业大学研制的 BJ-1 并联机床等均是采用 Stewart 并联机构。但是,经过几年的研究人们发现以 Stewart 平台为基本构型虽然能实现空间 6 自由度的并联运动,但是这类机床存在与其结构本身密切相关的缺点,如灵活度不高、工作空间与体积比小、运动学和动力学求解困难等。因此,国内外许多学者开始设计一些新结构形式的少自由度机构来用于加工。这类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、运动学解耦容易、机械元件的制造和控制精度较低等优点。这类少自由度并联机构以 3 杆 Delta 并联机器人和 Tricept 并联机器人代表^[8,13-19]。

1. Delta 并联机器人

Delta 并联机器人是由瑞士洛桑工学院(EPFL)Clavel 在 20 世纪 80 年代初首次提出,并申请专利。它是由 3 组连杆机构和摆动控制臂连接固定平台和动平台,摆动控制臂一端固定在固定平台上,通过电机驱动作反复摆动,另一端通过球铰链与连杆机构连接,连杆机构再通过球铰链与动平台连接,以实现动平台 3 个方向的移动。Delta 并联机器人运动部件质量轻,可以获得较高的加速度,广泛用于

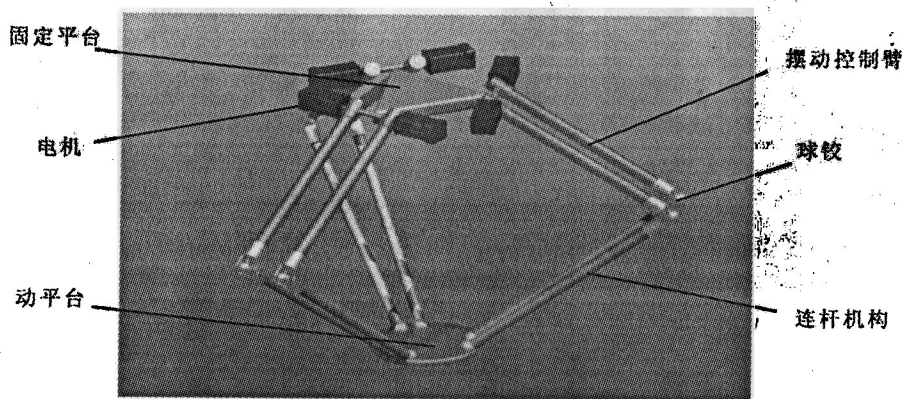
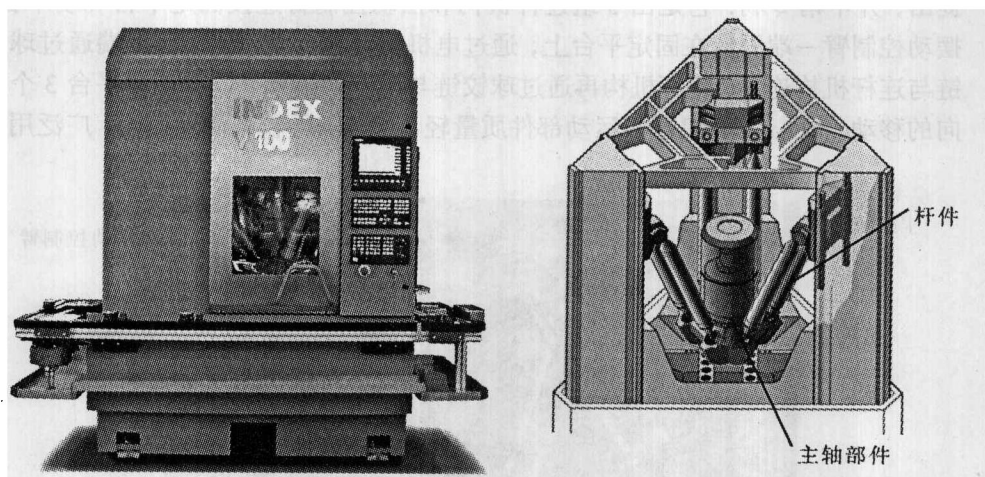


图 1-2 Delta 并联机器人

化妆品、食品和药品的包装和电子产品的装配^[20-21]。比如,近年来瑞典 ABB 集团公司推出的 Flexpicker IRB340 型、Delta C1000 型取放机器人,日本精机公司推出的 PA35 型高速钻床,瑞士 Demarex 公司推出的 C33 和 C33E 型用于包装巧克力的 Delta 并联机器人等。

基于 Delta 并联机器人开发的虚拟轴机床比较具有代表性的是德国 Index 机床公司(index-werke.de)的 V100 型车削加工中心,如图 1-3 所示,该机床由 3 组杆件一端用铰链固结于滑板,另一端与动平台相连,动平台上安装主轴部件,滑板由滚珠丝杠驱动沿 3 个导轨作上下移动,从而带动主轴实现 3 个方向的移动。这种配置属于 3 杆并联机构(Tripod)。它可以完成车削、铣削、磨削等多个工序的加工,采用西门子公司 Simumerik 840D 数控系统,已经用于商业化加工。图 1-4 所示为由 3 台 V100 型车削加工中心组成的生产线,用于生产传感器壳体,具有很好的实用价值。

另外,法国 Renault Automation 公司在 1999 年推出的 Urane SX 卧式加工中心、德国 Reichenbacher 公司生产的 Pegasus 型木材加工中心和我国清华大学与大连机床厂联合研制的 DCB-510 五轴联动串并联机床等虚拟轴机床均是采用 Delta 并联机器人结构形式^[8]。



(a) V100 型车削加工中心外观

(b) V100 型车削加工中心三维图

图 1-3 V100 型车削加工中心

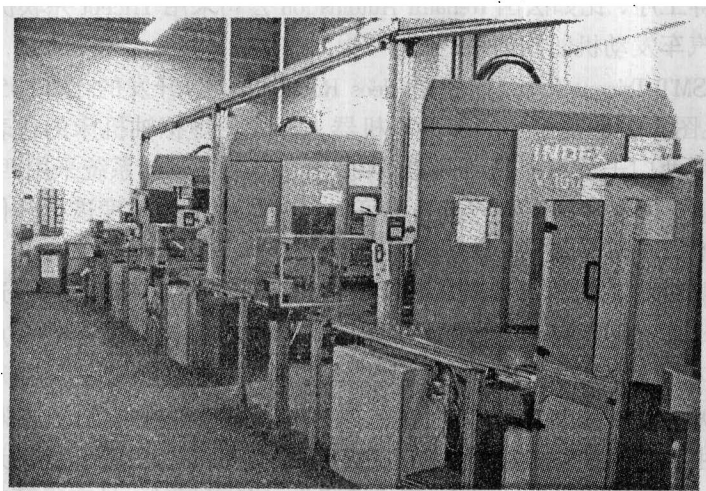


图 1-4 V100 型车削加工中心生产线

2. Tricept 并联机器人

Tricept 并联机器人是瑞典 Neos Robotic 公司开发的机器人, 如图 1-5 所示. 3 根伸缩杆通过球铰链与下平台(动平台)相连接, 下平台可以安装主轴或其他工具, 通过伺服电机的驱动实现 5~6 轴联动. 主要用于汽车装配自动线, 以及切削

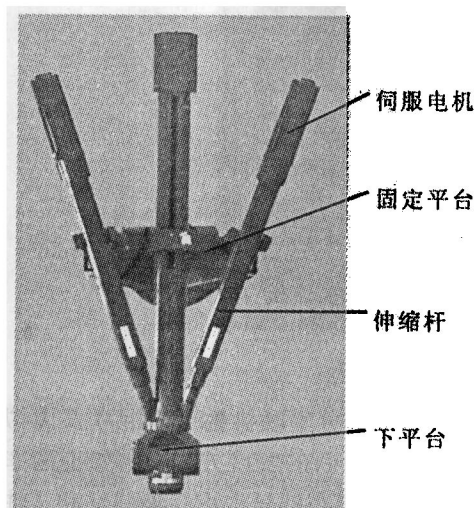


图 1-5 Tricept 并联机器人

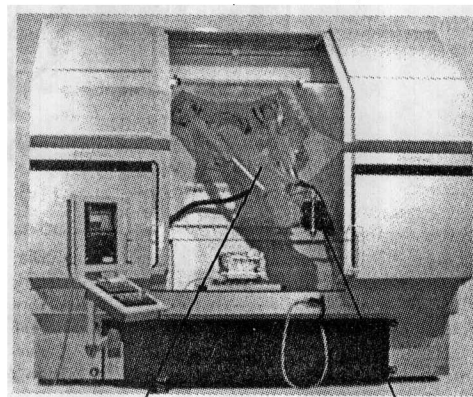


图 1-6 TMC845 型加工中心

和激光加工等工序。比如法国 Renault Automation 公司采用 Tricept 并联机器人在自动线上装配汽车发动机的阀门密封圈^[22-23]。

由瑞典 SMT Tricept 公司(前身是 Neos Robotic 公司)开发的 TMC845 型 5 坐标加工中心(见图 1-6)是基于 Tricept 并联机器人开发的虚拟轴机床的代表。该机床控制系统采用西门子公司 Simumerik 840D 数控系统,驱动系统采用西门子 611D 伺服驱动装置,通过在线直接测量系统可以对机床的工作精度进行补偿。所以其模块化程度高、工作可靠,具有良好的应用前景^[23]。

上述虚拟轴机床无论是基于 Delta 并联机器人、Tricept 并联机器人还是 Stewart 平台架构,均具有各自很多独有的结构特点,但同时也兼有了一些缺点,比如工作空间普遍不令人满意、主轴部件工作范围受限等。德国弗琅霍夫机床与锻压技术研究所(IWU)推出的 P-800 型 5 杆虚拟轴机床是一台极具创意的虚拟轴机床(见图 1-7),它由 5 根电滚珠丝杆通过结构独特的环形铰链与主轴部件相连,它的主轴倾角可达 90°,扩大了工作空间,缩小了机床的外形尺寸,具有很高的模块化程度和可重构性。但存在奇点是它的不足^[24]。

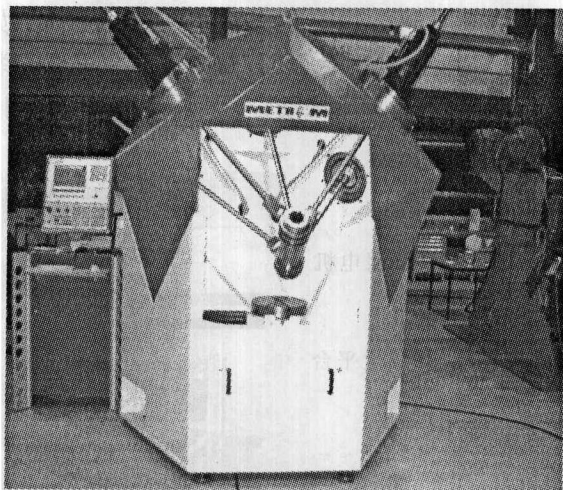


图 1-7 P-800 型 5 杆虚拟轴机床

另外,近几年出现的在并联机构的基础上串接部分串联机构形成混联式虚拟轴机床,也是为了克服并联机构工作空间小的又一个新的发展方向。比如美国辛辛那提和德国 DST 公司开发的 Hyper Mach 卧式加工中心就是采用 3 轴并联和 2 轴串联机构。混联式虚拟轴机床可以将并联和串联机构的优点融为一体,适用价值