

学科门类: 工学
中图分类号: TH113

单位代码: 10287
密 级: 公 开

硕 士 学 位 论 文

一种空间三自由度平动 并联机床研究

硕士生姓名 丁 学 明

一 级 学 科 机械工程

学科、专业 机械电子工程

研 究 方 向 机电控制及自动化

指 导 教 师 吴 洪 涛 教 授

南 京 航 空 航 天 大 学

二 〇 〇 二 年 三 月

学科门类：工科
中图分类号：TH113

单位代码：10287
密级：公开

硕士学位论文

一种空间三自由度平动 并联机床研究

硕士生姓名 丁学明

一级学科 机械工程

学科、专业 机械电子工程

研究方向 机械电子工程及自动化

指导教师 吴洪涛教授



南京航空航天大学

二〇〇二年三月

摘 要

运动学正解、工作空间求解和奇异性分析是限制并联机床发展的三大瓶颈问题。本文研究的 3UPU 并联机床很好地解决了上述问题，为其理论分析和实际应用打下了坚实的基础。

在运动学方面，利用矢量法求出的相似平台 3UPU 并联机构位置正解、反解的解析解是一个 2 次方程。通过代数法得到的相似平台 3UPU 并联机构奇异位置，与用矢量法对一般 3UPU 并联机构所作的分析一致。相似平台 3UPU 并联机构工作空间为三个开式运动链工作空间的交集，近似为一圆锥体。利用 VC++ 和 OPENGL 实现了工作空间和工件加工的动态仿真。

数控系统在硬件上采用主从式结构，以工控机作为上位机，以运动控制器 LM628 作为下位机。在软件上采用模块化设计，包括总控模块、人机界面管理模块、预处理模块、指令解释执行模块等

关键词：并联机床、3UPU 机构、位置分析、工作空间、奇异性、 仿真软件、
数控系统

Abstract

Forward kinematics、workspace and singularity are three of the biggest problem in parallel kinematic manipulator. These problem can be solved well in the dissertation on 3UPU, which is the basis of study and application.

At the aspect of kinematics, forward and inverse displacement of similar platform 3UPU is studied using vector method and the result is a quadratic equation. The singular position of similar platform 3UPU reached by algebraical method is identical to the position of general 3UPU analysed by vector method. The workspace of similar platform 3UPU is the workspace intersection of three open chains, which is a cone approximately. The emulation software basing on VC++ and Open GL can simulate workspace and producing workpiece.

At the aspect of CNC hardware, principal and subordinate structure is adopted, in which IPC works as principal computer and motional controller acts as subordinate computer. CNC software is designed using modularized structure, including general module、man-machine interface module、pretreatment module、explaining and executing command module and so on.

Key words: parallel manipulator、3UPU、displacement analysis、workspace、singularity、emulational software、CNC system

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 发展并联机床的意义.....	2
1.2 并联机构的应用.....	2
1.3 国内外并联机床研究现状和发展趋势.....	3
1.4 本文的研究内容及其安排.....	6
第二章 3UPU 并联机构.....	8
2.1 概述.....	8
2.2 3UPU 并联机构与 3RRPRR 并联机构.....	9
第三章 3UPU 并联机构位置分析.....	13
3.1 概述.....	13
3.2 机构位置分析.....	14
3.2.1 矢量方程建立.....	14
3.2.2 机构位置逆解.....	15
3.2.3 机构位置正解.....	16
3.2.4 机构位置正、逆解算例.....	16
3.3 小结.....	17
第四章 雅可比分析和奇异性分析.....	18
4.1 雅可比分析.....	18
4.1.1 雅可比概述.....	18
4.1.2 雅可比计算.....	18
4.2 奇异性分析.....	19
4.2.1 奇异性概述.....	19
4.2.2 奇异性计算.....	20
第五章 工作空间分析.....	23
5.1 概述.....	23
5.2 不考虑虎克铰角度限制时 3UPU 机构工作空间.....	24
5.3 考虑虎克铰角度限制时 3UPU 机构工作空间.....	27
5.4 结构参数选择.....	29
第六章 仿真软件概述.....	31
6.1 概述.....	31
6.2 仿真软件开发工具.....	31
6.2.1 Visual C++.....	31
6.2.2 OpenGL.....	32
6.2.3 Visual C++6.0 环境下 OpenGL 具体实现.....	32
6.3 仿真软件的总体规划和功能说明.....	34
6.3.1 用户控制模块.....	34
6.3.2 基本参数设置模块.....	35
6.3.3 工作空间仿真模块.....	36

6.3.4 工件加工仿真模块.....	36
6.4 仿真软件的类体系.....	37
6.5 软件功能的进一步扩展.....	38
第七章 基于 PC 的 3UPU 并联机床数控系统.....	39
7.1 概述.....	39
7.2 控制原理.....	40
7.3 硬件结构.....	40
7.3.1 硬件结构.....	41
7.3.2 伺服控制.....	41
7.3.3 上、下位机间通讯.....	42
7.4 软件结构.....	43
7.4.1 软件结构.....	43
7.4.2 数控系统多任务调度.....	44
第八章 总结与展望.....	46
8.1 论文工作总结.....	46
8.2 展望.....	48
致 谢.....	49
参考文献.....	50

第一章 绪论

随着科学技术的迅速发展,机械制造业正经历着前所未有的变化:加工精度从微米级向纳米级发展;经营策略从大规模生产到敏捷制造;竞争范围从国内市场扩展到全球市场。无论是对制造模式的宏观研究,还是具体到工艺技术的微观研究,都在不断地推陈出新。正是在这种大背景下,被称之为“21世纪新一代数控加工设备”的并联机床问世了,它的出现不仅引起了世界各国的广泛关注,而且被誉为“机床结构的重大革命”,值得制造业给予高度的重视^[1]。

1.1 发展并联机床的意义^{[2][3][4]}

已发展数百年的传统机床机构可以称之为串联式机构,它们的基本结构几乎没有什么变化,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“C”型布局。传统机床发展至今,即使是配备了最新型数控系统的机床,它的基本结构几乎没有什么变化。按照这种模式制造的机床,容易计算和控制。机床的轴线与笛卡尔坐标轴对应,无须进行坐标变换;同时工作空间相当于一个以各个轴的行程为边长的长方体;由于各个轴是独立的,每个轴的理论位置可以单独地通过各自的轴向调节器调节。但仍存在以下难以解决的问题:

- 1)主体结构为串联开链结构,存在悬臂部件,形成“C”型布局,承受很大的弯矩和扭矩,不容易获得高的结构刚度,需大幅度增加构件尺寸,不但耗材多,而且使机床过于笨重。
- 2)组成环节多(特别是多坐标机床中),各环节变形量和各连接处变形量相叠加,使机床不容易获得高的总体刚度,限制了加工精度和速度的提高。
- 3)串联结构会使各组成环节的制造误差、转动误差、热变形误差、受力变形误差等相叠加,为获得高的加工精度,需付出很大的代价。
- 4)运动环节(工件、夹具、转台、工作台等)的总质量大,再加上承重导轨中摩擦阻力大,转动链刚度不足,难以使机床获得高的进给速度和加速度,不能适应数控加工向高速高效的方向发展。
- 5)结构复杂、零件数量多、加工量大、制造难度大、生产周期长、生产成本高。

并联机床的出现,正是为解决传统数控机床存在的问题而进行的一种新的尝试。该机床不论在形式上还是在本质上与传统机床都完全不同。它由固定和活动两个平台以及连接两个平台的可变长度多支路构成,适用于磨、镗、铣和多项特加工,具有很大的开发潜力和广泛的应用前景。并联机床实质上是机器人

技术与机床结构技术结合的产物，其原型是并联机器人操作机。具有如下优点：

- 1) 刚度重量比大：因采用并联闭环静定或非静定杆系结构，且在准静态情况下，传动构件理论上为仅受拉压载荷的二力杆，故传动机构的单位重量具有很高的承载能力。
- 2) 响应速度快：运动部件惯性的大幅度降低有效地改善了伺服控制器的动态品质，允许动平台获得很高的进给速度和加速度，因而特别适于各种高速数控作业。
- 3) 环境适应性强：便于可重组和模块化设计，且可构成形式多样的布局和自由度组合。在动平台上安装刀具可进行多坐标铣、钻、磨、抛光，以及异型刀具刃磨等加工。装备机械手腕、高能束源或 CCD 摄像机等末端执行器，还可完成精密装配、特种加工与测量等作业。
- 4) 技术附加值高：并联机床具有“硬件”简单，“软件”复杂的特点，是一种技术附加值很高的机电一体化产品，因此可望获得高额的经济回报。

另外，还存在惯性小、传动链短、精度高、成本低以及逆向运动学简单等优点，但是通常存在以下缺点：

- 1) 工作空间很有限，限制其应用范围。它没有传统机床那么大的活动空间，而且在活动上远远不如串联机构来得灵活。
- 2) 平台运动过程中位置和姿态是彼此耦合的，给运动控制带来困难。
- 3) 正向运动学求解非常复杂，甚至无法求解。

串联机构和并联机构在性能特点上存在对偶关系，两者之间在应用上不是替代关系而是互补关系。传统串联机床(机器人)已经有很长的发展历程和无数的应用，任何有关并联机床全面替代传统机床的想法都是不现实的。

1.2 并联机构的应用^{[5][6]}

并联机构由于其独特的结构，在许多方面能得到广泛应用：

- 1) 用于飞行模拟器。上平台作为机舱，用 6 个液压缸支撑和驱动，可以使机舱获得任意需要的位置和姿态，模拟飞机飞行状态，用于训练飞行员。
- 2) 应用于飞船对接器。太空中的宇宙飞船工作过程中需要补充物品、交流人员等，飞船对接器的下平台安装在输送物品的飞船上，上平台作为对接环，由 6 个直线式驱动器驱动，上下平台中间都有通孔，以便作为结合后的通道，对接器还有吸收能量和减振的作用，并可完成对接拉紧、柔性结合、锁紧等工作。潜艇救援中也应用类似的对接器。
- 3) 应用于车轮装配机器人。将下平台横向安装于能绕垂直轴线回转的转台上，

- 上平台上装有机械手,机械手从侧面抓住从传送链送来的车轮,绕转台回转 180 度,将车轮装配到车体上,再将所有联接螺栓一次拧紧,完成自动装配车轮全过程。
- 4) 应用于设计并联机床。一般采用悬挂式结构,上平台悬挂固定,下平台安装机床主轴单独驱动,6 个支撑杆协调运动,可以实现机床“6 轴联动”,能够加工复杂的三维空间曲面。这种机床被称为 21 世纪的机床,实现了机床革命性改型。清华大学和天津大学合作研制出我国第一台 6 自由度虚拟轴机床,填补了国内空白。
 - 5) 它的微型机构应用于机器人腕部误差补偿器。将它安装于机器人手腕处用于补偿机器人手臂所发生的误差,以提高机器人的精度,由于此机构具有 6 个自由度,可以补偿在三维空间内任意方向的位置误差和姿态误差。
 - 6) 应用于设计 6 维测力仪。下平台固定,6 个支撑杆用六个能测拉压力的传感器代替,当上平台承受任意力螺旋(3 个力和 3 个力矩)时,根据并联机构静力学关系,6 个支撑杆只承受拉压力,所以很方便地测量六维力。六维测力仪广泛地用于测量切削力和跑跳运动员的起动力。
 - 7) 应用于设计接骨正位自动装置。在 X 光扫描协助控制下,实现断骨自动复位、定位。

1.3 国内外并联机床研究现状和发展趋势^{[7][8][9]}

1. 并联机床应用研究

并联机床(Parallel Machine Tool), 又称虚拟轴机床(Virtual Axis Machine Tool)或并联运动学机器(Parallel Kinematics Machine)。并联机构平台是由德国人 Stewart 于 1965 年首先提出的,当时主要用于模拟飞机飞行的试验平台装置,机舱由 6 个液压缸支撑和驱动,可以使机舱获得任何需要的位置和姿态。1978 年,澳大利亚著名机构学教授 Hunt 提出,可以应用 6 自由度的并联机构作为机器人机构,这种机器人一般称为并联机器人。到 80 年代中期时,国际上研究并联机床的人还是寥寥无几,相应的成果也不多。

80 年代末期到 90 年代初期,计算机工业及其大规模推广应用进入了划时代的黄金时期,以高性能计算机为基础的各种自动化机器得到了前所未有的飞速发展和普及,人类进入了信息时代。这时,人类的想象力再一次关注到了以并联机构为基础的并联机器人和并联机床的研究和开发上来。人们尤其对以并联机构为基础的新型数控机床寄予了各种期望,一度沉寂的并联机床的研究因此焕发了勃勃生机,有关研究成果大量涌现。

目前,国际学术界和工程界对研究与开发并联机床非常重视,并于 90 年代中期相继推出结构形式各异的产品化样机。1994 年在芝加哥国际机床博览会上,美国 Ingersoll 铣床公司、Giddings & Lewis 公司和 Hexal 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,引起轰动。此后,英国 Geodetic 公司,俄罗斯 Lapik 公司,挪威 Multicraft 公司,日本丰田、日立、三菱等公司,瑞士 ETZH 和 IFW 研究所,瑞典 Neos Robotics 公司,丹麦 Braunschweig 公司,德国亚琛工业大学等单位也研制出不同结构形式的数控铣床、激光加工和水射流机床、坐标测量机和加工中心。与之相呼应,由美国 Sandia 国家实验室和国家标准局倡议,已于 1996 年专门成立了 Hexapod 用户协会,并在国际互联网上设立站点。近年来,与并联机床和并联机器人操作机有关的学术会议层出不穷,例如第 47~49 届 CIRP 年会、1998~1999 年 CIRA 大会、ASME 第 25 届机构学双年会、第 10 届 TMM 世界大会均有大量文章涉及这一领域。由美国国家科学基金会动议,1998 年在意大利米兰召开了第一届国际并联运动学机器专题研讨会,第二届研讨会于 2000 年在美国密执安大学举行。1994~1999 年期间,在历次大型国际机床博览会上均有这类新型机床参展,并认为可望成为 21 世纪高速轻型数控加工的主力装备。

我国已将并联机床的研究与开发列入国家“九五”攻关计划和 863 高技术发展计划,相关基础理论研究连续得到国家自然科学基金和国家攀登计划的资助。部分高校还将并联机床的研发纳入教育部 211 工程重点建设项目,并得到地方政府部门的支持且吸引了机床骨干企业的参与。燕山大学于 1990 年研制出我国第一台并联机器人实验样机,并在此基础上作了许多研究;中科院机器人学开放研究实验室 1995 年开发出了样机,如今已开始机床的切削实验研究;清华大学和天津大学 1997 年 12 月联合开发了原型样机,并在机构设计、数控编程以及机构学基础理论方面取得了一系列的成果。哈尔滨工业大学研制的“BJ-1 型并联机床”于 1999 年 8 月通过省级鉴定。2001 年 6 月由清华大学与昆明机床股份有限公司共同研制的“XNZ63”并联机床,其综合指标达到了国际先进水平。它是在清华大学 1997 年研制的大型并联镗铣床的基础上,进行了一系列的重新设计优化、关键零件的工艺攻关及其它关键技术的研究,成功研制出商品化并联机床样机。这一新型样机具有模块化程度高、速度快、精度高和造价低的优点。它不仅能高速进行轻金属的复杂曲面加工,还可以进行黑色金属的曲面加工,特别适用于复杂的叶轮、模具、雕刻等空间曲面的加工,一次性装夹可完成铣削、镗孔、钻孔、磨削等多道工序的加工。

2. 并联机床理论研究

并联机床的理论研究涉及到许多现代控制、现代测量、建模仿真等高新技术。因此,有大量理论研究工作需要进一步深入进行。目前,主要的研究工作有以下几个方面:

- 1)设计理论研究。由于并联机床原型具有作业空间小,操作的各向同性差和奇异点多的不足,目前对并联机床设计理论的研究主要是围绕着扩大作业空间、改善灵活性、回避奇异点的运动特性和运动规律作研究,这涉及到结构学、运动学、动力学、机构学、数学等研究领域。
 - 2)控制技术研究。针对并联机床机械结构简单而控制系统复杂的显著特点,目前对控制方法、控制精度、数控编程等方面分别进行了研究,其关键技术是通过
对并联机床实轴(各个驱动杆)的控制,实现虚拟轴(传统概念的 x 轴、 y 轴和 z 轴)的联动控制,从而得到所要求的刀具运动轨迹。
 - 3)误差分析研究。并联机床虽然比串联结构机床大大减少了传动误差的积累,但
仍然存在着许多其它影响加工精度的因素,如机床的制造和安装误差,驱动杆
上下球铰的间隙,驱动杆杆长偏差对动平台位置精度的影响等等。国内外一些
学者对此进行了专门的研究并建立了相应的精度分析模型
- ### 3. 并联机床的发展趋势

并联机床之所以受到社会广泛关注并吸引了众多学者从各个角度进行研究,一个重要的原因就是并联机床以其独特的结构和先进的控制技术成为机床发展史上一个具有重要意义的突破。当制造业面临全球市场竞争,必须以快速响应求生存、求发展的时候,并联机床的一些优点具有明显的市场潜力和良好的发展前景,其未来发展趋势突出表现在以下几个方面:

- 1) 商业化步伐加快。在国际上,并联机床的发展是以企业为主进行的,盈利为目的必将加快并联机床商业化的步伐。在国内,虽然并联机床早期的研究和开发主要集中在高等院校和科研院所,近来不少企业纷纷介入,必将有力推动国产并联机床商业化的进程。
- 2) 向高速高效的方向发展。由于并联机床的主轴部件一般为电主轴单元,重量轻、体积小,再加上驱动主轴运动的并联进给机构所具有的高刚度,将非常有利于使刀具运动获得高速和高加速度;另一方面,并联机床加工时,笨重的工件、夹具、工作台等都固定不动,而仅是主轴(刀具)相对于工件作高速多自由度运动,因此发挥好这一重要优势将使并联机床比传统机床更适合高速加工,从而有力推动新一代并联高速和超高速机床的发展。
- 3) 向复合结构方向发展。高刚度并联结构加高灵活性旋转结构的有机组合所构成的复合结构多坐标并联机床,可有效的克服纯并联机床旋转坐标运动范围

小、工作空间小等不足,使并联机床与常规无坐标机床有相同的加工能力。因此,复合结构必将成为并联机床的重要发展方向。

- 4) 向集成化发展。例如,将并联机床加工中心与立车集成构成的万能加工中心,可实现一次装夹完成全部加工工序,从而大幅度提高加工效率。
- 5) 向重型装备发展。利用多套并联机构驱动多个主轴头同时运动,在多通道数控系统的控制下,实现对大型和重型工件的并行加工,可构成高效、高柔性的新型重型机床。
- 6) 向系统化方向发展。将并联机床进行组合构成并联制造系统,也将成为并联机床的一个新的发展方向。

1.4 本文的研究内容及其安排

本文提出了一种具有相似平台的空间三自由度平动并联机床(文中称“3UPU 并联机床”);对其运动学进行了分析,内容包括位置正解、位置反解、雅可比分析计算、工作空间分析计算、奇异性分析;在此基础上用 VC++ 和 OPEN GL 对 3UPU 机床工作空间和加工过程进行了仿真;最后对该机床的数控系统做了总体设计。本文在内容上安排如下:

第一章“绪论”,介绍了发展并联机床的意义以及国内外并联机床的应用现状、研究现状、发展趋势。

第二章“3UPU 并联机构”,阐述了 3RRPRR 并联机构和 3UPU 并联机构,3UPU 并联机构实际上是 3RRPRR 并联机构的一个特例.通过对 3RRPRR 并联机构的一般性分析,能更清楚的了解 3UPU 并联机构。

第三章“3UPU 并联机构位置分析”,首先建立坐标系并定义机床结构参数,通过矢量方程,导出了位置正解、反解的解析解。这是研究 3UPU 并联机床运动学的首要环节。

第四章“雅可比分析和奇异性分析”,利用运动学方程,通过微分法推导出相似平台 3UPU 并联机构的雅可比。用代数法求出了相似平台 3UPU 并联机构的奇异位置。另外,通过向量法对一般的 3UPU 并联机构作了分析,并且结论一致。

第五章“工作空间分析”,工作空间分析将并联机构拆解成三个开式运动链,每个与动链末端工作空间实际上是球体的一部分.三部分空间相交即为并联机床的工作空间,并得到了近似的解析解。

第六章 “仿真软件概述”，首先，介绍了使用 VC++，OPENGL 工具，并对 3UPU 并联机床的工作空间和工件加工作了动态仿真。

第七章 “基于 PC 的 3UPU 并联机床数控系统”，对 3UPU 并联机床数控系统进行总体设计。在硬件上采用主从式结构，即：工业控制计算机(IPC)作为上位机，以运动控制器 LM628 作为下位机。在软件上，采用模块化设计，包括总控模块、人机界面管理模块、预处理模块、指令解释执行模块、轴控制模块、辅助控制模块、控制面板管理模块。

第八章 “总结与展望”对本文的工作进行总结，对以后所需要的研究作了简单的交代。就并联机床走向实用化作一展望。

第二章 3UPU 并联机构

2.1 概述^{[10][11][41]}

三自由度并联机构是一种较新型的空间运动机构，它是六自由度 Stewart 机构衍生而来的。它具有结构简洁、刚度好、无误差积累等优点。近年来，国内外对于 3 自由度并联机床给予很大关注。第 12 届欧洲国际机床展览会(EMO97)上，德国斯图加特大学机床与制造设备控制技术研究展出了 LANAPOD 三条腿机床；汉诺威大学生产工程和机床研究所展出的用于汽车工业钢板激光加工的三条腿操作机；意大利 COMAU 机床公司和瑞典 NEOS 机器人公司分别展出了类似的三条腿机器人。在国内，东北大学以钢坯修磨为目的研制了一台新型机器人化三腿机床；天津大学与天津第一机床厂合作，开展了可实现三平动自由度新型多功能并联机床的设计理论、关键技术及样机建造工作。可见，研究 3 自由度并联机构具有很强的现实意义，是并联机床的发展方向之一。因为：

- 1) 绝大多数现实加工应用并不需要全部六个自由度的联动就能完成。事实上，传统串联机床通常只有三个自由度，最多只有五个自由度；因此 3-DOF 并联机床具有广泛的应用领域。
- 2) 并联机床的综合制造成本是与其自由度数量成正比的，低自由度意味着低成本和简化的控制装置，便于机床的早日推广应用。
- 3) 6 自由度并联机床有诸多缺点：动平台位置和姿态彼此耦合，给运动控制带来困难；正向运动学求解非常复杂；工作空间很有限且难于求解；相比之下，这些缺点在 3 自由度并联机床上体现得轻，特别是位置和速度正逆解均存在解析解，故为数控编程和误差补偿提供了极大的方便，便于并联机床的实用化。
- 4) 目前，并联机床一个重要发展趋势是采用并联和串联的混联机构，分别实现平动和转动。因为动平台实现姿态能力差是各种纯并联六自由度机床机构难以逾越的固有缺陷。例如，Stewart 平台型并联机床动平台实现姿态的能力一般不超过 30 度，因而难于满足一大类多坐标数控作业的要求。为了克服这一缺陷，采用混联机构，用可实现平动的三自由度并联机构作为主进给机构，辅以串联机构来实现转动自由度，进而完成需要大转角的多坐标数控加工作业。这种配置不但使平动和转动控制解耦，而且工作空间大，实现姿态能力强和可重组性强等优点。在混联机构中，并联机构部分用于实现工具头的 3 自由度平动；所以从这个角度看，研究 3 自由度并联机构也很有必要。

2.2 3UPU 并联机构与 3RRPRR 并联机构^{[12][42]}

本文所研究的 3UPU 并联机构如图 2.1 所示,U 表示虎克铰(universal pair),P 表示移动副(prismatic pair)。整个机构由动平台、静平台和三条腿组成,利用三条腿来连接动平台和静平台,每条腿包括两个虎克铰和一个可伸缩的连杆(由两个连杆和一个移动幅组成),虎克铰分别固定在动、静平台上,通过驱动连杆上的移动副使连杆伸缩,从而带动动平台作空间三自由度平动。

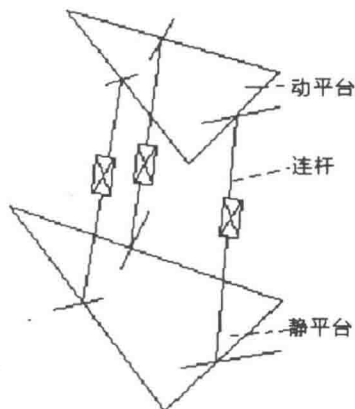


图 2.1: 3UPU 并联机构

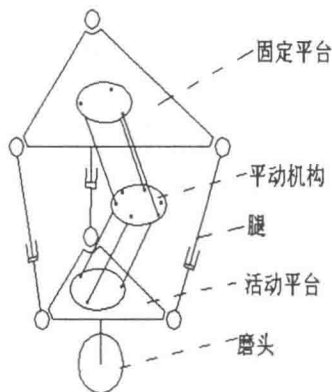


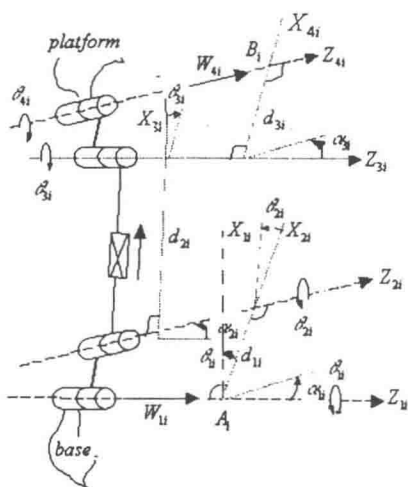
图 2.2 机器人化三腿磨削机床

图 2.2 是一台以钢坯修磨为目的的新型机器人化三腿机床机床固定平台与活动平台皆为正三角形;两平台间三条腿通过虎克铰与两平台连接,中间有一平动机构使平台保持平动,通过控制系统使三条腿伸缩,从而能使活动平台带动磨头在空间实现三自由度平动及期望的轨迹运动,以满足修磨的工艺要求^[11]。

以上两种机构相比较,3UPU 并联机构结构简单,易于控制。而机器人化三腿机床因为附加的平动机构,增加平动机构的相对尺寸,这样大大增加了平动机构与三条腿之间干涉的可能,进而导致机床工作空间的缩小,控制难度加大,制造成本也会提高。

如图 2.3 所示的 3RRPRR 并联机构,它也是由动平台、静平台和三条腿组成,R 表示转动副(Revolute pair),P 表示移动副(prismatic pair),连杆通过转动副来连接动、静平台,驱动连杆上的移动副,带动动平台运动。

如图 2.4 所示:3RRPRR 机构的每条腿是一个具有五自由度的串联机构(由四个连杆、四个转动副、一个移动副组成)。当 3RRPRR 机构满足一定条件就成为 3UPU 机构,也就是说,3UPU 并联机构是 3RRPRR 并联机构的一个特例。具体条件见以下的证明:

图 2.4 3RRPRR 并联机构第 i 腿示意图

W_{d_i} ($i=1,2,3$)为常量,不随动平台运动而变化。由图 2.4 可知:

$${}^bW_{4i} = R_{1i}G_{1i}R_{2i}G_{2i}R_{3i}G_{3i}{}^pW_{4i} \quad (2-1)$$

其中：

$$R_{ji} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{ji} & -\sin \theta_{ji} & 0 \\ \sin \theta_{ji} & \cos \theta_{ji} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad j=1,2,3 \quad (2-2)$$

$$G_{ji} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{ji} & -\sin \alpha_{ji} \\ 0 & \sin \alpha_{ji} & \cos \alpha_{ji} \end{bmatrix} \quad j=1,2,3 \quad (2-3)$$

θ_{ji} 是轴 $X_{(j-1)i}$ 与轴 X_{ji} 间的夹角, α_{ji} 是轴 Z_{ji} 与轴 $Z_{(j+1)i}$ 间的夹角。 $H_{ji} = R_{ji}G_{ji}$ 是坐标系 S_{ji} 到坐标系 $S_{(j-1)i}$ 的 3×3 坐标转换矩阵, ${}^bW_{4i}$ 是向量 W_{4i} 在坐标系 S_{li} 中的

值, ${}^pW_{4i}$ 是向量 W_{4i} 在坐标系 S_{4i} 中的值。若满足以下条件:

$$\alpha_{2i} = 0 \quad (2-4)$$

$$\alpha_{1i} = -\alpha_{3i} \quad (2-5)$$

$$\theta_{2i} = -\theta_{3i} \quad (2-6)$$

故可得:

$$G_{2i} = I \quad (2-7)$$

$$G_{1i}G_{3i} = I \quad (2-8)$$

$$R_{2i}R_{3i} = I \quad (2-9)$$

由(2-1)、(2-7)、(2-8)、(2-9)可推出:

$${}^bW_{4i} = R_{1i} {}^pW_{4i} \quad (2-10)$$

由图 2.4 可知: ${}^pW_{4i} = [0 \ 0 \ 1]^T$, 这样由(2-2)、(2-10)得:

$${}^bW_{4i} = [0 \ 0 \ 1]^T = {}^pW_{4i} \quad (2-11)$$

单位向量 W_{1i} 在坐标系 S_{1i} 中的值 ${}^bW_{1i} = [0 \ 0 \ 1]^T$, 故由(2-11)可知:

$$W_{4i} = W_{1i} \quad (2-12)$$

由于轴 Z_{1i} 固定在静平台上, 单位向量 W_{1i} 沿着轴 Z_{1i} , 所以 W_{1i} 是常量。由(2-12)知: 单位向量 W_{4i} 也是一个常量, 始终与固定在静平台上的轴 Z_{1i} 平行。这样, 由单位向量 W_{41} 、 W_{42} 、 W_{43} 确定的动平台与由单位向量 W_{11} 、 W_{12} 、 W_{13} 确定的静平台始终平行, 即动平台只作平动。

由空间运动学理论可知, 空间运动机构的自由度数可按下式计算:

$$F = 6(N-1) - \sum_{i=1}^5 i P_i \quad (2-13)$$

式中: N 为运动机构的构件数, P_i 为 i 级幅的构件数。

3UPU 机构共有 8 个构件(包括动、静平台、每条腿上 2 根连杆)、3 个移动副、6 个虎克铰, 即: $N=8, P_5=3, P_4=6, P_3=P_2=P_1=0$, 3UPU 机构自由度数 F 为: