



BOSHI WENKU

〔机械工程学〕

五轴联动并联机床 关键技术

WUZHOU LIANDONG BINGLIAN JICHUANG
GUANJIAN JISHU

赵辉 著

知识产权出版社



BOSHI WENKU
(机械工程学)

五轴联动并联机床 关键技术

WUZHOU LIANDONG BINGLIAN JICHUANG
GUANJIAN JISHU

赵辉 著

知识产权出版社

内容提要

本书全面介绍了五轴并联机床各方面的研究成果和最新进展,内容涉及并联机床构型与设计、并联机床的分析、并联机床的控制,具体包括并联机床机构设计、并联机床机械设计、运动学分析、静力学分析、误差分析、承载力分析、静刚度分析、误差分析以及数控系统设计与实现等。在机构设计方面,提出了一种基于支链的特殊螺旋的机构综合方法;在运动学分析方面,结合并联机床的运动特点,提出了 b 转动速度和平动速度之间的转换以及进行并联机床速度处理的新方法,使用粒子群算法解决了并联机床的运动学正确问题;在静力学方面,解决了在两个欧拉角表示转动时机床的静力分析问题;在静刚度分析方面,提出了基于并联机床运动学方程的静刚度计算算法;在承载力分析方面,提出了新的承载力性能指标。另外,本书介绍了一种基于运动控制卡的五轴并联机床的数控系统及其具体实现,具有重要的参考价值。

责任编辑:宋云

图书在版编目(CIP)数据

五轴联动并联机床关键技术/赵辉著.

—北京:知识产权出版社,2008.3

ISBN 978-7-80247-109-2

I. 五… II. 赵… III. 数控机床—研究 IV. TG659

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第031218号

五轴联动并联机床关键技术

赵辉 著

出版发行:知识产权出版社

社址:北京市海淀区马甸南村1号

网址: <http://www.cnipr.com>

发行电话:010-82000893 82000860 转 8101

责编电话:010-82000860 转 8324

印刷:知识产权出版社电子印制中心

开本:880mm×1230mm 1/16

版次:2008年4月第1版

字数:186千字

邮 编:100088

邮 箱:bjb@cnipr.com

传 真:010-82000860 转 8325

责编邮箱:songyun@cnipr.com

经 销:新华书店及相关销售网点

印 张:7

印 次:2008年4月第1次印刷

定 价:22.00元

ISBN 978-7-80247-109-2/T·266

版权所有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。



前 言

从提出并联机床的概念到现在已有二十多年时间，也出现了不少样机和产品。并联机床以其性能优势和巨大的市场潜力引起了业界的广泛关注，甚至其他行业如汽车制造、航空航天等也都纷纷加入到并联机床的研制中来。我国的一些科研院所以及生产厂家在并联机床方向上也开展了很多研究。并联机床在我国距离产业化还有不少道路要走。如果能够把握契机，深入研究并联机床的基础理论和关键技术，如并联机床设计理论、并联机床数控系统等，一方面可以带动相关学科的发展，另一方面对推动我国机械制造业的发展也有十分重要的实际意义。

本书内容包括了并联机床所涉及的一些关键技术，如并联机床的构型、并联机床的运动学和刚度、并联机床数控系统等。从整体上来看，本书大致可以分为三部分：第一部分主要包括了第1、2章，第1章属于介绍性内容，第2章属于数学基础介绍；第二部分包括了3~7章，主要属于并联机床机械系统方面的内容；第三部分则包含了剩余章节，主要涉及并联机床数控系统的一些关键技术。

作者在此要感谢北京航空航天大学张启先院士和上海交通大学的高峰教授。他们是作者科研的领路人。另外，也要感谢知识产权出版社的宋云编辑，其严谨认真的工作作风促进了本书的早日出版。



全书共分10章，第5、6、7、8、10章由赵辉撰写，第1、2、3、4章由彭斌彬撰写，第9章及附录部分由张春风撰写。

本书对机械工程技术人员和机械工程以及其他相关专业大专院校师生和研究生均有较大的使用价值。

本书如能对读者从事并联机床研究工作提供帮助，是作者的最大愿望。由于水平有限，书中难免存在不足，恳请读者批评指正。

赵辉

2008年4月

为了突出本书的特色，在编写过程中，参考了大量的国内外文献资料，并得到了许多同行的帮助和支持。在此，向所有关心和帮助过本书的同志表示衷心的感谢。本书的出版，得到了机械工业出版社领导和编辑的关心和支持，在此表示衷心的感谢。本书的出版，得到了机械工业出版社领导和编辑的关心和支持，在此表示衷心的感谢。

本书共分10章，第1章介绍了并联机床的发展概况，第2章介绍了并联机床的组成，第3章介绍了并联机床的坐标系，第4章介绍了并联机床的数学模型，第5章介绍了并联机床的逆运动学，第6章介绍了并联机床的正运动学，第7章介绍了并联机床的 Jacobian 矩阵，第8章介绍了并联机床的刚度分析，第9章介绍了并联机床的精度分析，第10章介绍了并联机床的故障诊断。附录 A 给出了本书中使用的符号说明，附录 B 给出了本书中使用的单位制。

本书由赵辉担任主编，彭斌彬担任副主编，张春风担任责任编辑。本书在编写过程中，得到了机械工业出版社领导和编辑的关心和支持，在此表示衷心的感谢。

目 录

第 1 章 引 言	1
1.1 并联机床的起源	1
1.2 并联机床的研究背景	3
1.3 国内外研究现状	11
1.4 并联机床的发展展望	26
1.5 本书主要内容	26
第 2 章 数学基础	28
2.1 概述	28
2.2 坐标变换	28
2.3 螺旋理论	34
2.4 本章小结	39
第 3 章 并联机床的机构构型	40
3.1 概述	40
3.2 并联机构的基本组成分析	41
3.3 运动副类型	43
3.4 运动支链类型	46
3.5 描述支链末端运动的特殊坐标	49
3.6 并联机构构型原理和机构构型	50
3.7 并联机床的构型	57

3.8 本章小结	62
第4章 并联机床运动学	63
4.1 概述	63
4.2 五轴并联机床几何模型	63
4.3 五自由度并联机床运动学模型	65
4.4 并联机床运动学正反解	69
4.5 速度 Jacobian 矩阵和输入输出速度影射关系	75
4.6 角速度在不同坐标系中的表示	78
4.7 并联机床刀具平移量和转动角度之间的当量关系	80
4.8 不同工件坐标系下坐标变换关系	82
4.9 并联机床的工作空间	84
4.10 并联机床的奇异性	89
4.11 本章小结	93
第5章 并联机床静力学及静刚度分析	94
5.1 概述	94
5.2 并联机床特殊零部件的受力分析	95
5.3 五自由度并联机构力 Jacobian 矩阵和速度 Jacobian 矩阵的关系	98
5.4 五轴并联机床静力学分析	102
5.5 并联机床静刚度分析	104
5.6 本章小结	109
第6章 并联机床承载力	110
6.1 概述	110
6.2 并联机床的承载力指标	111

6.3 并联机床承载力分析	115
6.4 本章小结	116
第7章 并联机床几何误差分析	117
7.1 概述	117
7.2 误差建模	118
7.3 误差分析	123
7.4 本章小结	127
第8章 数控系统设计	128
8.1 概述	128
8.2 并联机床数控系统	129
8.3 运动控制与运动控制器	130
8.4 数控软件系统及其功能	132
8.5 软件工程方法及其在数控软件系统设计中的应用	136
8.6 模式及其在数控软件系统设计中的应用	138
8.7 软件流程	140
8.8 本章小结	142
第9章 数控硬件系统的实现	143
9.1 概述	143
9.2 系统构成	143
9.3 PMAC 控制器与双端口 RAM 介绍	150
9.4 一些需要注意的问题	157
9.5 本章小结	160



第 10 章 数控软件系统的实现	161
10.1 概述	161
10.2 代码解释与检查	162
10.3 运动控制	170
10.4 速度控制	172
10.5 并联机床参考点确定	178
10.6 PLC 及机床监控功能的实现	181
10.7 几个数控系统常见功能的实现	182
10.8 软件主要模块功能	185
10.9 本章小结	188
附录	189
A 同伦方法	189
B 粒子群算法	192
B.1 基本粒子群算法	192
B.2 粒子群算法的改进	193
B.3 粒子群算法举例——3RRR 并联机器人优化设计	194
C 区间分析	197
C.1 区间数、区间向量和区间矩阵	197
C.2 函数的区间扩展	200
C.3 非线性方程组的区间解法	201
C.4 举例	204
参考文献	206



第1章 引言

1.1 并联机床的起源

提到并联机床的起源，不得不追溯并联机器人的起源。美国人 James E. Gwinnett 在 1928 年提出了一项专利申请，虽然该申请涉及的是动感电影，但是却采用了并联机构，如图 1-1 所示。该专利具有很强的超前性，在当时，具有现代意义上的机器人都还没有出现。英国人 Gough 在 1947 年提出了一种测试轮胎的装置，如图 1-2 所示。该装置采用了并联机构。然而，由于种种原因，Gough 提出的并联装置被人们冠以 Stewart 的称号。

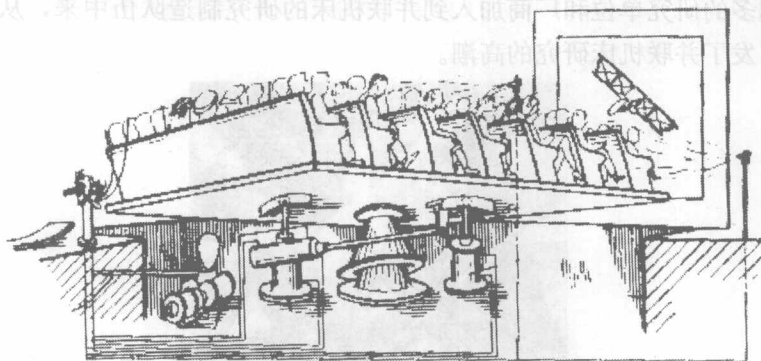


图 1-1 James E. Gwinnett 在 1928 年提出的一项专利

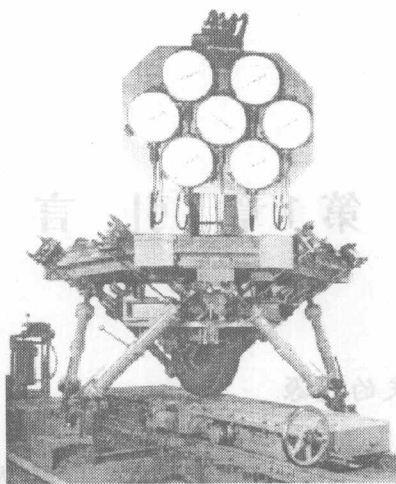


图 1-2 Gough 在 1947 年提出的轮胎测试装置

多年以后，采用并联结构的机床出现在 1994 年美国芝加哥国际机床博览会（IMTS' 94）上，如图 1-3 所示。该机床是美国的 Giddings & Lewis 公司历时 6 年方才研制成功，并在展会上引起了极大轰动。并联机床的出现，被称为是“机床行业的革命”。越来越多的研究单位和厂商加入到并联机床的研究制造队伍中来，从而引发了并联机床研究的高潮。



图 1-3 Giddings & Lewis 公司在 1994 年推出的并联机床“VARIAX”



1.2 并联机床的研究背景

机械制造业是现代工业的基础，与国民经济息息相关，在一个社会中，它的发展往往带来一个国家生产力水平的提高。因此，世界各国都非常重视机械制造业的发展。近年来，随着经济全球化的步伐不断加快，对制造业的要求也越来越高。为了实现生产的多样化，满足市场灵活多变的要求，各国都在积极探索和研制新型多功能制造装备与系统。

传统的数控机床如图 1-4 所示，各轴的运动相互独立，结构一般为开链式，且采用笛卡尔坐标或极坐标形式框架。采用这种串联结构形式来实现刀具运动具有很多优点：工作空间大、灵活度大、各轴可独立控制以及易于标定等。但是同时也带来一些问题，由于采用框架式结构且各轴运动相互独立，使得机床重量大，而且移动部件重量较大，从而又导致机床加工时加速度和速度难以获得质的提高，同时也使得机床的刚度变差。

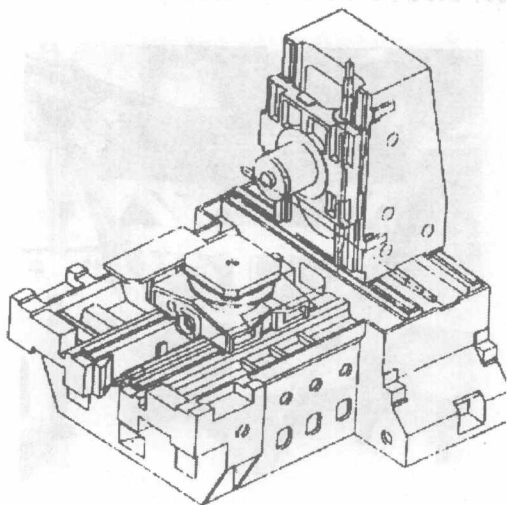


图 1-4 传统数控机床

1994年,美国的Gidding & Lewis公司在芝加哥国际机床博览会(IMTS' 94)上展示了名为VARIAX的数控机床和加工中心^[1],揭开了数控机床发展史上新的一页。这种基于并联机构的数控机床开始受到人们的关注并且很快成为制造业中的一个研究热点。

1995年,美国另一家著名机床生产厂家Ingersoll Milling Machine Rockford公司也推出了基于并联机构的加工中心:Octahedral Hexapod Machine (OHM),如图1-5所示。该机床除了能够实现多功能铣削加工之外,还可以作为综合测量机、轻型压床等使用。其他的如瑞典的Neos Robotics公司(图1-6)、瑞士的ETH公司(图1-7)、日本的Toyada公司、俄罗斯的Lapik公司、德国的Mikromat公司(图1-8)、德国的斯图加特制造技术中心(图1-9)以及法国的Renault-Automation公司(图1-10)等也纷纷开发了自己的并联机床^[2~5]。在并联机床发展的初期,主要为六自由度的并联机床,后来较多出现的是三自由度并联机床。之后,逐步具有其他自由度的并联机床出现,如图1-11和图1-12就是一种具有五自由度的并联机床。同时,混联机床也开始逐步出现,如图1-13所示。

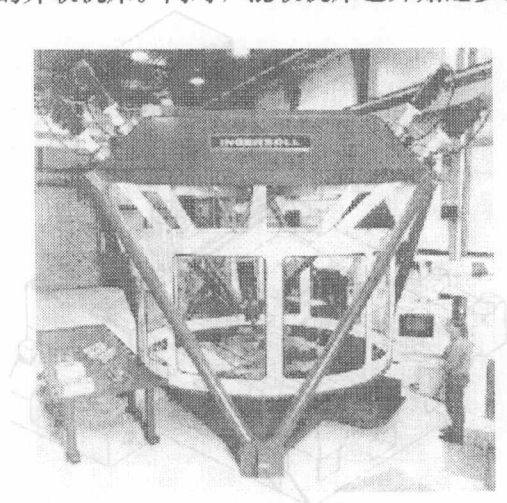


图 1-5 Ingersoll 公司的并联机床

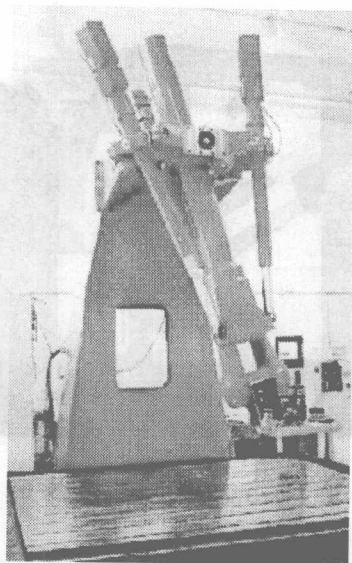


图 1-6 Neos Robotics 公司的并联机床 Tricept

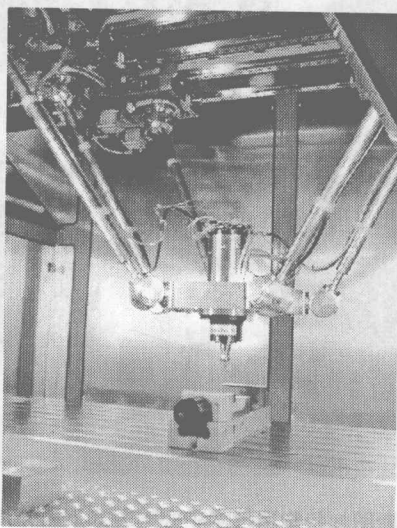


图 1-7 ETH 的并联机床 Hexaglide

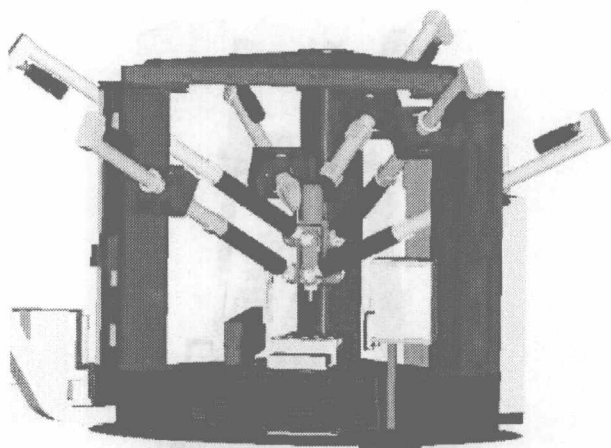


图 1-8 Mikromat 公司的并联机床 6X Hera

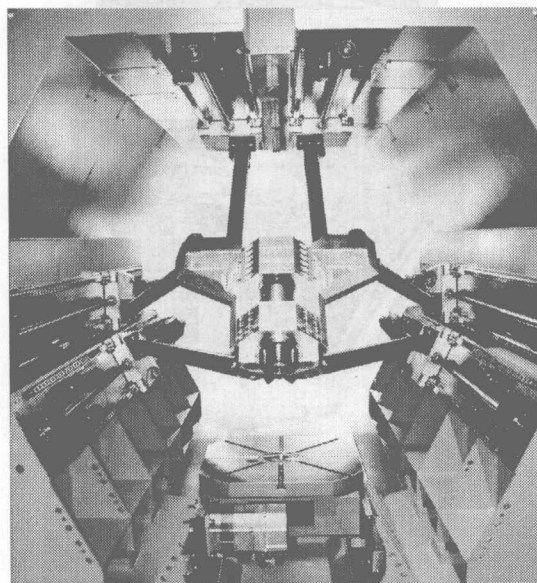


图 1-9 德国斯图加特制造技术中心的卧式五面体加工中心 Paralix

图 1-9 德国斯图加特制造技术中心的卧式五面体加工中心 Paralix

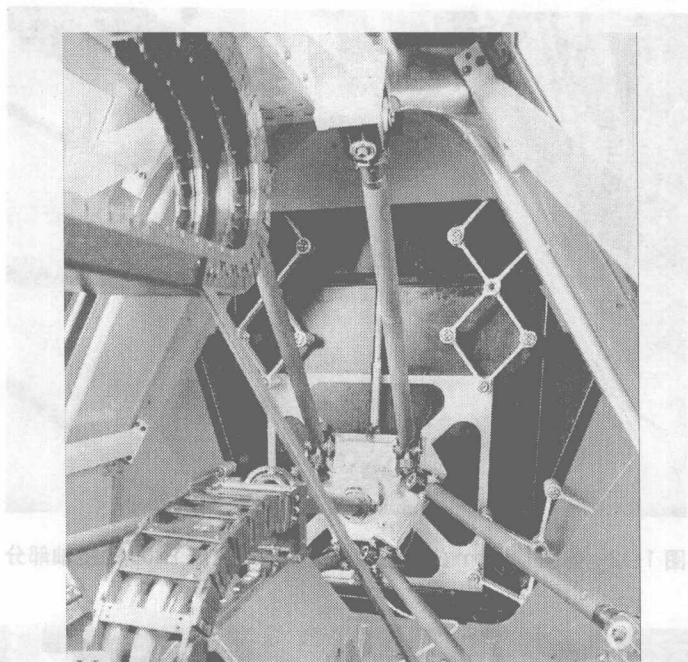


图 1-10 法国 Renault-Automation 公司的 urane SX 型卧式加工中心

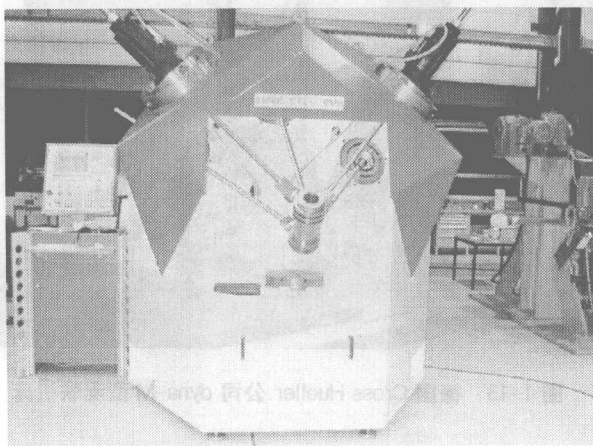


图 1-11 德国 Metrom 公司的五杆运动并联机床 P800

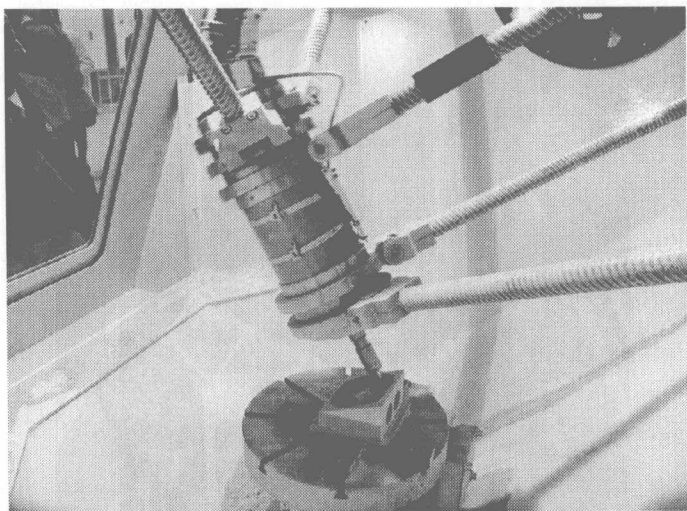


图 1-12 德国 Metrom 公司的五杆运动并联机床 P800 的主轴部分

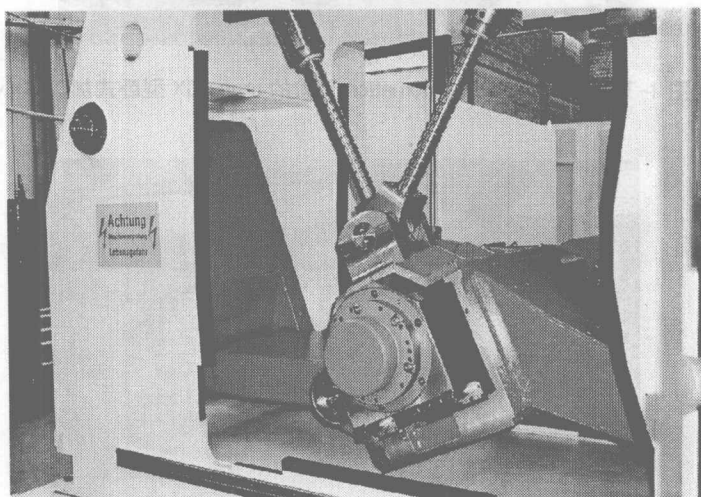


图 1-13 德国 Cross Hueller 公司 dyna-M 型混联机床

0089 机械工业出版社五轴机床关键技术 (1-1) 图