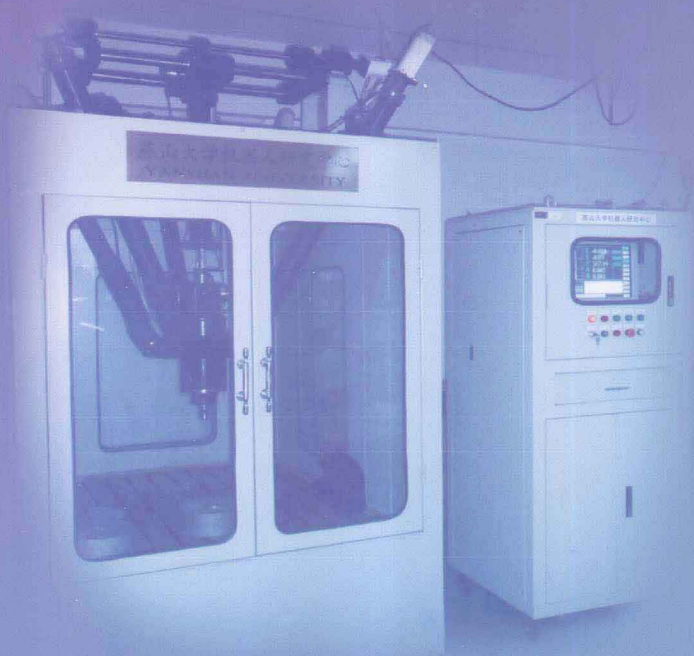


并联机床数控编程 理论与应用

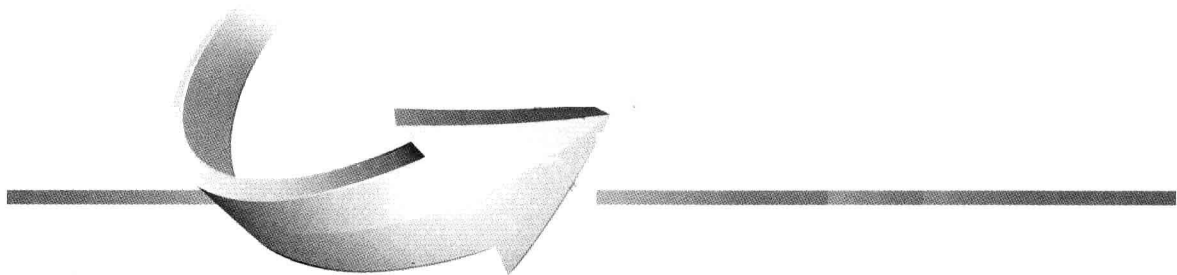
陈修龙 赵永生 齐秀丽 邓 昱 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

并联机床数控编程 理论与应用

陈修龙 赵永生 齐秀丽 邓 昱 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

并联机床是并联机构学、数控技术和计算机控制技术在数控机床领域的创造性应用,它相对于传统数控机床具有诸多优点,适合加工复杂曲面零件。本书主要介绍并联机床数控编程理论与应用,内容包括并联机床及其运动学分析、并联机床CAD/CAM集成系统结构设计、并联机床与刀具双摆动机床(A-B)运动一致性分析、并联机床后置处理器模块、并联机床工件坐标系定位算法、并联机床工作空间快速干涉检验、并联机床数控加工仿真模块。

本书可作为机械类、自动化类相关专业研究生的教材,也可供其他专业的师生和企业工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

并联机床数控编程理论与应用/陈修龙等著. —北京:中国电力出版社, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4395 - 5

I. ①并… II. ①陈… III. ①数控机床—程序设计 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 089935 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11.25 印张 144 千字

定价 23.00 元



敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

序

并联机床是近年发展起来的机床创新产品，是机床结构的革命性变革。与传统机床结构不同，它不是按照笛卡尔坐标将机床部件沿三个坐标轴的移动和这三个轴的转动依次串联叠加，而形成刀具和工件的相对运动轨迹，而是借助空间多杆机构的并联运动共同驱动带有主轴头的多自由度运动平台，实现刀具和工件的空间相对运动轨迹。与传统多轴数控机床相比，并联机床具有结构简单、传动链短、刚度高、动态性能好、主轴头运动速度快、可重构等特点。由于它能较方便地实现复杂的空间运动，尤其适合于复杂曲面零件的加工，在飞机大型结构件加工、汽轮机叶片加工和大型复杂模具加工等高端制造领域已经获得成功应用，具有广阔的发展前景。

并联机床的关键技术和进一步推广应用的难点在于：由于运动学原理与传统机床差别较大，且运动规律随机床结构不同而变、运动学解复杂、运动空间中刚度可变并存在奇异点等，给并联机床的数控加工程序编制带来一定的困难，阻碍了并联机床的推广应用。

本书分别对 5-UPS/PRPU 型并联机床及其运动学分析、CAD/CAM 集成系统结构设计、并联机床与刀具摆动机床（A-B）运动一致性分析、后置处理器模块、工件坐标系定位算法、工作空间快速干涉检验、数控加工仿真模块等数控加工关键技术问题，做了较系统的阐述。本书行文流畅，条理清晰，是国内迄今为止，从数控加工编程角度较全面介绍并联机床的不可多得的参考书。

本书对并联机床的理论分析比较深入、实用性较强，无疑会对推动和

促进并联机床在我国的发展和应用起到一定的推动作用。本书适合于机械制造类大专院校师生和从事数控加工的工程技术人员使用，对其他结构形式的并联机床的设计及其数控加工编程具有较好的参考价值，是一本颇有价值的学术性专著。

同济大学 7号 署

常州大学 沈勇平

2013年4月8日

前言

科学技术的不断发展对制造业提出了更高的要求。其中,含有复杂曲面零件的加工占有很大比例,对加工精度和效率的要求也很高,这些因素都对机床技术指标提出更高的要求。传统机床为串联机构,存在误差累积,因而不利于提高精度。传统的三、四坐标数控机床要实现复杂曲面的加工十分困难,而传统五坐标数控机床价格昂贵,很难大规模应用。并联机床具有传动链短、刚度重量比大、成本低、精度高、容易实现五轴联动等优点,非常适合于复杂曲面的数控加工。因此,并联机床的出现引起了国际学术界和工程界的极大关注,一些发达国家政府和研究机构纷纷投入大量人力物力研究和开发可加工复杂曲面的并联机床。目前,并联机床在国内外尚处于研究、试验阶段,还没有完全形成产业化,将其定位于一种产品,替代五坐标数控机床完成复杂曲面零件加工,推进其在工程实际中的应用是目前并联机床研究的重点。

并联机床的数控加工编程是实现并联机床数控加工的主要环节。由于并联机床与传统数控机床在结构和传动形式上差别很大,而商品化 CAD/CAM 集成编程系统都是针对传统数控机床开发的,若应用于并联机床,存在很大的局限性。因此,研究并联机床的数控加工编程关键技术,解决并联机床复杂曲面零件数控加工编程问题,适应并联机床的应用需求,具有非常重要的理论意义和应用价值。本书介绍了在并联机床数控编程理论与实际应用的成果,主要内容包括并联机床及其运动学分析、并联机床 CAD/CAM 集成系统结构设计、并联机床与刀具双摆动机床(A-B)运动一致性分析、并联机床后置处理器模块、并联机床工件坐标系定位算法、

并联机床工作空间快速干涉检验、并联机床数控加工仿真模块。

本书的主要科研成果是在燕山大学取得的，感谢燕山大学机械工程学院黄真教授、赵铁石教授、崔云起教授、胡占齐教授、郑魁静副教授的支持与帮助。

限于作者水平，书中难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

陈修龙

于山东科技大学

2013年4月16日

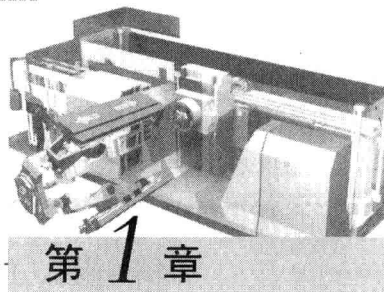
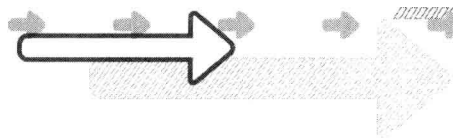
目 录

序 前言

第 1 章 概述	1
1.1 并联机床及其发展现状	1
1.2 并联机床的数控加工编程技术	27
第 2 章 并联机床及其运动学分析	30
2.1 5-UPS/PRPU 并联机床机构	31
2.2 5-UPS/PRPU 并联机床位置反解分析	33
2.3 5-UPS/PRPU 并联机床雅可比矩阵	41
2.4 5-UPS/PRPU 并联机床误差建模与补偿	45
2.5 5-UPS/PRPU 并联机床运动学分析新方法	57
第 3 章 并联机床 CAD/CAM 集成系统结构设计	74
3.1 5-UPS/PRPU 并联机床 CAD/CAM 集成系统的特点	74
3.2 5-UPS/PRPU 并联机床 CAD/CAM 集成系统开发平台 选用	75
3.3 5-UPS/PRPU 并联机床 CAD/CAM 集成系统软件的 组成	78
3.4 人机交互界面	80
3.5 系统软件的信息流程及关键算法	82

第4章 并联机床与刀具双摆动机床(A-B)运动	
一致性分析	87
4.1 5-UPS/PRPU 并联机床刀具姿态和动平台中心位置的 分析	87
4.2 刀具双摆动五坐标机床(A-B)刀具姿态和摆动中心位置 分析	91
4.3 NC 代码的生成	94
第5章 并联机床后置处理器模块	96
5.1 5-UPS/PRPU 并联机床的加工坐标系	97
5.2 5-UPS/PRPU 并联机床后置处理器及其功能	99
5.3 5-UPS/PRPU 并联机床后置处理器结构和后置处理 过程	100
5.4 5-UPS/PRPU 并联机床后置处理算法	102
5.5 仿真验证	111
第6章 并联机床工件坐标系定位算法	114
6.1 5-UPS/PRPU 并联机床工件坐标系的定位	114
6.2 5-UPS/PRPU 并联机床灵巧度的综合评价指标	115
6.3 5-UPS/PRPU 并联机床工件坐标系的定位算法	120
6.4 算法验证	127
第7章 并联机床工作空间快速干涉检验	129
7.1 5-UPS/PRPU 并联机床工作空间的几何约束条件	129
7.2 5-UPS/PRPU 并联机床工作空间快速干涉检验算法	130
7.3 算法验证	137

第 8 章 并联机床数控加工仿真模块	141
8.1 5-UPS/PRPU 并联机床虚拟样机参数化实体建模	142
8.2 5-UPS/PRPU 并联机床数控加工仿真系统结构	146
8.3 刀位轨迹的显示验证	149
8.4 数控加工仿真的实现	150
8.5 数控加工仿真模块中三维刀具和刀柄库的开发	152
8.6 数控加工仿真实例	160
8.7 数控加工实例	160
参考文献	163



概 述

1.1 并联机床及其发展现状

并联机床是并联机器人技术与数控机床技术相结合的产物，其原理是在并联机构的动平台上安装主轴头，动平台带动主轴头实现多轴联动。并联机床与传统数控机床将形成很强的互补，尤其在复杂曲面精密加工上具有十分广泛的应用前景，是目前国际上在并联机器人和先进制造领域的一个研究热点。与实现等同功能的传统五坐标机床相比，并联机床具有以下优点：

(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，因而特别适用于各种高速数控作业。

(3) 精度高。并联机床由并联机构组成，各杆的杆长都单独对主轴的位置和姿态起作用，因而它不存在传统机床中串联机构的误差累积问题，加工精度较高。

(4) 环境适应性强。并联机床便于可重组和模块化设计，且可构成形式多样的布局 and 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、CCD 摄像机等末端执行器，还可以完成精密装配、特种加工、测量等作业。

(5) 结构简单，维护维修方便。并联机床运动部件少，并且主要由通用元件（滚珠丝杠、球铰等）组成，加之布局敞开性好，因此维修量小且维修方便。

(6) 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。

1.1.1 并联机床在国际上的发展状况

1994 年，美国 Giddings & Lewis 公司在美国芝加哥国际制造技术展览会 IMTS' 94 上推出 VARIAX（变异型）并联机床（见图 1-1），引起了轰动，被誉为 21 世纪的新一代数控加工设备，标志着并联机构正式进

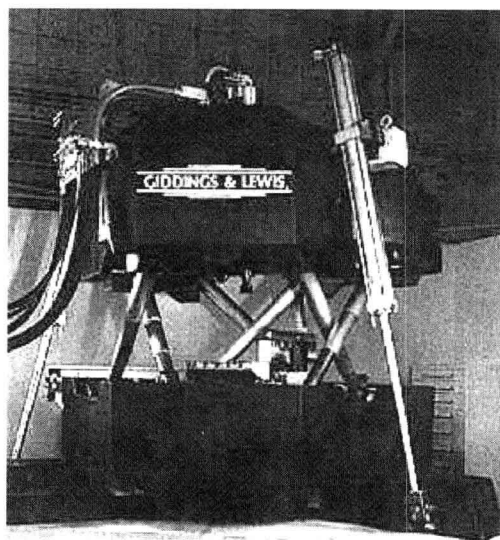


图 1-1 G & L 公司的 VARIAX

Fig. 1-1 VARIAX PMT

入机床领域。同期推出的并联机床还有美国 Ingersoll 公司的 Octahedral Hexapod（六足虫）（见图 1-2）和英国 Geodetic 公司的 GDM1000-04X（见图 1-3）。1994 年之后，世界各国的研究机构和企业开始大量投入并联机床的研究与开发，结构创新和理论研究成果大量涌现。在历届大型国际机床博览会（EMO、IMTS、JIMTOF、CIMT）上均有这类新型机床参展。

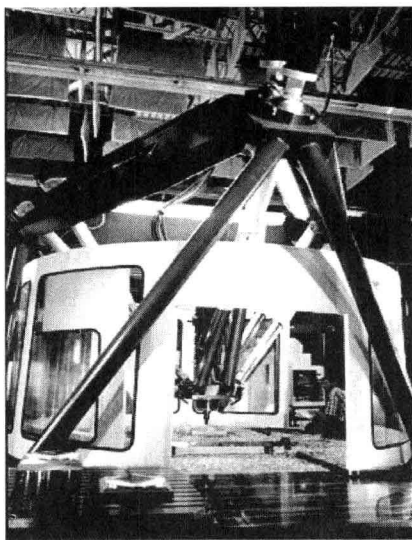


图 1-2 Ingersoll 公司的 Hexapod

Fig. 1-2 Hexapod PMT

1995 年，在第 11 届欧洲机床展览会（EMO' 95）上，英国 Geodetic 公司展出了 GPM1000-20S 型机床，意大利 Comau 公司展出了 Tricpt 型去毛刺机器人，日本日立精机公司展出了 Stewart 机器人。

1997 年，在德国汉诺威欧洲机床展览会（EMO' 97）上有多种并联机床参展，主要包括德国 Mikromat 公司的 6X 型高速立式加工中心（见图 1-4），瑞典 Neos Robotics 公司的 Tricept-600 型并联机床（见图 1-5），美国

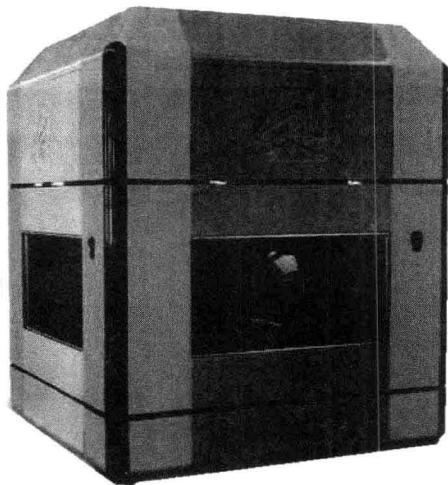


图 1-3 Geodetic 公司的 GDM1000-04X

Fig. 1-3 GDM1000-04X PMT

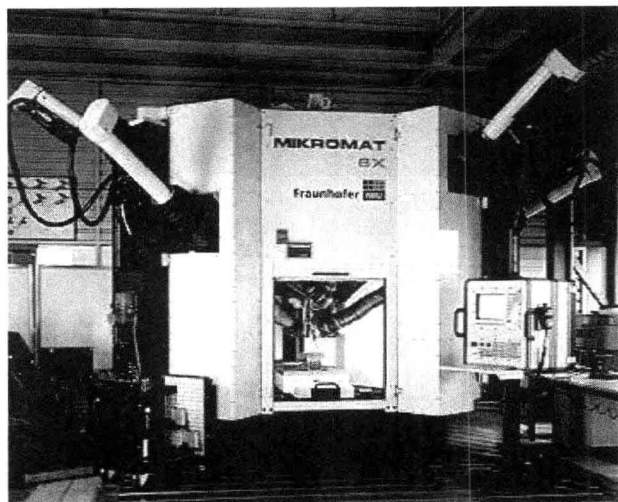


图 1-4 Mikromat 公司的 6X

Fig. 1-4 6X PMT

Ingersoll 公司的 HOH-600 型卧式并联加工中心（见图 1-6）和 VOH1000 型立式加工中心，英国 Geodetic 公司的 Evolution G500 和 G1000 并联加工中心，日本 Toyoda 公司的六条腿机床 Hexa M（见图 1-7），美国 Hexel 公司采用并联机构工作台和传统立式铣床组成的 Hexabot 并联机床（见图 1-8）。在这次展览会上，将传统机床结构称为串联机构，而将“六条腿”类机床结构称为并联机构。同期推出的并联机床还有俄罗斯 Lapik 公司的 TM-750 型 Stewart 数控机床（见图 1-9，CI-MT' 97 上展出，定位精度达到 0.001mm），瑞士联邦技术学院的 Hexa-glide 并联机床（见图 1-10）。

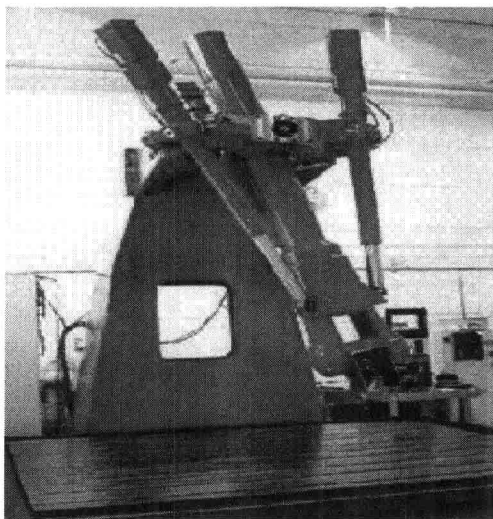


图 1-5 NEOS Robotics 公司的 Tricept 600

Fig. 1-5 Tricept 600 PMT

1999 年，在巴黎欧洲机床展览会（EMO' 99）上参展的并联机床主要有瑞典 Neos Robotics 公司的 Tricept 805（见图 1-11），韩国 SENA TE 公司的串并联机床 Eclipse（见图 1-12），日本大隈（Okuma）公司的

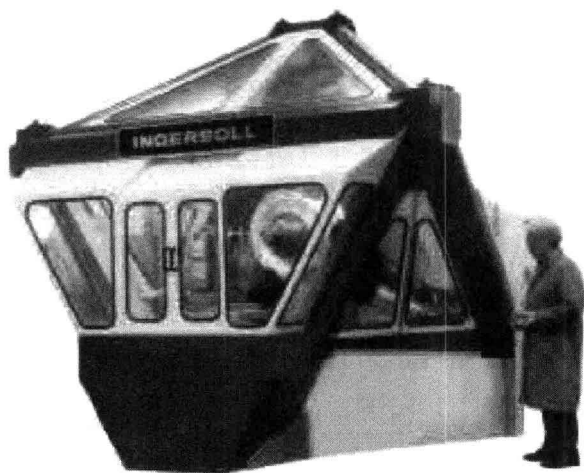


图 1-6 Ingersoll 公司的 HOH-600

Fig. 1-6 HOH-600 PMT



图 1-7 Toyoda 公司的 Hexa M

Fig. 1-7 HexaM PMT

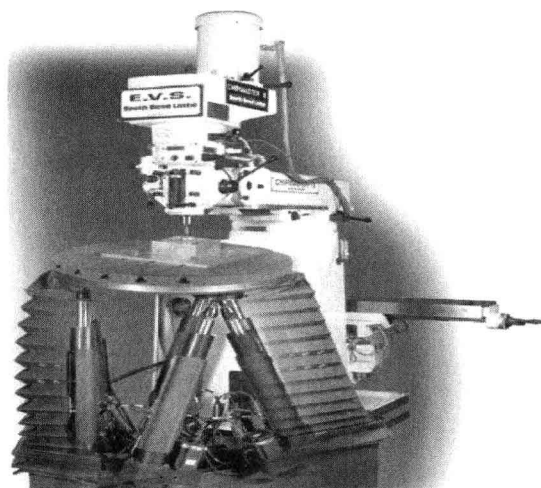


图 1-8 Hexel 公司的 Hexabot

Fig. 1-8 Hexabot PMT

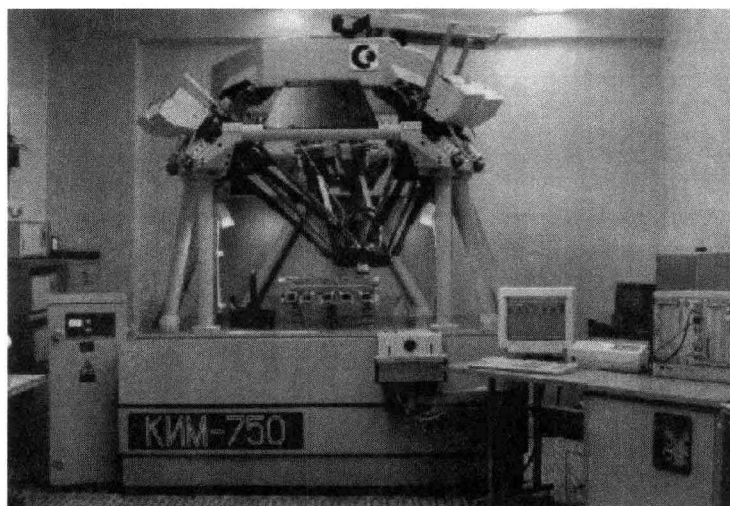


图 1-9 Lapik 公司的 KIM-750

Fig. 1-9 KIM-750 PMT