



电气工程系列丛书

DESIGN OF
A SPECIAL CONTROLLER
USED FOR
THE PARALLEL MANIPULATOR

黄文生 著

并联机床
数字控制器的设计

 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

非
外
借



电气工程系列丛书

本书由江苏高校品牌专业建设工程资助项目（TAPP，项目负责人：朱锡芳，PPZY2015B129）、常州工学院—“十三五”江苏省重点学科项目—电气工程重点建设学科、2016年度江苏省高校重点实验室建设项目—特种电机研究与应用重点建设实验室、江苏省产学研合作—前瞻性联合研究项目（BY2016031-03）资助出版

黄文生 著

并联机床

数字控制器的设计



江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

图书在版编目(CIP)数据

并联机床数字控制器的设计 / 黄文生著. — 镇江 : 江苏大学出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5684-0715-1

I. ①并… II. ①黄… III. ①数控机床—数字控制器—程序设计 IV. ①TG659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 312570 号

并联机床数字控制器的设计

Binglian Jichuang Shuzi Kongzhìqì De Shejì

著 者/黄文生

责任编辑/吕亚楠 吴昌兴

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江华翔票证印务有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

开 本/890 mm×1 240 mm 1/32

印 张/4.5

字 数/160 千字

版 次/2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-5684-0715-1

定 价/29.00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

并联机床和数控技术都是 21 世纪最具发展前景的关键技术,本书在介绍了数控并联机床发展现状及趋势的情况下,介绍了并联机床的运动学研究现状与分析方法,阐述了并联机床主轴运动所需的各种插补算法及其实现方法,提出了一种基于并联机床的新型计算机数控系统设计方法,实现了并联机床的控制。具体研究内容与成果如下:

(1) 介绍目前数控并联机床发展现状、分类、优缺点和发展趋势。

(2) 以三平移并联机床为例,分析并联机床的机构构型,建立其位置正、逆解模型,并进行速度分析和综合加速度的计算。

(3) 以三平移并联机床为例,采用弧度分割法实现插补算法,根据机床机构构型的分析结果和确定的各种参数,进一步介绍下位机的插补运算和上位机的运动轨迹运算的方法,从而实现控制器的设计。

(4) 三平移并联机床数控系统设计步骤与方法,通过多 CPU 技术配以液晶显示以提高并联系统的功能和性能。

(5) 用下位机与上位机的协调工作来提高专用数控系统的效率。

(6) 根据已确定的尺度参数,按照各功能模块之间的输入、输出关系,将各模块按照一定的顺序装配成数字化样机;按照零件加工轮廓的要求,通过在运动平台上定义期望运动,模拟走刀轨迹;通过仿真,对机床的运动学参数进行评价。

由于作者水平有限,书中难免有不足之处,敬请指正。

目 录

第1章 并联机床概述 001

- 1.1 并联机床的出现 001
- 1.2 并联机床的发展 004
 - 1.2.1 国外并联机床的发展 004
 - 1.2.2 国内并联机床的发展 012
- 1.3 并联机床的分类 016
- 1.4 并联机床的优缺点 017
 - 1.4.1 并联机床的优点 018
 - 1.4.2 并联机床的缺点 019
- 1.5 并联机床关键技术及发展趋势 019
- 1.6 本书章节安排 022

第2章 并联机床的运动学分析 024

- 2.1 并联机床运动学的研究现状 024
 - 2.1.1 并联机床位置分析研究现状 024
 - 2.1.2 并联机床速度和加速度研究现状 025
 - 2.1.3 工作空间运动学设计研究现状 026
- 2.2 三平移并联机床自由度分析和运动学建模 028
 - 2.2.1 三平移并联机床构型和自由度分析 028
 - 2.2.2 运动学方程的建立及其正、逆解 030
- 2.3 三平移并联机床的影响系数和速度、加速度分析 034
 - 2.3.1 影响系数的概念 034
 - 2.3.2 一阶影响系数(雅可比矩阵)和速度求解 035
 - 2.3.3 速度特性分析 037

2.3.4 速度综合 039

2.3.5 加速度分析 041

2.4 本章小结 042

第3章 插补算法及其改进方法 044

3.1 插补的实现方法 044

3.2 插补算法的发展现状 045

3.3 逐点比较法 046

3.3.1 逐点比较插补法的概念 046

3.3.2 空间直线插补原理 047

3.3.3 逐点比较插补法用于圆弧插补的原理 048

3.3.4 速度分析 050

3.4 弧度分割法插补 050

3.4.1 弧度分割法插补原理 051

3.4.2 效果检验 053

3.5 多维坐标的插补 053

3.6 NURBS 曲线插补 054

3.6.1 NURBS 插补的概念 054

3.6.2 恒定去除率的 NURBS 插补算法 056

3.7 本章小结 058

第4章 并联机床数字控制系统 059

4.1 并联机床专用数控系统的研究现状 059

4.2 三平移并联机床数控系统的总体设计方案及主要特点 060

4.2.1 总体设计方案 060

4.2.2 主要特点 061

4.3 硬件框图 061

4.4 主 CPU 电路 062

4.5 液晶显示控制器总体结构 065

- 4.6 过渡板设计 065
 - 4.6.1 过渡板的组成及工作过程 066
 - 4.6.2 过渡板的功能说明 066
 - 4.6.3 硬件时序分析 070
- 4.7 显示电路 071
 - 4.7.1 液晶显示模块 LMBGA_032_49CK_ 071
 - 4.7.2 对比度负压电路 074
 - 4.7.3 背光电路(CCFL) 075
- 4.8 系统专用控制芯片 SED1335 的应用及分析 076
 - 4.8.1 SED1335 的特点 076
 - 4.8.2 硬件组成 076
 - 4.8.3 指令系统 080
 - 4.8.4 SED1335 与单片机的连接 084
- 4.9 开放式数控系统 085
 - 4.9.1 开放式数控系统概述 085
 - 4.9.2 开放式数控系统研究现状 087
 - 4.9.3 开放式数控系统关键技术 088
- 4.10 本章小结 089

第5章 控制器监控程序设计 090

- 5.1 主 CPU 主程序结构 090
- 5.2 通信程序 099
- 5.3 从 CPU2 的输出软件的设计 101
- 5.4 显示程序设计 102
 - 5.4.1 显示主程序 102
 - 5.4.2 判断参数子程序 102
- 5.5 部分监控程序 104
 - 5.5.1 初始化子程序 104
 - 5.5.2 判断参数子程序 107
 - 5.5.3 显示子程序 109

5.6 本章小结 113

第6章 并联机床的运动学仿真 114

6.1 并联机床数字化模型的创建 115

6.2 运动学逆解仿真分析 116

6.3 本章小结 121

第7章 总结与展望 122

7.1 总 结 122

7.2 展 望 123

参考文献 124

第 1 章 并联机床概述

制造业是创造社会财富的基石,是衡量一个国家综合国力的重要指标,尤其是从 2008 年世界经济危机爆发以来,无论是发达国家、中等发达国家还是发展中国家,都将发展制造业作为增强竞争力、振兴国家经济的重要战略措施。

数控机床为整个社会的制造业提供装备基础,是现代工业发展必不可少的复杂生产工具,是保证高技术产业发展和国防军工现代化的战略装备。传统机床一般由动力源、床身、导轨、传动系统、工作部件、夹具等构成。传统机床的共同特点是工作时运动副的受力是一个力传递的过程,床身支承导轨、导轨支承工作台、工作台支承夹具,从而构成一个串联的受力环,故称之为串联机床。由于串联轴的配置,后运动的轴受到先运动的轴带动和加速,加工时切削力会作用到每一根轴上,故每根轴直径都需要较大的尺寸以保证工作部件的刚度。因此,串联机床都具有很大的质量,使得机床的进给速度难以增加、动态性能较差、轨迹误差较大。

1.1 并联机床的出现

并联机床(Parallel Machine Tool)也称为虚拟轴机床(Virtual Axis Machine Tool),是机床与并联机构相结合的产物。

并联机构由 Gwinnett 在 1928 年最早提出,他设计了一种基于球面并联机构的娱乐装置;1934 年, Pollard 发明了一种基于并联机构的喷涂机器人,取得了专利,但由于当时技术水平的限制,该机器人并没有真正实现;1947 年,邓禄普橡胶有限公司的自动化工程

师 Eric Gough 博士设计了著名的 Hexapod 型并联机器人,用于轮胎测试并联机构,如图 1-1 所示;1965 年,德国 Stewart 发表了一篇文章,为了在训练飞机驾驶员的飞行模拟器设计中产生高速且很大的力,使模拟器能够克服地球的引力,从而飞行员的座舱模拟加速运动,引进了并联运动学机构,发明了一种典型的并联机构,称为 Stewart 型并联机构(见图 1-2),并且在论文中详细分析了 Hexapod 型并联机构。澳大利亚著名机构学者 Hunt 在 1978 年提出将六自由度的 Stewart 并联机构平台应用到工业机器人上,形成一种六自由度的新型并联机器人,使人们真正开始意识到并联机器人的应用前景。1988 年瑞士 Clavel 提出了一种球面六杆机构的 Delta 并联机器人,其典型结构如图 1-3 所示。这种机器人的运动部件轻,加速度可达 $(1 \sim 2)g$ ($g = 9.8 \text{ kg/s}^2$),适合在直径 100 mm,高度 200 mm 的范围内取放质量不大($1 \sim 10 \text{ kg}$)的物品。目前 Delta 并联机器人已经广泛用于化妆品、食品、药品的包装和电子产品的装配。

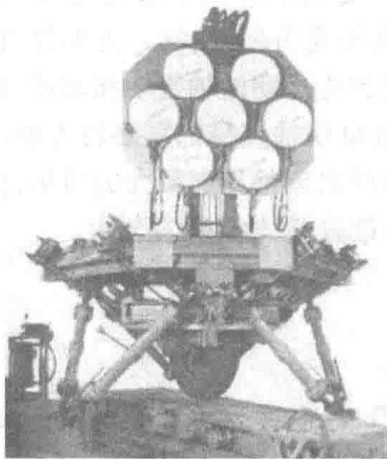


图 1-1 Hexapod 轮胎测试并联机构

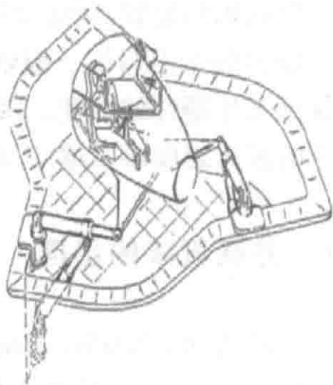


图 1-2 Stewart 型并联机构

此外,瑞典 Neos Robotics 公司开发和生产的 Tricept 系列并联机器人也是并联机器人的一个典型结构,如图 1-4 所示。它既可以完成汽车生产线的加工、装配、焊接等工序,还可以作为模块化制

造系统的组成部分,完成切削和激光加工。



图 1-3 Delta 并联机器人

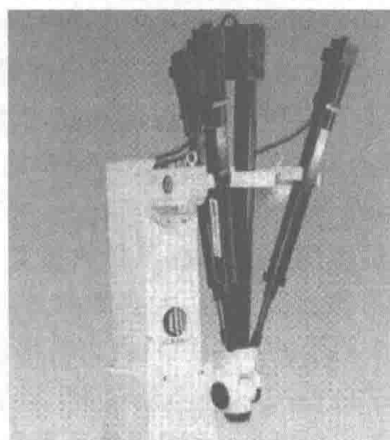


图 1-4 Tricept 系列并联机器人

并联机构已经被应用于许多需要快速移动包装的生产线、汽车总装线的车轮自动安装机构、航天飞船对接器的对接机构、煤矿开采等领域,在医用机器人、绳索机器人、高精度定位装置、天文望远镜等场合也得到了很好的应用。

随着并联机构和计算机技术的迅猛发展,从 20 世纪 80 年代末开始,在机床制造业发展方兴未艾之时,美国、俄罗斯等国相继将

Stewart 平台应用于开发机床并取得了一系列突破性的成果。并联机构平台在机床上的应用改变了传统机床的概念。并联机床由多个自由度组成,每个自由度的受力不存在力传递的现象,而是各自独立,形成并列的力支承状态,故刚度大、精度高。这种机床与串联机床相比,由于不存在力传递,所以无须将运动副的尺寸按照力传递的顺序设计,而是各运动副的尺寸可以一样大,从而大大减少了机床的用料,也减少了力传递中多个运动副的力变形的积累,从而提高了精度,更便于模块化设计。

1.2 并联机床的发展

1.2.1 国外并联机床的发展

20 世纪 90 年代以来,并联机床相继在美、日、俄等国问世,而真正将并联机构成功应用于机床则是在 1994 年芝加哥国际机床博览会上由美国 Giddings & Lewis 公司推出的第一代 VARIAX(变轴)并联机床(见图 1-5),该机床是以 Stewart 机构为核心的五坐标立式加工中心;以及由 Ingersoll 铣床公司同时推出的第一代“八面体六足虫”(Octahedral Hexapod)并联机床——VOH1000 型立式加工中心。这些并联机床的推出引起了极大的轰动,但此时的第一代并联机床还只能称作原型样机,大多数仅能够加工蜡模等易加工材料。在展览会上展示的 VARIAX 机床被提供给英国诺丁汉大学作为有关高速制造的研究设备,VOH1000 型加工中心则被交付给美国国家标准和技术研究所、美国国家宇航局进行研究。之后,世界各国都掀起了研究并联机床的热潮。



图 1-5 Giddings & Lewis 公司的 VARIAX 并联机床

1997 年的德国汉诺威国际机床展上,已有多个国家的 30 余台并联机床参展,其中仅六杆并联机床就有 10 多台。这次机床展不仅创造了串联机床与并联机床的类型划分,而且并联机床的结构形式也不仅仅再局限于经典的 Stewart 型六自由度形式,出现了新型的六自由度 Stewart 变型结构、六杆三自由度结构及三杆三自由度结构。这次展会上,Ingersoll 铣床公司又展出了 HOH600 型卧式加工中心(见图 1-6),后将其提供给德国阿亨工业大学机床实验室进行研究。英国 Geodetic 公司展出了 Evolution G500 和 G1000 两个型号的并联机床,该系列并联机床采用了“2 轴主轴头”(2-axis head)的主轴部件,其实际上就是同时运用了串联机构和并联机构,这种结构克服了原 Stewart 型并联机构工作空间小、灵活度差的缺点。德国 Mikrormat 公司展出了 6X Hexa 机床(见图 1-7),该机床采用了 Stewart 平台的变型结构,用主轴筒代替了平台,有利于主轴有倾角时保持受力均匀。



图 1-6 Ingersoll 公司的 HOH600 型加工中心



图 1-7 德国 Mikrormat 公司的 6X Hexa 机床

瑞士联邦工学院的机床与制造技术研究所机器人院 (ETH/IWF/IFR) 研发的“六滑台” (Hexa Glide), 用始端可滑动的定长杆代替了始端固定的伸缩杆, 如图 1-8 所示。德国斯图加特大学机床与制造设备控制技术研究所 (ISW) 展出的 LINAPOD 机床也采用了固定长度的滑杆结构, 虽然具有六根杆, 但平行的两个杆等效于一条腿, 因此该机床也被称为三条腿机床。德国汉诺威大学生产工程和机床研究所 (IFW) 展出了用于汽车工业钢板激光加工的三杆操作机, 末端执行件上的腕部结构又具有 2 个自由度, 因此该设备为串联和并联混合的结构。另外, 此次展览会上还出现了许多 Tricept 结构的三足结构产品, 比如意大利 COMAU 公司展出的 Tricept HPI 及瑞典 NEOS 公司展出的 Tricept 600, 如图 1-9 所示。

1999 年法国巴黎机床展上, 三杆并联机床展示了其实用化进展。瑞典 NEOS 公司进一步推出了 Tricept 805 并联机床 (见图 1-10), 该型号的产品共计 100 多台, 被世界闻名的公司 (如波音、大众、通用、沃尔沃等) 购买。三杆并联结构也出现了一些新的形式, 如韩国 SENA TE 公司的 ECLIPSE 机床 (见图 1-11), 不再采用在三杆机构末端串联其他机构的方式, 而是改为三杆机构始端可沿导轨滑动且三条导轨又可在同一条圆形导轨上滑动的形式, 使得主轴摆角有最大可达度。法国 Renault 公司展出的 Uranse SX 与 LINPOD 有些类似, 不同之处在于改立式为卧式。本次展会上, 日本 Okuma

公司也展出了经典 Stewart 型立式并联机床 PM-600, 如图 1-12 所示。

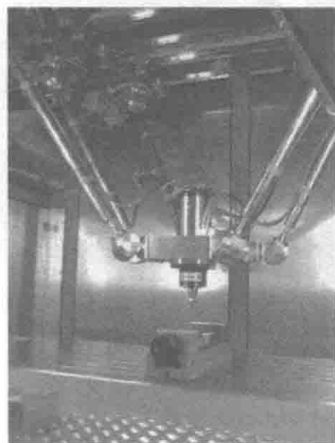


图 1-8 瑞士联邦工学院的
Hexa Glide



图 1-9 瑞典 NEOS 公司的
Tricept 600



图 1-10 瑞典 NEOS 公司的
Tricept 805



图 1-11 韩国 SENA TE 公司的
ECLIPSE 机床



图 1-12 日本 Okuma 公司的 PM-600 机床

2000 年前后,并联机床在运动学原理、机床设计方法、制造工艺、控制技术、动态性能研究和工业应用方面先后取得了重大的突破,世界著名的机床公司都先后推出新产品,发展了许多经过改进的机构原理和结构,并使并联机床进入实用阶段。

在 2000 年的美国芝加哥国际制造技术展览会 IMTS' 2000 上,展出了最新的并联机床,如瑞典 NEOS 公司的 Tricept 845 型加工中心(见图 1-13),其主轴头具有立式、卧式、 45° 三种安装方式。德国 INDEX 公司的倒置立式车削中心 Vertical Line V100(见图 1-14),其机构与 LINPOD 有些类似。美国 Hexel 公司推出了 P2000 型五坐标数控铣床,如图 1-15 所示。在同年的日本国际机床展览会(JIMTOF 2000)上,日立精机公司展出了 PA35Ⅱ并联机床,如图 1-16 所示。

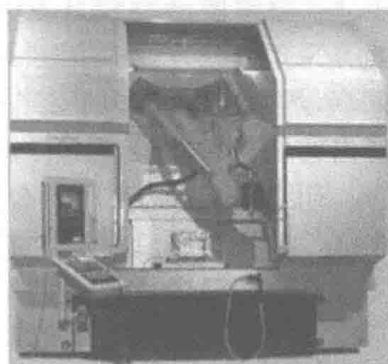


图 1-13 瑞典 NEOS 公司的
Tricept 845 型加工中心



图 1-14 德国 INDEX 公司的
Vertical Line V100 并联机床

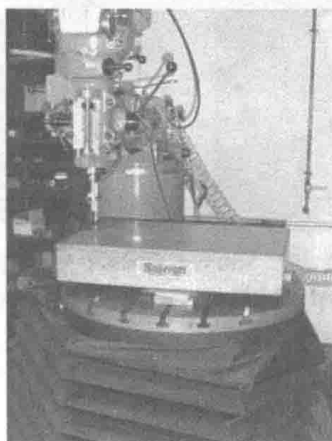


图 1-15 美国 Hexel 公司的
P2000 型五坐标数控铣床



图 1-16 日本日立精机公司的
PA35 II 并联机床

在 2001 年的德国汉诺威机床展 EMO' 2001 上,并联机床的展出量较大,三杆结构和串并联混合结构得到进一步发展,占所展机床绝大多数,有些已成为具有实用价值的工业产品,欧盟甚至为此设立了 PKM(Parallel Kinematic Machine)专项。德国 DECKEL MAHO 公司在获得瑞典 NEOS 公司的技术许可后,推出了 TriCenter