

# 并联机床加工中心的 研制与应用

## Research and Application on Parallel Kinematics Machining Center

哈尔滨量具刃具集团有限责任公司 高天国



高天国

毕业于哈尔滨工业大学精密仪器系,现主要从事并联机床的研发设计工作。

并联机床(Parallel Machine Tool),也叫并联运动学机床(Parallel Kinematic Machine),因没有实体坐标轴,故又被称为虚拟轴机床(Virtual Axis Machine Tool)。并联机床是基于空间并联机构 Stewart 平台原理开发的,是空间机构学、机械制造技术、数控技术、计算机软硬件技术和 CAD/CAM 技术高度结合,研制而成的高科技产品,可以看作并联机器人在机械加工

领域的一种应用。它克服了传统机床串联机构的固有缺陷(刀具只能沿固定导轨进给,刀具作业自由度偏低,设备加工灵活性和机动性不够等),可实现多坐标联动数控加工、装配和测量等多种功能,能满足复杂自由曲面零件(如叶片、叶轮、螺旋桨及复杂模具的型腔等)的加工要求,是近年来出现的一种新概念机床。

一种新概念机床。并联机床正逐步走入人们的视野,成为研究的热点。本课题在结合并联机构和数控

一种新概念机床。并联机床正逐步走入人们的视野,成为研究的热点。

本课题在结合并联机构和数控

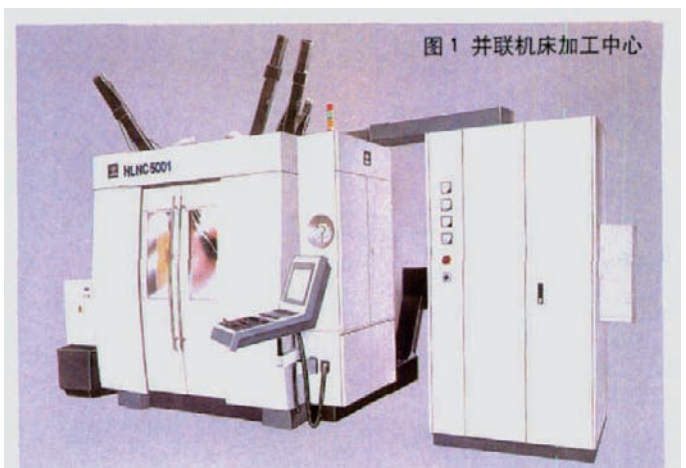


图1 并联机床加工中心

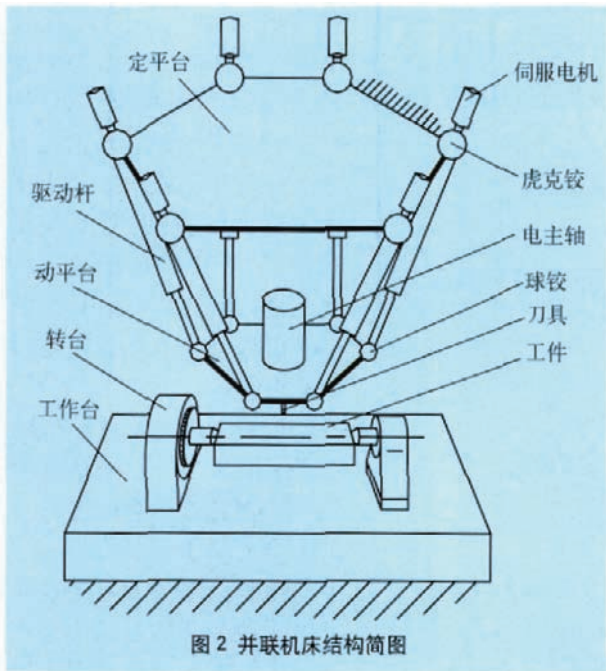


图2 并联机床结构简图

机床有关理论的基础上,根据应用的特点进一步丰富和完善相关内容,提出了并联机床加工中心,如图1所示。并联机床加工中心,在传统六轴并联机床的工作台上附加了一个转台,实现了七轴联动;还配有刀库,可实现自动换刀,以减轻操作者的劳动强度。并联机床加工中心实现了并联机床加工的自动化,从而完成了并联机构向并联机床加工中心的转化,以适应并联机床发展的需要。

### 并联机床结构原理

并联机床结构如图2所示,并联机床是由定平台、动平台和6根驱动杆组成。动平台上安装有电主轴,电主轴上夹持有刀具。通常,驱动杆的一端经虎克铰与定平台相连,另一端经球铰与动平台相连。可以通过改变6根驱动杆的杆长来控制动平台的运动,从而使动平台和电主轴获得不同的空间位置和姿态。同时,在工作台上串联一个数控转台,可实现七轴联动,以提高并联机床的加工能力。当电主轴夹持刀具高速旋转并随动平台一起运动时,可以在不同位置和姿态下对工件(在工作台上或夹持转台上)进行加工。

所要求的刀具轨迹。

并联机构的原理如图3所示,机构的构件总数为14;运动副总数为18,其中包括6个一自由度的移动副,6个二自由度的虎克铰( $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ ),6个三自由度的球铰( $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$ )。其中驱动杆和定平台连接处的虎克铰也可用球铰代替,这样每根驱动杆多了一个绕其轴线方向旋转的局部自由度,但机构的整体自由度不变。因此,这是一个具有6个自由度的并联机构。

### 并联机床加工中心 数控系统的组成

由哈尔滨量具刀具集团有限责任公司与哈尔滨工业大学联合开发研制的并联机床加工中心数控系统,以工控机为基础,具有自主知识产权的开放式数控系统。

该系统是在 Windows NT 或 Windows 2000 平台上以 kollmorgen 多轴运动控制卡为核心开发的,由

从图2可以看出,并联机床并非真实存在 $X, Y, Z, A, B, C$ 轴,不能像传统机床一样直接控制各坐标轴,而是通过改变6根驱动杆(简称实轴)的杆长来实现刀具沿 $X, Y, Z, A, B, C$ 轴(又称虚轴)运动的。因此,在并联机床控制技术的研究和数控系统的开发中,最关键的问题是如何控制6个实轴来实现刀具的联合运动,以得到

硬件和软件两部分组成。其中,硬件部分产生运动,是整个数控系统的执行者;利用 VC++ 开发的数控系统软件充分考虑了并联机床的结构特点、控制特点,以及被加工的复杂零件(如汽轮机叶片等)的特点,是并联机床加工中心的灵魂。

### 1 数控系统硬件

数控系统硬件框架如图4所示。其中,主控计算机、运动控制卡和可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)构成数控系统的核心框架,它们有着独立的分工。在机床的运行过程中,这三者之间始终保持实时双向通信,共同控制整个系统的运行。各部分的具体功能说明如下。

(1) 主控计算机: 数控系统的核心。主要功能是提供人机交互界面,负责数控代码的生成和编译、刀具运动轨迹仿真,以及加工过程中对运动控制卡和 PLC 的协调和监控。主控计算机通过局域网与远程计算机相连,实现与外部的数据交换。

(2) 运动控制卡: 运动控制的核心部件。主要任务是通过接收来自主控计算机的运动控制指令,控制7路电机同步运动。该卡采用 VxWorks 实时操作系统,通过 SERCOS 光纤通信协议与伺服驱动

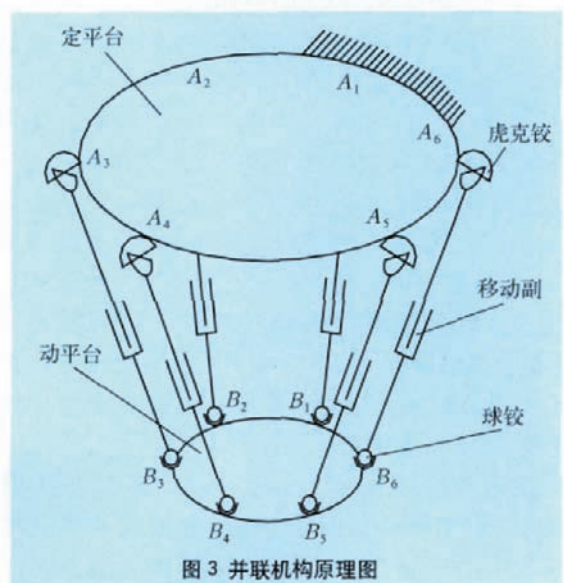


图3 并联机构原理图

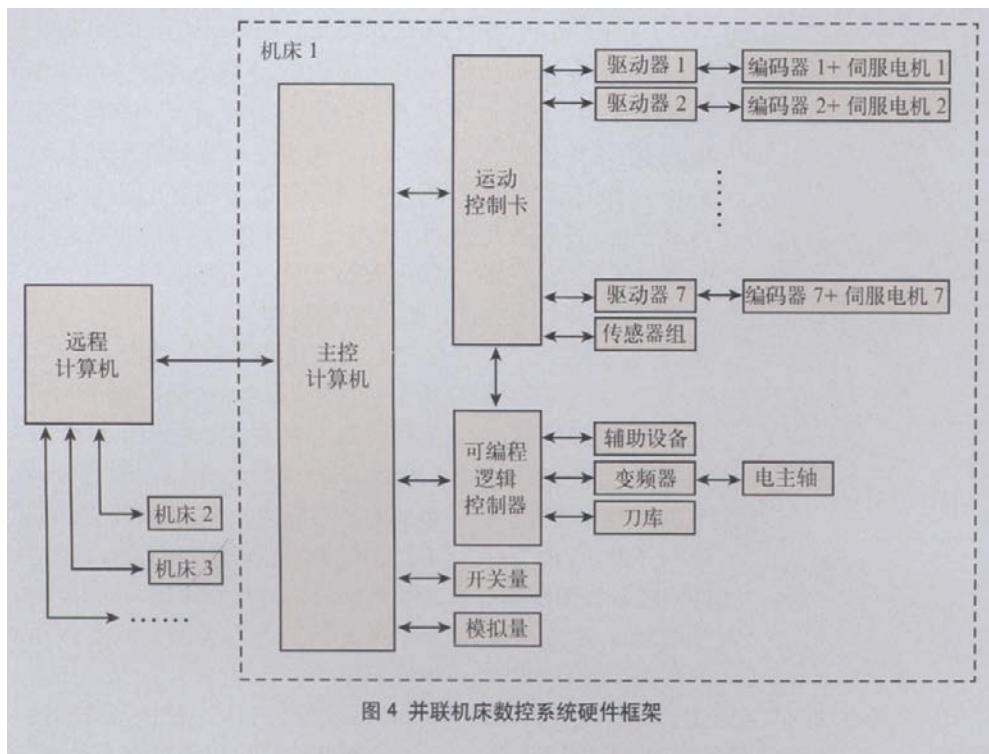


图4 并联机床数控系统硬件框架

动控制、手动运动控制、主轴运动控制、辅助功能、刀库控制、开关量和模拟量 I/O 控制,以及各部分的运行监控和错误处理等子模块。其中多数子模块与普通数控系统中的相似,现仅对自动运动控制、手动运动控制、运行监控和错误处理 3 个子模块进行简要的介绍。

a. 自动运动控制子模块。

该模块用于机床的连续加工。它对刀具数据进行了离线编译,并利用 kollmorgen 运动控制卡提供的电子凸轮功能实现各轴的高速同步运行。此模块还为用户提供原路退刀和刀轴方向退刀等功能,用户可以在中途终止暂停

器通信,通信速度快,信息量大,抗干扰能力强。

(3) PLC: 电气系统控制的核心。主要任务是接收来自主控计算机的辅助控制指令(M 指令),并控制辅助设备动作;通过控制变频器,进而控制机床的电主轴;管理刀库;机床运行过程中对各电气元件逻辑关系进行监控,以及故障诊断和处理。

(4) 远程计算机: 构成多机床大系统的核心。通过局域网络同时与多台机床相连,与它们进行数据交换并实行远程控制。这种方式节约了软件资源,便于集中管理和监控。

(5) 刀库: 机床刀具的管理中心。可安装 24 把刀具,并且可以实现加工过程的自动换刀。刀库的控制由 PLC 和主控计算机联合实现。PLC 负责刀库的转刀和换刀过程,主控计算机控制转刀和换刀的开启。

下:  
(1) 编程与仿真模块。

编程与仿真模块主要用到轨迹描述文件、刀位文件和运动控制数据文件。其中,刀具位置文件是软件编程的难点,该文件主要实现机床的干涉校验、模拟仿真、工艺管理和刀具位置描述等功能;轨迹描述文件是基于 APT 语言开发的,用户使用基本的轨迹元素、特殊点和直线,可以方便地建立轮廓轨迹;运动控制数据文件由刀具轨迹描述文件经刀具补偿、轨迹插补等运算后产生,用于存储伺服电机的运动控制数据。

(2) 运动控制模块。  
该模块汇集了系统中所有涉及硬件部分的操作,主要包括自动运

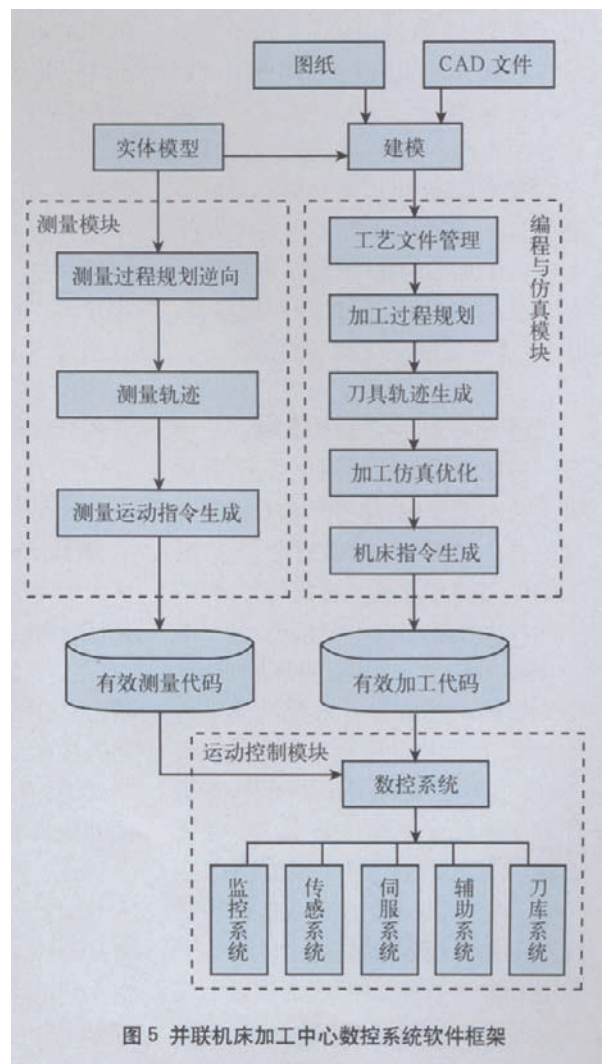


图5 并联机床加工中心数控系统软件框架



图6 哈尔滨汽轮机厂现场的4台并联加工中心

加工的情况下自动恢复断点,以便继续加工。

#### b. 手动运动控制子模块。

该模块用于运行由手轮控制的机床。对编译程序进行实时逆解运算,以解决并联机床运动的非线性。手动运动控制模块与测量模块相结合,使数控系统具备很好的测量功能。

#### c. 运行监控和错误处理子模块。

系统中,对于运行监控和错误处理的任务有如下分工:PLC负责对各部分电气的逻辑关系、电主轴系统和刀库系统进行监控;运动控制卡负责对伺服电机进行监控。同时,运动控制卡和PLC之间保持实时双向通信,以实现连锁动作。主控计算机接收PLC和运动控制卡发来的错误报告,并通过人机界面显示。而远程计算机通过访问主控计算机上的错误报告文件进行远程故障诊断。

#### (3) 测量模块。

主轴运动的灵活性使得并联机床非常适合测量工件。本系统为了更好地发挥并联机床的这个优势,专门开发了功能完备的测量模块,因此,该机床完全可以当作测量机使用。测量模块的具体功能包括:

##### a. 工件坐标系的测量。

用于加工之前对工件坐标系进行测量,以确定工件在机床上的装夹位置。该功能避免了传统机床中繁琐而复杂的工件找正工作。

##### b. 刀长和刀具直径的自动

测量。

利用随机床自带的测头和对刀器,用户可以非常方便地测量刀具的参数。

##### c. 机床的自动标定。

用户可在环境温度变化较大或

机床搬迁时,对机床精度进行自行标定和修正。

##### d. 在线加工精度测量。

用户可以对工件进行在线加工精度测量。

## 应用

本课题研制的并联机床加工中心适用于机械制造业中的铣削加工,尤其适合复杂自由曲面零件的加工。自由曲面是工程中最为复杂而又经常遇到的曲面,航空、造船、汽车、能源、国防等部门中许多零件的外形(如叶片曲面、螺旋桨桨叶曲面、变距螺旋面以及模具工作表面等)均为空间自由曲面。目前,能加工自由曲面的五坐标数控机床多是国外生产的,其价格昂贵。我国自由曲面的加工能力已成为行业发展的瓶颈。

本课题研制的并联机床加工中心根据主轴的不同姿态,加工范围分为:

- 主轴与Z轴夹角 $27^\circ$ ,  $\phi 400\text{mm} \times 250\text{mm}$ ;

- 主轴与Z轴夹角 $10^\circ$ ,  $\phi 600\text{mm} \times 290\text{mm}$ 。

主要参数:

- 主轴最大走刀速度: $4000\text{mm}/\text{min}$ ;

- 主轴快速移动速度: $15000\text{mm}/\text{min}$ ;

- 双向定位精度:  $0.022\text{mm}$ ;

- 电主轴额定功率:  $14\text{kW}$ ;

- 电主轴额定转速: $100 \sim 10000\text{r}/\text{min}$ ;

- 电主轴额定转矩: $110\text{N}\cdot\text{m}$ ;

- 刀库含刀量:24把。

由于没有实体的坐标系,工件坐标系的建立以及工件与机床的坐标转换完全依靠软件实现,无需像传统机床那样找正工件,操作者可以方便地建立工件坐标系。

在用并联机床加工中心加工汽轮机叶片的技术方面,完成了叶片叶型曲面加工和清根加工;并可用UG进行叶片加工数控编程和加工仿真。目前该并联机床加工中心已有4台应用于哈尔滨汽轮机厂的生产加工现场,1台应用于无锡鼎元叶片厂的生产加工现场。在叶片加工过程中,仅需1次装夹,自动换刀,即可完成叶片汽道型面、叶顶、叶根圆角和进、出汽边圆角的加工,并成功地完成多级别、具有复杂自由曲面的汽轮机叶片零件的加工。其中,单个叶片的加工效率与瑞士斯特拉格五坐标叶片专用机床相当。图6为1Cr13不锈钢汽轮机叶片的加工现场。

在用并联机床加工中心加工船用中小型螺旋桨的数控加工方面,可在UG环境下完成螺旋桨数控加工编程,用Vericut进行加工仿真和干涉校验。目前,已用并联机床加工中心成功地完成了小型螺旋桨的加工。

## 结束语

并联机床加工中心将并联机构和数控机床的有关理论有机地结合起来,形成了关于并联机床加工中心的理论,并以其崭新的设计理念,向人们展示了广阔的应用前景和市场潜力。从目前应用效果可以看出,在很多方面,并联机床的性能优于传统机床。可以预见,并联机床加工中心不仅将占据传统机床的部分应用领域,而且必将为整个机床行业扩展出更广阔的应用领域。(责编 小颖)