

并联机床——机床行业面临的机遇与挑战^{*}

汪劲松 黄 田



汪劲松 教授

摘要 并联机床是 90 年代问世的新型数控加工装备,其研发使机床行业面临新的机遇与挑战。简要评述了并联机床的国内外发展现状和未来趋势,以及设计理论与关键技术的研究进展。结合样机设计与制造的实践经验,提出亟待解决的若干理论与技术问题,以及解决这些问题的可行途径。

关键词 并联机床 概念设计 运动学 动力学 数控技术 精度补偿 关键基础件

中国图书资料分类法分类号 TG502

1 并联机床的发展趋势

为了提高对生产环境的适应性,满足快速多变的市场需求,近年来全球机床制造业都在积极探索和研制新型多功能的制造装备与系统,其中在机床结构技术上的突破性进展当属 90 年代中期问世的并联机床(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。与实现等同功能的传统五坐标数控机床相比,并联机床具有如下优点: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 and 自由度组合。在动平台上安

^{*} 国家自然科学基金资助项目(59775006)、国家攀登计划资助项目、国家 863 高技术发展计划资助项目(863-512-04-19, 863-511-943-006)、清华大学 211 工程和天津大学 211 工程资助项目、教育部博士点专项基金资助项目(97005607)、回国留学人员启动基金资助项目、天津市和云南省“九五”科技攻关资助项目。
收稿日期:1999-08-02

(3) 继续保持经济型数控系统“价廉物美”的特点,进一步提高数控系统的性能,降低成本,提高产品的市场竞争力,保住国产经济型数控系统这一块市场。我公司新近推出的 KT580-T 车床数控系统加上 KT220 双轴交流伺服驱动系统就是本着这一原则进行开发、生产、销售的。

(4) 国家应对国产数控产业提供一些优惠政策。如税收返还等。在“九五”中实施的示范工程应推广,使应用国产数控系统的单位都能得到实惠,从而促进国产数控系统的发展。

(5) 尽快解决产品的批量化、规模生产问题。应该说,通过“七五”、“八五”攻关,以及技术引进,国内数控厂家在技术、生产上都有了长足的进步,但尚未形成规模生产,产品批量小,质量也

不能令人满意。为摆脱这一局面,应选择几个有发展前途的产品和企业重点突破。在具体实施上,可选择量大面广的普及型数控系统,特别是车床数控系统,努力把批量搞上去,并坚持有所为有所不为的原则,以集中财力物力。

参 考 文 献

- 1 <http://www.mdsi2.com>
- 2 李非文. 机械制造. 1998(6):14~16

(编辑 华 恒)

章富元 男,1944 年生。上海开通数控有限公司(上海市 200233) 总经理、上海市机床研究所所长、教授级高工。

方江龙 汤季安 上海市 200233 上海开通数控有限公司

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。

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、汉诺威大学和斯图加特大学等单位也研制出不同结构形式的数控机床、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,并决定第二届研讨会于 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。在

国家自然科学基金委员会的支持下,中国大陆地区从事这方面研究的骨干力量,于 1999 年 6 月在清华大学召开了我国第一届并联机器人与并联机床设计理论与关键技术研讨会,对并联机床的发展现状、未来趋势以及亟待解决的问题进行了研讨。

2 并联机床设计理论与关键技术

2.1 概念设计

概念设计是并联机床设计的首要环节,其目的是在给定所需自由度条件下,寻求含一个主副体(动平台)的并联机构杆副配置、驱动方式和总体布局的各种可能组合。

按照支链中所含伺服作动器数目不同,并联机床可大致分为并联、串并联和混联 3 种类型。前两者在一条支链中仅含一个或一个以上的作动器,以直接生成 3~6 个自由度;而后者则通过 2 个或多个少自由度并联或串联机构的串接组合生成所需的自由度。按照作动器在支链中的位置不同,并联机床可采用内副和外副驱动,且一般多采用线性驱动单元,如伺服电机—滚珠丝杠螺母副或直线电机等。机架结构的变化可使得并联机床的总体布局具有多样性,但同时也使工作空间的大小、形状以及运动灵活度产生很大差异。因此,在制定总体布局方案时,应采用概念设计与运动学设计交互方式,并根据特定要求做出决策。

通过更换末端执行器便可在单机上实现多种数控作业是并联机床的优点之一。然而由于受到铰约束、支链干涉、特别是位置与姿态耦合等因素的影响,致使动平台实现姿态能力有限是各种 6 自由度纯并联机构的固有缺陷,难于适应大倾角多坐标数控作业的需要。目前并联机床一个重要的发展趋势是采用混联机构分别实现平动和转动自由度。这种配置不但可使平动与转动控制解耦,而且具有工作空间大和可重组性强等优点。特别是由于位置正解存在解析解答,故为数控编程和误差补偿提供了极大的方便。应该强调,传统机床的发展已有数百年历史,任何希望从纯机构学角度创新而试图完全摒弃传统机床结构布局与制造工艺合理部分的设想都将是失偏颇的。

2.2 运动学设计

并联机床运动学设计包括工作空间定义与描述,以及工作空间分析与综合两大内容。合理地定义工作空间是并联机床运动学设计的首要环节。与传统机床不同,并联机床的工作空间是各支链工作子空间的交集,一般是由多张空间曲面片围成的闭包。为了适合多坐标数控作业的需要,通常将灵活(巧)度工作空间的规则内接几何形体定义为机床的编程工作空间。对于纯 6 自由度并联机床,动平台实现位置和姿态的能力是相互耦合的,即随着姿态的增加,工作空间逐渐缩小。因此,为了实现动平台实现位姿能力的可视化,往往还需用位置空间或姿态空间进行降维描述。

工作空间分析与综合是并联机床运动学设计的核心内容。广义地,工作空间分析涉及在已知尺度参数和主动关节变量变化范围条件下,评价动平台实现位姿的能力;尺度综合则是以在编程空间内实现预先给定的位姿能力并使得操作性能最优为目标,确定主动关节变量的变化范围和尺度参数。

工作空间分析可借助数值法或解析法。前者的核心算法为,根据工作空间边界必为约束起作用边界的性质,利用位置逆解和 $K-T$ 条件搜索边界点集。后者的基本思路是,将并联机构拆解成若干单开链,利用曲面包络论求解各单开链子空间边界,再利用曲面求交技术得到整体工作空间边界。

尺度综合是实现并联机床运动学设计的最终目标,原则上需要兼顾动平台实现位姿的能力、运动灵活度、支链干涉等多种因素。针对 6 自由度并联机床,目前可以利用的尺度综合方法可以分为:基于各向同性条件的尺度综合,兼顾各向同性条件和动平台姿态能力的尺度综合,以及基于总体灵活度指标的加权综合 3 种方法。第 1 种方法因仅依赖满足各向同性条件时的尺度参数关系,故存在无穷多组解答。第 2 种方法针对动平台在给定工作空间中实现预定姿态能力的需要,通过施加适当约束,可有效地解决多解问题。第 3 种方法较为通用,通常以雅可比矩阵条件数关于工作空间的一次矩最小为目标,将尺度综合问题归结为

一类泛函极值问题。值得指出,第 2 种方法仅适用某些并联机构(如 Stewart 平台);而第 3 种方法除计算效率低外,还不能兼顾动平台实现姿态的能力。因此,针对不同类型的并联机床,研究兼顾多种性能指标的高效尺度综合方法将是一项极有意义的工作。

2.3 动力学问题

刚体动力学逆问题是并联机床动力分析、整机动态设计和控制器参数整定的理论基础。这类问题可归结为已知动平台的运动规律,求解铰内力和驱动力。相应的建模方法可采用几乎所有可以利用的力学原理,如牛顿-尤拉法、拉格朗日方程、虚功原理、凯恩方程等。由于极易由雅可比和海赛矩阵建立操作空间与关节空间速度和加速度的映射关系,并据此构造各运动构件的广义速度和广义惯性力,因此有理由认为,虚功(率)原理是首选的建模方法。

动态性能是影响并联机床加工效率和加工精度的重要指标。并联机器人的动力性能评价完全可以沿用串联机器人的相应成果,即可用动态条件数、动态最小奇异值和动态可操作性椭圆半轴长几何均值作为指标。与机器人不同,金属切削机床动态特性的优劣主要是基于对结构抗振性和切削稳定性的考虑。动态设计目标一般可归结为,提高整机单位重量的静刚度;通过质量和刚度合理匹配使得低阶主导模态的振动能量均衡;以及有效地降低刀具与工件间相对动柔度的最大负实部,以期改善抵抗切削颤振的能力。由此可见,机器人与机床二者间动态性能评价指标是存在一定差异的。事实上,前者没有计及对结构支撑子系统动态特性的影响,以及对工作性能的特殊要求;而后者未考虑运动部件惯性及刚度随位形变化的时变性和非线性。因此,深入探讨并联机床这类机构与结构耦合的、具有非定长和非线性特征的复杂机械系统动力学建模和整机动态设计方法,将是一项极富挑战性的工作。这项工作对于指导控制器参数整定,改善系统的动态品质也是极为重要的。

2.4 精度设计与运动学标定

精度问题是并联机床能否投入工业运行的关

键。并联机床的自身误差可分为准静态误差和动态误差。前者主要包括由零部件制造与装配、铰链间隙、伺服控制、稳态切削载荷、热变形等引起的误差;后者主要表现为结构与系统的动特性与切削过程耦合所引起的振动产生的误差。机械误差是并联机床准静态误差的主要来源,包括零部件的制造与装配误差。目前,由于尚无有效的手段检测动平台位姿信息,因而无法实现全闭环控制条件下,通过精度设计与运动学标定改善机床的精度就显得格外重要。

精度设计是机床误差避免技术的重要内容,可概括为精度预估与精度综合两类互逆问题。精度预估的主要任务是,按照某一精度等级设定零部件的制造公差,根据闭链约束建立误差模型,并在统计意义下预估刀具在整个工作空间的位姿方差,最后通过灵敏度分析修改相关工艺参数,直至达到预期的精度指标。工程设计中,更具意义的工作是精度综合,即精度设计的逆问题。精度综合是指预先给定刀具在工作空间中的最大位姿允差(或体积误差),反求应分配给零部件的制造公差,并使它们达到某种意义下的均衡。精度综合一般可归结为一类以零部件的制造公差为设计变量,以其关于误差灵敏度矩阵的加权欧氏范数最大为目标,以及以公差在同一精度等级下达到均衡为约束的有约束二次线性规划问题。

运动学标定,又称为精度补偿或基于信息的精度创成,是提高并联机床精度的重要手段。运动学标定的基本原理是,利用闭链约束和误差可见性,构造实测信息与模型输出间的误差泛函,并用非线性最小二乘技术识别模型参数,再用识别结果修正控制器中的逆解模型参数,进而达到精度补偿的目的。高效准确的测量方法是实现运动学标定的首要前提。根据测量输出不同,通常可采用 2 类运动学标定方法:①利用内部观测器所获信息的自标定方法,其一般需要在从动铰上安装传感器(如在虎克铰上安装编码器);②检测刀具位姿信息的外部标定方法,其原则上需要高精度检具和昂贵的五坐标检测装置。

2.5 数控系统

从机床运动学的观点看,并联机床与传统机

床的本质区别在于动平台在笛卡尔空间中的运动是关节空间伺服运动的非线性映射(又称虚实映射)。因此,在进行运动控制时,必须通过位置逆解模型,将事先给定的刀具位姿及速度信息变换为伺服系统的控制指令,并驱动并联机构实现刀具的期望运动。由于构型和尺度参数不同,导致不同并联机床虚实映射的结构和参数不尽相同,因此采用开放式体系结构建造数控系统是提高系统适用性的理想途径。

为了实现对刀具的高速高精度轨迹控制,并联机床数控系统需要高性能的控制硬件和软件。系统软件通常包括用户界面、数据预处理、插补计算、虚实变换、PLC 控制、安全保障等模块,并需要简单、可靠、可作底层访问,且可完成多任务实时调度的操作系统。

友好的用户界面是实现并联机床工业运行不可忽视的重要因素。由于操作者已习惯传统数控机床操作面板及有关术语和指令系统,故基于方便终端用户使用的考虑,在开发并联机床数控系统用户界面时,必须将其在传动原理方面的特点隐藏在系统内部,而使提供给用户或需要用户处理的信息尽可能与传统机床一致。这些信息通常包括操作面板的显示,数控程序代码和坐标定义等。

实时插补计算是实现刀具高速、高精度轨迹控制的关键技术。在以工业 PC 和开放式多轴运控板为核心搭建的并联机床数控系统中,常用且易行的插补算法是,根据精度要求在操作空间中离散刀具轨迹,并根据硬件所提供的插补采样频率,按时间轴对离散点作粗插补,然后通过虚实变换将数据转化到关节空间,再送入控制器进行精插补。注意到在操作空间中两离散点间即便是简单的直线匀速运动,也将被转化为关节空间中各轴相应两离散点间的变速运动,因此若仍使关节空间中各轴两离散点间作匀速运动,则将在操作空间中合成复杂的曲线轨迹。为此,必须对离散点密化以创成高速、高精度的刀具轨迹。这不仅需要大幅度提高控制器的插补速率,而且需要有效地处理速度过渡问题。

2.6 关键基础件

关键基础件的专业化和系列化配套是建造高速高精度并联机床,实现产品的可重组和模块化设计,以及大幅度降低制造成本的物质保证。这项工作也是将并联机床推向市场的重要环节。并联机床所需的关键基础件包括功率体积比大的高速电主轴单元、高速高性能直线电机、精密丝杠导轨副、结构紧凑且可调隙的精密滚动球轴承和卡当铰,以及高精度光栅和激光测量定位系统等。目前,国外已有专业生产厂(如德国 INA 轴承公司)开发出不同系列的产品。然而,这些产品在我国还多属空白,或与国际先进水平存在较大差距。

并联机床是机床家族中的一个新成员,目前还处于“襁褓”之中,尚有许多理论与技术问题有待攻克。并联机床是否具有生命力的关键在于能否回答潜在用户“有何理由能说服我购买并联机床而不是传统机床”这一问题。因此,紧紧把握新一代制造设备变革的契机,大力加强对并联机床的理论研究与工程实践,对促进这种新型数控装备早日产品化和产业化,尽快将高新技术转化为生产力具有重要的意义。这一工作将有赖于政府主管部门、机床生产企业和潜在用户的远见卓识,以及机床设计工作者与机器人机构学工作者的通力合作和不懈努力。

参 考 文 献

- 1 Cai G C, Hu M, Cuo B. CIRP Annals, 1999, 48(1) : 333~336
- 2 Huang T, Wang J S, Whitehouse D J. ASME Journal of Mechanical Design, 1999, 121(1) : 26~31
- 3 Huang T, Wang J S, Whitehouse D J. Science in China (Series E), 1999, 42(4) : 425~436 (English version)
- 4 Huang T, Wang J S, Whitehouse D J. In: Proceedings of the 10th World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, Oulu, Finland, 1999.
- 5 Huang T, Whitehouse D J, Wang J S. CIRP Annals, 1998, 47(1) : 347~351
- 6 Huang T, Wang J S, Whitehouse D J. Science in China (Series E), 1998, 28(2) : 384~403 (Chinese version), 1998, 41(4) : 137~145(English version)
- 7 Huang T, Wang J S. In: Proceedings of the 25th Biennial Mechanism Conference, DETC98/MECH -

- 6001, Atlanta, USA, 1998.
- 8 Huang T, Wang J S, Gosselin C M, Whitehouse D J. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 1999, in print.
- 9 Huang T, Wang J S, Gosselin C M, Whitehouse D J. SME Journal of Manufacturing Systems, 1999, in print.
- 10 Kim J, Park F C, Lee J M. CIRP Annals, 1999, 48(1) : 337~340
- 11 Modic S. Tooling and Production, 1994, 60(4) : 13~14 Peter O C. European Production Engineering, 1995, 19: 6~9
- 12 Mou J. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 1998, 37(5) : 669~685
- 13 Pritschow G et al. CIRP Annals, 1993, 42(1) : 449~452
- 14 Pritschow G, Wurst K H. CIRP Annals, 1997, 46(1) : 291~295
- 15 Rehsteiner F, Neugebauer R. CIRP Annals, 1999, 48(1) : 345~350
- 16 Schellekens P, Rosielle N. CIRP Annals, 1998, 47(2) : 1~30
- 17 Valenti M. ASME Mechanical Engineering, 1995, 117(11) : 70~75
- 18 Warnecke H J, Neugebauer R, Wieland F. CIRP Annals, 1998, 47(1) : 337~340
- 19 <http://java.cn.sandia.gov/imt/hexapod/plan>
- 20 <http://www/nsit.gov/public-affairs/factsheet/hex.htm>
- 21 黄田,汪劲松.中国科协第30次青年科学家论坛.北京:航空工业出版社,1999:25~38
- 22 黄田,汪劲松.机械工程学报.1999,35(5):43~47
- 23 黄田,王洋,倪雁冰.见:生产工程分会第8届学术会议论文集.威海,1999:
- 24 黄真,方跃法.并联机器人机构学与控制.北京:机械工业出版社,1997:
- 25 熊有伦.机器人学.北京:机械工业出版社,1993

(编辑 华 恒)

汪劲松 男,1964年生。清华大学(北京市 100084)机械工程学院副院长、首批“长江学者计划”特聘教授、博士研究生导师、国家“百千万人才工程”第一、二层次人选。研究方向:CIMS、并联机床、数控技术、步行机器人、绿色设计。发表论文100余篇。

黄 田 天津市 300072 天津大学