

并联机床发展探讨

Discussion of Parallel Machine Tool Development

中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室 房立金



房立金

中科院沈阳自动化所机器人学重点实验室研究员, 博士研究生导师。1988年毕业于西安交通大学电气工程系, 1992至1996年由国家公派赴俄罗斯留学, 并于1996年获得博士学位。长期从事机器人、并联机床等系统的研究与开发。

机床是装备制造业的核心设备, 经过了长期的发展完善过程, 自18世纪以来已经经历了三个重要的发展阶段。在第一个阶段机床采用的是集中的驱动传动, 由蒸汽机或直流电动机-发电机组集中提供能源, 通过传动系统将旋转运动和动力输送到每台设备, 单台机床不能独立工作。后来交流电动机的问世, 使机床

并联机床研究正从早期的追求“纯”并联方式向具有实际应用前景的串并联混合结构方式转变。

进入了第二个发展阶段。机床改由一台或多台交流电动机驱动, 克服了集中驱动方式的不足。第三个阶段是机床的数字化控制和信息化阶段。在这一时期, 电子和计算机技术与机械加工过程联系起来, 机床开始采用伺服驱动和数字控制。而这一类采用数字控制或计算机控制的机床也被人们称为数控机床。

数控机床在高精密高效率机械加工领域扮演了重要的角色, 特别是多轴联动、可加工复杂零件的高档数控机床更是成为竞争的制高点。西方国家也把高档数控加工技术列为其技术出口限制范畴。

随着制造技术的发展, 对生产过程的要求不断提高, 特别是对资源环境方面的要求越来越高, 要求机械加工过程更加高效、精密、清洁, 更加节省资源。

并联机床属于新结构机床, 其主要特征在于机床中采用了不同于传统机床的并联机构。1994年的芝加哥机床展览会上, Giddings & Lewis公司和Ingersoll公司分别推出了基于并联机构的六足机床。当

时被媒体誉为“机床结构的重大革命”、“21世纪的数控加工装备”。并联机床逐步成为制造业的研究热点, 从而引起了各国机床行业的极大兴趣和广泛关注。

并联机构在诸多领域的成功应用

并联机构本身的研究和应用很早就已经开始了。1947年, 英国人Gough采用并联机构设计了一种6自由度的轮胎测试机, 这种机构被称为六足结构(Hexapod)。1965年, Stewart的著名论文问世, 他设计了一种含有3个支链的6自由度运动平台, 并提出将其应用于飞行模拟器。Stewart通过研究论文的方式第一次向世界展示了并联机构, 引起了学术界的兴趣, 人们也常将这类并联机构称为Stewart机构。1964年美国工程师Klaus Cappel提出了一个称为八面体的六腿机构并利用并联机构建造了世界上第一个飞行模拟器。至今, 由并联机构构造的多种运动模拟器得到了广泛应用。

1978年, 澳大利亚机构学家

Hunt 提出将并联机构应用于机器人操作,并联机构在机器人研究领域得到关注,在并联机器人运动学求解算法、动力学性能分析、误差建模与分析、并联机器人机构设计及并联机器人应用等方面进行了深入的研究,产生了很多理论和应用研究成果。这些成果同时也成为并联机床研究与开发的理论和技术基础。

并联机床的技术优势

并联机床以空间并联机构为基础,使将近两个世纪以来以笛卡尔坐标直线位移为基础的机床结构和运动学原理发生了根本变化。并联机床以桁架杆系结构取代传统机床的悬臂梁和两支梁结构来承载切削力和部件重力。具有刚度高、动态性能好、模块化程度高、易于重构以及机械结构简单等优点。

并联机床最明显的优势是其桁架结构带来的良好的刚度特性。典型的对比是工业机械手串联机构。20世纪80年代,机械手被应用于汽车产业并得到了巨大发展。其主要应用是点焊、弧焊、喷涂、上下料作业。这些机械手工作在结构性环境中,按照事先示教编好的程序重复不断地工作。机械手是由多个关节串联而成,作业空间大,运动灵活,适合于上下料、焊接作业等场合。但机械手的刚度特性较差,难以达到很高的运动精度,也难以承受较大的载荷。这些缺点决定了机械手不能应用于机械加工。而并联机床则从原理上就具有很好的刚度特性和承载能力,可满足机械加工要求。

并联机床的另一个优点是其模块化结构。比如典型的6自由度Stewart机构是由6个完全相同的连杆分支支撑运动平台。分支的模块化特点使机床的设计加工等多方面得以简化。

此外,并联机床桁架结构的特点使机床具有良好的刚度重量比,单位

刚度的机构本体重量得以大大减小,可大量节省钢材,在当今全球资源环境日益紧张的形势下意义重大。

传统数控机床主要是简单的串联直角坐标轴,或带有一两个旋转坐标轴的结构。机床的运动关系比较清晰,运动学求解也较为简单。坐标轴之间没有复杂的耦合关系,操作直观简单。但是为了满足机械加工的精度,要求各坐标轴具有很高的刚度,因此机床的尺寸和重量都比较大。

与传统机床不同,并联机床的刀具轨迹是“虚轴”运动的结果,“实轴”(杆件)需要按照一定的运动学解算规律进行运动才能得到要求的“虚轴”轨迹。因此并联机床从运动机理上就是“多轴联动”的。这也是并联机床与传统机床相比所具有的一个优势。并联机床可以方便地实现空间复杂轨迹的运动,用于模具等复杂零件的加工。

并联机床桁架结构的优点极大地改善了机床的刚度重量比指标,极大地节省了机床的材料消耗,具有很好的发展前景。

并联机床的研究开发与应用

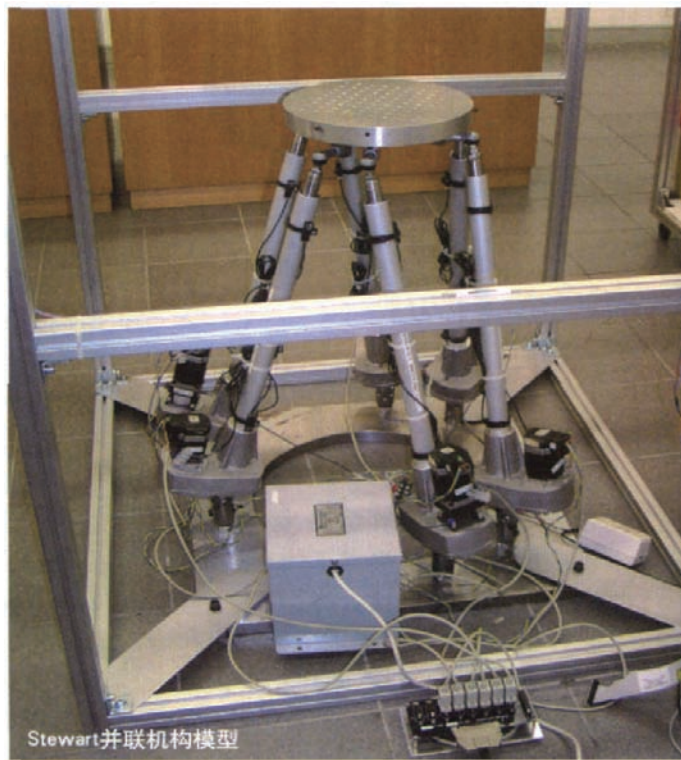
在并联机床研究方面,欧洲开展得最为深入,其研究开发工作由机床企业、大学和其它研究机构共同协作进行。1998年起在德国定期举办与并联机床密切相关的国际会议(Parallel Kinematics Seminar PKS),至今已进行了5届,成为并联机床研究领域最重要的国际会议之一。

在并联机床研究初期,其典型的机构形式是Stewart平台机构。Stewart平台是由安装在基座上的6根可伸缩的连杆支撑一个运动平台

而构成,每个连杆的两端通过铰链与基座和运动平台相连接。运动平台具有6个空间运动自由度,可实现平台的移动和转动。国外典型产品的代表有Ingersoll公司的Octahedral Hexapod,Hexel公司的Tornado,德国Mikromat公司的6X型机床,日本OKUMA公司的并联机床等。

并联机床在我国也得到广泛关注和重视。1997年在国家“九五”科技攻关计划中立项支持了中科院沈阳自动化研究所提出的并联机床研究项目,该所与清华大学、华中理工大学及大连机床集团联合研制成功五轴联动并联结构数控机床。

此外我国在国家自然科学基金、863及其它多种科技计划中也对并



联机床有关研究给予了广泛支持,促进了并联机床研究的发展,研制出多种并联机床。如大连机床集团与清华大学联合研制的DCB-510并联机床,齐齐哈尔第二机床厂与清华大学共同研制的大型龙门式五轴联动混联机床等。

2008年哈尔滨量具刃具集团有

限责任公司引进使用 Exechon 公司并联机床最新专利技术推出了新一代并联机床 LINKS-700, 标志着我国并联结构数控机床研究开发的新阶段。在 LINKS-700 中使用了 Exechon 公司的最新并联结构单元, 有效提高了机床的刚度和精度指标。从并联结构总体形式上可以看出, LINKS-700 机床中的并联单元是早期并联结构单元 Tricept TR845 的改进形式。

在并联机床设计开发过程中, 首先需要从原理上完成机床机构的运动学求解问题, 并在运动控制中实时



某种形式的机床并联单元仿真图

地使用运动学解算结果, 因此对并联机床的数控系统提出了较高的要求。

在机床结构设计方面, 为了方便工件装夹, 多数机床采用了基座和运动平台倒置的形式, 将运动平台置于基座的下方, 而基座则设计成一个更大的固定部件用以提供良好的基础支撑。倒置形式的不足之处是带来了机床总体积和总重量的增加。

标准的 Stewart 并联平台机构存在着作业空间较小的问题。设计人员在并联结构设计中结合不同机床的具体特点, 对并联机构进行了相应的改变, 设计出了多种不同形式的并联结构机床。

减少机床并联部分的自由度数目有利于在其结构设计中采用低副结构, 进而有利于提高机床关节部件的刚度和运动精度。

将并联单元作为机床的一个“部件”来设计, 机床的总体工作空间将由串联部分和并联部分共同组成, 因此实际上也可以回避并联机构本身带来的工作空间过小的问题。

并联机床面临的主要技术问题及解决思路探讨

并联机床由 Stewart 机构或其演化机构构成, 具有并联桁架结构的特点, 理论上具有较好的刚度重量比和较强的承载能力, 也具有很高的运动精度, 但在实际系统设计过程中发现, 实现其理论上的精度和刚度指标是困难的。这些困难主要来自机构关节部分的设计, 即在实践中难以实现理想的高精度运动关节。

此外, 虽然并联机床的桁架结构可以提高并联机构部分的刚度重量比, 但是如果从机床总体的角度来衡量, 则会发现大多数并联机床都是采用倒置的并联机构形式, 都需要一个庞大的支撑架作为机床的床身。因此实际上机床总的体积和重量并没有明显减少。

尽管并联机床仍存在许多不足之处, 甚至有些技术问题至今尚没有得到全面和根本上的解决, 但是, 作为一种处于成长过程中的新形式机床, 随着研究工作的深入, 许多技术难点正在逐步得到解决。

1 机床的关节运动精度问题

1994 年, 当并联机床首次在机床展览会上出现时, 人们对并联机床的认识还不够深入, 对其技术难点的认识不够充分。

随着研发应用过程的深入, 人们逐步加深了对并联机床的了解, 逐步开始理性地看待并联机床的潜在优势和所面临的技术难题。

归纳起来, 并联机床所面临的

突出技术问题主要体现在两个方面: 首先是并联机床的精度问题, 其次是并联机床的工作空间问题。而影响并联机床精度的主要因素包括两方面, 即分支两端运动关节的精度以及并联机构参数的标定。

并联机床运动平台和杆件的结构刚度是比较容易保证的, 主要运动副为球关节, 而这种关节的设计和实现则比较困难。要求能够灵活地转动同时又要在工作空间范围内高精度地传递力和运动。

如果关节的运动是非线性的, 则会对平台的精度造成较大的影响, 即使关节间隙做到很小, 其运动中心坐标也会在一个小的空间内波动, 形成误差。

并联机构关节的研制成为并联机床研究中最重要技术问题之一。

另外, 并联机床需要对所有并联机构关节的三维坐标进行精确标定, 获得准确的关节中心点的三维坐标, 进而得到准确的分支杆长度数据, 保证运动学计算结果的正确性。

在机床驱动和运动控制方面, 假设关节的运动具有良好的重复性, 即关节中心始终是在一个稳定的中心点上转动, 这时也同样需要通过标定得到这个中心点的坐标值。但是由于关节的运动中心是一个虚拟点, 无法直接测量, 只能采用间接的测量方法, 这不仅增加了标定环节的困难, 也将最终导致整个机床误差的增加。

实际上, 并联机构关节并不能始终位于理想中心位置转动, 而是在某个小的空间内作不规则的摆动。

并联机床走向实用化, 首先要研究解决的正是上述关节设计和关节参数标定两方面问题。

2 机床的有效工作空间问题

并联机床的工作空间是影响其应用的另一个重要因素。

与机械手及传统机床机构相比, 并联机床的工作空间要小很多。如果我们定义机械手或并联机床的工

作空间与其自身尺寸的比值为“有效空间比”，则并联机床的有效空间比要小很多。

不仅如此，在考察其有效工作空间时，如果将姿态空间和位置空间同时考虑，则并联机床的有效工作空间还要更小。这是因为，在并联机床工作空间的边缘，运动平台已经无法改变其姿态。实际使用时只能在其整个工作空间中选取既可满足位置要求同时又能满足姿态要求的子空间作为并联机床的有效工作空间。

因此就其有效空间来衡量，并联机床存在明显不足。因此，采用基于 Stewart 机构类型的“纯”并联机构并不是最佳选择。

在并联机床设计中将传统机床的导轨和龙门等结构与新型并联结构混合使用，是解决上述问题的有效途径之一。我们在五轴并联结构数控机床设计中即采用了这一设计思想，有效解决了并联机床有效工作空间过小的问题。

3 串 / 并联混合结构设计

综合分析并联机床的发展历程，采用少自由度并联机构，结合传统机床的串联机构，构成混联形式的新型机床是可行的技术途径之一。

虽然采用少自由度并联机构带来了机构约束方面的困难，但这类技术问题可以通过借鉴传统数控机床的相关技术措施加以解决。

2008 年，哈尔滨量具刃具集团有限责任公司研制成功新一代并联机床 LINKS-700。这一成功案例也从一个侧面表明，并联机床研究正从早期的追求“纯”并联方式向具有实际应用前景的串并联混合结构方式转变，LINKS-700 机床也正是这一发展趋势的典型诠释。

认识与结论

通过本文以上部分的综合分析，可归纳出如下主要结论：

(1) 传统机床的串联结构在机床的刚度重量比方面存在不足，以当

前时代的资源环境条件需要产生新的技术变革。并联机床的并联结构则可以弥补传统机床串联结构带来的诸多不足。

(2) 虽然目前并联机床依然面临诸多技术问题需要解决，但并联机床作为新一代机床的代表，依然具有良好的发展前景。

(3) 综合而言，并联机床当前需要解决的主要问题仍然表现在机床精度、刚度和作业空间等方面。随着研究工作的深入，不断涌现出新的研究成果，但上述问题依然没有得到全面彻底的解决。

(4) 采用串 / 并联混合结构是解决并联机床精度和工作空间等问题的有效途径之一。

(5) 并联机床关节参数的标定也是机床设计研制的重要内容之一，同时也是影响其走向应用的重要方面，需要在标定原理、标定工具以及技术方法等方面加以深入研究。

(责编 侧卫)



德国 SPRENGER 机械、电动式装配/推削用压机

Maschinenbau
Entwicklungen

德国 SPRENGER 机械、电动式装配/推削用压机经 40 多年专业设计和不断改进，现已广泛应用于各类机械的装配，如压进、推出轴筒、套类零件等。

同时也可使用推进型拉刀来洁净高效地制作各类花键槽。

特点

| | |
|--------|--------|
| ★ 高压力 | ★ 操作简单 |
| ★ 长行程 | ★ 可靠安全 |
| ★ 坚固设计 | ★ 节省空间 |
| ★ 高效装配 | |



T5-M01
电动式压机



T3、T5
机械式压机

广告索引号 08-070



中国总代理 上海德物机械有限公司 地址：上海市中山北路2130号万千大厦2001室 电话：021-52914389 52919640 传真：021-52917098
 电邮：sales@dimoral.com 网址：http://www.dimoral.com/