

并联构型装备的研究进展及若干关键技术

汪劲松, 李铁民, 段广洪

(清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084)

[摘要] 并联构型装备正处于商品化、产业化的关键时期。文章从结构、应用领域、驱动方式、控制等方面阐述了并联构型装备的研究进展, 介绍了国际上的一些主要研究计划, 分析了产业化进程中的若干关键技术及其可能的解决方案。

[关键词] 并联机构; 并联构型装备; 驱动; 控制系统

[中图分类号] TH122 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)06-0063-08

并联构型装备已成为制造业目前的研究热点之一。与串联构型相比, 并联构型具有刚度好、精度高、高速和高加速度等特点, 众多研究机构和制造企业都看好其在制造领域的应用前景。目前多种并联构型装备已经被设计和开发出来, 应用的领域涉及机床、机器人、定位装置、娱乐、医疗卫生等。研究人员正试图开发出在速度、刚度、精度和费用等方面更优的并联构型装备, 以便在与传统制造装备的竞争中占据更有利的地位。

1 并联构型装备的发展及特点

结构中包含一个或多个并联机构的机器称为并联构型装备。只要是多自由度, 驱动器分配在不同回路上的闭式多环机构均可称为并联机构^[1]。

关于并联机构最早的文献出现在19世纪末^[2]。20世纪中叶, 罗马尼亚人 Gough 采用并联机构设计了一种六自由度的轮胎测试机(见图1), 这种结构被称为六足结构(Hexapod)。1965年, Stewart 将一种并联机构用于飞行模拟器(见图2), 它包含三个支链, 每个支链上分别通过一个固定平台上的旋转关节和一个可伸缩连杆来控制^[3]。这种机构具有六自由度, 被称为 Stewart 平台。1978

年, 澳大利亚机构学家 Hunt 提出并联机构可以应用于机器人操作^[4]。此后若干年, 并联构型装备的研究进展缓慢, 主要是受到计算机和伺服控制技术的限制, 计算6个支链运动的时间和物质花费太大。但一些经济实力雄厚的部门已开始使用并联机构, 主要应用于航空、航天等领域^[5,6]。随着计算机技术的发展, 尤其是计算快速、功能强大的工业PC出现之后, 促进了并联机构的应用和发展^[7]。80年代后期, 几种基于并联结构的机器人相继出现, 它们普遍具有较高的速度和加速度, 动态特性好, 在装配行业得到很好的应用^[8]。但这种机构真正引起轰动是在1994年的芝加哥机床展览会上, Giddings & Lewis 和 Ingersoll 分别推出了基于并联机构的六足机床, 被媒体誉为“机床结构的重大革命”、“二十一世纪的数控加工装备”。从此并联构型装备一直是制造业的研究热点之一。

这种结构的主要特点是^[9-11]:

- 1) 杆件只受拉压, 不受弯曲应力;
- 2) 刚度高, 承载能力与整机质量比大;
- 3) 移动部件质量小, 可获得很高的动态特性;
- 4) 零件标准化程度高, 易于实现模块化设计;
- 5) 作业空间与机器尺寸比小;

[收稿日期] 2001-10-29; **修回日期** 2001-12-30

[基金项目] 国家973重点基础研究资助项目(G1998030607)

[作者简介] 汪劲松(1964-), 男, 重庆市人, 清华大学教授, 博士生导师

- 6) 灵活性较差, 运动平台倾斜角度较小;
- 7) 作业空间存在杆件干涉和奇异位变形危险。

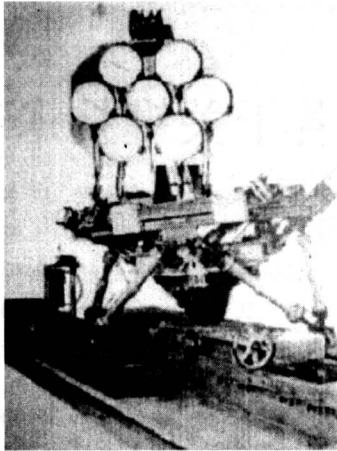


图 1 Gough 的轮胎测试机

Fig.1 Type testing platform designed by Gough

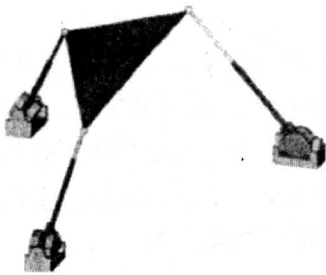


图 2 Stewart 平台

Fig.2 Stewart platform

2 并联构型装备的研究进展

2.1 应用领域

根据德国机床研究所提供的数据, 目前大多数并联装备应用于机床、定位装置和机器人领域, 其

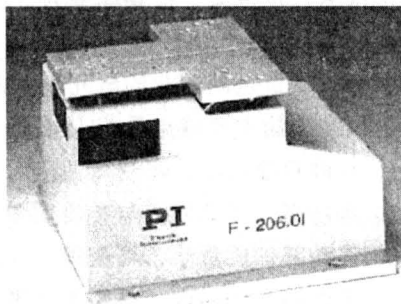


图 4 PI 公司的 F-206 精确定位系统

Fig.4 F-206 for accurately positioning tasks developed by PI Company

中机床所占比例最高 (见图 3)。但在该领域, 样机数量远远超过商业用机, 比例是 7:3。机器人领域的情况则相反, 60% 已投入实际工业应用, 40% 是样机。定位装置领域的情况与机床领域类似。

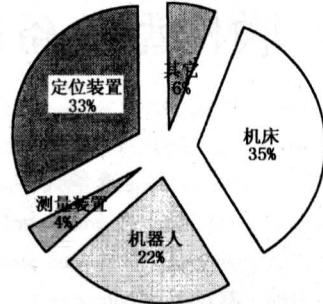
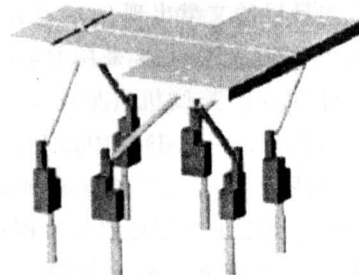


图 3 并联构型装备的应用

Fig.3 Application of parallel kinematics machines

不久前出现了混联结构, 也就是机构中至少包含一个串联和一个并联运动机构。这种结构在机器人领域得到广泛应用, 约占该领域整个并联装备的 40%。从总体上看, 混联结构的装备只占整个并联装备的 20% 左右。同纯并联机构相比, 由于末端执行器具有更大的倾斜角度, 混联机构的作业空间与机器尺寸比较大, 适合需要灵活性较高的环境, 但其刚度稍差, 所以在对刚度要求很高的机床或定位装置中, 纯并联结构的机器占 90% 以上。

2.1.1 定位装置 并联机构在光学和微定位领域有很好的应用, 主要是发挥其刚度高、运动误差无累积的特点。定位装置一般采用纯并联结构 (大多数是基于六足结构的六自由度系统), 个别采用平面或混联结构。驱动装置一般采用滚珠丝杠, 个别需要较小行程的设备采用压电驱动^[12]。图 4 是 PI 公司开发的高精度定位装置 F-206^[13], 采用定长杆结构, 其 x 、 y 和 z 方向的移动距离为 6 mm,



绕 x 、 y 和 z 轴的旋转角度为 $\pm 5^\circ$ ， x 、 y 和 z 方向的最小增量运动为 $0.1 \mu\text{m}$ ，设计分辨率为 $0.003 \mu\text{m}$ ， x 、 y 和 z 方向最大速度为 10 mm/s ，最大承载能力为 2 kg ；可应用于光子包装、光学设备测试、定位及调整装置、光纤定位、微细加工、微操作（生命科学中）、半导体操作系统、微手术操作。

2.1.2 机器人 并联构型装备在机器人领域的应用主要集中在两个方面，一是提供高加速度和高速度，二是提供高于串联机器人的承载能力和刚度。

在需要快速移动能力的包装行业，并联机器人得到广泛应用。比较成功的例子有三轴搬运系统 Delta 和六轴搬运系统 Hexa（见图 5 和图 6），均使用肘关节驱动，质量轻，作业空间大。由于运动部件质量小，最大加速度可达 20 g （Hexa），重复定位精度 0.01 mm 。截至 1998 年底，已经有 250 台 Delta 机器人投入实际生产环境。在制造领

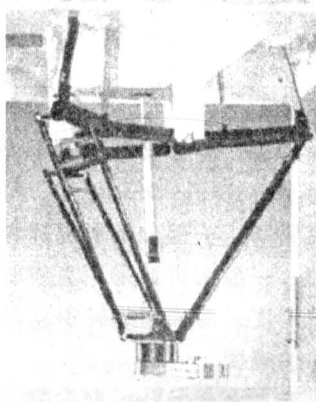


图 5 Demaurex 公司的高速机器人 Delta

Fig.5 High speed parallel manipulator—Delta, developed by Demaurex

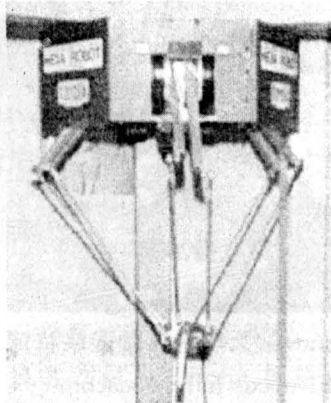


图 6 六自由度并联机器人 HEXA

Fig.6 Six degree freedom parallel manipulator—HEXA

域，使用并联机器人往往可以获得较好的刚度和精度。挪威 MultiCraft 公司的并联机器人就是一个成功的实例，它主要应用于螺旋桨的磨削、门把手的磨削和抛光等（见图 7）。

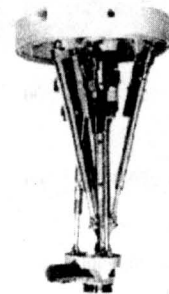


图 7 挪威 MultiCraft 公司的 MultiCraft 560

Fig.7 MultiCraft 560 developed by MultiCraft Company in Norway

2.1.3 机床 目前大多数并联结构机床还处于样机阶段，大约有 30 台，其中 80% 是铣床。表 1 列出了一些并联机床的主要性能指标。

表 1 前五种机床是连杆伸缩结构，后两种采用铰链点移动结构，均使用滚珠丝杠驱动，大部分是纯六足结构，主要面向五轴铣削加工。并联构型机床尚有许多需要完善的地方，例如能够提供给系统设计者更多的标准化零部件，提供给终端用户更加简单的避免干涉和处理奇异点的控制方式等。

目前许多公司正努力研制功能更加完备的并联装备，以实现介于机床和机器人之间的应用，即那些串联机器人无法满足要求（可能由于刚度或精度等方面的原因），以及机床也不适合（可能由于作业空间不够大，或机床造价太高）的操作任务。在该领域，混联结构机器占有很大市场。比较成功的有 Neos Robotics 公司的 Tricept（见图 8）、MultiCraft 560 和应用汽车薄板激光加工的 Georg V（见图 9）。这类机器的末端装有运动手腕，其灵活性高，作业空间与机器尺寸比可达 $1:3$ ，而普通纯并联机器人只有 $1:6 \sim 1:10$ ，传统机床也只是 $1:3 \sim 1:4$ 。在主受力方向的刚度一般为 $6 \sim 30 \text{ N}/\mu\text{m}$ ，运动精度也高于传统串联机器人。以 Neos Robotics 公司的 TR805 为例，其最大速度可达 100 m/min ，加速度 2 g ，主轴功率 45 kW ，最高转速 $24\,000 \text{ r/min}$ ，工作空间可达 $2\,000 \text{ mm} \times 1\,800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$ 。由于末端装有串联式手腕，刀具倾斜角度可达 90° [14]。

表1 并联机床的性能比较

Table 1 Survey of parallel kinematic machines

公司 机床	工作空间(x, y, z) /mm	主轴功率/kW 速度/ $r \cdot \min^{-1}$	最大速度 / $m \cdot \min^{-1}$	最大加速度 / $m \cdot s^{-2}$	刀具可倾斜 角度/ $^{\circ}$	体积精度 / μm
Gidings & Lewis Variax	630×630×630	22 24 000	66	9.8	30	15
Ingersoll HOH-600	600×600×800	37.5 10 000	40	3.5	15	25
Geodetic G 500	500×500×500	10 28 000	13	30	二轴手腕	25
Hexel Tornado 2000	600×600×600	20 20 000	18		30	25
Mikromat 6x	630×630×630	16 30 000	30	10	30	10
Toyoda HexaM	φ500×350	24 000	100	20	20	15
Mikron Triaglide	170×120×170	535 000	25	15	0 三轴	10

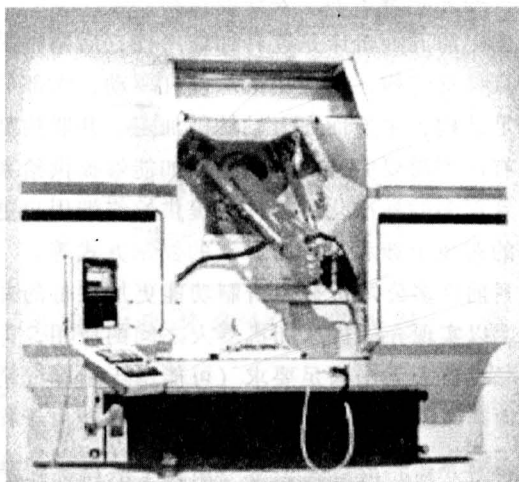


图8 Neos Robotics公司的TR805

Fig.8 TR805 developed by Neos Robotics

2.2 驱动方式

机器驱动方式主要由工作行程、加速度、速度、承载能力和精度等设计参数决定。在不同应用领域，并联装备的尺寸相差很大。在一些微光学应用中，整机尺寸只有几厘米；而在一些五轴机床的应用中，整机尺寸可达几米（例如 Ingersoll 的 HOH600 占地面积为 6 700 mm×5 600 mm）。因此驱动方式也随着应用的不同而不同。对于小型装备，使用压电驱动的例子越来越多。对于面向制造

的铣削和激光加工，尽管机器构型千差万别，大多仍采用传统驱动方式——滚珠丝杠。只有个别装备采用直线电机驱动。一部分带肘部连杆的机器直接利用电机驱动。一般来讲，采用直线驱动的机器可以获得更高的刚度，而采用旋转驱动的机器能实现更高的速度和加速度。

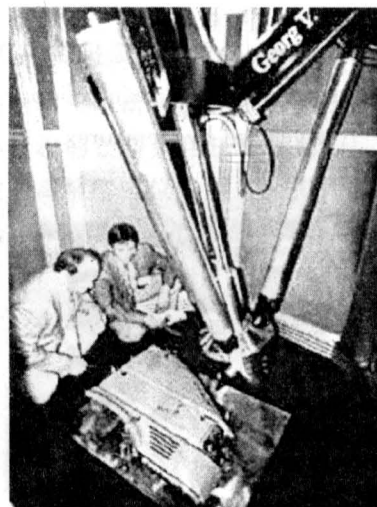


图9 Hannover大学的五轴混联机床 Georg V

Fig.9 Five axis hybrid machine—Georg V developed by Hannover University

在支链伸缩的结构中，为获得更好的运动精度，滚珠丝杠普遍取代了液压驱动。这种结构的优

点是不必在机架上安装直线轨道。由于驱动器要跟连杆一起运动，增加了制造的难度，尤其是增加了驱动杆的质量。在一些机器中，将驱动器安装在铰链内部（例如 Geodetic 和 Hexel），提高了制造精度，降低了由于安装误差带来的运动偏差。图 10 为 Geodetic 开发的球形驱动器。

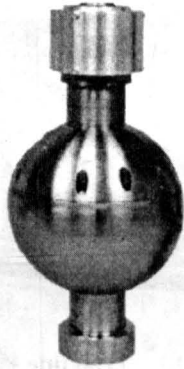


图 10 球形驱动器

Fig.10 Spherical driver

苏黎世 ETH 的 Hexaglide 采用直线电机驱动，减少了传动过程中的机械环节，可获得更大的速度和加速度以及更高的动态特性。因为机械传输不仅大幅度降低了直线运动和动态响应速度，而且存在着反向间隙、摩擦、惯性负载以及结构刚度下降等问题。但直线驱动器受外力（例如切削力、惯性力和摩擦力等）的影响较大。由于各种扰动直接作用在驱动器上，为了保证较高的位姿运动精度，必须具有高质量的运动控制策略和更加精确的力控制方法^[15]。

还有一些非常规的驱动方式，如绳索驱动^[16]；出现了一些新型铰链，如可实现大范围运动的铰链^[17]和应用于微动并联机器人的柔性铰链^[18]；还出现了并联构型的可重构式设计^[19]。

2.3 控制技术

目前已有多家专业公司投身于并联构型装备的控制系统开发。开发出交互式 NC 后置处理器产生器 CAM-POST 的 ICAM 技术公司正在开发并联机床的 NC 后置处理器，图 11 是其为 Tricept 805 开发的专用的并联机床后置处理器^[20]。

TSOR 技术公司为 Tricept 机器人的 Siemens 840D 控制器开发了 CNC 程序的预览器，名为 TRE。操作者可以利用 TRE 运行实际的 CNC 代码，得到三维动画演示，可以在实际加工前检验控制代码是否正确。

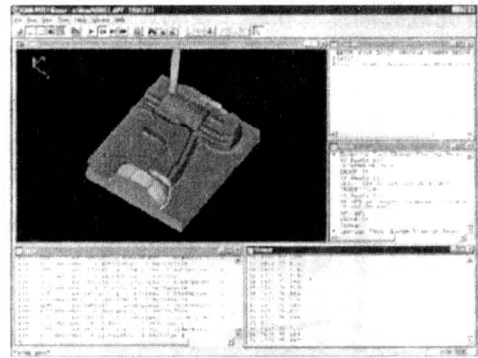


图 11 ICAM 针对并联机床开发的后置处理器

Fig.11 Postprocessor for parallel kinematics machine developed by ICAM

Siemens 公司也开发了专门应用于并联机床的数控系统，技术上的主要特点是：

- 1) 高速加工算法。包括预测算法、进给/加速的前向控制、振动限制等。
- 2) 误差补偿。支链的温度补偿、丝杠的误差补偿、铰链间隙补偿、基于冗余测量的整个系统补偿、自标定。
- 3) 3D 可视化。加工仿真、NC 检验、NC 编程。
- 4) 开放式的 CNC 结构。实时的操作系统、友好的人机交互接口。

2.4 几项重要研究计划

2.4.1 NAMT 计划 由美国 NIST 支持的 NAMT 并联机构研究小组主要进行三方面研究：并联机床性能研究和评价、远程控制技术和满足各种需求的仿真研究。利用 Ingersoll 开发的 Octahedral Hexapod 开展试验，具体研究工作包括：

- 1) 评价、描述和比较这类新型机床的测试过程和标准；
- 2) 为机床使用者提供关于并联机床性能的第一手资料；
- 3) 面向远程试验、信息交互和集成的网络传感器和控制信息；
- 4) 面向机器快速开发的一些仿真工具，例如程序验证、工作空间分析和工件定位等；
- 5) 提高精度的实用技术，例如标定技术、反馈度量系统。

2.4.2 ACROBAT 计划 德国的 ACROBAT 计划的目标是基于 SSM 结构开发一台名为 ACROBAT 的样机（见图 12），从机床（例如高速铣床）和精密零件装配两个方面，进行机器应用的各种评价试

验, 首先进行刚度、惯性、灵活性和精度的评价。

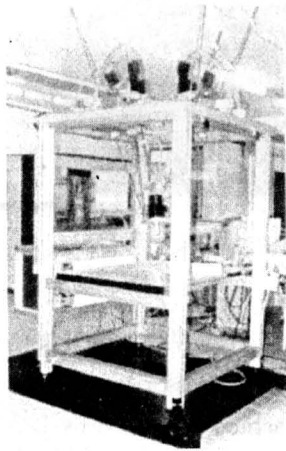


图 12 ACROBAT 的样机

Fig.12 The prototype for ACROBAT

2.4.3 PAR.THE.NET PAR.THE.NET (Parallel machines thematic network, 并联机器主题网络) 由欧洲发起, 目标是在工业界和科研单位之间建立合作关系, 在机床和机器人领域共同致力于并联构型装备的研究和开发。以前, 欧洲主要致力于并联机构的基础研究, 发表了大量文章, 开发了许多试验样机。这种方法存在一定的不足, 因为将产品推向市场的实用化技术是经济发展最具推动力的因素。日本和美国已经率先将该技术应用于实际生产。因此, 在未来几年, 当基于并联机构的机床和机器人广泛应用于机械或相关领域时, 欧洲将落在后面。因此, PAR.THE.NET 应运而生, 它反映了工业界的需求, 也为学术界指明了方向。

2.4.4 ROBOTool 计划 ROBOTool 计划由欧盟委员会投资, 1998 年启动, 研究期限为 24 个月, 总投资 177 万美元, 目标是针对整个欧洲进行并联构型装备的基础研究, 重点是针对机器构型和特殊铰链设计的软件工具开发、测量标定技术、专用 CAM 软件包、控制系统、伺服驱动技术和机电系统等。参加该项目的研究机构有: 意大利的 CNR-ITIA 和技术转让部门、德国的 IFW-Hannover 和 WZL/RWTH Aachen、瑞典的 IVF、比利时的 PMA/KU-Leuven、西班牙的 Ikerlan、法国的 LIRMM、英国的 Delcam plc、瑞士的 Sulzer NTI。

2.4.5 KTI 项目 KTI 项目始于 1996 年 4 月, 目标是研究并联机构在铣床工业中的应用, Hexaglide 就是在该项目支持下开发的。基于 Hexaglide 原型样机的开发, 该项目进行运动学、

标定技术、设计准则、动力学、控制策略和与传统机床的比较分析等方面的研究。此外, 该项目还开发了一台名为 Triaglide 的三自由度并联机床样机 (见图 13)。参加的研究机构有瑞士的 WZMO/KTI、Heidenhain (Schweiz) AG、Mikron SA Agno、W. Schneeberger AG 和 VSM。

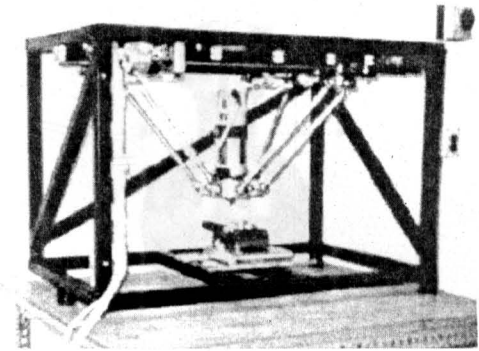


图 13 Triaglide 模型

Fig.13 The model of Triaglide

3 亟待解决的关键技术

3.1 设计

目前的研究主要集中在设计理论、设计方法等方面, 而要实现并联构型的产业化, 必须具备完善的设计手段和设计环境。

由于并联构型的输入和输出运动存在很强的非线性关系, 这给设计带来很大困难, 难以直观地判断和评价一个构型的运动是否可行, 性能是否满足要求。这就要求设计者不仅应具备精深的机构学知识, 还要熟悉机器人和机床的控制。即使这样, 设计中仍然不可避免地会出现构想与实际不相符, 导致设计周期长、工作量大、风险大, 很难适应商品化的要求。因此, 一个能支持并联机床所有设计活动的一体化软件集成环境很有必要^[21]。

清华大学制造工程研究所基于虚拟制造的思想, 开发了并联构型装备虚拟产品设计系统。该系统为设计者提供数字化的设计开发环境, 提供包括并联机构概念设计、运动学设计、整机设计、动力学分析、精度设计、可制造性分析、作业过程仿真与性能分析等方面的分析和设计平台; 为研究者提供并联装备设计方法研究、工作性能分析和作业工艺优化研究平台; 为用户提供各种并联类装备的作业过程、作业效果、作业能力演示平台。该系统融合最新设计理论成果, 提供集成设计和仿真分析环境, 改善了研究手段, 提高了设计质量和效率, 促

进了新型并联装备的开发^[22]。

3.2 精度保证策略

精度问题是并联构型装备能否投入工业运行的一个关键因素。从一般的机床研究观点来看, 提高精度的主要策略是精度分析、综合及补偿。目前提高并联装备精度的主要方法是通过精度设计和运动学标定, 在这方面有相当多的理论研究成果^[23,24]。

并联构型与传统串联构型在运动原理上存在巨大差异, 仅仅依靠上述研究无法克服其全部误差。首先, 并联机构在作业空间中刚度变化很大^[25], 而且同一位形下各个方向上的刚度也存在巨大差异^[26], 导致刀具在作业空间的不同位置、不同姿态以及承受切削力的不同方向都会对零件的精度产生很大影响。因此, 在控制中合理选择末端执行器的位姿对运动精度是至关重要的。Rehsteiner^[27]提出的通过零件合理定位来提高整机性能的思路非同寻常。影响并联机床精度的另一重要问题是控制中的非线性误差^[28], 降低此误差对轨迹精度的影响是提高精度的一个关键问题。提高关键零部件的制造精度和整机的装配精度也是一个有效途径。

3.3 控制

从伺服控制的角度来看, 开发并联装备需要的控制知识与开发传统三坐标、五坐标加工中心或多自由度机器人所需要的没什么不同^[29]。它们之间的最大区别表现在数控装置(CNC)中。由于存在特殊的作业空间、奇异位形、灵活度和刚度等诸多方面的问题, 并联构型装备CNC中必然包括传统CNC所不具备的作业空间检验、奇异检验、刚度 and 灵活度验算等功能^[30,31]。串联结构机床和机器人的传统控制体系及关键技术已经发展到很高水平, 它为并联机床数控系统的研究提供了很好借鉴。如何在继承这些先进思想和技术的同时, 充分发挥自身特色, 是并联构型装备控制系统发展道路上亟待解决的问题。

并联构型装备的驱动坐标系统与工件坐标系统完全不同, 对于普通用户, 如果没有任何帮助工具, 很难正确操作, 同时也给安装和维护带来困难。因此, 一个完备的控制系统除了能够提供必要的控制功能(用户能按照工件坐标系进行控制), 还应该提供一个三维的可视化系统或CAD/CAM工具。该系统能够让用户在机器工作之前检查实际运行情况。系统还应该能够标识临界位形, 例如可能的碰撞或支链的过载等, 应该能够避免机械奇异

位形的发生。只有这样, 这种新型装备才可能被更多潜在用户所接受。

4 结论

由于许多关键技术尚未完全解决, 并联构型装备的实用化进程并没有大多数人想象的那样顺利。对待这样一个新生事物, 既要看到它巨大的发展潜能, 又要保持清醒的头脑。可以肯定的是, 发展只有十余年的并联构型装备现在还无法在广阔的市场同已有几百年历史的串联构型竞争。但它的出现为工业界提供了更多的选择。随着各种关键技术的解决, 并联构型装备肯定会在某些应用领域发挥巨大的作用, 成为串联构型装备的一个有益的补充和有力的竞争对手。

参考文献

- [1] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论与控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997
- [2] Tonshoff H K, Grendel H. A systematic comparison of parallel kinematics [A]. Boer C R, Molinari-Tosatti L, Smith K S. Parallel kinematic machines: theoretical aspects and industrial requirements [C]. London: Springer-Verlag London Limited, 1999. 295~312
- [3] Stewart D. A platform with six degrees of freedom [J]. Proc Inst Mech Eng, 1965, 180(5): 371~386
- [4] Hunt K H. Kinematic geometry of mechanisms [M]. Oxford, Great Britain: Oxford University Press, 1978
- [5] Nguyen C C, Antrazi S C, Zhou Z L, et al. Analysis and implementation of a 6 Dof Stewart platform-based robotic wrist [J]. Computers and Electrical Engineering, 1991, 17(3): 191~203
- [6] Nguyen C C, Antrazi S C, Zhou Z L, et al. Experimental study of motion control and trajectory planning for a Stewart platform robot manipulator [A]. Proc of the IEEE International Conf on Robotics and Automation [C], 1991. 1873~1878
- [7] Aronson R B. Hexapods: hot or ho hum [J]. Manufacturing Engineering, 1997, (10): 60~67
- [8] Pierrot F, Fournier A, Dauchez P. Towards a fully-parallel 6 dof robot for high-speed applications [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C], 1991. 1288~1293
- [9] 汪劲松, 黄田. 并联机床——机床行业面临的机遇与挑战 [J]. 中国机械工程, 1999, 10(10): 1103~1107
- [10] Fitzgerald J M. Evaluating the Stewart platform for

- manufacturing [J]. *Robotics Today*, 1993, 6(1): 1~3
- [11] Hollingum J. Hexapods to take over [J]. *Industrial Robot*, 1997, 24(6): 428~431
- [12] 李嘉, 陈 愚, 董 怡, 等. 并联柔性铰机器人的静刚度研究[J]. *清华大学学报*, 1999, 39(8): 16~20
- [13] <http://www.physikinstrumente.com/micropositioningsystems/>[EB/OL]
- [14] <http://www.neorobotics.com/>[EB/OL]
- [15] <http://www.ifr.mavt.ethz.ch/projects/indRob/hexaglide/hexaglide.html>[EB/OL]
- [16] Albus J, Bostelman R, Dagalakis N. The nist robocrane [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1993, 10(5): 709~724
- [17] Hamlin G J, Sanderson A C. A novel concentric multi-link spherical joint with parallel robotics applications [A]. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]*, 1994. 1267~1272
- [18] Pernette E, Henein S, Magnani I, et al. Design of parallel robots in microrobotics [J]. *Robotica*, 1997, 15(4): 417~420
- [19] Ji Z, Song P. Design of a reconfigurable platform manipulator [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1998, 15(6): 341~346
- [20] <http://www.ad.siemens.de/ipkc/html-76/partners/icam/index.htm>[EB/OL]
- [21] Tossati L M, Bianchi G, Fassi I, et al. An integrated methodology for the design of parallel kinematic machines(PKM) [J], *Annals of the CIRP*, 1997, 46(2): 341~345
- [22] 汪劲松, 朱 煜, 张 华. 并联机床虚拟产品设计系统及基本框架研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2001, 7(5): 57~62
- [23] Patel A J, Ehmann K F. Volumetric error analysis of a Stewart platform-based machine Tool [J]. *Annals of the CIRP*, 1997, 46(1): 287~290
- [24] Patel A J, Ehmann K F. Calibration of a hexapod machine tool using a redundant leg [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, 40(4): 489~512
- [25] Tlustý J, Ziegert J, Ridgeway S. Fundamental comparison of the use of serial and parallel kinematics for machines tools[J], *Annals of the CIRP*, 1999, 48(1): 351~356
- [26] EI-Khasawneh B S, Ferreira P M. Computation of stiffness and stiffness bounds for parallel link manipulators [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39(2): 321~342
- [27] Rehsteiner F, Neugebauer R, Spiewak S, et al. Putting parallel kinematics machines(PKM) to productive work [J], *Annals of the CIRP*, 1999, 48(1): 345~351
- [28] Wang Jinsong, Wang Zhonghua, Huang Tian, et al. Nonlinearity for a parallel manipulator machine tool and its application on interpolation accuracy analysis[J]. *Science in China Series E*, 2002, 45(1): 97~105
- [29] Koepfer C. Hexapod—it's working [J]. *Modern Machine Shop*, 1997, 70(5): 82~88
- [30] 李铁民, 杨向东, 叶佩青, 等. 虚拟轴机床数控系统的研究[J]. *制造技术与机床*, 1999, (2): 13~15
- [31] 李铁民. 并联机床后置处理器的研究[D]. 北京: 清华大学精密仪器与机械学系, 2000

Research and Development in the Field of Parallel Kinematic Machines

Wang Jinsong, Li Tiemin, Duan Guanghong

(*Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

[Abstract] Parallel kinematic machines are in the process of industrialization. In this paper, research and development of parallel kinematic machines is investigated from various aspects including machine structures, application fields, drive principles and controllers. Some important research projects are introduced. Several key techniques and possible development directions are put forward.

[Key words] parallel manipulator; parallel kinematic machines(PKM); drive; control system