

并联机构的发展及应用

彭忠琦

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 绍了国内外并联机构的发展, 通过与串联机构的比较, 详细说明了并联机构的特点及其在各个领域中的应用。六杆并联机构是并联机构的一种特殊形式, 文中具体阐述了其工作原理, 并结合上海第三代同步辐射装置软 X 谱学显微光束线中使用的特殊六杆并联调节机构, 对其特点做进一步说明。

关键词: 并联机构; 六杆并联机构; 应用领域

中图分类号: O432.1; TH112

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112812.0045

Development and Application of Parallel Mechanism

PENG Zhong-qi

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: This paper introduces the development of the parallel mechanism at home and abroad, shows the features of the parallel mechanism and application in various fields by comparison with the serial mechanism. The working principle of the six-bar parallel mechanism was provided as a special form of the parallel mechanisms, and the features were explained by combining with the six-bar parallel mechanism used in the soft X-ray spectromicroscopy beamline of the third generation synchrotron radiation facility in Shanghai.

Keywords: parallel mechanism; six-bar parallel mechanism; application fields

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11079035); 应用光学国家重点实验室开放基金资助项目 (No. 09Q33FQ091)

1 引言

并联机构是一种由多个并行链构成的闭环系统,与传统的串联机构相比,具有高刚度、高精度、高承载能力、结构简单紧凑以及易于实现高速运动等一系列优点,吸引了国内外学术界与工程界的广泛关注,其应用也几乎涉及了现代尖端技术的各个领域。近年来,新型并联机构的研发已成为国际机构学界的研究热点。六杆并联机构作为并联机构的一种特殊形式,具有六个自由度的调节方式,已广泛应用于国内外大科学工程项目,在 21 世纪将具有非常广阔的发展前景。

本文主要介绍了国内外并联机构的研究进展、技术特点以及工程应用;阐述了六杆并联机构的工作原理及特点,并结合上海第三代同步辐射装置光束线,详细说明六杆并联调节机构的应用。

2 国内外并联机构的发展

并联机构的发展大致经历了从一杆到多杆、从平面到空间、从串联到并联的过程,其构想最早可以追溯到 1895 年。1934 年, Polladr 提出采用并联机构作为汽车喷漆装置;1947 年, Gough 提出一种基于并联机构的六自由度的轮胎检测装置;1965 年,英国高级工程师 Stewart 发表了一篇文章《A Platform with Six Degrees of Freedom》^[1],提出了一种六自由度的并联机构,在工程界引起轰动。Stewart 机构最初是作为训练飞行员的飞行模拟器,机舱由六个液压缸支撑和驱动,可以使机舱获得任何需要的位置和姿态,如图 1 (a) 所示。

1978 年,澳大利亚著名机构学教授 Hunt 首次提出把六自由度并联机构作为机器人机构^[2],他应用空间机构自由度计算准则及螺旋理论,对这种机器人进行了结构综合研究,给出了许多结构方案,由此拉开并联机器人研究的序幕。但在随后的近 10 年里,并联机器人研究似乎停滞不前。直到 80 年代末 90 年代初,并联机器人引起了广泛关注,成为国

际研究的热点,美国、日本、德国、中国、俄罗斯、意大利等都研制出各自的 Stewart 机床,这也促进了虎克铰、球铰、导轨、滚珠丝杠控制器等 Stewart 机床专用部件的迅速崛起。

在国内,燕山大学黄真教授于 1991 年研制出我国第一台六自由度并联机器人样机;1994 年研制出一台柔性铰链并联式六自由度机器人误差补偿器,如图 1 (b) 所示;1997 年出版了我国第一部关于并联机器人理论及技术的专著^[3]。另外,清华大学和天津大学于 1997 年联合研制了我国第一台大型镗铣类虚拟轴机床原型样机 VAMT1Y,如图 1 (c) 所示。



(a) PASCAL 飞行模拟器



(b) 六自由度并联机构



(c) VAMT1Y 并联机床

图1 并联机构的发展

并联机构的发展离不开其结构形式的多样化。并联机构平台可在空间实现二、三、四、五、六自由度的运动。 N 自由度的并联机构最多可有 N 条支链,

而且这 N 条支链都应是具有 N 个自由度以上的开式链^[4]。对于六自由度的并联机构，每条支链可以是六自由度的开式链。六自由度的并联机构主要有：SPS，SPT，SRT，STR，STP，SPC，SRP，6R，4RZP，3R3P，ZRZC，4RC，HSS，PSS 等。其中，参数表示含义如表 1 所示。

表1 参数表示含义

S	P	T	R	C	H
球铰	移动副	虎克铰	转动副	圆柱副	螺旋副

表2 并、串联机构主要性能对比

性 能	并联机构	串联机构
刚 度	高：刚性相互叠加，杆件只受拉力和压力	低：弹性相互叠加，杆件受到弯矩
承载能力	高	低
误 差	小：各杆件误差形成平均值	大：各杆件误差相互叠加
定位精度	高	低
运动质量	小：各杆件运动自由，可保持工件与工作台不动	大：一个杆件使跟随杆件加速，杆件及工作台大部分都运动
动态性能	即使杆件尺寸较大，也具有较好的动态性能	随各杆件尺寸的加大而变化
调 节	复杂：需同时调节各杆件	简单：各杆件独立调节

3.2 应用领域

按并联机构的工作特性，将其分成 3 类：运动模拟器，虚拟轴机床和机器人操作器^[6]。由于并联机构本身具有串联机构无法比拟的特点，因此，在新型机床研制、航天器交会对接、体感模拟娱乐机、医疗仪器以及飞行模拟等众多领域得到了广泛的应用和认可。

3.2.1 运动模拟器

基于并联机构的运动模拟器，应用最广泛的是飞行模拟器。Stewart 在 1965 年首次提出一种 6 条腿连接静平台和动平台的六自由度并联机构，作为飞行模拟器。训练用飞行模拟器具有节能、安全、经济、不受场地和气候条件限制、训练效率高等优点，已成为各类飞行员日常训练的必备工具。目前，全球约有 67 家公司生产基于并联机构的各类运动模拟器^[6]。图 2 是 CAE 公司生产的飞行模拟器，图 3 是

3 并联机构的特点及应用

3.1 并联机构的特点

传统的串联机构是由关节顺次联接而成的一个开链式机构，这种机构本身存在着承载能力弱、刚度低及精度不高缺点，较大地限制了其在某些领域中的应用。并联机构则是采用多个并行链构成的闭环机构，与串联机构相比具有明显优势^[5]。与传统的串联机构相比，并联机构的零部件数目也大幅减少，容易实现组装和模块化。两种机构主要性能比较如表 2 所示。



图2 CAE飞行模拟器



图3 波音737-400飞行模拟器

Frasca 公司生产的波音 737-400 型客机飞行模拟器。

3.2.2 并联机床

并联机床是并联机构与机床技术相结合的产物，是并联机构在工程应用领域最成功的范例，与传统数控机床相比较，它具有结构简单、刚度/重量比大、传动链短、速度快、切削效率高、精度高、成本低、响应速度快等优点，容易实现六轴联动，因而能加工复杂的三维曲面。图 4 是瑞士联邦技术学院研制



图4 HexaGlide并联机床 图5 Tricept 600并联机床
的HexaGlide 并联机床, 图5是瑞典 Neos Robotics 公司生产的 Tricept 600 型并联机床。

3.2.3 微动机构与微型机构

值得指出的是, 由于并联机构具有六个自由度, 可以在空间范围内对支撑平台的位置和姿态进行六维调节, 因此, 在高精度调节领域, 并联机构作为精密调节机构同样获得了广泛应用。微动机构已经成为并联机构另一个重要的应用方面, 利用并联机构做为微动机构充分发挥了并联机构的特点。目前主要用于微电子、精密机械工程、生物和遗传工程、医学工程以及材料科学等要求高精度操作与加工的领域, 具有非常广阔的应用前景。图6是德国PI公司研制的Nonapod微动并联机器人, 图7是PI公司研制的M-850微动并联机器人在医学中的应用。



图6 Nonapod微动并联机器人 图7 M-850微动并联机器人

3.2.4 宇宙飞船的空间对接

宇宙飞船的空间对接是完成空间组装、人员更

换、补给物品、维修及回收等作业的先决条件。自上世纪80年代, 并联机构已成为空间对接机构领域的研究热点。美国、法国、德国、英国、俄罗斯等发达国家的研究机构均展开了对并联机构的研究, 并已研制出多种样机。图8为航天器对接装置。



图8 航天器对接口

3.2.5 其他领域的应用

并联机构应用领域还包括天文望远镜、航空航天领域、加工制造、装配、轻工业、测量作业、焊接、铆接、土方挖掘、煤矿开采、娱乐设施等很多方面。如图9为大型射电天文望远镜调姿装置, 图10为基于并联机构设计的机械灵巧手。



图9 大型射电天文望远镜调姿装置 图10 机械灵巧手

4 六杆并联机构的应用

4.1 工作原理

六杆并联机构原型为Stewart机构, 是并联机构的一种特殊形式, 承载能力强, 调节精度高, 具有六个自由度, 已广泛应用于国内外不同领域的工程

研究中。图 11 为两种常用的六杆并联机构：6-SPS 和 6-RSS 机构。其中，数字“6”代表分支数；SPS、RSS 表示分支运动链结构，具体说明如下：SPS 由球面副 S、移动副 P 和球面副 S 串联而成，RSS 由转动副 R、球面副 S、球面副 S 串联而成。

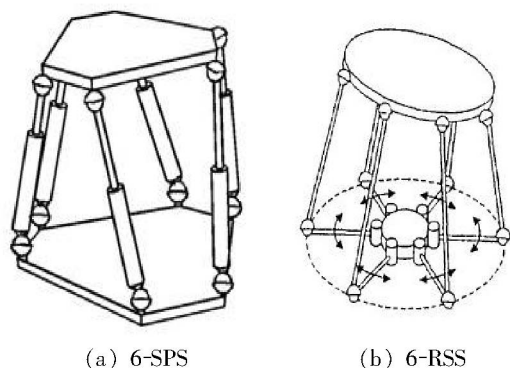


图 11 常用六杆并联机构

从结构上看，六杆并联机构的动平台通过 6 根支杆与定平台相联接，6 根支杆都可以独立地自由伸缩，每根支杆含有 1 个联接动平台的球铰、1 个移动副和 1 个联接定平台的球铰，这样，上、下平台就可进行六个独立运动，即有六个自由度，在三维空间可以作任意方向的移动以及绕任何方向、位置的轴线进行转动。

4.2 六杆并联机构在同步辐射光束线中的应用

在我国上海第三代同步辐射装置软 X 谱学显微光束线中，为使系统调节更为简便，采用了一种如图 12 所示的特殊形式六杆并联调节机构，图 13 为其在光束线中的实际应用。与图 11 中介绍的六杆并联机构不同，将其支杆分为 3 根竖直支杆和 3 根水平支杆，如图 12 (a)、(b) 所示。支杆长度以差动螺旋方式进行微动调节，操作简单，节省空间，有利于同时保证机构对高分辨率和高强度的要求。

作为束线工程中单色器、前置镜和后置镜系统的调节和承载基体，需支撑包括镜箱在内的大部分零部件，承重量较大，因此，要求六杆并联机构必须具有足够的强度和刚度，才能保证系统调节的稳定性和可靠性。通过利用有限元方法进行分析^[6]以及机构的实

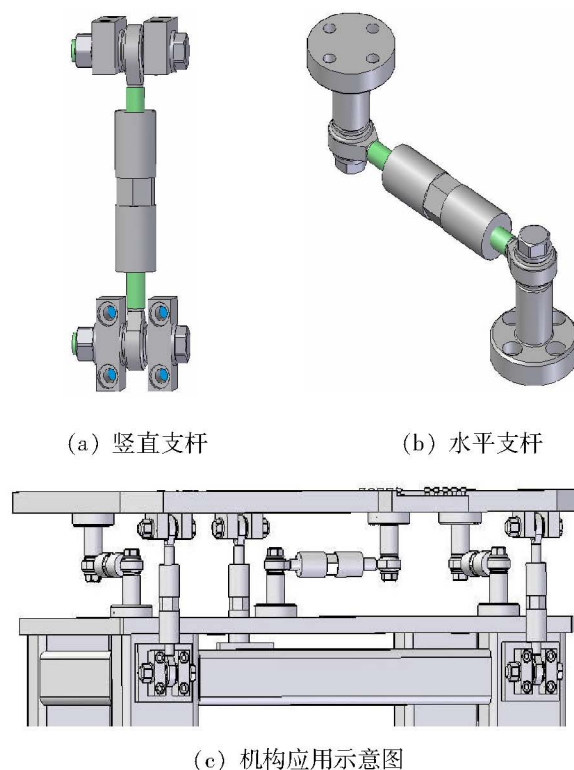


图 12 六杆并联机构



图 13 光束线六杆并联机构的实际应用

际操作结果可判断，此处应用六杆并联调节机构可以很好地解决上述问题，有利于束线机构的调试，为整条光束线支撑结构的稳定性提供了有力的保障。

5 结 论

并联机构凭借自身的高刚度、高精度、结构稳定、高承载能力以及易于实现高速运动等一系列优点，被广泛应用于新型机床研制、航天器交会对接、体感模拟娱乐机、医疗仪器以及飞行模拟等众多现代尖端技术领域。本文详细介绍了国内外并联机构

的发展现状,通过与串联机构的对比,阐述并联机构的特性及应用领域。六杆并联机构是并联机构的特殊形式,是一类性能优越的机构。结合上海第三

代同步辐射装置光束线中所使用的六杆并联机构,介绍了其工作原理和应用前景。

参考文献

- [1] Stewart D. A platform with six degrees of freedom[J]. *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1965, 180(15): 371-378.
- [2] Hunt K H. *Kinematic Geometry of Mechanisms*[M]. Oxford: Claredon Press, 1978.
- [3] 黄真,孔令富,方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [4] 文福安,杨光. 并联机器人机构概述[J]. *机械科学与技术*, 2000, 19(1): 69-72.
- [5] Dasgupta B, Mruthyunjaya T S. The Stewart platform manipulator: a review[J]. *Mech. Mach. Theory*, 2000, 35(1): 15-40.
- [6] 黄真. 并联机器人及其机构学理论[J]. *燕山大学学报*, 1998, 22(1): 13-16.
- [7] 黄昔光,何广平,谭晓兰,等. 并联机器人机构研究现状分析[J]. *北方工业大学学报*, 2009, 21(3): 25-31.
- [8] 李勇军. 同步辐射光束线六杆并联调节机构的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所硕士学位论文, 2008.

作者简介: 彭忠琦 (1957-), 男, 吉林榆树人, 高级工程师, 主要从事同步辐射光束线关键技术的研究。

E-mail: pengzhongqi@126.com