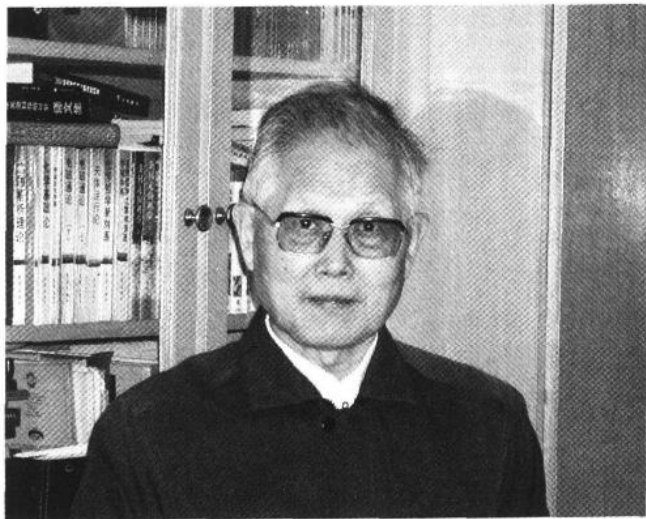


序 言 一



制造业是生产物质财富的产业。各类制造业所用的各种装备，大多数是用机床加工制造出来的，因此机床（也称工作母机）是装备制造业的基础。一个国家的机床制造水平与能力，是国家综合水平与能力的重要方面。我国在提高人民生活水平、加强国防能力的社会

主义建设中，以及参与经济全球化的竞争中，机床技术的发展和提高，无疑地将起到很大的作用。

并联运动机床是近年发展起来的一种新一代机床，其工作原理和结构，与传统的以笛卡尔坐标为基础的串联运动机床，有很大的不同。与传统机床相比，并联运动机床具有结构简单、刚度高、动态性能好、速度快、可重构等优点。由于它易于实现较复杂的空间运动，因而具有十分广阔的应用前景，是加工复杂零件的一个生力军。

近年来，世界上许多高等学校、科研机构 and 大型机床制造企业，都致力于开发各种并联运动机床，使得这一新技术逐渐趋于成熟，开始在生产实践中获得应用，并取得了很好的效果。

我国不少高等学校与科研院所在这方面也开始进行了研究工作，取得了一定的成果。但大部分企业对此还认识不足，在研究水平、规模和速度上，尚不能与国外先进水平相比。因此，必须引起工程技术人员对此新技术的注意和重视，大力推动这一新技术的发展，使我国能够迅速赶上国外先进水平。

本书对并联运动机床的工作原理、结构设计、系统控制、性能试验等各方面作了系统阐述，并通过若干实例进行了全面介绍，行文流畅，深入浅出。本书重在对此新技术系统全面介绍，而不拘泥于过多繁琐的并联机构复杂空间运动关系的数学推导，这种撰写思路非常适合大专院校师生和广大工程技术人员的迫切需要，是一本很好的高水平专著，无疑将对并联运动机床这一新技术在我国的发展和推广起到很大的作用。

人民要提高，社会要进步，国家要建设，而技术的不断创新和进步，则是一个永远的话题，本书的意图即在于斯。

中国工程院院士

周勤之

2002年12月1日于上海

序言二



《并联运动机床》一书从机床发展的历史角度，详细地介绍了它的产生和发展，系统阐述并联运动机床的运动学、结构设计、元器件、控制系统、性能试验、仿真优化等方面的内容，并对几种典型的并联运动机床进行了案例分析，内容非常丰富。

本书结构严谨，文笔流畅，层次分明，条理清晰，是我迄今为止第一次看到的、从数控机床角度全面而系统地介绍并联运动机床的著作。

这本书的特点是理论分析深入、应用技术论述全面，内容广泛，材料充实。书中不仅包括并联运动机床的工作原理、设计方法和性能分析，而且对国内外并联运动机床技术作了全面介绍，十分重视理论分析与工程实践的有机结合。在系统介绍并联运动机床基本理论的基础上，深入地讨论了并联运动机床的工程实践问题。

作者采用多媒体技术制作光盘，使难以在纸面上理解的空间机构成为生动的画面、动画和电影，引人入胜，使人一目了然。

我深信，本书对从事机械制造及自动化领域的高等学校教师、工程技术人员、研究生和大学生都具有很大的参考价值。它的出版必将推动并联运动机床的发展。

中国工程院院士

蔡鹤皋

2002年12月4日于哈尔滨

中 文 前 言

机床是生产各种机械的工作母机，机床工业是保证国民经济健康发展的基础工业，机床工业的发展水平是一个国家工业化水平的重要标志。

自18世纪英国工业革命以来，机床历经了三个重要的发展阶段。

第一个阶段的特点是天轴集中传动。即用机械动力代替人力，促使车削、铣削、磨削、齿轮加工等不同工艺方法相继出现，一直延续到20世纪20年代，才形成了近代制造工业。

第二个阶段的特点是采用交流电动机驱动和齿轮变速。它导致机床机械化和自动化的迅速发展，出现了以汽车工业为代表的大批量生产的自动化生产线，在二次世界大战后的20世纪60年代达到了顶峰。

第三个阶段是机床的数字控制。从1954年美国麻省理工学院研制成功第一台数控机床以来，经过近半个世纪的发展，数控机床已经在工业生产中获得了广泛应用，并成为当前机床工业的主流产品。

提高产品质量、降低成本和缩短产品开发周期，是企业取得市场竞争优势的基础。这就要求不断提高加工过程的精度、速度和柔性。面对这种激烈竞争的挑战和压力，世界各地的机床研究机构和某些具有创新思想的机床公司都在探索新一代的机床。1994年开始出现、并正在迅速发展的并联运动机床（有时称为6腿机床、虚拟轴机床等）就是这种执着追求的产物。

并联运动机床具有刚度高、动态性能好以及结构简单等一系列优点。它充分利用数控技术的潜力，且彻底改变了100多年来机床的结构配置和运动学原理，并将成为21世纪新一代机床的范例。

本书是在德国斯图加特大学近年取得的科研成果以及广泛收集国内外最新资料的基础上，由中、德两国学者合作在德国用中文撰写而成，是一次全新的中外科技合作形式的尝试。

本书论述了并联运动机床的发展过程、各国的研究进展和产品开发现状，并联机构学的理论基础，并联机床主要部件的设计方法、数字控制系统、计算机仿真以及案例分析。作者希望通过这一合作形式，能够为推动中国机床工业的技术进步作出微薄的贡献。欢迎读者对本书的不足之处提出批评和指正。

本书另一特点是附有多媒体光盘。光盘的内容不是书稿的重复，而是借助多媒体技术（包括动画和录像）把书面文字难以描述的动感和场景奉献给读者。这样一来，使得复杂空间机构的运动过程变得易于理解，一目了然。通过这一尝试，作者和出版者都在探索如何利用不同载体的相互配合，更有效、更全面地传播新技术和新知识。

在本书撰写过程中，承蒙德国斯图加特大学机床研究所（IfW）、机床控制技术研究所（ISW）、斯图加特制造技术中心（ZFS）、弗琅霍夫机床与锻压技术研究所（IWU）的同事和朋友们提供各方面的支持和帮助，作者对此表示衷心的感谢。

本书成稿之后，承蒙周勤之院士、蔡鹤皋院士、乌国卿高级工程师和赵松年教授认真审阅，提出了许多宝贵的修改意见，两位院士并挥笔为之作序，使本书生辉良多，对此作者感激不已。

张 曙

Uwe Heisel

2003年1月18日

德 文 前 言

(Vorwort)

Das vorliegende Buch entstand in der Gemeinschaftsarbeit der Autoren im Rahmen des Partnerschaftsabkommens zwischen der Universität Stuttgart und der Tongji Universität Shanghai während eines Studien- und Forschungsaufenthaltes von Professor Zhang Shu im Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart in der Zeit von September 2001 bis August 2002. Es enthält systematisch gegliedert und in didaktisch aufbereiteter Form den Stand der Erforschung und Entwicklung von Bearbeitungsmaschinen mit paralleler Kinematik. Der Inhalt des Buchwerks wurde durch die Auswertung der bekannten internationalen Literatur und auf der Grundlage der aktuellen Forschungsarbeiten in dem Stuttgarter Institut für Werkzeugmaschinen und dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen sowie unter Nutzung der Vorlesungsunterlagen der Vorlesung "Werkzeugmaschinen und Bearbeitungssysteme" von Professor Uwe Heisel erstellt. Das Buch gibt als erstes Werk seiner Art den heutigen Stand der Technik in umfassender Weise wieder. Es soll der Ausbildung und dem Studium junger chinesischer Ingenieure als Lehrbuch und Nachschlagewerk dienen. Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung bei den Mitarbeitern des Instituts für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart sowie bei den Freunden des Instituts, die bei der Materialsammlung behilflich waren und vielfältige Unterstützung gegeben haben. Der besondere Dank gilt auch dem Verlag, mit dessen Hilfe das vorliegende Buch entstehen und gestaltet werden konnte.

November 2002

Zhang Shu
Uwe Heisel

光 盘 简 介

本书所附光盘系采用 MS OfficeXP 中的 Powerpoint 软件制作而成，光盘的内容不是书稿的重复，而是借助多媒体技术（包括图片、动画和录像）把书面难以描述的动感和场景奉献给读者，其阐述角度和内容也与书稿有所区别。

这样一来，使得读者对难以想像的复杂的空间机构运动过程，变成一目了然，易于理解。通过这一尝试，作者和出版者都在探索如何利用不同载体的相互配合，更有效、更全面地传播新技术和新知识。同时，也为高等院校的教师在有课时内讲述更多的新内容提供了范例。

使 用 说 明

本光盘可以在个人计算机上播放。将光盘放入 CD-ROM 后，打开目录中的一个 Powerpoint 文件，即可自动播放。如计算机接有音箱，可同时听到旁白。读者可以按照自己的需要，在放映设置中选用不加旁白，或在幻灯片切换中将自动换片方式改为鼠标点击换片方式。

为了获得满意的效果，计算机的最低配置建议如下：

CPU Pentium 4, 500MHz;

内存 128M 以上;

软件 MS Office 2000 以上版本。

不能满足上述配置要求的计算机，可将光盘中的文件复印到计算机硬盘中，可以改善播放效果。

光 盘 目 录

一、作者简介（放映时间约为6min）

简要介绍作者从事制造技术领域研究工作近半个世纪的历程、所取得的主要成果，以及所获得的重大奖励。

二、机床发展的历史回顾（放映时间约为16min）

对20世纪制造业的发展过程作一简要的回顾，指出机床是制造机器的机器，

是装备制造业的核心，国民经济发展的重要基础。机床的结构以及它的驱动和控制方式历经了天轴集中传动、交流电动机传动和数字控制3个发展阶段，并永远处于不断变革的过程之中。并联运动机床的出现就是不断追求创新的产物。

三、并联机构及其应用（放映时间约为14min）

20世纪中期，美国 Gough、Stewart 和 Cappel 等人先后提出6杆并联机构的原理，开始主要用于运动模拟器。到了20世纪80年代，瑞士人 Cavel 和瑞典人 Neumann 又分别提出 Delta 机器人和 Tricept 机器人，开创了并联机器人工业应用的新纪元。光盘借助动画形象地描述 Stewart 平台、Delta 和 Tricept 3种并联机构的工作原理。利用图片、动画和录像介绍各种并联机构在运动模拟器、工业机器人、医用机器人、天文望远镜等许多领域的应用，发展前景广阔。并联运动机床是并联机构在工业中应用的一个主要方面。

四、6杆并联运动机床（放映时间约为30min）

1994年在美国芝加哥国际机床展览会展出第一台6杆并联运动机床。在不到10年的时间里，出现了各种基于 Stewart 平台的演化案例，从不同的角度改进并联运动机床结构，提高它的性能。光盘中通过8个案例从另一种角度系统介绍各种典型的6杆并联运动机床：例如，从可变杆长到固定杆长，从旋转伺服电动机驱动到直线伺服电动机驱动，从垂直配置到水平配置。大多数案例皆附有录像和动画。

五、3杆并联运动机床（放映时间约为33min）

由于 Delta 和 Tricept 机器人结构简单、工作可靠，很快就被应用到并联运动机床中来，并且在飞机制造业和汽车制造业中已经有了许多成功的实际案例。光盘通过6台3杆并联运动机床的实际案例，系统地介绍 Delta 和 Tricept 并联机构的应用和不同演化：可变杆长和固定杆长，旋转伺服电动机驱动和直线伺服电动机驱动，垂直配置和水平配置。大多数案例皆附有录像和动画。

六、创新永无止境（放映时间约为23min）

创新永无止境。近年来基于不同并联机构的各种新型并联运动机床不断涌现。光盘通过6台2杆、3杆和5杆并联运动机床的实际案例，说明并联机构的创新演化是可以多种多样的。特别是 Metrom 公司的5杆并联运动机床最具有创意，基本上克服了目前并联运动机床普遍存在的主要缺点。大多数案例皆附有录像和动画。

目 录

序言一	III
序言二	V
中文前言	VI
德文前言	VII
光盘简介	IX
使用说明	IX
光盘目录	IX
第一章 绪论	1
第一节 机床发展的历史回顾	1
第二节 并联机构及其应用	4
第三节 并联运动机床	18
第二章 机构运动学基础	35
第一节 空间机构的组成元素	35
第二节 空间并联机构	38
第三节 并联机构的分析	44
第四节 机床中的并联机构	52
第三章 并联运动机床的设计	57
第一节 需求和可行性分析	57
第二节 并联运动机床的设计方法	61
第三节 概念设计和机构综合	65
第四节 并联运动机床的结构设计	80
第五节 5 面加工机床的设计	85
第四章 部件的设计和选用	93
第一节 主轴系统	93
第二节 杆件和铰链	107
第三节 线性直接驱动技术	117

第四节 特种直接驱动技术	124
第五章 控制系统	128
第一节 开放式数控系统	128
第二节 EMC 控制软件	138
第三节 西门子 840D 和 ISG SoftCNC 系统	143
第四节 空间位置标定和自动补偿	150
第六章 机床性能研究	159
第一节 内容和对象	159
第二节 机床的几何性能	165
第三节 机床的运动精度	168
第四节 机床的静态性能	170
第五节 机床的动态性能	175
第六节 机床的热性能	177
第七章 仿真和优化	183
第一节 建模、仿真和虚拟现实	183
第二节 运动学仿真	186
第三节 有限元分析	189
第四节 机床结构的优化	192
第五节 虚拟现实技术	204
第八章 案例分析	209
第一节 PM-600 型立式加工中心	209
第二节 TMC 845 型加工中心	215
第三节 Dyna-M 型卧式加工中心	224
第四节 Linapod-III 型立式加工中心	233
第五节 P-800 型 5 杆并联运动机床	238
参考文献	243

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Historic Review of Machine Tool Development	1
1.2 Parallel Kinematics and its Application	4
1.3 Parallel Kinematics Machine Tool	18
Chapter 2 Basic Theory of Mechanism Kinematics	35
2.1 Kinematic Elements of Mechanism	35
2.2 Parallel Mechanism	38
2.3 Analysis of Parallel Mechanism	44
2.4 Parallel Kinematics for Machine Tool	52
Chapter 3 Design of PKM	57
3.1 Requirements and Feasibility Anylisis	57
3.2 Design Methodology of PKM	61
3.3 Concept Design and Mechanism Synthesis	65
3.4 Structure Design of PKM	80
3.5 Realization of 5 Side ~ machining with PKM	85
Chapter 4 Component Design and its Selection	93
4.1 Motor Spindle	93
4.2 Struts and Joints	107
4.3 Linear Direct Drive Technology	117
4.4 Special Direct Drive Technology	124
Chapter 5 Control System for PKM	128
5.1 Open Control System	128
5.2 Enhanced Machine Cotroller Software	138
5.3 Siemens 840D and ISG Soft CNC	143

5.4	Calibration and Compensation	150
Chapter 6	PKM Behavior Studies	159
6.1	Contents and Targets	159
6.2	Geometric Behavior	165
6.3	Behavior Motion Test	168
6.4	Static Behavior	170
6.5	Dynamic Behavior	175
6.6	Thermal Behavior	177
Chapter 7	Simulation and Optimization	183
7.1	Modeling, Simulation and Virtual Reality	183
7.2	Kinematics Simulation	186
7.3	Finite Element Anylisis	189
7.4	Machine Structure Optimization	192
7.5	Virtual Reality Technology	204
Chapter 8	Case Study	209
8.1	Okuma PM—600 Vertical Machine Center	209
8.2	TMC 845	215
8.3	Dyna—M Horizontal Milling Machine	224
8.4	Linapod—III Vertical Machine Center	233
8.5	P—800 5—struts Parallel Kinematic Machine	238
References		243

第一章 绪 论

第一节 机床发展的历史回顾

机床是制造产品的机器，或称之为工作母机，是装备制造业的核心设备。自18世纪英国工业革命以来，机床历经了三个重要的发展阶段。

第一个阶段是天轴集中传动。由蒸汽机或直流发电机—电动机组集中提供能源，通过带传动和厂房中架空的天轴传动系统，将旋转运动和动力输送到每台设备，然后借助多级塔轮进行变速。动力源的初步解决，促使机床的加工范围从车削和钻削发展到铣削、磨削、齿轮加工等不同的工艺方法，从而使手工作坊转向机械工厂。这种趋势一直延续到20世纪的20年代，形成了近代金属切削机床体系和机械制造业。采用天轴集中传动，单台机床不能独立工作，车间显得拥挤、昏暗和嘈杂。当时天轴传动的车间如图1-1所示。

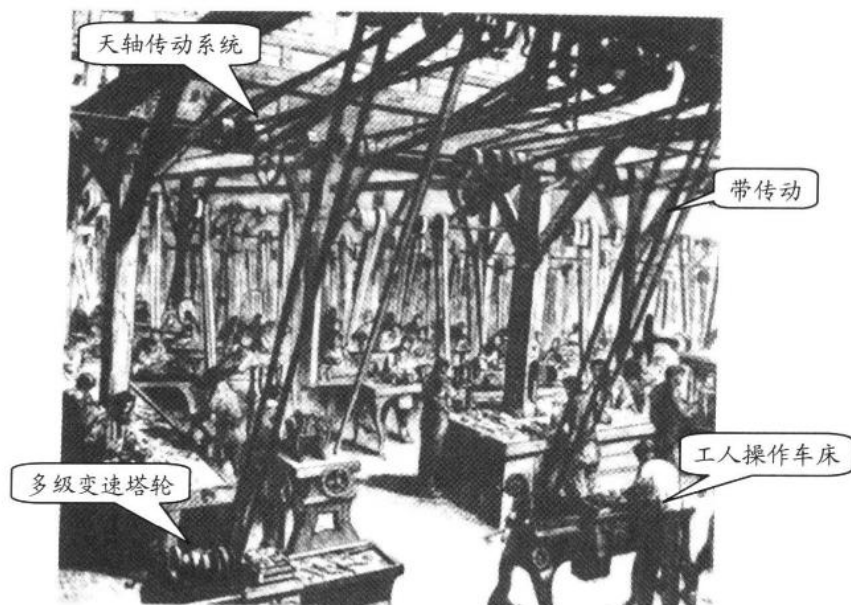


图 1-1 天轴传动的机械加工车间



交流电动机的问世，使机床进入了第二个发展阶段。机床开始由一台或多台交流电动机驱动，通过齿轮变速使机床主轴和进给部件获得所需要的速度和功率。直到今天为止，这类机床仍在工厂中普遍使用和继续生产。沈阳中捷友谊机床公司生产的摇臂钻床是其中的典型例子，它采用3台交流电动机分别驱动主轴和进给系统、横臂升降以及冷却液泵。该摇臂钻床的外观如图1-2所示。

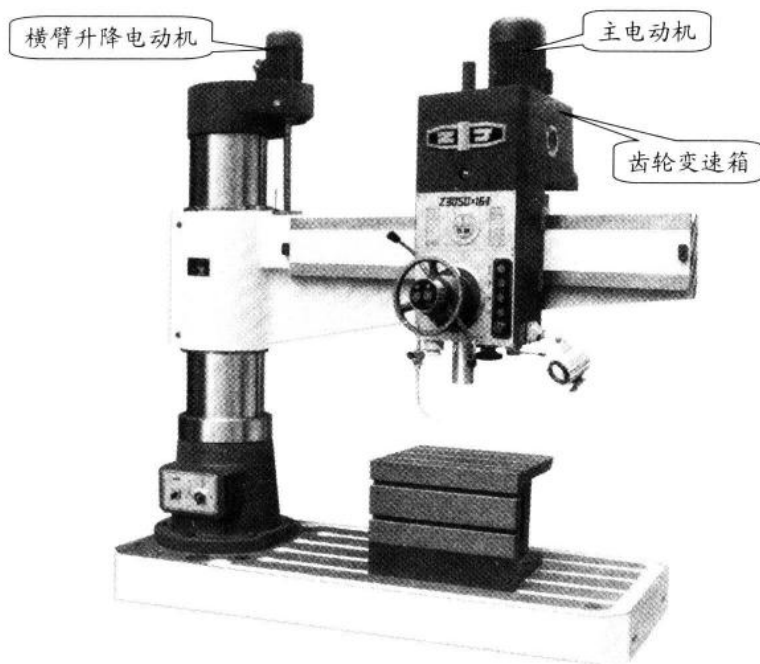


图 1-2 由 3 台交流电动机驱动的摇臂钻床

交流电动机的应用，不仅大大提高了机床的切削功率、速度和加工效率，还导致机床机械化和自动化的迅速发展。机械、电气和液压技术相结合，出现了以加工汽车零件为代表的组合机床自动线，使大批量生产的自动化水平在20世纪60年代达到了顶峰。

第三个阶段是机床的数字控制和信息化。1954年，美国麻省理工学院研制成功第一台数控机床，将计算机技术和电子技术与机械加工过程联系起来，机床的运动由机械传动和凸轮控制开始转变为伺服驱动和数字控制。采用交流或直流调速以及伺服驱动替代齿轮变速，大大简化了机床的机械传动系统。特别是20世纪70年代，出现了加工中心，将不同的加工工艺方法集成到一台机床

上,促使数控机床在工业中获得普遍应用,成为当前机床工业的主流产品。

日本 Mazak 公司最新推出的 e-410H 型卧式加工中心,将信息技术与制造技术融为一体,它由机床主体和信息塔两部分组成,如图1-3所示。e-410H 加工中心不仅可完成车削、铣削和钻削,实现5坐标数控切削加工,还可选用激光淬火和磨削附件,以便在一台机床上完成零件的全部加工工序。

该机床的创新之处在于,通过信息塔与工厂管理信息系统联网,实时地反映机床的工作状态和加工进度,及时向有关部门提出工夹具和工件的需求。在发生技术问题或机床故障时,能够通过视像和语音交互,与技术或维修部门、包括异地的供应商和客户直接联系,使问题获得及时解决,减少停机时间。

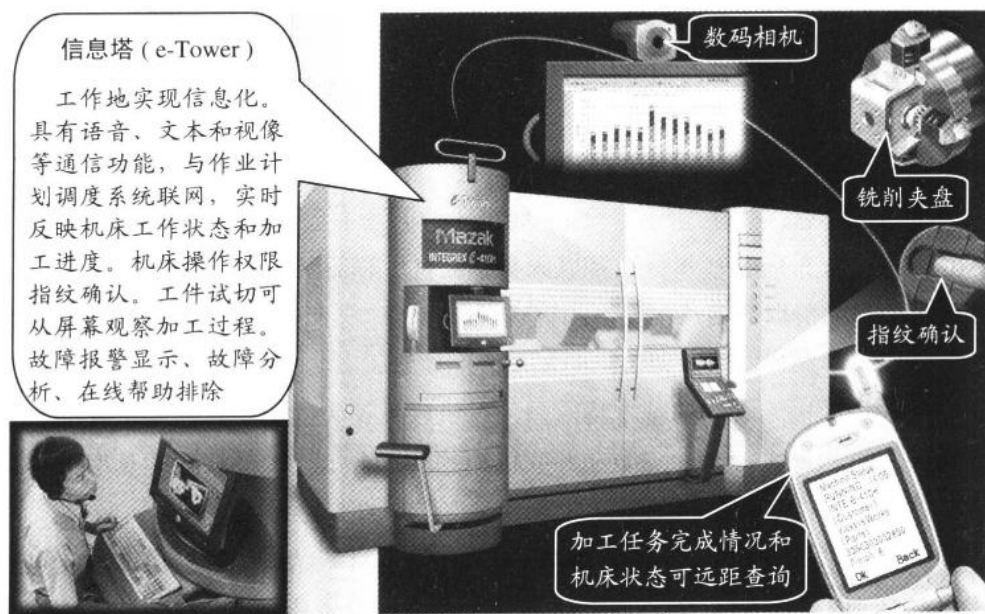


图 1-3 信息化的卧式加工中心

新一代机床的发展趋势是进一步满足超精密、超高速、激光和细微加工等新工艺提出的高性能和高集成度的要求。近10年来,并联运动机床的出现和迅速发展就是典型的例子。

并联运动机床是以空间并联机构为基础,充分利用计算机数字控制的潜力,以软件取代部分硬件,以电气装置和电子器件取代部分机械传动,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。并联运动机床与传统机床的比较如图1-4所示。

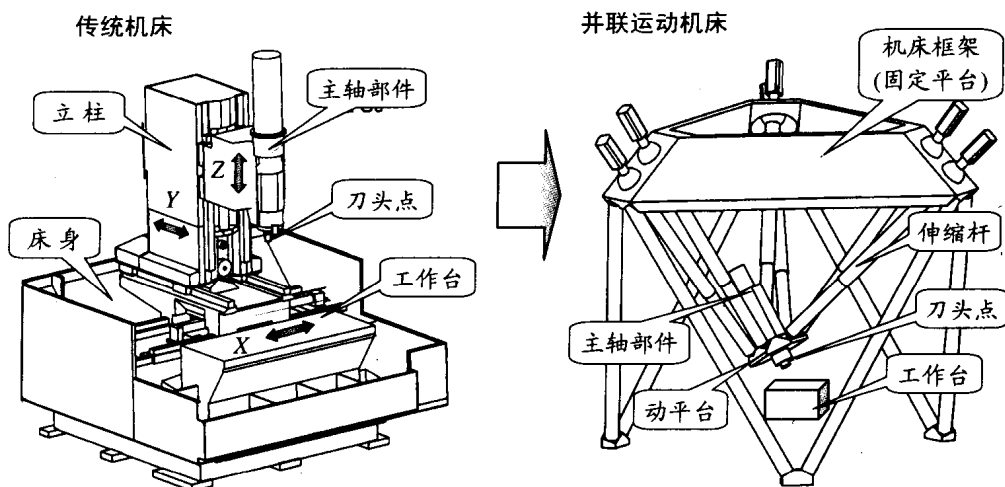


图 1-4 并联运动机床与传统机床的比较

从图中可见，并联运动机床与传统机床的区别主要表现在：

传统机床布局的基本特点是以床身、立柱、横梁等作为支承部件，主轴部件和工作台的滑板沿支承部件上的直线导轨移动，按照 X 、 Y 、 Z 坐标运动叠加的串联运动学原理，形成刀头点的加工表面轨迹。

并联运动机床布局的基本特点是，以机床框架为固定平台的若干杆件组成空间并联机构，主轴部件安装在并联机构的动平台上，改变杆件的长度或移动杆件的支点，按照并联运动学原理形成刀头点的加工表面轨迹。

由于并联运动机床结构以桁架杆系取代传统机床结构的悬臂梁和两支点梁来承载切削力和部件重力，加上运动部件的质量明显减小以及主要由电主轴、滚珠丝杆、直线电动机等机电一体化部件组成，因而具有刚度高、动态性能好、机床的模块化程度高、易于重构以及机械结构简单等优点，是新一代机床结构的重要发展方向。

第二节 并联机构及其应用

一、Stewart 平台

在1965年，Stewart 提出一种新型的、6自由度的空间并联机构，它由上下

两个平台和6个并联的、可独立自由伸缩的杆件组成，伸缩杆和平台之间通过两个球铰链 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 和 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 连接，称为 Stewart 平台，如图1-5所示。

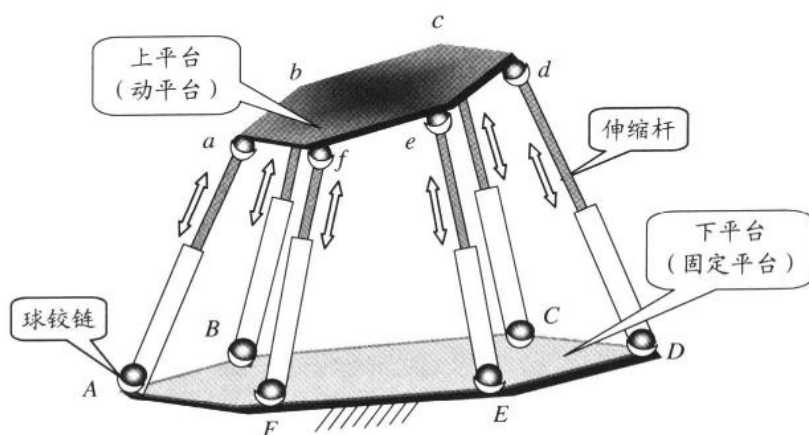


图 1-5 Stewart 平台的工作原理

从图中可见，如果将下平台作为固定平台，以伸缩杆的位移作为输入变量，则可以控制上平台（动平台）的空间位移和姿态（可观看光盘中的动画）。这种新型的、6自由度的空间并联机构引起众多研究者的兴趣，经过30余年的不断改进和发展，演变出不同运动学原理和结构的空间并联机构，并在许多科学研究和工业领域获得了广泛应用。

二、运载机械的运动模拟器

运载机械包括所有载人和载货的运输工具以及其他机械，如飞机、列车、船舶、坦克、汽车以及动态游乐设施等。

Stewart 平台并联机构最先用于飞行模拟器，即在地面训练飞行驾驶员。飞行模拟器可以承担90%的飞行训练任务，而每小时的训练费用仅是实际空中飞行的1/40~1/10，效益显著，很快获得推广。现在，各国主要航空公司的飞行员培训中心都采用飞行模拟器进行培训。上海东方飞行培训有限公司的 A300—600R 飞行模拟器如图1-6所示，模拟驾驶舱安装在并联机构的上平台上，地面作为固定下平台。上平台由6个液压缸支承，通过活塞杆的往复运动，操纵模拟驾驶舱在空间作6个自由度的运动。