

加工飞机结构件的 加工中心

诺维特机械科学技术发展中心 张曙



张曙：

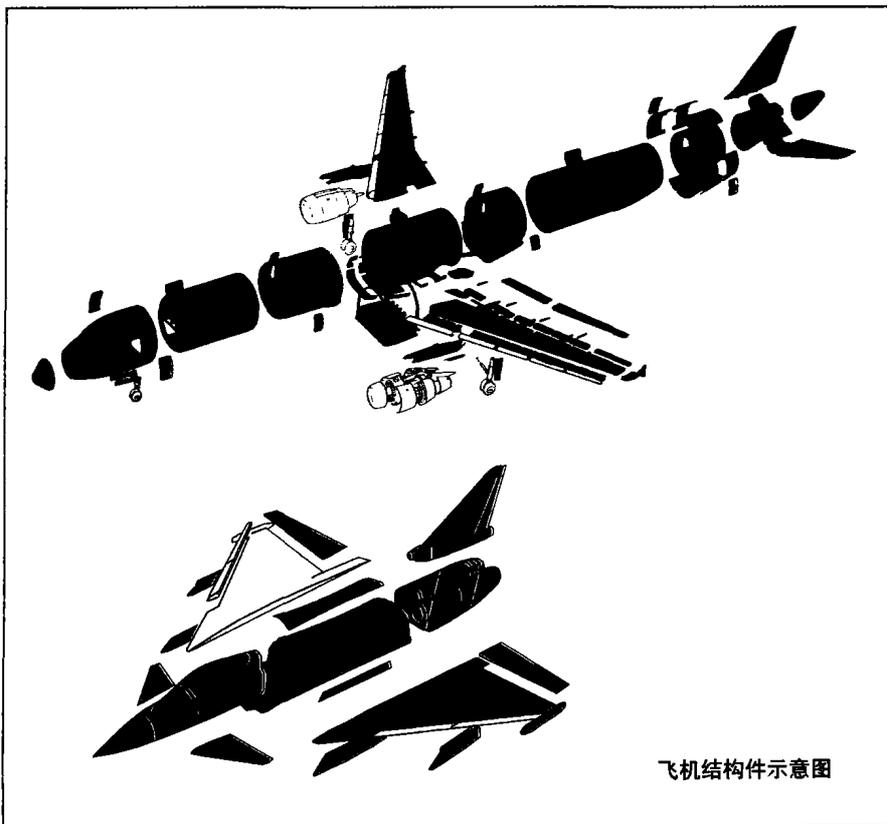
同济大学教授、博士生导师，上海市科技功臣，全国优秀科技工作者。现任中国机械工程学会常务理事、同济大学现代制造技术研究所名誉所长，兼任上海理工大学机械学院名誉院长等职务。张曙教授致力于先进制造技术及其发展战略的研究，曾先后获机械工业部、国家教委、国防科工委、上海市人民政府的多项奖励以及香港蒋氏工业慈善基金“科技成就奖”、香港理工大学“杰出中国访问学人奖”等重要奖项

数控机床是现代制造业的关键设备，一个国家数控机床的产量和技术水平在某种程度上代表了该国的制造业水平和竞争力。到目前为止，我国数控机床的技术水平、性能和质量与国外还有较大差距，技术含量较低的简易数控车床仍占主导地位，高

档数控机床及功能部件大多数依靠进口。航空工业是拉动数控技术发展的产业，许多新技术的出现都与航空工业的需求相关。研究加工飞机结构件的新型数控机床对发展我国数控机床产业具有重大意义

因此，尽管当前市场活跃，需求

旺盛，如果不了解国外数控机床的发展趋势，不断提高自主开发能力，积极培育新产品，就不能满足国民经济



飞机结构件示意图

可持续发展的要求。

结构特征和加工要求

飞机结构件的加工是飞机制造工程的主要组成部分。过去,飞机的大型结构件往往是由许多零件装配而成的。近年来,飞机结构件的整体设计原理越来越得到重视。整体设计的基本概念是,从一块整体毛坯上将金属切除,从而获得性能优越的整体结构件。它的优点不仅是缩短加工装配周期和物流链,同时也减轻了结构件的重量,这对现代化客机和战斗机都是非常重要的。

飞机结构件包括机身、机翼、隔板 and 肋条等,大多数是薄板类零件,上面有众多形状复杂的孔、空穴、沟槽和加强筋。其材料主要是高强度铝合金,毛坯是60~300mm厚的铝板或铝锭,长度从1m以内直到30m。

整体结构件加工的共同点是毛坯的金属切除量在80%以上,对新式战斗机来说甚至高达95%。由于在飞机结构件设计中广泛采用三维CAD和有限元分析,其结构得到不断优化,材料性能获得充分利用,从而在提高结构件强度的同时,有可能明显降低它的重量。这必然导致结构形状复杂化、空穴多、壁厚薄,必须使用5轴联动的数控机床才能加工。

通过对现代飞机结构件加工工艺的分析,对新一代数控机床大体提出以下几点要求:

(1) 机床的加工效率高,金属切除量大,主轴能够提供足够的功率,

可进行高速铣削。

(2) 机床的精度和可靠性高,性能稳定,能够保证加工质量,而不依靠加工后的检验工序。

(3) 工序集约化,在一台机床上尽可能加工完所有工序,刀库容量在100把刀具以上。

(4) 工件装卸方便,运行成本低,环境污染少,人机界面友好,可远距离操作和监控。

传统数控加工的局限

从上个世纪80年代以来,已经采用了大型龙门式5轴联动数控铣床加工飞机结构件。龙门式机床的工作台、横梁和主轴部件实现X、Y、Z轴的移动,再加上摆叉式或万能式主轴头,实现A轴/C轴或A轴/B轴的2个回转运动,构成5轴联动数控机床。

摆叉式或万能式主轴头的优点是主轴的偏转角度较大,可以实现矩形零件的5面加工。尽管主轴头在单个轴线上可以达到很高的回转速度和加速度,但刀具空间定向速度仍然较低,因为主轴头的两个回转运动是串联的,不能完全同时回转,对机床X、Y、Z轴线的补偿运动也不能及时反映。这种机构运动学上的先天缺陷,使摆叉式的主轴头不完全适用于加工飞机结构件。

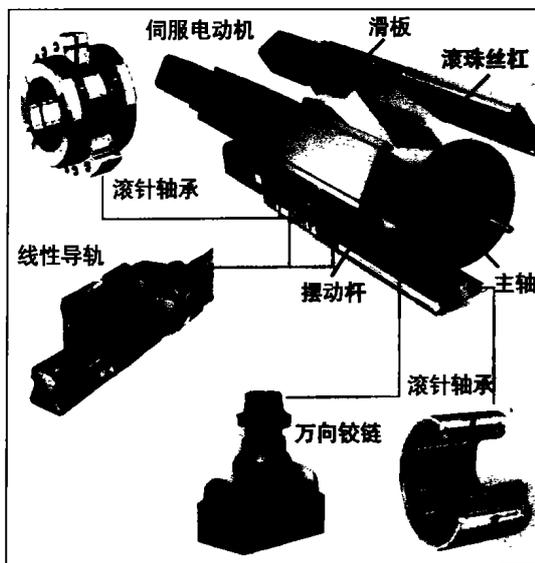
此外,无论摆叉式主轴头,或者是万能式主轴头,主轴头内部都有3个电动机,每个电动机都需要连接供电、冷却、润滑和位置检测等电缆或管道,相互之间还有位置转动,连接和密封结构非常复杂。加上主轴电动机内部还需要配置刀具夹紧装

置,导致主轴头尾部各种电缆和管道多达数十根,维护极其不便。

并联运动机构的运用

为了克服摆叉式主轴头摆角结构的缺点,德国DS-Technologie公司按照飞机结构件加工工艺的特点,独创性地推出采用并联运动机构的Sprint Z3型主轴头。

3个伺服电动机通过滚珠丝杠驱动3个按120°分布的滑板各自沿其线性导轨移动,然后滑板带动摆动杆,通过万向铰链驱动运动平台,构成3

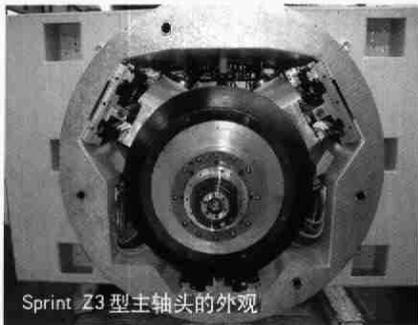


并联运动机构的主轴头

杆并联运动机构,使安装在运动平台上的电主轴可向任何方向作45°偏转。偏转定位速度达到80°/s,加速度685°/s²。主轴在Z轴方向的最大行程可达670mm。

应该指出的是,Sprint Z3型主轴头的所有零部件,包括伺服电动机、电主轴、线性导轨、轴承和万向铰链都是经过实际考验的标准化零部件,由专业厂家生产,在各种数控机床中已经获得广泛的应用,机构的可靠性能够获得充分保证。主轴头中尽管有3个伺服电动机和1个电主轴,但它们相互之间是独立的,各自的电缆和管道没有任何联系,这就省去了复杂的连接和密封结构,大大简化了主





Sprint Z3型主轴头的外观



轴头的维护工作。

电主轴是套装式的,可以安装不同规格型号的电主轴:例如,80kW、30000r/min、46N·m,或75 kW、24000r/min、72N·m,以及不同的刀柄接口:HSK-A63或HSK-A63/80。更换电主轴也非常方便,可在2h内完成。

高性能数控加工中心

DS-Technologie公司在Sprint Z3主轴头的基础上,推出加工飞机结构件的高性能数控加工中心Ecospeed。

Sprint Z3型主轴头配置在可在X轴向移动的立柱上,并且可沿立柱上的线性导轨作Y方向移动。配置的特点是所有运动都由刀具这一方完成,而工件是固定不动的,这对大型飞机结构件加工非常有利。此外,也是非常重要的一点,就是该机床的工作台能翻转90°,使工件可以在水平位置装卸,而在垂直位置加工,使得高速切除的大量切屑得以迅速排走。

Ecospeed加工中心移动部件的惯性小,可使主轴的X轴向移动速度达到65m/min, Y和Z轴向移动速度达到50m/min,所有轴线的加速度达到1g,从而保证了机床具有良好的动态性能。

按照机床配置的不同,主轴的X轴向移动距离可从3300mm到15800mm变化。由于移动距离大,故床身采用立式龙门结构。立柱沿床身的移动由电子控制的无间隙齿轮齿条机构驱动。

Ecospeed数控加工中心具有加工效率和加工精度高、表面质量好、加工后的飞机结构件无需手工打磨等一系列优点,在欧洲许多飞机制造厂获得了应用。美国Cincinnati机床公司也从德国引进了Sprint Z3主轴头制造技术。

2004年,DS-Technologie公司在Sprint Z3主轴头获得巨大成功后,推出加工中小型零件Ecospeed F系列加工中心,其特点仍然以Sprint Z3主轴头为基础,但立柱固定,工作台作X轴向移动,托板最大尺寸为7000mm×2200mm。用该机床加工高强度飞机铝合金,金属切除率达到8000cm³/min。

F系列的最新产品是Ecospeed F HT,不仅适用于加工铝合金,也可用于加工钢和铸铁,用户对象除飞机制造工业外,有望在汽车工业和模具工业获得推广,Ecospeed F HT将于2005年春投放市场。

Ecospeed F HT的配置特点是采用链式刀库和固定式可交换工作

台,尺寸可为630mm×630mm、800mm×800mm和1000mm×1000mm 3种。同时可配置不同规格的电主轴,从20kW和12000r/min,到80 kW和30000r/min。

DS-Technologie公司在Ecospeed加工中心的基础上,还生产用于加工细长飞机结构件,如机翼蒙皮纵桁的专用数控机床Ecoliner。该机床仍采用Sprint Z3主轴头,X轴向移动可达30000mm, Y轴向最大移动1700mm。所有方向最大移动速度皆为50m/min,加速度5m/s²。

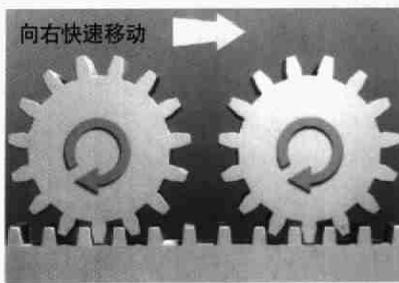
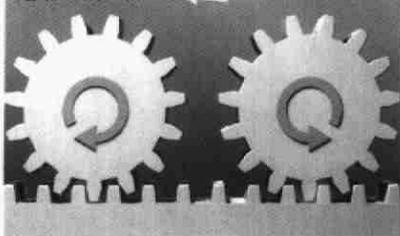
为了提高加工效率,在机床全长上可以配置2个带Sprint Z3主轴头的立柱,同时分别加工飞机细长结构件的不同部位。

应用案例

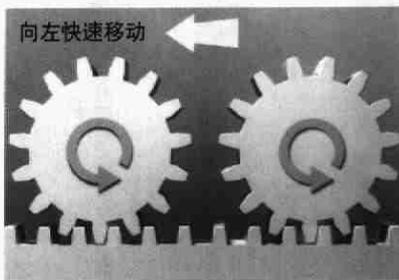
欧洲航空国防和空间公司(European Aeronautic Defense and Space Company, EADS)的德国奥格斯堡工厂(Augsburg Plant)是生产欧洲战斗机(Eurofighter)和空中客车(Airbus)结构件的主要工厂之一,也是最早购置Ecospeed加工中心的厂家。欧洲战斗机的机身中段是该厂的典型产品,由若干机身截面框架和底层框架组成,所有框架结



进给:相反转矩加载荷



向右快速移动



向左快速移动

无间隙齿轮齿条传动



结束语

实践证明,采用3自由度的并联运动机构作为飞机结构件加工中心的主体获得巨大的成功,这一创意推动了飞机制造技术的发展。许多其他著名的机床公司也开发了类似的加工中心。例如, Fatronik 公司推出了基于 Hermes 主轴头的 Space-5H 加工中心。这一趋势应引起我国航空和机床工业的重视。

参考文献

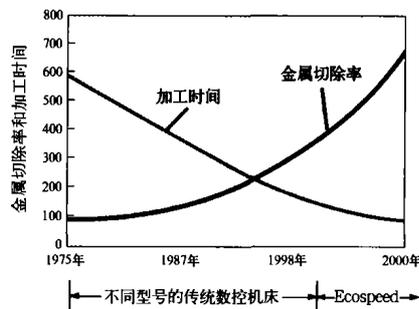
- 1 张曙. 并联运动机床. 北京: 机械工业出版社, 2003
- 2 Hennes N, Staimer D. Application of PKM in aerospace manufacturing—high performance machining centers ECOSPEED, ECOSPEED-F and ECOLINER. Proceedings of 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, Chmnitz 2004, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 557~577
- 3 Hennes N. ECOSPEED—an innovative machinery concept for high performance 5-axis machining of large structural components in aircraft engineering. Proceedings of 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, Chmnitz 2002, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 763~774
- 4 Collado V, Herranz S. Space 5H—a new machine concept for 5-axis milling of aeronautic structural components. Proceedings of 4th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, Chmnitz 2004, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 611~624
- 5 Saenz A J, Collado V, Gimenez M, et al. New automation solution in aeronautics through parallel kinematics system. Proceedings of 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, Chmnitz 2002, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 563~578
- 6 Lilla A. Quicker success with hybrid kinematics “ECOSPEED”. Proceedings of 3rd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, Chmnitz 2002, Verlag Wissenschaftliche Scripten, 775~784

(责编 根山)

构件皆采用整块铝合金毛坯加工而成。

以其中 1 个底层框架零件为例, 它的尺寸为 1920mm × 1161mm × 116mm, 重量 17.4 kg, 金属切除率高达 95%, 空穴和孔数 104 个, 最大空穴尺寸 120mm × 100mm, 最小壁厚 2mm。

为了提高结构件加工的经济性,



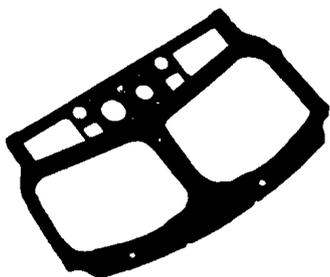
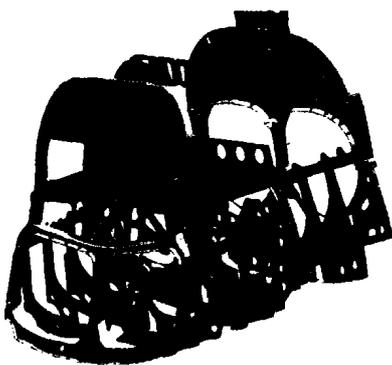
采用 Ecospeed 加工中心的经济效益

采取高性能切削(High Performance Cutting)策略, 即刀刃上表面速度和金属切除率都尽可能高。

加工时采用直径为 16mm, 半径为 4mm 的球头铣刀, 刀具偏转角度 $\pm 22^\circ$ 。

粗加工时, 使用主轴 80kW 的全部功率, 切深 $a_e=4\text{mm}$, $a_p=6\text{mm}$, 主轴转速 $n=24000\text{r}/\text{min}$, 进给速度 $f=12000\text{mm}/\text{min}$, 金属切除率高达 $7000\text{cm}^3/\text{min}$ 。

精加工 5 轴联动时也采用极高的进给速度, 表面质量获得明显提高, 无需人工打磨和抛光, 节约了加工时间, 降低了加工成本。



欧洲战斗机中段结构的数字模型和某底层结构件