

聚焦用户需求 创新研发专有技术

Innovating Private Technology Focusing on User Demand

同济大学现代制造技术研究所 张 曙
香港理工大学工业中心 谭惠民 黄仲明



张 曙

1956年毕业于哈尔滨工业大学。现任同济大学教授、博士生导师、现代制造技术研究所名誉所长、哈尔滨工业大学管理学院兼职教授、如皋市人民政府顾问、张曙科教基金董事长，中国机械工程学会高级会员、中国机械工程学会荣誉理事。曾任香港理工大学客座教授、上海理工大学机械学院名誉院长、盐城工学院特聘教授等职务。

随着用户需求的日益多样化和高性能化，批量生产的通用数控机床遇到了严峻的挑战。未来的发展有两种趋势：一种是以某种通用数控机床为基型增加选件的品种，扩展其功能和用途，由用户加以选择，实现客户化定制生产。另一种是聚焦用户需求，研发专有技术，开发专门化的数控机床，为用户提供全面解决方案。在激烈的市场竞争中，技术的先进性并非唯一的取胜要素，最根本的是机床制造商能不能吃透用户的需求，提供简单而可靠的解决方案，为用户创造更多的价值。

当好用户的工艺师，使机床产品能够最大限度地满足用户的需求，不断提高机床的适用性和可靠性以及其使用效益和效率，为用户创造更多的价值，是机床制造企业的终极目标和核心竞争力。因此，聚焦用户需求，研发专有技术就成为机床产业转型升级的重要内涵。

航空制造业、汽车制造业和模具制造业是机床制造商的3大主要服

务对象，他们对零件加工精度和效率日益提高的需求不断推动机床技术的发展，是机床产品创新的动力。例如，柔性化自动线、高速高精度加工中心、复合加工和多轴联动数控机床的出现无不与这3个工业的需求密切相关。

Ecospeed 的成功秘笈

1 聚焦用户需求

现代飞机结构件大多数是薄板类零件,其特点是结构形状复杂,尺寸大、壁厚小、凹穴凹槽多,而且要求质量轻、强度高、表面质量好。通常是由整块铝合金毛坯加工而成,其金属切除的体积高达80%~95%,因此要求机床的切削速度高,主轴功率大,单位时间材料切除率大。一个典型的飞机结构件如图1所示。



图1 典型的飞机结构件

德国 DS-Technologie 公司(DST)是著名的重型机床制造商,其主导产品是大型龙门式加工中心,设有航空制造部,专门从事飞机结构件的加工工艺研究和航空制造新机床的研发。

DST 的研究结果表明,从20世纪70年代的多轴铣床到90年代的龙门式五轴联动加工中心都不能完全满足现代飞机结构件加工的要求。因此,决定研发飞机结构件加工的新型机床——Ecospeed。

首先,需要搞清楚用户存在的问题,通过总结数十年飞机结构件加工的经验,提出用户所期望的机床性能指标,见表1。

过去采用龙门式五轴联动加工中心的基本构思是龙门式铣床的3个移动轴加上铣头的2个回转轴,从而构成五轴联动机床,铣头成为关键。对多种摆角式和回转式铣头进行了分析,对其用于加工飞机结构件时性能进行评价,结果见表2。

性能评价分5级,++为很合适,+为较好,+--为可用,-为较差,--

表1 飞机结构件加工期望的机床性能指标

性能指标	期望数值
托板尺寸 X/m	2.5~1
托板尺寸 Y/m	1.5~2.5
Z轴行程/mm	670
毛坯厚度/mm	<300
最大移动速度/($m \cdot \min^{-1}$)	50
加速度/($m \cdot s^{-2}$)	10(所有轴)
主轴偏转角度/($^{\circ}$)	40(A/B轴)
主轴偏转速度/($^{\circ} \cdot s^{-1}$)	80
主轴偏转加速度/($^{\circ} \cdot s^{-2}$)	685
主轴功率/kW和转速/($r \cdot \min^{-1}$)	75和24~27000
刀库容量/把	125

表2 摆角式和回转式铣头的性能评价

性能评价	摆角式铣头	回转式铣头
偏转角	++	++
角加速度	+-	+-
角速度	+	+
定位速度	--	--
重量	--	--
刚度	+-	++
复杂性	-	--
精度	+	+-
偏转长度	--	+-
几何布局	--	+-

为不合适。可见,无论摆角式还是回转式铣头都存在令人不够满意之处。

2 专有技术: Sprint Z3 主轴头

为了从根本上克服摆角式和回转式铣头的缺点,新型 Sprint Z3 型主轴头采用3杆并联运动机构,其内部的结构如图2所示。

从图中可见,3杆并联运动机构是由3个伺服电动机分别通过滚珠丝杠驱动的、按 120° 分布的3个移动装置组成。在滚珠丝杠驱动下,滑板各自沿底座上的线性导

轨移动,滑板的移动推动可摆动的杆件,再通过万向铰链驱动运动平台,使运动平台上的主轴作Z轴向移动及A轴和B轴方向的偏转。实践证明,这种3杆并联运动机构完全能够满足飞机结构件加工预期性能指标的要求。

应该指出的是,尽管 Sprint Z3 型主轴头的运动原理是新颖的,但所有零部件,包括伺服电动机、电主轴、线性导轨、轴承和万向铰链都是标准化的零部件,由专业厂家生产,在数控机床中已经获得广泛的应用,从而使三杆并联运动机构主轴头的可靠性能获得充分保证。安装在立柱上的 Sprint Z3 型主轴头如图3所示。

从图中可见,主轴头由配置在两侧的滚珠丝杠驱动下沿两侧线性导轨升降。采用双丝杠的目的是使驱动力处于主轴部件的重心,提高其动态性能。主轴滑座和立柱都是由钢板焊接而成的、封闭的、轻量化的结构件,以减轻移动时的惯性影响。

在 Sprint Z3 型主轴头的基础上,构成高性能数控加工中心 Ecospeed,其总体配置见图4。从图中可见,机床配置的特点是所有运动都由刀具一侧完成,在加工过程中固定在立式工作台托板上的工件是不移动的。垂直加工可使高速切除的大量切屑得以迅速排走。在工件加工完毕后,托板移到机床一侧的交换和装卸工位,然后翻转 90° ,使工件可以在水平位置装卸。

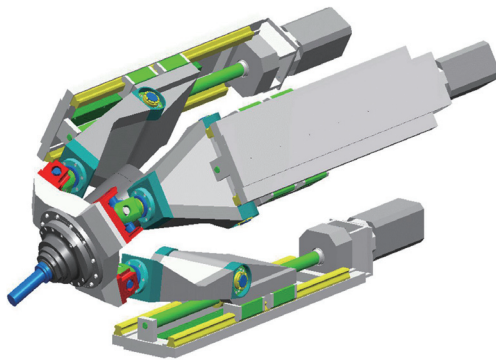


图2 Sprint Z3主轴头的结构



图3 安装在立柱上的Sprint Z3主轴头

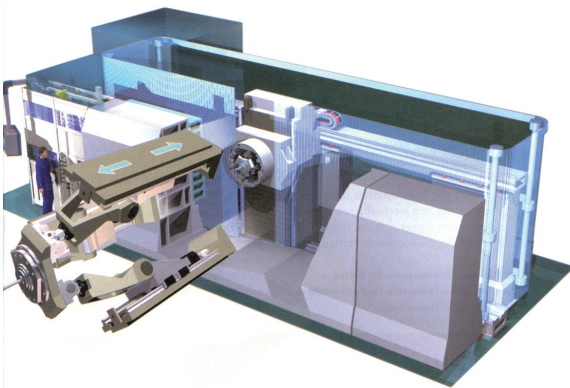


图4 Ecospeed高性能数控加工中心

与过去 30 年使用的多种龙门式铣床和加工中心比较, Ecospeed 将零件加工时间缩短了大约 6 倍, 将金属切除率提高了近 7 倍, 如图 5 所示。

高性能数控加工中心 Ecospeed

的成功应用使 DST 公司近年来在飞机结构件加工领域处于世界领先地位。

Zimmermann 公司的 新一代铣床

1 FZ32 龙门铣床

德国 Zimmermann 公司的产品系列进行了持续不断的改进和提高, 例如驱动技术的改进, 使其客户的生产力得到了显著地提高。其中最典型的例子就是新一代的高架移动式龙门铣床 FZ32。

这款机型专门设计用于对铝件和复合材料进行 5 面完全加工, 以及对钢件进行五轴联动的高效精加工。通过运用研发的驱动技术和使用最新一代的齿轮齿条驱动系统, 并配备高性能直线导轨, 它的加工进给速度提高了 60% 以上。通过使用高科技的纤维增强性填充材料, 显著地提高了机身承载部件的刚性。与此相适应, 该公司采用了新一代铣头 VH2 以便充分利用机床其他方面改进所带来的优势, 大幅提高的切削参数使 FZ32

对铝件的大排屑量切削成为可能。

新一代的 VH2 铣头基本具备了高速加工轻合金所需的所有性能: 旋转轴的夹紧系统最大限度地强化了粗加工性能, 带水冷的高刚性蜗轮蜗杆驱动以及独特的主轴油脂自动补充润滑系统确保了设备的长期稳定可靠性和低维护性。此外, 对于不同的应用, 这款机型能够提供多种相应的工件冷却方案。FZ32 拥有广泛的应用领域和出色的加工品质, 这已经在兹默曼公司客户对该机床的使用过程中得到了验证。

2 全球首创: M3 ABC 铣头

为了解决类似的飞机结构件凹穴凹槽加工的难题, 德国 Zimmermann 公司最近研发了一种具有 3 个回转轴的铣头 M3 ABC, 如图 6 所示。

从图中可见, M3 ABC 铣头与传统转角式铣头的区别在于增加了可沿特殊设计的、高精度和高刚度的弧形导轨偏转的 B 轴转动, 从 2 自由度变为 3 自由度。

M3 ABC 铣头 C 轴的回转角度为 $\pm 360^\circ$, A 轴可使主轴摆动 $\pm 110^\circ$, 而在 A 轴和 C 轴之间加入可偏转 $\pm 15^\circ$ 的 B 轴, 结构非常紧凑。

M3 ABC 铣头的 3 个自由度以及足够大的偏转范围使得采用该铣头的 ZF100 龙门式铣床可实现高柔性的六轴联动加工, 而且能够保证刀具处于最佳的空间姿态和使用优化的进给速度进行加工, 从而大幅度缩短加工时间, 同时获得非常好的表面质量。

这一创新从根本上改变了铝合金、合成材料和模型材料整体加工以及钢和铸铁零件高速加工的概念, 克服了长期以来 A-C 轴转角式铣头在五轴联动加工中的某些局限性。

典型飞机结构件的凹槽往往具有 $3^\circ \sim 5^\circ$ 斜度的内侧表面, 采用 A 轴和 C 轴的转角式铣头加工非常不方便, 特别是在转角处需要反复调整铣头的姿态。借助具有 ABC 轴的 M3

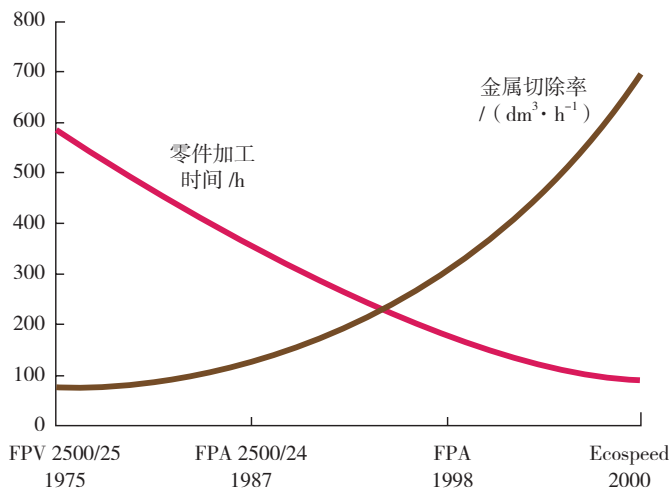


图5 Ecospeed与传统龙门式加工中心的比较

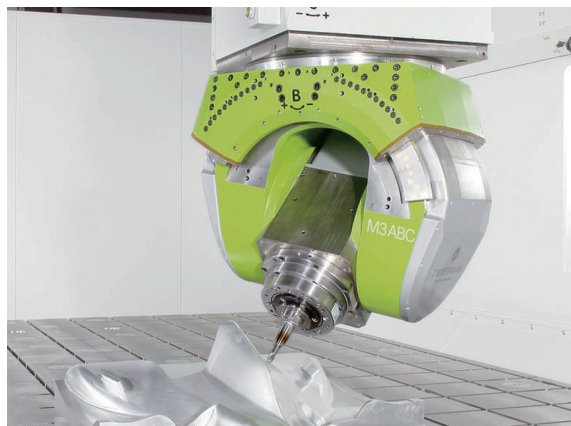


图6 M3 ABC铣头

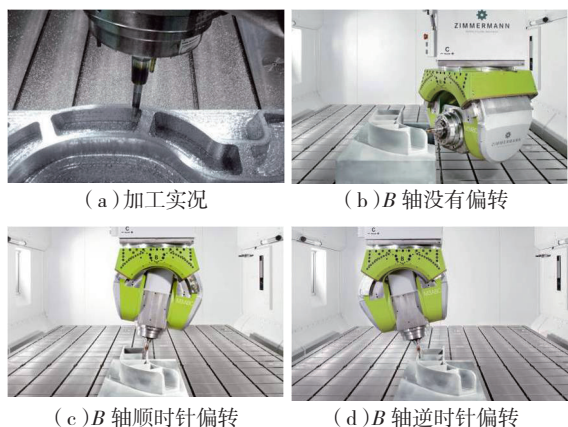


图7 用M3 ABC铣头加工凹槽

ABC 铣头加工这类凹槽却是非常理想的,如图 7 所示。

传统的具有 A 轴和 C 轴的摆角式铣头的主要缺点是在 A 轴处于 0 位时出现“死点”,此时铣头的 C 轴无效,即当铣头在垂直位置时,主轴无法在 C 轴方向偏转。即使主轴很小的姿态改变,也需要 C 轴作大的回转才能够实现,明显降低加工效率和零件表面质量。

新型的 M3 ABC 铣头则不然,即使在加工零件凹穴凹槽的转角处,也能保持恒定的高进给量,从而显著降低刀具的磨损。由于有 3 个回转轴,只需要最小的转动就能够实现主轴在任何方向、任何角度的姿态变化。此外,不再需要在每一加工循环之后急速撤回 C 轴,可以简化数控程序和节约大量的主轴姿态调节时间。

在 M3 ABC 铣头基础上,

Zimmermann 公司推出了六轴联动的 FZ100 动梁龙门式铣床,其外观如图 8 所示。

从图中可见,横梁可沿机床两侧的固定立柱在 X 轴方向移动,主轴滑座沿横梁在 Y 轴方向移动,而主轴滑枕在滑座中升降(Z 轴)。横梁、主轴滑座和主轴滑枕都采用轻量化设计原理,结构经过反复优化,不仅使机床移动部件的质量较轻,而且在工作时基本恒定,使惯性力的负面影响最小,从而保证了机床的高动态性能。

机床两侧面的立柱是整体结构,最大长度为 8m。为了保证结构的高刚性和吸振性,立柱由经过热处理的钢板焊接而成,其中填充有特殊的纤维加强混合物(DemTec),可以保持长期的工作稳定性而无需维护。

这种独特的立柱设计具有高热稳定性和颤振和振动的高阻尼,能够保证零件加工的高尺寸精度和高表面质量,其加工过程的动态性能和工件的轮廓精度远非一般铸铁和焊接钢结构所能比拟。

横梁由两侧立柱顶部的无间隙齿轮齿条机构驱动。这一布局使驱



图8 FZ100动梁龙门式铣床

动装置远离加工区域,并且容易采取完善的防护,有利于长期保证工作精度。横梁的最大移动速度可达 60m/min,最大加速度为 4m/s²。

工作台是整体铸铁件,长度为 3800~8800mm,宽度为 3000~4000mm,厚度为 220mm,直接安装在地基上,以保证其刚性。工作台的最大承重能力为 20000kg/m²。

M3 ABC 铣头的主轴功率为 60kW,最大转速为 22000r/min。

趋势与展望

随着用户需求的日益多样化和高性能化,批量生产的通用数控机床遇到了严峻的挑战。未来的发展有两种趋势:一种是以某种通用数控机床为基型增加选件的品种,扩展其功能和用途,由用户加以选择,实现客户化定制生产。另一种是聚焦用户需求,研发专有技术,开发专门化的数控机床,为用户提供全面解决方案。在激烈的市场竞争中,技术的先进性并非唯一的取胜要素,最根本的是机床制造商能不能吃透用户的需求,提供简单而可靠的解决方案,为用户创造更多的价值。应该清楚地认识到,只有机床制造商和用户都有利可得才能够使技术转变为真实的生产力。

创新的专有技术绝非空中楼阁、凭空想象能够研发的,而是建立在可靠的单项技术之上,是若干单元技术的集成。创新更离不开机床制造企业的技术和经验的多年积累,离不开工程师孜孜不倦的钻研。高素质的人才创新和研发专有技术的最重要的资源。

最后,创新的专有技术的研发还应该充分考虑模块化、可移植性和可重组性,提高其经济效益,使该项新技术能够为不同的用户服务,在不同的领域获得应用,使专有技术的研发带来更大的利润,获得更大的经济回报。

(责编 良辰)