

五轴车铣复合加工技术的现状与发展趋势

Current Status and Development Trend of Five-Axis Turning/Milling Complex Machining Technology

沈阳机床(集团)有限责任公司 李德珍 李宪凯



李德珍

高级工程师。从事数控车床、车削中心、四轴复合车铣中心的开发设计工作 10 余年。2001 年开始从事五轴车铣复合加工中心的研发工作,与团队一起填补多项国内空白,一直走在国内机床行业的技术前沿,并因此获沈阳市科技进步奖和辽宁省科技进步奖。

五轴车铣技术是 20 世纪 90 年代发展起来的复合加工技术,是一种在传统机械设计技术和精密制造技术基础上,集成了现代先进控制技术、精密测量技术和 CAD/CAM 应用技术的先进机械加工技术。这种

五轴车铣中心是五轴车铣技术的载体,是指一种以车削功能为主,并集成了铣削和镗削等功能,至少具有 3 个直线进给轴和 2 个圆周进给轴,且配有自动换刀系统的机床的统称。这种车铣复合加工中心是在三轴车削中心基础上发展起来的,相当于 1 台车削中心和 1 台加工中心的复合。

加工技术的实质是一种基于现代科技技术和现代工业技术的工艺创新并引发相关产业工艺进步和产品质量提升的新技术。

五轴车铣中心是五轴车铣技术的载体,是指一种以车削功能为主,并集成了铣削和镗削等功能,至少具有 3 个直线进给轴和 2 个圆周进给轴,且配有自动换刀系统的机床的统称。这种车铣复合加工中心是在三轴车削中心基础上发展起来的,相当于 1 台车削中心和 1 台加工中心的复合。因此可以在 1 台车铣中心上,经过一次装夹,完成全部车、铣、钻、镗、攻丝等加工,其工艺范围之广和能力之强,已成为当今复合加工机床的佼佼者,是世界范围内最先进的机械加工设备之一。

五轴车铣中心的先进性表现在其设计理念上。在通常的机械加工概念中,1 个零件的加工,少则一两工序,多则上百工序,要经过多台设备的加工来完成,要准备刀具、工装夹具。对复杂的零件来说,有的一套工装的准备就需要三、五个月的时间,即使不考虑经济成本,三、五个月的时间很可能会错过许多商品机遇和战略机遇。在汽车、家电等批量生产行业,为了提高效率和自动化水平,广泛采用自动化生产线,庞大的物流系统构成了自动线很主要的一部分,同时是一个占钱、占地的部分,也是故障多发的部分,对复杂形面的加工,物流更是一个大问题。零件的多次装夹和基准转换,有时带来不必要的工序,同时也使零件加工精度表

失。

五轴车铣复合加工中心从设计理念上解决了这个问题,它是一次装夹,完成加工范围内的全部或绝大部分工序,实现了从复合加工到完整加工的飞跃。

这种完整加工的设计理念有以下几方面好处:

(1) 缩减生产过程链和减少在制品数量。

完整加工大大缩短了生产过程链,而且由于把加工任务只交给一个工作岗位,不仅使生产管理和计划调度简化,而且透明度明显提高,无需复杂的计划系统就能够迅速解决所发生的事情并使之优化。工件越复杂,它相对传统工序分散的生产方法的优势就越明显。同时由于生产过程链的缩短,在制品数量必然减少,可以简化生产过程管理。

(2) 减少基准转换,提高加工精度。

工序集成化不仅提高了工艺的有效性,由于零件在整个加工过程中只有一次装卡,加工的精度更容易获得保证。

(3) 减少工装夹具数量和占地面积。

尽管加工中心机床的单台设备价格较高,但由于过程链的缩短和设备数量的减少,工装夹具数量、车间占地面积和设备维护费用也随之减少,从而降低了总体固定资产的投资、生产运作和管理的成本。

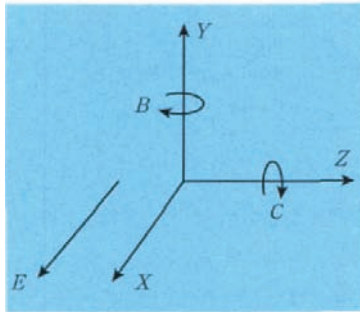
(4) 缩短产品研发周期。

可持续发展是企业的一个重要战略目标,其前提是产品的不断更新。在竞争日益激烈的环境下,机会转瞬即逝,这就要求产品研发周期不能太长。对于航空航天领域的企业,新产品零件越来越复杂,精度也越来越高,因此具备高柔性、高精度、高集成性和完全加工能力的五轴车铣复合加工中心可以很好地解决新产品研发中复杂零件加工的精度和周期

问题,大大缩短研发周期和提高新产品的成功率。

五轴车铣中心功能

五轴(有时为六轴)分别为3个或4个直线轴(X轴和E轴、Y轴、Z轴)以及2个回转轴(C轴、B轴)。



五轴车铣中心的进给轴

X、Y、Z构成三维空间,在加工中,X轴、E轴形成回转体的径向尺寸或复杂曲面的插补铣加工;Y轴形成刀具与主轴中心的偏离,可用于钻偏心孔、平面的Y向铣削或复杂曲面的插补加工;Z轴形成回转体的轴向尺寸或可用于平面的Z向铣削复杂曲面的插补加工。

C轴为绕Z轴旋转的轴,在回转体上实现周向进给,分度和定向停车,用于端面钻孔和插补铣削加工。

E轴为X轴的平行轴,是为实现某些特殊功能而附加的轴。

B轴为绕Y轴旋转的轴,形成刀具与主轴回转中心的夹角,当作为连续轴插补加工复杂曲面时,刀具可以保持连续垂直于零件轨迹的切线方向。

发展现状

进入21世纪以来,五轴车铣中心发展非常迅速,不仅规格齐全,在硬件功能上十分完善,且软件功能也很强大。如WFL的M系列

和MAZAK的E-H系列等。

在规格上,WFL的M系列从M30到M150,共有7个规格系列,基本上涵盖了直径从300mm~1500mm,长度最长到6500mm的所有工件;而MAZAK的E-H系列则基本上覆盖了车削直径从610mm~920mm的中型规格工件。

在硬件功能上,除了标准的功能模块配置外,还有一些可选模块。如WFL的M系列可选模块有副主轴模块、下刀塔模块、长镗刀杆模块和对刀尖的ATC更换模块、带径向自动进给的镗刀杆模块、角度头模块等。而MAZAK的E-H系列的可选模块有副主轴模块、下刀塔模块、长镗刀杆模块和对其刀尖的ATC更换模块。

在软件功能上,都具备在线检测功能、刀具在线实时监控及适应控制功能、自动对刀功能、温度补偿功能、CAD/CAM自动编程功能等。

目前,最先进的五轴车铣加工中心除了可以进行车、铣、钻、镗、攻丝等加工外,还可以镗型腔、钻深孔、滚齿、铣叶片以及进行磨削加工和工件的在线测量,实现各种误差补偿、刀具在线监控和适应控制等。

然而同样的设计理念,在众多的生产厂家当中,所走的路线却各不相同,各有各的特点,产品的应用场合也有较大区别。主要分为两大流派,一个是欧式风格,以WFL、NILES、沈阳数控为代表,一个是以DMG、



MAZARK 为代表的日式风格。

1 两类车铣中心在高效切削理念上的差别

两种流派的机床设计在考虑车铣效率时,实现的手段是不一样的,日式车铣复合加工中心是以高速、小切深、大进给为基础来确定机床的参数的,利用了刀具的上限切削速度,适合于模具圆角和材料较软的被加工零件切削。欧式车铣复合加工中心是以重切削为条件,即大切深、大进给、高线速度来确定机床参数的。两种高效切削方式实现方法明显不一样,以高速为基础的方式实现高效,从经济上考虑,刀具寿命低,零件制造成本相对提高;以重切削为基础设计的机床,刚性好,刀具使用中高转速寿命长,经济性好。目前机械式动力主轴转速已达 9000r/min,有效地解决了小圆角切削线速度低的问题。

2 车铣中心两大流派的结构分析

(1) 总体布局。

日式布局紧凑、体积小,采用大平顶梯形床身截面,截面高度低(平床身);欧式床身截面为三角形(斜床身)截面高度比日式要高,床身重,挠度小,但体积和重量都大,相对成本高。

(2) Y 轴形式。

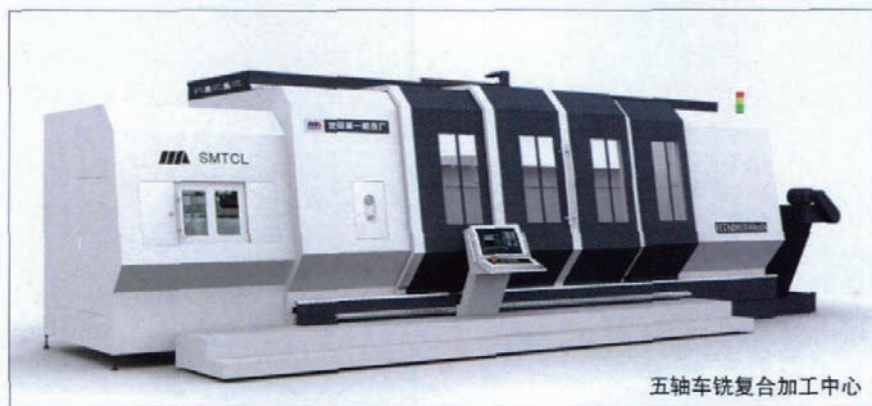
日式车铣复合加工中心的 Y 轴是虚拟 Y 轴,是 X 轴和一个与 X 轴有一定夹角 Y' 的轴差补来实现。Y 坐标与 X 坐标的垂直关系由差补精度决定。在实现 Y 坐标方向运动时, X 轴和 Y' 轴同时运动。对两轴运动的动态特性要求较严格,这种形式 X 轴拖动重力轻,易于控制,受局部影响 Y 轴行程较小。

欧式车铣复合加工中心,是机械保证, Y 与 X、Z 垂直,可达到较高精度,这在铣削 Y 向平面时易于达到理想的平面质量。这种部局 Y 向行程比日式大 1/3 左右。

(3) 刀具动力主轴。

日式车铣复合加工中心刀具动力主轴通常采用电主轴,动力主轴箱体积一般很大,相对来说主轴直径较小,采用角接触球轴承,这种设计可实现较高转速,属高速小扭矩主轴,扭矩一般 $\leq 150\text{N}\cdot\text{m}$,对于大刀具悬伸和重负载切削不利。在小切深、高转速方面有优势。主轴寿命相对较低,到达寿命后只有电主轴生产厂才有力量维护。

欧式车铣复合加工中心的刀具



动力主轴是曲型机械式主轴,目前最高转速 9000r/min,相对电主轴转速较低,对于绝大多数切削条件来说这个转速可以满足。这种形式一般很轻松达到 $300\text{N}\cdot\text{m}$ 以上扭矩,适合于大扭矩切削,在黑色金属切削方面有明显优势。

(4) C 轴形式。

从日式和欧式风格上看,相近规格日式 C 轴扭矩较小,欧式扭矩较大。从这一点上可以看出,欧式车铣复合加工中心在应对较大惯量、较大直径铣削能力上,更具有优势,尤其是 C 轴定向锁紧功能,对提高铣削能力,提高零件表面质量有很大的作用。

3 五轴车铣中心的几大结构形式

纵观世界上各个生产厂商的车铣复合加工中心产品,虽然它们的结构各不相同,各有千秋,但是总体来说可以分为以下 4 类典型结构。

第 1 类是以 WFL、沈阳机床为代表的斜床身立式车铣复合加工

中心。

该类机床总体布局采用传统卧式车床布局形式,床身采用高刚性的斜式床身结构,导轨为特殊设计的大尺寸直线导轨,具有高刚性和优良的抗振性。床身左端为车削主轴箱,具备 C 轴功能。右端为尾座装置。斜式床身上部是车、铣、镗主轴装置,可沿纵向(Z 轴)、横向(X 轴)、径向(Y 轴)进行直线运动和 B 轴的摆动回转运动。斜式床身的下部是一个在

纵向和横向均可机动控制的中心支架,用于端面和镗内孔加工不能使用尾座装置时支撑工件。因而该类机床具备 X、Y、Z、B 和 C 多轴插补联动功能,可在无人干预的情况下,进行车削、钻孔、铣削、磨削、枪钻、内外齿加工、车铣、圆弧铣削等加工任务。

第 2 类是以 DMG 公司为代表的斜平床身的立式车铣复合加工中心。

这类机床是世界上绝大多数机床制造商所采用的结构,其结构比较紧凑。其中 DMG 公司在其机床的 Z 轴采用了直线电机技术,快移速度达到 $70\text{m}/\text{min}$; B 轴采用涡轮蜗杆,其力矩电机驱动分度精度可以达到 0.001° 。

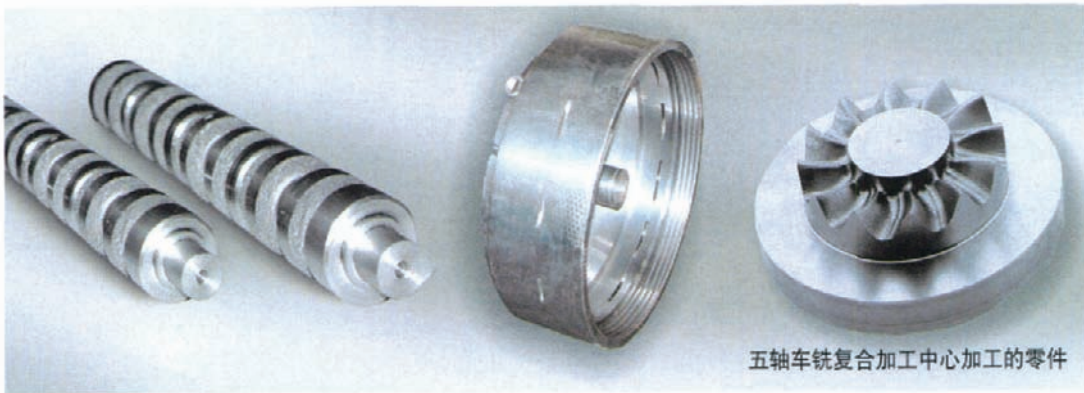
第 3 类是以日本的 MORI SEIKI 和 MAZAK 为代表的箱中箱式卧式车铣复合加工中心。

这类机床是日本森精机公司在 2005 年着力推出的一款新型的车铣复合加工中心,此款机床采用了很多

世界领先的技术。其中包括很多加工中心采用的箱中箱结构、森精机公司提出的重心驱动技术、丝杠中空冷却技术、车削主轴箱体冷却技术,以及其刀塔采用的力矩电机驱动的动力刀具等。

第4类是以INDEX公司为代表的动立柱式卧式车铣复合加工中心。

这类机床借鉴了卧式加工中心成功的经验,采用了动立柱式结构实现Z、X、Y向进给运动,而床身有两种结构,一种是采用平床身,另一种采用斜床身。



五轴车铣复合加工中心加工的零件

从这4类典型的机床结构不难看出,现代机床已经发展到相当完善的程度,各类机床之间彼此相互交融,第3和第4类机床就是很好地融合了卧式加工中心和车削中心的结构而得到的一种全新的结构,所以其既有卧式加工中心的特点,同时又有车削机床的特点,所以其加工范围和能力就大大地增强了。

国内对五轴车铣中心的研究始于2000年,并在2001年制造出第一台五轴车铣中心SSCKZ63-5;同年“十五”国家科技攻关计划重点项目SSCKZ80-5/2000启动并由沈阳机床承担此项目的研究,2003年该项目通过国家验收并在2005年获中国机械工业科学进步二等奖。

在五轴车铣技术领域,我国与发达国家相比,虽然起步较晚,但在开始研发的时候就瞄准当时世界上

五轴车铣中心最高水平,所以起点很高,走的是高刚性、大切削量的路线,而且进步相当快。经过几年的艰苦努力,目前这种五轴车铣中心在沈阳机床已进入技术成熟期和产品成长期,并已量产化。已有6种规格、8个品种、20多台设备在服役,无论在规格品种或功能上,还是在性能和精度上均与国外同类产品水平相当,不仅可以为风力发电、船舶、航空航天、军工等国家重点行业提供这种高档车铣复合设备和解决方案,还可为他们免费提供相关技术支持,这也是沈阳机床这样的国内知名企业在服务

观念上的重大改变。

发展趋势

五轴车铣复合加工中心从产生至今,已有近20年的历史,技术已经成熟并被国内外用户接收和认可。从趋势上看,主要向以下几个方向发展:

(1) 更高工艺范围。

通过增加特殊功能模块,实现更多工序集成。例如将齿轮加工、内外磨削加工、深孔加工、型腔加工、激光淬火、在线测量等功能集成到车铣中心上,真正做到所有复杂零件的完整加工。

(2) 更高效率。

通过配置双动力头、双主轴、双刀架等功能,实现多刀同时加工,提高加工效率。

(3) 大型化。

由于大型零件一般多是结构复杂、要求加工的部位和工序较多、安装定位也较费时费事的零件,而车铣复合加工的主要优点之一是减少零件在多工序和多工艺加工过程中的多次重新安装调整和夹紧时间,所以采用车铣中心进行复合加工比较有利。所以目前五轴车铣复合加工中心正向大型化发展。例如沈阳机床的HTM125系列五轴车铣中心,回转直径达到1250mm,加工长度可以达到10000mm,非常适合大型船用柴油机曲轴的车铣加工。

(4) 结构模块化和功能可快速重组。

五轴车铣中心的功能可快速重组是其能快速响应市场需求,并能抢占市场的重要条件,而结构模块化是五轴车铣中心功能可快速重组的基础。一些技术先进的厂家(如德国DMG、奥地利的WFL、日本的MAZAK公司等)的许多产品都已实现结构模块化设计,并正在向如何实现功能快速重组的方面努力。

家(如德国DMG、奥地利的WFL、日本的MAZAK公司等)的许多产品都已实现结构模块化设计,并正在向如何实现功能快速重组的方面努力。

结束语

五轴车铣技术的先进理念是提高产品质量和缩短产品制造周期。因此,这种技术在军工、航空、航天、船舶以及一些民用工业领域中的应用具有相当的优势,尤其在航空航天领域一些形状复杂的异形零件的加工中更具优势,因此国外早已在航空航天领域大批采用此类设备代替传统的加工设备,而国内在这方面则比较落后,因此还需借鉴国外的先进经验,争取在五轴车铣技术的应用领域改变落后的局面。

(责编 侧卫)