

大型飞机复杂回转件的车铣复合加工

Turn-Milling Complex Machining of Large Aircraft Complex Round Parts

南昌航空大学航空制造工程学院 王细洋 朱志坤



王细洋

南昌航空大学航空制造工程学院教授,工学博士,研究方向为数控加工及过程监控。

大型飞机上的复杂回转件包括起落架整体外筒、整体活塞杆、整体叶轮、滑架、转轴梁等,既具备回转体结构件高精度的特点,又具有非回转体结构复杂的特点,同时尺寸又比较大。

以起落架为典型代表的航空复杂回转件,结构复杂、精度要求高、材料切削性能差。车铣复合加工技术是解决其高效加工的有效途径。为发挥其最佳性能,应将普通机床和车铣中心搭配使用。工装设计时,应着重考虑如何防止铣削时工件的移位。多任务刀具适合于车铣复合加工。车铣复合定位 3+2 数控加工具有明显的效率和质量优势。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.01/02.068

航空复杂回转件属于航空整体结构件,作为飞机主要承力构件,常采用超高强度钢制造,切削性能差,属典型难加工材料。该类零件对加工设备、工艺方法、刀具选择、切削参数和冷却等都有特殊要求,常规加工方法难以保证加工质量和加工效率。近年来快速发展的车铣复合加工技术是解决其高效加工的有效途径。

车铣复合加工在我国航空制造领域应用时间还比较短。大飞机复杂回转件的机械加工,应当采用相应的车铣复合加工中心。车铣复合加工工艺、数控编程、切削刀具和切削参数是航空复杂回转件高效加工需

要解决的问题。

航空复杂回转件结构

航空复杂回转件是由回转件与支座、接头等结构件合并而成的整体件,在结构上有共同点。

图1所示为某型飞机起落架外筒。该零件主要是由主筒体、转轴柱体、相交区域的加强腹板和起收放连



图1 某型飞机起落架外筒

接作用的柱体、耳片等构成。主筒体内部为高精度深盲孔,是起落架缓冲器的主要组成元素。加工特征包括内外圆柱面、圆锥面、圆槽面、球面、螺纹、回转曲面等回转结构,以及平面、斜面、型面、加强筋、槽腔、开口、下陷、凸台等非回转结构。不是所有的复杂回转类零件都包含这些结构,但一定都包括回转部分和非回转部分。

图2为波音787飞机起落架。减震器是起落架的主要缓冲构件,采用气动液压减震支柱。内、外筒零件是典型的复杂回转件,承受高强度的冲击载荷。

非回转型面,多数位于零件的配合表面,包括直纹面和双曲面等型面。对于直纹面,可在5轴数控铣床上加工,立铣刀轴平行直纹面的母线,刀具沿直纹面的引导线切削。对于双曲面,多数采用三坐标行切或者五坐标行切的加工方法。

耳片是突出在零件外圆、平面或型面上的耳形结构,外形多为圆弧,两侧为平面,圆弧中心有孔。耳片有时成组出现,一般用于与其他零件连接配合。按所处位置和复杂程度不同,加工时可采用3轴、4轴或5轴数控加工,也可采用普通铣床加工,耳片侧面有时需要磨削。

凸台多数位于外圆、腹板或加强

筋板上。凸台的主要作用是连接、止动、加强孔边等。凸台可以采用3轴、4轴或5轴数控加工,也可以采用普通铣床加工。凸台端面有时需要磨削。

加强筋主要起增加结构强度和提提高结构稳定性的作用。复杂回转类零件上的加强筋形状主要是直壁,也有弧形及带有角度的加强筋。可采用3轴、4轴或5轴数控加工,也可采用普通铣床加工。

槽腔是位于零件非回转区域的空穴式结构,其深度大于零件的填角半径。其侧壁有开角、闭角、直角等形式,也有的侧壁是凹槽结构。可采用3轴、4轴或5轴数控加工,也可采用普通铣床加工。

当槽腔的深度小于或者等于零件的填角半径,所形成的凹陷结构叫做下陷。可采用3轴、4轴或5轴数控加工,也可采用普通铣床加工。

航空复杂回转件材料

在航空工业中,屈服强度($\sigma_{0.2}$)在1400~1600MPa以上的钢被称为超高强度钢。飞机和发动机中很多重要零件需要采用超高强度钢制造以满足高强度、高韧性、高抗疲劳性和耐腐蚀性等性能要求。

300M钢是美国国际镍公司在4340钢基础上添加了1.5%左右的

硅而发展起来的新型低合金超高强度钢。经淬火、回火后具有超高强度(抗拉强度1960~2100MPa)、高硬度(HRC52~56)、高韧性、优良的疲劳强度特性和耐应力腐蚀特性^[1]。

300M钢是目前超高强度钢中强度最高、应用最为成功的钢种。美国目前在役的90%以上的军民用飞机起落架用300M钢制造,如F-15、F-16、DC-10、MD-11、C-17、波音747、767和787等飞机。该钢也为空客飞机(如A380)采用。

我国于20世纪80年代研制了300M钢,并发展了一系列抗疲劳制造技术,使300M钢成功用于多种飞机的起落架,首次实现了起落架与飞机同寿命使用。

300M钢属典型航空难加工材料,切削加工特性主要有^[2]:

(1)切削力大,强度高。在同等切削条件下,300M钢切削力是普通钢材的3倍,是45钢的1.17~1.49倍。

(2)刀具磨损严重,不易断屑。镍含量较高,切削时产生的粘刀现象容易引起切屑瘤的形成,从而增大了表面粗糙度,加快了刀具磨损;材料中高硬度的碳化物颗粒,切削过程中会摩擦刀具切削面,从而加剧刀具磨损^[3]。韧性高,不易断屑。

(3)切削温度高。Ni元素的大量存在,使300M钢导热性下降,但硬度和强度得到了提高。高的切削功率和材料低的导热性两者共同作用提高了切削温度。高的切削温度,容易导致零件加工表面金相组织发生变化(烧伤)并伴随出现很大的表面残余应力,甚至出现裂纹,对零件表面质量造成不利影响。

车铣复合加工技术

航空复杂回转件的加工过程主要由回转面的车削、磨削和非回转面的铣、钻、镗等工序组成。

多品种小批量生产是航空产品的显著特点,实现不同产品之间的快

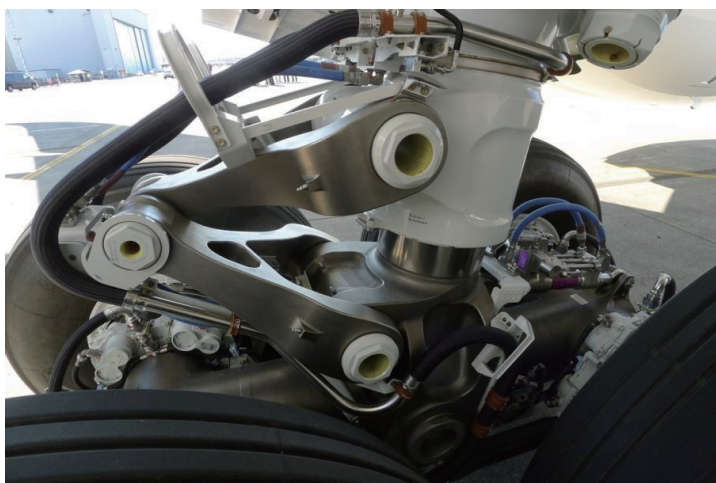


图2 波音787飞机主起落架外筒

速转换,对航空制造企业来说具有重大的现实利益。车铣复合加工是一种有效的解决方案。

车铣复合机床,简单的说就是具有数控车削、数控铣削、数控镗孔加工,甚至数控插齿、滚齿等多种加工功能的数控加工中心。工件可以在一次装夹中完成全部或大部分的回转面和非回转面的切削加工,位置精度容易得到保证。车铣复合机床的主要功能如图3所示。

车铣复合机床主要有2种结构形式,一种是以卧式加工中心为基础,增加车削功能,主要用于大型复杂的盘类、壳体类、机匣类结构件加工,如日本 MORISEIKI 和 MAZAK 机床。另一种是在卧式数控车床的基础上,增加了5轴数控铣削功能,主要用于曲轴类、筒杆类、发动机活塞等形状复杂、精度要求高的异型回转体零件加工。这类设备以奥地利 WFL 车铣技术公司的车铣复合加工中心为典型代表。

车铣复合加工技术已成为航空复杂回转件高效加工的发展方向,在空客和波音公司的大飞机制造中都得到了大量的应用。近年来,车铣复

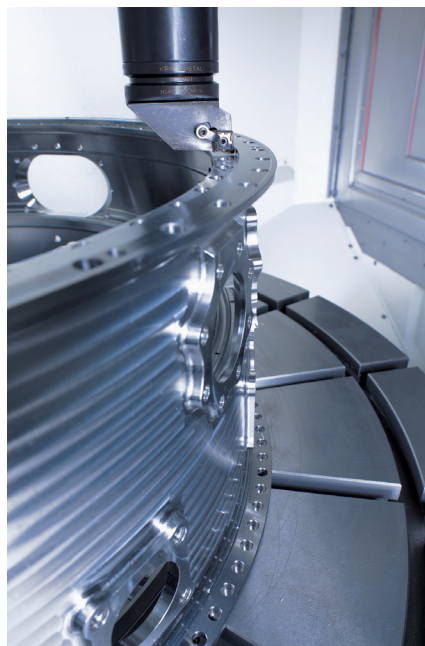


图3 车铣复合机床主要功能

合加工中心在我国航空制造厂家开始大量引进。但是,由于相关的工艺、编程、后处理等应用技术研究落后,引进的车铣复合加工设备基本上处于相对较低的运行水平。用于航空复杂回转件车铣复合加工的机床必须具备以下基本特性^[4]。

(1)高刚性、大功率、大扭矩,满足难加工材料强力、高效加工需要。

(2)高精度,满足复杂回转件半精加工、精加工精度指标要求。

(3)具备5轴联动铣削、3+2固定轴铣钻镗加工能力,满足复杂结构非回转部分的粗、精加工要求。

(4)具备内外圆数控车削加工能力,满足回转面车削加工要求。

(5)具备深孔钻、扩、镗加工能力,满足大长径比深孔加工要求。

(6)具备在线检测、刀具管理等辅助能力,减少辅助工作时间。

某型车铣复合加工中心的运动坐标具有 X_1 、 Y_1 、 Z_1 、 B_1 、 C_1 、 Z_2 、 Z_4 、 S_1 、 S_3 等8个运动轴。其中 S_1 既是车削模式下的车削主轴也是铣削模式下的 C_1 轴; S_3 是车铣镗单元主轴,所有加工刀具安装在 S_3 轴上; Z_2 是中心架轴; Z_4 是尾座轴; X_1 、 Y_1 、 Z_1 、 B_1 、 C_1 在铣削模式下可实现5轴五联动, X_1 、 Z_1 、 Y_1 、 B_1 在车削模式下可实现 B 轴联动车削,机床控制系统采用 Siemens840D。

该机床总体采用卧式布局,左端为车削主轴箱,具备 C 轴功能,右端为可编程尾座;斜床身上部是车、铣、镗主轴装置,可沿纵向(Z 轴)、径向(X 轴)、横向(Y 轴)进行直线运动和 B 轴的摆动回转运动;斜床身下部是一个数字控制定位的中心架,用于端面 and 镗内孔加工不能使用尾座装置时支撑工件;主轴箱后面的无磨损、免维护盘式刀库能容纳111把刀位;拥有在线检测功能。

车铣复合加工工艺

与普通数控加工工艺相比,车铣

复合加工工艺具有工序集中和编程复杂的特点。为使车铣中心的功能得到充分发挥,应在一台机床上加工尽量多的内容,对尺寸和位置精度要求高的部位尽量安排在一次装夹中完成。

车铣复合加工工艺设计时,应重点考虑3方面的问题:工序顺序安排、刀具选用和装夹方式选择。加工顺序安排合理可以减小零件变形,使加工精度更容易得到保证;刀具选用合理能有效提高加工效率和加工质量;装夹方式选择适当可以使装夹牢靠,减少装夹次数,方便程序的编制。

某型飞机起落架外筒毛坯为整体模锻件,是飞机关键受力件,易疲劳破坏。为保证加工质量,在加工过程中安排了超声波探伤、淬火、表面处理等特种工序。特种工序穿插在切削加工工序之间,成为划分不同加工阶段的标志。在热处理技术和刀具条件允许的条件下,尽量在毛坯状态进行热处理。

将车铣复合加工机床和普通加工机床结合起来使用,有利于降低加工成本以及提高效率。装夹面和定位基面可以安排在普通机床上进行加工。对功率和扭矩要求大的粗加工以及对加工精度要求不高的加工工序应安排在普通机床或普通数控机床上进行,这样可以充分发挥关键设备在难加工和精加工方面的优势,提高设备利用价值。同时,由于在加工过程中穿插了超声波探伤、去应力、淬火热处理等特种工艺,不可能完全实现“一次装夹、全部完工”的加工理念。

飞机起落架外筒零件的工艺流程大致可以如下安排^[4]。

(1)荒加工:为了给超声波检查准备较规则且粗糙度较小的表面,常采用车、铣、钳等方法去除锻件表面氧化皮。

(2)粗加工:采用车、铣、钻(含

数控)等加工方法,去除零件内、外表面大部分余量。

(3)半精加工:采用车、铣、钻(含数控)等加工方法,完成一般精度的非配合面的加工,并为精加工准备定位面。

(4)精加工:采用精车、精铣、精镗、磨削等方法,对零件的重要表面进行最终加工。

具体的加工工艺过程如图4所示。车铣加工1完成淬火前半精加工,完成绝大部分非配合面的加工,包括外圆、深孔内部槽腔、非回转表面加工,完成配合面的半精加工,包括各耳片、孔、深孔。车铣加工2补充加工上工序因装卡阻挡无法加工的部分。车铣精加工3完成淬火后的各耳片、孔、环槽、螺纹等精加工(不包括高精度面)。深孔精磨主要磨削及珩磨精密深孔配合面。

装夹方式

零件加工制造的首要条件就是定位合理与装夹紧固可靠。航空复杂回转类结构件主回转体轴线通常是零件的主要设计基准。为达到加工基准与设计基准一致的目标,常以主回转面作为主要的定位装夹面,再辅以孔、圆柱或平面,就能实现工件的完全定位。

车铣复合加工装夹方式与普通车床类似,一般以卡盘、中心架和顶尖装夹工件。车削加工外部回转面时以卡盘和顶尖装夹,加工内部回转面以卡盘和中心架装夹;铣削加工时,为提高装夹稳定性,卡盘、中心架与顶尖可同时使用。若机床配有尾座,应有效结合使用中心架和尾座顶尖,以增加装夹的强度,减少加工过程中的颤振现象。在细长杆零件加工中,中心架和尾座的使用将决定零件加工的成败。

采用卡盘-中心架-顶尖系统装夹工件时,工件仅有卡盘的夹紧力和顶尖的顶紧力,固紧工件的只有卡

爪的摩擦力,在切削力和顶尖力的作用下工件与卡盘能发生相对转动和轴向的移动。车削回转面时,加工过程中工件如果相对卡盘发生了转动,对车削加工结果影响不大,只需要注意限制轴向移动。

车铣复合加工时,车削与铣削、钻孔等工序内容在一次装卡中完成,加工过程中一旦发生工件位移而没有及时发现并纠正,后续的切削加工位置就和程序设定的加工位置不同,造成加工零件报废。铣削力是变化的冲击力,很容易致使工件发生位移,因此在设计装夹方式时,必须高度重视,注意设计防止工件绕主轴线扭转和沿轴线位移的装置。

在车铣粗加工时(包括车外圆、粗铣腔、粗铣柱面、平面等),利用毛坯上附带的加工试棒的材料夹持,中段以中心架定位并加紧,右端用顶尖顶住。加工中段时,可以将中心架涨开避让,加工右端时可以将顶尖移开避让,进行重载加工时顶尖和中心架同时参与夹持,具体装夹如图5所

示。

因为在大余量重载铣削、钻偏心孔等加工过程中,存在很大的扭转力,工件与卡盘之间可能会出现相对转动,所以在确定装夹方式时,通常应附加防扭转装置。铣内形和端面环槽装夹时,用卡盘反爪夹持内孔,防扭转装置固定在卡盘端头,以工件上的突出耳片增强防扭转能力。

车铣加工深孔和端头时,需要将工件掉头。用卡盘反爪夹持内孔,防扭转装置顶住小柱体平台,增强防扭转能力。

起落架外筒零件的两端外部均为比较复杂的结构,不便装夹,而内孔为主要加工面,不便设置工艺凸台。因此,半精加工和精加工阶段都采用内孔装卡,利用三爪卡盘向外张紧孔壁加工。为了防止工件在加工过程中在切削力作用下与卡盘发生相对旋转,在卡盘端面上设计安装了防转支撑,装夹(中心架和顶尖未示出)如图5所示。特制加长卡爪张紧工件内孔,卡爪端面顶住工件内孔

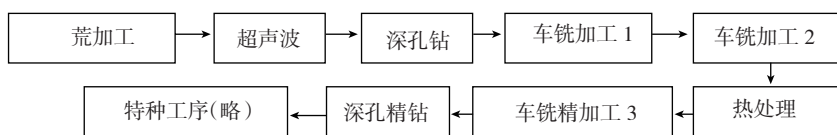


图4 回转件车铣复合工艺流程

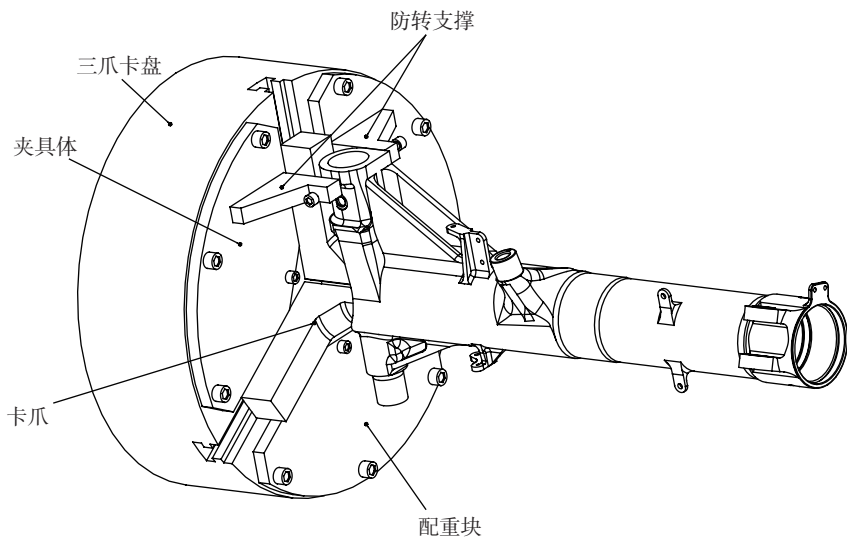


图5 车铣复合半精加工装夹^[4]

端面而实现工件的轴向定位,安装在防转支撑上的可调支螺钉顶住工件外伸部分,防止工件与卡盘的相对旋转。

车铣复合加工刀具

目前国内外加工高强度钢的刀具材料主要选用硬质合金、陶瓷和CBN。

车铣复合加工机床一般都可以兼容使用目前常用的各类旋转刀具和车削刀具。典型车铣复合机床机内结构布局,上部铣、钻、镗主轴单元与常规数控铣钻加工设备类似,可以使用各类回转刀具,下部刀塔与数控车床刀塔类似,可以装卡各类内外圆车刀。同时,车铣复合机床还具有更高的灵活性,出现了各种各样可以装在铣、钻、镗主轴单元上的车削刀具,可以不使用下部刀塔而完成车削加工。

车铣复合机床的灵活性还引导发展了多任务刀具。多任务刀具是指1把刀能完成数把刀完成的加工内容,一次安装多次走刀,极大地提高刀具的柔性。例如山特维克公司的CoroPlex多任务刀具提供了高可达性、高稳定性和高效率;减少了换刀时间;节省了刀具室空间;降低了成本。CoroPlex多任务刀具具有五合一刀具(1把铣刀和4把车刀)、双刃刀具(车刀合二为一)、小型转塔刀具(车刀四合一)等几种形式。

车铣复合加工数控编程

车铣复合加工需要完成数控车、多轴铣、3+2定位加工和钻孔等多种加工方式的编程,难度大。UG NX和CATIA系统具有车铣复合数控加工编程功能模块。

在对回转曲面、斜壁和轮廓型腔进行粗加工时,可以利用实体、表面或曲线定义被加工区域,切除大部分毛坯材料,适用于回转件所有外型及内腔的粗加工。粗加工时,采用跟随

零件的加工策略,通过沿零件的几何边界偏移相同数量的步距来形成加工刀路,当遇到相交时,将其中的一个刀路修剪掉。在这种加工策略下,岛域周边的余量能够有效的得到清除,这种加工策略特别适用于带岛的穴型加工^[3-5]。图6为车铣粗加工刀具路径。

复杂曲面由于表面凹凸起伏,斜率变化大,3轴数控加工时,切削深度和切削宽度的不断改变,会引起不稳定的刀具载荷,加剧刀具的磨损,降低加工质量。在表面凹凸程度较大的部位还容易发生刀具和工件的干涉,产生严重后果,定位3+2的加工方式能克服3轴数控加工复杂曲面时存在的缺点。

车铣复合定位3+2加工是指将B、C轴转到一定的角度并锁紧后进行加工,当一个区域的加工完成后,再根据另一个加工区域的法矢方向调整B、C轴的角度继续进行加工^[4]。其本质是将五轴联动加工变为某一方固定角度的加工,加工过程中刀轴方向不再发生变化。由于能够一次定位实现加工,相比3轴数控加工而言,3+2定位加工在效率和质量上具有明显优势。

车铣多轴铣精加工解决方案。使用多轴联动的加工方式,精加工复杂回转件圆柱部分多个复杂碎片曲面,选择加工几何、驱动方式及相关参数。在实际加工时应充分利用机床特性,有效控制刀具摆角变化大小,使位移和摆角之间良好匹配,防止过切现象产生。为降低刀具在零件拐角处摆角变化的剧烈程度,在加工零件拐角处时,应适当增加过渡的刀位,这也有利于机床平稳工作,避免产生过切,提高零件的加工表面质量。图7为多轴铣削刀具路径。

结束语

以起落架为典型代表的航空复杂回转件,结构复杂、精度要求高、材

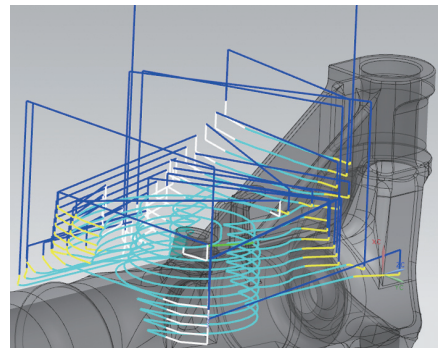


图6 车铣粗加工刀具路径

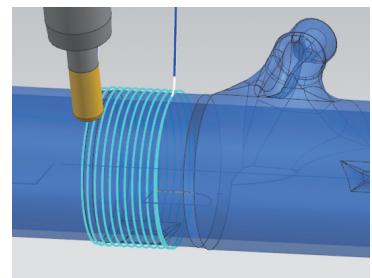


图7 多轴铣削刀具路径

料切削性能差。车铣复合加工技术是解决其高效加工的有效途径。为发挥其最佳性能,应将普通机床和车铣中心搭配使用。工装设计时,应着重考虑如何防止铣削时工件的移位。多任务刀具适合于车铣复合加工。车铣复合定位3+2数控加工具有明显的效率和质量优势。

只有解决了工艺、编程以及后处理等瓶颈问题,航空制造企业最新引进的车铣复合加工设备才能在复杂回转件加工中真正发挥作用。

参考文献

- [1] 张慧萍,王崇勋,杜熙.飞机起落架用300M超高强钢发展及研究现状.哈尔滨理工大学学报,2011,16(6):73-76.
- [2] 刘天琦.飞机起落架用材发展,大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年学术年会论文集,2007.
- [3] 李立玉.基于模型定义的飞机结构件数控编程技术研究[D].南昌:南昌航空大学,2013.
- [4] 朱志坤.航空复杂回转件高效数控加工工艺研究[D].南昌:南昌航空大学,2013.
- [5] 王细洋.飞机结构件的高速铣削工艺.航空制造技术,2013(14):64-69.

(责编 亿霖)