

航空发动机零件复合加工技术 研究

Complex Machining Technology for Aeroengine Part

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 杨金发 叶洪涛 张军 刘阳 田晓龙



杨金发

高级工程师,就职于中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司技术中心。主要从事航空难加工材料金属切削技术、高速高效数控加工技术、切削数据库智能化的研究与开发工作。

航空发动机制造技术已经成为一个国家科技水平和综合国力的重要标志之一。大涵道比涡扇发动机是自主研发大型飞机的关键。大飞机的发展,在很大程度上依赖于材料和制造技术的发展。随着现代尖端科技的不断发展,新结构、新材料和

航空发动机复合加工技术向精密化、自动化、柔性化、集成化、智能化、多样化和绿色环保方向发展。针对国家大飞机发展战略,我们必须对复合加工全过程研究,形成可用、可靠的技术体系与平台,形成生产力,提高加工质量和效率,快速响应市场需求。

复杂形状的精密零件被大量采用,先进的材料和工艺是航空发动机特别是大飞机发动机实现减重、增效和改善性能的关键。现代航空业要求航空发动机长期处于高负荷的工作状态,这对现代发动机的寿命、材料、制造工艺等提出了非常苛刻的要求。大飞机发动机新型整体结构、轻量化结构使其空气动力性能大幅优化。例如,CFM公司生产的发动机CFM56-7,其风扇叶片为24片,总重为118kg。

Leap-X是CFM公司正在研制的新一代涡扇发动机,其风扇叶片数量只有18片,总重仅为76kg,其

性能更加优异(图1)。我国航空发动机制造水平距离欧美国家还有很大差距,航空领域取得的每一次重大的革命性进展,无不与航空动力技术的突破和进步相关。发展和完善航空发动机制造水平对整个航空发动机制造体系的形成起着重要的作用。复合加工技术作为一项综合性制造技术在解决大飞机航空发动机新型整体结构、轻量化结构和冷却结构等新结构制造中具有广阔的应用前景。



(a) CFM56-7 发动机

(b) Leap-X 发动机

图1 CFM公司发动机

航空发动机典型零件 复合加工特点

发动机零件复合加工是一项综合性很强的系统工程。航空发动机零件复合加工由同类工艺方法的多工序加工和不同工艺方法的多工序加工(如传统加工和特种加工的复合,特种加工与特种加工的复合)构成。同类工艺方法的复合加工是以工序集中原则为基础、以传统机械加工工艺为主的复合,即工件在机床上一次装夹后,能够进行同一类工艺方法的多工序加工,这是航空发动机制造技术快速发展的高效加工方式^[1]。不同工艺方法的复合加工是指机械复合加工、电化学复合加工、电火花复合加工、超声复合加工等能量复合方式的复合加工技术,它综合应用机械、化学和电力等多种能量进行综合加工。目前比较成熟的工艺方法有超声切削、磁力研磨、超声磨料加工以及电火花放电铣等等。复合加工能大幅度地缩短零件加工周期和减少在制品储存量,有力地支持零库存的准时制造的实施,减少工件安装次数、避免安装误差,有利于提高加工精度和稳定性,进而实现航空发动机的安全、可靠和长寿命(图2)。

1 传统机械方法的多工序复合加工

航空发动机制造中,传统机械方法的多工序复合加工是以工序集中

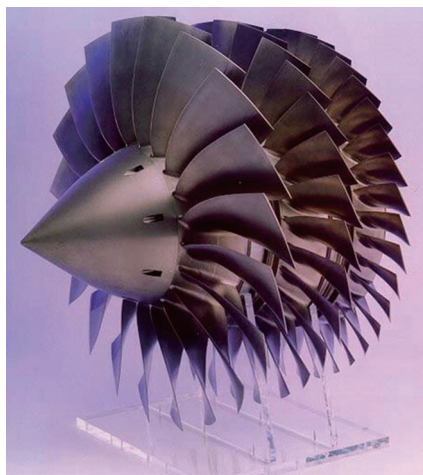


图2 整体叶盘

原则为基础的复合加工技术。这种复合加工指在复合加工机床上完成车、铣、钻、镗等多种加工要求。复合加工机床最突出的特点是工件工序集中,一次装夹实现多工序复合加工,工序集中有利于保证各加工面间的相互位置精度要求,使生产面积和操作人员数量减少,生产计划和生产组织得到优化。目前,航空制造业很多普通设备逐渐被工序集中的柔性自动化装备所取代。现代的复合加工机床更进一步实现切削工艺复合化的开发,如在车削中心上装载有回转刀具的铣削功能,在加工中心上有车削功能等,进一步提高机床的复合化程度。在多种复合加工的领域,车铣复合加工是目前发展最为完善的一个领域。车铣复合加工中心实际上相当于所装配的切削刀具、刀具夹紧系统所支持的加工方法和备选刀具

射流加工和化学机械抛光等。普通机械制造领域以常规机械加工、电化学加工和电火花加工为主的复合加工方法最为常见,较为成熟的工艺方法有电解磨削、电解电火花加工和化学铣削等。

航空发动机零件 复合加工技术的应用

航空发动机零部件是在高温、高压、高转速的恶劣环境下工作。每一种新产品的开发都意味着零件功能、结构、材料的重大变更。航空发动机普遍采用轻量化、整体化结构,如整体叶盘、叶环结构^[2]。航空发动机零部件大量采用新型超高强耐高温合金、单晶合金、金属间化合物及轻质高强复合材料,给切削加工增加了更大难度,对加工技术提出了更高的要求。



图3 WFL公司的M35车铣复合加工中心

组成的综合系统。车铣复合加工既能够实现车削功能,又能够实现铣、钻、镗、攻丝、铰孔等功能。设备的价格往往比较昂贵,从理论上讲车铣复合加工中心可以有效地提高产品质量和生产效率,但是在实际应用中,要想充分发挥复合加工设备的作用还应加强对技术人员进行加工程序编制和培训操作相关知识等基础培训工作(图3)。

2 能量复合方式的复合加工

能量复合加工技术可以分为机械复合加工、电化学复合加工、电火花复合加工、超声复合加工、磨料水

1 航空典型零件的复合加工

航空发动机典型零件如机匣、整体叶盘等大多采用钛合金、高温合金等难加工材料,其不但强度、硬度高且韧性和延伸率大,导热性差、加工表面的加工硬化大,切削性能差。整体叶盘可采用复合强力铣加工工艺方法(图4)。应选择合适的机床,设计专用工装,选择合适的刀具,采取有效的减振与变形控制措施。通过盘铣、插铣、侧铣的有效集成,大幅度提升整体叶盘的综合加工效率,降低制造成本。整体叶盘复合强力铣关键是需要解决数控编程中的通道

五轴加工方式的确定、多约束加工干涉、复杂的刀轴矢量计算等技术问题,以及加工过程中的切削参数确定、颤振抑制、弱刚性系统变形控制等工艺问题。航空发动机上机匣类零件中,整体结构机匣越来越多,为了提高机匣的强度,一些机匣都采用了整体结构,即机匣的座子和凸台和机匣是一体的。航空典型零件中的盘类零件趋向薄壁,为保证盘类件在高速下平衡,对主要表面的尺寸精度、位置精度、形状误差、表面粗糙度等要求较高。各类型轴,结构上一般都是空心轴,内表面根据等强度条件设计有台阶孔,内外表面同轴度很高。在机匣复杂外型面的铣削加工中,可应用复合加工技术,减少多工序加工零件的上下料装卸时间。在加工机匣环形件的异形孔时应采用数控激光切割技术。对于蜂窝封严结构的机匣又采用了蜂窝表面电火花磨削技术,各种新工艺、新技术的产生,都是为了满足机匣件不断改进的设计需求。虽然整体结构机匣的强度满足了发动机设计的要求,却增加了机械加工的难度,特别是具有复杂外型面的整体结构机匣,某整体结构机匣,其外型面的成型加工是普通工艺不能实现的,只有应用先进的五坐标数控加工技术才能通过工序集中,实现这些外型面的成型加工。又如某后机匣,材料是镍基高温合

金、最小壁厚为1mm左右、外型面复杂、上面有凸台、加强筋、纵向安装边及数十个连接孔等。在以工序集中为原则的复合加工中,工艺流程需要大量的决策数据。实际加工中要根据零件的特点将平面、型腔作为零件的主要特征来处理,将纵向安装边、加强筋等作为零件的次要特征来处理。在选择加工面时应注意:加工面与定位基准、加工基准具有一定的尺寸关系,并且容易测量;便于装夹,在工装设计时要充分考虑,使得一次装夹可以加工尽可能多的面。并且夹具设计不能太复杂,尽量使得工件保持均匀,加工部位敞开;便于选择刀具,其涉及到转交、斜面与平面交角时要选择好刀具;便于刀具进给,不发生碰撞、干涉等现象,减少复杂刀具的设计和使用;便于修改加工参数,提高加工效率,同时注意检查加工面的情况。车铣复合加工技术是解决此类零件材料去除率大、形状与结构复杂、加工精度高等问题的良好选择。

箱体机匣壳体的构形比较复杂,内部呈腔形,并且壁薄、刚性较差。在壳体壁上除了许多精度较高的轴承支撑孔、定位销孔、附件安装孔和平面外,还有许多精度较低、直径小且长的交叉油路孔、螺纹孔等。为了保证箱体机匣的装配精度,对机匣壳体提出了一系列技术要求,孔和平面的

尺寸精度、形位公差、表面粗糙度等要求都很高。机匣壳体不仅需要加工的部位较多,而且加工难度也较大,工序多、工艺路线长。

机匣壳体在通用设备上加工,加工精度难以保证。需要的工装多、生产率低,新产品试制周期长。采用复合加

工技术是这类零件的必然选择。这类零件的复合加工主要体现在工序集中上。数控加工中心是一种多工序自动换刀数控机床,机床能在一次定位装夹中自动完成钻、镗、铣、等多道工序的复合加工,从而实现自动化和工序的高度集中。数控加工中心具有很高的坐标位移精度和工作台回转精度,完全可以由机床本身的精度来保证零件的加工精度。在更换产品时,只需增加少量的工艺装备,重新编制加工程序就可以投入生产。机匣壳体复合加工工艺设计时需要注意以下问题:全部机械加工应安排在数控加工中心上进行,并在刀具容量范围内,使凡能合理安排加工出的表面,集中在一道工序进行,以达到工序的高度集中;规划好各主要表面加工顺序,必须遵循粗、精分开和先粗后精,遵循划分加工阶段的原则;定位基准,应尽可能采用一面两孔的定位方式,因为这种定位方式不仅定位稳定可靠,对保证加工质量有利,而且容易实现多方向加工;不适宜工序集中的表面应在一般设备上加工,以便充分发挥不同设备的自身优势,高效率、高质量、低成本加工。集中工序、一次装夹,实现多工序复合加工是确保此类零件加工精度和加工效率的有效途径(图5)。

由此可见,选用数控加工中心加工机匣壳体,不仅可以实现加工自动化,保证加工精度,还可以大幅提高生产率,缩短新型机匣的试制周期。

2 航空发动机零件“全程序无人干预”复合加工

在保证加工质量的基础上,提高生产率,提高自动化程度是航空制造业发展的总目标。“全程序无人干预”复合加工指加工过程中不需要人工干预,是从加工工序复合向以最终完成整个零件加工为目的的复合,目标是实现高度的信息化和自动化。复合加工除了能够实现预警防错纠错功能,消除加工过程中的随机误差,

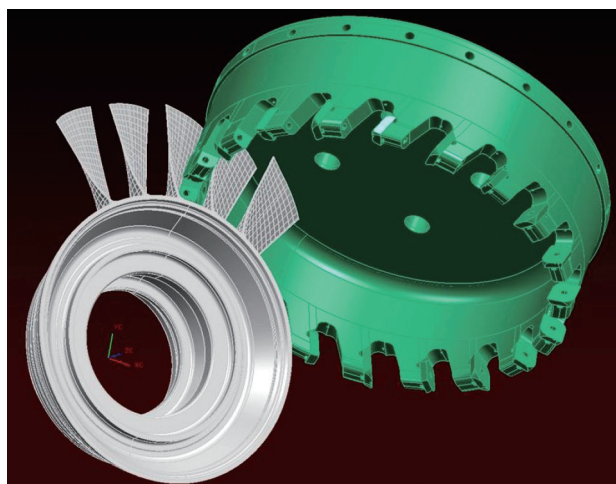


图4 整体叶盘的加工

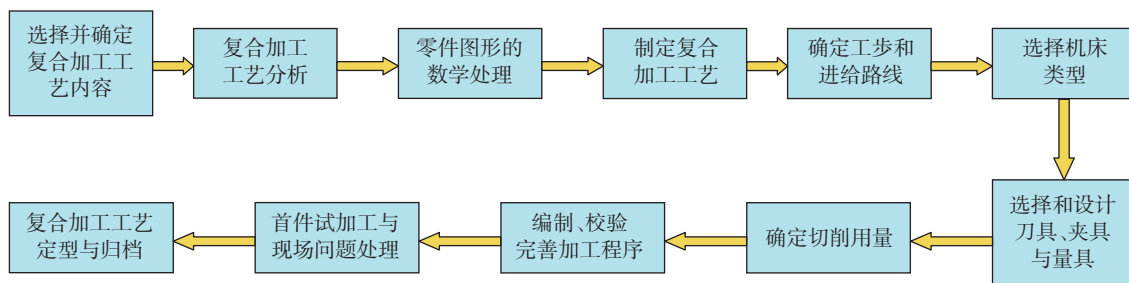


图5 机匣壳体复合加工工艺设计的主要内容

增强操作系统的可靠性；同时还能挖掘出潜在的设备功能,实现自动对刀、在线测量和自动加工补偿,并能提高产品质量,减少加工中间环节,实现单人多机操作,提升生产效率,降低制造成本和人员劳动强度。“全程序无人干预”复合加工要进行工艺流程的优化设计,注重快速编程以及程序的优化。“全程序无人干预”复合加工避免了中途装夹切换过程,有效地解决了同一类零件的高效加工。如某薄壁零件,加工时极易变形,仅刀具就需要使用钻头、铣刀、铰刀、镗刀、反倒角刀等不同种类刀具10多把。操作者需手动调用数控程序数量多达40多个,费时又易出错。运用全过程不干预加工,只需按动一次按钮,就能完成整个零件的全过程加工,充分发挥设备的功能,提高加工效率23%,产品合格率达100%。“全程序无人干预”复合加工要求合理选择刀具,优化走刀路线,在切削加工过程中能够及时断屑,避免加工中断,实现高效率、高质量,低成本加工。为了不断提高“全程序无人干预”复合加工技术水平,我们必须开展以航空发动机典型零件为载体,以先进设备为研究对象,进行发动机典型零件切削加工参数优化技术研究。开展工艺创新研究,解决加工材料、难加工结构高效数控加工技术瓶颈难题,以加工效率、加工质量、加工成本为指标,通过切削参数的优化,针对不同机床、刀具、工件材料及不同的加工特征,取得优化的加工数据,形

成可供实用的切削数据库,完善必要的软件环境,建立航空发动机制造业迫切需要的切削数据库系统。要求切削数据库系统能提供航空发动机难加工材料加工用刀具材料、刀具结构与几何参数、切削用量等工艺参数和切削力、刀具寿命等过程参数,实现数据查询、管理和智能推理功能。全面指导技术人员正确合理选择刀具及其相应的工艺参数,使切削数据库不断扩充,提高航空发动机制造水平。

3 航空发动机零件复合加工用刀具特点

复合加工中刀具的选择是十分重要的。刀具材料是提升刀具性能的基础,刀具结构是提高工件加工精度的关键。加工刀具必须适应复合加工设备高速、高效、自动化的特点,要充分考虑高速旋转下刀具的动平衡状态和刀具的使用寿命。著名大型刀具企业都在不断改进各自的刀具材料、刀具结构、涂层技术和难加工材料的加工方法,以满足航空制造

业的需求。内冷却高性能刀具如图6所示。

高效切削的关键技术是一系列高效刀具材料的合理应用及其对应的切削参数优化技术问题。切削用刀具必须具备锋利的切削角度、强壮的切削刃口、耐热的表面涂层和不同于一般材料的切削加工方法等有利于降低加工区域温度和快速散热的有效因素。航空发动机典型难加工材料复杂结构零件主要切削用刀具,基本以进口高性能切削刀具和非标专用刀具为主。

航空发动机零部件制造中,多功能刀具扮演着重要的角色。多功能刀具是指用一把刀就能实现数把刀才能实现的加工,实现一次安装多次走刀完工的要求,提高刀具的柔性化。对复杂零件的加工,要求在一次装夹中进行多工序的集中加工,并淡化传统的车、铣、镗、螺纹加工等不同切削工艺的界限。目前,多功能刀具主要有:多功能车刀、铣刀、镗铣刀、钻头、铰刀等刀具。有的多功能刀具



图6 肯纳内冷却高性能刀具

可提高加工效率 60% 以上,如多功能车刀发展了集车端面、外圆、仿形、切槽、切断和倒角等多种加工功能。带有过中心端刃的多功能立铣刀,借助数控机床螺旋插补、圆周插补或曲线插补等编程方法,可加工各种内外成型轮廓面、台阶、凹面;复合孔加工数控刀具集合了钻头、铰刀、扩孔刀的功能。这些刀具可有效避免频繁换刀和对刀,既节省换刀时间,又减少辅助时间、刀具数量和库存量,便于刀具管理,提高生产效率和加工质量。降低制造成本,多功能刀具在实际使用时要注意优化切削用量,提高刀具耐用度,优化走刀路线,避免与机床、零件产生干涉(图 7)。

4 能量复合加工技术应用

能量复合加工技术如化学-机械复合加工、电火花放电复合加工,切削复合加工等复合加工技术目前已应用。以切削复合加工中的超声振动切削为例,其在航空难加工材料、难加工工序(小直径精密微深孔、攻螺纹)加工中,收到了很好的效果。超声振动切削技术是一种新型的切削加工方法,刀具(或工件)以适当的方向,一定的频率和振幅振动,以改善其切削功效的脉冲切削方法。在切削过程中,刀具与工件周期性的

离开和接触,切削速度的大小和方向处于不断变化之中。由于切削速度的变化和加速度的出现,使得超声振动切削具有优良的工艺效果:减小了切削力与功率消耗;减小了切削变形;降低了切削温度;能很好地消除切削加工中的自激振动;可有效提高加工精度,降低零件加工表面粗糙度,提高表面加工质量。电火花蜂窝磨可以实现工件外型面低成本、高效率的大余量去除和成型加工,有效地解决难加工材料、特殊结构表面余量去除困难,加工振动大、刀具损耗大的难题。

电火花铣加工几乎没有切削力,不需要复杂的夹具支撑,通常结构简单、凸台较少的机匣比较适合电火花铣加工。化学铣是在零件表面涂覆抗腐蚀可剥落涂料,将零件非加工表面保护起来,利用化学腐蚀液去除零件材料^[3]。化学铣和电火花铣加工都不需要加工刀具,可以节省大量刀具费用,加工效率也较高。机械-热复合加工中的低温切削是指在切削加工过程中,采用低温液体及其他冷却方法冷却刀具或工件,有效降低切削区温度、减小刀具磨损、提高刀具使用寿命、提高生产效率、提高加工质量、降低加工成本,特别适合于加

工钛合金等难加工材料。

航空发动机复合加工技术发展趋势

新材料技术和先进制造技术是航空动力技术的重要基础。加工效率与成本之间的矛盾,影响着航空发动机研制的成本和进度。为提高加工效率,加工利润和加工质量,研究并应用高效、多样化的复合加工技术势在必行。航空发动机复合加工技术向精密化、自动化、柔性化、集成化、智能化、多样化和绿色环保方向发展。针对国家大飞机发展战略,我们必须对复合加工全过程研究,形成可用、可靠的技术体系与平台,形成生产力,提高加工质量和效率,快速响应市场需求。充分利用 CAD/CAM、CIMS 等技术实现设计制造一体化,并行设计、虚拟制造,反求工程等;利用模糊推理、人工神经网络等人工智能技术解决制造过程中的复杂决策问题,优化加工过程,提高实用性。借助先进检测、仿真手段,实现对加工过程的建模、仿真、预测,使得复合加工系统能根据实时工况自动优选加工参数,调整自身状态,进而实现“无人干预加工”。复合加工技术在航空发动机特别是大飞机发动机制造中将占据重要地位,其发展和完善对整个航空发动机制造体系的形成起着重要的作用。我们要加快常规大飞机发动机与新型大飞机发动机领域复合加工技术的开发和应用,使复合加工技术迅速成熟,实现国家航空动力技术的跨越式发展。

参考文献

- [1] 王焱. 复合加工制造技术在航空结构件制造中的应用. 航空制造技术, 2009(12): 40-43.
- [2] 黄维, 黄春峰, 王永明, 等. 先进航空发动机关键制造技术研究. 国防制造技术, 2009(3): 42-49.
- [3] 张建华, 张勤河, 贾志新. 复合加工技术. 北京: 化学工业出版社, 2005.

(责编 三丰)

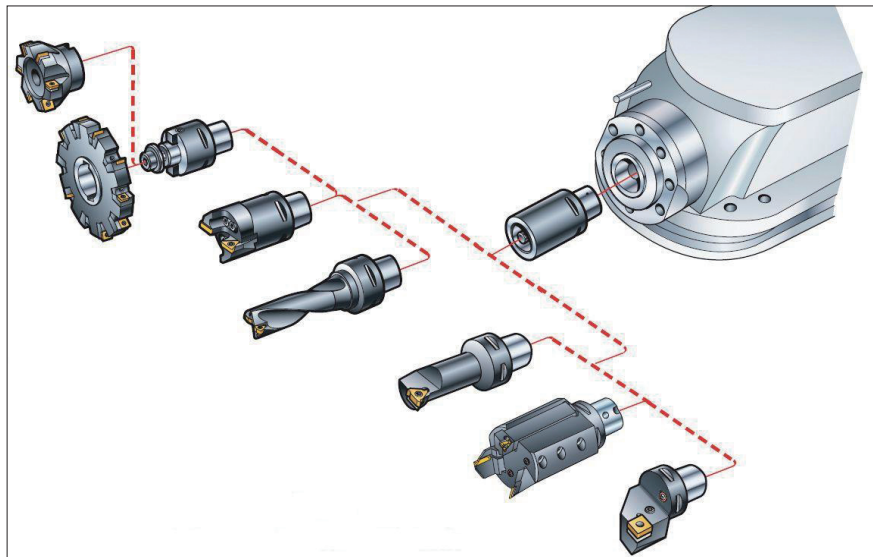


图7 复合加工机床中的铣削主轴可以使用旋转和非旋转刀具