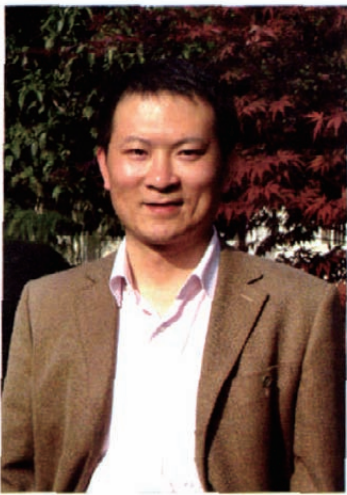


高效加工技术在航空发动机制造领域的发展和应用

Development and Application of High-Performance Machining Technology in Aeroengine Manufacturing Industry

西北工业大学 吴宝海 张莹 罗明
中国航空西安航空动力控制公司 齐国宁



吴宝海

西北工业大学机电学院副教授,主要从事航空复杂零件的多轴数控加工、智能加工等技术研究,主持和参与国家数控重大专项、自然科学基金、国防基础科研以及省部级基金等项目多项,研究成果成功应用于相关企业的型号产品。

为了提高推重比,新一代航空发动机研制中广泛采用新材料和新结构。同时,新型发动机的研制数量增加,周期缩短,这些给航空发动机制造厂家提出了更高要求。因此,如何

近年来,我国航空发动机的研制与生产任务日趋繁重,如何最大程度地发挥现有设备的加工能力、提高发动机关键件的生产效率成为航空制造企业关注的焦点。而机床技术、刀具技术以及工艺方法的不断发展和进步也有力地推动了高速高效加工技术在航空发动机零部件制造过程中的应用与发展。

实现难加工材料和复杂、整体结构零件的高效加工成为新一代发动机研制过程中迫切需要解决的问题。

高效加工的内涵

高效加工是在保证零件精度和质量的前提下,通过对加工过程的优化和提高单位时间材料去除量来提高加工效率和设备利用率、降低生产成本的一种高性能加工技术。根据金属切削工艺学原理,单位时间的材料去除率决定于切宽、切深和每齿进给量、刀齿数以及主轴转速,因此提高材料去除率也就意味着上述工艺参数的提高。同时,毛坯的形状、工

艺流程以及上料、装卡、换刀等生产辅助时间也是决定生产效率的重要因素。可见,高效加工涉及到零件制造全过程的各个环节。

高速加工通过提高切削速度和进给速度提高零件的加工效率和质量,是实现高效加工的一种重要加工方法。高效加工并不仅限于提高切削速度和进给速度。为提高切削效率,当切削宽度或切削深度提高后,刀具承受的热、力负荷较常规加工要大得多,这反而限制了所采用的切削速度。可见,高速加工与高效加工既有关联又各有侧重。在实际生产应用中,高速加工主要用以获得高的表

面质量和薄壁零件的加工精度,因此高速加工更多地应用于最后的精加工;而高效加工则面向零件的整个工艺流程,就切削过程而言,主要通过切削工艺方法的改进和切削参数的优化来提高材料的切除效率,因此高效切削加工更适用于粗加工过程。

近年来,我国航空发动机的研制与生产任务日趋繁重,如何最大程度地发挥现有设备的加工能力、提高发动机关重件的生产效率成为航空制造企业关注的焦点。而机床技术、刀具技术以及工艺方法的不断发展和进步也有力地推动了高速高效加工技术在航空发动机零部件制造过程中的应用与发展。

实现高效加工的关键技术

与飞机工业中铝、镁合金等材料的高速加工相对比,航空发动机行业实现钛合金、镍基高温合金等难加工材料中低速范围内的高效加工有着更为重要的现实意义。难加工材料的切削加工技术水平是衡量一个国家机械制造技术水平的重要标志,发达国家无不重视难加工材料的高效精密加工技术的研究。在航空发动机行业,实现难加工材料的高效加工涉及多个方面,如机床、刀具及切削用量的合理选择,切削过程的监控以及设备维护等。以机床为例,实现高效加工要求机床具有足够的刚度、扭矩和功率,除此之外还需要有与之配合的刀柄结构、冷却润滑措施等。高速、高效加工技术在我国航空发动机制造企业也越来越受到重视,相应的加工设备在发动机行业的拥有量也越来越多。但总地来说,这些高端设备的应用水平与国外相比仍然存在很大差距,设备的加工效能远未得到充分发挥。实际上,实现真正的高速高效加工除了具备高速高效加工设备外,还要具备与之相匹配的工艺、编程方法、刀具及相关的基础数据等。

1 高效加工工艺

高效加工工艺是提高加工效率的核心关键技术。高效加工工艺涉及毛坯制备、工艺路线制定、工艺方法选取以及装卡定位、刀具和切削参数等方面。切削加工的本质是零件多余材料的去除过程,因此少而均匀的毛坯余量、方便快捷的装卡方法、快速高效的材料切除过程是实现航空产品高效加工的关键。在毛坯制备方面,应积极发展和提高近净成型制坯技术,如精密锻造、线性摩擦焊接制坯等工艺。这种制坯技术的发展一方面可以显著减少机加工的材料切除量,从而提高产品的加工效率;另一方面,也有利于提高基体材料的一致性和均匀性,避免由于材料内部组织的不均匀对切削状态的影响。在毛坯制备时,还要结合零件的几何结构和加工方式,合理设置零件的装卡方式和定位基准,尽量采用标准化的装卡方式,推动快换工装在实际生产中的应用,以进一步缩短生产准备的时间,提高加工效率。目前的高速加工中心以及刀具正朝着功能复合化的方向发展,从工艺路线的安排上,应遵循工序集中的原则,减少零件加工过程中的装卡次数,这样一方面可以缩短工艺路线,提高零件的加工效率,另一方面也避免了由于装卡的改变而造成的误差积累。对于加工过程来说,在工序衔接方面,应尽量采取均匀的余量分布,因为局部的余量突变很可能会降低整个程序段的加工速度,并且容易造成由于切削力突变而断刀等现象。

目前,我国航空发动机制造领域普遍沿用20世纪五六十年代的制造工艺规

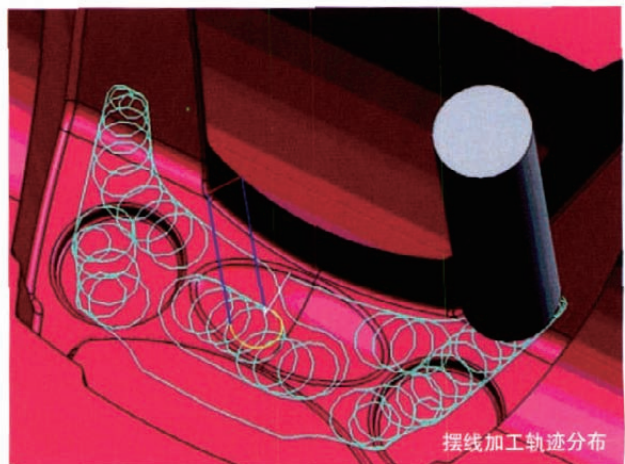
范,虽然近年来购置了大量的先进加工设备,但与之相适应的加工工艺研究却未能及时跟进,造成工艺路线冗长,先进设备的加工能力不能得到充分发挥。因此,应积极开展先进工艺的研究与推广工作,及时调整更新工艺规范。与此同时,制定工艺路线时还要立足现有设备,在先进与落后设备并存的情况下充分发挥新旧设备的加工能力,避免盲目采用先进的高速设备而忽视了现有常规设备的利用。

2 高速高效加工的数控编程技术

数控加工实际上是执行数控编程结果的过程,因此编程结果直接决定了零件的加工质量和加工效率。在目前数控加工尤其是多轴加工中,制约加工效率的因素主要有以下3个方面。

(1) 切削负荷的不均匀导致整个切削段只能按低的进给速度进行。

为避免切削负荷的剧烈变化,前道工序加工完成后应保证均匀的余量分布方式,避免由于余量的突变而造成切削负荷的急剧变化。这就要求在数控编程时不仅要关注零件的几何形状,还要注意毛坯的余量分布形式。同时,在切削顺序的规划方面,需要充分考虑零件的几何特点和余量分布,设定合理的加工顺序,避免未加工区域的余量对当前加工状态造成影响。尽量采用连续的螺旋或圆弧轨迹进行切向进退刀,减小加工



状态变化对刀具和主轴造成的冲击。当加工余量比较大时,可以采用摆线加工的方式。摆线加工是利用刀具沿一滚动的圆的运动来逐次、逐层对零件表面进行高速、高效、小切量切削。这种加工方式减小了刀具的每齿切削量,从而保证了切削过程的流畅性。另外,切削过程中的第一刀和最后一刀一般是不同加工区域的交接位置,这种区域的加工余量往往比较大,因此在这些位置的加工行宽应设置的较中间区域要小。

(2) 加工轨迹的分布不够光滑连续。

在加工轨迹的分布方面,高速加工要求轨迹分布光滑连续。常规加工中,不同切削行之间的跨行移动通常采用直线运动方式,但在高速加工中,这种运动方式将会导致机床运动不连续以及过大的加减速。因此,目前一些 CAD/CAM 软件均提供了适用于高速加工的圆弧、抛物线以及高尔夫球杆式的跨行运动方式。在分层铣削中,为了避免不同层之间的刀具非连续运动,可以采用螺旋式的加工路径分布,螺旋轨迹具体表现为一条完整的螺旋线,从而保证了加工过程中机床运动的稳定性。为了提高航空发动机薄壁叶片的加工质量和加工精度,西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室开发了叶片类零件高效精密加工的专用编程系统。该系统中叶片的加工轨迹分布采用了对称螺旋线形式,利用 B 样条技术将压力面和吸力面对应的加工轨迹进行光滑连接,从而使整个叶片的加工轨迹连接成一条光滑连续的曲线,避免了常规对称加工中频繁的进退刀过程,在加工效率提高的同时,有效抑制了加工变形。

(3) 刀轴矢量变化过于剧烈。

与三坐标加工相比,在五轴高速加工中如何控制刀轴矢量的变化是数控编程最核心的内容。这是因为刀轴矢量的改变决定了五轴机床转

动坐标的变化和变化率。与平动坐标相比,五轴机床转动坐标的运动速度和加速度仍处于较低水平,当在一个较小范围内转动坐标变化较大的时候,往往会导致刀具在该区域内滞留时间较长,这样将会在零件的表面形成切坑。由此产生的运动学问题在航空发动机复杂曲面类零件的加工中时常发生,而在国产五轴设备的应用中尤为明显。因此,在数控编程阶段必须严格控制刀轴矢量的变化,确保刀轴矢量变化均匀连续。如果选用与曲面相关的刀轴控制方式,如 UG 中普遍采用的相对于曲面、相对于驱动等方式,刀轴的规划结果实际上依赖于被加工曲面的法矢分布。由于设计或者造型的原因导致曲面法矢存在突变时,得到的刀轴矢量分布也必然有突变产生。

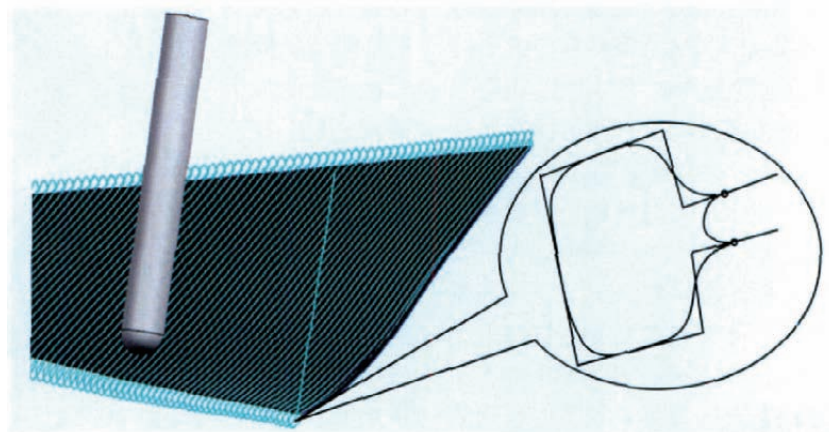
另外,在带有小叶片的整体叶轮、整体叶片的加工过程中,由于小叶片的存在,为了避免碰撞干涉,加工轨迹和刀轴矢量必然要进行调整,这种调整也将导致刀轴矢量的突然变化。造成这种问题的根源在于现有的数控编程系统仅考虑了零件的几何结构,尚未综合考虑五轴机床的运动特性。其解决方法主要有以下几种:一是对刀轴矢量的规划结果进行机床转动坐标变化程度的校核,当变化量过大时,在不发生干涉的前提下进行刀轴的均匀化处理;二是根据机床的运动特性实时调整加工

过程的进给速度,当刀轴改变较大时适当降低该区域的进给速度,以确保机床有足够的时间完成转动坐标的变化,避免过切的产生。另外,在一些相对开阔的区域也可以采用定轴加工方式,增强加工过程的稳定性。

3 高速高效加工的刀具技术

合理的刀具选用是充分发挥高速高效加工优势的最关键环节。高速高效切削加工除了要求刀具材料具备普通刀具材料的基本性能外,还要求具备高的硬度、强度,良好的热稳定性和热硬性以及优异的高温力学性能。目前,超硬刀具(如 PCD、PCBN)、陶瓷刀具、涂层刀具、TiC 基硬质合金刀具等都得到了不同程度的应用。但值得注意的是,先进的刀具必须在合适的零件材料、合理的工艺参数前提下才能发挥其优势。

除了在刀具材料、刀具参数方面的要求外,高速高效加工还对刀具尺寸、悬伸长度以及冷却方式等方面有着更高的要求。从加工工艺性的角度出发,应优先选用直径大的刀具。一方面,大直径的刀具可以获得更高的切削速度,而同时大直径刀具的刚性好,加工过程中抗冲击能力和耐磨性较小直径刀具都有优势。刀具的悬伸长度是影响刀具本身刚性的重要因素,同时也对工件-刀具-机床构成的整个工艺系统的动态性能产生影响。在航空发动机复杂整体构件的高速加工中,刀具的长径比控制



叶片螺旋铣削加工轨迹分布

尤为严格,其基本原则是在允许的条件下选用小的刀具长度。在复杂通道类零件的多轴加工中,刀具长度的确定与刀轴矢量的选取密切相关,不同的刀具姿态决定了刀具到达切削点的长度。因此,刀具悬伸长度的确定与加工工艺方法、数控编程等密切相关。在刀具冷却润滑方面,高效加工由于切削量大从而导致产生的切削热量更多,因此必须及时有效地对加工区域进行冷却。当机床主轴转速大幅提高后,传统的冷却方式由于离心力的作用很难进入加工区域,反而会加大铣刀刀在切入切出过程的温度变化,产生热疲劳,降低刀具寿命和可靠性。瑞士米克朗公司认为,当高速机床在转速达到 20000r/min 以上时,应采用油/气冷却润滑的干式切削方式。这种方式可以用高压气体迅速吹走切削区产生的切屑,从而将大量的切削热带走。同时,经雾化的润滑油可以在铣削刀具刃部和工件表面形成一层极薄的微观保护膜,有效延长刀具寿命并提高零件的表面质量。

4 加工过程的智能化控制

随着对加工质量和加工效率要求的不断提高,对加工过程的智能监控日益受到人们的关注。一方面,高档的数控加工设备具备了在线测量的功能,使得对加工过程精度的检测成为可能。在一些薄壁、复杂曲面零件的加工中,由于零件刚性比较差,很容易出现让刀现象,从而使零件加工不到位,因此可以利用机床在线检测功能对粗加工完成后的零件进行关键点的位置检测,然后将获得的检测数据与理论位置进行比对,并通过二者之间的差距驱动加工代码自动修正,从而实现反变形补偿。目前先进数控系统的数据处理功能越来越强,这个过程可以直接由数控系统实现。另一方面,高效加工中产生的热和振动等物理现象都成为影响零件加工精度和主轴寿命的重要因素。

因此,在目前智能化程度比较高的主轴上面通常会装有测量温度、位移和振动的传感器,以实现运转过程中主轴的轴向位移和振动的监控。这些传感器的检测数据转换成电信号后传给数控系统,数控系统通过内部集成的工艺知识和经验数据实时对主轴转速、进给速度和零点位置等参数进行修正,实现对热变形和轴向位移的修正补偿以及对振动的主动抑制。

为了实现这些功能,近年来各数控系统制造商推出的系统大都集成了加工过程监控的功能。如在 SIEMENS SINUMERIK810/840D 系统内就可以集成以色列 OMAT 公司的 ACM 自适应监控系统,能够实时采样机床主轴负载变化,记录主轴切削负载、进给率变化以及刀具磨损量等加工参数,并输出数据、图形至 Windows 用户图形界面。

实现高效加工的其他手段

在现代机械制造行业中,与加工效率密切相关的加工工艺方式的变更或者对传统加工工艺的改进始终是提高加工效率的关键途径。因此,在航空发动机制造领域,除了关注高速加工技术的研究和应用外,更应该积极探讨和引进新的制造工艺技术。

1 精密制坯技术

毛坯的外形直接决定了其后续的加工工艺和加工成本。近年来,制坯技术正朝着近净成型的方向发展,如精密铸造、精密锻造技术等。目前,精密锻造技术已成为高性能航空发动机研制中广泛采用的制坯方法,用以制造发动机的盘、轴、叶片等。利用这种技术制造的毛坯可以实现无余量或近无余量成型,可以省去或者减少后续加工的工艺过程。可见,精密制坯技术对于实现高效加工发挥着重要的作用。我国最大的叶片精锻生产线已在西安航空发动机集团公司建成投产,可以满足高温合金、



FISCHER PRECISE 集团
精密高速主轴的专家
永远领先一步

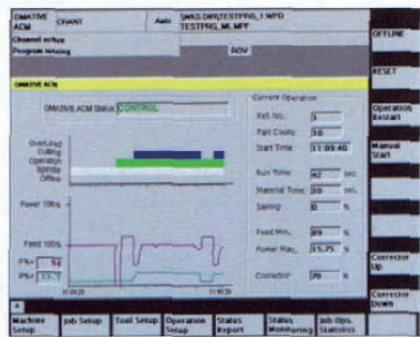


TRAMEC
... heads full of ideas

飞速主轴技术(上海)有限公司
上海市闵行区双柏路 888 号 5 楼
邮编: 201108
T: 021 6434 8150
F: 021 6434 8155
fpsh@fischer-precise.cn

www.fischer-precise.com www.precise.de

专业的轴轴维修与维修中心
展开全方位的对外服务



集成ACM自适应监控功能的
SIEMENS SINUMERIK 840D系统

钛合金、铝合金和不锈钢等材料精锻叶片的批量生产。该条生产线的建成和投产,改变了传统的叶片加工工艺技术,使生产效率和叶片的加工质量显著提高。

2 特种加工技术

航空发动机中高温合金等难加工材料和复杂薄壁结构零件的广泛应用给常规机加工工艺提出了严峻挑战,刀具磨损快、加工周期长成为制约发动机生产的关键因素。特种加工技术在这些零件的加工中表现出了独特优势,如利用线性摩擦焊接技术实现整体叶盘的焊接连接,采用多轴数控电火花铣削对高温合金整体构件进行粗加工等均获得了良好的加工效果。以高温合金整体叶盘的粗加工为例,西安航空发动机集团公司采用四轴电火花铣削进行高温合金整体叶盘的粗加工,加工效率得到明显提升,同时也大大降低了加工成本。除了上述2种典型的高效加工工艺,其他如激光加工、振动光饰、超高压水切割等先进工艺也得到不同程度的应用,并在高效加工方面取得了良好效果。另外,在传统加工设备改进工艺方法也是提高加工效率的重要手段之一。如近年来在腔体类零件中应用日趋广泛的插铣加工工艺即是利用常规数控加工设备通过改变走刀路线来提高加工效率的一种工艺方法。该方法中刀具沿主轴方向做进给运动,利用底部的切削刃进行钻、铣组合切削。在难加工

材料的曲面、切槽加工以及刀具悬伸长度较大的场合,插铣法的加工效率远远高于常规的端面铣削法。除了提高加工效率,插铣加工还能有效降低径向铣削力,减小零件变形,是一种极具发展前途的加工技术。

可见,通过采用较高的切削参数,高效加工可以获得很高的材料去除率,显著缩短加工时间。但是高效加工并不只是采用很高的切削参数,还可以通过能显著减少辅助时间的其他加工策略来实施高效加工。如采用复合刀具(如复合阶梯钻、钻铣螺纹刀具和其他用于综合加工的复合刀具)、圆周进给铣削的多功能立铣刀等各种先进刀具以显著减少换刀次数和降低辅助时间,由此进一步提高生产效率。

结束语

新一代高性能航空发动机在很大程度上依赖于先进的材料和工艺技术,高速高效加工技术是推动航空发动机制造工艺进步的关键所在。为了充分发挥高速高效加工设备的加工能力,提高我国航空发动机的制造水平,迫切需要在以下几个方面加强研究和应用。

(1) 航空发动机典型材料及结构零件的切削参数优化与积累。

合理的切削参数选取是提高加工效率、保证加工质量的关键环节。目前,我国航空发动机行业工艺参数的选取大多依赖工艺人员和操作人员的经验,缺乏科学、有效的工艺知识积累方法和手段。这样一方面导致切削参数选取偏保守,造成高速设备经常运行于低速水平;同时,工艺人员的流动也会造成这些知识和经验的丢失。

随着航空发动机材料和工艺水平的进步,一些新材料、新结构以及新工艺的应用急需针对其特点开展相应的工艺试验。因此,应建立切削参数积累机制和专用平台,将优化的

切削参数及工艺知识形成有效的积累。

(2) 基于机床动态特性与零件几何特性的数控编程技术。

多轴、高速加工的数控编程技术一直是制约目前发动机行业先进加工设备能力发挥的瓶颈。在高速加工的背景下,机床的扭矩、加减速能力等动态性能对零件加工质量的影响更为突出,数控编程过程不仅要关注零件的几何特性,还要综合考虑机床的动态性能,这给复杂整体结构零件的编程带来更大的难度。

应针对典型结构和设备进一步开展数控编程技术的研究,并建立相应的编程规范,提高工艺人员的编程能力,以充分发挥现有设备的加工能力,增强加工过程的稳定性。

(3) 加工过程的监控与自动优化技术。

加工过程的监控与优化是实现安全、稳定加工的关键保障技术。现有的高速加工设备一般具备主轴温度、扭矩监控、在线检测等功能,但这些功能在生产现场并未得到充分利用。因此,一方面要充分了解和掌握先进设备的在线监控功能,并将这些功能的应用作为加工质量控制的有效工具;同时,还要积极利用目前成熟的加工过程仿真与优化工具,如几何及物理仿真软件、刀具磨损监控系统、加工过程优化系统等,提高加工的安全性和设备利用水平。

(4) 高效加工新工艺的研究和应用。

在关注高速加工的同时,还应积极探索新工艺在航空发动机制造中的应用。利用现有设备,针对零件工艺特点研究新的加工工艺方法,提高产品加工效率。同时,由于复杂结构、难加工材料在新一代航空发动机中应用的更为广泛,从而对传统的机械加工工艺提出了挑战,因此更应关注新的工艺手段的发展和应用。

(责编 良辰)