

引文格式: 徐卫宏, 宋伟伟, 高素芳. 整体叶盘通道多轴线切割技术的研究与应用 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(7): 14-20.

XU Weihong, SONG Weiwei, GAO Sufang. Research and application of multi-axis wire-cutting technology for integral blisk [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(7): 14-20.

整体叶盘通道多轴线切割技术的研究与应用

徐卫宏¹, 宋伟伟², 高素芳³

(1. 中国航发南京轻型航空动力有限公司, 南京 210000;

2. 陆军装备部航空军事代表局驻上海地区航空军事代表室, 上海 200233;

3. 北京汉飞航空科技有限公司, 北京 101307)

[摘要] 整体叶盘是航空、航天发动机中的核心部件, 具有叶片细长、扭曲角度大、叶片间通道蚀除量大、结构强度弱且多采用高温合金等难加工材料的特点, 其中, 采用铣削方法加工叶片间通道效率较低, 且机械力极易产生变形, 不易保证零件加工质量。为实现高效率、高质量、低成本加工整体叶盘和叶片间通道的目标, 分析其结构和工艺特点, 提出由线切割、电火花成形和精铣3道工序完成叶片间通道的工艺方案, 形成了一种微应力、低成本、高质量、高效率的整体叶盘、叶片间通道加工的全新组合工艺方案, 简称电-电-铣组合工艺方案; 设计了用于内外轮廓切割的多轴线切割工艺及特有的内外轮廓切割的走丝装置, 并从装夹定位、电参数选择、切割路径等方面规范工艺参数, 解决了叶片间通道加工质量差、效率低的难题。通过典型零件的加工, 验证了工艺方案能够提高质量和效率, 并且降低成本。

关键词: 航空航天发动机; 整体叶盘; 叶片间通道; 电-电-铣组合工艺方案

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.07.014



徐卫宏

总工艺师, 研究方向为小型航空发动机关键部件工艺设计、制造研究及应用。

整体叶盘作为航空航天发动机中的核心部件, 直接关系到发动机系

统的成败, 是决定整机性能和维护成本的关键部件之一。整体叶盘结构是提高发动机部件效率的新型结构, 将叶片和风扇盘设计成一体, 省去常规风扇盘连接的榫齿和榫槽, 大大简化结构和重量, 此结构已经在先进军用发动机的三级风扇、高压压气机的整体叶盘转子得到了验证应用^[1-3]。整体叶盘通用的工艺方案是采用铣加工开槽、电火花粗加工叶型、电火花精加工叶型的工艺方案, 加工部位为叶片的通道、叶盆和叶背。由于其设备的局限性以及刀具的可达性, 造成铣加工开槽工序留有的余量较大, 严重影响后道工序电火花粗加工叶型和精加工叶型的加工效率, 制约了零件生产周期和产品质量。高效率、高质量、低成本地加工整体叶盘类零件成为研究人员关注的目标^[4-5]。

本文提出了一种利用电火花线切割代替铣加工进行通道开槽, 并与电火花成形加工相结合的工艺方案, 实现了整体叶盘通道、叶盆和叶背的高效、高质加工, 方案中所研究的多轴线切割及特有的内外轮廓切割走丝装置是工艺实现的关键技术, 通过对所采用的新结构、新技术进行阐述和分析, 为整体叶盘加工和制造提供借鉴。

1 整体叶盘零件结构特点和工艺方案分析

1.1 整体叶盘零件结构特点

图1所示为航空航天发动机用典型整体叶盘的三维造型图, 其装配在发动机的主支撑轴上, 服役于高温区, 使用工况环境恶劣, 对材质的耐高温性、耐磨性、致密性等要求较高。

高温耐热合金为首选材料,但这种材料机械加工难度大,是结构设计和加工的难题。

图1中整体叶盘与主支撑轴由定位子口和4个通孔连接固定,与主支撑轴安装配合,外环均匀分布。其结构特点和难点为:(1)整体叶盘使用高温耐热合金材料,几何尺寸为直径 $\Phi 258\text{mm}$,总高 62mm ,叶片数量30个;(2)整体叶盘叶片在周向、径向、轴向均有较大扭曲角度,型面为空间不规则形状,叶片上、下缘组成锥度梯形,叶片上缘为开式,下缘与基体相连,两相邻叶片之间在空间形成上开、下连且狭长的空间通道;(3)叶片细长,上缘最小厚度仅有 0.2mm ,下缘最宽厚度约为 6mm ,叶片单边长度 55mm ,叶片长与厚度比平均为18;(4)通道蚀除量大,几乎占叶片形成区域的 $2/3$ 。

1.2 整体叶盘零件工艺方案分析

传统工艺是采用铣加工开槽、半粗铣叶型、精铣加工叶型3个工序完成叶片通道、叶盆和叶背的加工^[6-8]。铣加工开槽工序为预加工,目的是蚀除尽量多的通道,以减少后续工序的加工量。但传统工艺存在以下主要问题:(1)加工部位为细长结构、加工材料为高温耐热合金,使用刀具直径小而长、刚性相对较差,受结构和刀具的局限性以及刀具可达性的限制,造成铣加工开槽留有较大余量,严重影响了后道工序半粗加工和精铣加工叶型的加工效率;(2)刀具细长、价格高,刀具极易磨损,加工高温合金材料每次进给量不能太大,成本较高,加工效率低下;(3)材料为高温耐热合金,成本高,铣加工的蚀除物为碎屑,蚀除物再利用价值较低。

电火花线切割技术采用沿着自身轴线方向运行的电极丝作为工具,对零件进行切割。具备以下技术优势:

(1)“以柔克刚”。直接利用电能加工,用“软”的电极丝加工“硬”的零件,电极丝与零件材料不接触。

线切割加工无须制造成形电极或刀具,只需采用 $\Phi 0.05\sim 0.28\text{mm}$ 的圆电极丝按设计的轨迹进行切割,电腐蚀熔化零件材料的体积非常小,是丝径+双边放电间隙的切缝与切割厚度的乘积。

(2)“精密微细”。由于脉冲放电的能量密度可精确控制,电极丝与零件两者之间几乎没有宏观机械作用力,因此可实现精密微细加工,能够方便地加工形状复杂的窄缝、窄槽等。

(3)“因材施教”。根据材料的物理化学特性,只需调整脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电流、间隙电压、间隙施加波形等电参数,就可实施对各种材料的切割,如高温合金、硬质合金、有色金属和钢等。

(4)“再利用”。自动化程度高,操作方便,加工周期短,成本低。只对零件材料进行图形轮廓加工,不破坏其他部分,特别是对贵重材料,图形内外切割的余料为整体材料,再利用价值高。

通过分析铣加工开槽工艺方法、通道结构,以及电火花线切割加工的独特优点,本文提出了一种采用多轴线切割技术替代铣加工开槽和半粗铣叶型的加工方法,解决了整体叶盘通道加工效率低、留量大、刀具成本

高等难题。

2 多轴线切割工艺及内外轮廓切割走丝装置设计

2.1 叶片间通道多轴线切割工艺方案设计及机床研发

针对整体叶盘通道的结构特点,采用电火花线切割加工工艺,本文就线切割机床结构方案进行探讨。由于整体叶盘型号种类多,直径 $200\sim 500\text{mm}$ 不等,叶片数约为 $25\sim 35$ 个,均匀分布。若在传统的电火花线切割机床上加工,每一个型号就要做一种夹具,不仅夹具制作费用高,而且制作周期长,影响零件整体进度。本文提出了带有双转轴工作台的多轴数控电火花线切割机床,确定了图2所示的HX6325电火花线切割机床,结构和技术参数为工作台尺寸 $\geq \Phi 800\text{mm}$;切割环形件直径范围 $\Phi 400\sim 1000\text{mm}$;X、Y、Z轴行程($630\times 400\times 300$)mm;最大加工厚度为 100mm ;最大加工工件质量为 250kg ;直线轴脉冲当量为 0.001mm ;B、C轴控制当量为 0.001° ;B轴偏转角度为 $-15^\circ\sim 30^\circ$;C轴旋转角度为 360° ;C轴最大转速为 4r/min ;C轴回转定位精度 $\leq 25''$;C轴回转重复定位精度 $\leq 10''$;X、Y轴定位精度 $\leq 0.015\text{mm}$;X、Y轴重复定位精度 $\leq 0.008\text{mm}$;表面粗糙度

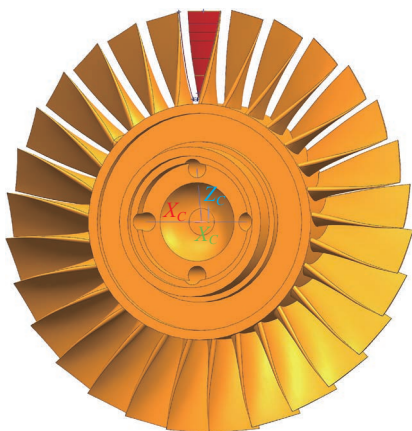


图1 典型整体叶盘的三维造型图
Fig.1 3D modeling diagram of typical integral blisk



图2 HX6325多轴数控电火花线切割机床
Fig.2 HX6325 multi-axis CNC WEDM machine

$R_a \leq 0.6 \sim 0.8 \mu\text{m}$; $h=60\text{mm}$ 时最大切割速度 $\geq 180\text{mm}^2/\text{min}$; 多次切割平均速度为 $40 \sim 60\text{mm}^2/\text{min}$; 最大加工电流为 8A 。采用五轴数控 / 四轴联动, 以满足不同型号的加工要求。

该机床针对整体叶盘通道的结构特点, 重新研制开发了电火花线切割多轴联动加工系统 (X 、 Y 、 Z 、 A 、 B 、 C) 软件, 最大限度地包括了电火花线切割加工的所有运动参数, 可实现一般平面加工、极坐标加工、双旋转坐标加工、二轴单旋转联动加工、二轴双旋转联动加工、四轴联动加工和五轴联动加工系统。系统通过对空间直纹曲面形成原理的分析, 采用直纹面运算算法, 可实现复杂曲面的切割。

该机床在 X 、 Y 运动轴上安装一个直径 600mm 的双转轴工作台, 采用北京汉飞航空科技有限公司多轴切割技术, 完成不同型号的零件加工, 无须制作对应的夹具, 缩短了制作周期, 节约加工成本。

2.2 内外轮廓切割走丝装置设计

走丝系统和线架结构是实现电火花线切割的重要部分, 直接影响加工效果。走丝速度越快, 影响越大。电极丝在放电加工区域移动的平稳程度, 取决于走丝系统的传动精度。电极丝运动的平稳性、速度的均匀性, 影响电极丝的使用寿命和加工效果。电火花线切割的线架结构和切割状态如图 3 所示, 大多采用上、下线臂结构形式, 电极丝从上线臂通过零件再到下线臂, 形成电极丝的闭环运行系统。在切割环形零件的内轮廓时, 需重新穿丝, 将电极丝穿过零件内环后再进行切割, 这种方法操作烦琐、辅助时间增加、加工效率低、生产成本低, 如果重新穿丝和找正还会带来精度损失。

本文提出的一种可用于内外轮廓切割的走丝系统和线架结构^[9], 可单独完成外部轮廓的切割, 以及一次上丝完成内外轮廓的切割。图 4 是用于内外轮廓切割的走丝结构

示意图, 采用工字型线臂, 由线架前端丝装置和线架后端丝装置组成; 在切割环形零件的内环和外环轮廓时, 可以不重新穿丝和上丝直接移动线臂就可以完成内环轮廓和外环轮廓的切割, 避免了反复穿丝、上丝步骤, 简化操作, 提高了加工效率, 同时解决了多次穿丝、多次找正对加工精度的影响。

图 5 是内环轮廓切割状态示意图, 运用丝架的前端丝和后端丝对零件进行切割, 在切割内环轮廓时, 线臂带动电极丝移动到零件的内环, 使用第 1 导向器、第 2 导向器、第 3 导向器和第 4 导向器中间的电极丝去切割环形零件的内轮廓。图 6 是外环轮廓切割状态示意图, 同样可运用丝架的前端丝对零件进行切割, 在切

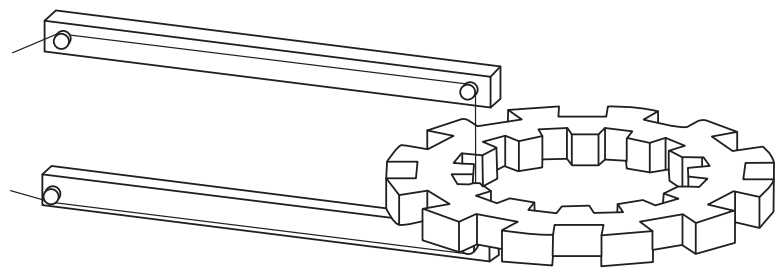


图 3 电火花线切割线架结构和切割状态示意图
Fig.3 Schematic of usual WEDM wire frame and cutting status

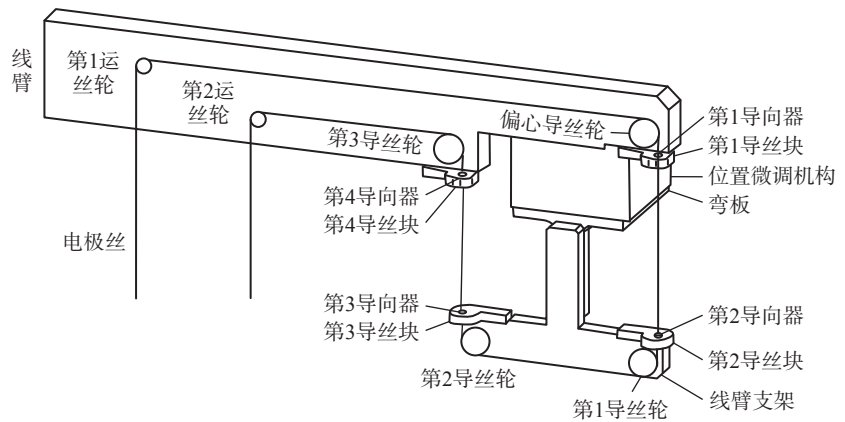


图 4 用于内外轮廓切割的走丝结构示意图
Fig.4 Schematic of WEDM cutting structure in used of cutting internal and external contour

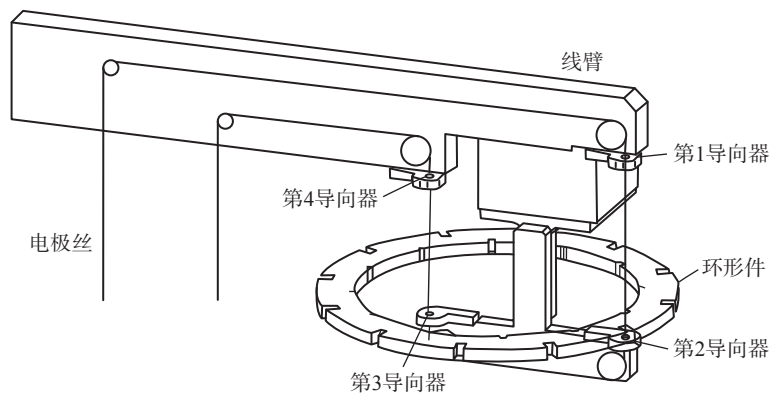


图 5 内轮廓切割状态示意图
Fig.5 Schematic of status of cutting internal contour

割外环轮廓时,先将线臂带动电极丝移出环形零件的内环,然后使用第1导向器和第2导向器中间的电极丝切割环形零件的外环。

上述走丝丝架结构可同时满足整体叶盘中间是实心、空心结构的加工,使整体叶盘的加工更加方便。

2.3 工艺参数设计

根据前文分析,在通道切割过程中在以下5个方面采取了措施。

(1)在装夹找正方面,4个固定螺钉的受力应一致,保证在切下某一段时尽可能减少应力的变化;应保证零件中心与回转轴中心的重合,同轴度 $\leq 0.02\text{mm}$,与XY运动轴的平面度 $\leq 0.05\text{mm}$ 。

(2)在切割路径和切割顺序方面,为防止或减少变形,切割路径顺序选为 180° 对称、跳跃切割,即按照第1个通道、第16个通道、第2个通道、第17个通道……的顺序进行切割。

(3)建立机床极坐标系,利用极坐标系编制程序,尽量选取 0° 、 90° 、 180° 、 270° 进行坐标点的计算,以减少因小数点计算引起的累计误差。

(4)电极丝直径、间隙补偿量的选择直接影响放电间隙的大小,此外还需要考虑放电间隙与零件材料、结构、走丝速度、电极丝张力、导轮运行状态、工作液种类及脏污程度、脉冲电源电规准,以及伺服调节等因素的影响关系。用中走丝电火花线切割机床进行加工,一般单边放电间隙为 $0.01\sim 0.02\text{mm}$ 。为精确确定放电间隙,在编程前,先用确定的加工条件试切同种材料的正方形,再实际测量出放电间隙,经试验,放电间隙为 0.02mm 。

(5)电参数选择。由于零件是高温合金,为了保证切割效率和表面粗糙度 $R_a 3.2\mu\text{m}$,选择了脉冲宽度 $50\mu\text{s}$ 、脉冲间隔 $200\mu\text{s}$ 、峰值电流 36A 、开路电压 90V 的参数进行切割,取得了良好的切割效果。

3 整体叶盘典型零件工艺方案验证

以航空发动机某典型整体叶盘(图1)的叶片间通道加工为例,对电-电-铣工艺方案进行了验证。

该验证使用多轴数控电火花线切割机床(HX6325),对整体叶盘叶片的通道、叶盆及叶背型面余量进行多轴线切割加工:(1)将图纸分解,作出线切割去除余量加工图,保证切割工序去除余量最大,轮廓余量最小;(2)作出电火花加工图,使轮廓更均匀,达到最终精铣加工余量的最优尺寸。图例外环上均匀分布30个扭曲叶片,采用一次装夹下完成通道、叶盆及叶盘的去余量加工,加工后余量最小值达到 0.5mm ,叶盆及叶背型面按照最小截面原则去除余量,轮廓趋近于理论型面,达到了余量去除最大化。由于多轴电火花线切割属于非接触式加工,切割过程中对零

件不产生加工应力,无应力变形问题,并且产品质量稳定性好,大幅降低了后续电火花粗加工叶型和精加工叶型的工作量,提高加工效率和生产进度。

3.1 切割方案规划

为最大化去除加工余量,对叶型轮廓截面进行分析,在每个叶型需要加工的截面选取截面轮廓图,并在加工不干涉的情况下对截面线进行偏置提取坐标数值,然后形成线切割轨迹图。为保证切割效率及切割余量尽量均匀,采用每个齿均进行5次切割的方法(图7),这样既保证了电火花成形加工后道工序加工效率最佳化,又保证了成形电极使用对零件加工的均匀化。

为保证加工程序无误,采用UG-NX10软件对切割轮廓轨迹进行模拟,对切割5次的各截面进行自动检查,确保各面留的余量尽量均匀且不过切。图8(a)是第1刀切割轨迹

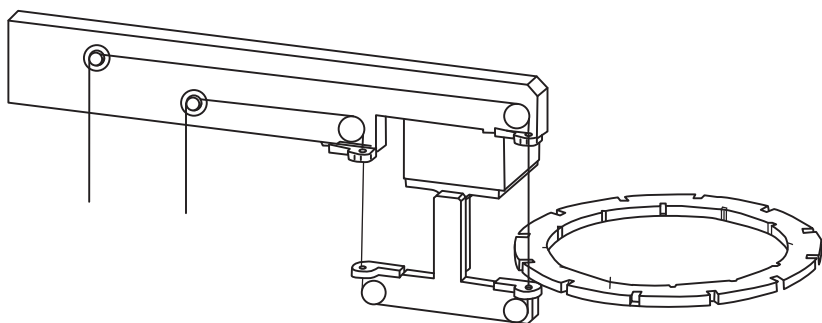


图6 外轮廓切割状态示意图

Fig.6 Schematic of status of cutting external contour

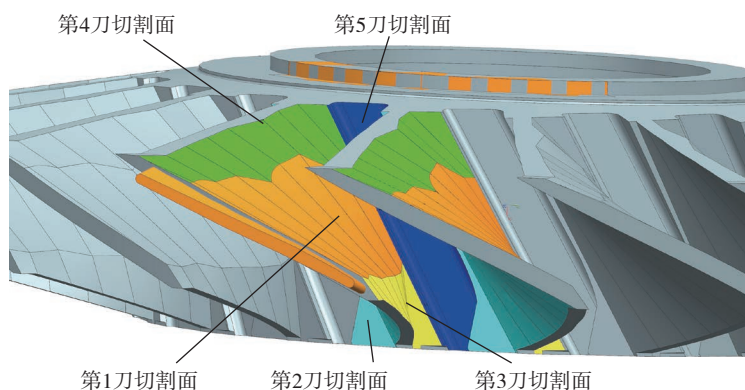


图7 每个叶片进行5次切割示意图

Fig.7 Schematic of every blade cutting five times

示意图,第1刀切割的目的是去除叶盆及叶背大部分余量,选用高效的工作液、 $\Phi 0.2\text{mm}$ 的电极丝、优化的电参数对其进行切割。

由于第1刀切割叶背区域有干涉的部分,且部分地方切割不到,为了最大化去除余量共采用了5刀切割,这样可以使留量更加均匀。图8(b)是第2刀切割轨迹示意图,即叶盆位置的余量去除;图8(c)是第3刀切割轨迹示意图,即叶型前缘位置的余量去除;图8(d)是第4刀

切割轨迹示意图,即叶型尾缘位置的余量去除;图8(e)是第5刀切割轨迹示意图,即叶型根部位置的余量去除。图8(f)是5次切割轮廓截面示意图。

为保证精铣加工的余量均匀,线切割加工完成后再进行电火花成形加工,更趋近于叶型轮廓,为精铣加工保留余量 0.5mm 。图9是线切割加工后电火花成形加工轮廓示意图。图10是5次切割后实物照片。图11是电火花成形加工后的实物照片。

3.2 切割后检测结果

按照工艺要求,线切割加工工序的线切割轮廓图的公差为 $\pm 0.1\text{mm}$,切割结束后,截取Z轴为 125.8mm 和 90mm 两个截面轮廓(图12),叶盆、叶背各选取2点进行尺寸检测,在4个象限各选取1点对叶根部进行尺寸检测,然后与理论模型数据对应点进行比对,各点尺寸检测数据比对及偏差如表1所示。可以看出,各点偏差均符合工艺及设计图纸的要求。

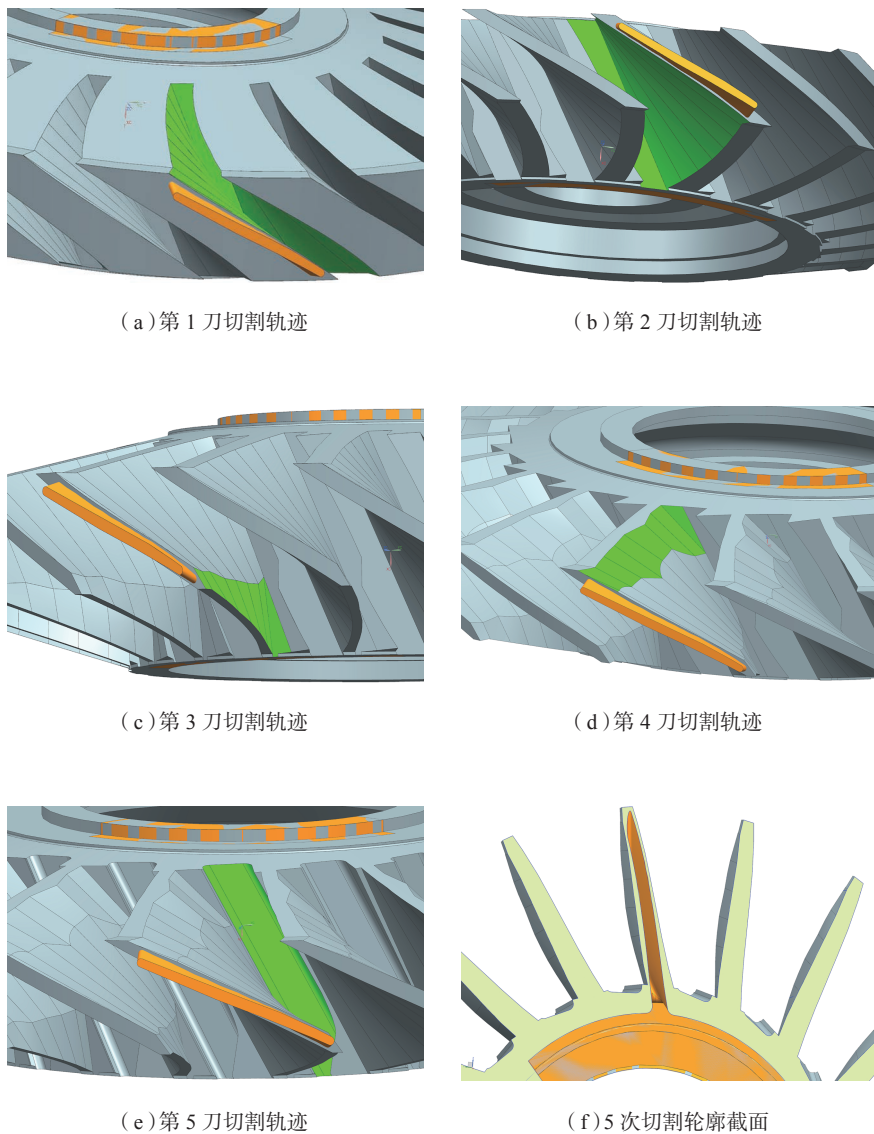


图8 5次切割轨迹与轮廓截面示意图

Fig.8 Schematic of moving track and contour sections of cutting five times

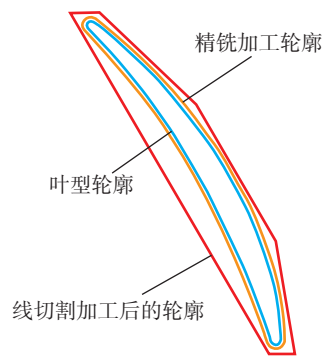


图9 线切割加工后电火花成形加工轮廓示意图

Fig.9 Schematic diagram of EDM contour after WEDM

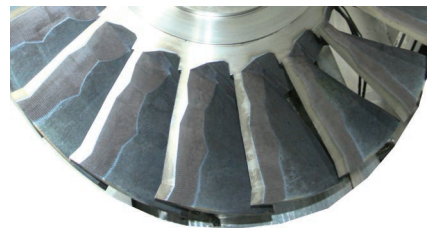


图10 5次切割后实物照片

Fig.10 Physical photos after 5 times of cuttings



图11 电火花成形后实物照片

Fig.11 Physical photos after EDM contour

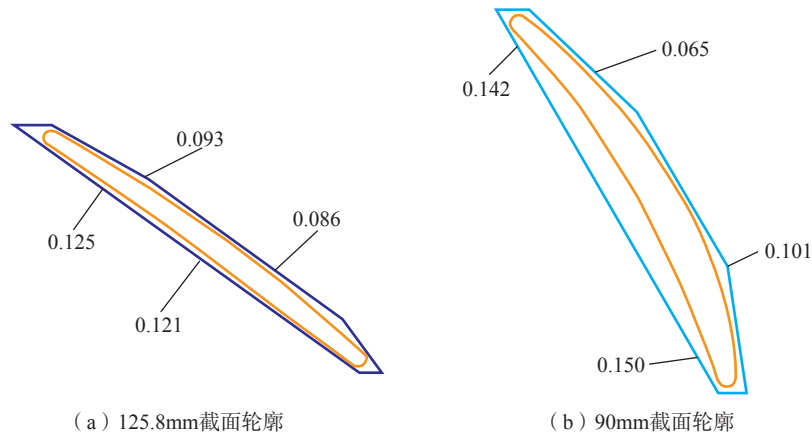


图 12 线切割后截面轮廓图
Fig.12 Schematic of section contour after wire cutting

4 结论

(1) 通过航空整体叶盘典型零件工艺验证,电-电-铣工艺方案是一种微应力、低成本、高质量、高效率加工整体叶盘叶片间通道的工艺方案,可以最大限度地去掉通道上的材料去除量。由于电火花线切割加工中无切削力,应力变形小,刀具费用大幅降低,提高了加工效率,减少了在半粗铣加工及精铣加工时五轴设备的占用时间及昂贵的刀具费用,为整体叶盘加工研究和生产制造行业提供了新型工艺方案。

(2) 本研究所采用的新机床方案和获得发明专利的走丝系统不用

重新穿丝、上丝,直接移动线臂就可完成内环轮廓和外环轮廓的切割,避免了反复穿丝、上丝,简化操作,提高了加工效率,并保证了精度。

(3) 本研究所形成的多轴线切割技术和后续电火花成形加工技术及工艺参数,已经批量应用于多种型号航空发动机整体叶盘的加工。三坐标测量结果表明,加工的整体叶盘完全符合图纸的设计要求,合格率达到 100%,工艺成熟度较高,具有较高的推广价值。实践验证了电-电-铣的工艺方案,以某型号整体叶盘为例,因电加工后材料余量均匀、余量控制相对稳定,使精铣加工的时间缩减 40h。传统加工工艺一个周期加

工 ≤ 50 件整体叶盘,而电-电-铣工艺一个周期内加工实现 ≥ 200 件整体叶盘。另外,电加工机床相对价格低,设备折旧低,如果整体叶盘加工任务批量大,可以多增加设备投入。电加工机床操作相对简单,可以实现一人操作多台设备,完成整体叶盘粗加工和半精加工的并联加工,快速提升产能。

参考文献

[1] 张海艳,张连锋.航空发动机整体叶盘制造技术国内外发展概述[J].航空制造技术,2013,56(23/24):38-41.
ZHANG Haiyan, ZHANG Lianfeng. Development overview of aeroengine integral blisk and its manufacturing technology at home and abroad[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56 (23/24): 38-41.

[2] 黄春峰.现代航空发动机整体叶盘及其制造技[J].航空与航天,2004(2):1-8.
HUANG Chunfeng. Modern aero-engine integral blisk and its manufacturing technology [J]. Aeronautics and Astronautics, 2004(2): 1-8.

[3] 任军学,张定华,王增强,等.整体叶盘数控加工技术研究[J].航空学报,2004,25(2):205-208.
REN Junxue, ZHANG Dinghua, WANG Zengqiang, et al. Research on NC manufacturing technology of integral blisk [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(2): 205-208.

[4] 赵辞,李家永,周金泉.小型弱刚性整体叶盘制造技术研究[C]//第十五届中国

表 1 线切割后检测结果
Table 1 Detection results after wire cutting

组别	Z 坐标值	X、Y 理论值	X、Y 实测值	偏差	结论
叶盆测量点 1	125.8	X=-5.46, Y=-10.308	X=-5.37, Y=-10.367	X=-0.090, Y=-0.059	合格
叶盆测量点 2	125.8	X=5.474, Y=5.187	X=5.572, Y=5.091	X=-0.098, Y=-0.096	合格
叶背测量点 3	125.8	X=3.287, Y=7.425	X=3.227, Y=7.486	X=-0.060, Y=-0.061	合格
叶背测量点 4	125.8	X=7.591, Y=9.226	X=7.675, Y=9.225	X=-0.084, Y=0.001	合格
叶盆测量点 5	90	X=-7.854, Y=-7.514	X=-7.756, Y=-7.601	X=0.098, Y=-0.087	合格
叶盆测量点 6	90	X=6.398, Y=0.500	X=6.431, Y=0.415	X=-0.033, Y=0.085	合格
叶背测量点 7	90	X=9.046, Y=7.469	X=9.058, Y=7.539	X=-0.012, Y=-0.070	合格
叶背测量点 8	90	X=-10.761, Y=-4.487	X=-10.812, Y=-4.447	X=0.051, Y=-0.040	合格

注:叶根部检测 4 象限各取一点,检测理论值=151.4mm,允许偏差范围 0~0.4mm;第 1 象限检测值=151.70mm、第 2 象限检测值=151.77mm 第 3 象限检测值=151.75mm、第 4 象限检测值=151.72mm,检测结论为合格。

科协年会论文集. 贵阳, 2013.

ZHAO Ci, LI Jiayong, ZHOU Jinquan. Research on manufacturing technology of small size weak rigidity integral blisk[C]//The Proceedings of the 15th Annual Conference of China Association for Science and Technology. Guiyang, 2013.

[5] 杨小平, 苏廷铭. 整体叶盘工程应用问题分析 [C]// 中国航空学会第十四届发动机结构强度振动学术研讨会. 贵阳, 2008.

YANG Xiaoping, SU Tingming. Engineering application problem analysis of integral blisk[C]//CSAA 14th Seminar on Engine Structure Strength and Vibration. Guiyang, 2008.

[6] 齐跃举, 苏宝华, 郑玉成. 航空发动机整体叶盘加工工艺分析 [J]. 中国新技术新产品, 2018(18): 62-63.

QI Yueju, SU Baohua, ZHENG Yucheng. Machining technique analysis of aeroengine integral blisk[J]. New Technology of China, 2018(18): 62-63.

[7] 程耀南, 陈天启, 左殿阁, 等. 航空发动机整体叶盘高效盘铣加工技术与刀具应用分析 [J]. 工具技术, 2016(3): 30-36.

CHENG Yaonan, CHEN Tianqi, ZUO Diange, et al. High efficiency milling technology and tool application analysis of aeroengine integral blisk[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2016(3): 30-36.

[8] 张定华, 张莹, 吴宝海, 等. 自适应加工技术在整体叶盘制造中的应用 [J]. 航空制造技术, 2008, 51(13): 51-55.

ZHANG Dinghua, ZHANG Ying, WU Baohai, et al. The application of adaptive machining technology in integral blisk manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008, 51(13): 51-55.

[9] 孙跃飞, 高素芳. 一种内环和外环的线切割加工方法及装置: CN201410196051.6[P]. 2016-09-21.

SUN Yuefei, GAO sufang. A kind of inner ring and outer ring wire-cutting processing method and the device: CN201410196051.6[P]. 2016-09-21.

Research and Application of Multi-Axis Wire-Cutting Technology for Integral Blisk

XU Weihong¹, SONG Weiwei², GAO Sufang³

(1. AECC Nanjing Light Aviation Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2. Aviation Military Representative Office of the Army Equipment Department in Shanghai, Shanghai 200233, China;

3. Beijing Hanfei Aero Technology Co., Ltd., Beijing 101307, China)

[ABSTRACT] Integral blisk is the key part of aero-engine with slender blade, large torque angle, large erosion removal quantity between blade channels, weak structure strength. It is difficult to manufacture due to its high-temperature alloy material. The commonly-used milling machining method for blade channels has many short-comings, such as, low machining efficiency, high deformation rate, and low machining quality of parts. In order to increase manufacturing efficiency and quality, and to decrease manufacturing cost of the blade channels of integral blisk, we analyzed the characteristic of the blade channel structure and machining technique, and proposed a new machining technique including wire-cut, electrical discharge machining (EDM) forming, and fine milling, which is a total novel technology scheme with characteristics of micro-stress, low cost, high quality, in brief, electro-electro-milling technology scheme. We also designed multi-axis wire-cutting technique and special wiring devices used for inside-and-outside outline cutting. The problems such as low quality, low efficiency have been resolved through normalizing process parameters in clamping and positioning, electrical parameters, cutting path. Finally, the effectiveness (increasing the machining quality and efficiency, lowering the machining costs) of the proposed technology scheme has been verified through typical parts machining.

Keywords: Aero-engine; Integral blisk; Blade channel; Electro-Electro-Milling technique

(责编 大漠)