

基于路径规划的大掠扭叶型整体叶盘的叶片分离技术

余强¹,唐兰剑²,赵强¹

(1. 中国航发四川燃气涡轮研究院,四川 成都 610500; 2. 中国航发四川燃气涡轮研究院,四川 绵阳 621000)

摘 要:整体叶盘的叶片分离技术是实现整体叶盘的叶片损伤修复和叶片试验的关键加工技术。计算并选定整体叶盘倾斜角度,设计专用叶片分离工装,计算叶片分离的刀位点,根据叶片的掠扭程度规划加工路径,用 UGNX 软件进行几何仿真,并在某型整体叶盘上进行了加工实验。结果表明,该叶片分离技术能较好地满足加工质量要求和有效避免加工干涉,且控制重要的刀位点以解决过切问题。

关键词:整体叶盘;路径规划;叶片分离;大掠扭;几何仿真

中图分类号:V232 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)05-0135-04

Blade Separation Technology for Blisk with Large Swept Twisted Blades Based on Path Planning

YU Qiang¹,TANG Lanjian²,ZHAO Qiang¹

(1. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China;

2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China)

Abstract: The blade separation technology of blisk is the key processing technology used to repair the blade damage and test the blade of blisk. The blisk is tilted to a certain angle, special blade separation tooling is designed, processing path is planned, and UGNX software is used to carry out the geometric simulation. The results show that this technology can perfectly meet the requirements of its machining quality and can be used to avoid over-tangent and control the cutting position.

Keywords: blisk; path planning; blade separation; large sweep and twist; geometric simulation

0 引言

随着航空制造技术的不断发展,近年来整体叶盘结构在新研制航空发动机中已得到广泛应用^[1]。但是,整体叶盘技术的应用也带来了整体叶盘叶片损伤修复和叶片试验等难题。在这些问题的解决过程中,需要将目标叶片从整体叶盘上分离下来。分离叶片过程造成的变形应尽量小,被分离叶片尺寸精度、位置精度和表面粗糙度要求较高。同时,具有大掠扭叶型的整体叶盘由于叶片掠扭程度大、叶片间相互遮挡、通道相对狭窄,所以刀具可达性较差,这些使叶片分离更加困难。因此,对于大掠扭叶型整体叶盘,需要探索出一种合适的叶片分离方法。

本文对大掠扭叶型整体叶盘的叶片分离进行了研究,提出了一种基于路径规划的电火花线切割分离叶片技术方案。通过理论计算得出叶片分离所需要的刀位点,再根据叶片的掠扭程度,规划出一条合适的加工路径,并在计算机上进行模拟检查。最后,在某型发动机整体叶盘上通过了加工验证,并取得了较好的效果。本技术的实现为整体叶盘叶片分离提供了新的思路,具有重要的意义。

1 研究对象分析

大掠扭叶型整体叶盘一般具有以下特点:1) 叶片扭

转角和掠角大,从进气边到排气边扭转和掠过较大角度。2) 叶片间通道窄,且通道形状随着叶片扭转产生剧烈变化。3) 叶宽和叶高较大,使相邻叶片在轴向上相互遮挡,叶片表面曲率变化大,给数控加工带来了难题。图1为某大掠扭叶型整体叶盘,掠角为49°,从进气边到排气边最大扭转角度为47°。



图1 大掠扭叶型整体叶盘

2 叶片分离方案

2.1 加工方法的确定

选择电火花线切割工艺方法分离整体叶盘叶片,理由如

下:1)线切割电极丝细,直径一般为 $0.1\text{ mm}\sim 0.3\text{ mm}$,有利于穿越狭窄的叶片通道。2)电火花线切割加工没有切削力,因此可以大大降低零件的加工变形。3)选择慢走丝加工方法,可以获得较高的表面粗糙度和尺寸精度。4)选择两轴联动的线切割机床可满足加工要求,加工成本低。

2.2 确定整体叶盘倾斜角

对大掠扭叶型整体叶盘,电极丝无法沿叶盘轴线方向穿越叶片间通道,因此造成电极丝无法沿叶盘轴向方向进行加工。如图2(a)所示,电极丝沿轴向穿越叶片间通道时被叶片阻挡。如图2(b)所示,将叶盘倾斜合适的角度 α 后,电极丝便可顺利穿越通道。

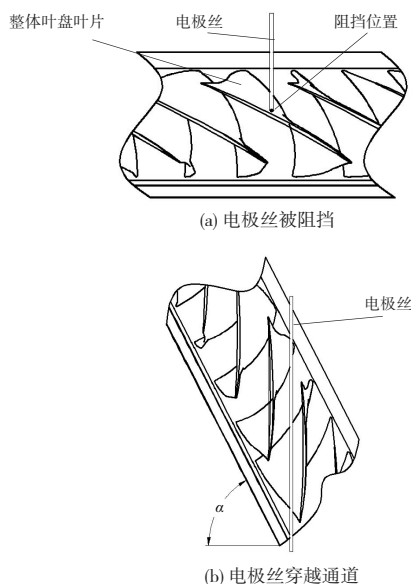


图2 整体叶盘倾斜角

电极丝穿越叶片间通道时,存在两个极限位置,在极限位置上电极丝刚好同时接触到相邻的两片叶片。因此,在实际加工时,电极丝应该位于两个极限位置之间。对应的整体叶盘倾斜角也有两个极限值,而选择的倾斜角大小应该在两个极限值之间。

图3为电极丝极限位置图。 h_1 为叶片在轴向方向的宽度, h_2 为极限位置2与叶背的切点在轴向方向的高度, a 为极限位置1与相邻两叶片前后缘切点在 y 方向上的距离, b 为极限位置1与相邻两叶片的两处切点在 y 方向上的距离。经过计算,整体叶盘倾斜角 α 应满足以下关系:

$$\arctan \frac{a}{h_1} < \alpha < \arctan \frac{b}{h_2} \quad (1)$$

2.3 工装设计

由于整体叶盘的叶片数量较多,一般需要分离的叶片不止一个,所以设计的工装必须有使整体叶盘旋转分度的功能。整体叶盘叶片分离工装应具备三项功能:支撑定位、倾斜固定角度、旋转分度。

以某型整体叶盘为例,图4为该叶片分离工装装夹示意图。整体叶盘通过2件定位销和1处平面与工装实现支撑定位,并通过压紧环和压紧螺栓1压紧固定。带斜面

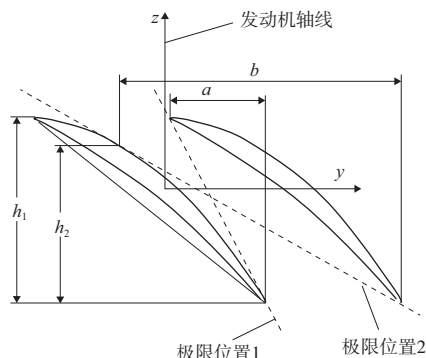


图3 电极丝极限位置

的基座使整体叶盘倾斜固定角度,压紧螺栓2将基座上的分度盘和基座压紧联接。在叶盘中间壁厚较大处进行压紧,防止零件在各个方向的移动。在压紧位置下部采用柔性辅助支撑,防止螺栓预紧力过大造成零件变形。分度盘上有 n (n =叶片总数)处高精度键槽,通过与分度插销组合使用,实现准确分度。每分离完成一片叶片后,转动分度盘,整体叶盘也跟着旋转,当旋转至下一个键槽时,将分度插销插入该键槽,然后继续分离叶片。

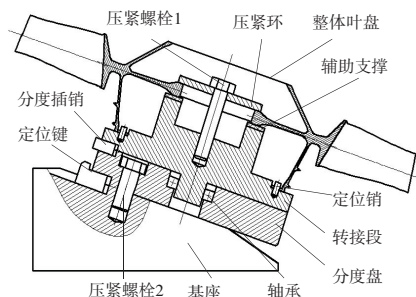


图4 专用工装

2.4 计算切入点 and 切出点

在分离整体叶盘叶片时,在整体叶盘上必然存在起始切入位置和切出位置,即切入点和切出点,它们是编程加工中需要给出的点。图5是整体叶盘叶片分离工作时的切入点和切出点。

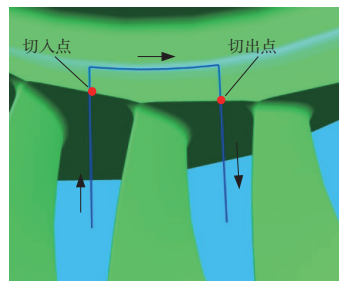


图5 切入点与切出点

在整体叶盘倾斜前,很容易确定在工作坐标系下的切入点和切出点坐标位置。在整体叶盘倾斜后,切入点和切出点在工作坐标系下的坐标位置产生变化。因此,需要计算出坐标变换后的切入点和切出点位置。图6为 P 点绕 x 轴旋转 α 角后至 $\bar{P}$ 点。

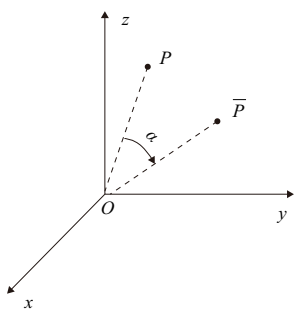


图6 坐标变换

因此,切入点和切出点满足以下关系:

$$\overline{P_i} = P_i R_\alpha \quad (2)$$

$$\overline{P_o} = P_o R_\alpha \quad (3)$$

两式中: P_i 为旋转前的切入点坐标; $\overline{P_i}$ 为旋转后的切入点坐标; P_o 为旋转前的切出点坐标; $\overline{P_o}$ 为旋转后的切出点坐标; R_α 为整体叶盘倾斜 α 角的旋转矩阵,为

$$R_\alpha = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & -\cos\alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.5 规划加工路径

整体叶盘倾斜后,线切割电极丝需穿过叶片通道到达切入点,并开始叶片分离工作。由于大掠扭叶型整体叶盘的叶片掠扭程度大,所以电极丝穿过叶片间通道时容易与叶片产生碰撞。在加工前,根据整体叶盘叶型和叶片间通道,规划合理的加工路径,避免电极丝与叶片发生干涉。

为了提高加工效率,消除每件叶片分离时的重复对刀,因此叶片分离工作完成后,电极丝应回到加工起始点。在路径规划中,将加工路径起始点和终止点设为同一点,使加工路径成为闭合回路。在分离一片叶片后,电极丝回到切割起始点,等待进行下一件叶片的分离工作。

图7为某整体叶盘叶片分离的加工路径示意图。规划加工路径分以下几步:1)在工作坐标系下选取加工路径上起始点(终止点)坐标位置,保证起始点位置处于整体叶盘和工装几何轮廓之外。2)根据起始点、已计算的切入点和切出点,初步确定加工路径的基本形状和走向。3)设置其余加工路径,保证电极丝沿加工路径运动不与整体叶盘和工装产生干涉。

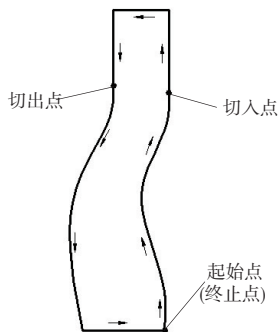


图7 加工路径

2.6 几何仿真

规划好加工路径后,还应在计算机上进行几何仿真,对加工路径进行模拟检查。在UGNX软件中进行几何仿真,其步骤为:首先建立整体叶盘实体模型和工装模型,然后使电极丝按照规划好的加工路径进行模拟加工,最后检查电极丝与工装、叶片在模拟加工过程中是否发生干涉。如果没有产生干涉,则说明规划的路径合理,路径不需要进行调整;如果产生干涉,则对发生干涉位置的路径进行调整,使电极丝与相邻实体有充裕的间隙值,再重新进行几何仿真。

除了进行干涉检查,还应检查电极丝是否在整体叶盘上造成了过切。图8为模拟检查过程中容易出现的“X”形的过切现象,即在叶片某分离位置出现加工轨迹交叉的现象。其原因是叶片切分宽度在 y 轴方向的投影距离过大,超过了该处叶片在干涉点处圆周上对应的弦长,因此在整体叶盘旋转分度进行叶片分离时,下一片叶片的加工轨迹与前一片叶片的加工轨迹在整体叶盘上相互交叉。

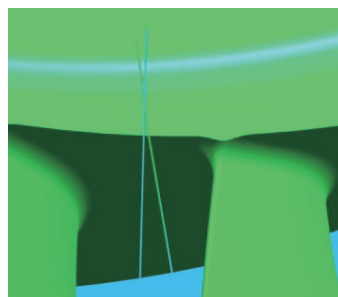


图8 “X”形过切现象

图9为加工路径的两处极限位置示意图, a 、 b 为两处极限位置。要使叶片分离过程不出现“X”形的过切现象,则应使 a 、 b 两点在整体叶盘对应圆周上构成的圆心角小于每片叶片的分度角度,即应满足:

$$\arcsin \frac{|y_a - y_b|}{2r} < \frac{2\pi}{n} \quad (5)$$

式中: r 为 a 、 b 两点在整体叶盘圆周上的半径; n 为整体叶盘叶片总数量; y_a 和 y_b 分别为 a 、 b 两点在工作坐标系下的 y 坐标值。

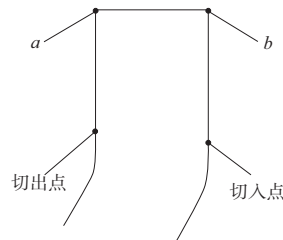


图9 加工路径极限位置

3 加工验证

图10为某型整体叶盘,共有34片叶片,叶尖处直径为760mm,叶盘总厚度176mm。叶片高度89.8mm,叶片掠过角度为 37° ,最大扭转角度为 40° 。



图 10 某型整体叶盘

按式(1)计算,取倾斜角 $\alpha = 26.5^\circ$ 。设计和制造叶片分离工装,实现整体叶盘的定位、倾斜和分度功能。然后,按式(2)~式(4)计算出在工作坐标系下的切入点和切出点坐标值,切入点坐标为 $[209.48 \ 12.39 \ 37.41]$,切出点坐标为 $[205.79 \ -19.46 \ 39.50]$ 。规划出加工路径,再按式(5)对 a 、 b 为两处极限位置进行验算,其结果满足要求。在 UGNX 软件上进行几何仿真,没有出现干涉现象。在两轴电火花线切割机床上慢走丝加工,共完成 2 件该型整体叶盘全部叶片的分离工作。

对所有分离叶片的切割面尺寸和平行度进行了检测,表 1 为叶片切割面尺寸误差的检测结果,表 2 切割面的平行度误差的检测结果。

表 1 尺寸结果

区间	数量	占比/%
$[-0.02, -0.01)$	14	20.6
$[-0.01, 0)$	23	33.8
$[0, +0.01)$	18	26.5
$[+0.01, +0.02)$	13	19.1

表 2 平行度结果

区间	数量	占比/%
$[0, 0.01)$	36	53.0
$[0.01, 0.02)$	30	44.1
$[0.02, 0.03)$	2	2.9

在表 1 中,所有叶片的尺寸误差在 $[-0.02, +0.02)$ 区间内,有 60.3%的叶片尺寸误差在 $[-0.01, +0.01)$ 区间内, $[-0.02, -0.01)$ 和 $[+0.01, +0.02)$ 区间内叶片数量大致相等。可以看出,叶片数量随尺寸误差区间变化呈接近正态分布趋势。分离叶片的尺寸精度较高,误差分布合理。

在表 2 中,所有叶片的平行度误差在 $[0, 0.03)$ 区间内,97.1%的叶片平行度误差在 $[0, 0.02)$ 区间内。可以看出,绝大部分叶片平行度误差 $<0.02 \text{ mm}$,叶片数量在平行度误差区间 $[0, 0.01)$ 和 $[0.01, 0.02)$ 分布较平均。分离叶片的平行度精度高,一致性好。

综上,采用基于路径规划的大掠扭叶型整体叶盘的叶片分离技术来分离某型整体叶盘叶片,方案可行且可靠,分离叶片的尺寸和平行度精度较高,一致性较好。

4 结语

本文对大掠扭叶型整体叶盘的叶片分离进行了研究,从理论计算、工装设计、路径规划、几何仿真证明了该技术的可行性,通过实物加工证明了该技术的可靠性,为整体叶盘叶片分离工作提供了较好的技术方案,具有重要的意义。在本次研究中,得出了以下结论:

- 1) 采用专用工装倾斜整体叶盘、规划加工路径和两轴电火花线切割的加工方法能有效地对大掠扭整体叶盘的叶片进行分离,并获得较好的加工质量。
- 2) 合理的加工路径可以避免电极丝和叶片发生干涉,提高加工效率,且切入点和切出点位置对加工路径的好坏起到了关键性的作用。
- 3) 控制 a 、 b 两处极限位置的坐标,能有效避免叶片分离过程的“X”形过切现象。

参考文献:

- [1] 黄春峰. 现代航空发动机整体叶盘及其制造技术[J]. 航空制造技术, 2006(4): 94-100.
- [2] 蔺小军, 杨碧颖, 张新鸽, 等. 整体叶盘通道去余量线切割加工技术研究[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2): 27-32.
- [3] 王文理. 整体叶盘自适应加工技术及其工程化探索[J]. 航空制造技术, 2014(13): 26-29.
- [4] 赵建社, 唐兰剑, 郁子欣, 等. 基于轨迹搜索的闭式三元流通道电火花加工电极设计方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(6): 824-829.
- [5] 王福元, 赵建社. 基于电解扫描成形原理的整体叶盘叶根加工方法[J]. 航空学报, 2015(10): 3457-3464.
- [6] 侯增选, 郭超, 赵宁, 等. 整体涡轮叶盘五坐标数控电火花加工编程[J]. 大连理工大学学报, 2013, 53(4): 521-525.
- [7] 田荣鑫, 邓霜, 张晓峰, 等. 基于控制线的开式整体叶盘环形刀四轴加工算法研究[J]. 航空制造技术, 2016(18): 88-94.
- [8] 李大力. 五轴联动测量技术在整体叶盘叶型检测中的应用[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(2): 31-34.
- [9] 刘嘉, 朱栋, 万龙凯, 等. 整体叶盘电解加工移动密封阴极设计与试验[J]. 中国机械工程, 2014, 25(14): 1847-1851.
- [10] 孟宪旗, 陈斌杰, 李海涛. 浅析慢走丝用电极丝技术的发展及应用[J]. 模具制造, 2019, 19(3): 75-79.

收稿日期: 2019-07-30