

# 用于提高整体叶盘叶片表面质量的数控工艺

## NC Technology used to Enhance Surface Quality of Blisk's Blades

中国燃气涡轮研究院 刘自成 江和甫 舒发龙 张为民

**[摘要]** 针对五坐标加工中心加工整体叶盘时叶片表面质量较差的问题,本文提出了一套利用UG软件自身功能光顺曲线和曲面的方法,使造型曲面的光顺程度得到大幅度提高,从整体叶盘数控加工工艺源头上保证了整体叶盘加工质量。实践表明,此方法方便、快捷,叶片表面质量得到明显改善,可满足工程使用要求。

**关键词:** 五坐标加工中心 整体叶盘 表面质量 曲面光顺

**[ABSTRACT]** According to the poor surface quality of blisk's blades processed by the five axis machining center, a novel method to smooth curves and curved surfaces by using UG software is put forward. Relying on this method, the surface modeling becomes more smooth, and the quality of blisk is ensured from the processing source. The test results indicate that the method is convenient and fast. Surface quality of blade improves markedly which shows that it meets the engineering requirements.

**Keywords:** Five axis machining center Blisk Surface quality Surfaces smoothing

在现代高推重比航空发动机结构中,整体叶盘是将旋转的工作叶片和转子盘毂直接连接为一体的一种结构形式<sup>[1-2]</sup>。由于该结构省去了连接用的榫头、榫槽,也避免了榫头气流损失,减少了零件重量和零件数,使得发动机的推重比和可靠性得到了进一步的提高。这也是整体叶盘在航空发动机中逐渐被大量使用的原因,同时也对整体叶盘的加工质量提出了更高的要求,而整体叶盘上叶片的表面质量又是决定叶盘是否合格的重要因素之一。

虽然我国的许多航空发动机生产厂已经采用数控加工的方法来生产叶片,但对于薄壁叶片的精加工余量仍然多采用传统的手工抛光方法来去除,并靠截面样板来保证叶片的气动形状。由此导致的主要问题是:叶片的波纹度和截面形状精度难以控制,严重影响发动机的气动性能;叶片之间一致性差,影响发动

机的动平衡性能;叶片内应力超过设计要求;表面完整性难以保证<sup>[3]</sup>。

对于带有自由曲面叶片的整体叶盘来说,叶盘通道窄而深,加工采用的刀具细而长,一般采用五轴联动加工中心进行加工。加工后的叶盘叶片表面由于受本身结构的限制,采用传统的手工抛光加靠截面样板的方法既不方便,又会产生由此带来的许多问题<sup>[4]</sup>。而现代的五轴联动加工中心,定位的精度可以达到0.02mm以内,而大部分的航空发动机所使用的整体叶盘上叶片的表面轮廓度要求都在0.04~0.1mm范围内。

所以用五轴联动加工整体叶盘的叶片理论上可以做到最后无余量精加工,但前提是数控加工后叶片表面要满足:无明显可见的加工刀痕,粗糙度达到 $R_a=0.4\mu\text{m}$ 等多项表面质量要求。在实际工作中,五轴联动无余量加工整体叶盘后,依靠人工进行几乎不去除余量的抛光工艺处理后,叶片就能满足设计要求。这种数控加工的工艺方法要求五轴联动加工出的叶片的表面质量非常高。

本文提出了一套利用UG软件自身功能光顺曲线和曲面的方法,使造型曲面的光顺程度得到大幅度提高,从整体叶盘数控加工工艺源头上保证了整体叶盘加工质量。

## 1 五轴联动数控加工整体叶盘工艺流程

五轴联动数控加工整体叶盘是一个复杂的工艺过程,基本的流程如图1所示。

对原始叶型数据的光顺处理,建立光顺的三维叶型曲面模型是整体叶盘五轴数控加工工艺流程的源头,也是最关键的步骤之一。曲面的光顺程度将直接影响加工后的表面质量,如果使用未经过光顺处理的三维模型加工,叶片表面将留下大量的凹坑,如图2所示。

## 2 叶片造型的光顺处理

### 2.1 未经过光顺处理的叶型造型

(1)使用非均匀有理B样条(NURBS)将数据点

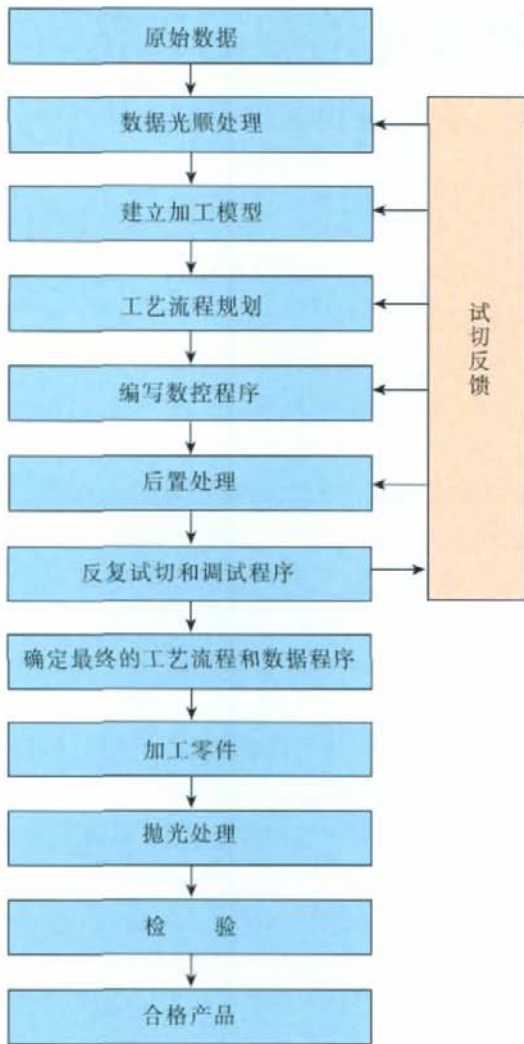


图1 加工整体叶盘工艺流程图  
Fig.1 Process flow chart of blisk

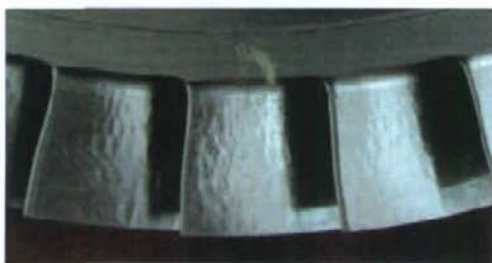


图2 带有大量凹坑的叶片表面  
Fig.2 Surface of blisk's blades with a large number of pits

连接成封闭截面线,见图3。

(2)将各截面线进行曲面放样,形成叶型曲面,见图4。

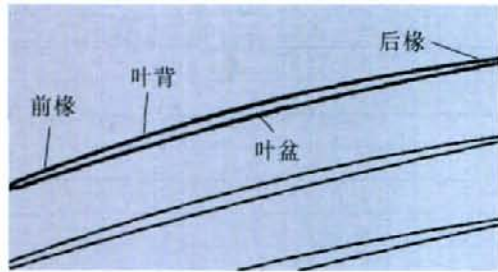


图3 叶型截面线  
Fig.3 Section line of blisk's blades

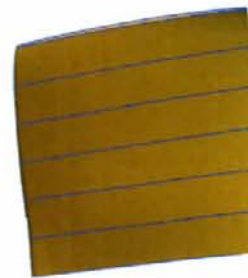


图4 叶型曲面  
Fig.4 Curved surface of blade

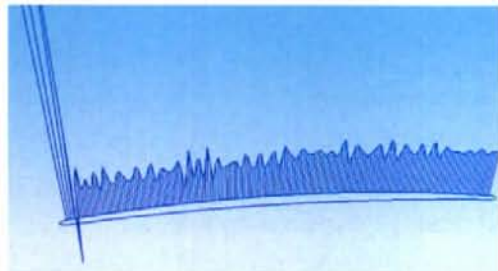


图5 未经过光顺处理的叶背截面线曲率图  
Fig.5 Sectional curvature map with no smoothing deal

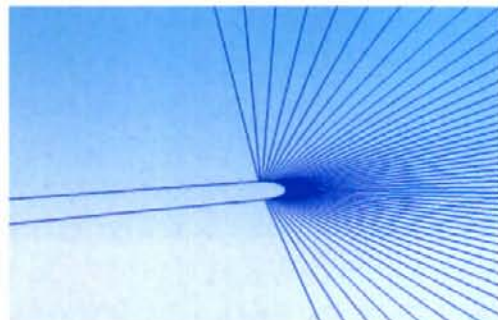


图6 榫头处截面线曲率面  
Fig.6 Curvature map of blade edge

对截面线进行曲率分析,曲率变化不平稳,特别在叶榷与叶盆和叶背的连接处,时常会有曲率突变现象,如图5所示;在前榷和后榷处,曲率变化更加剧烈,见图6。

采用这种模型加工出的叶片表面质量较差,将留下大量凹坑(图2)。

## 2.2 构造光顺叶型的方法

(1)将每个截面线分成4个部分:前榷截面线、后榷截面线、叶盆截面线、叶背截面线,见图3。

(2)使用圆弧代替前榷截面线和后榷截面线。代替的圆弧与前后榷头型值点最大距离(0.000 262mm)小于叶片表面轮廓度的公差要求,见图7。

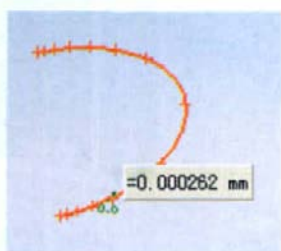


图7 榷头处使用圆弧代替样条曲线

Fig.7 Arc replacing spline curve in the blade edge

(3)使用能量法光顺叶背截面线和叶盆截面线。

能量法主要针对样条曲线,样条可以理解为一根受载荷变形的弹性梁。曲线型值点相当于弹性梁上的压铁,同时可以理解为梁上的集中载荷,迫使梁变形。实践表明,在一定的约束条件下,梁的弯曲弹性势能越小,曲线就越趋于光顺。改变压铁的位置,就是为了寻求梁的弯曲变形能趋于最小的状态。能量法光顺的基本原理即在于此,即移动型值点,使得过型值点的曲线所代表的弹性梁的变形能最小。

光顺后曲线与原始型值点的距离要保证小于叶

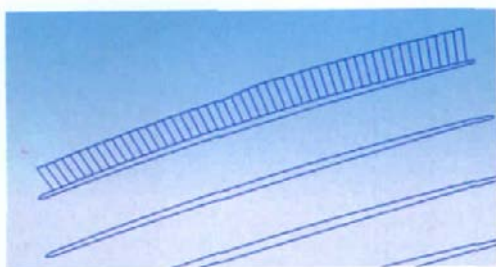


图8 叶背截面线光顺后曲率图

Fig.8 Sectional curvature map with smoothing deal

片表面轮廓度的公差要求,并且使叶背截面线和叶盆截面线与前后榷头处相切过渡。

光顺后叶背截面线的曲率见图8。

(4)将光顺后的各截面线进行曲面放样,形成叶型曲面。采用此方法的造型曲面进行数控加工,叶片的表面质量得到大幅度的提高,见图9。



图9 叶型光顺后的被加工叶片表面

Fig.9 Surface of blisk's blades with smoothing deal

## 3 结束语

此方法可用于各种叶片的光顺造型。在叶片本身扭曲较小时用此方法造型简单、快捷,并在实际加工中取得了较好的效果。

此方法只光顺了叶片截面线的 $U$ 方向,相对于曲面放样的 $V$ 方向并没有约束,见图10。所以当叶型扭曲度太大时,此方法的效果并不明显。

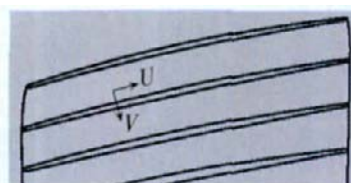


图10 叶型 $U$ 、 $V$ 方向示意图

Fig.10  $U$ 、 $V$  direction of blades's section line

## 参 考 文 献

- [1] 刘雄伟,张定华,王增强,等. 数控加工理论与编程技术. 第2版. 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 陈光. 整体叶盘在国外航空发动机中的应用. 航空发动机,1999(1):1-6,44.
- [3] 刘维伟,张定华,史耀耀,等. 航空发动机薄壁叶片精密数控加工技术研究. 机械科学与技术,2004,23(3):329-331.
- [4] 王增强,孟晓娟,任军学,等. 复杂薄壁零件数控加工变形误差控制补偿技术研究. 机床与液压,2004(4):61-63.

(责编 晓霏)