

整体叶盘叶片加工变形控制技术研究

Study on Control of Machining Deformation of Blisk Blade

中国燃气涡轮研究院 刘自成 舒发龙 张为民

[摘要] 针对五坐标加工中心(MIKRON_UCP1350)采用五轴联动方式加工整体叶盘时叶片和刀具受力变形较大的问题,从加工整体叶盘叶片的工艺特点着手,结合传统切削力理论公式计算和加工时叶片的有限元分析,对加工变形控制展开研究。在初步确定切削参数值后,经过试件实际试加工,修正切削参数值使加工后叶片既满足叶型面变形在公差允许范围内,同时也获得较好的铣削表面质量,加工效率也能得到提高。这种通过确定和优化切削参数来实现对叶片加工变形控制的方法经实践表明可满足工程使用要求。

关键词: 五坐标加工中心 整体叶盘 变形控制 有限元分析

[ABSTRACT] According to the deformation of blisk blades and cutting tools when the blisk is machined by the five axis machining center of MIKRON_UCP1350, and with considering the characteristics of blisk blade machining process, the calculation of cutting force and finite element analysis of blade machining, the control of the machining deformation is studied. After determination of the cutting parameters, it not only meets the deformation of blisk blades within the tolerance by modified milling parameters, but also improves the machining efficiency and obtains better milling surface quality. The test results indicate that the method through determination and optimized parameters to control the machining deformation of blisk blade process meets the engineering requirements.

Keywords: Five axis machining center Blisk Deformation control Finite element analysis

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^[1]。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,而整体叶盘叶片的加工质量又是决定叶盘是否合格的关键因素

之一。

1 整体叶盘叶片的加工工艺分析

整体叶盘上叶片表面是封闭的自由曲面,叶片之间的盘缘流道窄,且是绕中心旋转的回转曲面,叶片整体有扭曲趋势,加工时极易产生干涉,刀具路径规划和刀轴控制都具有很高的难度,如图1所示。整体叶盘叶片外廓尺寸相对截面尺寸较大,相对刚度低,加工工艺性差,是一种典型的薄壁件,在加工过程中由于切削力、切削热、切削振动等因素的影响,整体叶盘叶片易发生变形,造成零件尺寸超差、叶片厚度不均匀等误差。因此对铣削加工过程中叶片变形的预估和控制有重要工程运用价值,它将直接影响加工后的叶片是否在设计图纸要求的公差范围内。



图1 开式整体叶盘
Fig.1 Open blisk

另外,由于叶片间流道窄而深,为了保证五轴联动加工的安全性(为避免干涉,刀轴有倾斜摆角),夹持刀具伸出长度通常为刀具本身直径的5倍以上,远远超出常规加工中刀具夹持长度不超过刀具直径3倍的原则。所以刀具刚性差,让刀现象严重(即在叶片表面产生欠切,加工出的叶片厚度比理论值偏厚),易折断。

2 切削力大小的理论计算

由于切削机理的复杂性,目前大部分航空企业实际生产中广泛采用经验公式计算切削力。利用测力仪测出切削力,再将试验数据加以适当处理,就可以得到切削力的经验公式。

常用的铣削力计算指数经验公式如下:

$$F_z = \frac{C_F a_p^{x_F} a_f^{y_F} a_w^{z_F}}{d_0^{w_F} n^{w_F}} k_{Fz}, \quad (1)$$

其中 F_z 为铣削力,通常情况下公式(1)中的 C_F 、 x_F 、 y_F 、 u_F 、 q_F 、 w_F 可以在机械加工类的工艺手册中查到,此公式更详细的使用说明也可以在各类机械加工的工艺手册中查到。

3 刀具端点位移与切削力的关系

刀具在加工过程中由于受切削力的影响会产生变形位移,这样会产生欠切现象,即加工出来的叶片比理论模型明显偏厚。由于整体叶盘叶片间流道窄、叶片长,再加上加工过程中刀具为避免干涉会有摆角等多方面因素影响,导致实际加工中刀具伸出夹持柄的长度明显偏长。例如,选用的直径 $\phi 4\text{mm}$ 的刀具在实际加工中伸出刀具夹持柄的长度都超过了 30mm ,远超过常规加工中刀具伸出长度不大于 3 倍自身直径的原则。所以加工过程中由于刀具变形引起的欠切现象特别明显,计算出刀具端点的变形与切削力的关系为控制刀具变形、选择合理的切削参数奠定坚实基础。

刀具的计算模型简图见图 2,由于刀具圆柱体部分长度远大于其半球体部分,因此估算时可以忽略刀具的球体部分,而将其看成一个圆形截面的悬臂梁,刀具夹持部分设定为固定端边界条件,即位移为零。刀具切削力 F 与端点位移 y 的关系为:

$$F(l, y) = \frac{3EIy}{(l-R)^3 \cos \theta}, \quad (2)$$

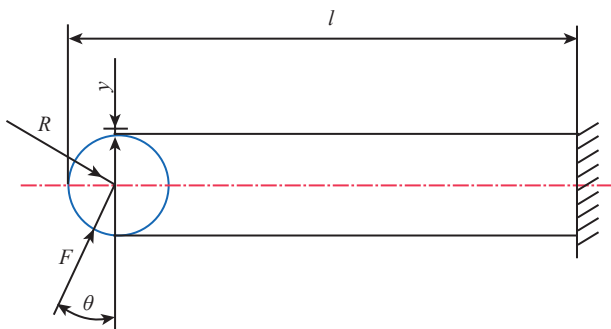


图2 刀具的计算模型简图

Fig.2 Calculation model of cutting tool

式中, l 为刀具长度; R 为截面半径,实际加工刀具直径为 $\phi 4\text{mm}$;

I 为抗弯截面系数, $I = \frac{\pi}{4} R^4$; θ 为切削力与刀具横截面夹角,实际加工中为 5° 。

刀具材料的弹性模量取为 $E=200\text{GPa}$, 刀具端点位移 (0.02mm 、 0.05mm 、 0.08mm 、 0.10mm) 与切削力的关系计算结果见表 1。由此表可以明显地看出,在允许同等的刀具端点位移变形时,刀具伸出长度越长,所需要的受力载荷就越小。所以在实际加工中,只要能够保证机床加工安全,刀具的伸出长度会选择尽可能短的。另外,将表 1 与表 2 相结合,用来确定最初试加工时的切削参数。

表1 刀具端点位移与切削力的关系

刀具伸出长度/mm	载荷/N			
	0.02mm	0.05mm	0.08mm	0.10mm
30	6.76	16.90	27.0	33.8
35	4.13	10.33	16.5	20.7
40	2.71	6.77	10.8	13.6
45	1.87	4.67	7.47	9.34
50	1.34	3.36	5.37	6.71

表2 各点受力载荷

位置	坐标值/mm			载荷/N
	X	Y	Z	
叶背中点	-0.268	0.646	101.28	32.8
叶背2/3处	1.114	3.408	101.18	71.6
叶背1/3处	-1.832	-2.887	101.29	26.5
叶盆中点	0.235	0.268	101.27	32.8
叶盆2/3处	1.543	2.965	101.18	73.3
叶盆1/3处	-1.320	-3.142	101.27	26.5
进气边	-3.833	-9.109	100.99	26.5
排气边	4.801	9.164	100.70	30.63

4 叶片加工变形的有限元分析

工件在受力状态下的弹性变形属于有限元理论中结构强度力学分析的内容,在知道力的大小和方向后,采用有限元计算方法可以精确计算相应的位移。对于叶片数控切削过程,切削力的大小、方向和作用点是随时间改变的,因此叶片弹性变形的大小和方向也是随着时间变化的函数,这样很不利于研究叶片在加工中的弹性变形。

假设在叶片切削过程中切削力连续变化,在连续刀

位点之间切削力的变化很小,则可认为在单个刀位点上切削力是固定不变的,这样,切削力和弹性变形从关于时间的函数转化成关于刀位轨迹或刀位点的函数,根据在各个刀位点的切削力大小,可以通过有限元法中静力学方法计算出该刀位点上弹性变形的数值。以上假设将叶片动态的切削过程转化成离散的几个刀位点上的静力学中应力、应变问题,而没有考虑因切削力的变化引起的叶片振动^[2]。

由于整体叶盘加工变形主要集中在叶片上,同时,在对某个叶片进行粗、精加工时,只有一个叶片受铣削力作用,其他叶片在加工过程中主要受到加工振动的影响,另外整体叶盘叶片具有严格的轴对称性,所以可以通过研究其中一个作用叶片来反映整体叶盘加工变形情况。

经简化后,整体叶盘叶片加工变形模型如图3所示。叶片网格划分时,考虑到叶片具体形状,选择六面体单元形状进行划分。而单个叶片的质量相对于装卡在机床上的整个整体叶盘和工装很小,所以对叶片与整体叶盘连接的根部附加固定端边界条件,即位移为零。利用该有限元模型,不仅可以计算出刀位点在切削力的作用下的精确位移,还可以得到叶片在刀位点上的弹性变形与切削力的规律。

由于单个叶片在加工过程中是单悬臂结构,显而易见,叶片顶部的变形应该是叶片变形最大的部位,如图4所示,现在在叶尖的8个部位设置采样点。

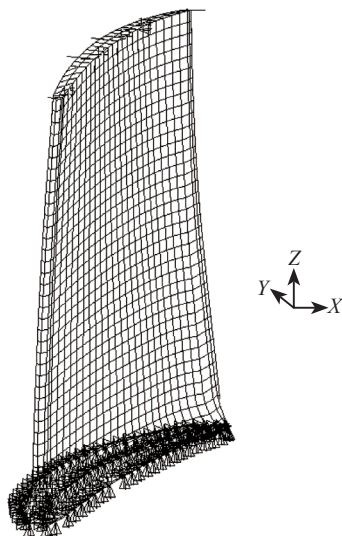


图3 叶片的计算模型简图
Fig.3 Calculation model of blade

假设切削力是以集中法向力加载在采样点上,计算在该点法向方向有0.1mm位移时的受力载荷,弹性模量

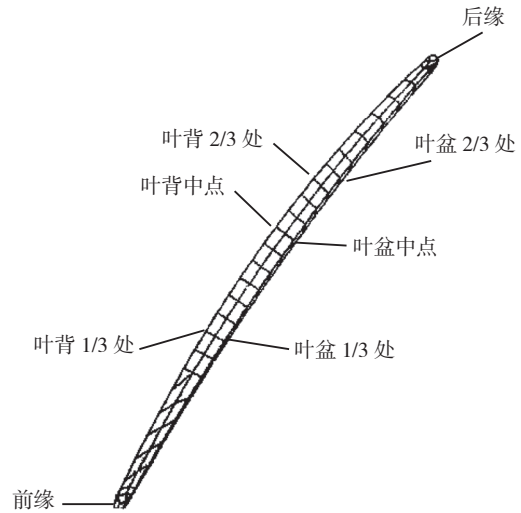


图4 叶尖的8个采样点位置
Fig.4 Eight sampling sites on blade tip

取为 $E=200\text{GPa}$ 。计算结果见表2,由此表可以明显看出在相同变形位移的假设下,叶片的前缘和后缘所需要的力明显小于其他部位。实际加工后的叶片检测结果也表明,在叶片的同一截面上,前缘和后缘附近的变形明显大于叶片中部的变形。

5 实际加工过程中切削参数确定方法

在实际加工过程中,切削参数的选择完全根据理论预估是很难做到的,主要原因是实际的切削状态和理论计算的模型通常有差异,加工过程中叶片和刀具都有变形且相互影响,而且叶片铣加工后的表面质量也是制约精加工时切削参数选择的因素,另外要兼顾加工效率的提高。

此零件叶片在精加工时切削参数的选择过程为:假设叶片加工时刀具端点位移和叶尖弹性变形最大处都不超过0.1mm,根据表1和表2初步确定刀具装卡时的刀具伸出长度和切削力,再根据选择的具体铣刀和铣刀的切削力经验公式反推出铣削深度 a_p ,每齿进给量 a_f ,铣削宽度 a_w 等参数。以理论计算的切削参数为基础进行真实材料试切试验,再根据加工后的表面质量和尽量提高效率的要求确定最终切削参数。正式零件的合格制造完成说明此方法完全能够满足对整体叶盘叶片加工变形控制的实际工程需要。

参考文献

- [1] 刘雄伟,郑延芳,郑海波. 数控加工理论与编程技术(第二版). 北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 白砾. 叶片类零件高质高效数控加工编程技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2004.

(责编 泰山)