

# 一类流线型曲面高效数控铣削加工方法研究及应用<sup>\*</sup>

李尧<sup>1</sup>, 刘强<sup>1</sup>, 杨森<sup>1</sup>, 熊佳俊<sup>1</sup>, 皮世威<sup>1</sup>, 徐义平<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中航工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司, 景德镇 333002)

**[摘要]** 针对一类典型流线型曲面——叶片的高效数控铣削加工方法研究,提出了基于加工系统动力学仿真分析的高效切削参数优化技术,该方法是提高切削加工效率,保证零件加工精度和表面质量的有效手段。首先,辨识得到加工零件材料的铣削力系数;其次,利用锤击试验分别得到机床-刀具系统及弱刚性零件结构的动态特性,同时利用有限元方法进行模态分析,并与试验结果进行对比分析,可辅助验证锤击试验结果的正确性,在此基础上仿真得到铣削颤振稳定域曲线,然后对建立了基于加工系统动态稳定性的高效数控铣削加工参数优化系统进行高效铣削参数优化;最后,依据优化的铣削参数制定零件铣削加工工艺,试验得到了加工质量合格的叶片,其加工效率较传统方法有显著的提高。

**关键词:** 流线型曲面; 动力学; 颤振; 参数优化; 铣削; 有限元方法

## Research and Application on High Efficient CNC Milling for a Type of Streamlined Curve

LI Yao<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>, YANG Sen<sup>1</sup>, XIONG Jiajun<sup>1</sup>, PI Shiwei<sup>1</sup>, XU Yiping<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. AVIC Changhe Aircraft Industry (Group) Co., Ltd., Jingdezhen 333002, China)

**[ABSTRACT]** Research on high efficient CNC machining for a type of classical streamlined curve, a method based on dynamic simulation of machining system and high efficient parameter optimization is presented to improve machining efficiency and ensure surface quality. Firstly, the material milling force coefficients are identified by e-cutting. Secondly, the dynamic characteristics of machine tool system and weak rigidity work-piece structure are obtained by hammer tests, and model analysis is carried out by finite element method simultaneously to ensure the validation of hammer tests, then the lobe of chatter stability is simulated based on hammer tests. Thirdly, a high efficient parameter optimization based on dynamic stability of machining system is established. Finally, on the basis of optimized milling parameters to design machining process, a qualified blade is machined by tests, and the processing efficiency is significantly improved compared with traditional method.

**Keywords:** Streamlined curve; Dynamics; Chatter; Parameter optimization; Milling; Finite element method

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2016.19.091

流线型曲面为通过任意一条曲线上各点所有流线型曲线的集合<sup>[1-2]</sup>。由于流线型曲面在动力学方面的优点和美学特点,被广泛应用于航空、航天、车辆和船舶等工业领域<sup>[3]</sup>。流线型曲面可构造各种复杂空间曲面以满足设计功能要求,但也为零件加工提出了更高要求。典型发动机叶片作为典型的流线型曲面,在燃气轮机、航空发动机等领域起重要的作用<sup>[4]</sup>。

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金重大项目(11290144); 基础科研计划资助项目(A2120110002)。

该类叶片的工作特点和工作环境决定了对尺寸、形状精度及表面完整性都有严格的要求,目前比较通用的加工方式为数控铣削。叶片曲面的复杂性主要体现在:(1)几何上空间形状扭转度较大;(2)结构上为薄壁结构,刚性较弱;(3)结构静/动力学性能差,加工时易出现颤振及加工变形现象。针对以上难题,国内外学者分别对该类零件的静/动力学性能、加工走刀轨迹及加工参数优化等方面进行了大量研究,并取得了一定的成果。文献[5]中系统研究了动态铣削力系数和工艺系统

柔度对加工稳定性的影响;文献[6]中提出了基于数控加工系统及零件结构动力学分析的颤振稳定预测,解决了部分加工颤振问题;文献[7]应用自适应加工技术,减少了叶盘加工中过切、少切现象的发生;文献[8]提出了一种基于动力学仿真的数控加工参数优化技术,适用于中低速加工;文献[9]实现了基于高速切削参数优化技术在航空复杂薄壁零件上的加工应用,取得了良好效果。

本文以航空叶片类零件为研究对象,对铣削加工过程中的切削力及颤振稳定域进行动力学仿真,通过有限元分析验证动力学仿真结果,并以颤振为约束条件进行高效数控加工参数优化,通过该类流线曲面的高效数控加工试验验证该方法适用性,零件加工流程如图1所示。

### 1 铣削加工系统动力学分析

航空叶片等薄壁类在加工过程中,颤振问题是影响加工精度和质量的重要因素,也是导致加工不稳定的重要原因。加工颤振源于切屑形成中的自激机理,刀具-工件系统某个模态最初被切削力所激励,在接近但不等

于加工系统主结构频率处产生颤振<sup>[10-11]</sup>。铣削加工系统动力学分析通过综合考虑刀具参数、零件材料及结构、切削用量和加工系统动态特性,仿真得到给定铣削径向宽度下的铣削颤振稳定域。

#### 1.1 叶片材料铣削力系数测试

材料铣削力系数测试是仿真铣削颤振稳定域的基础,选用6061铝合金加工流线型叶片,切削力系数测量系统包括Kistler9257B型三向测力仪、Kistler5070A型电荷放大器、计算机、Dynoware软件及相关配套硬件,结构如图2所示。

利用SandvicD12的2齿刀在3种切深下进行走刀,共得到9组不同切削用量下的切削力数据,如表1所示。将数据导入“E-cutting 切削力系数辨识”模块即可辨识出铝合金6061的铣削力系数,如表2所示。

#### 1.2 铣削加工系统模态参数辨识

分别对机床-刀具系统和叶片零件进行动态特性辨识试验,硬件主要包括力锤、加速度计及信号采集仪,软件为笔者所在实验室开发的E-cutting,其中机床-刀具系统针对刀尖处的X/Y两个方向测试,而叶片的测试需要对其表面多点测试以得到工件刚性最弱位置,辨识

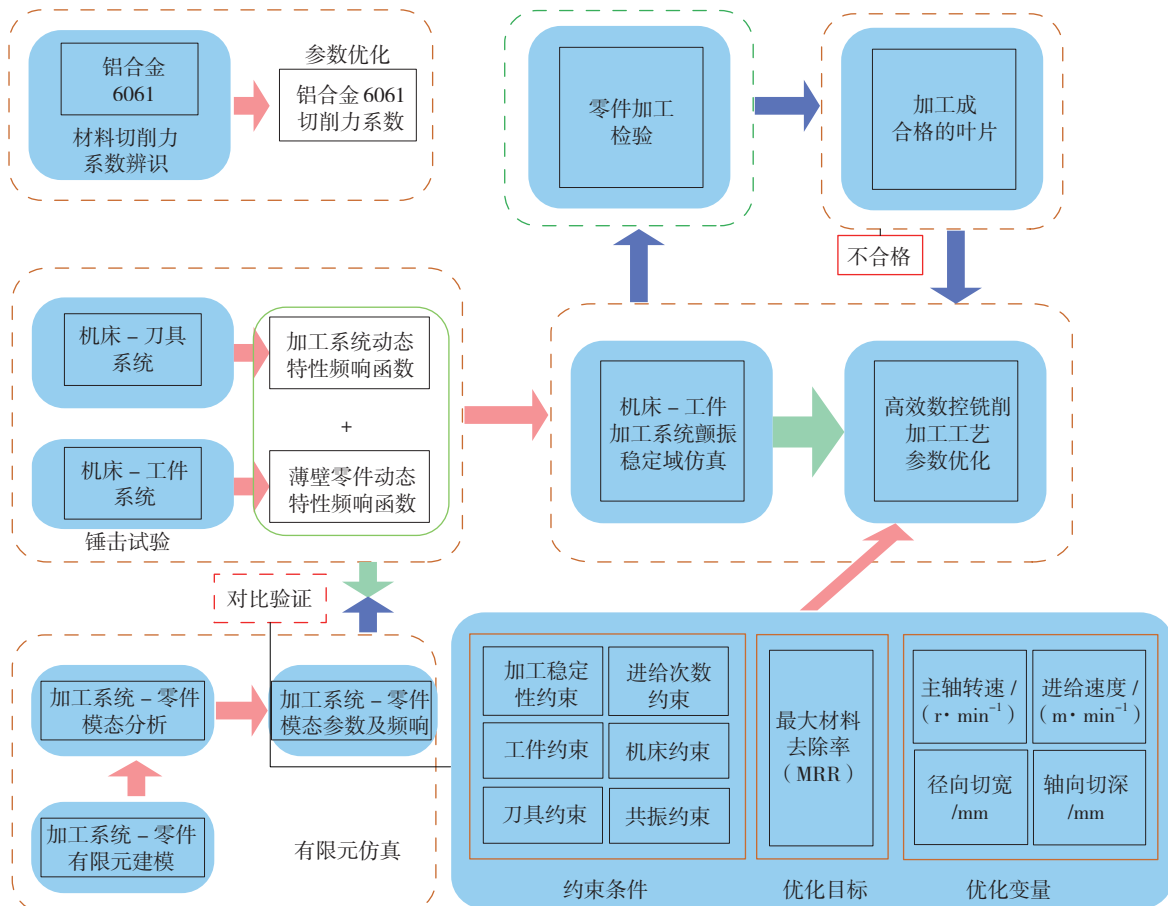


图1 流线型曲面高效数控铣削加工流程

Fig.1 High efficiency numerical control milling process of streamlined curve

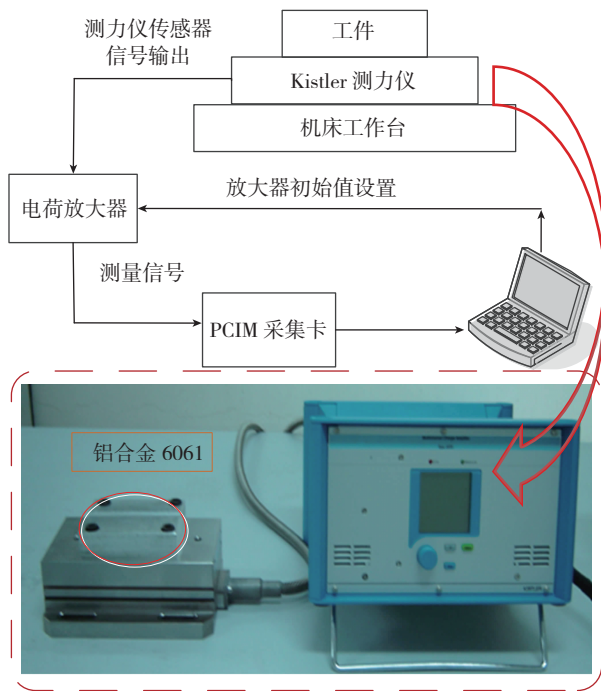


图2 切削力系数辨识试验系统  
Fig.2 Identification test system of cutting force coefficient

表1 切削力系数辨识切削参数表

主轴转速 / ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	切深 /mm	切宽 /mm
3000	1	12
3000	2	12
3000	3	12
3600	1	12
3600	2	12
3600	3	12
4200	1	12
4200	2	12
4200	3	12

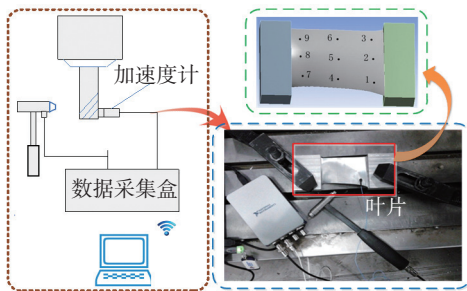


图3 辨识试验原理  
Fig.3 Identification test principle

试验原理图及工件测量点位置如图3所示。叶片加工选取的刀具与机床参数如表3~4所示。平头立铣刀和球头刀分别用在粗加工和半精加工、精加工工艺上。

### 1.2.1 机床-刀具系统模态辨识

分别对整体立铣刀和球头立铣刀在正常装夹状态下辨识机床-刀具系统的动态特性,并对两种刀具建立三维模型,利用有限元技术分析其模态,作为辨识结果的对比验证,保证辨识结果的正确性。两把刀具辨识结果及有限元分析结果如图4~5所示。

由图4~5分析可知,锤击试验辨识和有限元仿真得到的机床-刀具系统的模态参数相差不大,整体上有限元仿真结果要比试验辨识模态值偏大,这主要是因为实际的机床与刀具的连接处存在一定柔性,而有限元分析时对这两个部件的接触处理为刚性连接,导致仿真结果值偏大。据此可知试验测得的模态参数可靠,通过铣削颤振稳定域仿真系统。两把刀的稳定域中都不存在较大的稳定性叶瓣,应在稳定性叶瓣下方选取铣削深度值,φ14平头立铣刀在粗加工阶段的稳定铣削厚度为1.55mm以下,而球头立铣刀主要用于半精加工和精加工,当确保半精加工零件刚度时,稳定铣削深度最大可为1.2mm。

### 1.2.2 弱刚性零件模态辨识

由于叶片类零件扭转度较大,其中叶根处最大厚度为6mm,叶尖处为2mm,叶身高为92mm,属于薄壁曲面零件,刚性较差,加工中易发生变形,高速铣削经常发生颤振现象,尤其是在精加工阶段,此时的材料余量较少,零件刚性最差,因此需要对工件进行模态参数辨识,得到其精加工的颤振稳定域。模态辨识试验的流程与1.2.1节相同。由于三维模型中点4(图6所示红色标记处)为刚性最弱的部位,因此只要满足在该点处高速数控铣削加工中不发生颤振,就可以保证在其他部位也不会发生颤振现象,对机床-刀具-工件系统经测试及有限元分析得到的叶片模态参数和颤振稳定域如图6所示。由此可知,当进行精加工工艺阶段,球头铣刀的加工深度最大可为0.26mm。

## 2 高效铣削加工工艺参数优化

满足加工系统稳定性约束条件可保证叶片的加工质量,在此基础上进行铣削加工参数优化,能有效提高叶片类零件的加工效率,其中切削参数优化研究的关键是目标函数、优化变量、约束条件。高效铣削加工参数

表2 工件材料(铝合金6061)切削力系数

轴向切削力系数 $K_{te}/(N \cdot \text{mm}^{-2})$	径向切削力系数 $K_{tr}/(N \cdot \text{mm}^{-2})$	切向切削力系数 $K_{tc}/(N \cdot \text{mm}^{-2})$	轴向切削力系数 $K_{te}/(N \cdot \text{mm}^{-2})$	径向切削力系数 $K_{tr}/(N \cdot \text{mm}^{-2})$	切向切削力系数 $K_{tc}/(N \cdot \text{mm}^{-2})$
781.7	-245.3	-58.2	11.5	-9	-6

表3 加工刀具基本参数

刀具种类	尺寸
整体立铣刀	直径 14mm, 悬长 40mm
球头立铣刀	直径 12mm, 悬长 40mm

表4 加工机床基本参数

机床型号	主要参数
VMC0850B 数控铣床 主轴锥孔类型为 BT40	主轴转速为 50~6000r/min 主轴功率为 7.5kW

优化流程如图 7 所示。

### 2.1 铣削参数优化目标函数

优化设计的前提和关键是建立目标函数, 建立评价指标与设计变量之间的数学关系。高效铣削参数优化系统以最大材料去除率(MRR)为优化目标, 其数学表达式为:

$$MRR = n N a_p a_e f_i \quad (1)$$

式中:  $n$  为主轴转速,  $r \cdot \min^{-1}$ ;  $N$  为铣刀齿数;  $a_p$  为轴向切削深度, mm;  $a_e$  为径向切削切宽, mm;  $f_i$  为每齿进给量, mm。

### 2.2 优化变量设定

优化模型中, 优化目标由一组参数表达。在这些参数中, 有些是给定值, 有些需要在优化过程中确定, 称为设计变量。针对铣削过程优化而言, 切削用量主要包括主轴转速  $n$ 、进给速度  $V_f / (\text{mm} \cdot \min^{-1})$ 、轴向切深  $a_p$  和径向切宽  $a_e$ , 其中进给速度是转速、每齿进给量与齿数的乘积, 另在进行加工系统动力学稳定域仿真时需预先设定径向切宽  $a_e$ 。根据目标函数, 设置相互独立的 3 个优化变量为  $n$ 、 $f_i$ 、 $a_p$ 。

在由设计变量构成的正交系中, 以各设计变量变化区间所界定的空间称为探索空间, 或称为变量空间。在同一优化问题中, 同时参与优选的各设计变量数值在量级上可能相差悬殊, 如在寻优过程直接使用这些设计变量的真实值, 计算误差会严重影响数量级小的变量, 从而造成失真。为避免发生这种情况, 有必要将设计变量进行变换, 即将设计变量的真实值转换为变量区间的相对值, 使各个设计变量的变化范围均在 0~1 区间内, 这一过程被称为设计变量的标准化。

### 2.3 约束条件设置

在实际工作中, 约束条件分为等式约束和不等式约束两类。所有约束条件将设计空间分为满足约束条件和满足约束条件两部分, 优化设计将在满足约束条件的空间内进行。高效数控铣削加工参数优化的约束条件包括机床性

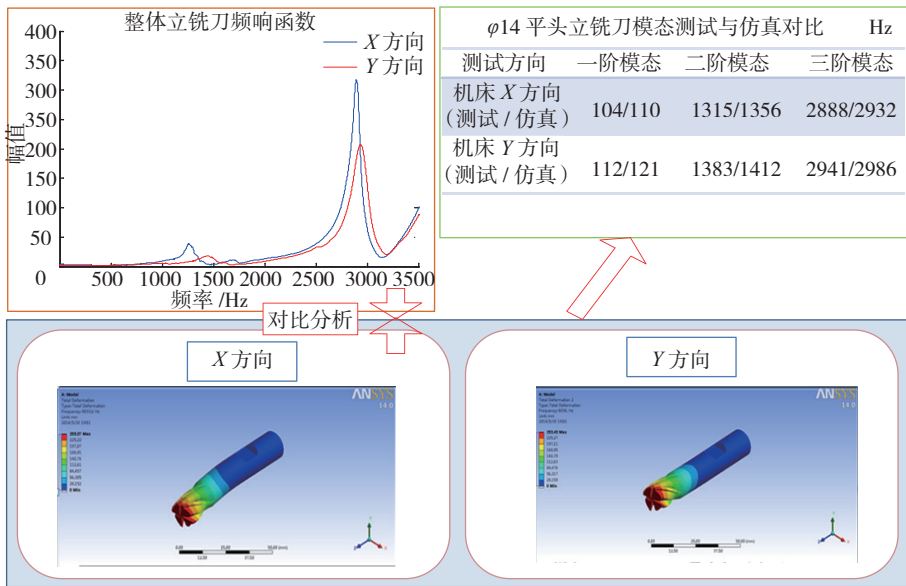


图4 φ14平头立铣刀模态测试与仿真对比结果

Fig.4 Modal test and simulation results of φ14 flat end milling cutter

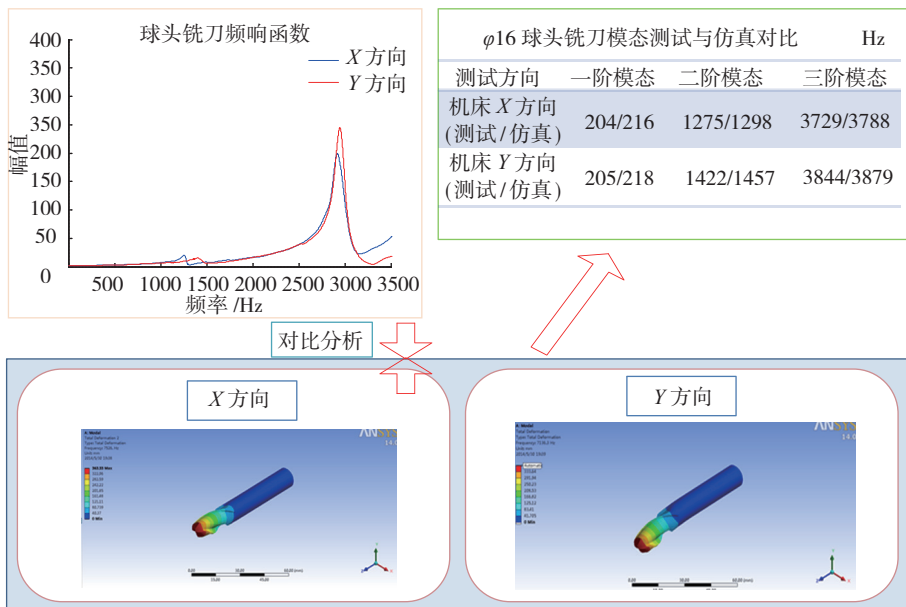


图5 φ16球头铣刀模态测试与仿真结果

Fig.5 Modal test and simulation results of φ16 ball end milling cutter

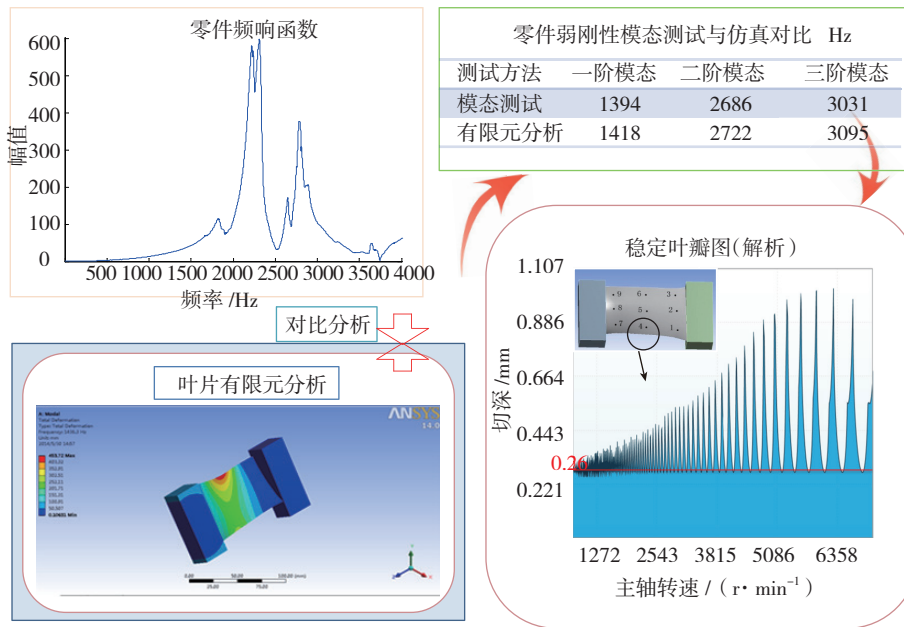


图6 叶片零件模态辨识及颤振稳定域  
Fig.6 Modal identification and flutter stability domain of blade parts

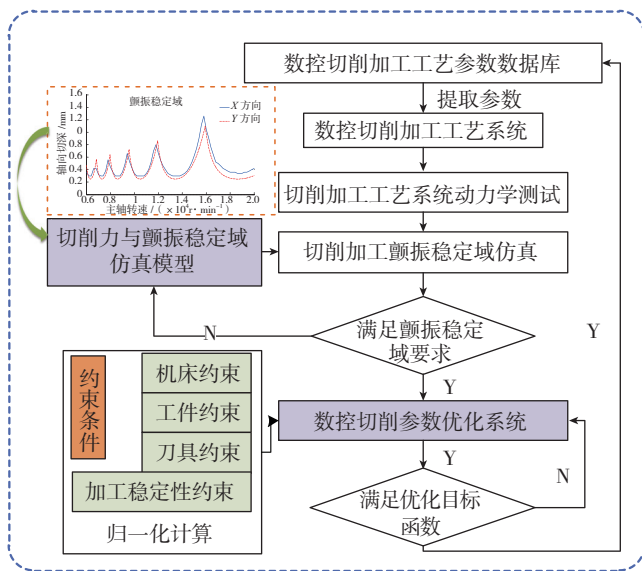


图7 高效铣削加工参数优化流程  
Fig.7 High efficiency milling parameter optimization process

能约束、工件约束、刀具约束、加工稳定性约束。

(1) 机床约束。铣削过程中, 铣削功率和扭矩不能超过机床设计的额定功率与额定扭矩, 加工所需的切削力不能超过许用值, 即

$$\begin{aligned}
 p_m &= F_c \times V_c = \frac{\pi}{60000} DnF_t \leq P_e \eta_s \\
 T_m &= \frac{DF_c}{2000} \leq T_e \\
 F_c &\leq F_{max}
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

式中:  $P_e$  为机床主轴额定功率;  $T_e$  为主轴额定转矩;  $\eta_s$  为机床效率。

(2) 工件约束。零件表面粗糙度决定加工质量, 根

据经验公式, 铣削表面粗糙度约束条件表示为:

$$f_i \leq \sqrt{4DR_{amax}/318} \quad (3)$$

式中:  $f_i$  为每齿进给量;  $R_{amax}$  为最大许用粗糙度。

(3) 刀具约束。铣削加工参数的选择直接影响刀具寿命, 为保证较高的利润, 刀具寿命应满足下式:

$$T = c_f / (v_c^m f_s^r a_p^k) \geq T_{min} \quad (4)$$

式中:  $T_{min}$  为最小刀具寿命,  $h$ ,  $c_f$ ,  $m$ ,  $r$ ,  $k$  分别是常量,  $v_c$  表示切线速度、 $f_s$  为每齿进给量、 $a_p$  表示切削厚度。

(4) 加工稳定性约束。在高速铣削中, 铣削参数选择不合理易引起颤振, 影响加工质量甚至

损坏机床和刀具, 辨识机床-刀具-工件工艺系统的动力学特性, 得到仿真颤振稳定域。

$$a_{lim} = -\frac{2\pi\Lambda_R}{NK_c}(1+r^2) \quad (5)$$

$$r = \frac{\sin w_c}{1 - \cos w_c}, \quad n = \frac{60w_c}{N(\varepsilon + 2k\pi)}$$

式中,  $n$  为主轴转速,  $a_{lim}$  为临界切削厚度,  $w_c$  为颤振发生频率,  $N$  表示刀齿数,  $\Lambda$  为螺旋角,  $R$  为半径。

### 3 叶片零件高效铣削加工参数优化及试验

#### 3.1 叶片零件高效铣削参数优化策略

(1) 选取径向切宽  $a_e$ 。根据零件加工工艺确定径向切宽, 粗加工时  $a_e$  取铣刀直径的 50%~90%, 精加工时  $a_e$  取粗加工余量。

(2) 选取主轴转速  $n$ 。据颤振稳定性仿真结果确定转速  $n$ , 尽量在较大的稳定性叶瓣中选取转速高、轴向切深大的点。颤振稳定性叶瓣图中不存在较大的稳定性叶瓣, 则应在稳定性叶瓣下方选取。

(3) 初定轴向切削深度  $a_p$ 。确定  $n$  后, 据颤振稳定性叶瓣图来选择  $a_p$ , 考虑到颤振稳定性仿真结果的相对准确性, 选取的  $a_p$  不应太靠近稳定域边界。

(4) 选取加工层数  $N_p$ 。据总切削深度和初定的  $a_p$  计算  $N_p$ 。分层时, 在不增加切削层数的前提下, 应保证每层的铣削用量均匀。

(5) 进给速度  $V_f$  确定。根据已确定的切削参数 ( $a_e$ 、 $n$ 、 $a_p$ 、 $N_p$ ) 并结合动力学仿真结果确定  $V_f$ 。

#### 3.2 叶片零件高效铣削参数优化结果

加工对象为铝合金6061,毛坯尺寸:184.4mm×80mm×28.2mm。

(1)粗加工阶段铣削参数优化。粗加工阶段采用整体硬质合金立铣刀加工铝合金材料,铣削参数优化以最大材料去除率为目标。在叶片加工中,材料去除深度最小处为3mm,最大深度为24mm。结合机床-刀具系统的颤振稳定叶瓣图,轴向切深设定为1.5mm,分16层加工,优化结果对比见表5。

(2)半精加工阶段铣削参数优化。半精加工阶段主要是为了保证精加工余量,使材料去除率保持均匀,将叶片在粗加工中R刀形成的阶梯型余量去除。为了提高半精加工效率,并减小材料残余对精加工误差的影响,可将半精加工的径向切宽设定为 $a_r=2\text{mm}$ ,结合机床-刀具系统的颤振稳定叶瓣图,优化结果对比见表6。

(3)精加工阶段铣削参数优化。精加工阶段考虑的是零件加工表面质量,保证表面质量下尽量提升材料去除率,优化结果对比见表7。

将弱刚性叶片零件的加工工艺分为粗、半精、精加工3个阶段,分别根据不同加工阶段的特点设定约束条件,在铣削加工系统动力学分析基础上,保障满足铣削加工稳定及表面质量,应用高效铣削加工参数优化技术有效提高加工效率,即材料去除率有较大幅度提升。

### 3.3 叶片零件铣削加工试验

应用3.2节中得到的优化参数进行叶片的高效铣削加工试验,加工所用机床为VMCC0850B,零件加工过

程如图8所示。

通过使用优化后的铣削参数对毛坯件进行从粗加工、半精加工到精加工的工艺过程,最终可得符合要求的流线型叶片零件。采用优化后的切削参数进行叶片的加工验证。实际加工结果表明,切削参数优化的效果明显,在保证加工质量的前提下,大大提高了材料去除率,缩短了加工时间。叶片的加工过程没有出现颤振现象,最终验证了基于铣削加工动力学仿真和高效切削参数优化方法针对流线型曲面型叶片零件铣削加工的有效性及其可行性。

## 4 结论

(1)针对一类流线型曲面型叶片零件的铣削加工过程,建立了基于加工系统动力学及高效切削参数优化的方法,可在保证复杂曲面零件加工质量及精度的同时提高铣削效率。

(2)针对该类叶片零件弱刚性特点,对零件结构选取了9个点进行动力学测试试验,并结合有限元仿真技

表5 叶片粗加工铣削参数优化前后对比

优化前后	主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $V_f/(mm \cdot \text{min}^{-1})$	径向切宽 $a_r/mm$	轴向切深 $a_d/mm$	材料去除率 MRR / $(\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
优化前	3000	840	8.4	1	7.056
优化后	4750	1100	10.1	1.5	16.665
效率提高	1.583	1.310	1.202	1.5	2.362

表6 叶片半精加工铣削参数优化前后对比

优化前后	主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $V_f/(mm \cdot \text{min}^{-1})$	径向切宽 $a_r/mm$	轴向切深 $a_d/mm$	材料去除率 MRR / $(\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
优化前	4500	500	1	0.7	0.35
优化后	4750	600	2	0.5	0.6
效率提高	1.056	1.2	2	0.5	1.714

表7 叶片精加工铣削参数优化前后对比

优化前后	主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $V_f/(mm \cdot \text{min}^{-1})$	径向切宽 $a_r/mm$	轴向切深 $a_d/mm$	材料去除率 MRR / $(\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$
优化前	4725	450	0.2	0.15	0.0135
优化后	4750	550	0.3	0.2	0.033
效率提高	1.005	1.222	1.5	1.333	2.444

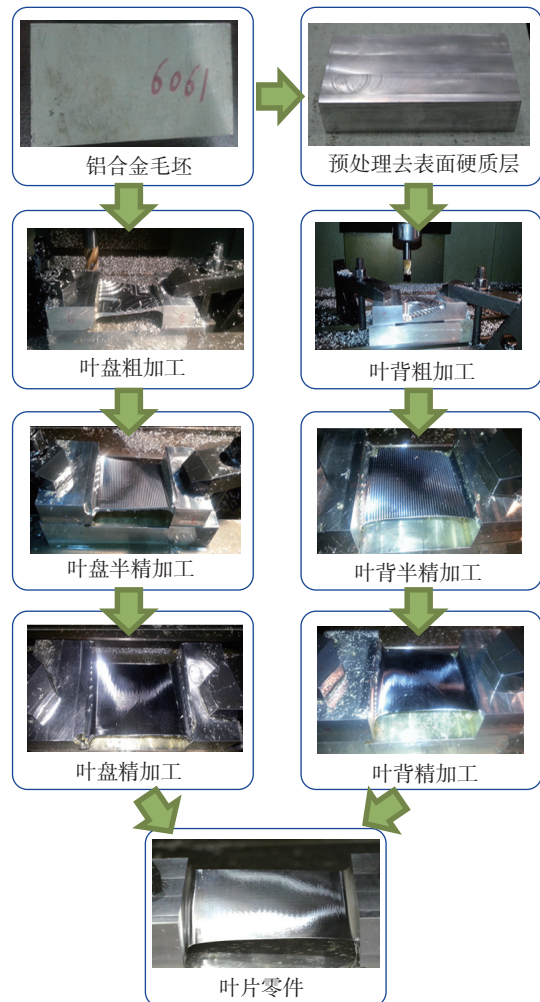


图8 叶片零件的加工过程

Fig.8 Blade part machining process

术,仿真得到零件结构刚性最弱部位的颤振稳定域,以此作为零件精加工工艺参数选择的依据。

(3) 根据叶片零件的结构特点,设计了从粗加工、半精加工到精加工过程不同铣削参数组合的工艺路线,并通过试验加工得到合格的叶片零件,且加工效率较未优化时有明显提高。

### 参考文献

- [1] 杨叔子, 吴波. 先进制造技术及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2003,39(10): 74-78.
- YANG Shuzi, WU Bo. Trend in the development of advanced manufacturing technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003,39(10): 74-78.
- [2] 李秀娟. 流线型曲线曲面构造关键技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- LI Xiujian. Research on key technology of streamline curve and surface constructing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [3] 周志熊, 周秦源, 任莹晖. 复杂曲面加工技术的研究现状及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2010,46(17): 105-112.
- ZHOU Zhixiong, ZHOU Qinyuan, REN Yinghui. Research status and development trend of complex surface machining technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010,46(17): 105-112.
- [4] 李海宁, 史耀耀. 航空发动机风扇/压气机叶片制造关键技术[J]. 航空制造技术, 2013(16): 34-37.
- LI Haining, SHI Yaoyao. Key technology of NC machining for aeroengine fan/compressor blade[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(16): 34-37.
- [5] EI BARADIE M A. Statistical analysis of the dynamic cutting coefficient and machine tool stability[J]. Journal of Engineering for Industry, 1995,115(2):205-215.
- [6] ALTINTAS Y, WECK M. Chatter stability of metal cutting and grinding[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2004, 53(2):619-642.
- [7] 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(13):51-55.
- ZHANG Dinghua, ZHANG Ying, WU Baohai, et al. Application of adaptive machining technology in blisk manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(13):51-55.
- [8] 李峥, 刘强. 中低速数控铣削参数优化技术研究及应用[J]. 航空制造技术, 2011(5):64-68,73.
- LI Zheng, LIU Qiang. Research and application of NC milling parameter optimization in medium cutting speed case[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(5):64-68,73.
- [9] 夏斌, 苏卫华, 黄官平. 高速切削参数优化加工技术的应用[J]. 航空制造技术, 2011(23): 68-71.
- XIA Bin, SU Weihua, HUANG Guanping. Application of high speed cutting parameter optimization process technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2011(23): 68-71.
- [10] ALTINTAS Y, STEPAN G, MERDOL D, et al. Chatter stability

of milling in frequency and discrete time domain[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008,1:35-44.

[11] ALTINTAS Y, BRECHER C, WECK M. Virtual machine tool[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2005,54(2):115-138.

(责编 古京)

(上接第90页)

中的应用[J]. 锻压技术, 2005,30(1): 79-81.

LI Zhiqiang, GUO Heping. Application of superplastic forming and diffusion bonding technology in aerospace industry[J]. Forging and Stamping Technology, 2005,30(1): 79-81.

[2] 王哲. 钛合金超塑成形/扩散连接技术在飞机结构上的应用[J]. 钛工业进展, 1999(3): 23-25.

WANG Zhe. Application of superplastic forming and diffusion bonding technology of titanium alloy in aircraft structure[J]. Titanium Industry Progress, 1999(3): 23-25.

[3] 李志强, 郭和平. 超塑成形/扩散焊接技术的应用进展与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2010(8):32-35.

LI Zhiqiang, GUO Heping. Application progress and development trend of superplastic forming and diffusion bonding technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(8):32-35.

[4] BOTOMLEY I E. Superplastic forming and diffusion bonding of aircraft structures[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G:Journal of Aerospace Engineering, 1995,209(3):227-231.

[5] PRICE H J. Superplastic forming and diffusion bonding process: US7134176 B2[P]. 2002.

[6] 陈火红. 新编 Marc 有限元实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

CHEN Huohong. New Marc finite element example tutorial[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.

[7] 林兆荣. 金属超塑性成形原理及应用[M]. 北京: 航空工业出版社, 1990.

LIN Zhaorong. Principles and applications of metal superplastic forming[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1990.

[8] 钱九红. 航空航天用新型钛合金的研究发展及应用[J]. 稀有金属, 2000,24(3):218-223.

Qian Jiuhong. Application and development of new titanium alloys for aerospace[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2000,24(3):218-223.

[9] SANDERS D G, RAMULU M. Examination of superplastic forming combined with diffusion bonding for titanium: Perspective from experience[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2004, 13(6): 744-752.

[10] 韩文波, 张凯锋, 王国峰. Ti-6Al-4V 合金多层板结构的超塑成形/扩散连接工艺研究[J]. 航空材料学报, 2005,25(6):29-32.

HAN Wenbo, ZHANG Kaifeng, WANG Guofeng. Study on superplastic forming and diffusion bonding process of Ti-6Al-4V alloy with multi plate structure[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005,25(6):29-32.

[11] JONG H Y, LEE H S, YEONG M T. Finite element analysis on superplastic blow forming of Ti-6Al-4V multi-sheets[J]. Materials Science Forum, 2007, 546-549:1361-1366.

(责编 古京)