

基于动力学仿真技术的TC4 整体叶轮 铣削参数优化*

Optimization of Milling Parameters for TC4 Integrated Impeller Based on Dynamic Simulation Technology

湖南工业大学冶金校区 李忠群
北京航空航天大学机械工程及自动化学院 刘强

[摘要] 针对某航空发动机 TC4 整体叶轮在数控加工过程中存在颤振、加工效率低及因加工变形而导致局部超差等问题,提出了相应的铣削参数优化解决方案。在进行切削力系数辨识试验获取 TC4 材料的切削力系数及锤击试验获取加工系统动力学特性参数的基础上,通过综合使用自行开发的铣削加工动力学仿真软件 SimuCut 和国外的 CutPro 软件进行动力学仿真与优化,获得了优化的切削参数。使用优化的切削参数进行加工,有效地消除了颤振和因加工变形引起的局部超差,提高了加工效率。

关键词: 动力学仿真 颤振稳定性 切削参数优化 整体叶轮加工

[ABSTRACT] Optimization of milling parameters is applied to solve the problems of chatter, low machining efficiency and local machining out-of-tolerance due to machining deformation in the fabrication of TC4 integrated impeller of an aeroengine. Based on the cutting force coefficients of TC4 material gained by cutting force coefficient identification tests and the dynamic parameters of the machining system gotten by hammer tests, the optimized cutting parameters are obtained by using the self-developed dynamic simulation software SimuCut for milling and the oversea counterpart CutPro synthetically. The optimized cutting parameters are used in practical milling process, and the machining deformation resulted from the machining chatter and the local out-of-tolerance are eliminated and the machining efficiency is improved.

Keywords: Dynamic simulation Chatter stability Cutting parameter optimization Machining of integrated impeller

由于具有结构紧凑、体积小、重量轻、比强度大等诸多优点,钛合金整体叶轮被广泛应用在航空发动机上,其加工质量直接影响航空发动机的性能和使用寿命。目前,钛合金整体叶轮通常由五轴联动数控机床铣削而成。在铣削整体叶轮时,一方面,由于叶片很薄(叶尖和前后缘处厚度甚至还不到 0.2mm),在切削力作用下极易产生颤振,并因“让刀”而引起局部超差;另一方面,细长而严重扭曲的叶片结构使得只能用小直径、大悬伸量的刀具来加工,导致加工系统的刚性差。常规的 CAD/CAM 软件只能提供纯几何干涉检查功能,无法对切削加工过程中诸如切削力、功率、转矩以及加工稳定性等对于保证加工质量和效率至关重要的物理量和现象进行预测。本文提出了一种基于铣削加工动力学仿真,通过切削参数优化来保证零件加工质量、提高加工效率的方法。该方法以瞬时刚性力模型和再生颤振理论为基础,用试验方法获得工件材料的切削力系数和加工系统的动力学特性参数,对颤振稳定域和铣削加工中的各物理量进行仿真,以加工效率为目标函数,以切削力、主轴功率、扭矩、切削速度、切削区温度、颤振稳定域等为约束条件来确定优化的切削参数,实现无颤振和高效加工。

1 切削参数优化模型

1.1 目标函数

合适的切削参数对于高效、高质量加工,延长刀具寿命来说是至关重要的。铣削时需确定齿数 N 、径向切深 a_e 、轴向切深 a_p 、主轴转速 n 和每齿进给量 f_z 等参数(见图 1)。铝合金加工时由于刀具磨损小,可直接将材料去除率(MRR)作为优化的目标函数;钛合金、高温合金等难加工材料加工时,由于存在严重刀具磨损现象,故必须兼顾刀具的使用寿命。可将 MRR 作为唯一的目标函数,而把刀具使用寿命作为一个约束条件处理。MRR 定义如下:

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

* 国家科技支撑计划资助项目(2006BA103A6)和湖南省教育厅科学研究项目(08D096)资助。

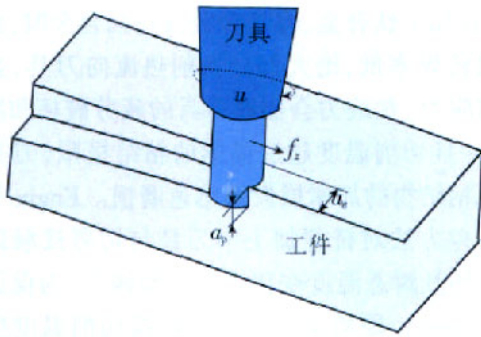


图1 切削参数优化模型中的设计变量
Fig.1 Design variables in the cutting parameter optimization model

1.2 约束条件

约束条件可表示为如下标准形式:

$$\left. \begin{aligned} q_{lb} \leq q \leq q_{ub} \\ f_{nc}(a_p, a_c, n, N) \leq 0 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

式中, q 为设计变量, 其上限和下限分别为 q_{lb} 和 q_{ub} , f_{nc} 为以设计变量表示的非线性约束条件。铣削加工中的约束条件可分为以下 2 类: 与机床特性有关, 如机床扭矩/功率曲线、主轴最高/最低转速、最大进给速度等; 与加工特性有关, 包括由刀具静态变形引起的形状误差、最大/最小切屑载荷、最大切削线速度和刀具寿命等。约束条件有线性和非线性之分, 线性约束条件直接由上、下限控制, 如最大/最小主轴转速和每齿进给量限制等, 表示为: $n_{min} \leq n \leq n_{max}$ 和 $f_{z, min} \leq f_z \leq f_{z, max}$; 表面形状误差、扭矩/功率要求、加工系统稳定性等则为非线性约束条件。

1.2.1 加工稳定性约束

由于加工系统刚性弱, 加工时极易发生颤振, 故加工稳定性是必须考虑的约束条件。铣削运动方程可描述为如下二阶延迟微分方程:

$$\{F\} = (a_p / 2) K_{tc} (1 - e^{-Ts}) [A(t)] [G(s)] \{F\}, \quad (3)$$

式中, $\{F\}$ 为切削力, T 为与主轴转速有关的刀齿切削周期, s 为 Laplace 算子, $[G(s)]$ 为传函矩阵, $[A(t)]$ 为方向系数矩阵, K_{tc} 为切向切削力系数。在 Budak 和 Altintas^[4]提出的分析模型中, 通过用 Fourier 级数的平均值来代替时变方向系数, 加工系统的稳定性可简化为如下标准特征值问题:

$$\det [I + \Lambda [A_0] [G(i\omega)]] = 0, \quad (4)$$

式中, $[I]$ 为单位矩阵, 设参数 K_{rc} 为径向切削力系数, $[A_0]$ 和 Λ 由轴向切深 a_p 、径向切深 a_c 和主轴转速 n 等 3 个设计变量确定:

$$\left. \begin{aligned} [A_0] &= [A_0(a_c, N, K_{tc}, K_{rc})] \\ \Lambda &= \Lambda(a_p, n, K_{rc}) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

加工系统稳定性与主轴转速 n 、径向切深 a_c 和轴向切深 a_p 之间关系可用一张曲面来表示。

1.2.2 切削力约束

根据线性-刃口力模型(linear-edge force model)^[5], 作用在刀齿 j 上 z 高度处厚度为 dz 的切削刃微元上的切向力 dF_t 、径向力 dF_r 和轴向力 dF_a 可表示为

$$\left. \begin{aligned} dF_{t,j}(\phi, z) &= [K_{tc} h_j(\phi, z) + K_{te}] dz \\ dF_{r,j}(\phi, z) &= [K_{rc} h_j(\phi, z) + K_{re}] dz \\ dF_{a,j}(\phi, z) &= [K_{ac} h_j(\phi, z) + K_{ae}] dz \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

式中, K_{ac} 为轴向切削力系数, h 为切削厚度, K_{te} 、 K_{re} 、 K_{ae} 分别为切向、径向和轴向刃口力系数, ϕ 为径向接触角, 考虑到螺旋切削刃的滞后作用, 接触角沿轴向变化可表示为: $\phi_j = \phi + (j-1)\phi_p + 2z \tan\beta/D$, ϕ 为第一个刀齿的角位移, ϕ_p 为齿间角, $\phi_p = 2\pi/N$, β 为螺旋角。通过坐标变换可将式(6)中的切向、径向和轴向力变换到进给(X)方向、垂直于进给(Y)方向和轴向(Z)方向上, 沿轴向积分并对每个刀齿求和可得到三向切削力瞬时值。对于圆柱螺旋铣刀, 当忽略刃口力影响时, 其三向切削力可表示为^[3]

$$\left. \begin{aligned} F_x(\phi) &= \sum_{j=1}^N \frac{f_z R}{4 \tan\beta} [-K_{tc} \cos 2\phi_j(z) + K_{rc} (2\phi_j(z) - \sin 2\phi_j(z))]_{z_{jl}(\phi)}^{z_{ju}(\phi)} \\ F_y(\phi) &= \sum_{j=1}^N \frac{f_z R}{4 \tan\beta} [-K_{tc} (2\phi_j(z) - \sin 2\phi_j(z)) + K_{rc} \cos 2\phi_j(z)]_{z_{jl}(\phi)}^{z_{ju}(\phi)} \\ F_z(\phi) &= \sum_{j=1}^N \frac{K_{ac} f_z R}{\tan\beta} [\cos 2\phi_j(z)]_{z_{jl}(\phi)}^{z_{ju}(\phi)} \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

其中, $z_{ju}(\phi)$ 为 Z 向积分上限, $z_{jl}(\phi)$ 为 Z 向积分下限。随铣刀旋转, 切屑厚度的正弦变化引起切削力在最大值和最小值之间振荡。切削力峰值为重要的约束条件, 而又很难用分析的方法获取, 只能采用数值方法。

为提高加工系统刚度, 常使用锥形铣刀来加工整体叶轮。由于锥形铣刀属通用螺旋铣刀范畴, 故可借用通用螺旋铣刀的切削力模型来求解其三向切削力^[4]。

1.2.3 转矩和功率约束

任何时候, 切削功率和转矩都不能超越机床本身的能力。切削功率 $P_c(\phi)$ 和转矩 $T_c(\phi)$ 主要由切削力决定, 当铣刀刃部直径为 D 时, 它们可表示为:

$$\left. \begin{aligned} P_c(\phi) &= F_t(\phi) \left(\frac{D\pi n}{60} \right) \\ T_c(\phi) &= F_t(\phi) (D/2) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

1.2.4 切削厚度约束

考虑到切削厚度与径向接触角之间的正弦关系 $h(\phi) = f_z \sin(\phi)$, 当径向切深小于刀具半径时, 最大切削厚度无法达到指令规定的每齿进给量值。过小的切削厚度会使切削刃在工件表面刮擦而非切削。因此, 需要根据径向切深来对每齿进给量进行修正, 从而使 $h(\phi)$ 达到用户自定义的最大每齿进给量 h_{\max} 。

$$f_z = \begin{cases} \frac{h_{\max}}{2\sqrt{b(1-b)}} & b \leq 0.5 \\ h_{\max} & b > 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

1.2.5 表面粗糙度约束

以铣削加工表面形貌仿真为基础, 不同铣削方式的表面粗糙度的计算方法不同, 就圆柱立铣刀周铣而言, 表面粗糙度约束条件为:

$$R_a = 318 \frac{f_z^2}{4D} \leq R_{\max} \quad (10)$$

1.2.6 切削温度约束

切削区温度对刀具磨损有严重影响, 且制约加工

效率。在加工钛合金、镍基合金及高强合金时, 由于材料的热传导率低, 绝大部分切削热流向刀具, 造成严重的热应力。热应力会加速刀具的疲劳破坏和磨损过程, 而一旦切削温度超过晶体的粘结极限, 刀具会因晶体间粘结物的加速损失而迅速磨损。Engin 等人使用有限差方法对铣削加工中刀具与切屑接触区的稳态温度场及瞬态温度变化进行了预测^[5]。为保证刀具的使用寿命, 硬质合金刀具的最高切削温度应低于 900℃, CBN 刀具的最高切削温度应低于 1 200℃。

2 切削参数优化

TC4 整体叶轮的数控编程由专门的叶轮数控加工软件包 MAX-5 实现, 并在 HERMLE C800U 五轴加工中心加工, 该机床的主要技术指标为: 最高转速 10 000r/min, 机床总功率 43kW。粗、精加工由同一型号直径为 $\phi 6\text{mm}$ 、单边锥度为 2° 、3 齿硬质合金锥形球头铣刀完成, 铣刀的安装悬伸量为 30mm。工厂原用切削参数见表 1。精加工时叶尖部位存在由加工变形引

表 1 TC4 整体叶轮铣削加工优化前、后切削参数、切削效率及加工效果对比

加工阶段		主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $F/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	径向切深 a_r/mm	轴向切深 a_f/mm	材料去除率/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	加工效果
粗铣	优化前	1 200	500	1	1.5	0.75	无颤振
	优化后	3 600	1 080	1	1.5	1.62	无颤振
精铣	优化前	1 500	500	0.5	0.3	0.075	因局部加工变形而超差
	优化后	4 600	690	0.5	0.3	0.104	无超差, 表面质量明显提高

起的超差。

2.1 切削力系数获取

切削力系数辨识试验所用切削参数见表 2, 由 SimuCut 软件辨识出该材料的切削系数为^[6]: $K_{tc} = 1\ 869.8\text{N/mm}^2$, $K_{rc} = 915.4\text{N/mm}^2$, $K_{ac} = 780.6\text{N/mm}^2$, $K_{fc} = 41.0\text{N/mm}$, $K_{rv} = 77.5\text{N/mm}$, $K_{av} = 58.9\text{N/mm}$ 。

表 2 TC4 切削力系数辨识实验用切削参数

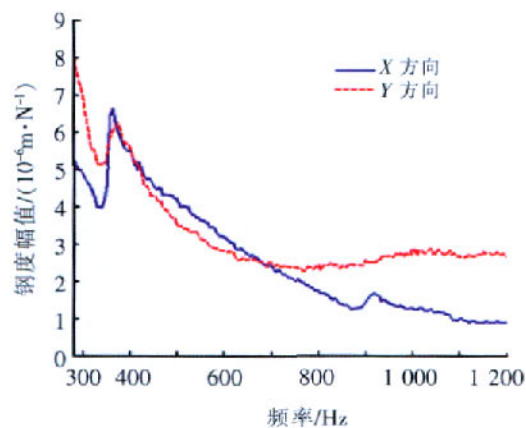
主轴转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	每齿进给量 f_z/mm	径向切深 a_r/mm	轴向切深 a_f/mm
600	0.04	16	1
600	0.06	16	1
600	0.08	16	1
600	0.1	16	1

2.2 加工系统动力学特性参数获取

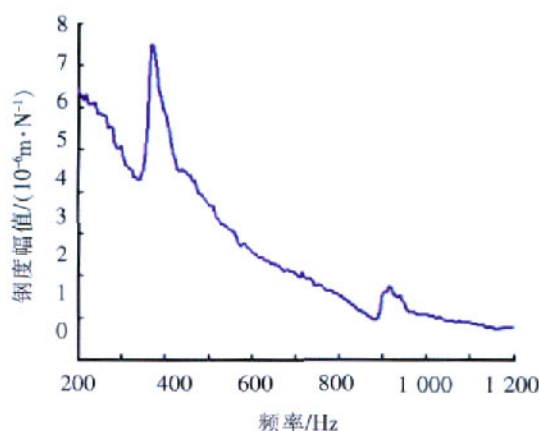
由于粗加工时工件系统刚性明显高于刀具系统刚性, 故只考虑刀具系统刚性; 而精加工时工件系统刚性与刀具系统刚性处在同一量级, 所以必须同时考虑。获取加工系统动力学特性参数的方法是: 按正常工作状态将刀具和工件装夹在机床上, 分别在刀尖处的进给(X)方向和垂直于进给(Y)方向及粗加工后叶轮的叶尖处刚性最薄弱方向上进行锤击试验, 由 DynaCut^[7]获取的刀具系统与工件系统频响函数见图 2。由正交多项式模态参数整体估计方法辨识出的加工系统动力学特性参数见表 3。

2.3 优化切削参数获取

粗加工采用逆铣以提高加工系统稳定性, 精加工采用顺铣以获得较好的表面加工质量。当粗加工径向切深为 1mm、精加工径向切深为 0.5mm 时, 由 SimuCut 软件仿真得到的粗加工(切宽 $a_e = 1\text{mm}$, 逆铣, 弱刚



(a) 机床刀具系统



(b) 机床工件系统

图2 加工系统的频响函数

Fig.2 FRFs of machining system

表3 加工系统动力学特性参数

对象	方向	阶数	固有频率 ω/Hz	阻尼比 ξ	刚度 $K/(10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
机床/刀具系统 (粗/精加工)	X	1	357.8	0.027	8.9
		2	893.0	0.033	180
机床/工件系统 (精加工)	Y	1	367.0	0.069	4.3
		2	899.0	0.013	70

性刀具,刚性工件)、精加工(切宽 $a_e=0.5\text{mm}$, 顺铣, 弱刚性刀具, 刚性工件)颤振稳定域如图3所示。

2.3.1 粗加工切削参数确定

粗加工切削参数优化主要应满足切削力、切削功率、转矩、切削线速度、切削温度和加工稳定性等约束条件。其中:切削功率和转矩的许可范围由机床确定, 铣刀的最大切削线速度由刀具制造商提供(由加工钛

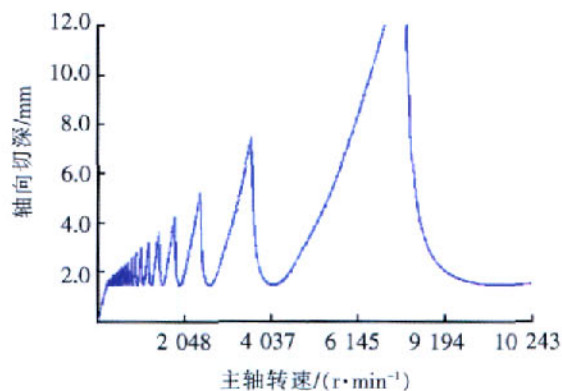
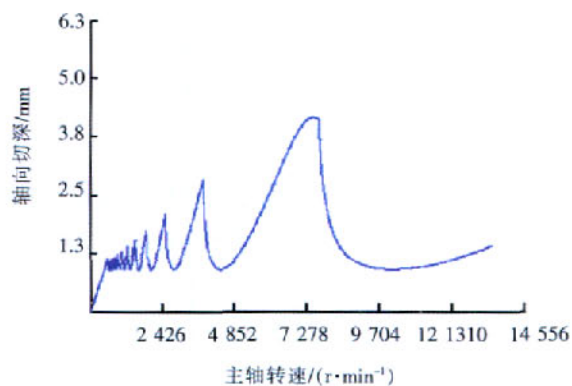
(a) 粗加工(切宽 $a_e=1\text{mm}$, 逆铣, 弱刚性刀具, 刚性工件)(b) 精加工(切宽 $a_e=0.5\text{mm}$, 顺铣, 弱刚性刀具, 刚性工件)

图3 加工系统颤振稳定域仿真结果

Fig.3 Simulation results of chatter stability lobes of machining system

合金的切削速度不超过 $100\text{m}/\text{min}$ 得出最大允许主轴转速应低于 $5\ 300\text{r}/\text{min}$, 最大切削温度不超过 900°C , 颤振稳定性约束条件由仿真获得, 而切削力的有效范围很难确定。以下是一种可行的解决思路: 由于使用原参数加工未出现刀具和工件损坏问题, 说明此时切削力在有效值范围内, 只要优化后的切削参数对应的最大切削力不超过优化前的值, 就满足切削力约束条件。具体方法: (1) 根据颤振稳定性叶瓣图, 选择较大稳定叶瓣所对应的主轴转速 n 和轴向切深 a_p , 转速 n 应同时满足切削线速度约束条件; (2) 调整 f_z , 使优化后的最大切削力低于优化前值; (3) 使用优化后切削参数进行温度仿真, 若仿真出的切削温度高于许可值, 降低 f_z 直至满足温度要求。

按上述方法得出粗加工切削参数为: $n=3\ 600\text{r}/\text{min}$, $a_e=1.0\text{mm}$, $a_p=1.5\text{mm}$, $V_f=1\ 080\text{mm}/\text{min}$ 。温度仿真在 CutPro 软件上进行, 优化前后温度仿真结果对比见图4。图4显示: 优化后的切削线速度显著增大使得铣削温度

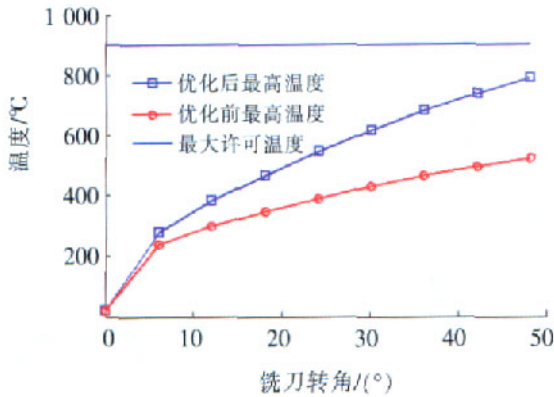
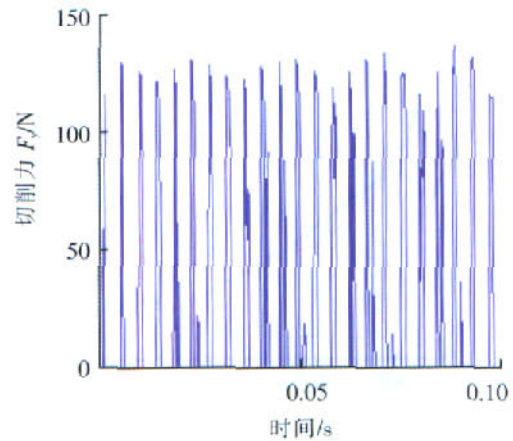


图4 优化前后切削区最高温度仿真结果对比
Fig.4 Comparison of simulation results of maximum temperature in cutting zone before and after optimization



(b)优化后

图5 优化前、后 Y 向切削力仿真结果对比
Fig.5 Comparison of simulation results of cutting force F_y in Y direction before and after optimization

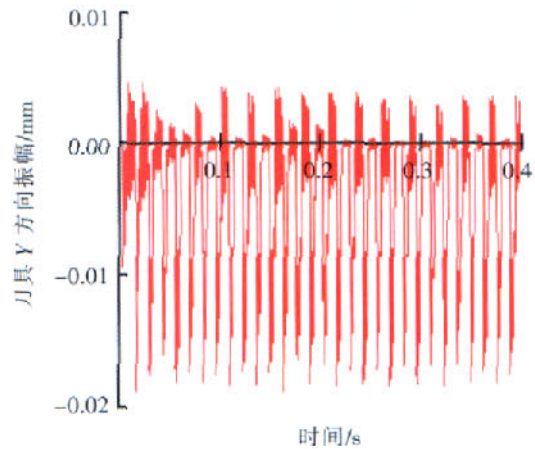
随之增高,但低于最高许可温度,故满足切削温度约束条件。此外, $P_{cmax}=0.2kW$, $T_{cmax}=0.52N\cdot m$,远小于机床许可值。

2.3.2 精加工切削参数确定

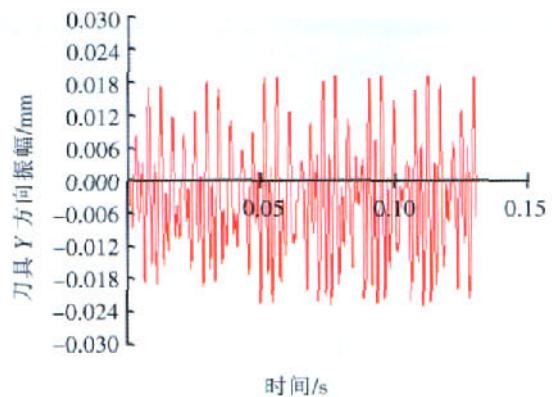
精加工切削参数优化方法与粗加工类似。由于使用原始参数加工时存在局部超差现象(由加工变形引起),故在确定切削参数时应减少 Y 方向上的切削力,把加工变形控制在公差范围内。保持 a_e 、 a_p 和 V_f 不变,提高 n 、降低 f_z 可达到上述目的,由此确定出的精加工优化参数为: $n=4\ 600r/min$, $a_e=0.5mm$, $a_p=0.3mm$, $f_z=0.05mm$ ($V_f=690mm$)。

分别用优化前、后的切削参数在 SimuCut 中进行时域仿真,Y 方向切削力对比见图 5,工件振动对比见图 6。

图 5 显示,优化后 Y 方向最大切削力比优化前降低了近 1/4,由此产生的加工变形随之减少。图 6 显示,工件最大振幅由优化前的 0.03mm 降低为优化后

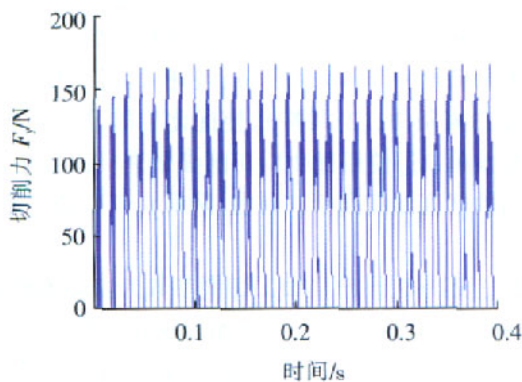


(a)优化前



(b)优化后

图6 优化前、后 Y 方向工件振动仿真结果对比
Fig.6 Comparison of simulation results of surface workpiece vibration in Y direction before and after optimization



(a)优化前

的 0.02mm。通过切削参数优化,零件的表面质量有所提高。

3 优化前后效果对比

使用优化切削参数进行了实际零件加工,优化前、后切削参数、切削效率及其加工效果明显提高(参见表 1)。粗加工切削效率提高了 1.16 倍,精加工基本消除了超差现象,且零件的表面加工质量有明显提高。

4 结论

(1)由于零件和加工用刀具的刚性都很弱,整体叶轮加工过程中极易发生颤振。对加工系统进行动力学特性参数测试,对加工系统的颤振稳定性进行仿真,将加工系统稳定性作为关键约束条件引入到切削参数优化过程中,可充分利用稳定性叶瓣图来避振和提高加工效率。

(2)在加工钛合金、高温合金等难加工材料时,切削温度对刀具的使用寿命起到了关键的作用,使用 Cutpro 软件进行切削温度仿真,可有效避免刀具的过快磨损。

(3)综合应用切削加工动力学仿真技术,成功地实现了整体叶轮加工的切削参数优化,解决了加工中存在的问题,提高了加工效率。

参 考 文 献

- [1] Budak E, Altintas Y. Analytical prediction of stability lobes in milling. *Annals of the CIRP*, 1995, 44(1): 357-362.
- [2] Budak E, Altintas Y. Analytical prediction of chatter stability in milling—part I: general formulation; Part II: application to common milling systems. *ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control*, 1998, 120: 22-36.
- [3] Engin S, Altintas Y. Mechanics and dynamics of general milling cutters—Part I: helical end mills. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2001, 41: 2 195-2 212.
- [4] Lazoglu I, Altintas Y. Prediction of tool and chip temperature in continuous and interrupted machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42: 1 011-1 022.
- [5] 金晓亮,刘强,袁松梅.基于虚拟仪器的数控机床动态特性测试与分析系统研究. *制造技术与机床*, 2007(6):77-80.
- [6] 刘强,尹力.一种面向数控工艺参数优化的铣削过程动力学仿真系统研究. *中国机械工程*, 2005, 16 (13):1 146-1 149.
- [7] Budak E, Tekeli A. Maximizing chatter free material removal rate in milling through optimal selection of axial and radial

depth of cut pair. *Annals of the CIRP*, 2005, 54(1): 353-356.

- [8] CutPro. Analytic and time — domain process simulation software package—milling module[EB/OL]. 2000[2007-11-1]. <http://www.malinc.com/CutPro/index.htm/>. (责编 金卯)

(上接第 79 页)



图 11 焊接形式的侧模瓣侧拉块
Fig.11 Welded die flap and pulling chip
on the side of the mold

3 结束语

此次发动机缸体水套热芯盒模具的改进设计改变了靠经验和计算修正整体模具热变形偏移量复杂的传统设计理念,创新地提出了模框冷、模瓣热,冷热分开的新理念,有效地解决了因热变形而带来的模具热稳定性的问题。在此次改进设计中,又创造性地设计了埋入式水冷射砂嘴,从而打破了埋入式射嘴只能在冷芯盒上使用的专利,提高了热芯盒制芯的质量与生产效率。同时因为此次的改进,不仅改进后的模具重量比以前减轻了至少 30%,而且机械加工的部位也减少了很多。因此这次改进设计不仅解决了技术问题,同时还很大程度地降低了模具制造成本,为以后热芯盒模具的设计提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 刘文川,姜善涛.热芯盒几种附件结构的优化设计, *中国铸造装备与技术*, 2003(1):25-28.
- [2] 刘文川. 462Q 气缸体水套砂芯制芯工艺及热芯盒设计. *铸造设备研究*, 2000(1):20-22.
- [3] 刘文川,王兴平,谭勇,等.干式缸套气缸水套砂芯热芯盒的优化设计. *中国铸造装备与技术*, 2005(1):41-45.
- [4] 刘文川,周红梅,黄睿.热芯盒几种附件的通用性优化设计, *中国铸造装备与技术*, 2005(6):38-40.

(责编 钟元 金卯)