

2020年05月硕士生毕业答辩



基于切削负载均衡的钛合金整体叶轮 高效铣削工艺研究

硕士生：陶正瑞

导师：安庆龙 副研究员

日期：2020年05月20日



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



1

研究背景与意义

2

铣削力建模与试验分析

3

铣削过程动力学建模及稳定性研究

4

钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

5

钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证

6

总结与展望



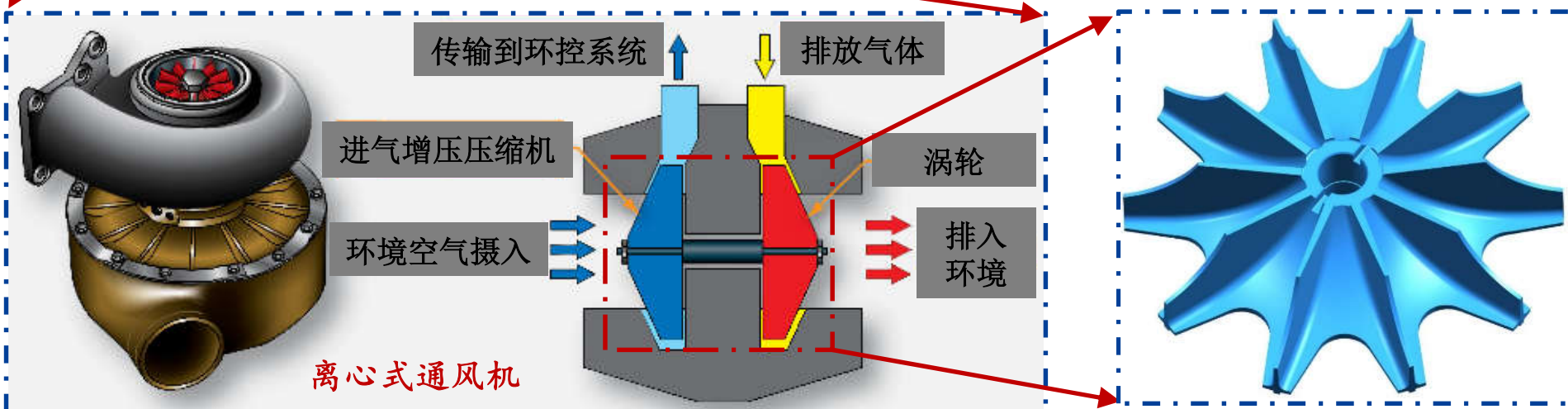


1 研究背景与意义



飞机环境控制系统

(Aircraft Environmental Control Systems, AECS) 保证乘员和设备正常工作所需的适当环境条件



钛合金整体叶轮是离心式通风机的核心部件，直接影响环控系统的服役性能和使用寿命



1 研究背景与意义-整体叶轮加工难点分析

铸造工艺:

- 制造精度和表面质量较低
- 铸造合金组织孔隙大, 叶片抗疲劳性能低

铣削工艺:

- 工艺柔性好, 适应范围广, 生产周期短
- 单件制造成本较低, 加工精度高、表面质量好

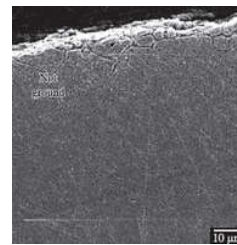
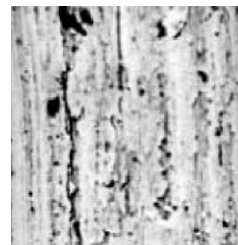
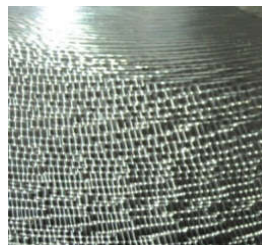
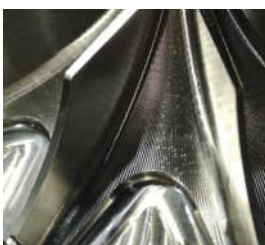
表面质量、形状精度以及加工效率要求高

加工现状

叶轮结构难加工&钛合金材料难加工

叶片-变截面薄壁结构, 流道-复杂曲面
加工变形 铣削颤振 刀痕严重

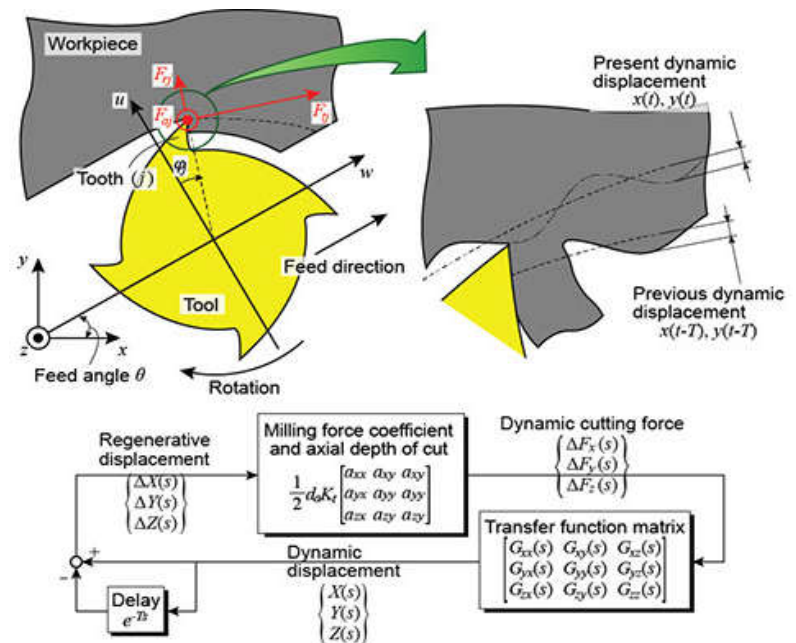
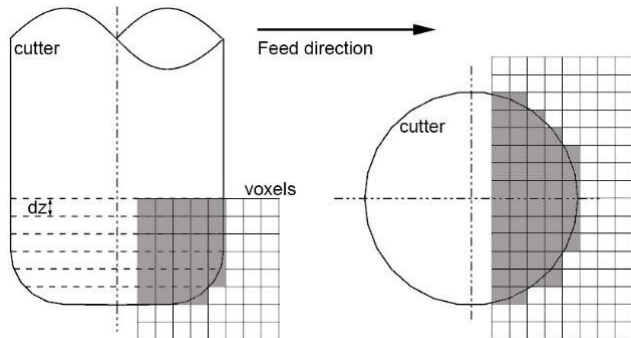
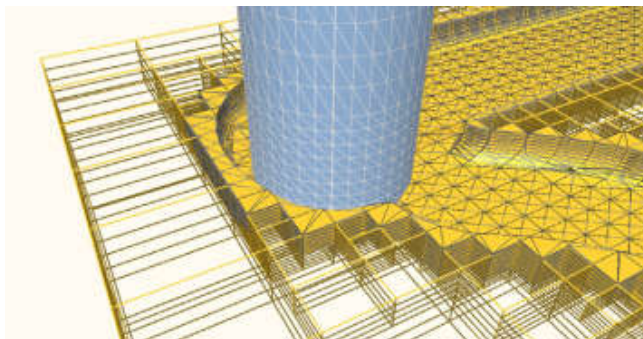
钛合金加工过程强力-热耦合效应容易导致
表面振纹 刀具磨损 表面裂纹 表面烧伤



生产效率极低、花费成本高、叶轮质量差、服役寿命短

1 研究背景与意义-数控铣削过程仿真技术研究现状

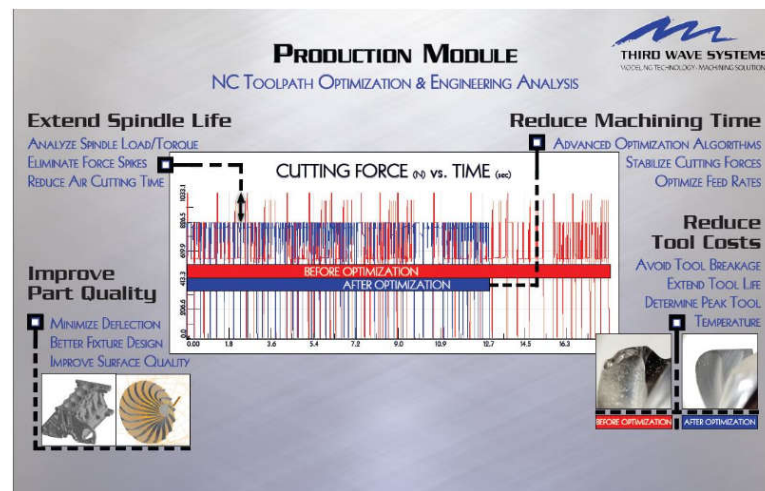
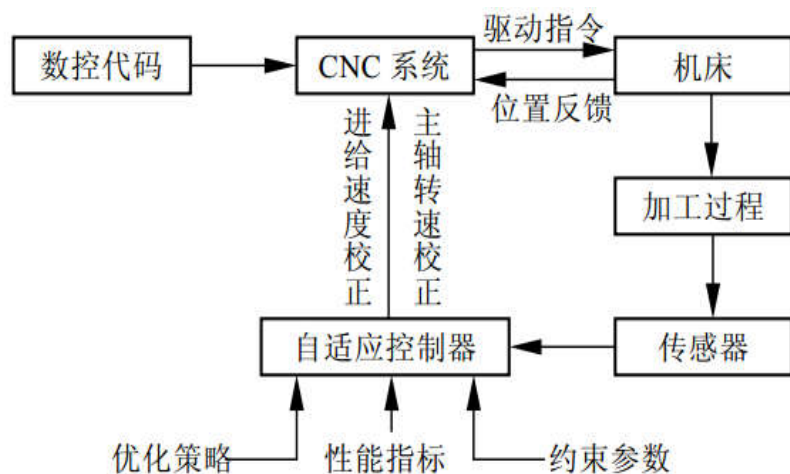
类型	几何仿真	物理仿真
原理	基于几何空间离散方法获取切削过程参数（切深、切宽、切入切出角等）	基于微元积分思想的精确求解切削力、基于再生颤振理论的系统动力学建模
应用	检查刀具干涉和碰撞；通过检查刀位轨迹是否符合加工要求，是否存在过切和欠切现象；为物理仿真提供必要的边界条件和输入量	加工变形与控制；切削稳定性与预测；加工表面形貌仿真；调整和优化切削参数的依据



结合几何仿真与物理仿真，精确描述加工过程并为参数优化提供依据

1 研究背景与意义-数控铣削加工参数优化研究现状

类型	在线自适应优化技术	离线优化技术
原理	采用各种相关传感器在线测量切削过程物理量，实现加工过程加工参数自动调整	采用加工仿真软件预先对加工过程几何与物理量进行预测，根据优化模型与约束条件，调整加工参数
优点	根据实际加工过程自动调整进给速度，能够适应各种因素对切削过程的影响	无需与数控系统集成；成本低；适用范围广
缺点	需要考虑集成与控制滞后问题；成本较高；缺乏合适控制器；控制方法不成熟	对加工过程进行简化；需要建立精确的物理模型



离线优化技术适用于企业现有加工环境



1 研究背景与意义-主要解决的问题

1、解决铣削加工过程物理仿真问题

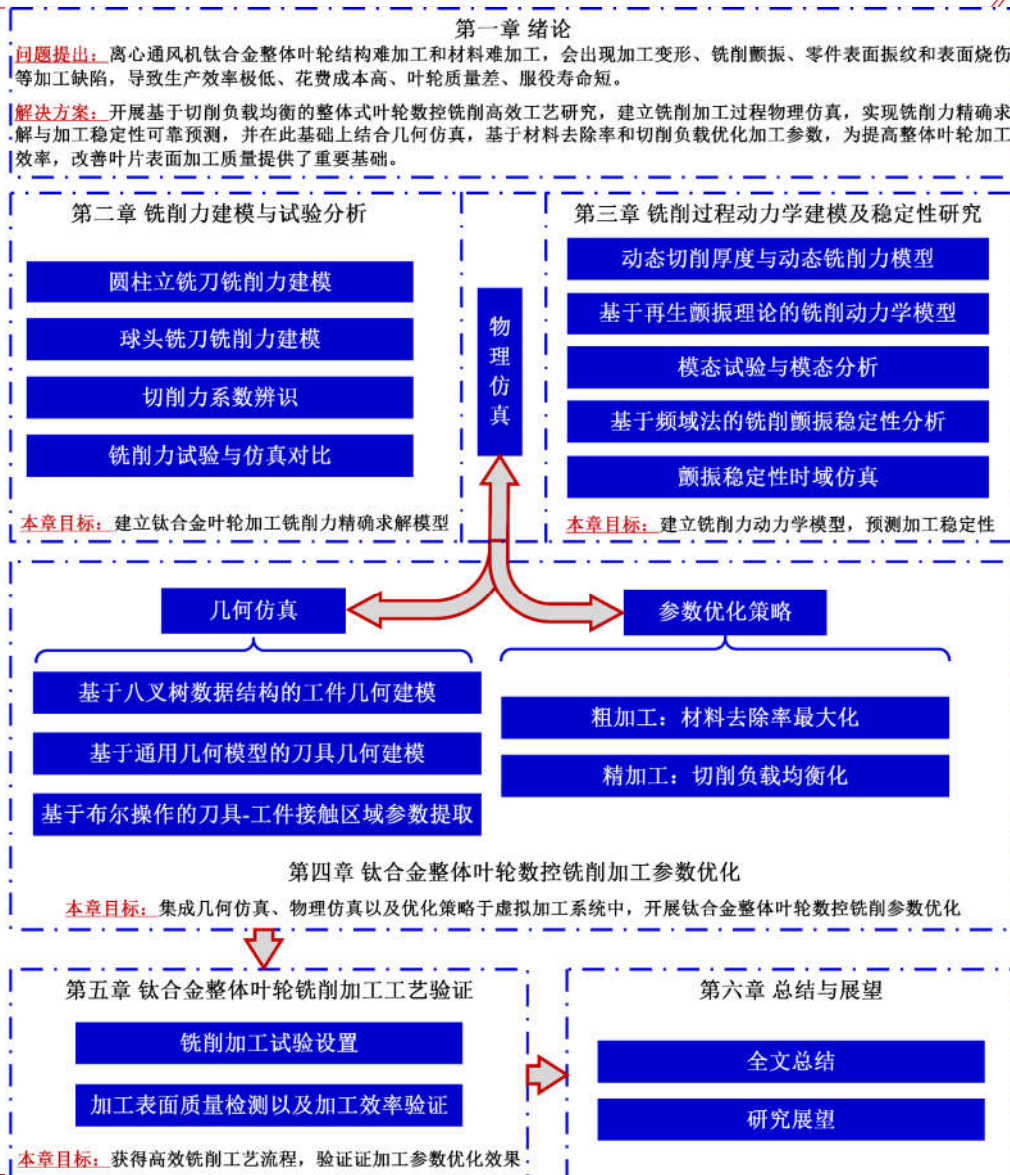
由于叶轮流道的复杂曲面无法精确描述，且刀具走刀轨迹直线插补圆弧，基于空间几何约束求解截取区域的形状难度大。故采用几何仿真求解刀具-工件接触区域，并提取几何参数信息。物理仿真包括求解切削过程铣削力、切削稳定性预测以及切削过程能耗计算，需要建立基于微元积分思想的切削力模型、基于再生颤振理论的系统动力学模型以及机床能耗模型

2、基于切削负载均衡的加工参数优化问题

粗加工以材料去除率最大化为优化目标，精加工以恒切削力为优化目标，考虑到加工稳定性约束、切削力约束、转矩以及机床功率约束，需要分段优化加工参数，提高加工过程加工效率以及平稳性



1 研究背景与意义-研究内容与技术路线



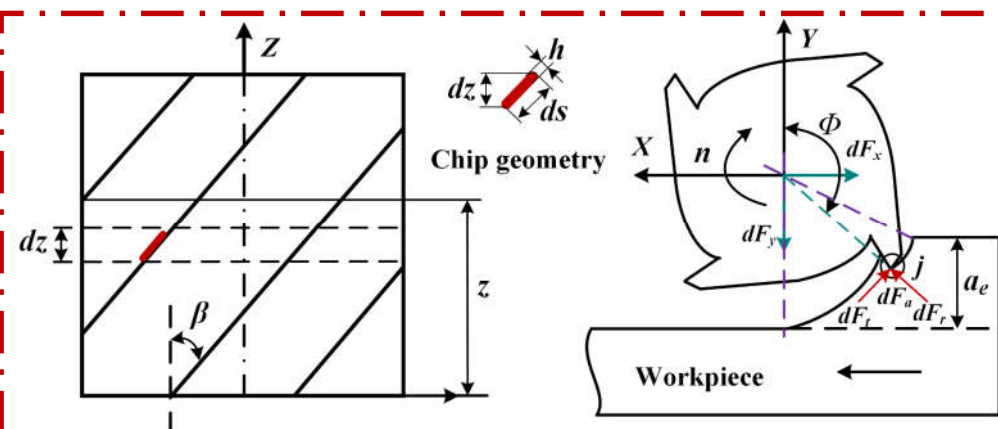


- 1 研究背景
- 2 铣削力建模与试验分析**
- 3 铣削过程动力学建模及稳定性研究
- 4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化
- 5 钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证
- 6 总结与展望



2 铣削力建模与试验分析

2.1 圆柱立铣刀铣削力建模



剪切力系数, 常数, N/mm^2

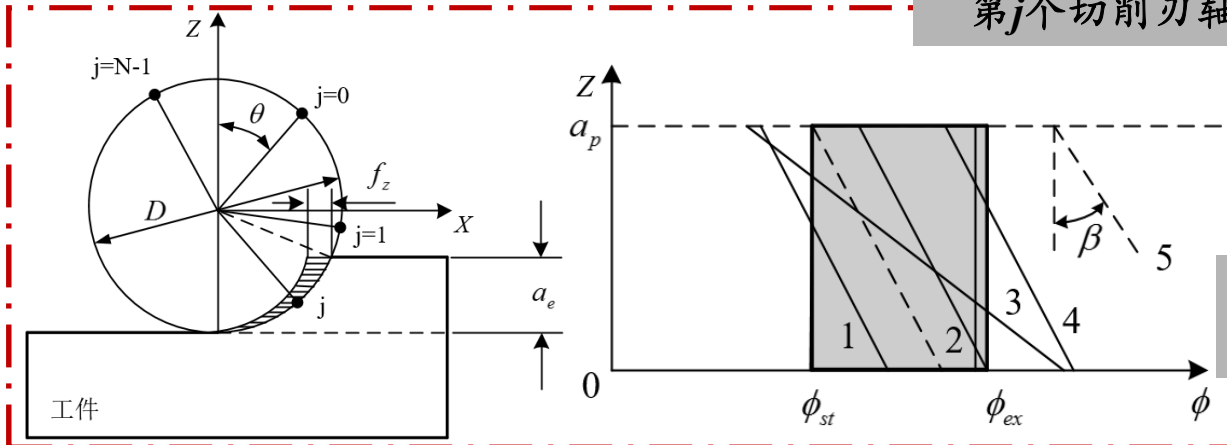
耕犁力系数
常数, N/mm

$$\begin{cases} dF_{t,j}(\phi, z) = K_{tc} h_j(\phi_j(z)) dz + K_{te} dS \\ dF_{r,j}(\phi, z) = K_{rc} h_j(\phi_j(z)) dz + K_{re} dS \\ dF_{a,j}(\phi, z) = K_{ac} h_j(\phi_j(z)) dz + K_{ae} dS \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} dF_{x,j}(\phi_j(z)) \\ dF_{y,j}(\phi_j(z)) \\ dF_{z,j}(\phi_j(z)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \phi_j(z) & -\sin \phi_j(z) & 0 \\ \sin \phi_j(z) & -\cos \phi_j(z) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_{t,j}(\phi, z) \\ dF_{r,j}(\phi, z) \\ dF_{a,j}(\phi, z) \end{bmatrix}$$

第 j 个切削刃轴向积分

$$\begin{bmatrix} F_x(\phi_j) \\ F_y(\phi_j) \\ F_z(\phi_j) \end{bmatrix} = \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} \begin{bmatrix} dF_{x,j}(\phi, z) \\ dF_{y,j}(\phi, z) \\ dF_{z,j}(\phi, z) \end{bmatrix} dz$$

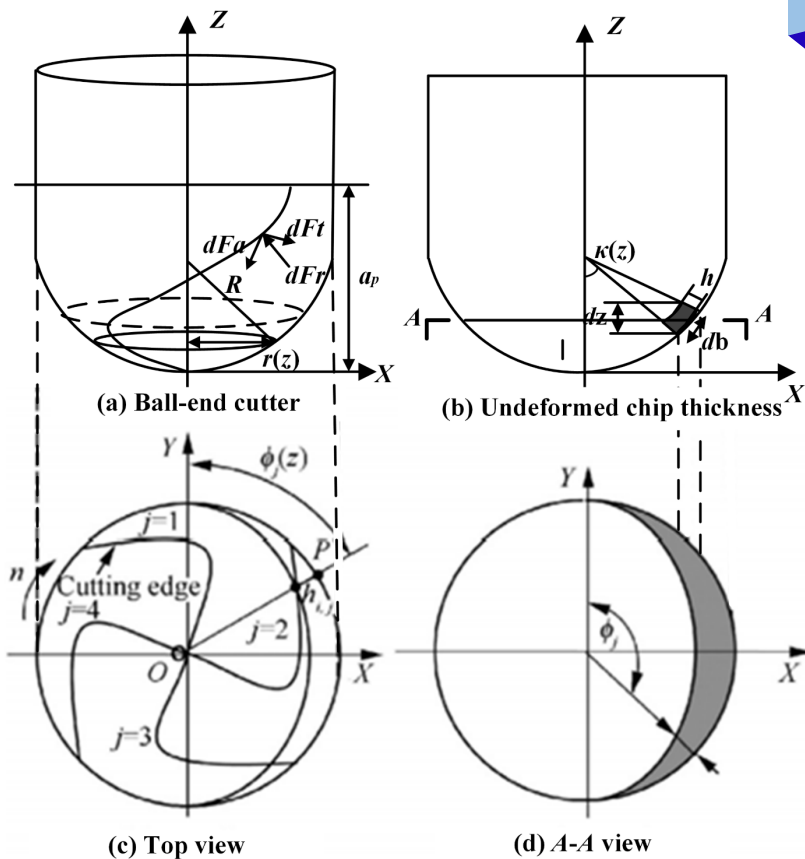


各切削刃所受
铣削力之和

$$\begin{bmatrix} F_x(\theta) \\ F_y(\theta) \\ F_z(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{j=N} F_{x,j}(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^{j=N} F_{y,j}(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^{j=N} F_{z,j}(\phi_j) \end{bmatrix}$$

2 铣削力建模与试验分析

2.2 球头铣刀铣削力建模



剪切力系数，轴向接触角 κ 函数， N/mm^2

$$\begin{cases} K_{tc} = K_{tc0} + K_{tc1}\kappa + K_{tc2}\kappa^2 + K_{tc3}\kappa^3 \\ K_{rc} = K_{rc0} + K_{rc1}\kappa + K_{rc2}\kappa^2 + K_{rc3}\kappa^3 \\ K_{ac} = K_{ac0} + K_{ac1}\kappa + K_{ac2}\kappa^2 + K_{ac3}\kappa^3 \end{cases}$$

$$\begin{cases} dF_{t,j}(\phi_j(z), \kappa) = K_{tc} h(\phi_j(z), \kappa) db + K_{te} dS \\ dF_{r,j}(\phi_j(z), \kappa) = K_{rc} h(\phi_j(z), \kappa) db + K_{re} dS \\ dF_{a,j}(\phi_j(z), \kappa) = K_{ac} h(\phi_j(z), \kappa) db + K_{ae} dS \end{cases} \rightarrow f_t \sin \phi_j(z) \sin \kappa$$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} dF_{x,j}(\phi_j, z) \\ dF_{y,j}(\phi_j, z) \\ dF_{z,j}(\phi_j, z) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} dF_{t,j}(\phi_j, z) \\ dF_{r,j}(\phi_j, z) \\ dF_{a,j}(\phi_j, z) \end{bmatrix} \\ T = \begin{bmatrix} -\cos \phi_j(z) & -\sin \kappa \sin \phi_j(z) & -\cos \kappa \sin \phi_j(z) \\ \sin \phi_j(z) & -\sin \kappa \cos \phi_j(z) & -\cos \kappa \cos \phi_j(z) \\ 0 & \cos \kappa & -\sin \kappa \end{bmatrix} \end{cases}$$

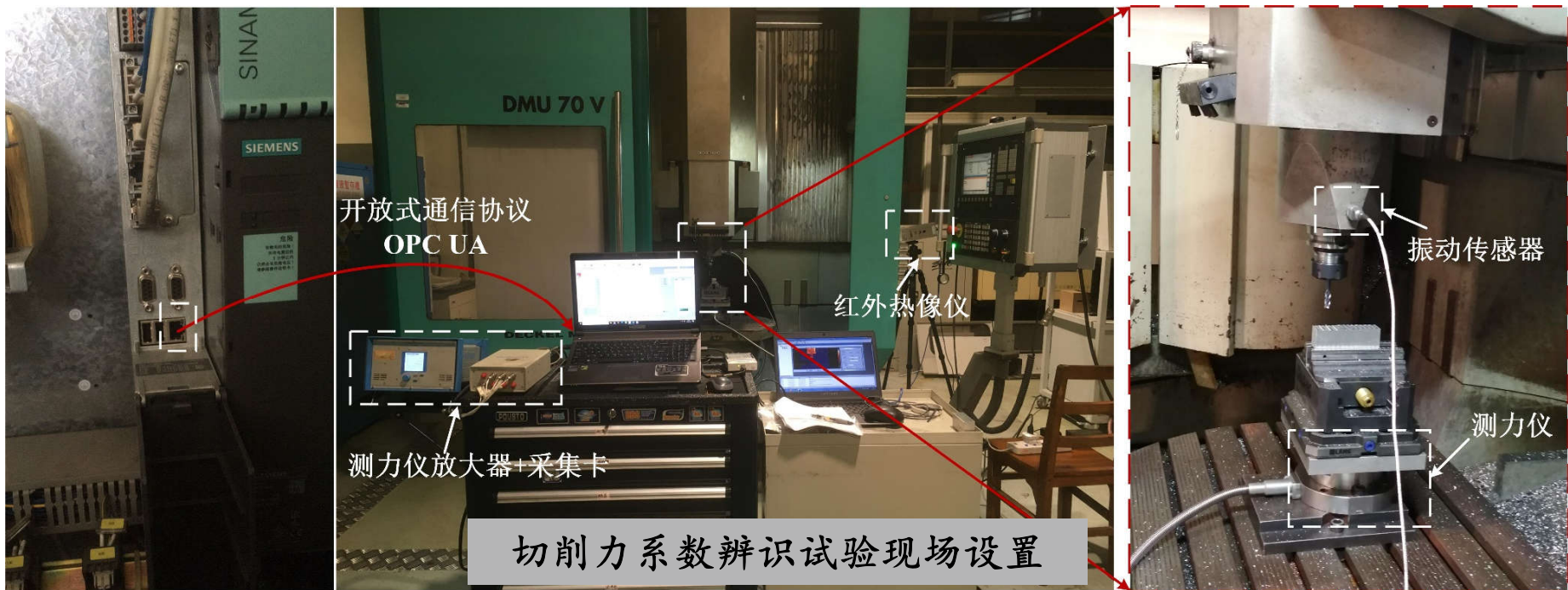
坐标变换矩阵
考虑轴向接触角 κ

$$\begin{bmatrix} F_x(\phi_j) \\ F_y(\phi_j) \\ F_z(\phi_j) \end{bmatrix} = \int_{z_{j,1}}^{z_{j,2}} \begin{bmatrix} dF_{x,j}(\phi, z) \\ dF_{y,j}(\phi, z) \\ dF_{z,j}(\phi, z) \end{bmatrix} dz \quad \begin{bmatrix} F_x(\theta) \\ F_y(\theta) \\ F_z(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{j=N} F_{x,j}(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^{j=N} F_{y,j}(\phi_j) \\ \sum_{j=1}^{j=N} F_{z,j}(\phi_j) \end{bmatrix}$$



2 铣削力建模与试验分析

2.3 铣削力仿真与试验验证



钛合金TC4的材料属性

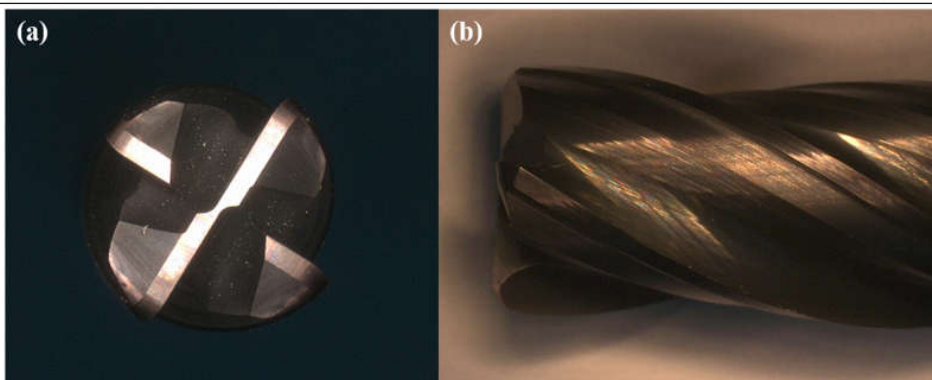
密度(ρ)	杨氏模量(E)	泊松比(ν)	热膨胀系数(α_T)	熔点(T_m)
4430 kg/m ³	113 GPa	0.342	$9.05 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	1680 $^{\circ}\text{C}$
导热系数(λ)	比热容(c_p)	屈服强度($\sigma_{0.2}$)	抗拉强度(σ_b)	
7.235 W/(m $\cdot^{\circ}\text{C}$)	$2.28 \times 10^6 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$	824 MPa	902 MPa	

2 铣削力建模与试验分析

2.3.1 基于平均力求解圆柱立铣刀切削力系数

齿数 $\leftarrow$	直径 $D/\text{mm}\leftarrow$	螺旋角 $\beta/^\circ\leftarrow$	涂层 $\leftarrow$
4 $\leftarrow$	8 $\leftarrow$	30 $\leftarrow$	TiAlN $\leftarrow$

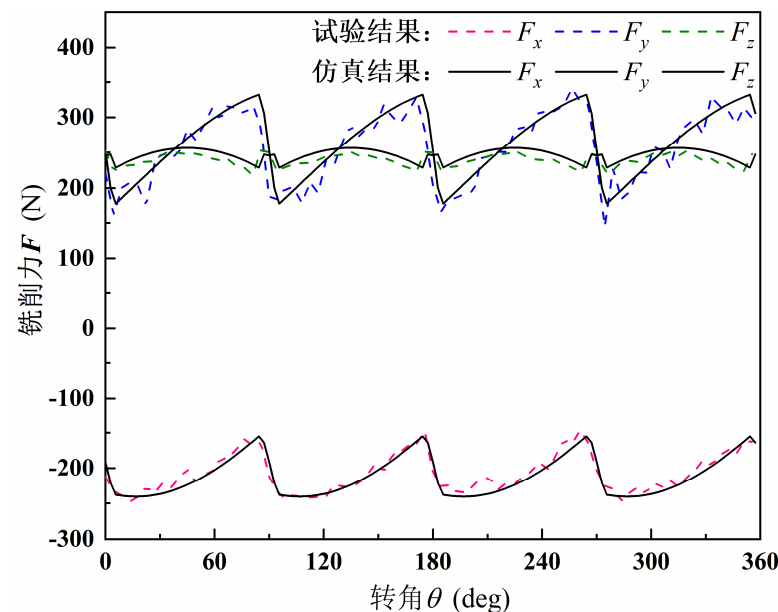
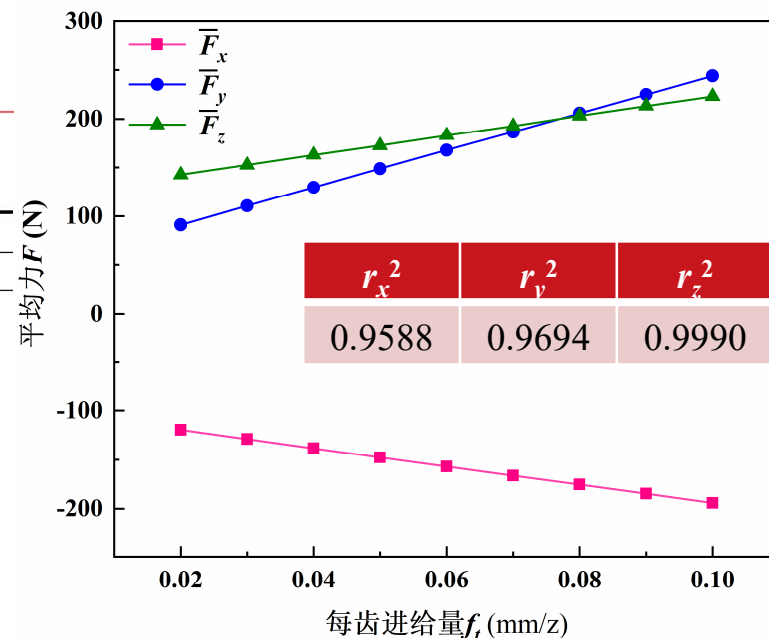
刀具 $\leftarrow$



序号 $\leftarrow$	进给率 $f/\text{mm}\leftarrow$	主轴转速 $\omega/\text{rpm}\leftarrow$	轴向切深 $a_p/\text{mm}\leftarrow$	进给速度 $f/(\text{mm}/\text{min})\leftarrow$
1 $\leftarrow$	0.02 $\leftarrow$	3000 $\leftarrow$	1 $\leftarrow$	240 $\leftarrow$
2 $\leftarrow$	0.03 $\leftarrow$	3000 $\leftarrow$	1 $\leftarrow$	360 $\leftarrow$
3 $\leftarrow$	0.04 $\leftarrow$	3000 $\leftarrow$	1 $\leftarrow$	480 $\leftarrow$
4 $\leftarrow$	0.05 $\leftarrow$	3000 $\leftarrow$	1 $\leftarrow$	600 $\leftarrow$
5 $\leftarrow$	0.06 $\leftarrow$	3000 $\leftarrow$	1 $\leftarrow$	720 $\leftarrow$
6 $\leftarrow$	0.07 $\leftarrow$	3000 $\leftarrow$	1 $\leftarrow$	840 $\leftarrow$
7 $\leftarrow$	0.08 $\leftarrow$	3000 $\leftarrow$	1 $\leftarrow$	960 $\leftarrow$
8 $\leftarrow$	0.09 $\leftarrow$	3000 $\leftarrow$	1 $\leftarrow$	1080 $\leftarrow$
9 $\leftarrow$	0.1 $\leftarrow$	3000 $\leftarrow$	1 $\leftarrow$	1200 $\leftarrow$

试验 $\leftarrow$
参数 $\leftarrow$

K_{tc}	K_{rc}	K_{ac}	K_{te}	K_{re}	K_{ae}
2004.98	1005.87	848.81	45.53	84.17	65.70

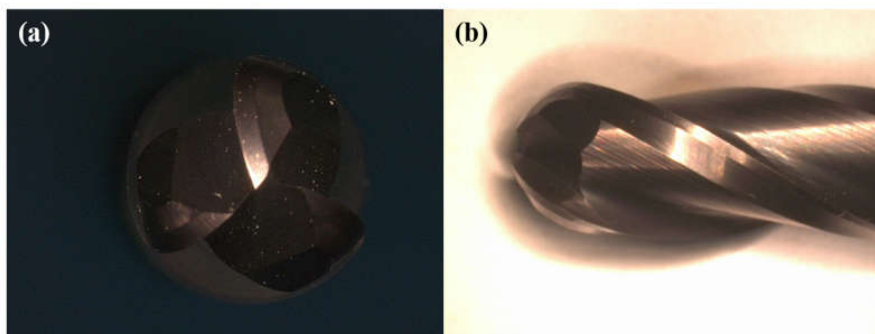


2 铣削力建模与试验分析

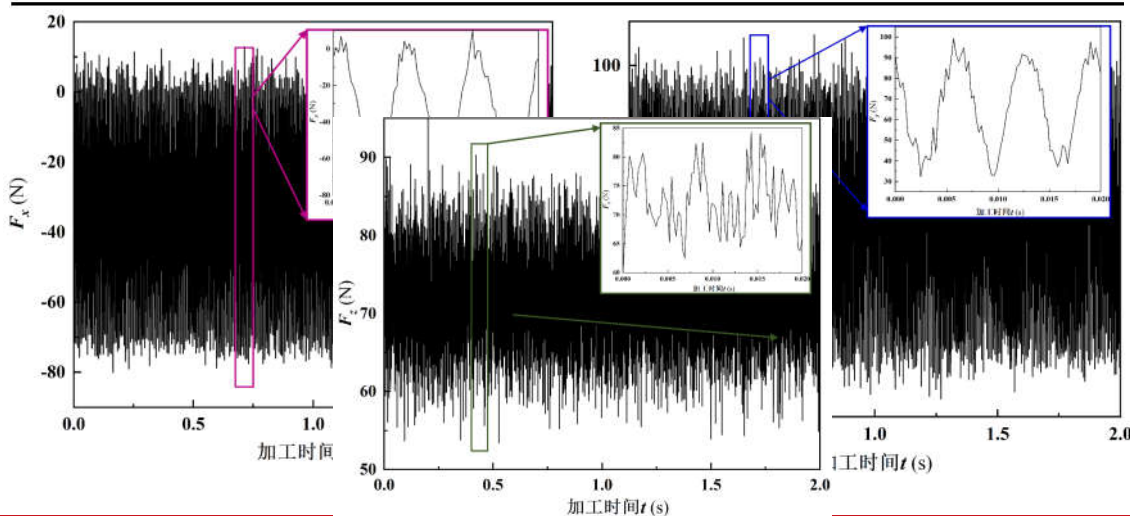
2.3.2 基于瞬态力求解球头铣刀切削力系数

齿数 $\hookleftarrow$	直径 D/mm $\hookleftarrow$	螺旋角 $\beta/^\circ$ $\hookleftarrow$	涂层 $\hookleftarrow$
3 $\hookleftarrow$	6 $\hookleftarrow$	45 $\hookleftarrow$	TiAlN $\hookleftarrow$

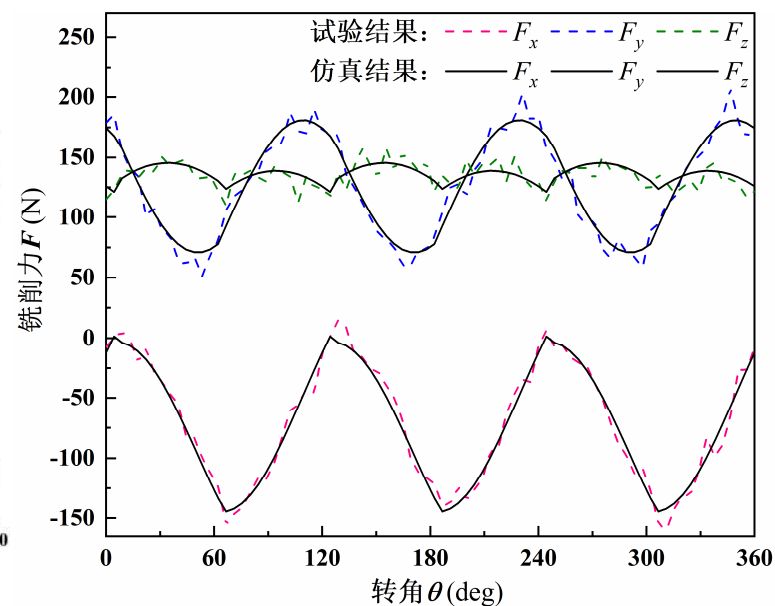
刀具 $\hookleftarrow$



试验 $\hookleftarrow$	序号 $\hookleftarrow$	主轴转速 ω/rpm $\hookleftarrow$	轴向切深 a_p/mm $\hookleftarrow$	进给率 f/mm $\hookleftarrow$	进给速度 $f/(\text{mm}/\text{min})$ $\hookleftarrow$
参数 $\hookleftarrow$	1 $\hookleftarrow$	2000 $\hookleftarrow$	0.3 $\hookleftarrow$	0.04 $\hookleftarrow$	240 $\hookleftarrow$
	2 $\hookleftarrow$	2000 $\hookleftarrow$	0.5 $\hookleftarrow$	0.08 $\hookleftarrow$	480 $\hookleftarrow$



K_{tc0}	K_{tc1}	K_{tc2}	K_{tc3}
4385.61	-1739.60	6654.77	-1668.48
K_{rc0}	K_{rc1}	K_{rc2}	K_{rc3}
6673.06	-2787.16	1098.22	-2790.25
K_{ac0}	K_{ac1}	K_{ac2}	K_{ac3}
799.28	-377.91	207.72	-42.51
K_{te}		K_{re}	K_{ae}
5.95		4.39	-8.76





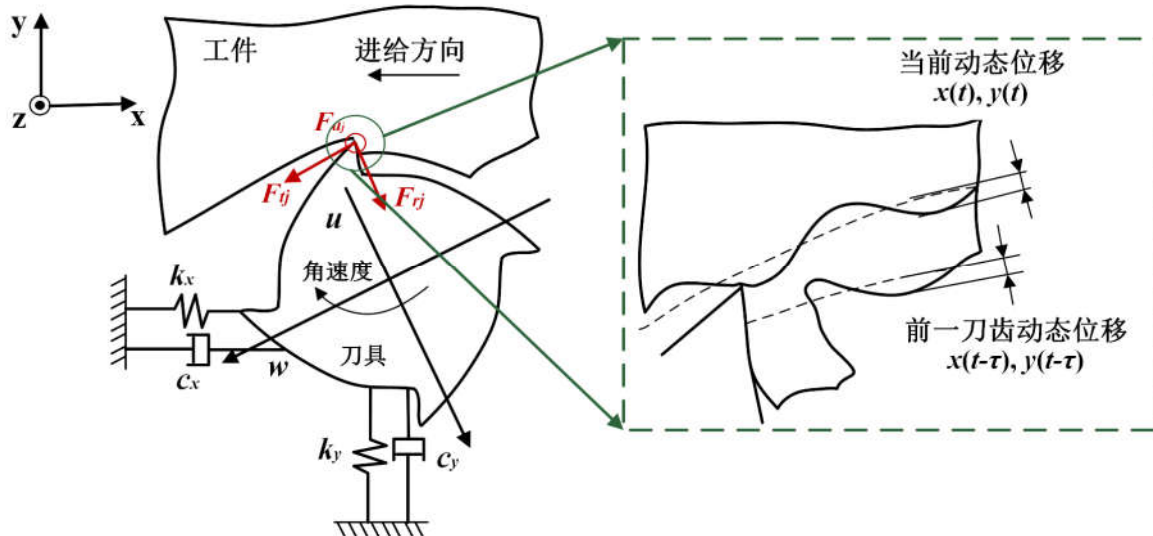
- 1 研究背景
- 2 铣削力建模与试验分析
- 3 铣削过程动力学建模及稳定性研究**
- 4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化
- 5 钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证
- 6 总结与展望





3 铣削过程动力学建模及稳定性研究

3.1 动态切削厚度与动态铣削力模型



$$\begin{cases} h(\phi_j) = ((-x_{j-1} \sin(\phi_j) - y_{j-1} \cos(\phi_j)) - (-x_j \sin(\phi_j) - y_j \cos(\phi_j))) g(\phi_j) \\ h(\phi_j) = ((x_j - x_{j-1}) \sin(\phi_j) + (y_j - y_{j-1}) \cos(\phi_j)) g(\phi_j) \\ h(\phi_j) = (\Delta x \sin(\phi_j) + \Delta y \cos(\phi_j)) g(\phi_j) \end{cases}$$

动态瞬时切削厚度与刀具转角 ϕ_j 关系

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} a_p K_{tc} \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \frac{1}{2} a_p K_{tc} [A(t)] (\Delta)$$

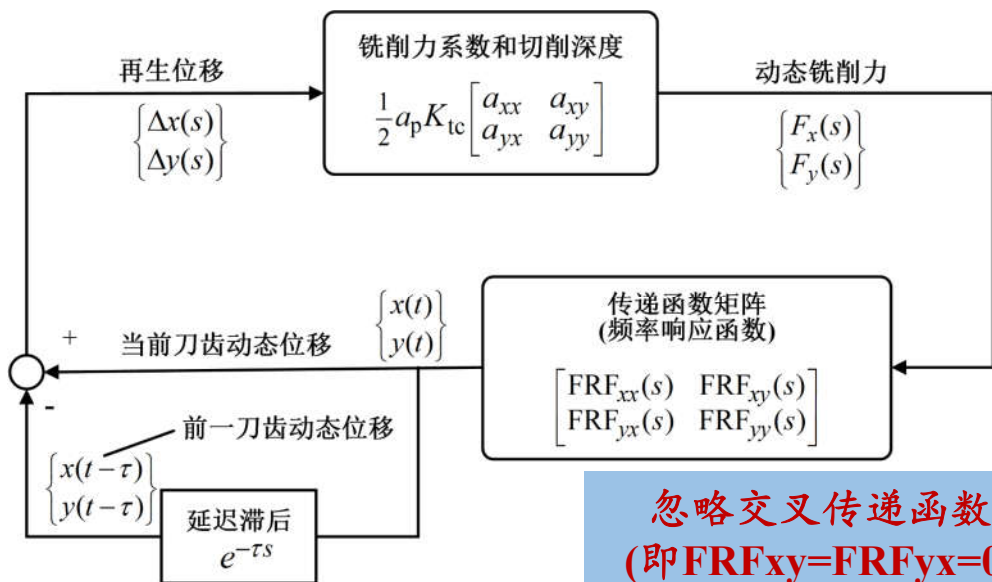
时变方向系数

$$\begin{cases} a_{xx} = \sum_{j=1}^{N_t} -g(\phi_j) (\sin(2\phi_j) + K_r (1 - \cos(2\phi_j))) \\ a_{xy} = \sum_{j=1}^{N_t} -g(\phi_j) (1 + \cos(2\phi_j) + K_r \sin(2\phi_j)) \\ a_{yx} = \sum_{j=1}^{N_t} g(\phi_j) ((1 - \cos(2\phi_j)) - K_r \sin(2\phi_j)) \\ a_{yy} = \sum_{j=1}^{N_t} g(\phi_j) (\sin(2\phi_j) - K_r (1 + \cos(2\phi_j))) \end{cases}$$



3 铣削过程动力学建模及稳定性研究

3.2 基于再生颤振理论的铣削动力学模型



忽略交叉传递函数
(即 $FRF_{xy}=FRF_{yx}=0$)

$$\Lambda_{1,2} = \frac{-a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0}}{2a_0} = -\frac{1}{2a_0} \left(a_1 \mp \sqrt{a_1^2 - 4a_0} \right)$$

$$a_0 = FRF_{xx} FRF_{yy} (a_{xx} a_{yy} - a_{xy} a_{yx}),$$

$$a_1 = a_{xx} FRF_{xx} + a_{yy} FRF_{yy}$$

$$\det \begin{bmatrix} 1 + \Lambda a_{xx} FRF_{xx} & \Lambda a_{xy} FRF_{yy} \\ \Lambda a_{yx} FRF_{xx} & 1 + \Lambda a_{yy} FRF_{yy} \end{bmatrix} = 0$$

简化后的特征方程

$$\begin{aligned} [A_0][FRF(\omega_c)] &= \frac{N}{2\pi} \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} FRF_{xx} & FRF_{xy} \\ FRF_{yx} & FRF_{yy} \end{bmatrix} \\ &= \frac{N}{2\pi} \begin{bmatrix} a_{xx} FRF_{xx} + a_{xy} FRF_{yx} & a_{xx} FRF_{xy} + a_{xy} FRF_{yy} \\ a_{yx} FRF_{xx} + a_{yy} FRF_{yx} & a_{yx} FRF_{xy} + a_{yy} FRF_{yy} \end{bmatrix} \\ &= \frac{N}{2\pi} [FRF_{or}] \\ \Lambda &= \frac{N}{2\pi} \left(-\frac{1}{2} a_p K_{tc} (1 - e^{-i\omega_c \tau}) \right) \\ &= -\frac{N}{4\pi} a_p K_{tc} (1 - e^{-i\omega_c \tau}) \end{aligned}$$

$$\{F(\omega_c)\} = \frac{1}{2} a_p K_{tc} \left\{ [A(\omega_c)] * [1 - e^{-i\omega \tau}] [FRF(i\omega_c)] \{F(\omega_c)\} \right\}$$

$$\{F(\omega_c)\} \left([I] - \frac{1}{2} b K_t (1 - e^{i\omega_c \tau}) [A(\omega_c)] [FRF(\omega_c)] \right) = 0$$

$$\det \left([I] - \frac{1}{2} a_p K_t (1 - e^{i\omega_c \tau}) [A_0] [FRF(\omega_c)] \right) = 0$$

闭环动态铣削系统的特征方程

零阶频域法

3 铣削过程动力学建模及稳定性研究

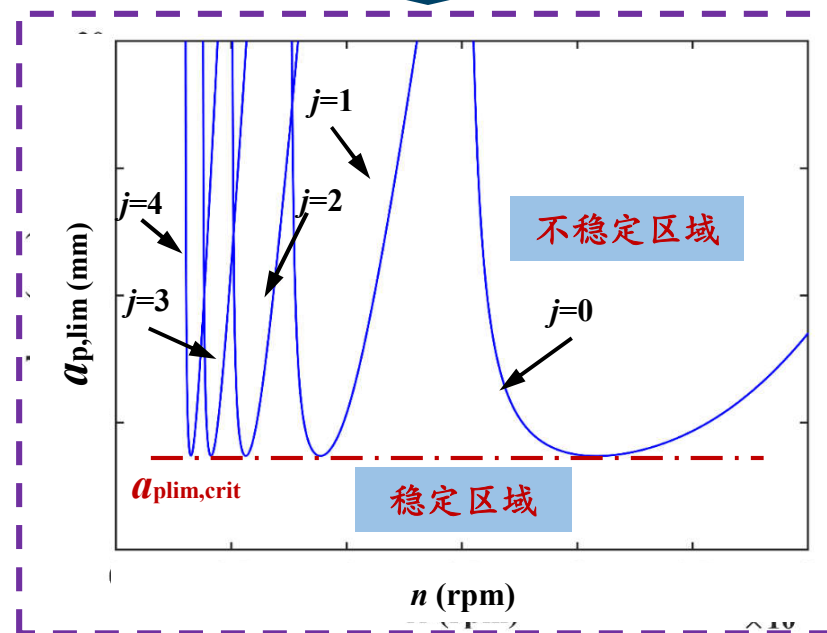
3.2 基于再生颤振理论的铣削动力学模型

颤振频率 ω_c 处的临界轴向切削深度及其主轴转速

$$a_{p,lim} = -\frac{2\pi}{NK_{tc}} \Lambda_{Re} \left(1 + \frac{\Lambda_{Im}}{\Lambda_{Re}} \frac{\sin(\omega_c \tau)}{(1 - \cos(\omega_c \tau))} \right) = -\frac{2\pi}{NK_{tc}} \Lambda_{Re} (1 + \kappa^2) (\text{mm})$$

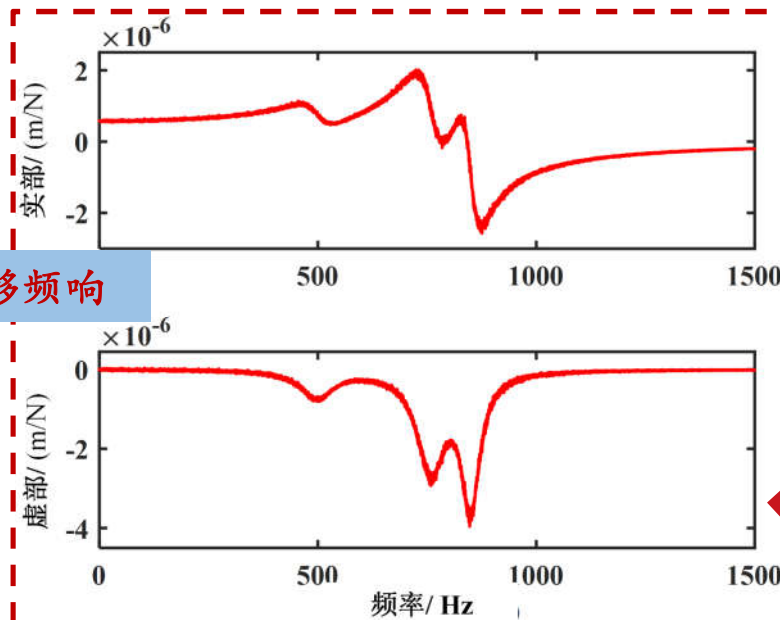
$$n = \frac{60\omega_c}{N(\pi/2 + \omega_c \tau/2 + j \cdot 2\pi)} (\text{r/min})$$

稳定性叶瓣图

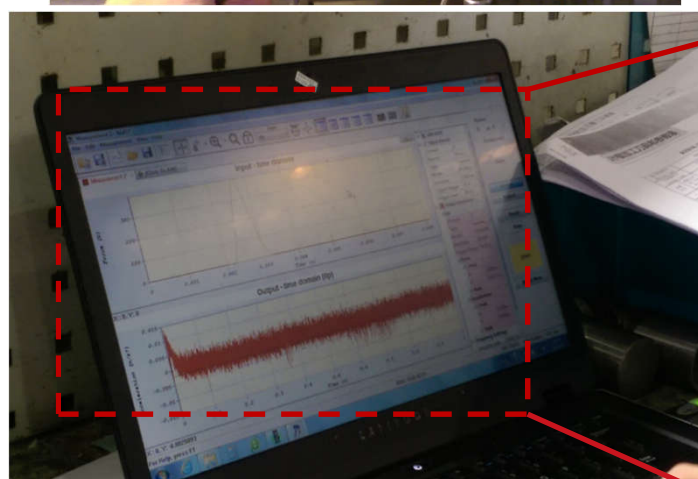


3 铣削过程动力学建模及稳定性研究

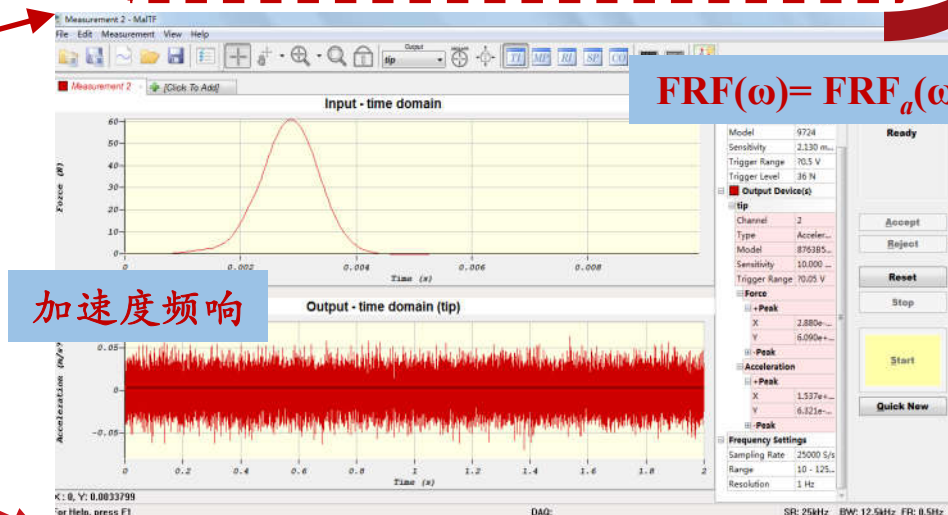
3.3 模态试验与模态分析



位移频响



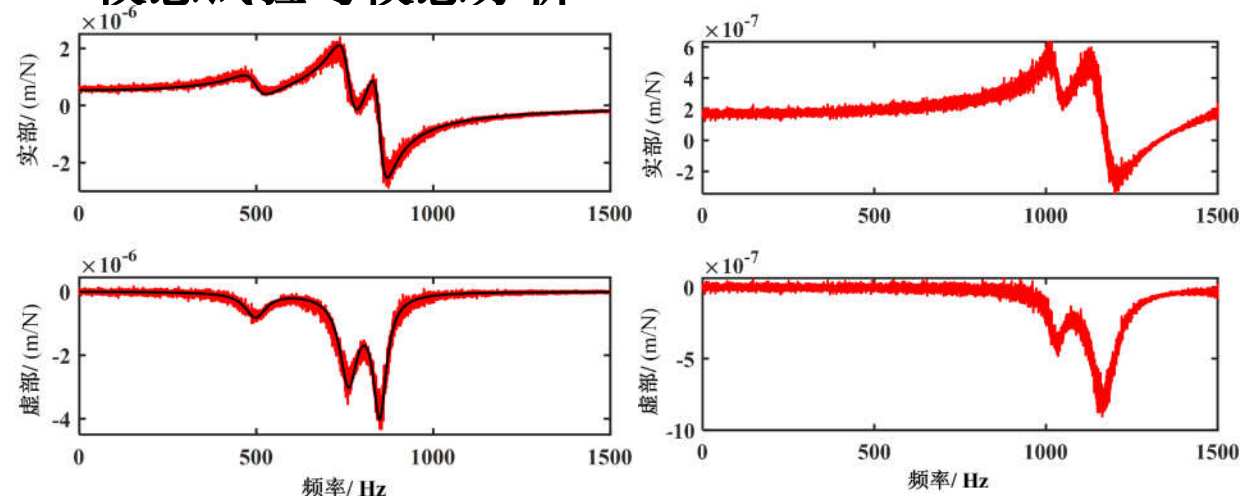
力锤试验



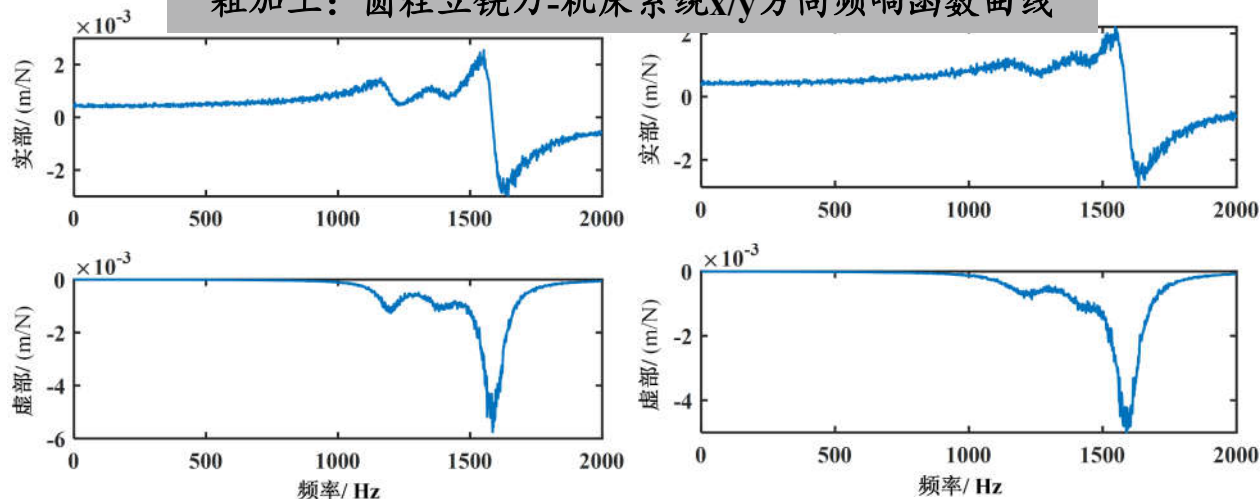
加速度频响

3 铣削过程动力学建模及稳定性研究

3.3 模态试验与模态分析



粗加工：圆柱立铣刀-机床系统x/y方向频响函数曲线



精加工：球头铣刀-机床系统x/y方向频响函数曲线

系统模态参数

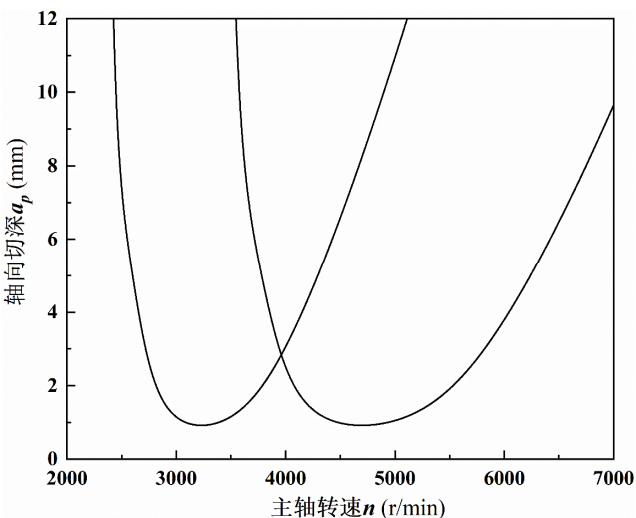
参数	x方向	y方向
一阶固有频率(Hz)	499	1032
一阶刚度(N/m)	8.99e6	6.79e7
一阶阻尼比	0.073	0.023
二阶固有频率(Hz)	761	1846
二阶刚度(N/m)	4.51e6	1.03e7
二阶阻尼比	0.040	0.014
三阶固有频率(Hz)	849	1167
三阶刚度(N/m)	4.98e6	1.71e7
三阶阻尼比	0.027	0.038

参数	x方向	y方向
一阶固有频率(Hz)	1198	1214
一阶刚度(N/m)	1.29e7	1.32e7
一阶阻尼比	0.042	0.072
二阶固有频率(Hz)	1387	1425
二阶刚度(N/m)	1.31e7	1.51e7
二阶阻尼比	0.047	0.048
三阶固有频率(Hz)	1587	1593
三阶刚度(N/m)	3.90e6	3.55e6
三阶阻尼比	0.028	0.031

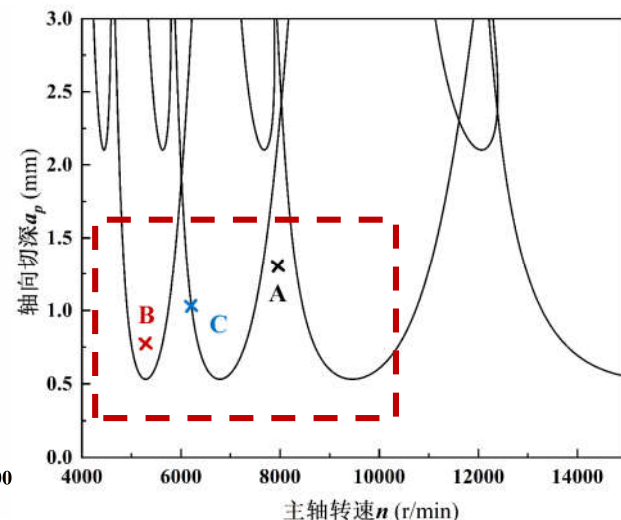
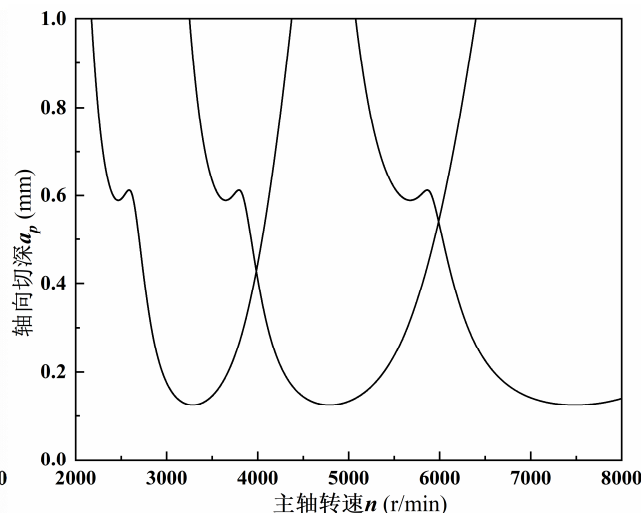
3 铣削过程动力学建模及稳定性研究

3.4 零阶频域法求解颤振稳定性叶瓣图

结合刀具几何参数、切削力系数辨识结果和系统模态参数，获得圆柱立铣刀-机床系统/球头铣刀-机床系统在不同加工条件下的稳定性叶瓣图



粗加工顺铣，径向浸入量为20%和100%



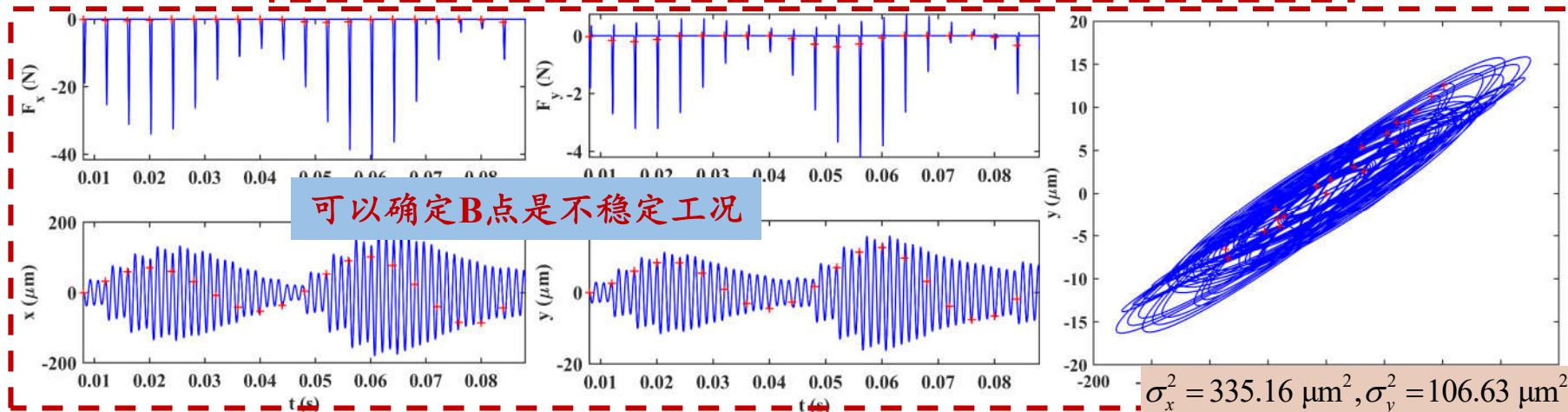
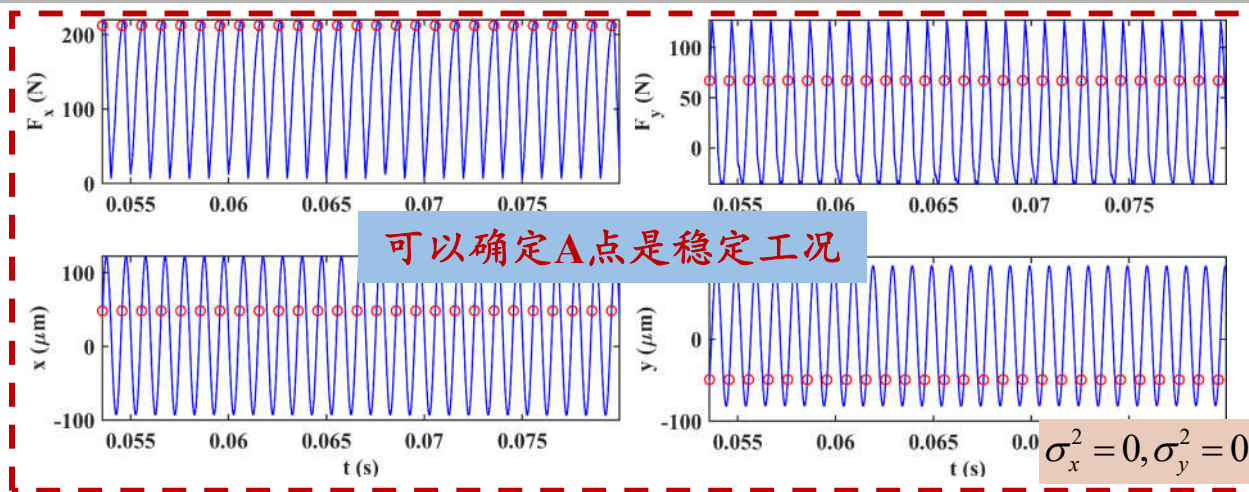
精加工逆铣，径向浸入量为30%

由稳定性叶瓣图可知，A点是稳定工况、B点是不稳定工况而C点是临界状况

3 铣削过程动力学建模及稳定性研究

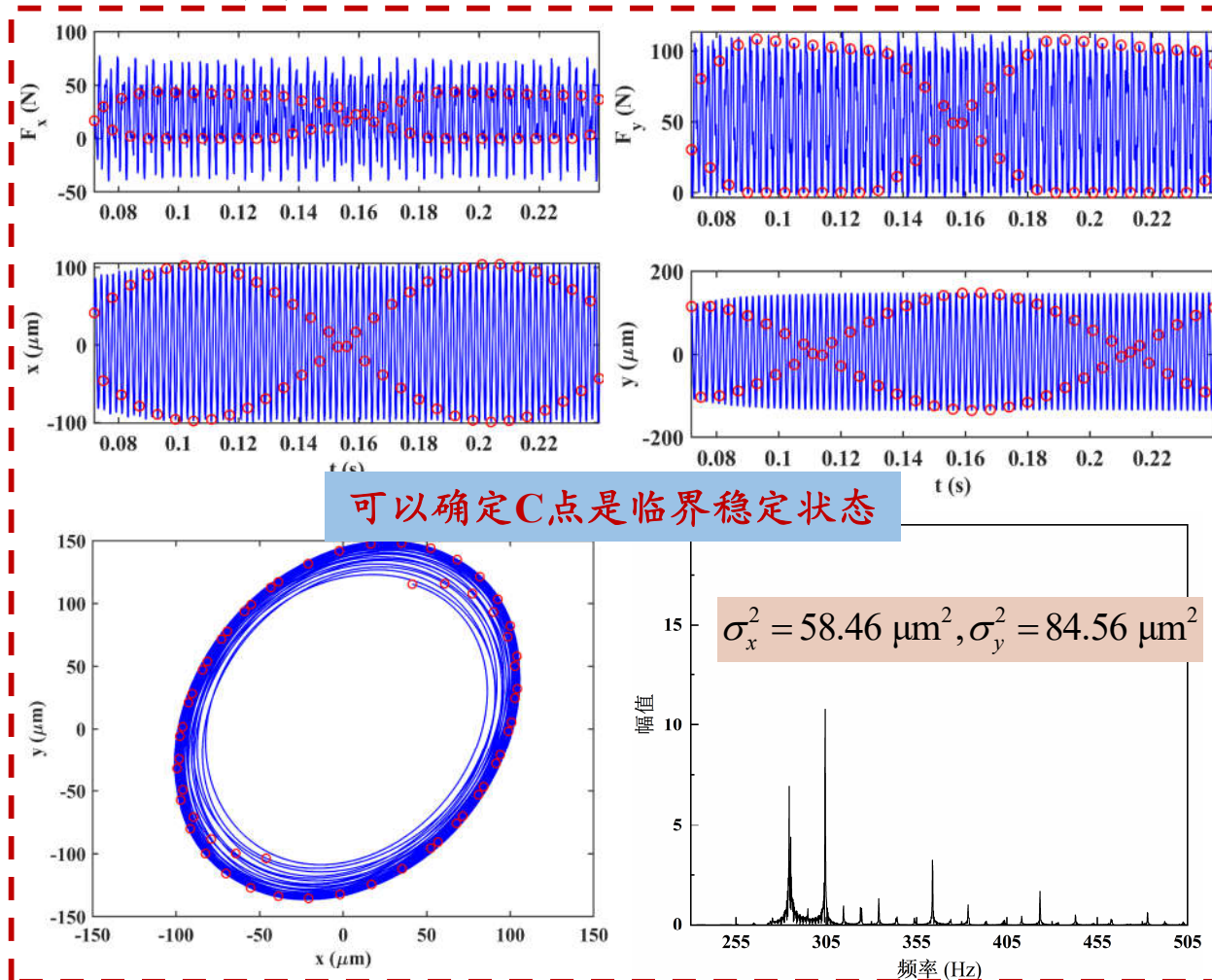
3.6 颤振稳定性时域仿真

在A($a_p=1.25$ mm, $n=8000$ rpm)、B($a_p=0.75$ mm, $n=5300$ rpm)、C($a_p=1$ mm, $n=6100$ rpm)时域仿真, 并间隔采样, 结合统计样本方差和刀尖点轨迹作为判断颤振的依据



3 铣削过程动力学建模及稳定性研究

3.6 颤振稳定性时域仿真



时域仿真判别出的稳定性结果与采用稳定性叶瓣图判定结果一致



- 1 研究背景
- 2 铣削力建模与试验分析
- 3 铣削过程动力学建模及稳定性研究
- 4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化**
- 5 钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证
- 6 总结与展望

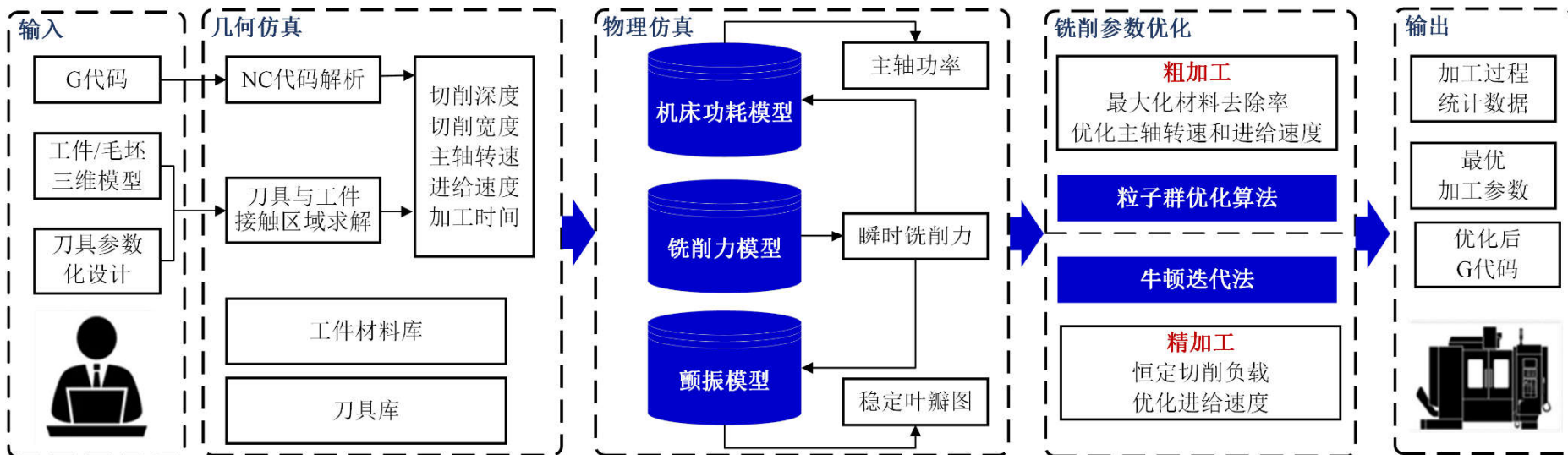




4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

4.1 铣削加工过程仿真

实现功能包括几何仿真、物理仿真以及加工参数优化



基于铣削加工过程仿真的加工参数优化

走刀轨迹间隔采样，
采样点处通过几何仿真求解加工区域几何参数

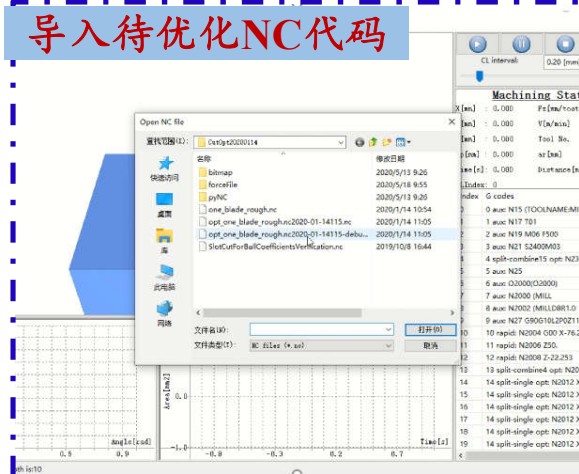
仿真结果为约束条件或优化目标，
建立优化模型，求解采样点处最优加工参数

输入物理模型计算加工过程中的物理量和物理现象，
如铣削力、主轴功率、振动和加工稳定性

4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

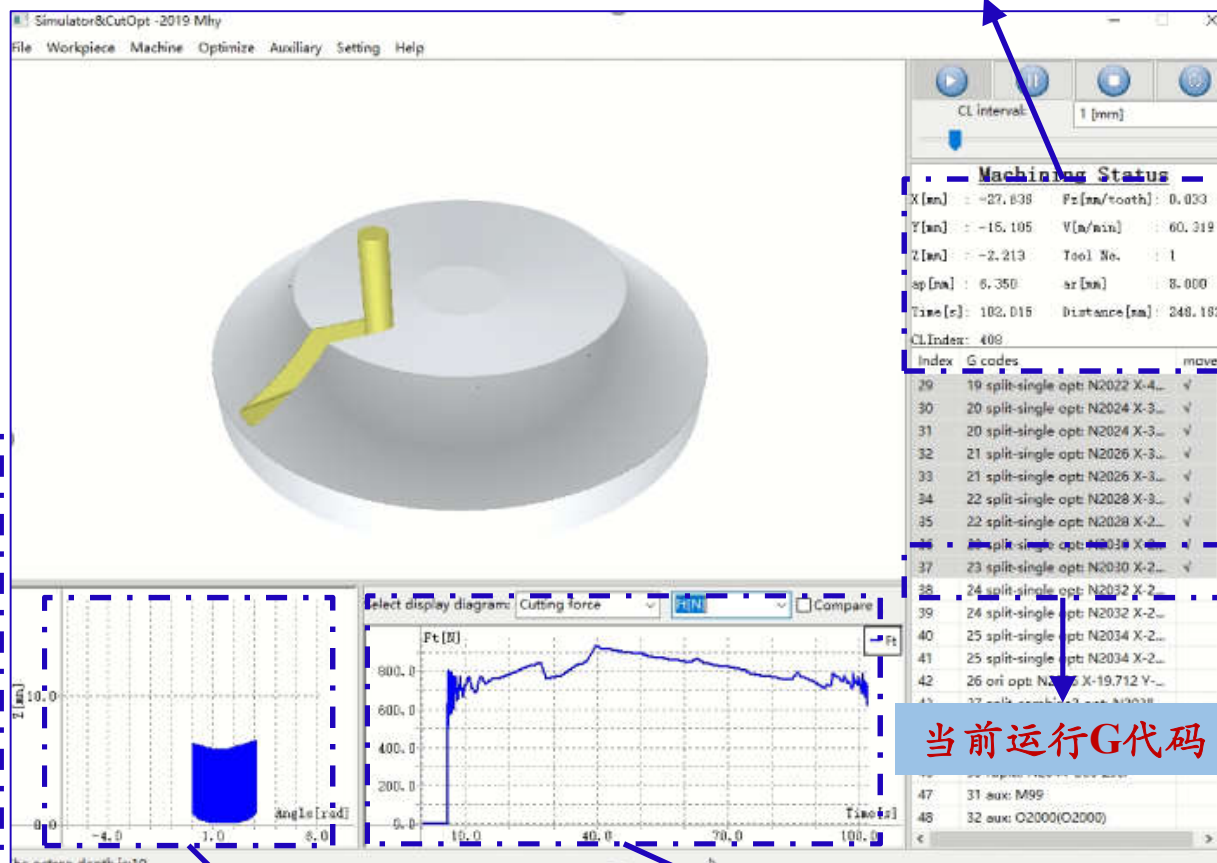
4.2 虚拟加工系统

导入待优化NC代码



主要设置步骤和用户界面

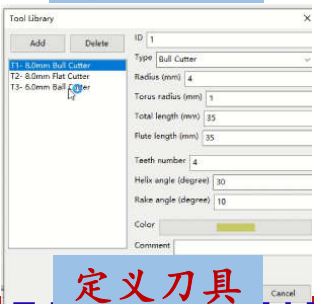
铣削加工状态:走刀距离和加工时间; 切削参数; 刀具位置



优化设置



导入毛坯



定义刀具

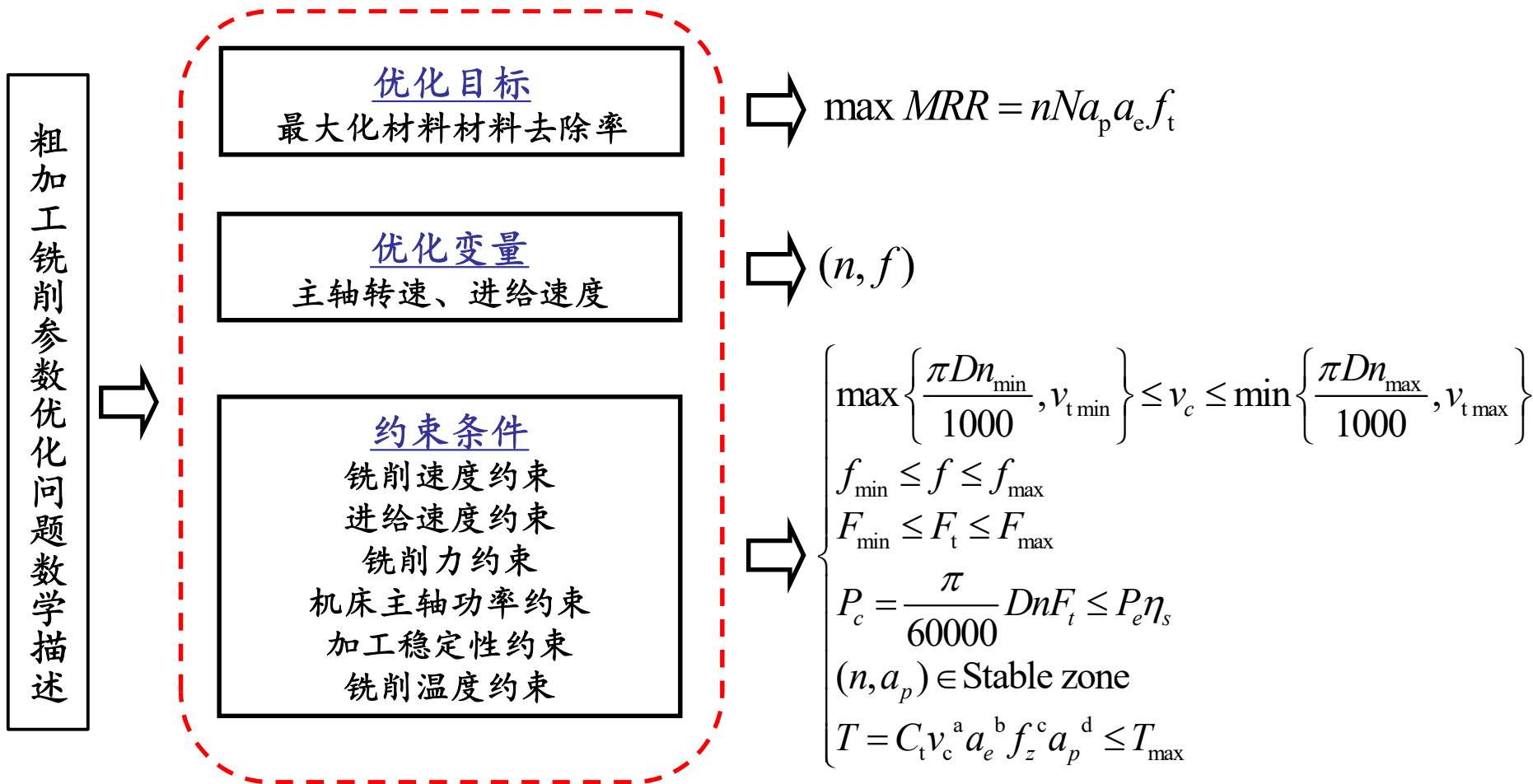
刀具-工件接触区域

实时铣削力计算



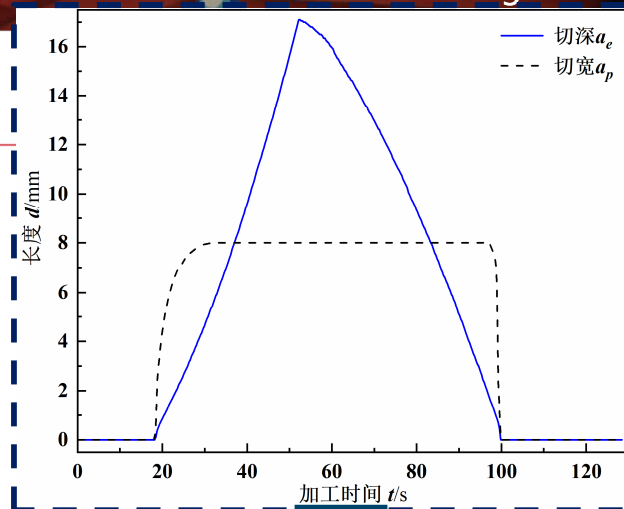
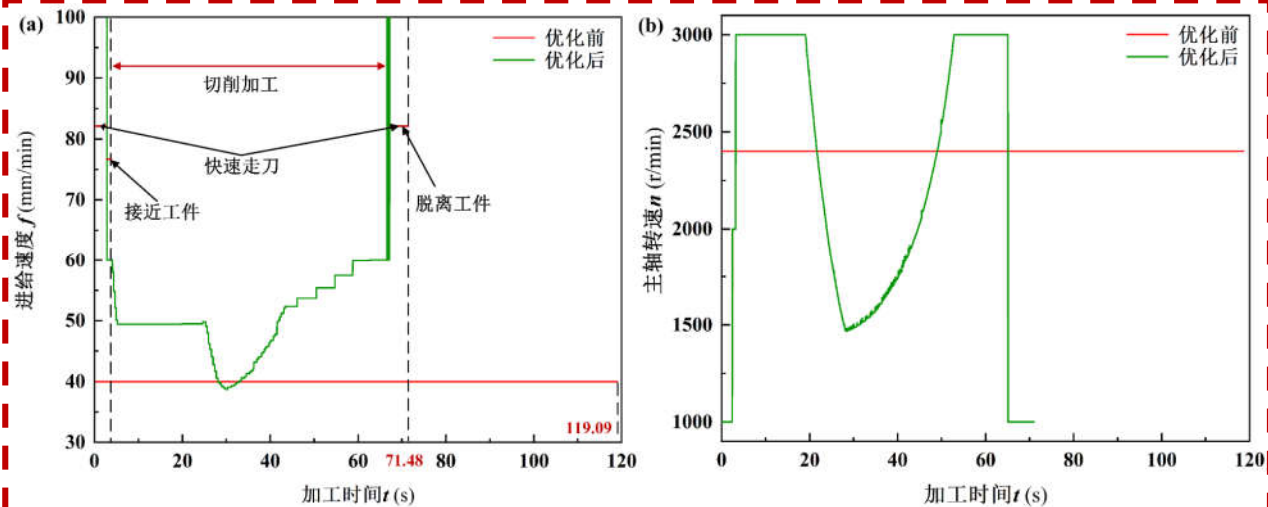
4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

4.3 基于粒子群算法的粗加工铣削参数优化



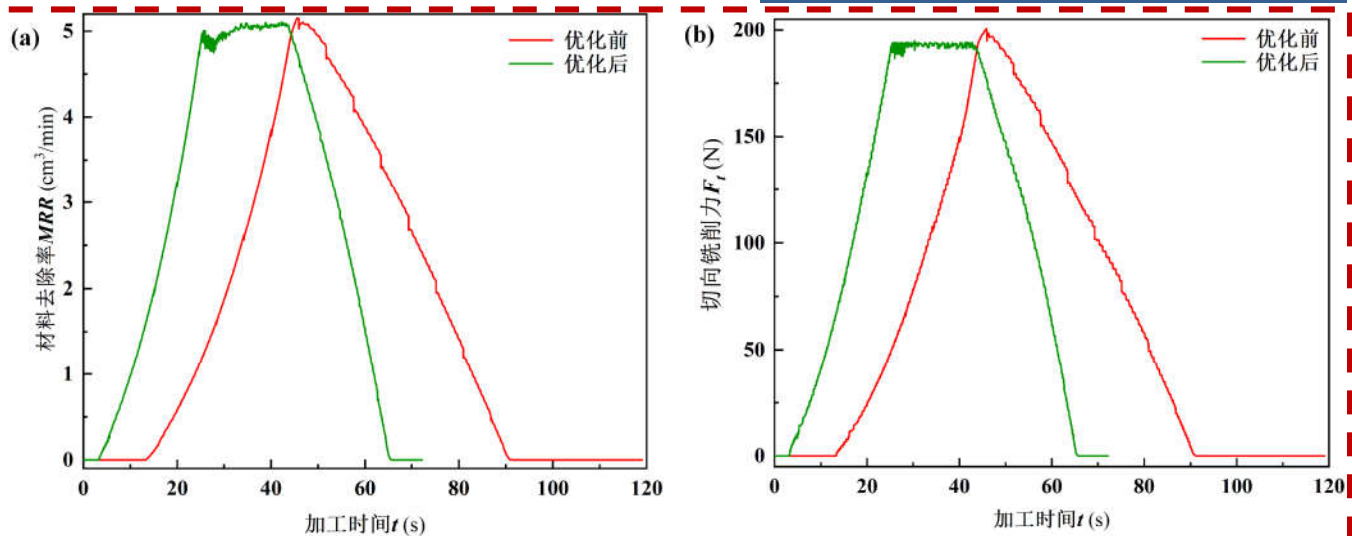
4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

4.3 基于粒子群算法的粗加工铣削参数优化



切削余量大的位置进给速度和主轴转速低，而在切削余量小的位置进给速度和主轴转速高

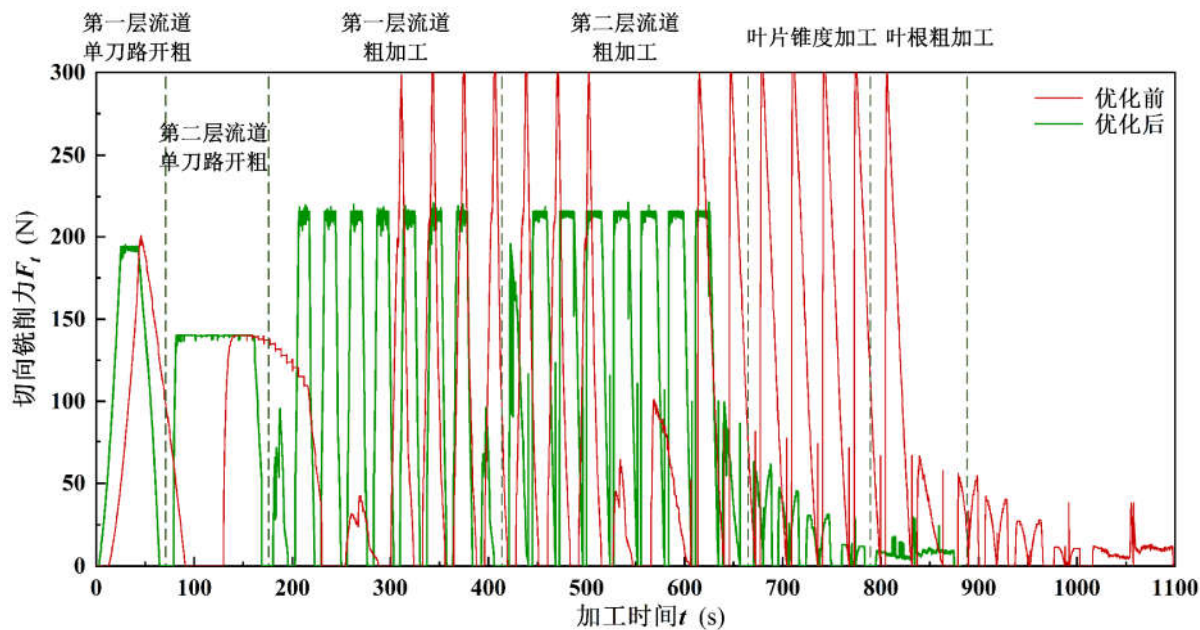
切削负载和材料去除率呈正比，材料去除率维持在 $5 \text{ cm}^3/\text{min}$ ，切削负载均衡且加工时间减小了 47.61 s





4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

4.3 基于粒子群算法的粗加工铣削参数优化

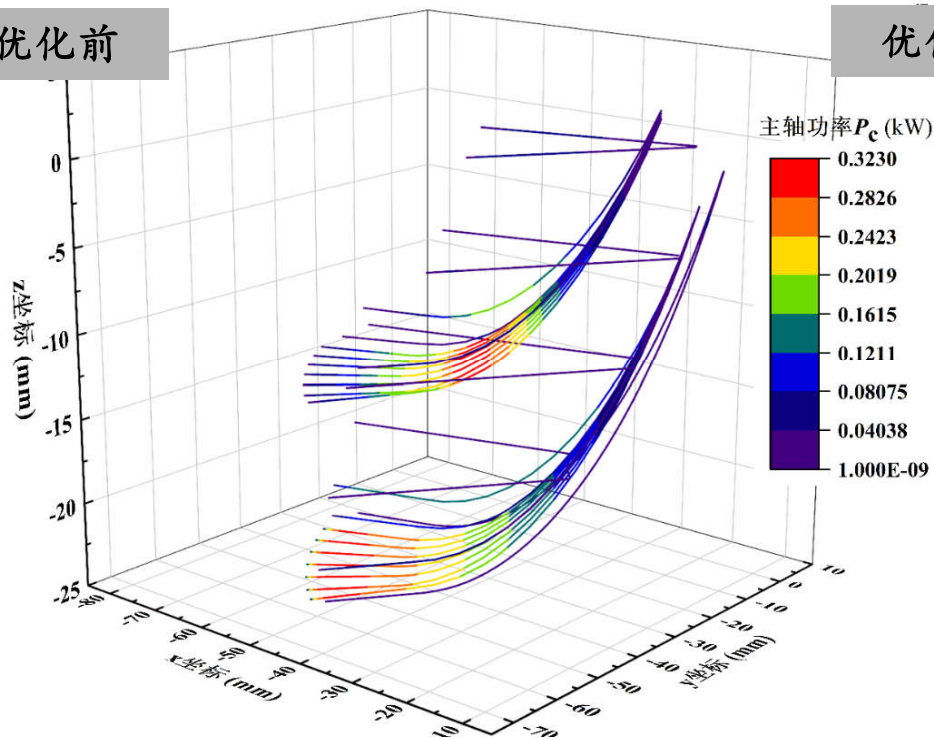


工序	优化前 (s)	优化后 (s)	效率提升
1	119.09	71.48	40.0%
2	125.17	97.58	22.0%
3	309.79	238.49	23.0%
4	309.84	244.89	21.0%
5	133.43	122.52	8.2%
6	89.32	85.24	4.6%
总加工时间	1096.64	860.20	20.8%

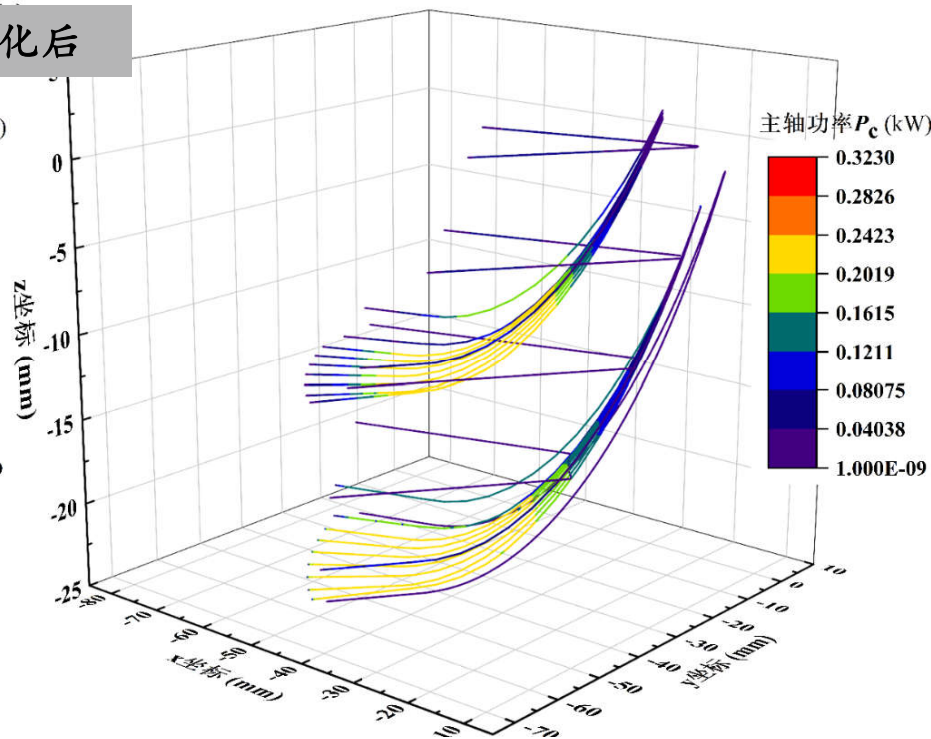
4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

4.3 基于粒子群算法的粗加工铣削参数优化

优化前



优化后



主轴功率是切向铣削力 F_t 与切削速度 v_c 的乘积，综合反映粗加工优化进给速度和主轴转速的效果，优化后流道第一层中间圆弧过度部位和第二层起始至中间部位负载分布更加均匀

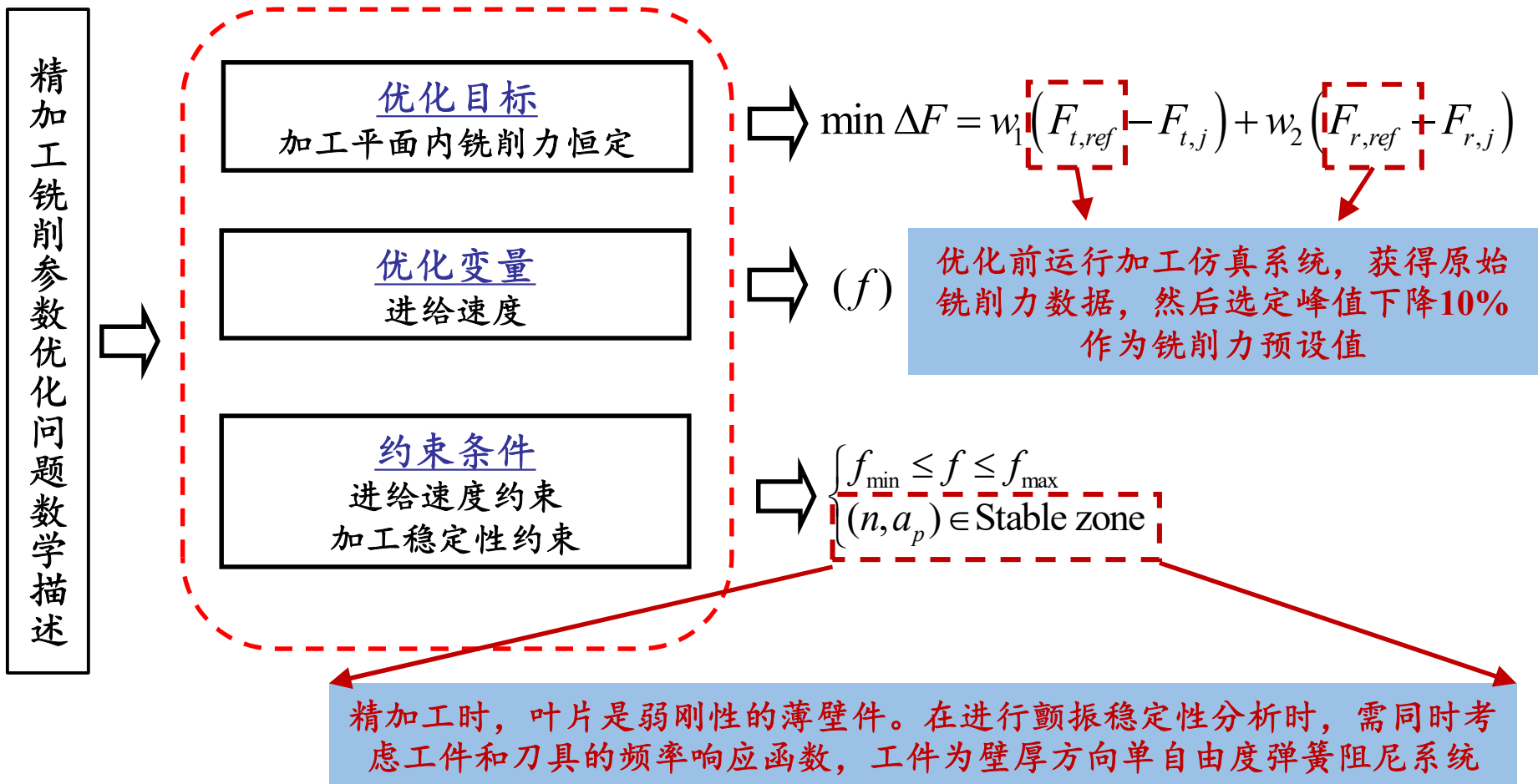
通过合理选择加工参数，可以在改进加工效率的同时使切削负载均衡



4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

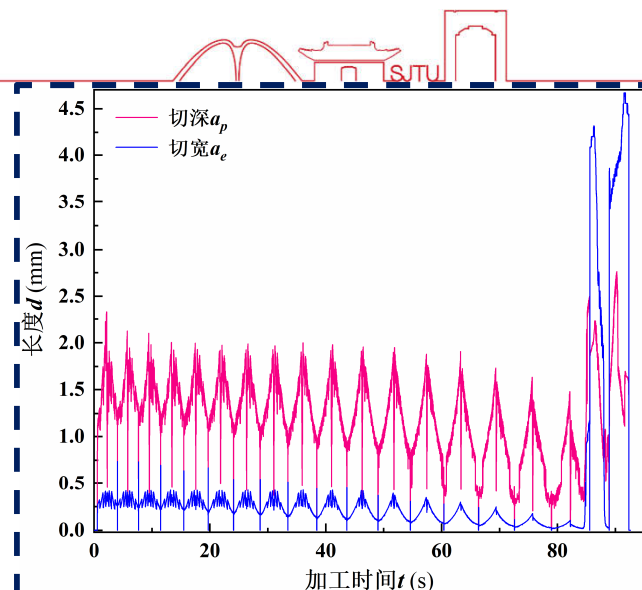
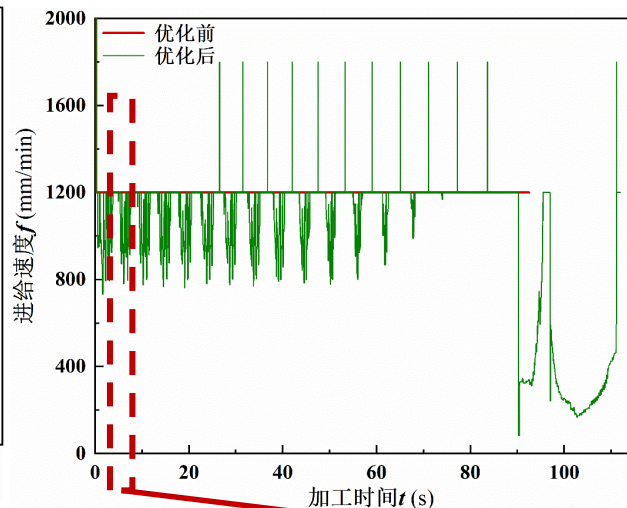
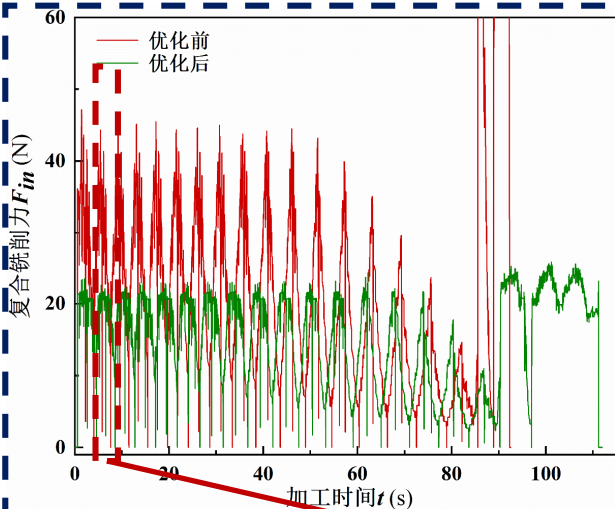
4.4 基于牛顿迭代法的精加工铣削参数优化

精加工切削余量小，优先保证加工表面质量，因此对切削负载均衡要求较高



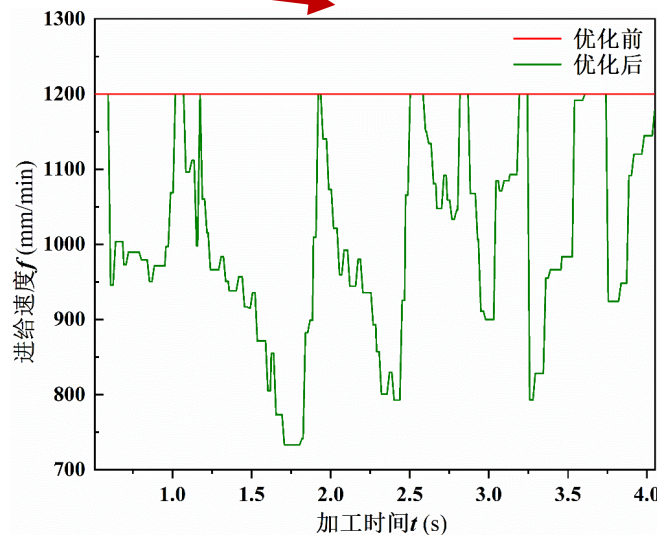
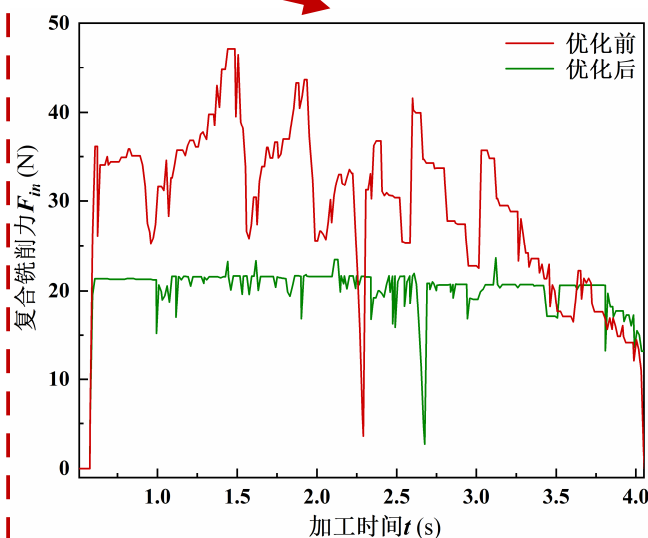
4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

4.4 基于牛顿迭代法的精加工铣削参数优化



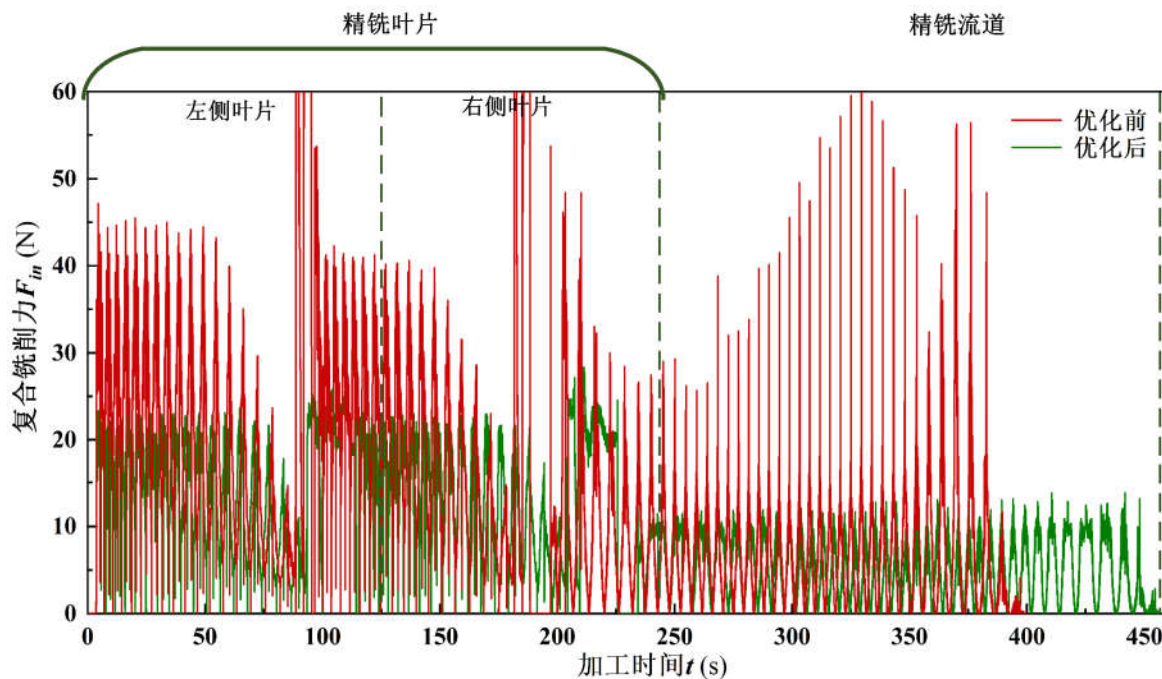
进给速度不断调整
以达到铣削
力均衡化

叶尖处一次走刀



4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

4.4 基于牛顿迭代法的精加工铣削参数优化

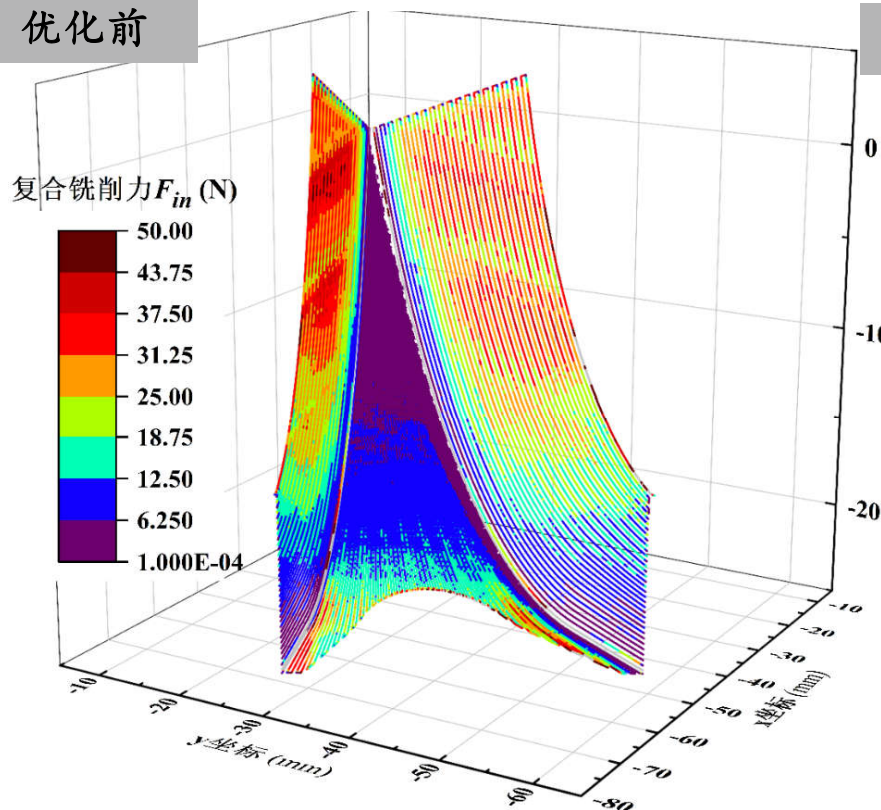


工序	加工时间(s)			平面复合铣削力变异系数		
	优化前	优化后	效率提升	优化前	优化后	波动性下降
精铣叶片	186.25	225.62	-21.1%	87.1%	26.7%	60.4%
精铣流道	229.87	227.39	1.1%	76.4%	17.3%	59.1%
总计	416.12	453.01	-8.9%	1.32	72.8%	59.2%

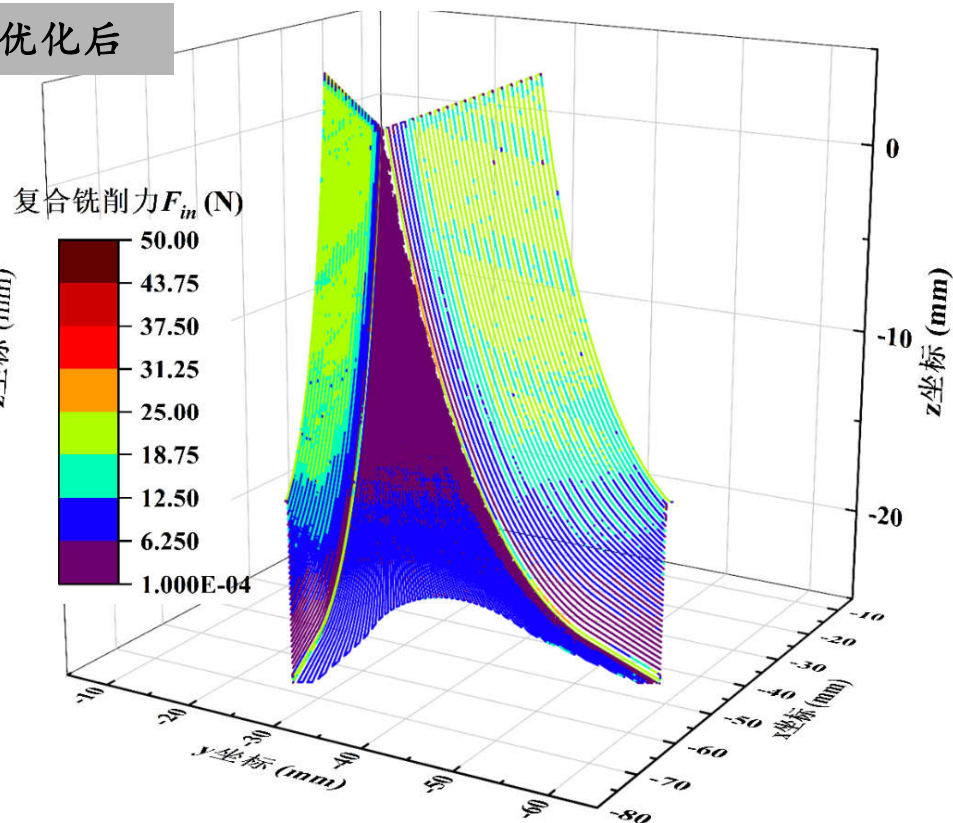
4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

4.4 基于牛顿迭代法的精加工铣削参数优化

优化前



优化后

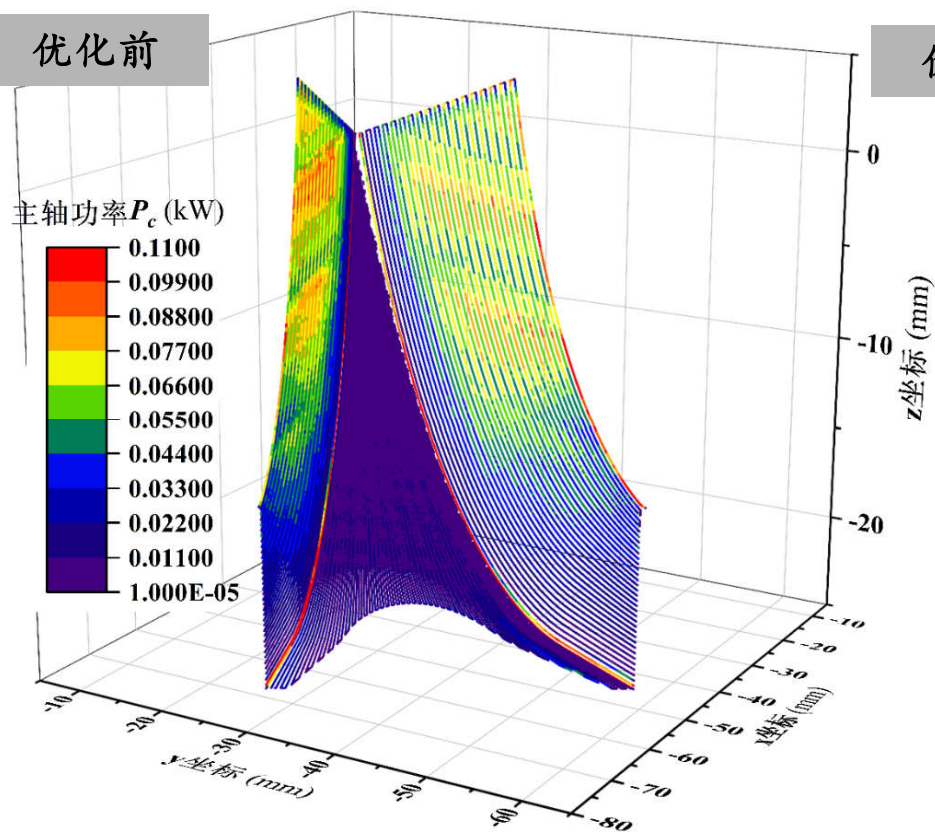


平面复合铣削力在流道左右两侧叶面上的更均衡，铣削力幅值减小，是叶片加工表面质量提高的重要依据

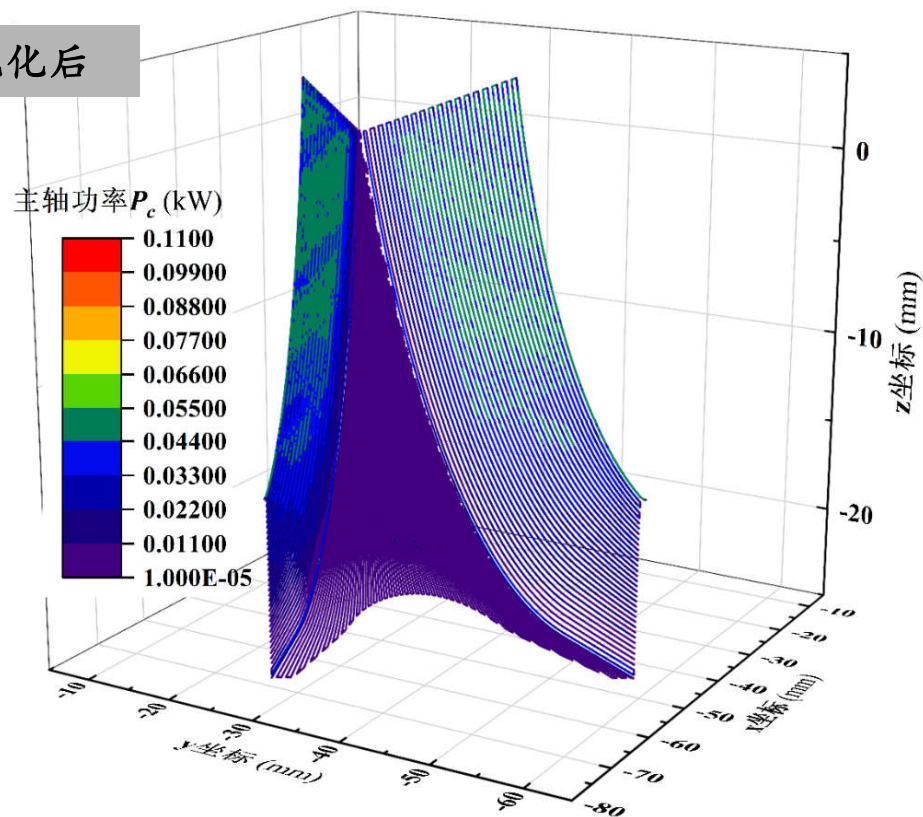
4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化

4.4 基于牛顿迭代法的精加工铣削参数优化

优化前



优化后



主轴功率分布也明显更加均衡，平均功率由48.57 W降到30.54 W，下降了37%

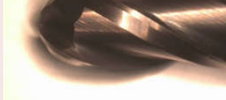


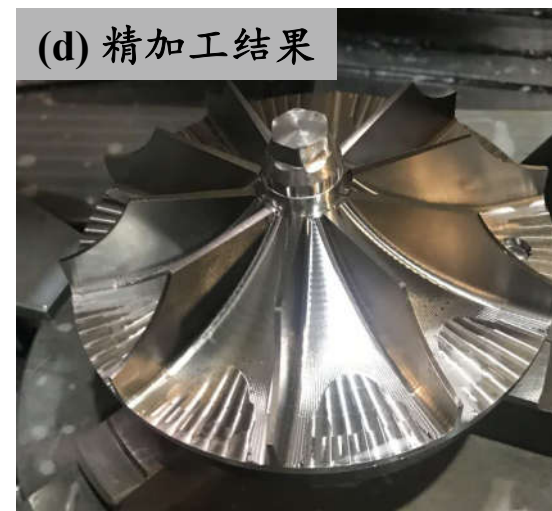
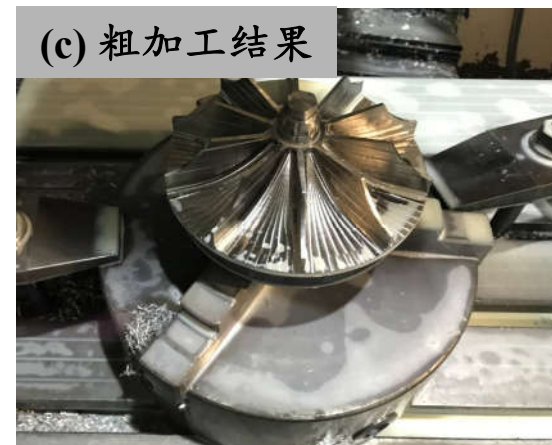
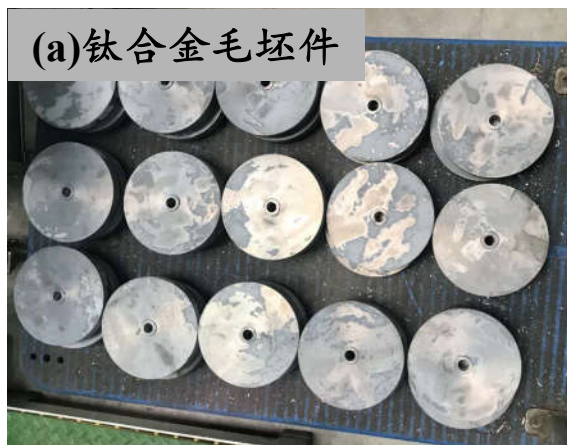
- 1 研究背景
- 2 铣削力建模与试验分析
- 3 铣削过程动力学建模及稳定性研究
- 4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化
- 5 钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证**
- 6 总结与展望



5 钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证

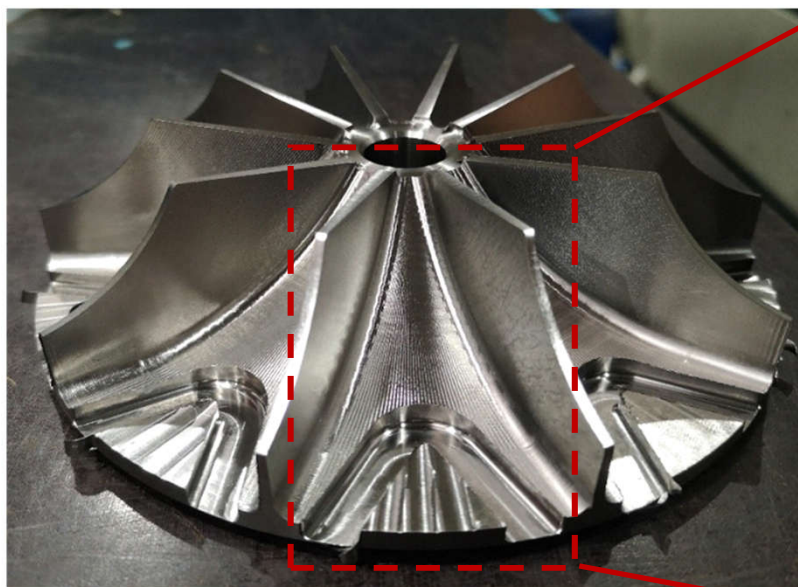
5.1 钛合金整体叶轮控铣削加工试验

工序	刀具刃口
01 第一层流道开槽 粗加工I	
02 第二层流道开槽 粗加工II	
03 第一层流道粗铣 粗加工III	
04 第二层流道粗铣 粗加工III	
05-06 叶片锥度、叶根 粗加工	
07-08 叶片（半）精加工 流道（半）精加工	

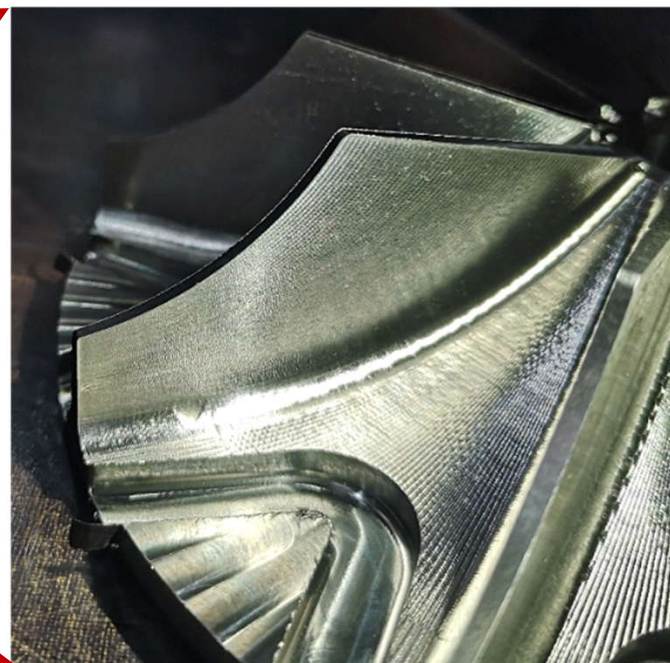


5 钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证

5.2 加工试验结果



钛合金整体叶轮成品



单个叶轮流道

- 在叶片根部和轮毂等难加工结构部位未见加工干涉和过切发生
- 加工过程无颤振，工艺系统稳定性好，有效地提高了整体叶轮加工表面质量



5 钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证

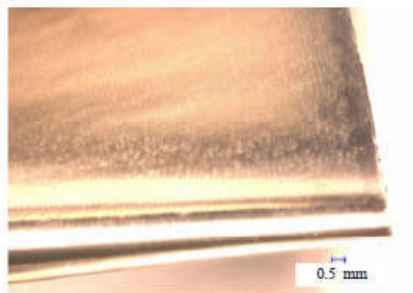
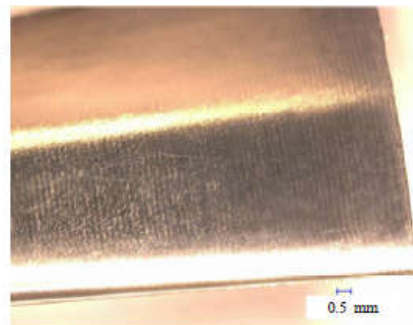
5.3 表面粗糙度检测

采用Mitutoyo SJ-210 表面粗糙度测量仪分别对整体叶轮样件叶片吸力面与压力面不同位置进行多次测量

Ra(μm)	测量1	测量2	测量3	测量4	测量5	测量6
吸力面	0.631	0.566	0.743	0.693	0.735	0.89
压力面	0.856	0.946	0.823	0.867	1.046	0.984



叶片吸力面表面粗糙度均值为Ra 0.730 μm，叶片压力面表面粗糙度均值为Ra 0.885 μm，叶片压力面表面粗糙度值高于叶片吸力面。叶片表面粗糙度设计要求值为Ra 1.6 μm



叶片加工表面微观几何形状误差满足其设计要求

5 钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证



5.4 加工效率

编号	工序	加工阶段	优化前	优化后	优化效果
1	第一层流道开槽	粗加工	1h22min	3h56min	21.8%
2	第一层流道开槽		1h25min		
3	第一层流道粗铣削		2h15min		
4	第二层流道粗铣削				
5	叶片锥度加工				
6	叶根粗铣削				
7	精铣叶片	精加工	2h50min	3h4min	-8.2%
8	精铣流道				
9	铣削缺口	辅助工序	20min	20min	---
10	光刀(无余量)		15min	15min	---
	总计		8h27min	7h45mim	10.2%

需要注意：虚拟加工系统中单个叶轮流道加工效率提高了11.05%，现场加工生产效率提高了10.2%，考虑到机床加减速性能达不到要求出现滞后现象，以及换刀时间，和理论值有出入

- 通过加工参数优化，加工效率提高10.2%
- 粗加工刀具由原来1件/把提高至2件/把，刀具磨损速率降低
- 通过了产线150件以上的长期验证，加工零件满足产品精度、表面粗糙度相关要求



- 1 研究背景
- 2 铣削力建模与试验分析
- 3 铣削过程动力学建模及稳定性研究
- 4 钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化
- 5 钛合金整体式叶轮铣削加工工艺验证
- 6 总结与展望**





6 总结与展望

6.1 总结

- 研究了数控铣削加工过程物理仿真中最重要的物理量：铣削力，分别建立圆柱立铣刀和球头铣刀的铣削力模型，并通过切削试验进行切削力系数辨识，与试验数据对比分析，验证了模型的准确性。
- 研究了铣削加工再生颤振现象，基于刀具-机床系统模态试验分析结果和铣削过程动力学模型，使用零阶频域法对铣削稳定性进行预测，并结合铣削动力学模型和动态铣削力模型进行时域仿真，并根据x、y平面铣削力和刀尖位移仿真结果预测铣削系统的稳定性做了论述。
- 研究了复杂走刀轨迹数控铣削变参数优化，结合几何仿真和物理仿真，建立虚拟加工系统，并据此开展基于材料去除率和切削负载的钛合金整体叶轮数控铣削加工参数优化。
- 提出了环控系统钛合金整体叶轮全流程数控铣削加工工艺方案，开展叶轮试件加工试验，结果验证了虚拟加工系统中基于几何物理仿真铣削参数优化结果的准确性和可靠性。

6.2 展望

- 对叶片铣削加工叶轮加工表面质量、尺寸精度以及表面完整性基础数据进行研究，找出其与叶片使用性能及铣削加工工艺的内在联系，建立基于叶轮使用性能要求的数控虚拟加工仿真优化系统，从而实现对整体叶轮数控铣削工艺的深度优化。
- 针对现有数控加工系统的不足，可通过力、温度传感器及机床主轴功率监测等手段在线监测数控切削加工过程的切削物理数据，并实时导入数控系统对切削参数进行负反馈调节，建立智能铣削数控系统。

学术成果 — 期刊论文(其中SCI一作论文1篇, EI一作论文2篇)



1. **Z. Tao**, Q. An, G. Liu, M. Chen. A Novel Method for Tool Condition Monitoring Based on Long Short-Term Memory and Hidden Markov Model Hybrid Framework in High-Speed Milling Ti-6Al-4V. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105 (2019) 3165-3182. (SCI收录,一作,发表, IF=2.496)
2. Q. An&, **Z. Tao**&, X. Xu, M. El Mansori. A Data-driven Model for Milling Tool Remaining Useful Life Prediction with Convolutional and Stacked LSTM Network. *Measurement*, 154 (2020) 107461. (SCI收录,共一作,发表, IF=2.791)
3. J. Li, **Z. Tao**, X. Cai, Q. An, M. Chen. Experimental and finite element analysis of the formation mechanism of serrated chips of nickel-based superalloy Inconel 718 [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, (2020). (SCI收录,二作,Online, IF=2.496)
4. Q. An, J. Chen, **Z. Tao**. Experimental investigation on tool wear characteristics of PVD and CVD coatings during face milling of Ti-6242S and Ti-555 titanium alloys. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 86 (2020) 105091. (SCI收录,三作,发表, IF=2.794)
5. C. Cai, X. Liang, Q. An, **Z. Tao**. Cooling/Lubrication Performance of Dry and Supercritical CO₂-based Minimum Quantity Lubrication in Peripheral Milling Ti-6Al-4V. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, (2020) 1-17. (SCI收录,四作,发表, IF=4.561)
6. **陶正瑞**, 党嘉强, 徐锦泱, 等. 曲面基体绝缘涂镀层涡流测厚高精度标定方法 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019. (EI收录,一作,录用)
7. **陶正瑞**, 党嘉强, 徐锦泱, 等. 基于支持向量机回归的曲面零件涡流测距标定方法[J]. *上海交通大学学报*, 2019. (EI收录,一作,录用)
8. **陶正瑞**, 陈杰, 安庆龙, 等. CFRP及叠层结构螺旋铣孔专用刀具切削性能评价[J]. *工具技术*, 54 (2020) 22-27. (中文核心,一作,发表)
9. 党嘉强, **陶正瑞**, 徐锦泱, 等. 聚氨酯泡沫绝热层高效精密打磨装置设计与建模[J]. *机床与液压*, 48 (2020) 59-62. (中文核心,二作,发表)

学术成果 — 会议论文与国家发明专利



学术会议

1. **Z. Tao**, G. Liu, Q. An*. Hierarchical Dirichlet Process Hidden Semi-Markov Model-based Method for Tool Wear Estimation in High-Speed Milling Ti-6Al-4V. *The 8th International Conference on High Speed Machining (ICHSM 2018)*, Guangzhou, China, 22-24, November 2018.
2. **Z. Tao**, Q. An*, M. Chen. Cutting Performance Evaluation of Helical Milling Specialized Tool for CFRP/Titanium Alloy. *The 14th China-Japan International Conference on Ultra-Precision Machining Process (CJUMP2018)*, Harbin, China, 13–15 September 2018.

国家发明专利

专利名称：金属表面涂镀层厚度的非接触式测量方法及装置(实质审查)

公开号：CN109141325A

发明人：陈明; 任斐; **陶正瑞**; 刘公雨; 张崇印; 徐锦泱; 郭立杰; 安庆龙; 明伟伟

谢谢各位老师！
欢迎指正！



上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

上海交通大学

