



叶轮加工仿真及进给速度优化

陶正瑞

2019.08



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

1

叶轮现有加工方案

2

虚拟仿真及参数优化平台

3

几何与物理仿真

4

进给速度优化效果

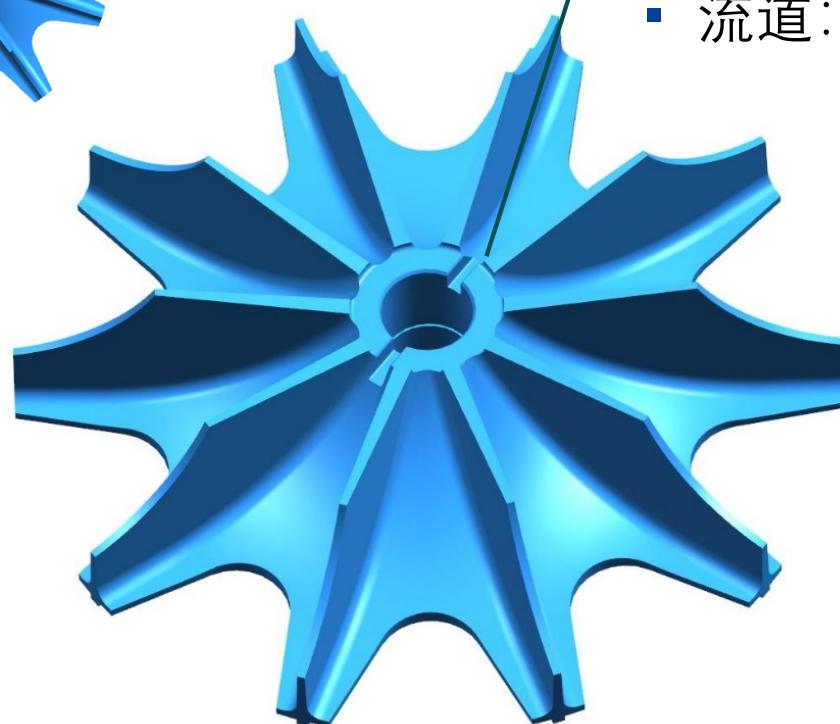
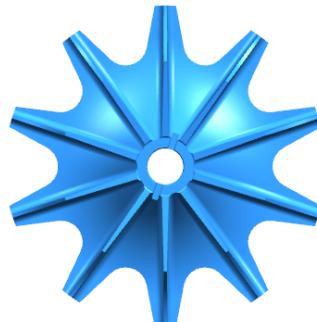
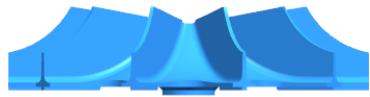
5

总结

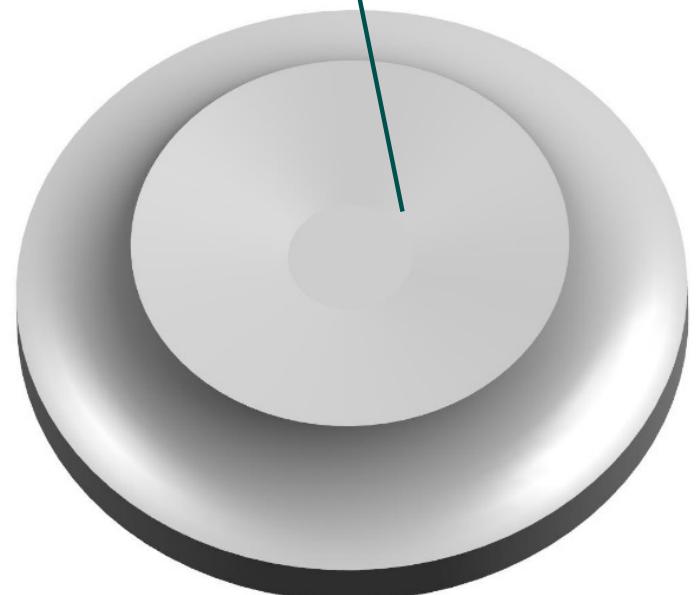




1.叶轮零件



- 材质: 钛合金 (TC6)
- 直径: 150mm
- 高度: 37mm
- 流道: 10个



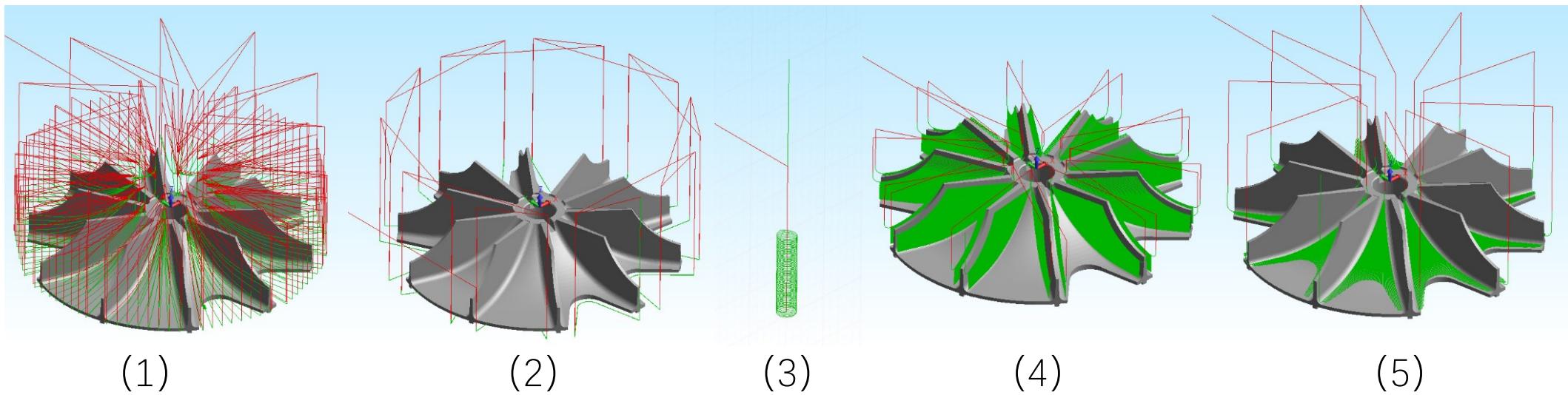
▪ 毛坯



1.1叶轮现有加工方案

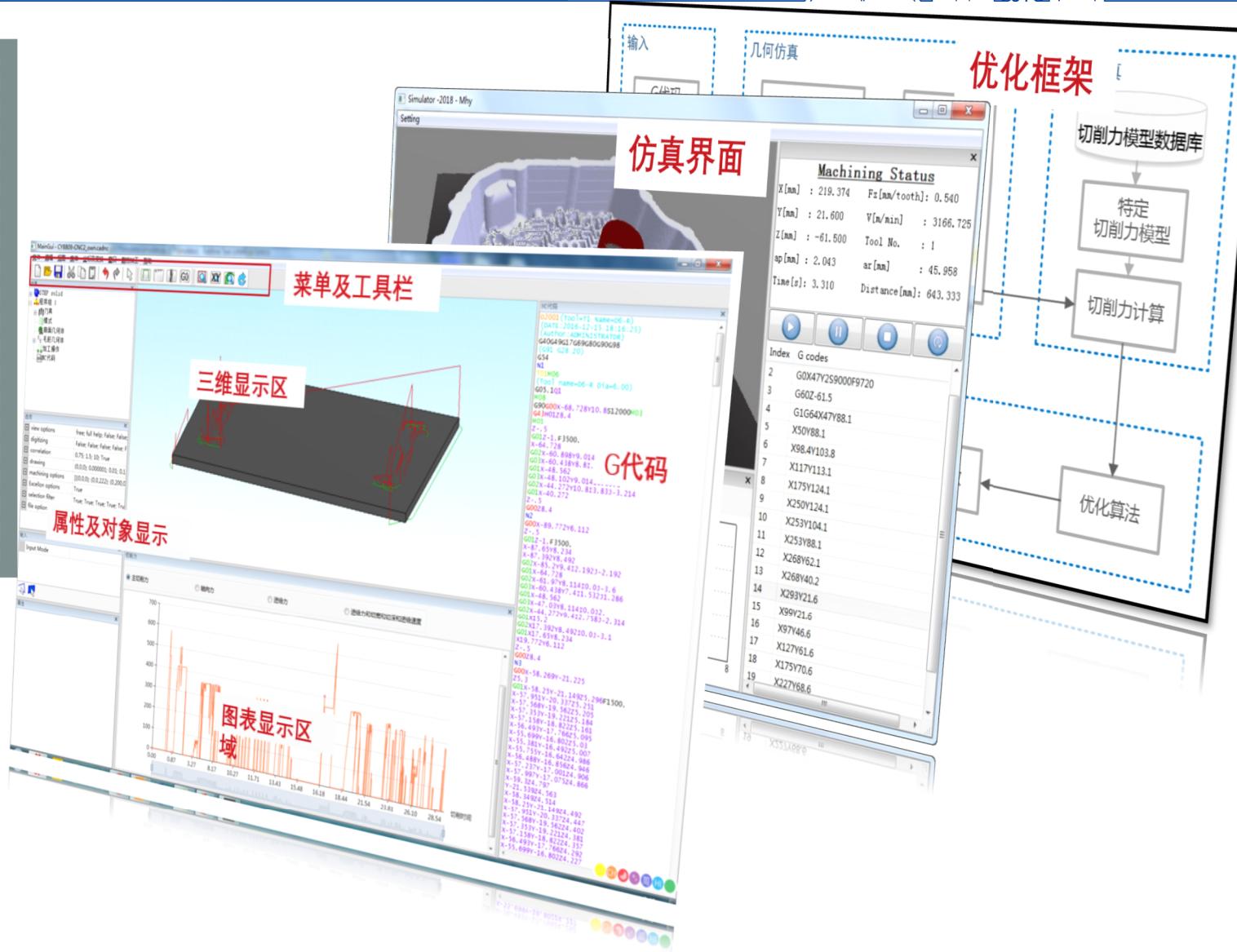
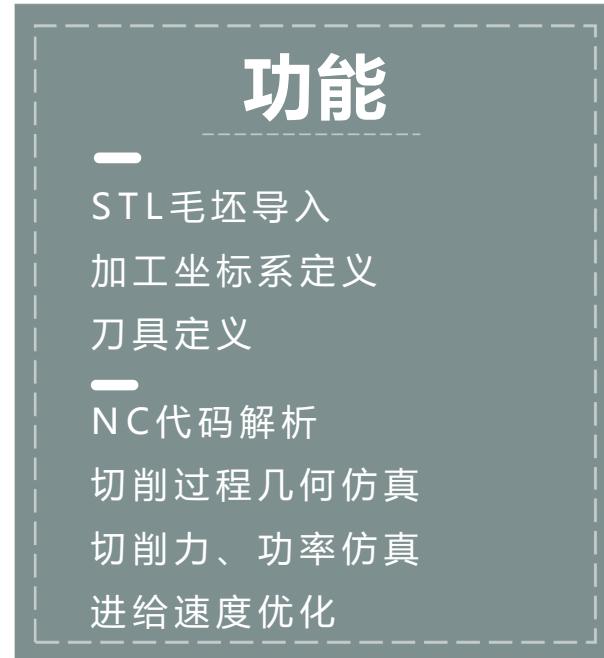


工序	说明	NC文件	刀具
1	开粗	121-1-cuxi.nc	D8R1
2	铣槽 (缺口)	121-2-xicao.nc	D8R1
3	螺旋铣孔	121-3-xikong.nc	D6
4	精铣叶片	121-4-YP-JINGXI.nc	D6R3
5	精加工流道	121-5-xiliudao.nc	D6R3





2. 虚拟仿真及参数优化平台





2.1 虚拟加工仿真系统模块



- 数控程序解析
- 包含刀具、工件和夹具的虚拟机床
- 材料去除过程仿真
- 碰撞检测
- 支持STL毛坯导入



- 瞬时切削力计算与输出
- 刀具磨损状况仿真
- 刀具寿命预估
- 表面粗糙度仿真
- 主轴跳动情况仿真



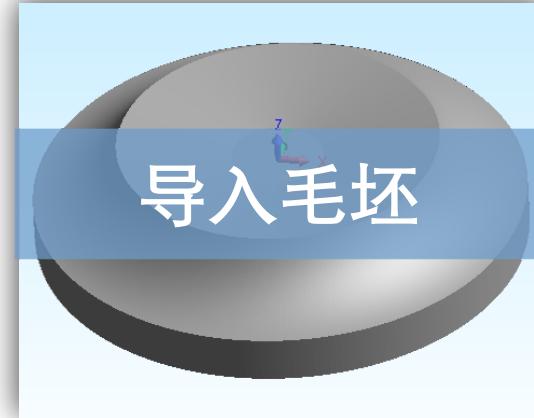
- 基于给定切深、切宽等加工参数，对进给速度、主轴速度进行自适应优化
- 给定加工参数范围，实现多目标自动寻优



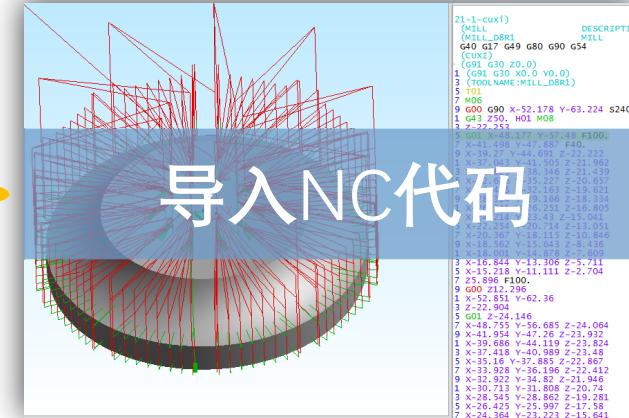
2.2 仿真平台使用步骤



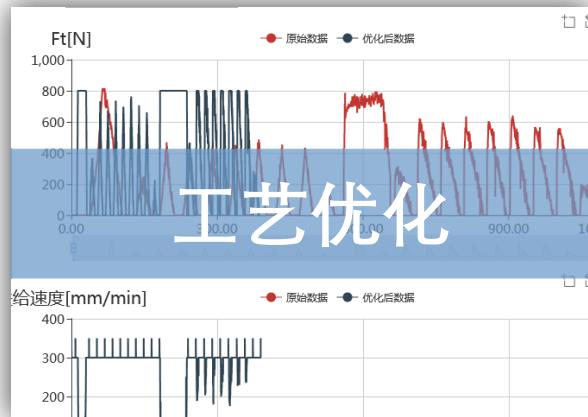
定义坐标系



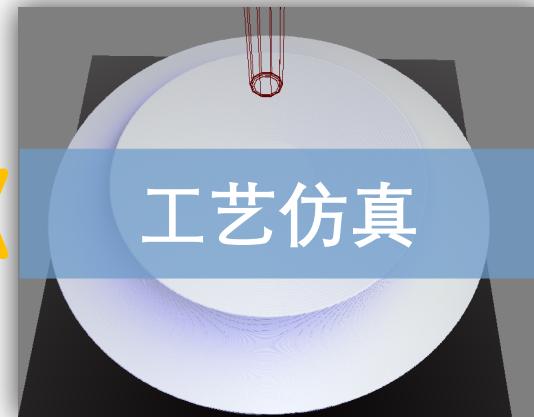
导入毛坯



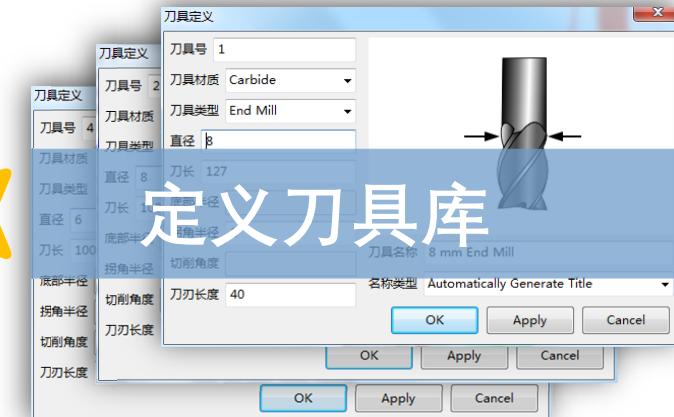
导入NC代码



工艺优化



工艺仿真



定义刀具库

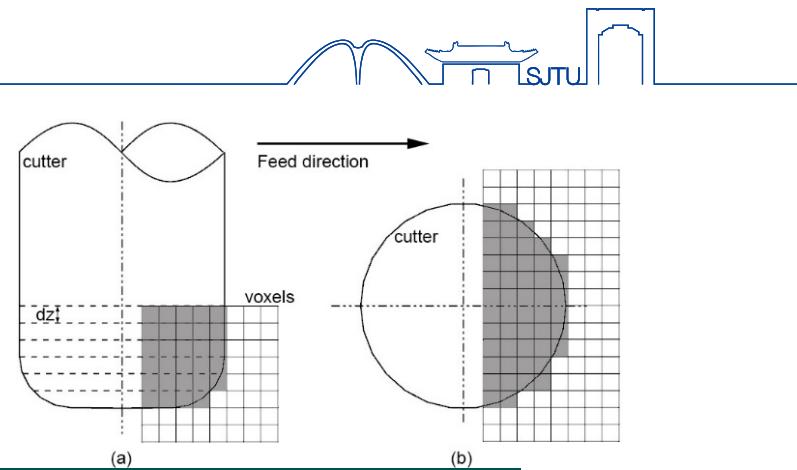




3.1 几何及物理仿真理论

▪ 几何仿真

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）



▪ 物理仿真

➤ 基于微元法计算切削力

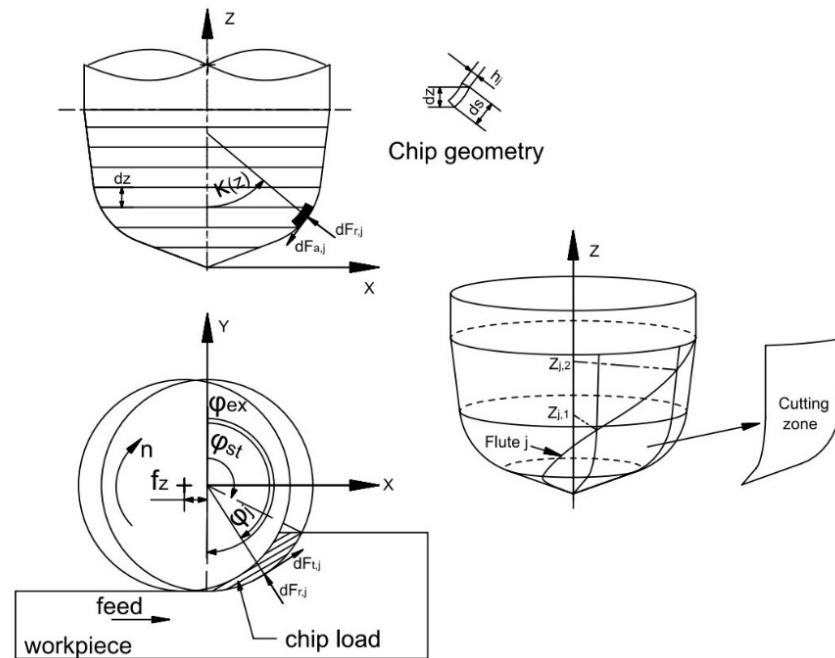
$$\begin{cases} dF_{t,j}(\phi, z) = (K_{tc} h_j(\phi, z) + K_{te}) ds \\ dF_{r,j}(\phi, z) = (K_{rc} h_j(\phi, z) + K_{re}) ds \\ dF_{a,j}(\phi, z) = (K_{ac} h_j(\phi, z) + K_{ae}) ds \end{cases}$$

TC6切削力系数

K_{tc} [N/mm ²]	K_{rc} [N/mm ²]	K_{ac} [N/mm ²]	K_{te} [N/mm]	K_{re} [N/mm]	K_{ae} [N/mm]
1785	461	610	26	43	6

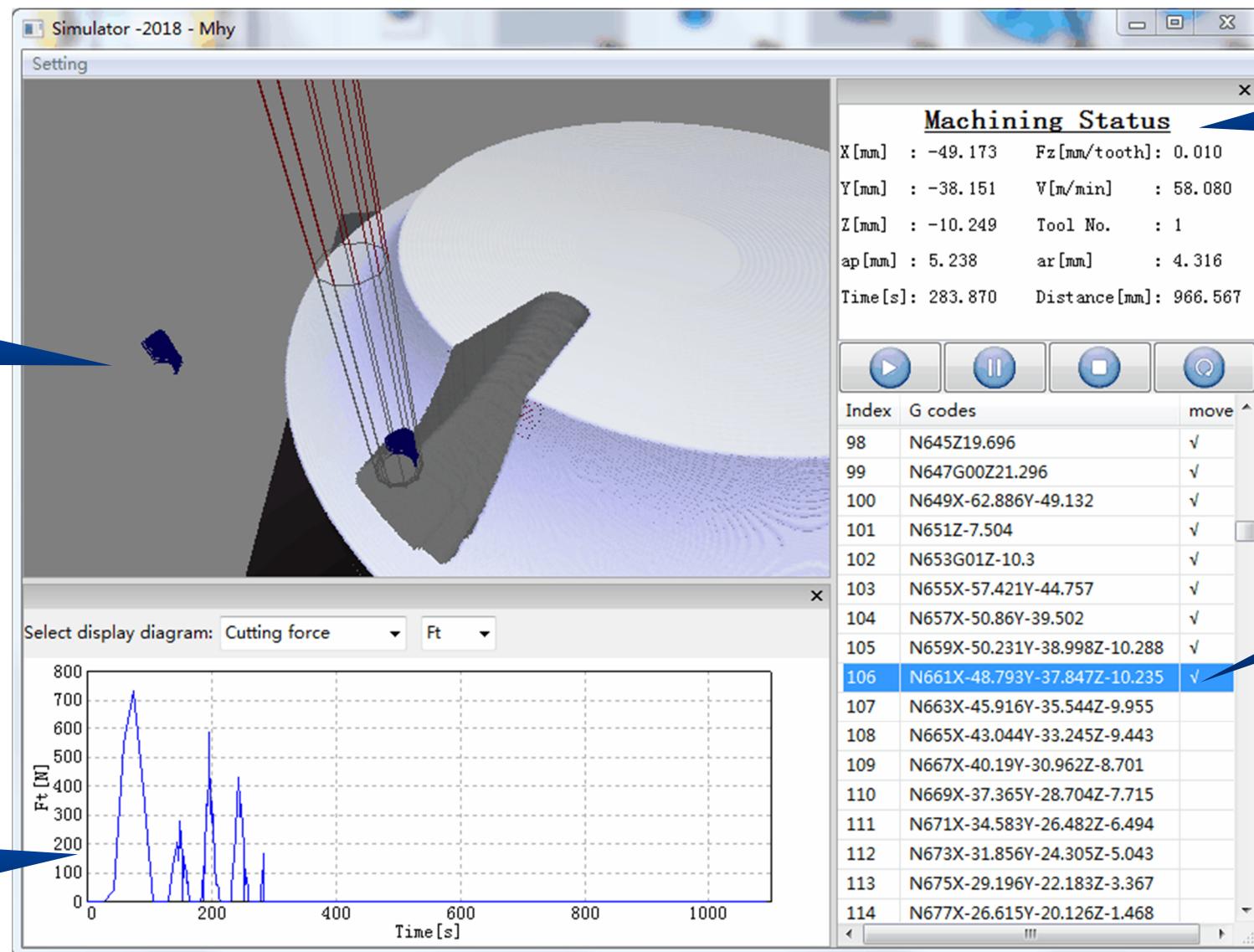
➤ 切削功率基于切削力进行估算

$$P(\phi) = \frac{\pi D n F_t(\phi)}{60000}$$





3.2 几何及物理仿真动画及效果





4. 工艺优化



- 优化目标

- 使最终的铣削力平稳、均匀分布，减少突变
- 降低加工时间，提高加工效率，降低加工成本

- 优化方法

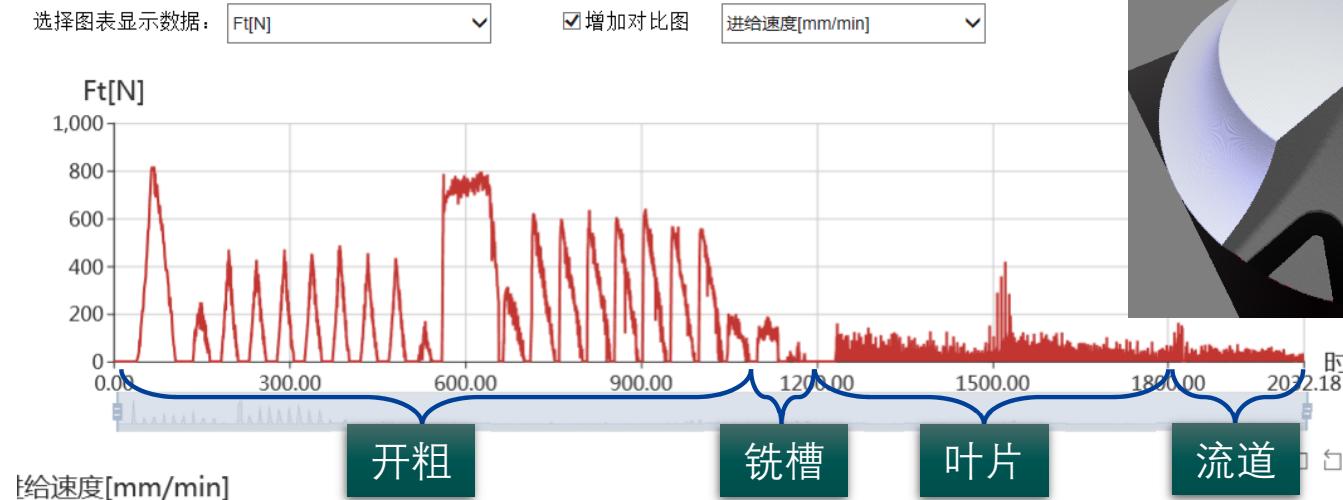
- 在满足不超过给定的最大铣削力情况下，尽量提高进给速度
- 当前铣削力大于最大铣削力时，降低进给
- 当前铣削力小于最大铣削力时，提高进给

因采用微元法，通过积分获得了切削力，故不同于经验公式，无法在给定切削状态下基于给定切削力直接反求相应的进给速度。在优化过程中，需要计算满足条件的进给速度时，假定进给速度与切削力是线性关系，采用如下的迭代公式寻找目标进给速度值。

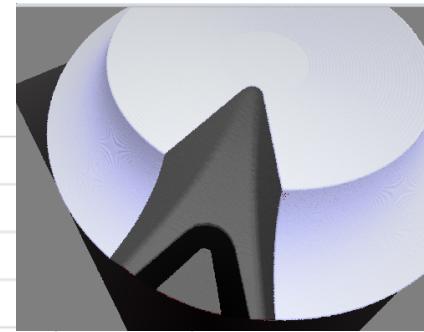
$$f_{next} = f_0 + \frac{f_m - f_0}{F_m - F_0} \cdot (F_{target} - F_0)$$



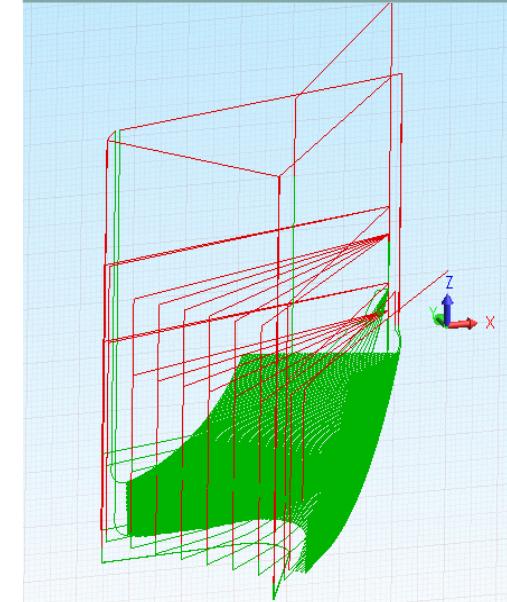
4.0 单个流道的铣削加工步骤仿真结果



工序	说明	刀具	加工时间
1	开粗	D8R1	1092s (18.2min)
2	铣槽 (缺口)	D8R1	100s (1.67min)
4	精铣叶片	D6R3	635s (10.6min)
5	精加工流道	D6R3	204s (3.4min)



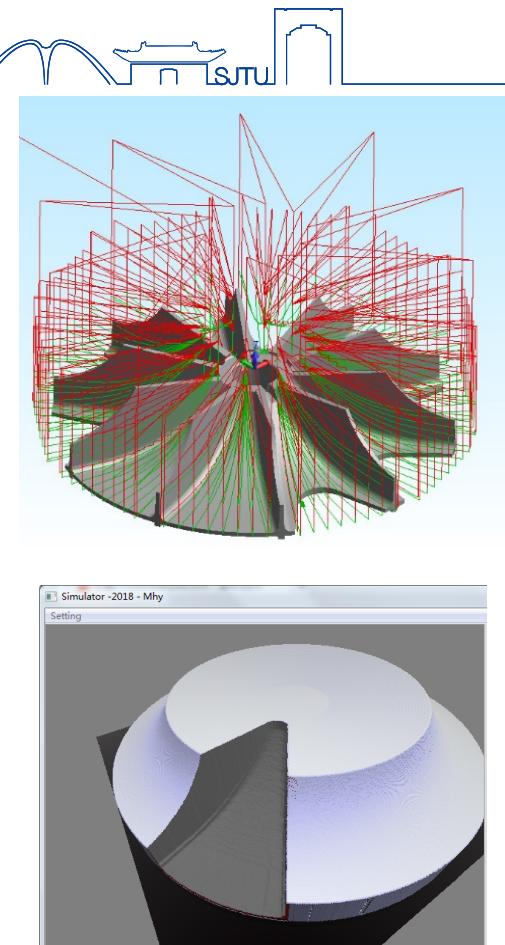
因叶轮的十个流道加工轨迹相同，故仅对一个流道的加工过程进行仿真优化。





4.1-工序1开粗仿真及优化结果

▪ 仿真结果



- 理论加工时间：1092s
- 因采用“流线”式刀轨，在每一道加工中，切削深度变化较大，可提高切削深度较小的NC代码段的进给速度，提高加工效率。

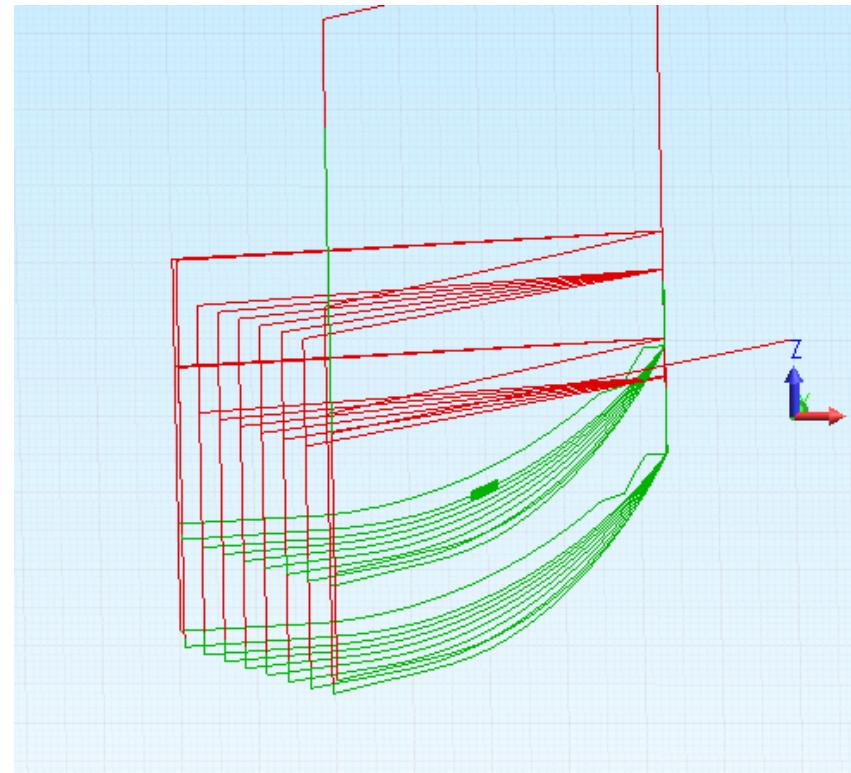


4.1-工序1开粗仿真及优化结果



- **说明：**

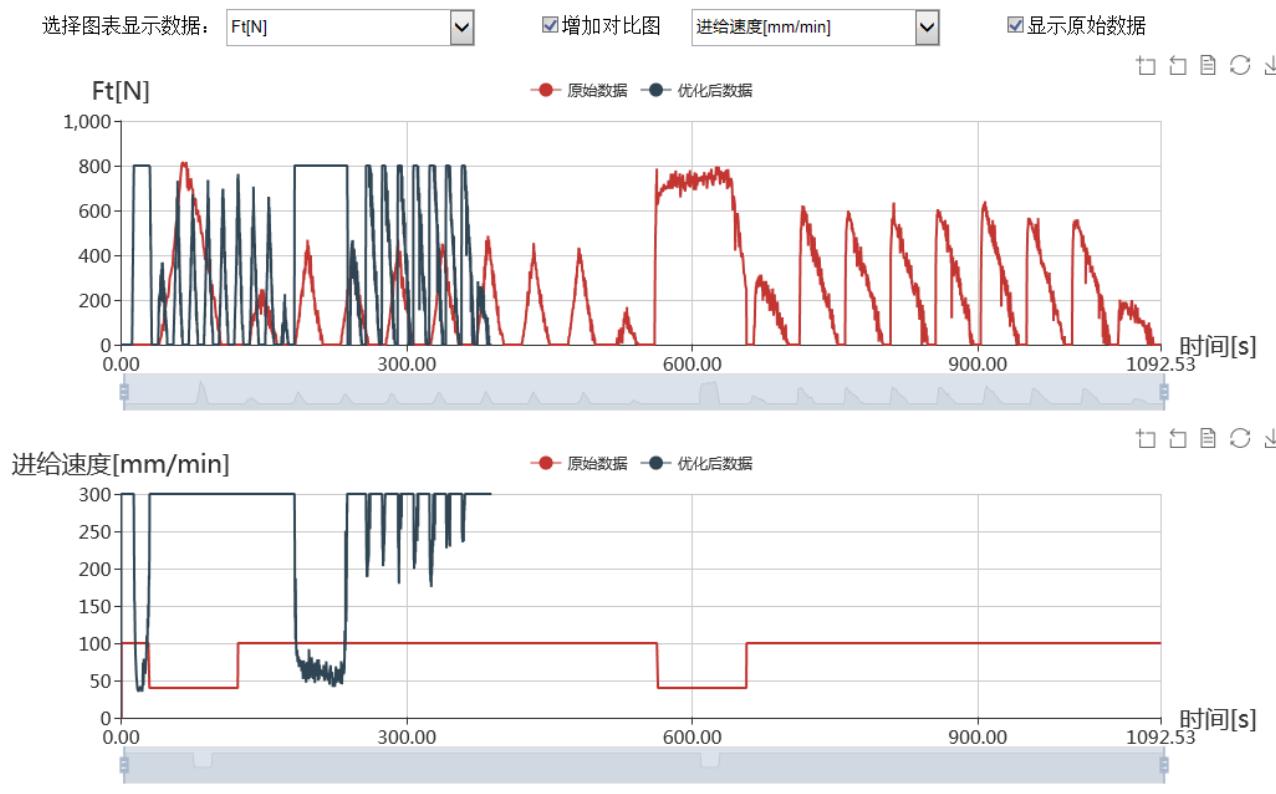
流道的开粗刀轨为两层，原始NC文件中，运行轨迹是先走最下面一层，再切上面一层，导致第二层空切。推测可能是G代码导出时选错了NX中加工操作的顺序。在本次仿真与优化中，对G代码进行了修改，使其两次切削按照顺序进行。





4.1-工序1开粗仿真及优化结果

▪ 优化结果



- 优化后加工时间: 390s
- 相比优化前, 进给力趋于平稳, 加工时间大幅降低。



4.1-工序1开粗仿真及优化结果



■ NC代码优化结果

```
N491 X-37.043 Y-41.505 Z-7.962
N493 X-34.825 Y-38.346 Z-7.439
N495 X-32.626 Y-35.227 Z-6.657
N497 X-30.455 Y-32.163 Z-5.621
N499 X-28.324 Y-29.166 Z-4.334
N501 X-26.241 Y-26.251 Z-2.805
N503 X-24.214 Y-23.43 Z-1.041
N505 X-22.254 Y-20.714 Z-9.949
N507 X-20.367 Y-18.115 Z-3.154
N509 X-18.562 Y-15.643 Z-5.564
N511 X-18.001 Y-14.878 Z-6.391
N513 X-16.844 Y-13.306 Z-8.289
N515 X-15.218 Y-11.111 Z-11.296
N517 Z19.896 F100.
N519 G00 Z26.296
N521 X-52.851 Y-62.36
N523 Z-8.904
N525 G01 Z-10.146
N527 X-48.755 Y-56.685 Z-10.064
N529 X-41.954 Y-47.26 Z-9.932
N531 X-39.686 Y-44.119 Z-9.824
N533 X-37.418 Y-40.989 Z-9.48
N535 X-35.16 Y-37.885 Z-8.867
N537 X-33.928 Y-36.196 Z-8.412
N539 X-32.922 Y-34.82 Z-7.946
```

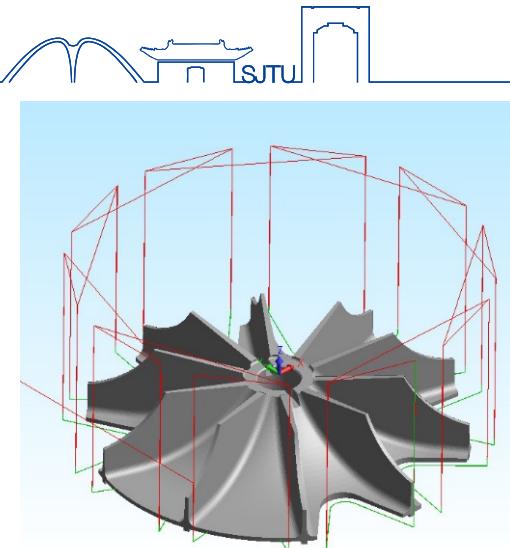
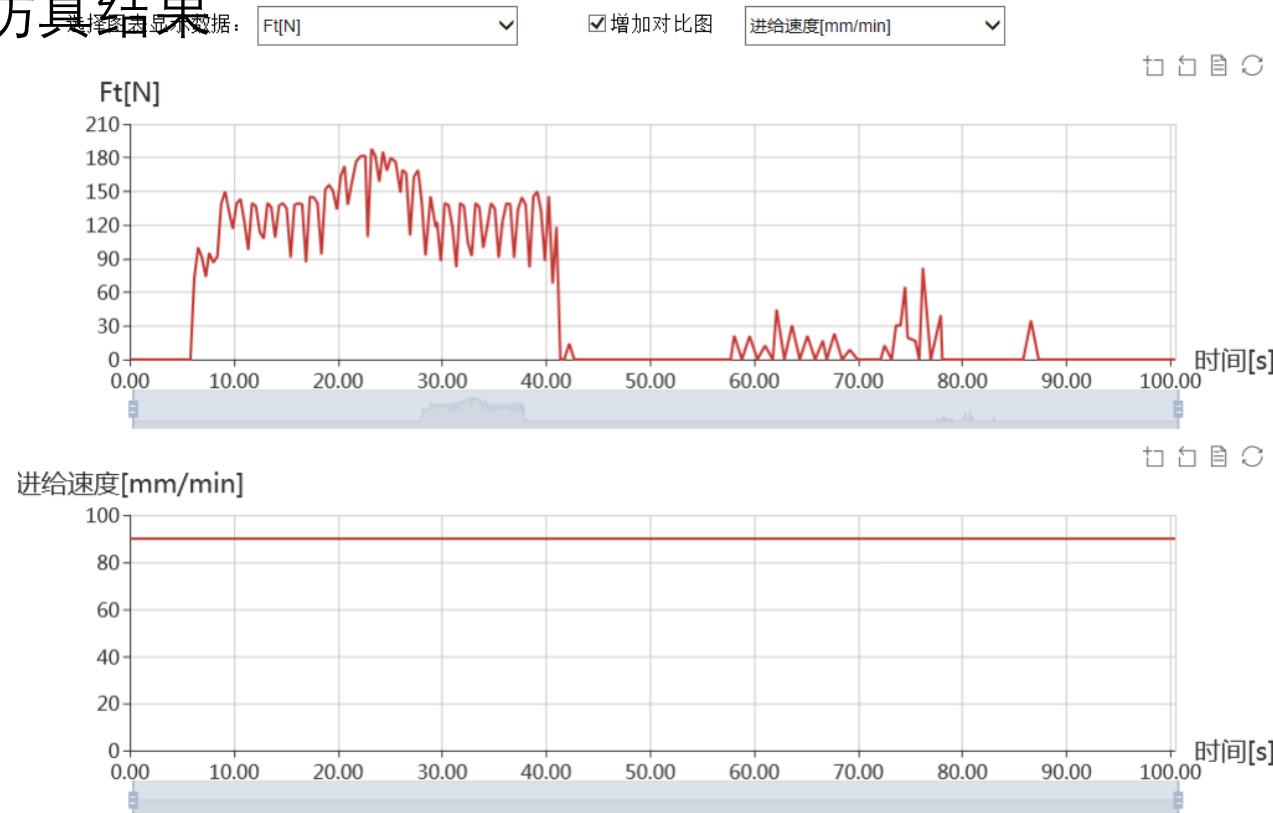
```
N491X-37.043Y-41.505Z-7.962F157.
N493X-34.825Y-38.346Z-7.439F38.
N495X-32.626Y-35.227Z-6.657F35.
N497X-30.455Y-32.163Z-5.621F44.
N499X-28.324Y-29.166Z-4.334F94.
N501X-26.241Y-26.251Z-2.805F135.
N503X-24.214Y-23.43Z-1.041F276.
N505X-22.254Y-20.714Z-9.949F300.
N507X-20.367Y-18.115Z-3.154F300.
N509X-18.562Y-15.643Z-5.564F300.
N511X-18.001Y-14.878Z-6.391F300.
N513X-16.844Y-13.306Z-8.289F300.
N515X-15.218Y-11.111Z-11.296F300.
N517Z19.896F300.
N519G00Z26.296
N521X-52.851Y-62.36
N523Z-8.904
N525G01Z-10.146F300.
N527X-48.755Y-56.685Z-10.064F300.
N529X-41.954Y-47.26Z-9.932F300.
N531X-39.686Y-44.119Z-9.824F300.
N533X-37.418Y-40.989Z-9.48F300.
N535X-35.16Y-37.885Z-8.867F300.
N537X-33.928Y-36.196Z-8.412F300.
N539X-32.922Y-34.82Z-7.946F300.
```

- 对NC代码段的进给速度进行修改/赋值。



4.2-工序2切槽仿真及优化结果

▪ 仿真结果

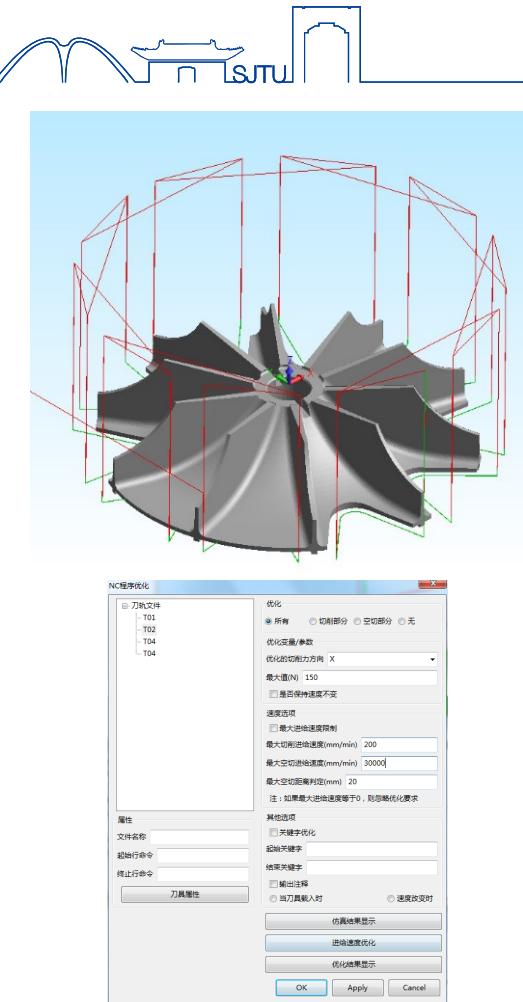


- 理论加工时间: 100s
- 铣槽时, 共加工了2次, 第二次去除材料较少, 可适当提高进给。



4.2-工序2切槽仿真及优化结果

▪ 优化结果

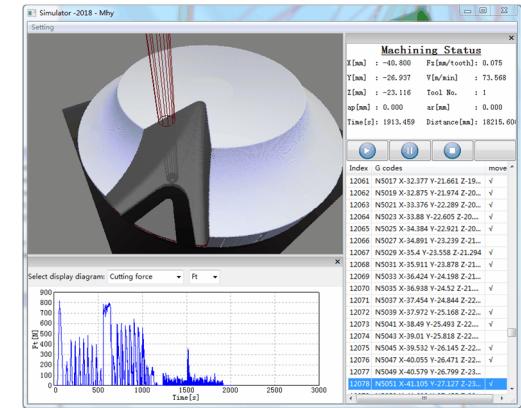
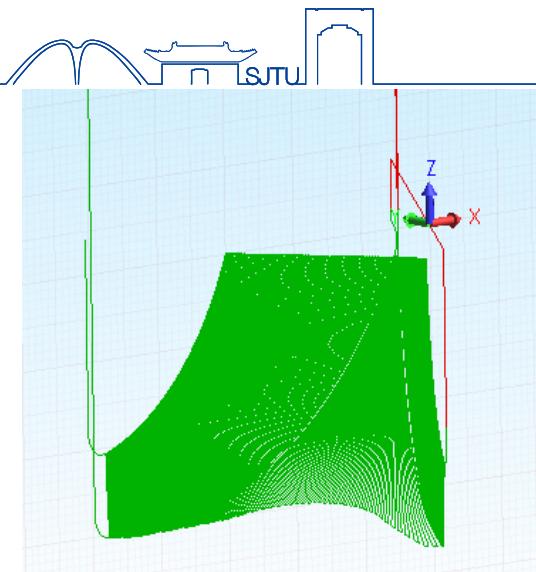
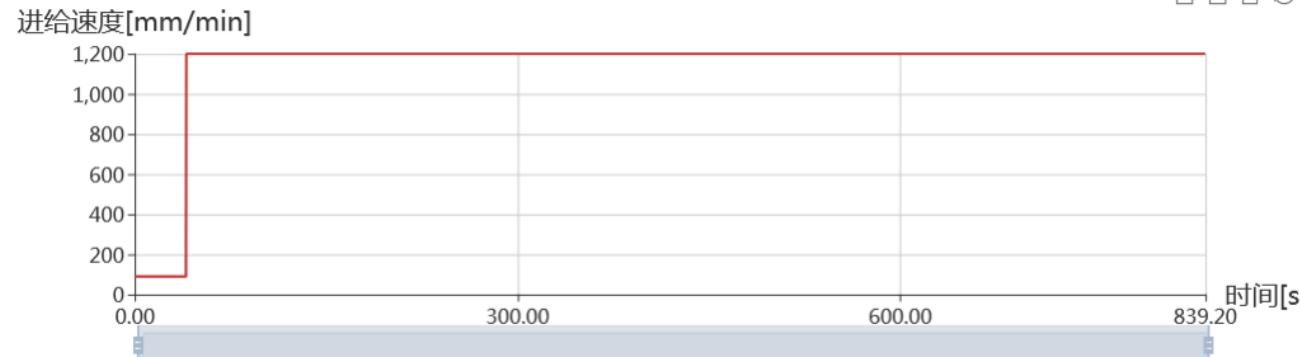
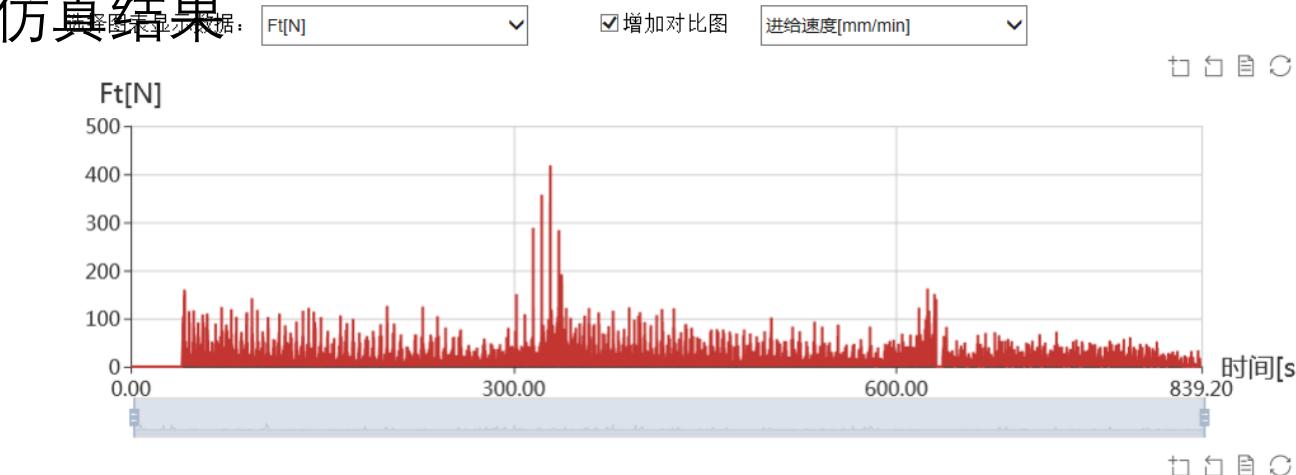


➤ 优化后加工时间: 62s



4.3-工序4&5 精铣仿真及优化结果

▪ 仿真结果

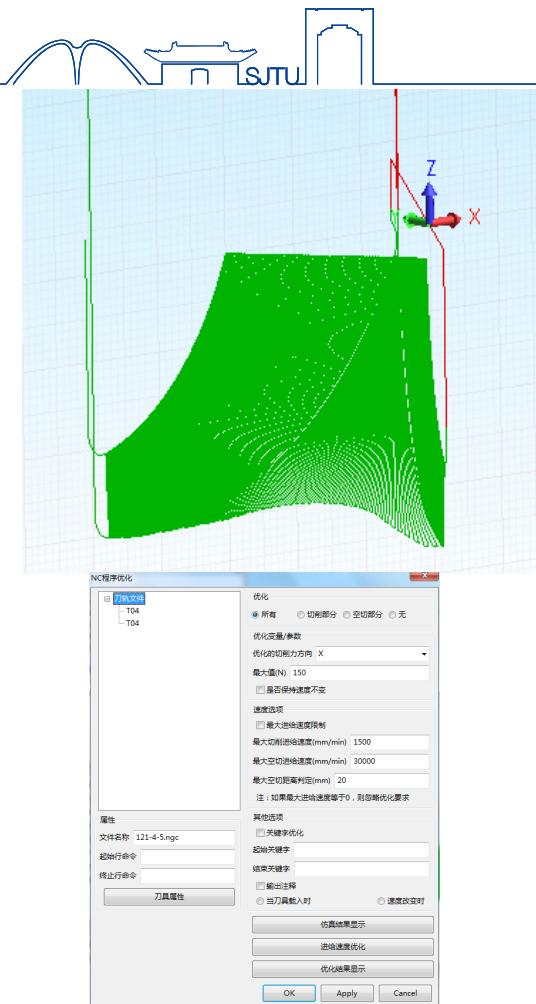
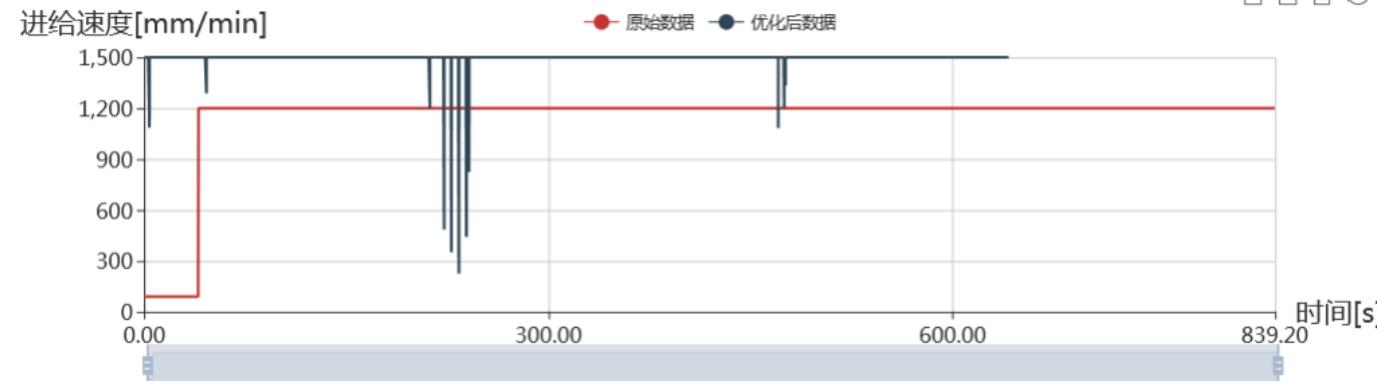
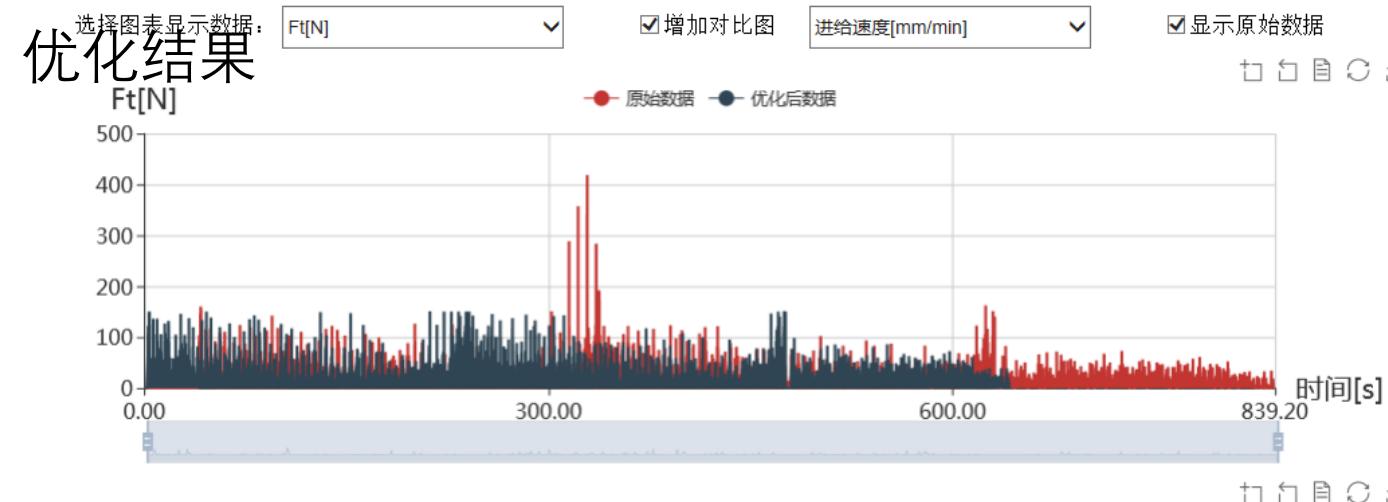


- 理论加工时间: 839s
- 在叶片铣削末尾处, 切削力出现峰值, 可降低此处进给, 使切削力平稳。



4.3-工序4&5 精铣仿真及优化结果

▪ 优化结果



➤ 优化后加工时间: 641s



5. 总结



- 虚拟仿真（几何仿真与物理仿真）可以获取加工中的切削参数和各类物理量，使得加工参数的离线优化得以实现。
- 通过进给速度优化，叶轮的加工时间降低为原来的，大幅提高了加工效率。

工序	说明	刀具	原加工时间	优化后时间	效率提高
1	开粗	D8R1	1092s (18.2min)	390s (6.5min)	64%
2	铣槽 (缺口)	D8R1	100s (1.67min)	62s (1.03min)	61%
4	精铣叶片	D6R3	635s (10.6min)	641s (10.7min)	24%
5	精加工流道	D6R3	204s (3.4min)		

待完善：

- 切削力系数与材料和刀具均相关，目前软件内采用的切削力系数不准确，需要进行标定。
- 精加工时，由于仿真精度的限制，结果可能会存在较大误差。

谢谢！

