

doi: 10.7690/bgzdh.2022.09.007

## 立式双刀车削细长轴仿真研究

周晓华<sup>1</sup>, 尹健<sup>1</sup>, 席静<sup>2</sup>, 张露<sup>1</sup>, 何树国<sup>3</sup>, 王宪升<sup>3</sup>, 钟金龙<sup>1</sup>

(1. 中国兵器装备集团自动化研究所有限公司, 四川 绵阳 621000;

2. 陆装驻北京地区第一军代室, 北京 100072; 3. 重庆建设工业(集团)有限责任公司, 重庆 400054)

**摘要:** 针对细长轴传统加工过程中变形大、质量一致性差等问题, 提出立式双刀车削细长轴的加工方式。借助有限元软件开展细长轴立式单刀、双刀车削过程中的动态切削力及变形分析, 对比相同切削参数下单刀、双刀车削细长轴时的切削力平稳性及工件变形量。结果表明: 双刀车削能有效缩短切削力进入稳定段的时间, 且双刀车削引起的细长轴弯曲变形量仅为单刀车削的 6.6%。立式双刀车削能够有效减小细长轴加工过程中的弯曲变形, 为细长轴的高速切削提供基础。

**关键词:** 立式车床; 双刀对车; 细长轴; 切削力; 变形

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## Simulation Study on Slender Shaft in Vertical Twin-tool Turning

Zhou Xiaohua<sup>1</sup>, Yin Jian<sup>1</sup>, Xi Jing<sup>2</sup>, Zhang Lu<sup>1</sup>, He Shuguo<sup>3</sup>, Wang Xiansheng<sup>3</sup>, Zhong Jinlong<sup>1</sup>

(1. Automation Research Institute Co., Ltd. of China South Industries Group Corporation, Mianyang 621000, China;

2. No.1 Military Representative Office of General Equipment Department in Beijing, Beijing 100072, China;

3. Chongqing Jianshe Industry (Group) Co., Ltd., Chongqing 400054, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of large deformation and poor quality consistency in the traditional machining process of slender shaft, the machining method of vertical double tool turning slender shaft is proposed. The dynamic cutting force and deformation analysis in the vertical single tool and double tool turning process of slender shaft are carried out with the help of finite element software. The cutting force stability and work piece deformation of single tool and double tool turning slender shaft with the same cutting parameters are compared. The results show that double tool turning can effectively shorten the time when the cutting force enters the stable stage, and the bending deformation of slender shaft caused by double tool turning is only 6.6% of that caused by single tool turning. Vertical double tool turning can effectively reduce the bending deformation in the machining process of slender shaft, which provides a basis for high-speed cutting of slender shaft.

**Keywords:** vertical lathe; twin-tool turning; slender shaft; cutting force; deformation

## 0 引言

细长轴通常是指长度与直径之比大于 25 (即  $L/D > 25$ ) 的轴<sup>[1]</sup>, 如车床上的丝杠、汽车传动轴等。由于细长轴自身横向刚性差, 在车削过程中受切削力、自重和旋转时离心力的作用, 会产生弯曲、振动, 严重影响其加工精度<sup>[1-4]</sup>。同时, 细长轴受热伸长量大, 采用卡盘+顶尖这种首尾固定的装夹方式会导致工件弯曲变形, 严重时会使其在顶尖之间卡死, 影响加工。细长轴的高质量加工是机械加工领域急需解决的难题。

为提高细长轴的加工质量, 基于细长轴振动理论的加工尺寸误差得到了大量的研究, 并在此基础上提出了多种误差预测模型<sup>[3]</sup>和误差补偿<sup>[1, 2, 4]</sup>措施。误差补偿通常只能针对单一产品, 不能解决多

种零件的混合加工问题, 需进一步研究减小加工变形的的方法。吴能章等<sup>[5]</sup>提出了“夹拉法”和最小拉力算法, 可计算出满足加工精度需求的最小拉力。戴海港等<sup>[6]</sup>提出了三刀车削方案, 并证明了该方案的有效性。李书平等<sup>[7]</sup>介绍了跟刀架和中心架在细长轴加工中的应用。在众多方案中, 双刀车削加工方式是现有研究中最成熟的方案。双刀车削加工过程中的振动特性得到了大量的研究<sup>[1, 3, 8, 9]</sup>, 为双刀车削加工的应用提供了重要的参考价值, 但现有研究均是基于恒定切削力条件下的研究, 缺乏对动态切削力作用下双刀切削时细长轴的特性分析。

笔者在分析立式双刀车削细长轴工艺的基础上, 通过建立细长轴立式双刀车削有限元模型, 利用仿真软件进行单刀、双刀车削的动态切削力分析

收稿日期: 2022-05-06; 修回日期: 2022-06-03

作者简介: 周晓华(1982—), 男, 河北人, 高级工程师, 从事非标机床、高端装备设计制造以及智能制造研究。

E-mail: Bluemao\_1982@163.com.

和工件响应分析，研究立式双刀车削加工细长轴时的动态特性。

### 1 细长轴的立式双刀车削加工

目前，细长轴普遍采用卧式车床进行车削加工。在加工过程中，细长轴受力情况如图 1 所示。由图 1 可知，自重、主切削力  $F_y$  和径向力(又称切深抗力)  $F_x$  垂直于细长轴的轴线，是导致加工过程中细长轴发生弯曲的主要因素<sup>[3]</sup>。车削加工的过程中产生大量的切削热，会导致细长轴的轴向长度出现明显的伸长，传统顶尖无法补偿细长轴的热伸长量，会进一步加剧细长轴的弯曲变形。为解决卧式车削加工中细长轴的加工变形问题，笔者提出了立式双刀车削的加工方式。

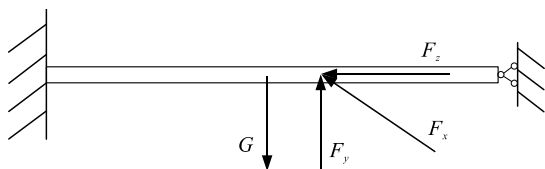


图 1 卧式车削加工时切削力分布

立式双刀车削时，细长轴受力情况如图 2 所示。一方面，双刀对径车削的布局使得两刀分别产生的主车削力和径向力在空间范围内尽可能的相互抵消，有效减小切削力引起的细长轴弯曲变形。另一方面，采用上端夹持、下端浮动顶尖顶紧的立式车削方式，消除了自重和热伸长引起细长轴的弯曲变形。同时，由于立式双刀车削时细长轴的弯曲变形减小，可提高加工时的主轴转速，有助于提高细长轴的表面加工质量和生产效率。

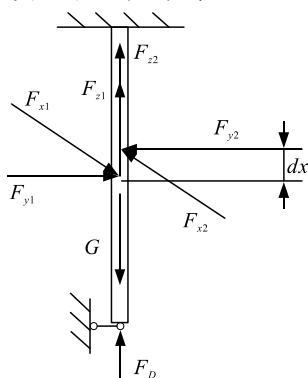


图 2 立式双刀车削加工时切削力分布

## 2 细长轴切削过程中的动态切削力分析

### 2.1 有限元模型的建立

细长轴在切削加工过程中的动态切削力仿真采用专业工艺仿真软件 DEFORM。在 DEFORM 软件中分别建立工件和刀具模型。单刀车削时，刀具位

于工件 1/2 处；双刀车削时，左侧刀具位于工件 1/2 处，右侧刀具位于左刀上方  $dx$  处，仿真模型如图 3 所示。工件材料为高强度合金钢，刀片型号为 VBGT160404，模型参数如表 1 所示。为保证计算精度，节约计算成本，更好地反映数据变化规律，设定总体网格单元规模为 300 000 个，未加密的单元最小尺寸为 1.2 mm。在实际切削过程中，只有切削区域及附近局部区域的材料会发生较大变形；因此，采用动态局部加密功能对刀尖、切削层及附近局部区域进行网格加密，使得应力集中处的网格较细密，远离应力集中处的网格较稀疏。在切削位置定义局部细化窗体，窗体内单元尺寸为 0.15 mm，如图 4 所示。

表 1 仿真模型参数

| 项目                      | 数值    |
|-------------------------|-------|
| 长度/mm                   | 480   |
| 直径/mm                   | 25    |
| 密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 7.8   |
| 泊松比                     | 0.3   |
| 弹性模量/GPa                | 210   |
| 吃刀深度/mm                 | 2     |
| 进给速度/(mm/min)           | 500   |
| 主轴转速/(r/min)            | 3 000 |

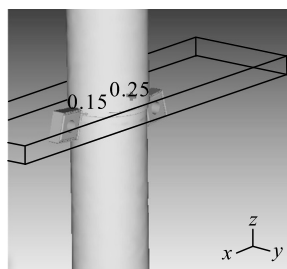


图 3 双刀车削模型

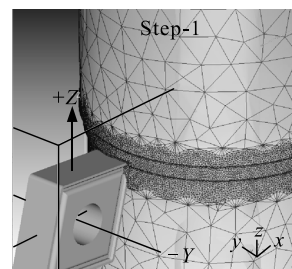


图 4 网格划分结果

### 2.2 模型参数设置

工件材料采用 Johnson-Cook 本构模型，该模型考虑了应变、应变率和温度对材料流动应力的影响，认为材料应力符合 Von-Mises 屈服准则，材料的强度为各向同性且与平均应力无关。

刀-切屑摩擦模型采用粘结-滑移摩擦模型：

$$\left. \begin{aligned} T_f &= \mu\sigma_n && \text{当 } \mu\sigma_n < \bar{\tau}_s \text{ 时 (滑动区)} \\ T_f &= \bar{\tau}_s && \text{当 } \mu\sigma_n \geq \bar{\tau}_s \text{ 时 (粘结区)} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $T_f$  为摩擦应力； $\sigma_n$  为正应力； $\mu$  为摩擦系数； $\bar{\tau}_s$  为工件材料极限剪切流动应力。仿真时，摩擦系数取值 0.4。

切屑分离准则采用 Normalized C&L 模型，Normalized C&L 模型广泛应用于体积成形的有限元模拟。

### 2.3 边界条件设置

分析时, 工件设置为匀速转动和沿  $z$  向(工件轴向)匀速直线运动, 转速为 3 000 r/min。刀具添加固定约束。文献[6]推荐的双刀车削时双刀间距  $d_x$  的取值, 双刀车削时两刀间距设置为 2 mm。仿真时长设置为 0.032 5 s, 仿真工件旋转 1 圈的切削过程。

### 2.4 仿真结果

单刀车削和双刀车削仿真结果分别提取切削过程的主切削力  $F_y$ 、径向切削力  $F_x$  和轴向切削力  $F_z$ , 如图 5 和 6 所示。由图 5 可知, 单刀车削时切削力在 0.02 s 后进入稳定状态。由图 6 可知, 双刀车削时左刀切削力在 0.015 s 后进入稳定状态, 切削力进入稳定段的时间双刀车削 < 单刀车削。单刀车削和双刀车削时分别选取 0.020~0.032 5 s 和 0.015~0.032 5 s 时间段的各方向切削力求平均值, 结果如表 2 所示。由表 2 可知, 单刀车削各方向切削力的平均值略小于双刀车削, 最大偏差为 3.5%。

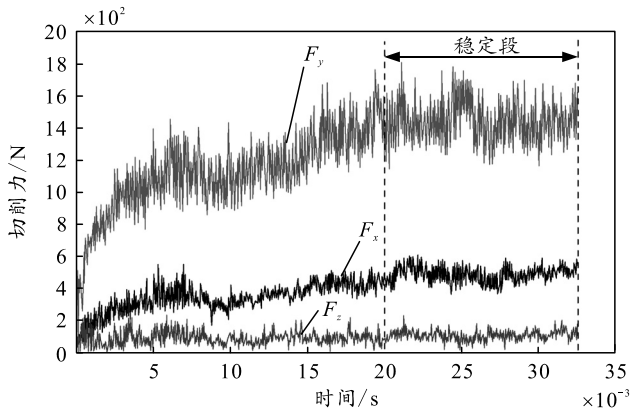


图 5 单刀车削时切削力的时程曲线

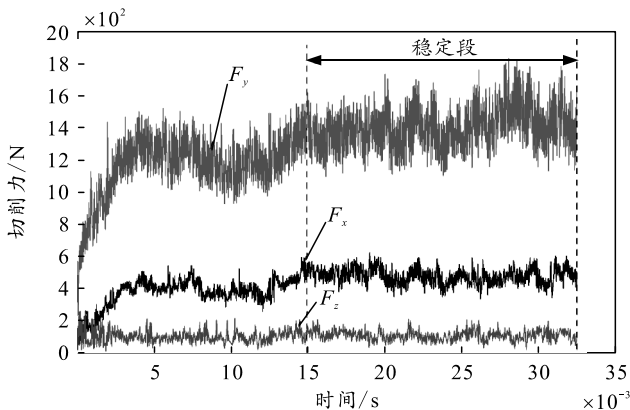


图 6 双刀车削时左刀切削力的时程曲线

表 2 单刀车削和双刀车削时稳定段切削力的平均值

| 项目          | 单刀车削/N  | 双刀车削/N  | 偏差/% |
|-------------|---------|---------|------|
| 主切削力 $F_y$  | 1 446.3 | 1 400.6 | 3.2  |
| 径向切削力 $F_x$ | 490.7   | 473.6   | 3.5  |
| 轴向切削力 $F_z$ | 107.1   | 105.5   | 1.5  |

## 3 细长轴切削过程中的变形分析

### 3.1 有限元模型的建立

细长轴在切削加工过程中的变形仿真采用通用有限元仿真软件 ANSYS。在 ANSYS 软件中分别建立  $\Phi 25 \times 400$  mm、内孔  $\Phi 6$  mm 的工件模型, 采用六面体划分网格, 单元数量共计 7 506, 节点数共计 37 728, 工件模型如图 7 所示。模型材料参数如表 1 所示。

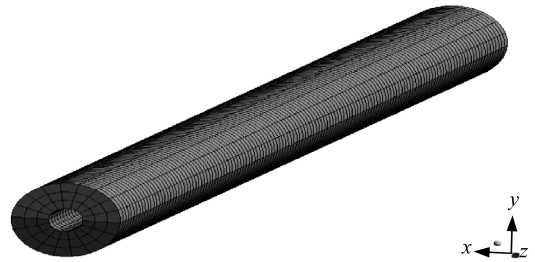


图 7 工件有限元模型

### 3.2 边界条件设置

分析时, 工件左端添加全约束, 右端添加位移约束  $U_x$  和  $U_y$ , 并在右端端面添加沿轴向指向左端的顶尖顶紧力  $F_D=300$  N。分别将第 3 节中得到单刀动态切削力和双刀动态切削力根据刀具的布置添加到对应位置的节点上, 仿真总时长设置为 0.032 5 s, 选择瞬态分析模块进行仿真。

### 3.3 仿真结果

求解过程完成后, 分别提取工件左刀加载节点  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向位移响应曲线, 如图 8—11 所示。由图 8—10 可知, 工件的主要振动方向为  $y$  向, 由主切削力引起, 且双刀车削时  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的位移均小于单刀车削。单刀车削时  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的最大响应位移分别为 0.106 9、0.365 2 和 0.025 3 mm。双刀车削时  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的最大响应位移分别为 0.021 5、0.025 0 和 0.000 7 mm。单刀、双刀车削时最大复合位移比值为 1:0.066。

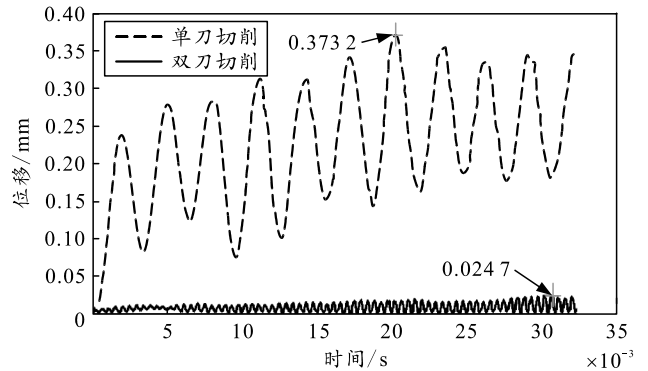


图 8 工件左刀加载点复合位移响应曲线

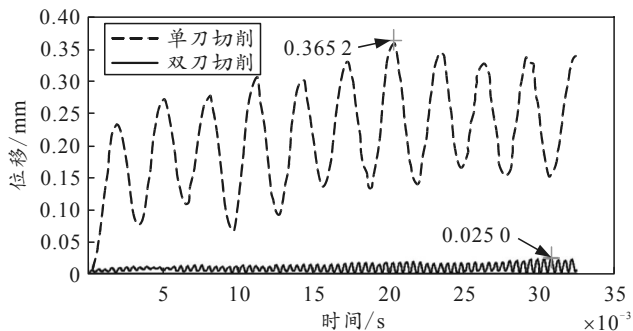


图 9 工件左刀加载点 y 方向位移响应曲线

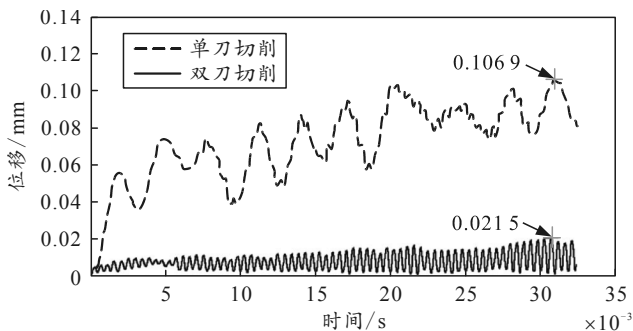


图 10 工件左刀加载点 x 方向位移响应曲线

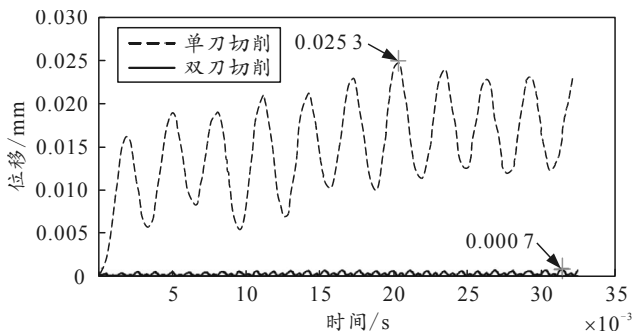


图 11 工件左刀加载点 z 方向位移响应曲线

#### 4 结论

通过分别建立细长轴立式单刀、双刀车削有限元模型，进行相同切削参数下切削过程仿真，对比研究单刀、双刀车削时切削力的变化，并在此基础

上建立工件的有限元模型，研究单刀、双刀切削力作用下工件的位移响应，得出以下结论：

1) 立式单刀、双刀车削时，刀具 x、y、z 方向的稳定段切削力平均值基本一致，但双刀车削时切削力能更快进入稳定段，效率更高。

2) 在切削参数相同条件下，立式双刀车削时 x、y、z 方向的位移均小于单刀车削，且立式双刀车削细长轴引起的最大弯曲变形仅为单刀车削的 6.6%。

立式双刀车削方式能有效减小细长轴加工过程中的弯曲变形，不仅能提高细长轴切削加工后的直线度，而且能有效改善细长轴在切削过程中由于弯曲变形引起的周期性振动，为细长轴的高速切削提供了基础。

#### 参考文献：

- [1] 尚广云, 邓志平, 仲良, 等. 双刀车削加工细长轴的振动误差分析[J]. 机床与液压, 2009(12): 66-68.
- [2] 赵海涛, 杨建国, 童恒超. 细长轴车削加工的振动及其补偿控制[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(1): 117-120.
- [3] 赵刚. 细长轴双刀车削有限元仿真研究[D]. 成都: 西华大学, 2013.
- [4] 尚广云. 双刀车削加工细长轴的尺寸误差研究[D]. 成都: 西华大学, 2016.
- [5] 吴能章, 周利平. 夹拉法加工细长轴的最小拉力算法[J]. 工具技术, 2005(11): 43-45.
- [6] 戴海港, 邓志平, 李文超. 细长轴三刀车削受力分析[J]. 机械设计与制造, 2011(4): 150-152.
- [7] 李书平, 黄杏, 陈佰江, 等. 超细长轴车削加工工艺分析[J]. 煤矿机械, 2009, 30(5): 104-106.
- [8] 张正义, 邓志平. 细长轴对称式双刀车削刀具间距的仿真研究[J]. 中国工程机械学报, 2014, 12(3): 252-256.
- [9] 仲良, 邓志平, 尚广云, 等. 双刀车削细长轴振动特性分析[J]. 中国工程机械学报, 2015, 13(5): 441-446.
- [10] 赵晶, 戴幻尧, 来庆福, 等. 自控终点误差与目标散布下反舰导弹捕获概率分析[J]. 战术导弹技术, 2010(2): 64-68.

\*\*\*\*\*

(上接第 15 页)

- [4] 张亚, 孔军. 潜射巡航导弹现在点攻击捕获概率计算[J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32(2): 40-45.
- [5] 来庆福, 赵晶, 冯德军, 等. 反舰导弹雷达导引头最佳开机距离影响因素分析[J]. 战术导弹技术, 2011(5): 90-95.
- [6] 贾正荣, 卢发兴, 王宇航. 反舰导弹区域射击方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(11): 2490-2497.
- [7] 魏海光, 边聚广. 一种反舰导弹纯方位攻击捕获概率