

基于 AdvantEdge FEM 的刀具力学分析

勾晶晶 朱小燕 张海 周万煜

(东方汽轮机有限公司 四川 德阳 618000)

摘要: 针对燃气轮机静叶装配槽切削过程中刀具弹性变形导致的过切、欠切问题, 建立理论刀具力学模型, 运用 Advant Edge 软件对加工过程的切削力、弹性变形量进行仿真, 实现刀具弹性变形预测及刀具弹性变形量推算, 为槽型加工的切削参数选择提供理论支撑。

关键词: 燃机轮机; 刀具; 切削力; 刀具扰度; AdvantEdge

0 引言

燃气轮机被誉为“工业皇冠”, 其叶片结构复杂, 加工精度高。在数控加工过程中, 在切削力的作用下, 刀具弹性变形会引起过切、欠切, 影响叶片装配槽型的加工质量。因此, 有必要研究刀具的弹性变形。

依据力学理论, 分析刀具弹性变形机理。以悬臂梁作为刀具受力变形的理论模型, 分析其在加工过程中的受力。运用 Advant Edge 软件对刀具的切削力进行模拟, 推算扰度值, 为刀具方案选择、切削参数优化提供依据^[1]。

1 加工刀具力学模型

切削过程是材料剪切过程, 主要由克服被加工材料对弹性变形、塑性变形的抗力及克服切削与刀具的摩擦力构成。切削力作用在刀具和工件上, 具有大小相等, 方向相反的特性。切削力在工件坐标系中可分解为三个方向的分力, 在垂直与侧刃方向的分力作用下, 刀具会发生弹性变形, 如图 1 所示, Y 方向分力 F_y 会导致槽型铣削成型过程中发生过切、欠切, 影响产品质量^[2]。以刀具为受力对象, 刀具受力满足典型悬臂梁的力学模型。

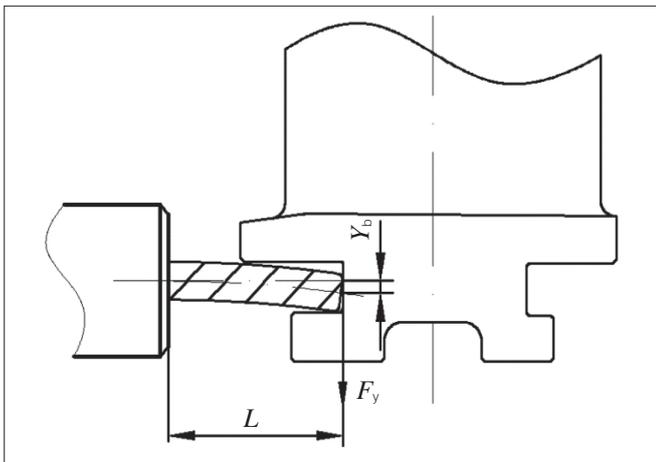


图 1 刀具受力变形及力学模型示意图

图 1 中, Y_b 为刀具弹性变形量, L 为刀具悬出长度, F_y 为垂直侧刃、进给方向分力。假设刀具长度远大于加工长度, 刀具受力点为刀尖, 刀尖扰度为:

$$Y_b = \frac{F_y L^3}{3EI} \quad (1)$$

式中: I - 刀具转动惯量, 其值约等于 $\frac{\pi D^4}{64}$;

F_y - 垂直侧刃、进给方向分力;

L - 为刀具悬出长度;

Y_b - 刀具弹性变形量;

E - 刀具杨氏模量;

D - 刀具直径。

整合公式:

$$Y_b = \frac{64F_y L^3}{3\pi E D^4}$$

由此可以得出初步结论: 刀具弹性变形量 Y_b 与刀具悬出长度、刀具直径、切削力密切相关。

2 燃机静叶装配槽型加工的切削 AdvantEdge 仿真

切削过程是一个复杂的成型过程, 实际的刀具受力情况、刀具横截面的变化, 引起复杂形状截面的惯量与截面积让刀具弹性变形不完全满足简单的悬臂梁力学模型。以燃机静叶装配槽加工过程为分析对象, 刀具已依据工件几何尺寸进行具体选型, 则刀具弹性变形主要受刀具悬出长度、切削力的影响^[3]。

借助 AdvantEdge 软件可以分析刀具在加工过程中所受应力和变形情况, 如图 2、图 3 所示。切削过程中, 刀具与工件完全接触, 受力情况选用一个切削过程作为仿真分析对象。

AdvantEdge 软件为了减少计算, 只将刀刃部位进行建模, 刀柄部位建模需要自行建模成梁结构。刀具弹性变形量的计算是将刀柄作为一个梁, 惯量和横截面被假定为圆柱面并据此计算 (图 4)。

仿真结果表明, 仿真出的刀具应力分布、刀具应力

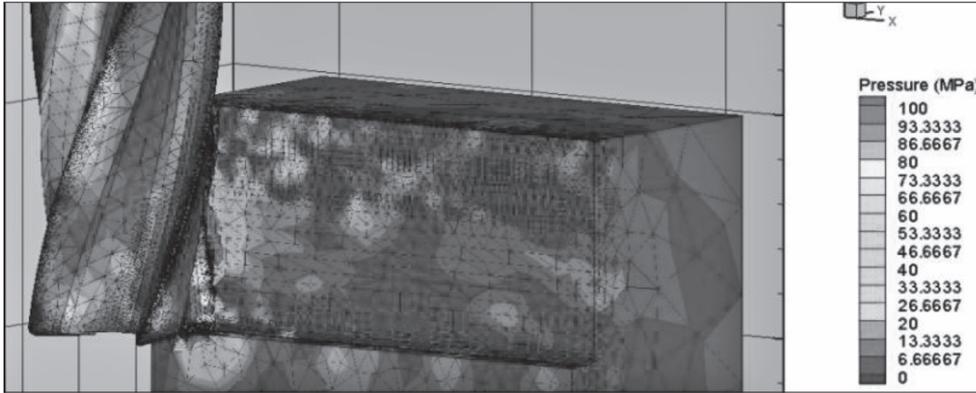


图2 刀具应力分布图

分力印证了切削力、切削分析设想的合理性。在切削力的作用下，刀具在工件坐标系中发生了明显的变形。为验证刀具弹性变形量与切削参数、刀具悬出长度的关系，需要建立准确的刀具模型和切削模型。

2.1 切削力与刀具弹性变形量的关系

采用 D4 刀具作为仿真对象，仿真结果如图 5 所示。

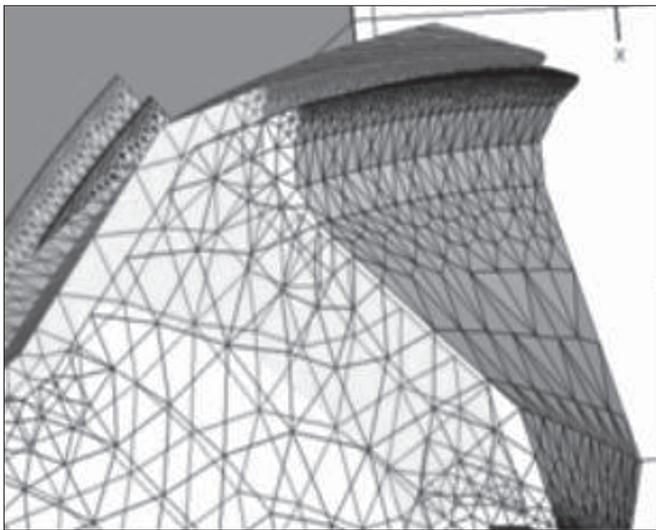


图3 刀具变形示例图

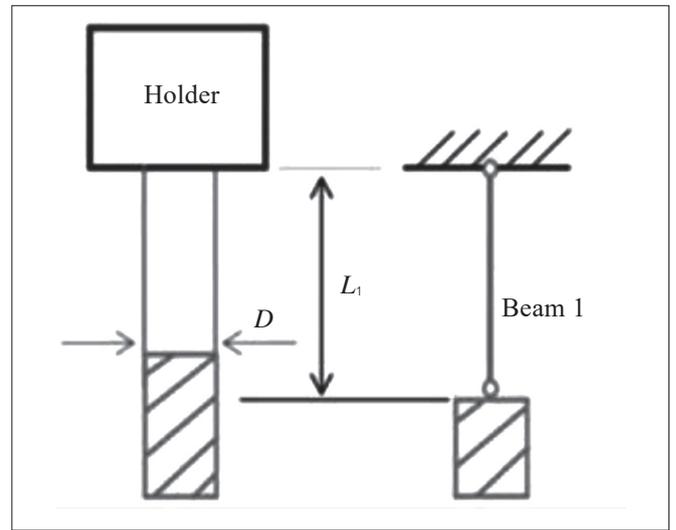


图4 AdvantEdge 成梁原理

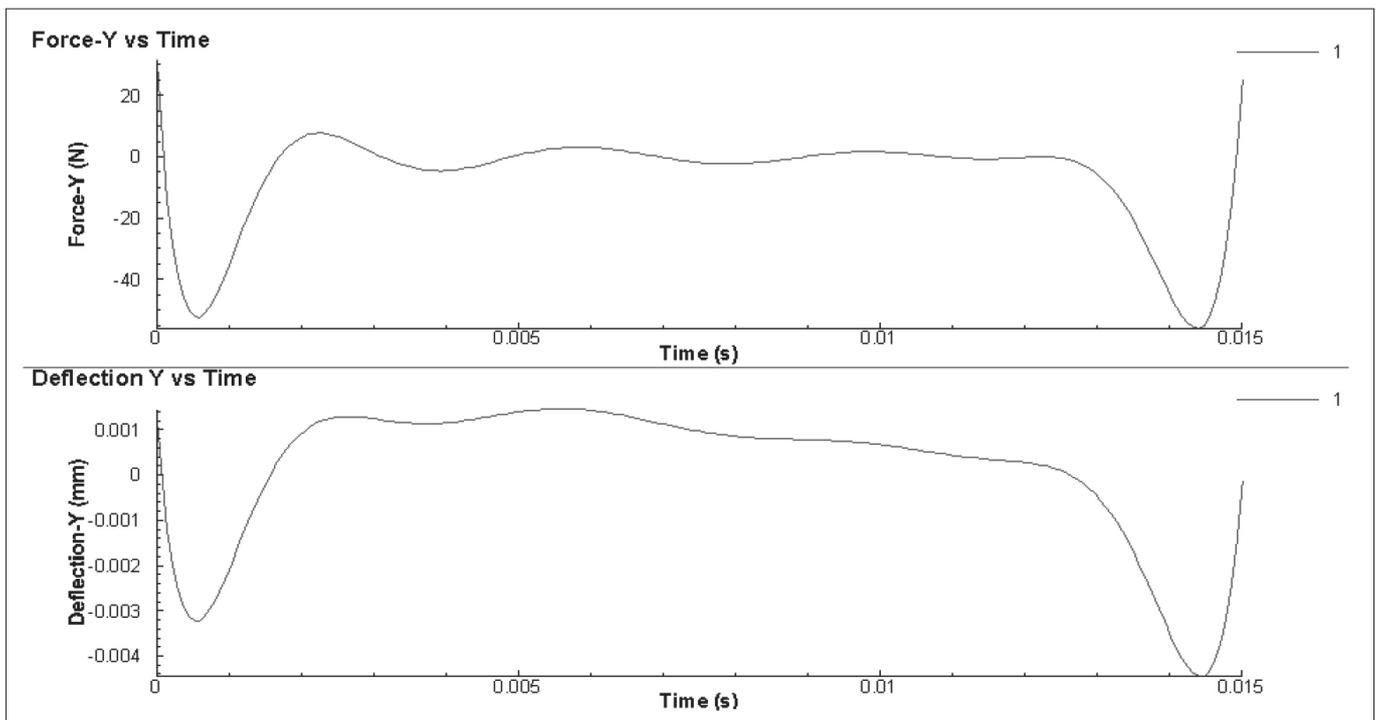


图5 AdvantEdge 刀具受力及弹性变形量

图5中, Force-Y为工件坐标系下Y方向的分力, Deflection Y为刀具在工件坐标系Y方向弹性变形量。结果表明:

(1) 金属切削过程中, 工艺系统始终存在着或大或小振动。刀具相对于工件的振动, 直接导致切削力随之发生波动。

(2) 在切削过程中, 刀具弹性变形量具有正比于切削力的特性。

2.2 刀具弹性变形量与加工参数、刀具悬出长度的关系

依据切削力的形成机理分析, 切削力影响因素比较复杂, 在刀具选型确定、工件确定的情况下, 主要受切削参数的影响。因此, 需建立以加工参数、刀具悬出长度与刀具弹性变形量的分析模型。

常见切削参数为主轴转速 (v_c)、每齿进给 (a_f)、切深 (a_e) 和切宽 (a_p)。

2.2.1 刀具弹性变形量与刀具悬出长度的关系

建立单因素试验, 固定切削参数, 得出不同的刀具悬出长度与刀具弹性变形量的关系^[4]。刀具弹性变形量与刀具悬出长度试验参数见表1。

表1 刀具弹性变形量与刀具悬出长度试验参数

| 序号 | 刀具悬出长度/mm | 切削参数 | | | |
|----|-----------|--------------|---------|-------|-------|
| | | 主轴转速/(r/min) | 每齿进给/mm | 切深/mm | 切宽/mm |
| 1 | 15 | 3000 | 0.15 | 0.2 | 5 |
| 2 | 25 | | | | |
| 3 | 35 | | | | |
| 4 | 60 | | | | |
| 5 | 100 | | | | |

刀具弹性变形量与刀具悬出长度试验结果见图6。结果表明:

(1) D4在刀具悬出长度15~25mm区间内变化不明显。

(2) 刀具悬出长度超过35mm后, 刀具弹性变形量出现较大波动, 刀具长度变化后, 在切削过程中刀具前

角发生变化, 导致实际切削力发生波动。

2.2.2 刀具弹性变形量与加工参数的关系

以加工参数作为分析对象, 分析主轴转速 (v_c)、每齿进给 (a_f)、切深 (a_e) 和切宽 (a_p) 的关系。由于析因较多, 采用正交试验法分析, 参数选取见表2。刀具弹性变形量与切削参数仿真结果见图7。

表2 刀具弹性变形量与加工参数正交试验表

| 序号 | 切削参数 | | | |
|----|--------------|---------|-------|-------|
| | 主轴转速/(r/min) | 每齿进给/mm | 切深/mm | 切宽/mm |
| 1 | 1000 | 0.05 | 0.05 | 1 |
| 2 | 1000 | 0.1 | 0.1 | 3 |
| 3 | 1000 | 0.15 | 0.2 | 5 |
| 4 | 2000 | 0.05 | 0.1 | 5 |
| 5 | 2000 | 0.1 | 0.2 | 1 |
| 6 | 2000 | 0.15 | 0.05 | 3 |
| 7 | 3000 | 0.05 | 0.2 | 3 |
| 8 | 3000 | 0.1 | 0.05 | 1 |
| 9 | 3000 | 0.15 | 0.1 | 5 |

由图7可以看出:

(1) 由方差分析法的分析结果可以看出, 在上述4种因素中主轴转速对刀具弹性变形量无显著影响^[5]。

(2) 每齿进给、切宽、切深对刀具弹性变形量有显著影响, 且均呈现正比趋势, 影响程度可表示为主轴转速<每齿进给<切宽<切深。

3 结语

(1) 在切削过程中, 刀具弹性变形量具有正比于切削力的特性。降低切削力有利于减小刀具弹性变形量。

(2) 在燃机静叶装配槽加工过程中, 刀具强度无法增加时, 调整加工参数可以减小刀具弹性变形量。

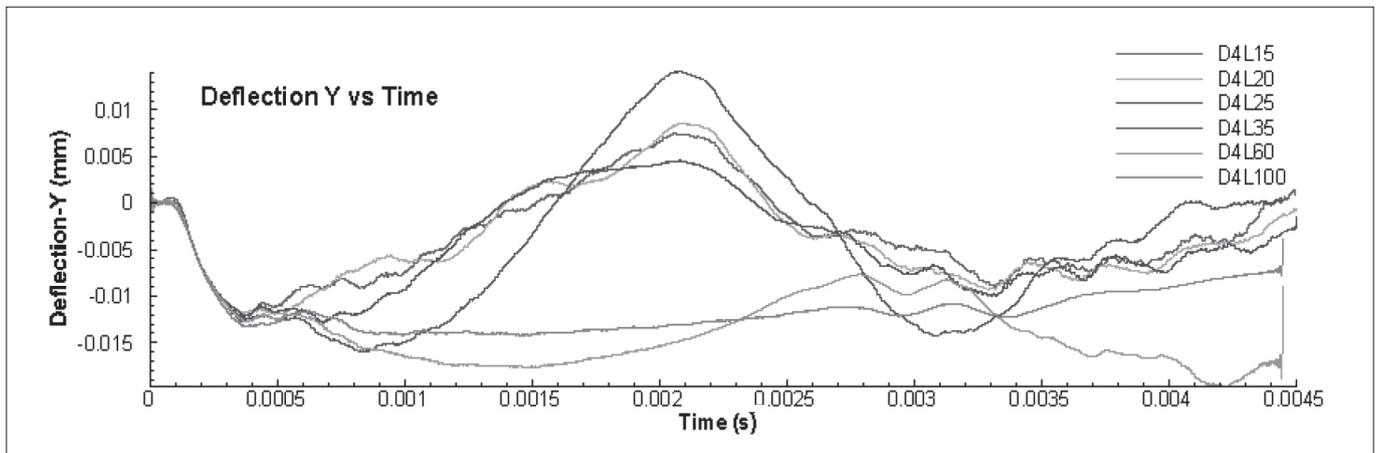


图6 刀具弹性变形量与刀具悬出长度仿真结果

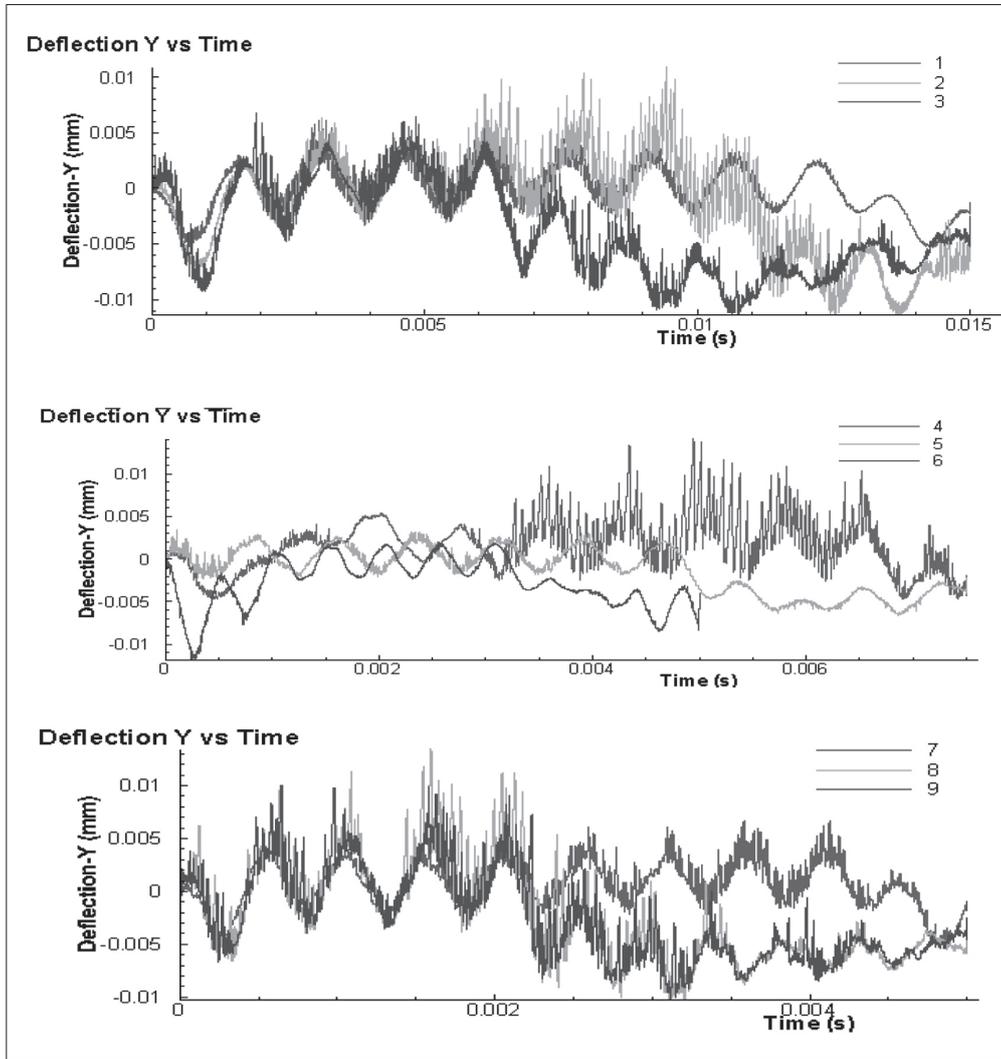


图7 刀具弹性弹性变形量与切削参数仿真结果

(3) 应采用合理的刀具悬出长度, D4 刀具不宜超过 25mm。

(4) 在调整加工参数时, 按影响程度: 主轴转速<每齿进给<切宽<切深进行调整。

通过三维切削软件 AdvantEdge, 可直观地测量到刀具弹性变形量, 为研究刀具悬出长度、切削参数对刀具弹性变形量的影响提供理论依据, 也为今后攻丝工艺方案的确定提供数据支撑。

参考文献:

[1] 朱佳生. 透平机械制造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1980.

[2] 秦仁. 透平机械原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.

[3] 刘旭荣. 细腻数控加工过程切削力级热变形对加工误差的影响 [D]. 长春: 长春工业大学, 2007.

[4] 赵明, 刘嘉伟, 李杰光. 叶片精密加工弹性变形误差及规律研究 [J]. 机械设计与制造, 2009(06): 106-108.

[5] 孟凡中. 弹塑性有限变形理论和有限元方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1985.

(上接第 24 页)

文中采用的方法即满足牛顿迭代法的算法要求, 同时收敛速度和计算精度均满足需求。

(4) Jacobian 矩阵 是一个 12×6 的矩阵, 需采用 SVD 分解计算其广义逆, 虽解决了 Jacobian 矩阵不存在矩阵的逆的问题, 但也增加了计算量。

参考文献:

[1] 胡同海, 杨柳松, 魏红霞, 等. 衬板机械手的基本型式及自由度分析 [J]. 矿山机械, 2020, 48(6): 44-48.

[2] 杨溢, 耿洪臣. 大型磨机换衬板机械手研究现状 [J]. 矿山机械, 2009, 37(5): 70-74.

[3] 李勇, 王继新, 郝万军, 等. MLH2000 型七自由度磨机

换衬板机械手的研制 [J]. 矿山机械, 2009, 37(5): 67-69.

[4] 韩磊, 刁燕, 张希斌, 等. 基于改进牛顿迭代法的手腕偏置型六自由度关节机器人逆解算法 [J]. 机械传动, 2017, 41(1): 127-150.

[5] 何理, 张军. 基于简化形式的 Jacobian 矩阵的牛顿迭代法求解 6 自由度机器人逆解算法 [J]. 机床与液压, 2015, 43(21): 107-112.

[6] Saeed B. Niku. 机器人学导论 - 分析、控制及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 60-70.

作者简介: 黄晓阳 (1989.10-), 女, 汉族, 河南洛阳人, 研究生在读, 研究方向: 制造业管理。