基于 DEFORM-3D 的转盘镗孔正交实验优化

撰文／鹤壁汽车工程职业学院 赵帅 李震 毕雅萱

本文利用 DEFORM-3D 软件模拟了转盘零件在不同切削参数条件下切削力、形变量的变化值，并利用这些数值通过正交实验得到最优化的切削工艺参数，然后经切削试验零件各孔误差均在合理范围内，该方法为以后零件切削工艺参数选择提供了一定的参考。

一、引言

高精度多工位机床的关键核心部件包括转动圆盘、上下动力头座，俗称“三明治”机构。如图 1 所示，转动圆盘是机床的分度回转工作台，台面上安装有夹具和工件；上下动力头座分别位于转动圆盘的上下两侧，起到支撑动力头的作用。

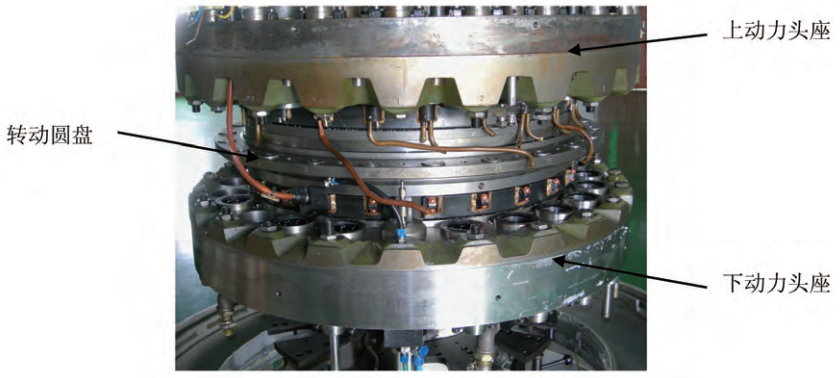
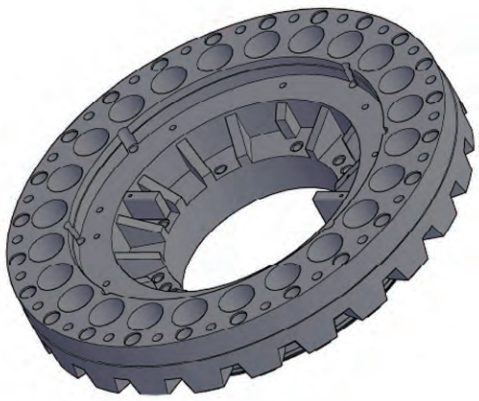


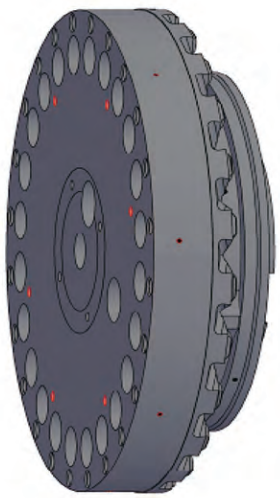
图 1 “三明治”机构图

如图 2 所示，“三明治”机构零件属于精密多孔盘类结构件，外沿孔径的尺寸精度要求在 ±5μm，圆度精度要求在 8μm。因此，零件孔的制造精度要求格外严格，台面上孔的加工量占整个零件加工量的一半以上。现以转动圆盘孔的加工为例，对其工艺参数的选择进行分析研究。

DEFORM-3D 是一套基于工艺模拟系统的有限元仿真软件，其强大的模拟引擎，能够分析金属成形过程中多个关联对象耦合作用的大变形和热特性。与传统的直接实验法相比，使用软件仿真费用低、耗时短，在考虑多因素时其优势尤为明显。因此，本文以 DEFORM-3D 软件为平台，针对转盘镗孔过程进行模拟仿真，并通过正交实验得出最优化切削参数组合。



(a) 上动力头座



(b) 下动力头座

(c) 转动圆盘

图 2 “三明治”机构零件结构图

二、DEFORM-3D 有限元仿真平台

1. 建立有限元模型

由于 DEFORM-3D 分析软件不具备三维造型功能，所以本文选择在 SolidWorks 软件中建立模型。在 SolidWorks 中建立的镗刀装配模型，如图 3 所示，其中镗刀前角 γ_0=8°，后角 α_0=10°，刀尖圆弧半径 r_z=0.2mm。模型文档另存为 STL 文件格式，并在选项中选择“在单一文件”保存装配体的所有零件。进入 DEFORM-3D 软件中的 MACHINING 模块后，导入预先构造的刀具模型，刀具材料选择硬质合金 WC。设定工件尺寸，材料选用 QT700-2。

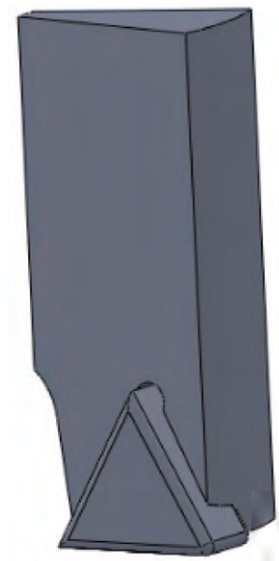


图 3 镗刀几何模型

2. 模型的网格划分

划分网格时首先要考虑网格数量，数量越多划分的越细密，分析精度越高，但计算规模也将成倍增加。在结构中应力应变集中和变化比较剧烈的部位，网格宜划分得密一些，其它部位可稀疏一些。具体到镗孔加工过程中，刀具切削部分应该实现网格细分，其他部分网格应该加粗，这样既保证了局部变形的求解精度，又节省了求解时间和内存消耗。在本实验中，刀具网格类型为相对网格类型，其单元总数为 15,000 个，Size Radio 为 4，工件网格类型为绝对网格类型，网格最小尺寸为 0.01mm，其单元总数为 26,357 个。

3. 模拟参数设置

模拟过程中，模拟计算步长的确定是十分重要的。对于几何形状简单，边角无流变或其它局部严重变形的问题，步长可选用模型中较小单元边长的三分之一。本实验设置仿真总步数为 5,000，步数增量设为 25，切削终止角度 65°。刀具磨损模型选用适合于金属切削的 Usui’s 模型，系数 a 为 0.000,000,1，b 为 855。最后检查仿真的各项参

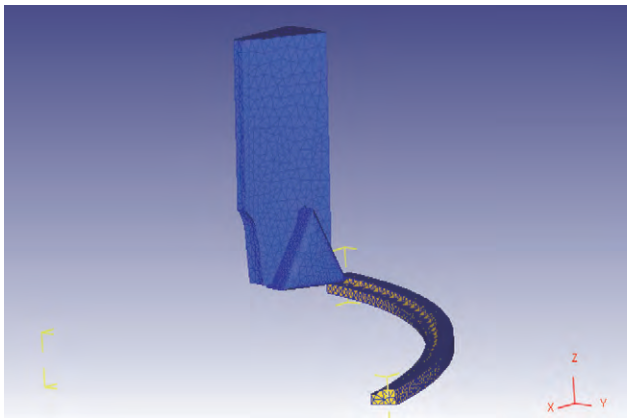


图 4 三维模型的网络划分

数设置是否正确，生成数据库，开始运行仿真。

三、镗孔切削的正交实验仿真

正交实验是研究多因素、多水平实验的主要方法，它是根据正交性原则从所有实验点中挑选部分有代表性的点进行实验，从中寻找出一组最佳的水平组合。

1. 实验方案设计

首先确定影响镗刀切削性能的主要因素有：*A*——切削速度（m/min）；*B*——进给量（mm/r）；*C*——切削深度（mm）。

通过理论参考资料和生产实践确定 3 个因素的变化范围：*A*（v）为 80 ~ 120m/min；*B*（v_f）为 0.02 ~ 0.06 mm/r；*C*（v_p）为 0.03 ~ 0.08mm。设计每个因素取 3 个水平，得到正交试验的 3 个因素（*A*、*B*、*C*）与 3 个水平（1、2、3）表，如表 1 所示。

表 1 因素水平表

因素水平	*A* 切削速度 m/min	*B* 进给量 mm/r	*C* 切削深度 mm
1	80	0.02	0.03
2	100	0.04	0.05
3	120	0.06	0.08

2. 实验结果与分析

切削参数因素水平表设计完成之后，基于已有刀具和工件有限元模型进行表 2 中的切削正交试验，实验评价指标为切削力和转盘形变量，并按照各组实验顺序记录实验结果，对结果进行整理计算。

在正交实验表 2 中，各个参数下评价指标的均值如表 3、表 4 所示。其中，K_1 代表“水平 1”的指标均值；K_2 代表“水平 2”的指标均值；K_3 代表“水平 3”的指标均值；极差 *R* 代表不同水平时各因素评价指标均值的极差，其大小代表了该因素的水平变化时评价指标的变化幅度。极差越大说明该因素的水平变化对评价指标的影响越大，因素则据主要地位；反之则说明因素居次要地位。

表 2 转盘镗孔切削正交试验

实验次数	切削速度 m/min	进给量 mm/r	切削深度 mm	切削力 N	形变量 μm
1	80	0.02	0.03	32	6.9
2	80	0.04	0.05	56	7.8
3	80	0.06	0.08	82	8.2
4	100	0.02	0.05	45	6.1
5	100	0.04	0.08	68	6.7
6	100	0.06	0.03	24	6.8
7	120	0.02	0.08	51	3.5
8	120	0.04	0.03	20	4.3
9	120	0.06	0.05	39	5.6

表 3 基于主切削力 *FZ* 的评价指标和极差分析

指标均值	*A* 切削速度	*B* 进给量	*C* 切削深度
K_1	57	43	26
K_2	46	49	45
K_3	37	48	68
极差 *R*	8.2	2.4	16.7

表 4 基于转盘形变量的评价指标和极差分析

指标均值	*A* 切削速度	*B* 进给量	*C* 切削深度
K_1	7.5	5.3	5.9
K_2	6.5	6.8	6.8
K_3	4.4	7.2	6.3
极差 *R*	2.3	1.6	0.4

由表 3 中各因素的极差可以看到，基于主切削力 F_Z 的极差由大到小的排列为：*C*、*A*、*B*；即，对评价指标影响程度由大到小的因素分别为：切削深度、切削速度、进给量。随着切削深度增加，主切削力 F_Z 具有明显上升趋势；而随着切削速度增加，主切削力 F_Z 则具有下降趋势；在整个切削实验中，进给量对主切削力 F_Z 影响不大。因此，基于主切削力 F_Z 最小作为优化目的，从上述各因素的变化趋势看，正交试验方案的较优组合为 $A_3B_2C_1$，即切削速度 v=120mm/min，进给量 v_f=0.04 mm/r，切削深度 v_p=0.03 mm。

由表 4 中各因素的极差可以看到，基于转盘形变量的极差由大到小的排列为：A、B、C；即，对评价指标影响程度由大到小的因素分别为：切削速度、进给量和切削深度。转盘变形量随着主轴切削速度的增加而减小，主要是因为在一定的切削条件下，增加主轴切削速度，可以减小镗刀的每转进给量，减小了切削力的大小，从而减小了转盘的变形量；转盘变形量随着进给速度增加而增大，主要是因为在一定的切削条件下，增加进给速度，提高了镗刀的每转进给量，增大了切削力的大小，从而增大了转盘的变形量；转盘变形量随着切削深度的增加而增大，因为切削深度增加，镗刀的切削面积增加，增加了切削力的大小，从而增大了转盘的变形量。因此，基于转盘形变量最小作为优化目的，从上述各因素的变化趋势看，正交试验方案的较优组合为 $A_3B_1C_1$，即 v=120mm/min，进给量 v_f=0.04mm/r，切削深度 v_p=0.03mm。

在精密镗孔切削时，切削力也是工件受力变形的另一个重要依据，这主要是因为镗刀在切削工件时，工件受切削力影响会产生很强的塑性变形应力场和温度场，从而导致工件发生形变。因此，以切削力和形变量作为评价指标来衡量切削参数优劣时，切削力比形变量更具有参考价值。因此，综合分析为了既提高加工质量，从切削力和形变量两方面综合考虑，正交试验的最优组合为 $A_3B_1C_1$，即切削速度 v=120m/min，进给量 v_f=0.02mm/r，切削深度 v_p=0.03mm。

四、试验验证

该转盘零件的镗孔工艺主要在双坐标镗床上完成，加工后的零件如图 5 所示。经三坐标测量机检测，转动圆盘的关键孔位 ϕ25 尺寸、形状精度测量结果如图 6、图 7 所示。

图 5 转盘实物图

在图 6 中，孔径的误差主要集中在后半程的第 22、23 孔加工，未满足孔径 $\Phi 25^{+0.003}_{-0.003}$ mm 的要求。这有可能是因为随着加工的进行，刀具受热磨损所引起的误差。在图 7 中，孔的圆度精度要求小于 0.005mm，有 3 个孔没有达到精度要求，其中第 9 和 15 孔的误差比较异常。这很可能是因为零件在加工后进行测量时，由于操作人员、测量机和主客观（温度、接触力）等偶然因素直接影响了测量结果，因此应排除这两个孔的误差。

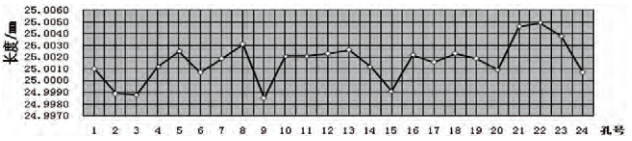


图 6 转盘 ϕ25 孔径分布

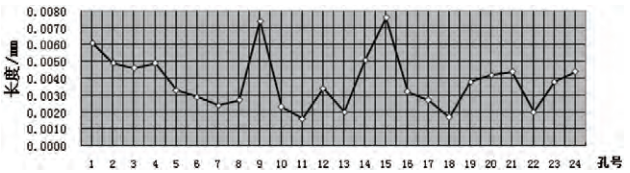


图 7 转盘 ϕ25 孔圆度分布

五、结语

本文基于 DEFORM−3D 建立了镗孔过程中的三维有限元模型，根据不同切削参数模拟获得了一系列的切削力、应变数值，并利用正交实验得出了最优切削参数组合，最后对转盘零件进行实际加工，结果也进一步验证了切削参数的合理性。与传统加工方法相比，这种方法节省了工艺试验材料和费用，缩短了产品开发周期，为今后类似精密零件的切削加工提供了参考。