

1-15-2021

Optimized Analysis of Milling Thin-wall Parts Based on SHELL Element Models

Yusong Liao

1. Department of Mechanical and Automotive Engineering, Chuzho Vocational and Technology College, Chuzhou 239000, China; ;

Han Jiang

2. Institute of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimized Analysis of Milling Thin-wall Parts Based on SHELL Element Models

Abstract

Abstract: As to milling the thin-wall part accurately, here with the finite element model *composed of SHELL elements, the effects of lowering position, size of the part and cutting parameters to the deformations of the thin-wall part were analyzed and compared, and the corresponding theoretical analysis was provided.* The conclusions can be got as; the model composed of SHELL elements can analyze the factors causing the defforations of the thin-wall part and optimize the cutting method and cutting parameters effectively to improve the machining accuracy and efficiency.

Keywords

SHELL element, finite element, thin-wall, milling, accuracy

Recommended Citation

Liao Yusong, Han Jiang. Optimized Analysis of Milling Thin-wall Parts Based on SHELL Element Models[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(6): 1381-1387.

基于 SHELL 单元模型的对薄壁件铣削仿真优化分析

廖玉松¹, 韩江²

(1. 滁州职业技术学院机械与汽车工程系, 滁州 239000; 2. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230003)

摘要: 为了实现对薄壁框架零件较高精度的铣削加工, 通过基于 SHELL 单元所组成的有限元模型, 在充分提高分析效率的基础上, 分析了落刀位置、零件几何尺寸以及切削用量在加工过程中对零件变形的影响, 最终对零件的不同切削参数下的变形量进行了分析。最终可以得出结论: 采用基于 SHELL 单元的有限元模型在提高分析效率的基础上, 可以对薄壁件的加工过程进行较为系统的优化最终以达到提高薄壁件加工精度和加工效率的目的。

关键词: SHELL 单元; 有限元; 薄壁; 铣削; 精度

中图分类号: TG54 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2015) 06-1381-07
DOI:10.16182/j.cnki.joss.2015.06.032

Optimized Analysis of Milling Thin-wall Parts Based on SHELL Element Models

Liao Yusong¹, Han Jiang²

(1. Department of Mechanical and Automotive Engineering, Chuzhou Vocational and Technology College, Chuzhou 239000, China;
2. Institute of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230003, China)

Abstract: As to milling the thin-wall part accurately, here with the finite element model composed of SHELL elements, the effects of lowering position, size of the part and cutting parameters to the deformations of the thin-wall part were analyzed and compared, and the corresponding theoretical analysis was provided. The conclusions can be got as: the model composed of SHELL elements can analyze the factors causing the deformations of the thin-wall part and optimize the cutting method and cutting parameters effectively to improve the machining accuracy and efficiency.

Keywords: SHELL element; finite element; thin-wall; milling; accuracy

引言

随着工业的不断发展, 薄壁件的需求量日益增多, 且其加工精度的要求也越来越高, 特别是航空航天制造领域以及汽车制造领域, 其对整体大型薄壁件高精度加工技术需求更是迫切。由于薄壁件的刚性较弱, 因此其加工过程会存在诸多影响加工精度的问题。薄壁件的高精度加工是目前工业领域 1

个较难解决的问题。

目前国内外对该领域有一定的研究, 国内的梁睿君^[1], 吴琮^[2], 董辉跃^[3], 王光宇^[4]以及梁岩里^[5]通过运用传统三维实体有限元模型模拟了薄壁件的切削过程, 并在颤振、切削参数以及刀具参数的优化方面做了一定的工作, 但是该分析模型所需的时间往往较长, 效率低下, 难以在实际生产中进行广泛运用, 陈华^[6]通过有限元模拟了薄壁件的装夹效果并对其进行优化, 但是仅仅装夹上的优化并不能从根本上解决问题, 孔金星^[7]通过实际实验对薄壁件的切削参数进行了一定的优化, 但是整个实验过程同样会消耗大量的时间和试件, 其成本较高, 叶建友^[8]提出了 1 种以冷却液为介质的空化脉



收稿日期: 2014-12-04 修回日期: 2015-03-31;
基金项目: 国家自然科学基金(51275147);
作者简介: 廖玉松(1969-), 男, 安徽, 硕士, 副教授, 研究方向为 CAD/CAM、数控加工与编程; 韩江(1963-), 男, 河南, 博士, 教授, 博导, 研究方向为数控技术和 CMIS 系统的研究工作。

<http://www.china-simulation.com>

• 1381 •

冲射流作为薄壁件铣削的随动柔性辅助支撑的加工方法,但是该方法支撑的稳定性以及支撑效果目前还并未得到验证。马纯艳^[9]和国外的 Jinxing K^[10]提出通过提高切削速度的方法提高薄壁件的加工质量,这也只能算是切削参数优化的一部分,并不能从根本上解决问题。

针对以上技术所存在的部分缺陷,从提高效率 and 降低成本的角度出发,目前急需 1 种新技术能够快速且较精确地优化薄壁件加工方法和切削参数。本文提供 1 种基于 SHELL 单元的有限元模型对薄壁框架零件的铣削过程进行了模拟,经过验证,其模拟精度不低于传统的三维实体有限元模型,但是在效率上远远高于传统的三维实体有限元模型,该技术在工业中具有较为广泛的实用性。

1 变形分析模型的选择

如图 1 所示的薄壁框体零件采用平面表示,其网格划分所用单元为 SHELL 单元,已加工面和未加工面通过对 SHELL 单元赋值不同厚度进行区分。其 4 个面都定义有一致的特征量,具体包含变形线、落刀线及其关键性的点、线、面。变形线为计算变形量的具体位置,落刀线为加工零件时刀具的加工初始位置。落刀的具体位置根据计算需要进行具体选择。通过计算验证,最终得出结论:该方式所建立的模型与传统的三维实体有限元模型所得到的结果差别甚小,可以忽略不计,因此该方法完全可以取代三维实体有限元模型。

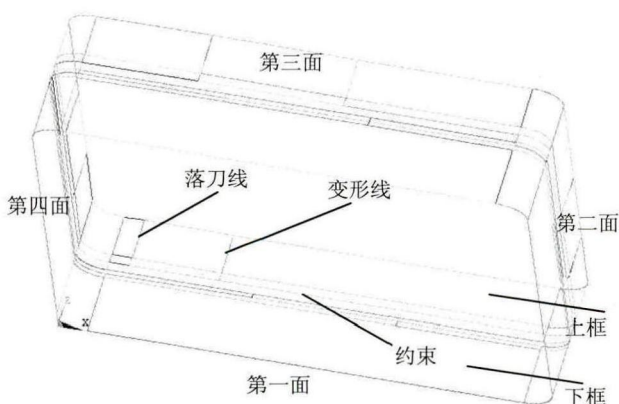


图 1 侧壁变形分析有限元模型示意图

图 2 为各面变形线和落刀线的选择基准。根据实际加工情况,这里将约束划分为无约束、相邻框体约束和工艺凸台约束 3 种。相邻框体约束来自于与其相邻的框,工艺凸台约束为侧壁外侧所设置的凸台。根据此 3 类约束,可以按照需要选择相应的模型。

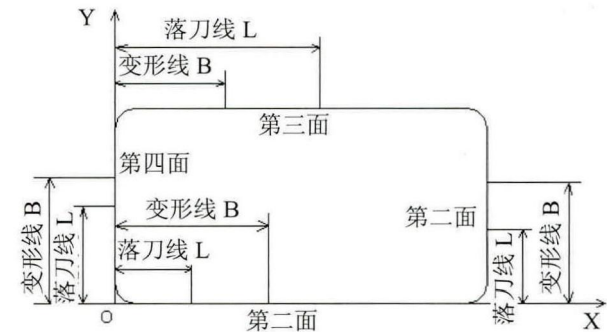


图 2 落刀线与变形线选择基准示意图

2 基于侧壁变形模型分析的变形规律探索

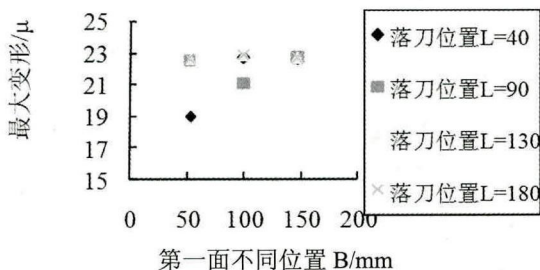
2.1 不同落刀线位置对侧壁变形的影响

选择的框体的尺寸为长 200 mm, 宽 200 mm, 高 50 mm, 未加工时候壁厚为 3 mm, 采用直径为 10 mm 的 Fraisa 刀具对其进行铣削加工。对零件内侧进行顺铣, 走刀路径为对一、二、三、四面进行依次加工, 完成加工后刀具返回起始落刀处。铣削参数为: 轴向切深 $a_p=10$ mm, 径向切深 $a_e=1$ mm, 每齿进给量 $f_z=0.1$ mm/z, 主轴转速 $n=10\ 000$ r/min。对模型所施加的约束为: 二、四面为无约束状态, 一、三面相邻工件约束。将刀具的起始落刀位置 L 定在第一面, 当 L 值分别取 40, 90, 130, 180 mm 时计算各个侧壁不同部位的变形量, 各个面的 L, B 值的定义见图 2, 计算结果如图 3 所示。

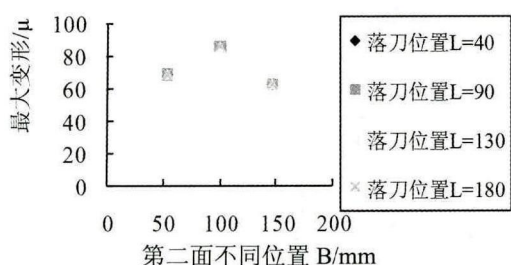
图 3(a)为计算得到的第一面的各轴线处的最大变形量。落刀位置 L 对第一面各位置处的变形量的影响, 下面通过改 L 值来对变形量的变化进行考察。

(1) $L=40$, 在 $B=50$ 位置处变形量偏小, 这是由于在初始阶段材料未完全去除时零件的刚性较好, 随着加工过程的进行, 零件被去除的材料逐

渐增加, 其刚性也随之减弱, 从图 3(a)中可以看出, 在 $B=100$ 时, 最大变形量明显增大, 然而在 $B=150$ 时变形并未有明显增大, 这主要得益于其已经很靠近约束处。



(a) 第一面各轴线位置最大变形示意图



(b) 第二面各轴线位置最大变形示意图

图 3 第一、二面各轴线位置最大变形示意图

(2) $L=90$, 变形较大的位置为 $B=50$ 、 150 处, 在 $B=100$ 位置处零件的变形量偏小, 这主要归结于在 $B=100$ 时刀具的切削行程仅仅为 10 mm , 去除的材料不是很多, 因此零件的刚性也不会降低很多, 所以不会引起零件较大的变形。随着零件被去除材料的增加, 在 $B=150$ 处, 变形量自然会因为零件的刚性减弱而增大。当切削至位置 $B=50$ 时, 未加工的部分仅为 $B=50$ 至 $B=90$ 部分, 零件的刚性显然较弱, 其变形量自然会明显大于 $B=100$ 处的变形量。

(3) $L=130$, 在 $B=100$ 位置处, 零件的变形量较大, 在位置 $B=50$ 、 150 处零件的变形量偏小, 这主要归结于落刀位置为 $L=130$ 时, 在位置 $B=100$ 处零件未去除材料的部分只有 $B=100$ 至 $B=130$ 这段, 其过弱的刚性导致了零件较大的变形量, 而在位置 $B=150$ 及 $B=50$ 处零件的变形量与在 $L=90$ 处落刀时的变形量并未有太大的差别。

(4) $L=180$, 当在 $L=180$ 处进行落刀时零件的变形量与在 $L=130$ 处进行落刀时零件的变形量并未有太大的差别。

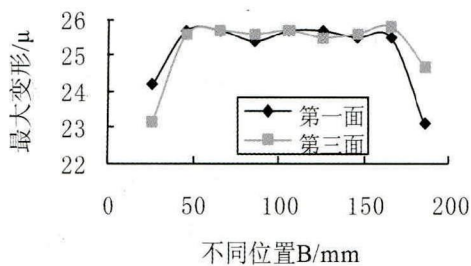
综上所述, 落刀位置所在的第一面, 其实落刀位置的变化对表面不同部位的变形量是有一定的影响的。这主要归因于不同的落刀位置会导致零件不同部位的刚性发生较大的变化。落刀处两侧的变形量的差别会随着刚性差别的增大而增大, 在实际实验过程中可以很明显的观察到落刀位置处的较为严重的接刀痕。因此, 在实验中为了避免严重的接刀痕, 可选择刚性较好的靠近零件弯角部位进行落刀。

由于落刀线的位置处于第一面, 因此其不会对其他面的具体变形量产生严重的影响, 其结果如图 3(b)所示。以下的变形量分析中, 若没有进行说明, 则默认取落刀线选择在第一面的 $L=10$ 位置处。

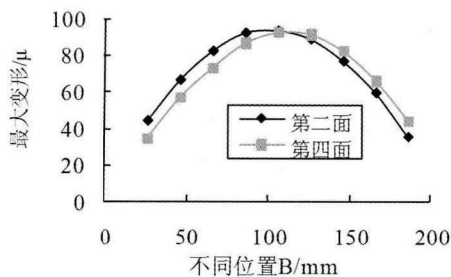
2.2 同一面不同位置处变形分析

模型的参数设置与前面的模型一致。在所有面的若干位置处进行分析, 并记录每一位置的最大变形量, 结果如图 4 所示。在拐角附近区域所有面的变形量均较小, 这主要得益于拐角附近区域的约束较大, 其刚性较好。另外, 各面的最大变形量曲线也并非一致, 第一、三面, 尽管中部的变形量较明显大于两端的变形量, 但是其中间部位不同位置处的变形量差别并非很大, 这主要是由于受到相邻框体的约束的结果。第二、四面, 其中间的变形量最大, 两端其变形量呈现明显降低的趋势, 其曲线呈现较为典型的抛物线形状, 这主要是由于其外侧没有任何约束所导致。

从以上分析可知, 对于薄壁件的加工, 不同的约束对加工过程零件的变形量影响较大, 在零件的刚性较弱以及没有任何约束的位置处可以通过减小切削用量分多次走刀进行切削或者设置特定的凸台使得变形量减小。



(a) 第一、三面各轴线位置最大变形示意图



(b) 第二、四面各轴线位置最大变形示意图

图 4 各轴线位置最大变形示意图

2.3 走刀方式和切削参数对变形的影响

2.3.1 分层加工与大切深情况下变形对比

在合适的范围内减小轴向切深 a_p 时会使得切削力明显减小, 因此最终会使得变形量减小, 较小的轴向切深也比较适用于高速切削工艺中。模型中将大切深 $a_p=36$ mm 平均分 4 次走刀。为便于比较, 模型的尺寸以及切削用量的设置均与前期模型一致。通过对模型分析计算, 最终得到了不同面的不同位置处的变形量, 图 5 所示的为在第一面的位置为 $B=53$ 出的变形量。

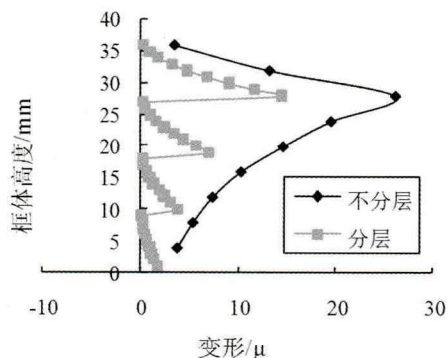


图 5 第一面 $B=53$ 处分层与不分层变形对比图

可以看出, 与大切深相比, 采用分层切削时零

件的变形量会很明显减少很多, 而且两者的变形曲线形状有很大不同, 对于大切深, 在薄壁的最上端位置处其变形量达到最大, 而对于分层切削, 其最大变形量出现的位置往往在其轴向切深的最底部, 其主要原因为当轴向切深较小时, 切削力最大的部位往往在最下端, 而当轴向切深较大时, 从上之下, 切削力在两端的切削力较小, 中部的切削力较大, 因此导致了 2 种切削条件下变形曲线的差别。从上述比较可以看出, 采用分层切削的加工方式可以有效控零件的加工变形。

2.3.2 不同 a_p 下最大变形对比

所取的轴向切深值 a_p 分别为 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20 mm, 框体的其余尺寸设置为: 长度为 100 mm, 宽度为 100 mm, 高度为 30 mm, 壁厚为 3 mm, 刀具螺旋角为 30° , 直径为 10 mm, 内壁采用顺铣方式, 切削用量为: 径向切深 $a_e=1$ mm, 每齿进给量 $f_z=0.15$ mm/z, 主轴转速 $n=10000$ r/min, 图 6 为表面最大变形量的计算结果。

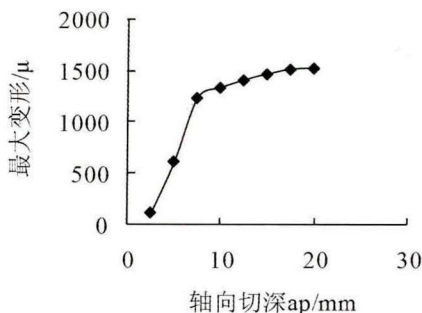


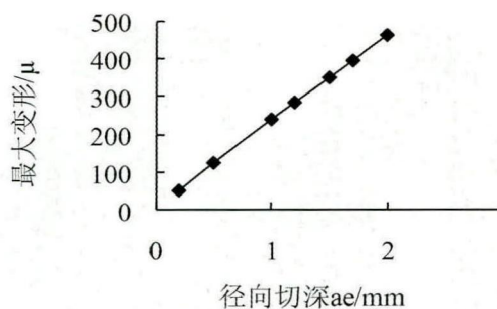
图 6 不同 a_p 下变形对比图

可以看出, 在轴向切深 a_p 较小时, 最大变形量随着轴向切深 a_p 的增加而迅速增加, 当增至 7.5 mm 以上时, 零件最大变形量的增加会变得缓和。其主要原因为当轴向切深大于某一值时, 轴向切深的变化不会引起刀齿最大切削面积的变化, 因此不会引起切削力的变化, 从而其变形也不会有明显的变化。在精度满足要求的前提下, 可以尽量采用较大的轴向切深 a_p 以提高实际生产效率。如图 6 所示, 当轴向切深在 10 mm-20 mm 范围内变化时, 最大变形量没有很明显的变化, 当轴向切深为 20 mm

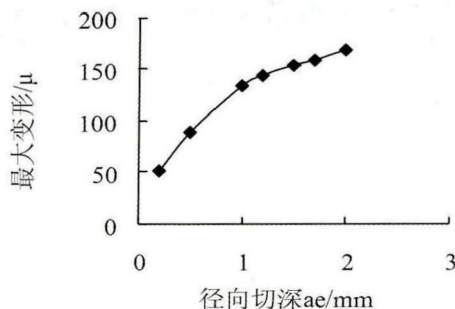
时其生产效率能提高 1 倍。

2.3.3 不同 a_e 下最大变形对比

通过改变径向切深 a_e 观察零件变形量的变化。其轴向切深取值为 0.2、0.5、1、1.2、1.5、1.7、2 mm, 框体的其他几何尺寸设置以及刀具参数均与上述模型一致, 轴向切深取 $a_p=5$ mm 以及 $a_p=10$ mm 时, 表面的最大变形量的计算结果分别如图 7(a), (b) 所示。



(a) $a_p=10$ 时不同 a_e 下变形对比图



(b) $a_p=5$ 时不同 a_e 下变形对比图

图 7 $a_p=10$ 以及 $a_p=5$ 时不同 a_e 下变形对比图

可以看出, 在轴向切深为 $a_p=10$ mm 时, 最大变形量基本与径向切深 a_e 呈现线性关系, 当轴向切深取 $a_p=5$ mm 时, 随着径向切深 a_e 的增加, 最大变形量也会逐渐增加, 不过在径向切深 a_e 增大到 1 mm 后, 其最大变形量会出现一个较为稳定的状态, 这可以归因于当轴向切深 a_p 较小时, 若增大径向切深 a_e , 其切削面积在形成变形点位置并未增加, 因此导致切削力并没有明显的增加的趋势, 最终零件的变形量也不会有明显的增加趋势。如图 8 所示, 在径向切深由原先的 a_e 增加至 a_{e1} 的过程中, 其切削面积有增大的趋势(在 EF 部位的切削面积稍大于在 BC 部位的切削面积), 但是位于形成变形点的部位

(如图 8 中的 H 点处), 2 种不同径向切削深度情况下其切削力并未有显著变化, 由此可见, 当铣削侧壁时, 在轴向切深 a_p 较小时, 当径向切深 a_e 大于某特定值时, 变形量不会随着径向切深 a_e 的增大而有所变化。在实际铣削加工过程中, 可以遵循这原则, 在满足精度要求的条件下, 通过增大轴向切深 a_e 来提高加工效率。

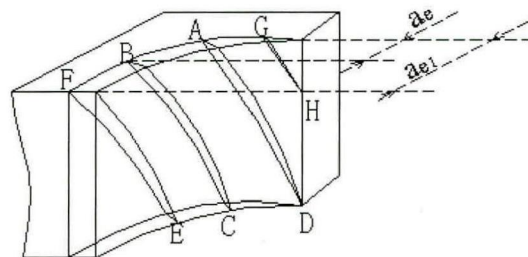


图 8 a_p 较小时不同 a_e 下变形示意图

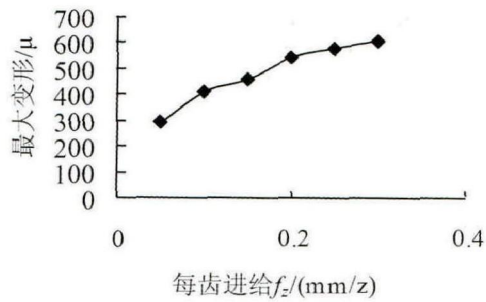
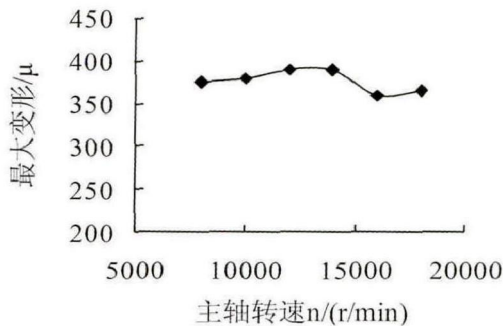
2.3.4 不同 f_z 下最大变形对比

每齿进给量 f_z 分别取 0.05、0.1、0.2、0.25、0.3 mm/z, 框体零件的几何尺寸的设置以及刀具参数与上述模型一致, 径向切深 $a_e=1$ mm, 轴向切深 $a_p=10$ mm, 主轴转速为 $n=10000$ r/min, 表面的变形量的计算结果如图 9(a) 所示。

可以看出, 表面的变形量随着每齿进给量 f_z 的增加有缓和增加的趋势, 这主要归结于增加每齿进给量后同时参与切削的齿数以及每齿所切的材料的厚度会随之增加, 因此会造成切削力的增加从而最终导致零件的变形量增大。因此, 可以通过减小每齿进给量 f_z 以减小零件的变形, 不过其控制变形的效果不是很明显, 在实际加工中往往会降低加工效率, 因此可以将其看作控制零件变形的次要因素。

2.3.5 不同 n 下最大变形对比

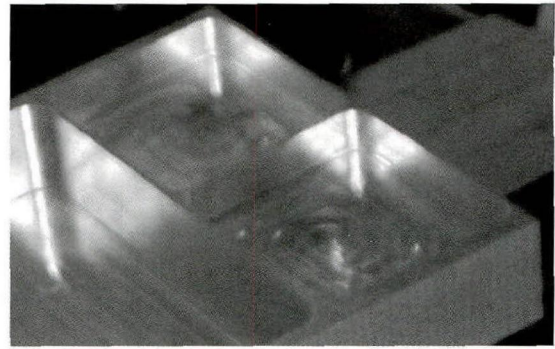
主轴转速分别取 8 000、10 000、12 000、14 000、16 000、18 000 r/min, 框体零件的几何尺寸的设置与上述相同, 刀具螺旋角为 45° , 直径为 16 mm, 内壁采用顺铣方式进行加工, 径向切深取 $a_e=1$ mm, 轴向切深取 $a_p=10$ mm, 每齿进给量取 $f_z=0.15$ mm/z, 表面的最大变形量的计算结果如图 9(b) 所示。

(a) 不同 f_z 下变形对比图(b) 不同 n 下变形对比图图 9 不同 f_z 和 n 下变形对比图

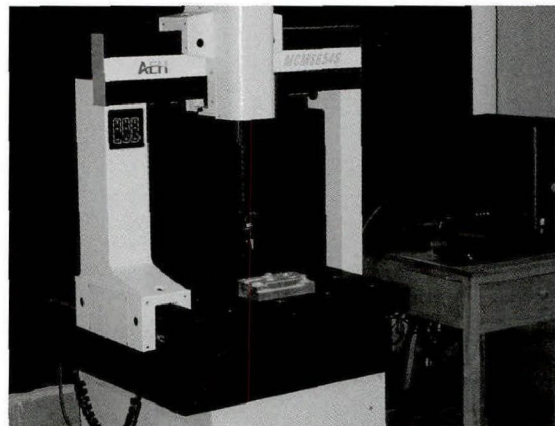
可以看出,零件的表面的变形量随着主轴转速 n 的增加其变化趋势为先增加后减小,根据刀具的直径以及主轴转速可以算得本算例的切削速度取值范围为 $v=402\sim 904$ m/min,文献[11]的实验数据同样表明在该切削速度范围内遵循先增大后减小的变化趋势。针对精加工而言,当主轴转速仍在上述范围内时,其切削速度的变化范围为 $v=251\sim 565$ m/min,实验结果表明在该范围内切削力并未呈现减小趋势,因此,对于直径不一致的刀具而言,需要根据具体的切削情况选择其切削力较小的主轴转速以确保零件的变形量较小而提高零件的加工精度。

3 实验验证

根据前有限元模型优化的结果,取其优化后的走刀方式和切削参数,在型号为 HS664RT 的菲迪亚数控铣床上进行加工,经过优化后的加工方式和切削参数下得到的框形零件如图 10(a)所示。加工完成后在如图 10(b)所示的三维坐标机上对加工得到的零件的加工误差进行测量。



(a) 加工后的零件



(b) 三维坐标测量仪

图 10 加工后的零件以及测量所用三维坐标测量仪

最终得到的零件的最大变形量仅为 $40\ \mu\text{m}$ 左右,零件的壁厚去除材料误差仅为 $25\ \mu\text{m}$ 左右。相对于未经过优化后的走刀方式和切削参数下得到的数百微米的变形量以及材料去除误差而言,其精度得到了大大改善。

4 结论

本文运用基于 SHELL 单元的有限元模型对薄壁框架零件的铣削加工过程的变形进行了高效的模拟分析,并提出了提高零件加工精度的一系列优化措施,包括零件的尺寸,落刀位置以及切削参数的优化,最终可以得出以下结论:

- (1) 在实际实验中为了避免严重的接刀痕而提高零件的加工质量,可通过选择靠近诸如零件弯角之类的刚性较好的部位进行落刀;
- (2) 约束对加工过程的变形量的影响较大,在零件的刚性较弱以及没有任何约束的位置处可

以通过减小切削用量分多次走刀进行切削或者设置特定的凸台进行约束使得其变形量减小;

(3) 框体的长度和高度的增加会使得零件的刚性降低, 从而增大零件的变形量, 其中高度对变形的影响大于长度, 框体厚度的增加有助于增加零件的刚性, 从而会减小零件的变形;

(4) 与大切深相比, 采用分层切削时零件的变形量会很明显减少很多, 采用分层切削的加工方式可以有效控零件的加工变形;

(5) 随着轴向切深、径向切深以及每齿进给量的增加, 零件变形均有增加的趋势, 在精度满足要求的前提下, 可以试着增大切削用量以提高加工效率, 当切削速度在 $v=402\sim 904\text{ m/min}$ 范围内变化时表面的最大变形量遵循先增大后减小的趋势, 需要根据具体的切削情况选择其切削力较小的主轴转速以确保零件的变形量较小而提高零件的加工精度;

(6) 经过实验验证, 可以发现经过模型优化后的走刀方式和切削参数能够在很大程度上改善零件的加工精度, 从而进一步说明基于 SHELL 单元的模型在大大提高分析效率的基础上能够对薄壁件铣削加工过程的变形因素进行具体的分析从而对实际加工过程提供可靠的指导以提高最终的加工精度和加工效率。

参考文献:

- [1] 梁睿君, 叶文华. 薄壁零件高速铣削稳定性预测与验证 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 135-139.
- [2] 吴琼, 张以都, 张洪伟, 等. 航空薄壁件铣削加工动态特性与实验分析 [J]. 兵工学报, 2008, 29(9): 1118-1119.
- [3] 董辉跃, 柯映林, 杨慧香. 薄壁板高速铣削加工过程中的让刀误差预测 [J]. 浙江大学学报, 2006, 40(4): 6062.
- [4] 王光宇, 吴运新, 闫鹏飞, 等. 航空铝合金薄壁件铣削加工变形的预测模型 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(5): 1696-1702.
- [5] 梁岩里, 王凯, 杨三强, 等. 薄壁件铣削加工颤振控制研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012, (4): 28-31.
- [6] 陈华, 陈蔚芳, 郑会龙. 薄壁件装夹方案优选的有限元模拟 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2008 (3): 63-67.
- [7] 孔金星, 雷大江, 岳晓斌. 薄壁零件高速铣削实验 [J]. 机床与液压, 2008, 36(3): 52-55.
- [8] 叶建友, 吕彦明, 徐看. 薄壁件铣削变形及补偿技术研究 [J]. 制造技术与机床, 2014 (3): 17-20.
- [9] 马纯艳. 薄壁件高速铣削加工变形分析与实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [10] Ratchev S, Liu S, Becker A A. Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162: 673-681.
- [11] 赵云峰, 程丽, 祁荣先, 等. 并联机床虚拟样机建模与加工过程动力学仿真 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(2): 357-361.