

文章编号:1000-6893(2009)03-0570-07

薄壁件加工变形主动补偿方法

陈蔚芳, 楼佩煌, 陈华

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

Active Compensation Methods of Machining Deformation of Thin-walled Parts

Chen Weifang, Lou Peihuang, Chen Hua

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics
and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 研究薄壁件加工过程中受力变形产生的回弹误差控制,提出了分层完全补偿和优化补偿两种加工路径补偿方法,建立了加工路径补偿优化模型,考虑了多次走刀间加工变形和切削力的耦合作用,并应用迭代算法求解路径补偿优化模型。以航空薄壁件单刃端铣加工为例,对完全补偿、分层完全补偿和优化补偿进行了仿真分析和试验分析。结果表明,分层完全补偿和优化补偿能更好地减少加工误差,为薄壁件受力变形控制提供了参考依据。

关键词: 加工; 变形; 迭代算法; 薄壁件; 优化; 主动补偿

中图分类号: TG501; V261 **文献标识码:** A

Abstract: In order to control the machining error caused by cutting deformation of thin-walled parts, two approaches of machining path compensation are proposed, i. e., multilayer full compensation and optimization compensation. A mathematical model is established for the optimization compensation by considering the coupling effect between the machining deformation and the cutting force. The model is solved with an iterative algorithm. The case of the end milling for a thin-walled aircraft part is taken as an example to study the three compensation methods of full compensation at the last layer, multilayer full compensation, and optimization compensation. The simulation results of the three compensation methods are compared with those of experiments. The conclusion is that the last two compensation methods can reduce machining errors better than the first one. These two compensation methods are proved to be efficient in controlling machining deformation and reducing machining errors.

Key words: machining; deformation; iterative algorithm; thin-walled part; optimization; active compensation

在切削力作用下,薄壁件及刀具发生较大变形,刀触点处实际切深小于名义值,从而产生让刀现象,造成一部分材料残留下来,残留下来的余量等于加工过程中的变形量,加工完成后,变形弹性恢复,造成工件的尺寸、形状和位置误差。在加工条件一定的情况下,工件的壁厚越薄,受力变形越严重,产生的误差也越大。让刀引起的残余材料是铣刀在切削过程中无法切除的,需采用多次重复精加工或对变形进行预补偿等方法加以解决。由于多次重复精加工导致加工效率低下,因此根据预测的加工变形在精加工时对刀具路径进行误差补偿,以抵消受力变形引起的加工误差,是目前薄壁件变形控制的一个比较热门的研究方向。

P. Dépincé 等^[1-2]提出了一种集刀具误差预

测和补偿的表面误差控制方法,为了得到刀具的补偿曲线,采用了迭代算法。E. M. Lim 等^[3]提出了采用控制表面策略补偿球头刀铣削加工误差的方法,在该方法中,刀具引起的加工误差通过表面生成模型预测,不需要通过实际的加工试验而获取。在生成控制表面时,为了适应表面误差的不同情况,定义了误差敏感函数。V. S. Rao 等^[4]对由切削力引起的刀具变形进行了分析,在此基础上研究了曲面加工刀具路径修正的方法,以补偿刀具误差,补偿量的确定采用迭代算法。上述文献主要从刀具变形或偏摆引起的表面误差角度研究了误差预测与补偿方法。

C. M. Lee 等^[5]通过试验手段来修正刀具轨迹,给出了薄壁悬臂件最优的刀具方位。S. Ratchev 等^[6-7]在加工变形预测基础上,采用单层次循环和多层次循环两种方式对刀具轨迹做补偿,单层次循环只对刀具轨迹做一次性修正补偿,

收稿日期:2008-06-15; 修订日期:2009-01-14

基金项目:部级项目

通讯作者:陈蔚芳 E-mail: meewfchen@nuaa.edu.cn

不考虑刀位点变化与加工变形的耦合效应;多层次循环方式在修正后的刀位点与切削力模型、加工变形间进行迭代计算,直至加工表面误差满足给定的精度要求。胡创国^[8]也对单层次循环和多层次循环误差补偿方案进行了分析,只考虑单次走刀。楼文明^[9]分析了刀具路径补偿量的迭代计算步骤,并指出了为了减少任意位置进行刀位补偿的复杂性,可以对预测表面上变形的最大值和最小值之间进行直线插补,然后再进行补偿。康永刚等^[10]在考虑刀具/工件系统变形基础上,给出了基于切削力信号的实际切深计算方法,并基于实际切深进行了最大变形误差的预测,为实现在线误差补偿打下了基础。王增强等^[11]在讨论了薄壁零件加工过程中的切削力模型和工件加工表面残余应力的分布规律后,对叶盘零件加工变形误差提出了补偿方案,采用的是单层完全补偿。孙杰等^[12]采用有限元软件对薄壁框进行了加工变形预测,基于得到的加工变形在考虑一定的回弹量基础上对刀位点进行修正以实现补偿,但没有给出路径补偿时各关键点处回弹系数的计算方法。赵威^[13]、王志刚^[14]等通过分析侧壁类零件加工变形的具体情况,提出采用偏摆刀具和修正径向切深来实现变形补偿。万敏等^[15]对铣削过程中误差补偿技术的研究状况进行了系统的分析。

从现有文献资料看,研究重点主要侧重于刀具引起的误差预测与补偿、大型腹板和侧壁铣削加工变形预测与补偿,加工路径上各切削点的补偿量一般等于预测的变形值,或变形值乘上回弹系数,即单层完全补偿,也有研究者通过迭代计算,求得更合理的补偿量。补偿的方式有加工路径的位置补偿和刀具的偏摆补偿(通常需4~5轴数控机床才能实现)。现有薄壁件变形预测与主动补偿研究中,主要侧重于单次走刀的变形预测和误差补偿,对多次走刀的变形预测和分层补偿方法研究相对较少。

对加工路径进行主动补偿的关键之一是补偿量的确定,即加工路径上各刀位点相对于原有路径的偏离量的确定。对于不同的路径补偿方法,补偿量和补偿效果不一样。本文在现有文献完全补偿(即补偿量等于加工变形量)研究基础上,对多次走刀下的分层完全补偿和优化补偿两种路径补偿方法进行了深入分析,并以航空薄壁件单刃端铣加工(为减少切削力、加快刀具准备速度和减少刃磨时间,有一些航空企业常采用类似镗削的单刃端铣方法铣削薄壁件各表面)为例,采用数值

仿真与试验分析相结合的方法,对完全补偿、分层完全补偿和优化补偿法的补偿结果进行了分析与比较,得出了分层完全补偿和优化补偿能够更好地减少加工误差的结论,为薄壁件受力变形控制提供了一种较好的主动补偿方法。

1 加工路径主动补偿方法

1.1 分层完全补偿

完全补偿是指走刀路径上各工位(为简化仿真过程,采用离散工位代替连续切削过程)处的补偿量等于变形量的补偿方式。如图1所示,工件上P点的变形值为 Z_i ,则该点的补偿值也取 Z_i ,补偿曲线与变形曲线沿基准轴对称。显然,完全补偿时,由于补偿量等于变形量,对不同切削位置的变形量进行连续插值就可以得到连续的补偿量。

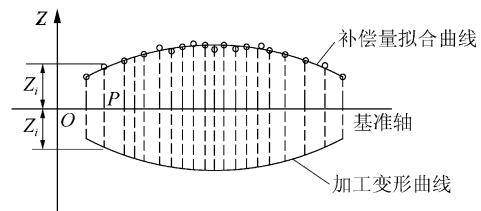


图1 补偿量与变形量

Fig. 1 Compensation values and deformation values

上述方法计算简单,但没有考虑补偿量与加工变形的耦合关系,即补偿后,切深加大,切削力变大,从而导致变形增大,补偿后的变形量大于补偿前该工位的变形量,所以采用完全补偿不能完全消除由让刀余量引起的加工误差。针对变形耦合问题,郑联语等^[16]提出用变形量乘以一个回弹系数作为补偿量,但没有对回弹系数的确定问题给出具体分析。

分层完全补偿是指在每次走刀过程中,对刀具路径进行完全补偿,以减少只进行最后一次补偿所带来的较大的回弹误差,同时可以避开回弹系数的计算问题。

假设精加工层数(即走刀次数)为 m ,每一层工位数为 n ,则第 $j(j=1,2,\dots,m)$ 层第 $i(i=1,2,\dots,n)$ 个工位的实际铣削深度可表示为

$$a'_{pi}^{(j)} = a_{pi}^{(j)} + \delta_i^{(j)} - \delta'_i{}^{(j)} \quad (1)$$

式中: $a_{pi}^{(j)}$ 为实际名义铣削深度; $\delta_i^{(j)}$ 为补偿前变形量; $\delta'_i{}^{(j)}$ 为补偿后变形量。

某一工位处的加工误差等于要去除的加工余量减去实际铣削深度,表示为

$$\Delta_i^{(j)} = a_{pi}^{(j)} - a'_{pi}^{(j)} = \delta_i^{(j)} - \delta_i^{(j)} \quad (2)$$

未采用补偿时,该工位的加工误差表示为

$$\Delta_i^{(j)} = a_{pi}^{(j)} - (a_{pi}^{(j)} - \delta_i^{(j)}) = \delta_i^{(j)} \quad (3)$$

比较式(2)和式(3),可以得出

$$0 < \Delta_i^{(j)} < \Delta_i^{(j)} \quad (4)$$

图2为其中一层采用完全补偿加工的示意图。图中 a 线表示某一层加工前的工件表面; b 线表示某一层加工后的理想表面; c 线表示补偿前 b 线加工变形后所在的位置,也是完全补偿时的刀具走刀轨迹; d 线表示补偿前加工后的表面, c 线与 d 线关于 b 线对称; e 线表示某一层完全补偿加工后的表面。某一层补偿后,再进行后一层完全补偿时,余量更加均匀,从而减少加工误差。

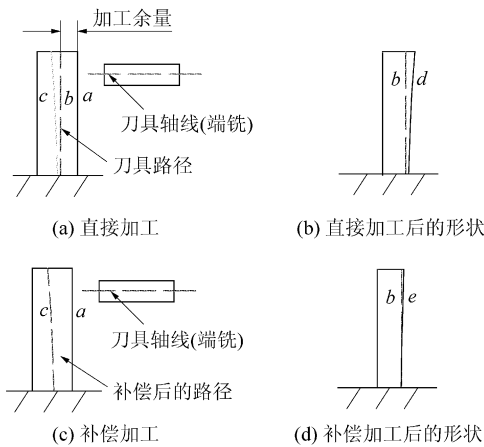


图2 某一层完全补偿加工示例

Fig. 2 Full compensation of a layer

分层完全补偿与完全补偿相比,由于每一层都进行了补偿,因而能匀化最后一次走刀的变形误差,所以能更有效地减小工件的加工误差。缺点是要根据预测变形生成多个数控补偿程序。

1.2 优化补偿

分层完全补偿适用于精加工走刀次数在两次以上的加工过程补偿,在精加工只采用一次走刀的情形下,分层完全补偿等同于完全补偿,没有考虑补偿量与加工变形间的耦合关系,为此,本文给出了基于预测变形的路径优化补偿方法,以解决补偿量与加工变形之间的耦合关系,把工件的加工误差减小到可以忽略或满足要求的范围内。

(1) 加工路径优化补偿模型

加工路径优化补偿主要指对路径上各工位处补偿量进行优化,然后根据一组最优补偿量,通过

拟合、插值等方法确定最优补偿路径。为了达到优化补偿的目的,必须对每一个工位处的补偿量分别进行优化,把各工位处的加工误差都减小到允许的范围内,即以最小化所有工位处的加工误差为目标函数进行优化,表示为

$$\begin{aligned} & \min \Delta_i^{(j)} \\ & \text{s. t.} \\ & f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \\ & v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: f, v 为进给量和切削速度,有一定的范围限制;设计变量为各工位的补偿量。该优化补偿模型同文献[7]相似,不同之处在于预测变形时考虑了多次走刀之间加工变形与切削力的相互耦合作用。

(2) 加工路径优化补偿量的求解

优化补偿考虑了切削深度与加工变形之间的耦合关系,式(5)的最优解即为第 j 层第 i 个工位处的最优补偿量。本文采用迭代算法求解最优补偿量,即每一迭代步均完全补偿前一迭代步的加工误差,然后采用有限元法计算当前迭代步的加工误差,若误差达不到要求,则继续迭代,反之,迭代终止。最优补偿量求解流程如图3所示。

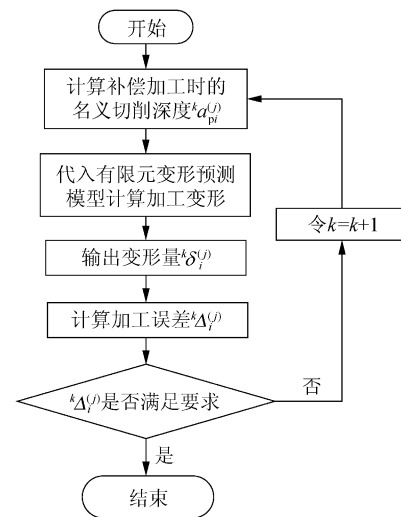


图3 最优补偿量求解流程图

Fig. 3 Flowchart of optimal compensation solution

对于第 j 层第 i 个工位而言,补偿量的初始值为0,即没有补偿量,求解出此时的加工变形量 $\delta_i^{(j)}$ 。显然,在补偿前工件的加工误差等于加工变形量 $\delta_i^{(j)}$ 。第1次迭代时,补偿量 $^1\gamma_i^{(j)}$ 等于前一次的加工误差,表示为

$$^1\gamma_i^{(j)} = \delta_i^{(j)} \quad (6)$$

此时的名义切深为

$${}^1 a_{pi}^{(j)} = a_{pi}^{(j)} + {}^1 \gamma_i^{(j)} = a_{pi}^{(j)} + \delta_i^{(j)} \quad (7)$$

切削深度的变化直接影响切削力的大小,而引起变形量的改变。把切削深度代入加工变形预测模型计算出加工变形量 ${}^1 \delta_i^{(j)}$,此时的加工误差表示为

$${}^1 \Delta_i^{(j)} = {}^1 \delta_i^{(j)} - {}^1 \gamma_i^{(j)} = {}^1 \delta_i^{(j)} - \delta_i^{(j)} \quad (8)$$

即为变形量减去补偿量。第 2 次迭代时,补偿量等于前一次的补偿量加上前一次的加工误差,表示为

$${}^2 \gamma_i^{(j)} = {}^1 \gamma_i^{(j)} + {}^1 \Delta_i^{(j)} = \delta_i^{(j)} + ({}^1 \delta_i^{(j)} - \delta_i^{(j)}) = {}^1 \delta_i^{(j)} \quad (9)$$

此时的名义切深为

$${}^2 a_{pi}^{(j)} = a_{pi}^{(j)} + {}^2 \gamma_i^{(j)} = a_{pi}^{(j)} + {}^1 \delta_i^{(j)} \quad (10)$$

代入加工变形预测模型计算此时的加工变形量为 ${}^2 \delta_i^{(j)}$,则此时的加工误差为

$${}^2 \Delta_i^{(j)} = {}^2 \delta_i^{(j)} - {}^2 \gamma_i^{(j)} = {}^2 \delta_i^{(j)} - {}^1 \delta_i^{(j)} \quad (11)$$

第 k 次迭代时,补偿量等于第 $k-1$ 次的补偿量加上该补偿量下的加工误差,表示为

$${}^k \gamma_i^{(j)} = {}^{k-1} \gamma_i^{(j)} + {}^{k-1} \Delta_i^{(j)} = {}^{k-2} \delta_i^{(j)} + ({}^{k-1} \delta_i^{(j)} - {}^{k-2} \delta_i^{(j)}) = {}^{k-1} \delta_i^{(j)} \quad (12)$$

补偿量为 ${}^k \gamma_i^{(j)}$ 时的加工变形量为 ${}^k \delta_i^{(j)}$,加工误差为

$${}^k \Delta_i^{(j)} = {}^k \delta_i^{(j)} - {}^k \gamma_i^{(j)} = {}^k \delta_i^{(j)} - {}^{k-1} \delta_i^{(j)} \quad (13)$$

依此类推,直至把变形误差降低到一个很小的范围内,用数学公式表示为

$$|{}^w \Delta_i^{(j)}| = |{}^w \delta_i^{(j)} - {}^{w-1} \delta_i^{(j)}| < \eta \quad (14)$$

式中: w 为迭代终止时的迭代次数; η 为一个趋近于零的很小的正数。

根据计算得到的优化补偿值,通过曲线、曲面拟合方法求得刀位轨迹上各插值点的优化补偿位置,以此补偿位置作为刀位轨迹和数控加工程序修正的依据,使刀具按照补偿轨迹加工,达到补偿目的。补偿程序的生成可借助 CAD/CAM 软件实现,也可以通过自行开发软件完成。图 4 是自行开发的生成数控补偿程序的软件界面。

1.3 补偿值计算中的加工变形预测方法

在补偿值求解过程中,关键问题是加工变形的预测,目前主要采用有限元法,主要过程包括建立或导入几何模型、定义材料模型、划分网格、施加边界条件和切削力载荷、计算和处理加工变形量、去除材料等,如图 5 所示。

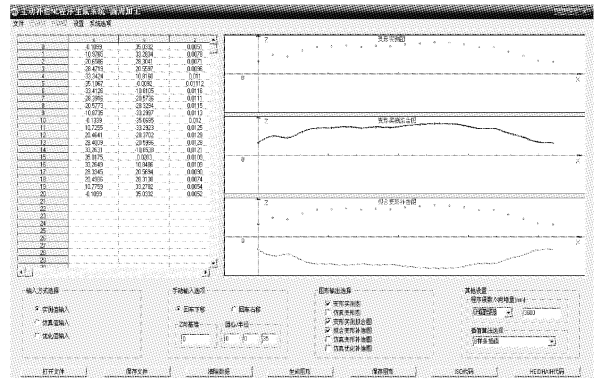


图 4 数控补偿程序生成界面

Fig. 4 Numerical control compensation program generating interface

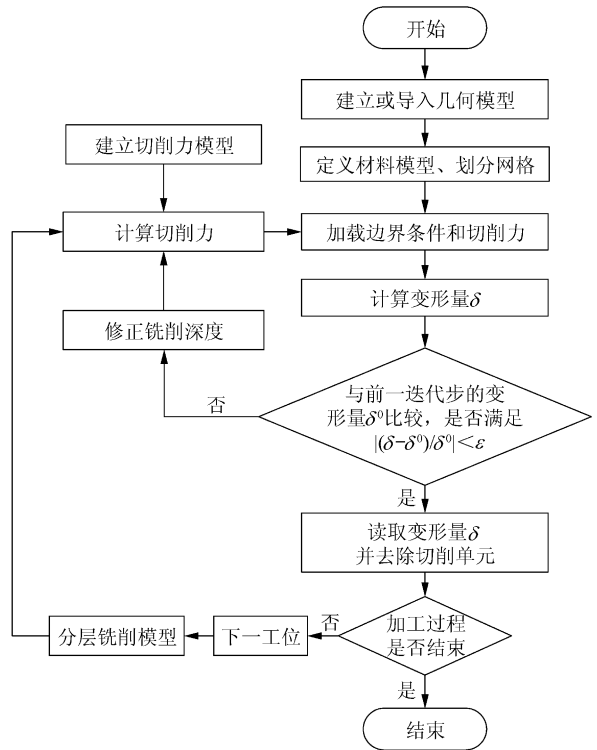


图 5 加工变形预测流程

Fig. 5 Flowchart of machining deformation prediction

几何模型可从 CAD 导入,也可在有限元软件中创建。材料模型包括材料的本构关系和失效准则等,有限元软件提供了丰富的材料模型供选用,根据工件材料输入合适的材料参数。实体建模成功之后对工件进行网格划分。

施加切削力是加工变形预测的重要内容。在有限元分析中,只对单元和节点做分析,因此施加在实体模型(如线素、面素、体素)上的载荷与约束,需传递到有限元模型中相对应的单元和节点上。通常,切削力是一个面力,作用在工件与刀具的接触曲面上,为了能方便体现切削力和被切除

材料之间的关系,文中将刀具和被加工面的接触面简化为台阶面,将切削力均匀作用于台阶面的待切削面上(如图6所示),并根据力的等效原理,将切削力等效到该面的各个节点上,从而实现切削力的施加。

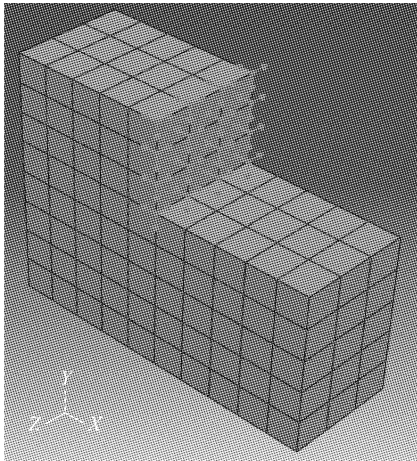


图6 切削力的施加

Fig. 6 Cutting force loading

薄壁件铣削时,由于加工过程中工件受力变形和加工结束后变形弹性恢复,前一次走刀的加工变形将影响后一次走刀的名义切深,从而引起切削力的变化。

假设铣削过程被分为 m 层(m 次走刀),每一层的加工过程用 n 个工位表示,则第 j 层第 i 个工位的实际名义铣削深度 $a_{pi}^{(j)}$ 可以表示为

$$a_{pi}^{(j)} = a_p^{(j)} + \delta_i^{(j-1)} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (15)$$

式中: $a_p^{(j)}$ 为加工前设定的第 j 层的初始名义铣削深度; $\delta_i^{(j-1)}$ 为第 $j-1$ 层第 i 个工位的加工变形,参见图7。

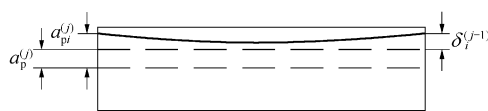


图7 多层铣削模型

Fig. 7 Multilayer cutting model

单刃端铣时,由于工件的变形使得轴向切深变小,导致切削力变小;反过来,切削力减小又引起工件的变形减小,轴向切深增大,切削力增大。因此,每个工位(切削位置)的实际铣削深度采用迭代求解,迭代公式如下:

$${}^v a_{pi}^{(j)} = a_{pi}^{(j)} - {}^{v-1} \delta_i^{(j)} \quad (16)$$

式中: ${}^v a_{pi}^{(j)}$ 为第 j 层第 i 工位第 v 次迭代得到的铣

削深度; ${}^{v-1} \delta_i^{(j)}$ 为第 j 层第 i 工位根据第 $v-1$ 次迭代得到的切深及切削力仿真得到的加工变形。实际铣削深度的迭代求解过程也就是加工变形的迭代求解过程。迭代计算时,当前后两次求解得到的变形值相差很小时,迭代结束。用数学公式可以表示为

$$\left| \frac{{}^v \delta_i^{(j)} - {}^{v-1} \delta_i^{(j)}}{{}^{v-1} \delta_i^{(j)}} \right| < \epsilon \quad (17)$$

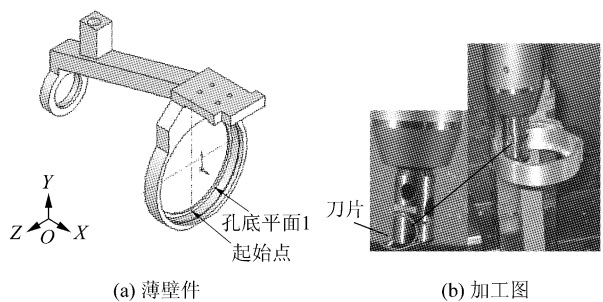
式中: ${}^v \delta_i^{(j)}$ 为第 j 层第 i 工位在第 v 次修正切深后仿真得到的变形值; ϵ 为一个很小的正数,可以根据实际需要选取。此时的切削深度 ${}^v a_{pi}^{(j)}$ 为该工位的实际铣削深度, ${}^v \delta_i^{(j)}$ 为该工位的实际加工变形量。

当前后两次迭代的变形量相差很小时,可以认为切削力和变形之间达到了动态平衡,此时的变形即为预测的加工变形,通过后处理模块可把变形值写入指定的文件进行处理。如果整个加工过程尚未结束,那么,把切削载荷移动到下一工位,通过有限元的“生死单元”技术去除切屑单元,然后循环执行直至完成整个加工过程。

2 实例仿真分析与试验验证

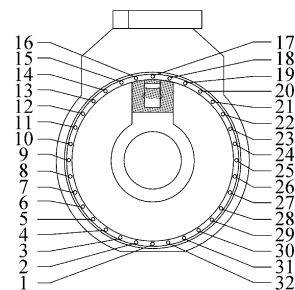
(1) 完全补偿与分层完全补偿

以图8所示航空薄壁件(材料为ZL114A铝合金,孔底平面厚度1.1 mm,该面法向变形对加工精度影响较大)孔底平面1加工为例,采用MikronUCP-710加工中心,一面两孔定位、螺旋



(a) 薄壁件

(b) 加工图



(c) 测点

图8 薄壁件加工和测量示例

Fig. 8 Machining and measuring of thin-walled part

夹紧装夹;刀具材料为硬质合金,前后角分别为 10° 和 15° ,回转直径为24.1 mm;切削参数为 $a_p = 0.1$ mm, $a_e = 2.25$ mm, $n = 1\ 200$ r/min, $f = 0.06$ mm/r。在 ABAQUS 软件中采用 C3D8R 单元进行网格划分,共划分了 16 718 个单元。

完全补偿与分层完全补偿(分3次走刀,每次加工余量为0.1 mm,每层加工过程用32个工位模拟(参见图8(c)),仿真结果如图9所示。分层完全补偿后最大加工误差为0.000 36 mm,比补偿前减小了99.19%,补偿后最大与最小加工误差的差值比补偿前减小了99.17%;只在最后一层进行完全补偿时,补偿后最大加工误差为0.006 10 mm,比补偿前减小了86.11%,补偿后最大与最小加工误差的差值比补偿前减小了85.13%。

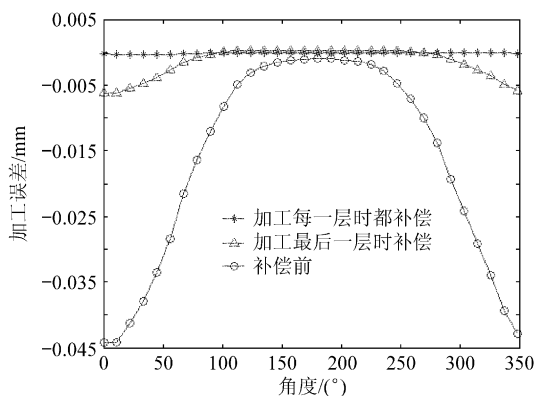


图9 完全补偿与分层完全补偿仿真结果

Fig. 9 Full compensation results at last layer and at each layer

由此可以看出,分层完全补偿可以更加有效地减小薄壁件加工误差,并且使误差更加均匀。这是因为只对最后一层进行补偿时,各个切削点处的切削状态发生了改变,切削力大小也随之发生变化,导致刀具轨迹难以一次性补偿到位。由于前面几层加工时没有对变形进行及时补偿和均匀化,所以加工变形对最后一层的名义切深影响较大,导致最后一层的变形量较大,受补偿量与加工变形的耦合关系的影响也就更大,所以加工误差较分层补偿的加工误差大。

(2) 优化补偿

仍以图8为例,刀具和切削参数等相同。取 $\eta = 0.001$,优化补偿结果如图10所示,为了进行比较,图中的优化补偿和完全补偿均指在最后一次走刀时的补偿。优化补偿后最大加工误差为0.000 87 mm(补偿结果与 η 的取值有关, η 越小,则补偿后的加工误差越小),完全补偿后最大的加

工误差为0.006 10 mm。由此看出,与完全补偿相比,优化补偿能够更好地减少加工误差。优化补偿的补偿量大于完全补偿的补偿量。这是由于优化补偿考虑了补偿量和变形的耦合关系。

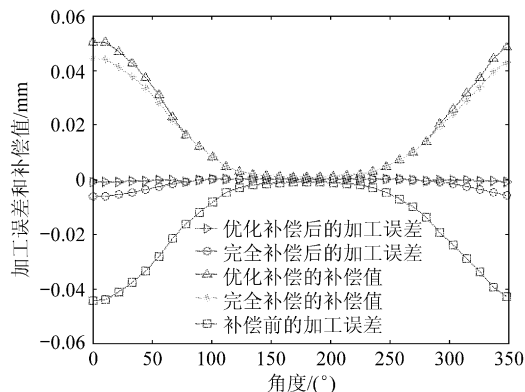


图10 优化补偿仿真结果

Fig. 10 Simulation results of optimal compensation

(3) 仿真与试验结果比较

采用相同参数在瑞士 MikronUCP-710 五坐标加工中心上进行了补偿试验(参见图8(b)),结果如图11所示。可以看出,试验结果与仿真结果趋势基本一致,说明本文采用的补偿仿真模型基本正确。

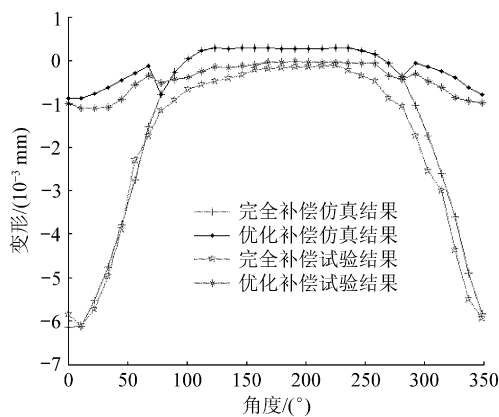


图11 仿真结果与试验结果的比较

Fig. 11 Comparison of simulation and experimental results

3 结论

(1) 薄壁件受力变形对加工精度产生重要影响。利用有限元技术对加工过程中多次走刀下的受力变形进行了预测,为多次走刀主动补偿量的确定提供了较为合理的仿真模型。

(2) 分层完全补偿法对每一次走刀路径都进行了补偿,从而均匀化了只进行最后一次补偿所造成的变形误差。优化补偿法由于考虑了不同走刀

路线间加工变形和切削力的耦合作用,所以可以获得更合理的补偿量。

(3) 以航空薄壁件为对象,进行了主动补偿的仿真和试验分析,通过对比分析,表明分层完全补偿和优化补偿均能降低薄壁件受力变形误差,为薄壁件受力变形控制提供了参考依据。

参 考 文 献

- [1] Dépincé P, Hascoët J Y. Active integration of tool deformation effects in end milling. Part 1: prediction of milled surfaces [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(9): 937-944.
- [2] Dépincé P, Hascoët J Y. Active integration of tool deformation effects in end milling. Part 2: compensation of tool deformation [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(9): 945-956.
- [3] Lim E M, Menq C H, Yen D W. Integrated planning for precision machining of complex surfaces—III compensation of dimensional errors[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1997, 37(9): 1313-1326.
- [4] Rao V S, Rao P V M. Tool deflection compensation in peripheral milling of curved geometries [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(15): 2036-2043.
- [5] Lee C M, Kim S W, Lee Y H, et al. The optimal cutter orientation in ball end milling of cantilever-shaped thin plate[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 153-154: 900-906.
- [6] Ratchev S, Liu S, Becker A A. Error compensation strategy in milling flexible thin-wall parts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162-163: 673-681.
- [7] Ratchev S, Liu S, Huang W, et al. An advanced FEA based force induced error compensation strategy in milling [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, 46(5): 542-551.
- [8] 胡创国. 薄壁件精密切削变形控制与误差补偿技术研究[D]. 西安: 西北工业大学机电学院, 2007.
Hu Chuanguo. Deformation control and error compensation in precision machining of thin-walled parts[D]. Xi'an: School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [9] 楼文明. 航空薄壁件加工变形补偿技术研究[D]. 西安: 西北工业大学机电学院, 2007.
Lou Wenming. Study on machining deformation deformation of aeronautical thin-walled components[D]. Xi'an: School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [10] 康永刚, 王仲奇, 吴建军, 等. 基于实际切深的薄壁件加工变形误差的预测[J]. *西北工业大学学报*, 2007, 25(2): 251-256.
- Kang Yonggang, Wang Zhongqi, Wu Jianjun, et al. Fast prediction of static form errors in peripheral milling of thin-walled workpieces using real cutting depth[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2007, 25(2): 251-256. (in Chinese)
- [11] 王增强, 孟晓娴, 任军学, 等. 复杂薄壁零件数控加工变形误差控制补偿技术研究[J]. *机床与液压*, 2006(4): 61-63.
Wang Zengqiang, Meng Xiaoxian, Ren Junxue, et al. A scheme for the compensation of deformation error in NC machining of thin-walled complex parts[J]. *Machining Tool and Hydraulics*, 2006(4): 61-63. (in Chinese)
- [12] 孙杰, 李剑峰, 李方义, 等. 制造过程关键环节的有限元仿真分析[J]. *山东大学学报*, 2005, 35(1): 17-21.
Sun Jie, Li Jianfeng, Li Fangyi, et al. Research on key manufacturing process by finite element method[J]. *Journal of Shandong University*, 2005, 35(1): 17-21. (in Chinese)
- [13] 赵威, 何宁, 武凯. 航空薄壁件的刀具偏摆数控补偿加工技术[J]. *机械制造及自动化*, 2002(5): 18-20.
Zhao Wei, He Ning, Wu Kai. A NC compensation approach of machining aeronautical thin-walled workpiece by tilting tools[J]. *Machine Building and Automation*, 2002(5): 18-20. (in Chinese)
- [14] 王志刚, 何宁, 武凯, 等. 薄壁零件加工变形分析及控制方案[J]. *中国机械工程*, 2002, 13(2): 113-117.
Wang Zhigang, He Ning, Wu Kai, et al. Analysis and control approach for machining deflection of thin-walled workpiece[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002, 13(2): 113-117. (in Chinese)
- [15] 万敏, 张卫红. 铣削过程中误差预测与补偿技术研究进展[J]. *航空学报*, 2008, 29(5): 1340-1349.
Wan Min, Zhang Weihong. Overviews of technique research progress of form error prediction and error compensation in milling process[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(5): 1340-1349. (in Chinese)
- [16] 郑联语, 汪叔淳. 薄壁零件数控加工工艺质量改进方法[J]. *航空学报*, 2001, 22(5): 424-428.
Zheng Lianyu, Wang Shuchun. Approaches to improve the process quality of thin-walled workpiece in machining [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2001, 22(5): 424-428. (in Chinese)

作者简介:

陈蔚芳(1966—) 女, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向: 工艺设计与优化, 数控技术, 现代集成制造。
Tel: 025-84892509
E-mail: meewfchen@nuaa.edu.cn

(责任编辑: 蔡斐, 杨冬)