

文章编号:1000-6893(2007)05-1262-06

一种快速有效的薄壁件加工表面误差预测算法

康永刚, 王仲奇, 姜澄宇

(西北工业大学 机电学院, 陕西 西安 710072)

An Efficient Algorithm for Calculations of Surface Errors in Peripheral Milling

Kang Yonggang, Wang Zhongqi, Jiang Chengyu

(School of Mechatronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 在切削力作用下, 刀具/工件的变形是影响薄壁弱刚度件加工精度与质量的关键因素, 快速有效地进行表面误差的预测是实现工艺参数优化及在线刀具路径补偿的前提。针对立铣加工过程, 提出了一种考虑刀具/工件变形位置的快速柔性迭代算法, 基于此建立了薄壁件加工变形预测的有限元计算模型, 并通过等效集中力作用位置的确定、模型分割及最小化网格重划方法进一步提高了模型的计算速度。通过刀具/工件的瞬时接触区域的限定算法、实际切深的修正算法、材料去除效应的模拟等关键技术更提高了模型的计算精度。以典型航空铝合金材料为对象, 合理安排试验, 并通过数值计算结果和试验数据的对比, 表明该方法计算精度高, 计算速度较文献方法提高了近 2 倍。

关键词: 立铣; 薄壁件; 柔性迭代算法; 表面误差

中图分类号: V261.2; TH502 **文献标识码:** A

Abstract: Cutting deformation is the key factor influencing the precision and quality of the machined thin-walled workpiece, and the form error prediction is the precondition for process optimization and error compensation. Cutting forces are analyzed and cutting-force model for thin-walled workpiece machining is developed, then a finite-element model is presented to analyze the surface dimensional errors in peripheral milling of aerospace thin-walled workpieces. The efficient flexible iterative algorithm is proposed to calculate the deflections as contrasted with the rigid iterative algorithm used in the literatures. Meanwhile, some crucial techniques such as the finite-element modeling of the tool-workpiece system; the determinant algorithm to judge instantaneous immersion boundaries between the cutter element and the workpiece, the iterative scheme for the calculations of tool-workpiece deflections considering the former convergence cutting position, are studied. The proposed approach is validated and proved to be efficient through comparing the obtained numerical results with the test ones.

Key words: end milling; thin-walled workpiece; flexible iterative algorithm; surface error

航空工业中整体壁板、框、梁及叶盘等形状复杂且刚性差的结构件在切削力作用下很容易产生变形, 严重影响着工件的加工精度及表面质量。因此很多学者^[1-8]致力于薄壁件加工表面误差预测和控制的研究。Kline^[1]在不考虑刀具/工件变形对切削力的反馈影响的前提下, 就三边夹紧固定, 一边自由边界条件下的矩形薄壁板进行了表面加工误差研究。Sutherland 等^[2]提出考虑刀具/工件变形的瞬时未变形切屑厚度和表面误差的计算方法。而 Budak 等^[3]证实在静态铣削过程中, 瞬时未变形切屑厚度收敛于名义值。因而可以仅考虑对径向切削深度的修正, 并结合迭代

算法分析刀具和工件变形的耦合效应以及加工过程中的材料去除效应^[4-8]。以上文献, 迭代方法均采用“刚性迭代法”, 即以刚性模型计算结果为迭代运算的初始位置, 迭代速度慢; 迭代过程仅考虑对切入(切出)角的简单修正, 误差较大。同时文献中并没有对迭代算法及其过程进行详细的论述。由于迭代算法是预测薄壁件加工变形的关键环节(有无迭代, 计算结果相差可达 9% 以上), 所以有必要对薄壁件的加工变形迭代算法进行更详细、深入的探讨。

在深入分析薄壁件铣削过程的基础上, 提出了一种快速有效的“柔性迭代算法”, 并应用于薄壁件加工表面误差预测中。该方法基于加工过程的连续性事实, 通过对刀具/工件的柔性迭代初始位置的确定, 建立了考虑薄壁件上下变形的差异

收稿日期: 2006-09-18; 修订日期: 2006-11-27

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50435020)

通讯作者: 王仲奇 E-mail: wangzhqi@nwpu.edu.cn

实际切深、集中力作用位置的求解及其在有限元分析中的应用等一系列关键技术与算法,大幅度提高了表面误差模型的计算速度,同时精度也得到了提高。

1 薄壁件静态铣削过程分析与建模

如图 1(a) 所示,考虑一面固定(底面固定),三面自由的薄壁件顺铣加工过程,刀具为平底立铣刀。螺旋立铣刀划分为如图 1(b)所示的轴向等距的多段梁单元,同时假设刚性主轴与夹头中刀柄装夹部分之间为线弹性关系,其刚度为 k_c , L 为刀齿轴向长度。

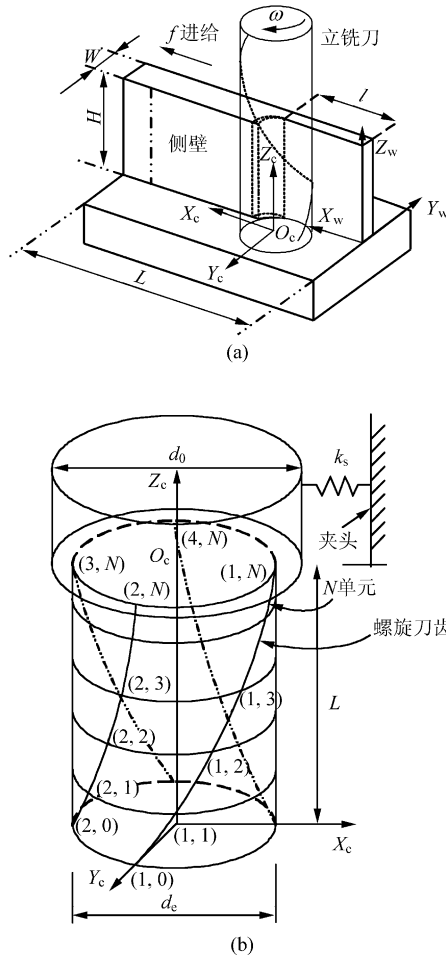


图 1 薄壁件立铣过程(顺铣)刀具有限元模型

Fig.1 Down-milling a flexible plate with end milling cutter

法向力 F_y 是引起加工变形的主要因素。在某加工瞬态作用在刀齿 t , 第 m 微元上的法向力, 即节点 (t, m) 处的作用力 $dF_{y,t,m}$ 引起的刀齿节点 (k, n) 的弹性变形

$$\delta_{ct,m}(k,n) =$$

$$\begin{cases} \frac{dF_{y,t,m}(l_c - z_{t,m})^2 [3(l_c - z_{k,n}) - (l_c - z_{t,m})]}{6E_c I_c} + \\ \frac{dF_{y,t,m}}{k_c} & 0 < z_{k,n} < z_{t,m} \\ \frac{dF_{y,t,m}(l_c - z_{k,n})^2 [3(l_c - z_{t,m}) - (l_c - z_{k,n})]}{6E_c I_c} + \\ \frac{dF_{y,t,m}}{k_c} & z_{t,m} < z_{k,n} \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_c 为刀具弹性模量; I_c 为铣刀截面对其形心轴的惯性矩, $I_c = \frac{\pi d_c^4}{64}$, 等效直径 $d_c = s d_0^{[7]}$ ($s \approx 0.8$); l_c 为铣刀被装夹后的悬臂长度; $z_{k,n} = kL/N$ 为某一刀齿 (k, n) 节点的 Z_c 向坐标。

那么,所有受力刀齿节点在刀齿节点 (k, n) 引起的变形

$$\delta_c(k,n) = \sum_{t=1}^{N_f} \sum_{m=0}^N \delta_{ct,m}(k,n) \quad (2)$$

工件由 ABAQUS 建立。切削而引起的工件厚度的不一致,使得工件模型必须采用三维单元,如图 2 所示。 X_w 向的单元均匀分布,仿真过程中的一个进给步对应一个单元。 \overline{GC} 为表面生成线, \overline{FB} 为切削进入线, \overline{DD} 为加载线。由于薄壁件在 Y_w 向的刚度最小,所以仅考虑施加切削力 F_y 。而加载节点及变形计算节点可通过对 \overline{DD} , \overline{GC} 和 \overline{FB} 进行分割得到,从而可以避免切削力频繁地向节点离散而带来的计算效率及精度上的损失,同时该方法可以保证网格随意划分而不影响计算精度。为了更方便地进行有限元分析,切削力作为集中力(根据矩相等原理)施加在加载节点上。材料的去除效应采用生死单元技术并编制 python 程序进行控制。

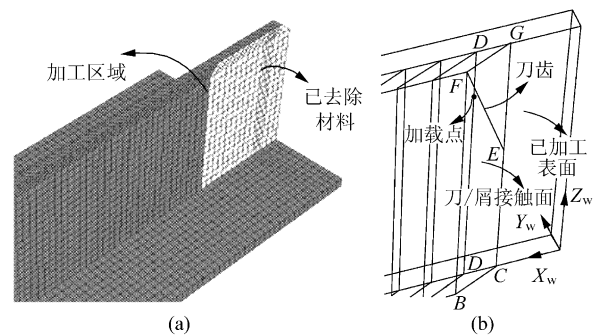


图 2 工件有限元模型

Fig.2 Finite element model of plate

通过分割切削区域,将各个进给位置分隔开来,这样模型改变及迭代过程中单元的重新划分只

限于处于切削区域的切屑部分,结合 python 程序进行网格重划,从而大大提高了模型的运算速度。

2 基于螺旋立铣刀的切削力模型的建立

对于某一轴向微单元,其瞬时切向、径向切削力可表示为^[8-9](轴向力对侧壁变形影响不显著,未列出)

$$\begin{bmatrix} dF_T \\ dF_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_T d_z t_c(i, j, k) \\ K_R dF_T \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: d_z 和 t_c 分别为刀齿微单元 $i(i, j, k)$ 对应的切削宽度和瞬时未变形切屑厚度; K_T, K_R 为切削常量,由实验确定^[2,10],

$$t_c(i, j, k) = f_z \sin [\beta(i, j, k)] \quad (4)$$

式中: f_z 为每齿进给; $\beta(i, j, k)$ 为当刀具处于第 j 个角度增量位置时,第 k 个刀齿上第 i 个微单元所处的空间角度。

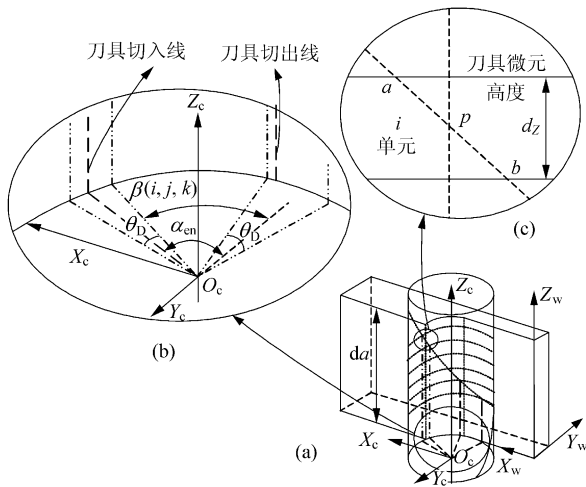


图 3 刀齿微元切入区域的修正
Fig. 3 Illustrations of correction factors of cutting forces

在铣削过程中,刀刃接触工件的轴向长度一般不会是刀齿微元的整数倍,如图 3(c)所示,刀齿微元 i 的 ap 段未与工件接触,但 pb 段与工件接触。因而,式(3)必须乘以一个比例因子 μ 。

$$\mu = \begin{cases} 1 & \alpha_{ex} < \beta(i, j, k) \leq \alpha_{en} - \theta_D \\ \frac{\alpha_{en} - \beta(i, j, k)}{\theta_D} & \alpha_{en} - \theta_D < \beta(i, j, k) < \alpha_{en} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\alpha_{ex} = 0$ (顺铣); θ_D 为一刀齿微元所占空间角,见图 3(b); $\alpha_{en} = \arccos(1 - d_r/R)$, R 为刀具半径。

将所有参与切削的刀具微元切削力叠加,分解到 Y_w 向得到总的切削力(顺铣)

$$F_y = \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{k=1}^{N_f} \{K_R K_T d_z f_z \sin [\beta(i, j, k)] \cdot \cos [\beta(i, j, k)] + K_T d_z f_z \sin^2 [\beta(i, j, k)]\} \mu \quad (6)$$

3 柔性迭代算法及柔性预测模型的建立

(1) 柔性迭代算法的提出

顺铣时,刀具和工件的变形使得径向切深变小,导致切削力变小,反过来影响工件和刀具的变形减小,径向切深增大,切削力增大,如表 1 和图 4 所示。

表 1 切削力和径向切深的变化趋势

Table 1 Variations of cutting forces and radial cutting depths

迭代次数	切削力	图 4 表面生成点	δ_r 和 δ_w 的变化	实际切深
1	—	E_{10}	据名义切深得到	↓
2	↓	E_{11}	↓	↑
3	↑	E_{12}	↑	↓
4	↓	E_{13}	↓	↑
k	...	E_{1k}

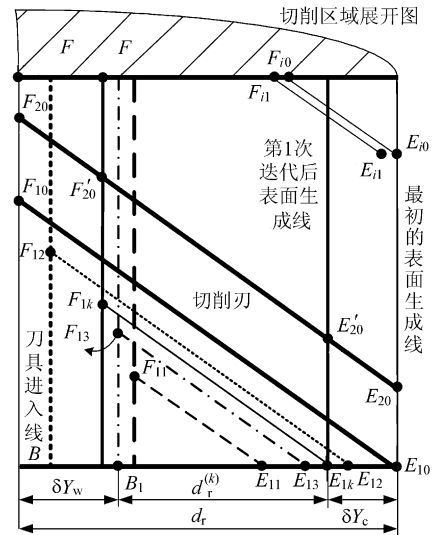


图 4 变形迭代过程示意
Fig. 4 Deflection iteration process of tool/workpiece

如图 4, $\overline{F_{10}E_{10}}$ 为切削迭代过程的初始位置,第 k 次修正后得到表面生成点 E_{1k} 。得到收敛结果后,文献中采用的方法仍然基于刚性系统,将下一个切削增量初始迭代位置定为 $\overline{F_{20}E_{20}}$ 继续迭代,其中 E_{20} 与 E_{10} 同样在最初的刚性模型的表面生成线上。然而,由第 1 迭代步收敛切削位置 $\overline{F_{1k}E_{1k}}$ 可知,此时的刀具切入和表面生成线分别为: $\overline{F_{1k}B_1}$ 和 $\overline{E_{1k}E'_{20}}$,依据切削过程的连续性,可以断定,把下一个切削初始位置定位 $\overline{F'_{20}E'_{20}}$ 将更接近于实际的加工过程,其迭代计算得到的变形误

差也更接近于实际加工变形。而且很明显该方法也可以提高算法的收敛速度。本文将该方法定义为：“柔性迭代法”，与之相对应的是前述文献中应用的“刚性迭代法”。由以上分析过程可以预测，在柔性切削力模型中， F 点（实际刀具切入线顶点）以前，刚性迭代算法预测结果将大于柔性迭代法计算结果以及实验数据。切削刃通过 F 点以后，如图所示 $\overline{F_{i0}E_{i0}}$ 和 $\overline{F_{i1}E_{i1}}$ 切削长度基本一致，两种迭代结果基本一致。

以上分析同样适用于逆铣加工，但对于切深较大的情况，工件/刀具的变形导致切深增大，产生的是“过切”现象。其收敛速度也较快。小切深的分析相当于顺铣过程的逆序。

径向切深的变化改变了刀具切入角度和切削区域，对于顺铣，切出角度 α_{ex} 始终为零，而此时刀具的切入角（逆铣为切出角）为

$$\alpha'_{en} = \arccos \left(1 - \frac{d_r - \delta Y_c - \delta Y_w}{R} \right) \quad (7)$$

随着切入角的变化，刀具微元的切削状态将发生变化，导致切削区域的改变。须由式(5)重新对刀具微元切削状态进行计算。

(2) 实际切深的计算

对于柔性迭代算法（也对应于实际的切削过程），由于变形的存在使得薄壁件加工中各个切削刃位置的实际切深都不一样，如图 5 中斜线所示。如何精确得到当前迭代位置的实际切深是计算下一迭代步及初始切削力的前提。

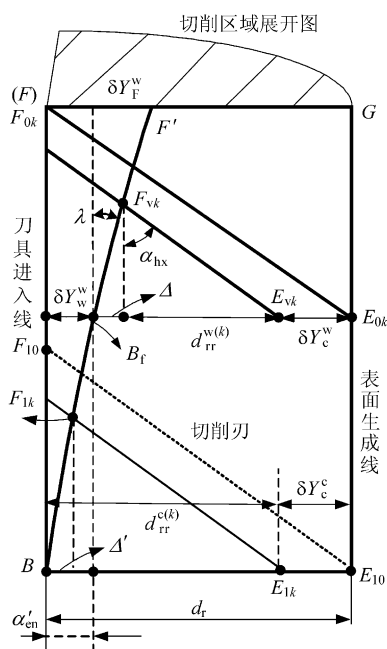


图 5 实际切深的计算及其切削力的变化
Fig. 5 Real cutting depths and cutting forces

如图 5 所示： E_{vk}, E_{1k} 为对应于上部和底面的第 k 次迭代的表面生成点位置，而 $\overline{E_{vk}F_{vk}}, \overline{E_{1k}F_{1k}}$ 为相应的刀具/工件的实际接触区域。 $\delta Y_c^c, d_{rr}^{c(k)}$ 分别为对应于工件底端刀具的变形及相应 k 次迭代后的径向切深；而 $\delta Y_w^w, \delta Y_c^w, d_{rr}^{w(k)}$ 分别为工件上部工件和刀具的变形以及 k 次迭代后的加工径向切深。

由图 5，可得如下关系：

$$d_{rr}^w = d_r - \delta Y_c^w - \delta Y_w^w - \Delta \quad (8)$$

$$d_{rr}^c = d_r - \delta Y_c^c - \Delta' \quad (9)$$

文献[2-6]中考虑工件/刀具的变形线为直线， E_{vk}, E_{1k} 处未考虑 Δ ，预测切深较 d_{rr}^c, d_{rr}^w 偏大，从而产生切削力预测误差，且迭代速度慢。

将工件/刀具变形曲线假设为斜直线，由图 5 可以得到

$$\Delta = \frac{(d_r - \delta Y_c^w - \delta Y_w^w) \cos \alpha_{hx} \sin \lambda}{\sin(\lambda + \alpha_{hx})} \quad (10)$$

式中： $\lambda = \arctan \frac{\delta Y_F^w - \delta Y_w^w}{\alpha'_{en} R / \tan \alpha_{hx}}$ ； α_{hx} 为刀具螺旋角； δY_c^w 可由式(1)得到； δY_w^w 的计算可以通过在工件有限元模型上施加集中力而得到。

(3) 表面静态误差的计算方法

切削力作用引起刀具和工件的变形，相应加工瞬态对应图 2(b)中 \overline{GC} 直线上的表面生成点的变形沿法向映射到加工表面形成表面误差。

表面生成点 E 的表面误差为

$$e_l(E) = \delta_c(E, j, k) + \delta_w(E, j, k) \quad (11)$$

式中： $\delta_w(E, j, k)$ 和 $\delta_c(E, j, k)$ 分别为 E 点处工件变形及其对应的刀具变形在 Y_w 方向和 Y_c 方向的投影。

4 仿真研究和实验验证

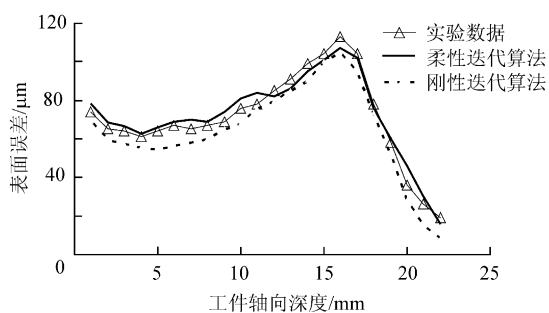
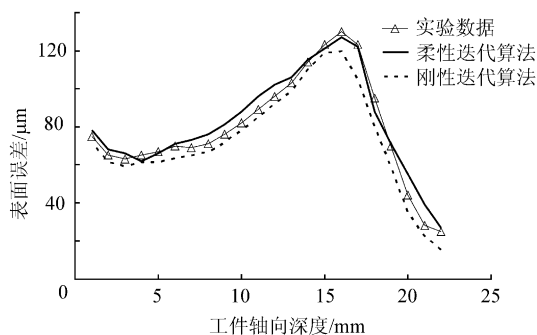
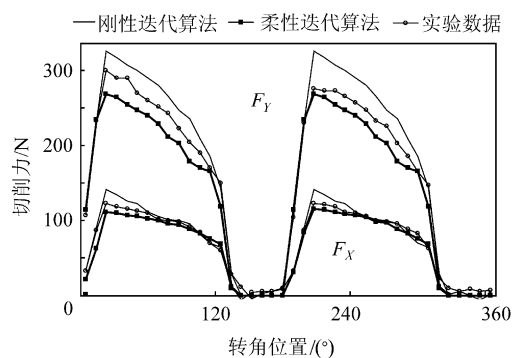
为验证所提出的柔性迭代算法及建立的表面误差预测模型的有效性，根据前述方法与技术，针对航空铝合金材料 7050-T7451（考虑到切削热的影响，弹性模量取 71 GPa），在 JOHNFOR D VMC-850 三坐标数控铣床上进行了实验，工件长度 L 均为 105 mm，顺铣加工，干切削。测力仪为 KisTLer-9255B，实验参数列于表 2。其中切削力系数可由文献[9] 确定。刀具为两齿平底立铣刀，材料 Y330，弹性模量 530 GPa，螺旋角 30° ，法向前角均为 12° ，主轴转速 2 000 r/min，每齿进给量为 0.05 mm，装卡长度 53.4 mm，刀具与夹头间的装卡刚度 $K_c = 18\ 900$ N/mm。表面误差由三坐标测量机 GLOBAL STATUS 121510 测得。

表 2 实验参数

Table 2 Experiment parameters of tools

K_t	K_r	轴向切深 /mm	刀具直径 /mm	壁厚 /mm	d_r /mm
1 458.062	0.708	24	12	5.2	2

图 6、图 7 为工件进给位置 $l=55$ mm 和 $l=100$ mm 时的刚性迭代算法和柔性迭代算法变形预测结果的对比,虽然两者的形状、趋势与实验数据吻合较好,但柔性迭代算法的结果与实验数据吻合得更好,并且在最大值和工件最上面部分柔性迭代算法相对于刚性迭代算法有着明显高的误差预测精度,而且刚性迭代算法预测值基本上都低于实验值。图 8 显示柔性迭代算法所得切削力与实验数据的形状、趋势吻合也较好。刚性迭代法得到的最大切削力部分较实验和柔性迭代法结果要大,理应产生较大的变形,但是由于刚性迭代法没有考虑如图 5 所示的 Δ 值,而较大的切削力在某种程度上正好补偿了这个误差,从而在误差预测上也具有较高的精度,但最大变形误差仍较大。由以上两例可以看出本文计算切削力并预测薄壁件加工变形的正确的方法,并且可以看出柔性迭代算法误差预测精度好于刚性迭代算法。更重要的是柔性迭代算法的迭代次数明显少于刚性迭

图 6 工件中间位置变形预测 ($l=55$ mm)Fig. 6 Surface dimensional errors for $l=55$ mm图 7 工件边缘位置变形预测 ($l=100$ mm)Fig. 7 Surface dimensional errors for $l=100$ mm图 8 工件中间位置切削力预测 ($l=55$ mm)Fig. 8 Cutting force predictions for $l=55$ mm

代算法, $l=100$ mm 时刚性迭代算法的最大迭代次数为 5 (误差 2%), 而柔性迭代算法为 1, 从而计算速度得到了大幅提高。对于算例中轴向 22 个单元的模型, 奔腾 IV 机上, ABAQUS 6.5 利用柔性迭代算法、等效集中力及最小化网格重划等方法建立的柔性模型, 其计算时间较文献方法减少了 50% 左右。

图 9 显示了薄壁件加工的现场情况。

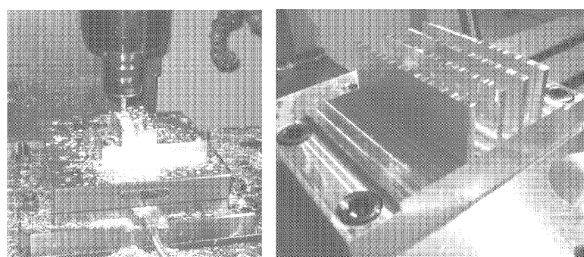


图 9 薄壁件加工图

Fig. 9 Machining and machined thin-walls

5 结论

针对立铣加工过程, 提出了一种考虑刀具/工件变形位置的快速柔性迭代算法, 基于此建立了薄壁件加工变形预测的有限元计算模型。所建立的模型利用柔性迭代算法及等效集中力及最小化网格重划等方法提高了模型的计算速度。通过刀具/工件的瞬时接触区域的限定算法、实际切深的修正算法、材料去除效应的模拟等关键技术更提高了模型的计算精度。以航空铝合金材料 7050-T7451 为对象, 安排实验, 通过数值计算结果和实验数据的对比, 表明该方法计算精度高, 计算速度较文献方法提高了近 2 倍。

该方法计算速度快, 为在线预测加工变形并进行实时补偿提供了一种实现途径。

参 考 文 献

- [1] Kline W A, Devor R E, Shareef I A. The prediction of surface accuracy in end milling[J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1982, 104: 272-278.
- [2] Sutherland J W, Devor R E. An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milling systems[J]. ASME Journal of Engineering for Industry, 1986, 108: 269-279.
- [3] Budak E, Altintas Y. Flexible milling force model for improved surface error predictions[C]// Proceedings of the Engineering System Design and Analysis. Istanbul, Turkey: ASME, 1992, Vol. 47: 89-94.
- [4] Tsai J S, Liao C L. Finite-element modeling of static surface errors in the peripheral milling of thin-walled workpieces[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94: 235-246.
- [5] Budak E, Altintas Y. Peripheral milling conditions for improved dimensional accuracy[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1994, 34(3): 907-918.
- [6] Wan M, Zhang W H, Qiu K P, et al. Numerical prediction of static form errors in peripheral milling of thin-walled workpieces with irregular meshes[J]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005, 127(1): 13-22.
- [7] Kops L, Vo D T. Determination of the equivalent diameter of an end mill based on its compliance[J]. CIRP Annals, 1990, 39(1): 93-96.
- [8] 武凯. 航空薄壁件加工变形分析与控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
Wu Kai. Machining errors analysis and control of the thin wall structure components in aero industries[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)
- [9] Kline W A, Devor R E, Lindberg R. The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts[J]. International Journal of Machine Tool Design and research, 1982, 22(1): 7-22.

作者简介:



康永刚(1977—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 先进航空制造技术及有限元结构分析技术。

E-mail: westfly@mail.nwpu.edu.cn

王仲奇(1963—) 男, 教授。主要研究方向: 模具 CAD/CAE、航空 CIMS 技术。

(责任编辑: 蔡斐)