DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.06.003

# 改善航空超薄壁零件加工刚性的方法

马鹏举1,廖志兵1,童赛赛1,杨开放2

(1. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京 100191;2. 中国货运航空有限公司 飞行部波音 777 机队,上海 201615)

摘 要:基于对超薄壁结构加工过程中工件变形的分析,提出了减小工件变形的分区循环逐层 切削策略,以改善工件刚性,更好地保证加工精度。通过试验验证了分区循环逐层切削加工策 略的有效性:采用正常的切削工艺参数,工件的壁厚可以达到 0.5~1 mm,工件的直线度在工件 宽度方向和高度方向精度分别可以达到 0.04 mm/300 和 0.06 mm/100,工件的形状误差减小 50%,能满足一般航空零件加工精度要求。分区循环逐层切削对机床、夹具等设备辅具没有特 殊要求,在工程实践中易于采用。 关键词:超薄壁零件加工;工件弹性让刀;振动;分区循环逐层切削;工艺凸台 中图分类号:TH161 文献标识码:A 文章编号:1671-5276(2020)06-0013-05

#### Method for Improving Workpiece Rigidity in Machining Ultra-thin Wall Parts in Aviation MA Pengju<sup>1</sup>, LIAO Zhibing<sup>1</sup>, TONG Saisai<sup>1</sup>, YANG Kaifang<sup>2</sup>

(1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China; 2. Flight Department Boeing 777 Fleet, China Cargo Airlines Limited, shanghai 201615, China)

Abstract: Based on the analysis of the deformation appearing during the processing of ultra-thin-walled structures, a block-divided multilayer cutting strategy for reducing the deformation of the workpiece is proposed, which is used to improve the rigidity of the workpiece and better ensure the machining accuracy. The effectiveness of this strategy is verified by experiments. Under normal cutting process parameters, the wall thickness of the workpiece can reach  $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ , and the straightness of the workpiece can reach 0.04 mm/300 and 0.06 mm/100 in the width and height directions of the workpiece respectively. Its shape error is reduced by 50%. It meets the accuracy requirements of processing the general aviation parts. Block-divided multilayer cutting does not require special requirements, such as machine tools, fixtures and other equipment accessories, and it is easy to be adopted in engineering practice. Keywords: ultra-thin wall parts machining; part concession deformation; chatter; block-divided multilayer cutting; processing ribs

# 0 引言

薄壁零件是指壁厚高度比值在 1/5~1/8 范围内的零件,如果小于这个值则可称之为超薄壁零件<sup>[1]</sup>。在航空 零件设计结构中,有时零件或结构的壁厚甚至在 0.5 mm 左右,其壁厚高度比甚至达到 1/30 或更小<sup>[2]</sup>。和一般的 薄壁零件相比其加工更困难,尤其是在精加工阶段,工件 或结构的刚性已经非常差。此时,加工面临两个突出的问 题:一是工件的超薄壁受到切削力作用后产生弹性让刀, 引起较大的尺寸和形状误差;二是在该阶段工件的加工稳 定性变得很差,极易发生颤振而无法正常切削,造成工件 的表面质量严重下降。薄壁或超薄壁零件在航空零件加 工中比较常见,正常加工手段不容易达到零件的壁厚要 求,很难保证加工精度和表面质量。

减少薄壁零件的变形,保证加工精度的研究大致可分 为以下几类。 1)优化刀具路径<sup>[2]</sup>。采用多层切削的方法,充分利用工件刚性<sup>[3-5]</sup>,根据工件壁厚高度比,设计合理的走刀路径达到减小形变的目的<sup>[6-7]</sup>。

 2)优化切削用量,直接减少工件的变形。采用小的 轴向切深和径向切宽,增大主轴转速<sup>[8]</sup>。

3)建立理论模型,设计刀具位置补偿。文献[9]首先确定切削力模型,再通过有限元分析方法得到薄壁件的变形规律,对工件变形进行补偿;文献[10]建立薄壁零件在5轴加工中心上各个位置的瞬态加工切削用量模型,基于维持在任意加工位置切削力与切削位置点的比值为常量的假设,制定瞬态加工规划,在刀具切削路径上平均变形误差。文献[11]提出一种理论分析模型,运用柱状铣刀铣削薄壁零件的侧壁时,预判切削厚度的变化对工件刚度的影响,然后进行补偿。

4)使用专用夹具。结合有限元仿真分析,设计和应 用针对薄壁零件加工的专用夹具、智能夹具,减少夹紧变 形,通过对夹紧顺序受力变形规律的分析,确定合理的夹

基金项目:国家科技重大专项(2014ZX04001021,2019ZX04018001-009);航空工业123机匣变形控制技术攻关项目(GTX20160029) 第一作者简介:马鹏举(1961—),男,河北石家庄人,副教授,博士,研究方向为数字化加工技术、航空制造工艺与技术、旋转锻造与冷态

而有前方:当前至(1961—),方,何元有家庄八,前我技,每工,前先方向为数子化加工技术、航空前追工乙马技术、旋转散追马待恐 成形。在国内主要核心期刊及机械类国际会议上发表论文 30 余篇。

紧顺序[12-15]。

5)抑制振动。针对薄壁件加工颤振问题,采用理论 分析和实验相结合的方法,分析薄壁零件加工过程中的模态、振动,采用增加系统阻尼的方法抑制系统的振动<sup>[16-19]</sup>。

6)优化数控加工程序设计。基于有限元分析,综合考虑夹紧变形、加工过程中的振动、工件材料的性能、刀尖切削部位的状态、预判工件结构特征所引起的非线性因素等情况,对G代码进行优化,使得数控程序与工艺更好地融合,有效地保证加工精度<sup>[14,19-21]</sup>。这种方法要求程序设计人员不但要具有程序设计的能力,还需具备丰富的加工工艺知识,并把二者很好地结合起来。

本文提出的航空超薄壁零件分区循环逐层切除余量 优化工件刚性的方法。通过分区分层切削,充分利用工件 的刚性,改善工件的振动特性,大大减小弹性让刀产生的 加工误差,提高了加工质量。而且本方法无需特殊工装, 成本低,容易在生产实际中推广应用。

## 1 薄壁件让刀变形分析

薄壁件具有低刚度特性,在铣削加工过程中,当铣削 宽度较大时,工件易产生"让刀现象",从而产生加工误 差。图1(a)为立铣刀在铣削薄壁件加工过程中产生工 件变形的原理示意图。图中 *ABCD*为理论上应去除的部 分,由于薄壁件壁厚薄,刚性差,刀具切入工件时,在铣削 力作用下,工件产生了弹性变形,*A*、*D*两点分别移至了 *A'*、*D'*点,因此在铣削过程中,刀具仅切除了*A'DCB*部分 (图中的阴影部分),仍有一部分材料(*CDD'*)未被切除。 加工结束后,工件弹性形变得以恢复,未被切除的部分 *CDD*′造成薄壁件的加工误差δ,如图1(b)所示,造成工件 尺寸、形状和位置误差。另外由于薄壁件刚性低,极易发 生振动,从而影响表面质量。



图1 薄壁件侧壁让刀变形

# 2 分区域分段循环逐层切削的加工 余量切除策略

本文提出图 2 所示的工艺方法,即分区域分段循环逐 层切削的加工余量切除策略,其本质是最大限度地利用工 件的刚性。图 2(a) 是常用的切削方法,其余量切除顺序 为 1—2—3—4,每切除一层余量,工件的刚性随之下降, 在切除最后一层余量时,工件的刚性就变得非常差,工件 受到切削力作用产生的加工误差十分明显,而且随着工件 刚性变差,极易发生振动,严重影响工件的表面质量。在 图 2(b)所示的切削方法中,余量切除顺序为 1—2—3— 4—5—6—7—8 可以有效地利用工件本身的刚性。



图 2 分区循环逐层切削与加工路径的两种方案

将以上加工方法推广到超薄壁零件实际生产过程中, 为减少加工过程中的变形,采用分区、分段循环逐层切削 的加工策略。对于高精度、复杂的大型超薄壁零件,可以 首先根据零件结构划分成加工区域,如图3所示。





(b) 薄壁回转类
图 3 分区、分段循环逐层切削

为了进一步保持工件的刚性,在每个区域之间有暂时 保留的改善工件刚性的工艺凸台。对于大型的超薄壁平 面或曲面,保留在正反面的工艺凸台形成一个网状的结 构,最大限度地支撑加工部位,减小切削力造成的变形。

如图 3(a) 所示,首先加工段1的1区和2区,然后切除凸台,再加工段2的3区和4区,切去段2的凸台,最后形成工件。对于图 3(b) 所示的薄壁圆筒形零件(如机匣)的切削顺序以此类推。不但分段、分区划分工件内外加工表面,而且在划分加工区域时使内外表面所留有的工艺凸台内外错开,进一步改善工件加工时的刚性。

## 3 试验验证

### 3.1 试验样件设计

实验用样件设计如图 4 所示,其中长度和高度分别取 值 300 mm 和 100 mm。装夹部分是专门设计的工艺凸台, 在加工后可以用线切割方法切除。在加工表面标出测量位 置,测量点纵向(即 y 向)分为 4 段,分别用 1-、2-、3-、4-表 示,每段横向(即 x 向)测量 10 个点,每一个测量位置分别 是-1、-2、-3、-4、-5、-6、-7、-8、-9、-10,如"3-2"即表示 第 3 层的第 2 个点,以此类推。为了消除毛刺和刀具切削 刃形状的影响,测量位置均离开工件边缘一定距离。



图 4 实验样件示意图

图 5 是试验样件的设计方案,其中在图 5(a)的工件 宽度方向的两端留有宽度为 3 mm 的加强筋。





为了检验本文提出的薄壁零件加工方法的有效性,重 点验证:

1) 在同样的加工工艺条件下(需要优化)所用工艺 方法所能达到的最小壁厚值的大小。同样的加工工艺条件,走刀路径的不同,加工过程中的零件各部分的刚度变 化是否会不同。刚度越低系统越容易产生振动,所以试验 中以发生振动前工件所达到的壁厚作为方案的评价指标 之一,即图4中A值的大小。

2)由于加工过程中弹性变形在线测量受到加工现场 各种因素的影响,如切屑、工件的毛刺、冷却润滑液、加工 中的振动,数据测量往往不准确或难以进行。加工过程中 工件的弹性让刀最后反映在工件上各点壁厚的变化,壁厚 可以在工件加工结束后采用多种方法测量,所以本试验中 采用测量壁厚的方法间接表示工件的弹性变形。

#### 3.2 试验设备及工艺参数的选择

试验中所用的机床为普通立式铣床,切削用量按加工

阶段有 3 种选择:1)高速钢铣刀(其刚度相比于实验获得的壁厚约为 1 mm 的零件,可以认为加工过程中不发生弹塑性变形,也不会引起加工过程中的振动),切削深度  $a_p$  = 1.0 mm,切削宽度  $a_e$  = 1.0 mm,主轴转速 n = 1 200 r/min,进给速度 f = 160 mm/min;2)其他参数不变,取主轴转速 n = 800 r/min;3)其他参数不变,取主轴转速 n = 500 r/min。工件设计见图 4 和图 5,工件材料为铝合金。工件通过装在工作台上的平口钳装夹,不使用冷却润滑液,如图 6 所示。试验中分别对零件进行编号,具体零件特征与刀具路径优化对比如表 1 所示。



图 6 实验现场

表1 工件加工特征

样件序号	路径有无优化	有无边缘加强筋
1	无	有
2	有	有
3	无	无
4	有	无

#### 3.3 结果讨论

对加工样件进行三坐标测量,结果如图7所示。





图 7 加工样件的三坐标测量结果

#### 1)工件壁厚

薄壁零件加工时,所能达到的工件壁厚是体现设备精度、工艺技术水平的一个重要指标。同样的工艺装备条件下,不同的工艺方法所能达到的壁厚最小值,反映工艺方法的优劣。

为了减少随机误差的影响,求样件加工后的40个测 量数据壁厚的算术平均值。4个样件的平均壁厚如图8 所示。根据试验设计,这里所指的样件壁厚值是指在同等 工艺条件,工件不发生振动能正常加工的条件下所能达到 的最小壁厚值。本文所要解决的是超薄壁零件加工的问 题,工艺方法优化的目的是降低超薄壁零件加工能够达到 的最小壁厚值。从实验数据中可以看出,2号样件和1号 样件相比, 壁厚减小了 52%, 4 号样件和 3 号样件相比减 小了58%。对于薄壁零件采用分区、分段逐层循环切除 余量的方法,充分利用了工件的刚度,所能加工的零件最 小壁厚控制在1mm以下,能满足航空零件的普遍要求,对 于实现薄壁加工效果明显。同样,采用分区切削的方法, 工件局部的刚性得以增加,所加工的壁厚值也得以有效减 小.表现在测量统计数据即3号样件的平均壁厚值 A3=1. 5569,大于1号样件的平均壁厚值A1=1.4095。可以预 计,对于大型表面(平面薄板、曲面薄板、薄壁圆筒状零件 及结构等),将加工表面按零件特征划分成不同的区域, 分区域、分段逐层循环切除余量,将会有效地减少工件的 变形,特别是对于薄壁件加工效果将更加明显。

2) 加工表面的形状误差

直线度误差是指实际直线对理想直线的变化量,反映 了被测直线的不直程度。图 9 为样件加工后 x、y 方向直 线度对比图。从图 9 可以看出,直线度数值在 x 向基本控 制在了 0.04 mm/300 以下,在 y 向不超过0.06 mm/100,能 满足航空零件对直线度的要求。

图 9(a) 是加工表面上从上到下标定的 4 条测量位置 (从下往上依次是 4-、3-、2-、1-,如图 4 所示)上每一组 数据的最大值和最小值之差。测量数据是壁厚值,如果假



设薄壁两面加工时的让刀变形是对称的,则其值的 1/2 就 可以认为是加工表面沿着某一测量位置的直线度误差。 首先分析一个样件上不同高度(y 轴方向)的直线度误差, 可以看出,在工件加工表面的 y 轴方向,从下到上的 4 个 测量位置 x 向上直线度在递增,越靠近装夹位置(4-),也 就是刚度最好的位置,直线度误差越小,靠近加工表面的 顶端位置(1-),刚度最差,直线度误差最大。这与实际经 验的判断一致,而且越是在刚性差的位置区域,直线度改 善越明显(2-和1-位置)。其次分析不同加工方案(不同 样件)对应位置的直线度误差。1 号样件大于 2 号样件,3 号样件大于 4 号样件,特别是在低刚度区,即靠近顶端位 置(测量位置 1-、2-),1 号样件和 2 号样件相比直线度降 低的幅度>50%,说明应用本文提出的分段两面循环切削 方案,再结合分区域切削留出工艺凸台,工件局部的刚度 大大增加,加工精度提高效果更为明显。

加工表面 y 向直线度对比如图 9(b)所示。和上面分 析类似,从每一个对应切削(点)位置(依次是-1、-2、-3、 -4、-5、-6、-7、-8、-9、-10,如图 7 所示)所对应的 4 个样 件的数据比较可以发现,采用分段逐层循环切除余量的方 法时,工件沿着工件横向不同位置的 y 向直线度精度提高 了 50% 左右。对于没有留有加强筋工艺凸台的样件(3 号、4 号),在测量位置-1和-10处(工件的两端测量位 置),3 号样件的 y 向直线度误差明显大于预留加强筋工 艺凸台的1 号样件的直线度误差,说明预留加强筋工艺凸 台工艺方法的有效性。在此基础上,进一步采用分段逐层 循环切除余量的优化路径后,直线度都得到了明显改善, 其值与其他测量位置接近一致。

结合以上 x、y 两个方向的直线度变化,可以得出结 论,由于采用了优化的加工策略和方法,不但能同时减小 工件两个方向(横向、纵向)直线度误差,加工表面的平面 度误差也明显降低,提高了零件的形状精度。对于薄壁圆 筒性零件将有效改善零件的圆度、圆柱度。

### 4 结语

对于薄壁零件的加工,本文提出的分区、分段逐层循 环切除余量的方法,充分利用了工件的刚度:

 1)所能加工的零件最小壁厚控制在了1mm以下,能 满足航空零件的普遍要求,对于实现薄壁加工效果明显。

2)有效地提高了加工零件或结构的形状精度,如直 线度、平面度、圆度、圆柱度,普遍可以提高 50%以上。在 本文的实验条件下(采用普通精度机床、较大的切削用 量、没有采取诸如减振、特殊夹具)直线度数值在 x 向控制 在 0.04 mm/300 以下,在 y 向不超过 0.06 mm/100,能满足 一般航空零件加工精度要求。

3)和一般减小薄壁零件加工变形的工艺方法相比, 工艺方法简单易实现,如不需要复杂的误差补偿数控编程等,而且对机床设备、夹具、刀具等没有特殊要求。

4)方法适用性广。适用于平面立板、腹板(如航空结构件)、曲面立板、腹板(如叶片、叶轮)、薄壁圆筒形零件 或结构(如机匣,可以认为是平面、曲面的卷曲)、薄壁框 架类等常见航空薄壁零件或零件特征的加工;不但适用于 单面加工,同样也适用于双面加工。

#### 参考文献:

- DAVIM J P. Machining of complex sculptured surfaces [M]. London: Springer, 2012.
- [2] SCIPPA A, GROSSI N, CAMPATELLI G. FEM based cutting velocity selection for thin walled part machining [J]. Procedia CIRP, 2014, 14: 287-292.
- [3] WANG Jun, SOICHI Ibaraki, ATSUSHI Matsubara. A cutting sequence optimization algorithm to reduce the workpiece deformation in thin-wall machining [J]. Precision Engineering, 2017, 50: 506-514.
- [4] 王朋. 铝合金薄壁件加工变形仿真技术研究[D]. 沈阳: 沈阳 航空航天大学,2018.
- [5] 郑耀辉,王朋,王明海,等. 不同加工顺序对薄壁件加工变形

的仿真研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(5): 157-160.

- [6] SMITH S, DVORAK D. Tool path strategies for high speed milling of aluminium workpieces with thin webs [J]. Mechatronics, 1998(8): 291-300.
- [7] DAVIES M A. Impact dynamics in milling of thin-walled structures[J]. Nonlinear Dynamics 2000, 22: 375-392.
- [8] 傅勇,杨吟飞,兰惠,等. 走刀策略对 7050 铝合金薄壁筋铣削 的影响[J]. 机械制造与自动化,2019,48(2): 51-54.
- [9] 陈蔚芳,楼佩煌,陈华. 薄壁件加工变形主动补偿方法[J]. 航 空学报,2009,30(3): 570-576.
- [10] MA J W, HE G Z, LIU Z, et al. Instantaneous cutting-amount planning for machining deformation homogenization based on position-dependent rigidity of thin-walled surface parts[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 401-411.
- [11] MASMALI M, MATHEW P. An analytical approach for machining thin-walled workpieces [J]. Procedia CIRP, 2017, 58: 187-192.
- [12] 崔惠婷,陈蔚芳,冯婷.装夹优化抑制薄壁件加工振动研究[J].组合机床与自动化加工技术,2016(5):138-142.
- [13] 李纪磊, 雷炜炜, 王卫英. 适用于薄壁件加工的真空柔性夹 具设计[J]. 机械工程与自动化, 2016(4): 133-135.
- [14] AOYAMA T, KAKINUMA Y. Development of fixure devices for thin and compliant workpieces [J]. Annals of CIRP 2005, 54 (1): 325-328.
- [15] WANG Y, XIE J, WANG Z, et al. A parametric FEA system for fixturing of thin-walled cylindrical components [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 205 (1/2/3): 338-346.
- [16] 马鹏举,徐汶,高延,等. 薄壁机匣铣削加工颤振抑制研究[J]. 航空制造技术,2018,61(11): 16-23.
- [17] 周勇. 航空薄壁件加工动态特性及控制[J]. 工具技术, 2016,50(1): 82-86.
- [18] GERASIMENKO A, GUSKOV M, GOUSKOV A, et al. Analytical modeling of a thin-walled cylindrical workpiece during the turning process: stability analysis of a cutting process[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19(8): 5825-5841.
- [19] BUDAK E, TEKELI A. Maximizing chatter free material removal rate in milling through optimal selection of axial and radial depth of cut pairs [J]. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2005,54 (1): 353-356.
- [20] QUINTANA G, CIURANA J. Chatter in machining processes: a review[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2011,51(5): 363-376.
- [21] KOLLURU K, AXINTE D, BECKER A. A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to workpiece surface[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology 2013,62(1): 415-418.

收稿日期:2019-10-29