

飞机结构件槽特征加工摆线螺旋复合刀轨生成方法

王慧洁 李迎光 郝小忠 刘长青 高鑫

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

摘要:针对飞机结构件槽特征传统的单/双向折线或环切加工时刀具的切削力大、刀轨存在尖点、加工方向突变、容易引起刀具振动等问题,提出了飞机槽特征摆线螺旋复合刀轨生成算法。该方法采用摆线铣对飞机结构件槽特征进行开槽,避免了第一刀满刀加工,降低了进刀切削力;采用螺旋刀轨进行飞机结构件槽特征腹板面的加工,减小了机床的震颤,增加了刀轨的平稳性;在转角处采用转角循环铣加工刀轨改善了转角的切削力状况。同时在刀轨连接处采用变螺旋曲线进行过渡,保证了曲率的连续变化。切削实验表明,该刀轨改善了飞机结构件槽特征加工过程中的切削力和刀具振动,提高了工件表面加工质量。

关键词:槽特征;摆线;螺旋;转角

中图分类号:TH161

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2014)05-0816-09

Cycloid and Spiral Integrated Tool Path Generation Method for Pocket Machining of Aircraft Structural Parts

Wang Huijie, Li Yingguang, Hao Xiaozhong, Liu Changqing, Gao Xin

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

Abstract: In the conventional direction-parallel and contour-parallel tool path strategies for the pocket machining, the cutting force and vibration are aggravated at inflection points and the sharp corners due to the drawbacks of these tool path strategies. In order to address the issues, a cycloid and spiral integrated tool path generation method for pocket machining of aircraft structural parts is proposed. Firstly, the cycloid tool path is used to slot the pocket where the cutting force can be reduced. Secondly, the spiral tool path is utilized for the machining of pocket bottom where the machining chatter can be avoided and the stability of the tool path can be guaranteed. Thirdly, the corner-looping based tool path is embedded for the improvement of machining condition in corners. Meanwhile, the clothoid curve segment is adopted so as to smooth the transition of tool paths by taking the advantage of its continuous curvature change. Experimental results show that, by using the proposed method, cutting force condition can be improved and the vibration during machining can be reduced, while the surface machining quality is also satisfied.

Key words: pocket feature; cycloid; spiral; corner

飞机结构件是构成飞机机体骨架和气动外形的重要组成部分,主要包括框、梁、肋等多种类型。槽特征在飞机结构件中广泛存在,槽特征加工在整个飞机结构件加工过程中占有很大比例,但由于飞

机结构件形状复杂,加工精度要求高,造成槽特征加工难度较大^[1]。通过对航空企业的调研发现,目前槽特征加工主要采用单/双向折线加工或者采用环切的方式进行加工。但这些方法在飞机结构件

基金项目:国家科技重大专项基金(2012ZX04010041)资助项目。

收稿日期:2014-05-10;修订日期:2014-07-10

通信作者:李迎光,男,教授,E-mail:liyingguang@nuaa.edu.cn。

槽特征加工过程中存在诸多弊端:首先在第一刀加工时属于满刀加工,切削力较大;其次在腹板面加工过程中,由于加工方向的突变,不仅会导致切削宽度和切削力的急剧变化,还会在加工刀轨中产生尖点,影响工件表面加工质量;而当刀具移动到转角区时,由于切削量和加速度发生急剧变化,会造成切削力增大,刀具振动加剧,机床震颤等不良影响,不仅缩短了刀具使用寿命,甚至会出现崩刃、断刀等事故的发生,影响零件表面的加工质量和精度。此外由于上述刀轨存在的局限性,此类方法不适用于难加工材料的加工,也不适用于高速加工场合,因而难以适应数控加工技术的发展趋势^[2]。

针对上述槽特征加工中存在的问题,国内外已有了诸多的研究,主要集中在两个方面:

一种是通过改进现有加工刀轨,达到优化加工的目的。如 Pateloup 等将传统环切刀轨中的尖角替换成了圆弧,在一定程度上提高了刀轨的光滑度^[3]。安鲁陵等在常规的环切刀轨生成算法基础上,设计了型腔高速铣削加工刀轨生成算法,对刀轨的拐角处进行了平滑处理,实现了相邻刀轨环之间的光滑曲线过渡,避免了刀具运动方向的急剧变化,可使切削性能得到改善^[4]。Choy 等提出了一种基于转角循环刀轨的槽特征加工方法,他们在传统的环切刀轨的基础上,将循环加工轨迹片段添加到槽特征转角加工轨迹中^[5]。Wang 等修改了环切算法进而推算出了由 B 样条表示的刀具路径,同样提高了刀轨的光滑度^[6]。姜晓峰则对能否减少传统槽特征加工方法中抬刀、落刀次数进行了深入研究^[7]。

另一种则是通过提出新的刀轨算法来优化刀轨。如陈晓兵等提出了一种螺旋刀轨生成算法,采用调和映射的方法对网格曲面进行参数化,根据计算得到的对角参数螺旋线,在此基础上采用“区域划分”的方法生成螺旋加工刀轨^[8]。王玉国等以 B 样条曲线为基础规划刀轨,可直接应用于具有 NURBS 插补功能的高速数控加工系统^[9]。此外孙全平等结合高速铣削的特点和现实要求,提出了适合高速铣削的摆线刀轨生成算法^[10]。同样针对高速铣削,石可伟等提出了 Clothoid 曲线和 B 样条曲线两种新的环间过渡方式以形成光滑连续、切削平稳的加工刀具轨迹^[11]。Bieterman 等通过数值离散方法推导出了一种光滑刀轨的生成算法,改善了工件表面加工质量^[12]。廖文和等提出了适合高速铣削的刀轨算法,着重解决了型腔和轮廓加工刀轨的合理规划及进刀方式的选取等问题^[13]。

上述方法中无论是基于对原有刀轨的优化还是提出新的刀轨算法,都在一定程度上改善了槽特征加工刀轨状况,提高了工件表面加工质量。但是上述方法都是针对于槽特征加工过程中存在的某一类问题,仅仅是重新规划刀具的走刀路径或者在转角处采用新生成的曲线进行过渡,得到了光滑的加工刀轨却降低了加工效率,提高了腹板面的加工质量却忽略了转角处的加工精度。并未提出一种方法既能够提高槽特征腹板面及内型转角的加工质量,也能够保证切削加工的稳定性和加工效率。对于飞机结构件,迫切的需要一种槽特征加工工艺及其刀轨生成方法以解决槽特征加工过程中存在的问题,提高飞机结构件的加工效率及质量。

针对上述问题本文提出了一种新的飞机结构件槽特征加工工艺及其刀轨的生成算法。该方法在深入分析原有的摆线刀轨、螺旋刀轨及转角循环铣加工刀轨的特点及适用范围的基础上,结合各个刀轨的优点将其分别应用于槽特征加工的不同阶段和部位,形成新的刀轨策略,提出了针对飞机结构件槽特征结构特点的刀轨生成方法。新的刀轨策略解决了槽特征加工过程中不同部位存在的问题,最大程度上发挥了各种刀轨的优点,可以优化槽特征加工过程中的切削力,提高工件的表面加工质量。此外由于采用了摆线和螺旋铣刀轨,使得该方法不仅适用于普通材料的加工,更适用于难加工材料,同时也适用于高速加工。相比较于其他加工方法,该方法能获得更好的加工效果。

1 摆线螺旋复合加工工艺及刀轨

为了提高工件表面加工质量和加工效率,优化加工过程中的切削力,提出了飞机结构件槽特征加工摆线螺旋复合刀轨生成算法,刀轨算法流程图如图 1 所示。

首先根据飞机结构件槽特征信息,采用环分析的方法获得腹板面精加工驱动几何信息^[14]。根据刀具半径及摆线圆加工刀轨半径计算出初始摆线加工区域最短边线的长度,将驱动几何曲线进行偏置,得到满足等切宽要求的初始摆线加工区域。

然后在初始摆线加工区域内确定螺旋进刀点,再根据刀具信息、摆线圆加工刀轨半径及步距等相关信息在初始摆线加工区域内生成摆线加工刀轨。

其次将驱动几何曲线按照设定的切宽进行等距离偏置,得到一系列驱动几何偏置线,通过径向各层驱动几何偏置线之间的过渡直线连接形成螺旋刀轨。并在刀轨拐角处采用转角循环铣和变螺

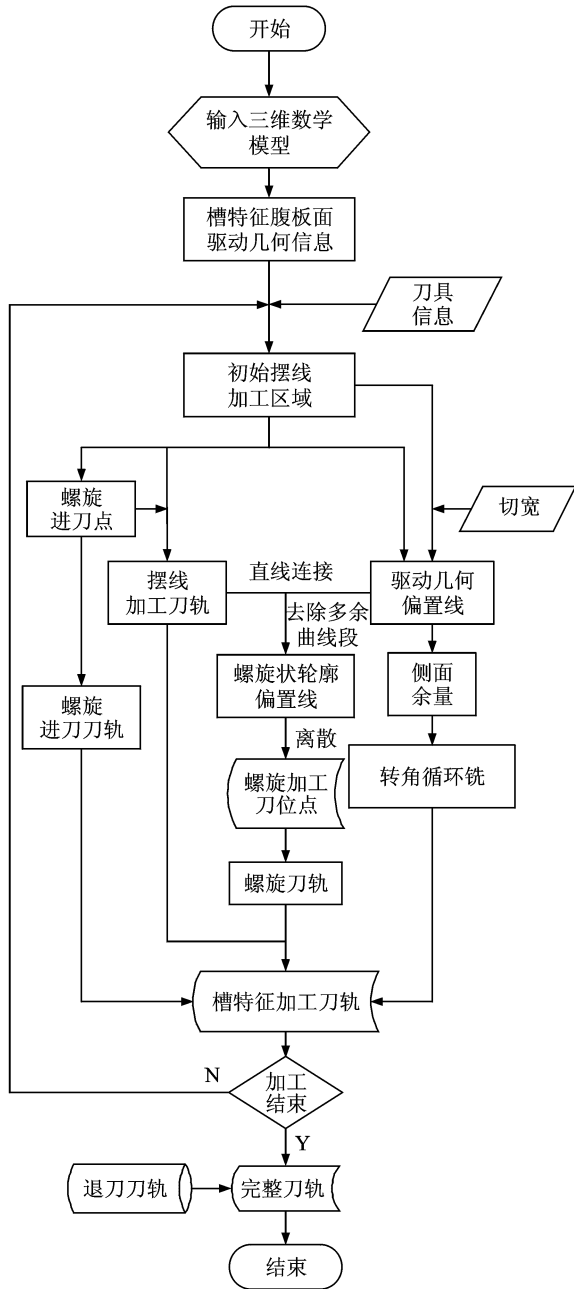


图1 摆线螺旋复合刀轨算法流程图

Fig. 1 Flow chart of cycloid and spiral integrated tool path

旋曲线进行过渡。

最后根据零件模型获取内型及转角的加工余量信息,确定侧面加工余量,采用内型转角一体加工刀轨算法^[15],生成转角和内型处精加工刀轨。

该方法在整个槽特征加工过程中,将运用3种不同的加工刀轨分别为:摆线铣刀轨、螺旋刀轨及转角循环铣刀轨。这3种刀轨各有其优点及适用范围,而根据槽特征加工过程中存在的问题,结合上述各刀轨的特点将它们分别应用在槽特征加工的不同阶段时有利于充分发挥各刀轨的优点。采

用摆线铣开槽可以避免第一刀的满刀切削,减小第一刀的切削力。而螺旋刀轨能够增加刀轨的平稳性,在槽特征加工过程中能同时避免在刀轨中出现尖点和因加工方向的突变而引起的切削力突变,此外转角循环铣刀轨不仅能改善转角部分的加工效果,减少换刀次数,同时也能提高加工效率。

2 初始摆线加工区域与初始摆线刀轨生成

2.1 初始摆线加工区域的确定

槽特征加工摆线螺旋复合刀轨是在槽特征粗加工的基础上进行的。在槽特征完成粗加工后,根据槽特征信息,采用环分析的方法获得槽特征腹板面精加工驱动几何信息。

在获得槽特征腹板面的驱动几何曲线后,求解驱动几何曲线各边的长度,将其记 L_i 。其中 i 表示从1到 N 的任意正整数, N 则表示驱动几何曲线的边的数目。曲线各边长度的求解按以下准则:

当驱动几何线为直线时,该边的长度即为直线自身长度;当驱动几何线为曲线时,长度则为曲线两端点的距离。

比较驱动几何曲线各边的长度 L_i 确定出长度最短和长度最长的驱动几何曲线,并将长度最短的驱动几何曲线称作最短几何线,最长的驱动几何曲线称作最长几何线,其长度分别记为 L_{\min} 和 L_{\max} 。

在得到驱动几何曲线的基础上,将驱动几何曲线各边沿径向向里偏置即可得到初始摆线加工区域。将初始摆线加工区域各轮廓线中的最短轮廓线即与最短几何线相对应的偏置边的长度记为 l_{\min} 。其长度可根据式(1)确定

$$l_{\min} = D + 2 \times R_c \quad (1)$$

式中: D 、 R_c 分别为刀具直径、摆线圆刀轨半径。

初始摆线加工区域最短轮廓线边长的设定是确定初始摆线加工区域的基础,通过限制最短轮廓线的边长,可以唯一确定初始摆线加工区域。最短轮廓线的确定考虑了刀具和摆线圆的半径,由此确定的初始摆线加工区域为最小区域,不仅能够保证在初始摆线加工区域中可以生成摆线加工刀轨,同时能够减少摆线铣刀轨的数目,缩短摆线铣加工时间,提高零件加工效率。

在确定初始摆线加工区域后,将驱动几何曲线沿径向逐层向里偏置即可,采用等宽偏置的方法,也可选择等比例偏置。在进行等宽偏置时,将驱动几何曲线各边沿径向依次向里偏置相同距离,且每沿径向偏置一次,都需测定最里层驱动几何偏置线

最短边的长度 l_x ,直到 l_x 的大小恰好为 l_{\min} 时停止偏置。此时该层驱动几何偏置曲线所组成的区域即为初始摆线加工区域。其中驱动几何偏置曲线各边长度的计算方法同驱动几何曲线各边长度的计算方法相同。

2.2 初始摆线刀轨的生成

初始摆线加工刀轨的生成主要分为以下两个步骤:

(1) 确定刀具螺旋进刀点

在生成初始摆线加工刀轨之前,首先需要初始摆线加工区域内确定刀具螺旋进刀点,主要分为以下几个步骤:

首先将初始摆线加工区域轮廓线各边均沿径向向里偏置 $D/2$ 的距离,偏置后的轮廓线所组成的区域即为摆线刀轨区域。然后计算摆线刀轨区域各轮廓线的长度,确定最短轮廓线并将其记为 A_0B_0 ,在得到摆线刀轨区域最短轮廓线 A_0B_0 后,遍历摆线刀轨区域其余各轮廓线,找到与 A_0B_0 顺时针相连的轮廓线,记为 B_0C_0 。采用同样的方法找到与 B_0C_0 顺时针相连的轮廓线 C_0D_0 ,直到摆线刀轨区域的所有轮廓线被标记完成。最后在摆线刀轨区域内作半径为 R_c 的圆使其与轮廓线 A_0B_0, B_0C_0 均相切,其中 R_c 为初始摆线加工刀轨的摆线圆半径。而该圆与轮廓线 A_0B_0 的切点即为刀具螺旋进刀点,如图 2 中 Q 点所示。

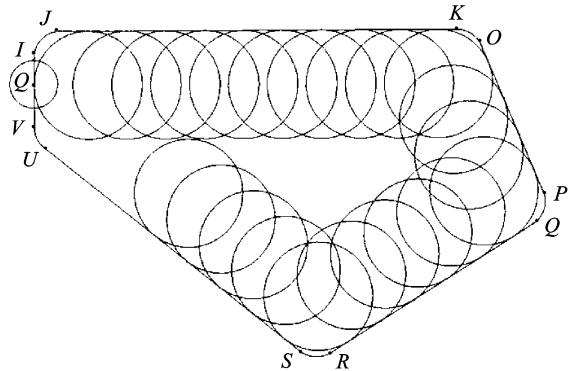


图 2 螺旋进刀点

Fig. 2 Spiral approach point

(2) 确定摆线圆刀轨的步距

在生成初始摆线加工刀轨之前,还需确定摆线圆刀轨的步距,需要保证轮廓线 B_0C_0 的长度 $L_{B_0C_0}$ 满足式(2)

$$L_{B_0C_0} = 2 \times R_c + n \times L_0 \quad (2)$$

式中: L_0 为摆线圆步距, n 为摆线刀轨区域内沿着轮廓线 B_0C_0 方向的摆线圆数目,为了保证 n 满足

正整数的要求,可根据式(3)求解出合适的 n

$$n = [(L_{B_0C_0} - 2 \times R_c) / L_c] + 1 \quad (3)$$

式中: $[(L_{B_0C_0} - 2 \times R_c) / L_c]$ 表示取整,即 n 为小于 $(L_{B_0C_0} - 2 \times R_c) / L_c$ 的最大整数; L_c 为设置的初始步距。

在求得合适的 n ,则可根据式(4)确定摆线圆步距 L_0 为

$$L_0 = (L_{B_0C_0} - 2 \times R_c) / n \quad (4)$$

在确定刀具螺旋进刀点及摆线圆刀轨步距之后,即可从刀具螺旋进刀点开始,在摆线刀轨区域内作半径为 R_c 的圆并保证该圆与轮廓线 A_0B_0, B_0C_0 均相切,然后沿着 B_0C_0 方向按照摆线圆步距 L_0 依次作半径为 R_c 的圆使之与 B_0C_0 相切,直到轮廓线 B_0C_0 方向的摆线圆数目达到 n 后,顺时针旋转刀轨,同样作半径为 R_c 的圆依次与轮廓线 B_0C_0, C_0D_0 相切,直到遍历完摆线刀轨区域内的所有轮廓线。

若沿着最外层的摆线圆刀轨加工完一圈后初始摆线加工区域还留有余量未切削,则将初始摆线加工区域轮廓线继续沿径向向里偏置 $D/2$ 的距离,按上述方法继续作摆线圆刀轨直到初始摆线加工区域加工完成为止。摆线刀轨区域内的所有摆线圆即为初始摆线加工区域内的刀具轨迹,如图 2 所示。

(3) 转角处过渡刀轨

当刀具运动到摆线刀轨区域的转角处时,为了避免由于曲率的急剧变化而引起机床的震颤,采用图 2 变螺旋曲线 IJ, KO, PQ, RS, UV 切削过渡代替传统的圆弧过渡,其中变螺旋曲线的最大曲率半径 L_h 设为摆线圆半径的一半,即

$$L_h = 0.5 \times R_c \quad (5)$$

3 螺旋刀轨的生成及转角处理

3.1 螺旋刀轨的生成

传统的槽特征加工方法在加工腹板面时存在加工方向的突变,易引起刀具的振动,同时也会在工件表面留下接刀痕,影响零件零件表面加工质量。为了增加腹板面加工时刀轨的平滑性,避免加工方向的突变,采用等切宽螺旋刀轨去除腹板面材料,保证加工过程中切削力的稳定。

生成螺旋刀轨主要分为以下几个步骤:

(1) 生成驱动几何曲线径向各层偏置线

在生成螺旋刀轨之前,首先需要将初始摆线加工区域轮廓线沿径向向里偏置 $D/2 - \sigma$ 的距离,将得到的偏置线称为径向最里层驱动几何偏置曲线,

其中 σ 为刀具切宽。

再将驱动几何曲线各边同时沿径向向里偏置 $\delta + D/2$ 的距离, 得到径向第一层驱动几何偏置曲线, 其中 δ 为槽特征粗加工完成后留下的精加工余量。

求取径向最里层驱动几何偏置曲线与径向第一层驱动几何偏置曲线间的距离 L , 因此径向第一层与最后一层驱动几何偏置曲线间的偏置次数 n_1 为

$$n_1 = [L/\sigma] \quad (6)$$

根据式(6)确定的偏置次数 n_1 , 求解径向各层偏置曲线间的偏置距离 L_p , 即为

$$L_p = L/n_1 \quad (7)$$

最后将径向第一层驱动几何偏置曲线沿径向依次向里偏置 L_p 的距离, 偏置次数即为上述 n_1 , 得到径向各层驱动几何偏置曲线, 如图3所示。

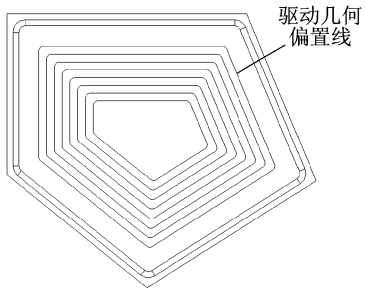


图3 径向各层驱动几何偏置线

Fig. 3 Geometry offset lines along radial direction

将驱动几何径向最里层偏置线记为第1层驱动几何偏置线, 沿径向向外的各层偏置曲线依次为第2, 第3, …, 第 $n_1 + 1$ 层驱动几何偏置曲线, 其中第 $n_1 + 1$ 层偏置曲线即为径向第1层驱动几何偏置线。

(2) 构造过渡曲线

在刀具完成初始摆线区域的加工后, 刀具保持先前的运动方向过渡到初始摆线加工区域轮廓偏置线的最短边 A_0B_0 , 然后沿着直线 B_0F_1 过渡到驱动几何第1层偏置曲线。此后刀具每走完一层径向驱动几何偏置曲线都沿着直线 B_iF_{i+1} 从第 i 层偏置线过渡到第 $i+1$ 层偏置线。此处的 B_iF_{i+1} 即为径向各层驱动几何偏置线间的过渡曲线, 如图4所示。

(3) 生成螺旋刀轨

在图4的基础上去除多余直线段 $B_1F_1, B_2F_2, \dots, B_{n_1}F_{n_1}$, 余下曲线段所组成的螺旋状曲线即为螺旋刀轨。为了避免刀具切削力方向的突变, 在螺旋刀轨的转角处同样采用边螺旋曲线进行过

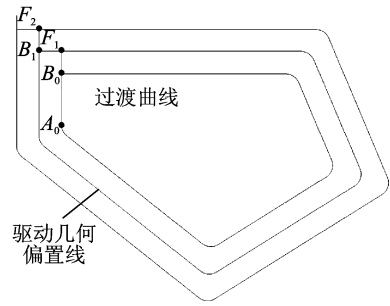


图4 径向各层偏置线间的过渡曲线

Fig. 4 Transition curves between geometry offset lines along radial direction

渡, 生成最终槽特征腹板面加工的螺旋刀轨, 如图5所示。

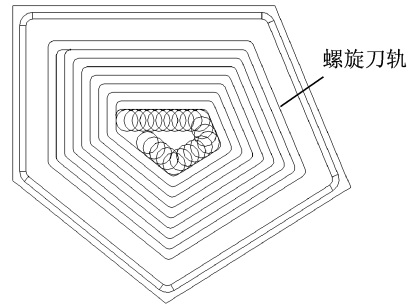


图5 螺旋刀轨

Fig. 5 Spiral tool path

3.2 转角处理

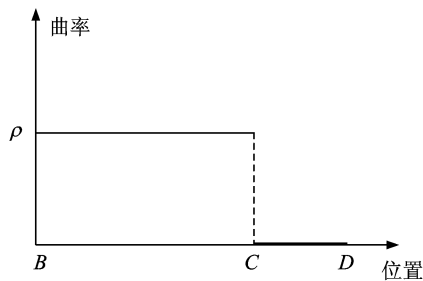
在刀轨转角处, 由于刀具与材料的接触角发生急剧变化, 同时刀具运动方向和加速度方向也存在变化, 导致了切削力的急剧变化和刀具的振动, 可能会导致弹刀、拉刀等事故的发生, 降低了工件表面加工质量。为了优化刀轨转角处的切削力, 提高工件表面加工质量, 在槽特征转角处采用转角循环铣的加工方法, 进行分层加工, 很好地解决了上述问题。

转角循环铣刀轨的层数则根据刀具接触角进行判定。在转角处每添加一层径向层刀轨后, 计算当前余量, 再进行接触角验证, 判定是否需要继续添加径向层刀轨。

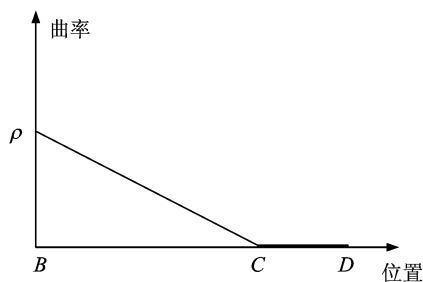
因此在上述的螺旋刀轨的转角处也采用转角循环铣进行加工, 在循环铣的加工过程中满足最大和恒定接触角原则, 保证切削力在一定范围内变化。为减少刀具的振动, 在循环铣中直线与直线, 直线与圆弧曲线间过渡时不采用圆弧进行过渡, 而是采用变螺旋曲线进行过渡。

变螺旋曲线的优点体现在它能够保证曲线的

曲率满足线性变化,在零件加工过程中减小了刀具及机床的振动,增加了刀轨的平稳性。变螺旋与圆弧曲线的对比图和曲率变化图如图 6(a,b)所示。其中横坐标表示当前刀具中心所在位置,纵坐标 ρ 为曲率值,从图 6(a)可以看出,如果采用圆弧进行过渡,曲率会发生急剧变化,运动过程中会引起机床的异常震动。而图 6(b)表明变螺旋曲线的曲率呈线性变化,不存在急剧变化。因而变螺旋曲线可以用来连接两段曲率不同的曲线,并通过线性变化的曲率进行过渡。



(a) 圆弧曲率变化图



(b) 变螺旋曲线曲率变化图

图 6 变螺旋与圆的曲率图

Fig. 6 Curvature of clothoid and circle

变螺旋曲线可通过公式计算。此处变螺旋曲线的计算公式^[16]为

$$\begin{cases} x = l' - \frac{l'^5}{40c^2} + \frac{l'^9}{3\ 456c^4} - \dots \\ y = \frac{l'^3}{6c} - \frac{l'^7}{336c^3} + \frac{l'^{11}}{42\ 240c^5} - \dots \end{cases} \quad (8)$$

式中: l' 为中间某点距起点 B 的距离; c 为回旋常数。根据式(8)可以计算变螺旋曲线。变螺旋曲线如图 7 曲线 BC 所示。

最后在完成螺旋刀轨加工后,采用转角内型一体化加工刀轨对内型及转角处的残留进行加工。即根据粗加工余量,结合等接触角和最大接触角原则计算出相应的加工刀轨,对转角和内型进行组合加工。既能够减少换刀次数,提高加工效率,也能够避免在转角处产生接刀痕,改善工件表面加工质量。在转角处同样采用转角循环铣进行加工。如

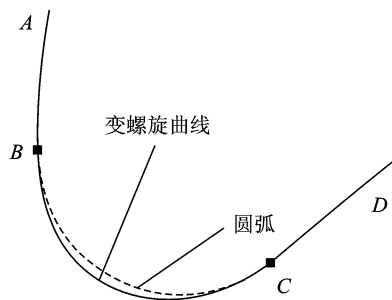
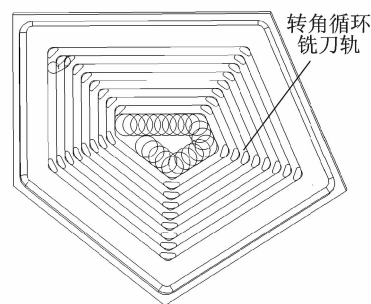


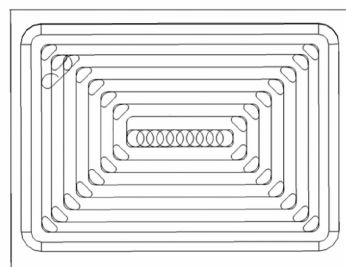
图 7 变螺旋曲线连接刀轨

Fig. 7 Connection tool path using clothoid curve

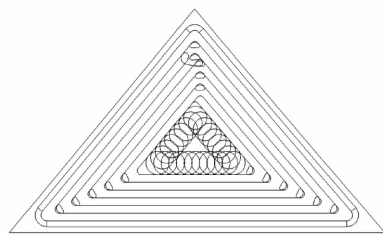
图 8 所示分别为在 3 种典型飞机结构件槽特征中生成的摆线螺旋复合铣刀轨,图 8(a~c)依次为五边形,四边形和三角形槽特征。



(a) 五边形槽特征加工摆线螺旋复合铣刀轨



(b) 四边形槽特征加工摆线螺旋复合铣刀轨



(c) 三角形槽特征加工摆线螺旋复合铣刀轨

图 8 不同形状槽特征摆线螺旋复合刀轨

Fig. 8 Cycloid and spiral integrated tool path for pocket features with different shapes

4 实验验证

以图 9 所示的飞机结构件典型的四边形槽特征为例来验证提出的槽特征加工摆线螺旋复合刀

轨生成方法。该实验件包含两个典型槽特征,为了验证摆线螺旋复合刀轨的加工效果,两个槽特征尺寸相同,材料相同,均为铝质。在 MIKRON 机床上采用直径为 12 mm 的硬质合金刀进行加工。且采用相同的切削参数及装夹方式。唯一的区别在于两个槽特征的刀轨类型不同,其中 A 采用摆线螺旋复合刀轨加工方法, B 采用传统的槽特征加工方法。两槽特征的尺寸、切削参数、刀轨类型以及装夹方式等如表 1 所示。

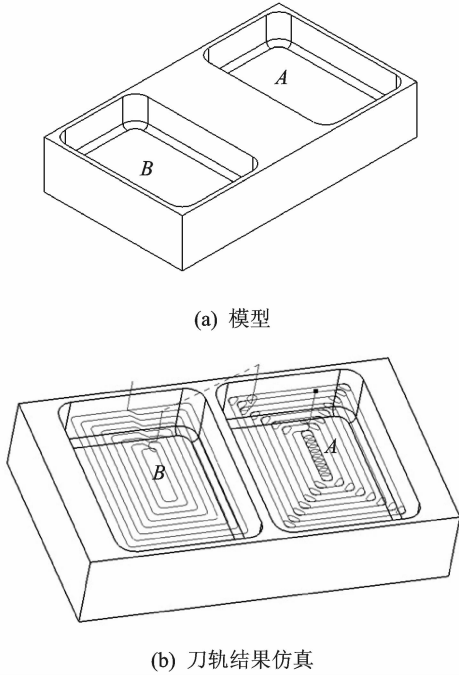


图 9 实验零件

Fig. 9 Experimental part

表 1 实验切削参数

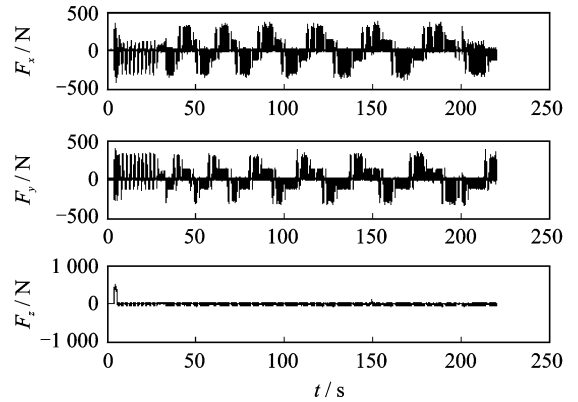
Tab. 1 Machining parameters of experiment

特征	槽 A	槽 B
材料	铝	铝
尺寸/(mm×mm)	94×67.5	94×67.5
机床	MIKRON	MIKRON
进给速度/(mm·min ⁻¹)	800	800
主轴转速/(r·min ⁻¹)	1 000	1 000
切深/mm	2	2
装夹	压板	压板
刀轨	复合刀轨	CATIA
刀具直径/mm	12	12

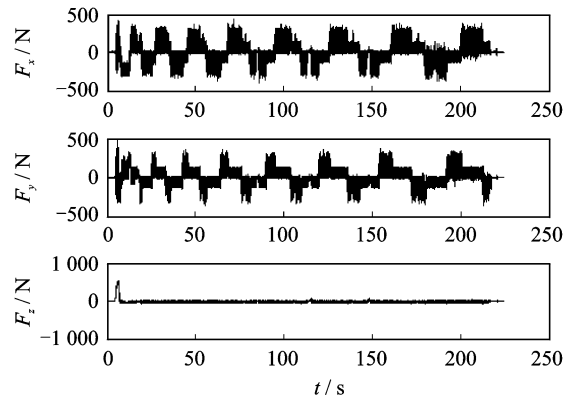
实验过程中使用 Kistler 测力仪以及振动测试和模态分析仪记录切削过程中的切削力和刀具振动。采用粗糙度仪测量加工后的工件表面质量。加工过程中腹板面的切削力和振动信号分别如图 10, 11 所示。其中 F_x , F_y 和 F_z 为切削力在 3 个方

向的分量, A_x , A_y , A_z 为振幅在 3 个方向的分量。

加工过程中的切削力和振动信号以及工件表面加工质量信息如表 2 所示。



(a) A槽切削力信号



(b) B槽切削力信号

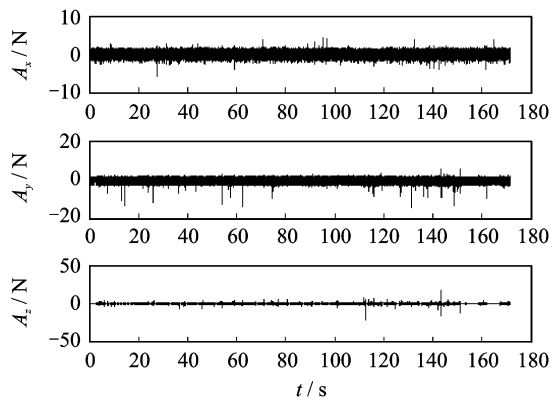
图 10 A/B槽切削力信号

Fig. 10 Cutting force signal for pockets A and B

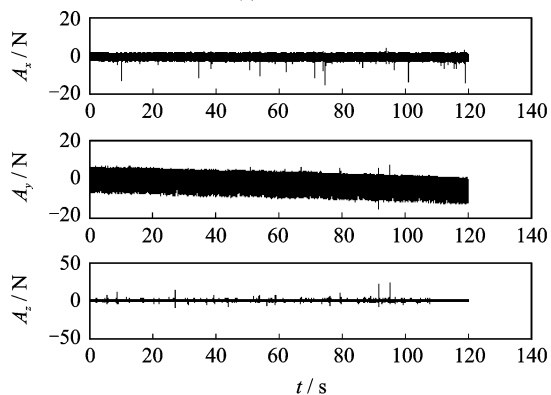
表 2 实验结果

Tab. 2 Experimental results

参数	特征轴	槽 A	槽 B
第一刀切削力/N	x 轴	363.60	430.02
	y 轴	396.43	497.78
	z 轴	514.01	546.10
最大切削力/N	x 轴	386.82	445.02
	y 轴	438.62	497.78
	z 轴	514.01	546.10
最大振幅/V	x 轴	5.80	15.65
	y 轴	13.93	15.36
	z 轴	21.38	22.18
振幅方差/V ²	x 轴	0.079	4.011
	y 轴	3.882	72.719
	z 轴	0.041	0.149
表面粗糙度/μm		2.8	3.2
时间/s		220	180



(a) A槽振动信号



(b) B槽振动信号

图 11 A/B 槽振动信号

Fig. 11 Vibration signal for pockets A and B

由表 2 实验结果可知,采用槽特征摆线螺旋复合铣加工刀轨同传统加工方法相比:第一刀加工时采用摆线开槽使得 x, y 和 z 三个方向上的第一刀切削力分别减少了:66.42, 101.35, 32.09 N, 同时 3 个方向上的平均切削力分别减小了 110, 50 和 40 N;在槽特征腹板面加工过程中,由于采用了螺旋刀轨的方式进行加工,切削力有了明显减小, x, y, z 方向切削力最大分别为 386.82, 438.62 和 514.01 N;相比较于传统的槽特征加工方法,在 3 个方向的切削力分别减少了 58.20, 59.16 和 32.09 N;同时 x 轴的最大刀具振幅减小了 9.85 V, y 与 z 轴的最大振幅分别减少了 1.43, 0.8 V。而比较可以用来表征刀具磨损状态及动态切削力的振幅方差发现,摆线螺旋复合铣刀轨 x, y 轴的振幅方差相较于传统刀轨分别降低了 3.932 V^2 和 68.837 V^2 。由于在转角处采用循环铣的加工方法,加工刀轨路径总长度有所增加,但在加工转角时,消除了刀轨尖点,避免了切削力急剧变化的情况,因而转角加工无需降低进给速度,因此本方法总体上并未对加工效率产生影响,加工时间略有增

加。如图 12 所示为切削加工效果图。

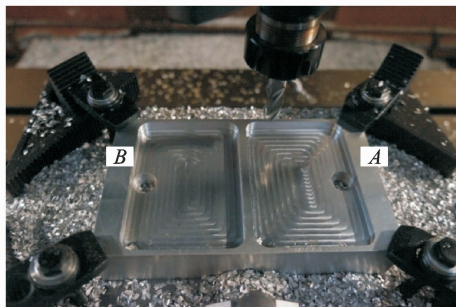


图 12 切削加工效果图

Fig. 12 Machining presentation

通过分析发现传统飞机结构件槽特征加工方法第一刀切削力大,存在加工方向易突变等问题。但如果整个槽特征加工过程中都采用摆线铣刀轨虽然有利于降低切削力,却会在很大程度上影响加工效率。而螺旋刀轨在提高加工效率、减少刀具磨损的同时却会增大第一刀的切削力。此外螺旋线能够提高刀轨的光滑度,但由于连续性的问题,在加工转角处时工件表面质量仍有欠缺。而本文正是在分析了各刀轨特点的基础上,结合他们的优点并将其应用到槽特征加工的不同阶段及部位,而避免了上述刀轨自身的局限性给零件加工带来的不良影响。综上所述,飞机结构件槽特征加工摆线螺旋复合刀轨相比于传统的槽特征加工刀轨有较明显的优势:降低了刀具的切削力,减少了机床的震颤及刀具磨损,避免了刀轨中的尖点和转角处的接刀痕,增加了刀轨的平滑度,提高了工件表面加工质量和加工效率。

5 结 论

(1)采用摆线铣开槽,避免了第一刀满刀加工,实验表明相较于传统的槽特征加工方法, x, y, z 三个方向上的第一刀切削力分别减小了:15.45%, 20.36%, 5.88%。

(2)采用螺旋刀轨进行槽特征腹板面加工增加了刀轨的平稳性,避免了因加工方向的改变导致的切削力的突变。实验表明在整个槽特征加工过程中 x, y, z 三个方向的最大切削力分别减少了 13.08%, 11.88% 和 5.88%。

(3)采用螺旋刀轨同时避免了刀轨中出现尖点,减缓了刀具及机床的震颤,实验表明在槽特征加工过程中 x 轴方向的振幅降低了 62.94%。

(4)刀轨的拐角处采用转角循环铣和变螺旋曲线过渡,保证了曲率变化的连续性,增加了刀轨的

光滑度。提高了零件转角处的表面加工质量。

为了得到更好的优化效果,下一步工作主要包含以下两个方面:

(1)对摆线螺旋复合加工刀轨中的进给速度进行优化,以达到更好的切削力优化效果。

(2)增加摆线螺旋复合刀轨算法的鲁棒性以更好地适用于各种形状的复杂飞机结构件槽特征。

参考文献:

- [1] 韩雄,汤立民.大型航空结构件数控加工装备与先进加工技术[J].航空制造技术,2009(1):42-47.
Han Xiong, Tang Limin. NC Machining equipment and advanced machining technology for large aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(1):42-47.
- [2] 刘战强,万熠,艾兴.高速铣削中切削力的研究[J].中国机械工程,2004,14(9):734-737.
Liu Zhanqiang, Wan Yi, Ai Xing. Cutting forces in high speed milling[J]. China Mechanical Engineering, 2004,14(9):734-737.
- [3] Pateloup V, Duc E, Ray P. Corner optimization for pocket machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004,44(12):1343-1353.
- [4] 安鲁陵,周来水,庄海军,等.型腔高速铣削刀轨生成算法研究[J].计算机辅助设计与形学学报,2004,16(9):1202-1206.
An Luling, Zhou Laishui, Zhuang Haijun, et al. Tool path generation for high-speed milling of pockets[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004,16(9):1202-1206.
- [5] Choy H S, Chan K W. A corner-looping based tool path for pocket milling[J]. Computer-Aided Design, 2003,35(2):155-166.
- [6] Wang H C, Jang P, Stori J A. A metric-based approach to two-dimensional (2D) tool-path optimization for high-speed machining[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2005,127(2):33-48.
- [7] 姜晓峰,周来水.复杂多曲面3轴粗加工刀轨优化的计算方法[J].中国机械工程,1999,10(10):1182-1184.
Jiang Xiaofeng, Zhou Laishui. Optimization of tool path in the 3-axis rough milling of complex multi-surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 1999,10(10):1182-1184.
- [8] 陈晓兵,廖文和,戴宁,等.利用调和映射的复杂网格曲面螺旋刀轨生成算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2012,24(11):1399-1404.
Chen Xiaobing, Liao Wenhe, Dai Ning, et al. Algorithm for spiral tool path generation using harmonic map for complex mesh surface machining[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012,24(11):1399-1404.
- [9] 王玉国,周来水,安鲁陵,等.型腔铣削加工光滑螺旋刀轨生成算法[J].航空学报,2008,29(1):216-220.
Wang Yuguo, Zhou Laishui, An Luling, et al. Smooth spiral tool path generation for pocket milling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008,29(1):216-220.
- [10] 孙全平,廖文和.基于摆线的高速铣削刀轨生成算法研究[J].机械制造,2003,41(5):12-14.
- [11] 石可伟,周后明.型腔高速加工环间移刀轨迹优化——Clothoid曲线[J].湖南工程学院学报:自然科学版,2012,22(2):25-27.
Shi Kewei, Zhou Houming. On toolpath optimization between loops in HSM of pocket clothoid curve[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering: Natural Science Edition, 2012,22(2):25-27.
- [12] Sun Y W, Guo D M, Jia Z Y. Spiral cutting operation strategy for machining of sculptured surfaces by conformal map approach[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006,180(1):74-82.
- [13] 孙全平,廖文和,盛亮.高速铣削刀轨优化技术的研究[J].机械科学与技术,2004,23(8):922-926.
Sun Quanping, Liao Wenhe, Sheng Liang. Research on tool-path optimization for high speed milling[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2004,23(8):922-926.
- [14] 张石磊,李迎光,刘长青,等.基于环分析的飞机结构件槽特征腹板精加工区域自动创建方法[J].中国机械工程,2013,24(13):1728-1733.
Zhang Shilei, Li Yingguang, Liu Changqing, et al. Loop-analysis-based automatic creation method for bottom finish machining region of pocket feature in aircraft structural parts[J]. China Mechanical Engineering, 2013,24(13):1728-1733.
- [15] 高鑫,李迎光,张臣,等.飞机结构件内型转角一体加工刀轨生成方法[EB/OL].<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20131230.1702.003.html>,2013-12-30.
Gao Xin, Li Yingguang, Zhang Chen, et al. An integrated machining tool path generation method for corner and profile of aircraft structural parts[EB/OL].<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.v.20131230.1702.003.html>,2013-12-30.
- [16] 李孟山,李少元.回旋曲线点位坐标计算公式[J].工程勘察,2002(1):62-63.
Li Mengshan, Li Shaoyuan. The coordinate computational formula of clothoid[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2002(1):62-63.

