DOI: 10.3901/JME.2020.03.197

九轴联动叶片双刀对顶铣削的非线性 误差分析与控制算法*

宋冬冬 薛 飞 赵万华 卢秉恒

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 西安 710049)

摘要: 针对双刀对顶铣削线性插补过程中三个旋转运动引起切触点实际运动轨迹与理论规划轨迹不重合的现象, 为了保证工件的表面加工质量, 提出了减小双刀对顶铣削中非线性误差的轨迹优化算法。针对双刀具的位置约束关系, 建立九轴联动机床的运动学同步转换模型。结合工件表面的几何特征, 阐述了切触点间非线性误差的理论表征方法, 并建立旋转轴引起非线性误差的简化计算模型; 以双刀对顶铣削轨迹线上非线性误差和加工误差为优化目标, 建立双刀对应切触点同步插值的优化模型。以典型汽轮机叶片双刀对顶铣加工为例, 同步修正了双刀对应线性插补轨迹线上的切触点, 仿真和试验结果显示, 该方法有效减小了加工过程中的非线性误差, 可提高叶片型面的加工精度。

关键词: 双刀铣削; 非线性误差; 轨迹优化

中图分类号: TG156

Analysis and Control Algorithm of Non-linear Error for Nine-axis Synchronize Milling Blades with Twin-cutters

SONG Dongdong XUE Fei ZHAO Wanhua LU Bingheng

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract: There are three rotary motions in linear interpolation of twin-tool milling process, which causes the phenomenon that the actual motion trajectory of the cutting contact point does not coincide with the theoretical planning trajectory. In order to ensure surface machining quality of the workpiece, the path optimization algorithm for reducing the non-linear error in twin-tool milling process is proposed. Considering the position constraint relationship of two cutters, the kinematic synchronous conversion model of nine-axis machine tool is suggested. Based on the geometrical feature of the workpiece surface, the theoretical characterization method of non-linear error between the cutting contact points is researched, and the simplified calculation model of the non-linear errors caused by the rotational motion is built. For effectively controlling the non-linear error and the machining error of the twin-tool milling path, the optimization model is established to realize the synchronous interpolation of opposite cutting contact points for the two cutters. Then, the cutting contact points in twin-tool milling path is simultaneously corrected for a typical turbine blade based on the method. The results of simulation and experiment show that the non-linear error of twin-tool milling is reduced. And the feasibility of proposed method is verified which can be used to improve the machining accuracy of blade profile.

Key words: twin-tool milling; non-linear error; path optimization

0 前言

多轴数控加工扩展了刀具运动的自由度, 已成为改善复杂形状机械零件加工质量和加工效率的有效方法, 在航空航天、能源、汽车及模具等行业中具有显著的优势。然而, 对于中长型薄壁汽轮机叶

片, 其材质多为不锈钢的难加工材料, 在五轴加工机床单刀螺旋铣削过程中切削力易引起叶片的变形, 出现“让刀”现象, 尤其对于余量大且不均匀的锻造毛坯, 特别在粗加工阶段, 限制了加工中可供选择的切削参数, 且需要冷作矫正的方法保证已加工叶片的精度一致性, 兼顾加工精度和效率方面存在瓶颈。采用两把刀具同时对顶铣削叶片两侧的型面, 借助于双刀具切削力的相互抵消减小加工过程中产生的变形, 且双刀相对单刀的方式可大大提

* 国家自然科学基金(51605373)和国家科技重大专项(2018ZX04004001)资助项目。20190311 收到初稿, 20190809 收到修改稿

高加工效率,对提升行业的加工水平具有重大意义。但是,线性插补中刀具的旋转运动产生了切触点理论轨迹线与实际加工轨迹线不重合的现象,引起不可避免的非线性误差,而多个旋转轴驱动双刀具的同步运动更增加了刀具运动轨迹的复杂化程度,使得非线性误差成为更加突出的问题。

多轴加工过程中切触点的非线性误差控制策略已是诸多学者一直关注并研究的问题^[1-3]。HWANG 和 LIANG^[4]以刀具角度的变化量建立 5 轴机床非线性误差的计算模型,评价切触点间最大加工误差,并修正切削允许的最大步长。姬俊锋等^[5]提出一种改进的五轴数控加工走刀步长算法,在前置处理中补偿非线性误差。郑颺默等^[6]以刀轴矢量与旋转轴运动坐标之间存在的非线性关系建立刀具姿态误差模型,在刀具姿态误差超差的情况插入切触点以控制非线性误差,防止靠近奇异点处旋转轴的速度剧烈变化。杨旭静等^[7]提出了通过限制相邻切触点处刀轴夹角的方法控制非线性误差。该类研究在切触点间的中点位置直接插入新的切触点以减小非线性误差,而直接密化的切触点则可能对加工效率有一定的影响。

非线性误差量的大小与机床结构的配置形式密切相关,在后置处理中考虑非线性误差也成为改善加工精度的关键。TUTUNEA-FATAN 等^[8]探讨了刀具在不同类型机床中沿预定路径的非线性误差值,并以此选择线性插补期间运动效率最优的加工设备而改善加工精度。SØRBY^[9]分析了非正交配置机床的非线性误差,并用于所提出的逆运动学算法以修正 NC 代码。吴大中等^[10]在两个相邻切触点的中点处线性插值新切触点,直至误差满足要求,并进行了仿真验证。SHE 等^[11]在开发两种结构形式机床的后置处理算法中均考虑非线性误差,以提高机床的加工精度。王丹等^[12]根据旋转轴的变化量提出减小机床过大非线性误差的算法,在超差的切触点间仍是用线性插值。LI 等^[13]利用三次样条平滑刀具路径和切触点密化的方法减少非线性误差,提出了后处理过程中刀具路径优化算法。BOZ 等^[14]引入了球面插值方法修正后置处理算法中非线性误差超差的切触点,提高 NC 代码的加工精度。周玉龙等^[15]研究了非线性误差与进给速度的近似关系,并采用一次试探法求解满足误差要求的进给速度。然而,众多的研究则在后置处理的过程中直接插入切触点以减小非线性误差,而忽略了曲面的原始信息。

目前,随着结构多样化和功能集成化的发展,超过 5 轴的新型机床应运而生。WANG 等^[16]阐述了磨削发动机叶片的 6 轴砂带磨床,ZHAO 等^[17]研究

了用于飞机装配且双 5 轴对称布局的自动钻铆新型机床,YUEN 等^[18]提出用于精密加工的 9 轴微型机床等。而本研究的前期工作中研发了九轴联动双刀加工机床^[19],目的在于提高叶片型面的加工精度和加工效率,包含 6 个直线运动轴、2 个刀具摆动轴和 1 个工件旋转轴,使两把刀具具有足够多的自由度,且刀具对称布局在工件两侧,可实现叶片型面的双刀对顶铣削。同时,研究了双刀加工轨迹的规划算法,并成功规划了双刀加工轨迹线^[20],实现了叶片型面的双刀具对顶同步铣削,且等效切削参数下双刀相对单刀的铣削效率可提高约 45%,但三个回转轴引起的非线性误差仍是亟需解决的新问题。

本文在轨迹规划的基础提出了减小双刀对顶铣削中非线性误差的轨迹优化算法。考虑双刀加工机床的结构和双刀具的位置约束关系,建立九轴联动机床的运动学同步转换模型;研究切触点间非线性误差的理论表征方法和简化计算模型,并分析双刀具加工过程中共用工件回转轴引起的非线性误差表征方法。在轨迹规划的过程中,以非线性误差和加工误差超差量分别建立切触点间参数增量修正系数的计算模型,优化双刀对顶铣削线性插补轨迹线上的切触点,获得更高的加工精度和更好的表面质量。同时,通过仿真和试验分别验证了该算法减小非线性误差的有效性。

1 九轴联动叶片双刀机床运动学模型

在工件坐标系下,轨迹规划过程中生成的刀位数据包含切触点位置和刀轴矢量,不考虑具体机床结构和指令形式。而多轴联动加工过程中,刀具沿着工件表面铣削,实际运动轨迹反映了机床加工坐标系下刀具的位置和姿态。机床的运动学模型则建立了刀位数据在加工坐标系和机床坐标系下的相对位置关系,并用于表征工件表面上刀具的实际运动轨迹。

1.1 九轴联动叶片双刀机床的坐标系

九轴联动叶片双刀加工机床具有两把刀具,可同时铣削叶身的两个曲面。刀具 TB 在机床坐标系下具有沿 X 、 Y 、 Z 轴的直线运动和绕 Y 轴旋转的 B 轴,刀具 TC 在机床坐标系下具有沿 U 、 V 、 W 轴的直线运动和绕 V 轴旋转的 C 轴,两把刀具共用工件回转 A 轴。在加工过程中,工件绕 A 轴旋转,刀具 TB 和 TC 同时调整姿态以铣削工件两侧的曲面,实现双刀对顶铣削。

为了能够准确地描述九轴联动叶片双刀加工机床的运动链和运动转换关系,建立九轴联动叶片双

刀机床的坐标系,如图 1 所示。设机床坐标系为 MCS,并在各个运动轴上相对于 MCS 建立参考坐标系 RCS,且方向与 MCS 一致。直线轴的参考坐标系 O_X 、 O_Y 、 O_Z 、 O_U 、 O_V 、 O_W 分别建立在相对应的移动部件上。与刀具分别固联的参考坐标系 O_{TB} -RCS 和 O_{TC} -RCS 称为刀具 TB 和 TC 的坐标系。摆轴 B 和 C 的参考坐标系 O_B -RCS 和 O_C -RCS 的原点分别在回转中心线上,摆轴上刀具 TB、TC 的初始位

置分别与 Z、W 轴的方向一致,且刀具 TB 在 O_B -RCS 下的旋转半径为 r_b ,刀具 TC 在 O_C -RCS 下的旋转半径为 r_c 。旋转 A 轴参考坐标系 O_A -RCS 原点设置在转台的中心线上,工件坐标系 WCS 固联在 A 轴,且 O_A -RCS 与 WCS 原点的相对位置偏差为 r_a 。当机床处于初始状态时, O_{TB} -RCS、 O_{TC} -RCS 和 O_A -RCS 的原点相交于一点,矢量 S_b 和 S_c 分别表示刀具 TB 和 TC 相对于初始状态下移动轴的相对位移矢量。

图 1 九轴联动机床坐标系变换关系

1.2 运动学模型的建立和求解

根据图 1 所示的九轴联动机床坐标系,设刀具 TB、TC 的回转轴分别平行于 Z、W 轴的状态为机床初始状态。工件坐标系与机床坐标系中各坐标轴的方向一致,且坐标系 O_{TB} -RCS、 O_{TC} -RCS 和 O_A -RCS 的原点重合。在 O_{TB} -RCS 下,刀具 TB 的位置和刀轴矢量分别为 $t_{tb}^p = [0 \ 0 \ 0]^T$ 和 $t_{tb}^o = [0 \ 0 \ 1]^T$,在 O_{TC} -RCS 下,刀具 TC 的位置和刀轴矢量分别为 $t_{tc}^p = [0 \ 0 \ 0]^T$ 和 $t_{tc}^o = [0 \ 0 \ 1]^T$ 。在 WCS 下,刀具 TB 的刀位数据分别为切触点位置矢量 $P_{wb}^t = [p_x \ p_y \ p_z]^T$ 和刀轴矢量 $O_{wb}^t = [i_b \ j_b \ k_b]^T$,刀具 TC 的刀位数据分别为切触点位置矢量 $P_{wc}^t = [p_u \ p_v \ p_w]^T$ 和刀轴矢量 $O_{wc}^t = [i_c \ j_c \ k_c]^T$ 。 x 、 y 、 z 、 u 、 v 、 w 、 θ_a 、 θ_b 、 θ_c 分别为各个运动轴相对于初始位置的坐标值,同时也对应于 NC 数据中各个轴的位置量,并表示为 X 、 Y 、 Z 、 U 、 V 、 W 、 A 、 B 、 C 。

根据机床坐标系之间的转换关系,该机床的正向运动学模型为

$$\begin{bmatrix} O_{wb}^t & P_{wb}^t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^W A_{TB} \cdot \begin{bmatrix} t_{tb}^o & t_{tb}^p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} O_{wc}^t & P_{wc}^t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^W A_{TC} \cdot \begin{bmatrix} t_{tc}^o & t_{tc}^p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, ${}^W A_{TB}$ 和 ${}^W A_{TC}$ 分别表示刀具 TB 和 TC 刀位数据的坐标转换矩阵,可以表达为

$${}^W A_{TB} = T[r_a] \cdot R_A[\theta_a] \cdot T[x, y, z] \cdot R_B[\theta_b] \cdot T[r_b] \quad (3)$$

$${}^W A_{TC} = T[r_a] \cdot R_A[\theta_a] \cdot T[u, v, w] \cdot R_B[\theta_c] \cdot T[r_c] \quad (4)$$

式中, T 为平移运动轴的齐次坐标转换矩阵; R_A , R_B , R_C 分别为绕 A、B、C 轴旋转的齐次坐标转换矩阵。

根据式(1)~(4),代入各个轴相应的转换矩阵,则 WCS 下刀位数据可表示为

$$\begin{cases} i_b = \sin \theta_b \\ j_b = -\sin \theta_a \cos \theta_b \\ k_b = \cos \theta_a \cos \theta_b \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} i_c = \sin \theta_c \\ j_c = -\sin \theta_a \cos \theta_c \\ k_c = \cos \theta_a \cos \theta_c \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} p_x = r_b \sin \theta_b + x + r_a \\ p_y = y \cos \theta_a + (r_b \cos \theta_b + z) \sin \theta_a \\ p_z = y \sin \theta_a - (r_b \cos \theta_b + z) \cos \theta_a \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} p_u = u + r_a - r_c \sin \theta_c \\ p_v = v \cos \theta_a + (r_c \cos \theta_c + w) \sin \theta_a \\ p_w = v \sin \theta_a - (r_c \cos \theta_c + w) \cos \theta_a \end{cases} \quad (8)$$

式(5)~(8)表达了刀具相对于 WCS 的位置和姿态随机床的运动变化,在刀位数据确定的情况下,机床各运动轴位移的表达式为

$$\theta_a = \arcsin\left(\frac{j_b}{k_b}\right) \quad (9)$$

$$\theta_b = \arcsin(i_b) \quad (10)$$

$$\theta_c = \arcsin i_c \quad (11)$$

$$\begin{cases} x = p_x - r_b \sin \theta_b - r_a \\ y = p_y \cos \theta_a + p_z \sin \theta_a \\ z = p_z \cos \theta_a - p_y \sin \theta_a - r_b \cos \theta_b \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} u = p_u - r_a + r_c \sin \theta_c \\ v = p_v \cos \theta_a + p_w \sin \theta_a \\ w = p_v \sin \theta_a - p_w \cos \theta_a - r_c \cos \theta_c \end{cases} \quad (13)$$

在双刀轨迹规划过程中, 确定了轨迹线上的切触点数据, 由式(9)~(13)可以求解 NC 数据中所有轴的位移量, 同时, 在已知 NC 代码数据情况下, 由式(5)~(8)可得到切触点的位置信息和刀轴矢量, 并近似表达刀具理论运动轨迹线。

2 非线性误差分析

2.1 非线性误差的理论分析

采用牛鼻铣刀加工曲面零件时, 由于刀具底面中心无刀刃, 为避免刀具底面中心与加工表面接触以及切削刃与加工表面发生干涉, 需要将刀轴分别沿进给方向 f 与加工表面法矢量 n 倾斜一定的角度, 使刀具底面的刀刃圆环面与加工表面接触, 实现高效加工, 如图 2 所示。牛鼻铣刀刀刃圆环面与工件表面切触点处的实际切削半径称为刀具的等效切削半径, 刀具沿进给方向的等效切削半径 R_e 可近似表示为

$$R_e = R - r(1 - \sin \theta) \quad (14)$$

式中, R 为牛鼻铣刀的半径; r 为牛鼻铣刀的圆角半径; θ 为刀具轴线与曲面法矢量的夹角。

图2 牛鼻铣刀的实际切削状态

曲面加工的理论刀具轨迹是由刀具与被加工曲面的啮合关系所确定的非线性连续曲线。对于采用线性插补方式控制的多轴联动加工机床, 其轨迹则通过一系列的小线段离散逼近工件表面, 即刀具相对工件从当前位置线性移动到下一位置的同时, 工件绕旋转轴从当前方位线性旋转到下一方位, 因此,

刀具实际运动的包络面与加工曲面之间存在一定的误差 ε , 包含直线逼近误差 δ_l 和刀轴摆动引起的非线性误差 δ_n , 如图 3 所示。

图3 凸曲面上线性插补段内的非线性误差

图3展示了等效切削半径为 R_e 的牛鼻铣刀与凸曲面在线性插补段内的几何关系。在刀具的摆动平面内, 设 i 点为当前切触点, j 点为下一个切触点, 插补段之间的曲线近似用圆弧逼近, 圆弧半径 R_f 为两个切触点沿进给方向的法线曲率半径 R_i 和 R_j 的平均值。假设相邻切触点间的圆弧弧长为 Δs , 且 i 和 j 点之间的直线段与圆弧的最大距离为 $\delta_{\max}$, 根据几何关系, 则有

$$\delta_{\max} = R_f - \sqrt{R_f^2 - \frac{1}{4}\Delta s^2} \quad (15)$$

则直线的逼近误差 δ_l 可表示为

$$\delta_l = \frac{1}{8R_f} \times \Delta s^2 \quad (16)$$

多轴铣削加工中, 刀轴摆动引起的非线性误差可描述为旋转轴引起刀具切触点的实际运动轨迹偏离预先离散的理论直线段而形成的误差, 且实际运动轨迹为连接直线段两端点的一段曲线, 如图3所示。建立局部坐标系 XOY , 令 X 轴平行于弦长, 刀轴矢量与 Y 轴正向的夹角为 θ , 并规定逆时针方向为正值。在插补线段内, 第 i 个切触点的坐标为 $[x_{oi}, y_{oi}, 0]$, 第 j 个切触点的坐标为 $[x_{oj}, y_{oj}, 0]$, 刀心 O_i 和 O_j 连接线上的点可表示为

$$y_o = \frac{R_e(\sin \theta_j - \sin \theta_i)}{x_{oj} - x_{oi}}(x - x_{oi}) + y_{oi} \quad (17)$$

刀具切触点的轨迹为

$$\begin{cases} y = y_o - R_e \sin \theta \\ \theta = \frac{\theta_j - \theta_i}{x_{oj} - x_{oi}}(x - x_{oi}) + \theta_{oi} \end{cases} \quad (18)$$

求导得

$$y' = \frac{R_e(\sin \theta_j - \sin \theta_i)}{x_{oj} - x_{oi}} - R_e \left(\frac{\theta_j - \theta_i}{x_{oj} - x_{oi}} \right) \cos \theta \quad (19)$$

$$y'' = R_e \left(\frac{\theta_j - \theta_i}{x_{oj} - x_{oi}} \right)^2 \sin \theta \quad (20)$$

当 $\theta > 0$ 时, $y'' > 0$, 切触点轨迹为凹曲线, 反之, 为凸曲线, 令 $y' = 0$ 得到极值点的条件为

$$\cos \theta = \frac{\sin \theta_j - \sin \theta_i}{\theta_j - \theta_i} \approx \cos\left(\frac{\theta_j + \theta_i}{2}\right) \quad (21)$$

由式(21)可以看出, 当 $\theta = (\theta_i + \theta_j)/2$ 时, 即在插补段中点附近, 刀触点轨迹的偏差最大, 则刀轴摆动误差 δ_n 应为

$$\delta_n = \frac{1}{8} R_e (\Delta \theta)^2 \quad (22)$$

对于凸曲面, 加工误差可表征为

$$\varepsilon = \delta_i + \delta_n \quad (23)$$

2.2 旋转轴引起的非线性误差简化表征模型

多轴加工曲面的过程中, 切触点间存在离散直线与曲面轮廓的逼近误差, 而且刀具旋转引起切触点运动轨迹与理论线性插补轨迹不一致, 导致了加工过程中所特有的原理性误差, 如式(23)所示。而后置处理过程中, 由于刀位数据中仅包含切触点的坐标和刀轴矢量, 详细计算非线性误差存在一定的难度。在两个切触点间采用线性插补方式控制轴运动的过程中, 切触点间的实际运动轨迹则为各个轴合成的运动轨迹, 而且为空间曲线, 该曲线偏离理论插补轨迹而存在一定的误差, 引入非线性误差的简化表征模型。

设 (P_i, O_i) 、 (P_j, O_j) 为相邻切触点数据, 其中 P_i 、 P_j 为相邻切触点的位置矢量, O_i 、 O_j 为相邻切触点处的刀轴方向矢量。理论轨迹线 $P_{kl}(t)$ 为相邻切触点之间的直线段。设相邻切触点对应机床各轴运动位置分别为 P_{wi} 、 P_{wj} , 采用线性插补方式控制轴运动的过程中, 轴瞬时运动轨迹 $P_w(t)$ 为

$$P_w(t) = p_{wi} + t(p_{wj} - p_{wi}) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (24)$$

根据运动学方程, 机床轴运动引起刀具切触点在工件坐标系下的实际轨迹 $P_k(t)$ 表示为

$$[P_k(t) \ 1]^T = {}^w A_T [p_w(t)] [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T \quad (25)$$

设理论轨迹线 $P_{kl}(t)$ 的单位矢量 a 为

$$a = \frac{(P_j - P_i)}{|P_j - P_i|} \quad (26)$$

则轨迹 $P_k(t)$ 上切触点与 $P_{kl}(t)$ 对应点之间的偏离距离为

$$\delta(t) = |P_k(t) - \{p_i + [(P_k(t) - p_i) \cdot a] a\}| \quad (27)$$

将 $\delta(t)$ 对参数 t 求导, 设在 $t = t_s$ 时取得最大值, 则最大值 $\delta_{\max}(t_s)$ 可表示为

$$\delta_{\max}(t_s) = |P_k(t_s) - \{p_i + [(P_k(t_s) - p_i) \cdot a] a\}| \quad (28)$$

对于 $\delta_{\max}(t_s)$ 的求解, 严格的计算比较困难, 且由式(21)可知, 刀触点轨迹最大的偏差距离处于中点附近, 在工程应用中可直接取 $t_s = 0.5$ 处的值近似评价相邻切触点间的距离偏差。然而, $\delta_{\max}(t_s)$ 则表示实际刀具的运动轨迹和理想轨迹之间的距离, 仅间接反映实际加工过程中产生的误差, 非线性误差则是指加工误差敏感方向的误差值, 即型面法线方向上投影量。如图 4 所示凹曲面加工过程, 设进给方向和行距方向所在平面的法向为误差敏感方向 n_s , 则 $\delta_{\max}(t_s)$ 在 n_s 上的投影 δ_n 可表示为

$$\delta_n = \delta_{\max}(t_s) \frac{n_s \cdot b}{|n_s| |b|} \quad (29)$$

式中, b 为 $\delta_{\max}(t_s)$ 的单位矢量, 并表示为

$$b = \frac{P_k(t_s) - \{p_i + [(P_k(t_s) - p_i) \cdot a] a\}}{|P_k(t_s) - \{p_i + [(P_k(t_s) - p_i) \cdot a] a\}|} \quad (30)$$

以 δ_n 判定被加工曲面与刀具实际运动轨迹之间的非线性误差是否满足要求, 如果超差则需要插入切触点, 以保证非线性误差不超差。

图 4 凹曲面非线性误差简化计算示意图

2.3 双刀轴旋转引起的非线性误差

在九轴联动加工过程中, 双刀对顶同步铣削叶背、叶盆曲面, 两把刀具共用工件旋转 A 轴, 即工件的旋转角度同时影响刀具 TB 和 TC 的位置和方向, 如式(5)~(8)所示, 使得非线性误差的计算过程复杂化。叶背曲面为凸曲面, 叶盆曲面为凹曲面, 需要同时保证两侧切触点处的非线性误差不超差, 如图 5 所示, 且两个切触点需满足机床的结构约束关系。

图 5 双刀轴矢量引起的非线性误差

双刀对顶铣削需要同时并分别规划叶背和叶盆曲面的轨迹, 并考虑九轴联动叶片双刀加工机床中

双刀具的结构约束以及叶片型面的残留高度、弦高误差等约束,满足叶背、叶盆曲面上的加工区域同时完成铣削和两侧曲面上轨迹线、切触点个数相同的要求,且需要校核双刀轴引起的非线性误差。设刀具 TB 加工叶背曲面,并在叶背曲面上规划的一条参数轨迹线为 $p_d = p_d(u)$,切触点间的参数增量为 Δu_d ,切触点处的位置 and 方向矢量为 $\mathbf{P}_d$ 、 $\mathbf{O}_d$ 。通过后置处理算法求解 X 、 Y 、 Z 、 A 、 B 轴的位移量,由式(24)、(25)可得刀具的实际运动轨迹 $\mathbf{P}_{kb}(t)$,并可求得该轨迹最大的非线性误差 δ_{nd} 。以 δ_0 作为非线性运动误差的评价标准,若 $\delta_{nd} \geq \delta_0$,则需要在该相邻切触点之间插入新切触点。为了保证较大的切削步长,并提高算法的收敛性和计算效率,以非线性误差超差量的大小优化插入切触点的位置,则插入点处所对应的参数增量 $\Delta u'_d$ 可表示为

$$\Delta u'_d = \kappa_d \cdot \Delta u_d \quad (31)$$

式中, κ_d 为叶背曲面轨迹上参数增量的修正系数,并表示为

$$\kappa_d = \begin{cases} 0.5 & \delta_{nd} \geq 2\delta_0 \\ 1 - \frac{\delta_{nd} - \delta_0}{2\delta_0} & 1.1\delta_0 < \delta_{nd} < 2\delta_0 \\ 0.95 & \delta_0 \leq \delta_{nd} \leq 1.1\delta_0 \end{cases} \quad (32)$$

以类似的方法,设叶背曲面对应的叶盆曲面上的参数轨迹线为 $p_b = p_b(u)$,切触点间的参数增量为 Δu_b ,切触点处的位置矢量 $\mathbf{P}_b$ 和方向矢量为 $\mathbf{O}_b$ 。通过后置处理算法求解 U 、 V 、 W 、 C 轴的位移量,利用共用 A 轴的旋转角度由式(24)、(25)可得刀具的实际运动轨迹 $\mathbf{P}_{kb}(t)$,并求解该轨迹上最大的非线性误差 δ_{nb} 。若 $\delta_{nb} \geq \delta_0$,则需在该相邻切触点之间插入新切触点。同理,插入点处所对应的参数增量 $\Delta u'_b$ 可表示为

$$\Delta u'_b = \kappa_b \cdot \Delta u_b \quad (33)$$

式中, κ_b 为叶盆曲面轨迹线上参数增量的修正系数,并以 δ_{nb} 和 δ_0 量的大小确定。

为满足双刀铣削过程中切触点个数相同的要求,并保证两个曲面上切触点的一一对应关系,任何一条轨迹线上的非线性误差超出 δ_0 ,则需在两条轨迹线上同时插入切触点,故叶盆曲面和叶背曲面采用相同的修正系数,并表示为

$$\kappa = \min(\kappa_d, \kappa_b) \quad (34)$$

以相同修正系数 κ 求得两条轨迹线上的参数增量,确定切触点处的位置矢量,并采用文献[20]中的方法确定满足结构约束的刀轴矢量。

2.4 考虑非线性误差的双刀加工轨迹修正算法

以双刀加工轨迹规划算法规划的两条对应轨迹线为基础,通过直线逼近误差分别确定轨迹线上走刀步长,以双刀轴旋转引起的非线性误差和曲面的加工误差为约束修正轨迹线上的参数增量,优化切触点位置和刀轴矢量,提高实际加工轨迹线与曲面的符合程度,实现双刀高精加工,如图 6 所示的双刀轴非线性误差控制示意图。在叶片型面上规划叶背和叶盆曲面的双刀加工轨迹线和切触点间的参数增量,计算切触点的位置和刀轴矢量,并通过机床运动学模型得出各个轴对应的运动位置和刀具实际运动轨迹线。以 δ_0 作为非线性误差的评价标准,分别计算两个曲面上相邻切触点间的非线性误差 δ_{nd} 和 δ_{nb} 。若两者均满足要求,则修正系数 κ_d 和 κ_b 均为 1,即不插入切触点。若 δ_{nd} 和 δ_{nb} 至少一个不满足要求,则需分别在两条轨迹线上相邻切触点之间同时插入相同修正系数为 κ 的切触点,并重新校核插入切触点后相邻切触点之间的误差,直到所有切触点之间的非线性误差均满足要求为止。

若叶片两侧曲面对应两条轨迹线上切触点间的非线性误差均满足要求,则需要进一步分别并同时校核两个曲面上的加工误差。设轨迹规划过程中叶片型面加工误差的允差为 ε_0 ,结合曲面的几何特征,分别计算叶背和叶盆曲面的加工误差 ε_d 、 ε_b ,判定加工误差超差量的大小并确定切触点处参数增量的加工误差修正系数 τ ,符号 $\wedge$ 表示叶背曲面 d 和叶盆曲面 b ,则表示为

$$\tau_{\wedge} = \begin{cases} 0.5 & \varepsilon_{\wedge} \geq 2\varepsilon_0 \\ 1 - \frac{\varepsilon_{\wedge} - \varepsilon_0}{2\varepsilon_0} & 1.1\varepsilon_0 < \varepsilon_{\wedge} < 2\varepsilon_0 \\ 0.95 & \varepsilon_0 < \varepsilon_{\wedge} \leq 1.1\varepsilon_0 \end{cases} \quad (35)$$

以相同的加工误差修正系数 τ 插入叶背曲面和叶盆曲面的切触点,且插入点处所对应的参数增量 $\Delta u''$ 可表示为

$$\tau = \min(\tau_{\wedge}) \quad (36)$$

$$\Delta u'' = \tau \Delta u'_{\wedge} \quad (37)$$

若 $\varepsilon_{\wedge}$ 均小于误差允许值 ε_0 ,则系数 $\tau_{\wedge}$ 为 1。若 $\varepsilon_{\wedge}$ 中任何一个超出加工误差的要求,则在叶片型面的两侧同时插入切触点,并校核插入点处的加工误差直至满足要求为止。

图 6 中详细展示了双刀加工轨迹线上切触点优化算法实施策略,在非线性误差和加工均满足要求的情况下,局部密化切触点数据以确定切触点的位置和刀轴矢量,并根据机床运动学模型计算各个运动轴的位移量,同时转化为满足数控系统要求的 NC 代码。

图 6 双刀轴非线性误差控制示意图

3 仿真和试验

3.1 非线性误差仿真分析

选择某中长型汽轮机叶片为研究对象, 叶片材质为不锈钢, 型面的长度为 633 mm, 回转直径为 165 mm。牛鼻铣刀的半径为 16 mm, 圆角半径为 6 mm, 刀心点到摆轴旋转中心的距离为 624 mm。设轨迹规划过程中的非线性误差不超过 0.003 mm, 加工误差的允差为 $[-0.02 \text{ mm}, 0.02 \text{ mm}]$ 。规划的叶片双刀加工轨迹线如图 7 所示, 以叶背曲面和叶盆曲面上的一对虚线表示的轨迹线为例, 分别以中点直接插值和文中算法插入切触点, 并转换为满足九轴数控加工要求的 NC 代码。

轨迹线上第 i 和第 $i+1$ 个切触点间的非线性误差定义为第 i 个切触点处的非线性误差。计算叶背和叶盆曲面轨迹线上切触点处的非线性误差值, 并绘制非线性误差曲线, 如图 8 所示。结果显示, 叶背曲面的非线性误差明显大于叶盆曲面, 在插值之

图 7 叶片双刀加工轨迹线

前, 叶背曲面非线性误差的原始误差存在超差现象, 而叶盆曲面非线性误差的原始误差满足公差设计要求。对比中点直接插值和本文提出的插值算法, 采用中点直接插值算法需要插入 13 个切触点, 而采用本文提出的插值算法仅需要插入 5 个切触点, 插值之后非线性误差均可控制在公差设计要求之内。由于轨迹线上切触点个数的改变影响切触点间的加工步长, 插入较少的切触点有利于提高加工效率, 且有利于改善工件的表面加工质量。

图8 切触点处非线性误差曲线

在校核非线性误差后, 需要进一步校核该轨迹线上切触点间由直线逼近误差和非线性误差引起的加工误差。计算切触点间的加工误差值, 如图9所示, 叶背曲面的轨迹线上仍存在部分切触点间加工误差超差的现象。采用本文提出的算法进行差值优化后, 加工误差均满足公差设计要求。且本文提出的算法在轨迹线上直接插入切触点, 提高了轨迹线与叶片型面的符合程度, 有利于改善叶片型面的加工精度。

图9 切触点加工误差曲线

3.2 双刀加工试验

采用非线性误差控制算法对叶片型面上的双刀

加工轨迹线进行优化, 并以优化前后的双刀加工轨迹线分别在自主研发的九轴联动双刀加工机床上开展加工试验, 其加工过程如图10所示, 两把刀具均完全铣削了叶片两侧的曲面, 且整个加工过程中无干涉现象。

图10 叶片型面双刀加工过程

针对双刀对顶铣削后的叶片型面, 该工序铣削后的理论余量为0.6 mm, 沿叶片长度方向设置S型且均布在叶片两侧加工区域内的60个理论测量点, 同时用海克斯康三坐标测量机(型号为7107)测量叶片已加工表面的实际坐标值, 由此计算实测坐标值与理论坐标值间的距离偏差, 以表征叶片型面的加工精度, 如图11所示。图11中显示, 轨迹线优化前后铣削叶片型面均存在距离偏差, 但趋势是相同的, 且采用优化前的轨迹线铣削形成叶片型面的最大偏差值约为0.3 mm, 而优化后形成的最大偏差值约为0.2 mm。两者的距离偏差均在余量范围内, 但较小的距离偏差益于保障后续工序的加工精度, 且已加工表面比较平整, 在工程应用中选择较小的距离偏差作为满足该工序要求的加工精度, 此外, 最大偏差位于刚性较弱的叶片进出气边附近, 验证了该算法控制加工误差的有效性。

图11 叶片型面实际加工后的测量结果

4 结论

(1) 根据九轴联动双刀加工机床的结构特征和双刀具的约束关系, 建立九轴联动机床的运动学同步转换模型, 实现工件坐标系下切触点位置及刀轴矢量与机床坐标系下各轴运动坐标的同步转换。

(2) 详细分析了线性插补运动中凹凸曲面上刀具理论规划轨迹与实际运动轨迹存在的差异, 阐述切触点间非线性误差和加工误差的理论表征方法, 并研究旋转轴所引起非线性误差的简化计算模型。同时, 定义非线性误差超差量与插入切触点位置的对应关系, 建立双刀加工轨迹线上切触点位置的修正算法, 在满足非线性误差要求的情况下实现了双刀对应切触点的同步插值。

(3) 考虑叶片型面两侧切触点间的非线性误差和加工误差, 提出双刀加工轨迹线上双刀对应切触点的同步优化算法。并采用该算法优化汽轮机叶片双刀加工轨迹线上的切触点, 仿真分析得出切触点间的非线性误差和加工误差均满足要求, 同时以切削试验验证了该算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] HO Mingche, HWANG Yeanren. Machine codes modification algorithm for five-axis machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 452-460.
- [2] 周艳红, 周济, 周云飞, 等. 五坐标数控加工的理论误差分析与控制[J]. 机械工程学报, 1999, 35(5): 54-57. ZHOU Yanhong, ZHOU Ji, ZHOU Yunfei, et al. Analysis and control of the theoretical error in five-axis NC machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(5): 54-57.
- [3] JIA Zhenyuan, MA Jianwei, SONG Dening, et al. A review of contouring-error reduction method in multi-axis CNC machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2018, 125: 34-54.
- [4] HWANG Yeanren, LIANG Chashong. Cutting errors analysis for spindle-tilting type 5-axis NC machines [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, 14: 399-405.
- [5] 姬俊锋, 周来水, 安鲁陵, 等. 考虑非线性误差补偿的五坐标数控加工走刀步长改进算法[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(4): 37-42. JI Junfeng, ZHOU Laishui, AN Luling, et al. A new determination method of tool step for 5-axis NC machining[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(4): 37-42.
- [6] 郑颢默, 林浒, 盖荣丽, 等. 五轴数控系统旋转轴快速平滑插补控制策略[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9): 105-111. ZHENG Liaomo, LIN Hu, GAI Rongli, et al. Fast smooth interpolation control strategy of rotary axes for five-axis CNC systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9): 105-111.
- [7] 杨旭静, 周元生, 陈泽忠, 等. 五轴数控加工中旋转轴运动引起的非线性误差分析及控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(3): 140-146. YANG Xujing, ZHOU Yuansheng, CHEN Zezhong, et al. Analysis and control of tool path interpolation error in rotary axes motions of five-axis CNC milling[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(3): 140-146.
- [8] TUTUNEA-FATAN O R, MD-SHAFAYET H B. Comparing the kinematic efficiency of five-axis machine tool configurations through nonlinearity errors [J]. Computer-Aided Design, 2011, 43: 1163-1172.
- [9] SØRBY K. Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47: 299-306.
- [10] 吴大中, 王宇晗, 冯景春, 等. 五坐标数控加工的非线性运动误差分析与控制[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(10): 1608-1612. WU Dazhong, WANG Yuhan, FENG Jingchun, et al. Analysis and control of the non-linear errors in five-axis NC machining[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2007, 41(10): 1608-1612.
- [11] SHE Chenhua, HUANG Zhaotang. Postprocessor development of a five-axis machine tool with nutating head and table configuration[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, 38: 728-740.
- [12] 王丹, 陈志同, 陈五一. 五轴加工中非线性误差的检测和处理方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(9): 1003-1006. WANG Dan, CHEN Zhitong, CHEN Wuyi. Detection and control of non-linear errors in 5-axis machining[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(9): 1003-1006.
- [13] LI Jiangang, ZHOUYANG Hongsheng, LOU Yunjiang. Tool path optimization in postprocessor of five-axis machine tools[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68: 2683-2691.
- [14] BOZ Yaman, ISMAIL L. A postprocessor for table-tilting type five-axis machine tool based on generalized kinematics with variable federate implementation[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66: 1285-1293.
- [15] 周玉龙. 满足非线性误差要求的五轴进给速度控制方

- 法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(7): 209-212.
- ZHOU Yulong. Research on feedrate control of five-axis based on non-linear error [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(7): 209-212.
- [16] WANG Junteng, ZHANG Dinghua, WU Baohai, et al. Kinematic analysis and feedrate optimization in six-axis NC abrasive belt grinding of blades[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 79: 405-414.
- [17] ZHAO Dan, BI Yunbo, KE Yinglin. An efficient error compensation method for coordinated CNC five-axis machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 123: 105-115.
- [18] YUEN A, ALTINTAS Y. Trajectory generation and control of a 9 axis CNC micromachining center[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2016, 65: 349-352.
- [19] 何仲云, 余常武, 位文明, 等. 一种卧式双刀加工叶片的卧式机床结构: 中国, 201010578663.3 [P]. 2011-05-25.
- HE Zhongyun, YU Changwu, WEI Wenming, et al. A twin-cutters horizontal machine tool for blades: China, 201010578663.3 [P]. 2011-05-25.
- [20] SONG Dongdong, XUE Fei, WU Diaodiao, et al. Iso-parametric path-planning method of twin-tool milling for turbine blades[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 98: 3179-3189.
-
- 作者简介:** 宋冬冬, 男, 1984 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为自由曲面的轨迹规划。
E-mail: sdd1213@stu.xjtu.edu.cn
- 薛飞(通信作者), 男, 1982 年出生, 博士, 高级工程师。主要研究方向为叶片高效加工工艺及装备。
E-mail: xuefei82@mail.xjtu.edu.cn
- 赵万华(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 长江学者特聘教授, 博士研究生导师。主要研究方向为基于运行大数据的装备智能化基础研究和增减材成形过程中的材料力学行为表征。
E-mail: whzhao@mail.xjtu.edu.cn