

DOI: 10.7652/xjtuxb202002002

五轴机床加工零件轮廓误差预测方法

吕盾¹, 刘青¹, 刘沛², 汤洪涛², 赵万华¹, 卢秉恒¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710054, 西安;

2. 科德数控股份有限公司, 116600, 辽宁大连)

摘要: 研究了五轴机床进给轴实际位置预测方法和零件轮廓误差求解方法,在此基础上提出了五轴机床加工零件轮廓误差预测方法。机床进给轴实际位置的预测,通过辨识选定机床进给轴传递函数和读取待加工零件插补指令、将各轴指令输入各轴传递函数获得。零件轮廓误差的求解,通过正运动学变换求解工件坐标系下待加工零件的指令位置轨迹和实际位置轨迹、求解二者之间的轮廓误差来实现。以S形试件为加工零件,以科德KMC600S UMT五轴铣车立式复合加工中心为加工机床,预测了S缘条直纹面A的轮廓误差。刀尖位置误差和刀轴姿态误差引起的零件轮廓误差随着直纹面的位置变化,误差分别在0.04 mm和 $\pm 7 \times 10^{-5}$ rad内。研究表明:建立的五轴机床加工零件轮廓误差预测方法,可以在加工前实现零件轮廓误差的精确预估,提前判断选定机床是否能够满足零件轮廓误差的要求,为优化加工参数、保证高速加工下的零件轮廓精度提供依据。

关键词: 五轴数控机床;轮廓误差;精度预测;S形试件

中图分类号: TH16;TG659 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2020)02-0009-07

Contour Error Prediction Method of Part for Five-Axis Machining

LÜ Dun¹, LIU Qing¹, LIU Pei², TANG Hongtao², ZHAO Wanhua¹, LU Bingheng¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China;

2. KEDE Numerical Control Co. Ltd., Dalian, Liaoning 116600, China)

Abstract: The actual position prediction method of the feed shaft for five-axis machining and the solving scheme for part contour error were investigated, and a part contour error prediction method for five-axis machining was then proposed. The actual position prediction of the feed shaft was obtained by identifying the transfer function of the feed shaft for candidate machine tool, reading the interpolation instructions of the parts to be processed, and inputting the instructions of each axis into the transfer function of each axis. The solving scheme for the part contour error was realized by the forward kinematic transformation to the instruction position trajectory and the actual position trajectory of the part to be processed in the workpiece coordinate system, and the contour error between the above two trajectories was sought out. An S-shaped test piece was chosen as the processed part and the vertical composite machining center of KEDE KMC600S UMT five-axis turn-milling was considered as the machine tool to predict the contour error of S-edge strip ruled surface A. The A's contour errors due to the tool tip position error and tool orientation error were within 0.04 mm and $\pm 7 \times 10^{-5}$ radians, respectively. The results show that the contour error prediction method of part for five-axis machining can be used for

收稿日期: 2019-06-26。 作者简介: 吕盾(1978—),男,副教授;赵万华(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775421);国家科技重大专项资助项目(2015ZX04001002)。

网络出版时间: 2019-10-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20191016.0904.004.html>

predicting the contour error of a part for a machine tool before machining, judging whether the chosen machine tool can meet the requirements of the part contour error in advance, and facilitating the optimization of the machining parameters to ensure the part contour precision during high speed machining.

Keywords: five-axis machine tool; contour error; accuracy prediction; S-shaped test piece

五轴数控机床是航空结构件、发动机叶轮和燃气轮机叶片等复杂曲面零件加工的关键装备,是支撑航空、航天及能源工程等高端工程领域的基础^[1]。

零件轮廓误差的控制一直是五轴加工研究的热点和难点问题。国、内外学者从几何误差^[2-5]、热误差^[6-9]及动态误差^[2,10-11]的补偿和控制等角度,不断探索五轴加工高轮廓精度的实现方法。

在影响五轴加工零件轮廓误差的这些误差源中,几何误差和热误差是静态和准静态误差,是在机床不运动或者缓慢运动的条件下产生的。动态误差在进给运动中产生,与进给速度、加速度及加加速度等参数相关。在五轴高速加工中,与进给运动相关的动态误差,往往超过几何误差和热误差,成为影响零件轮廓精度的主要因素^[12-13]。

关于机床动态误差,国内、外已经开展了大量的研究工作。围绕数控系统的插补算法,在刀具路径规划、进给速度规划和指令整形等方面形成了不少研究成果;围绕伺服进给系统的控制,形成了以零相差跟踪控制器、陷波和模态滤波控制器及交叉耦合控制器等为代表的控制策略。Koren^[14-15]、Rames^[16]、Huo^[17]、Tang^[18]和 Jia^[19]等分别针对各个时期的研究进展进行了回顾和综述。这些成果中,不少已经在实际中进行了应用,成为数控系统和伺服驱动中的功能模块。

由于动态误差的成因复杂、控制难度大,即使采用了上述插补算法和控制策略,在加工前也常常无法预知五轴机床能否满足零件轮廓精度的要求。在现场加工时,只能采用保守的加工参数,以极低的进给速度来满足零件轮廓精度的要求,既没有充分发挥机床性能,造成了机床的浪费,又牺牲了零件的加工效率。

本文提出一种五轴机床加工零件轮廓误差预测方法,可实现零件轮廓误差的精确预估,提前判断选定机床是否能够满足零件轮廓误差的要求,为优化加工参数、保证高速加工下的零件轮廓精度提供依据。

1 机床进给轴实际位置的预测方法

为了实现在加工前对零件轮廓误差的预测,需

要获取加工零件经选定机床数控系统插补后的指令位置,并预测机床各轴的实际位置。

对选定五轴数控机床各个进给轴的传递函数进行辨识。将待加工零件的 NC 代码输入选定机床的数控系统,读取插补后各轴的指令位置。将各轴的指令位置分别输入各轴的传递函数,预测出各轴的实际位置(以下简称实际位置)。

1.1 五轴机床各进给轴传递函数辨识

1.1.1 激励代码的生成 M 序列作为一种辨识输入信号,可产生幅值剧烈变化的激励信号。选用变幅值 M 序列,使幅值变化进一步加剧,有助于激起机床振动,保证良好的辨识精度。

为充分激励起机床各个进给轴的动态特性,选用变幅值 M 序列的激励信号(如图 1 所示)生成 G 代码(如图 2 所示)。将激励代码输入到机床数控系统,使各轴做激励运动。采集激励运动中的插补指令位置、光栅尺反馈位置以及采样频率等数据,用于传递函数的建立。

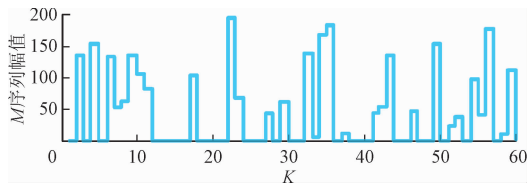


图1 变幅值 M 序列激励信号

```
N10 G54
N20 G90
N30 G01 X0 F5000
N40 G237 A65537 D5056 C2
N50 G04 F2
N60 G01 X9.00000
⋮
N850 G01 X90.00000
N860 G04 F2
N870 G312 G238
N880 M30
```

图2 生成的激励 G 代码

1.1.2 传递函数的建立 建立各轴插补指令位置和光栅尺反馈位置之间的输入输出关系如下

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \sum_{i=0}^{n_b} b_i z^{-i} / (1 + \sum_{j=1}^{n_a} a_j z^{-j}) \quad (1)$$

式中: $B(z^{-1})$ 为光栅尺反馈位置; $A(z^{-1})$ 为插补指令位置; b_i 和 a_j 分别为离散传递函数分子及分母的系数; n_a 和 n_b 分别为离散传递函数分子及分母的阶数。 b_i 、 a_j 、 n_a 、 n_b 通过辨识来获取。

离散传递函数分子阶数 n_a 及分母阶数 n_b 采用搜索法确定,具体为:设置阶数值定义域,在该定义域内辨识不同阶数的离散传递函数,选择估计误差最小的阶数值作为阶数参数辨识结果。

离散传递函数分子系数 b_i 及分母系数 a_j 采用最小二乘法辨识^[20]。

1.2 各轴指令位置的获取和实际位置的预测

将待加工零件 G 代码输入选定加工机床的数控系统,经数控系统插补后,获得各轴插补指令,即各轴指令位置。对于科德 KMC600S UMT 五轴铣床立式复合加工中心,数控系统为科德 GNC61,可以以文本的形式读取各轴的插补指令。

将各轴的插补指令分别输入各轴传递函数,输出即为预测的各轴实际位置。

综上所述,某零件在选定的五轴机床上进行加工,机床各进给轴实际位置的预测方法如图3所示。对于待加工零件,选定了加工机床后,先利用1.1节的方法辨识各轴传递函数,再用本节的方法读取该零件的插补指令,最后根据图3所示方法,即可预测该零件在选定加工机床中各轴的实际位置。

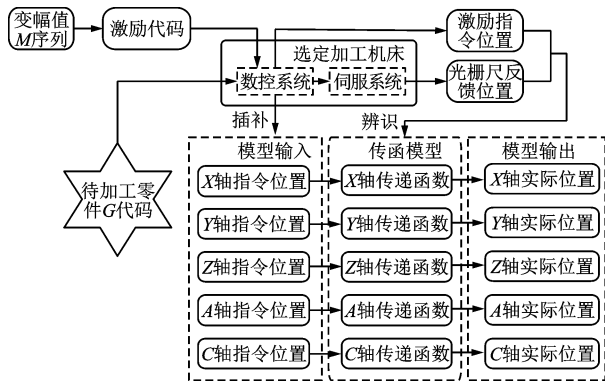


图3 五轴机床各进给轴实际位置的预测流程图

2 零件轮廓误差的求解方法

第1节获得了零件在选定机床上进行加工时机床各轴的指令位置,并且预测了机床进给轴实际位置。将指令位置和实际位置进行正运动学变换,得到工件坐标系下的待加工零件的指令位置轨迹和实际位置轨迹,即待加工零件的指令轨迹和实际轨迹,求解零件指令轨迹与实际轨迹之间的轮廓误差。

2.1 双转台五轴机床的正运动学变换模型

以图4所示的双转台五轴数控机床为例,建立正运动学变换模型。该结构形式的五轴机床具有X、Y、Z 3个直线轴和A、C 2个旋转轴,两个旋转轴位于工件侧。

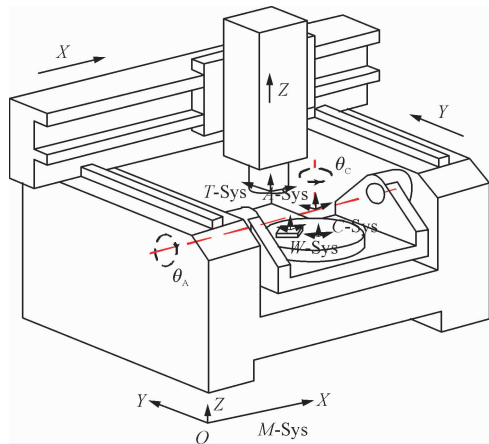


图4 双转台五轴数控机床的运动结构图

在工件坐标系(W-Sys)中,刀尖位置和刀轴姿态分别表示为 $\mathbf{P}=[P_x, P_y, P_z]^T$ 和 $\mathbf{O}=[O_x, O_y, O_z]^T$, 其中, P_x, P_y, P_z 分别表示刀尖在工件坐标系下X、Y、Z 3个方向的坐标, O_x, O_y, O_z 分别表示刀轴姿态在工件坐标系下X、Y、Z 3个方向的矢量投影。

在机床坐标系(M-Sys)下,各轴的位置用 $\mathbf{m}(t)=[X(t), Y(t), Z(t), \theta_A(t), \theta_C(t)]^T$ 表示,其中 $X(t), Y(t), Z(t)$ 分别表示在机床坐标系下X、Y、Z轴的位置, $\theta_A(t), \theta_C(t)$ 分别表示在机床坐标系下A、C轴转过的角度。

正运动学变换是根据机床坐标系下各轴的位置 $\mathbf{m}(t)=[X(t), Y(t), Z(t), \theta_A(t), \theta_C(t)]^T$, 计算在工件坐标系下刀具的位姿 $\mathbf{Q}=[\mathbf{P}, \mathbf{O}]$ 。运用D-H方法^[21], 在每个运动单元建立坐标系, 构建相邻两个单元之间的 4×4 阶齐次变换矩阵, 并将各个齐次变换矩阵按顺序相乘得到相应的正运动学变换, 就可以将5个进给轴在机床坐标系下的位置, 转换为工件坐标系下的刀尖位置坐标和刀轴方向矢量。

双转台五轴数控机床的正运动学变换矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(X, Y, Z, A, C) &= \mathbf{T}_T^W = \\ &= \mathbf{T}_C^W \mathbf{R}_C \mathbf{T}_A^C \mathbf{R}_A \mathbf{T}_Y^A \mathbf{T}_X^A \mathbf{T}_Z^X \mathbf{T}_{\text{tool}} = \\ &= \begin{bmatrix} \cos\theta_C & -\cos\theta_A \sin\theta_C & \sin\theta_A \sin\theta_C & F_x \\ \sin\theta_C & \cos\theta_A \cos\theta_C & -\sin\theta_A \cos\theta_C & F_y \\ 0 & \sin\theta_A & \cos\theta_A & F_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2) \end{aligned}$$

其中

$$\mathbf{T}_C^W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_{CWx} \\ 0 & 1 & 0 & L_{CWy} \\ 0 & 0 & 1 & L_{CWz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{T}_A^C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_{ACx} \\ 0 & 1 & 0 & L_{ACy} \\ 0 & 0 & 1 & L_{ACz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{T}_Y^A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & L_{YAx} \\ 0 & 1 & 0 & L_{YAy} \\ 0 & 0 & 1 & L_{YAz} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{T}_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_{tool} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} F_x &= (Z(t) + L_{tool} + L_{YAz})\sin\theta_A\sin\theta_C - (Y(t) + L_{YAy})\cos\theta_A\sin\theta_C + (X(t) + L_{ACx} + L_{YAx})\cos\theta_C - L_{ACy}\sin\theta_C + L_{CWx} \\ F_y &= -(Z(t) + L_{tool} + L_{YAz})\sin\theta_A\cos\theta_C + (Y(t) + L_{YAy})\cos\theta_A\cos\theta_C + (X(t) + L_{ACx} + L_{YAx})\sin\theta_C + L_{ACy}\cos\theta_C + L_{CWy} \\ F_z &= (Z(t) + L_{tool} + L_{YAz})\cos\theta_A + (Y(t) + L_{YAy})\sin\theta_A + L_{ACz} + L_{CWz} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{T}_C^W$ 为工件坐标系与 C 轴坐标系的齐次变换矩阵; L_{CWx} 、 L_{CWy} 、 L_{CWz} 分别为两坐标系原点在 X、Y、Z 3 个方向上的距离; $\mathbf{T}_A^C$ 为 C 轴坐标系与 A 轴坐标系的齐次变换矩阵; L_{ACx} 、 L_{ACy} 、 L_{ACz} 分别为两坐标系原点在 X、Y、Z 3 个方向上的距离; $\mathbf{T}_Y^A$ 为 A 轴坐标系与直线轴坐标系的齐次变换矩阵; L_{YAx} 、 L_{YAy} 、 L_{YAz} 分别为两坐标系原点在 X、Y、Z 3 个方向上的距离。

双转台五轴数控机床在工件坐标系下刀尖位置坐标和刀轴方向矢量分别为

$$\mathbf{P} = \begin{cases} P_x = F_x \\ P_y = F_y \\ P_z = F_z \end{cases}; \mathbf{O} = \begin{cases} O_x = \sin\theta_A\sin\theta_C \\ O_y = -\sin\theta_A\cos\theta_C \\ O_z = \cos\theta_A \end{cases} \quad (6)$$

2.2 零件轮廓误差计算

对于五轴机床侧刃铣削,零件的轮廓误差由刀尖位置误差和刀轴姿态误差两个因素引起^[22-23],如图5所示。其中, (P_r, O_r) 表示指令轨迹上刀具位姿, (P_a, O_a) 表示实际轨迹上的刀具位姿。 (P_c, O_c) 是指令轨迹上距离实际刀具位姿 (P_a, O_a) 最近的刀尖位置和刀轴姿态。刀尖位置误差引起的零件轮廓误差 ϵ_p 是 P_a 和 P_c 之间的矢量。刀轴姿态误差引起的零件轮廓误差 ϵ_o 是指 O_a 和 O_c 之间夹角^[24]。

2.2.1 刀尖位置误差引起的零件轮廓误差计算模型 刀尖位置误差引起的零件轮廓误差 ϵ_p 是指 P_a

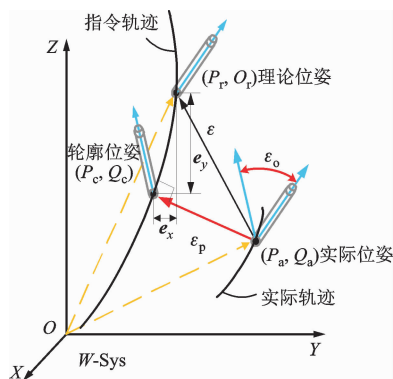


图5 五轴侧刃铣削刀具位姿与零件轮廓误差的几何关系

和 P_c 之间的矢量,即计算指令轨迹上距离实际刀尖位置 P_a 最近点 P_c 的距离,故确定 P_c 点的位置是关键。选用文献[23]的方法计算刀尖位置误差引起的零件轮廓误差。如图6所示, P_a 为实际刀尖点位置, P_r 为距离 P_a 最近的参考刀位点, ϵ_p 为轮廓误差矢量。将实际刀尖点 P_a 相对于 P_r 及其前后两个插补段路径的可能相对位置范围划分为3个区域,也决定了刀尖位置误差引起的零件轮廓误差计算的3种情况(如图7所示)。

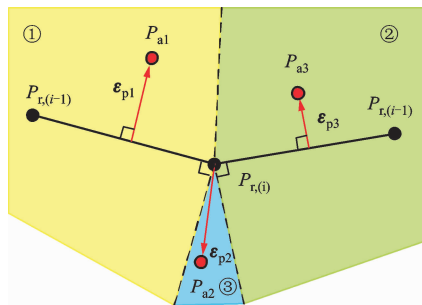


图6 刀尖位置误差引起的零件轮廓误差计算模型

情况1:使用最近参考刀位点 $P_{r,(i)}$ 之前的插补段 $P_{r,(i-1)}$ $P_{r,(i)}$ 进行计算。

情况2:使用最近参考刀位点 $P_{r,(i)}$ 之后的插补段 $P_{r,(i)}$ $P_{r,(i+1)}$ 进行计算。

情况3:使用最近参考刀位点 $P_{r,(i)}$ 进行计算。

(1)情况1和情况2。如果实际刀尖位置 P_a 在区域①和区域②时, $P_{r,(i)}$ P_a 的矢量 $\mathbf{p}$ 在 $P_{r,(i-1)}$ $P_{r,(i)}$ 上的投影矢量为 $\mathbf{p}'$,根据图7所给出的几何关系,可以得到刀尖位置轮廓误差向量为

$$\epsilon_p = \epsilon_x \mathbf{i} + \epsilon_y \mathbf{j} + \epsilon_z \mathbf{k} = \mathbf{p} - \mathbf{p}' \quad (7)$$

由此,刀尖点轮廓误差的模长为

$$\|\epsilon\| = \sqrt{\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2} \quad (8)$$

(2)情况3。如果实际刀尖位置 P_a 在区域③时,刀尖位置轮廓误差直接用 $\mathbf{p}$ 表示,即

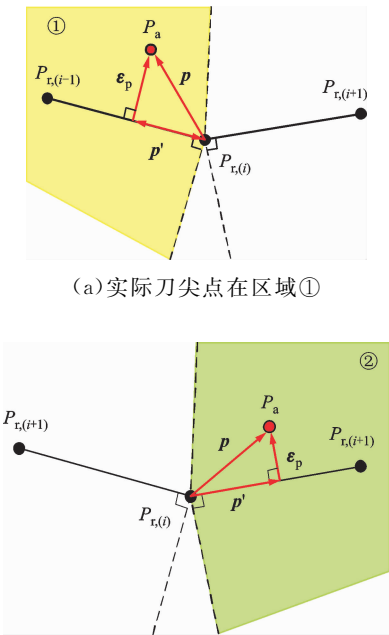


图 7 实际刀尖点的投影矢量

$$\boldsymbol{\varepsilon}_p = \varepsilon_x \boldsymbol{i} + \varepsilon_y \boldsymbol{j} + \varepsilon_z \boldsymbol{k} = \boldsymbol{p} = p_x \boldsymbol{i} + p_y \boldsymbol{j} + p_z \boldsymbol{k} \quad (9)$$

$$\|\boldsymbol{\varepsilon}\| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \quad (10)$$

2.2.2 刀轴姿态误差引起的轮廓误差计算模型

五轴数控机床刀具刀尖的每个位置点,都有相对应的刀轴姿态。又由于刀轴矢量都是单位矢量,所以将矢量起点放在同一个坐标原点,将得到矢量终点在一个半径为 1 的球面上移动,这样的轨迹称之为刀轴姿态轨迹。根据前文所述(如图 5 所示),定义刀轴姿态轮廓误差 ε_o 是实际刀轴方向矢量 $\boldsymbol{O}_a$ 和理论轨迹上距离实际刀尖位置最近的轮廓位姿矢量 $\boldsymbol{O}_c$ 之间夹角,当 ε_o 为弧度表示时,它的大小为 $\boldsymbol{O}_a$ 和 $\boldsymbol{O}_c$ 两个矢量终点球面圆弧的弧长,其值等于圆弧对应的弦长。具体计算为(参照图 8)

$$\varepsilon_o = \angle \boldsymbol{O}_a, \boldsymbol{O}_c \quad (11)$$

$$\varepsilon_o \approx |\boldsymbol{O}_c - \boldsymbol{O}_a| \quad (12)$$

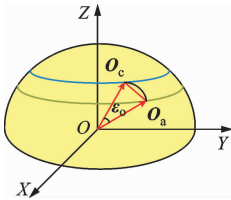


图 8 刀轴姿态误差引起的轮廓误差计算模型

3 轮廓误差预测

选定科德数控 KMC600S UMT 五轴铣车复合

立式加工中心为加工机床,待加工零件选取 S 形试件的 S 形缘条直纹面 A。

3.1 各轴实际位置预测方法的验证

采用第 1 章所述方法,将变幅值 M 序列激励代码输入选定机床数控系统,读取插补指令位置及光栅反馈位置等数据,辨识各轴的传递函数。将读取得到的待加工零件插补指令位置输入各轴的传递函数,得到各轴实际位置的预测结果。

为了验证各轴实际位置预测结果的准确性,将变幅值 M 序列激励代码作用下 X 轴光栅尺实测位置与 X 轴预测的实际位置进行做差,如图 9 所示,最大差为 24 μm 。X 轴跟随误差如图 10 所示,对于实验机床,跟随误差最大达到 800 μm ,预测结果与测量结果之差为 24 μm ,远远小于跟随误差大小,因此可以验证预测结果的准确性。

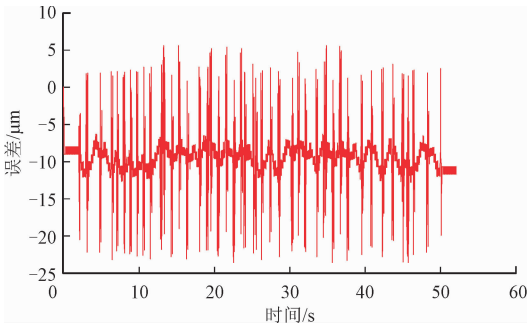


图 9 X 轴光栅尺实测位置与预测的实际位置差值

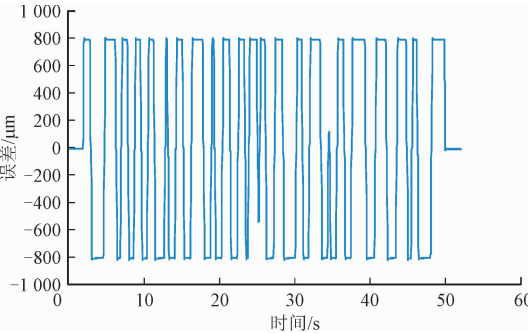


图 10 X 轴跟随误差

3.2 S 形缘条直纹面 A 的轮廓误差预测

将 S 形缘条直纹面 A(如图 11 所示)的加工代码输入选定机床的数控系统,读取各轴的插补指令位置,输入按第 1 节所述方法建立的各轴传递函数,预测各轴的实际位置。

按照第 2 节所述方法,先将机床坐标系下各进给轴指令位置与实际位置切换到工件坐标系下,生成零件指令轨迹和实际轨迹。再由指令轨迹与实际轨迹计算刀尖位置误差引起的轮廓误差与刀轴姿态

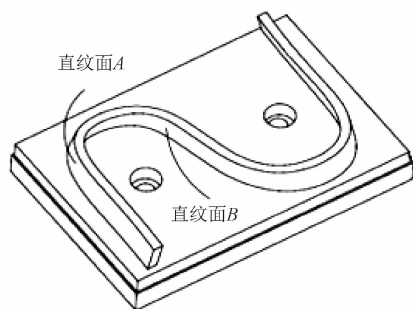


图11 S形试件左右两条直纹面

误差引起的轮廓误差。为了更加清楚表达S形缘条直纹面A刀尖位置轨迹及刀轴姿态,作图时将误差放大1 000倍,且只取插补指令中的41个位置点,如图12所示。

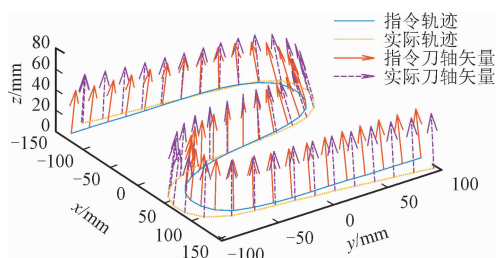


图12 工件坐标系下的指令刀具位姿和预测的实际刀具位姿

根据图12所示结果,指令轨迹上刀具位姿的包络面为目标表面,实际轨迹上刀具位姿的包络面为预测的实际表面,两者不重合,即为轮廓误差。

图13、图14分别表示出了刀尖位置误差和刀轴姿态误差引起的零件轮廓误差沿直纹面A的变化。根据验证结果,刀尖位置误差引起的零件轮廓误差随着直纹面的位置变化,误差在0.04 mm内。刀轴姿态误差引起的零件轮廓误差也随着直纹面A的位置而变化,误差在 $\pm 7 \times 10^{-5}$ rad内。

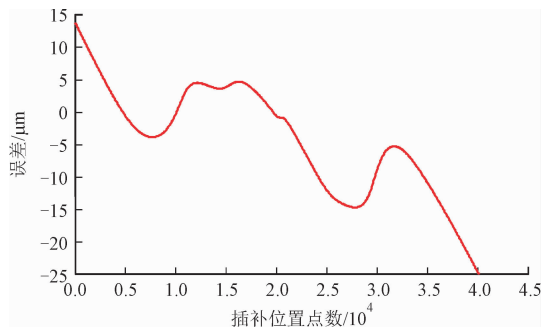


图13 S缘条直纹面A刀尖位置误差引起的零件轮廓误差

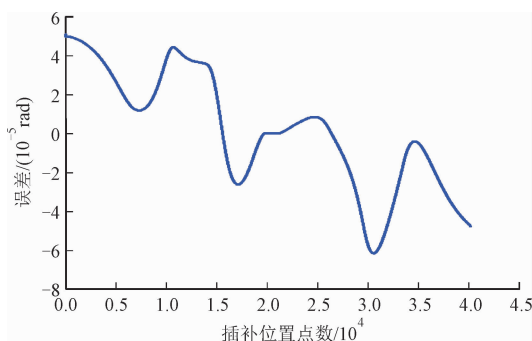


图14 S缘条直纹面A刀轴姿态误差引起的零件轮廓误差

4 结论

本文提出了一种五轴机床加工零件轮廓误差预测方法,可以在加工前预测在某选定机床上加工某零件时的轮廓误差,提前判断选定机床是否能够满足零件轮廓误差的要求。所提出的方法包括两部分:

(1)五轴机床各轴实际位置预测模型。辨识五轴数控机床各轴的传递函数,将待加工零件插补指令位置输入各轴传递函数,预测出各轴实际位置,即实际位置;

(2)五轴联动加工零件轮廓误差求解模型。将机床坐标系下各进给轴指令位置和实际位置转换到工件坐标系下待加工零件的指令位置和实际位置,分别计算指令轨迹和实际轨迹之间刀尖位置误差和刀轴姿态误差引起的轮廓误差。

参考文献:

- [1] BOHEZ E L J. Five-axis milling machine tool kinematic chain design and analysis [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(4): 505-520.
- [2] 李杰, 谢福贵, 刘辛军, 等. 五轴数控机床空间定位精度改善方法研究现状 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(7): 113-128.
LI Jie, XIE Fugui, LIU Xinjun, et al. Analysis on the research status of volumetric positioning accuracy improvement methods for five-axis NC machine tools [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(7): 113-128.
- [3] 项四通, 杨建国, AITINFAS Y, 等. 五轴数控机床空间误差测量、建模与补偿技术研究 [J]. 机械工程学报, 2018, 54(4): 108.
- [4] 郭世杰, 姜歌东, 梅雪松. 摆头转台型五轴机床旋转轴运动误差测量与辨识 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 402-410, 426.

GUO Shijie, JIANG Gedong, MEI Xuesong. Motion

- error measurement and identification of rotary axis of five-axis machine tool [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 402-410, 426.
- [5] IBARAKI S, KNAPP W. Indirect measurement of volumetric accuracy for three-axis and five-axis machine tools: a review [J]. International Journal of Automation Technology, 2012, 6(2): 110-124.
- [6] 刘阔, 孙名佳, 吴玉亮, 等. 无温度传感器的数控机床进给轴热误差补偿 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(15): 162-169.
- LIU Kuo, SUN Mingjia, WU Yuliang, et al. Thermal error compensation without temperature sensors for CNC machine tools' feed drive system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(15): 162-169.
- [7] 王新孟, 杨军, 梅雪松, 等. 精密坐标镗床进给系统热误差分析与预测 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(10): 22-28.
- WANG Xinmeng, YANG Jun, MEI Xuesong, et al. Analysis and prediction for thermal error of precision coordinate boring machine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(10): 22-28.
- [8] LI Y, ZHAO W H, LAN S H, et al. A review on spindle thermal error compensation in machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 95: 20-38.
- [9] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Error compensation in machine tools: a review [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(9): 1257-1284.
- [10] 王伟, 陶文坚, 李晴朝. 五轴数控机床动态精度检验试件特性研究 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(1): 101-109.
- WANG Wei, TAO Wenjian, LI Qingzhao. Research on characteristic of test specimen for five-axis CNC machine tools [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(1): 101-109.
- [11] 吕盾, 李润泽, 刘辉, 等. 数控机床高速高加速进给下的跟随误差控制策略 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(12): 25-31.
- LÜ Dun, LI Runze, LIU Hui, et al. A control strategy of tracking errors for numerical control machine tools at high speed and acceleration feeding [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(12): 25-31.
- [12] SLAMANI M, MAYER R, BALAZINSKI M, et al. Dynamic and geometric error assessment of an XYZ axis subset on five-axis high-speed machine tools using programmed end point constraint measurements [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50: 1063-1073.
- [13] SCHMITZ T L, ZIEGERT J C, CANNING J S, et al. Case study: a comparison of error sources in high-speed milling [J]. Precision Engineering, 2008, 32(2): 126-133.
- [14] KOREN Y, LO C C. Advanced controllers for feed drives [J]. CIRP Annals, 1992, 41(2): 689-698.
- [15] KOREN Y. Control of machine tools [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(4B): 749-755.
- [16] RAMESH R, MANNAN M A, POO A N. Tracking and contour error control in CNC servo systems [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, 45(3): 301-326.
- [17] HUO F, POO A N. Precision contouring control of machine tools [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 64(1/2/3/4): 319-333.
- [18] TANG L, LANDERS R G. Multiaxis contour control: the state of the art [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(6): 1997-2010.
- [19] 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.
- [20] PANG Zhonghua, CUI Hong. MATLAB simulation of system identification and adaptive control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009: 27-30.
- [21] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on metrics [J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 22(2): 215-221.
- [22] YANG J X, ALTINTAS Y. A generalized on-line estimation and control of five-axis contouring errors of CNC machine tools [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 88: 9-23.
- [23] ERKORKMAZ K, YEUNG C H, ALTINTAS Y. Virtual CNC system: part II High speed contouring application [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(10): 1124-1138.
- [24] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed contouring control algorithm for CNC machine tools [C] // Proceedings of ASME Dynamic Systems and Control Division. New York, USA: ASME, 1998: 463-469.

(编辑 杜秀杰)