

基于时变特性的数控机床综合误差建模方法

李杰¹, 刘辛军^{1,2}, 谢福贵¹, 李卫东³, 朱绍维³

1. 清华大学机械工程系, 北京 100084

2. 清华大学精密超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084

3. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092

摘要 以立式B-A摆头五轴数控机床为例, 根据机床误差元素的时变特性, 研究一种能够反映静、动态综合误差的数控机床误差建模方法。将动态误差表达为与运动单元速度、加速度相关的傅里叶级数形式, 并与静态误差结合, 将运动副误差元素表达为静态误差矩阵与动态误差矩阵的复合形式, 利用多体系统理论构建了静、动态误差与刀具轨迹误差的映射关系模型。理论分析表明, 基于时变特性的综合误差建模方法考虑了运动学、动力学两方面的影响因素, 可以更准确地反映机床高速、高精加工过程产生的实际误差, 从而为数控机床的误差补偿及控制参数整定奠定一定的理论基础。

关键词 数控机床; 误差建模; 动态误差; 误差补偿; 控制参数整定

五轴数控机床相对于三轴数控机床增加了2个转动轴, 具有刀具位姿调节能力强、切削效率高及工件安装时间短等优点, 因而被广泛应用于航空、航天领域复杂形面的加工^[1]。另一方面, 五轴数控机床拓扑结构复杂, 转动轴制造精度难于保证, 使其加工精度问题突显。特别在复杂、薄壁航空结构件的加工过程中, 经常出现尺寸超差及表面波纹。五轴数控机床加工精度改善方法已成为研究的热点^[2]。

机床加工误差是指刀具实际加工轨迹与工件理论轮廓之间的偏差。精度设计与误差补偿是改善机床加工精度的两种重要方法。精度设计是在机床制造阶段, 通过合理的公差分配, 提升关键零部件的制造精度, 选用高刚度、低热变形的材料等方法使得机床具有较高的原始精度^[3]。误差补偿通过对现有机床增设补偿硬件局部地调整刀具位姿, 或通过软件修改机床控制参数及G代码提升加工精度^[4,5]。机床误差模型描述了进给轴误差元素与刀具轨迹误差的映射关系, 可为机床误差的检测、辨识、补偿以及控制参数整定提供理论依据。无论是采用精度设计还是误差补偿的方法提升机床加工精度, 误差建模是必备的基础。

五轴数控机床的主要误差源包括关键零部件的制造、装配误差, 切削条件下各种力学因素引起的振动, 以及高速主轴头热误差等。分析各类误差产生的原因及表现形式, 根据时变特性可将误差分为仅依赖于运动单元位置的非时

变静态误差和依赖于运动单元速度、加速度特性的时变动态误差。静态误差在机床装配完成后即可确定, 且短时间内不会发生变化, 通常由进给轴的几何误差作用形成。动态误差是由进给轴的速度、加速度所引发的阻尼力、惯性力等力学因素作用而产生的变形及振动。动态误差不依赖于运动单元的位置, 但依赖于进给轴的速度和加速度, 具有时变特性。

关于机床静态误差建模的研究颇多, 通常采用低序体阵列法表达机床拓扑结构, 然后基于小角度误差假设用齐次坐标变换矩阵表达运动副的误差元素, 最终基于多体系统理论构建误差元素与刀具轨迹误差的映射关系^[1,2,6]。关于动态误差建模的研究相对较少, 主要包括区间分析方法和概率分析方法。黄鹏^[7]利用区间分析方法构建了3PRS并联机床的动态误差模型, 但该方法在边界条件时存在误差过估计, 此外, 区间数作除数时不能包含0元素, 这一运算特性也大大限制了区间分析法的应用范围。Huang等^[8]基于概率分布构建了一种三自由度并联机构的误差模型, 但该方法中“所有误差具有零平均值”的假设条件存在一定的局限性。无论是基于区间分析法还是基于概率分布, 所构建的误差模型都是从误差的数值特征定义误差项, 未能真实地反映动态误差蕴含的力学特性及时变特征。本文以立式B-A摆头五轴数控机床为例, 依据机床误差元素的力学特性及

收稿日期: 2015-08-21; 修回日期: 2015-12-03

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX04001-021)

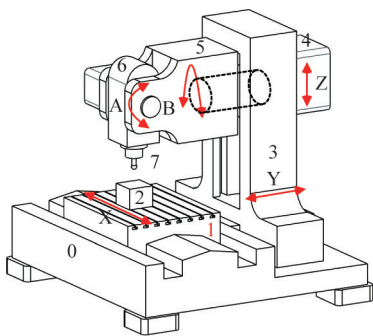
作者简介: 李杰, 博士研究生, 研究方向为机床误差补偿, 电子邮箱: jie-li13@mails.tsinghua.edu.cn; 刘辛军(通信作者), 教授, 研究方向为高档数控机床与基础制造装备, 电子邮箱: xinjunliu@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式: 李杰, 刘辛军, 谢福贵, 等. 基于时变特性的数控机床综合误差建模方法[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 65-70; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.009

时变特性,研究一种能够反映静、动态综合误差的数控机床误差建模方法。

1 五轴数控机床拓扑结构

以立式B-A摆头五轴数控机床为例,其物理模型如图1所示。该五轴数控机床加工系统主要由机床床身、X轴移动单元、Y轴移动单元、Z轴移动单元、B轴摆动单元、A轴摆动单元、刀具和工件共同组成。



0—机床床身;1—X轴移动单元;2—工件;3—Y轴移动单元;
4—Z轴移动单元;5—B轴摆动单元;6—A轴摆动单元;7—刀具

图1 立式B-A摆头五轴数控机床模型

Fig. 1 Structure of the B-A swiveling head 5-axis machine tool

将立式B-A摆头五轴数控机床的各运动单元视为简单几何体,按照机床拓扑结构顺次连接,如图2所示。在各个运动单元上固联空间坐标系,用以表述该运动单元在空间的位姿。依据低序体阵列法,立式B-A摆头五轴数控机床的低序体阵列如表1所示,其中 λ 为机床的各个典型体, $L^r(\lambda)$ 为典型体 λ 的低序体算子,表示第 r 阶低序典型体的标号。B-A摆头五轴数控机床的低序体阵列可将五轴数控机床的拓扑结构数学化表达,为进行五轴数控机床多体系统误差建模提供了便利。

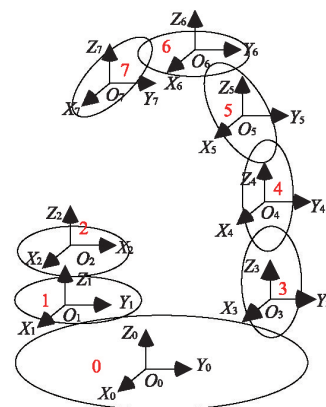


图2 立式B-A摆头五轴数控机床拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of the B-A swiveling head 5-axis machine tool

表1 立式B-A摆头五轴数控机床低序体阵列

Table 1 Lower body array of the B-A swiveling head 5-axis machine tool

典型体 λ	$L^0(\lambda)$	$L^1(\lambda)$	$L^2(\lambda)$	$L^3(\lambda)$	$L^4(\lambda)$	$L^5(\lambda)$	$L^6(\lambda)$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0
2	2	1	0	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0	0
4	4	3	0	0	0	0	0
5	5	4	3	0	0	0	0
6	6	5	4	3	0	0	0
7	7	6	5	4	3	0	0

2 误差元素建模

复杂、薄壁航空结构件在加工过程中经常出现尺寸超差和表面波纹,该现象与机床的联动精度密切相关。数控机床的联动精度是机床各伺服轴在一定的速度、加速度条件下联动运动时刀具的轨迹精度,其形成过程如图3所示。

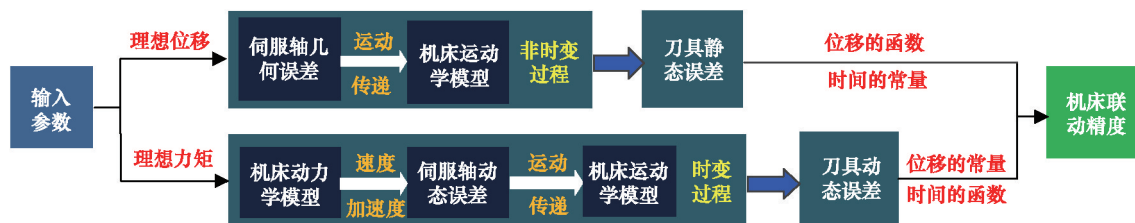


图3 数控机床联动精度形成过程

Fig. 3 The trajectory accuracy formation process of machine tools

在理想位移作用下,机床各伺服轴产生的几何误差,通过运动学模型传递形成刀具的静态误差。另一方面,在理想力矩作用下,机床各运动单元产生速度和加速度,相应地引发伺服轴的动态误差,并通过运动学模型传递形成刀具的动

态误差。最终,在刀具的动态误差与静态误差综合作用下,形成机床的联动误差。

数控机床动态误差与静态误差的区分,主要依据该误差形成过程中的时变特性。静态误差在机床装配完成后即确

定,反映的是机床的运动学特征,误差传递过程具有非时变特征,误差大小仅依赖于各运动单元的位置。因此,任意运动副中的静态误差可视作运动单元位置的多项式函数,即

$$\delta_i^j(u) = \sum_{k=0}^n M_k \rho^k \quad \theta_i^j(\xi) = \sum_{k=0}^n N_k \varepsilon^k \quad (1)$$

其中, $\delta_i^j(u)$ 、 $\theta_i^j(\xi)$ 分别为运动单元 i 、 j 所构成运动副在 u 方向的静态线性误差元素和绕 ξ 方向的静态角度误差元素, $u=x, y, z$ 为线性误差方向, $\xi=\alpha, \beta, \gamma$ 为角度误差方向; ρ 为对应平动进给轴的位置变量; ε 为对应转动进给轴的位置变量; k 为位置多项式函数的拟合阶次; M_k 、 N_k 分别为线性误差和角度误差的拟合系数。

航空结构件的加工误差主要在精加工阶段形成。在精加工过程中,刀具切削量极小,切削力相对于各伺服轴的进给力可以忽略。动态误差主要是伺服轴的进给力,运动单元的阻尼力、惯性力等力学因素引发的变形及振动。不失一般性,可以通过等效换算将所有进给轴接触面视为一般弹性单元,并假设其综合刚度为 K ,则进给轴接触面所产生的振动变形 $X(t)$ 与进给力 $F(t)$ 、惯性力 $F_a(t)$ 及阻尼力 $F_v(t)$ 的关系可以表示为

$$F(t) + F_a(t) + F_v(t) = K \cdot X(t) \quad (2)$$

由于数控系统的响应频率远高于机床机械系统的基础固有频率,在机械系统频率分析范畴可将机床进给力视为理想进给力,即进给力为理想常数,因此对方程(2)进行频域变换可得

$$F_a(\omega) + F_v(\omega) = K \cdot X(\omega) \quad (3)$$

通过方程(3)可知,进给轴接触面所产生振动的频率特征,主要由惯性力、阻尼力的频率特征确定,即接触面的振动可视作惯性力、阻尼力综合作用所引发的受迫振动。由于阻尼力、惯性力分别依赖于运动单元的速度和加速度特性,因此动态误差随机床运动单元速度、加速度的频率波动而动态变化,且误差值被物理约束限定在一定范围内。由于在计算机上开展有限序列频谱特性分析时,无论其是否来自周期序列,都应该将其视为某一周期序列的1个周期^[9],因此根据动态误差蕴含的力学特征和时变特性,可将动态误差视为与运

动单元速度、加速度的频率特性相关的傅里叶级数,即

$$\Delta_i^j(u) = \sum_{k=1}^{\infty} (C_i^j)_k \sin(k(\omega_i^j)_v t + (\varphi_i^j)_v) + \sum_{k=1}^{\infty} (D_i^j)_k \sin(k(\omega_i^j)_a t + (\varphi_i^j)_a) \quad (4)$$

$$\Theta_i^j(\xi) = \sum_{k=1}^{\infty} (E_i^j)_k \sin(k(\omega_i^j)_v t + (\varphi_i^j)_v) + \sum_{k=1}^{\infty} (F_i^j)_k \sin(k(\omega_i^j)_a t + (\varphi_i^j)_a) \quad (5)$$

式中, $\Delta_i^j(u)$ 、 $\Theta_i^j(\xi)$ 分别为运动单元 i 、 j 所构成运动副在 u 方向的动态线性误差元素和 ξ 方向的动态角度误差元素; $u=x, y, z$ 为动态线性误差的方向; $\xi=\alpha, \beta, \gamma$ 为动态角度误差的方向; $(\omega_i^j)_v$ 、 $(\omega_i^j)_a$ 分别为运动单元 i 、 j 的相对速度和加速度的角频率; $(\varphi_i^j)_v$ 、 $(\varphi_i^j)_a$ 分别为运动单元 i 、 j 的相对速度和加速度的相位; $(C_i^j)_k$ 、 $(D_i^j)_k$ 、 $(E_i^j)_k$ 、 $(F_i^j)_k$ 为运动单元 i 、 j 所构成运动副的动态线性误差元素和角度误差元素的傅里叶级数对应系数。当运动单元静止或低速平稳运动时 $(\omega_i^j)_v=0$, $(\varphi_i^j)_v=0$ 且 $(\omega_i^j)_a=0$, $(\varphi_i^j)_a=0$, 对应的动态误差 $\Delta_i^j(u)=0$ 且 $\Theta_i^j(\xi)=0$ 。

3 综合误差建模

3.1 运动副误差传递矩阵

运动副由2个相对运动的单元体构成,根据多体系统理论可知,构成运动副的2个单元体之间的位姿误差,可以通过3项线性误差与3项角度误差构成的综合误差矩阵进行表达。另一方面,根据误差形成过程的时变特性,可将每一项误差分解为非时变静态误差和时变动态误差两部分。因此,任意运动副中两相邻单元的位姿误差,可以通过6项静态误差构成的静态误差矩阵和6项动态误差构成的动态误差矩阵进行综合表达。立式 $B-A$ 摆头五轴数控机床包含移动副和转动副,其所含误差元素如图4所示,其中 $\delta_i^j(x)$ 、 $\delta_i^j(y)$ 、 $\delta_i^j(z)$ 为静态线性误差, $\theta_i^j(\alpha)$ 、 $\theta_i^j(\beta)$ 、 $\theta_i^j(\gamma)$ 为静态角度误差, $\Delta_i^j(x)$ 、 $\Delta_i^j(y)$ 、 $\Delta_i^j(z)$ 为动态线性误差, $\Theta_i^j(\alpha)$ 、 $\Theta_i^j(\beta)$ 、 $\Theta_i^j(\gamma)$ 为动态角度误差。

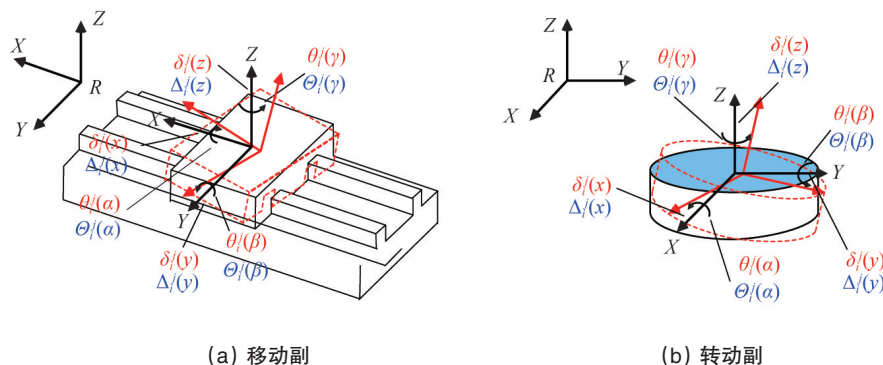


图4 机床移动副及转动副的误差元素

Fig. 4 Error components of the translational joint and the rotation joint in machine tools

应用齐次坐标变换矩阵,可将运动副中相邻单元体的各项静态误差矩阵表达为

$$T(\theta_i^j(\alpha)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_i^j(\alpha) & -\sin \theta_i^j(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin \theta_i^j(\alpha) & \cos \theta_i^j(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(\theta_i^j(\beta)) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i^j(\beta) & 0 & \sin \theta_i^j(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_i^j(\beta) & 0 & \cos \theta_i^j(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T(\theta_i^j(\gamma)) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i^j(\gamma) & -\sin \theta_i^j(\gamma) & 0 & 0 \\ \sin \theta_i^j(\gamma) & \cos \theta_i^j(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T(\delta_i^j(x)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \delta_i^j(x) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$T(\delta_i^j(y)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \delta_i^j(y) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T(\delta_i^j(z)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \delta_i^j(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

忽略高阶误差项,基于小角度误差假设,运动单元体 i, j 所构成运动副中所有静态误差元素形成的误差传递矩阵为

$$S_i^j = T(\theta_i^j(\alpha))T(\theta_i^j(\beta))T(\theta_i^j(\gamma))T(\delta_i^j(x))T(\delta_i^j(y))T(\delta_i^j(z))$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -\theta_i^j(\gamma) & \theta_i^j(\beta) & \delta_i^j(x) \\ \theta_i^j(\gamma) & 1 & -\theta_i^j(\alpha) & \delta_i^j(y) \\ -\theta_i^j(\beta) & \theta_i^j(\alpha) & 1 & \delta_i^j(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

同理可得运动单元 i, j 所构成运动副中所有动态误差元素形成的误差传递矩阵为

$$D_i^j = T(\theta_i^j(\alpha))T(\theta_i^j(\beta))T(\theta_i^j(\gamma))T(\Delta_i^j(x))T(\Delta_i^j(y))T(\Delta_i^j(z))$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & -\theta_i^j(\gamma) & \theta_i^j(\beta) & \Delta_i^j(x) \\ \theta_i^j(\gamma) & 1 & -\theta_i^j(\alpha) & \Delta_i^j(y) \\ -\theta_i^j(\beta) & \theta_i^j(\alpha) & 1 & \Delta_i^j(z) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

需要说明的是,机床的动态误差与相应运动单元体的速度及加速度的频率相关,仅在运动单元体快速运动、变速运动时存在。当运动单元缓慢、匀速运动或静止时,运动副中动态误差为0,此时动态传递误差矩阵 $D_i^j = I^{4 \times 4}$ 。

3.2 刀具误差与运动副误差的映射关系

在理想条件下,机床所有运动副中不存在误差,刀具位姿由机床几何参数及进给轴运动量共同确定。为简化运动模型推导过程,假设所有运动单元的固联坐标系具有相同姿态,且所有坐标系原点均设置在B轴与A轴的交点处。设刀尖点至刀具坐标系原点的距离为 L ,则刀尖点在刀具坐标系的位置 $P_i = [0, 0, -L, 1]$,刀具向量为 $V_i = [0, 0, -1, 0]$,则在理想条件下,刀尖点的位置 P_{ideal} 和刀具姿态 V_{ideal} 可表达为

$$P_{ideal} = (M_0^1 M_1^2)^{-1} M_0^3 M_3^4 M_4^5 M_5^6 M_6^7 P_i \quad (11)$$

$$V_{ideal} = (M_0^1 M_1^2)^{-1} M_0^3 M_3^4 M_4^5 M_5^6 M_6^7 V_i \quad (12)$$

式中, M_0^1 、 M_1^2 、 M_0^3 、 M_3^4 、 M_4^5 、 M_5^6 、 M_6^7 为相邻运动单元间的运动矩阵,即

$$M_0^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_1^2 = I^{4 \times 4} \quad M_0^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_3^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_4^5 = \begin{bmatrix} \cos B & 0 & \sin B & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin B & 0 & \cos B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_5^6 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos A & -\sin A & 0 \\ 0 & \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_6^7 = I^{4 \times 4}$$

在实际条件下,机床运动副中包含静态误差元素及动态误差元素。刀具位姿由机床的几何参数、进给轴运动量、运动副误差共同确定。因此,实际条件下刀尖点位置 P_{actual} 和刀具姿态 V_{actual} 可表达为

$$P_{actual} = (H_0^1 H_1^2)^{-1} H_0^3 H_3^4 H_4^5 H_5^6 H_6^7 P_i \quad (13)$$

$$V_{actual} = (H_0^1 H_1^2)^{-1} H_0^3 H_3^4 H_4^5 H_5^6 H_6^7 V_i \quad (14)$$

式中, $H_0^1 = M_0^1 S_0^1 D_0^1$, $H_1^2 = M_1^2 S_1^2 D_1^2$, $H_0^3 = M_0^3 S_0^3 D_0^3$, $H_3^4 = M_3^4 S_3^4 D_3^4$, $H_4^5 = M_4^5 S_4^5 D_4^5$, $H_5^6 = M_5^6 S_5^6 D_5^6$, $H_6^7 = M_6^7 S_6^7 D_6^7$, $D_i^2 = I^{4 \times 4}$ 。

刀具在实际条件下的运动轨迹与理想条件下的运动轨迹的偏差即为该机床的加工误差,因此,在实际条件下刀具的位置误差 P_{error} 和姿态误差 V_{error} 可表达为

$$P_{error} = P_{actual} - P_{ideal} \quad (15)$$

$$V_{error} = V_{actual} - V_{ideal} \quad (16)$$

3.3 建模方法的合理性分析

在航空结构件精加工过程中经常出现这样的现象,同批粗加工后的工件在同一台数控机床上进行精加工,在相同的加工工艺条件下,采用不同的进给倍率时会获得不同的加工精度及表面质量。通常适当降低进给倍率获得的加工质量,优于高进给倍率条件下的加工质量。显然同一台机床短期内加工同批零件时,伺服轴具有相同的几何误差。在相同的工艺条件下进行精加工,相同的几何误差通过机床运动模型传递至刀具,最终使刀具具有相同的静态误差。改变机床的进给倍率,实际上是改变了机床的速度和加速度特性。当机床进给倍率增大时,相同时间内伺服轴的位移变化量、速度变化量都将增大,从而导致进给轴的速度幅值 $|v|$ 和加速度幅值 $|a|$ 都将增大。对于一般惯性、耗散阻尼系统,总存在关系式

$$|F_a(\omega)| \propto |a| \quad |F_v(\omega)| \propto |v| \quad (17)$$

显然,当机床的进给倍率增大时,进给系统的惯性力、阻尼力的幅值都将增大。同时由方程(3)可将进给轴的动态误差抽象表达为

$$X(\omega) = \frac{F_a(\omega_a) + F_v(\omega_v)}{K} \quad (18)$$

由式(17)、式(18)可知,当机床进给倍率增大时,机床伺服轴

的动态误差也增大。因此,即使应用同一台机床,在相同的工艺条件下加工同一批零件,不同的进给倍率也会获得不同的加工精度。

在进行机床加工精度控制方法研究时,往往在不同的控制参数条件下检测刀具所经过轨迹线的轮廓误差,并以此判断机床的加工精度和动态性能。例如,Andolfatto等^[10]开展了五轴高速机床的伺服误差、几何误差及动态误差评估研究,在设定刀具运动轨迹及不同进给倍率条件下检测刀具的空间动态误差,结果显示,随着机床伺服轴进给倍率的增大,刀具在3个空间方向的动态误差也逐步增大。此外,国内外还开展了多轴联动轮廓误差研究,结果显示,分别改变轨迹空间位置、进给轴伺服增益(进给轴加速性能表征)及进给速度,都会影响联动轮廓误差^[11~13]。通过以上理论分析及有关文献研究结果可知,对于给定的机床加工系统,其加工误差受到非时变静态误差及时变动态误差综合作用的影响;非时变静态误差与进给轴的位置相关,时变动态误差与进给轴的速度、加速度特性密切相关。本文提出的基于时变特性的机床综合误差建模方法,与以上结论具有一致性,且与精加工实践过程相符,具有普适性。

将基于时变特性的机床综合误差建模方法应用于数控机床误差检测、辨识及补偿研究时,其研究路线可分为2个基本步骤:静态误差的检测、辨识及补偿;动态误差的检测、辨识及伺服参数整定。在机床低速平稳运动条件下其动态误差为0,此时应用激光干涉仪、球杆仪、R-test等检测设备分别对机床的平动轴和摆动轴进行静态误差检测与辨识^[5,14],并通过修正机床误差补偿列表改善其静态精度。在静态误差补偿基础上,开启五轴数控机床RTCP联动功能,运用球杆仪、R-test等检测装置,对多轴联动条件下刀具空间位置误差进行动态检测^[15,16],依据各伺服轴的编码器检测误差与终端刀具动态误差进行频谱特性分析,利用动态误差模型对进给轴动态误差进行参数辨识,并基于动态误差辨识结果对伺服轴控制参数进行整定,从而达到提升机床动态精度的目的。

4 结论

提出了一种基于时变特性的数控机床综合误差建模方法,建立的误差模型包含了数控机床运动副的静态误差和动态误差。静态误差是机床运动学特性的表征,可采用静态检测、辨识和补偿方法进行改善。动态误差是机床动力学特性对机床运动学特性影响的表征,可在单轴运动或多轴联动条件下,依据刀具轨迹的频谱特性对机床动态误差进行诊断和补偿。本文方法从运动学和动力学两个角度探讨了机床的精度影响因素,可以更加直观、准确地对数控机床在高速、高精加工中产生的实际误差进行描述,为机床精度及误差补偿提供了重要的理论基础。

参考文献(References)

[1] 任永强, 杨建国, 窦小龙, 等. 五轴数控机床综合误差建模分析[J]. 上

海交通大学学报, 2003, 37(1): 70-75.

- [2] 刘春时, 孙伟, 李小彭, 等. 面向五轴数控机床的空间误差建模流程研究[J]. 机床与液压, 2009, 37(8): 4-7.
- [3] Liu Chunshi, Sun Wei, Li Xiaopeng, et al. Research on volumetric error modeling for 5-axis NC machine tools[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(8): 4-7.
- [4] Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, et al. Geometric error measurement and compensation of machines: An update[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 660-675.
- [5] Li J, Xie F G, Liu X J. Geometric error modeling and sensitivity analysis of a five-axis machine tool[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 7(5): 1-15.
- [6] Zhu S W, Ding G F, Qin S F, et al. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2012, 54: 24-29.
- [7] 粟时平, 李圣怡. 五轴数控机床综合空间误差的多体系统运动学建模[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2003(5): 15-21.
- [8] Su Shipin, Li Shengyi. Modeling the volumetric synthesis error of 5-axis machine tool based on multi-body system kinematics[J]. Modular Machine tools & Automatic Manufacturing Technique, 2003(5): 15-21.
- [9] 黄鹏. 一类空间三自由度并联机构精度保证研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.
- [10] Huang Peng. Research on the accuracy assurance of a class of 3-DOF spacial parallel manipulators[D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [11] Huang T, Li Y, Tang G B, et al. Error modeling, sensitivity analysis and assembly process of a class of 3-DOF parallel kinematic machines with parallelogram struts[J]. Science China: Series E, 2002, 45(5): 467-476.
- [12] 褚福磊, 彭志科, 冯志鹏, 等. 机械故障诊断中的现代信号处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [13] Chu Fulei, Peng Zhike, Feng Zhipeng, et al. Modern signal processing method of mechanical fault diagnosis[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [14] Andolfatto L, Lavernhe S, Mayer J R R. Evaluation of servo, geometric and dynamic error sources on five axis high-speed machine tool[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(10): 787-796.
- [15] Lin M T, Wu S K. Modeling and improvement of dynamic contour errors for five-axis machine tools under synchronous measuring paths[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013, 72 (18): 58-72.
- [16] 霍彦波, 丁杰雄, 谢东, 等. 五轴数控机床转动轴与平动轴联动的轮廓误差仿真分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2012(3): 21-24.
- [17] Huo Yanbo, Ding Jiexiong, Xie Dong, et al. Simulation analysis for the contour errors from synchronous motion of rotational axis and translational axis in five-axis CNC machine tool[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2012(3): 21-24.
- [18] 谢东, 丁杰雄, 霍彦波, 等. 数控机床转动轴进给系统轮廓误差分析[J]. 中国机械工程, 2012 (12): 1387-1392.
- [19] Xie Dong, Ding Jiexiong, Huo Yanbo, et al. Contour error analysis for rotation feed axis in CNC machines[J]. China Mechanical Engineering, 2012(12): 1387-1392.
- [20] Ibaraki S, Oyama C, Otsubo H. Construction of an error map of rotary axes on a five-axis machining center by static R-test[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, 51(3): 190-200.

- [15] 张大卫, 商鹏, 田延岭, 等. 五轴数控机床转动轴误差元素的球杆仪检测方法[J]. 中国机械工程, 2008 (22): 2737-2741.
Zhang Dawei, Shang Peng, Tian Yanling, et al. A DBB- based alignment error measurement method for rotary axis of 5-axis CNC

- machine tool[J]. China Mechanical Engineering, 2008 (22): 2737-2741.
[16] Florussen G H J, Spaan H A M. Dynamic R-test for rotary tables on 5-axes machine tools[J]. Procedia Crip, 2012(1): 536-539.

A comprehensive error modeling method for numerical control machine tools based on time-varying characteristics

LI Jie¹, LIU Xinjun^{1,2}, XIE Fugui¹, LI Weidong³, ZHU Shaowei³

1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Beijing Key Lab of Precision/Ultra-precision Manufacturing Equipments and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610092, China

Abstract Based on the time-varying characteristics of the error components, a comprehensive error modeling method for a B-A swiveling head 5-axis machine tool is proposed. First, the dynamic error components are expressed as the Fourier series that are associated with the speed and the acceleration of the moving platform. Then, joint error transformation matrixes are modeled as the synthesis of the static and dynamic error transformation matrixes. Subsequently, the error mapping between the trajectory errors of the cutting tool and the joint error sources are constructed based on the MBS method. Finally, a theoretical analysis is made and the results show that both the kinematic and dynamic accuracy impacting factors are considered in this method, which can reflect the machining errors of the machine tools more accurately and also provide a solid foundation for the error compensation and the control parameter modulation.

Keywords numerical control machine tool; error modeling; dynamic error; error compensation; control parameter modulation

(责任编辑 韩星明)