

# 基于两路激光实时跟踪的机床刀具位姿误差测量

殷建

铜陵学院机械工程学院, 光电子应用安徽省工程技术研究中心, 安徽 铜陵 244061

**摘要** 在动态状况下, 实时获取机床刀具的位姿误差是提高机床精度的关键因素之一。机床多轴联动时, 利用两路激光实时跟踪测量主轴测量杆上两测点的空间运动轨迹, 得到两测点三维数据, 并拟合出两个空间圆, 用两圆的圆心连线来计算刀具的方向和位置误差。机床加工时, 变化的工艺参数引起的动态运动误差和热误差变化会造成沿 Z 轴方向运动的滑枕误差实时变化, 变化的滑枕误差会影响刀具的最终位置方向。通过自适应卡尔曼滤波预测算法对滑枕误差值进行预测-测量-修正, 将计算得到的误差最优估计值替换误差补偿模型中原有的误差参数, 进而对刀具位姿进行误差修正。最后, 对圆锥台试件以及一个 S 型工件进行有误差修正补偿和未补偿加工, 由测得工件的精度对比可知, 采用的刀具位姿误差实时测量方法及自适应修正补偿可更加有效地提高五轴机床的加工精度。

**关键词** 测量; 位姿误差; 循圆辨识; 齐次坐标变换矩阵; 激光跟踪仪

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.121207

## Pose Error Measurement Based on Two Path Lasers Real-Time Tracking of Machine Tool

Yin Jian

*Engineering Technology Research Center of Optoelectronic Technology Appliance, Anhui Province, College of Mechanical Engineering, Tongling University, Tongling, Anhui 244061, China*

**Abstract** At dynamic situation, acquiring the dynamic pose error of machine tools in real time is one of the key factors to improve the accuracy of machine tool. For multi-axis machine tool, two path lasers are used to track the space motion trajectory of two measuring points on the main-spindle measuring rod in real time. Two measuring points of 3D data are obtained and two space circles are fitted out. Then the line connecting the centre of two circles is used to identify the direction and position error of the tool. As the real-time ram errors moving along Z-axis changes with the change of the thermal error and dynamic motion error caused by the change of parameters, and the ram errors affect the final position of the tool direction. The ram errors should be predicted, measured, and corrected with the adaptive Kalman filter algorithm. The original error parameters in the error compensation model are replaced by the calculated optimal estimation value to correct the pose error of the tool. Finally, the error correction compensation and the uncompensated process are applied for the frustum specimen and the S-type workpiece. The comparison of the accuracy of the measured workpiece shows that the real-time measuring method of the tool position error and the adaptive correction compensation can effectively increase the processing accuracy of five-axis machine.

**Key words** measurement; pose error; follow circle identification; homogenous coordinate transformation matrix; laser tracker

**OCIS codes** 120.1880; 120.4630; 120.4640

**收稿日期:** 2017-06-16; **收到修改稿日期:** 2017-07-10

**基金项目:** 国家自然科学基金青年项目(51205243)、安徽高校自然科学重点研究项目(KJ2016A885)

**作者简介:** 殷建(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事数控机床误差测量与补偿方面的研究。

E-mail: yinjianshanghai@163.com

## 1 引言

高精度大型龙门式双摆头五轴机床特别适合大型复杂曲面结构件的加工,可以极大提高工件的加工精度及表面质量,是我国航空、汽车等制造业急需发展的重点制造装备。可以通过提高机床零部件制造、装配精度等措施来减小机床自身误差值来提高机床加工精度,但这种方法的经济成本非常高。目前国内外机床制造商大多采用误差补偿的方式来提高机床精度,但采用软件方式实现误差补偿,必须实时获得刀具相对于工件的切削位置方向的实际值和理想值间的偏差,然后通过机床控制系统中误差补偿模块去修正机床各运动轴的运动轨迹。加工过程中由于很难直接测量刀具的位姿误差,目前多通过测量各运动轴的单项误差值,由误差模型推算出刀具的位置和方向误差。而在实际加工过程中,工艺参数(如进给速度、主轴转速)和外界环境温度变化时,机床热误差、动态运动误差值等都会发生变化。由于沿 Z 轴方向运动的滑枕处在整个机床运动链的末端,且刀具以及主轴头都是安装在滑枕上,当滑枕误差产生实时改变时,直接影响到刀具的位姿误差。这时就需要一种有效的自适应模型来对预先测量得到的 Z 轴误差值和实际状况下误差值间的偏差进行修正,进而来补偿刀具位姿的变化。

从 20 世纪 60 年代开始,学者们采用激光干涉仪、激光准直仪对机床单轴单项误差进行了测量,使用球杆仪、平面光栅、二维球盘等仪器对机床综合误差进行测量和辨识研究,但是都缺乏直接对切削时刀具方向误差的测量<sup>[1-3]</sup>。虽然采用激光跟踪仪、激光三角法测量系统、光电经纬仪<sup>[4-6]</sup>可以实时测量出刀具切削点的三维位置坐标,但是都缺乏对切削刀具方向的测量。此外,目前的误差测量大多针对机床某一固定运行的工况。针对复杂型体工件加工时,机床多变工艺参数以及周边环境温度变化对机床刀具位姿误差值修正问题的研究很少。对运动目标轨迹的自适应修正研究,Oppenheim 通过对工业机器人关节及末端执行器动态运动位置的实时测量,运用自适应滤波算法得出机器人执行器运动轨迹的最优估计值<sup>[7-11]</sup>。Samo 等<sup>[13]</sup>针对采集到的物体运动图像,通过卡尔曼滤波器对连续图片间的像素相关性进行分析,目标发生形变时预测目标的状态,得出最终的运动状态轨迹。但是针对大型龙门式五轴机床误差参数的自适应修正补偿问题很少有研究者涉及。

本文采用两路激光跟踪的测量方法,在机床多轴联动时,通过两路激光实时跟踪测量主轴中测量杆上两测量点的空间运动轨迹,由测量得到的两个空间拟合圆的圆心连线计算出机床刀具的位姿误差。为减小机床运行参数改变时,沿 Z 轴方向运动滑枕误差的变化对刀具的位置和方向误差产生的影响,本文通过自适应卡尔曼滤波算法对滑枕误差进行计算,得出最优估计值替代其误差模型中原有误差参数值,对刀具的位姿误差进行修正后再进行误差补偿以提高机床的加工精度。最后通过采用刀具位姿误差实时测量方法对圆锥台试件以及 S 型工件进行加工,来验证机床刀具位姿误差实时测量方法的有效性和准确性。

## 2 刀具位姿误差实时辨识测量

龙门式双摆头机床在加工过程中,旋转轴的运动可以自由地调整刀具相对于工件的切削位姿,不仅可以获得更好的工件表面质量,而且还可以提高工件的尺寸位置精度,所以实时获取刀具的位置和方向对提高机床加工精度至关重要<sup>[12-14]</sup>。本研究利用两台跟踪仪并结合测量夹具位置,实现了刀具的方向位置误差的测量辨识。

### 2.1 测量坐标系确定

在实时误差测量过程中,由于激光跟踪仪测得的刀具误差数据是相对于其自身坐标系 $\{M\}$ 的,所以要得到与机床实际运动最吻合且精确的数据,必须将测量得到的误差数据都统一到机床自身坐标系中进行计算。因此,首先需确定激光跟踪仪相对于机床坐标系的位置和方向,这样激光跟踪仪可以在机床工作空间任意位置进行误差测量,并且可以建立两个激光跟踪仪坐标系间的联系。实验用机床结构如图 1 所示,包括 X、Y、Z 三个直线移动轴和 A、C 两个转动轴。先在机床上设定一个参考坐标系 $\{R\}$ ,它是测量坐标系和机床坐标系间转换的公共坐标系,参考坐标系可通过激光跟踪仪测量出在机床床身三个已知位置的点上放置的反射镜位置,利用激光跟踪仪测量三个反射镜的位置来确定测量坐标系 $\{M\}$ 相对于参考坐标系的位置关系。这样测量得到的误差数据可以通过坐标变换 ${}^R T_M$ (表示测量坐标系相对于机床参考坐标系的变换矩阵)转换到

参考坐标系中,再由 ${}^0T_R$ (表示机床参考坐标系相对于机床坐标系的变换矩阵)将测量数据变换到机床坐标系 $\{C_0\}$ 中。

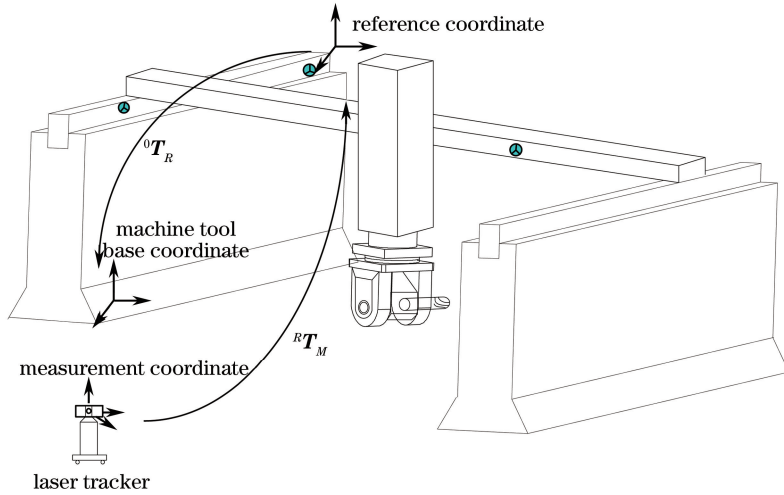


图 1 测量坐标系建立

Fig. 1 Establishment of measuring coordinate system

## 2.2 刀具位姿误差的激光跟踪实时测量

使用激光跟踪仪对刀具误差进行实时跟踪测量。激光跟踪测量具有测量精度高、测量距离大的优点,在航空航天、汽车制造、精密加工等行业中得到了广泛的应用<sup>[12]</sup>。为了实时测量出机床运行时刀具的位姿误差,先在主轴中夹装一个测量杆,在测量杆上不同距离位置处放置了两个猫眼反射镜 $P_1$ 、 $P_2$ ,两个反射镜距离杆轴心线的距离分别为 $r_1$ 、 $r_2$ 。通过机床多轴联动使得测量杆在空间实现循圆运动,如图 2 所示。此时两路激光实时跟踪测量两个反射镜的空间位置,得到两个反射镜运动的空间轨迹,通过最小二乘法将空间轨迹点拟合出两个空间圆,得到两个圆心 $O_1$ 、 $O_2$ ,如图 3 所示,此空间直线 $O_1O_2$ 可以认为是测量杆的实际中心轴线,将此直线投影到对应坐标投影平面上,即可计算出相应的角度 $\phi_x$ 、 $\phi_y$ 、 $\phi_z$ ,可认为这就是刀具实际的方向误差值。图 2 中机床坐标系为 $C_S$ 在 X 轴、Y 轴、Z 轴、C 轴、A 轴、主轴、刀具(测量杆)上创建的局部坐标系分别为 $C_{S1} \sim C_{S7}$ ,其运动链结构为 X 轴 $\rightarrow$ Y 轴 $\rightarrow$ Z 轴 $\rightarrow$ C 轴 $\rightarrow$ A 轴 $\rightarrow$ 主轴 $\rightarrow$ 刀具。

采用上述测量辨识方法,在机床工作区域内测量得到的刀具位置及三个方向误差大小如图 4 和图 5 所示。

以龙门式五轴机床为研究对象,其集成电主轴的双摆头式旋转轴安装在沿 Z 轴方向运动的滑枕上,Z 轴处在三个直线轴运动链的末端。由于直线轴和旋转轴之间运动的耦合效应,刀具的方向位置误差受到滑枕误差的影响,特别是其姿态误差更是受到旋转轴 A、C 的影响。因为电主轴以及双摆头的两个旋转轴 A、C 轴的自身几何精度很高,且具备良好的润滑冷却效果,故可认为在机床工作状况变化时,其误差值基本保持不变,但沿 Z 轴运动的滑枕误差受到机床运行状况变化影响较大,所以需要对其误差进行自适应修正。

## 3 Z 向运动滑枕误差辨识及自适应修正

沿 Z 轴方向运动的滑枕的方向位置误差是机床在一定运行状况下通过离线测量辨识获得,只和机床空间位置有关。误差补偿没有考虑机床运行状况变化时滑枕误差的变化对刀具位姿误差的影响,认为它是一个常数。所以为提高补偿精度,当机床运行状况变化时,采用自适应卡尔曼滤波算法对滑枕的误差进行测量和修正,计算出其最优估计值,再经运动学模型修正刀具的位姿误差,如图 6 所示。

### 3.1 Z 向运动滑枕误差自适应卡尔曼滤波方程

卡尔曼滤波器不仅可以提高模型的预测精度,而且可以有效消除测量过程中产生的随机误差和噪声干扰,同时还可以对模型参数中的不确定因素进行修正,因此在目标跟踪测量中得到广泛应用。由于卡尔曼滤波器的计算不需要存储早期历史测量数据,只需要下一次更新保存模型数据,便于计算机的实时计算,从而

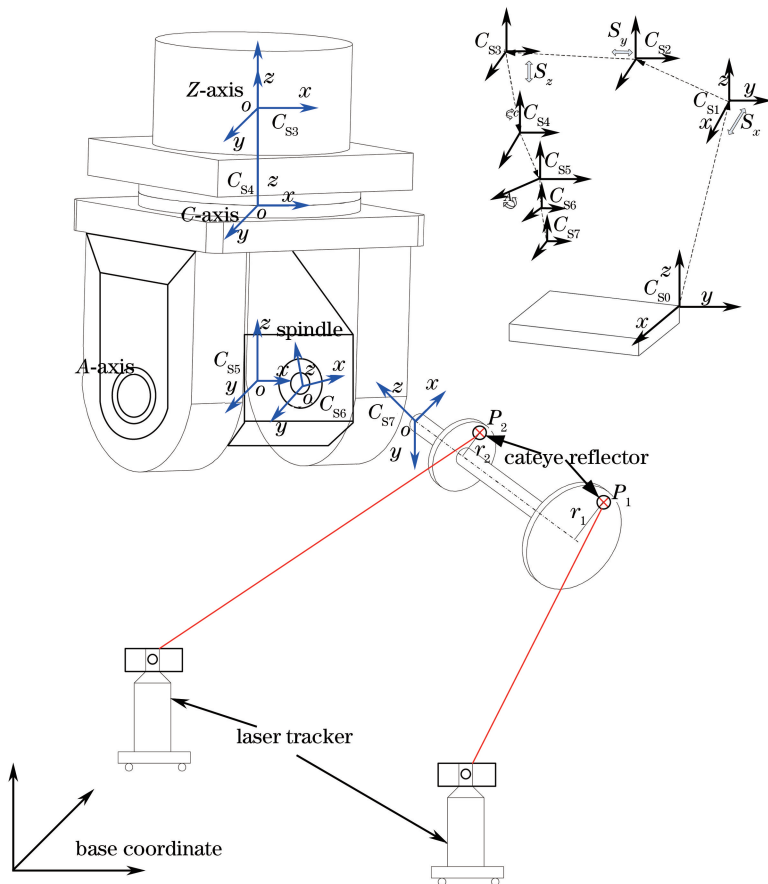


图 2 激光实时跟踪测量测量标杆误差图

Fig. 2 Error diagram of overcasting staff measured by laser real-time tracking

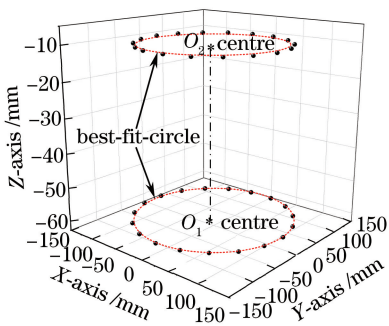


图 3 刀具方向误差辨识计算

Fig. 3 Tool direction error identification calculation

能够从一系列不完全以及包含噪声的测量值中估计动态系统的最优状态值,方便对误差值进行实时更新计算。本研究采用离散卡尔曼滤波器来对误差模型中滑枕的误差参数进行实时修正更新。假设  $X_k$  为滑枕在  $K$  时刻的状态变量,由误差模型中方向误差构成,即  $[\bar{\phi}_x \ \bar{\phi}_y \ \bar{\phi}_z]^T$ 。  $Z_k$  为滑枕在  $K$  时刻的观测状态,由其方向误差的测量值构成,即  $[\phi_x \ \phi_y \ \phi_z]^T$ 。则  $K$  时刻的滑枕方向误差卡尔曼滤波预测的状态方程和观测方程为:

$$X_{k+1} = A_k X_k + B U_k + W_k, k = 1, 2, \dots; W_k \sim N(0, Q_k), \tag{1}$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k, k = 1, 2, \dots; V_k \sim N(0, R_k), \tag{2}$$

假设对所有的  $j, k$  值  $E[\omega_j v_k^T] = 0$ , 由于没有控制量输入, 这里  $U_k$  取 0, (1)、(2) 式中  $A_k, B$  为系统参数矩阵,  $H_k$  为测量系统参数矩阵, 随机信号  $W_k, V_k$  分别表示过程激励噪声和观测噪声。

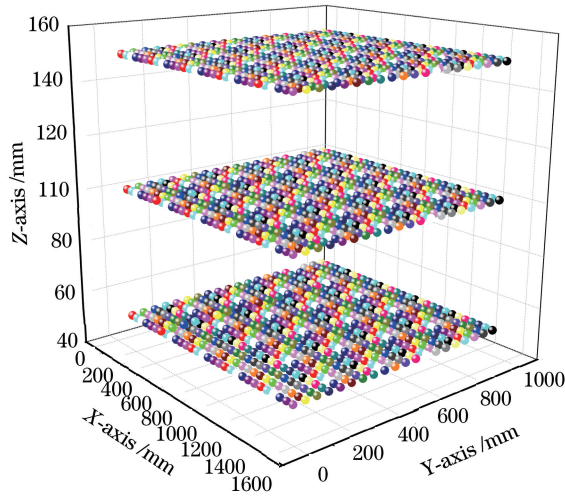


图 4 刀具位置误差测量值

Fig. 4 Measurement values of tool position errors

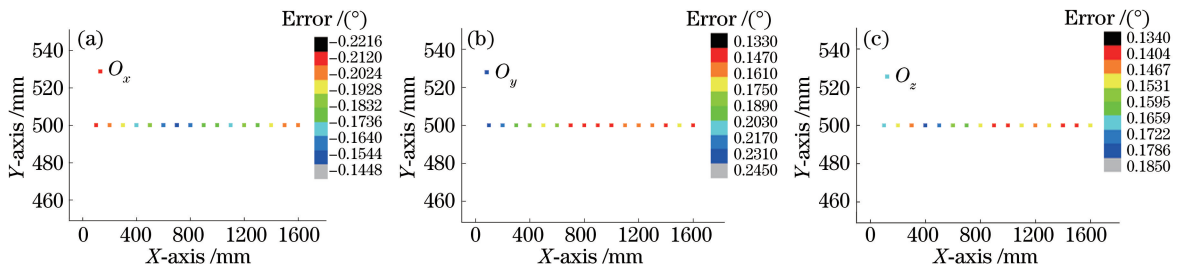


图 5 刀具方向误差测量值。(a)  $O_x$ ; (b)  $O_y$ ; (c)  $O_z$

Fig. 5 Measurement values of tool direction errors. (a)  $O_x$ ; (b)  $O_y$ ; (c)  $O_z$

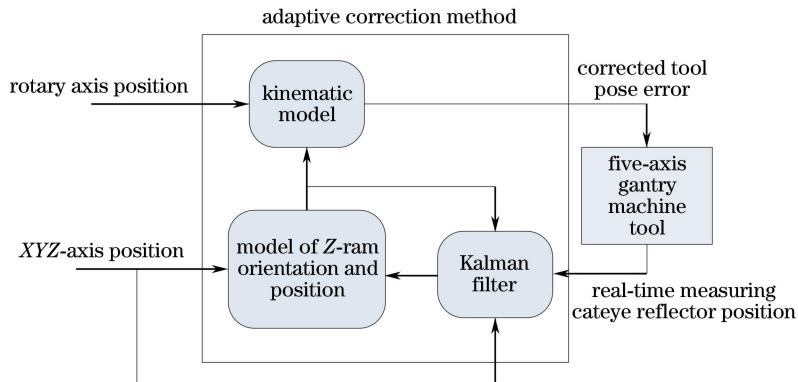


图 6 自适应修正误差方法示意图

Fig. 6 Schematic diagram of adaptive correction errors method

### 3.2 Z 向运动滑枕误差模型

本研究将机床工作空间划分为如图 7 所示的多个单元,在确定的工况下,使用激光干涉仪分步测量滑枕在单元节点处的误差大小。对节点以外的非测点误差值,采用基于形状函数有限元插值方法获取非测点的空间误差,得到的误差值作为卡尔曼滤波器中的空间状态变量预测值。

### 3.3 Z 向运动滑枕误差观测量计算

机床加工运行时,滑枕的方向和位置误差无法实时直接测量获得,所以本研究由测量得到的刀具方向和位置误差,通过齐次坐标变换矩阵获取滑枕的误差值。

对于本实验所用的龙门式五轴机床,通过其运动拓扑结构可以得出刀具(测量杆)相对于机床机床坐标

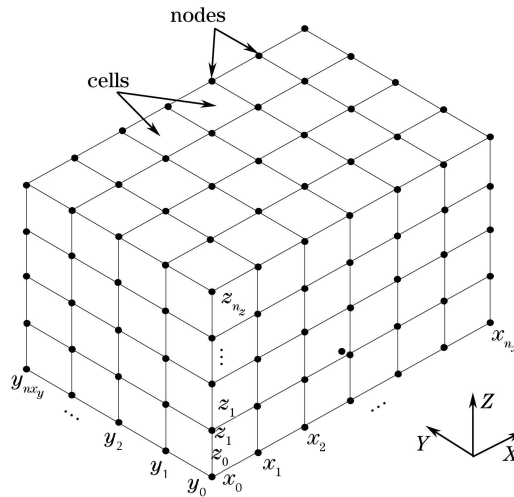


图7 有限元插值法计算机床非测点误差值

Fig. 7 Error value of unmeasured point of machine tool calculated by finite element interpolation method

系的方向和位置误差 ${}^0_6\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^0_6\mathbf{O}_t & {}^0_6\mathbf{P}_t \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,如下式所示:

$${}^0_6\mathbf{T} = {}^0_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T}(\theta_c) {}^4_5\mathbf{T}(\theta_a) {}^5_6\mathbf{T}(\theta_s), \quad (3)$$

式中XX直接由激光跟踪仪测量辨识得到。由(3)式可以计算得到滑枕相对于机床机床坐标系的位置和方向

向误差 ${}^0_3\mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^0_3\mathbf{O} & {}^0_3\mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为:

$${}^0_3\mathbf{T} = {}^0_5\mathbf{T} [{}^3_4\mathbf{T}(\theta_c) {}^4_5\mathbf{T}(\theta_a)]^T, \quad (4)$$

式中 ${}^0_3\mathbf{O} = [\phi_{xz} \ \phi_{yz} \ \phi_{zz}]^T$ 为方向误差, ${}^0_3\mathbf{P} = [\delta_{xz} \ \delta_{yz} \ \delta_{zz}]^T$ 为位置误差; ${}^{i-1}_i\mathbf{T}$ 对*i*=4,5,6表示相邻坐标轴间的误差变换矩阵。

这里旋转轴C轴相对于Z轴的误差变换矩阵、A轴相对于C轴的误差变换矩阵;和电主轴相对于A轴的误差变换矩阵可以通过文献[15]中所提出的方法进行求解得出。其中测量杆在主轴坐标系中的位置为:

$${}^i_6\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & r \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中*r*,*l*为测量杆上反射镜相对于主轴坐标系在X、Z方向的偏置距离。这样通过齐次坐标变换可以计算得出Z轴相对于机床参考坐标系的位置和角度误差,代入误差模型中实时修正刀具位姿误差。图8为Z轴在50 mm高度时所计算得到的定位误差及一个角度误差 $\phi_z$ 。

### 3.4 Z向运动滑枕误差自适应卡尔曼滤波修正

本研究中滑枕的方向误差的状态方程和观测方程分别为:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Phi}_x \\ \bar{\Phi}_y \\ \bar{\Phi}_z \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_x \\ \bar{\Phi}_y \\ \bar{\Phi}_z \end{bmatrix}_k + \mathbf{W}_k, \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} h_k & 0 & 0 \\ 0 & h_k & 0 \\ 0 & 0 & h_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_x \\ \bar{\Phi}_y \\ \bar{\Phi}_z \end{bmatrix}_k + \mathbf{V}_k, \quad (7)$$

式中 $\bar{\Phi}_i$ 中的*i*取*x*、*y*、*z*,表示预标定误差模型中测量节点处Z轴方向误差值; $\phi_i$ 中的*i*取*x*、*y*、*z*,表示实时

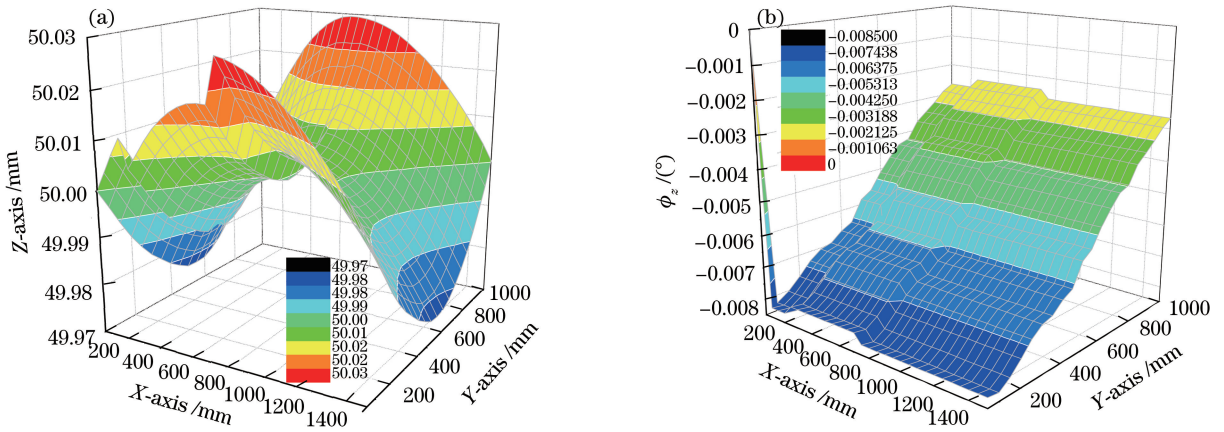


图 8 (a) Z 轴上滑枕定位误差及(b) Z 项角误差的测量值

Fig. 8 (a) Positioning error of the Z ram error and (b) measurement value of Z angle error

测量辨识得到的滑枕方向的误差值。 $h_k = [0 \cdots 0 \ N_1 \ N_2 \ \cdots \ N_8 \ 0 \cdots 0]$ ,  $N_i$  中的  $i$  取值为  $1, 2, \dots, 8$ ;  $N_i = 1/8(1+x_i x)(1+y_i y)(1+z_i z)$  为计算非测点误差值的单元形函数,  $x_i, y_i, z_i$  为单元节点在  $X, Y, Z$  三个方向的位置值。

本研究将测量过程中环境温度变化、机床振动等多种不确定因素归结为一个随机噪声,一方面利用测量值不断修正误差模型中的预测值,同时也对测量方程中由不确定因素而产生的噪声参数进行自适应滤波。基于测量观测值,找到最优估计值。整个滤波器预测更新流程如图 9 所示。

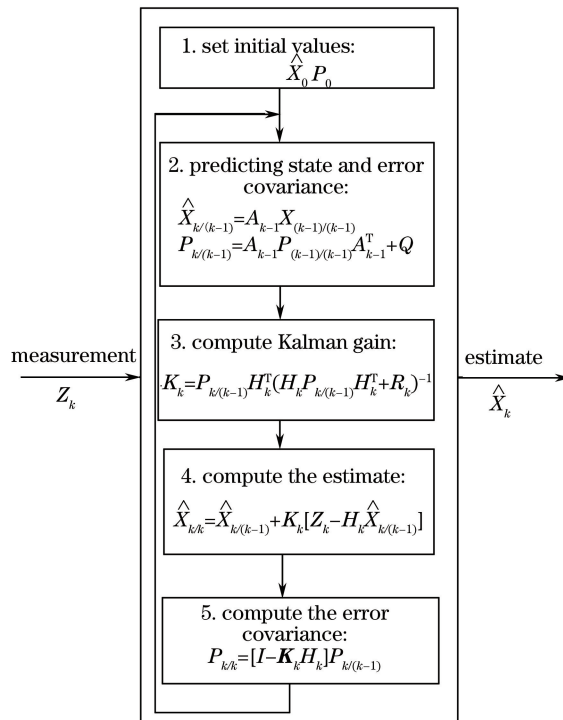


图 9 卡尔曼滤波算法更新流程图

Fig. 9 Renewal flow chart of Kalman filter algorithm

图 9 中  $\hat{X}_{k/(k-1)}$  表示  $x_k$  的最优预测;  $\hat{X}_{k/k}$  表示  $x_k$  的最优估计;  $P_{k/(k-1)}$  表示预测协方差;  $P_{k/k}$  表示更新协方差;  $K_k$  表示滤波增益矩阵。

## 4 机床误差补偿验证

对于大型龙门式机床的几何误差和热误差的补偿,离线测量得到的误差参数是一定值。当机床使用一定时间后,其零部件的磨损或运行状况变化引起的时变热误差会使得误差模型中刀具误差参数发生变化,这时就需要对测量得到的刀具位置误差进行实时修正以提高误差补偿效果。

测量实验在某机床公司生产的一台五轴加工中心的机器上进行,机床直线轴行程为  $20\text{ m} \times 3\text{ m} \times 1.2\text{ m}$ ,旋转轴参数 A 轴( $\pm 110^\circ$ )、C 轴( $\pm 360^\circ$ )。误差补偿模型中的误差数值是通过离线测量方式并根据国际标准 ISO-230-7 使用激光干涉仪及激光跟踪仪在连续一个月对机床进行误差测量而获得,将获得的刀具位姿误差以及沿 Z 轴运动的滑枕误差值作为补偿模型中的误差参数,其误差值作为自适应卡尔曼滤波器的预测值。将激光跟踪仪实时测量得到的滑枕误差值作为测量更新值,将滤波器计算得到的最优估计值代入模型中替代原有误差值来修正刀具的实际位姿误差。在一台五轴机床上对典型的锥台试件(图 10)进行多次加工,先按理论值加工一个锥台,再将修正后得到的刀具位姿误差值代入误差补偿模型中,加工相同的锥台试件。在 ZEISS 三坐标测量机上对试件的锥度和上下两个面的圆度分别进行测量,通过对比补偿前后加工得到工件的精度(表 1),可以看出所提出的刀具实时位姿误差测量及补偿方法可以更加有效地提高工件的加工精度。最后再对一个典型曲面轮廓 S 型工件进行加工,图 11 为加工的 S 型工件照片。在补偿前及补偿后两次加工的零件表面的相同高度位置上,分别选取 10 个采样点,在三坐标测量机上对这些点的尺寸数据进行测量,对补偿前后的零件尺寸误差进行对比分析,结果发现,最大尺寸误差由  $44.86\text{ }\mu\text{m}$  减小到  $14.3\text{ }\mu\text{m}$ ,误差的平均值由  $26.52\text{ }\mu\text{m}$  减小到  $11.24\text{ }\mu\text{m}$ ,均方差由  $10.19\text{ }\mu\text{m}$  减小到  $2.4\text{ }\mu\text{m}$ 。说明所提出的刀具位姿误差测量方法可以明显提高机床的加工精度。

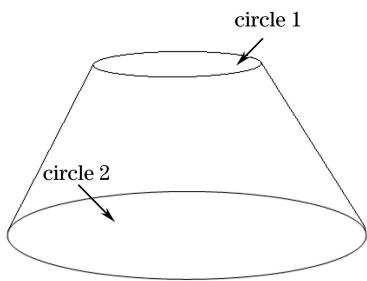


图 10 实验用圆锥台

Fig. 10 Cone frustum for test

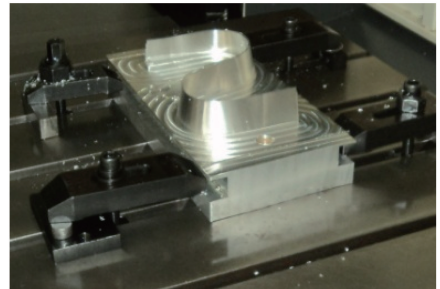


图 11 S 型工件

Fig. 11 S-type workpiece

表 1 补偿前后锥台误差参数值对比

Table 1 Comparison of coning error parameter values before and after compensation

Item	Real value	Before compensation	After compensation
Roundness of circle 1	$\Phi 40\text{ mm}$	$23.7\text{ }\mu\text{m}$	$12.3\text{ }\mu\text{m}$
Roundness of circle 2	$\Phi 86\text{ mm}$	$27.7\text{ }\mu\text{m}$	$14.6\text{ }\mu\text{m}$
Taper	$30^\circ$	$30^\circ 2' 14''$	$30^\circ 54''$

## 5 结 论

误差测量是机床误差补偿的重要一环,针对动态状况下刀具位姿误差的实时测量及补偿修正问题,提出使用激光跟踪仪循圆方法对刀具误差进行测量,而当机床处在变化的运行状况时,针对实时变化的 Z 向运动滑枕的误差对刀具误差产生影响问题,使用自适应卡尔曼滤波器进行预测-测量-修正。最后对圆锥台试件以及 S 型工件进行了有补偿及无补偿的加工,锥台的圆度提高了 48%,S 型工件的尺寸误差平均减小了 50%,精度测量结果表明所提出的刀具误差实时测量及自适应修正方法具有很好的补偿效果。

## 参 考 文 献

- [1] Schwenke H, Knapp W, Haitjema H, *et al.* Geometric error measurement and compensation of machines: an update



- [1] . CIPP Annals: Manufacturing Technology, 2008, 57(2): 660-675.
- [2] Chen G, Yuan J, Ni J. A displacement measurement approach for machine geometric error assessment [J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2011, 41(1): 149-161.
- [3] Zhu Jia, Li Xingfei, Tan Wenbin, *et al.* Method of geometric error detection for measuring machine based on laser tracker[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 25-30.  
朱嘉, 李醒飞, 谭文斌, 等. 基于激光干涉仪的测量机几何误差检定技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 25-30.
- [4] Chen Yang, Lin Jiarui, Gao Yang, *et al.* A hybrid of vision and inclination sensor method for estimating relative pose [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1212003.  
陈洋, 林嘉睿, 高扬, 等. 视觉与倾角传感器组合相对位姿测量方法[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1212003.
- [5] Liu Xinbo, Wang Zhong. Method for deep hole straightness based on single laser beam rotation [J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2017, 54(3): 031203.  
刘新波, 王仲. 基于单激光束旋转的深孔直线度测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031203.
- [6] Liang Yunfeng, Zhang Bin. Analysis for squareness measurement error of machine tool introduced by steering prism [J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2017, 54(2): 021203.  
梁允峰, 张斌. 转向棱镜引入的机床垂直度测量误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(2): 021203.
- [7] Zhou Lingling, Dong Haibo. Method of roadheader position detection based on image recognition of double laser target [J]. Laser & Optoelectronic Progress, 2017, 54(4): 041205.  
周玲玲, 董海波. 基于双激光标靶图像识别的掘进机位姿检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041205.
- [8] Li Ruigang. Calibration of tool spindle for 5-axis CNC machine using laser tracker [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 477-483.  
李锐刚. 基于激光跟踪仪标定五轴数控加工中心主轴[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 477-483.
- [9] Li Danni, Hu Dan, Wang jinsong, *et al.* Application of three-dimensional laser radar to the measurement of deviation angle of guns[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1014004.  
李丹妮, 呼丹, 王劲松, 等. 三维激光雷达在火炮偏离角测量值的应用[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1014004.
- [10] Fan Y, Zhao B. Combined non-contact coordinate measurement system and calibration method[J]. Optics & Lasers Technology, 2015, 70(1): 100-105.
- [11] Lertpiriyasuwat V, Berg M C, *et al.* Extended Kalman filtering applied to a two-axis robotics arm with flexible link [J]. The International Journal of Robotics Research, 2000, 19(3): 254-270.
- [12] Yan Junhua, Wang Zhigang, Ai Shufang. Real-time tracking of targets with complex state based on ICT algorithm[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2015, 43(3): 107-112.  
闫钧华, 王志刚, 艾淑芳. 基于 ICT 算法的复杂状态目标实时跟踪[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(3): 107-113.
- [13] Simončić S, Klobčar D, Podržaj P. Kalman filter based initial guess estimation for digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 73(1): 80-88.
- [14] Li Andong, Lin Zaiping, An Wei, *et al.* Infrared small target detection in compression domain based on self-adaptive parameter configuration[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(10): 1008003.  
李安东, 林再平, 安玮, 等. 基于自适应改进的压缩域红外弱小目标检测[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 1008003.
- [15] Yin Jian, Li Ming. Errors measurement for rotation axis of five-axis machine tool based on laser tracker[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0408005.  
殷建, 李明. 基于激光跟踪仪的五轴机床旋转轴误差测量[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0408005.