

# 基于激光干涉仪的旋转轴误差快速检定方法\*

皮世威, 刘 强, 孙鹏鹏

(北京航空航天大学机械工程及其自动化学院 北京 100191)

**摘要:**为了提升五轴数控机床各旋转轴精度,解决旋转轴几何误差难以测量的问题,提出了一种基于激光干涉仪的旋转轴几何精度快速测量方法。该方法针对 AC 双转台和 BC 摆头转台的结构特性,采用旋转轴与直线轴联动的测量技术,可以避免传统测量方法对旋转轴中心的依赖性,推导了测量中直线轴转角误差与直线度对旋转轴几何误差约束关系,在保证精度的同时减少了测量过程中的设备安装调试时间,实现了五轴机床旋转轴转角误差、重复转角误差以及反向间隙的快速测量和补偿。对实际五轴机床 AC 双转台几何精度进行检定,提高了旋转轴的几何精度,实验证明该测量方法具有很强的工程应用价值。

**关键词:** 五轴机床; 旋转轴; 激光测量; 精度补偿

**中图分类号:** TH124      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.3599

## Geometric error detection for rotary feed drive based on laser interferometer

Pi Shiwei, Liu Qiang, Sun Pengpeng

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy of 5-axis machine tool, a geometric error detection method for rotary feed drive using laser interferometer is presented, which realizes geometry error measurement for rotary axis. This method can be implemented in general rotary feed drive such as AC table tilting type and BC tilting table type. Synchronized motion with linear axis and rotary axis is applied in the measurement. The dependence of traditional methods on rotary center coordinate can be avoided during the measurement. The constraints between the angular error of the linear axis and the geometric error of the rotation axis are deduced. The time cost of setup and measurement can be decreased guaranteeing with the measurement accuracy. Compensation and fast measurement are realized on measurement of positioning error, resettle error and backlash in rotary axis. An experiment of geometric error measurement is conducted based on XKR-50A 5-axis machine tool. The accuracy of the rotary feed drive is largely improved after the compensation. The feasibility and engineering application of the method is proved.

**Keywords:** 5-axis machine tool; rotary feed drive; laser interferometer; accuracy compensation

## 0 引 言

五轴数控加工中心相对于三轴数控机床具有较好的加工灵活性,加工效率更加高效,但由于附加旋转轴的作用,也增加了相应误差项<sup>[1]</sup>。在面对特定的复杂曲面部件,例如叶轮、叶片以及叶盘等难加工且精度要求较高的工件时,由于刀轨路径奇点的存在,旋转轴几何误差会导致最终较大的加工表面误差,因此要保证高精度的加工

质量需要提升五轴数控加工中心各旋转轴的精度。传统的直线进给轴精度测量方法较为成熟<sup>[2]</sup>,采用激光干涉仪来对直线轴转角误差与反向间隙进行测量与补偿,操作简单,但对于五轴机床旋转轴的误差检测技术尚无通用且简便的方法。

旋转轴的几何精度检测方法很多<sup>[3]</sup>,针对不同五轴机床结构有不同的几何精度检测方法<sup>[4]</sup>。常用方法可以分为激光干涉仪测量法、球杆仪测量法<sup>[5]</sup>、机器视觉定位<sup>[6]</sup>及多面棱镜加准直测量方法<sup>[7]</sup>。激光干涉仪多应用

于直线轴几何精度测量<sup>[8]</sup>,线性测量精度达到 0.001 μm,角度测量精度达到 0.01"。天津大学的朱嘉等人<sup>[9]</sup>采用激光干涉仪对机床测量机进行建模与误差测量。旋转轴回转精度则采用多面棱镜加准直仪的测量方式,角度测量精度为 1"<sup>[10]</sup>,该方法测量仪器安装需基于旋转轴中心,且采用人工计数方式,测量精度受棱镜的制造精度较大,测量精度相对不高。旋转轴耦合几何精度测量则一般采用激光跟踪仪<sup>[11]</sup>以及球杆仪进行测量, Lee K. I. 等人<sup>[12]</sup>通过球杆仪测量多轴联动引起的运动误差进而提升五轴机床的几何精度,但球杆仪测量过程复杂,激光跟踪仪测量成本极其昂贵。因此采用激光干涉仪对几何误差测量相对简单高效<sup>[13]</sup>,但不同于直线轴几何精度测量方法<sup>[14]</sup>,目前旋转轴的回转误差测量方法均需将测量仪器安装在被测旋转轴的轴心上<sup>[15]</sup>。对于摇篮式双转台以及双摆头五轴机床机构,确定旋转轴 A 轴中心需要通过复杂的工装来定位<sup>[16]</sup>,并且受人工装配的影响较大,增加了测量的准备时间。因此本文采用一种基于激光干涉仪的多轴联动的旋转轴转角误差测量方法,能够快速有效地避免旋转轴中心的定位问题,在保证测量精度的同时使得旋转轴测量过程更为简便与高效。

## 1 旋转轴几何误差测量原理

### 1.1 旋转轴几何误差模型

影响五轴机床精度的因素较多,几何精度为主要影响因素之一,其表达形式一般通过推导相邻结构标系 O 到工件坐标系 W 的 D-H 齐次坐标变换矩阵来获得<sup>[17]</sup>。

$${}^0\mathbf{T}_W = {}^0\mathbf{T}_A \cdot {}^A\mathbf{T}_C \cdot {}^C\mathbf{T}_W \quad (1)$$

式中:  ${}^n\mathbf{T}_m$  为结构件 n 到 m 的齐次坐标变换矩阵。

对于实际五轴机床对象,由于装配、制造引起的机床几何误差不可避免,因此相邻结构件之间的齐次变换矩阵实际为:

$${}^n_{\text{actual}}\mathbf{T}_m = {}^n_{\text{ideal}}\mathbf{T}_m \cdot {}^n_{\text{error}}\mathbf{T}_m \quad (2)$$

式中:  ${}^n_{\text{actual}}\mathbf{T}_m$  为实际变换矩阵,  ${}^n_{\text{ideal}}\mathbf{T}_m$  为理论变换矩阵,  ${}^n_{\text{error}}\mathbf{T}_m$  为误差矩阵。

对于机床旋转台进给系统,存在 6 个自由度,因此存在 6 项空间几何误差,及 x、y、z 3 个方向的线性误差  $e_x$ 、 $e_y$ 、 $e_z$ ,以及分别绕 x、y、z 转动的 3 个旋转误差  $r_x$ 、 $r_y$ 、 $r_z$ ,另外旋转轴系统由于装配过程会产生两项线性误差和两项转角误差,及关于直线轴之间的垂直度误差和位置误差。以 C 轴为例,存在相对于 X、Y 轴的垂直度误差  $\sigma_{cx}$ 、 $\sigma_{cy}$ ,以及位置误差  $p_{cx}$ 、 $p_{cy}$ 。其误差项齐次变换矩阵可以表示为<sup>[18]</sup>:

$${}^A_{\text{error}}\mathbf{T}_C = \begin{bmatrix} 1 & -r_{zc} & r_{yc} + \sigma_{cx} & e_{xc} + p_{cx} \\ r_{zc} & 1 & -r_{xc} - \sigma_{cy} & e_{yc} + p_{cy} \\ -r_{yc} - \sigma_{cx} & r_{xc} + \sigma_{cy} & 1 & e_{zc} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)可以推导出 C 轴转动在 X、Y、Z 3 个方向上的综合几何误差  $\varepsilon_{cx}$ 、 $\varepsilon_{cy}$ 、 $\varepsilon_{cz}$  为:

$$\begin{cases} \varepsilon_{cx} = -(e_x + p_{cx}) + Y_p(r_z) - Z_p(r_y + \sigma_{cx}) \\ \varepsilon_{cy} = -(e_y + p_{cy}) + Z_p(r_x + \sigma_{cy}) - X_p(r_z) \\ \varepsilon_{cz} = -e_z + X_p(r_y + \sigma_{cx}) - Y_p(r_x + \sigma_{cy}) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $(X_p, Y_p, Z_p)$  为转动的位置坐标。

由式(4)可以知随着转动距离增大,线性误差  $e_i$  与位置误差  $p_{ci}$  对于旋转轴几何精度影响较小,旋转误差  $r_i$  和垂直度误差  $\sigma_{ci}$  对旋转轴几何精度影响较大,其中旋转轴转角误差对几何精度起主导作用。在机床实际应用之前应当对旋转轴旋转误差进行检定与补偿。要获取旋转轴的转角误差需要相对于轴本身坐标系测量的,目前旋转轴系统几何精度检测普遍采用棱镜加准直仪的方案进行测量,精度稍显不足,且具有旋转中心局限性,本文采用激光干涉仪来进行测量与补偿<sup>[19]</sup>,其测量结果精确且稳定。

### 1.2 激光干涉仪测量原理

双频激光干涉仪是数控机床几何误差检定中最为常用的仪器,其工作原理图如图 1 所示。激光器发出两相互垂直且频率不同的偏振光束,光束频率分别为  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 。光束在射出激光器之前经过数字转换生成  $\omega_1 - \omega_2$  的基准信号。射出激光器后两光束到达干涉镜之后进行分离,频率为  $\omega_1$  的光束发生垂直折射到反射镜 1 上,频率为  $\omega_2$  的光束照射到反射镜 2 上返回。在实际测量过程中,反射镜 1 与干涉镜相对静止,而反射镜 2 安装在被测工作台上随工作台以速度  $v$  相对运动,此时由反射镜发射回来的光束频率为  $\omega_2 \pm \Delta\omega$ 。反射回来的两光束经过分光镜反射回激光器,再经过数字转换生成  $\omega_1 - (\omega_2 \pm \Delta\omega)$  的实际信号,通过与之前的基准信号就能够得到与  $\pm \Delta\omega$  对应的脉冲信号,± 的选取与运动方向有关,运动过程中反射回来的光束频率为:

$$\omega_2 + \Delta\omega = \sqrt{\frac{c-2v}{c+2v}} \approx \omega_2 \left(1 - \frac{2v}{c}\right) \quad (5)$$

式中:  $c$  为光速,  $\omega_2$  为定值。

因此  $\Delta\omega$  与运动速度  $v$  可由式(6)表示。

$$\Delta\omega \approx -\omega_2 \frac{2v}{c} \quad (6)$$

式中:  $\Delta\omega$  为干涉带明暗变化的频率。

其乘以波长的一半可转化为相对移动的距离  $l$ :

$$l = \frac{\lambda}{2} \int \Delta\omega dt \approx \lambda \int \frac{\omega_2 v}{c} dt \quad (7)$$

式中:  $\lambda$  为激光波长。

由此可见,激光干涉仪的误差来源于干涉测量系统

的误差,因此只要激光头安装稳定,非干涉测量区域的轻微振动不会对测量结果造成影响。

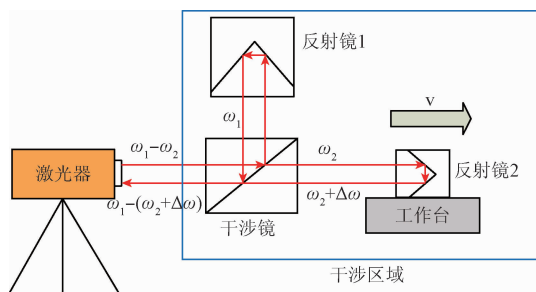


图1 双频激光干涉仪测量原理

Fig.1 Schematic diagram of dual-frequency laser interferometer

### 1.3 旋转轴精度测量原理

对于旋转中心点已知的旋转进给系统,采用简单的工装将角度反射镜安装在旋转轴中心处,其转角误差测量方法与直线轴类似,只是需要将直线距离变化量转变为角度变化量。以C轴为例,其测量原理如图2所示。角度测量过程需要基于回转轴校正装置,将其安装在旋转轴的旋转中心,光路一直保持畅通反射回干涉仪。测量过程将C轴行程( $0^\circ \sim 360^\circ$ )细分为 $n$ 份,每旋转 $\phi$ 角度反射镜随旋转轴从位置1转动到位置2,相对静止后进行一次转角测量,然后将反射镜相对工作台拨回到位置1再进行下一次测量,直到覆盖旋转轴大部分的行程,即可得出C轴整个行程中的转角误差。

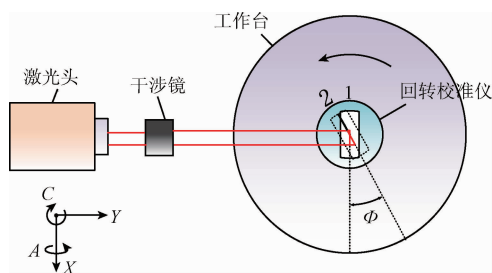


图2 C轴定位误差测量原理

Fig.2 Schematic diagram of error measurement for C axis

### 1.4 多轴联动的AC转台几何精度测量原理

对于旋转中心无法通过简便的工装将进行定位的旋转轴,角度回转仪无法准确定位在被测旋转轴的轴线上,这也是采用多棱镜准直仪这一传统测量方案时遇到的客观局限,准直仪的测量原理与局限性如图3所示,一般来说C轴位于工作台上,其旋转中心可以精确定位,从而完成测量。但对于A轴,进行测量时,转台从位置①运动到位置②,由于无法将棱镜安装在旋

转中心轴线上,因此无法观测到棱镜的反射的光路变化,此方案不适用。

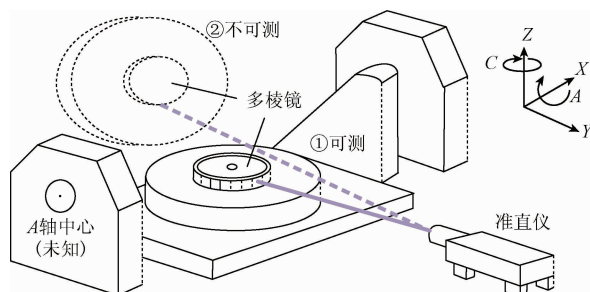


图3 棱镜准直仪测量A/C轴几何精度的原理

Fig.3 Schematic diagram of Prism-Collimator measurement in A/C Axis

由于激光干涉仪的测量原理,在测量A轴几何精度时,虽无法采用与C轴测量类似的单轴运动方法,但可以通过多轴联动方式进行测量,消除在直线轴自由度上的相对位移。有效地保证激光光束始终会照射在回转校准装置的反射镜面上,从而确保激光光路不被阻挡,激光干涉仪信号读取不间断。图4所示为AC摇篮式双转台五轴机床的旋转轴A轴转角误差测量原理。

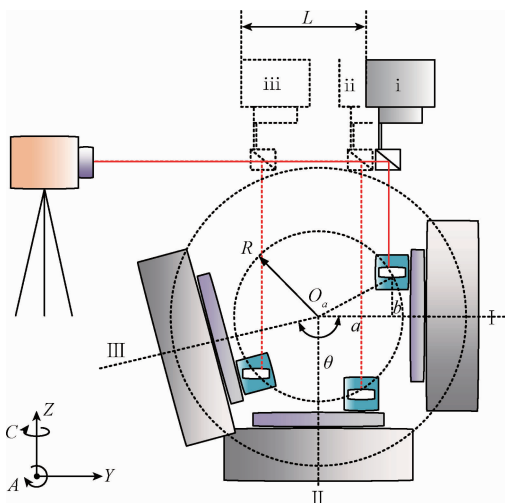


图4 A轴的测量原理

Fig.4 Schematic diagram of Measurement for A axis

$O_a$  为A轴旋转中心,坐标未知。当A轴从位置I旋转到位置II以及位置III的同时,需要直线轴在Y方向上从位置i同步运动到位置ii以及位置iii。使得旋转轴A在Y方向上的运动与Y轴实际运动同步。

通过几何关系可知,在YOZ平面中,角度回转仪位于以 $O_a$ 为圆心, $R$ 为半径的圆周上,随机选择测量路径圆上的3点的坐标分别为 $A(y_a, z_a)$ 、 $B(y_b, z_b)$ 、 $C(y_c, z_c)$ ,则可求得圆心 $O_a$ 的坐标:

$$\begin{cases} x_{oa} = x_a \\ y_{oa} = \frac{(z_b - z_a)(z_c^2 - z_a^2 + y_c^2 - y_a^2) - (z_c - z_a)(z_b^2 - z_a^2 + y_b^2 - y_a^2)}{2(y_c - y_a)(z_b - z_a) - (y_b - y_a)(z_c - z_a)} \\ z_{oa} = \frac{(y_b - y_a)(y_c^2 - y_a^2 + z_c^2 - z_a^2) - (y_c - y_a)(y_b^2 - y_a^2 + z_b^2 - z_a^2)}{2(z_c - z_a)(y_b - y_a) - (z_b - z_a)(y_c - y_a)} \\ R = (y_a - y_{oa})^2 + (z_a - z_{oa})^2 \end{cases} \quad (8)$$

测量过程中 Y 轴随动位置坐标为:

$$y = R \cos\left(\theta + \arctan \frac{b}{a}\right) \quad (9)$$

式中:  $\theta$  为每段测量 A 轴所转过的角度,  $a$  为旋转发射镜基面到 A 轴旋转中心的距离,  $b$  为旋转反射镜到 C 轴中心的距离。

在实际测量过程中, 旋转轴的角度误差  $\theta$  和直线轴同运动的转角误差、Y 轴直线度等因素对实际光程差有一定影响, 使之不能精确满足式。图 5 所示为 AC 摇篮式双转台的 A 轴在测量过程中的光路图, 当旋转轴与直线轴同步运动时, 各自会产生一定的定位误差。反射镜的夹角为  $\theta$ , 实际光路分别为  $A_1$ 、 $A_2$ , 且在全反射过程中, 反射镜的镜片为等腰直角三角形。

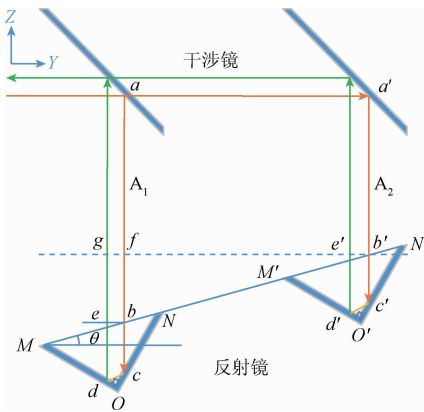


图 5 干涉镜与反射镜间光路示意图

Fig. 5 Laser track between the interferometer and mirror

设光路  $A_1$ 、 $A_2$  在干涉镜与反射镜间的光程分别为  $L_1$ 、 $L_2$ , 则光程为:

$$\delta = L_1 - L_2 \quad (10)$$

实际光程差可以表示为:

$$\delta = \delta_i + \delta_e \quad (11)$$

式中:  $\delta_i$  为理论光程差,  $\delta_e$  为实际光程差对理论光程差的偏差。

通过几何关系化简可以得如下:

$$\delta_i = 2 |aa'| \tan\theta \quad (12)$$

$$\delta_e = (|bN| - |b'N'|) \times$$

$$\left( \frac{2 \sin \pi/4}{\sin(\pi/4 - \theta)} - \frac{2 \cos \theta}{\cos 2\theta} (1 + \sin 2\theta) \right) + (|ON| - |O'N'|) \frac{1 + \sin 2\theta}{\cos(\pi/4 - \theta)} \quad (13)$$

对于理论光程差  $\delta_i$  的误差, 其计算方法是假设在  $\theta$  很小的情况下,  $\theta$  的误差近似为  $\tan\theta$  的误差, 设  $|\theta| < 2^\circ$  且  $|aa'| = |NN'|$ ,  $|ON| = |O'N'|$  时, 被测角度  $\theta$  使  $|aa'| \neq |bb'|$ , 从而使得:

$$(|bN| - |b'N'|) = |aa'| (\sec\theta - 1) \neq 0 \quad (14)$$

从而式 (13) 可以转化为:

$$\delta_e = 2 |aa'| (\sec\theta - 1) \times \left( \frac{\sin \pi/4}{\sin(\pi/4 - \theta)} - \frac{\cos \theta}{\cos 2\theta} (1 + \sin 2\theta) \right) \quad (15)$$

$$\theta_e = \frac{\delta_e}{2 |aa'|} =$$

$$(\sec\theta - 1) \left( \frac{\sin \pi/4}{\sin(\pi/4 - \theta)} - \frac{\cos \theta}{\cos 2\theta} (1 + \sin 2\theta) \right) \quad (16)$$

计算可得, 设  $|\theta| < 2^\circ$  时有:

$$|\theta_e| < 2.14 \times 10^{-5} = 0.077'' \quad (17)$$

当干涉镜距离  $|aa'|$  与反射镜距离  $|NN'|$  存在不匹配的误差时, 即  $|aa'| \neq |NN'|$  时, 设  $|ON| = |O'N'|$ , 则  $|bN| - |b'N'| = |aa'| - |NN'|$ , 由式 (8) 可知:

$$\delta_e = 2 (|aa'| - |NN'|) \times \left( \frac{\sin \pi/4}{\sin(\pi/4 - \theta)} - \frac{\cos \theta}{\cos 2\theta} (1 + \sin 2\theta) \right) \quad (18)$$

令  $f(\theta) = \left( \frac{\sin \pi/4}{\sin(\pi/4 - \theta)} - \frac{\cos \theta}{\cos 2\theta} (1 + \sin 2\theta) \right)$ , 可得当  $|\theta| < 2^\circ$  时,  $|f(\theta)| < 0.035$ , 设  $|aa'| = 100 \text{ mm}$ , 当  $|aa'| - |NN'| < 80 \text{ }\mu\text{m}$  时可满足  $\theta_e < 0.2''$ , 从而保证测量精度不受影响。

当存在反射镜两全反射镜片边长不一致产生的误差时, 即  $|aa'| = |NN'|$ ,  $|ON| \neq |O'N'|$ , 则有:

$$\delta_e = (|ON| - |O'N'|) \frac{1 + \sin 2\theta}{\cos(\pi/4 - \theta)} \quad (19)$$

$$\text{设 } |\theta| < 2^\circ \text{ 时, } \frac{1 + \sin 2\theta}{\cos(\pi/4 - \theta)} < 1.463.$$

令  $|aa'| = 100 \text{ mm}$ , 当  $|ON| - |O'N'| < 4 \text{ }\mu\text{m}$  时可满足  $\theta_e < 0.2''$  的精度要求。

由式 (12) 可知, 在 AC 型五轴机床联动测量过程中, 干涉镜安装在主轴上, 因此 Y 轴的定位误差使干涉镜相对反射镜在 Y 轴方向上移动, 如图 4 所示, 使得光路  $A_1$ 、 $A_2$  在 Y 方向上平移, 此时光程差并不受影响, 即 Y 轴的定位误差不影响测量结果。Y 轴直线度包含 X 分量和 Z 分量, 由图 4 可知, X 分量不影响光路的分布, Z 分量

使得光在干涉镜的分光点  $a, a'$  发生  $Y$  向的移动, 同理由式(12)不影响光程差。但是  $Y$  轴在  $YZ$  平面内的俯仰可使反射镜相对于干涉镜的角度偏差等量变化, 即实际测量的角度结果为  $Y$  轴俯仰角与  $A$  轴角度偏差的叠加<sup>[20]</sup>。

综上所述, 影响测量结果精度的因素除  $Y$  轴俯仰角外, 其他影响因素均为测量系统的原理和元器件误差, 在直线度  $\theta < 2^\circ$  且测量步长在 100 mm 以内时, 能够达到精度要求, 此时可以忽略测量过程中直线度对旋转轴回转精度的影响, 从而精确测得实际角度。另外, 对于  $Y$  轴在  $YZ$  平面的俯仰角, 还可利用俯仰角测量系统来进行抵消补偿, 以准确测得摆动轴本身的角度。

### 1.5 多轴联动的 BC 摆轴几何精度测量原理

对于 BC 摆轴转台型五轴机床, 同样可以采取摆轴与直线轴同步运动的测量方法来进行转角误差测量, 摆轴  $B$  的精度测量原理如图 6 所示。摆轴  $B$  在  $XOZ$  平面内的旋转中心为  $O_b$ , 干涉镜固定在工作台上, 转轴  $C$  相对于激光器静止不动, 角度回转仪与反射镜安装在主轴上, 随  $B$  轴、 $X$  轴一起做相对转动与平移运动。当  $B$  轴在行程内运动时, 要保证激光光束回路不被干涉, 需要直线轴在  $X$  方向上进行同步运动,  $B$  轴与  $X$  轴的联合运动使得摆轴  $B$  从位置  $i$  旋转到位置  $j$  又旋转到位置  $k$ , 于此同时, 旋转反射镜的运动轨迹为与  $Z$  轴平行的直线运动, 从而保证了光束不被阻挡。测量结果同样不受  $X$  轴的定位误差影响, 测量过程与  $AC$  双转台结构相似, 根据  $B$  轴的实际摆动行程进行分段, 测得各点处的角度位置误差并补偿。

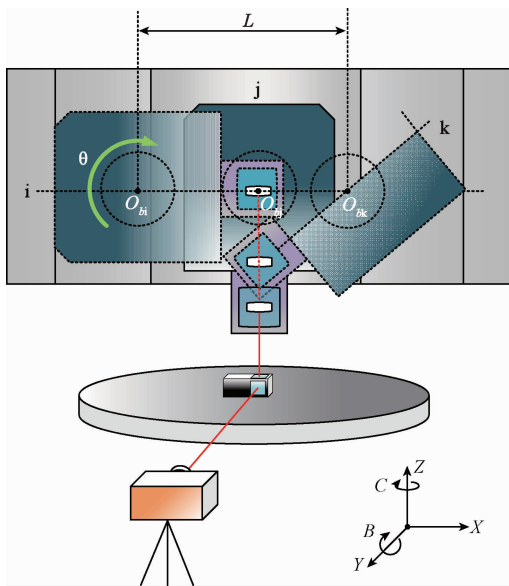
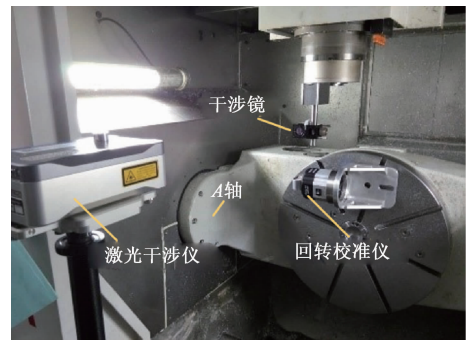


图6 摆轴  $B$  轴测量原理

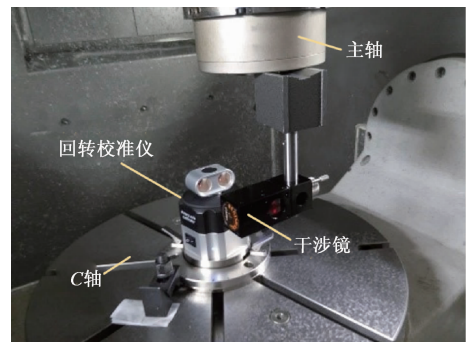
Fig. 6 Schematic diagram of Measurement for  $B$  axis

## 2 旋转轴几何精度测量与补偿

基于上述的五轴机床旋转轴转角误差测量原理, 针对机电院 XKR-50A 摇篮式双转台五轴数控机床的  $A$ 、 $C$  旋转轴进行角度转角误差、重复转角误差以及反向间隙测量, 并对旋转轴的转角误差和反向间隙进行补偿, 实验测量设备安装如图 7 所示。机床各进给系统均为全闭环控制, 旋转进给系统行程分别为  $A$  轴 ( $-120^\circ \sim 30^\circ$ ),  $C$  轴为 ( $0^\circ \sim 360^\circ$ )。激光测量设备采用雷尼绍公司的 ML80 激光干涉仪以及组镜, 旋转进给系统测量所需的角度校准系统采用雷尼绍的 XR20-W 回转校准器, 其重复定位精度可达  $0.2''$ 。该校准器可以通过蓝牙连接将信号无线传输给 PC 端进行位置计算。



(a)  $A$ 轴测量实验现场  
(a) Measurement for  $A$  axis

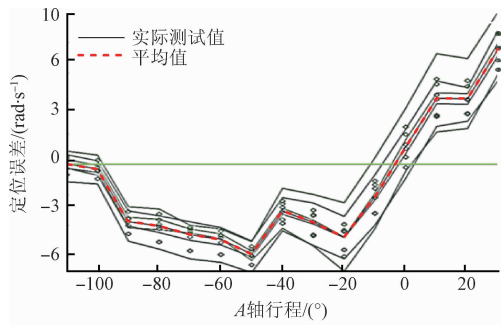


(b)  $C$ 轴测量实验现场  
(b) Measurement for  $C$  axis

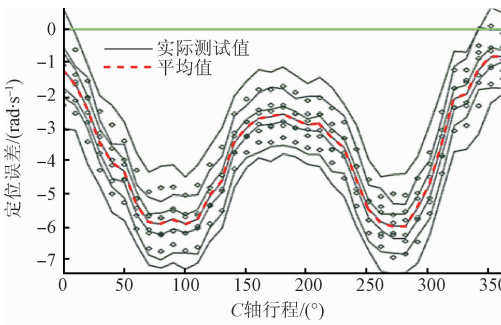
图7  $A/C$  轴几何误差测量现场图

Fig. 7 Geometric error measurement for  $A/C$  axis

如图 7(b) 所示,  $C$  轴测量过程中回转校准器安装在  $C$  轴轴心,  $\Phi$  取  $10^\circ$  将  $C$  轴行程均分为 36 份;  $A$  轴测量过程中回转校准器则安装在工作台的任意位置, 起始位置为  $-110^\circ$ ,  $\Phi$  取  $10^\circ$  将  $A$  轴行程均分为 14 份。测量共计 5 次, 每次来回各 1 次, 无补偿的  $A$ 、 $C$  轴转角误差曲线如图 8 所示。



(a) A轴无补偿下行程内的转角误差曲线  
(a) Position error of A axis without compensation



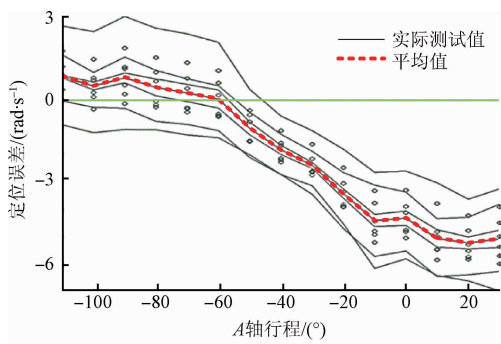
(b) C轴无补偿下行程内的转角误差曲线  
(b) Position error of C axis without compensation

图 8 五轴机床旋转进给系统转角误差测量结果

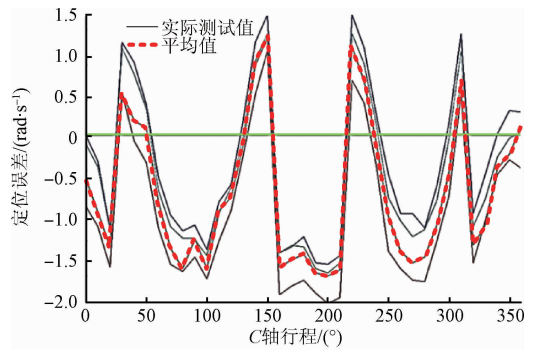
Fig.8 Position Error for rotary axis

最终几何误差结果取 5 次实验的平均值,均值如图 7 中虚线所示,根据实验测量可以看出,AC 轴的角度定位误差较大,且在正负方向均存在累计误差,说明该几何误差是由于旋转轴传动部分螺距以及反向间隙引起的,可通过系统补偿进行消除。根据实测摆轴 A 和旋转轴 C 的角度定位误差与反向间隙进行几何精度补偿,补偿后的测试结果如图 9 所示。

A、C 轴补偿前后的转角误差、重复转角误差和反向间隙测量结果如表 1 所示。通过对比补偿前后五轴机床进给旋转轴和摆轴转角误差可以看出,经过补偿后的摆



(a) A轴补偿后行程内的转角误差曲线  
(a) Position error of A axis after compensation



(b) C轴补偿后行程内的转角误差曲线  
(b) Position error of C axis after compensation

图 9 五轴机床进给系统转角误差补偿结果

Fig.9 Position Error for rotary axis after compensation

轴 A 转角误差达到 10.08", 旋转轴 C 转角误差达到了 4.77", 相对补偿前提升效果显著。由于进给系统为全闭环控制,重复转角误差和反向间隙都已经达到了很高的精度,仅通过补偿已经无法继续提升进给系统的静态精度等级,但已具备较高的旋转轴精度等级。

表 1 旋转轴补偿前后的精度指标

Table 1 Rotary axis geometry error before and after compensation

指标	摆动轴 A		旋转轴 C	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
转角误差	17.12" (0.004 8°)	10.08" (0.002 8°)	8.11" (0.002 3°)	4.77" (0.001 3°)
重复转角误差	5.14" (0.001 4°)	4.15" (0.001 2°)	3.65" (0.001°)	1.85" (0.000 5°)
反向间隙	0.92" (0.000 3°)	0.67" (0.000 2°)	1.06" (0.000 3°)	0.89" (0.000 3°)

实验结果说明该基于激光干涉仪的多轴联动测量方法能够有效的测量旋转轴的几何误差,通过补偿提高机床的加工精度。

### 3 结 论

根据五轴机床机构特性与激光干涉仪原理,采用旋转轴与直线轴联动的方法对旋转轴几何精度进行检测,相对于传统测量方法,该方法有效地解决了旋转轴旋转中心较难确定的问题,测量设备安装简便,实现旋转轴几何精度的快速测量。

通过推导分析可知测量过程中直线轴定位误差对旋转轴转角误差影响较小,当直线度误差  $\theta < 2^\circ$  时,保证测量步长在 100 mm 以下时,可使激光干涉系统的光程差在

误差允许范围之内,从而保证测量结果为实际旋转轴几何精度。

对五轴双转台数控机床旋转轴进行几何精度测量,测量结果显示C轴定位误差由 $8.11''$ 减小到 $4.77''$ ,重复定位误差由 $3.65''$ 减小到 $1.85''$ ;A轴定位误差由 $17.12''$ 减小到 $10.08''$ ,重复定位误差由 $5.14''$ 减小到 $4.15''$ ,提升了五轴机床旋转轴的几何精度。

基于激光干涉仪的多轴联动测量方法对于多种形式的五轴数控机床旋转轴几何精度测量都具有一定的通用性,操作过程简便,能够有效地提升五轴机床精度等级,具有较高的工程应用价值。

## 参考文献

- [ 1 ] 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.
- [ 2 ] CHEN G, YUAN J, NI J. A displacement measurement approach for machine geometric error assessment [ J ]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2001, 41(1):149-161.
- [ 3 ] 陈光胜, 李郝林. 多轴数控机床转台误差快速检测与分离[ J ]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11):2499-2505.  
CHEN G SH, LI H L. Fast geometric error measurement and identification of rotary table for multi-axis CNC machining tools [ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11):2499-2505.
- [ 4 ] ZHONG G Y, WANG CH Q, YANG SH F, et al. Position geometric error modeling, identification and compensation for large 5-axis machining center prototype[ J ]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2014, 89(2):142-150.
- [ 5 ] 杨平, 朱睿, 郭隐彪, 等. 基于激光干涉仪与自准直仪的平面镜轮廓高精度测量技术[ J ]. 机械工程学报, 2013, 49(17):52-58.  
YANG P, ZHU R, GUO Y B, et al. A high-precision measurement technique of flat mirror profile comprising interferometers and autocollimator[ J ]. Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2013, 49(17):52-58.
- [ 6 ] 邓辉, 谢俊, 孟广月, 等. 基于机器视觉的重复定位精度测量技术[ J ]. 电子测量技术, 2014, 37(12):45-48.  
DENG H, XIE J, MENG G Y, et al. Repeat positioning accuracy measurement technology based on machine vision[ J ]. Chinese Journal of Electronic Measurement Technology, 2014, 37(12):45-48.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 王伟兴, 郎小龙, 姚君. 多光谱成像仪几何特征标定技术研究[ J ]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8):70-73.  
WANG W X, LANG X L, YAO J. Study on geometric characteristic calibration of multispectral camera [ J ]. Chinese Journal of Foreign Electronic Measurement Technology, 2015, 34(8):70-73.
- [ 9 ] 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.  
ZHU J, LI X F, TAN W B. Method of geometric error detection for measuring machine based on laser interferometer [ J ]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10):25-30.
- [ 10 ] 黄敏晗, 张勇. 数控机床回转轴定位精度测量方法的分析比较[ J ]. 机电技术, 2013(4):134-136.  
HUAN M H, ZHANG Y. Analysis and comparison of measuring method for rotation axis in CNC machine tool[ J ]. Chinese Journal of Mechanical and Electrical Technology, 2013(4):134-136.
- [ 11 ] 王金栋, 郭俊杰, 费致根, 等. 基于激光跟踪仪的数控机床几何误差辨识方法[ J ]. 机械工程学报, 2011, 47(14):13-19.  
WANG J D, GUO J J, FEI ZH G, et al. Method of geometric error identification for numerical control machine tool based on laser tracker[ J ]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(14):13-19.
- [ 12 ] LEE K I, LEE D M, YANG S H. Parametric modeling and estimation of geometric errors for a rotary axis using double ball-bar [ J ]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 62(5-8):741-750.
- [ 13 ] ISO 230-7: 2006. Test code for machine tools-Part 7: Geometry accuracy of axes of rotation[ S ]. International Standardisation Organisation, 2006.
- [ 14 ] LV W H, BIAN Z Q, CHONG W. Design and implementation of automatic shading device for diffuse radiation measurement [ J ]. Instrumentation, 2015, 2(3):12-18.
- [ 15 ] 叶建华, 高诚辉, 江吉彬. 旋转台几何误差的在机测量与辨识[ J ]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12):2804-2811.  
YE J H, GAO CH H, JIANG J B. On-machine measurement and identification for the geometric errors of rotary table[ J ]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12):2804-2811.
- [ 16 ] 何振亚, 傅建中, 徐月同. 数控机床旋转轴转角定位

- 误差测量方法[J]. 浙江大学学报:工学版, 2015, 49(5):835-840.
- HE ZH Y, FU J ZH, XU Y T. New method to measure angular position errors of rotational axis of CNC machine tool [J]. Chinese Journal of Zhejiang University : Engineering Science, 2015, 49(5):835-840.
- [17] IBARAKI S, NAGAI Y, OTSUBO H. R-Test analysis software for error calibration of five-axis machine tools : Application to a five-axis machine tool with two rotary axes on the tool side [J]. International Journal of Automation Technology, 2015, 9(4):387-395.
- [18] LIN Y, SHEN Y. Modelling of five-axis machine tool metrology models using the matrix summation approach[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(4):243-248.
- [19] 曲兴田,赵永兵,刘海忠,等. 串并混联机床几何误差建模与实验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2017, 47(1):137-144.
- QU X T, ZHAO Y B, LIU H ZH, et al. Modeling and experiment of spatial geometric errors of hybrid serial-parallel machine tool [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition , 2017, 47(1): 137-144.
- [20] 高俊翔, 汤善治, 李明, 等. 数控机床圆检验测量技术及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12): 1805-1811.
- GAO J X, TANG SH ZH, LI M, et al. CNC machine tool

circular test measurement technology and application[J]. Chinese Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(12):1805-1811.

### 作者简介



**皮世威**, 分别在 2010 年和 2013 年于北方工业大学获得学士与硕士学位, 现为北京航空航天大学博士研究生, 主要研究方向为数控装备精度提升研究。

E-mail:pishiwei@buaa.edu.cn

**Pi Shiwei** received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from North China University of Technology in 2010 and 2013, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Beihang University. His main research interest is 5 axis machine tool accuracy improvement.



**刘强** (通讯作者), 1983 年于中南矿冶学院获得学士学位, 分别在 1989 年和 2000 年于北京航空航天大学获得硕士学位和博士学位, 现为北京航空航天大学教授、博士生导师, 主要研究方向为高精度数控机床数控技术研究。

E-mail:qliusmea@buaa.edu.cn

**Liu Qiang** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Central South University in 1983, and his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Beihang University in 1989 and 2000, respectively. Now he is a professor in Beihang University. His main research interest is high performance 5-axis machine tool CNC research.