

旋转轴与平移轴联动误差的快速测量及溯源

周玉清¹, 陶涛¹, 梅雪松^{1,2}, 姜歌东¹, 孙挪刚¹

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了对多轴数控机床旋转轴与平移轴联动误差进行快速测量与溯源, 提出了一种基于数控机床内置的光栅尺、编码器等无传感器信息的评估方法. 该方法通过对数控系统的二次开发, 可获取配置不同数控系统的多轴机床的无传感器信息, 依据旋转轴与平移轴的联动特性, 构造了具有一些球杆仪特征的虚拟杆, 且规划了虚拟杆切向测试路径, 并采用单旋转轴与两平移轴联动方式, 进行圆度误差测试, 实现了多轴数控机床旋转轴与平移轴联动误差的动态快速测量. 此外, 基于虚拟杆的工作原理, 分别建立了联动误差关联及解耦模型, 并提出了利用空间圆周图谱和小波频谱技术进行联动误差快速溯源的策略. 试验结果表明, 所提出的旋转轴与平移轴联动误差测试与溯源方法实用、有效, 为多轴数控机床旋转轴与平移轴联动误差补偿奠定了基础.

关键词: 旋转轴; 误差测试; 误差溯源; 无传感器

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)05-0080-05

Rapid Error Measurement and Trace of Simultaneous Rotary-Translational Axes Collaborative Motion

ZHOU Yuqing¹, TAO Tao¹, MEI Xuesong^{1,2}, JIANG Gedong¹, SUN Nuogang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To rapidly measure and trace the simultaneous rotary-translational (R-T) axes motion error of multi-axes numerical control (NC) machine tool, a kind of motion error estimation method based on built-in sensor, such as grid scale and motor encoder, is proposed. The sensorless information of multi-axis NC machine tool is obtained via the redevelopment of the different NC system. According to the characteristics of simultaneous R-T axes motion, a virtual bar with some functions of ballbar is constructed. And the virtual bar-based test path of circular error test through collaborative motion of a rotary axis and two translational axes is scheduled, which is implemented to measure the simultaneous R-T axes motion error of multi-axis NC machine tool. Then, the coupling and decoupling mathematical models of the motion error is established based on the test principle of the virtual bar, respectively. To localize the error sources conveniently, some typical spatial error charts and the wavelet spectrum analysis technology are introduced. The experimental results show the practicability and effectiveness of the proposed method for measuring the motion error.

Keywords: rotary axis; error measurement; error trace; built-in sensor

多轴联动数控机床一般由多个直线轴和旋转轴组成, 具有许多普通数控机床无法比拟的优点, 但其加工精度往往低于普通数控机床, 主要原因是旋转轴与平移轴的联动误差没有得到保证^[1]. 在高速、高

加速度的工况下,旋转轴与平移轴的联动误差表现更为突出^[2],问题的关键在于对联动误差缺乏有效的测量、分离与补偿。目前,在关于多轴数控机床旋转轴与平移轴联动误差测量研究方面,很多工作是基于球杆仪、平面光栅以及其他专用设备对机床进行圆运动测试来实现的^[3-4],尽管此方法可获取联动误差信息,实现机床静态性能的评估,但不能对旋转轴动态误差进行测量,并且成本、测量装置的安装等也制约了其应用,从而为多轴数控机床旋转轴与平移轴联动误差的评估带来了困难。

目前,无传感器信息已在伺服控制、状态监测等方面得到广泛的应用^[5-6],但鲜有涉及到旋转轴与平移轴联动误差测量与溯源。本文通过深入研究无传感器的测试原理,规划了虚拟杆切向测试路径,采用单旋转轴与两平移轴联动方式,进行圆度误差测试,建立了联动误差测量及溯源模型,给出了典型的仿真联动误差圆周图谱,从而实现了旋转轴与平移轴联动误差的测量与溯源。

1 无传感器的测试原理及 R-T 轴联动误差测量

用户通过深入数控系统软硬件核心,获取开放式数控系统无传感器的信息,并根据所需进行二次开发。对于诸如 Fanuc、Siemens 等通用数控系统,可通过购买 OEM 软件包来进行二次开发。

1.1 多轴联动误差建模

设 $P(x_i, y_i, z_i)$ 是目标空间测试曲线上任意一点的坐标, $P_1(x_{1i}, y_{1i}, z_{1i})$ 是相对于该位置点的光栅标尺或电机编码器的实际测量值,则 P 和 P_1 的联动误差可表示为^[6]

$$e_i = (x_i \Delta x_i + y_i \Delta y_i + z_i \Delta z_i) / L \quad (1)$$

$$\Delta x_i = x_{1i} - x_i; \Delta y_i = y_{1i} - y_i; \Delta z_i = z_{1i} - z_i$$

式中: L 为 P 与坐标原点 O 的指令距离。当联动误差主要表现为伺服增益不匹配误差时,则

$$e_i = \left(x_i \frac{F_x}{K_{px}} - y_i \frac{F_y}{K_{py}} - z_i \frac{F_z}{K_{pz}} \right) / L \quad (2)$$

式中: K_{px} 、 K_{py} 、 K_{pz} 分别为 X 、 Y 、 Z 轴的位置环增益; F_x 、 F_y 、 F_z 分别为 X 、 Y 、 Z 轴方向的测试分速度。

1.2 R-T 轴联动测试路径规划

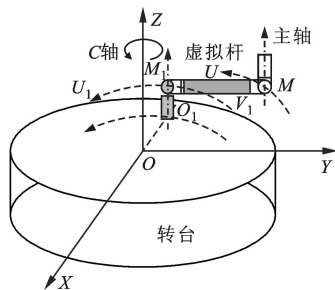
对于旋转轴,误差方向和旋转轴速度方向一致,即联动误差一直与旋转轴自转圆正切,因此提出一种虚拟杆切向安装测试技术,可获取平移轴与旋转轴的联动误差。虚拟杆的含义包括:①杆是不存在

的,只是用来表征一定长度的虚拟标尺;②虚拟杆具有球杆仪的一些功能,误差导致的变化可在虚拟标尺上显现出来;③虚拟杆的变化值可用无传感器测得,容易实现联动误差的在线测量与溯源。

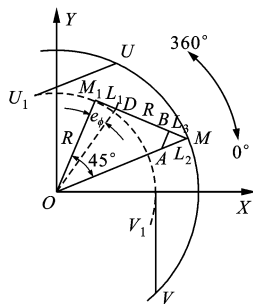
如图 1 所示, MM_1 为虚拟杆, L_1 、 L_2 、 L_3 分别为点 M_1 和 D 、点 A 和 M 、点 B 和 M 之间的长度, UMV 和 $U_1M_1V_1$ 为虚拟杆测试时两端形成的轨迹。当 C 轴以一定的测试速度匀速转动时,随动圆 UMU 在 X - Y 平面上被插补,以保证虚拟杆 MM_1 在测试过程中始终正切半径为 R 的测试圆 $U_1M_1V_1$ 。理论上 $U_1M_1V_1$ 是 UMV 平面上的虚拟圆,是由 C 轴自转插补而成的。由于测试圆和随动圆通过虚拟杆相连接,因此 M 和 M_1 点的角速度相等。测试曲线可写成

$$\left. \begin{aligned} X &= 2^{1/2} R \cos\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) \\ Y &= 2^{1/2} R \sin\left(\theta - \frac{\pi}{4}\right) \\ Z &= Z_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: θ 为 C 轴的瞬时角度; Z_0 表示 Z 轴的位置。



(a) 切向安装



(b) 路径规划

U 、 V : 圆弧点; R : 圆半径; U_1 、 M_1 、 V_1 : 虚拟杆轨迹点

图 1 虚拟杆测试路径规划

旋转轴与平移轴的联动误差测试过程如下:在全闭环或半闭环位置控制下, C 轴按给定速度在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 间往复转动一次, X 、 Y 轴同步随动, 同时记

录 X 、 Y 、 C 轴光栅尺或编码器的反馈值,从而进行旋转轴与平移轴联动误差的评估。

2 R-T 轴联动误差分离及溯源

2.1 R-T 轴联动误差分离

误差分离是进行误差补偿的重要基础。如图 1b 所示, $e_{ci}=L_3$, $e_{xyi}=L_1$, 则联动误差的分离步骤为:
①同时获取 M 点在 X 、 Y 轴上的光栅尺或编码器值,计算出跟随误差

$$e_{si} = (X^2 + Y^2)^{1/2} - H \quad (4)$$

②由 e_{si} 计算出 X 、 Y 轴在虚拟杆上的作用误差

$$e_{ci} = 2^{-1/2} e_{si} \quad (5)$$

③由式(1)计算虚拟杆的旋转轴与平移轴联动误差

$$e_i = ((X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2)^{1/2} - R \quad (6)$$

④由于 $e_i = e_{xyi} + e_{ci}$, 因此

$$e_{ci} = e_i - e_{xyi} \quad (7)$$

⑤若 C 轴联动运行时角度误差 e_{ϕ} 较小, 则 C 轴在不同位置点的角度误差

$$e_{\phi_i} = \arctan(e_{ci}/R) \quad (8)$$

2.2 R-T 轴联动误差溯源

误差溯源是进行误差补偿的重要手段, 旋转轴与平移轴的联动误差源有: ① X 、 Y 平面上的随动圆轮廓误差; ② C 轴的跟随误差。由于可做出随动圆的二维圆周误差图谱, 所以对于 X 、 Y 轴的误差溯源较为容易, 而 C 轴误差源主要是由伺服控制策略造成的, 如伺服增益不匹配引起的误差, 以及由旋转轴机械传动部件产生故障导致的振动误差。针对旋转轴联动误差的不同原因, 本文提出了空间圆周误差图谱法和小波频谱的分析方法。

2.2.1 伺服增益不匹配空间圆周误差图谱 对于旋转轴与平移轴的联动误差, 伺服增益不匹配误差是最大的误差源之一。由式(2)可分别得出逆时针和顺时针伺服增益不匹配时的联动误差

$$e_{wc} = 2^{-1/2} F \cos(2\beta) \left(\frac{1}{K_{px}} - \frac{1}{K_{py}} \right) - R \frac{F_{ca}}{K_{pc}} + 2^{-3/2} F \sin(2\beta) \left(\frac{1}{K_{py}} - \frac{1}{K_{px}} \right) + 2^{-1/2} F \left(\frac{\sin^2 \beta}{K_{py}} + \frac{\cos^2 \beta}{K_{px}} \right) \quad (9)$$

$$e_{wi} = -e_{wc} \quad (10)$$

式中: K_{pc} 、 F_{ca} 分别是 C 轴的位置增益系数和角速度。

根据测试圆和随动圆的运动关系, 得到

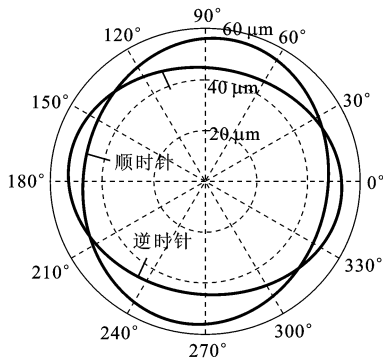
$$RF_{ca} = 2^{1/2} F \quad (11)$$

由式(9)~式(11)可知, 当 $K_{px} = K_{py} = K_{pc}$ 时, 联动

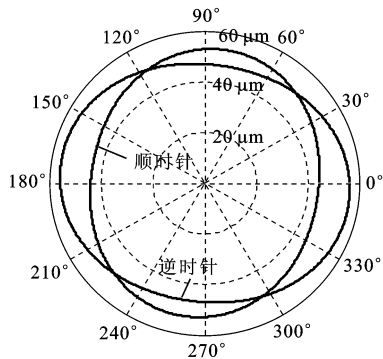
误差为 0。借助圆周误差图谱原理^[3], 以空间圆周误差为半径、 β 为角度作误差图谱, 得到

$$\beta = \arctan(y/x) \quad (12)$$

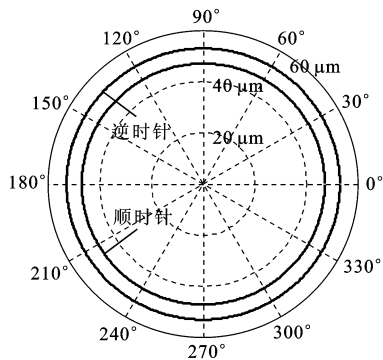
如图 2 所示, 当联动测试条件分别为 $K_{px} < K_{py} = K_{pc}$ 和 $K_{px} < K_{py} = K_{pc}$ 时, 空间圆周误差图谱呈椭圆形, 并且其最大值分别出现在像限 I ($0^\circ \sim 90^\circ$) 和像限 III ($180^\circ \sim 270^\circ$), 或像限 II ($90^\circ \sim 180^\circ$) 和像限 IV ($270^\circ \sim 360^\circ$)。当联动测试条件为 $K_{px} < K_{py}$ 时, 逆时针测试误差图谱外扩, 反之, 顺时针测试误差图谱内缩。因此, 根据图 2 所示的空间圆周误差图谱, 可快速判断由伺服不匹配造成的旋转轴与平移轴的联动误差, 从而实现误差溯源。



(a) $K_{px} < K_{py} = K_{pc}$



(b) $K_{px} > K_{py} = K_{pc}$



(c) $K_{px} < K_{px} = K_{py}$

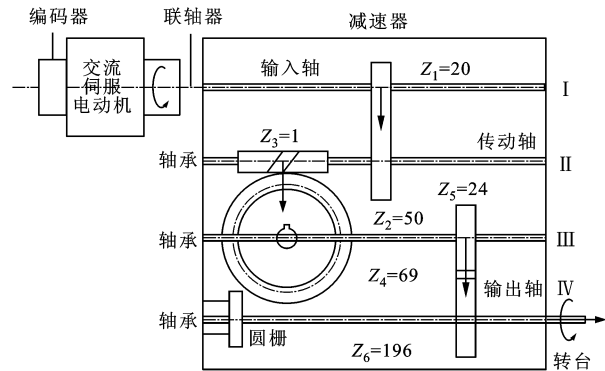
图2 仿真测试得到的空间圆周误差图

2.2.2 小波频谱分析法 多轴联动数控机床旋转轴经常由齿轮、蜗轮蜗杆减速器等构成. 机械故障的复杂性导致测试信息具有复杂、不平稳的信号特征, 采用传统的时域、频域分析很难进行故障特征提取. 由于小波具有消噪、滤波、能识别早期故障等优点, 因此采取小波分析和频谱分析相结合的方法来实现由旋转轴机械传动故障所引起的误差溯源.

3 试验分析

3.1 试验平台搭建

如图 3 所示,以某数控加工中心为试验对象,它由 3 个直线轴和 1 个旋转轴(C 轴)组成. 数控系统是 Siemens 840D,4 个轴均采用位置全闭环控制. C 轴的传动结构主要是 3 级减速器:第 1 级为皮带轮减速系统;第 2 级为蜗轮蜗杆减速系统;第 3 级是齿轮减速系统,总减速比为 5 635 : 4. 将反馈测量装置圆光栅安装在 IV 轴上,测试采用 PC+IK220 计数器板卡结构,以获取光栅正弦波信号.



$Z_1 \sim Z_6$: 各级传动部件的齿数; I、II、III、IV: 传动轴

图 3 C 轴减速器的结构

3.2 试验规划与数据分析

对 X、Y、C 轴以 $F=888.7 \text{ mm/min}$ 进行全行程往复匀速测试,虚拟杆长为 100 mm,由数据采集系统同时获取 X、Y、C 轴光栅尺的实际反馈值,采样频率为 27.77 Hz.

根据 X、Y、C 轴光栅尺的测试值可做出基圆为 $200 \mu\text{m}$ 的空间误差圆周图谱,如图 4 所示. 当逆时针测试时,最大联动误差为 $150.3 \mu\text{m}$,出现在 0.6° 处,峰峰值为 $153.8 \mu\text{m}$. 当顺时针测试时,最大联动误差为 $113.8 \mu\text{m}$,出现在 -314.7° 处,峰峰值为 $78.6 \mu\text{m}$. 当测试联动误差呈现周期性振动时,将对零件的加工质量有很大影响,因此必须对误差的产生原因进行分析.

3.3 伺服控制误差源

如图 4 所示,当逆时针联动测试时,误差相对于基圆外扩,当顺时针测试时,误差相对于基圆内缩. 由图 2c 可知,系统存在伺服不匹配,且 $K_{pc} < K_{px} = K_{py}$,因此 C 轴的伺服位置增益 K_{pc} 需进一步作调整和优化.

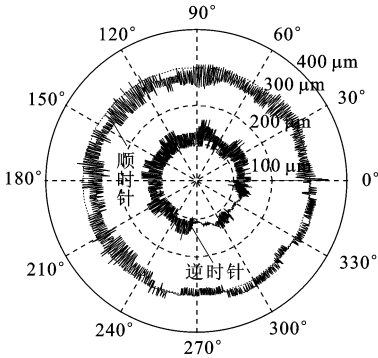


图 4 顺时针和逆时针测试空间的误差圆周图

3.4 X、Y、C 轴误差溯源

图 5 是根据 X、Y 轴光栅尺反馈值所作的二维误差圆周图谱. 跟随误差大多在 $-8 \mu\text{m}$ 内波动,极大峰值出现在过像限处,是爬行误差,但总体上 X、Y 轴运行较平稳. 以逆时针测试为例,分析 X、Y 轴的圆运动跟随误差对总体联动误差的影响,根据虚拟杆的切向安装特点,可计算出作用误差,误差最大峰峰值为 $30 \mu\text{m}$,这主要是由摩擦造成的.

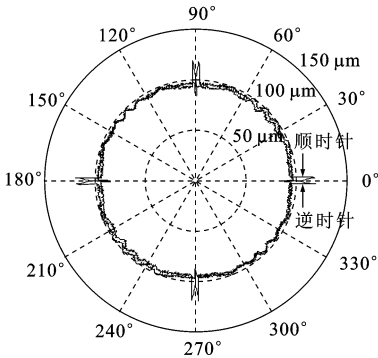


图 5 X、Y 轴顺时针和逆时针测试误差溯源

根据式(7)和式(8),进一步得出 C 轴的近似角度误差,如图 6 所示,C 轴联动误差是一个在 $0.016^\circ \sim 0.086^\circ$ 范围内呈周期性振荡的复杂、不平稳信号. 为进行误差溯源,采用 Db8 小波对 e_{ϕ_i} 信号进行小波分解(见图 7a),经 3 次分解可得到低频逼近信号 A_3 和 高频细节信号 D_1 、 D_2 和 D_3 . 从 A_3 波形中,可看到周期性低频特征的存在,并且 D_2 在 $0 \sim 40 \text{ s}$ 间明显地出现振荡,这都表明 C 轴伺服进给系统运行的

不稳定性. 为了精确定位故障源,采用快速傅里叶变换对 D_2 进行了频谱分析,结果如图 7b 所示,其主要频率成分为 0.136 Hz. 与表 1 对比并结合 C 轴传动结构可知,系统振荡是由于传动轴 II 存在间隙所致.

表 1 C 轴的工作频率和啮合频率			
轴	转频/Hz	齿轮	啮合频率/Hz
I	23.749	Z_1/Z_2	474.980
II	9.392	Z_3/Z_4	9.392
III	0.136	Z_5/Z_6	3.267
IV	0.017		

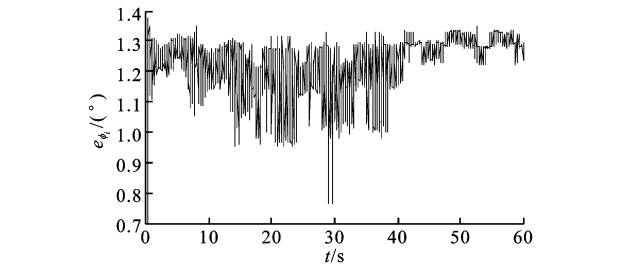
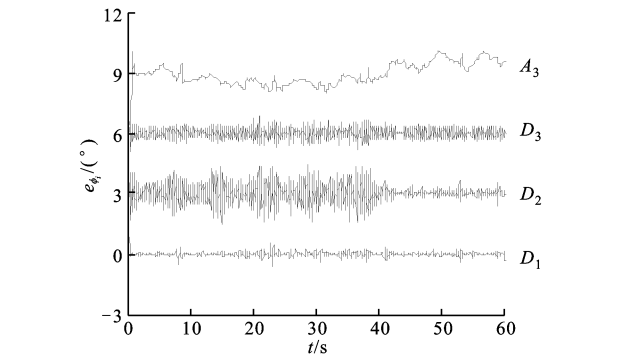
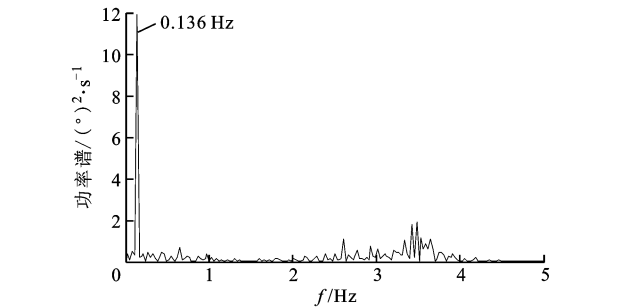


图 6 C 轴联动误差分离



(a)C 轴联动误差的 Db8 小波分解



(b) D_2 功率谱的分析

图 7 基于 Db8 小波的 C 轴误差溯源

4 结 论

本文通过对无传感器(光栅尺、编码器)的多轴联动数控机床旋转轴与平移轴联动误差在线测试与溯源方法的研究,得出如下结论.

(1)理论和试验表明,基于无传感器和虚拟杆的旋转轴联动误差测量与辨识策略是可行有效的,并且无传感器测量不需要安装额外的传感器或测量装置,系统即可在线运行.

(2)利用文中所建议的空间误差圆周图,可进行误差快速溯源,并在误差分离的基础上,借用小波频谱分析技术,可进行旋转轴复杂的、非线性的故障与误差溯源.

参考文献:

[1] TSUTSUMI M, SAITO A. Identification of angular and positional deviations inherent to 5-axis machining centers with a tilting-rotary table by simultaneous four-axis control movements [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(11): 1333-1342.

[2] MEI Xuesong, TSUTSUMI M, TAO Tao, et al. Study on the compensation of error by stick-slip for high-precision table [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(5): 503-510.

[3] WANG Shihming, EHMANN K F. Measurement methods for the position errors of a multi-axis machine, part 1: principles and sensitivity analysis [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(6): 951-964.

[4] IWAI H, MITSUI K. Development of a measuring method for motion accuracy of NC machine tools using links and rotary encoders [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(1): 99-108.

[5] PLAPPER V, WECK M. Sensorless machine tool condition monitoring based on open NCs [C]// Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001: 3042-3046.

[6] GANDHI P S, GHORBEL F H. Closed-loop compensation of kinematic error in harmonic drives for precision control applications [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(6): 759-768.

(编辑 管咏梅)