

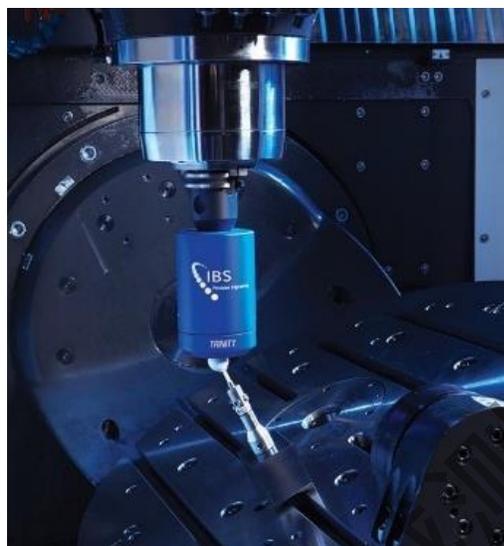
基于软件旋转轴误差补偿法提高五轴机床精度

Theresa M. Spaan-Burke¹, Guido Florussen¹, Jorris Janssenswillen¹,
Henny A.M. Spaan¹

¹IBS Precision Engineering, Eindhoven, Netherlands

1 简介

复杂的工件，如涡轮叶片、叶轮、医疗假体和复杂的机架，目前通常在 5 轴机床上制造。5 轴连续运动由机器的 3 个线性轴和 2 个旋转轴组合实现。这些轴位置的稳定性对于满足几何公差至关重要。本文采用快速、准确的三维测量方法对旋转轴枢轴线的稳定性进行分析，以确定动态机器的 5 轴性能。



这些变形的影响高度依赖于机床或工件本身。

如果可以测量枢轴**轴线位置和方向的误差**，则可以在控制器中对其进行补偿，以进一步优化，从而提高机器的精度。然后可以用 5 轴测试来验证这种精度的提高。

为了确定旋转轴枢轴线的**位置和方向**，使用旋转检查器（IBS RI），见图 1。一个三维无线非接触式探头被放置在主轴上，代表切削刀具。放置在工作台上的精密标准球代表工件。根据 ISO10791-6 应用测量序列来确定机器的运动精度。

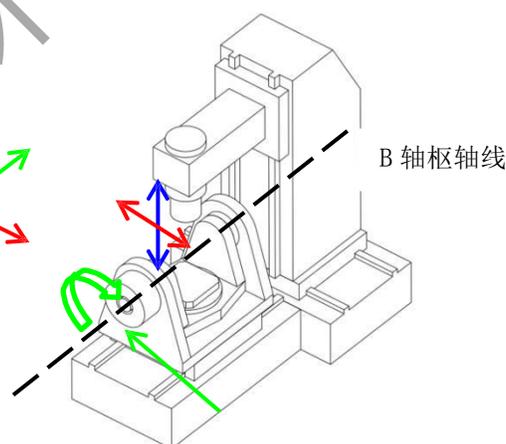


图 2

2 实验程序

在 5 轴加工过程中，主轴和工作台之间的连续运动是通过机器的三个线性轴和两个旋转轴的同步组合实现的。这些旋转轴与其他旋转轴的正确的位置对于满足几何公差至关重要。位置错误可能是由于以下原因造成：

1. 几何错位（例如，在机器制造时，碰撞后或工件加负载后）。
2. 温度变化过程中的变形。

对于工作台上有两个旋转轴的耳轴工作台机器，进行了三个运动学测试，分别命名为 BK1、BK2 和 BK4。在 BK1 测试中，见图 2，B 轴被命令移动 $\pm 90^\circ$ ，而线性轴 X 和 Z 跟随运动。通常，这将在 30 秒内完成。在一台完美的机器中，旋转轴和线性轴将完美地相互跟随。在实践中，会出现误差，并使用在 3 轴测试中观察到的相对位置偏差来确定 B 轴枢轴线上的相对偏移。

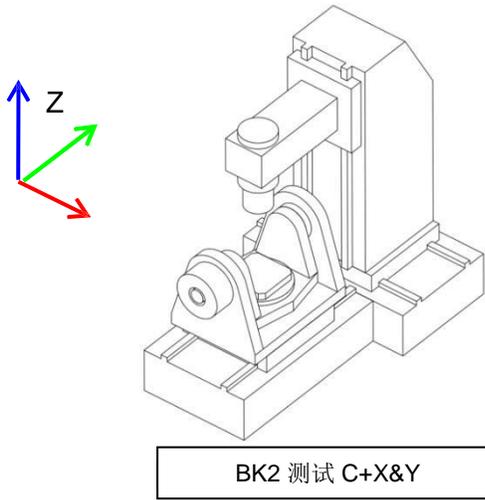


图 3. BK2 测试.

对于 BK2 测试，C 轴顺时针和逆时针旋转一整圈，X 轴和 Y 轴紧随运动。确定 C 轴轴线的位置和方向。

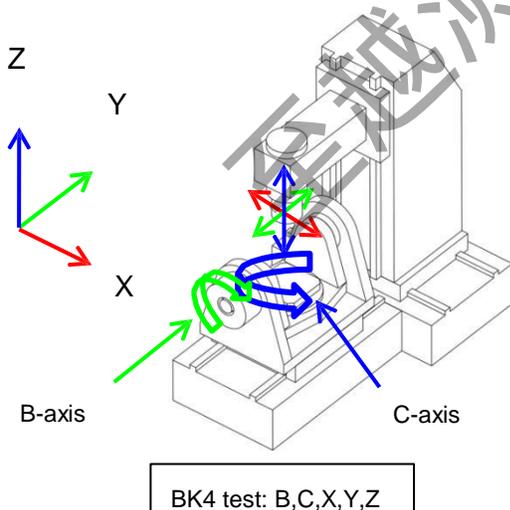


图 4. BK4 测试原理.

整体 5 轴精度通过 BK4 测试进行测量，见图 4。在该测试中，C 轴在其整个范围内的移动速度是 B 轴的两倍，而 X 轴、Y 轴和 Z 轴跟随运动，覆盖了机器的大部分工作空间。RI 系统以自动顺序在大约 1 - 1.5 分钟内执行 BK1、BK2 和 BK4 测试，允许用户对机器的精度进行“快照”

表 1 B-axis RI 检测结果.

术语 (ISO 10791-6)	
XOB	X 方向的位置偏差 (μm)
ZOB	Z 方向的位置偏差 (μm)
AOB	B 轴绕 X 的垂直误差 (deg)
COB	B 轴绕 Z 的垂直误差 (deg)

在执行 BK1 和 BK2 测试后，可以在控制器中补偿轴枢轴线上的误差。表 1 中列出了 BK1 试验得出的误差作为示例。全 BK4 五轴试验可用于补偿前后的精度比较测量。

本文介绍了两个案例研究，第 3 节关于几何错位；在关于热稳定性的第 4 节中。

3 几何对准的作用

在 DMU50 五轴机床上进行测量，并使用数据补偿几何误差。在图 5 中显示了测量结果，显示了在 5 轴 BK4 测量过程中旋转工作台和线性轴位置之间的 X、Y 和 Z 偏差。这些偏差的范围表明 5 轴精度为 $69\mu\text{m}$ 。

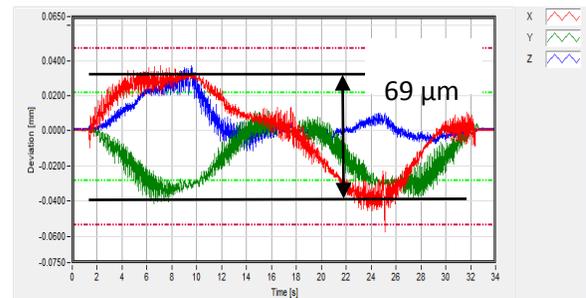


图 5. 补偿前 f BK4 检测

补偿:

首先，BK1 和 BK2 测量。然后对旋转轴的垂直度误差进行补偿。观察到，由此产生的总 5 轴误差为 0.0382 mm (图 7)，略大于未补偿垂直度时的值 (0.019 mm) (图 6)。尽管单独的 3 轴误差测量 (BK1 和 BK2) 表明在补偿枢轴位置之后有所改善，但还是发生了这种情况。

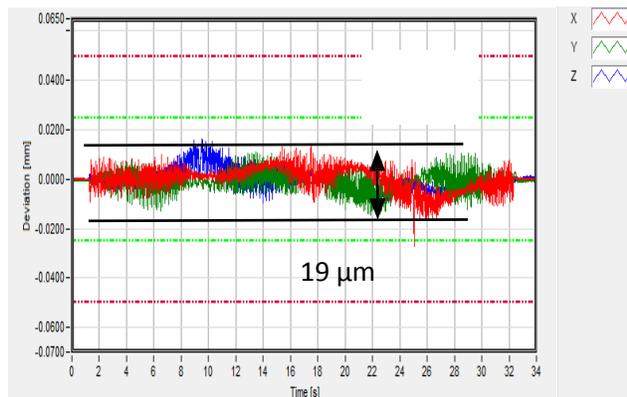


图 6. BK4 测试枢轴点补偿, 没补偿垂直度.

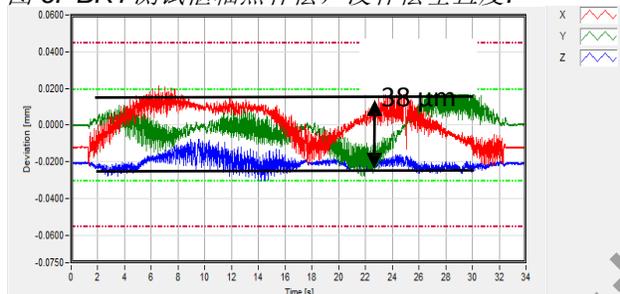


图 7. BK4 测试 补偿枢轴点和垂直度

为了解决这一问题, 进行进一步的测量。在 BK1 测量中, 测量 B 轴时, C 轴处于零位置, 球放置在 +Y 方向上 177mm。然后在 C 轴为 180° 的情况下重复 B 轴测量, 此时球 -Y177mm 的位置 (图 5)

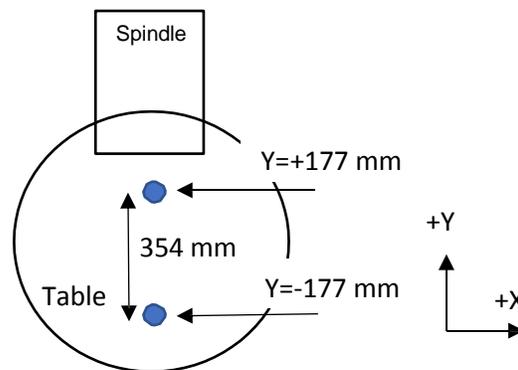


图 8. 显示用于 BK1 测试的两个主球位置.

Y 保持不变, 两次测量的 Z-X 平面中的枢轴线误差应该相同。但事实并非如此, 见表 2。在这两次测量之间, B 轴枢轴线在 Z 方向上的位移为 18.6μm

表 2 在 Y=177 和 Y=-177mm 枢轴点误差。

位置 [mm]	XOB [μm]	ZOB [μm]	AOB [°]	COB [°]
Y=-177	4.1	-18.9	0.0005°	-0.0002°
Y= +177	0.6	-0.3	0.0002°	0.0001°
Max-min	3.5	18.6	0.0003°	0.0003°

该结果表示 Y 轴和 Z 轴之间的垂直度误差 (Y 轴在 Z 方向下垂, 同时在 Y 方向向外移动)。这可以计算 $(0.019/354) = 0.0031^\circ$, X 中的枢轴线差异仅为 3.5μm, 不作进一步考虑。

校正此 Y-Z 垂直度误差, AOB 的 B 轴参数已调整了 0.003°, 并再次重复 BK4 测试。图 9 显示了补偿后的结果, 观察到了很大的改善; 这里只检测到 15μm 的振幅。

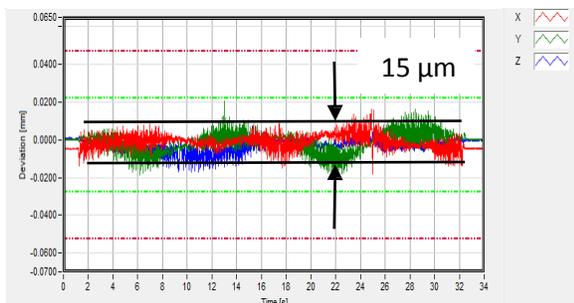


图 9. AOB 调整了 0.003 度后 BK4 测量结果

在补偿 5 轴机床时，5 轴测试被证明是最后检查的关键。

4 热稳定性

即使在优化了机器的精度之后，精度也可能受到温度变化等误差源的影响。本节研究了机床预热对 5 轴精度的影响。这种情况下，测量是在另一台 DMG 机器上进行的。为了加热机床，连续移动其轴[4, 5]。将包含 BK1、BK2 和 BK4 测试的测量序列放入一个循环中，并重复确定两个旋转轴的枢轴的位置和方向误差。

在表 3 中，结果表明，在 30 分钟的热循环中，B 轴的垂直度没有显著变化（小于 1 毫度）。然而，枢轴线位置在 X 方向偏移了 $-5.0\mu\text{m}$ ，在 Z 方向偏移了 $-11.2\mu\text{m}$

表 3 B 轴枢轴点和垂直度误差

B-axis	XOB [μm]	ZOB [μm]	AOB [$^{\circ}$]	COB [$^{\circ}$]
Time	Value	Value	Value	Value
t=0	-17.7	-29.8	-0.0073	-0.0091
t=5 min	-18.6	-30.9	-0.0071	-0.0091
t=30 min	-22.7	-41.0	-0.0071	-0.0100
Max-min	-5.0	-11.2	0.0002	0.0009

该加热循环期间 C 轴的结果如表 4 所示。C 轴的枢轴线显示出类似的效果，漂移为 $X=-9.5\mu\text{m}$ ， $Y=-7.1\mu\text{m}$ ，而垂直度误差变化小于 0.3 毫度。

表 4 预热期间 C 轴枢轴点和垂直度误差。

C-axis	XOC [μm]	YOC [μm]	AOC [$^{\circ}$]	BOC [$^{\circ}$]
Time	Value	Value	Value	Value
t=0	-17.9	-31.9	-0.0005	0.0002
t=5 min	-21.1	-32.6	-0.0006	0.0003
t=30 min	-27.4	-39.0	-0.0008	0.0002
Max-min	-9.5	-7.1	-0.0003	-0.0001

相对较短的预热周期已经显示出枢轴线位置的显著误差，这将对零件精度产生显著影响。使用 IBS RI 测量系统，这些错误可以得到补偿，如前一段所示。由于测量可以在生产过程中在 1-1.5 分钟内完成，因此可以不断提高机器的精度。

5 摘要

3D 无线探头和标准球用于在大约 1-1.5 分钟内测量和补偿五轴机床。

该系统不仅用于识别旋转轴的误差，而且由于 BK4 测试包括所有机器的轴，因此可以识别和校正线性轴的垂直度误差

连续运行三个 ISO 运动学测试 BK1、BK2、BK4，可以评估机器的热稳定性。

补偿是提高机器精度的一种有效方法，但应始终通过 5 轴测试进行检查，因为单独的 3 轴测试可能会导致误导性结果或令人失望的机器精度。

确认

该项目得到欧洲区域发展基金在安大略省可持续发展方案范围内的共同资助。

参考：

- [1] E. Trapet, J.J. Aguilar Martin, and H. Spaan, Method for checking a rotary axis with self-centering sensing device, Patent EP2 050 534 B1, 2003.
- [2] S. Weikert, "R-test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools", Annals of CIRP, Vol. 53, No.1, p429-432, 2004.

- [3] B. Bringmann, W. Knapp, "Model based 'Chase-the-ball' Calibration of a 5-axes Machining Centre", Annals of CIRP, Vol. 55, No.1, 2006.
- [4] ISO 230-3, "Test code for machine tools – Part 3: Determination of thermal effects", second edition, 2007.
- [5] ISO 10791-10, "Test conditions for machining centres – Part 10: Evaluation of thermal distortions", first edition, 2007.
- [6] G. Florussen, M. Morel, H. Spaan, "Assessing the impact of rotary axes on the dynamic accuracy of machine tools", 9th Lamdamap conference, p28-37, 2009.
- [7] H. Spaan, G. Florussen, "Determining the 5-axes machine tool contouring performance with dynamic R-test measurements", 12th Euspen conference, Stockholm, Sweden, p377-381, June 2012.
- [8] ISO 10791-6, "Test conditions for machining centres – Part 6: Accuracy of speeds and interpolations", second edition, December 2014.

至越测控技术文档

