



机床和半导体制造设备的精密测量技术(I)

利用机动球杆的三维空间误差评价技术

朴喜载 (韩国)

金永三 (韩国)

文章编号: 1006-883X (2000) 01-0001-05

摘要: 本文介绍机动球杆系统的基本原理、特点和用途。该系统可在几小时内完成机床和半导体制造设备的三维空间误差评估。

关键词: 机床、设备、评价、误差、测量。

使用的测量设备是激光干涉仪。然而激光干涉仪具有价格昂贵, 测量方法复杂, 测量时间长等缺点, 因此大部分用户只测量简单的位置误差。

对机床和半导体制造设备的生产商及用户来讲, 为了维持设备的性能和保证产品的质量, 设备的性能评估是极其重要的问题。

作轴向运动的单轴结构中存在 6 个误差成份 (图 1): 轴向运动方向有位置误差 (Positional Error), 导轨的纵向有纵向正直度误差 (Vertical Straightness Error), 导轨的横向有横向正直度误差 (Horizontal Straightness Error), 轴向运动方向有转动角误差 (Roll Error), 导轨的垂直方向有斜度误差 (Pitch Error) 和侧滑角误差 (Yaw Error)。一般多轴机床的精度由多种误差成分决定, 除上述误差外, 一般多轴机床中还有各轴之间的垂直度误差。即, 作三轴运动的机械具有三个垂直度误差, 共有 21 个运动误差成分。为了对包含许多误差成分的机床和半导体制造设备进行性能评估, 目前为止经常

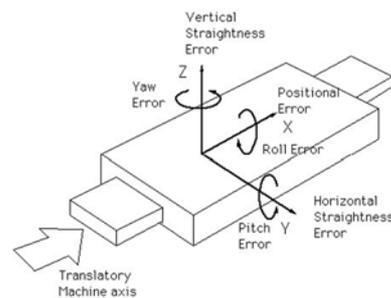


图 1 单轴运动的误差成分

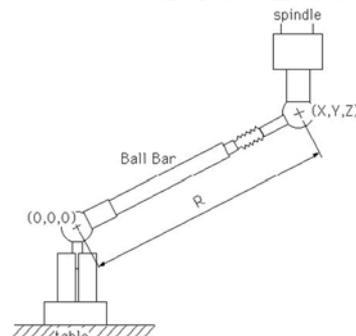


图 2 利用机动球杆的误差测量



因此，研究开发在机械的三维空间中进行简单而有效的误差评估的测量仪器是十分必要的。在这样的背景下，可以方便地对机床进行性能评估的机动球杆测量技术越来越受到重视。机动球杆系统由两个超精度的钢球和连接两个球的机动球杆组成，机动球杆中内制精密的 LVDT (线性可调差接变压器 : Linear Variable Differential Transducer) 传感器，可测量圆周内插运动时产生的半径误差。这种方法也适合于 ISO 230-4 的圆周滞后、圆周偏差、半径偏差等的评估。但是，现有的球杆测量方法局限于评估圆周内插运动时的圆弧轨迹误差，不能分析各种运动误差和其他动态误差。SNU Precision 株式会社和汉城大学机械设计系精密测量实验室共同开发了可分析三维空间误差的机动球杆系统 (AVEC-100)，此系统可在几个小时内完成机床和半导体制造设备的三维空间误差评估，并可分析 27 个误差成分。下面较详细地说明机动球杆的基本原理及 AVEC-100 的特征和用途。

一、利用机动球杆测量误差的基本原理

连接两个钢球的机动球杆中内制了精密的 LVDT 传感器，典型的安装方法是把两个钢球固定在机床的主轴和桌面上。

如果设定桌面钢球的中心坐标为 $O(0,0,0)$ ，主轴钢球的中心坐标为 $P(X,Y,Z)$ ，两个中心之间的距离为 R ，则 R 可以表示为

$$R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$$

当数控机床指令工具移动到点 $P(X,Y,Z)$ 时，工具的实际移动位置为点 $P'(X',Y',Z')$ 。

因此，位置误差为

$$\Delta X = X' - X, \Delta Y = Y' - Y, \Delta Z = Z' - Z$$

可以推出；

$$\begin{aligned} (R + \Delta R)^2 &= X'^2 + Y'^2 + Z'^2 \\ &= (X + \Delta X)^2 + (Y + \Delta Y)^2 + (Z + \Delta Z)^2 \end{aligned}$$

展开后整理，可得出；

$$\Delta R = 1/R(X\Delta X + Y\Delta Y + Z\Delta Z) \quad (1)$$

式 (1) 是获得圆周内插误差的典型的方法，一般的

机动球杆只能简单地测量 ΔR ，所获得的测量数据也只能评估圆度或没有考虑多轴运动规律的二维误差成分。

二、AVEC-100(机动球杆系统)的基本原理

机床和半导体制造设备的三维空间误差可用三维空间误差模型来描述，机动球杆系统是根据此模型开发的。模型考虑了各个位置的位置误差、正直度误差、角度误差、回差等参数误差，也考虑了垂直度误差，伺服系数不一致误差和相邻轴之间的关系。对 ASME B5.54 中分类的 11 种类型的机床，建立了三维空间误差模型 (图 3)。

在 AVEC-100 系统输入了机械的三个正交平面 (XY, YZ, ZX) 中测量的半径方向的数据后，即可根据建立的模型进行三维空间误差分析，分析结果将以表格和图标来显示。目前可评估的误差成分共为 27 个，今后将会更多。

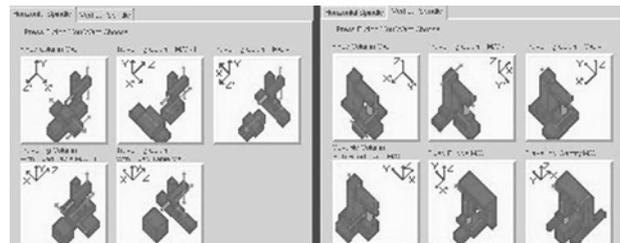


图 3 机床的 11 种类型 (ASME B5.54)



图 4 AVEC-100

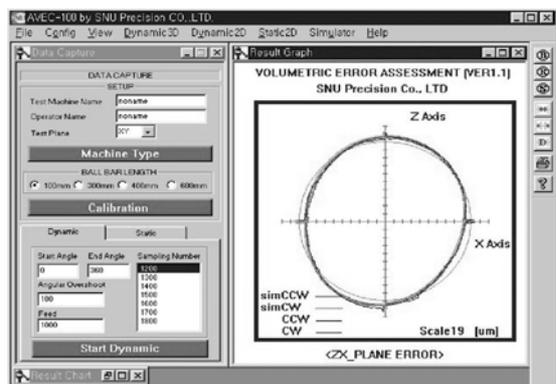


图 5 AVEC-100S/W

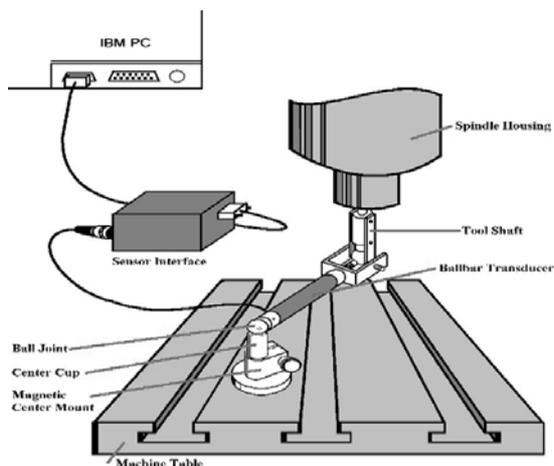


图 6 AVEC-100 的安装

三、AVEC-100 (机动球杆系统) 的特征

SNU Precision 株式会社和汉城大学机械设计系精密测量实验室共同开发了分析三维空间误差的机动球杆系统 (AVEC-100) (图 4), 使机床和半导体制造设备可在几个小时内完成三维空间误差评估。AVEC-100 机动球杆系统由可以测量 27 个误差成分的应用软件 (图 5) 和简单方便的机构组成。最大测量半径为 1.2m, 并具备了各种延长杆, 可在各种机械中应用。做为选项的校准器 (Calibrator) 由热变形极小的殷钢 (Invar) 材料组成, 因此可确保测量的精度。AVEC-100 系统具有其他球杆系统提供的二维误差成分分析和零误差分析功能, 还具备了 ISO 230-1 的圆度评估功能和 ISO 23-2 的重复性评估功能。此外, AVEC-100 可以测量并评估机

械的动态特性和静态特性。图 6 为 AVEC-100(机动球杆)系统的安装图示,在图示状态下只需进行圆周内插圆度即可完成误差测量。几分钟内就能完成一个平面的误差测量,可见 AVEC-100 系统的测量方法多么简便。

四、AVEC-100 (机动球杆系统) 的应用

我们利用 AVEC-100 系统对立式万能机床进行了误差成分分析。图 7 是 AVEC-100 在 XY 平面测量时的照片。完成三个平面的测量后,在 AVEC-100 的三维空间误差分析程序中进行了误差成分分析。27 个误差成分的分析结果如图 8 所示。其中回程峰值 (Reversal Spike) 是产生误差的最大因素,大部分机器中都有与此类似的重要特征。

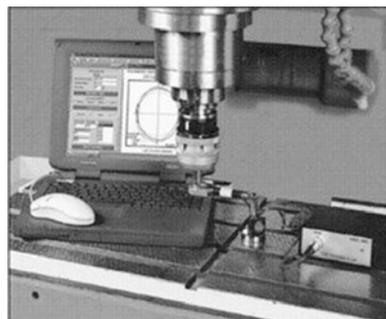


图 7 在 XY 平面中测量

Rank	Error Component	Independent	Value
1	X-Reversal Spike Error	24.1 um (14.6%)	24.1 um
2	Y-Reversal Spike Error	23.4 um (14.1%)	23.4 um
3	Y-Positional Error	19.3 um (11.3%)	19.3 um
4	Z-Positional Error	16.3 um (9.5%)	16.3 um
5	Z-Squareness Error	-14.7 um (8.9%)	-14.7 um
6	X-Positional Error	-13.1 um (7.8%)	-13.1 um
7	Z-Reversal Spike Error	12.0 um (7.3%)	12.0 um
8	XV-Squareness Error	-8.1 um (4.9%)	-8.1 um
9	Y-Angular Error Along Z-Axis	-4.9 um (2.9%)	-4.9 um
10	Z-Backlash Error	-4.1 um (2.5%)	-4.1 um
11	Y-Angular Error Along X-Axis	3.9 um (2.3%)	3.9 um
12	XV-ServoGain Mismatch Error	-3.9 um (2.3%)	-3.9 um
13	Z-Angular Error Along Y-Axis	3.3 um (2.0%)	3.3 um
14	X-Backlash Error	-2.7 um (1.6%)	-2.7 um
15	Y-Backlash Error	-2.5 um (1.5%)	-2.5 um
16	X-Straightness Error Along Z-Axis	-2.4 um (1.4%)	-2.4 um
17	Z-Angular Error Along X-Axis	-2.0 um (1.2%)	-2.0 um
18	Z-Straightness Error Along Y-Axis	-1.9 um (1.1%)	-1.9 um
19	X-Straightness Error Along Y-Axis	-1.8 um (1.1%)	-1.8 um
20	YZ-ServoGain Mismatch Error	-1.3 um (0.7%)	-1.3 um
21	Y-Straightness Error Along X-Axis	-1.2 um (0.7%)	-1.2 um
22	X-Angular Error Along Z-Axis	-0.9 um (0.5%)	-0.9 um
23	X-Angular Error Along Y-Axis	0.9 um (0.4%)	0.9 um
24	YZ-Squareness Error	0.3 um (0.2%)	0.3 um
25	Y-Straightness Error Along Z-Axis	0.3 um (0.2%)	0.3 um
26	Z-Straightness Error Along Y-Axis	0.3 um (0.2%)	0.3 um
27	ZV-ServoGain Mismatch Error	0.0 um (0.0%)	0.0 um

图 8 27 种空间误差成分的测量结果

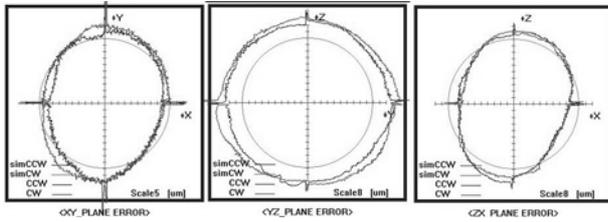


图 9 在 AVEC-100 中以图像显示的测量结果

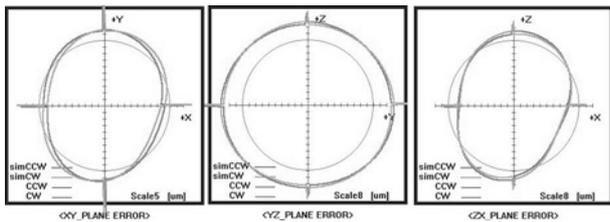


图 10 在 AVEC-100 中对误差分析结果进行的模拟显示

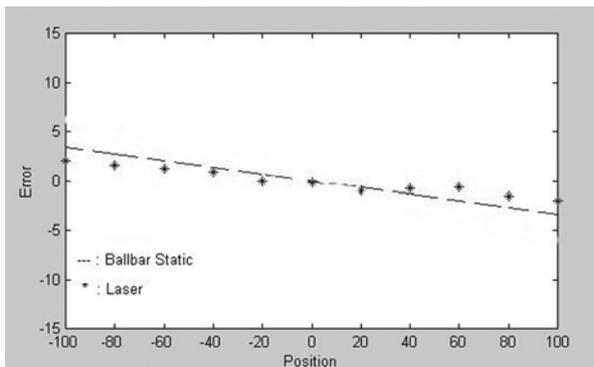


图 11 利用激光干涉仪和 AVEC-100 测量的 Y 轴位置误差比较

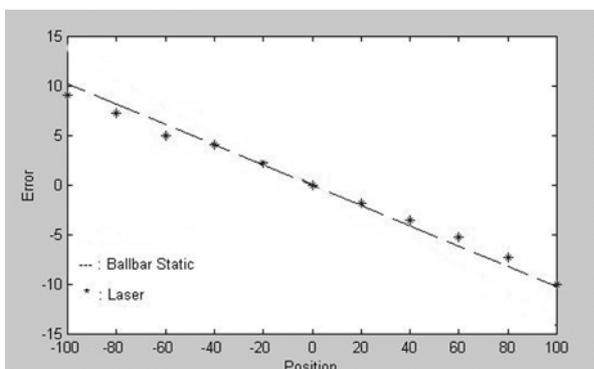


图 12 利用激光干涉仪和 AVEC-100 测量的 X 轴位置误差比较

图 9 是将测量结果以图像显示 图 10 中利用误差分析结果进行了模拟显示，模拟结果与实际测量数据相似，这说明误差分析结果是可以信赖的。

利用 AVEC-100 测量的位置误差和利用激光干涉仪测量的位置误差显示在图 11 和图 12 中，图中可以看到 AVEC-100 和激光干涉仪的测量结果非常接近，这有力地证明了利用低廉的价位进行精密测量是完全可行的。

五、AVEC-100（机动球杆系统）的优点

测量多轴机床的一个平面时，只需几分钟即可进行误差测量，从而实现了以前根本不可能实现的每日监测，确保了机械的精度管理。

AVEC-100（机动球杆系统）具有以下优点：

1、监测机械的状态

通过每天对机械的检测，可以随时监视机械状态的变化。因工人的操作失误发生机械冲撞时，或机械磨损时，可迅速确认机械的精度，从而防止废品的大量生产。

2、发生事故时协助制订对策

在使用机械的过程中发生事故时，如工具和工件的冲撞，需要迅速判断是停止生产进行修理还是继续生产过后修理。AVEC-100 提供事故的严重程度和判断的基准，协助负责人员做出明智的决定，防止做出过大或过小的评估。

3、可作为简便的售后服务设备来使用

进行售后服务时可利用 AVEC-100 检测机械的性能，这是目前测量仪器中独一无二的功能。以前的机动球杆依赖于图像显示的评估方法，而 AVEC-100 提供 27 个误差成分的实际大小，以便迅速决定修理项目。

4、搬动机械后，可利用 AVEC-100 决定校准与否

一般认为，搬动机械时机械的组合状态将发生变化，因此需要进行精密校准。往往此时人们经常花费巨款进行校准，而校准后发现机械的状态没有发生太多的变化。此时如果利用 AVEC-100 进行简



单监测，那可是节省时间和费用的明智选择。

5、制造机床后，可利用 AVEC-100 进行综合性能评估

众所周知，制造机床后进行综合检测是保证产品质量的根本对策，但是实际上不可能花费很多时间和劳动力对产品进行综合检测。而 AVEC-100 使综合检测变为可能。

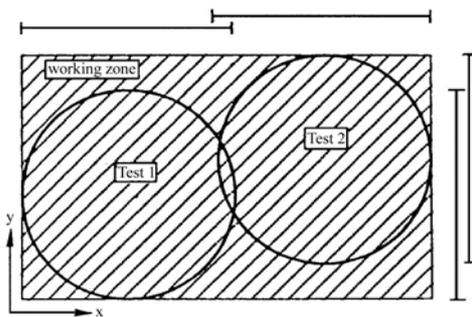


图 13-1 重迭法的使用例子

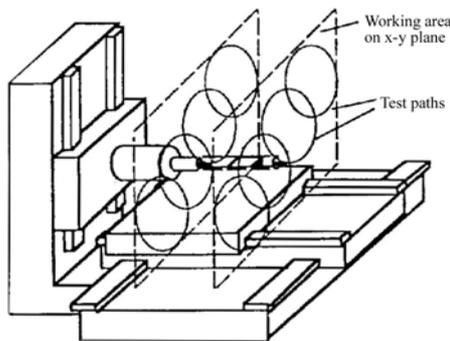


图 13-2 可应用于任何操作空间

六、机动球杆的研究动向

由于机动球杆的特性，一次只能测量并评估正四方形平面。这是机动球杆的缺点。在一般的多轴机床中各个轴的最大移动范围都不相同，因此测量

长方形平面才能做出完善的误差分析。为了解决这个问题，有些科研机构正在研究开发利用重迭法同时评估多次测量数据的算法。重迭法的使用例子如图 13 所示。

最近的研究动向中，有些学者利用高次方程试图建立空间误差模型。研究机动球杆的人们的最大的关心在于能否利用机动球杆校正多轴机床的误差。如果上述研究动向得以实现，那么机动球杆将成为校正机床的理想工具。

The Precise Measurement Technology of Machine and Semiconductor Manufacturing Equipment

Abstract: This paper introduces the principle, characteristic and use of Kinematic Ball Bar System. The System can accomplish analyzing and identifying 3-D measurement error coming from machine tools and semiconductor manufacturing equipment in hours.

Keywords: Machine , Measurement , Error, Kinematic Ball Bar System.

作者简介:

朴喜载：汉城大学机械设计系 教授

金永三：SNU Precision 株式会社代表理事

联系方法：

Prof Heui Jae Pahk, School of Mechanical and Aerospace Eng. Seoul National Uni., Serea, 151-742, Tel: +82-2-880-7467, Fax: +82-2-883-1513, Email: hjpahk @ plaza. snu. ac. kr

读者服务卡编号 001