

机床垂直度校准

作者: M.A.V. Chapman

简介

本白皮书根据2012版ISO230-1标准《机床测试规范 — 机床在空载或准静态条件下运行的几何精度》，介绍了评估机床线性运动轴之间垂直度的各种方法。根据机床各轴存在的垂直度、直线度和角度（俯仰或扭摆）误差，以及在机床加工区域内的测试位置，本文中通过计算机模拟对采用每种方法得出的垂直度结果进行了比较和对比。本文最后还提供了一份评价对比表，以及关于如何在空间误差补偿过程中评估和应用机床垂直度误差的建议。

两条线性运动轴之间的垂直度 — 定义

ISO230-1标准第3.6.7节将两条线性运动轴之间的垂直度误差定义为：“一个线性运动组件上的功能点的运动轨迹形成的参考直线相对于其对应的线性运动名义轴的倾斜度，与另一个线性运动组件上的功能点的运动轨迹形成的参考直线相对于其对应的线性运动名义轴的倾斜度之差。”ISO230-1中指明，对每条轴上的功能点的运动轨迹，采用下列任一方法进行直线拟合，便可得到参考直线：

- 1) 平均最小区域法拟合参考直线，
- 2) 最小二乘法拟合参考直线，或
- 3) 端点法拟合参考直线

图1展示了这些不同的拟合方法。红色轨迹线表示，随着轴运动而产生的直线度偏差变化（即轨迹）。蓝色虚线表示，分别采用最小区域法、最小二乘法和端点法进行拟合得到的参考线。在端点法拟合图中标注了参考线的倾斜度（斜率）。请注意，参考线的倾斜度可能因拟合方法而异。因为计算方便，所以最广泛使用的拟合方法是端点法和最小二乘法。在计算垂直度误差时，建议对两条轴采用相同的参考线拟合方法。本文中的所有参考线均采用最小二乘法进行拟合计算。

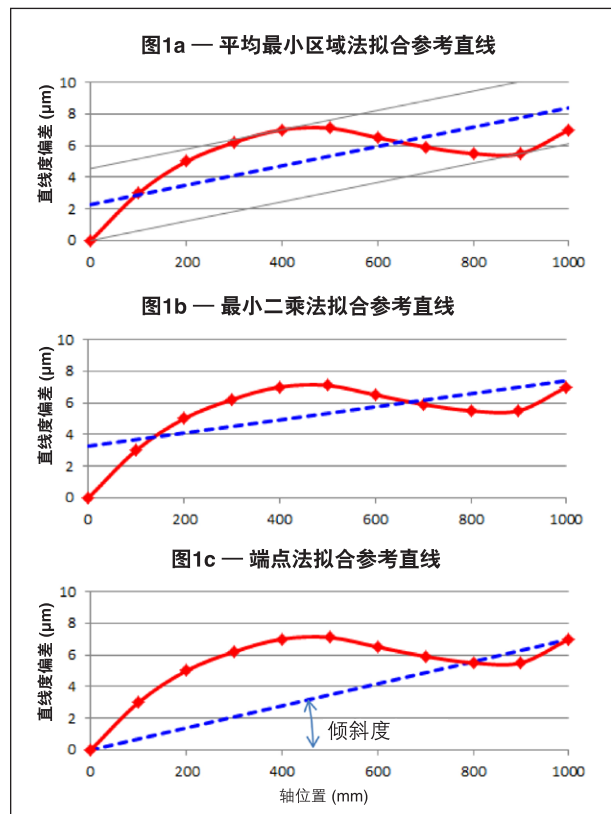


图1

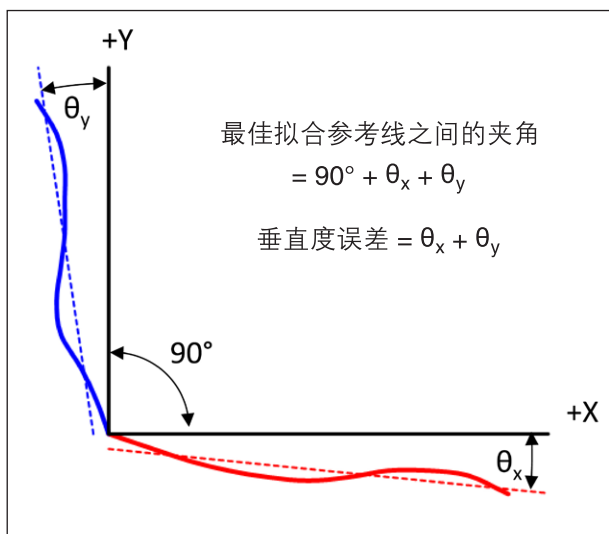


图2

图2展示了两条线性运动轴之间垂直度误差的计算方法。两条黑色实线分别代表机床的X轴和Y轴。红色实线和蓝色实线分别代表X轴和Y轴在整个轴行程中的直线度偏差变化（即它们的轨迹）。请注意，为使表述清楚，图中夸大了这些偏差。红色虚线和蓝色虚线分别代表两条轨迹的最小二乘法拟合参考线。图中的 θ_x 和 θ_y 分别是两条参考线的倾斜度（斜率）。在本例中，将 θ_x 和 θ_y 相加，即可得出垂直度误差。请注意，还可以使用其他符号规约。雷尼绍的球杆仪和激光系统配用的垂直度分析软件设定：如果两条运动轴的正向夹角 $> 90^\circ$ ，则垂直度结果为正值。本文中统一采用这一符号规约。

注释：

1. ISO230-1标准推荐采用另一种符号规约：将一条机床轴定义为“基准轴”，另一条机床轴定义为“参考轴”，基于右手定则，将垂直度误差的方向定义为参考轴相对于基准轴的旋转。在上面的图2中，如果以X轴为基准轴，那么Y轴相对于X轴的垂直度误差为+ve。但是，如果以Y轴为基准轴，那么X轴相对于Y轴的垂直度误差就是-ve。为避免混淆，ISO230-1中还建议注明两轴的夹角大于还是小于 90° ！显然，在比较垂直度测试结果时，一定要了解所使用的符号规约。
2. 虽然ISO定义了参考线相对于其对应的机床轴（X、Y或Z轴）的倾斜度，但在测量垂直度误差时，倾斜度通常是通过参考线相对于由基准标准件或激光光束所定义的正交线之间的偏差来测量的。最终结果是相同的；不过，标准件、分度器或光学棱镜可能会存在垂直度误差，因此在计算时需要纳入这些误差。如果误差未知，则可能需要反转参考基准，通过重复测量取垂直度结果的平均值。
3. 如果基于机床轴的整个工作长度测试垂直度，那么该结果具有所谓的“全局性”。如果只针对机床轴的某一部分进行测试，那么得到的是“局部”垂直度结果。

两条线性运动轴之间的垂直度 — 测试方法

ISO230-1:2012标准目前介绍了五种机床垂直度评估方法，分别是：

- 1) 机械直角尺和千分表（第10.3.2.2节）
- 2) 机械直尺、千分表和分度转台（第10.3.2.3节）
- 3) 光学直角尺和激光干涉仪直线度测量镜组（第10.3.2.4节）
- 4) 圆测试（第10.3.2.6节和ISO230-4标准）
- 5) 对角线位移测试（第10.3.2.6节和ISO230-6标准）

下文详细介绍了每种方法。

第1种方法 — 使用机械直角尺和千分表进行双轴直线度测试

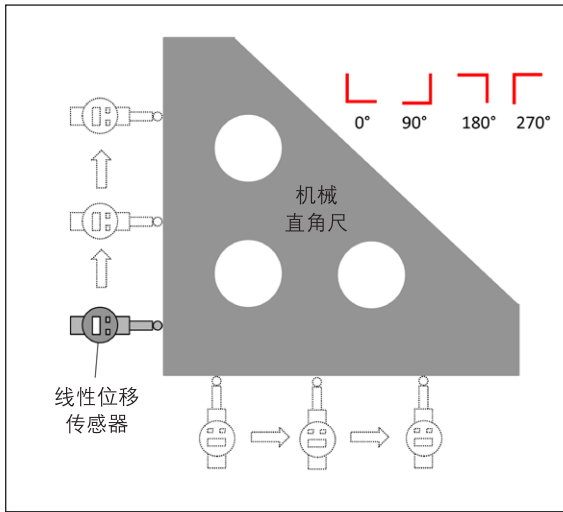


图3

如果还有可以配合使用的机械直尺，那么可以采用另一种“T”形布局，如图4所示。这种布局的优点是可以反转（即图4的左右镜像），通过这种反转技术可消除直角尺的误差。另一个优点是，这种布局适用于其中一条轴靠近机床工作区域中心的情况。

请注意，当测量两条水平轴之间的垂直度时，通过相应地旋转设备，即可在四个不同的方向（0°、90°、180°或270°）上采用“L”形和“T”形配置。然而，如果其中一条轴是垂直轴，则只能在两个方向（0°和90°）上采用“L”形配置，或者在一个方向（180°）上采用倒置的“T”形配置。下文的模拟中会详细介绍这里提到的不同方向。

这种方法需要先将机械直角尺与相关的机床轴名义上准直，然后使用线性位移传感器（如数显表或千分表），依次测量每条轴的直线度偏差。这种设置如图3所示，本文中将其称为“L”形配置。分别采集两条轴的直线度数据之后，（采用最小二乘法、端点法或最小区域法进行拟合）先计算每组数据的倾斜度（斜率），然后再比较两个倾斜度，即可得出垂直度误差。请注意务必沿用正确的符号规约，具体取决于直角尺和千分表的方向，以及各轴的正向方向。

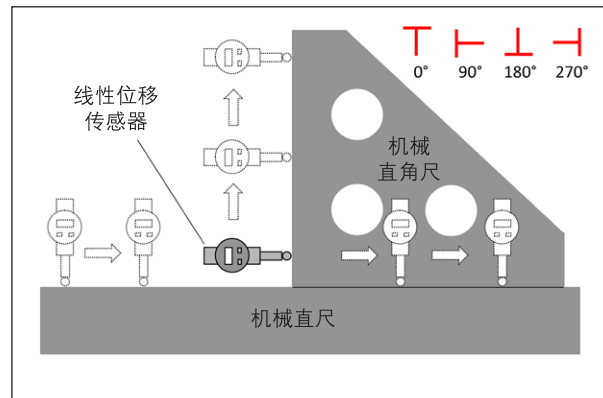


图4

第2种方法 — 使用直尺、千分表和分度转台进行双轴直线度测试

这种方法需要在角度分度器上安装机械直尺。测量第一条轴的直线度偏差之后，利用分度器将直尺旋转90°，以便测量第二条轴的直线度。这种设置如图5所示，本文中将其称为“十”字形配置。

垂直度的计算方法与第1种方法相同。

这种方法的优点在于，它适用于两条轴都靠近工作区域中心的情况。但是，它依赖于精密分度器，而且精度必须高于所需测量的垂直度的精度。

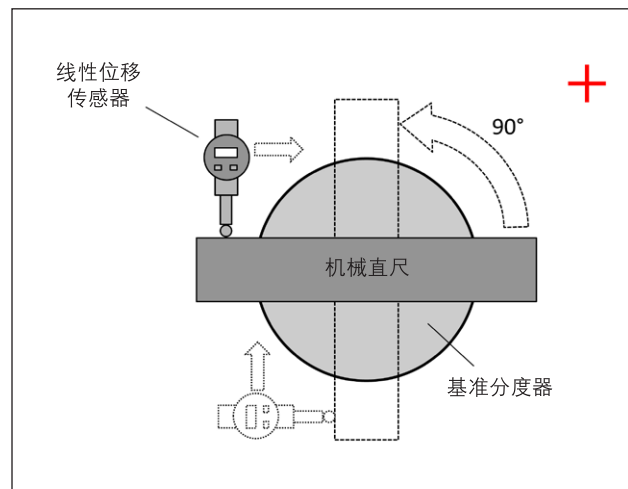


图5

第3种方法 — 使用光学直角尺和激光干涉仪直线度测量镜组进行双轴直线度测试

这种方法采用激光干涉仪系统（例如雷尼绍XL-80激光干涉仪），配有直线度测量光学镜组和光学直角尺。这些设备可以设置为“L”形或“T”形配置（取决于机床配置）。“L”形配置如图6所示，常用于测试两条水平轴之间的垂直度。这种设置的工作原理如下：直线度反射镜在空间中投射出一个光学直尺边，再利用光学直角尺将其转向90°。然后，利用直线度干涉镜测量（显示）与光学直角尺的两个直尺边之间的直线度偏差。

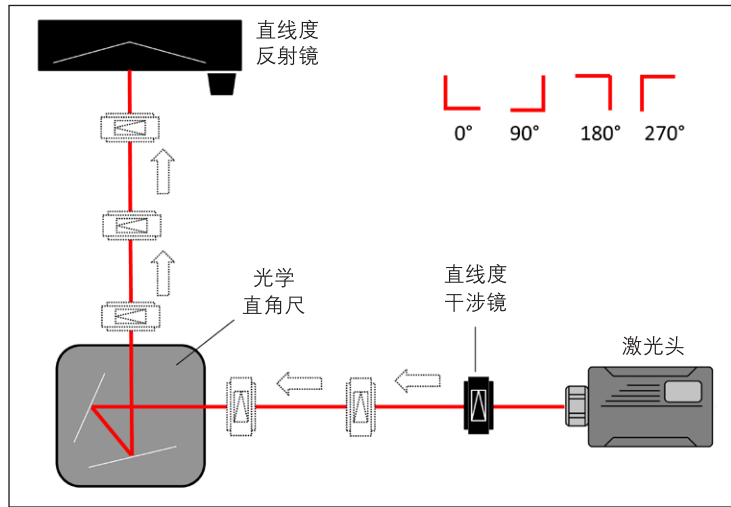


图6

图6中的直线度反射镜和光学直角尺与图3中的机械直角尺之间具有直观的相似性。它们都有一样的“L”形参考线。

图6中利用直线度干涉镜与光学直角尺的直尺边测量两轴之间的直线度偏差，图3中利用线性位移传感器与机械直角尺的直尺边测量两轴之间的直线度偏差，这两种方法是相同的。如图7所示，机械直尺配用千分表和直线度反射镜配用干涉镜之间具有直观的相似性，雷尼绍的白皮书《TE325 — 激光干涉法直线度测量及其在移动工作台上的应用》对此做出了详细说明。同样地，当测量两条水平轴之间的垂直度时，根据机床空间的限制，通过相应地旋转设备，即可在四个方向

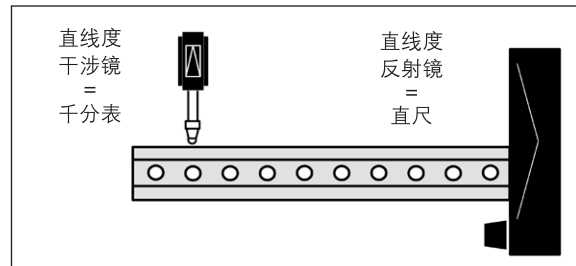


图7

（0°、90°、180°或270°）上采用“L”形配置。下文中模拟了在所有四个方向上采用“L”形配置的情况。

此外还可以增设转向镜和大角锥反射镜来重新布置所有组件，按“T”形配置进行测试，如图8a和图8b所示。如果其中一条被测轴是垂直轴，则往往采用这种配置。水平轴用激光头、直线度干涉镜和反射镜进行测试，如图8a所示。垂直轴则用转向镜、光学直角尺和附加的大角锥反射镜进行测试，如图8b所示。请务必确保，在测量两条轴之间，直线度反射镜的准直不应发生改变，因为反射镜是完成两次测试的参考基准。同样地，图8a和图8b所示的采用激光干涉镜获得的测量结果，与图4所示的采用机械直角尺获得的测量结果之间具有直观的相似性。

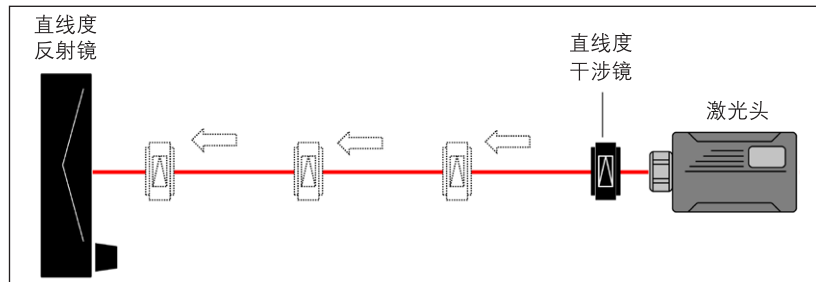


图8a

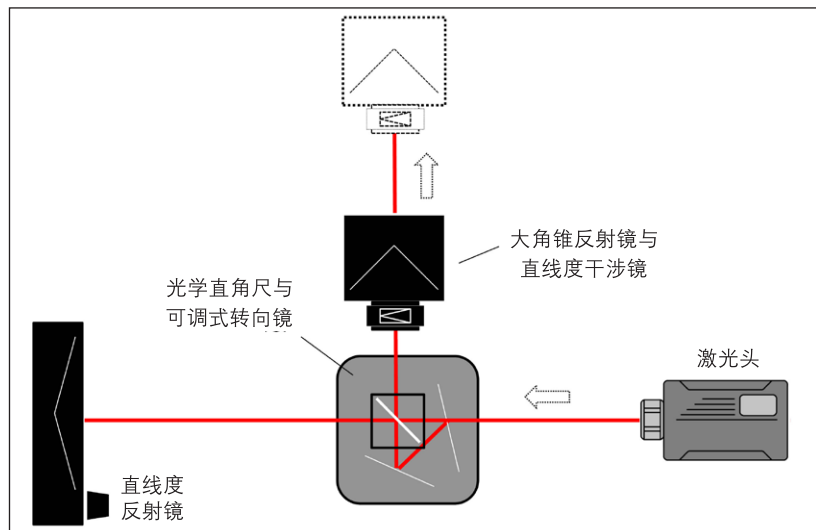


图8b

垂直度结果的计算方法与第1种和第2种方法完全相同；但是，由于存在制造公差，通常需要对光学直角尺的细微角度误差（通常称为“棱镜误差”）进行修正。用户输入“棱镜误差”值之后，分析软件就会自动应用该修正。

激光测量的优点在于，它可以轻松地在大机床上进行全局性垂直度测量；而机械直尺和直角尺可能并不适用于这种应用场景，因为这样的测量过程过于繁琐或费用高昂，而且它们本身的重量还可能会导致机床结构发生机械变形。

第4种方法 — 圆测试

对于能够在数控系统的控制下进行精确圆弧插补的机床，可以使用伸缩式球杆仪（例如雷尼绍QC20球杆仪）执行动态圆测试，以确定机床的垂直度，如图9所示。ISO230-4中介绍了这种测试方法。对机床进行

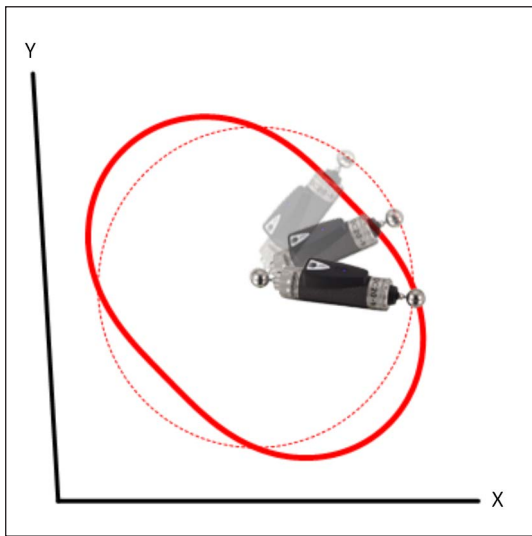


图9

编程设定，使其以低进给率沿 360° 圆形轨迹（如红色虚线所示）运动，先顺时针运动，然后再逆时针运动。伸缩式球杆仪的一端连接至圆心处的机床工作台中心座，另一端连接至机床主轴上安装的中心座。当机床绕圆运动时，球杆仪内的传感器会测量半径的变化，并生成一条误差轨迹（如红色实线所示，图中有所夸大）。如果存在垂直度误差，则球杆仪通过顺时针和逆时针运动生成的平均误差轨迹会呈椭圆形，如图所示。通过对比 45° 对角线（即椭圆的主轴和次轴）的长度，便可估算出垂直度误差。雷尼绍的球杆仪图形诊断软件能够运行大量计算，将垂直度误差与机床可能存在的任何其他误差（如反向间隙、伺服、比例不匹配、周期和直线度误差）区分开来，从而确保垂直度结果不受这些误差的影响。雷尼绍软件还可通过部分圆弧测试（低至 220° ）估算垂直度。

对于能够在数控系统的控制下进行精确圆弧插补的机床，可以使用伸缩式球杆仪（例如雷尼绍QC20球杆仪）执行动态圆测试，以确定机床的垂直度，如图9所示。ISO230-4中介绍了这种测试方法。对机床进行编程设定，使其以低进给率沿 360° 圆形轨迹（如红色虚线所示）运动，先顺时针运动，然后再逆时针运动。伸缩式球杆仪的一端连接至圆心处的机床工作台中心座，另一端连接至机床主轴上安装的中心座。当机床绕圆运动时，球杆仪内的传感器会测量半径的变化，并生成一条误差轨迹（如红色实线所示，图中有所夸大）。如果存在垂直度误差，则球杆仪通过顺时针和逆时针运动生成的平均误差轨迹会呈椭圆形，如图所示。通过对比 45° 对角线（即椭圆的主轴和次轴）的长度，便可估算出垂直度误差。雷尼绍的球杆仪图形诊断软件能够运行大量计算，将垂直度误差与机床可能存在的任何其他误差（如反向间隙、伺服、比例不匹配、周期和直线度误差）区分开来，从而确保垂直度结果不受这些误差的影响。雷尼绍软件还可通过部分圆弧测试（低至 220° ）估算垂直度。

球杆仪测试的优点是快速、简便。球杆仪测试的速度快意味着垂直度结果基本不受环境变化（如热变化）的影响，而其他测试方法却难免受到环境变化的影响。此外，还可以使用加长杆来改变测试半径，半径范围达到50 mm至1000 mm，因此可测试各种尺寸的机床。球杆仪可沿机床各轴在多个位置进行测试，并对所有结果取平均值，因此可评估各轴轴长明显不等的机床的垂直度（本文末尾详细介绍了这项技术）。

如果机器（比如坐标测量机（CMM））不能进行圆弧插补，则可以使用雷尼绍的坐标测量机空间精度检测规（MCG）执行测试，如图10所示。此外，在小型机器上，还可以使用雷尼绍测头和环规进行测试。

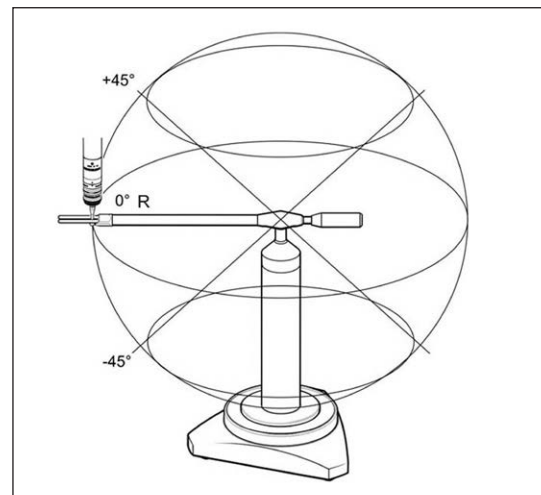


图10

第5种方法 — 对角线位移测试

最后一种评估机床垂直度的方法需要采用激光干涉仪系统（例如雷尼绍XL-80激光干涉仪）配用线性光学镜组，以测量两条对角线的长度，如图11所示。ISO230-6中介绍了这种测试方法。通常，先对激光头进行准直，以便测量第一条对角线的长度。然后，重新准直激光头，再测量第二条对角线。最重要的一点是，在测试过程中，每条轴的移动部分对于两条对角线都是相同的，并且消除任何反向间隙的影响；最好在两个方向上测量每条对角线的长度，然后取平均值。

同样重要的一点是，两条对角线必须一个接一个立即测量，以尽可能降低发生热变化的可能性。在小型机床上，还必须确保将激光头与对角线精确准直，以尽可能减少余弦误差。

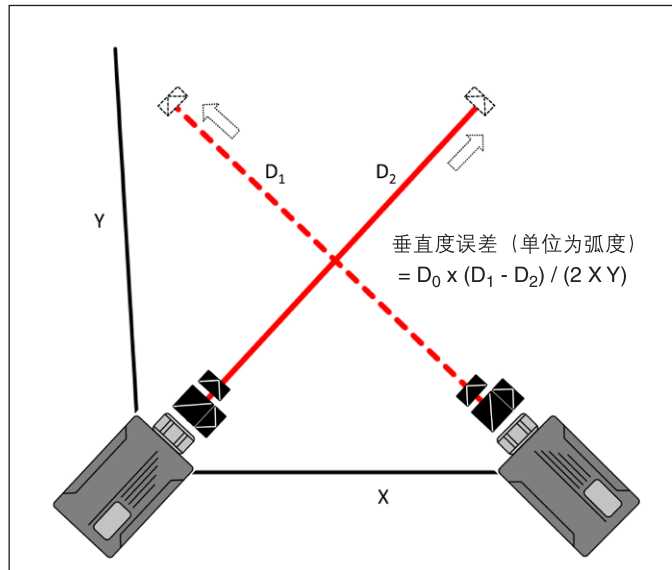


图11

我们来看一下如何在XY平面中进行测试，如图11所示。假设X是编程设定的X轴行程长度，Y是编程设定的Y轴行程长度，则垂直度（单位为弧度）表示为：

$$\text{垂直度} = D_0 (D_1 - D_2) / (2XY)$$

其中， D_0 是对角线名义长度， D_1 和 D_2 是对角线实际长度。

如果 $X=Y$ ，则该方程式可简化为：

$$\text{垂直度} = (D_1 - D_2) / D_0$$

这种测试方法的优点是快速简便，非常适用于大型机床和长宽比不相等的机床。如果其中一条轴是垂直轴，那么设置就会稍微复杂一点，可能需要增设转向镜和旋转接头。由于垂直度结果只基于两个激光距离读数进行计算，如果机床的重复性较差，那么就可能需要重复测试，以获得良好的平均值。或者，可以在每条对角线上的多个位置采集数据。将测得的位移量与编程设定的位移量进行比较。然后，将每条对角线的线性误差数据通过最小二乘法拟合出一条直线，再比较两个斜率，最终确定垂直度误差。根据ISO230-1和ISO230-6的建议，本文中基于两条对角线的总长差异来确定垂直度误差。

机床误差模拟

为评估不同的垂直度测试方法的性能，我们模拟了五台具有不同的垂直度、直线度和扭摆误差组合的机床，如图12所示。假设所有五台机床的X轴和Y轴长度均为800 mm，这种模拟方式只考虑XY平面的变形（不过所得到的结果一般也适用于其他两轴组合）。图12中的蓝线表示每台机床的XY平面变形情况，我们将其放大了2,000倍，然后叠加在无变形的方格网（每格边长100 mm）上。

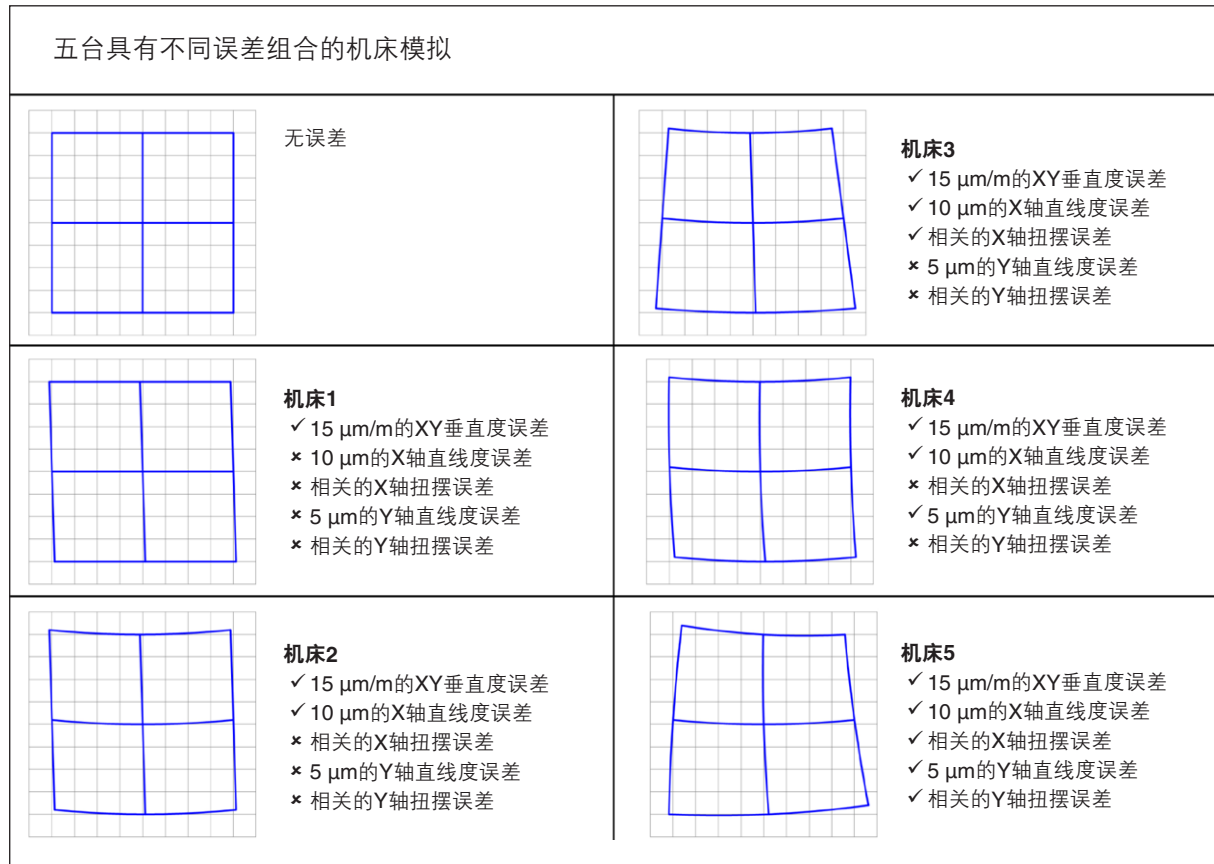


图12

所有五台机床的基础全局性垂直度误差均为+15 μm/m。在此基础上叠加X轴和Y轴的各种直线度误差和扭摆变形误差组合。请注意，如果包含扭摆变形误差，那么该误差量通常与该轴的直线度误差相关（假设机床是刚体机械结构，详情请参阅附录I）。另请注意，直线度误差并不一定会引起机床XY平面的角度变形，这取决于机床的运动机械构造（机械结构链）。这也是为什么模拟中包括各种直线度误差组合，分别包含或不包含相关的因扭摆引起的变形。如果由存在直线度误差的轴支撑着工件夹具，那么，该轴所产生的扭摆可能会使工作空间变形，如机床3和5所示。然而，如果存在直线度误差的轴仅支撑着刀具，那么即使存在扭摆误差，也不会造成机床XY平面产生角度变形。我们特意挑选了这些误差组合，以强调在全局性垂直度误差的基础上叠加各种角度误差和直线度误差时（这些误差会造成局部垂直度变化），各种测试方法产生的不同反应。我们重点关注机床3和5，因为虽然它们包含不同程度的因扭摆引起的变形，但它们的局部和全局性垂直度变形是一致的，都是15 μm/m。

模拟模式

由于机械直尺配用千分表与直线度反射镜配用干涉镜之间具有直观的相似性，因此，这两种方法采用“L”和“T”形配置得到的模拟结果是相同的。于是，我们用五种不同的模拟模式即可涵盖上文介绍的所有测试方法和设备组合。这五种模拟模式 (a-e) 及其各自适用的测试方法/设备如下：

- a. 使用伸缩式球杆仪进行圆测试
- b. 使用激光干涉仪和线性光学镜组进行激光对角线测试
- c. 使用下列工具，按“十”字形配置进行双轴直线度测试：
 - 机械直尺、千分表和90°分度器
- d. 使用下列工具，按“T”形配置进行双轴直线度测试：
 - 机械直尺、直角尺和千分表，**或者**
 - 激光干涉仪直线度测量镜组、光学直角尺、大角锥反射镜和转向镜。
- e. 使用下列工具，按“L”形配置进行双轴直线度测试：
 - 机械直角尺和千分表，**或者**
 - 激光干涉仪直线度测量镜组和光学直角尺

图13展示了这五种不同的模拟模式。与上文相同，蓝线表示模拟机床的XY平面变形情况，叠加在无变形的方格网（每格边长100 mm）上。红线表示在测试过程中机床的运动。机床运动的变形情况也放大了2,000倍。（请注意，代表球杆仪轨迹的红线会自动缩放和居中，以匹配在球杆仪测试分析过程中常用的轨迹缩放比例。）

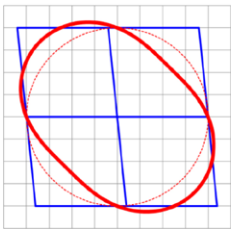
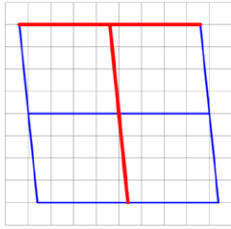
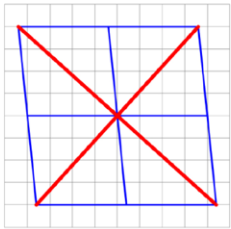

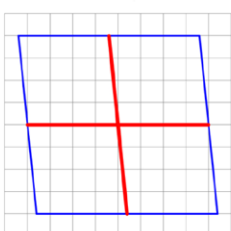
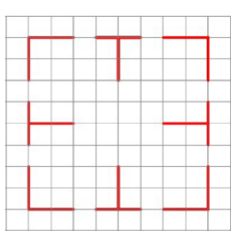
五种不同的模拟模式 (a – e)	
 <p>a) 球杆仪测试 测试半径和位置可以变化。球杆仪误差曲线图将自动缩放和居中。</p>	 <p>d) 双轴直线度测试 (T) 使用直角尺和千分表，或者激光头、光学直角尺、大角锥反射镜和直线度测量光学镜组，按“T”形配置进行测试。方向、长度和位置可以变化。</p>
 <p>b) 激光对角线测试 使用激光头和线性光学镜组进行测试。对角线长度和位置可以变化。</p>	 <p>e) 双轴直线度测试 (L) 使用直角尺和千分表，或者激光头、光学直角尺和直线度测量光学镜组，按“L”形配置进行测试。方向、长度和位置可以变化。</p>
 <p>c) 双轴直线度测试 (+) 使用直尺、千分表和90°分度器进行测试。基准长度和测试位置可以变化。</p>	<p>注释 “L”形和“T”形配置均可设置在四个方向上，如左图所示。</p> 

图13

请注意，对于模拟模式d和e，可以在四个不同的方向（0°、90°、180°、270°）上设置测试设备；还可以调整模拟参数，在机床的800 mm x 800 mm的XY平面内改变测试设备的尺寸和位置。比如，在模拟全局性垂直度测试时，可以将球杆仪半径设为400 mm，并在XY平面的中心进行测试。对于局部垂直度测试，可以缩小球杆仪半径，并改变测试位置。

全局性垂直度模拟结果 — 机床1

图14显示的是, 采用每种模拟模式对机床1进行全局性垂直度测试模拟而得到的结果。

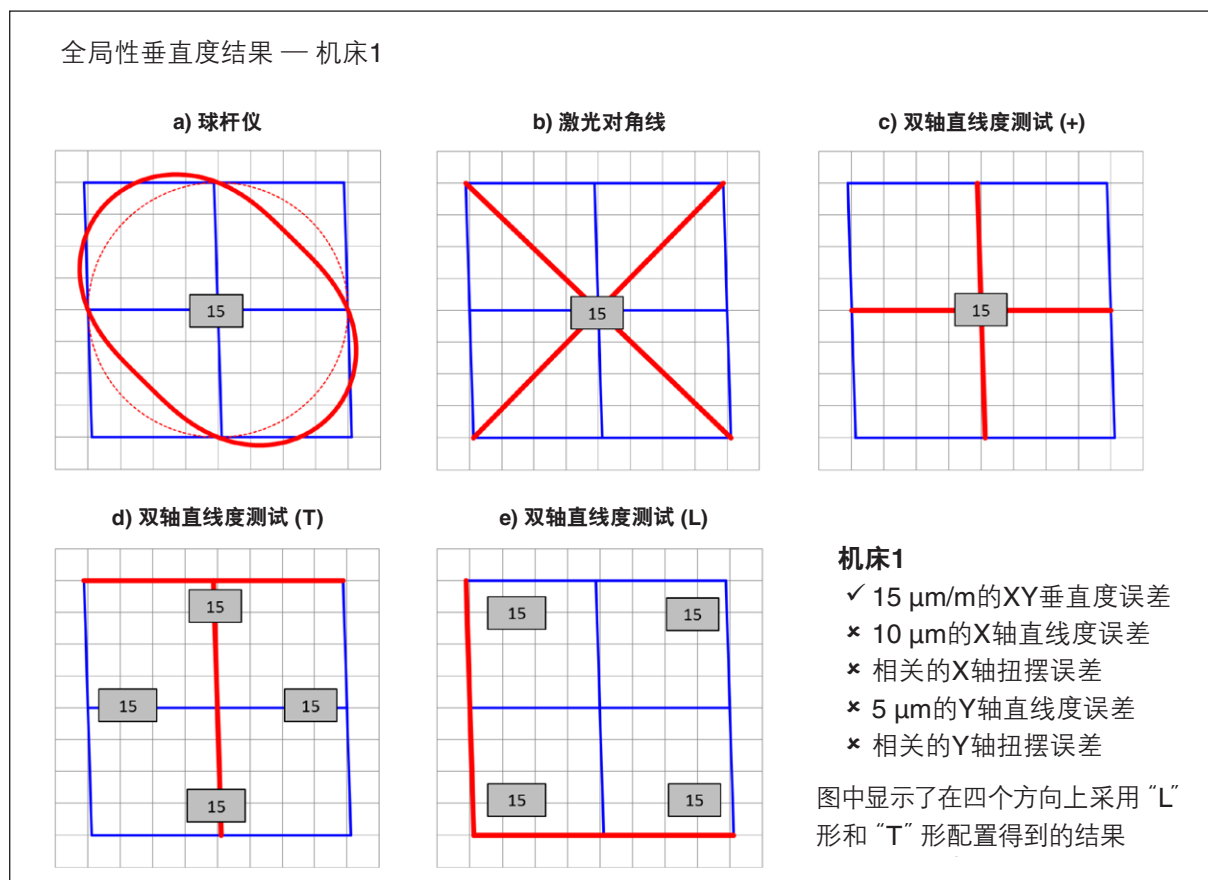


图14

小矩形框中的数字表示采用每种模拟模式计算得出的垂直度结果, 单位为 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。“T”形和“L”形配置均有四个结果, 即在每个方向上都有一个结果。我们把每个结果放在每种设备方向的轴运动轨迹交叉点附近; 为使清楚表述, 图中仅显示一条红色的“T”形或“L”形机床运动轨迹。比如, 在图14 d)中, 最上方的结果与红线所示的“T”形设备方向相关。右边的结果与将红线顺时针旋转 90° 后的“T”形布局相关。

机床1的测试结果表明, 无论采用哪一种测试方法和设备方向, 所有全局性垂直度结果均为 $15 \mu\text{m}/\text{m}$ 。这与预期完全一致, 因为所模拟的机床只有 $15 \mu\text{m}/\text{m}$ 的全局性垂直度误差, 没有其他误差。

全局性垂直度模拟结果 — 机床2

图15显示的是, 采用每种模拟模式对机床2进行全局性垂直度测试模拟而得到的结果。

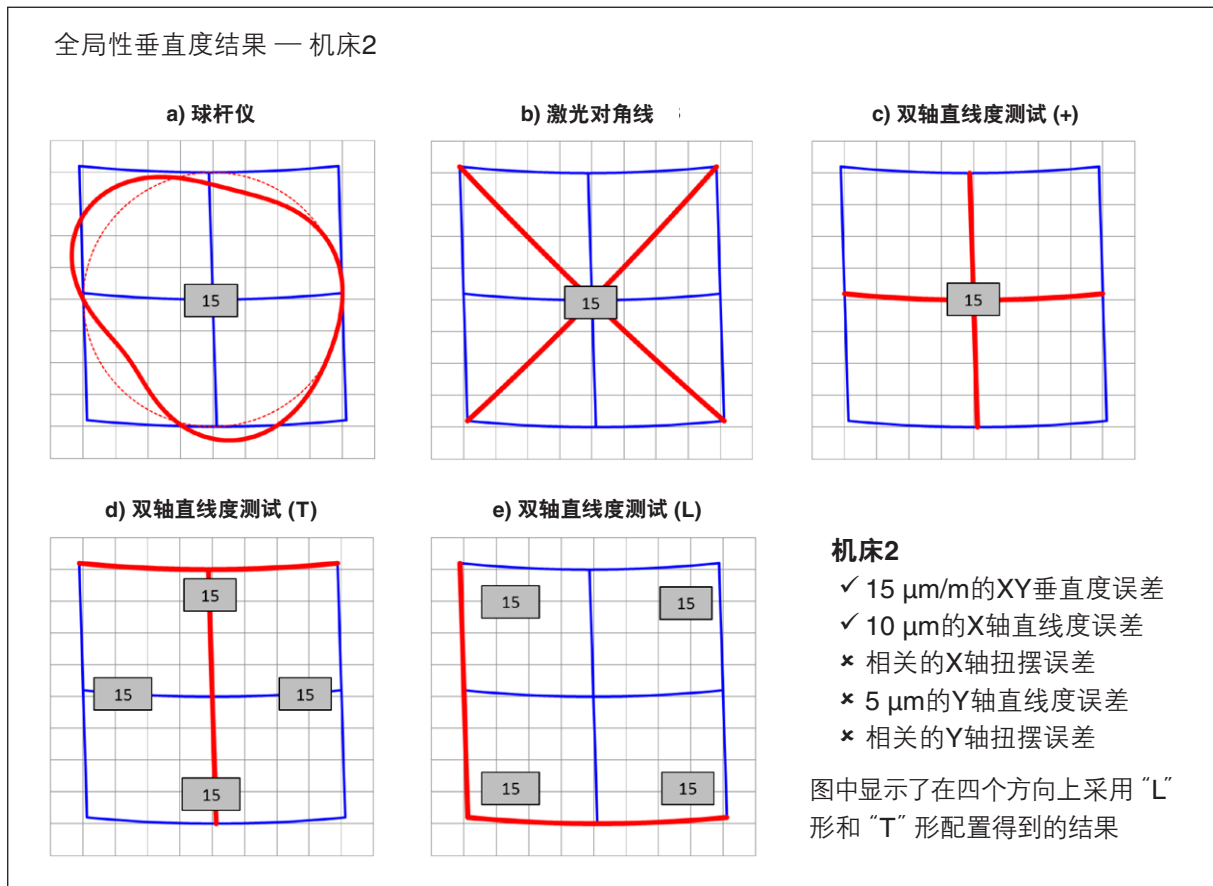


图15

机床2的测试结果表明, 无论采用哪一种测试方法和设备方向, 所有全局性垂直度结果也均为15 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。这表明加入X轴直线度误差并不会影响任何一种全局性垂直度测试方法的性能。

全局性垂直度模拟结果 — 机床3

图16显示的是, 采用每种模拟模式对机床3进行全局性垂直度测试模拟而得到的结果。

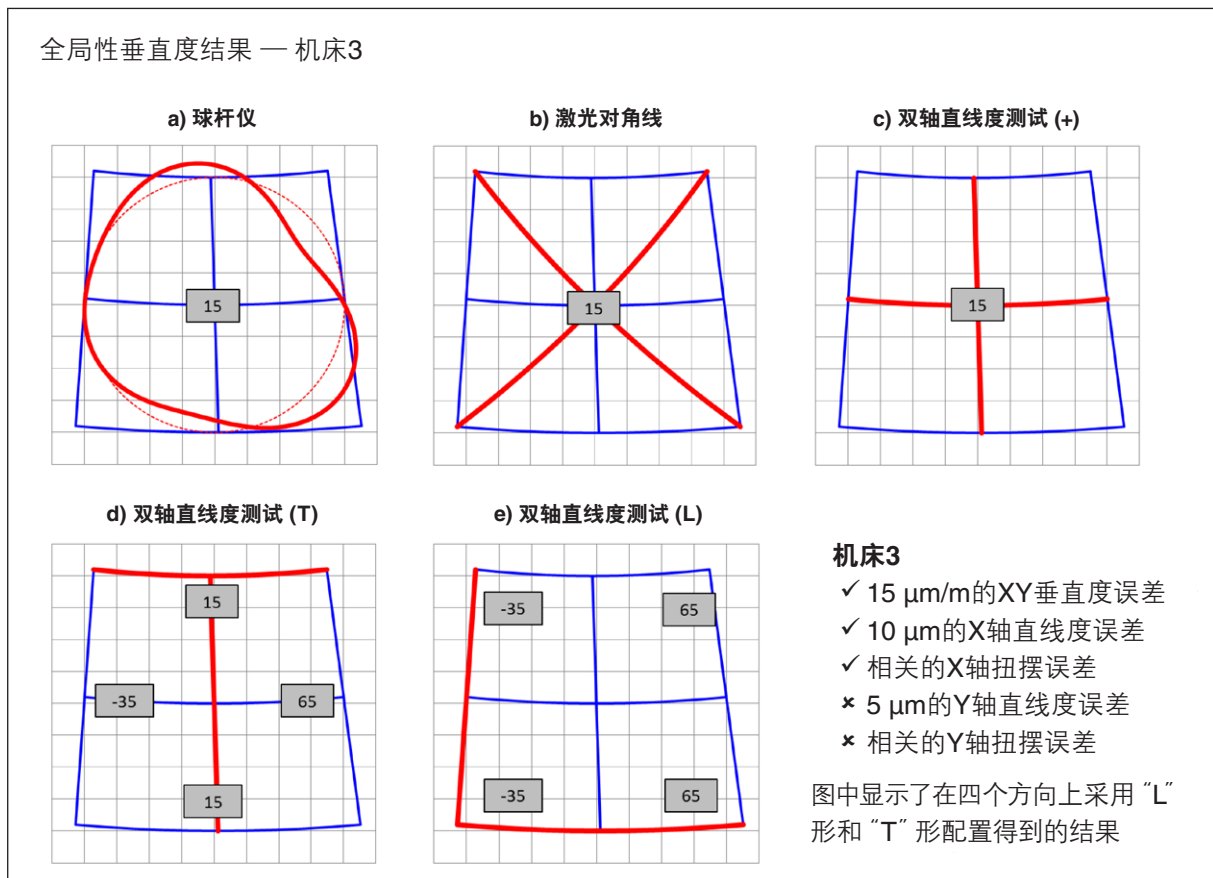


图16

机床3的测试结果表明, 利用球杆仪、激光对角线测试法和“十”字形双轴直线度测试法得出的全局性垂直度也均为 $15 \mu\text{m}/\text{m}$ 。然而, 利用“T”形和“L”形测试法得出的结果却有所不同。这表明, 这两种测试方法容易受X轴扭摆的影响。这些结果并不是“错误”结果, 它们只是凸显了当Y轴从X轴的左端移至右端时, X轴和Y轴之间的夹角从 $-35 \mu\text{m}/\text{m}$ 到 $+65 \mu\text{m}/\text{m}$ 的变化。虽然“T”形和“L”形垂直度测试涵盖两条轴的整个行程范围 (并因此归类为“全局性”垂直度测试), 但实际上, 它们只表明在特定位置测得的两轴之间的垂直度。“十”字形配置也是如此。不过, 在本例中, 由于模拟变形的对称性, 采用“十”字形垂直度测试法得出的结果与采用球杆仪和激光对角线测试法得出的结果相符。请注意, 针对“T”形或“L”形垂直度测试法, 如果取对角或对边上的结果的平均值, 则该平均值也与采用其他测试法得出的结果相符。

注: ISO230-1标准建议, 最好沿着穿过机床工作区域中心的直线来评估机床垂直度。上面的结果直观地说明了其中的原因。“L”形测试中涉及的两条线通常位于机床工作区域的边缘, 因此它反映的是机床边缘而非中心的垂直度。

全局性垂直度模拟结果 — 机床4

图17显示的是, 采用每种模拟模式对机床4进行全局性垂直度测试模拟而得到的结果。

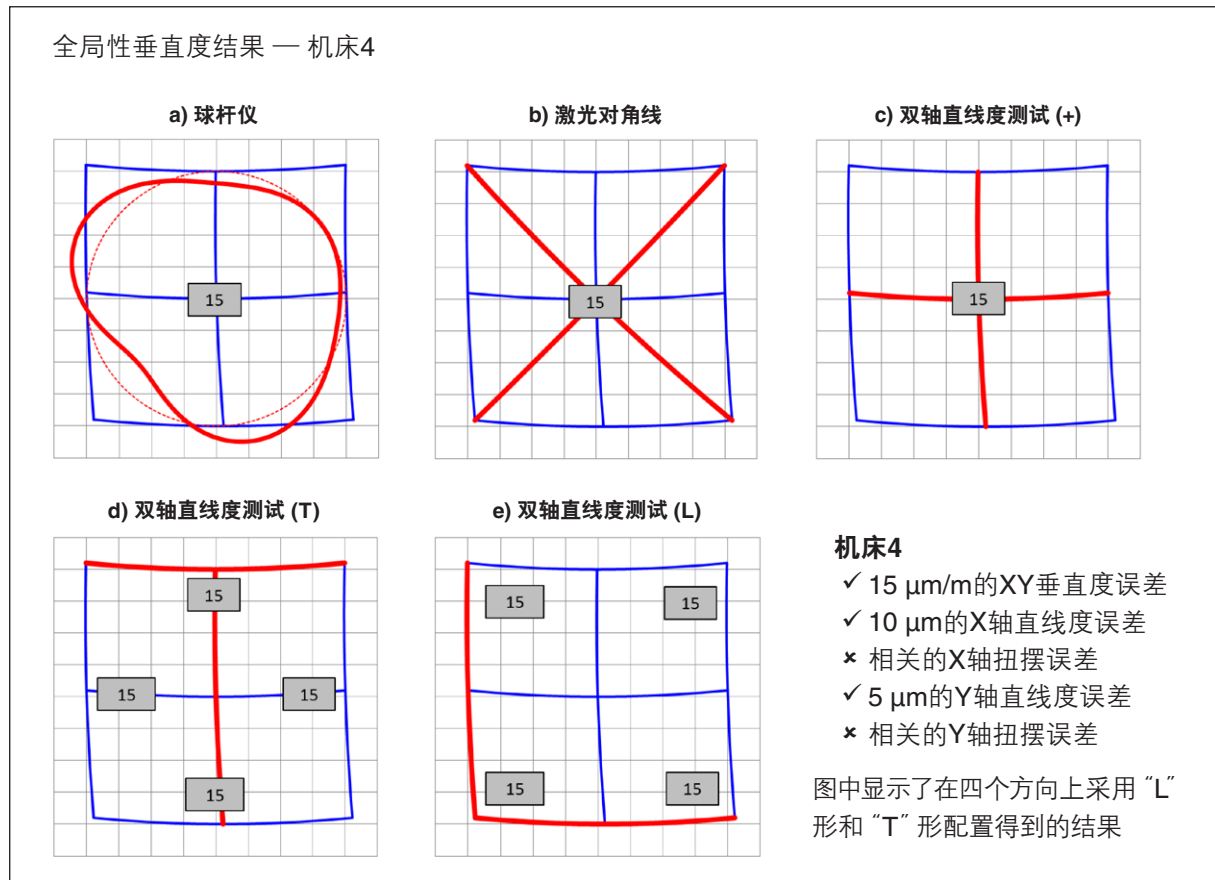


图17

机床4的测试结果表明, 无论采用哪一种测试方法和设备方向, 所有全局性垂直度结果也均为15 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。在机床4上, 扭摆误差变形已经消除, 即使X轴和Y轴都存在直线度误差, 所有测试法依然得出相同的结果。

全局性垂直度模拟结果 — 机床5

图18显示的是, 采用每种模拟模式对机床5进行全局性垂直度测试模拟而得到的结果。

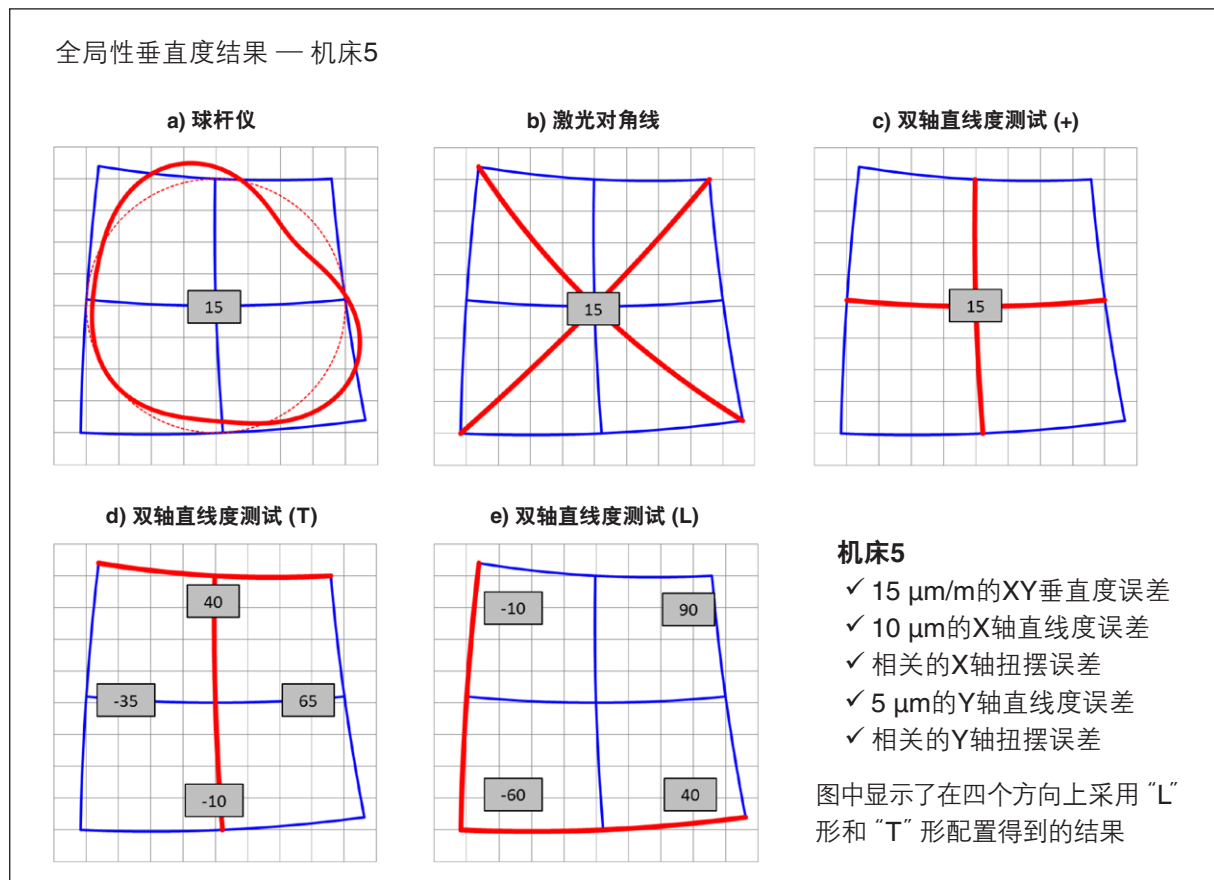


图18

机床5的测试结果表明, 利用球杆仪、激光对角线测试法和“十”字形双轴直线度测试法得出的全局性垂直度依然均为15 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。然而, 由于“T”和“L”形测试法容易受X轴和Y轴扭摆的影响, 因此利用这两种测试法得出的结果同样有所不同。同样地, 这些结果并不是“错误”结果, 它们只是反映了当Y轴从X轴的一端移至另一端或X轴从Y轴的一端移至另一端时, X轴和Y轴之间的夹角变化。请注意, 针对“T”形或“L”形垂直度测试法, 如果取对角或对边上的结果的平均值, 则该平均值也与采用其他测试法得出的结果相符。

全局性垂直度结果 — 综述

如果机床的XY平面并没有因扭摆误差变化而变形, 那么, 所有测试方法在所有方向上的全局性垂直度结果都是相同的 (15 $\mu\text{m}/\text{m}$)。

然而, 如果机床的XY平面存在对称变化的扭摆误差, 那么:

- 球杆仪、激光对角线测试和“十”字形双轴直线度测试依然会得出相同的全局性垂直度结果 (15 $\mu\text{m}/\text{m}$)。
- “T”形和“L”形双轴直线度测试会得出不同的结果, 具体取决于设备方向。

局部垂直度模拟结果 — 机床1

在机床的XY平面中的五个位置, 我们使用每种测试方法模拟了局部垂直度测试。图19显示的是, 采用每种模拟模式对机床1进行局部垂直度测试模拟而得到的结果。我们仅在机床各轴上取200 mm的长度评估了局部垂直度, 位置如图中所示。

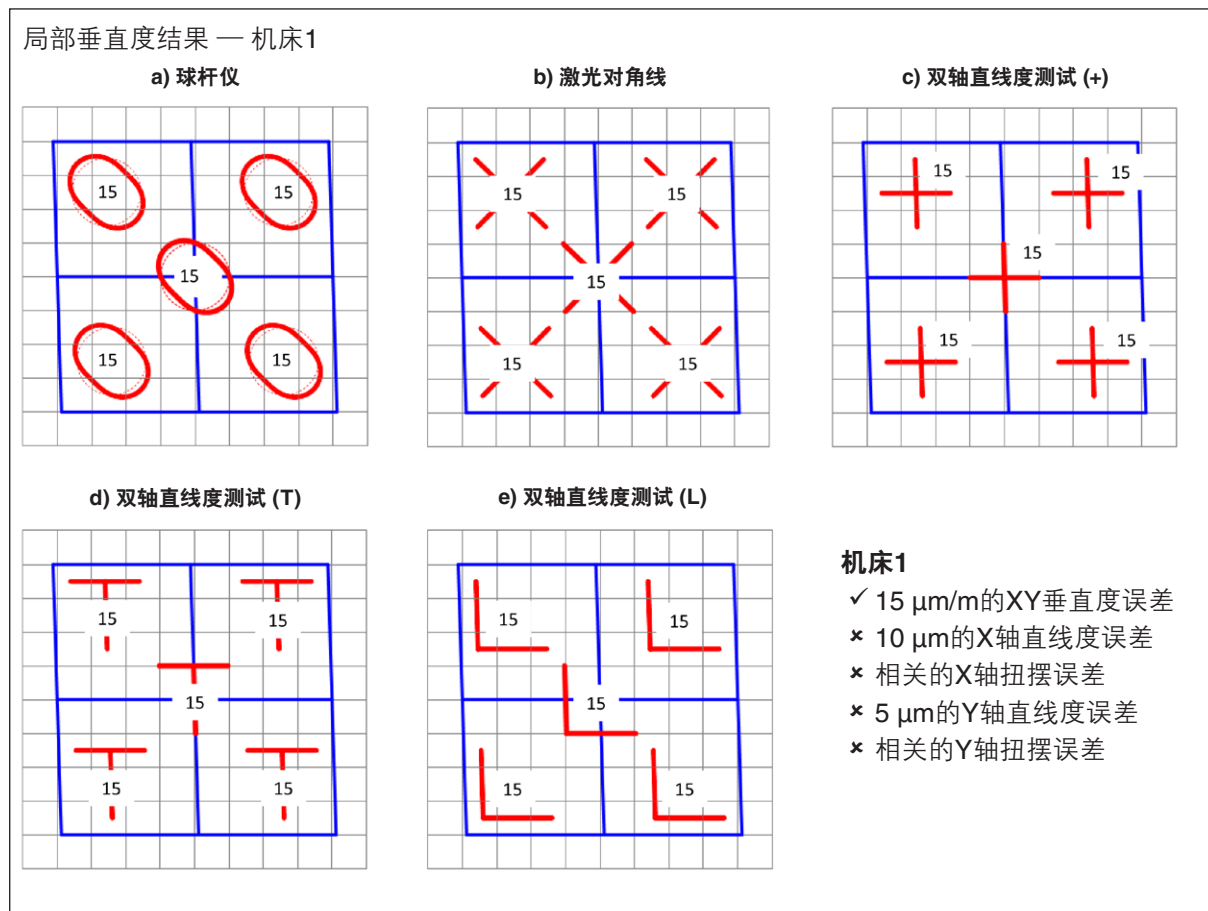


图19

机床1的模拟测试结果表明, 无论采用哪一种测试位置和方法, 局部垂直度结果均为15 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。这与预期完全一致, 因为所模拟的机床只有15 $\mu\text{m}/\text{m}$ 的全局性垂直度误差, 没有其他误差。

局部垂直度模拟结果 — 机床2

图20显示的是, 采用每种模拟模式对机床2进行局部垂直度测试模拟而得到的结果。

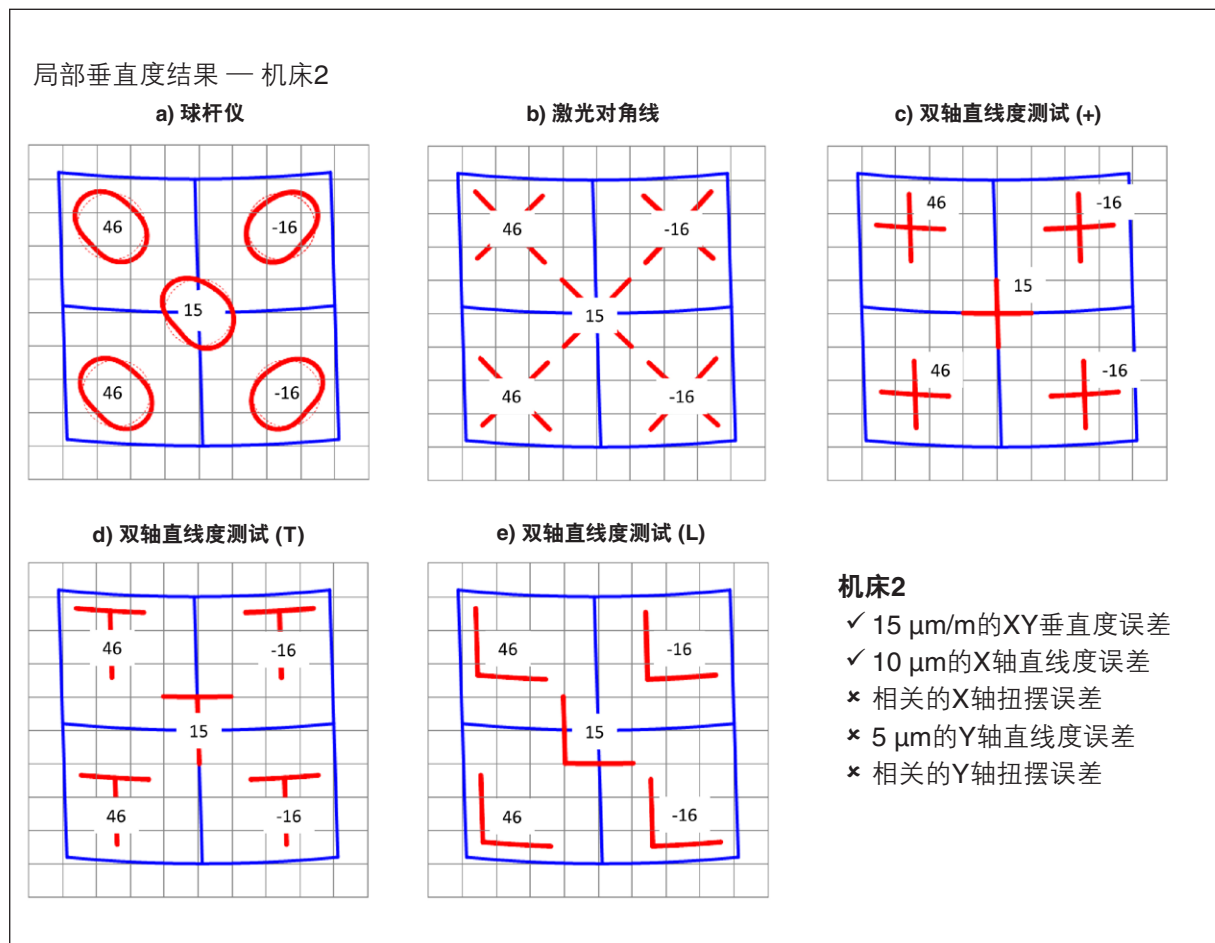


图20

机床2的模拟测试结果表明, 局部垂直度结果因测试位置而异, 但所有测试方法得出的结果相同。这表明, X轴直线度误差会导致局部垂直度发生变化。显然, 在此类机床上必须谨慎选择测试位置。所有测试方法得出的结果都相同, 因为机床2上不存在因扭摆引起的角度变形。

局部垂直度模拟结果 — 机床3

图21显示的是, 采用每种模拟模式对机床3进行局部垂直度测试模拟而得到的结果。

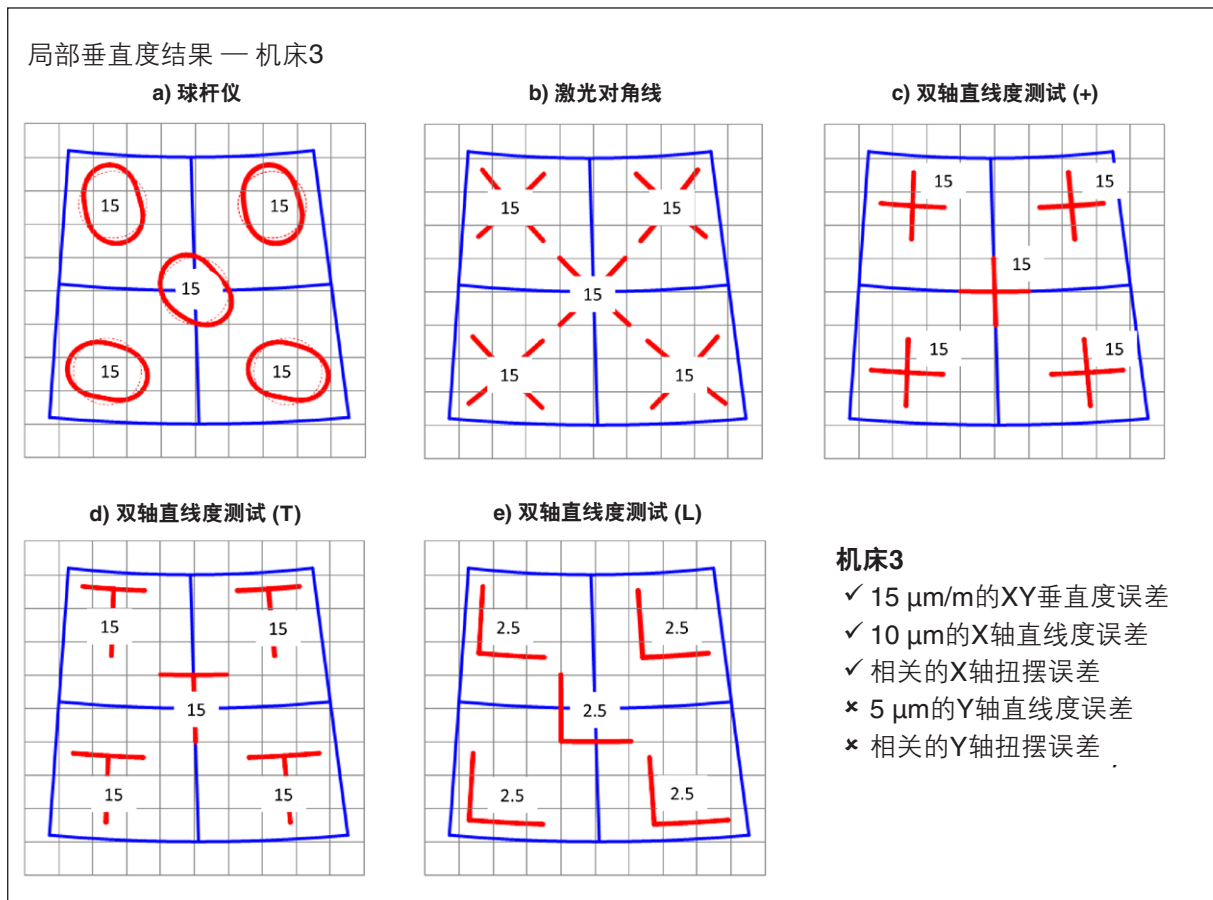


图21

机床3的模拟测试结果表明, 局部垂直度结果因测试方法而异, 但不受测试位置的影响。利用球杆仪、激光对角线测试法、“十”字形和“T”形双轴直线度测试法得出的结果相同, 但“L”形双轴测试法得出了不同的结果。无论在哪个测试位置, 垂直度结果都一致。这表明, 如果机床的某条轴存在直线度误差, 并引起相应的扭摆变形(假设机床是刚体), 但是局部和全局性垂直度却不会受到影响, 即使机床发生明显“弯曲”。

局部垂直度模拟结果 — 机床4

图22显示的是, 采用每种模拟模式对机床4进行局部垂直度测试模拟而得到的结果。

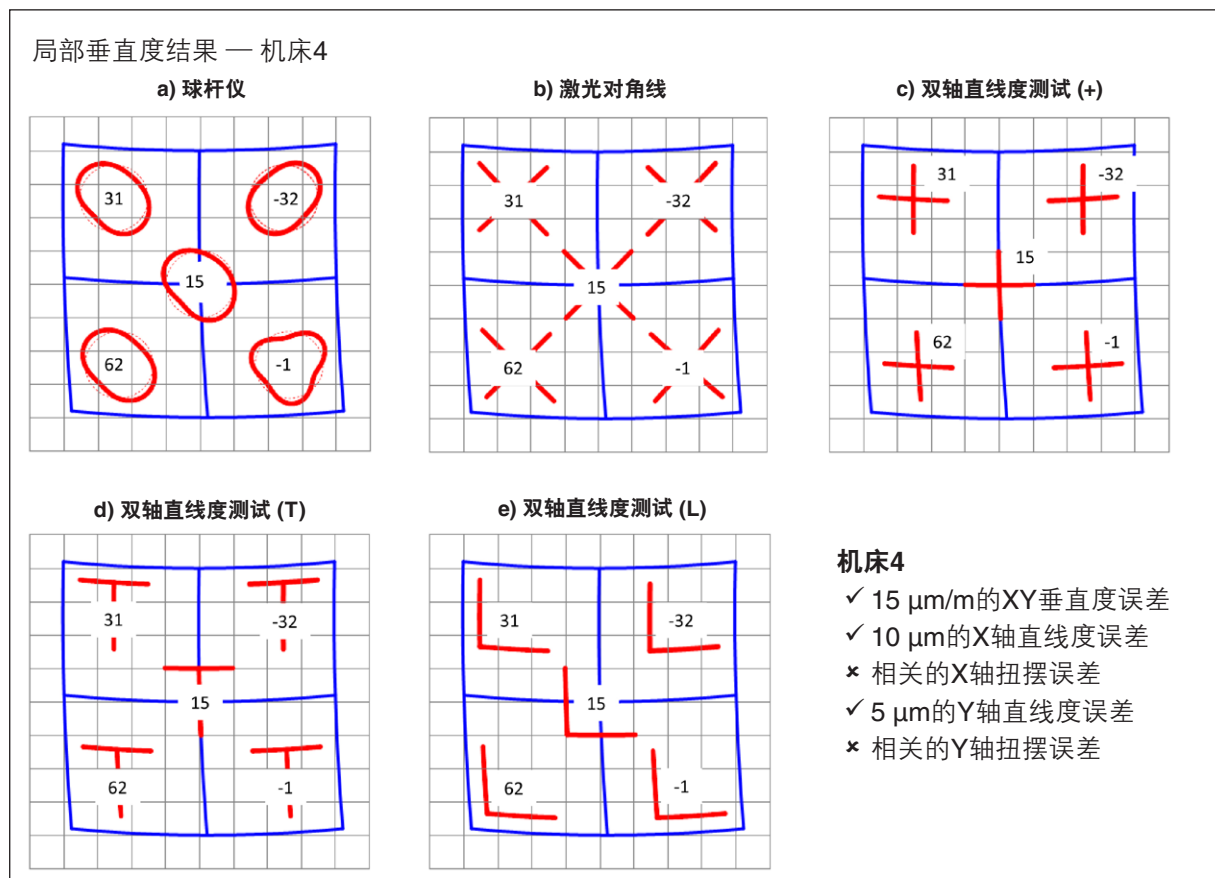


图22

机床4的模拟测试结果表明, 局部垂直度结果因测试位置而异, 但所有测试方法得出的结果相同。这表明, X轴和Y轴直线度误差会导致局部垂直度发生变化。显然, 在此类机床上必须谨慎选择测试位置。所有测试方法得出的结果都相同, 因为机床4上不存在因扭摆引起的角度变形。

局部垂直度模拟结果 — 机床5

图23显示的是, 采用每种模拟模式对机床5进行局部垂直度测试模拟而得到的结果。

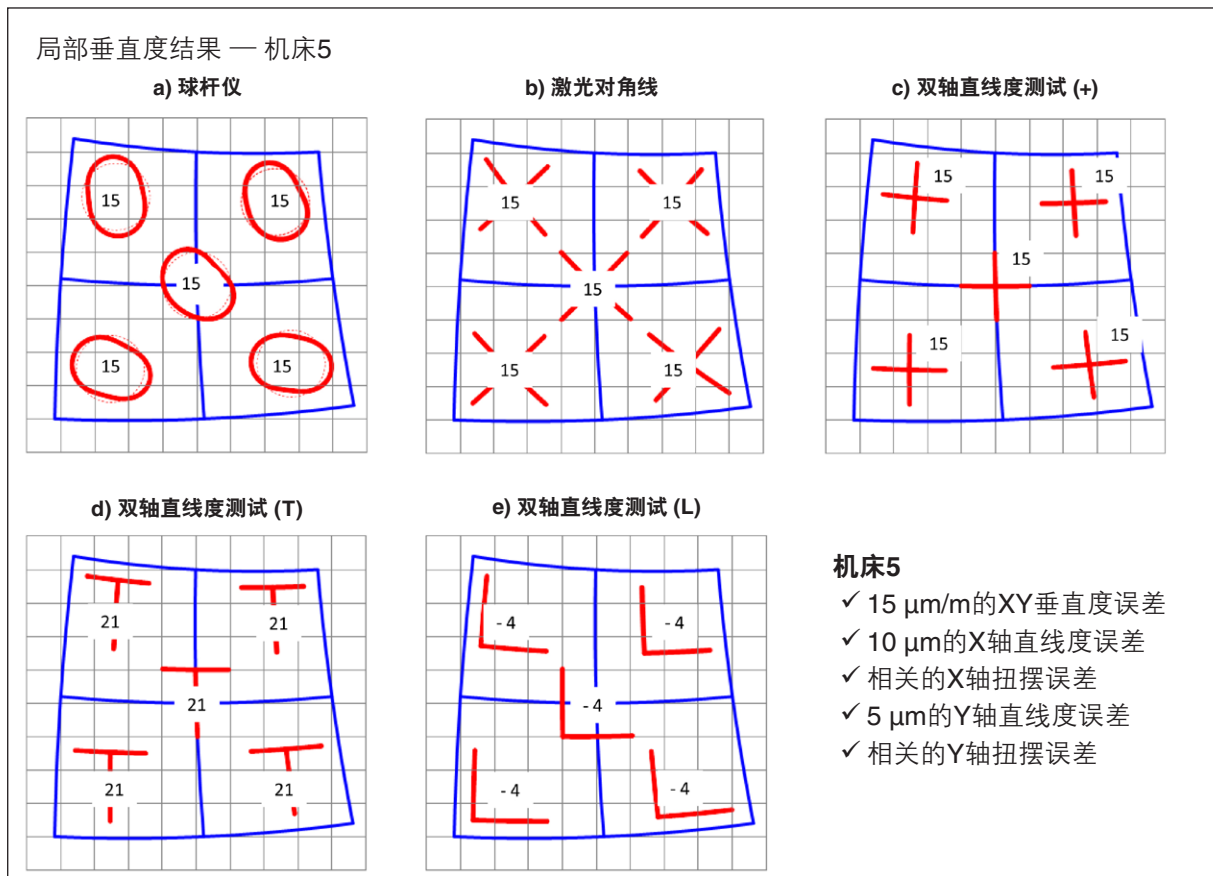


图23

机床5的模拟测试结果表明, 局部垂直度结果因测试方法而异, 但不受测试位置的影响。利用球杆仪、激光对角线测试法和“十”字形双轴直线度测试法得出的结果相同, 但“L”形和“T”形双轴测试法得出了不同的结果。同样地, 无论在哪个测试位置, 垂直度结果都一致。这表明, 如果机床的两条轴存在直线度误差, 并都引起相应的扭摆变形(假设机床是简单的刚体), 但是局部和全局性垂直度却不会受到影响, 即使机床发生明显“弯曲”。

局部垂直度结果 — 综述

如果机床的一条轴或多条轴存在直线度误差, 但不存在因扭摆引起的角度变形, 那么, 局部垂直度结果将因测试位置而异, 但所有测试方法得出的垂直度结果都相同。

如果机床存在直线度误差, 并引起相应的角度(俯仰或扭摆)变形误差, 但是这并不会引起局部垂直度变化; 因此, 局部垂直度测试结果不受测试位置影响。然而, “T”形和“L”形测试法得出的局部垂直度结果不同于利用球杆仪、激光对角线测试法和“十”字形双轴测试法得出的结果。其他模拟(本文中未显示)表明, “T”形和“L”形测试法得出的局部垂直度结果也因设备方向而异; 这与在相同条件下得出的全局性垂直度结果也因设备方向而异一样。

在长宽比不相等的机床上测试全局性垂直度误差

在上文中模拟的机床上，X轴和Y轴都是等长的。然而，实际机床通常都是X轴比Y轴长，而Z轴最短。如果机床各轴的轴长明显不等，那么在测试全局性垂直度时，就需要采用可通过配置适应轴长差异的测试设备。双轴直线度测试法和激光对角线测试法通过轻松调整即可适应轴长差异。然而，球杆仪测试通常依赖于360°圆测试，因此特别适用于各轴轴长非常接近的机床。雷尼绍先进的球杆仪诊断软件在一定程度上解决了这个问题，该软件可以分析220°圆弧，因而可对长宽比接近1½: 1的机床进行全局性垂直度测试。

对于长宽比较大的机床，可以沿长轴在多个位置进行球杆仪测试，然后对得出的垂直度结果取平均值。为了比较这种方法与其他测试方法的性能，我们模拟了另一台机床（机床6），其X轴长750 mm，Y轴长250 mm。这台机床的全局性垂直度误差为15 μm/m，X轴直线度误差为10 μm，Y轴直线度误差为5 μm。图24显示的是，采用每种模拟模式对机床6进行全局性垂直度测试模拟而得到的结果。

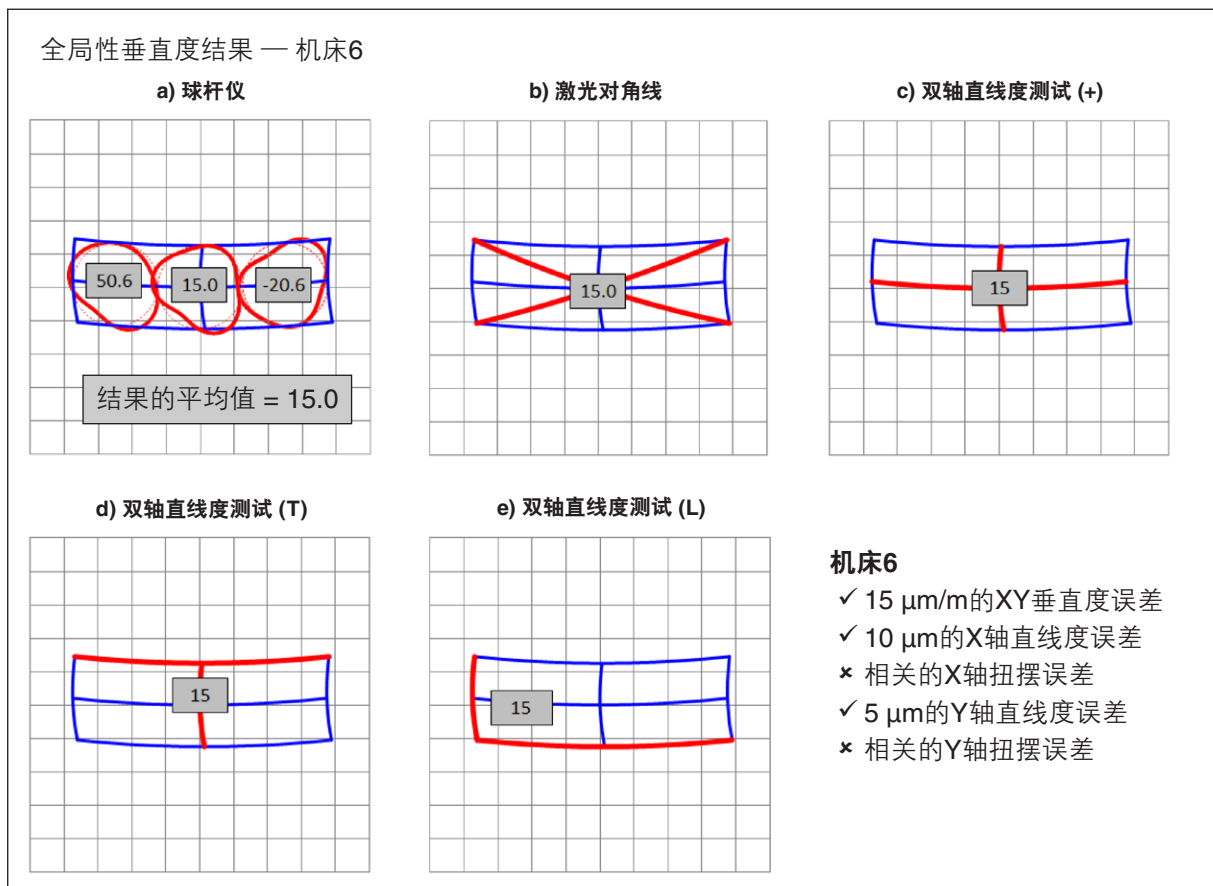


图24

请注意，三次球杆仪测试得出的垂直度结果的平均值为15 μm/m，与其他各种测试方法得出的全局性垂直度结果相符。

机床1至6上模拟的直线度误差都是简单的曲线。然而，机床的细长轴往往表现出更复杂的直线度误差走向。为了研究不同测试方法在这种条件下的性能，我们模拟了另外一台机床。机床7和机床6的区别只在于，机床7的X轴直线度误差走向更复杂，这一点或许可以通过由艾里点支撑的轴看出来。图25显示的是，采用每种模拟模式对机床7进行全局性垂直度测试模拟而得到的结果。

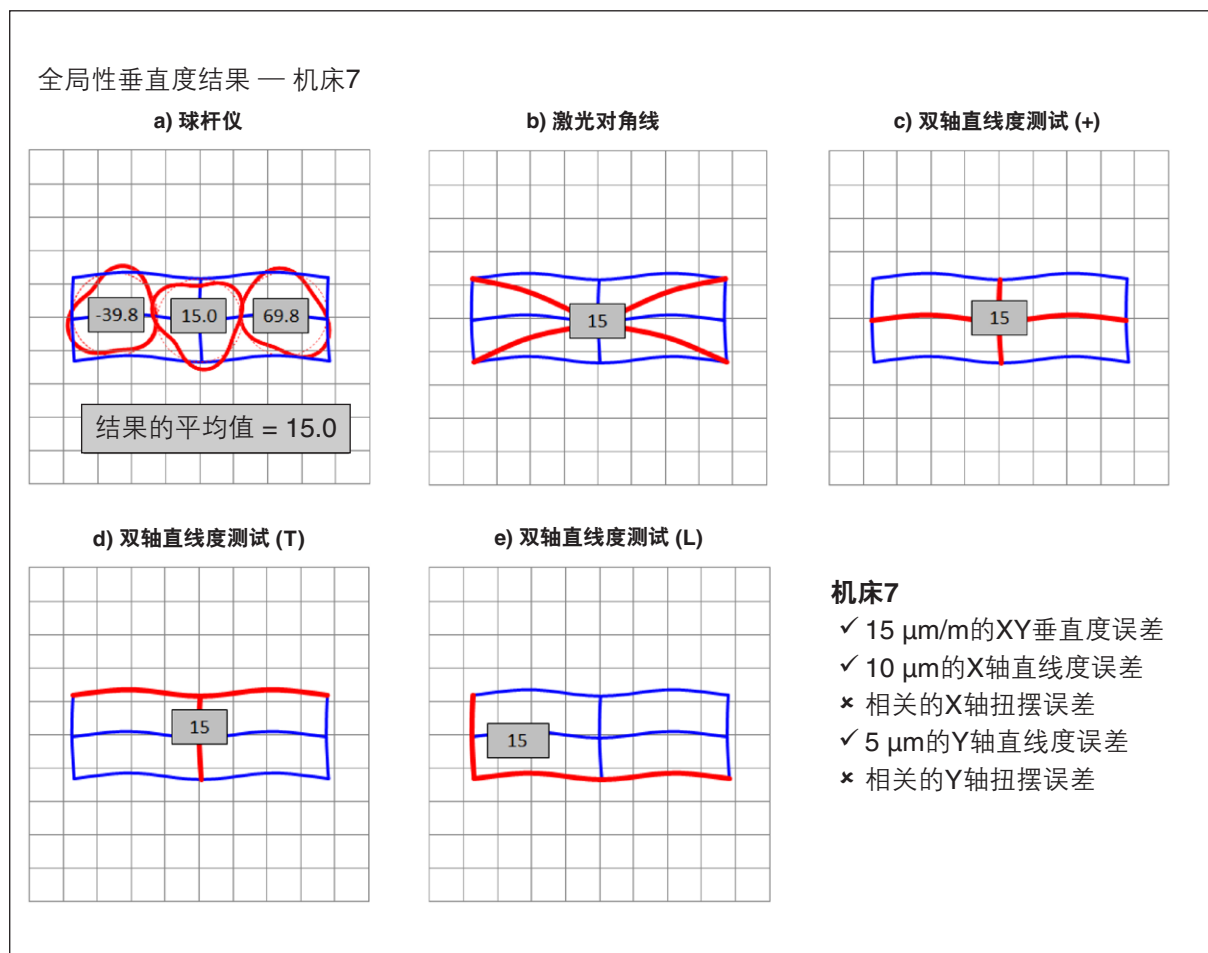


图25

同样地，三次球杆仪测试得出的垂直度结果的平均值与其他各种测试方法得出的全局性垂直度结果相符。请注意，如果加入相关的X轴和Y轴扭摆变形误差，那么通过“T”形和“L”形双轴直线度测试法得出的全局性垂直度就会明显不同，分别为95 $\mu\text{m}/\text{m}$ 和39 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。然而，通过球杆仪测试得出的垂直度结果的平均值以及通过“十”字形双轴直线度测试法和激光对角线测试法得出的全局性垂直度结果仍然一致，即15 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。

为方便起见，上图中模拟了三次半径为125 mm的球杆仪测试，刚好容纳在机床750 mm x 250 mm的工作区域内。然而，在大多数机床上，多个相邻的球杆仪测试圆并不能刚好容纳在机床的工作区域内。在这种情况下，可以使用等距分布的重叠圆。为了研究这种方法的性能，我们在机床6和机床7上模拟了四次球杆仪重叠圆测试，如图26所示。

球杆仪重叠圆测试模拟

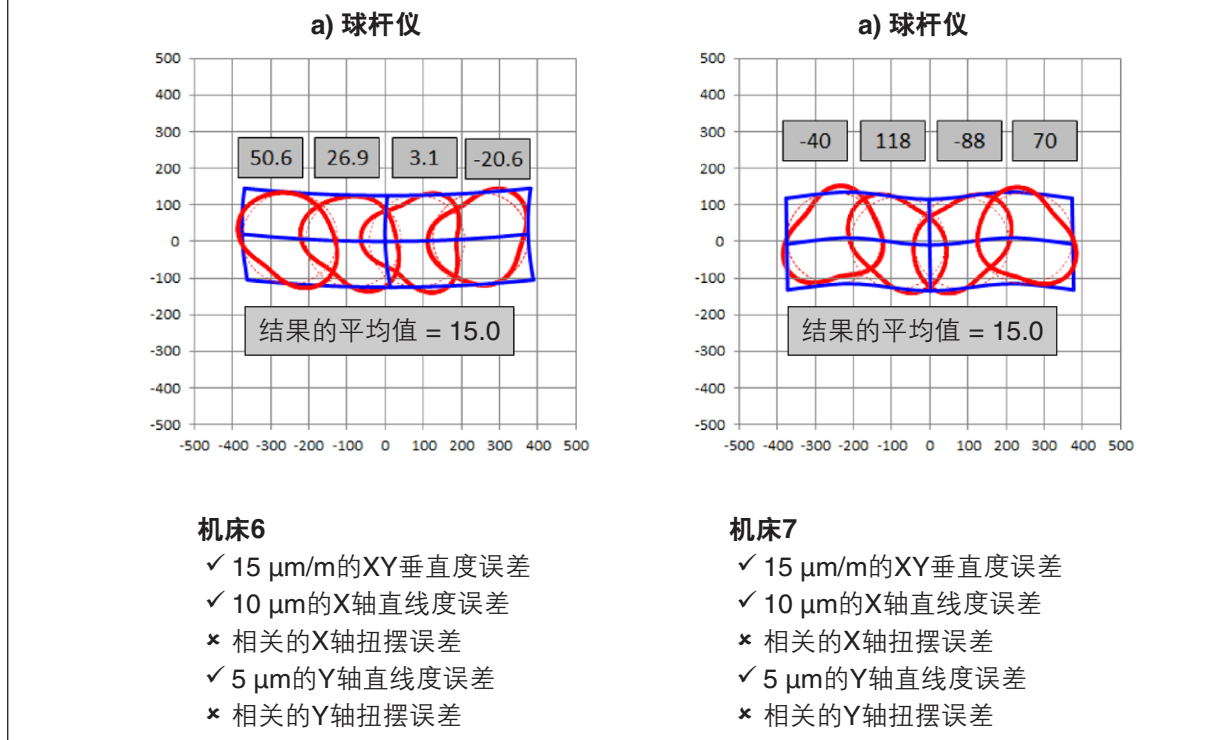


图26

这些模拟测试结果表明，四次球杆仪重叠圆测试得出的垂直度结果的平均值与三次球杆仪相邻圆测试得出的垂直度结果的平均值一致，都是15 $\mu\text{m}/\text{m}$ 。虽然这两个平均值并非在所有条件下都完全一致，但实际结果表明，这种方法允许一定程度的重叠。如果有两个以上的测试圆重叠，那么建议在设置测试时将重叠量设为相等。

上述结果表明，针对各轴轴长不等的机床，使用多次球杆仪测试得出的结果取平均值，可以有效估算机床的全局性垂直度。

总体结论

本文研究了ISO230-1对两条线性运动轴之间垂直度的定义，以及用于测量垂直度的各种测试方法。通过模拟各种测试方法，比较了这些方法在机床轴存在各种直线度和扭摆误差组合的条件下的性能。

这些模拟表明了以下几点：

- 通过ISO230-1标准所述各种垂直度测试方法得出的结果，因所用的测试方法、在机床工作区域内的测试位置及测试设备的方向而有所不同。
- 利用球杆仪、激光对角线测试法和“十”字形双轴直线度测试法在所有条件下得出的结果均相同。然而，如果机床的工作区域内存在因俯仰或扭摆引起的角度变形，那么采用“L”形和“T”形双轴直线度测试会得出不同的结果，而且这些结果还会因设备方向而异。
- 请注意，这些结果并不是“错误”结果，它们只是采用了不同的参照系。因此，在比较不同系统的垂直度结果时务必谨慎。如果测试位置或测试方法不同，则结果也可能不同。此外，还需要考虑符号规约和参考线拟合方法之间的差异。

- 如果对机床工作区域的对角或对边重复进行“L”形或“T”形双轴直线度测试，然后对得出的全局性垂直度结果取平均值，那么该平均值会更接近于利用球杆仪、激光对角线测试法或“十”字形双轴直线度测试法得出的结果。
- 对于轴长不等的机床，使用多次球杆仪测试得出的垂直度结果取平均值，可以估算全局性垂直度。
- 由于俯仰和扭摆误差会导致垂直度测试结果因测试方法、测试位置和设备方向而异，因此在执行空间误差补偿时需要谨慎对待垂直度误差。附录II中详细介绍了这一点。

作为补充，图27是针对ISO230-1标准中介绍的各种全局性垂直度测试方法列出的“星级评价表”。此表依据的是上述各项模拟的结果，同时结合了每种方法的主要特点和局限性。

测试方法星级评价表	机械直角尺和千分表按“L”形配置	机械直尺、直角尺和千分表按“T”形配置	机械直尺和90°分度器按“十”字形配置	激光干涉仪直线度测量镜组和光学直角尺按“L”形配置	激光干涉仪直线度测量镜组和光学直角尺按“T”形配置	使用球杆仪、环规或MCG运行圆测试	激光对角线测试
使用简便	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
适用于大型机器	☆☆	☆☆	☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆
适用于长宽比不相等的机器	☆☆	☆☆☆	☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆☆☆
不受扭摆误差影响	☆	☆☆	☆☆☆	☆	☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆
不受环境变化影响	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆☆☆	☆☆	☆	☆☆☆☆	☆☆

图27

附录I — 直线度误差及相关扭摆误差的模拟

直线度误差及相关扭摆误差的模拟所用的方程式如下。假设机床的X轴长度为L，它存在一个简单的弯曲或曲线，因而导致直线度误差为S，如图28所示，其中蓝线表示变形（为使表述清楚，图中夸大了变形）。

这种简单的直线度误差可以用二次方程 $\delta y = Kx^2$ 来模拟，其中 δy 是X轴于位置x在Y轴方向上的直线度偏差，K是常数。代入 $\delta y = S$ 和 $x = L/2$ ，重新整理后得出 $K = 4S/L^2$ 。因此，X轴于某个位置在Y轴方向上的X轴直线度误差的方程式为：

$$\delta y = 4Sx^2/L^2 \dots\dots\dots \text{方程式1}$$

现在设想一下，如果在机床弯曲的X轴上方安装一条笔直的Y轴，将会发生什么，如图29（红线）所示。在没有其他约束条件的情况下，当X轴运动时，Y轴的角度会随X轴的局部扭摆角度而变化。用方程式1对x求导，便可得出这个“相关扭摆角度” θ ，即 $\theta = 8Sx/L^2$ 。相关扭摆误差会导致在X轴方向上出现小幅度位移 δx ，该位移量会随在Y轴上的位置而变化。如果 θ 表示弧度，我们忽略二阶项，则该位移量可近似表示为 $\delta x = -y\theta$ 。请注意，如果机床还存在全局性垂直度误差 θ_0 ，那么先把这个误差和 θ 相加，再计算 δx ，得出 $\delta x = -y(\theta_0 + \theta)$ 。代入 θ 之后，得出：

$$\delta x = -y(\theta_0 + 8Sx/L^2) \dots\dots\dots \text{方程式2}$$

通过方程式1和方程式2可计算出在任意一般x,y位置的机床位置细微误差 δx 和 δy 。如果命令机床移至位置[x,y]，那么机床实际到达的位置是[(x+ δx),(y+ δy)]。代入 δx 和 δy 之后，得出：

$$\text{实际位置} = [(x - y(\theta_0 + 8Sx/L^2)),(y+4Sx^2/L^2)] \dots\dots\dots \text{方程式3}$$

如果机床存在垂直度误差XY，X轴存在直线度误差，而且因该直线度误差引起相关扭摆变形，则可使用方程式3计算机床在任意x,y位置的定位误差。由于直线度误差并不一定会导致相关的扭摆误差变形（取决于机床构造和机械结构链），因此 $8Sx/L^2$ 可能为0。在这种条件下，方程式3变为：

$$\text{实际位置} = [(x - y\theta_0),(y+4Sx^2/L^2)] \dots\dots\dots \text{方程式4}$$

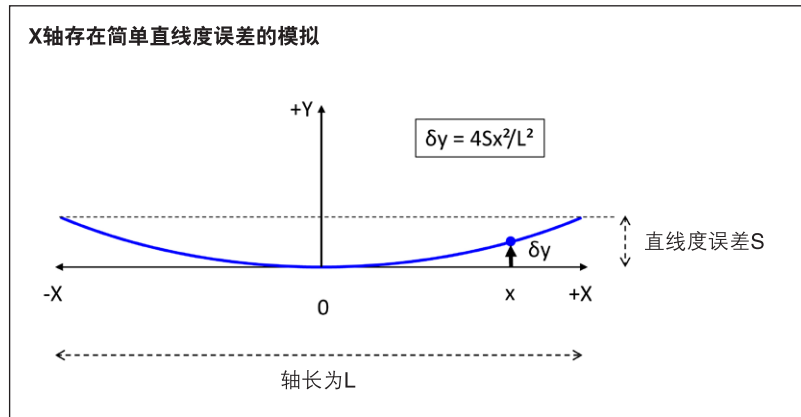


图28

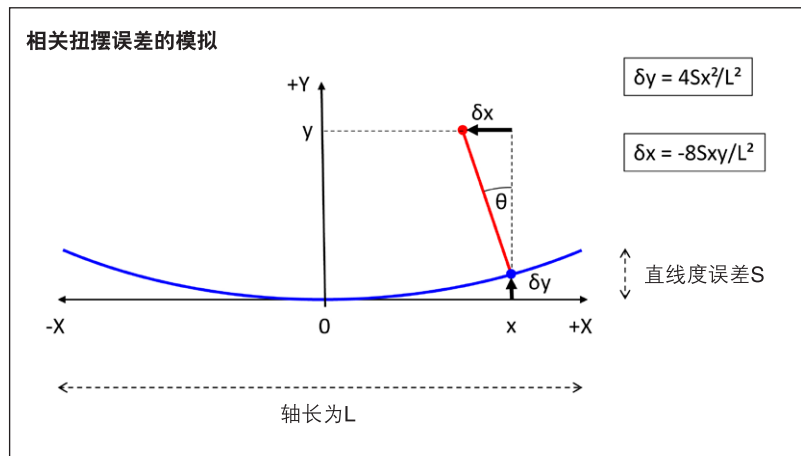


图29

我们可以用类似的方式推导出关于Y轴的方程式, 以此模拟Y轴直线度误差及任何相关扭摆误差的影响。(请注意, 在本例中, 无需再次考虑垂直度误差。) 结合这些方程式, 我们可以计算出本文中模拟的所有机床的定位误差。

在模拟每种垂直度测试方法时, 将生成适用的命令位置序列 (根据测试方法而定), 计算机床在每个位置的定位误差, 然后采用适用的算法来计算垂直度。

附录II — 机床垂直度误差的空间补偿

在执行垂直度误差补偿或调整时, 应当考虑以下几点。

由于直线度、俯仰和扭摆误差会根据测试方法、测试位置和设备方向的不同而导致垂直度测试结果出现变化, 因此建议先对直线度、俯仰和扭摆误差进行测量和补偿。在尽可能减小这些误差之后, 垂直度 (以及附带的线性) 误差的测量将基本不受测试位置和测试方法的影响, 从而可提高垂直度结果的可靠性和易用性。

对测得的垂直度误差进行补偿时应务必谨慎, 以确保所应用的补偿可以保持或优化与机床上其他参考线/特征之间的准直状态。需要考虑的准直状态举例如下。

- 补偿的轴运动与主轴的回转轴中心线之间的平行度或垂直度
- 补偿的线性轴运动与工作台台面之间的平行度或垂直度
- 补偿的轴运动与第四轴和第五轴上的参考点之间的准直。

这些潜在的影响因素可以通过一个简单的例子清楚地展示出来。假设一台车床, 我们采用本文中介绍的一种测试方法测得, X轴和Z轴之间的垂直度误差为 $40\ \mu\text{m}/\text{m}$, 如图30a所示。图中显示, Z轴已正确准直, 与主轴的回转轴中心线平行, 但X轴存在准直偏差。如果只单独测量XZ垂直度, 则用户无法判断X轴和/或Z轴是否与主轴正确准直, 因此存在可能会错误应用垂直度误差补偿的风险。用户可以选择对X轴或Z轴 (或任意两轴组合) 应用交叉轴补偿, 以修正垂直度误差。

图30b显示的是, 在X轴运动过程中, 在Z轴上 (正确) 应用细微 ($40\ \mu\text{m}/\text{m}$) δz 修正的效果。请注意, 此时刀具的补偿X轴运动与Z轴成 90° (因此, X轴和Z轴此时看起来互相“垂直”), 而且Z轴与主轴的回转轴中心线保持平行。

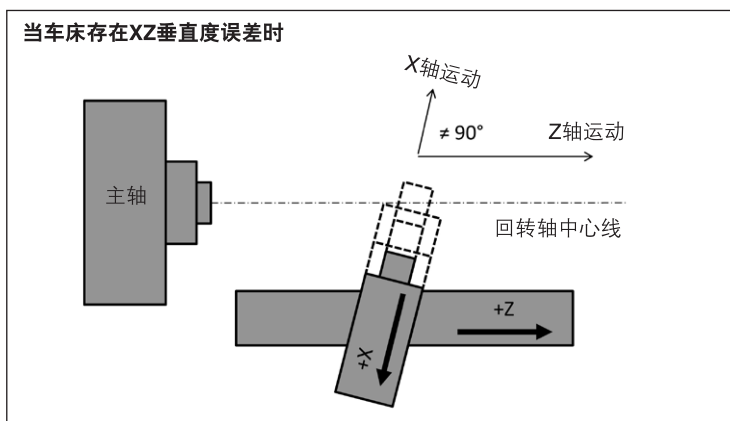


图30a

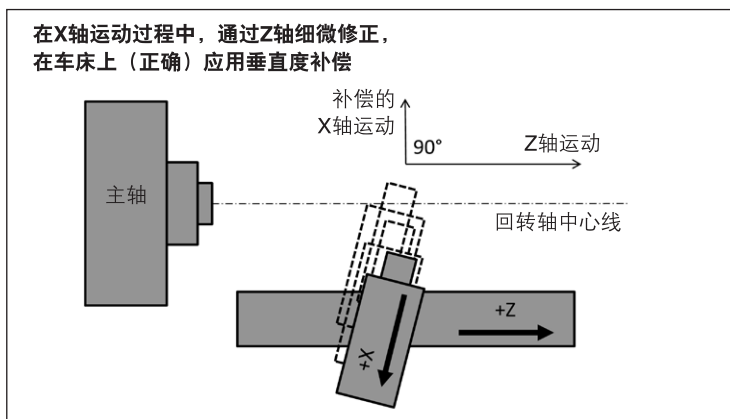


图30b

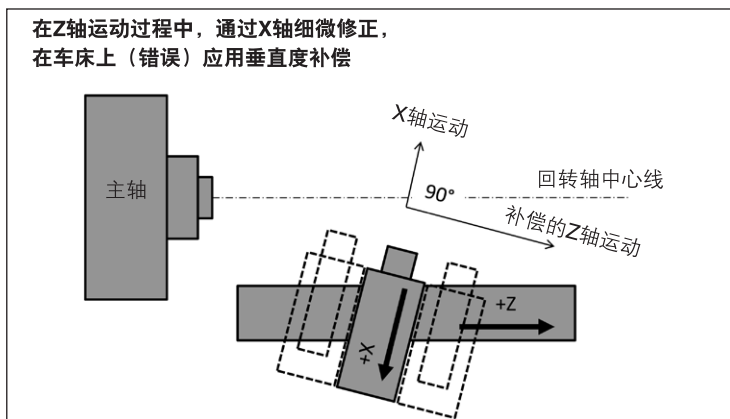


图30c

图30c显示的是,在Z轴运动过程中,在X轴上(错误)应用细微(40 μm/m) δx修正的效果。请注意,尽管刀具的补偿Z轴运动与X轴成90度(X轴和Z轴仍然看起来互相“垂直”),但补偿的Z轴运动与主轴的回转轴中心线不平行。

在图30b和图30c中,通过补偿可确保补偿的X轴和Z轴运动相互垂直;但在图30c中,通过补偿却导致补偿的Z轴运动与主轴的回转轴中心线之间出现准直偏差。这个例子清楚地说明了,在通过软件补偿机床垂直度之前,为什么一定要考虑机床的其他准直状态。在补偿较大的XZ或YZ垂直度误差时,这一点尤为重要。在这种情况下,建议先通过机械调整来消除X轴、Y轴、Z轴、主轴的回转轴中心线和机床工作台之间的大部分垂直度和平行度准直偏差。然后,再通过空间误差补偿进行最终调整。

参考文件

1. ISO230-1:2012《机床测试规范 — 第1部分:机床在空载或准静态条件下运行的几何精度》
2. 雷尼绍白皮书《TE325 — 激光干涉法直线度测量及其在移动工作台上的应用》
3. ISO230-4:2005《机床测试规范 — 第4部分:数控机床的圆测试》
4. ISO230-6:2002《机床测试规范 — 第6部分:体对角线和面对角线位置精度的测定(对角线位移测试)》

www.renishaw.com.cn/calibration

 #雷尼绍

© 2013-2022 Renishaw plc. 版权所有。RENISHAW®和测头图案是Renishaw plc的注册商标。
Renishaw产品名、型号和“apply innovation”标识为Renishaw plc或其子公司的商标。
其他品牌名、产品名或公司名为其各自所有者的商标。
Renishaw plc. 在英格兰和威尔士注册。公司编号: 1106260。注册办公地: New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK。
在出版本文时,我们为核实本文的准确性作出了巨大努力,但在法律允许的范围内,无论因产生的所有担保、条件、声明和责任均被排除在外。



扫描关注雷尼绍官方微信

文档编号: H-5650-3247-01-A

发布: 2022.12

上海 T +86 21 6180 6416 E shanghai@renishaw.com	天津 T +86 22 8485 7632 E tianjin@renishaw.com	青岛 T +86 532 8503 0208 E qingdao@renishaw.com
北京 T +86 10 8420 0202 E beijing@renishaw.com	成都 T +86 28 8652 8671 E chengdu@renishaw.com	西安 T +86 29 8833 7292 E xian@renishaw.com
广州 T +86 20 8550 9485 E guangzhou@renishaw.com	重庆 T +86 23 6865 6997 E chongqing@renishaw.com	宁波 T +86 574 8791 3785 E ningbo@renishaw.com
深圳 T +86 755 3369 2648 E shenzhen@renishaw.com	苏州 T +86 512 8686 5539 E suzhou@renishaw.com	郑州 T +86 371 6658 2150 E zhengzhou@renishaw.com
武汉 T +86 27 6552 7075 E wuhan@renishaw.com	沈阳 T +86 24 2334 1900 E shenyang@renishaw.com	