

# 激光干涉法直线度测量及其在移动工作台上的应用

作者: M.A.V. Chapman; R. Fergusson-Kelly; W. Lee

## 简介

本白皮书详细介绍了雷尼绍激光干涉法直线度测量光学镜组的工作原理；然后解释了如何使用这些光学镜组来测量移动工作台的直线度；特别着重说明了，当直线度干涉镜是移动镜组时与当反射镜是移动镜组时，这两种设置之间的测量值差异。

## 直线度测量光学镜组概述

图1是测量移动工作台的X轴水平方向直线度的典型设置。所用的三个关键组件是：

- 激光头 (如图所示安装在三脚架上)
- 直线度干涉镜 (如图所示, 安装在主轴上)
- 直线度反射镜 (如图所示, 安装在移动工作台上)

当工作台沿箭头方向(X轴)移动时, 激光头和光学镜组可测量工作台的运动与一条完美直线之间的任何水平(左右)方向偏差。图2是光学镜组和穿过它们的激光光束路径的近距离视图。

此外, 还可以将直线度干涉镜和反射镜旋转 $90^\circ$  (见图3) 并重复上述测量过程, 便可测量工作台的运动与一条完美直线之间的垂直方向偏差, 即垂直方向直线度。

为简单起见, 下文中的所有示意图和描述均指在立式主轴(Z)机床上测量水平轴(X)的垂直方向直线度。不过, 本文中阐述的这些原理同样适用于坐标系适当旋转后的其他机床布局。

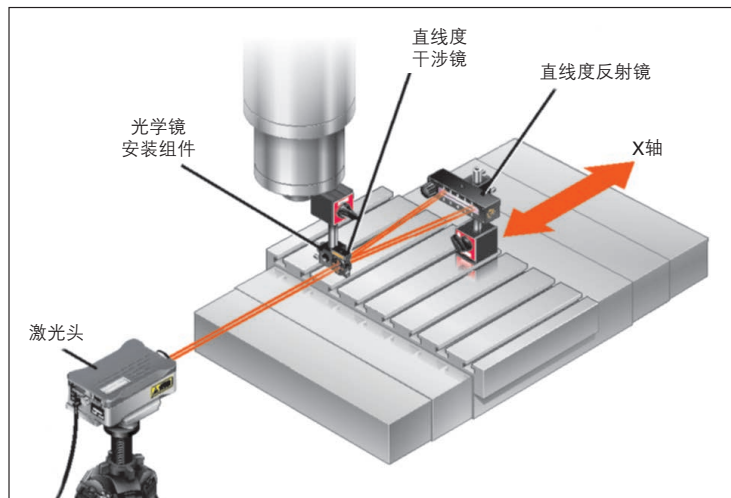


图1

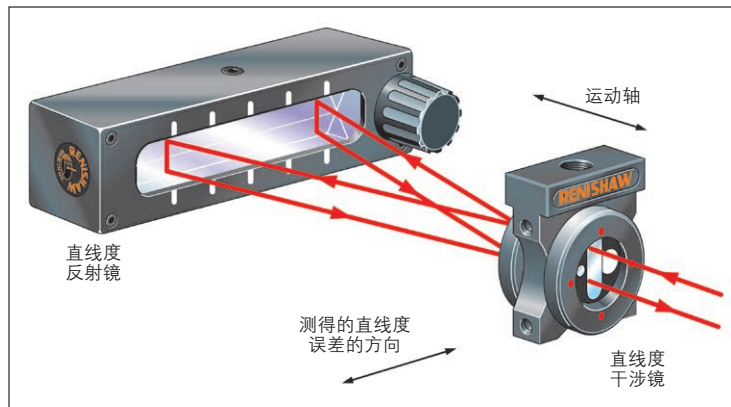


图2

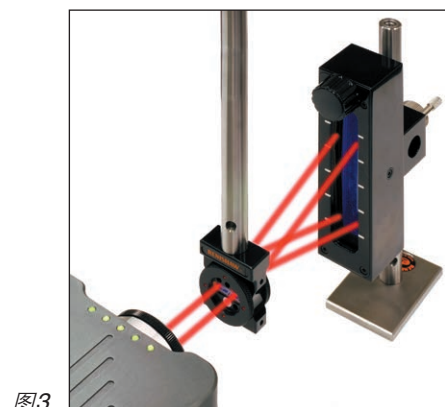


图3

为了理解激光系统如何测量直线度，最简单的方法是，首先看一看当反射镜是移动镜组时，将会发生什么，如简图图4所示。从激光头射出的激光光束到达直线度干涉镜时，将被分成两条光束，二者之间的发散角为 $2\theta$ （原理请详见下文中的“直线度干涉镜详解”章节）。这两条光束到达直线度反射镜后，将被原路

反射回来（原理请详见下文中的“直线度反射镜详解”章节）。它们穿过直线度干涉镜后将重新合为一条光束并返回到激光头，经过相互干涉后产生测量信号。最后，激光系统将通过检测被干涉镜分开的两条光束之间的光程长度相对变化来测量直线度误差。

如果直线度反射镜在X轴方向上沿一条完美直线移离干涉镜（如图4中的黄色箭头和虚线新位置所示），那么光束1和光束2的光程会增加相同的长度，因此激光系统的直线度测量值不会发生变化。

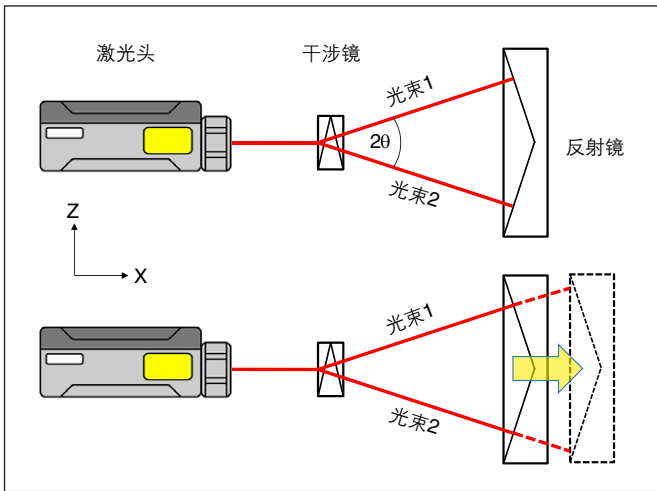


图4

但是，如直线度反射镜在Z轴方向上移动了距离 $S$ （如图5中的黄色箭头和虚线位置所示），那么光束被干涉镜分开照射到反射镜上，再被反射回干涉镜上之后，光束1的光程长度将增加 $2 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ ，而光束2将缩短 $2 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 。因此，光束1和光束2之间的光程长度相对变化为 $4 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 。在直线度模式下，激光系统的软件将系统测出的光程长度相对变化转换为直线度读数，然后除以 $4 \cdot \sin(\theta)$ ，最后得出垂直方向直线度读数 $S$ 。 $\theta$ 的值是根据所使用的直线度测量光学镜组（长距离或短距离）预定义的。

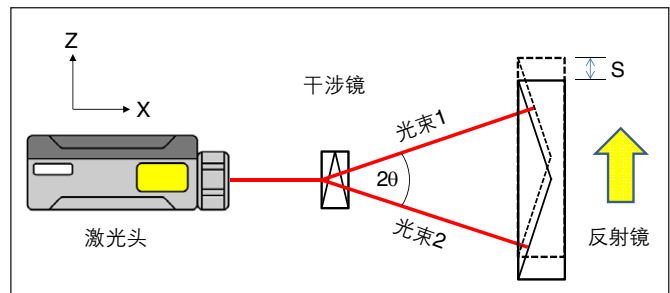


图5

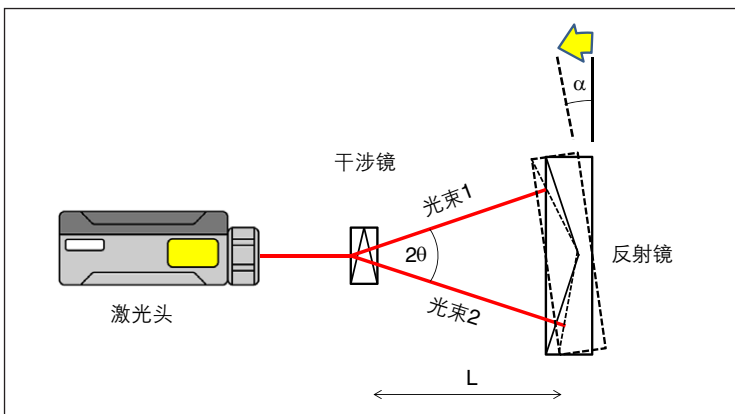


图6

现在再看一下，如果反射镜扭转（倾斜）一个小角度 $\alpha$ ，将会发生什么，如图6所示。（请注意，为使表述清楚，本例中夸大了倾斜角度。）这时，光束1和光束2的光程长度再次发生相对变化。如果 $\alpha$ 较小（例如，可能是因移动线性轴的俯仰误差引起的），则可以看到光束1的光程长度缩短约 $2 \cdot L \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha)$ ，其中 $L$ 是光学镜组之间的间隔；同时，光束2的光程长度增加了 $2 \cdot L \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha)$ 。因此，光束1和光束2之间的总光程长度相对变化为 $4 \cdot L \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha)$ 。然后，激光系统的软件将该总光程长度相对变化除以 $4 \cdot \sin(\theta)$ ，最后得出直线度误差读数 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。因此，如果直线度反射镜的角度改变，那么直线度读数也会改变。

由于发现了反射镜的角度变化似乎会“影响”直线度读数，因此人们通常认为直线度反射镜必须始终处于静止状态。然而，事实并非如此，因为有时我们可以反过来利用这种影响。

我们可以将这些光学镜组与千分表和精密直尺进行类比（见图7）。直线度反射镜和直尺的应用原理类似。如果反射镜或直尺沿Z轴方向移动，则激光干涉测量结果或千分表会直接记录移动距离。

如果反射镜围绕一个点倾斜了小角度 $\alpha$ ，且该点与干涉镜之间的距离为L，则直线度读数会改变 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。同样地，如果直尺围绕一个点倾斜了角度 $\alpha$ ，且该点与千分表测头之间的距离为L，则直线度读数也会

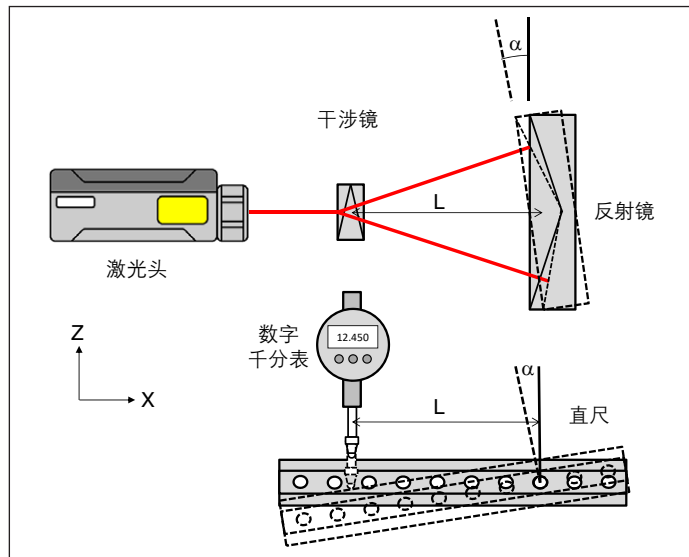


图7

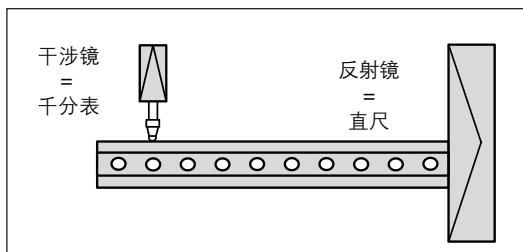


图8

改变 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。因此，我们可以把直线度干涉镜想象成相当于千分表，而直线度反射镜相当于精密直尺。直线度反射镜可在空间中沿其中心线有效生成一条虚拟直尺。然后直线度干涉镜会“显示”工作台的运动与该虚拟直尺之间的偏差。在决定哪个直线度测量光学镜应该移动，而哪个应该静止不动时，这个形象的类比非常有用（如图8直观所示）。我们稍后再详细讨论。

## 直线度反射镜详解

图4-图7以示意图的形式展示了一种简单的直线度反射镜，由两个彼此成一定角度的平面镜组成。而图1-图3所示的是雷尼绍的反射镜，设计较为复杂。它由一块实心玻璃制成，具有两个折射面和两个反射面，如图9所示。（请注意，为使表述清楚，图中修改了顶角。实际上，短距离直线度反射镜的顶角接近 $177^\circ$ 。）

图10展示了反射镜周围及其内部的光束路径。当激光光束射入玻璃时，由于折射率提高，光束经过折射后会靠近法线。然后，被两个互成 $90^\circ$ 的反射面逆向反射出去。最终，当激光光束离开玻璃时，由于折射率降低，光束经过折射后会偏离法线。

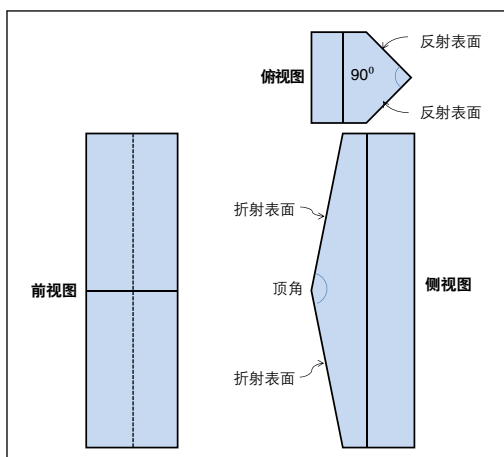


图9

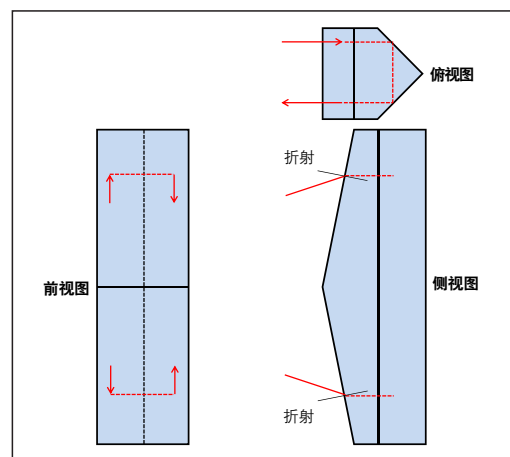


图10

这种设计虽然比较复杂,但比简单的双平面镜设计具有更多优点。

- 逆反射设计可确保射出光束和返回光束不会重叠,从而在光束准直过程中可以轻松跟踪光束路径。
- 逆反射还意味着,反射镜无需绕其长轴进行精确的滚摆准直,因为逆反射可确保将光束反射回干涉镜上。这样使得光束准直更加容易。
- 使用实心玻璃可以确保尺寸稳定性和机械强度。

详细的光学模拟表明,如果实心反射镜围绕一个点倾斜了小角度 $\alpha$ ,且该点与干涉镜之间的距离为 $L$ (如图7所示),则直线度读数仍会如前所述改变 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。因此,我们依然可以想象,这种较为复杂的实心玻璃直线度干涉镜在空间中沿其中心线有效生成一条虚拟直尺,如前文所述。

## 直线度干涉镜详解

直线度干涉镜(又称Wollaston棱镜)由三个楔形双折射晶体组成,如图11所示。与折射率恒定的各向同性材料不同,双折射材料的折射率随晶轴方向及入射光束的偏振而变化。光透过这种材料时,将以平行和垂直于晶体的光轴这两个线性偏振方向进行传输。其中一个偏振方向的折射率稍高,光传播得较慢;而另一个偏振方向的折射率较低,光传播得较快。晶体的两个外楔形的光轴呈垂直方向,内楔形的光轴则呈水平方向(如图11中的双箭头所示)。

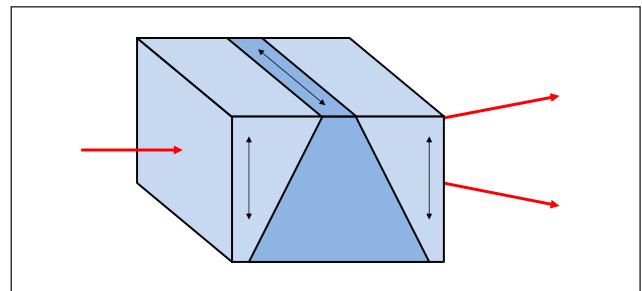


图11

图12显示了Wollaston棱镜内的光束路径。请注意,为使表述清楚,图中将圆偏振入射光束分成了两条独立光束(通常情况下它们是重叠的),光束发散角也有所夸大。

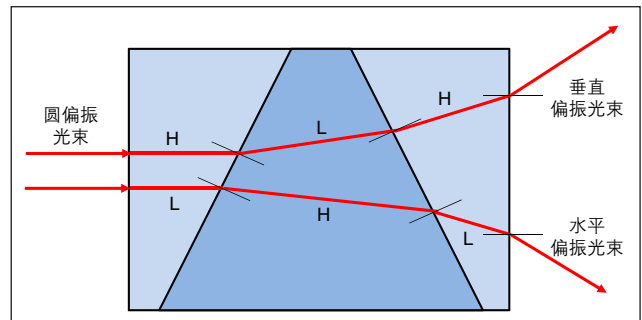


图12

一旦圆偏振激光光束照射到双折射材料的第一个楔形上,它就会被分成两条线性偏振光束,其中一条光束垂直偏振(即与第一个楔形的晶轴平行偏振),而另一条光束水平偏振(即与第一个楔形的晶轴垂直偏振)。由于这种材料的双折射特性,垂直偏振光束的折射率(H)略高于水平偏振光束的折射率(L),如图所示。两条光束沿相同方向穿过第一个楔形。

当垂直偏振光束(上方)到达第一个和第二个楔形之间的交界面时,由于折射率降低,光束经过折射后会偏离法线。然而,当水平偏振光束(下方)到达该交界面时,由于折射率提高,光束经过折射后会靠近法线。因此,光束从这个点开始发散。

当垂直偏振光束到达第二个和第三个楔形之间的交界面时,由于折射率提高,经过这次折射后,光束会靠近法线。同时,当水平偏振光束到达该交界面时,由于折射率降低,经过这次折射后,光束会偏离法线。由于第二个和第三个楔形之间的交界面与第一个和第二个楔形之间的交界面的倾斜方向相反,因此两条光束的发散角增大。

最终，当这两条光束穿过第三个楔形回到空气中时，由于折射率降低，它们都会进一步偏离法线，因而发散角进一步增大。直线度测量光学镜组按照严格的公差制造，因此Wollaston棱镜折射出的两条光束之间的发散角 ( $2\theta$ ) 能够与直线度反射镜的名义角相匹配，偏差控制在几角秒内。

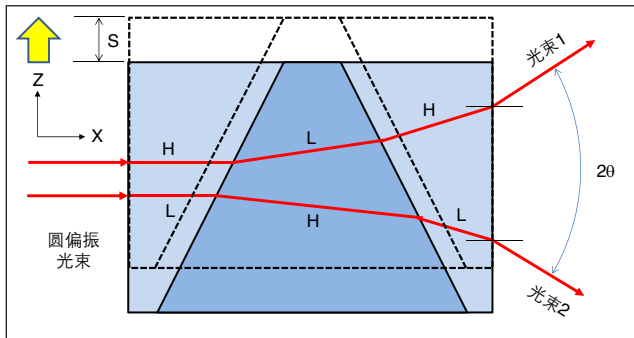


图13

侧向移动距离 $S$ 之后，（形成干涉测量光束1的）上方光束的光程长度会缩短 $2 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ ，而（形成干涉测量光束2的）下方光束的光程长度会增加 $2 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 。因此，光束1和光束2之间的总光程长度相对变化为 $-4 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 。激光系统的软件将光程长度相对变化转换为直线度读数，然后除以 $4 \cdot \sin(\theta)$ ，最终得出直线度误差读数 $-S$ 。请注意，这与当直线度反射镜侧向移动距离 $S$ 时（见图5）得出的结果完全相同，只是符号相反。

现在来看一下，如果Wollaston棱镜围绕其几何中心倾斜了小角度 $\alpha$ ，将会发生什么（为使表述清楚，图14中的倾斜角度有所夸大）。通过对激光系统的光束路径进行详细的光学模拟，结果表明：光束1和光束2之间的光程长度差异（以及由此得出的直线度读数）不会因Wollaston棱镜的小角度移动而明显改变。将直线度干涉镜比作千分表时，这个结论同样适用，也不会受到小幅角度变化的影响。

正是因为Wollaston棱镜内部的差分折射会使光束发散，所以它可用于测量直线度。我们来看一看，如果Wollaston棱镜沿Z轴方向移动了距离 $S$ 到达新位置，如图13中的虚线所示，将会发生什么。显然，上方（垂直偏振）光束会穿过较多具有较低折射率(L)的材料，而下方（水平偏振）光束会穿过较多具有较高折射率(H)的材料，因此光程长度会相应地发生改变。由于穿过Wollaston棱镜的光程长度差异也是产生光束发散角 $2\theta$ 的原因之一，因此我们可以很明显地看出，当Wollaston棱镜

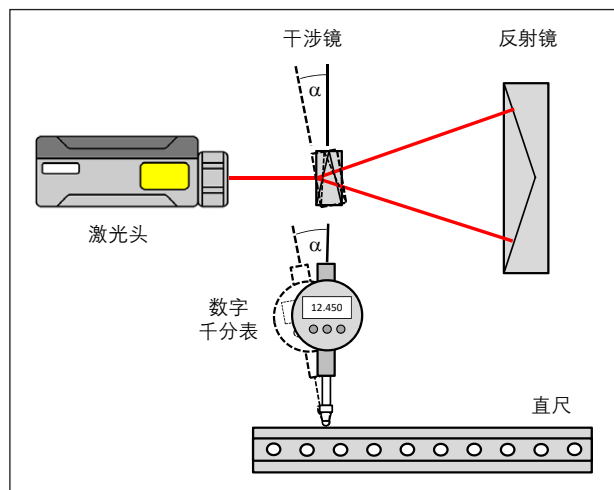


图14

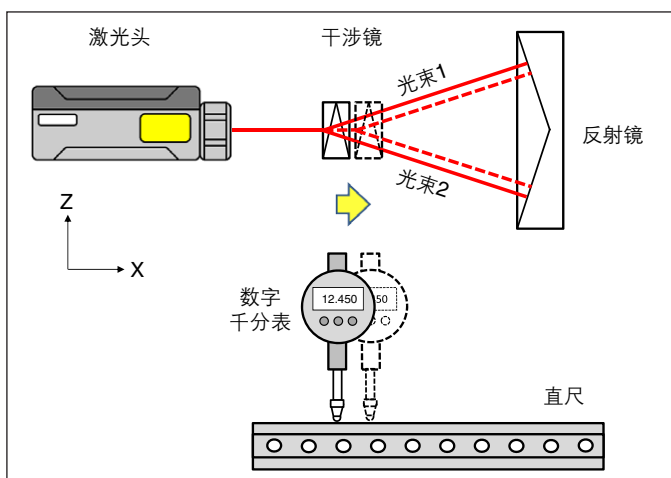


图15

图15展示了，如果在X轴方向上沿一条完美直线移动Wollaston棱镜（如黄色箭头和虚线新位置所示），将会发生什么。光束1和光束2的光程会增加相同的长度，因此激光系统的直线度测量值不会发生变化。将千分表沿一条准直直尺移动时，这个结论同样适用。



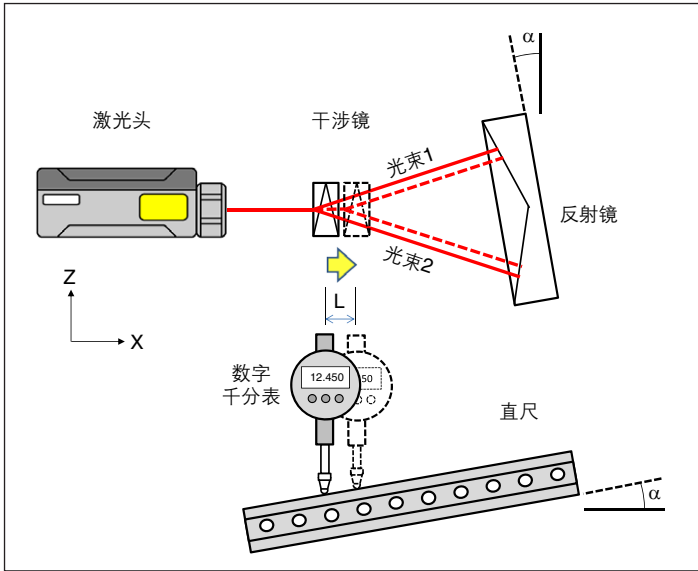


图16

最后我们看一下, 如果再次在X轴方向上沿一条完美直线移动Wollaston棱镜, 将会发生什么; 但是这次我们将直线度反射镜略倾斜一个小角度 $\alpha$ , 如图16所示(有所夸大)。如果移动了距离L, 则激光系统的直线度读数将改变 $L \cdot \tan(\alpha)$ 。请注意, 如果直尺也倾斜了同样的角度, 则千分表的读数也会发生完全相同的改变。在直线度测量过程中, 如果反射镜或直尺与运动轴之间存在准直偏差, 那么测量值会出现“斜率误差”。软件通常会端点拟合或最小二乘法拟合, 以消除这项误差。然而, 最好尽可能减小斜率误差(通过调整直尺或反射镜), 以降低由于测量时在X轴方向上的定位偏差, 而对直线度测量结果产生的影响; 对于激光头来说, 可确保在整个轴方向上保持高信号水平。

### 激光准直的影响

前文中, 我们的分析侧重于直线度干涉镜和反射镜的操作, 并将它们与千分表和直尺进行类比。然而, 激光系统执行测量还需要用到第三个组件, 即激光头。我们通过详细的分析确定了激光头位置的相对重要性, 以及准直偏差对直线度测量值的影响。

首先看一个简单的情况, 将激光头沿Z-轴方向移动距离S, 如图17所示。这时激光光束照射到干涉镜上的位置向下移动了距离S, 与干涉镜向上移动距离S的情况完全相同(见图13)。如前所述, 这样的移动会导致光束1和光束2在干涉镜附近发生 $-4 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 的光程长度相对变化。但是, 激光光束照射到反射镜上的位置也向下移动了距离S, 与反射镜向上移动距离S的情况完全相同(见图5)。这样的移动会导致两条光束在反射镜附近发生 $+4 \cdot S \cdot \sin(\theta)$ 的光程长度相对变化。这两个变化长度相等, 一正一负, 刚好抵消。因此, 如果激光头只是平移, 那么激光系统的直线度读数并不会改变。

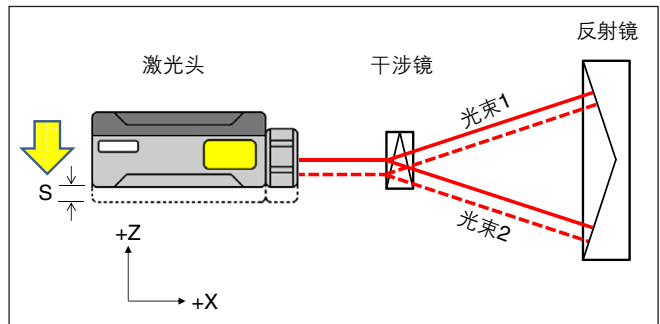


图17

如果激光头倾斜小角度 $\alpha$ (图18中所示有所夸大), 将会发生什么, 这一点并不好理解; 因此, 我们进行了详细的光学模拟, 以进一步研究这种情况。结果表明, 光束1和光束2之间的光程长度差异(以及由此得出的直线度读数)不会因激光头的小角度俯仰移动而明显改变。

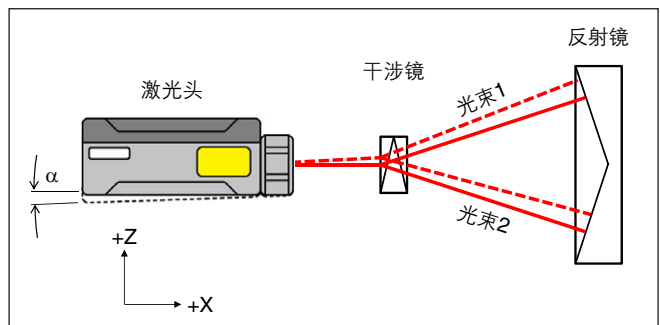


图18

然而，各种准直误差组合的模拟分析表明，如果Wollaston棱镜没有在滚摆方向（绕X轴）上相对于直线度反射镜精确准直，那么激光头容易产生扭摆（绕Z轴旋转）误差（见图19）。

模拟分析表明，如果Wollaston棱镜与反射镜之间的滚摆准直误差为 $\theta$ 弧度，则激光头会产生 $\alpha$ 弧度的扭摆误差，再结合光学镜组之间的间隔为L米，那么直线度读数（以米为单位）将改变 $L \cdot \alpha \cdot \theta$ 。这个公式同样适用于短距离和长距离直线度测量光学镜组。

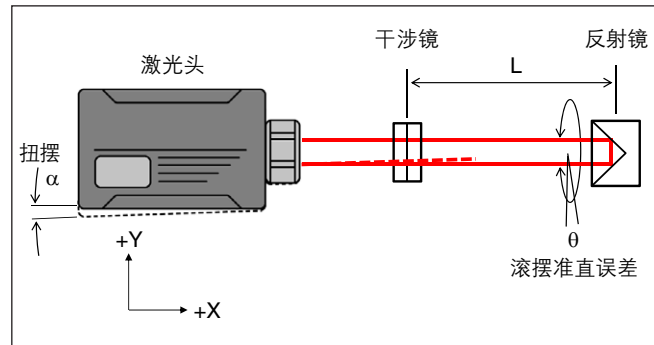


图19

转换测量单位后则是，如果Wollaston棱镜与反射镜之间的滚摆准直误差为 $\theta$ 度，则激光头会产生 $\alpha$ 角秒的扭摆误差，再结合光学镜组之间的间隔为L米，那么直线度读数（以微米为单位）将改变约 $L \cdot \alpha \cdot \theta / 11.818$ 。

例如：

如果Wollaston棱镜与反射镜之间的滚摆准直误差为 $1^\circ$ ，且光学镜组之间的间隔为1米，那么激光头与光学镜组之间将产生10角秒的准直误差，最终的直线度读数将改变0.846微米。

因此，建议在测量开始前，务必确保Wollaston棱镜和直线度反射镜在滚摆方向上精确准直。这样一来，激光头与光学镜组之间的小幅准直误差将不会对直线度读数产生明显影响。由此可以认为，利用激光干涉法得出的直线度读数仅取决于直线度反射镜（直尺）和直线度干涉镜（千分表）之间的相对位置。请注意，这与利用非激光干涉法测量直线度的工作原理截然不同；对于非激光干涉法而言，保持激光源的指向稳定性至关重要。

## 移动工作台的直线度测量

下面，本白皮书将探讨在立式主轴机床上利用两种不同的设置（A和B）测量X轴的垂直方向直线度的差异，即使用激光干涉仪系统或者千分表和直尺。为了着重说明这种差异，我们先看一下这样一种情况：由于移动工作台的重心转移，导致其在X轴方向上产生俯仰误差。本例中假设工作台铸件如同一个刚体，如果发生任何弯曲，则均来自于底层支撑导轨和轴承。为使表述清楚，下面的示意图中夸大了俯仰误差。

**设置A** — 直线度干涉镜（或千分表）安装在固定式主轴上，而反射镜（或直尺）安装在移动工作台上（见图20和21）。

**设置B** — 直线度反射镜（或直尺）安装在固定式主轴上，而干涉镜（或千分表）安装在移动工作台上（见图22和23）。

### 设置A（干涉镜或千分表固定）

下面的图20中显示的设置包括：安装在三脚架上的激光头、安装在主轴上的直线度干涉镜、安装在移动工作台上的直线度反射镜。图中显示了利用该设置得出的直线度结果，表明工作台的运动呈一条直线。这是由于当X轴移动时，反射镜生成的虚拟直尺与直线度干涉镜始终在同一个位置相交，因为反射镜的角度变化会被反射镜与干涉镜之间逐渐增大的距离所补偿。

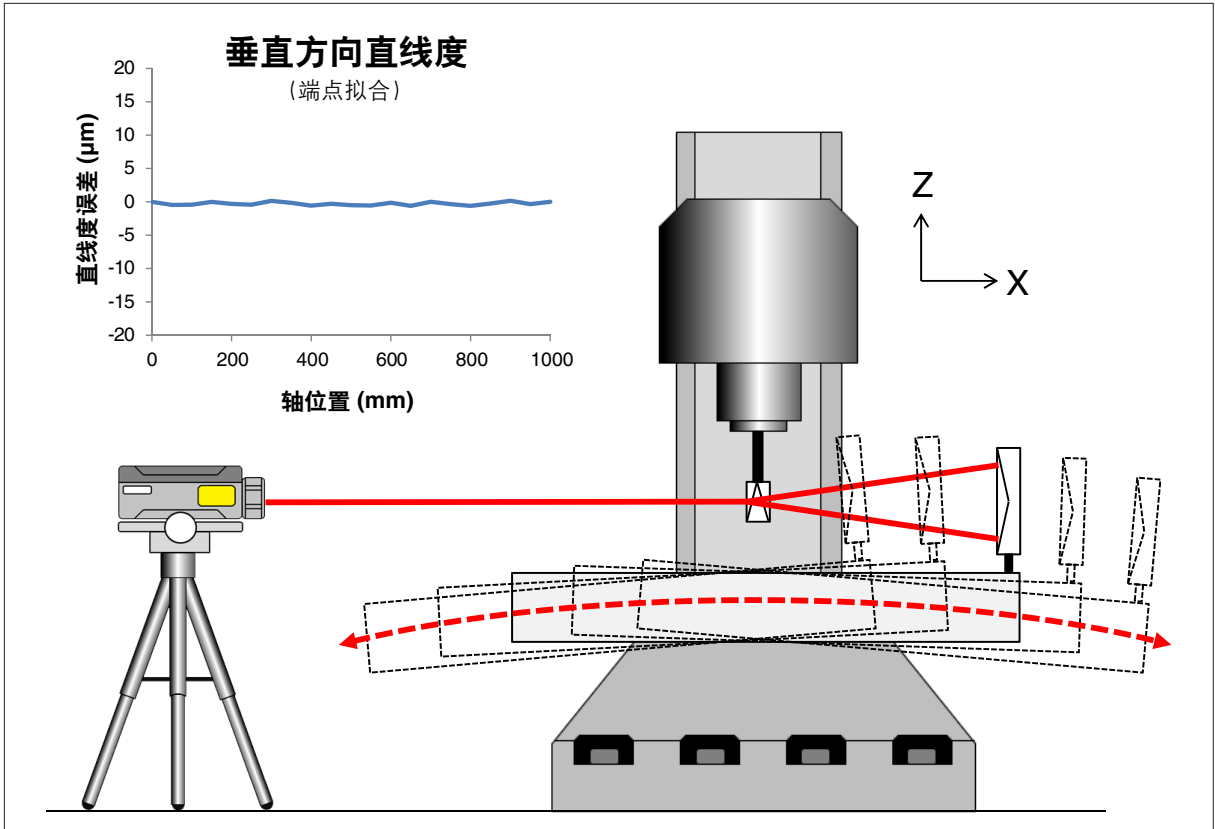


图20

这个结果乍看好像并不精确，因为很明显工作台沿一条曲线移动，而直线度结果图中显示的却是一条直线。我们稍后再详细讨论。

现在我们看一下，如果把激光系统换成在移动工作台上安装直尺，并在主轴上安装数字千分表，将会发生什么，如下方图21所示。

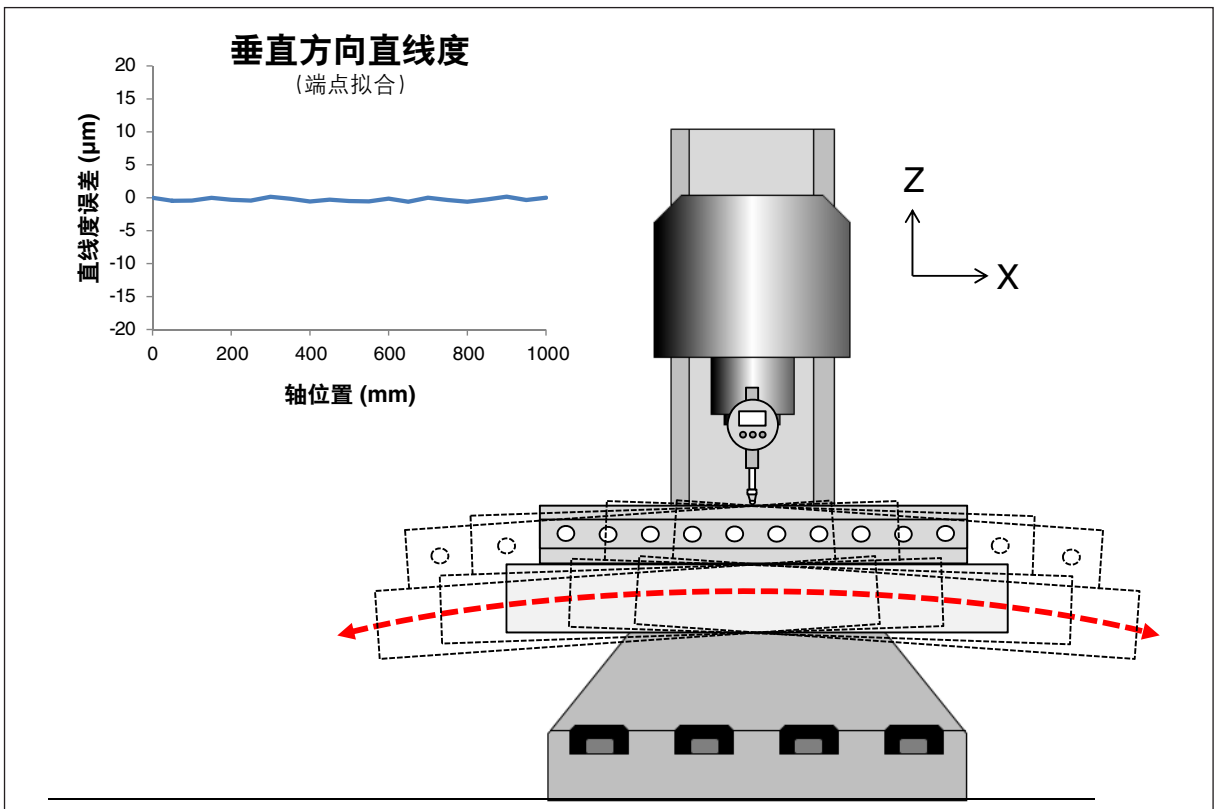


图21



利用该设置得出的结果图再次表明,工作台的运动呈一条直线。这是因为当工作台在主轴下方移动时,主轴与安装在工作台上的直尺之间的垂直距离保持不变。

使用激光系统并将反射镜安装在移动工作台上时获得的直线度结果,与使用千分表并将直尺安装在移动工作台上时获得的结果一致。

我们现在看一下,如果将这两个组件调换位置,将干涉镜(或千分表)安装在移动工作台上,将会发生什么,如设置B所示。

### 设置B (干涉镜或千分表移动)

图22中显示的设置包括:安装在三脚架上的激光头、安装在主轴上的反射镜、安装在移动工作台上的干涉镜。利用该设置得出的直线度结果图表明,工作台的运动呈一条曲线。显然,这与将反射镜用做移动镜组时获得的结果大不相同。

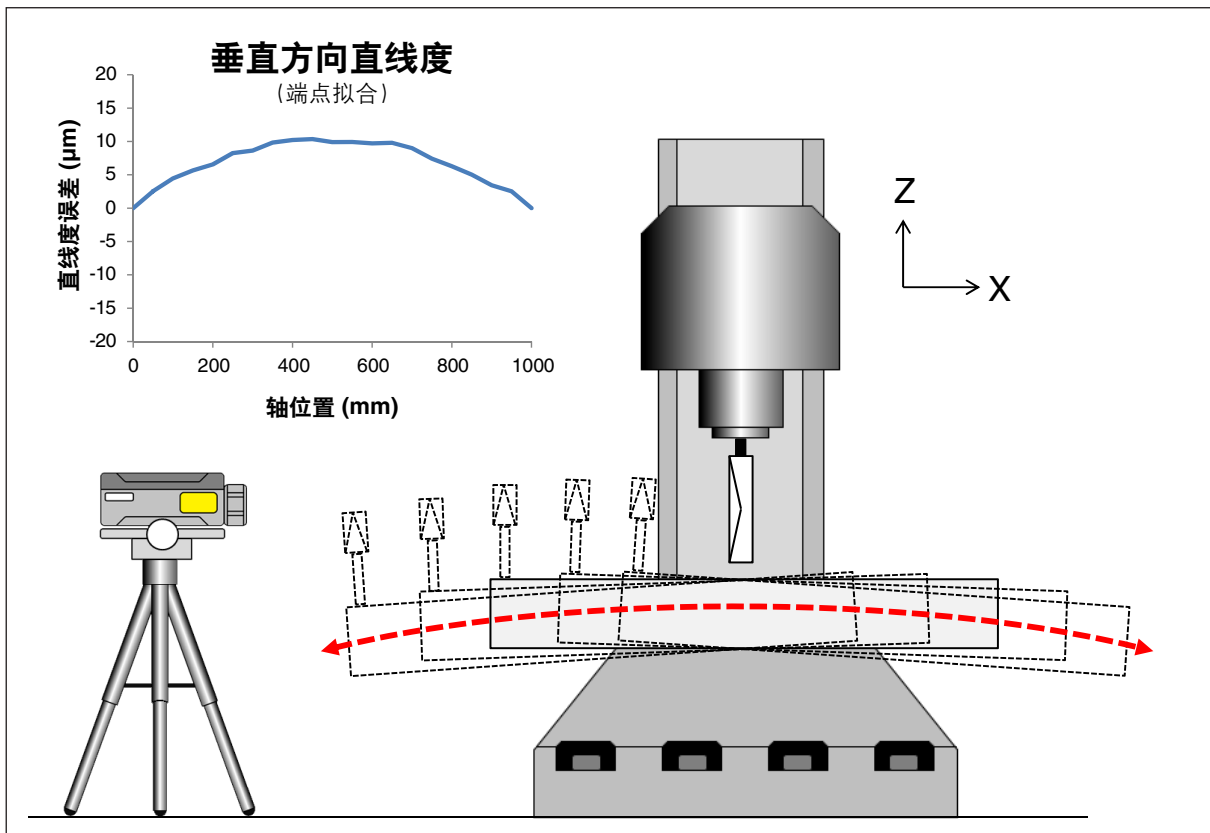


图22

最后我们看一下,如果把激光系统换成在主轴上安装直尺,并在移动工作台上安装数字千分表,将会发生什么,如下方图23所示。

利用该设置得出的结果图再次表明,工作台的运动呈一条曲线。

使用激光系统并将干涉镜安装在移动工作台上时获得的直线度结果,与使用安装在移动工作台上的千分表并将直尺安装在主轴上时获得的结果一致。

显然,当直线度干涉镜(或千分表)移动时获得的结果,与当反射镜(或直尺)移动时获得的结果大不相同。但是,哪个结果才“正确”呢?

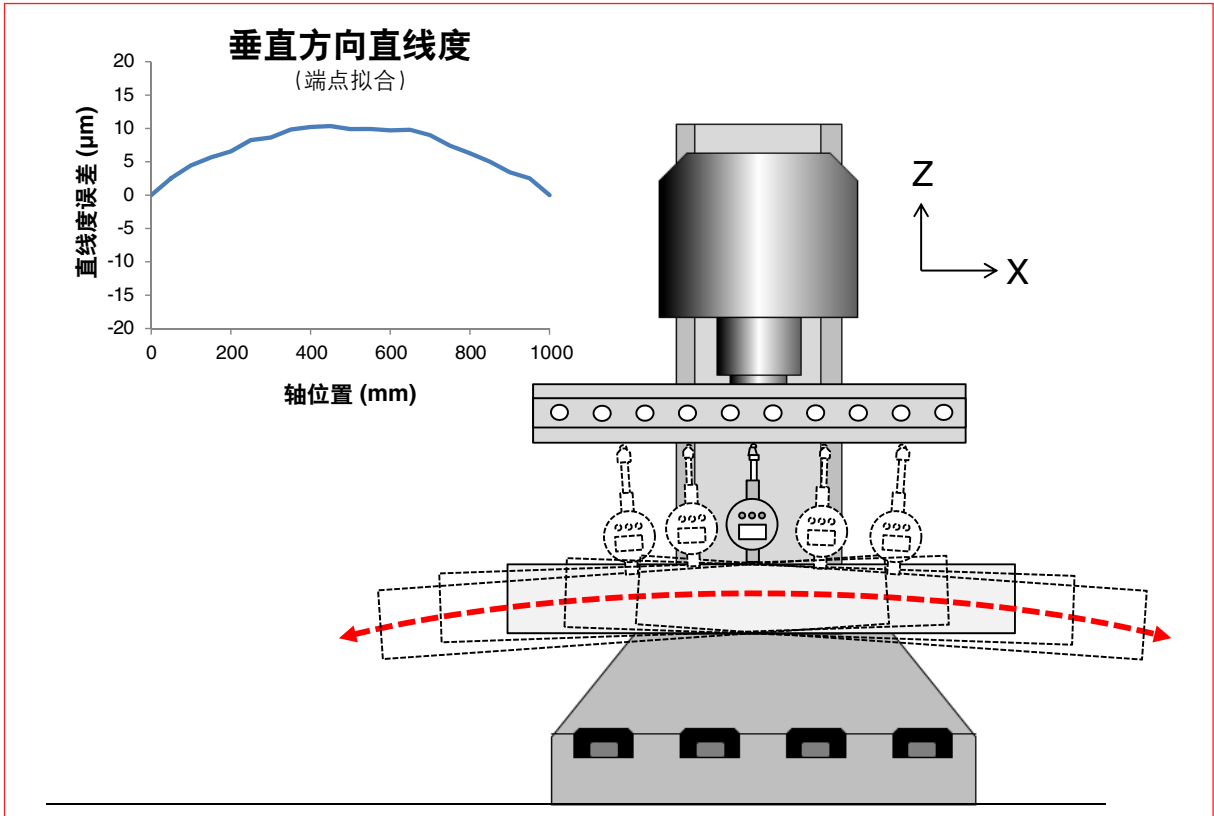


图23

### 干涉镜移动还是反射镜移动 — 哪种“正确”？

为了找到答案，我们来看一下这种情况：机床沿X轴在工件上铣削一排尺寸和深度均相同的5个孔，如图24中的截面所示。然后，将工件放在坐标测量机(CMM)上，检查孔的精度。坐标测量机会测量出，所有孔的深度相同，并且底部中心都在一条直线上。它还会测量出，每个孔的角度均不相同。

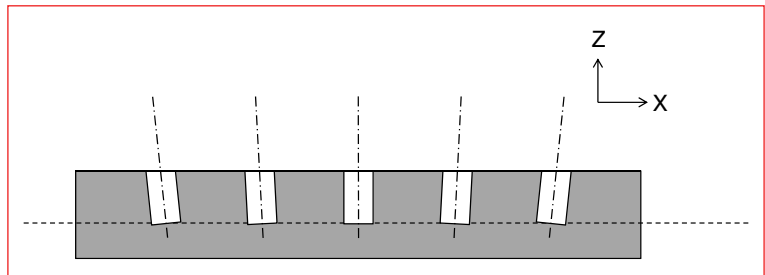


图24

从工件的角度看，X轴似乎呈一条直线，只存在俯仰误差。这与使用激光系统并将反射镜安装在移动工作台上时获得的直线度结果一致，与使用千分表并将直尺安装在移动工作台上时获得的结果也一致。

根据这个结果，并且将激光系统类比为千分表和直尺，我们可以深入理解究竟应该将直线度干涉镜还是反射镜安装在移动工作台上。

**设置A (干涉镜或千分表固定)** — 当检查工件夹具与主轴之间的相对移动精度时，通常应使用这种设置。通过这种设置可测量出主轴相对于工件坐标系的位置误差，从而帮助我们预先了解工件的加工精度。在检查移动工作台时，ASME B5.54国际标准推荐使用这种设置。

**设置B (反射镜或直尺固定)** — 当检查机床上单个点的运动误差时，通常应使用这种设置。例如，跟踪移动工作台上某个点相对于机床坐标系的运动轨迹。这样可以反映机床的装配质量，但不一定能反映机床的加工精度。

## 结论

本白皮书详细阐释了激光干涉法直线度测量的工作原理；说明了如何将直线度干涉镜（Wollaston棱镜）比作千分表，将直线度反射镜比作精密直尺；还证明了利用激光干涉法测量直线度时，为何激光头的位置并不十分重要。随后还通过这个类比阐释了，利用不同的设置在移动工作台上执行测量会产生重要差异。经证明，为了正确评估切削刀具相对于工件的运动直线度，应按照设置A所示和ASME B5.54标准中的建议，在刀架上安装直线度干涉镜（或千分表），并将直线度反射镜（或直尺）安装在工件夹具（移动工作台）上。而设置B（干涉镜移动）更适合评估机床的装配质量，以及用于故障诊断。

无论选择哪种测量设置，下列技巧都有助于优化测量精度。

## 激光干涉法直线度测量技巧

当使用直线度干涉镜时，为了提高测量精度，我们建议：

- 如果轴长允许，始终使用短距离直线度测量光学镜组。短距离光学镜组比长距离光学镜组的精度更高，并且不易受到环境的影响。
- 尽可能降低空气扰动噪声的影响。当暖气流或冷气流穿过激光光束时，它们会短暂改变光程长度，进而干扰直线度读数。通过在激光系统的软件中启用“长期平均”功能，以及改变局部环境，可以减少这种噪声。
  - 撤除或遮挡局部热源，避免阳光照射。
  - 还可以打开风扇大力搅动空气，这样有助于使空气均匀化，同时提高噪声频率，从而通过“长期平均”功能可以更有效地消除噪声。如图25中的示例所示，使用风扇吹动空气穿过光束，可减少空气扰动噪声。
- 调整直线度反射镜，避免斜率误差过大；对于手动机床，这一点尤为重要。
- 确保反射镜安装牢固，并且达到热稳定。请记住，反射镜会在空间中生成一条虚拟直尺，延伸数米。避免因热膨胀效应或振动造成反射镜的角度不稳定。最好用一块布盖住反射镜的外壳，使其免受环境中热变化的影响。
- 确保直线度干涉镜与反射镜在滚摆方向上精准准直。这样可以确保激光头相对于光学镜组的小幅角度准直变化不会影响直线度测量值。请特别注意，当距离较短时，如果对激光头安装组件或机床本身（如机床装有防震装置或地基不牢）的角度稳定性存在顾虑，那么仅确保返回的光束精确重叠可能并不能满足要求。如果一直存在顾虑，则应考虑将激光头牢牢地固定在机床上。

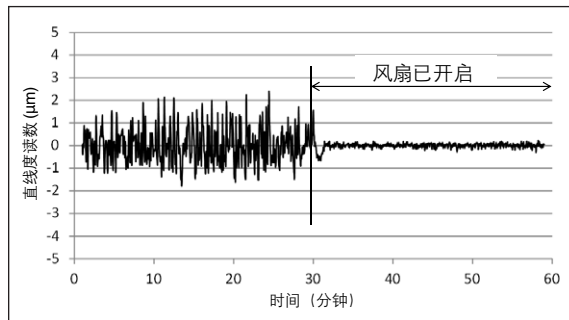


图25

[www.renishaw.com.cn/calibration](http://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，无论因何产生的所有担保、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-5650-2999-01-A

发布：2022.09

上海 T +86 21 6180 6416 E [shanghai@renishaw.com](mailto:shanghai@renishaw.com)

北京 T +86 10 8420 0202 E [beijing@renishaw.com](mailto:beijing@renishaw.com)

广州 T +86 20 8550 9485 E [guangzhou@renishaw.com](mailto:guangzhou@renishaw.com)

深圳 T +86 755 3369 2648 E [shenzhen@renishaw.com](mailto:shenzhen@renishaw.com)

武汉 T +86 27 6552 7075 E [wuhan@renishaw.com](mailto:wuhan@renishaw.com)

天津 T +86 22 8485 7632 E [tianjin@renishaw.com](mailto:tianjin@renishaw.com)

成都 T +86 28 8652 8671 E [chengdu@renishaw.com](mailto:chengdu@renishaw.com)

重庆 T +86 23 6865 6997 E [chongqing@renishaw.com](mailto:chongqing@renishaw.com)

苏州 T +86 512 8686 5539 E [suzhou@renishaw.com](mailto:suzhou@renishaw.com)

沈阳 T +86 24 2334 1900 E [shenyang@renishaw.com](mailto:shenyang@renishaw.com)

青岛 T +86 532 8503 0208 E [qingdao@renishaw.com](mailto:qingdao@renishaw.com)

西安 T +86 29 8833 7292 E [xian@renishaw.com](mailto:xian@renishaw.com)

宁波 T +86 574 8791 3785 E [ningbo@renishaw.com](mailto:ningbo@renishaw.com)

郑州 T +86 371 6658 2150 E [zhengzhou@renishaw.com](mailto:zhengzhou@renishaw.com)