

# 激光干涉仪线性读数的环境补偿

作者：M.A.V. Chapman

## 简介

激光干涉仪常常被假定为可自动获得最高精度的测量结果。“这是激光，所以测量结果一定很精确！”但实际情况颇为复杂。当使用激光在空气中测量线性位移时，环境补偿系统的性能尤为重要。激光头和干涉测量光学镜组可提供非常高的线性分辨率和精度，但系统的测量精度却主要由环境补偿单元（气象站）决定。本白皮书探讨了环境补偿在线性干涉测量中的重要性，同时还介绍了空气折射补偿和材料膨胀补偿。本文详细介绍了雷尼绍的XC-80环境补偿单元，它可根据空气折射率和材料温度的变化，自动补偿雷尼绍XL-80激光干涉仪的线性位移读数。此外，根据具体应用，针对环境传感器的放置及材料膨胀系数的选择提供了建议。

## 线性干涉测量 — 基本原理

图1所示为单频（零差）激光干涉仪系统，其中线性光学镜组在“基准”位置彼此紧靠。

分光镜将激光头的输出光束分成两条光束。上面的角锥反射镜固定在分光镜上，用于产生激光干涉仪的固定长度参考光束。另一个角锥反射镜相对于干涉镜可分开移动，用于产生激光干涉仪的测量光束。经每个角锥反射镜反射的光束在分光镜上重新合为一条光束，并返回到激光头，然后在激光头的条纹检测器内部相互干涉。当两条返回光束中的波“同相”时（如图1所示），它们会相长干涉，在探测器中产生一条“明”条纹。

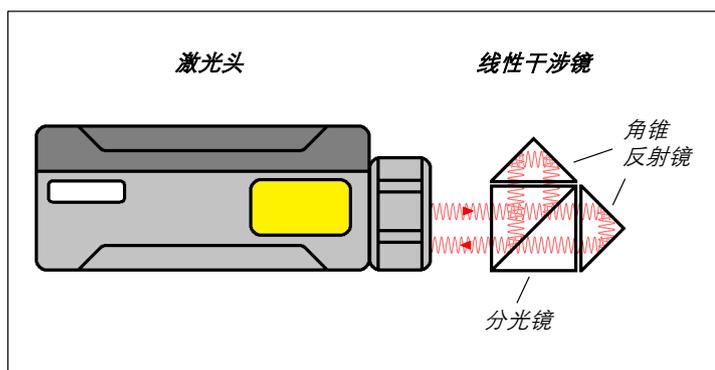


图1

在图2中，产生测量光束的角锥反射镜移动到与分光镜之间的距离为L的位置，同时产生参考光束的角锥反射镜仍然固定在分光镜上。当两条返回光束中的波为180°“反相”时（如图2所示），它们会相消干涉，在探测器中产生一条“暗”条纹。条纹探测器检测到的是明条纹还是暗条纹（或介于两者之间的任何亮度级），取决于激光干涉仪两条光束之间的相对光程长度。如果参考光束角锥反射镜是固定的，那么测量光束角锥反射镜与分光镜之间的移动距离每增加半个波长 ( $\lambda/2$ )\*，条纹探测器就会检测到一次“明—暗—明”的完整条纹转变。

\*注：每移动距离 $\lambda/2$ ，总光程会增加 $\lambda$ ，这是因为激光光束会先照射到角锥反射镜上，再被反射回来。

简单来说\*，激光系统通过计算在探测器内部检测到的完整条纹转变次数来测量距离。如果当光学镜组彼此紧靠时，将计数器清零（重置基准），那么距离表示为 $L = \lambda \times N/2$ ，其中N是自清零后计数得出的“明—暗—明”条纹转变次数。如果将系统清零时光学镜组彼此紧靠，那么N也等于：当光学镜组移动时，激光干涉仪的测量光束的射出光程和返回光程部分所增加的激光波数。

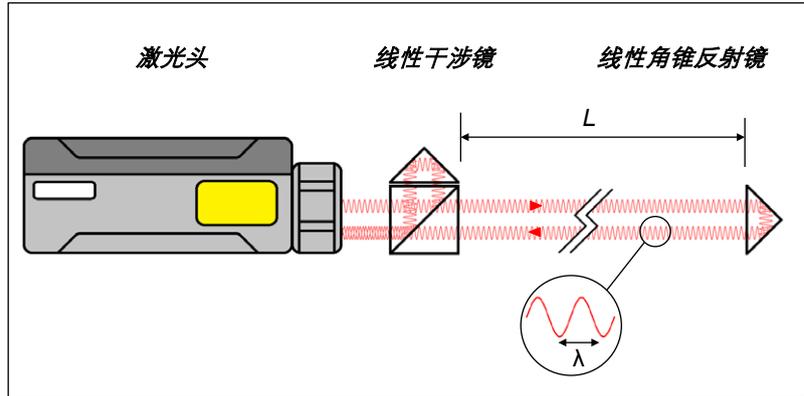


图2

\*注：实际上，零差激光干涉仪的条纹探测器还能够将条纹分成更小的增量，并确定移动方向。使用多个条纹光电探测器即可实现这一点，对每个探测器进行调谐，使其检测不同干涉条纹相位的亮度。

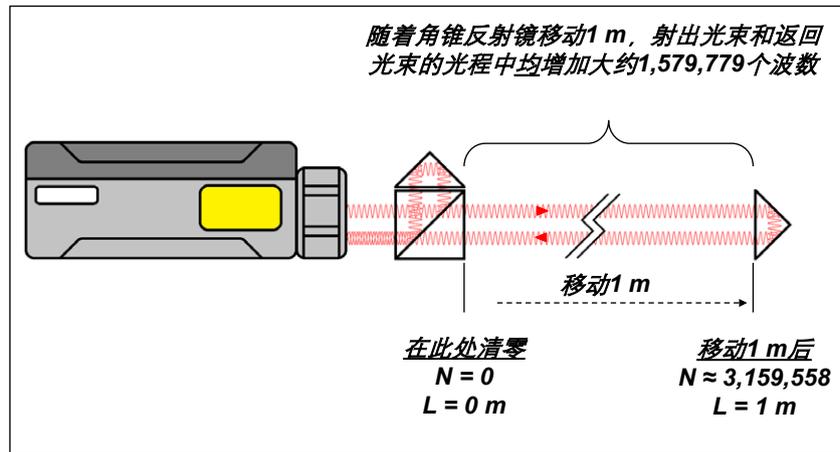


图3

以图3所示为例。如果在清零后角锥反射镜移动了1 m，且激光波长为 $0.633 \mu\text{m}$ ，那么计数器的条纹计数约为3,159,558，相当于当反射镜移动1 m时，分光镜与测量光束角锥反射镜之间的间隔所增加的激光波数。

如果出于某种原因，测量光束中的激光波数发生改变，那么条纹计数器的计数也会相应增加或减少。显然，当测量光束角锥反射镜移动时，就会发生这种情况，导致N和位置读数L发生相应改变，以正确指示任何额外的移动。

但是，测量光束中增加的波数还取决于激光在空气中的波长。如果激光波长发生改变，那么测量光束中增加的波数也会改变。如果激光系统继续使用原始波长，通过公式 $L = \lambda \times N/2$ 计算距离，那么就会导致计算错误，得出不精确的距离读数。但是，为什么激光波长会改变呢？

虽然人们常说“光速是恒定的”，但实际上，光速会因传播介质而异。介质的折射率越高，光在介质中传播的速度越慢。举个例子，光在玻璃（折射率为1.4）中的传播速度比在真空（折射率为1）中的传播速度慢大约30%。随着光速改变，激光的波长也会发生相应改变。虽然空气的折射率变化幅度小很多，但已经足以严重影响线性激光测量值的精度，除非应用波长补偿。

## 空气的折射率

鉴于折射在光学设计和测量中的重要性，人们对空气的折射率进行了广泛研究（见参考文献1-5）。图4、图5和图6显示了气压、气温和相对湿度的变化如何改变0.633  $\mu\text{m}$ 波长的红色氦氖 (HeNe) 激光的激光波长。图中所示变化的单位为百万分之一 (ppm)。

真空的折射率刚好为1。氦氖激光头检测到的标准\*空气的折射率约为1.0002714。因此，激光在标准空气中的波长比其在真空中的波长短约271 ppm。

\* 标准空气的定义是气压为1013.25 mbar、气温为20°C、相对湿度为50%的空气。

这些图表显示了激光波长相对于标准空气中的激光波长的变化 (ppm)。（在每个图表中，红点表示标准空气条件。）比如，如图4所示，在气压\*为800 mbar、气温为10°C、相对湿度为50%的条件下，氦氖激光的波长相对于其在标准空气中的波长增加了约50 ppm。

\* 请注意，气压因当地天气条件和海拔高度而异。比如，海平面的典型气压为1,013 mbar，而在1,000米海拔处，典型气压为900 mbar。

如图4所示，激光波长取决于气压，灵敏度范围为-0.24 ppm/mbar至-0.29 ppm/mbar，具体取决于气温。随着气压上升，激光波长逐渐缩短。在接近标准空气气压的条件下，灵敏度约为-0.27 ppm/mbar。

如图5所示，激光波长还取决于气温，灵敏度范围为+0.5 ppm/°C至+1.0 ppm/°C，具体取决于气压。随着气温上升，激光波长逐渐增加。在接近标准空气气温的条件下，灵敏度约为+0.96 ppm/°C。

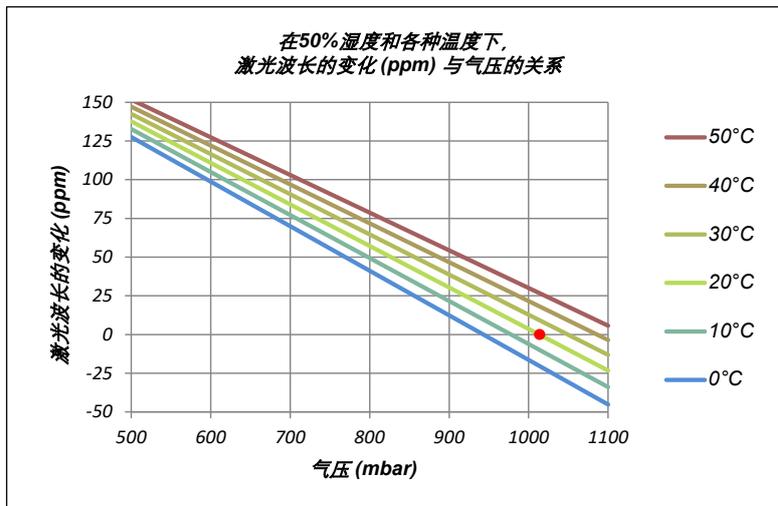


图4

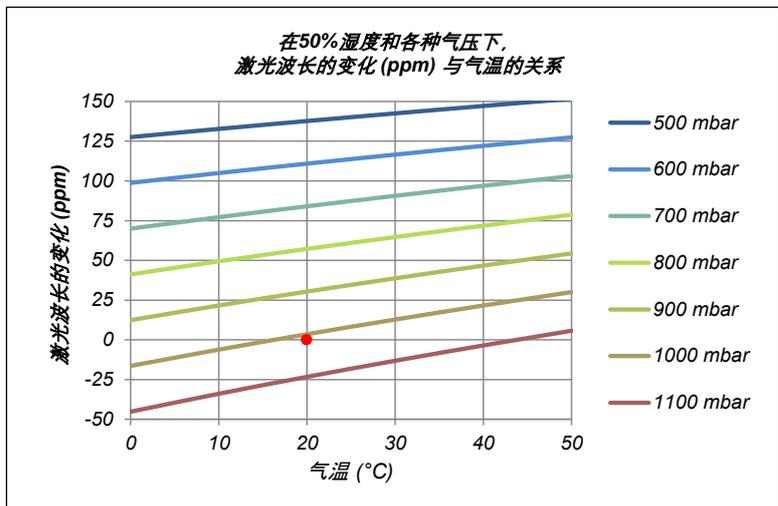


图5

如图6所示，激光波长还取决于相对湿度，空气湿度每增加10%，灵敏度范围为+0.02至+0.4 ppm，而且与气温密切相关。在低温条件下，对湿度变化的灵敏度可以忽略不计；但当温度较高时，由于暖空气会吸收更多水蒸气，因此对湿度变化的灵敏度会越来越高。空气中的水分越多，激光波长就越长。在接近标准空气的相对湿度的条件下，灵敏度约为+0.1 ppm/10% RH。

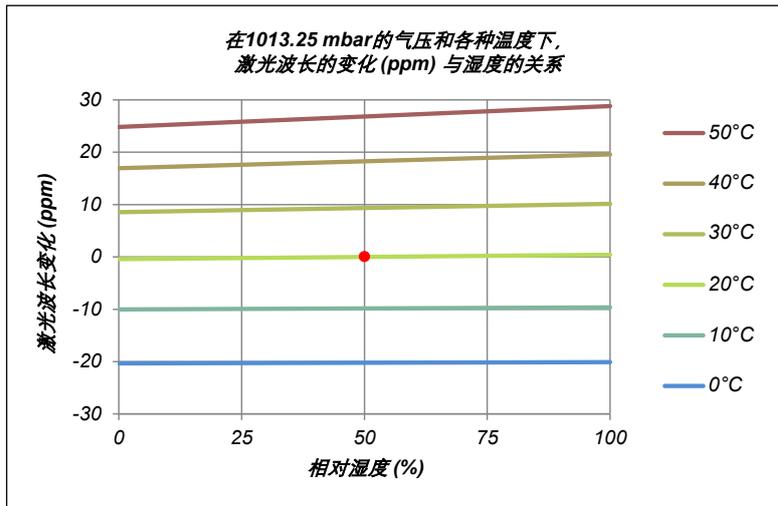


图6

利用这些图表和灵敏度数据，可以很容易地粗略估算\*因当地大气条件变化而可能引起的激光测量误差。

\* 请参阅附录2，了解更为精确的计算方法。

我们看一看下面这个例子。

假设激光波长 $\lambda$ （用于通过公式 $L = \lambda \times N/2$ 计算线性位移）是在标准条件下定义的，并且保持不变（即不应用补偿）。现在，假设在当地气压为900 mbar、气温为25°C、湿度为60%的条件下进行线性测量。我们可以使用上述灵敏度数据的倒数\*来估算未补偿的激光读数的误差。

\* 上述灵敏度数据定义了激光波长如何随气温、气压和湿度的变化而改变。但是，如果激光波长增加，则针对既定移动距离计算得出的条纹数量(N)会减少，因此未补偿的激光读数也会随之降低。

气压引起的误差	-113.25 mbar × (+0.27 ppm/mbar)	-30.6 ppm
气温引起的误差	+5°C × (-0.96 ppm/°C)	-4.8 ppm
空气湿度引起的误差	+10% × (-0.1 ppm/10% RH)	-0.1 ppm
<b>总误差</b>		<b>-35.5 ppm</b>

人们通常想当然地认为，激光干涉仪的线性测量值的精度约为1  $\mu\text{m}/\text{m}$ 或1 ppm。（“这是激光，所以测量结果一定很精确！”）上面的例子清楚地表明，为了达到这样的预期精度，精确补偿空气折射效应是多么重要。

## 空气折射补偿

如图4、图5和图6所示，气温、气压、相对湿度与折射率之间的关系相当复杂。业界对其中的关系进行了深入研究。如果已知气温、气压和湿度，那么可以利用几个既定公式来精确估算空气的折射率。其中最知名的是1966年发表的Edlén公式（见参考文献2）。Birch和Downs于1993年和1994年修正了这个公式（见参考文献3和4）。Ciddor于1996年发表了另一个公式（见参考文献1）。大多数激光系统采用“Edlén修正公式”或“Ciddor公式”来计算空气的折射率。在正常环境条件下，这两个公式的估算精度很接近。在美国国家标准与技术研究所 (NIST) 的Metrology Toolbox网站（见参考文献5）上，可以找到有关这些公式和“折射率计算器”的详细论述。

完整的公式非常复杂，本文不再赘述。不过，NIST的Metrology Toolbox提供了一个精度略低但更加简单的公式，它堪称“便携式计算器”，适用于0.633 μm氦氖激光。

$$n_{\text{空气}} = 1 + ((7.86e-5 \times P)/(273 + T)) - 1.5e-11 \times H \times (T^2 + 160)$$

其中， $n_{\text{空气}}$  = 空气折射率， $T$  = 气温 (°C)， $H$  = 相对湿度%， $P$  = 气压 (mbar)。在更大的气温、气压和湿度范围内，超过在上述接近标准空气的条件下的灵敏度所允许的范围，可以通过这个公式估算潜在的测量误差。附录2中详细介绍了这个公式。

图7展示了如何利用Edlén修正公式或Ciddor公式，根据大气条件变化来补偿激光读数。红色单元格与当前激光波长的计算相关。蓝色单元格与激光位置读数的计算相关。

首先，使用传感器确定当地的气压、气温和相对湿度。然后，系统将利用这些数据，通过Edlén公式或Ciddor公式来计算空气的折射率 $n_{\text{空气}}$ 。系统将使用 $n_{\text{空气}}$ 和激光的真空波长 $\lambda_{\text{真空}}$ 来计算“应用环境补偿后的”激光波长 $\lambda_{\text{空气}}$ 。随后，系统将使用“应用环境补偿后的”激光波长 $\lambda_{\text{空气}}$ ，而不是默认的激光波长 $\lambda$ ，

来乘以条纹计数。因此，举例来说，随着激光波长增加，（针对既定线性位移 $L$ 的）条纹计数 $N$ 将降低，但是根据传感器读数计算得出的 $\lambda_{\text{空气}}$ 值将相应增加，因而通过 $L = \lambda_{\text{空气}} \times N/2$ 得出的“应用环境补偿后的”位置在名义上仍保持恒定和精确。

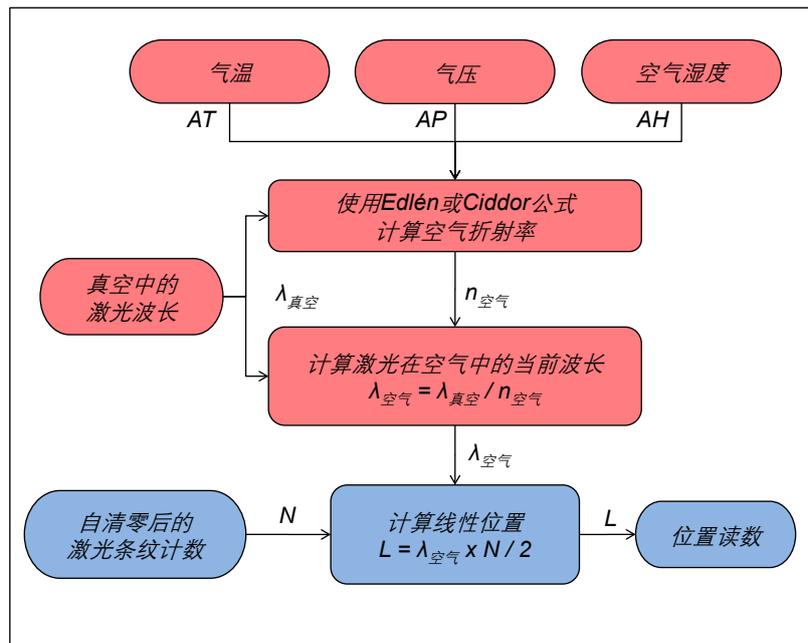


图7

## 利用XC-80进行自动环境补偿

如图8所示，雷尼绍的XL-80激光干涉仪系统可采用XC-80环境补偿单元和传感器，根据当地大气条件变化的影响自动补偿线性读数。XC-80中包含电子处理装置，以及气压和相对湿度传感器。通过电缆连接外部空气和材料\*温度传感器。图9展示了各个组件是如何连接的。

\* 请注意，下文中将介绍如何使用材料温度传感器进行热膨胀补偿。

每个外部材料和空气温度传感器都包含一个温度感应模拟元件和一个数字处理单元。每个传感器均已在出厂前完成单独校准，

并且包含一个误差补偿表，以确保在整个测量范围内保持精度。温度感应元件获得的模拟读数经过数字化和误差修正（使用误差补偿表），然后再通过传感器网络以数字方式发送至XC-80。数字传输方式对电噪声及电缆阻抗有较好的屏蔽作用，因此可以确保数据完整性，必要时还可以延长传感器导线。



图8

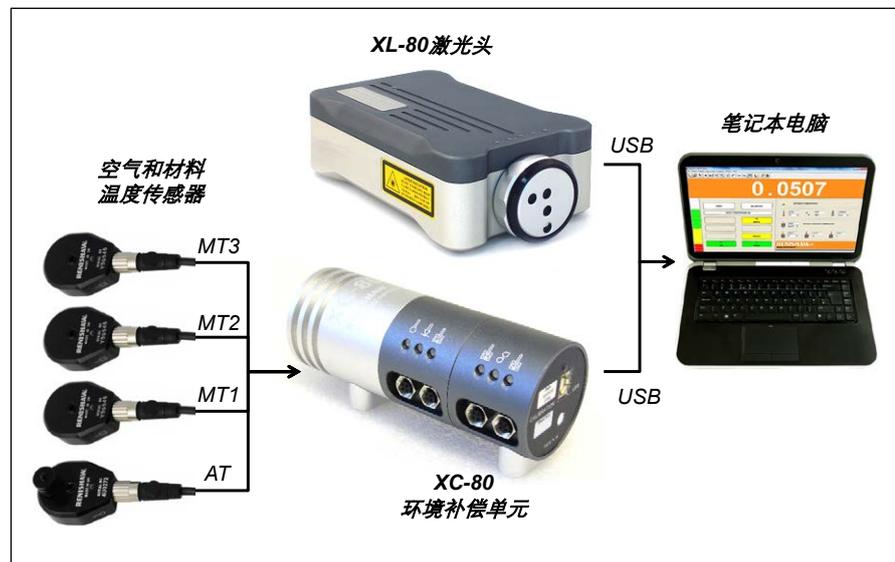


图9

XC-80包含一个经过误差补偿的气压传感器，一个相对湿度传感器，以及其他电子数字处理元件。气压测量是要求最为严苛的测量之一，因为这要求在广泛的工作气压 (650-1150 mbar) 和气温 (0-40°C) 范围内达到要求的精度 ( $\pm 1$  mbar)。雷尼绍采用高品质气压传感器，以确保长期稳定性和可靠性。每个气压传感器均已在出厂前在气压和气温上升和下降的条件下完成了单独校准（市面上的大多数气压传感器易受气温影响，并且表现出滞后）。雷尼绍利用这些校准结果生成了3D误差补偿表，并将其存储在XC-80内部，以确保在整个工作气压和气温范围内保持精度。

图10所示为，经过误差补偿后，XC-80气压传感器对应气温和气压的误差图示例。在本例中，误差范围为0至±0.32 mbar。请注意，此精度图不包含校准装置的测量不确定度。

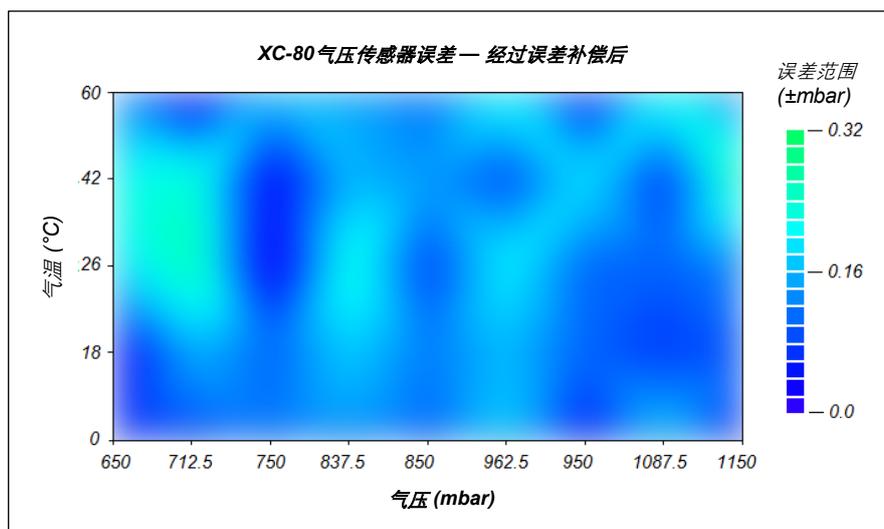


图10

图11中的表格显示了XC-80的各个传感器的校准后精度。图中的所有数字均具有K = 2的扩展不确定度 (95%置信度)。

XC-80的测量精度和范围		
测量	精度	范围
气温	±0.2°C	0 - 40°C
气压	±1 mbar	650 - 1150 mbar
空气湿度	±6% RH	0-95%，非冷凝
材料温度	±0.1°C	0 - 55°C

图11

XC-80通过USB以数字方式将环境传感器读数传输至计算机，更新速率为每7秒钟一个传感器读数，每42秒钟进行一次完整的环境数据更新（来自于多达6个当前生效的传感器）。

计算机还会通过USB收到来自于XL-80激光干涉仪的激光状态和条纹计数N，最大更新速率为50 KHz。雷尼绍的LaserXL软件利用XC-80提供的空气传感器读数，通过Ciddor公式计算当地的空气折射率，从而计算出XL-80在空气中的当前激光波长 $\lambda_{\text{空气}}$ 。然后再利用公式 $L = \lambda_{\text{空气}} \times N/2$ 计算出距离L，从而根据当地空气折射率的变化，自动补偿激光读数。

我们通过一个简单的例子看一看利用XC-80进行空气折射补偿的有效性。假设在海拔100米处进行激光测量，当地气温为25°C、相对湿度为70%、海平面气压为970 mbar，而且没有特别极端或异常的情况。

海拔100米处的气压比海平面气压低约12 mbar，因此假定当地气压为958 mbar。通过NIST的简单公式计算得出，在上述条件（958 mbar、25°C、70% RH）下，空气的折射率约为1.0002519。而标准空气（定义XL-80激光干涉仪的默认激光波长的空气条件）的折射率约为1.0002714。这两个折射率（及相关的激光波长）之间的差异接近20 ppm。因此，在上述条件下，如果不进行环境补偿，则线性位置读数可能会包含大约20 ppm或20  $\mu\text{m}/\text{m}$ 的测量误差。

但是，如果使用XC-80的空气传感器读数正确进行折射率补偿，则系统的线性测量误差将降至0.5 ppm (0.5  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) 以下。精度提高到原来的大约40倍！图12以图表的方式展示了未补偿精度与补偿后精度之间的差异。值得注意的是，未补偿结果的主要误差源是气压（受海拔和天气的共同影响）。第二个主要误差源是气温。最微小的误差源是激光稳频精度。这清楚地说明了环境补偿的重要性。请注意，如图12所示实现精度提高的假设是，传感器的位置合适，并且有充足的时间对环境中的任何变化作出响应。自动环境补偿并非“万能的灵丹妙药”，无法在所有环境下实现精确测量。为获得最佳结果，环境必须保持合理稳定，并且传感器的位置应靠近测量光束，远离局部热源等。

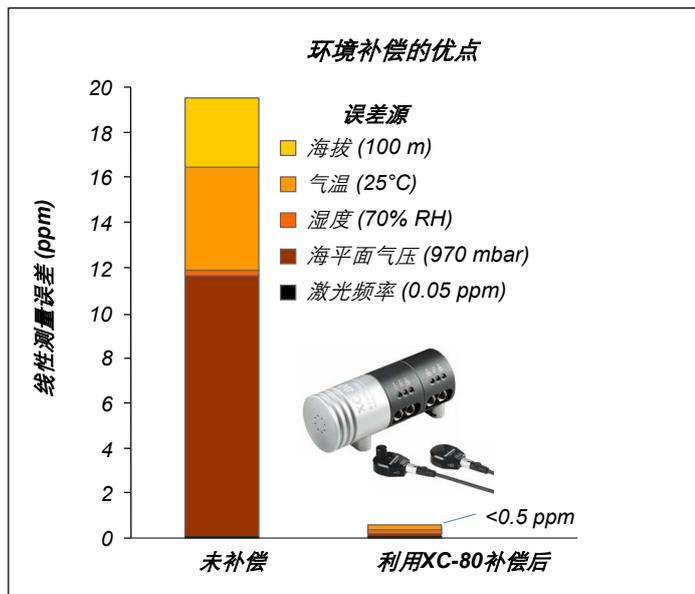


图12

图13中的表格显示，气压和折射率随海拔升高而降低，可供参考。表格中还显示了，随着海拔升高，激光波长相对于海平面处波长的变化 (ppm)。由于天气而引起的每天/季节性气压变化通常为100-150 mbar。这将导致激光波长发生约25-40 ppm的额外变化。

海拔 (m)	气压 (mbar)	折射率 n	变化 (ppm)
0	1013.25	1.0002714	0
500	954.6	1.0002557	-16
1000	898.7	1.0002407	-31
1500	845.6	1.0002264	-45
2000	795.0	1.0002128	-59
2500	746.8	1.0001999	-71
3000	701.1	1.0001877	-84
3500	657.6	1.0001760	-95
4000	616.4	1.0001649	-106
4500	577.3	1.0001544	-117
5000	540.2	1.0001445	-127

图13

### 材料膨胀补偿

大多数工程材料、部件和机器都会随温度变化而膨胀或收缩。因此，高精密工程部件、机床和坐标测量机 (CMM) 的尺寸通常在特定基准温度下定义。校准行业采用的国际基准温度是20°C。

但是，当检查尺寸时（例如使用激光干涉仪系统），环境温度往往并非20°C。为了避免这个问题，有一种方法是在将温度控制在20°C的房间内进行检测。但是，在很多情况下，这种做法并不切实际，必须“现场”测量尺寸。为了解决这个问题，雷尼绍的XL-80激光干涉仪系统提供了一种功能，利用手动输入的材料膨胀系数和多达三个材料温度传感器检测的温度，对线性读数进行补偿。这个过程称为材料膨胀补偿。这个过程的目标是，估算在20°C的国际基准温度下进行测量时可能获得的线性激光读数。

假设使用激光干涉仪验证0.5 m长直线光栅的精度。该光栅由玻璃制成，线性膨胀系数为6 ppm/°C（如图14所示）。该直线光栅的精度规格为，在20°C的温度下，全长的精度在±1 μm范围内。然而，安装光栅的机床无法移动，而且光栅的当前温度是22°C。那么，该直线光栅（如果无约束）的全长将膨胀 $0.5 \text{ m} \times 6 \text{ ppm/}^\circ\text{C} \times 2^\circ\text{C} = 6 \text{ }\mu\text{m}$ 。如果使用激光干涉仪系统检测该光栅的精度，而不应用材料膨胀补偿，结果将显示光栅的精度（如图15中的红线所示）不符合规格。

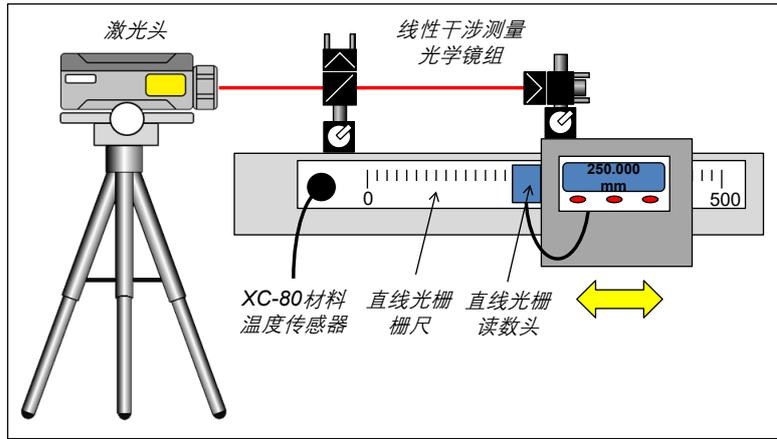


图14

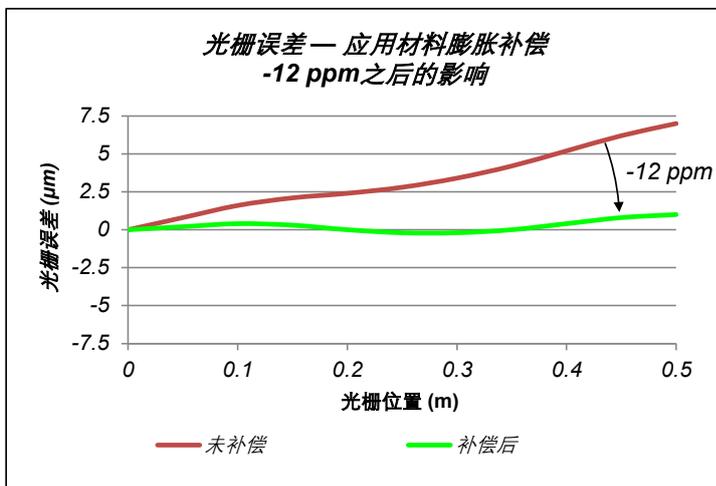


图15

然而，如果利用具有材料温度传感器的雷尼绍XC-80环境补偿单元来测量该光栅的温度，并在软件中输入线性膨胀系数6 ppm/°C，则系统将自动应用材料膨胀补偿。如果测得的材料温度为22°C，系统将对激光读数应用 $-6 \text{ ppm/}^\circ\text{C} \times 2^\circ\text{C} = -12 \text{ ppm}$ 的修正。举个例子，如果未补偿的激光读数为500.007 mm，在应用-6 μm的修正之后，即得出补偿后激光读数为500.001 mm。如果修正正确，那么材料膨胀补偿会增加正好相反的修正，以抵消光栅的热膨胀，从而更精确地估算在20°C下测量光栅时可能得出的激光测量值。修正后的数据如图15中的绿线所示，此时的数据表明光栅符合规格。

图16显示了如何应用材料膨胀补偿。红色单元格是当前激光波长（参见上文的图7）的计算结果。黄色单元格与材料膨胀补偿的计算相关。蓝色单元格与激光位置读数的计算相关。请注意，系统此时使用“环境系数”EF（如图16中的蓝色单元格所示），而不是 $\lambda_{\text{空气}}$ （如图7中的蓝色单元格所示），来乘以条纹计数的一半 $N/2$ 。此环境系数与激光波长 $\lambda_{\text{空气}}$ 非常相似，只不过它包含一个细微的调整，以补偿材料膨胀。因此，将 $N/2$ 乘以EF，可以同时补偿空气折射和材料膨胀效应。

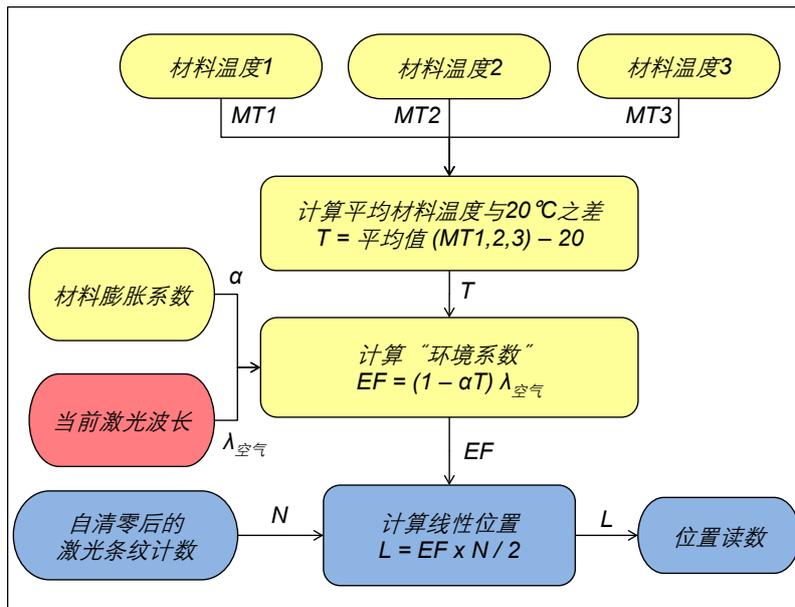


图16

因此，同时对线性激光读数应用空气折射补偿和材料膨胀补偿的拓展公式可以写作：

$$L = (1 - \alpha T) \times \lambda_{\text{空气}} \times N / 2 \dots\dots\dots \text{公式1}$$

其中，L为激光读数，N是自系统清零后计数得出的激光条纹数， $\alpha$ 是用户输入的材料膨胀系数，T是材料平均温度与20°C之差， $\lambda_{\text{空气}}$ 是利用Edlén或Ciddor公式根据气温、气压和湿度计算得出的当前空气折射率。

## 材料膨胀系数

材料膨胀补偿会对测量精度产生显著影响。大多数钢铁的线性膨胀系数接近10 ppm/°C，加工车间的温度通常超过25°C（机床自身温度通常更高）。如果在这样的条件下进行线性测量，那么因材料膨胀而造成的误差很可能会超过50 ppm (50 μm/m)。本节就材料膨胀系数的选择给出了建议，并着重介绍了机床定位精度的测量。

在线性激光测量过程中，一定要选择正确的膨胀系数，特别是当材料温度与20°C相差较大时。例如，如果精确的膨胀系数是5 ppm/°C，但在软件中输入了6 ppm/°C，那么材料温度与20°C每相差1°C，就会额外产生1 ppm的测量误差。当校准机床或XY平台的定位精度时，往往需要轴反馈系统的膨胀系数，并且最好采用制造商提供的数据。如果没有上述数据，图17列出了制造机床、XY平台及其位置反馈系统所用的各种材料的典型膨胀系数表。

材料	应用	膨胀系数 (ppm/°C)
铁/钢	机器结构组件、齿轮齿条、滚珠丝杆	11.7
铝合金	轻型坐标测量机的机器结构	22
玻璃	玻璃栅尺直线光栅	6-11
花岗岩	机器结构和工作台	8
混凝土	机器地基	12
宝钢	低膨胀光栅/结构	<2
Zerodur零膨胀微晶玻璃	“零”膨胀光栅/结构	<0.2

图17

如果没有上述数据，图17列出了制造机床、XY平台及其位置反馈系统所用的各种材料的典型膨胀系数表。

注释:

- 1) 在确定膨胀系数时，一定要注意由两种膨胀系数不同的材料固定在一起的位置。例如，对于齿轮齿条反馈系统，合适的膨胀系数可能更接近于固定齿条的铸铁轨道。对于带有地基安装式轨道的大型龙门机床，轨道的膨胀系数可能会因混凝土地基的约束作用而减小。
- 2) 材料膨胀系数因材料成分和热处理方式的不同而异。因此获得高度精确的数值通常很困难。校准时的环境温度与20°C相差越大，此系数的精度就越重要。如果没有精确的系数，则可以在接近20°C的温度下进行校准，以减少测量误差。
- 3) 如果一台机床一直加工与反馈系统的膨胀系数相差很大的工件材料（例如铝合金、碳合成材料、陶瓷、平板玻璃基板、硅晶片等），那么使用工件的膨胀系数可能比使用机床反馈系统的膨胀系数更合适。尽管此时的校准并不能代表机床在20°C时的性能，但当工件回到20°C时，将有助于提高工件测量精度。下一小节的目标4详细介绍了这一点。

## 传感器位置

本节针对环境传感器的放置位置给出了建议。

**空气温度传感器** — 将空气温度传感器放在靠近激光测量光束的地方，最好在光束的中间位置。避开电机、电源等产生的暖气流，避免阳光直射。

**气压和湿度传感器** — 这些传感器都位于XC-80内部，XC-80应该水平放置，并且与激光测量光束的高度差不超过3米。

**材料温度传感器** — 在激光校准过程中，材料温度传感器应该放置在机床的什么位置，这一直是个争议颇多的话题。首先要确定材料膨胀补偿的主要目标。这通常是标准ASME B89.1.8-2011之附录C（见参考文献6）所述的四个目标之一，如下表所示：



图18

目标1	按照国家或国际机器验收标准进行校准
目标2	估算当机床在20°C的环境温度下运行时可获得的线性定位精度
目标3	估算当机床反馈系统在20°C时可能达到的线性精度
目标4	估算当机床制造的工件回到20°C时的工件检测精度

这些目标之间通常存在明显的差异，尤其是，如果在机床运行期间，位置反馈系统（例如滚珠丝杠）变热；或者，如果工件与位置反馈系统的膨胀系数相差明显，例如在配用玻璃栅尺直线光栅的机床上加工铝制工件。下文根据所选目标，针对材料温度传感器的位置 and 材料膨胀系数的选择给出了建议。

**目标1 — 按照国家或国际标准校准机器的精度。**请按照标准中规定的步骤进行校准，包括如何放置材料传感器、采用哪种膨胀系数和执行什么机床预热循环等。如果标准中还规定了热变化测试，也应运行测试。

**目标2 — 估算当机床在20°C的环境温度下运行时可实现的精度。**这通常是在机床制造、签核、调试或重新校准过程中的目标。在很多情况下，此目标与目标1相同。为了实现这一目标，材料温度传感器应放置在机床工作台上或不靠近热源（例如电机、齿轮箱等）的其他大结构机床部件上。材料膨胀系数应设定为与反馈系统相同。注：有一种常见的误解是，一定要将材料温度传感器放置在滚珠丝杠或反馈系统上。虽然针对目标3来说确实如此，但对于目标2来说通常并非如此，如下例所示。

假定对机床进行校准时，车间的温度是25°C，但由于机床运行产生的热量，滚珠丝杠的温度高5°C，即30°C。如果材料温度传感器放置在滚珠丝杠上（或附近），则需要对激光读数进行补偿，以估算当滚珠丝杠在20°C下运行时可能得到的激光读数。但是，如果机床在20°C的环境温度下运行，则滚珠丝杠的温度不是20°C。由于螺杆和电机运行而产生的热量仍然存在，因此滚珠丝杠的温度仍将比环境温度高大约5°C（即25°C）。因此，将材料温度传感器放置在滚珠丝杠上会导致过度补偿。比较理想的方法是，将传感器放在机床的大结构部件上，以获得与过去几个小时内机床周围平均环境温度相关的温度读数。

**目标3 — 估算当机床反馈系统在20°C时可能实现的精度。**这对于诊断机床位置反馈系统的故障尤其有用。如果机床校准无法实现目标1或2，那么就需要验证反馈系统在20°C时的精度。为了实现此目标，应准直激光光束，使其尽量靠近反馈系统所在轴线（以尽量降低阿贝偏置误差）。如果存在阿贝偏置误差，那么还应检查轴的俯仰和/或扭摆误差。材料温度传感器应放置在反馈系统上（或附近），膨胀系数应设定为与反馈系统相同。

**目标4 — 估算当机床制造的工件回到20°C时的工件检测精度。**这个过程对于优化在非温控车间生产的加工件的尺寸精度尤其有用；在这些应用场合，机床位置反馈系统的膨胀系数与工件的膨胀系数相差非常大。材料热膨胀系数应设定为与工件相同。材料温度传感器应放置在温度与工件预期温度近似的位置上。（这个位置通常是在机床工作台上，但还需要考虑其他因素，例如所使用的冷却系统类型和金属切削速度。）还应注意的是，必须在典型条件下进行此类校准，而且只有在各个工件的温度和膨胀系数相对稳定的情况下才真正有效。

**其他注意事项 — 必须保证材料温度传感器与被测材料之间具有良好的热接触。**材料表面最好平整、裸露。

如果空气温度与机床温度有明显差异，那么很可能材料的表面温度与中心温度也存在较大差异。在这种情况下，应仔细安排材料温度传感器的位置，使其能够测量到中心温度。

在机床运行过程中，机床的温度通常会升高。建议您在开始校准前执行移动的预热步骤，以确保校准中包括这种影响。

## 死程误差

为了通过公式1（见第10页）有效补偿在不稳定环境中获得的线性测量结果， $N$ （条纹计数）名义上必须反映激光干涉仪的测量光束上光学镜组之间的间隔。举个例子，如果间隔加倍，则 $N$ 名义上也应加倍；当 $N = 0$ 时，光学镜组应彼此紧靠。如果当光学镜组彼此紧靠时将激光干涉仪清零（即，将 $N$ 设为0），就可以轻松做到这一点。

如果将激光干涉仪系统清零时，线性光学镜组不是彼此紧靠，而且环境随后发生变化，那么基准位置的激光读数会出现小幅偏移。这个偏移通常由两个部分组成，即空气死程误差和材料死程误差。

## 空气死程误差

以图19所示为例。假设将激光干涉仪系统清零，光栅读数为0.000 mm，但测量光束上的光学镜组之间存在“死程”间隔 $D$ 。在此位置，如果 $N = 0$ ，则激光位置读数也是0.000 mm。现在，假设空气的折射率改变了+1 ppm。这会导致激光波长缩短1 ppm，并且光学镜组之间的间隔 $D$ 中的波数将随之增加1 ppm。条纹计数 $N$ 将相应增加，并且激光位置读数将从零偏移 $1 \text{ ppm} \times D$ 。这就是“空气死程误差”。即使

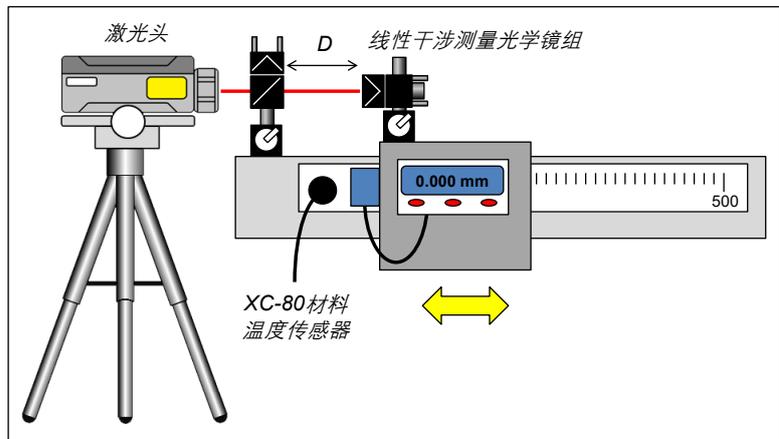


图19

环境补偿单元正确计算了新的激光波长，由于 $N$ 几乎为零（而不是 $2D/\lambda_{\text{空气}}$ ），因此应用空气折射补偿几乎没有任何效果。实际上，系统并不能“看到”测量光束中的额外空气，因此不会补偿这部分光束中的激光波长变化。

空气死程误差的一般公式如下：

$$E_{\text{ADP}} = D \times (\lambda_{\text{空气}} - \lambda_0) / \lambda_0$$

其中， $E_{\text{ADP}}$ 是空气死程误差， $D$ 是当清零时光学镜组之间的间隔（即死程）， $\lambda_{\text{空气}}$ 是当前激光波长， $\lambda_0$ 是当系统清零时的激光波长。如下所示，利用此公式，并假设当前空气相对于标准空气的变化，就可以估算每米空气死程的死程误差。

自清零后，气压变化误差为 $0.27 \mu\text{m}/\text{mbar}$ 。

自清零后，气温变化误差为 $0.96 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$ 。

自清零后，相对湿度变化误差为 $0.1 \mu\text{m}/10\%$ 。

这表明，空气死程误差通常非常小；如果将系统清零时测量光束上光学镜组之间的间隔 $D$ 小于10 mm，则空气死程误差可以忽略不计。

请注意，有些激光系统配有软件，当用户手动输入空气死程之后，软件会进行额外修正。雷尼绍的 LaserXL 软件不提供这种功能，这是因为两个原因：

- 1) 用户可能会弄错符号规约。根据移动的正向方向和光学镜组的布局，用户可能需要为死程输入正值或负值。如果输入的符号不正确，那么误差将加倍，而不是消除。
- 2) 比较好的测量方式就是，将光学镜组彼此紧靠，直接固定在关注点上，从而尽量减小无关的空气和材料的“死”程。如下一节所示，事实上，材料死程误差通常更为重要。因此，不提供软件修正功能可以鼓励用户采用更好的测量方式。

## 材料死程误差

同样以图19所示为例。再次将激光干涉仪系统清零，光栅读数为0.000 mm，但测量光束上的光学镜组之间存在“死程”间隔D。在此位置，如果N = 0，则激光位置读数也是0.000 mm。现在，假设机床温度上升了1°C，且材料膨胀系数约为10 ppm/°C。这时发生的膨胀会导致测量光束上的光学镜组进一步分离约10 ppm × D，而且光学镜组之间的间隔D中的波数将随之增加10 ppm。条纹计数N将相应增加，并且激光位置读数将从零偏移10 ppm × D。请注意，此“材料死程误差”是因气温变化1°C而产生的空气死程误差的10倍。即使环境补偿单元正确计算了新的环境系数EF，由于N几乎为零（而不是2D / EF），因此应用材料膨胀补偿几乎没有任何效果。实际上，系统并不能“看到”测量光束中的额外材料，因此不会补偿其热膨胀或收缩。

材料死程误差的一般公式是： $E_{MDP} = D \times \alpha \times T$

其中， $E_{MDP}$ 是材料死程误差，D是当清零时光学镜组之间的间隔（即死程）， $\alpha$ 是死程中材料的线性膨胀系数，T是自系统清零后的材料温度变化。例如，如果材料膨胀系数为10 ppm/°C，那么死程误差为：10 μm/每米材料死程/自系统清零后材料温度每变化1°C。

这清楚地说明了，材料死程误差可能比空气死程误差更为重要。由于“死程”中的材料可能与被测物体不同，而且它们的温度各自独立变化，因此无法进行简单的软件修正。最好的方法是采取合适的测量方式，即：

- 将光学镜组彼此紧靠，直接固定在关注点上，从而尽量减小材料死程。
- 保持温度稳定和/或快速完成测量，尽量减少测量过程中的材料温度变化。
- 如下面两节所述，使用预设读数或者使用分光镜作为移动光学镜组，以尽量减小将系统清零时光学镜组之间的间隔。

## 通过预设激光读数来消除死程

我们看一看图19所示设置的一种变体。如图20所示，在这种设置中，直线光栅的参考零位在最远端。但是，由于空间限制，无法重新调整激光干涉仪和光学镜组的位置（机床或光栅的零位不在激光干涉仪的光学镜组彼此紧靠的位置上），雷尼绍的LaserXL软件中使用的材料和空气补偿公式中包含一个额外的“预设”项。

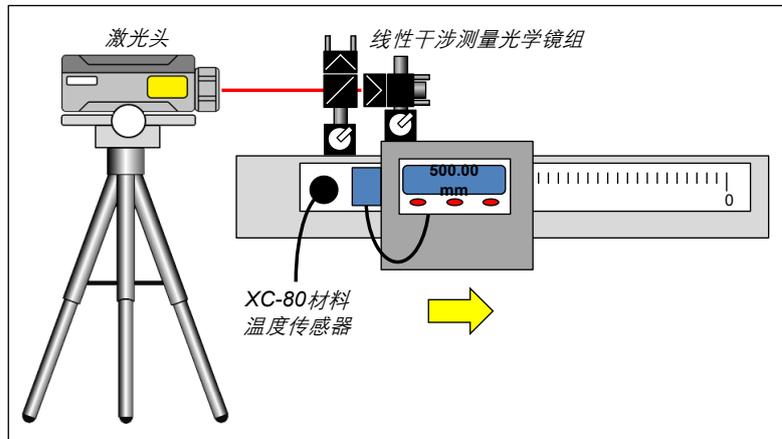


图20

$$L = P + ((1 - \alpha T) \times \lambda_{\text{空气}} \times N / 2) \dots\dots\dots \text{公式2}$$

其中，P是用户输入的“预设”值，用于将线性激光读数偏置一个指定的量。请注意，未对预设值进行补偿，它只是一个固定的偏置量，用于在补偿后的激光位置读数显示之前添加到其中。

在图20所示的示例中，将激光干涉仪清零和应用预设值的正确方法如下：

1. 将滑架移至光栅的500 mm位置。
2. 调整光学镜组安装座，使其彼此紧靠（如图20所示）。
3. 检查激光读数的符号规约是否与光栅的符号规约一致。
4. 将激光干涉仪系统清零。这样即可满足在激光干涉仪清零时光学镜组彼此紧靠的要求。  
*注：此时，激光读数为0.000 mm，光栅读数为500 mm。*
5. 将滑架移至光栅的参考零位。  
*注：此时，光栅读数为0.000 mm，激光读数约为-500 mm（比如，我们假设它为-500.0011 mm）。*
6. 在激光干涉仪软件中输入一个预设值，使激光读数和光栅读数一致。  
*（在此例中，用户应在激光干涉仪软件中输入预设值+500.0011。然后，激光读数将跳至0.0000 mm，与光栅读数一致。）*
7. 现在开始校准。此时，环境中的任何其他变化都将被正确补偿，从而避免由于将激光干涉仪清零时光学镜组相距500 mm而出现空气和材料死程误差。

## 通过互换光学镜组的位置来消除死程

将系统清零时使光学镜组彼此紧靠的另一种方法是，当轴的参考零位位于激光干涉仪的最远端时，将移动光学镜组和固定光学镜组的位置互换，如图21所示。在此设置中，分光镜（而不是角锥反射镜）固定在移动滑架上，而角锥反射镜固定在工作台的最远端。如图21所示，滑架位于基准位置，且光学镜组彼此紧靠，从而消除了空气死程。

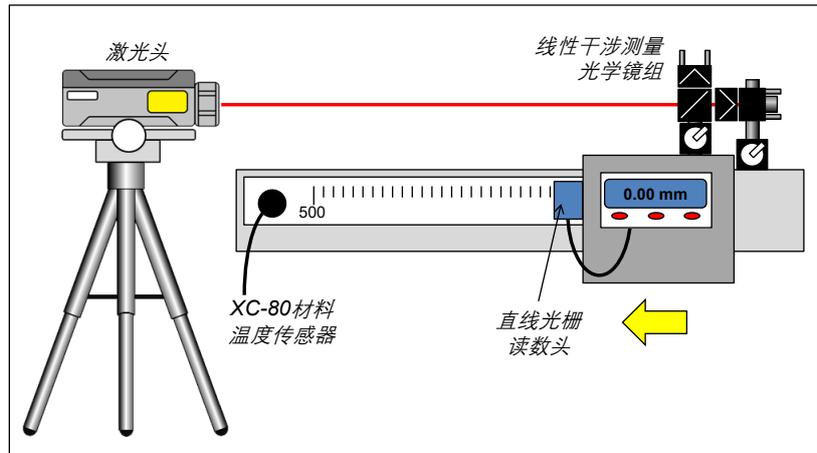


图21

（不过，在此图示中，光学镜组固定点与光栅读数头和光栅零位之间的偏置略有增加；如果温度发生变化，并且机床工作台和移动滑架发生不同程度的膨胀，就会导致出现材料死程误差。）请注意，对于较长的轴（10米以上），这种布局可能更难准直，因为由于光学制造公差，分光镜的输出光束可能与输入光束不完全平行。

## 结论

本白皮书阐释了空气折射补偿和材料膨胀补偿对于确保激光干涉仪的线性测量精度的重要性。本文详细介绍了与气温、气压、湿度和材料膨胀的未补偿变化相关的潜在误差；说明了雷尼绍XC-80环境补偿系统的原理，并就如何充分利用该系统提供了建议。如需延伸阅读，请参阅下文的参考文献和附录。附录1和2简要说明了环境补偿的其他方法。附录3解释了为什么激光干涉法角度和直线度测量通常不需要环境补偿。

## 附录1 — 环境补偿的其他方法

本白皮书介绍了如何使用雷尼绍XC-80环境补偿单元自动补偿空气折射和材料膨胀。本附录简要介绍了其他方法。

**手动补偿** — 如果有适合的环境数据，雷尼绍 LaserXL 软件（请参见图22）允许手动（通过键盘）输入气温、气压、湿度、材料温度和膨胀系数。每当用户输入一项新的环境数据，对激光读数应用的补偿都会更新。这种方法的缺点是无法频繁更新补偿，因此只适用于稳定的环境。雷尼绍XC-80系统的优点在于，每7秒钟获取一个新的传感器读数以自动更新补偿。XC-80系统还在一个紧凑型封装中提供了所有需要的传感器，并且具有适当的高精度水平。



图22

**空气折射计** — 空气折射计是一种高度专业化的仪器，可直接测量空气折射率的变化。空气折射计通常包含一个非常稳定且长度固定的参比腔，该参比腔通常由零膨胀玻璃制成，两端都装有镜子。利用平面镜线性激光干涉仪可直接测量参比腔内的激光波数变化。参比腔内的气温、气压和湿度与周围环境相同。空气折射计有两种基本类型。*跟踪式折射计*只测量折射率变化，而*绝对式折射计*可以测量绝对折射率和各种变化。折射计可以非常迅速地高精度测定折射率的变化，但折射计既昂贵又笨重，并且需要另一条激光光束用于折射计。通常只在标准实验室，以及半导体晶圆加工机械上的激光位置反馈系统中使用。它们的响应速度比传统的气温、气压和湿度传感器快很多。不过，这可能会增加补偿后激光读数中的噪声，因为折射计附近的空气折射率局部变化会立即应用于线性测量的整个长度。传统传感器的响应速度较慢，不会对突然的局部变化做出响应，因此能够在补偿过程中起到平滑作用。雷尼绍的激光系统不支持来自于折射计的环境输入。

**平衡式光学设计** — 如果将系统清零时光学镜组无法彼此紧靠，则可以考虑采用平衡式光学布局。如果激光干涉仪的参考光束和测量光束的长度相似，并且暴露在一样的空气中，那么空气折射率的变化将对两条光束产生一样的影响。

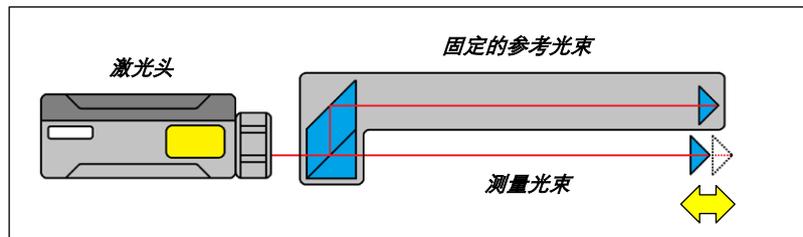


图23

图23显示了一种可能的布局。上图中的系统没有使用常规的线性分光镜，而是使用角度干涉镜进行分光，产生两条相互平行的参考光束和测量光束。长参考光束由因钢钢（以确保热稳定性）或机床的其他部分提供支撑，用于产生一条与测量光束光程相似的局部参考光束。

**在受控环境中测量** — 如果在高度受控的环境中进行测量，则可能不需要环境补偿。这种情况可能包括：

- 在真空中测量。
- 在气温、气压和湿度受控的空气中测量。

## 附录2 — 使用NIST空气折射公式

上文中提到，NIST的Metrology Toolbox提供了一个精度略低但更加简单的公式，它堪称“便携式计算器”，可替代Edlén和Ciddor公式，而且适用于0.633 μm氦氖激光：

$$n_{\text{空气}} = 1 + ((7.86e-5 \times P)/(273 + T)) - 1.5e-11 \times H \times (T^2 + 160)$$

其中， $n_{\text{空气}}$  = 空气折射率， $T$  = 气温 (°C)， $H$  = 相对湿度%， $P$  = 气压 (mbar)。尽管这个公式不如Edlén修正公式或Ciddor公式精确，但NIST指出，在0-35°C、500-1200 mbar、0-100% RH、CO<sub>2</sub>含量为450 ppm ±150 ppm的范围内，精度应该在±0.15 ppm以内。

因此，这个公式对于估算在各种气温、气压和湿度条件下的环境补偿误差非常有用。此外，也可以用于对未补偿的激光读数应用空气折射补偿，如下所述：

如果不应用空气折射补偿，雷尼绍激光系统的软件将假设在“标准空气”条件下进行线性激光测量，即：气压为1013.25 mbar，气温为20°C，相对湿度为50%。

将这些条件代入NIST公式，即可获得“标准空气”的折射率。

$$n_{\text{标准空气}} = 1 + ((7.86e-5 \times 1013.25)/(273 + 20)) - 1.5e-11 \times 50 \times (20^2 + 160) = 1.00027139$$

不过，如果实际上是在另一种气压、气温和湿度条件下进行激光测量，则当前的空气折射率表示为：

$$n_{\text{空气}} = 1 + ((7.86e-5 \times P)/(273 + T)) - 1.5e-11 \times H \times (T^2 + 160)$$

然后可以利用下面的公式乘以两个折射率之间的比率，对未补偿的线性激光读数 ( $L$ ) 进行补偿。

$$L_{\text{补偿后}} = L_{\text{未补偿}} \times n_{\text{标准空气}} / n_{\text{空气}} = L_{\text{未补偿}} \times 1.00027139 / n_{\text{空气}}$$

*请注意：上面的公式不会修正空气死程误差；在不稳定的环境中，如果在清零时光学镜组不是彼此紧靠，就会出现这种误差。*

### 附录3 — 激光干涉法角度和直线度测量的环境补偿

**直线度干涉测量** — 图24所示为直线度测量光学镜组的示意图。如图所示，激光干涉仪的光束1和光束2的长度几乎相同。因此，空气折射率的任何变化对两条光束的影响几乎相同。当测量较大的直线度误差时，可能会出现细微失衡，这在一定程度上容易受空气折射率变化的影响。不过，折射率的最大预期变化约为155 ppm（请参见图4、图5和图6），相当于0.015%。与雷尼绍直线度测量光学镜组规定的测量精度0.5%（短距离光学镜组）或2.5%（长距离光学镜组）相比，这种影响微不足道，相当于当测量1 mm的直线度误差时，误差只有0.15  $\mu\text{m}$ 。

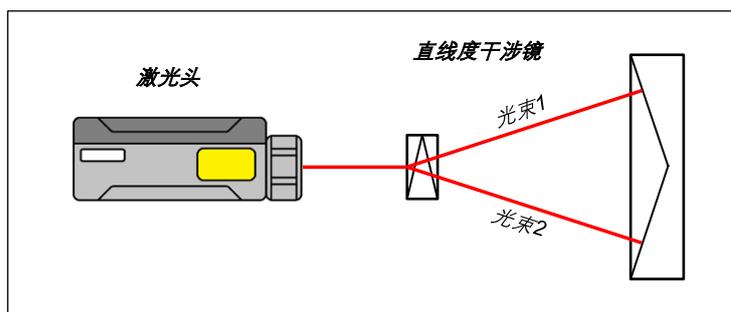


图24

**角度测量** — 图25所示为角度测量光学镜组的示意图。如图所示，当反射镜与光束垂直时，激光干涉仪的光束1和光束2的光程长度相当。当测量轴的俯仰或扭摆角度时，通常会出现这种情况。当测量较大的角度（最大为 $10^\circ$ ）时，可能会出现细微失衡，这在一定程度上容易受空气折射率变化的影响。

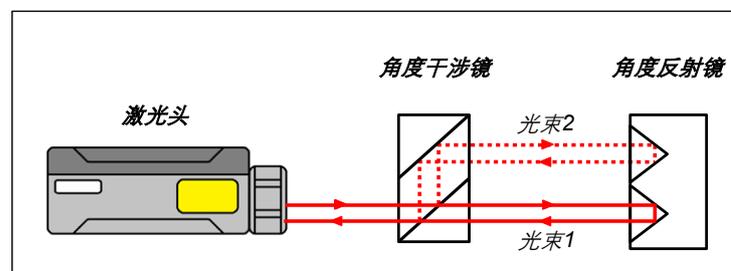


图25

不过，折射率的最大预期变化约为150 ppm (0.015%)。与雷尼绍角度测量光学镜组规定的测量精度0.6%（标准精度角度测量光学镜组）或0.2%（高精度角度测量光学镜组）相比，这种影响微不足道。最后，当使用角度测量光学镜组结合雷尼绍XR20-W基准分度器测量回转轴时，光学校准循环会自动包含当前的空气折射率。关于这一点，详情请参阅《雷尼绍白皮书TE327 — 回转轴的干涉测量校准》（参考文献7）。

### 参考文献

1. Phillip E. Ciddor, "Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared," *Appl. Optics* 35, 1566-1573 (1996).
2. B. Edlén, "The refractive index of air," *Metrologia* 2, 71-80 (1966).
3. K.P. Birch and M.J. Downs, "An updated Edlén equation for the refractive index of air," *Metrologia* 30, 155-162 (1993).
4. K.P. Birch and M.J. Downs, "Correction to the updated Edlén equation for the refractive index of air," *Metrologia* 31, 315-316 (1994).
5. NIST Metrology Toolbox <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp>

6. ASME B89.1.8-2011 《位移测量激光干涉仪的性能评估：非强制性附录C — 使用激光干涉仪系统进行精确的测量 — 最佳程序和实践》，第41-48页 (1998)
7. 雷尼绍白皮书《TE327 — 回转轴的干涉测量校准》

[www.renishaw.com.cn/calibration](http://www.renishaw.com.cn/calibration)

#雷尼绍

© 2013-2023 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-5650-3248-03-A  
发布：2023.02

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