

白皮书

栅尺安装方式对实现最佳热学性能的影响

当机器的温度发生变化时，机器上许多部件的长度都会因热膨胀效应而发生变化。同机器上任何其他部件一样，所有光栅尺也遵循同样的热学定律：随着温度变化，栅尺的长度也会发生变化。诚然可以选择接受由此产生的误差，或者通过控制机器运行的环境使其尽量微小，但是即使一摄氏度的温度变化也可能导致测量误差超过百万分之十（10 $\mu\text{m}/\text{m}$ ）。本白皮书介绍了如何应对光栅尺的热膨胀，提供了多个计算和补偿热致应力的选项，还解释了栅尺与基体之间的膨胀失配将如何影响光栅系统的整体性能。

1 安装方式与热学性能

可以对栅尺上出现的热致应力进行计算和补偿。通常可以利用温度测量值和热膨胀系数（CTE）来计算栅尺和基体的长度变化，然后再对这些变化进行补偿。栅尺上的热应力取决于下文所述的安装方式。确保精确测量机器的相关部件以及工件（如相关）的温度十分重要，因为二者出现任何测量误差均会影响热膨胀的补偿。

*示例1：*比如一台铝制机器，其线性轴长度为1米，工作温度范围为15至25 $^{\circ}\text{C}$ 。铝的CTE相对较高，大约为23 $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ 。在这个温度范围内（ $\pm 5^{\circ}\text{C}$ ），1米长的轴将膨胀/收缩 $\pm 115 \mu\text{m}$ （ $1 \times 23 \times 10^{-6} \times 5 = 115 \times 10^{-6} \text{m}$ ）。

大多数直线栅尺采用不锈钢等材料制成，这些材料的热膨胀特性与铝的膨胀特性有所不同。如果这种栅尺是在20 $^{\circ}\text{C}$ 时安装到此铝制线性轴上的，那么，完全忽视热效应将导致出现显著的位置不确定度。在上例中，当温度变化5 $^{\circ}\text{C}$ 时，1米长的铝制轴可能出现115 μm 的位置误差，具体取决于栅尺安装方式。

现在我们需要考虑应选择随基体伸缩栅尺还是自由伸缩栅尺。

1.1 随基体伸缩栅尺

举例来说，如果工件固定在机器上的特定位置，那么无论温度如何变化（假设机器随着温度升高伸长了115 μm ），您可能都希望通过栅尺定位到机器上的相同物理位置。在这种情况下，栅尺应该具备伸缩性并能够随机器伸展/收缩。

这种安装方式称为“随基体伸缩”，因为基体控制栅尺，而栅尺以与基体相同的系数膨胀/收缩。

1.1.1 选择随基体伸缩栅尺的条件

在很多应用场合，随基体伸缩栅尺都是最优选择，其中包括：

- 需要机器的坐标系而不是绝对位置，比如须移动至位于机器工作台上固定位置处的工件。
- 当工件的热膨胀系数与机器基体的热膨胀系数十分接近且二者保持相同温度时，栅尺和工件的膨胀幅度也将十分接近。因此，给定温度下基体的任何长度变化均可由等效的栅尺长度变化所自动补偿。
- 机器轴较长时，与随基体伸缩栅尺相关的不确定度不会随长度增加而增加，但是与自由伸缩栅尺相关的不确定度会随长度增加而显著增加。
- 如果基体具有低导热率和高热质量（例如一块非常厚的花岗岩），那么短期气温波动并不会导致基体温度发生大的变化及基体出现大幅度的膨胀/收缩，因此可以忽略这种短期温度变化。然而，必须强调的是长期温度变化仍是需要考虑的，长期温度变化可能更难以恰当地测量，因为其与基体平均温度相关，且更有意义。此时直接测量长度可能更合适，比如定期与已知标准进行对比。

1.2 自由伸缩栅尺

栅尺安装后可以很大程度上独立于基体而自由膨胀或收缩，这种栅尺称为“自由伸缩”栅尺。也就是说，自由伸缩栅尺的膨胀量由栅尺自身的热膨胀系数及温度决定。

在例1中，机器的材质为铝，铝的热膨胀系数较高，大约为23 ppm/°C。而不锈钢栅尺的热膨胀系数较低，大约为10.1 ppm/°C。每当温度升高5 °C时，与铝制基体膨胀115 μm相比，不锈钢栅尺的膨胀量仅为50.5 μm。通过使用低膨胀栅尺并进行热补偿可以进一步提高光栅的性能。

自由伸缩栅尺的膨胀由栅尺自身的温度控制。自由伸缩栅尺通常很薄 (<1.5 mm) 而且导热性相对较高。因此可以假设栅尺上的温度（作为深度的函数）是均值的。这样一来，测量相关温度（然后进行精确的热补偿）就简单多了。由于自由伸缩栅尺很大程度上独立于基体，因此也不必精确地知道基体的膨胀量。

使用热膨胀系数低的栅尺可以改善自由伸缩栅尺的热补偿。由于补偿修正往往很小，因此由于温度测量值不精确而造成的补偿误差也会很小。当温度测量值不确定时，或者当机器上存在局部温度变化时，这一点十分有利。

对所有可能的安装方式来说，基体的膨胀总会至少部分程度上影响栅尺的净膨胀：栅尺不会完全以其自身的热膨胀系数膨胀。实际栅尺位置与完全自由伸缩栅尺所预测的位置之间的偏离称为干扰，在安装自由伸缩栅尺时，应优先考虑最大程度地减小这种干扰。需要注意的是，即使栅尺材料的热膨胀系数非常低，这种干扰也会使栅尺的实际最小热膨胀高于理论值。雷尼绍提供两种基本的自由伸缩栅尺安装方式，以最大程度地减小在各种情况下对栅尺产生的干扰。这两种安装方式包括：使用背面自带的不干胶带；以及，采用物理方式进行机械安装以限制栅尺偏离运动轴，包括针对直线硬栅尺和不锈钢带栅尺，分别使用夹具和FASTRACK™。下节详细介绍了由干扰导致的栅尺偏离完全自由伸缩特性的情形。

2 自由伸缩栅尺的干扰

2.1 栅尺的干扰

针对不干胶带安装和机械安装产生的干扰，雷尼绍开发并通过实验验证了计算此类干扰的数学模型。这些数学模型太过复杂，无法在本文中完整呈现，而且部分结果是非线性的：比如，栅尺端部的位置误差最大，但是不能简单地在栅尺全长上线性细分这一误差。

下文的公式预测了栅尺端部在最差情况下受到的干扰。

2.1.1 关键术语

干扰是由安装方式导致的栅尺末端出现的位置误差，与栅尺的膨胀和基体的膨胀存在一定的关联性。它是理论上完全自由伸缩栅尺与实际栅尺之间的长度差异。干扰通常以μm为单位进行测量，在本白皮书中用u表示。

相对膨胀是栅尺和基体之间由于温度变化产生的相对热致膨胀变化，如图1所示。在本白皮书中，相对膨胀以ppm为单位进行测量，用ρ表示。它被定义为：

$$\text{相对膨胀} = \rho = \Delta T (CTE_{\text{基体}} - CTE_{\text{栅尺}})$$

其中：

ΔT 是温度偏离某一设定温度 — 通常是安装温度 (20 °C) — 的变化

$CTE_{\text{基体}}$ 是基体的热膨胀系数 (ppm/°C)

$CTE_{\text{栅尺}}$ 是栅尺的热膨胀系数 (ppm/°C)

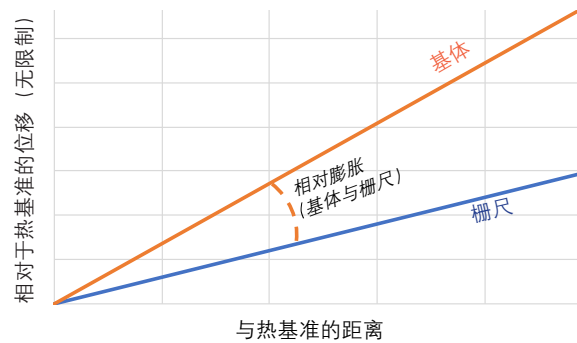


图1. 栅尺与基体之间的相对膨胀

自由长度是栅尺在基体上的固定点（即热基准（参见第3.1节））与栅尺的最远自由末端之间的距离。通常，热基准位于栅尺的中间，因此自由长度是栅尺总长度的一半。在本白皮书中，自由长度以m为单位进行测量，用z表示。

膨胀失配是从热基准到最远自由末端，栅尺的热膨胀与基体的热膨胀之间的差异：计为zρ。

2.1.2 公式

参数

下列公式中使用了以下参数。

E = 栅尺的弹性模量 (Pa)

A = 栅尺的截面面积 (m²)

L = 栅尺的总长度 (m)

z = 栅尺的自由长度 (m)

即，对于带中心基准的栅尺， $z = L/2$

u = 干扰 (μm)

ρ = 相对膨胀 (ppm)

q = 由于机械安装，每单位长度产生的摩擦阻力 (Nm^{-1})

k = 由于不干胶带安装，每单位长度产生的钢带剪切刚度 (Nm^{-2})

机械安装式栅尺：

机械安装（使用夹具和 *FASTRACK*）式栅尺受到的干扰 (u) 可以使用以下公式估算：

$$u = \frac{qz^2}{2EA}$$

只要相对膨胀大于由以下公式定义的阈值，上方公式即适用。

$$\rho \geq \frac{qz}{EA}$$

大多数实际情况均可满足此条件。从这个公式推导出的一个重要结论是，干扰通常与相对膨胀不相关。

从这个公式还可以看出干扰与自由长度的平方成正比。

不干胶带安装式栅尺：

通过不干胶带安装的栅尺受到的干扰约为：

$$u = \frac{\rho kz^3}{3EA}$$

其与机械安装方式有两个明显的不同点：不干胶带安装栅尺受到的干扰与相对膨胀相关，而且与自由长度的立方而不是长度的平方成正比。

边界条件：

在满足以下条件的情况下，这两种安装方式下的栅尺受到的干扰在理论上是相同的：

$$z\rho = \frac{3q}{2k}$$

在某个应用场合，如果膨胀失配（自由长度乘以相对膨胀）低于此临界值，则不干胶带安装受到的干扰小于机械安装受到的干扰。如果膨胀失配高于此临界值，则恰好相反。

此交叉点仅与 q 和 k 相关，一旦 q 和 k 已知，则可以估算所有栅尺配置的膨胀失配交叉点。

此膨胀失配交叉点可以用于确定，在特定条件下，对于不干胶带安装式栅尺和机械安装式栅尺，哪种方式受到的干扰更低。RTL 系列钢带栅尺的膨胀失配交叉点是 $20 \mu\text{m}$ ，而 REL/RSL 直线硬栅尺是 $500 \mu\text{m}$ 。

干扰/相对膨胀曲线图

下文的曲线图形象地描绘了安装方式对栅尺末端位移的影响，可以使用其预测所选的安装方式如何影响光栅系统的测量性能。图中成对绘制了各种栅尺长度在不干胶带安装和机械安装情况下的干扰/相对膨胀曲线。

图上用实线突出显示了干扰最小（性能更优）的安装方式。

图2中的曲线图可以用于确定，在某一相对膨胀条件下，哪种安装方式受到的干扰最小。

例如，如果在铝制基体 ($\text{CTE} \approx 23 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) 上安装了 1 m 长的带中心基准的 RTL 栅尺 ($\text{CTE} \approx 10 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$)，然后温度升高了 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ，则可以得出相对膨胀为 $(23 - 10.1) \times 5 \approx 65 \text{ ppm}$ 。

从图2a的曲线图中，我们可以看出，与不干胶带安装 ($\sim 0.28 \mu\text{m}$) 相比，使用 *FASTRACK* 安装栅尺 ($\sim 0.18 \mu\text{m}$) 受到的干扰更小。

曲线图中右上方黑色曲线上方的区域表示，在此区域，由于栅尺和基体之间发生过度的膨胀失配，不干胶带安装方式可能会失败。

请注意，这些曲线图基于栅尺的总长度 L ，假设栅尺在中心点固定或者没有固定点，即 $z = L/2$ 。在所有其他情况下，如果自由长度 z （从固定点到栅尺自由末端）已知，则在下方的曲线图中仅需使 $L = 2z$ 。

摩擦对机械安装式栅尺的影响有些难以确定：下文的曲线图提供了审慎的设计指导，但是并不适用于执行具体误差补偿。

RTL系列钢带栅尺的相对膨胀/干扰曲线图

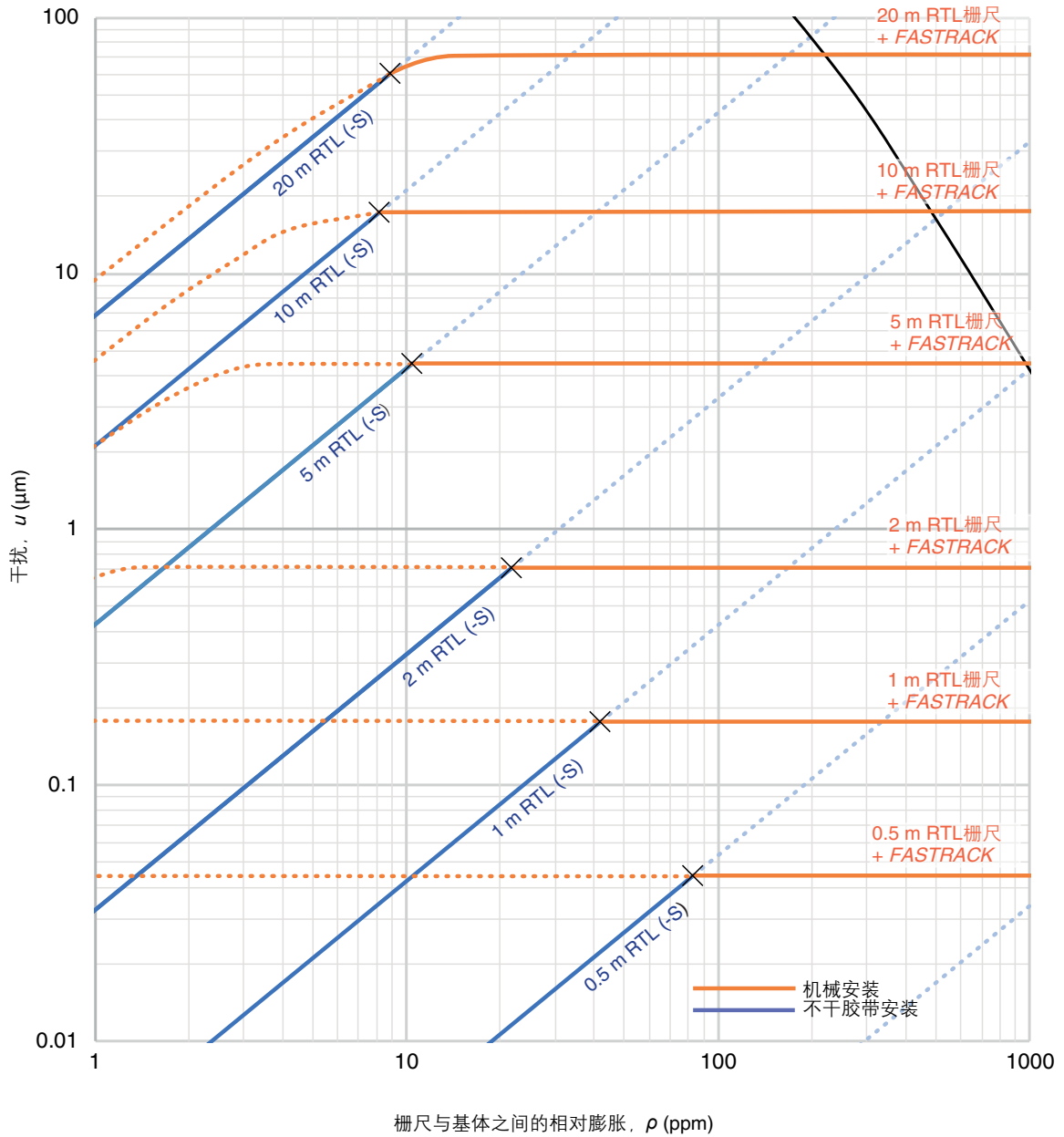


图2a. 对于RTL系列栅尺的各种长度型号和安装方式，由已知的相对膨胀导致的干扰。请注意，上方的曲线图假设设定中心固定点，或者无固定点。

REL和RSL直线硬栅尺的相对膨胀/干扰曲线图

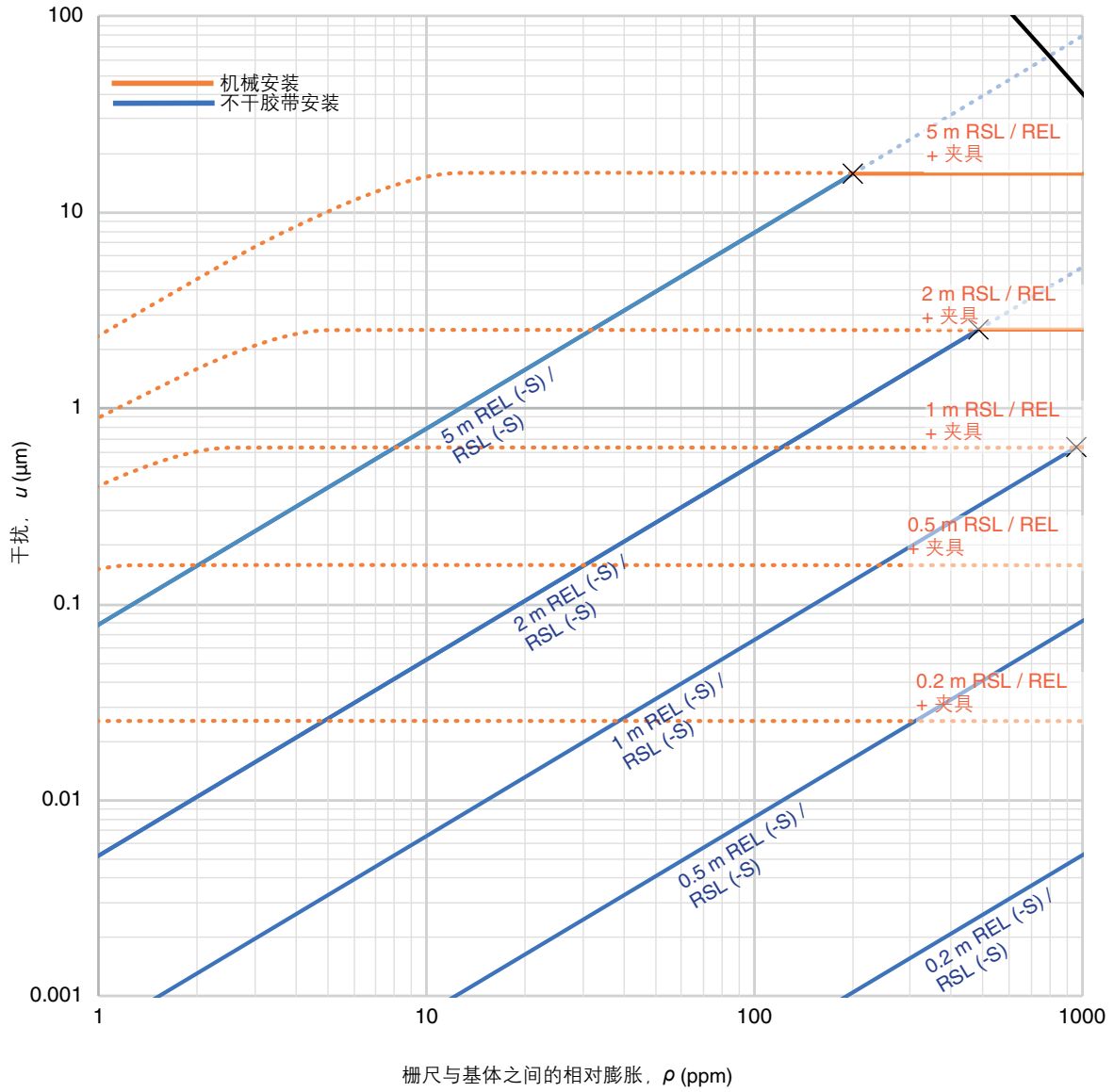


图2b. 对于RSL/REL栅尺的各种长度型号和安装方式，由已知的相对膨胀导致的干扰。
请注意，上方的曲线图假设设定中心固定点，或者无固定点。

2.2 迟滞

机械安装式栅尺受到的干扰可能还受栅尺受热历程的影响。为了更好地理解这一点，假设使用机械方式将一根CTE为零的栅尺安装到CTE非零的基体上。然后，使系统周围的温度上升。起初，栅尺大致上随基体伸缩，因为此时热致应力尚不足以克服机械安装方式中的摩擦力。最初温度开始升高时，栅尺以基体的CTE膨胀（参见图3中的第1阶段）。

之后当热致应力足够大时，会导致栅尺相对基体出现滑动，此时栅尺将以自身的CTE（在此例中为零）膨胀（第2阶段）。

随后，当温度下降时，情况则相反，需要先经过一段时间的降温后，栅尺才能克服安装中的摩擦力并相对基体出现滑动（第3阶段和第4阶段）。从这不难看出，栅尺的位置取决于系统的受热历程：这种效应称为安装迟滞。安装迟滞导致栅尺的膨胀出现一定的不确定性。迟滞效应的大小等于机械安装式栅尺受到的最大干扰。通常，不干胶带安装式栅尺不会产生安装迟滞，因为这种安装方式不存在机械摩擦。

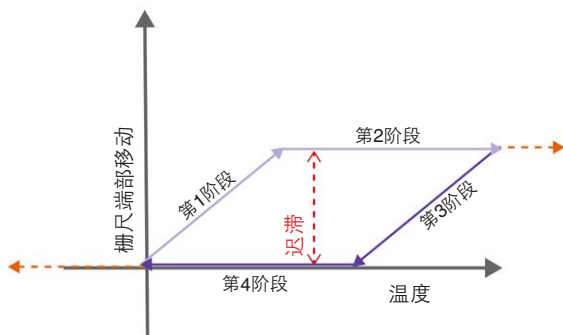


图3. 栅尺末端随温度变化的移动。假设栅尺采用机械方式安装，栅尺的CTE为零，而基体的CTE大于零。

3 其他栅尺安装考虑因素

3.1 基准

使用自由伸缩栅尺时，推荐使用热基准，它是栅尺上的一个点，借助这一点栅尺可牢牢地固定在基体上，这样栅尺和基体在这一点上就不会发生相对移动。

一般情况下，建议将热基准置于栅尺的中间，因为这样可以尽可能缩短自由长度，从而减小栅尺的总干扰。

如上文第2.1.2节所述，对于机械安装方式，栅尺末端的干扰与自由长度的平方成正比；而对于不干胶带安装方式，栅尺末端的干扰与自由长度的立方成正比。

雷尼绍光栅尺无需基准也可以安装，但是，出于多种因素考虑，我们不建议用户省略基准。如果没有基准，就无法确定栅尺相对于基体不发生移动的那个点。若考虑基于对称性的参数，此点应位于栅尺的中间，但是如果存在温度梯度，或者安装特性或基体属性在整个栅尺长度上存在变化，那么情况应另当别论。此外，热基准还有助于防止栅尺在直线轴加速运动时发生移动。

3.1.1 确认安装效果：FASTRACK和夹具安装

采用机械方式安装栅尺时，安装质量会影响摩擦阻力，进而影响栅尺受到的干扰的大小。因此，在安装之前，一定要仔细检查，确保基体是清洁的，安装面平直且未溅到任何可能残留的液体，并尽可能避免用布反复擦拭安装面，以减少磨损。

使用FASTRACK或夹具安装栅尺时，在栅尺上设置基准之前，一定要检查轴的滑动力。将这一滑动力与相应安装方式的预期滑动力进行对比（对于RTL栅尺， $\leq 0.3 \text{ Nm}^{-1}$ ，对于直线硬栅尺， $\leq 25 \text{ Nm}^{-1}$ ），就可以知道是否会实现计算的干扰。有时，由于未检查滑动力，导致未检测到实际存在的安装误差，这会大大增加栅尺受到的干扰。雷尼绍在栅尺安装指南中建议，通过减少固定栅尺的夹具数量可以降低夹具安装式直线硬栅尺的摩擦力，进而减小最大干扰。

3.1.2 不干胶带安装式栅尺：最大膨胀失配

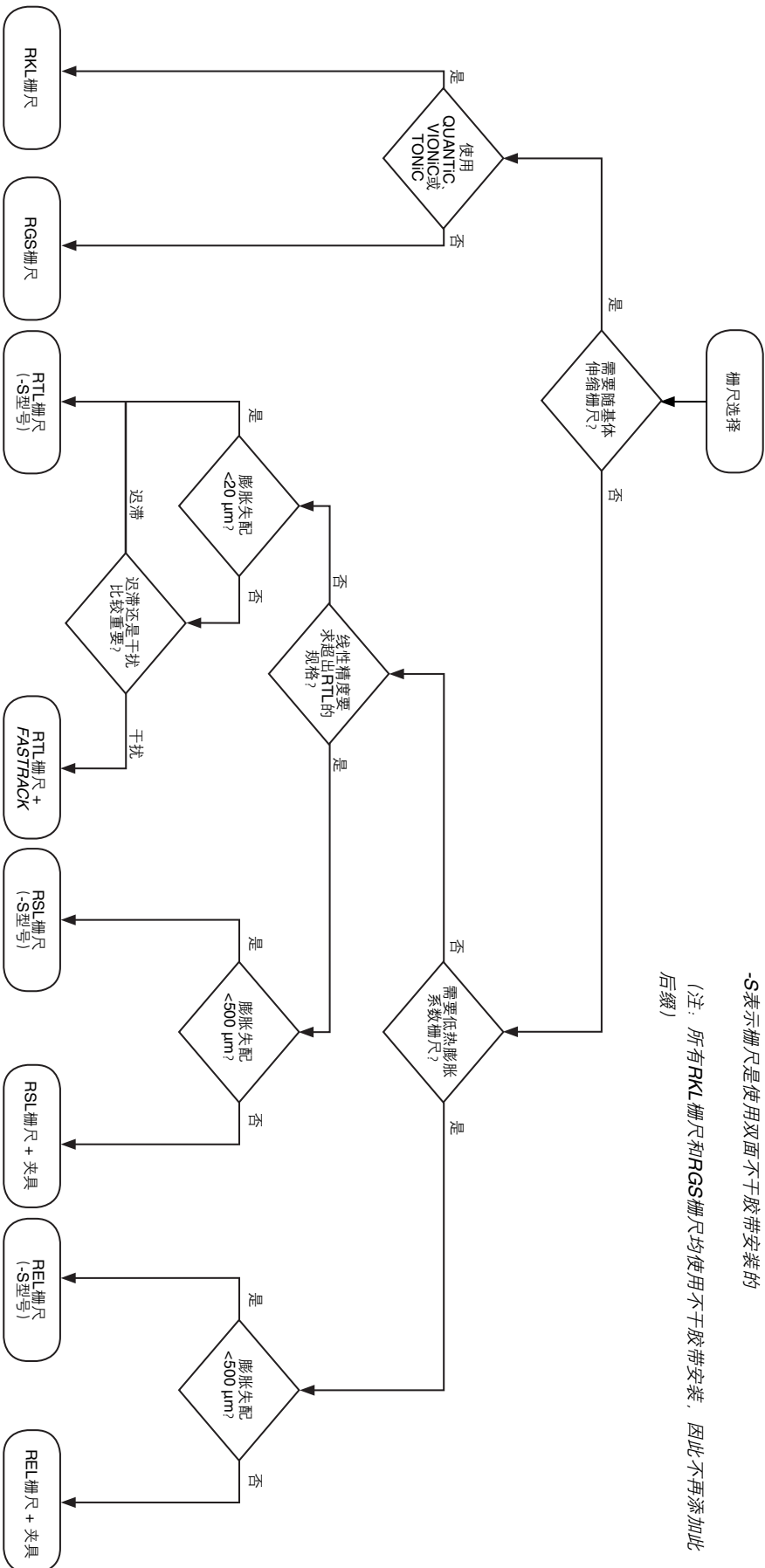
如图2a和2b右上方的黑色曲线所示，不干胶带安装式栅尺的最大膨胀失配不应超过1 mm，即使在运输过程中也是如此。一旦超过这个临界点，则无法保障不干胶带的机械性能。

3.1.3 随基体伸缩栅尺：RKL和RGS

使用随基体伸缩的RKL或RGS栅尺时，一定要使用环氧树脂胶固定的端部盖条利用两个点将栅尺牢固地固定到基体上。这样可以确保牢固地固定栅尺，因为不干胶带自身的刚度并不足以将栅尺固定到基体。

4 栅尺选择指导

以下流程可以帮助确定，针对某一应用场合，哪种栅尺和安装选项最为合适。



如需了解需要随基体伸缩栅尺还是低热膨胀系数栅尺，请参阅第2.2节和第2.3节。在某些情况下，虽然机械安装方式的干扰更低，但是不干胶带安装仍比机械安装更合适。这是因为不干胶带安装不存在迟滞，这对于某些应用场合十分重要。

5 术语表

术语	定义
不干胶带安装	在整个栅尺长度上粘贴的双面不干胶带，可将栅尺固定到位。
CTE	热膨胀系数 (CTE)，物体随温度变化发生的尺寸变化量。通常以每摄氏度百万分之几或ppm/°C表示。
膨胀	部件的长度变化除以其原始长度。
相对膨胀	基体与基体上安装的栅尺之间的膨胀差异。
干扰	栅尺末端由于安装方式导致的位置误差。它是理想中的完全自由伸缩栅尺的末端位置与栅尺末端实际到达的位置之间的长度差异。
膨胀失配	从热基准到最远自由末端，栅尺的热膨胀与基体的热膨胀之间的差异。
自由伸缩栅尺	栅尺的热膨胀由栅尺自身的属性控制，而且很大程度上不与基体相关的光栅系统。
自由长度	自由伸缩栅尺的热基准与离此点最远的栅尺末端之间的距离。如果未使用热基准，则应假设热基准位于轴的中间。
安装迟滞	栅尺从高温降温至某一温度与从低温升温至该温度之间的净膨胀差异。
随基体伸缩栅尺	栅尺的热膨胀由基体的热膨胀控制的光栅系统。
机械安装	通过机械部件将栅尺固定到位。针对钢带栅尺，使用 <i>FASTRACK</i> ；针对直线硬栅尺，使用夹子和夹具。
热基准	将自由伸缩栅尺牢固地固定到基体上的一个点。在这一点上，基体和栅尺之间不会发生相对移动，因此栅尺相对于基体发生的所有膨胀均围绕此点展开。

