

## 了解折光仪的测量性能

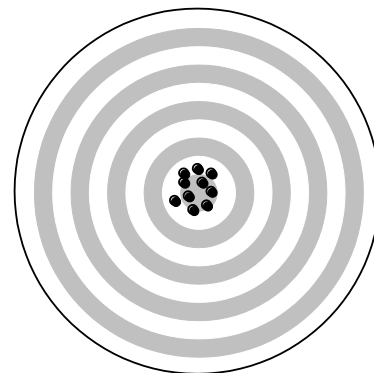


图 1. 良好的准确度——测量值接近真值。

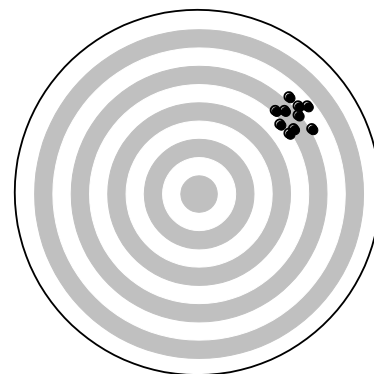


图 2. 重复性高但准确度低——重复测量结果是一致的，但与真值相差甚远。

### 简介

测量准确度是测量仪表重要的特性之一。本技术说明阐释了维萨拉在线折光仪的测量性能。

本文呈现的是使用 PR-43 型折光仪获得的真实测量结果。

### 术语

本文档使用了测量技术中普遍被认可并采用的术语。应该注意的是，以下术语也经常用来表示其他含义。

测量不确定度是一个定量值，用于描述真值周围的测量点的范围。它是测量中不同时间和空间不确定度来源的总称，与仪表和测量设置有关。

准确度指仪表测量结果与样本绝对真实值之间的差异。测量仪表的准确度可帮助确定测量不确定度。说明准确度的经典方法是使用飞镖盘（如图 1 和图 2），其中，中心被视为真值。

真实的准确度通常很难确定，因为真值始终会受到不确定度的影响。

准确度受系统误差（偏移）和随机误差（噪声）限制。

重复性指相同条件下，在短时间内重复测量同一样本时，仪表读数之间的差异。

重现性指在部分因素发生变化（如不同的仪表、操作人员、测量时间、地点或者更换样本）的情况下，对类似样本进行多次测量时，读数之间的差异。

除了这些定义明确的概念之外，还会经常用到分辨率和灵敏度的概念。下方描述提供了这些术语可能的含义。

分辨率可能是指显示屏能够显示的最小变化。例如，能够显示到小数点后三位（如 0.123）的数字显示屏的分辨率为  $\pm 0.001$ 。对于内部分辨率远高于实际测量准确度或精密度的现代数字仪表而言，这种解释意义不大。尽管可以更改显示屏的读数以显示更多的分辨率位数，但分辨率位数的增加并不会提高仪表的准确性，只会加大读数的明显变化。

分辨率也可以定义为能够看到的输入信号的最小变化。在这种情况下，分辨率取决于仪表的人为因素（噪声、漂移等）。这是测量技术中所用的分辨率的定义，但由于它很难可靠地确定，因此在实践中很少使用。

我们有时使用灵敏度（而非分辨率）来表示“可以检测到的最小变化”。

## 系统误差

折光法浓度测量中存在几种非随机误差源（图 3）。

为了测量浓度，折光仪必须测量两个物理量：折射率（nD）和温度（T）。然后根据测得的数值，通过一条化学曲线计算液体浓度值。三个因素都包含浓度测量的误差源：

- 由于仪表校准中的不确定性、热效应或光学系统缺陷等原因，可能出现系统性的 nD 测量误差。不过，这些误差是可重现的，因为如果在相同的条件下使用相同的仪表和相同的样本，就会得到相同的 nD 值。
- 温度测量系统误差由三个不同因素引起。

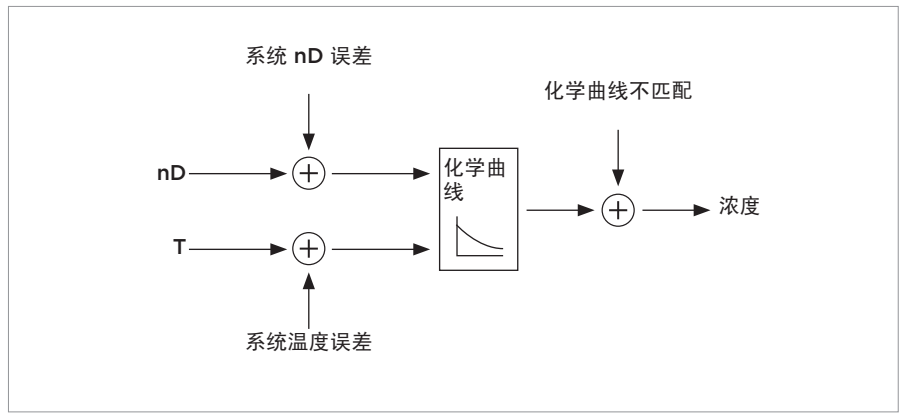


图 3. 影响折光仪浓度读数的系统误差。

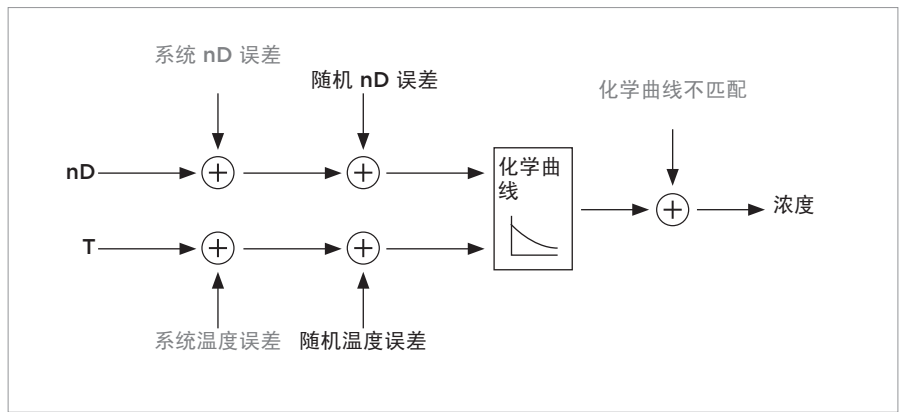


图 4. 折光仪 nD 和温度测量中存在随机误差（噪声）。

首先，测温元件的温度可能与在棱镜上流动的液体的温度不同。这取决于流动剖面以及其他工艺相关因素。此误差可能高达几摄氏度，这通常是主要的温度测量误差源。

其次，维萨拉折光仪中的 Pt1000 温度测量元件在不同装置之间存在小的差异。最大误差为  $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

第三，电阻测量电子器件和数字线性化会共同造成不到  $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的误差。

- 当工艺液体成分与创建化学曲线时所用的液体样本不完全匹配时，这种化学曲线的不匹配会带来偏差。此外，在化学曲线浓度或温度补偿范围之外进行测量也可能导致测量误差。不过，化学曲线不匹配造成的误差是可重复的，并且可以通过使用现场校正或创建新的化学曲线来校正。

一般来说， $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度测量误差会导致常见液体（白利度标准液、黑液等）的浓度读数偏移质量百分比 0.1%。不过，这个数字很大程度上取决于液体。

## 随机误差

除了系统误差（偏移）之外，测量系统中总是存在一些随机噪声。

单次测量的总误差是系统误差与随机误差之和（图 4）。

折光仪中存在不同类型的噪声，包括：

- nD 测量的噪声源自 CCD 检测器图像中的光学噪声。这种噪声的大小取决于工艺介质（缓和的光学图像产生的噪声大于陡峭的光学图像）。通常，噪声在仪表的 nD 下限附近更为明显，在范围的中间最小。噪声的实际大小取决于仪表

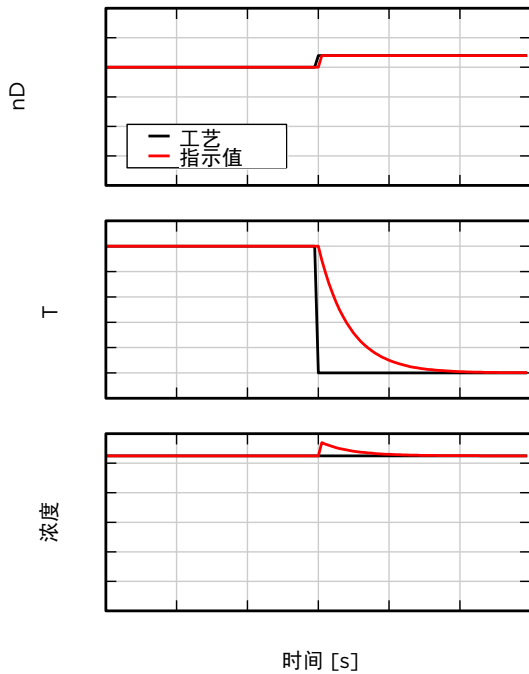


图 5. 温度阶跃变化（浓度无变化）

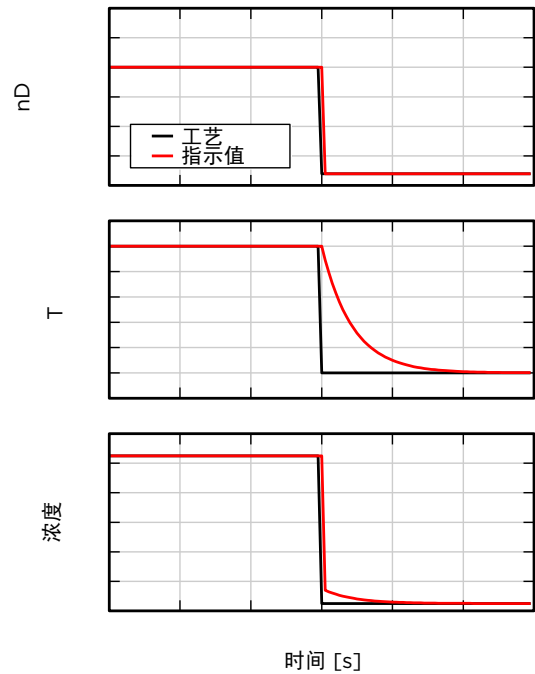


图 6. 浓度和温度的同步阶跃变化

和光学器件，但单次测量的标准偏差通常低于 0.0001nD。（有关改进方法，请参见下文。）

- 温度测量的噪声主要来自测量电子元件。与其他误差源相比，这种噪声可以忽略不计。

维萨拉折光仪中的 nD 噪声表现良好，因为它可以通过滤波轻松降低。例如，4 秒的线性滤波大约可将噪声降低一半。

## 工艺相关误差

在实际应用中，显著的测量误差通常与工艺有关。

在某些情况下，工艺流的流速过慢，或者仪表未与液体接触。如果出现这种情况，棱镜附近的工艺介质可能不是具有代表性的样本。而仪表会测量这个样本，因此测量结果不可靠。

此外还存在一种可能：部分介质沉积在棱镜上（又称附着或结垢）。仪表会开始测量这个薄膜的 nD，而不是工艺介质的 nD。这一过程的发生可能是渐进的，并被视为测量结果中的漂移。棱镜附着引起的典型漂移在浓度的几个百分点左右。

流动条件可能导致无法明确定义棱镜上的样本。如果流体未充分混匀，可能无法在棱镜上测量出均匀样本的浓度值。此外，流速过快可能会导致湍流和气穴。在这两种情况下，测量结果都不可靠。

应该注意的是，工艺相关误差通常比仪表误差严重一个数量级。

## 动态特征和响应时间

仪表会进行两次独立的测量：nD 和温度。这些测量具有不同的动态特征。

nD 测量每秒进行一次。由于处理和通信延迟，nD 阶跃变化的响应时间为 200 到 1200 ms。nD 测量没有时间滞后，因此为测量定义半时或时间常数没有意义。

温度测量每秒进行多次。其时间常数由仪表的热时间常数（热响应时间）决定。时间常数取决于仪表型号和工艺条件，但半时大约为 6 秒。

大多数情况下，仪表响应比工艺快，动态特征不会引入显著的测量误差。但是，如果工艺中出现快速的阶跃变化，则仪表时间常数的影响会变得不可忽视。

图 5 显示了浓度恒定但温度逐步变化 10 摄氏度的情况。从图中可以看出，由于温度补偿没有接收到准确的温度信息，指示浓度在一段时间内略有跳跃。

图 6 显示了一种更可能的情况，其中温度变化伴随 10% 的浓度变化。从图中可以看出，较慢的温度响应在阶跃变化后的几秒钟内引入了大约 1% 的误差，但此误差仅为阶跃变化的一小部分。

需要强调的是，这种现象只出现在一些界面检测应用中。一般来说，如果温度变化率低于每分钟几摄氏度，则这种影响可以忽略不计。

## 滤波

测量结果中的噪声量可以通过滤波（衰减）来降低。这样会导致响应时间增加。在大多数工艺过程的变化速度，比仪表的响应速度缓慢得多，因此适度的衰减不会降低测量准确度。

在维萨拉的折光仪中，滤波应用于输出值（大多数情况下为浓度）。有两种不同的滤波方法：指数和线性。指数滤波是业界常用的衰减方法。线性滤波指对输出信号进行移动平均处理，在实践中只能通过数字信号处理来实现。

图 7 显示了两种滤波方法的响应结果。从图中可以看出，指数滤波的响应时间是无限的（输出值永远不会与输入一致），而线性滤波很快就能实现与输入的一致。可以选择滤波时长，使两者的降噪效果大致相同。

对于线性滤波，滤波时长为平均时间。如果滤波时长为 20 秒，则阶跃变化会持续 20 秒。对于指数滤波，滤波时长为阶跃变化的一半时间。10 秒的指数滤波需要 10 秒来将输出更改为输入阶跃的 50%。

不过，指数滤波的输出结果比线性滤波更平滑，尤其是对 PID 控制器的微分控制有利。

增加滤波时长可降低随机噪声。但是，系统误差源通常会设置上限，以便在某个点之后增加滤波时长不会消除噪声。虽然没有硬性限制，但在大多数情况下，超过 30 秒的滤波不是很有用。

### 重复性测试结果

为确定仪表的短期稳定性，相关人员会使用多个 PR-43 折光仪装置进行一系列测试，指定准确度为 0.0002 nD。

其中一项测试是将糖溶液置于温度升高的环境中，持续数小时。温度的升高会导致 nD 的降低，因此可以看到 nD 缓慢的逐渐变化。在测试中，变化约为整个测量范围的 3%。

所选测试溶液的 nD 接近于噪声性能最差的水。nD 值越高，噪声越小。

上述测试的 nD 数据如图 8 所示。图中仪表测得的所有 nD 数据点均未经滤波。

为了查看噪声，图 9 中去除了温度变化的影响，仅保留了噪声。

在这一未经滤波的数据中，绝大多数点都在平均值的 0.0001 nD（对应 0.05 Bx）范围内。噪声的标准差大约为 0.000045 nD（对应 0.025 Bx）。通常，仪表的可重复性由“2 sigma”值定义，在本例中为 0.00009 nD（小于 0.05 Bx）。

如果不需要快速的响应时间，滤波可以改善测试数据，如图 10 所示，其中对相

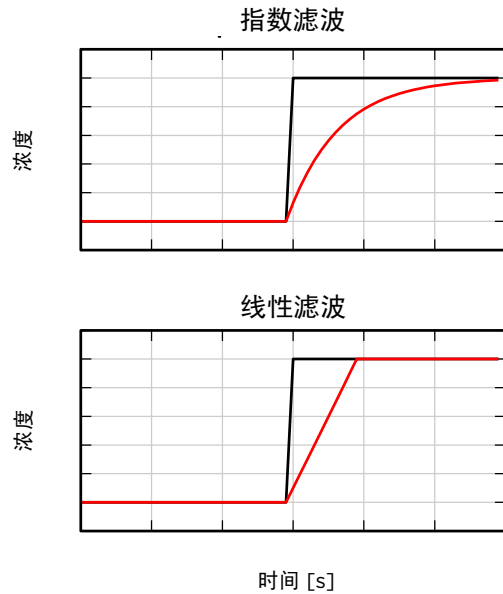


图 7. 使用 5 秒半时指数滤波和 10 秒线性滤波时，滤波后的阶跃变化。

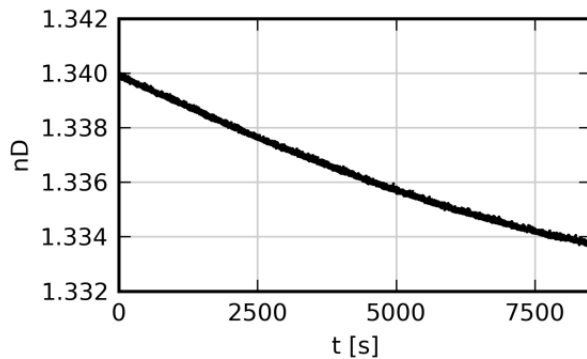


图 8. 温度缓慢升高的未滤波 nD 测量点

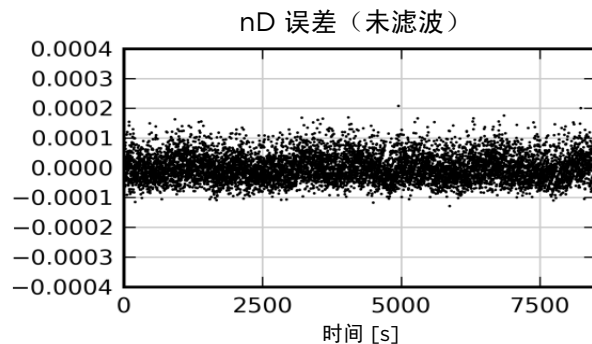


图 9. 去除温度影响的未滤波 nD 测量误差。

同数据应用了 10 秒的线性滤波。

滤波后噪声的剩余标准偏差大约为 0.000017 nD（小于 0.01 Bx）。不过，在大部分噪声消失的同时，数据开始显示出一些缓慢的变化。

将滤波时长延长到 30 秒可以更明显地展现这种现象（如图 11 所示）。

30 秒滤波的标准差是 0.000013 nD。随着缓慢的变化开始占据主导地位，10 秒滤波带来的改善变得微弱。

图 12 显示了采用 10 秒滤波的仪表的性能，展示的是最后 10 分钟的情况。

从图中可以看出，可从噪声中区分出 0.00005 nD 级别的变化。

## 结论

虽然 PR-43 折光仪的准确度为  $\pm 0.0002$  nD，但其在理想条件下的实际测量性能通常更好。可以通过现场校正或创建新的化学曲线降低测量误差，并通过滤波减小噪声。

测量结果表明，折光仪的重复性甚至可能比准确度还要好一个数量级。在工艺过程控制应用中认清这一点很重要，因为在这类应用中，可靠地观察趋势和变化比化学品浓度的绝对准确度更重要。

一般来说，折光仪之外与测量条件相关的许多不确定度来源可能对测量的总体不确定度产生重大影响。应该考虑以下因素：

- 恒定的过程温度（或温度仅在较窄的范围内缓慢变化）
- 较窄的浓度范围
- 均匀、无悬浊的工艺液体
- 保证棱镜自清洁效果的充分流动条件
- 工艺中 nD 缓慢变化（允许滤波）

如果满足这些条件，则测量结果的准确度很可能比声明的准确度更好。许多测量不确定度问题不是折光仪 nD 准确度或重复性性能导致的，而是源自工艺条件等外部因素。

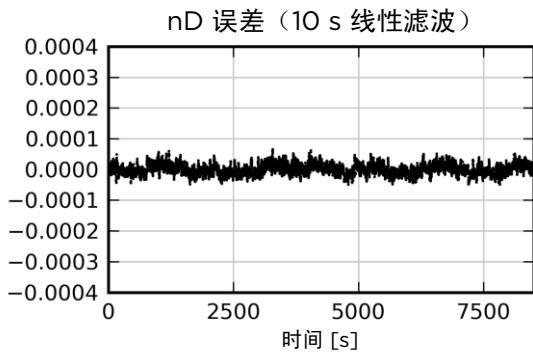


图 10. 采用 10 秒线性滤波的 nD 测量噪声

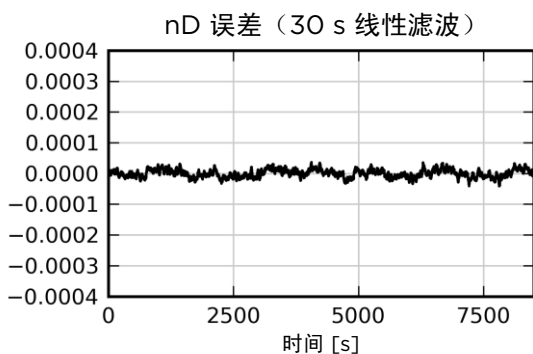


图 11. 采用 30 秒线性滤波的 nD 测量噪声

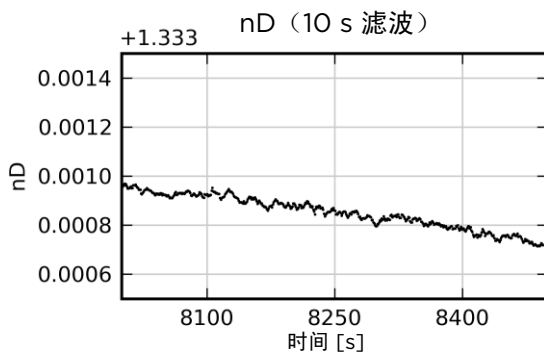


图 12. 采用 10 秒线性滤波的 nD 测量

**VAISALA**

请联系我们，网址为：  
[www.vaisala.cn/zh/lp/contact-form](http://www.vaisala.cn/zh/lp/contact-form)



扫描二维码获取更多  
信息

参考编号 B212435ZH-A-R ©Vaisala 2021  
本资料受版权保护，所有版权为维萨拉及其各个合作伙伴所有。保留所有权利。所有徽标和/或产品名称均为维萨拉或其单独合作伙伴的商标。未经维萨拉事先书面同意，严禁以任何形式复制、转让、分发或存储本手册中的信息。所有规格（包括技术规格）如有变更，恕不另行通知。

[www.vaisala.cn](http://www.vaisala.cn)