

白皮书

圆光栅的精度

圆（角度*）光栅可用在各种各样的机器和设备上。圆光栅由一个位置测量读数头和一个刻在圆光栅柱面或磁盘表面的精确栅尺组成。读数头通过光学方式感应间隔规则的刻度标记来测量位置，并以模拟或数字信号的形式输出这些信息。随后，信号通过数显表（DRO）或运动控制器转换为位置读数。本白皮书概述了影响圆光栅性能的主要因素，以帮助设计人员为其所选的应用选择最佳光栅系统。

许多现代自动化系统都需要精密的旋转运动，如旋转式计算机直接制版（CTP）预压机，机床A、B和C轴、表面贴装机、形状测量系统、晶圆处理和检测设备以及测角仪。不同的应用需要不同的光栅性能和特性组合，以优化其功能——有些对精度有要求，有些则要求重复性、高分辨率或低周期误差，以实现速度回路控制。选择能够在技术规格和功能之间实现最佳平衡的光栅极具挑战性，很少有光栅能够满足所有的要求。

精密运动控制取决于系统的精度和动态响应。准确测量位置固然重要，但如果不能精确控制位置，系统也无法正常工作。直驱旋转电机（或称扭矩电机）具备高扭矩，可在非常小的角度范围内实现精密伺服控制。由于负载直接耦合至驱动电机，无需安装会引起反向间隙、滞后、齿轮误差或皮带拉伸等状况的传动部件，所以其动态响应极佳。虽然大内径扭矩电机的无框架结构没有明显可用的联轴器来安装轴式光栅，但圆环式光栅可提供简便的解决方案。此外，圆光栅可以像负载一样刚性耦合至驱动电机，消除了系统中不必要的间隙。在任何测量或控制系统中，光栅最好尽可能接近驱动电机，这有助于将影响伺服性能的潜在轴共振降至最低，特别是在伺服带宽增加时。



图1. 安装在直驱电机（SOLPOWER，中国台湾）上的雷尼绍RESOLUTE™ RESA圆光栅。

圆光栅是提供精密角度位置反馈的优良解决方案。

与选择电机一样，要选择正确的圆光栅，应根据实际的规格要求，了解影响光栅精度的因素，并充分了解如何克服性能短板。在选择圆光栅时，明智的做法是除了考虑精度和分辨率外，还要考虑数据速率、系统大小、复杂性和成本等一系列参数。如今直线光栅的测量精度和分辨率可达到几十纳米，而圆光栅的测量性能可达到一角秒以内。一角秒是一个很小的角度：

- 可表示为半径206.25 mm时，弧长1微米对应的角度。
- 可表示为地表上30 m距离与地心对应的夹角。
- 可解析为1转/秒时1.3 MHz的数据速率。

在确定所需的测量性能时，考虑精度、分辨率和重复性非常有用：

- 对于重复性要求高的应用（例如拾取装置），系统反复在相同的光栅计数位置停止运动比各工作台角度的精确性更重要。
- 对于连续平稳运动，所选的光栅分辨率和精度不允许在控制伺服带宽内发生抖动误差。
- 对于慢速移动的装置，例如天文望远镜，精确的角度测量比系统最高数据速率更重要。
- 对于高速系统，可能需要在速度和定位精度之间取舍；粗栅距（刻线数较少）光栅适合高数据速率，但细栅距（刻线数较多）光栅通常具有较低的细分误差。

了解系统的精度要求后，再选择合适的光栅就容易多了。尽管某些厂商这样声称，但“即插即用”方式极少能实现高精度旋转测量——了解误差预算对于优化性能至关重要。虽然本白皮书参照的是图3所示的圆光栅，但同样的参数也适用于图2所示的雷尼绍RCDM光栅码盘等表面读取型圆光栅。

*角度光栅一般具有10,000或以上的刻线数，精度优于±5角秒。严格来说，“圆光栅”是指低于这些标准的光栅，但通常用作描述所有圆形光栅的通用术语。



图2. RCDM码盘上的ATOM™光栅读数头。

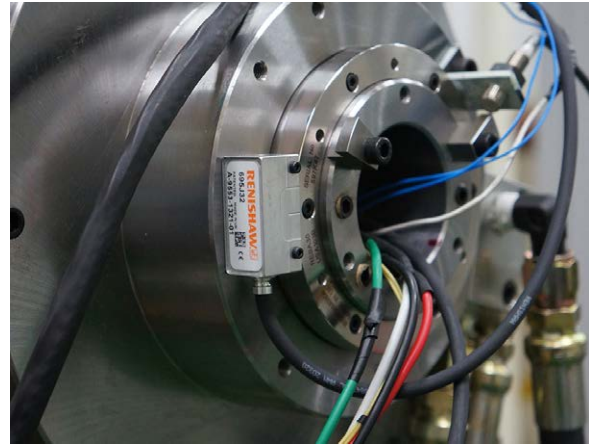


图3. DDR转台应用，带原位RESOLUTE绝对式光栅（ITRI，中国台湾）。

建立误差预算

想象一下，儿童在学校用塑料量角器在纸上测量两条线之间的夹角。他们把量角器直接放在纸上，让量角器的底线直接压住其中一条线，并调整其位置，直到原点与两条线的交点重合。然后在刻度尺上读出两条线之间的夹角，必要时进行细分以满足所需的分辨率。开始的几次，他们的读数可能与老师的读数不同，老师需要强调将量角器准确居中并对齐直线的重要性。这些准误差对测得角度的影响可能比塑料量角器自身角度刻度不规则对结果的影响更大。

孩子们已经学会了准确测量角度的三条规则：

1. 尽可能将圆尺的中心对准被测角的顶点。
2. 使测尺尽可能接近被测项目。
3. 尽量减少测尺与被测项目之间的相对（角度）运动。

还有其他三个因素可能没有考虑到：

4. 整个圆周上刻度间的圆周距离应一致。
5. 对于所有角度位置，径向刻度中心与进行测量的刻度尺边缘之间的径向距离应相同。
6. 测量角度时，应通过量角器垂直观察直线，尽量减少视差。

与在纸上使用塑料量角器一样，这些先决条件同样适用于机器中的圆光栅。

图5中，要测量或控制其角度运动的待测部件在一根轴上旋转，而这根轴安装于两个轴承上。带有内置轴承的圆光栅耦合至该轴，并通过安装在非旋转结构上的读数头读取。鉴于上述规则，要使光栅系统输出反映待测部件的实际旋转运动，必须符合以下要求：

1. 系统的每个部分在其轴承上旋转时必须无相对于旋转轴的径向跳动（即侧向运动）。
2. 连接待测部件与光栅的轴系统在扭矩作用下应具有刚性。
3. 联轴器的设计应使光栅在其轴承内旋转的角度运动与在其自身轴承系统内旋转的待测部件的角度运动相同；即需要一个等速接头。
4. 栅尺边缘周围的各条刻线之间的间隔应该一致，读数头应该以线性方式对刻线进行细分。
5. 栅尺应该是真正的圆形，其旋转轴应垂直穿过圆心。
6. 读数头读取栅尺时应无视差或其他几何误差，而且必须牢牢固定在非旋转参考框架上。

如果以上任何一个条件不能得到满足，待测部件的角度位置与光栅系统所报告的角度位置之间将出现偏差。通过研究每一个可能的误差源，可以确定各个误差源所引起的误差大小，从而确定整个系统的总误差预算。

轴承跳动效应

“轴承跳动”一词用来描述引起部件和/或光栅的旋转轴发生径向跳动（或侧向平移）的各种系统属性。径向跳动包括由轴承系统缺陷造成的可重复分量和不可重复分量：包括间隙、高次谐波（如球和滚道缺陷）和偏心（见图4）。

在滚动轴承上运转的主轴径向跳动幅度受轴承系统的设计和调整影响，但通常超过 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。由于光栅系统对其圆栅的圆周位置的分辨率至少能达到该值的十分之一，由此可以看到，轴承跳动引起的误差可覆盖精良设计的系统的其余部分引起的误差。轴承跳动的误差因素表示为：

角度测量误差（角秒）= 轴承跳动（ μm ） $\times 412.5/D$

其中D是栅尺的直径，单位为mm。

尽管表现出周期分量，但由于任何用于补偿的误差修正都必须修正许多主轴转数，因此该测量误差可能很难评估。

对于高精度系统，由于选择正确的轴承径向刚度可以将径向跳动降至亚微米级，因此最好使用设计精良的空气轴承。使用空气轴承时，必须考虑失衡力的影响：低速条件下，主轴绕其几何中心线旋转，但在高速条件下，当失衡向心反作用力超过轴承及其安装件的径向刚度时，主轴绕其质心旋转。虽然这种转变通常在高速条件下发生，但在静态和动态中心线之间可能出现几个微米的差异。此径向跳动可重复，因此可以按主轴每旋转一周出现一个周期进行预测。

无论使用哪种轴承，都应注意以下事项：

- 对于图5所示系统，只有支撑光栅的轴承会产生轴承跳动误差。然而，其所产生的优势可能被联轴器引起的其他误差削弱。
- 尽管有消除轴承跳动效应的技术（特别是在同一个栅尺上使用两个或多个读数头），但必须考虑角度测量的目的：
 - 例如，使用经纬仪测量水平或垂直平面上各点之间的角间距时，即使是明显的轴承跳动，也可以用两个读数头来补偿。
 - 如果需要位置反馈以使用极坐标来定位旋转组件上的给定点（如晶圆检测机应用），除非在同一个圆光栅上使用三个或更多读数头，否则支撑待测部件的轴承的任何轴向跳动都将影响定位精度。

如果不可避免地会产生较大的轴承跳动，则必须考虑选择适当的栅距。根据经验法则，如果增量信号是2个或多个读数头的平均值（参考零位来自其中一个读数头），则栅距应超出轴承跳动3到4倍，如果小于这个值，参考零位重复性方面的问题可能会很严重，除非采用补偿技术，如雷尼绍的propoZ™技术。

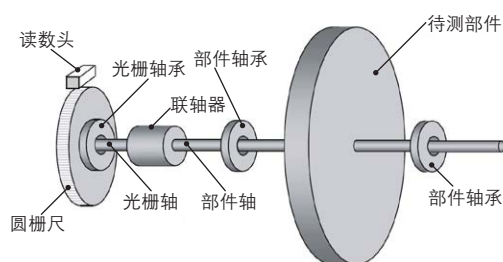


图5. 通用机器系统

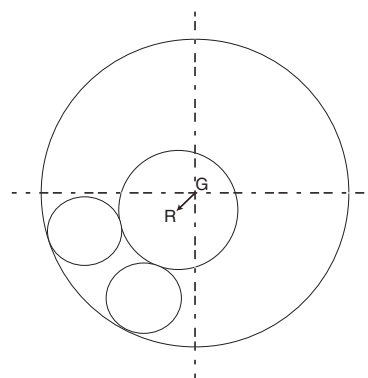


图4. 轴承跳动是总偏心度的构成因素之一，是旋转轴(R)从几何中心(G)开始的位移。

耦合误差效应

图5所示系统含有一个独立的圆光栅，其轴承通过一个联轴器连接到待测部件。这种设计的优点是，只有光栅轴承的跳动会影响角度测量精度。然而，如果系统要返回待测部件上某一点的极坐标，而非远处某个物体的角度轴承上的点，则主轴承的跳动将影响定位精度，因此我们必须谨慎看待这一“优点”。

联轴器本身的设计也可能对系统精度产生显著影响。

虽然全面介绍不同联轴器设计的缺陷不在本文的讨论范围内，但需要考虑几个重要因素：

反向间隙

旋转驱动系统中的任何反向间隙都会导致所报告的角度位置随旋转方向发生变化，这对系统重复性的影响最为显著。

抗扭刚度

联轴器的刚度可能不如其所连接的轴，因此可能会受到振动/共振和轴扭曲的影响，如果该联轴器用于反馈回路，可能会显著影响瞬态性能、稳定时间、容许的闭环增益和带宽。

角度误差

在某些准直条件下，大多数联轴器会在传动轴和从动轴之间引起角度误差（例如，如果两轴的轴线不平行，Oldhams联轴器会产生每转4次的误差）。对于高精度系统，圆光栅应与待测部件牢固安装在同一轴上，并在同一轴承上旋转。

轴扭转效应

待测部件与圆栅尺之间的轴如果缺乏抗扭刚度，将引起动态误差，进而降低系统性能。为最大程度降低该效应，我们建议安装非接触式光栅时，应使其尽可能靠近待测部件（见图6）。

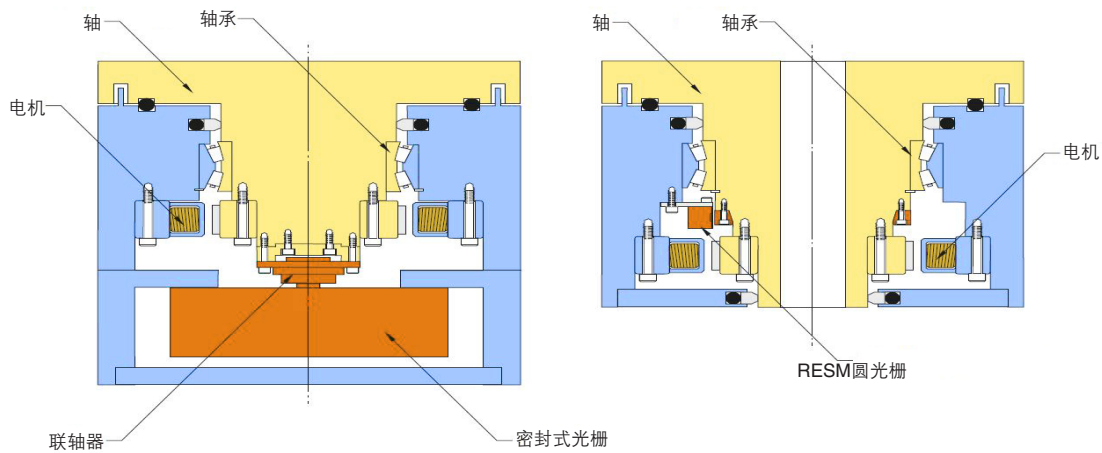


图6. 密封式光栅和开放式圆光栅

栅尺偏心和扭曲效应

准确测量角度最简单的方法是，读取与旋转轴保持恒定距离的均匀线性刻度的计量标尺。完美圆栅尺偏心安装引起的这些刻度标记的半径变化会产生误差，这些误差每转变化一次。栅尺扭曲会产生其他误差，这些误差每转变化两次或更多次。

以半径为 r_0 的完美圆栅尺为例。栅尺的安装使其以相位角 Φ_1 绕距离标称栅尺中心 a_1 处的某个点旋转（见图7）。在任意方位角 θ_1 ，旋转中心与栅尺表面的距离 R_θ 表示为：

$$R_\theta = r_0 - a_1 \cos(\theta - \Phi_1)$$

因此，每旋转一周，真实半径将呈正弦变化，其幅度等于偏心率。

为了增加栅尺扭曲的效应，可以将圆光栅的整体形状视为一系列不同频率 n 、相位 Φ_n 和幅值 a_n 的正弦波的总和，因而方位角 θ 的栅尺半径表示为：

$$R_\theta = r_0 - a_1 \cos(\theta - \Phi_1) - a_2 \cos(2\theta - \Phi_2) - a_3 \cos(3\theta - \Phi_3) - \dots - a_n \cos(n\theta - \Phi_n)$$

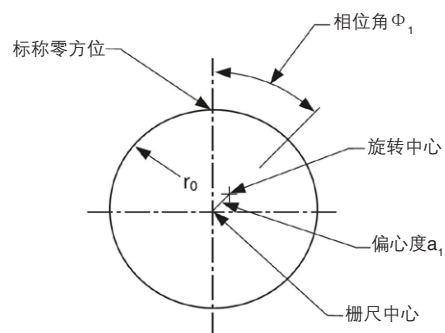


图7. 当圆栅尺的旋转中心偏离栅尺几何中心时，会出现栅尺偏心误差。

可以看到，幅值 a_n （均值至峰值）的正弦变化扭曲引起的最大圆周误差 E_n 如下所示，且每转循环 n 次：

$$\pm E_n = a_n / n$$

举一个最简单的例子，偏心率 $1 \mu\text{m}$ （即 $n = 1$ ）将引起圆周正弦线性误差 $\pm 1 \mu\text{m}$ 。

高阶栅尺扭曲的幅度增幅将越来越小，对栅尺精度的影响也将越来越小。低次谐波会产生显著影响：偏心率引起的误差效应可能与轴承跳动的效应相似。

雷尼绍的圆光栅安装在锥面安装座上时会出现少量的几何变形，这可能表明，测量会受到偏心和扭曲，特别是由多个紧固螺栓和锥面安装座引起的潜在各向异性效应的影响（如图8所示）。然而，在一个标准安装的200 mm圆光栅上，使用12个拧紧到正确扭矩设置的螺栓进行固定时，不会引起明显的误差；每转12个周期的误差“噪音”约为 $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 。

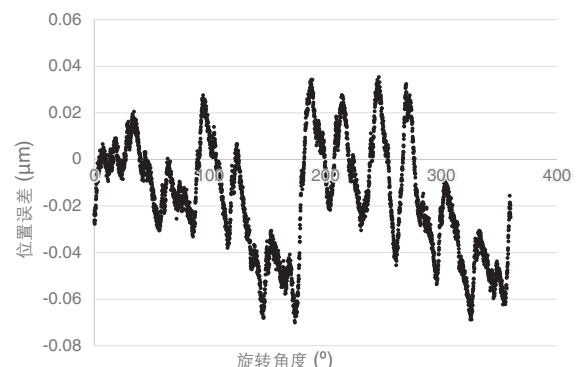


图8. 圆光栅的各向异性引起的每转12个周期的误差。

在典型安装中，60%或以上误差由偏心（由于安装）引起，低次谐波（主要是第2到第4次）产生的安装误差比例越来越小。

幸运的是，偏心和扭曲引起的误差可以用补偿技术来应对，其中最有效的方法是使用多个读数头。采用两个读数头可消除偏心和所有其他奇次谐波引起的误差。在某些安装中采用四个读数头可取得良好的效果，但增加更多的读数头往往会逐渐降低投资回报：仔细选择圆光栅截面形式是限制高次失真谐波更有效的方法。

雷尼绍圆光栅装置采用了专利锥面安装座，有效地将圆光栅可能出现的偏心和扭曲转变为幅度较小的偏摆，大大降低对精度的影响。例如，锥面安装座将200 mm圆光栅的1 μm 偏心度转变为偏摆幅度为0.002° 的同心圆光栅，从而提高测量精度，而无需使用多个读数头。

栅尺偏摆的效应

偏摆是指圆光栅与待测部件同心安装，但其几何轴向旋转轴方向倾斜的情况（如图9所示）。从侧面观察（即径向），这种偏摆会使圆光栅的圆周每转一周发生一次正弦轴向运动。

偏摆具有两种不同但细微的误差机制。对于第一种机制，以直径200 mm圆光栅（带有轴向刻度）为例，安装时偏摆幅度为0.1°。

安装过程中，已经使用在栅尺表面上运行的千分表（DTI）将栅尺调整为同心。在旋转一周的过程中，不仅栅尺相对于读数头轴向移动 $\pm 0.175\text{ mm}$ ，栅尺刻度的扭摆角也会在其标称值的任一侧 $\pm 0.1^\circ$ 的范围内变化。如果将读数头放在与DTI相同的位置（如图10所示），则产生的误差为二阶。然而，如果读数头从该点轴向位移1 mm；轴向运动、扭摆角和读数头位置变化相结合，将在圆周处引起每转一次且呈正弦变化的约 $\pm 1.74\text{ }\mu\text{m}$ 的误差（ ± 3.6 角秒）。

第二种机制是这样的：从正面看，圆形硬币呈圆形。如果在眼前偏摆这枚硬币，则呈椭圆形。偏摆圆光栅的影响与之相似，具有产生每转两次误差的效应，该误差的大小与偏摆角的余弦成反比。这是一种二阶效应，在上述例子中，误差为 ± 0.16 角秒：就大多数应用而言，该误差机制可以忽略不计。

读数头引起误差的效应

计量标尺只是光栅系统的一部分，读数头也会影响总体误差预算。读数头引起的最显著的误差如下：

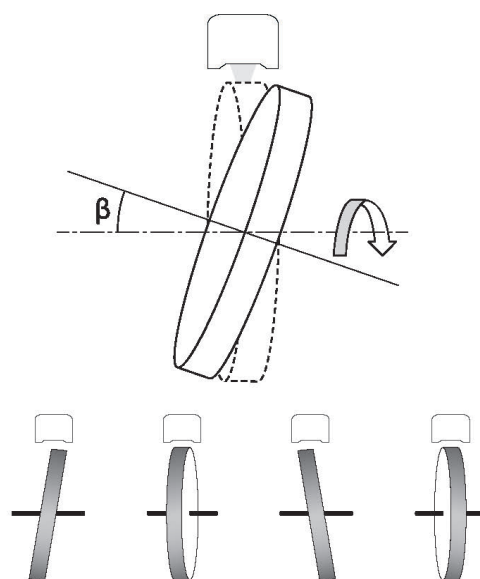


图9. 当圆栅尺的几何轴向旋转轴倾斜时，会产生偏摆误差。

电子细分误差

具有3,600个刻度的圆光栅，每0.1°或360角秒有一个刻度。如果所需的分辨率比该栅距更精细，则需要读数头具有细分功能。细分中的任何非线性因素将导致周期误差，也称为电子细分误差（SDE）。

以雷尼绍读数头为例，栅尺和读数头指示光栅产生的光学条纹随着栅尺的运动横向移动通过读数头光电探测器。这些条纹的强度呈正弦变化，由读数头解码为两个相位相差90°的正弦电压。

如果在示波器上显示这两个相对电压，会生成一个圆形利萨如图形，每移动一个栅距该图形就旋转一次。如果该利萨如图形是完美的圆形，并且以原点为中心，则其旋转速度与栅尺的运动将完全一致；如果细分方法具有真正一致的角度分辨力，则读数头细分是完美的，否则就会出现电子细分误差（SDE）。

电子细分误差（SDE）受读数头调整（与栅尺旋转中心对准）、栅尺调整和栅尺清洁度影响：精心维护和谨慎安装系统非常重要。读数头的光学设计也决定了电子细分误差（SDE）的性能：对于雷尼绍的20 μm 栅距Tonic系统，电子细分误差通常为 $\pm 30\text{ nm}$ （在200 mm圆光栅上为 ± 0.06 角秒）。

由于电子细分误差（SDE）往往在高频率下发生，补偿几乎无法消除电子细分误差（SDE）的效应，但在小距离范围内取平均值可能对某些应用有效。

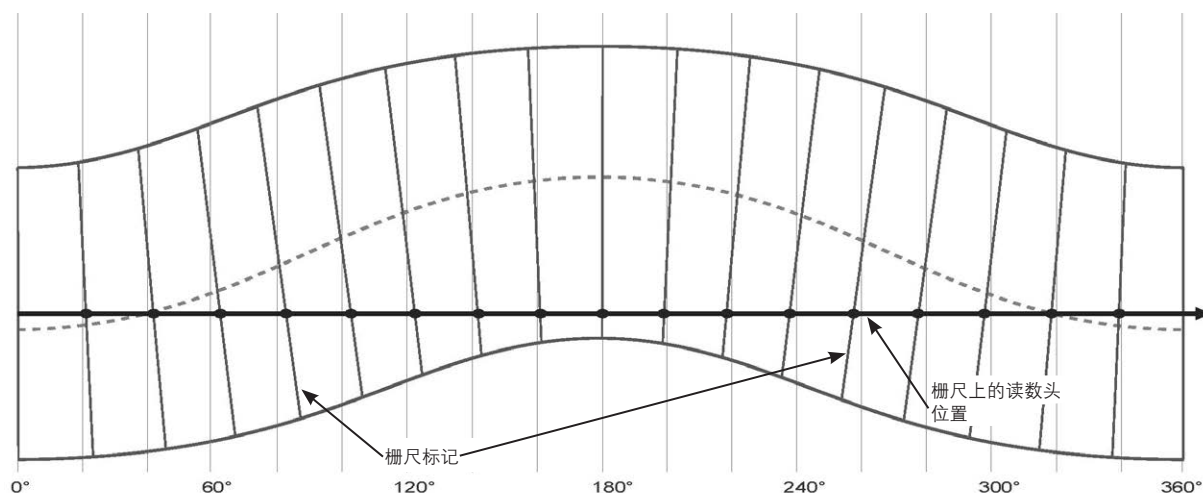


图10. 偏摆效应导致栅尺随旋转角度振荡。粗黑线表示栅尺上的读数头/DTI位置，虚线标记栅尺中心线。黑点表示栅尺在读数头下方旋转时每个栅尺标记的视位。

视差

如果栅尺与读数头之间的距离发生变化（例如由于圆光栅偏心、温度变化等），除非读数头与栅尺旋转中心线正确准直，否则将引起误差。如果读数头发生俯仰，则间隙的变化将引起与俯仰角正弦成比例的测量误差（如图11所示）。

安装稳定性

牢固、稳定地安装读数头对于精确和重复的角度测量极为重要。系统的设计应使读数头不会随着姿态、负载、温度、振动等的变化而相对于栅尺旋转轴移动。

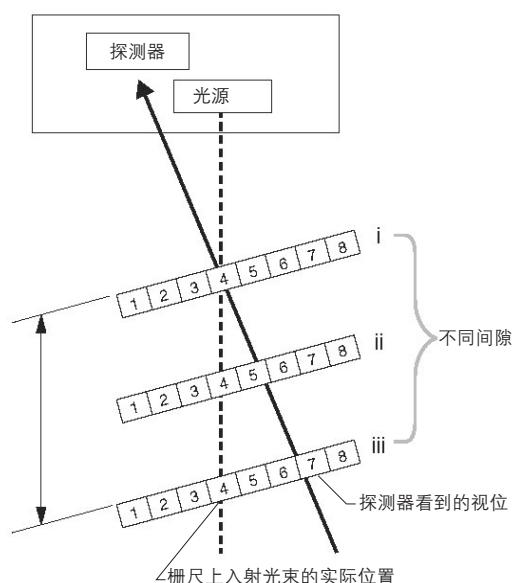


图11. 视差是当栅尺（相对于读数头）俯仰时，光栅读数头间隙改变导致的测量误差。如图所示，光源的光入射在栅尺位置4上，但随着间隙的增加，探测器会读取位置5和6。

如果系统产生意外较高的不可重复误差，则有必要检查以确保固定读数头的螺栓，以及相关支架和安装件没有随着时间推移而松动。

栅尺刻度精度的效应

在制造圆光栅时，制造商会将刻度直接刻划在基体上（而不是刻在直线栅尺上，然后再固定到圆盘或圆环的圆周）。制造商可将栅尺坯件固定在心轴上，然后旋转心轴来确定每个刻度的位置。刻度刻划完成后，将刻划后的栅尺从心轴上取下之前，测得的栅尺精度（刻度的实际位置与预期位置之间的差异）被称为“刻度误差”。如果重复该测量，但这次使用正确调整的读数头，则除刻度误差外，误差还包含读数头引起的分量（主要是电子细分误差 [SDE]）；该误差称为“系统误差”。

此时，如果取下圆光栅并将其重新安装在相同或不同的心轴上，并使用读数头检查其精度，所记录的误差又不同。该差异相当于圆光栅初次安装以进行刻度刻划与重新安装以进行使用之间的偏心度和高阶不圆度变化引起的误差。

本例中测得的总误差称为“安装误差”，该误差定义最能反映用户在现场实现的性能。

综上所述

刻度误差 = 制造时进行刻度划分的误差。

系统误差 = 刻度误差 + 电子细分误差 (SDE)

安装误差 = 系统误差 + 安装差异的效应

表1: Ø200圆光栅上总安装误差的组成因素。

误差类型	Ø200圆光栅的典型误差	
	μm	角秒
刻度误差	0.5	1.0
系统误差	0.53	1.1
典型安装误差 (1个读数头)	2.5	5.2
典型安装误差 (2个读数头)	1.0	2.1

在典型安装中，这些误差大小往往不同；表1给出了对雷尼绍大量直径200 mm的圆光栅进行测试的结果。直径为200 mm时，1微米对应2.06角秒。

刻度误差和系统误差由光栅制造商定义，但额外的 $\pm 2 \mu\text{m}$ 安装误差的责任由制造商和客户共同担负。即使客户安装的光栅能够确保完全同心并保持完美圆形，系统误差和安装误差之间仍然存在差异（除非客户将圆光栅安装在与制造商刻划刻度时的安装位置完全相同的位置）。

刻度误差的产生取决于制造工艺：

1. 对于通过在码盘/圆光栅边缘周围刻划/蚀刻各个轴线而制成的圆光栅，刻度误差由刻度制作过程中产生的误差引起。

2. 对于采用掩模和蚀刻技术制成的径向玻璃光栅，刻度误差由掩模精度误差和蚀刻过程中掩模放置误差共同引起。

3. 对于将直线栅尺固定在既定轴的圆周上的圆光栅系统，刻度误差由直线栅尺的制造精度、直线栅尺的厚度及既定轴半径的变化，以及将直线栅尺固定在轴上的张力差异引起。

准备阶段结束后，最后一种刻度误差可能会发生变化，因为温度变化加上栅尺与轴之间热膨胀系数的差异可能会导致栅尺相对于轴表面发生蠕变。如果用胶水来固定栅尺，则胶水松弛会增大此效应。

而雷尼绍圆光栅和码盘，以及其他圆栅尺的刻度误差不会随时间变化，每次旋转的刻度误差均可预测，对于用户来说，刻度误差与安装精度的效应无法区分；因此，可以使用相同的技术来降低误差。

如果圆光栅边缘的轴向刻度发生偏转或与旋转轴线不完全准直，就会出现细微的刻度误差。

这在纯粹的旋转运动期间没有影响，但圆光栅相对于读数头的任何轴向运动（由于轴承中的轴端浮动）将错误指示栅尺旋转。这种机制类似于前述的第三种偏摆机制。径向栅尺所用读数头俯仰不正确（即存在视差）的影响与之相似。

误差补偿技术

确定了运动控制系统所有误差源的影响之后，可以对达到装置技术规格所需的精度与未经补偿的圆光栅系统的预期性能进行比较。如果未经补偿的圆光栅系统无法达到所需的精度，则必须做出选择：要么选择具有更高规格的不同光栅系统（如果能够找到可满足安装空间、交付期及预算要求的新光栅），要么运用误差补偿技术，以消除性能短板。最有效的两种补偿方法是使用多读数头和误差补偿。

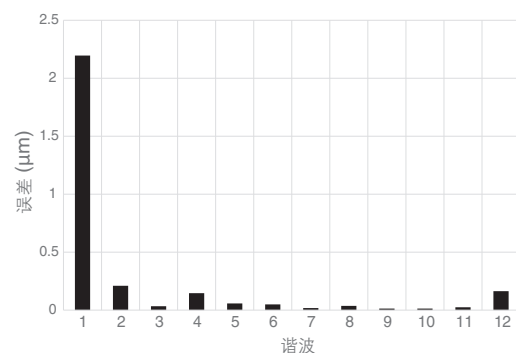


图12. 圆光栅误差补偿的快速傅立叶变换；第一谐波对应圆光栅偏心，是总安装误差的最大分量。

多读数头

安装两个对径读数头，可以消除偏心效应以及重复性误差的更高阶奇次谐波。这种方法还可以消除角度测量时轴承跳动的效应，但消除轴承跳动以实现准确的极坐标定位通常需要四个读数头。增加所使用的读数头数量将进一步减少重复性误差，但一般认为安装四个以上读数头的复杂性和成本远大于其优势。这种多读数头技术无需进行精心校准即可获得效果；在时间和测试系统设计方面都具有很大的益处。

误差补偿

如果选用的控制系统配置为使用误差补偿，则可以用它来减少重复性误差。为使该技术奏效，在最后组装圆光栅系统之后，必须由原始设备制造商使用干涉仪或其他经认可的测量基准对其进行校准。

安装人员不能依赖光栅制造商提供的任何校准证书，因为这会忽略安装过程中引起的任何误差，导致误差补偿毫无意义。优化误差补偿点的数量非常有利：对于正弦变化的周期误差，每个周期补偿七个点，可消除该频率下约90%的误差（如图12所示）。因此，一百个点误差补偿可补正前十四个谐波中的大多数误差，但应注意，这可能会增加由剩余的更高次谐波引起的误差。需要记住的是，该技术对轴承跳动、轴扭曲或其他时间相关的误差源的效应没有影响。

总结

本文简要介绍了确定圆光栅系统的实际规格时必须进行的一些权衡与取舍。此外还探讨了一些限制可实现精度的更重要的因素，并详细介绍了许多用于提高此可实现精度的技术。有关本主题的更多信息，可参阅ISO 230-7:2015（第7部分—旋转轴的几何精度）。

有关详细产品信息，请访问
www.renishaw.com.cn/encoder