



## 技术信息

# 机床加工精度

生产效率和加工精度是机床行业的重要竞争因素。但机床加工条件的快速变化加大了进一步提升生产效率和加工精度的难度。在零件加工过程中，必须经济和高精度地实现小批量生产。在航空航天领域，粗加工时需要强大材料切除能力，而精加工时必须达到高精度。在高质量模具加工过程中，粗加工时需要切除大量材料，精加工时需要高的表面质量。同时，如果要求一定的加工时间内实现加工路径间距最小，机床需要足够大的轮廓加工进给速率。

机床的热稳定性对其加工条件的快速变化占有越来越重要的地位。特别是小批量生产必须面对不断变化的加工任务，无法达到热稳定条件。同时，首件工件的精度正成为生产订单创利能力的关键。钻孔、粗加工和精加工操作的不断变换也使机床温度条件不断发生变化。粗加时，铣削率增加到80%以上，而精加时低于10%。加速度和进给速率的不断提高造成直线驱动的滚珠丝杠发热。因此，进给驱动的位置检测技术对机床热稳定性具有非常关键的作用。

### 机床热稳定性

避免造成工件尺寸因机床发热而产生偏差是机床行业面对的日益重大课题。主动冷却、对称的机床结构和温度测量技术已获广泛应用。

机床温度变化主要是由进给轴滚珠丝杠造成的。沿滚珠丝杠的温度分布与进给速率和驱动力大小紧密相关。在没有采用直线光栅尺的机床上，因温度导致丝杠长度的变化（典型值：20分钟100  $\mu\text{m}/\text{m}$ ），会使工件产生严重缺陷。

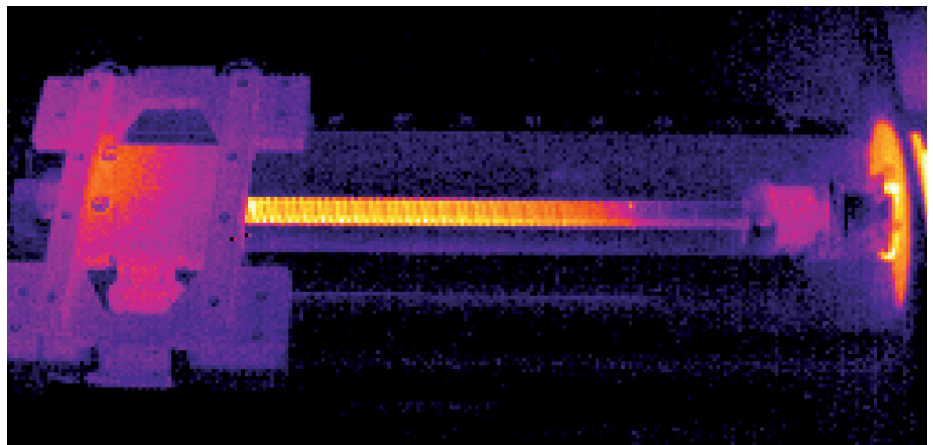


图1： 10 m/min进给速度，多次往复运动时的滚珠丝杠发热情况。温度分布图的温度显示为25  $^{\circ}\text{C}$  至40  $^{\circ}\text{C}$ 。

## 进给驱动的位置检测

原则上可以用滚珠丝杠和安装在丝杠上的旋转编码器作NC进给轴位置检测，也可以用直线光栅尺检测。

如果滑架位置用丝杠螺距和旋转编码器（图2，上图）检测，滚珠丝杠必须承担两项任务：作为驱动系统，它必须传递大驱动力，但作为测量设备，希望它能提供高精度位置值和可重复性的螺距值。但是，位置控制环上只有旋转编码器。

因为驱动机构的磨损或温度变化不能被补偿，所以这种结构被称为半闭环控制。驱动系统存在无法避免的定位误差，并严重影响工件质量。

如果用直线光栅尺检测滑架位置（图2，下图），位置控制环包括全部进给机构。因此，也被称为全闭环控制。那么，机床驱动部件的间隙和传递误差就不再影响位置检测精度。其精度几乎只取决于直线光栅尺精度和安装位置。

直线轴和旋转轴基本情况一样，位置检测通过安装在减速箱上的电机旋转编码器或直联在旋转轴上的更高精度的角度编码器。如果用角度编码器，可实现更高的精度和重复性。

## 其它半闭环控制技术

为避免滚珠丝杠和机床周围零件发热，有些滚珠丝杠采用空心结构，用循环冷却液冷却。半闭环控制模式的定位精度取决于滚珠丝杠的热膨胀，因此也取决于冷却液温度。仅仅1 K的温度变化就可导致1 m行程上10  $\mu\text{m}$ 的定位误差。但是常见的冷却系统基本无法保证温度变化不超过1 K。

有些半闭环控制系统对滚珠丝杠的热膨胀通过数控系统的模型进行近似计算。但由于

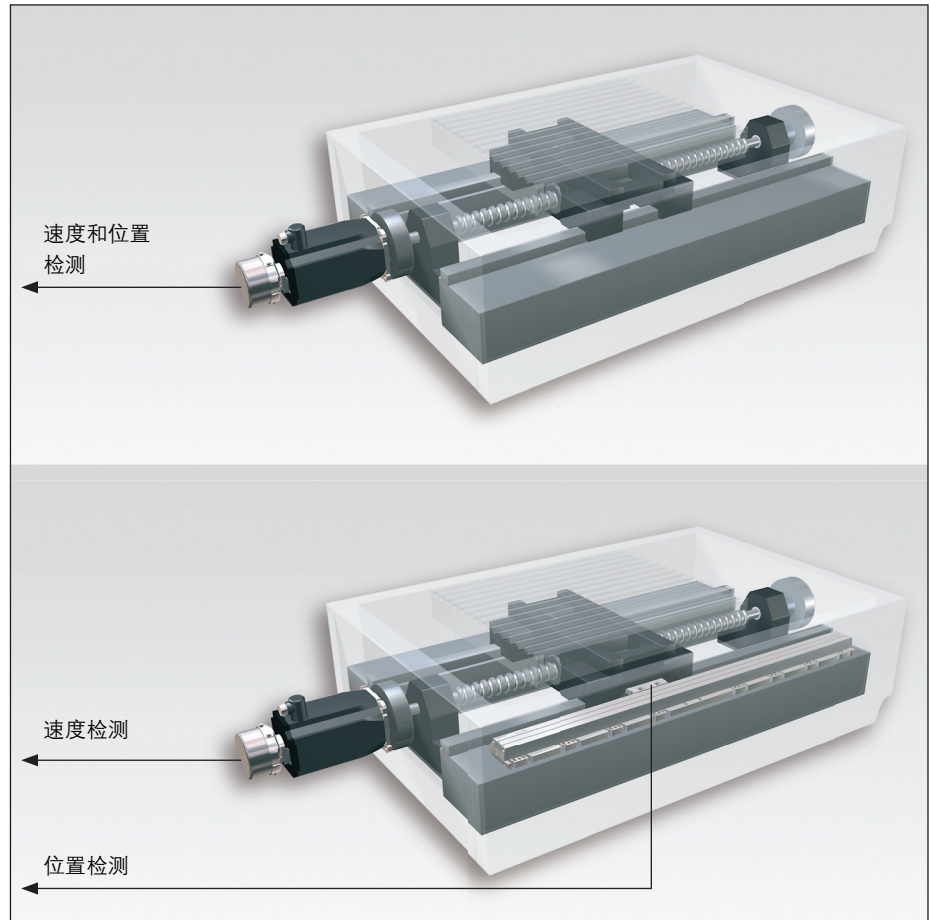


图2：半闭环控位置反馈控制（上）和全闭环位置反馈控制（下）

加工期间的温度特性难以测量，而且受多种因素影响，例如滚珠丝杠螺母磨损、进给速率、切削力、移动范围等，即使使用这样的模型也经常导致50  $\mu\text{m}/\text{m}$ 的可观误差。

有的滚珠丝杠两端采用固定轴承，以提高驱动机构刚性。但刚性极高的轴承也不能避免局部发热的热膨胀。而且会产生很大的热应力。即使刚性很强的轴承结构也会变形，甚至导致机床几何形状变化。这些应力也会影

响驱动系统的摩擦特性，因此影响机床的轮廓加工精度。

由于这些限制，上述这些改进措施能实现的驱动精度无法与采用直线光栅尺的全闭环控制系统相提并论。此外，半闭环控制系统采用这些改进措施后也无法补偿磨损、驱动机构的弹性变形、轴承预应力变化的影响。

## 驱动精度对零件加工的影响

机器制造业小批量生产对小批量零件加工的需求不断提高。因此，首件零件的加工精度对制造业公司的创利能力具有重大影响。小批量零件生产的高精度机床面对重大挑战。不断改变工件装卡、钻孔、粗加工和精加工操作使机床温度条件不断变化。

粗加工工件时的典型进给速率为3 m/min至4 m/min，精加工工件进给速率为0.5 m/min至1 m/min。换刀的快移运动使平均速度明显提高。中速进给速率的钻孔和铰孔对滚珠丝杠的发热影响不大。由于进给速率变化大，各加工步骤使得沿滚珠丝杠的温度分布很不相同。在半闭环控制模式下，滚珠丝杠承受的变化载荷作用力不利于工件加工精度，包括一次装卡完成零件加工的情况。因此，全闭环控制系统的直线光栅尺是实现高精度小批量零件加工的重要因素。

### 用同一毛坯加工多个零件举例

在机床上，对一个500 mm长铝坯进行钻孔，再铰孔。两道工序间的中速进给速率较低，因此这部分滚珠丝杠的发热量可以忽略不计。接下来，铣削轮廓，中速进给速率大幅提高，滚珠丝杠发热量明显增加（图3）。

如果铣床为半闭环控制模式，滚珠丝杠热膨胀会导致钻孔和铣削加工误差。滚珠丝杠自由端轴承最大偏差可达135 μm。对全闭环控制模式，可完全避免这些误差（图4）。

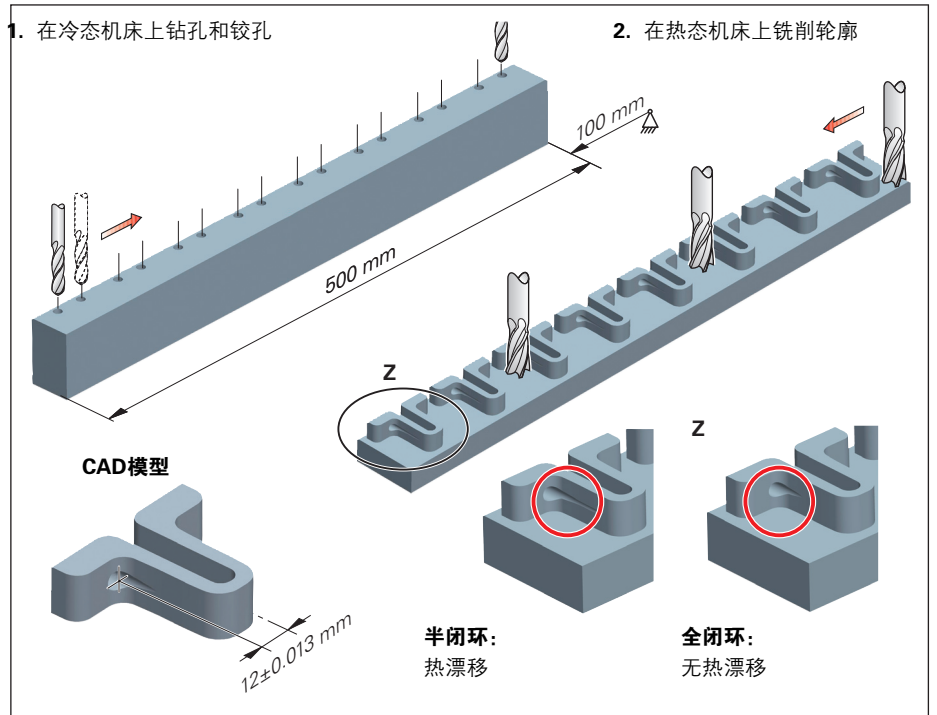


图3： 驱动精度对小批量零件加工的影响  
△ = 滚珠丝杠的固定轴承

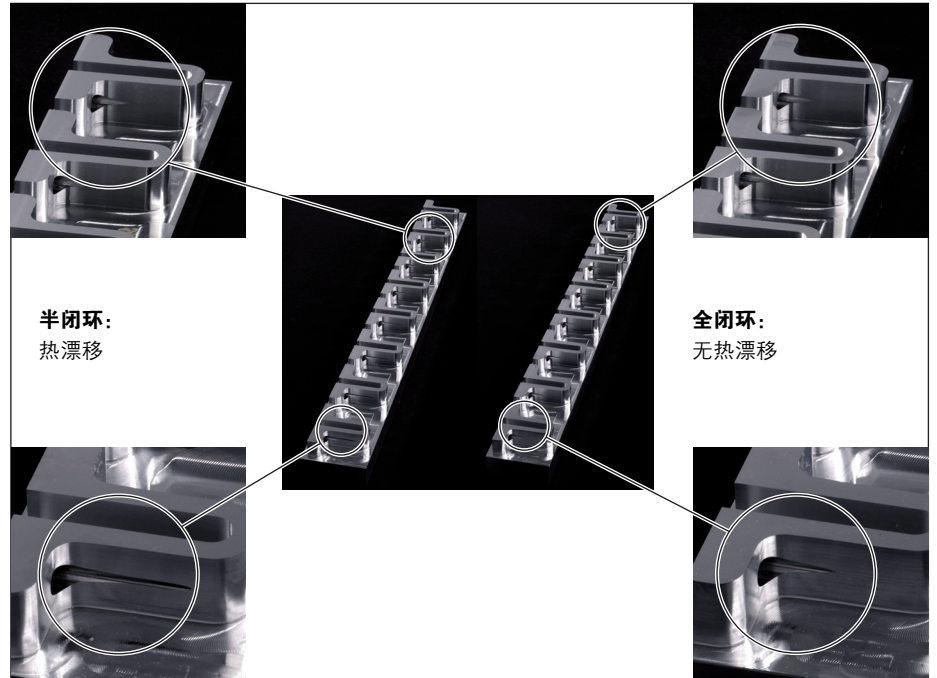


图4： 驱动精度对小批量零件加工的影响

图示工件，孔位置和各工件平分线间的定义尺寸为12 mm，加工公差等级要求IT8。也就是允许±13 μm的偏差。全闭环控制模式下加工的零件全部在要求的公差内。

半闭环模式下的偏差为135 μm。因此，工件只能满足IT13公差等级要求，不能满足IT8要求。

## 航空航天工业大切削量的整体构件

在航天工业，整体构件具有最小重量下的最佳材料利用率优点。整体整体构件的材料切除率大约为95%或者更高。当今高速切削（HSC）机床要求高速进给和高速切削。整体构件的大材料切除率具有突出的经济优点。但这样的进给速率和切削力也使滚珠丝杠产生大量摩擦热。滚珠丝杠的磨损和热膨胀在加工过程中也不相同，例如粗加工和精加工情况下得进给速率。如果进给驱动采用半闭环控制模式（不用直线光栅尺），小批量和短交货期生产时，加工零件的尺寸就会不同。由于热膨胀原因，可能无法满足公差要求。如果使用直线光栅尺，就可以避免这些误差，滚珠丝杠的热膨胀在全闭环内可以完全被补偿。

### 加工机翼连杆举例

图5为连杆加工，在连杆上相距350 mm处加工两个孔，公差等级为IT7。用同一个毛坯形状对该整体构件进行两次加工，检查半闭环控制模式的加工精度。第二件在第一件下方10 mm处开始加工。两次加工之间，在毛坯上方执行20次空刀加工循环。

半闭环控制模式，第二工件轮廓与第一轮廓工件不吻合（图6）。加工中距离滚珠丝杠固定轴承越远，滚珠丝杠热膨胀影响越明显。

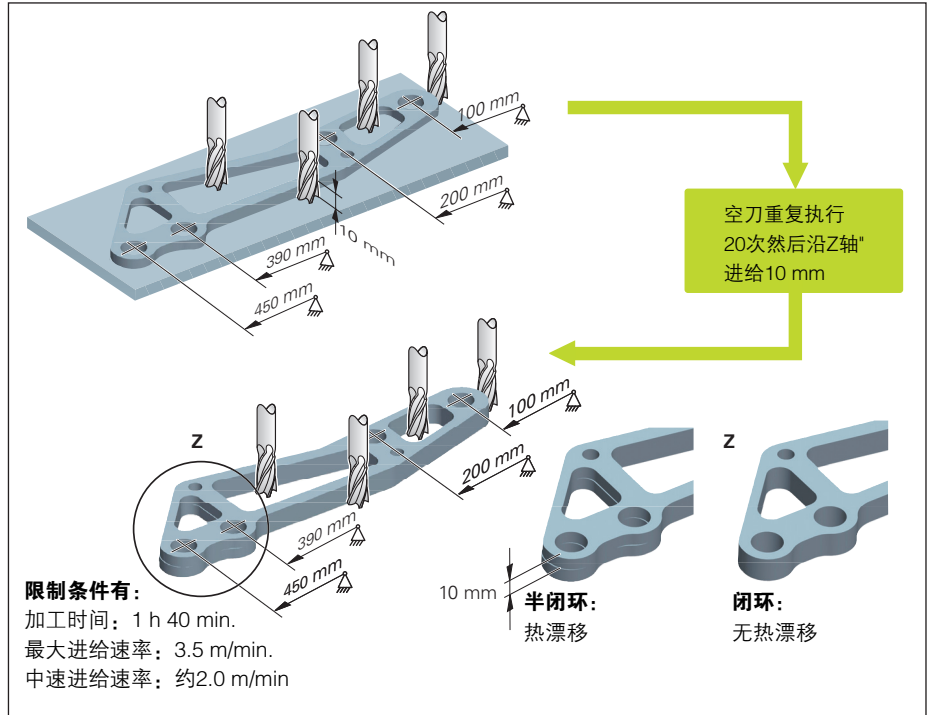


图5： 连杆加工

△ = 滚珠丝杠的固定轴承



图6： 连杆，一个毛坯加工两次

350 mm和公差等级为IT7的功能尺寸相当于 $\pm 28 \mu\text{m}$ 的允许偏差。半闭环控制模式的第二件无法满足这项要求。偏差达 $44 \mu\text{m}$ 。采用了直线光栅尺全闭环控制模式的机床上加工的零件没有这个棱边。

全闭环控制模式下 $10 \mu\text{m}$ 偏差是由于机床几何形状的热变形和结构变形造成的。甚至，两孔尺寸要求公差还提高到IT5。因此从最开始就能保证高的加工精度。

## 对工模具制造的影响

吹铸或压铸模具的加工非常消耗时间，因为其需要极高的表面光洁度，有时还要加工非常细致的结构。现在许多模具都直接采用铣削加工，不再使用耗时的电火花成形加工工艺。使用的铣刀直径甚至只有0.12 mm。模具的铣削加工不仅要求高精度的形状。还要求进给速率大以缩短加工时间，包括高硬度材料。典型模具加工时间从10分钟到数天不等。但是不允许因为加工速度快而牺牲尺寸精度。第一刀和最后一刀的路径必须完全相同以确保不浪费提高进给速率节省的时间，避免修复加工。

进给轴驱动的滚珠丝杠发热直接取决于NC程序控制的各轴进给速率，滚珠丝杠的长度变化可能达到150  $\mu\text{m}/\text{m}$ 。这些条件使半闭环控制模式无法保证尺寸精度。滚珠丝杠的典型发热量可使模具的150 mm长度范围出现20  $\mu\text{m}$ 的棱边。滚珠丝杠热膨胀导致的误差可造成大约一半模具的缺陷过大而无法修复。

### 3-D铣削自由形状表面举例

下例为加工德国阿尔卑斯山—瓦兹曼山峰形状的模具。500 mm长工件通过多道切削加工，在X轴方向进行顺铣和逆铣，铣刀为12 mm球头铣刀，最大进给速率为4.5 m/min。Z轴和Y轴方向一次进给0.2 mm，大约60分钟完成加工。半闭环控制模式，用4.5 mm/min的高速进给速率和稳定的加速度和减速度使滚珠丝杠发热，热变形造成130  $\mu\text{m}$ 偏差。

由于这种模具形状的直线偏差不易被察觉，

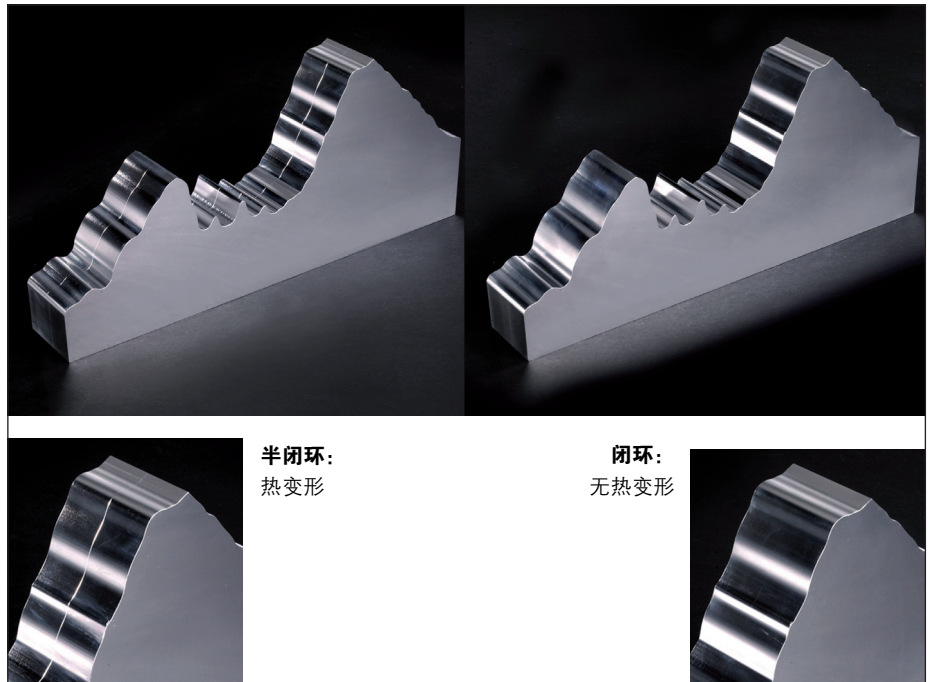


图7：自由形状表面的瓦兹曼山峰：

因此特意从工件中间开始加工。开始和最后一道路径相邻，可见的棱边线清楚地反映了温度变化影响。工件距离固定轴承位置越远，热漂移影响越大。

为满足模具制造的严格要求，必须用高精度直线光栅尺补偿滚珠丝杠的热膨胀。图7为全闭环控制模式高精度和高表面质量与半闭环控制模式件加工情况的比较。

### 总结

要成功完成加工订单，必须要求机床具有高的热稳定性。即使负载不同，也必须保证加工精度。这样才能在整个行程上保证要求的公差等级，包括速度和切削力大幅变化时。

直线进给轴驱动的滚珠丝杠热膨胀严重影响精度且受速度和载荷大小变化的影响。如果滑架位置仅用丝杠螺距和旋转编码器反馈，20分钟的定位误差可达100  $\mu\text{m}$ 。由于该方法在控制环内无法补偿这些基本驱动误差，因此称它为半闭环控制系统。但是直线光栅尺可以完全补偿这些误差。采用直线光栅尺的进给驱动工作模式为全闭环控制系统，滚珠丝杠的误差在被测量并在全闭环控制中被补偿。用角度编码器取代旋转编码器也有类似的优点，因为机械传动部件也有热膨胀。直线光栅尺和角度编码器是确保加工工件精度的基础，包括机床工作条件不断变化的严酷情况。

# 机床用直线光栅尺

提供位置反馈信号的直线光栅尺是机床高精度定位精度不可或缺的条件。它直接采集进给轴实际位置信息。因此，机械连接部件对位置测量结果没有影响—运动误差和热变形误差以及其他作用力影响的位置误差都被直线光栅尺检测到，并且包含在控制环之内。因此，它能消除以下潜在误差源：

- 滚珠丝杠热性能导致的定位误差
- 反向误差
- 机械作用力导致驱动机构变形造成的误差
- 滚珠丝杠螺距误差导致的运动误差

因此，直线光栅尺已成为**定位精度**和**高速加工**不可或缺的必备条件。

海德汉公司用于数控机床的直线光栅尺几乎可以适用于任何场合。它是所有采用闭环控制机器和设备上进给轴的最佳选择，例如铣床、加工中心、镗床、车床和磨床。

直线光栅尺动态性能好，运动速度可靠性高，沿测量方向的运动加速度大，这些特性使它不仅能满足常规轴动态性能要求，也能满足直接驱动设备的高动态性能要求。

	精度等级	信号周期	测量长度	接口	型号
<b>纤细外壳的直线光栅尺</b>					
<b>绝对式</b>	± 5 μm; ± 3 μm	–	至1240 mm	EnDat 2.2	<b>LC 483</b>
<b>增量式</b>	± 5 μm; ± 3 μm	4 μm	至1220 mm	~ 1 V <sub>pp</sub>	<b>LF 481</b>
	± 5 μm; ± 3 μm	20 μm	至1240 mm	~ 1 V <sub>pp</sub>	<b>LS 487</b>
<b>标准外壳直线光栅尺</b>					
<b>绝对式</b>	± 5 μm; ± 3 μm	–	至4240 mm	EnDat 2.2	<b>LC 183</b>
<b>增量式</b>	± 3 μm; ± 2 μm	4 μm	至3040 mm	~ 1 V <sub>pp</sub>	<b>LF 181</b>
	± 5 μm; ± 3 μm	20 μm	至3040 mm	~ 1 V <sub>pp</sub>	<b>LS 187</b>
	± 5 μm	40 μm	至30040 mm	~ 1 V <sub>pp</sub>	<b>LB 382</b>



LC 483



LC 183



LB 382

## HEIDENHAIN

约翰内斯·海德汉博士（中国）有限公司

北京市顺义区天竺空港工业区A区

天纬三街6号 (101312)

☎ 010-80420000

☎ 010-80420010

Email: sales@heidenhain.com.cn

[www.heidenhain.com.cn](http://www.heidenhain.com.cn)

### 更多信息：

- 《数控机床用直线光栅尺》样本
- 《进给轴精度》样本

