



技术信息

## 直线轴伺服电机的旋转编码器： 对铣削工件表面质量的影响

机床行业的许多领域，特别是模具制造业，对工件公差的要求极为严格，而且不允许表面缺陷。要在最短时间内满足这些要求相当困难。在模具制造中，粗加工需要切除大量材料，精加工时需要达到极高的表面质量（图1）。只有达到很高的铣削表面质量才能避免后续成本，例如手工打磨。

除机床的机械系统、使用的数控系统和刀具外，进给轴的测量技术对高附加值的铣削效果具有重大影响。特别是工件上周期性的0.5 mm至5 mm波长的表面缺陷可被肉眼识别，令人十分不快——在模具制造中尤其如此。其原因之一是进给轴编码器的细分误差。除高端直线光栅尺外，直线进给轴采用极小细分误差的旋转编码器是工件获得高表面质量的关键。



# 肉眼可见表面缺陷的原因

## 细分误差和其影响

### 明显的表面缺陷

人眼对结构性的变化非常敏感，即使工件表面极小的缺陷也能被发现。例如，对于像素高达500万的显示器，一个像素的缺陷就能被立即察觉。人眼对周期性表面的缺陷更为敏感。

特别是在模具制造中，周期性的表面缺陷让人不愉快，而且需要代价昂贵的修复加工。工件表面的可见缺陷有不同的表现形式，可能是暗影也可能是波纹。导致的原因也有多种，例如：

- 影响加工过程的机床振动（参见[1]）。
- 进给轴所用编码器的细分误差（参见[2]）

### 信号偏差导致的细分误差

当今机床常用的进给轴编码器主要有两种确定进给轴位置值的方式：

- 绝对式，开机后就能确定进给轴位置，精度一般，
- 增量式，提供两路正弦信号（A和B），90°相位差

要获得所需的分辨率，需要对周期性的模拟信号A和B进行进一步的细分。只要两路正弦输出信号理想，电气相位角准确相差90°，就不存在细分误差。否则就将产生该误差，这种误差在每一个扫描信号周期（即信号周期）中都重复出现。因此，被称为细分误差（图2）。

细分误差的大小受许多因素的影响，例如：

- 信号周期大小，
- 光栅和栅距定义的一致性，
- 扫描掩膜质量，
- 传感器特性，及
- 模拟信号后续处理的稳定性和动态性能

### 细分误差的影响

模具制造的几何形状日趋复杂，工件加工难度越来越高。用5轴加工时，所有进给轴共同运动的情况非常普遍。如果用多个NC轴插补加工倾斜面或曲面，细分误差将直接反映在工件上。

用小角度加工倾斜面时，这个影响尤其明显。一个编码器的细分误差（例如Z轴）在投影到倾斜工件表面后变得十分明显（图3）。由于倾斜，沿刀具路径信号周期将放大n倍。进给轴沿Z轴运动正好一个信号周期时，X轴运动n个或更多个信号周期。倾斜工件表面上的波形波长对应于Z轴编码器的n个信号周期。人眼可以很容易发现0.5 mm至5 mm的波长。

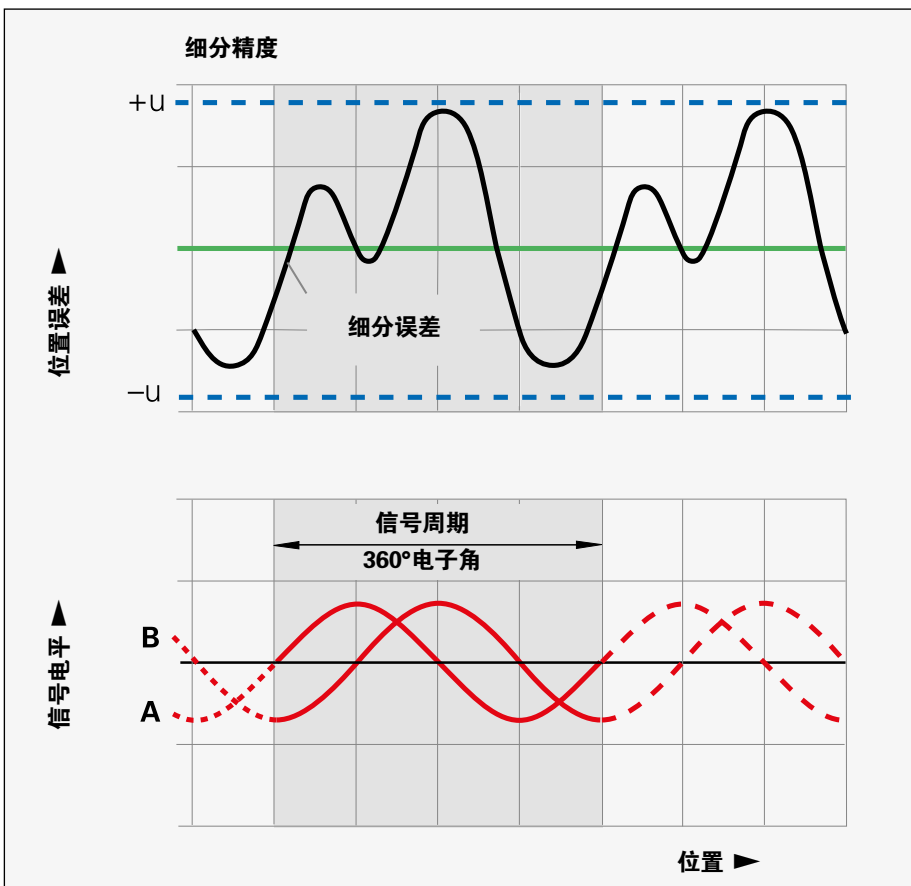


图2: 单信号周期内位置误差（细分误差）

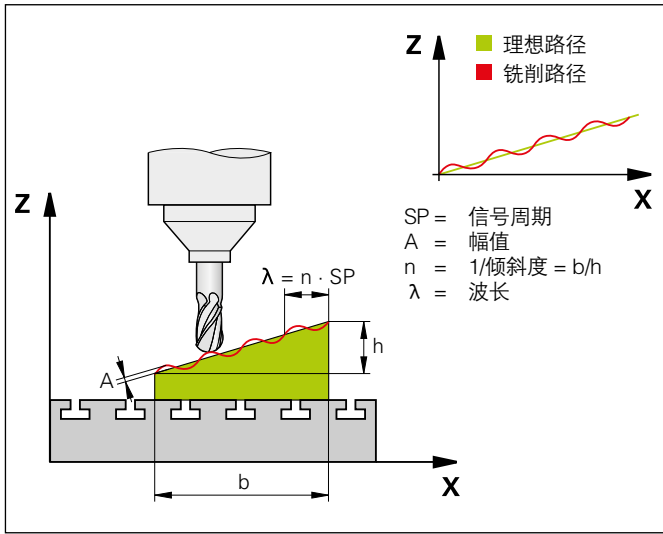


图3：倾斜工件上细分误差的示意图

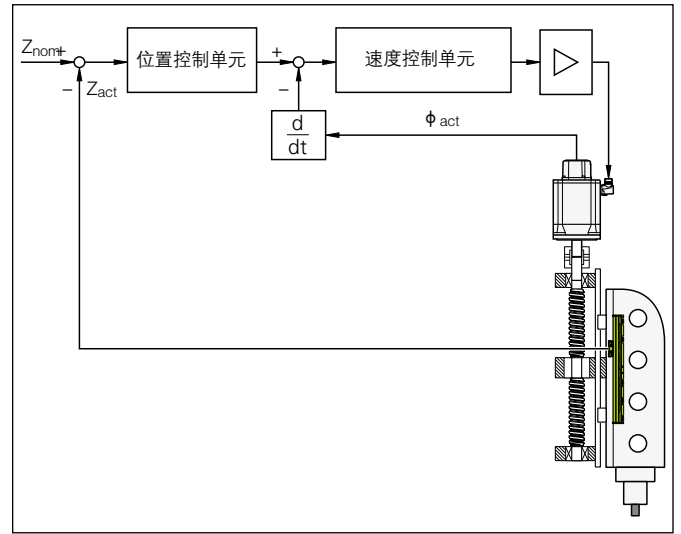


图4：进给轴示意图

### 进给轴的位置和速度测量

图4显示采用伺服电机伺服控制的进给轴、滚珠丝杠、主轴坐标轴结构和进给轴的测量方式。用直线光栅尺测量主轴坐标轴位置，并将实际位置的测量值反馈给该轴的位置控制环。用作第二测量值的旋转编码器位于进给轴的伺服电机上，它测量电机轴转角。旋转编码器的信号用于确定实际速度。

文献[2]给出的加工测试结果显示直线光栅尺  $\pm 200 \text{ nm}$  的细分误差将使工件的表面缺陷明显可见。而海德汉LC 100直线光栅尺的细分误差明显小于  $\pm 100 \text{ nm}$ ，完全没有可见的表面波纹。

下面测试中所用机床的所有直线轴都采用海德汉LC 483型直线光栅尺。其细分误差也都明显小于  $\pm 100 \text{ nm}$ ，都没有可见的表面波纹。这个原理是以下有关旋转编码器细分误差对铣削工件表面影响的观察和说明的基础。

旋转编码器的细分误差相当于单信号周期内的短行程角度误差。要使工件几何和表面质量达到要求的高精度，通常需要几何精度较高的机床。对于高机械刚性和无反向间隙的进给轴，滚珠丝杠将旋转编码器的细分误差转换成直线误差。这就是说一定的旋转编码器细分误差和在下面指定的其它条件下，将造成工件表面缺陷。

读数头在带有周期性误差的光栅上运动，运动速度的提高导致误差频率的提高。因此，细分误差频率取决于进给速率。由于位置控制环和速度控制环的截止频率（带宽）不同，在不同进给速率下，刀具中心点在不同的旋转位置时，编码器的细分误差变得明显可见。低进给速率（低细分误差频率）时，旋转编码器的细分误差被位置控制单元修正。如果旋转编码器的细分误差频率超过位置控制环的截止频率（较高进给速率），则无法对其进行调整。那么，刀具中心点处细分误差的出现频率就将增加。

# 影响细分误差的因素

## 进给速率和位置控制单元 及速度控制单元的带宽

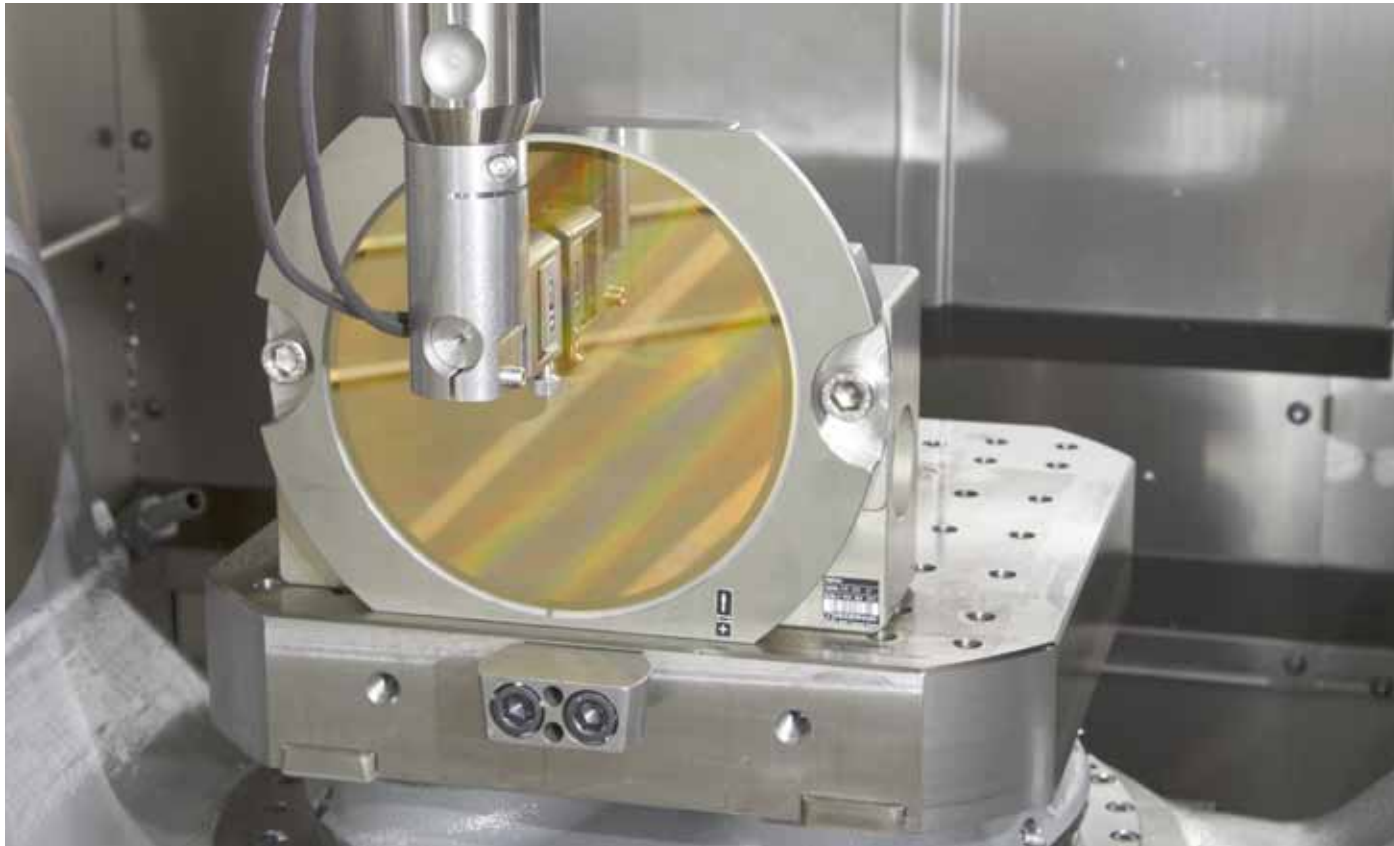


图5：用KGM 181二维编码器的测量测试系统

### 二维编码器的测试系统

为了区分加工工艺的影响与刀具中心点运动的影响，用海德汉二维编码器KGM 181在加工前确定轮廓偏差。二维编码器可以非接触地确定刀具中心点与机床工作台在两个运动进给轴平面内的轮廓偏差。图5为测试系统。用高端模具机床进行该测试。

测量面由机床的X轴和Z轴组成。Z轴伺服电机直接连接滚珠丝杠，因此传动链中只有滚珠丝杠，没有其它传动件。滚珠丝杠的螺距为 $P = 20 \text{ mm}$ 。

需观察的机床轴为Z轴。为进行测试，伺服电机使用了不同的旋转编码器。我们用两个安装方式兼容的高端旋转编码器，其圆光栅码盘都为2048线。旋转编码器1的细分误差比旋转编码器2大3倍。

如前面的介绍，旋转编码器的细分误差通过滚珠丝杠转换成直线误差。直线运动的信号周期通过滚珠丝杠的螺距与编码器的线数计算确定：

$$SP_{RElin} = \frac{P}{LC} = \frac{20 \text{ mm}}{2048} \approx 9.8 \mu\text{m} \quad (\text{公式1})$$

对于被加工件，二维编码器测量的行程路径为 $b = 60 \text{ mm}$ 和 $h = 0.4 \text{ mm}$ 。这些参数用第3页计算波长的公式计算，假定 $SP_{RElin}$ 和人眼对周期性形状误差的灵敏度 $\lambda = 0.5 \text{ mm}$ 至 $5 \text{ mm}$ 。

因此，严重的细分误差， $9.8 \mu\text{m}$ 的信号周期导致轮廓偏差 $\lambda \approx 1.5 \text{ mm}$ 。

### 测量结果确认相关性

图6显示旋转编码器1和两种不同轮廓速度条件下的测量结果。低速（ $500 \text{ mm/min}$ ）主要用小直径刀具加工钢件（例如 $\varnothing 6 \text{ mm}$ ），高速 $4000 \text{ mm/min}$ 主要加工铝件。

运动误差图显示， $4000 \text{ mm/min}$ 进给速率时，Z轴方向出现波形轮廓偏差。放大该图后，可见大约 $1.5 \text{ mm}$ 的波长。这相当于基于Z轴伺服电机旋转编码器的细分误差所得的波长。

图6：细分误差高3倍的旋转编码器1的测量结果

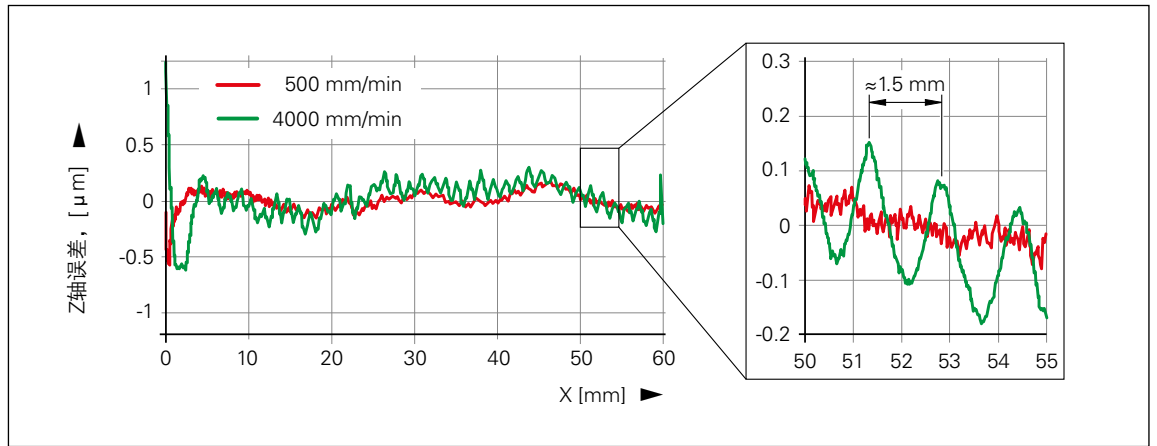
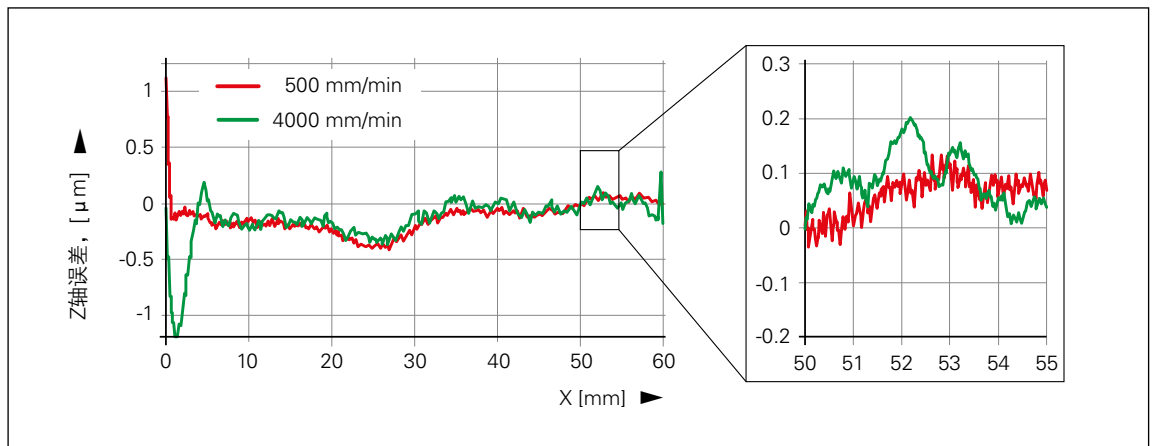


图7：旋转编码器2的测量结果



如前面的说明，细分误差频率取决于进给速率。无论旋转编码器的细分误差表现为刀具中心点的轮廓偏差还是其调整都取决于位置和速度控制单元的带宽。公式2（Z轴速度的计算）和公式3用于确定旋转编码器信号的细分误差和返回Z轴速度控制环的频率：

$$v_z = \sqrt{\frac{v_B^2}{1 + \left(\frac{b}{h}\right)^2}} = \sqrt{\frac{4000^2}{1 + \left(\frac{60}{0.4}\right)^2}} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$$

$$= 26.7 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad (\text{公式2})$$

$$f_{SP} = \frac{v_z}{SP_{RElin}} = \frac{26.7 \text{ mm/min}}{9.8 \mu\text{m}}$$

$$\approx 45 \text{ Hz} \quad (\text{公式3})$$

对于该倾斜面和4000 mm/min的进给速率，旋转编码器信号的细分误差频率大约为45 Hz。旋转编码器信号的反馈和差异（第3页图4）不影响编码器细分误差的频率，因此同样存在于实际速度信号中。

带宽大于80 Hz的速度控制单元随旋转编码器细分误差进行振荡。Z轴结构的进给运动的振动频率对应于细分误差的频率。就该例而言，45 Hz的旋转编码器细分误差频率超过位置控制环的截止频率（ $f_{LPC} < 40 \text{ Hz}$ ）。如果现在细分误差的量值足够大，刀具中心点将相应地可见轮廓偏差（参见旋转编码器1的测量结果）。

图7为旋转编码器2的测量结果，它安装在Z轴伺服电机中，其它条件完全相同。由于旋转编码器2的细分误差小3倍，低进给速率和高进给速率时，都不存在可见的波纹。现在，Z轴伺服电机旋转编码器的细分误差极小，刀具中心点与机床工作间不存在可检测到的周期性轮廓偏差。下面的铣削工件显示，该结论同样适用于刀具与工件之间的相对运动，即被加工表面。



# 降低细分误差避免轮廓偏差

## 旋转编码器决定表面质量

### 工件加工

为显示细分误差对加工表面质量的影响，加工工件上指定的倾斜面 $b = 60 \text{ mm}$ 和 $h = 0.4 \text{ mm}$ ，加工中使用旋转编码器1或旋转编码器2。该工件在Y轴方向进行多道向下的铣削加工以形成倾斜面。Y轴方向的行距和每次的精加工余量为 $0.1 \text{ mm}$ 。图8显示机床用该加工参数加工的情况。

图9为被铣削的表面。用旋转编码器1铣削的表面为上图。该旋转编码器的细分误差导致 $\lambda \approx 1.5 \text{ mm}$ 的波纹，尽管幅值大约仅 $0.1 \mu\text{m}$ ，但也令人不愉快。这就是说前面用二维编码器确定的轮廓偏差导致工件表面上存在明显不良的表面质量。



加工参数	
刀具直径, mm	6
刀刃数	2
主轴转速, rpm	18000
进给速率, mm/min	4000
切削材料	PCD
工件材质	铝

图8：加工情况与加工参数

Z轴的伺服电机改用细分误差低3倍的旋转编码器2 — 其它条件均相同 — 表面质量明显提高（图9，如下）。由于旋转编码器的细分误差较小，表面已不存在以前的规则波纹。海德汉ERN 1387旋转编码器的细分误差甚至低于旋转编码器2。它应用于电机的速度控制等应用中。

### 结论

要实现高表面质量的加工效果，需要进给轴编码器具有极小的细分误差。由于细分误差在不同进给速率下表现为刀具与工件间的轮廓偏差，这不仅与进给轴的直线光栅尺有关，也与伺服电机的编码器有关。为了避免上述轮廓偏差，机床的所有进给轴都需要选用细分误差小的高质量进给轴编码器。

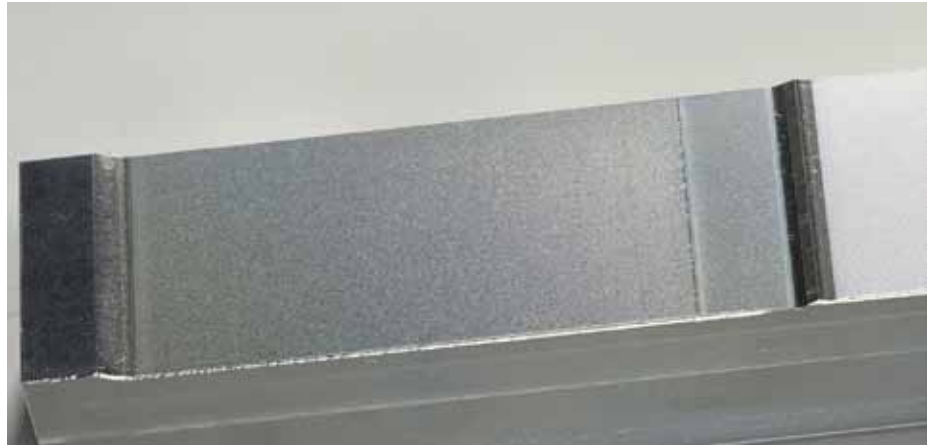


图9：铣削的表面：旋转编码器1（上图）的细分误差比旋转编码器2（下图）大3倍

# 极小细分误差的旋转编码器

## ERN 1387

内置轴承增量式旋转编码器和  
安装式定子联轴器



	增量式 ERN 1387
接口	$\sim 1 V_{PP}^{1)}$
线数/系统精度	2048/ $\pm 20''$
参考点	一个
输出信号频率 截止频率-3 dB	- $\geq 210 \text{ kHz}$
换向信号	$\sim 1 V_{PP}^{1)}$
宽度	Z1刻轨 <sup>2)</sup>
供电电压	DC 5 V $\pm 0.25 \text{ V}$
轴	锥度轴 $\varnothing 9.25 \text{ mm}$ ; 锥度1:10
机械允许转速 n	$\leq 15000 \text{ rpm}$
启动扭矩	$\leq 0.01 \text{ Nm}$ ( 20 °C时 )
转子转动惯量	$2.6 \cdot 10^{-6} \text{ kgm}^2$
定子联轴器固有频率	$\geq 1800 \text{ Hz}$
被测轴允许的轴向窜动	$\pm 0.5 \text{ mm}$
振动55 Hz至2000 Hz 冲击6 ms	$\leq 300 \text{ m/s}^2$ <sup>3)</sup> ( EN 60068-2-6 ) $\leq 2000 \text{ m/s}^2$ ( EN 60068-2-27 )
最高工作温度	120 °C
防护等级EN 60529	IP40, 安装后

1) 公差限制 信号幅值: 0.8  $V_{PP}$ 至1.2  $V_{PP}$   
不对称度: 0.05  
放大比例: 0.9至1.1  
相位角:  $90^\circ \pm 5^\circ$ 电子角  
信噪比E, F: 100 mV

2) 每圈输出一个正弦和一个余弦信号; 参见样本海德汉编码器接口

3) 基于室温标准;  
适用的工作温度可达100 °C:  $\leq 300 \text{ m/s}^2$   
至120 °C:  $\leq 150 \text{ m/s}^2$

## 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

### 更多信息:

[1] 技术信息: 动态高精

[2] 技术信息: 用海德汉编码器  
打造完美表面

