

## 工业应用中的精密倾斜感知

### 引言

在本应用笔记的指导下，用户可在静态或动态环境中选择最合适的意法半导体传感器进行角度测量。

倾角计用于测量相对于地球重力矢量的倾斜、坡度或倾角。倾角计广泛应用于游戏控制器、土地测量、飞机飞行控制器、卫星天线、平台调平、太阳能电池板、车辆、照相机、手机等方面，以及工业和医疗平台调平领域。

倾斜估测中使用的典型技术包括液体电容传感、液体中的气泡、电解质、MEMS 加速度计或 imu。MEMS 倾角计因其较小的尺寸、低廉的成本和易于集成而广受欢迎。MEMS 技术的最新进展进一步降低了噪声、尺寸和功耗。

根据所使用的算法，倾角计主要分为两类：

- 静态倾角计主要用于静态应用，例如天线或平台稳定和监测、建筑结构健康监测（SHM）、农业设备中的主动侧翻保护（ARP）、机器人位置感知和控制、太阳能电池板安装和跟踪器、工业机械底盘调平、精密水准仪。在这些应用中，平均加速度始终接近地球重力 ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  或 32.2 英尺/秒<sup>2</sup>) 或仅经历短期外部加速度，因此静态倾角计是倾斜角的合适解决方案，能够提供可靠的精度。外部加速度（任何类型的运动，如移动、振动等）会在静态倾角计的倾斜测量中引入误差。
- 动态倾角计是一种用于测量物体相对于重力矢量的坡度（倾斜度）、高度或下垂度的解决方案，而该物体并非静止且会经受快速运动、振动或冲击。由于倾角计仅依靠重力加速度的投影来测量物体相对于重力矢量的角度，因此任何外部加速度（任何类型的运动，如移动、振动等）都会在倾斜测量中引入误差。为了克服这个问题，除了加速度计之外，还可以使用陀螺仪。这种使用 IMU 并利用高级算法（例如：卡尔曼滤波器）来组合两个传感器测量值的解决方案被称作动态倾斜仪，能够对加速度计和陀螺仪的信号进行处理，以获得来自各个传感器的无误差差值。

**图 1. 倾角计及其应用**

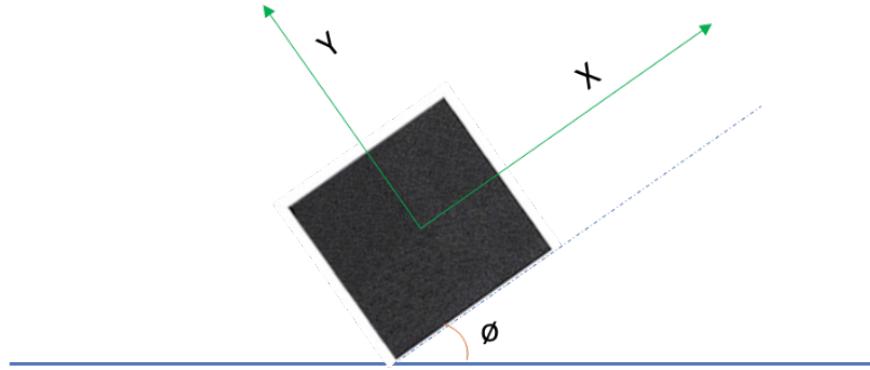


表示重力矢量和传感器/设备轴之间角度的倾角可以用三个不同的分量在三维空间中表示。不同行业的表示方式各有不同，具体取决于传感器的传感轴数。在下一节中，我们将描述使用加速度计和不同轴模式计算倾角的原理。

## 1 单轴或单平面倾斜计算

在某些应用中，只需要测量单个倾角，且此模式用于测量相对于 X 轴的倾斜。下图显示了用于测量重力分量的加速度计传感轴。

图 2. 使用单轴或双轴进行倾斜测量



加速度计测量其传感轴上的重力矢量投影。对于单轴传感器，仅测量沿 X 轴的重力分量，对于双轴或三轴传感器，沿 Y 轴的其余分量将在 Z 轴保持固定的情况下测量。一些文献表示，在计算中同时使用 X 轴和 Y 轴可称为双轴倾斜计算。

X 轴将按以下方式测量重力投影：

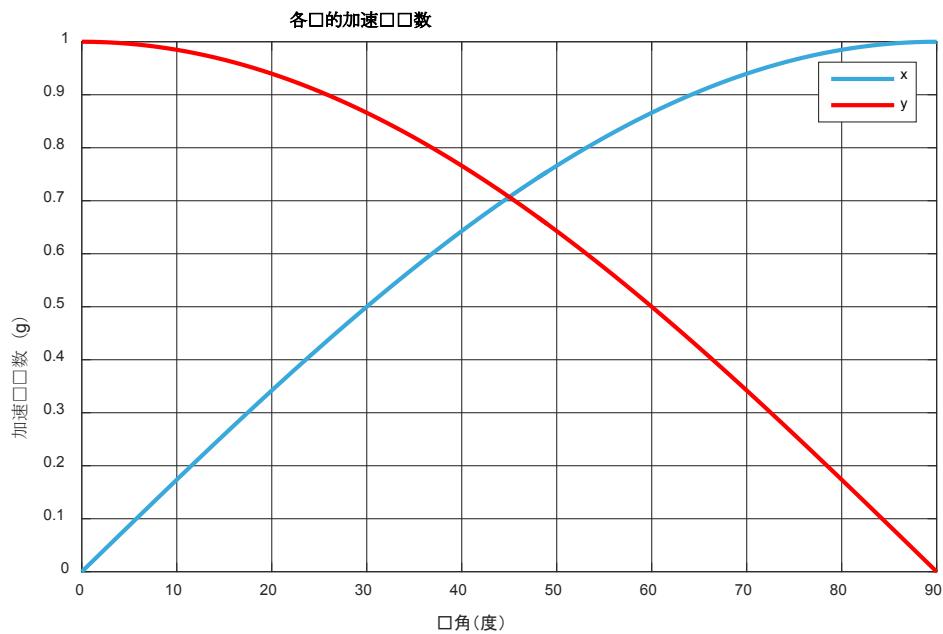
$$X = g * \sin(\Phi) \quad (1)$$

如果加速度计为双轴或多轴，则 Y 测量值将为：

$$Y = g * \cos(\Phi) \quad (2)$$

下图显示了相对于  $\Phi$  的 X 和 Y 测量值。

图 3. 加速度计读数



倾斜角  $\Phi$  可使用以下公式计算：

$$\Phi = g * \sin^{-1}(X) \quad (3)$$

$$\Phi = g * \cos^{-1}(Y)$$

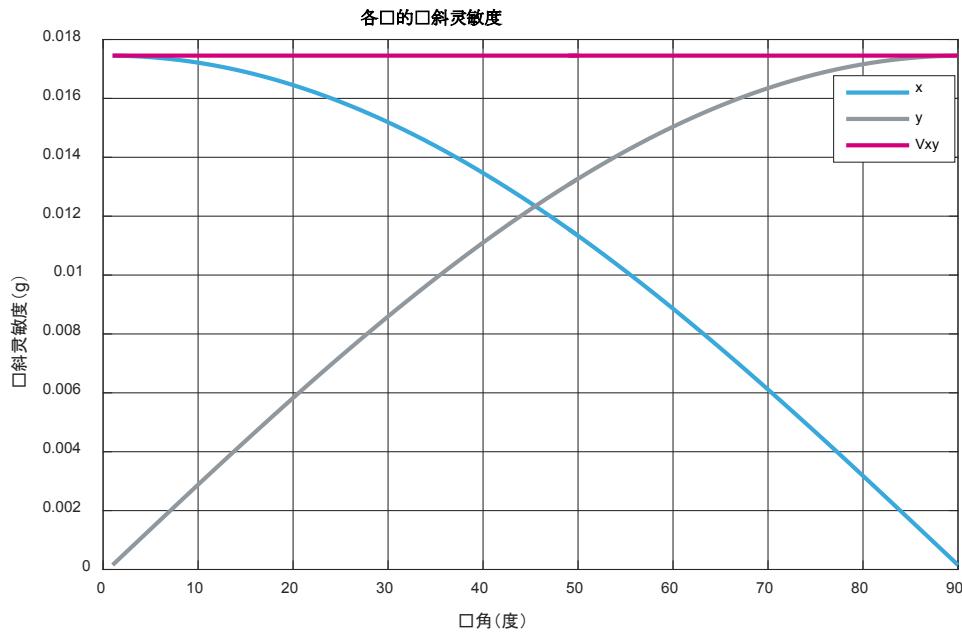
$$\Phi = g * \tan^{-1}(X/Y)$$

方程式 3 中显示的 3 个公式都将计算  $\phi$  角。从图 3 中可以观察到，当传感器轴垂直于重力矢量时，传感器对角度变化更为敏感。灵敏度可以通过计算每个  $\phi$  的斜率或  $\phi$  的相关微分方程 3 来测量。灵敏度分析有助于了解每个轴上的误差如何影响倾角计算，并且误差的影响并非恒定。

灵敏度的计算结果如图 4 所示。从图中可以看出，使用  $\arcsin$  或  $\arccos$  的灵敏度随倾斜角度而变化。如图所示，随着  $\arcsin$  的灵敏度降低， $\arccos$  角的灵敏度增加，使用  $\arctan$  可以保持灵敏度恒定。

使用  $\arctan2$  以及双轴或三轴传感器的另一个优点是，能够在 [0,360] 范围内计算倾斜角，而单轴的最大范围可达 [-90,90]，并且仅在小角度时具有高分辨率。

图 4. 倾斜灵敏度



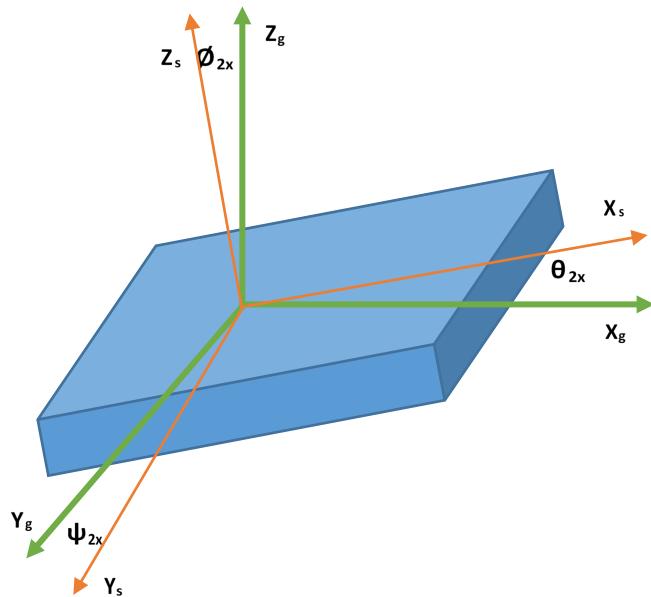
## 2

## 双轴或双平面倾斜感知

双平面模式适用于需要在两个正交水平轴上倾斜的应用。

双平面模式可计算 X 轴，Y 轴和水平面之间的角度。此模式还计算重力倾斜（垂直轴和重力矢量）或水平面和传感器 XY 平面之间的角度。

图 5. 双轴或三轴加速度计倾斜计算



Theta<sub>2x</sub> 测量 X 轴和水平面之间的角度。角度范围为[-90 度, 90 度]度。

$$\theta_{2x} = \sin^{-1}(X) \quad (4)$$

Psi<sub>2x</sub> 测量 Y 轴和水平面之间的角度。角度范围为[-90 度, 90 度]度。

$$\psi_{2x} = \sin^{-1}(Y) \quad (5)$$

Phi<sub>2x</sub> 测量 XY 平面和水平面之间的角度。对于双轴传感器，角度范围为[0, 90]度；对于三轴传感器，角度范围为[-90, 90]。

$$\phi_{2x} = \sin^{-1}(V_{xy}) \quad (6)$$

在双轴传感器中，缺少关于 Z 轴方向的信息，因而 V<sub>xy</sub> 的计算公式为：

$$V_{xy} = \sqrt{(X^2 + Y^2)} \quad (7)$$

对于三轴传感器，V<sub>xy</sub> 将被  $\sqrt{1-Z^2}$  代替。

倾斜角也可用侧倾角和俯仰角表示，并可通过以下公式计算：

$$\begin{aligned} Pitch &= \sin^{-1}(X) \\ Roll &= \tan^{-1}(Y, Z) \end{aligned} \quad (8)$$

## 3 软件库

有三种不同的软件库供意法半导体传感器使用，以支持高精度的倾斜估计。

- **MotionTL2:** MotionTL2 软件库提供多轴模式实时倾斜估计，支持 2 轴加速计。
- **MotionAC2:** MotionAC2 软件库为 2 轴加速计提供偏差和比例因子校准。该软件库适用于在运行时和工厂校准期间执行校准逻辑。
- **MotionDI :** MotionDI 软件库提供了一个实时动态倾角计，支持三轴加速度计和陀螺仪的校准。

意法半导体官网 [st.com](http://st.com) 提供以上软件库（二进制格式），请参阅 [X-CUBE-MEMS1](#) 以及相关的用户手册。

## 4 误差和校准

加速计利用机械结构来测量加速度，它会受到许多影响测量精度和倾斜测量精度的误差源的影响。其中一些误差为：

- 白噪声与振动
- 偏差/偏移和温度漂移
- 灵敏度与非线性
- 交叉轴灵敏度

影响倾斜精度的另一个因素（但与加速计无关）是传感器未对准。

### 4.1 白噪声与振动

加速度计的噪声来源于电子噪声、电压波动、ADC 错误、热机械效应、闪烁噪声和许多类似元件的噪声。通常，固有白噪声由数据手册中的噪声密度表示。例如，典型的 IIS2ICLX 噪声密度规定为  $15 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。也可以将带宽与噪声联系起来，因为通常传感器带宽设置为采样频率的一半。

即使没有固有噪声，设备也可能会遭受外部振动，从而提高加速度计信号中的噪声。

加速度计可以提供 1Hz 到几 kHz 的输出数据速率 (ODR) 测量。从噪声密度表达式可以观察到，随着采样率的增加，噪声级与赫兹的平方根成比例增加。在较高 ODR 下采样有两个主要优点：

- 更快响应：在高 ODR 下，加速度计能检测到急剧变化。
- 降低噪声：在高 ODR 下，滤波将减少由于振动或固有噪声引起的噪声。在低 ODR 下，RMS 噪声较低，但不足以降低振动噪声。

图 6 显示了在不同角度值噪声等级恒定情况下观察到的典型误差。可以看到，当我们接近平行于重力矢量的方向角时，由于正弦函数在 90 度处的灵敏度较低，噪声引起的误差增大。同样，图 7 显示了在恒定倾斜角下具有不同白噪声等级的平均角度误差。正如我们所预期的，倾斜测量的误差将随着噪声等级的增加而增加。

图 6. 不同行程的倾角误差

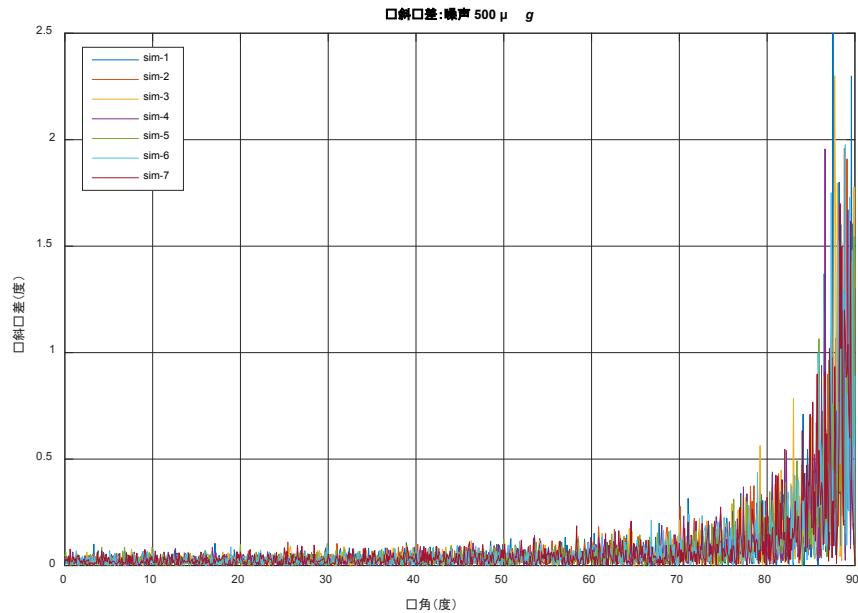
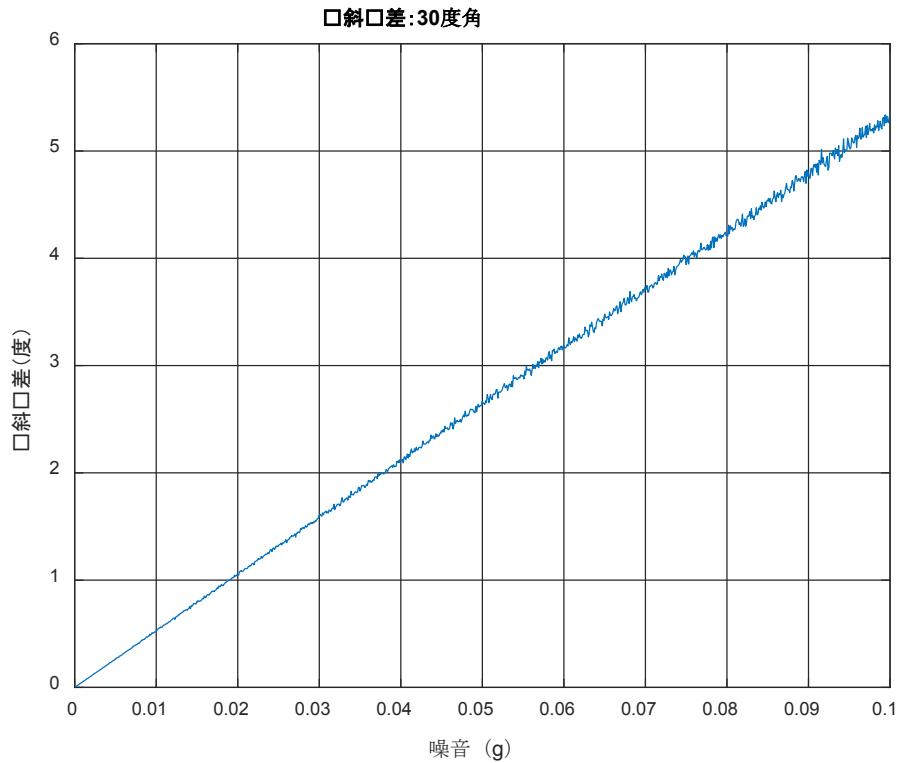


图 7. 噪声等级和平均误差



噪声对精度的影响可以通过平均  $n$  个样本的输出来改善。窗口大小 ( $n$ ) 可根据应用的要求进行选择。较大的窗口将减少噪声，但会增加延迟。

考虑有噪声的信号表示为：

$$\hat{X} = X + N(0, \sigma^2) \quad (9)$$

其中  $N(0, \sigma^2)$  表示均值和  $\sigma$  噪声均为 0 的高斯噪声。

如果我们将信号  $\hat{X}$  与窗口大小  $n$  进行平均，则得到信号  $\bar{X}$  将表示为：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{X}_i = X + N\left(0, \frac{\sigma^2}{n}\right) \quad (10)$$

方程 10 表明， $n$  个样本的平均值将噪声等级降低  $n$  倍。

MotionTL2 库提供旋钮设置来控制输入信号的滤波，从而降低噪声并以更高的精度来估计倾斜角度。

## 4.2 偏移/偏差和温度漂移

偏移是指当不存在加速度时，加速度计信号的恒定水平。偏差通常用零  $g$  水平表示。由于焊接过程中的热机械应力、温度变化、老化和其他因素，加速度计的偏差可能会发生变化。

偏差变化的范围通常定义为零  $g$  水平、寿命期的零  $g$  水平以及与温度有关的零  $g$  水平变化。通过这三个参数，便可估计由于偏差而累积的典型误差。

图 8 演示了恒定偏差对倾斜度最终计算的影响。此图表示在 X 轴或 Y 轴或两个轴都有 50 mg 偏移情况下的倾斜角误差。如我们所见，使用  $\arctan$  公式发现最大误差约为 2.75 度（方程式 3）。

图 8. 偏差引起的倾斜误差

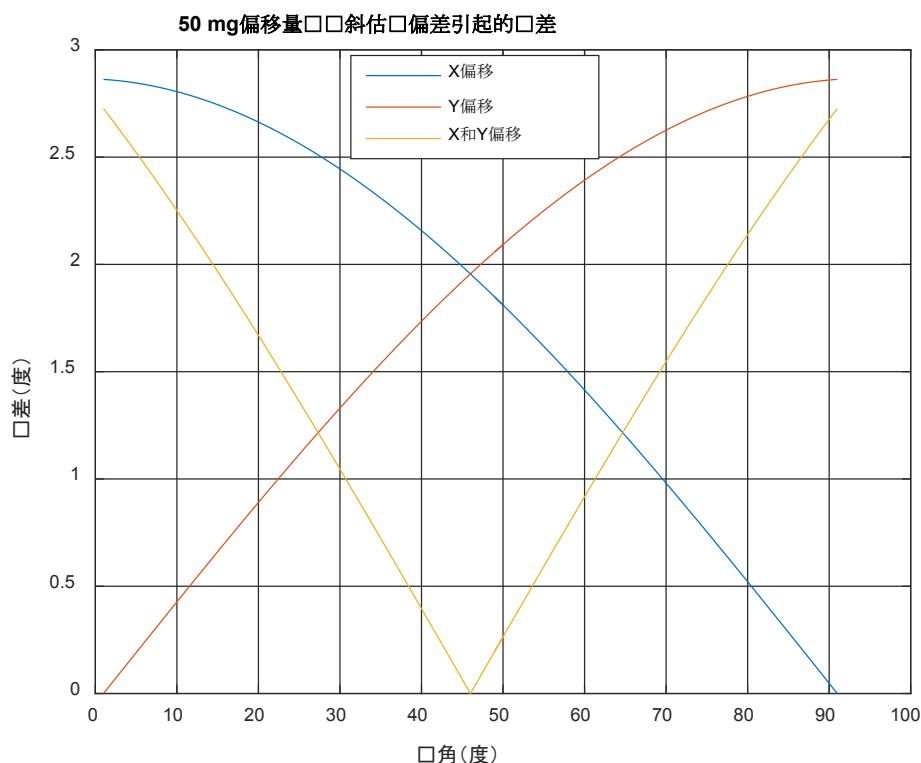
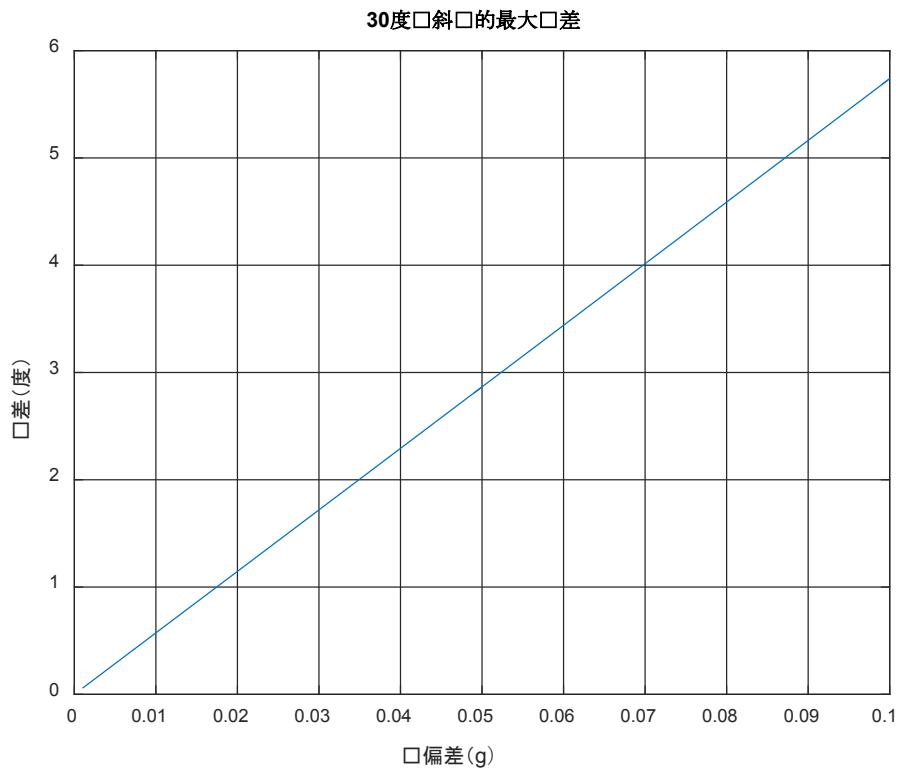


图 9 显示了总偏差 ( $| | X_{off}+Y_{off} | |$ ) 误差在选定角度 (30 度) 从 1 mg 到 100 mg 变化时的最大误差。如图所示，误差随着总偏差的增加而线性增长。

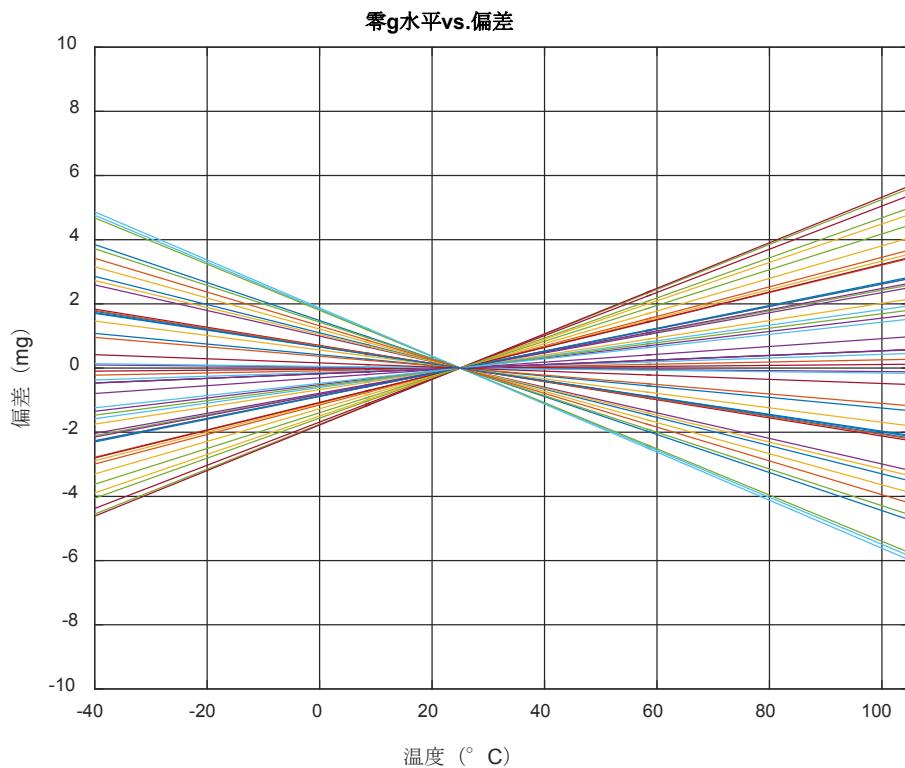
图 8 和图 9 均证明了加速度计偏差的影响。因此，建议进行加速度计校准，以减少误差。

图 9. 利用 arctan 进行倾斜估计的最大误差



偏差将随温度而变化。零  $g$  水平与温度的关系由加速度计偏差随温度变化的方式来定义。加速度计属于机械系统，温度会影响器件的性能和结构。IIS2ICLX 传感器校准良好，显示了极小的温度偏差漂移 ( $\sim 0.020 \text{ mg}/^\circ\text{C}$ )。图 10 显示了 IIS2ICLX 传感器在-40 至 +105°C 温度范围内的典型偏差变化，最大偏差为  $0.075 \text{ mg}/^\circ\text{C}$ 。如我们所见，总偏差约为  $\pm 6 \text{ mg}$ ，相当于  $\pm 0.34$  度。

图 10. 偏差水平变化与温度



大多数意法半导体 MEMS 传感器具有稳定的抗温度变化性能，通常不需要温度补偿，并且在室温（25°C）下校准良好。在特定应用要求的情况下，可应用偏移温度补偿程序。两点程序如下：

1. 测量温度 T1、固定位置和零外部加速度下的加速计读数。
2. 将温度升高/降低至少 10 度，并记录加速计读数和温度 T2。
3. 使用以下公式计算各轴相应温差 (T1-T2) 的斜率：

$$\text{Slope}_{T1} = \frac{\text{Acc}X_{T2} - \text{Acc}X_{T1}}{(T2 - T1)} \quad (11)$$

4. 存储 Slope<sub>T1</sub> 并使用以下表达式更正 T 处的下一个读数：

$$\text{Acc}X_{\text{compensate}} = \text{Acc}X_T - (T - T1) * \text{Slope}_{T1} \quad (12)$$

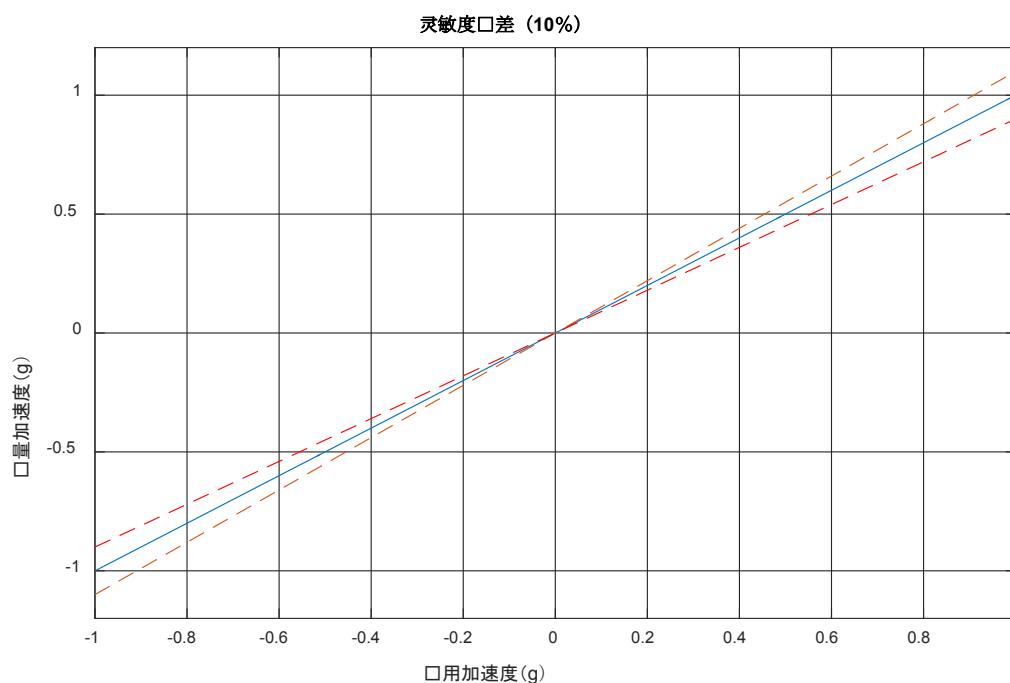
作为减少偏差误差的替代方法，建议至少使用 MotionAC2 库对传感器进行焊接后工厂校准。建议在运行时使用 MotionAC2 库来纠正由于温度或老化而产生的任何漂移。MotionAC2 库提供带有偏移和比例因子校正的运行时校准。

## 4.3 灵敏度与非线性

灵敏度定义为加速计读数与实际加速度的变化率。理想情况下，该关系呈线性，由  $mg / \text{LSB}$  定义。在传感器中，灵敏度将随时间和温度而变化。此类参数在数据手册中指定为灵敏度偏差（%）。

下图显示了理想情况下的灵敏度以及最大和最小灵敏度。

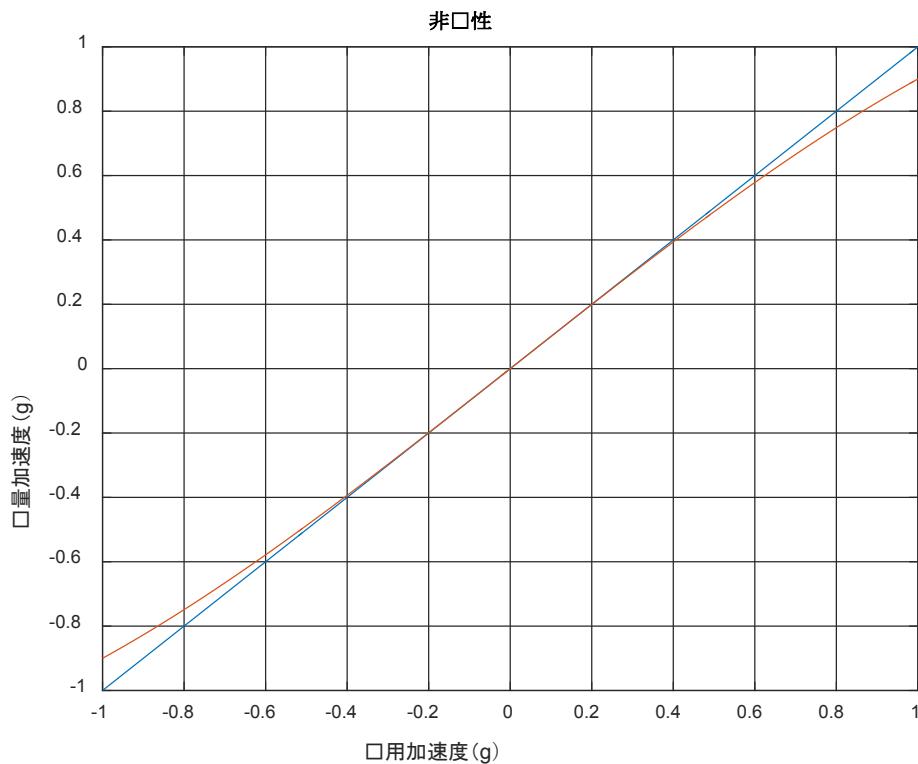
图 11. 加速度计灵敏度



温度也会影响加速计的灵敏度。通常定义为每摄氏度的百分比 ( $\%/\text{°C}$ )。对于 IIS2ICLX 传感器，该值低于  $0.012\%/\text{°C}$ ，在大多数应用中可忽略。

非线性：在整个工作范围内，装置的灵敏度始终为非线性，因为传感元件的物理响应本质上呈非线性。在工厂校准中确定的校正项允许将灵敏度表示为线性函数。然而，从恒定灵敏度观察到的偏差不能用线性函数来近似。非线性定义为与理想恒定灵敏度的最大偏差，其形式为相对于满标度的百分比。IIS2ICLX 灵敏度非线性约为  $0.1\% \text{FS}$ 。

图 12. 非线性

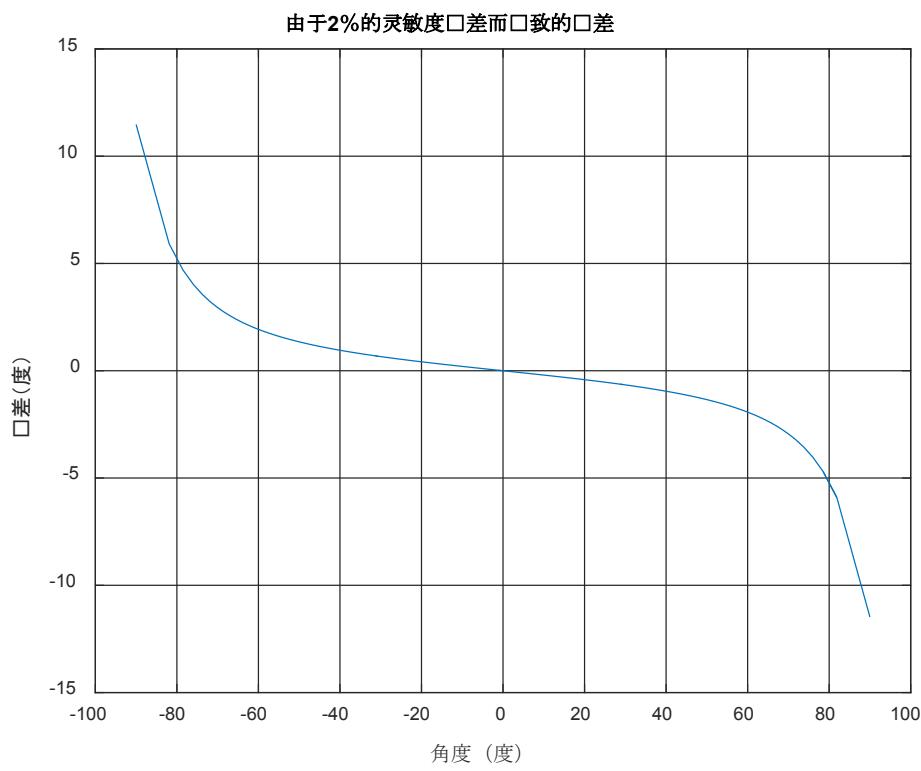


灵敏度变化和非线性对倾斜的最终精度也有类似的影响。我们还应注意，灵敏度误差对单轴与双轴倾斜计算将有显著影响。

灵敏度对单轴的影响很容易观察和表示，但是双轴倾斜度的计算会随 X 和 Y 轴之间的相对灵敏度误差而变化。如果各轴上的灵敏度误差相似，则不会因除法运算而对倾斜计算产生影响。如果每个轴在灵敏度上存在相反（正负两面）误差，则有显著影响。

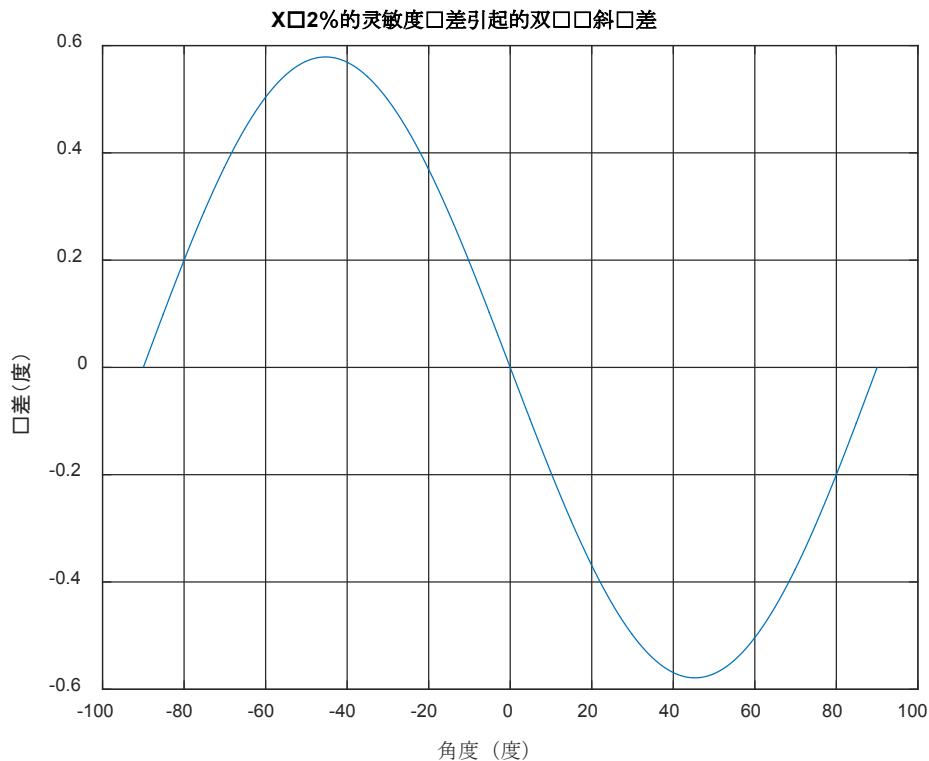
下图显示了由于 2% 灵敏度误差引起的倾斜测量误差，而且我们观察到，当轴平行于重力矢量（90 度）时，误差较为显著。

图 13. 单轴-由于灵敏度误差而导致的倾斜角度误差



为了使双轴计算中的误差可视化，我们在 Y 轴上使用了理想的灵敏度，在 X 轴上使用了 2% 的灵敏度误差。下图显示了使用  $\arctan$  公式（方程式 3）用双轴计算单个倾斜角时的误差，与单轴计算中的 12 度相比，误差在 0.6 度以内。这是利用双轴传感器测量单个倾斜角的原因之一。

图 14. 由于 2% 的灵敏度误差导致 2 轴倾斜误差



MotionAC2 允许使用 4 点滚动校准方法校准灵敏度误差。

#### 4.4

#### 交叉轴灵敏度

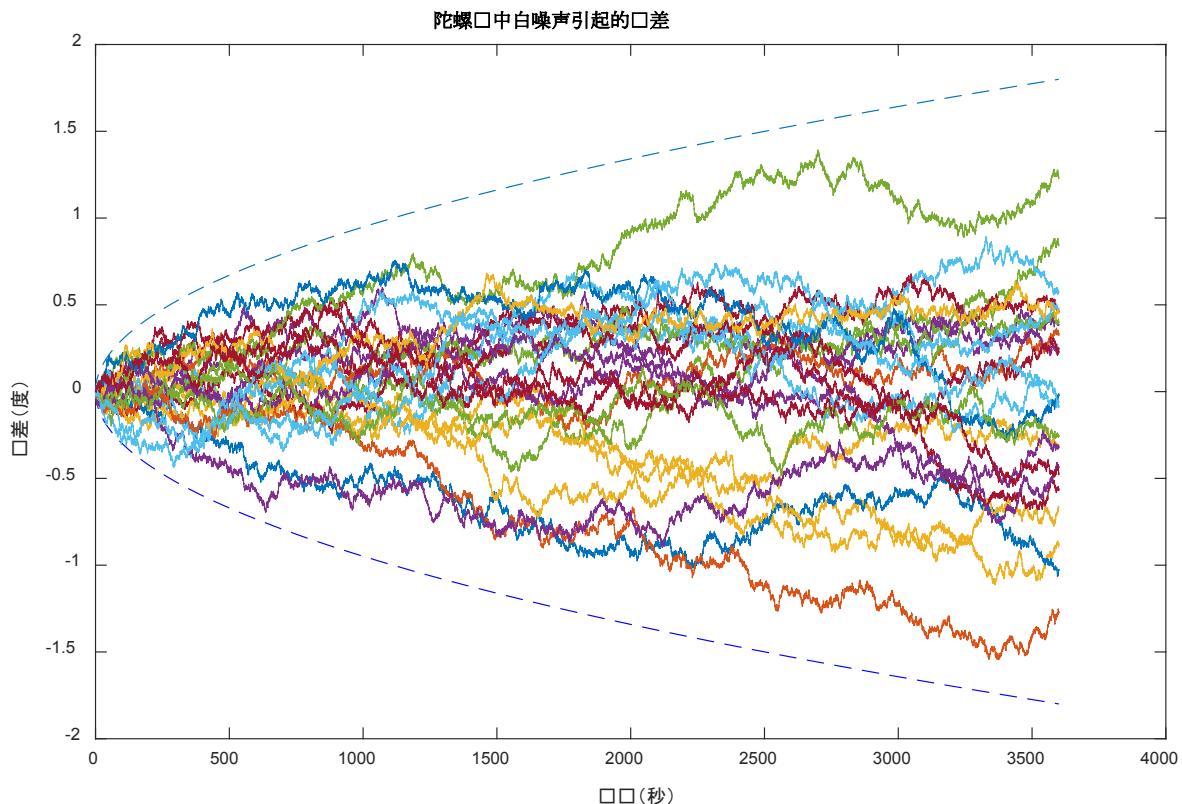
两个或多个轴之间的耦合或串扰会导致交叉轴误差。存在交叉轴误差的情况下，如果在一个轴上施加加速度，则传感器也会测量另一个轴上的部分加速度。交叉轴灵敏度可能由于非正交轴引起。

对于两轴倾斜测量的所有倾斜角度，由交叉轴引起的误差几乎保持不变，并且与交叉轴误差成正比。

## 5 动态倾角计和 MotionDI

加速度计非常适合外部加速度可以忽略不计的静态倾角计。然而在许多应用中，外部加速度很高或测量误差较大，容易受到干扰。对于此类应用，可以利用陀螺仪测量来稳定倾斜输出，但陀螺仪也会受到噪声和漂移的影响。因此，角速度积分会随着时间的推移而累积误差，并导致倾角估计的显著误差。下图显示了白噪声对陀螺仪测量积分的影响。

图 15. 由于白噪声积分而导致的错误



因此，陀螺仪和加速度计之间的传感器融合对于提供适合动态条件的解决方案至关重要。MotionDI 软件库可用于动态倾角计应用，并针对 ISM330DHCX、ASM330LHH 和 ISM330DLC 进行了优化。

MotionDI 滤波和预测软件使用先进的算法，在典型环境条件下智能集成多个 MEMS 传感器的输出，以获得最佳性能。MotionDI 通过加速度计和陀螺仪数据的融合，利用扩展卡尔曼滤波来估计陀螺仪偏差并计算准确的倾角。MotionDI 库还支持加速计校准和陀螺仪温度补偿校准，如下图所示。

图 16. MotionDI

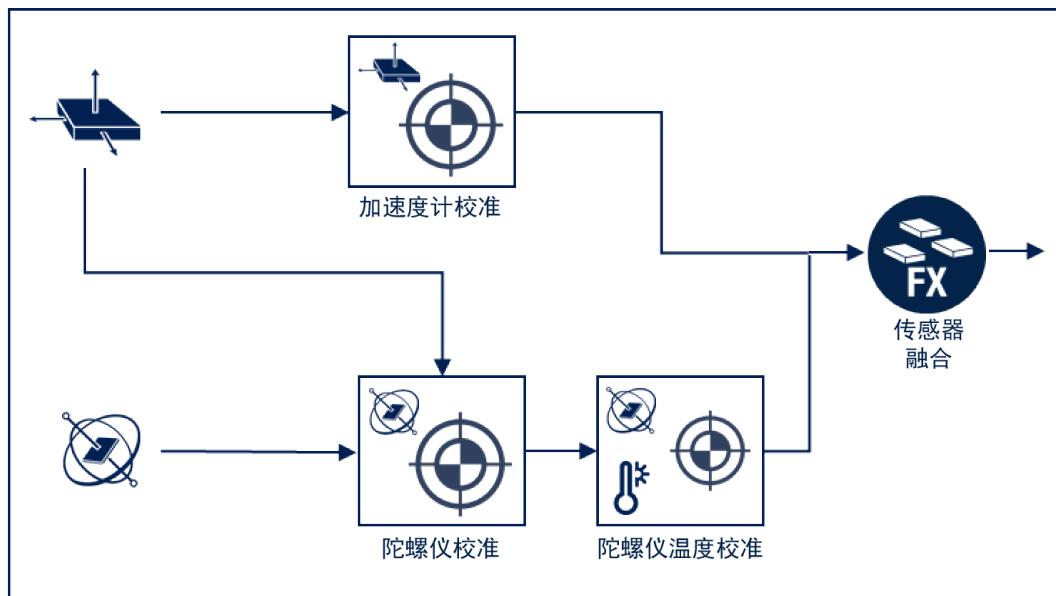
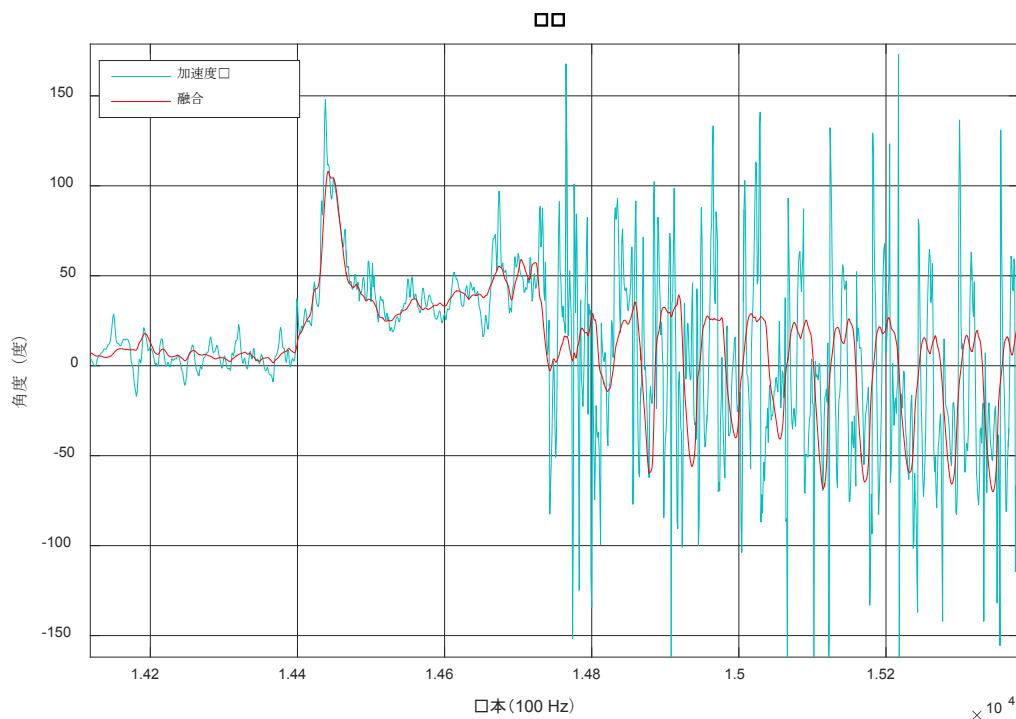


图 17 显示了存在外部加速度的情况下加速度计的角度估计和 MotionDI 库计算的角度估计。由于外部加速度较大，加速度计估计的角度不正确，但是 MotionDI 库可以使用扩展卡尔曼滤波来估计准确的倾斜信息。

图 17. 传感器融合



## 6 传感器选择

为了符合应用要求，在选择合适的加速度计部件时，应考虑以下参数。

### 轴数

传感器的最少轴数是任何应用的重要标准。如果应用仅需要测量单轴倾斜度，那么选用单轴加速度计即可。即使单轴够用，依然建议您选择双轴或更多轴的加速度计，以便提高倾斜测量的精度，防止应用需要测量大于 30 度的倾角。如第 1 节 单轴或单平面倾斜计算中所示，不同的误差源会影响倾角精度，而双轴传感器则提供了更好的稳定性和更优质的性能。

### 测量范围（满量程）

根据应用要求，重点选择在正常工作状态下不会饱和的传感器。如第 1 节 单轴或单平面倾斜计算中所示，加速度计读数基于当前的倾斜角度。我们首先应检查应用的最大和最小典型工作移动范围，并查看传感器的最大满量程是否足以捕获重力矢量引起的加速度而无任何饱和。如果应用需要测量[-90, 90]倾斜范围，则建议选择满量程至少为 2 g 的传感器。

检查传感器支持的最小满量程也很重要，因为在最小满量程设置下，传感器分辨率将达到最大，并且允许以高分辨率测量角度。

IIS2ICLX 传感器支持多种满量程 ( $\pm 0.5\text{ g}$ ,  $\pm 1.0\text{ g}$ ,  $\pm 2.0\text{ g}$ ,  $\pm 3.0\text{ g}$ )。

### 工作温度范围

传感器应在规定的工作温度范围内运行。IIS2ICLX 传感器支持-40°C 至+105°C 的宽工作温度范围。

### 分辨率

传感器分辨率确定传感器可以检测到的最小或最大变化。在选定的整个倾角范围内，应考虑分辨率，以检查传感器是否满足倾角计的期望分辨率。如图 4. 倾斜灵敏度所示，对于单轴而言，测量具有某些间隔的倾斜角所需的传感器分辨率并非恒定。例如，1 mg 分辨率将允许在 0 度倾斜角附近以 0.05 度分辨率测量倾斜角。

传感器的分辨率取决于各种因素，例如噪声、带宽、ADC 和低通滤波器。

噪声等级是确定分辨率的主要限制因素之一。只有当外部运动幅度高于传感器的噪声等级时，传感器才能识别变化。任何振幅小于传感器噪声等级的信号都不可见，由此限制了可以达到的最小分辨率。传感器噪声等级、带宽和 ODR（采样率）之间的关系可以表示为：

$$\text{Noise or resolution} \sim \text{Noise density} * \sqrt{\text{BW} * 1.6} \sim \text{Noise density} * \sqrt{\text{ODR}} \quad (13)$$

一般来说，传感器带宽是 ODR 的一半。对于 IIS2ICLX，噪声密度为  $15\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ ，在 ODR 50 Hz 时，传感器带宽为 ODR/2 或 25 Hz，预期噪声约为  $95\mu\text{g}$ 。

如果 ADC 的分辨率低于加速度计的噪声分辨率，则将模拟测量转换为数字测量的 ADC 可以限制传感器的分辨率。通常，ADC 具有非常高的分辨率，但是即使具有高分辨率，ADC 转换也会由于舍入而在信号中引入固有噪声。

### 精度

- 零-g 水平（偏移/偏差）和灵敏度误差

即使可以通过工厂或运行时校准解决零 g 水平和灵敏度误差，研究零 g 水平和灵敏度误差的最大范围依然具有重要意义。通过两种误差的最大范围，可以评估应用是否需要运行时校准。

零 g 水平和灵敏度误差通常由两个不同的术语表示：

- 典型的精度或范围：典型值表示传感器在不执行任何校准且无任何机械应力（例如焊接）之前的零 g 水平或灵敏度范围。任何机械应力都会影响零 g 水平或灵敏度误差的典型范围。
- 寿命变化：该规范表示传感器在执行一次性校准后的寿命变化。

- 在不同温度条件下的稳定性

在第 4.2 节 偏移/偏差和温度漂移和第 4.3 节 灵敏度与非线性中，我们看到了温度对偏移量和灵敏度的影响，以及温度如何导致角度随温度漂移。在典型的工作温度范围内对这些参数进行分析对于应用而言至关重要。如果应用的工作温度范围在室温（ $25^{\circ}\text{C}$ ）左右，则选择传感器时可以忽略这些参数，但在工作温度范围较宽的情况下，此类漂移将对精度产生影响。校准温度偏差和灵敏度的过程更为复杂，在运行期间不易完成。由于此类漂移的校准限制，我们应该小心地选择一个相对于温度变化具有较低漂移的传感器。

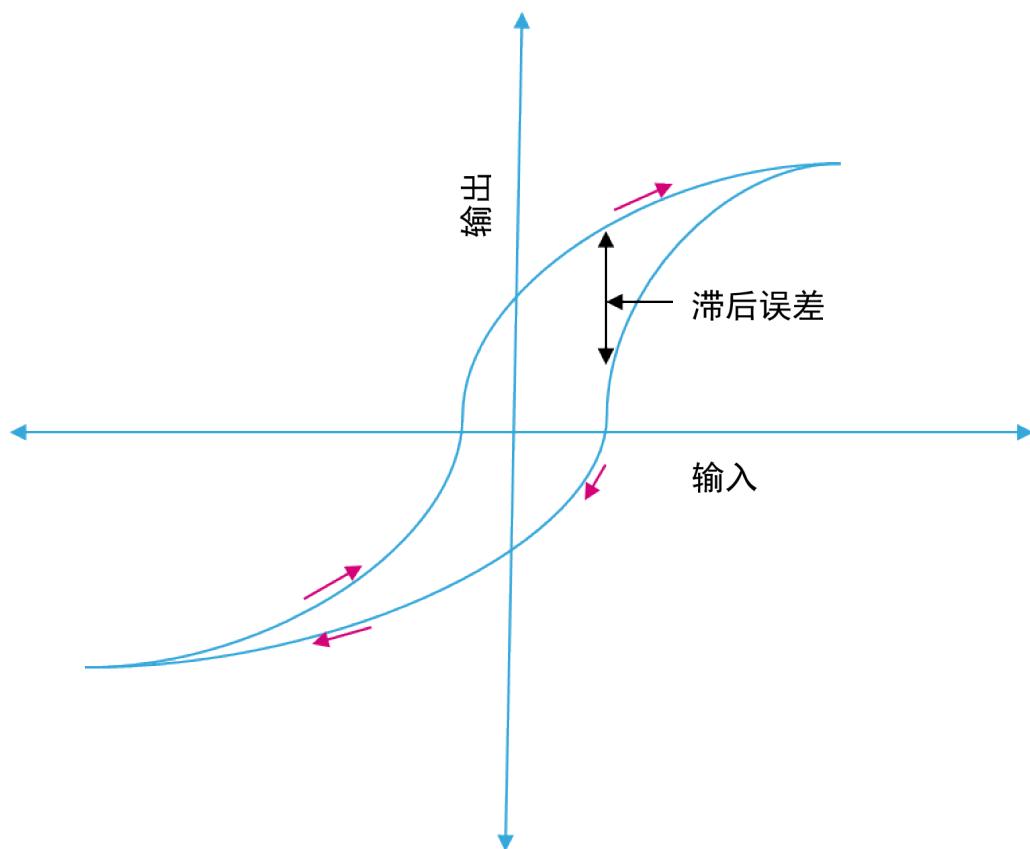
IIS2ICLX 具有  $0.02 \text{ mg}/^{\circ}\text{C}$  零  $\text{g}$  水平随温度的变化， $105^{\circ}\text{C}$  时的最大零  $\text{g}$  水平变化为  $\pm 1.6 \text{ mg}$ ，这将导致  $\pm 0.092$  度的误差。

同样，IIS2ICLX 的灵敏度随温度的变化为  $\pm 0.01\%/{^{\circ}\text{C}}$ ，在  $105^{\circ}\text{C}$  时累积的最大误差为 0.008，在 90 度时最大倾斜误差约为 7.26 度，[0, 90]倾斜角度范围的平均误差约为 0.95 度。

- 重复性/滞后

对于给定的输入（力、旋转等）和外部特性（温度、湿度），无论方向如何改变，都期望测量到相同的读数。由于温度或机械等各种应力，导致传感元件特性的变化和相同输入的输出差异表现为滞后，如下图所示。

图 18. 滞后误差



偏移和灵敏度会由于温度扫描而出现滞后误差。

由于较大的滞后误差需要传感器在运行时经常校准，因此偏移或灵敏度滞后误差有助于确定适用的传感器。

- 振动矫正 (VRE)

对宽频带交流振动的直流分量进行校正，会使倾角计的偏移量发生偏移，导致较大的误差。在静态倾角计中，直流分量的异常偏移难以补偿，因为计算时考虑了直流/静态分量，并将其误分类为角度变化。振动整流高度依赖于加速度计的结构、振动频率和强度。

对于任何应用，选择合适的带宽非常重要，这样加速度计便可以抑制所有高频振动。

- 带宽

传感器观察到的运动受传感器的带宽所限制。传感器应根据带宽进行选择，带宽是正常工作条件下捕获运动的必要条件。我们还应记住，较大的带宽会导致信号中更高频率的噪声积分，并可能导致更高的振动校正误差，如上一节所述。

选择高精度加速度计是满足应用要求的关键。重要的是，要在比较前面列出的所有参数之后，再选择传感器。工厂校准和运行时校准可明显减少偏差和灵敏度等主要来源的影响，建议使用工厂或运行时校准软件校准传感器。

表 1 将表 2 高精度双轴 IIS2ICLX 与 IIS3DHHC 加速度计进行比较。表格中比较了加速度计读数中的各种误差源以及倾斜角估计中的误差贡献。所有误差估计均独立于其他误差源。

表 1. IIS3DHHC 误差预算

IIS3DHHC	Typ <sup>(1)</sup>	倾角误差
灵敏度误差	7%	1.95 度（采用双轴）
灵敏度随寿命变化	NA	NA
灵敏度随温度变化	0.7%/°C	85°C 最大误差为 10 度
零-g 水平偏移	20 mg	30 度时 1.2 度
寿命内零-g 水平偏移	NA	NA
温度范围内零-g 水平偏移	0.4 mg/°C	85°C 下 30 度时 1.21 度
噪声密度	65 µg/√50	0.4 mg RMS 时 0.02 度
50 Hz, 2.5 g RMS 时 VRE	NA	NA
工作温度范围	-40 至 +85 °C	-

1. 典型值为 1 西格玛值，在室温下测量。

如果我们将 IIS3DHHC 和 IIS2ICLX 进行比较，则大多数大型误差源（例如灵敏度误差，零 g 水平偏移和温度漂移）都会大大减少。

表 2. IIS2ICLX 误差预算

IIS2ICLX	Typ <sup>(1)</sup>	倾角误差
灵敏度误差	2%	0.6 度（采用双轴）
灵敏度随寿命变化	0.7%	0.2 度
灵敏度随温度变化	0.01%/°C	105 °C 最大误差为 0.2 度
零-g 水平偏移	8 mg	30 度时 0.75 度
寿命内零-g 水平偏移	2.5	30 度时 0.25 度
温度范围内零-g 水平偏移	0.02 mg/°C	105 °C 下 30 度时 0.16 度
噪声密度	15 µg/√50	95 µg RMS 时 0.005 度
50 Hz, 2.5 g RMS 时 VRE	1 mg	0.1 度
工作温度范围	-40 至 +105 °C	-

1. 典型值为 1 西格玛值，在室温下测量。

随着 IIS2ICLX 上的最新改进，最大的误差源仍然是灵敏度误差和零 g 水平偏移，对这些误差进行校准即可实现理想的性能。

## 版本历史

表 3. 文档版本历史

日期	版本	变更
2020 年 8 月 20 日	1	初始版本

## 目录

<b>1</b>	单轴或单平面倾斜计算 . . . . .	2
<b>2</b>	双轴或双平面倾斜感知 . . . . .	4
<b>3</b>	软件库 . . . . .	5
<b>4</b>	误差和校准 . . . . .	6
<b>4.1</b>	白噪声与振动 . . . . .	6
<b>4.2</b>	偏移/偏差和温度漂移 . . . . .	8
<b>4.3</b>	灵敏度与非线性 . . . . .	11
<b>4.4</b>	交叉轴灵敏度 . . . . .	14
<b>5</b>	动态倾角计和 MotionDI . . . . .	15
<b>6</b>	传感器选择 . . . . .	17
	版本历史 . . . . .	20
	目录 . . . . .	21
	图一览 . . . . .	22

## 图一览

图 1.	倾角计及其应用 . . . . .	1
图 2.	使用单轴或双轴进行倾斜测量 . . . . .	2
图 3.	加速度计读数 . . . . .	2
图 4.	倾斜灵敏度 . . . . .	3
图 5.	双轴或三轴加速度计倾斜计算 . . . . .	4
图 6.	不同行程的倾角误差 . . . . .	6
图 7.	噪声等级和平均误差 . . . . .	7
图 8.	偏差引起的倾斜误差 . . . . .	8
图 9.	利用 arctan 进行倾斜估计的最大误差 . . . . .	9
图 10.	偏差水平变化与温度 . . . . .	10
图 11.	加速度计灵敏度 . . . . .	11
图 12.	非线性 . . . . .	12
图 13.	单轴-由于灵敏度误差而导致的倾斜角度误差 . . . . .	13
图 14.	由于 2% 的灵敏度误差导致 2 轴倾斜误差 . . . . .	14
图 15.	由于白噪声积分而导致的错误 . . . . .	15
图 16.	MotionDI . . . . .	16
图 17.	传感器融合 . . . . .	16
图 18.	滞后误差 . . . . .	18

#### 重要通知 - 请仔细阅读

意法半导体公司及其子公司（“ST”）保留随时对 ST 产品和/或本文档进行变更、更正、增强、修改和改进的权利，恕不另行通知。买方在订货之前应获取关于 ST 产品的最新信息。ST 产品的销售依照订单确认时的相关 ST 销售条款。

买方自行负责对 ST 产品的选择和使用，ST 概不承担与应用协助或买方产品设计相关的任何责任。

ST 不对任何知识产权进行任何明示或默示的授权或许可。

转售的 ST 产品如有不同于此处提供的信息的规定，将导致 ST 针对该产品授予的任何保证失效。

ST 和 ST 标志是意法半导体的商标。关于意法半导体商标的其他信息，请访问 [www.st.com/trademarks](http://www.st.com/trademarks)。其他所有产品或服务名称是其各自所有者的财产。

本文档中的信息取代本文档所有早期版本中提供的信息。

© 2020 STMicroelectronics - 保留所有权利