

# MEMS 陀螺仪的简单校准

硅陀螺仪及其同类加速度计产品在消费电子设备中应用日益广泛。然而，由于数据准确性欠佳，MEMS 系统却反而使得最终用户体验变得更糟。

作者：MARK LOONEY

传统上，陀螺仪是用于测量旋转角速率的机械器件，其常见用途之一就是导航系统中估算方位角。在系统中安装此类陀螺仪时，通常会涉及到舱壁安装的机械设计，即机械定位螺丝系统，以实现框架结构对齐校准。MEMS（微机电系统）陀螺仪技术现在可以通过多种封装提供此项功能，并能够集成到 PCB（印刷电路板）系统中。MEMS 陀螺仪采用硅结构微机械系统，支持将运动转换为电信号的传感器功能。

尽管与之前的机械器件相比，MEMS 陀螺仪更容易集成到电子系统中，但是仍旧需要考虑很多因素，其中包括功能、性能和价格之间的权衡。很多系统以高精度作为主要性能指标。虽然现成产品可满足一些设计要求，但看起来适合系统设计的陀螺仪可能存在精准度过低问题。例如，许多器件的精准度可能参差不齐且相去甚远，这对关键系统目标非常不利。

陀螺仪校准可以弥补这一差距，使得我们能够选用在价格、封装样式、功耗或其他属性方面更具优势的方法。校准的目的是为了在系统级将传感器特性转换为有价值的单元。经过精心设计的校准功能可识别多种传感器特性，并在终端系统的重要条件下产生可预测输出。要将 MEMS 陀螺仪特性转换为可预测的系统级性能，需先了解传感器的性能和特性，确定传感器特性会对关键系统性能指标产生的影响，并制定相关策略和流程来表征与纠正可限制系统内传感器值的特性。

在初始原型开发阶段，系统开发人员很难合理调整精确的电机阶段、编码器和稳定机械结构方面的投资。此种校准方法并不能取代投资合适的设备进行生产准备处理的需求，但却可加快研发周期并减少前期投资需求。

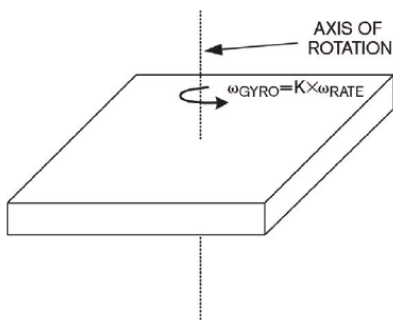


图 1. 偏航角速度 MEMS 陀螺仪响应围绕其预定义旋转轴的运动。

## MEMS 陀螺仪特性特性

理想情况下，测量已知旋转速率时，MEMS 陀螺仪会产生可预测输出。输出具有完美的线性度，并且不存在噪声和偏移。然而，在控制经济成本的制造过程中通常无法做到尽善尽美，因此就需要更进一步了解 MEMS 陀螺仪误差。偏航角速度 MEMS 陀螺仪响应围绕其预定的旋转轴运动（如图 1 所示）。对于 MEMS 陀螺仪，旋转角速率的测量单位通常采用度/秒。对于模拟输出产品，比例因子一般为度/秒每伏或毫伏。对于数字产品，比例因子一般为度/秒每最低有效位。

下式提供 MEMS 陀螺仪的一种简单特性模型：

$$\omega_{GYRO} = K \times \omega_{RATE} \times \epsilon + \omega_{BIAS} + \omega_{NOISE} + K_2 \times \omega_{RATE}^2 + K_3 \times \omega_{RATE}^3 + \dots$$

通常，我们可以根据产品数据手册中提供的信息来估算此式中的各个误差项。通过估算出这些误差项，我们将可以完成此过程的第二步，即确定系统级影响并确立性能目标。

## 系统级影响

熟悉 MEMS 陀螺仪的特性和误差模式之后，必须确定这些对系统操作的影响。要成功实现传感器集成，设定支持关键系统目标的性能目标至关重要。导航和平台控制等系统利用陀螺仪输出通过积分来确定相对角位移。偏置误差会给传感器的输出响应带来固定误差，使静止的器件看起来好像在旋转，最终结果是角度测量误差不断累积，相当于偏置误差和累积时间的乘积。下式是此漂移因子的数学关系式：

$$\phi_{EBIAS} = \int_0^t \omega_{BIAS} \times dt = \omega_{BIAS} \times t^1$$

只有运动时，比例因子误差会导致位移测量误差。最终误差的数学关系式如下：

$$\phi_{ESCALE} = \int_0^t \omega_{RATE} \times K \times \epsilon \times dt = \epsilon \times \int_0^t \omega_{RATE} \times K \times dt$$

与相关测量积分时间成反比的噪声会导致测量出现随机误差。分析此种影响的一种常见工具是 Allan 方差法，该工具可得出偏置估算值相对于积分时间的变化情况。例如，当积分时间为 6 秒时，精准度大约为 0.004°/sec（图 2）。

偏置、噪声和比例因子误差（其中包括线性度）会对使用 MEMS 陀螺仪来测量角位移的系统产生相当大的影响（图 3）。这些误差会直接影响导航系统中的方位角估算，而在使用陀螺仪作为反馈检测单元的平台控制系统中，则会直接影响系统精度。

## 概览

- MEMS（微机电系统）陀螺仪校准的目的是为了在系统级将传感器特性转换为有价值的单元。
- 您必须确定 MEMS 陀螺仪的特性和误差模式对系统操作的影响。
- Allan 方差曲线可以帮助分析测试时间和偏置精度之间的权衡关系。

## 简单校准

校准的目的通常是缩小传感器的误差分布,并将该器件转换为可针对所测条件提供可预测输出的传感器系统。此过程涉及确定各个传感器在已知条件下的特性,从而给特定器件的校正公式提供所需数据。此过程的目的是提供入门级的简单校准方法。针对一阶偏置和比例因子误差的线性补偿方法能够将复合误差降至 1% 以下。

估算偏置误差的一种简单方法是保持器件位置不变,然后求取 MEMS 陀螺仪输出的平均值。陀螺仪的 Allan 方差曲线可以帮助分析测试时间(即平均时长)和偏置精度之间的权衡关系。通常,可使用伺服电机级来确定比例因子误差的特性,该级采用光学编码器来进行精确速率控制。使用此方法时, MEMS 陀螺仪以已知速率旋转,并提供输出测量。虽然此方法在开发和生产后期非常有效,甚至是必不可少的,但是还有一种更简单的方法。假定纠正了偏置误差,那么集成 MEMS 陀螺仪可以提供观察比例因子的另一机制。这种情况下,比例因子误差是所测角度和实际角位移的比值。

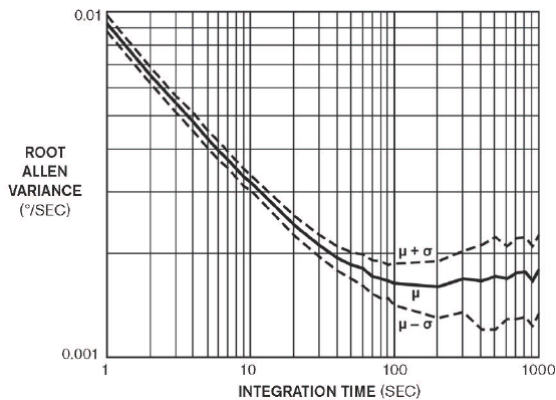


图 2. Allan 方差平方根以曲线图表示 ADIS16130 MEMS 陀螺仪噪声影响与积分时间的关系。

## 校准示例

具体实施时可借助陀螺仪使用此方法。此过程同样适用于表面贴装 MEMS 陀螺仪的系统级板。开始校准时,请先考虑以下物理设置:

1. 选择支点,并使用机器螺丝组件加以固定。试验支点螺丝扭矩能否确保可靠的固定,同时允许在表面上平滑旋转。
2. 安装两个角位置的机械止动装置。一种方法是使用 M2 机械螺丝安装两个 M2 垫片。将螺丝固定到位,并保证能够进行 90° 左右的旋转操作。
3. 在各止动点之间旋转陀螺仪组件,以确保能够平滑旋转。
4. 使用独立传感器测量位移角。执行此步骤的一种选择是使用基于加速度计的倾角计,如 ADI 公司([www.analog.com](http://www.analog.com))的 ADIS16209。您可以将该器件固定到旋转平台上,然后垂直放置该平台,并使用倾角计来测量角位移。如果倾角计的精度为 0.25°,而旋转幅度为 90°,那么误差将小于 0.3%。

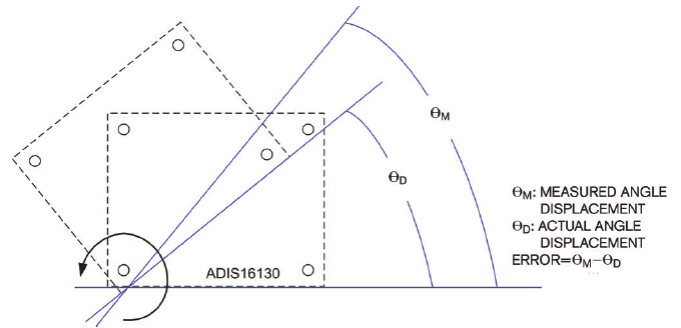


图 3. 偏置、噪声和比例因子等多种形式的 MEMS 陀螺仪误差会影响使用此类器件测量角位移的系统。

完成设置和角度测量之后,请按照以下步骤来测量陀螺仪的特性:

1. 接通陀螺仪并让其达到热稳定状态。为此,很多 MEMS 陀螺仪配有温度传感器。
2. 让陀螺仪位于第一个止动位置并开始测量输出。按照以下步骤继续对输出进行采样。
3. 等待 5 秒钟,然后将陀螺仪转到第二个止动位置。开始平滑旋转,在 3 到 4 秒内转动 90°。
4. 等待 5 秒钟,然后按照相同方式将陀螺仪旋回到第一个止动位置。
5. 等待 5 秒钟,然后停止测量。保存数据。

获得时间记录数据之后,请按照以下步骤来计算此 MEMS 陀螺仪的校正系数(图 4):

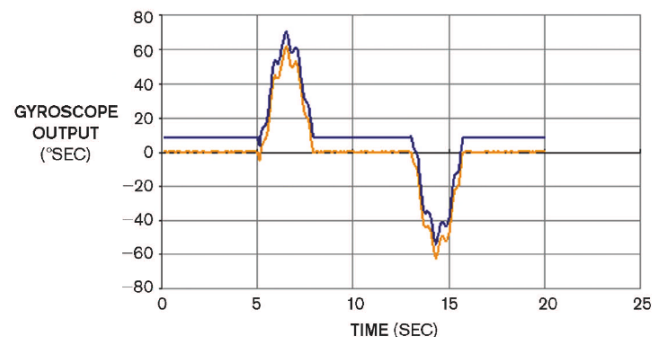


图 4 只需 MEMS 陀螺仪输出特性的一份时间记录即可计算出校正系数。

1. 求取前 3 秒数据的平均值,计算偏置失调校正系数。偏置校正系数与此平均值符号相反。本例中,偏置校正系数为 -8.6°/sec。采用此校正系数时,偏置估算值的精度高于 0.1°/sec。
2. 从时间记录中减去偏置估算值。然后,对 4 秒时间戳至 9 秒时间戳的输出数据求积分。本例中,测得的角位移为 95.1°。此步骤的比例因子为 90°除以 95.1°,即 0.946。
3. 利用步骤 2 中纠正偏置后的响应结果,对 12 秒时间戳至 16 秒时间戳的输出数据求积分。本例中,测得的角位移

为 $-95.3^\circ$ 。此步骤的比例因子为 $90^\circ$ 除以 $95.3^\circ$ ，即 0.944。

4. 将步骤 2 和 3 的结果求平均值,以计算比例因子校正系数,本例中为 0.945。

与任何其他实验室过程一样,此过程需要在实际操作中进行改进和调整。实验将有助于进一步提高旋转速度精度,但是必须确保传感器任何时候都不会超量程。同时,还必须确保表面光滑,以便陀螺仪组件不会在旋转过程中出现上下跳跃。另一个敏感区域是接近止动点时。如果陀螺仪止动后“反弹”,可能会引入误差。保证充足的转换时间可方便获得准确的时间戳。请务必记住,要在运动开始前求积分,并在运动停止后中止。

MEMS 陀螺仪对加速度和重力敏感。因此,在放置时有必要考虑重力因素。本例中,陀螺仪与其旋转轴平时,重力对陀螺仪的影响最小。有些情况下,可能还需要控制电源和热影响。

其它情况下,请先重复此过程,然后再执行关键测量,这样可以有效控制这些影响。否则,请在两种电源级别、以两种温度重复此过程,这样将可帮助减轻一阶影响。

这种 MEMS 陀螺仪校准过程相对而言比较简单,而需要的设备投资很少。对于一些系统,此过程可确保能够达到必要精度。而对于其他应用,该过程可以简化概念证明开发阶段,从而帮助合理调整后续投资,以便采购器件或在最终系统投入生产时校准至必要的精度。要想在较宽的温度、电源及其他环境影响范围内保持最佳精度,将需要更多的投入成本。

### 作者简介

Mark Looney 是 ADI 公司的一名应用工程师,编写了许多高级惯性感测产品的文献和应用资料。Looney 于 1995 年毕业于内华达大学雷诺分校,并取得电气工程硕士学位。