

## 陀螺仪机械性能：最重要的参数

作者：Harvey Weinberg，ADI公司MEMS和传感器技术部应用工程组主管

### 简介

选择陀螺仪时，需要考虑将最大误差源最小化。在大多数应用中，振动敏感度是最大的误差源。其它参数可以轻松地通过校准或求取多个传感器的平均值来改善。零偏稳定性是误差预算较小的分量之一。

**浏**览高性能陀螺仪数据手册时，多数系统设计师关注的第一个要素是零偏稳定性规格。毕竟，它描述的是陀螺仪的分辨率下限，理所当然是反映陀螺仪性能的最佳指标！然而，实际的陀螺仪会因为多种原因而出现误差，使得用户无法获得数据手册中宣称的高零偏稳定性。的确，可能只有在实验室内才能获得那么高的性能。传统方法是借助补偿来最大程度地降低这些误差源的影响。本文将讨论多种此类技术及其局限性。最后，我们将讨论另一种可选范式——根据机械性能选择陀螺仪，以及必要时如何提高其偏置稳定度。

### 环境误差

所有中低价位的MEMS陀螺仪都有一定的时间-零点偏置和比例因子误差，此外还会随温度而发生一定的变化。因此，对陀螺仪进行温度补偿是很常见的做法。一般而言，陀螺仪集成温度传感器的目的就在于此。温度传感器的绝对精度并不重要，重要的是可重复性以及温度传感器与陀螺仪实际温度的紧密耦合。现代陀螺仪的温度传感器几乎毫不费力就能达到这些要求。

许多技术可以用于温度补偿，如多项式曲线拟合、分段线性近似等。只要记录了足够数量的温度点，并且在校准过程中采取了充分的措施，那么具体使用何种技术是无关紧要的。例如，在每个温度的放置时间不足是一个常见的误

差源。然而，无论采用何种技术，无论有多细心，温度迟滞——即通过冷却与通过加热达到某一特定温度时的输出之差——都将是限制因素。

图1所示为陀螺仪ADXRS453的温度迟滞环路。温度从+25°C变为+130°C，再变为-45°C，最后回到+25°C，与此同时记录未补偿陀螺仪的零点偏置测量结果。加热周期与冷却周期中的+25°C零点偏置输出存在细微的差异(本例中约为0.2°/s)，这就是温度迟滞。此误差无法通过补偿来消除，因为无论陀螺仪上电与否，它都会出现。此外，迟滞的幅度与所施加的温度“激励”量成比例。也就是说，施加于器件的温度范围越宽，则迟滞越大。

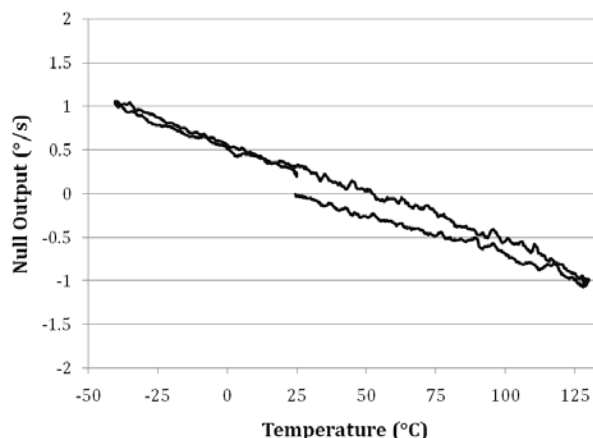


图1. 经历温度循环(-45°C至+130°C)时未补偿ADXRS453的零点偏置输出

如果应用允许启动时复位零点偏置(即无旋转时启动)，或者在现场将零点偏置调零，则可以忽略此误差。否则，这就可能是零偏稳定性性能的一个限制因素，因为我们无法控制运输或存储条件。

### 抗振

理想情况下，陀螺仪仅测量旋转速率，无关其他。但实际应用中，由于机械设计不对称和/或微加工不够精确，所有陀螺仪都有一定的加速度敏感度。事实上，加速度敏感度

有多种外在表现，其严重程度因设计而异。最显著的通常是对线性加速度的敏感度(或g敏感度)和对振动校正的敏感度(或g<sup>2</sup>敏感度)。由于多数陀螺仪应用所处的设备是绕地球的1g重力场运动和/或在其中旋转，因此对加速度的敏感度常常是最大的误差源。

成本极低的陀螺仪一般采用极其简单紧凑的机械系统设计，抗振性能未经优化(它优化的是成本)，因而振动可能会造成严重影响。1000°/h/g(或0.3°/s/g)以上的g敏感度也不足为奇，比高性能陀螺仪差10倍以上！对于这种陀螺仪，零偏稳定性的好坏并无多大意义，陀螺仪在地球的重力场中稍有旋转，就会因为g和g<sup>2</sup>敏感度而产生巨大的误差。一般而言，此类陀螺仪不规定振动敏感度——默认为非常大。

较高性能的MEMS陀螺仪则好得多。表1列出了几款高性能MEMS陀螺仪的数据手册所列规格。对于这一类别中的多数陀螺仪，g敏感度为360°/h/g(或0.1°/s/g)，某些低于60°/h/g，远远优于极低成本的陀螺仪。但是，对于小到150mg(相当于8.6°倾斜)的加速度变化，即使其中最好的陀螺仪也会超出其额定零偏稳定性。

有些设计师试图利用外部加速度计来补偿g敏感度(通常是在IMU应用中，因为所需的加速度计已经存在)，这在某些情况下确实可以改善性能。然而，由于多种原因，g敏感度补偿无法获得完全的成功。大多数陀螺仪的g敏感度会随振动频率变化而变化。图2显示了Silicon Sensing CRG20-01陀螺仪对振动的响应。注意，虽然陀螺仪的敏感度在额定规格范围内(在一些特定频率处略有超出，但这些可能不重要)，但从DC到100Hz，其变化率为12:1，因此无法简单地通过测量DC时的敏感度来执行校准。确实，补偿方案将非常复杂，要求根据频率改变敏感度。

表1.

制造厂商	产品型号	g敏感度(°/s/g)	g <sup>2</sup> 敏感度(°/s/g <sup>2</sup> )	零偏稳定性(°/h)
Analog Devices	ADXR5646	0.015	0.0001	8
Melexis	MLX90609	0.1	未规定	17
Silicon Sensing	CRG20-01	0.1	0.005	5
VTI	SCR1100-D04	0.1	未规定	2.1

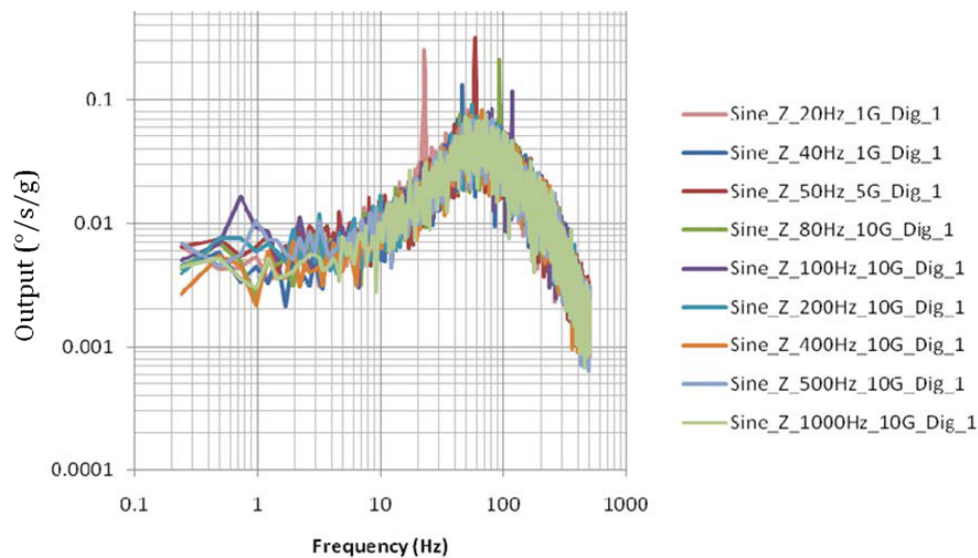


图2. Silicon Sensing CRG20-01对不同正弦音的g敏感度响应

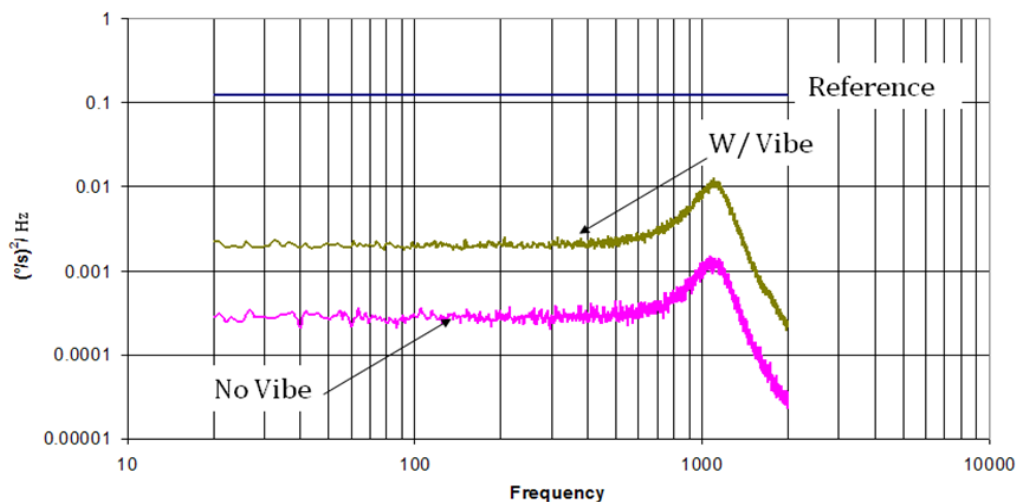


图3. Analog Devices ADXRS646对随机振动(15 g rms, 0.11 g<sup>2</sup>/Hz)的g敏感度响应, 1600 Hz滤波

作为对比, 图3显示的是陀螺仪ADXRS646在相似条件下的响应。事实上, 有些陀螺仪比其它陀螺仪更容易进行g敏感度补偿。不过遗憾的是, 数据手册几乎从不提供此类信息, 必须由用户去探索, 而且可能极耗精力, 但在系统设计过程中, 常常没有时间等待惊喜出现。

另一个困难是将补偿加速度计和陀螺仪的相位响应相匹配。如果陀螺仪和补偿加速度计的相位响应匹配不佳, 高频振动误差实际上可能会被放大! 由此便可得出另一个结论: 对于大多数陀螺仪, g敏感度补偿仅在低频时有效。

振动校正常常不作规定, 原因可能是差得令人难堪, 或者不同器件差异巨大。也有可能只是因为陀螺仪制造商不愿意测试或规定(公平地说, 测试可能比较困难)。无论如何, 振动校正必须引起注意, 因为它无法通过加速度计进行补偿。与加速度计的响应不同, 陀螺仪的输出误差会被校正。

改善g<sup>2</sup>敏感度的最常见策略是增加一个机械抗振件, 如图4所示。图中显示的是一个从金属帽壳封装中部分移出的Panasonic汽车陀螺仪。该陀螺仪组件通过一个橡胶抗振件与金属帽壳隔离。抗振件非常难以设计, 因为它在宽频率范围内的响应并不是平坦的(低频时尤其差), 而且其减振特性会随着温度和使用时间而变化。与g敏感度一样, 陀

螺仪的振动校正响应可能会随频率变化而变化。即使能够成功设计出抗振件以衰减已知频谱下的窄带振动, 此类抗振件也不适合可能存在宽频振动的通用应用。

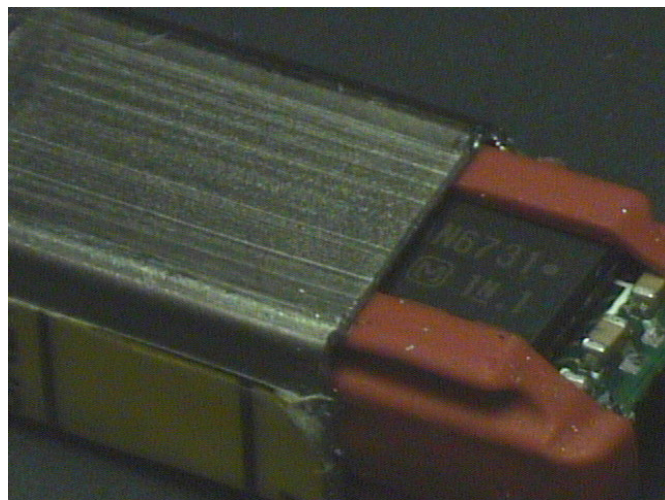


图4. 典型抗振件

### 机械滥用引起的主要问题

许多应用中会发生常规性短期滥用事件, 这些滥用虽然不致于损伤陀螺仪, 但会产生较大误差。下面列举几个例子。

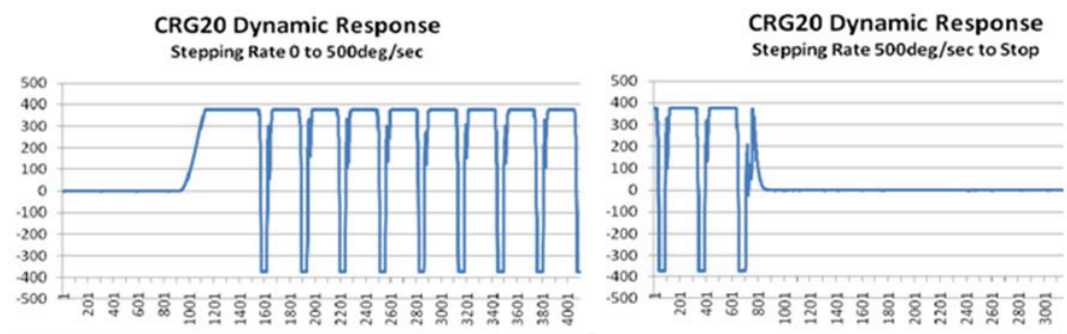


图5. Silicon Sensing CRG-20对500°/s速率输入的响应

有些陀螺仪可以承受速率过载而不会表现异常。图5显示了Silicon Sensing CRG20陀螺仪对超出额定范围大约70%的速率输入的响应。左边的曲线显示的是旋转速率从0°/s变为500°/s再保持不变时CRS20的响应情况。右边的曲线则显示的是输入速率从500°/s降为0°/s时该器件的响应情况。当输入速率超出额定测量范围时，输出在轨到轨之间紊乱地摆动。

经受250 g 0.5 ms冲击时的响应情况(产生冲击的方法是让一个5 mm钢球从40 cm的高度落在陀螺仪旁边的PCB上)。陀螺仪未因冲击而损坏，但它不再响应速率输入，需要关断再上电以重新启动。这并非罕见现象，多种陀螺仪都存在类似的行为。检查拟用的陀螺仪是否能承受应用中的冲击是明智的。

显然，此类误差将大得惊人。因此，必须仔细找出给定应用中可能存在哪些滥用情况，并且验证陀螺仪是否能经受得住。

误差预算计算

如上所述，多数陀螺仪应用中都存在运动或振动情况。利用上文所示的数据手册所列规格(如果没有规定振动校正特性，则使用保守的估计值)，表2列出了表1所示陀螺仪在不同应用中的典型误差预算。从表3可以看出，增加g敏感度补偿方案后，虽然抗振性能提高了半个数量级(绝非易事)，但振动敏感度仍然是一个远大于零偏稳定性的误差来源。

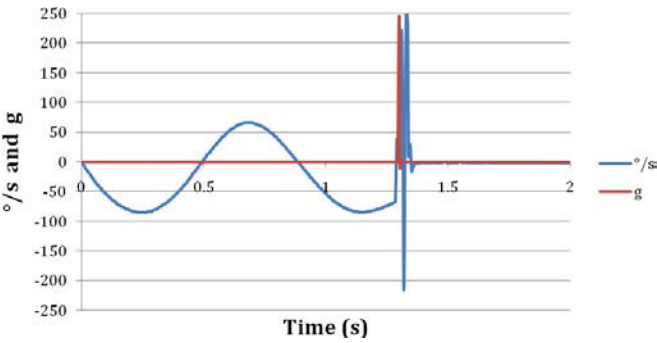


图6. VTI SCR1100-D04对250 g、0.5 ms冲击的响应

有些陀螺仪在经受哪怕只有数百g的冲击时，也会表现出“锁定”的倾向。例如，图6显示的是VTI SCR1100-D04在

表2. 多种陀螺仪(未经补偿)在不同振动情况下的估计误差(°/s)

制造厂商	产品型号	跑步 (2 g峰值)	直升机 (0.4 g振动)	船上 (0.5 g倾斜)	施工设备(50 g峰值)
Analog Devices	ADXR5646	4	22	5	36
Melexis	MLX90609	35	150	38	1080
Silicon Sensing	CRG20-01	32	147	37	630
VTI	SCR1100-D04	35	150	38	1080



表3. 采用g敏感度补偿的多种陀螺仪(g敏感度改善5倍)在不同振动情况下的估计误差(°/s)

制造厂商	产品型号	跑步 (2 g峰值)	直升机 (0.4 g振动)	船上 (0.5 g倾斜)	施工设备(50 g峰值)
Analog Devices	ADXRS646	1	4	1	14
Melexis	MLX90609	12	35	9	936
Silicon Sensing	CRG20-01	9	32	8	486
VTI	SCR1100-D04	12	35	9	936

### 选型新范式

在误差预算中，零偏稳定性是最小的分量之一，因此选择陀螺仪时，更为合理的做法是考虑将最大误差源最小化。在大多数应用中，振动敏感度是最大的误差源。然而，有时用户可能仍然希望获得比所选陀螺仪更低的噪声或更好的零偏稳定性。幸运的是，我们有办法来解决这一问题，那就是求平均值。

不同于设计相关的环境或振动误差，多数陀螺仪的零偏稳定性误差具有噪声特性。也就是说，不同器件的零偏稳定性是不相关的。因此，我们可以通过求取多个器件的平均值来改善零偏稳定性性能。如果对 $n$ 个器件求平均值，则期望的改善幅度为 $\sqrt{n}$ 。宽带噪声也可以通过类似的求平均值方法予以改善。

### 结束语

长久以来，零偏稳定性被视为陀螺仪规格的绝对标准，但在实际应用中，振动敏感度常常是限制性能的更严重因素。根据抗振能力选择陀螺仪是合理的，因为其它参数可以轻松地通过校准或对多个传感器求平均值来改善。

### 附录：计算振动引起的误差

为了计算给定应用中振动引起的误差，需要了解加速度的预计幅度，以及此种加速度可能发生的频率。表2和表3所示的应用说明如下：

- 跑步通常产生2 g的峰值，约占4%的时间。
- 直升机的振动相当稳定。多数直升机规格为0.4 g宽频振动和100%占空比。

- 汹涌水面上的船只(尤其是小船)倾斜度可达 $\pm 30^\circ$ (产生 $\pm 0.5$  g振动)。占空比可以假设为20%。
- 对于平土机和前端装载机等施工设备，只要其刀片或铲斗撞击到石头，就会产生高g(50 g)而短暂的冲击。占空比典型值为1%。

计算振动引起的误差时，必须考虑g敏感度和 $g^2$ 敏感度。以直升机应用为例，计算如下：

$$\begin{aligned} \text{误差} &= [\text{g敏感度误差}] + [\text{g}^2\text{敏感度误差}] \\ &= [0.4 \text{ g} \times \text{g敏感度} \times 3600 \text{ s/h} \times 100\%] + \\ &\quad [(0.4 \text{ g})^2 \times \text{g}^2\text{敏感度} \times 3600 \text{ s/h} \times 100\%] \end{aligned}$$

如果通过加速度计补偿g敏感度，则仅g敏感度降低，降幅为补偿系数。

### 资源

欲了解有关陀螺仪、MEMS和惯性检测解决方案的更多信息，请访问[www.analog.com/zh/MEMS](http://www.analog.com/zh/MEMS)

### 本文提到的产品

产品	描述
ADXRS646	具有高稳定性、低噪声和振动抑制特性的偏航角速度陀螺仪