

主轴测量：RPM 和带宽

适用设备：

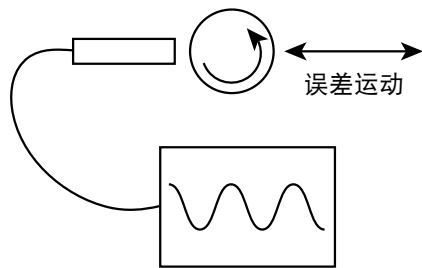
测量旋转主轴的电容式传感器系统

应用：

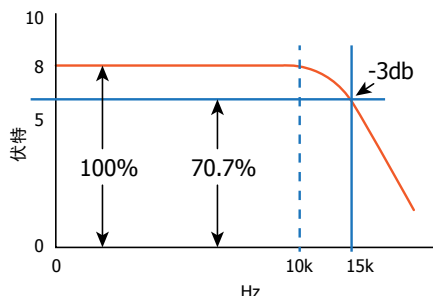
高速旋转目标的旋转测量

概述

旋转主轴可产生许多不同频率的误差运动。这些频率是由旋转速度、轴承元件的形状误差、外部影响和其他来源所决定的。通过对这些频率的检查揭示，15 kHz 的带宽足以准确地测量高速主轴。



非接触式传感器可以测量单轴向的旋转主轴的误差运动。该轴中的运动频率决定传感器所需的带宽。



若带宽为 15 kHz，传感器输出在 15 kHz 下可降低至 70%。频率响应持平，直至约 10 kHz 处。

主轴运动

主轴回转误差测量通常采用多个轴向的传感器来完成。为了容易理解这些测量是如何完成的，以其中一个传感器为例。当目标靠近和远离传感器时，单一的非接触式传感器可以测量旋转目标的位移情况。测量系统的带宽必须能够足以测量该轴向的主轴运动频率。即使对于特高速的主轴来说，这些频率通常也会很好地落在测量系统能力范围内。

传感器的带宽

Lion Precision CPL190 和 CPL290 电容式传感器的幅值输出均可在 10 kHz 以内“持平”，这意味着对在 10 kHz 下运动的目标进行的测量是准确的。

当它们在 10 kHz 内“持平”时，“带宽”为 15 kHz。传感器的带宽定义是指输出电压降低至更低频率下（或 DC）输出电平的 70.7% (-3db) 时的频率，了解这一点十分关键。这意味着，在 15 kHz 下运动且位移为 10 μm 的目标将只会被测量为 7 μm 。

基本频率

由于离心率，所有旋转目标都会在每次旋转时出现一个周期的误差运动。这一现象确定了一个“基本频率”，并且该“基本频率”始终为：

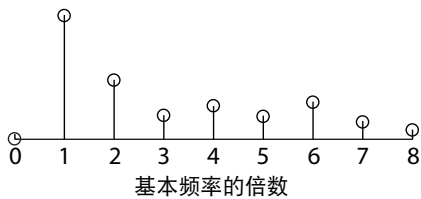
$$\text{基本频率 (单位: Hz)} = \text{RPM}/60$$

具有 10 kHz 下平坦频率响应的传感器可以准确地测量转速高达 600,000 RPM 的目标的基本运动。标准的 15 kHz 带宽传感器能够可靠且重复地测量高达 900,000 RPM 的旋转速度，虽然输出只有实际幅值的 70%。

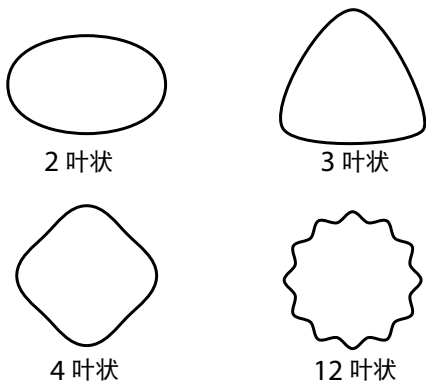
非基本频率

相对于基本频率来说，所有其他误差运动的频率均可测量。例如，相当于基本频率两倍的一个频率可以被简单地标记为“2”。此举仅针对一般情况进行讨论，而不是诉诸于可能与个案不相关之特定频率的实例。

频率（而非基本频率）亦会出现在主轴的误差运动中。轴承元件中的缺陷、底座、电机、驱动器、结构振动以及其他因素都可单独构成一个独特的频率。这些误差运动发生在整数和非整数倍数基本频率处。



同步误差运动的典型频率分布。同步误差运动出现在基本频率的整数倍处。¹



同步误差运动可产生“叶”状。叶的数量越多，则需要更高的带宽，以便精确测量。

同步误差运动

是基本频率整数倍数的误差运动被称为“同步误差”，因为主轴每次转动时，它们都会在相同的角度位置处进行重复。同步误差是因转子和定子缺陷、安装应力以及影响转子或定子形状的其他来源所致。

定子和转子的形状误差

定子和转子并不完全是圆的。这些缺陷在主轴运动中产生额外的频率，而此类频率始终与基本频率同步。2叶状和3叶状误差均是常见的失圆度误差。这些形状误差可产生高出基本频率两倍和三倍的主轴运动频率。请参看左侧的图片。

在 10 kHz 内持平的系统可以准确地记录转速高达 200,000 RPM 时的3叶状误差。

安装导致的误差

安装主轴可能在轴承结构中产生应力，从而造成轻微畸变。这些可产生同步误差运动，并且与定子和转子的形状误差基本相同，但是形状误差是由安装应力所致。这些误差可能出现在基本频率或更高频率处。从理论上来说，每一个安装紧固件均可同步误差运动增添另一个叶。

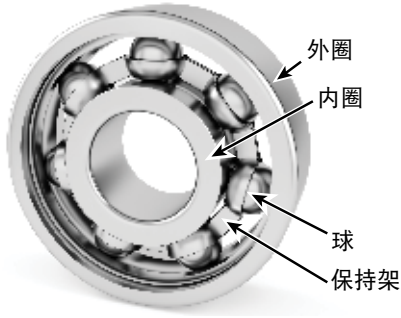
电机磁极 Print-Thru

电机中的磁极可以在电机的转子上产生一个正交力，但磁极处的正交力不同于磁极之间的正交力。这个不断发生变化的力在每次旋转时循环出现。取决于主轴轴承的刚度，这个千变万化的力可以作为主轴中的误差运动出现。此运动与基本频率同步。

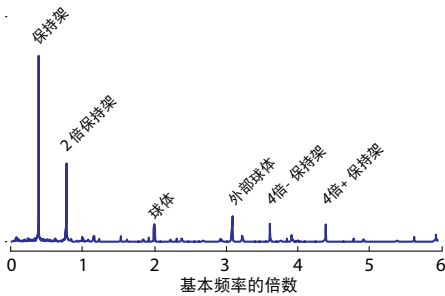
驱动电机中的磁极数量决定 print-thru 误差的形状。例如，八个磁极的电机可以产生一个 8 叶状误差，并且在 10 kHz内持平的系统将会准确地测量转速高达 75,000 RPM 时的误差。典型的驱动电机有 4、6 或 8 个磁极。超大型电机可能有更多的磁极，但是由于其尺寸，它们转动的速度慢得多，以使误差运动频率相对较低。

非同步误差运动

某些误差运动出现在频率为基本频率的非整数倍数处。虽然这些误差可能有一个重复周期，但是它们并非在主轴旋转的相同角度位置处进行重复；它们与基本频率不同步。



每个轴承元件都有一个独特的直径，而这个独特的直径可以产生一个独特的误差运动频率。



发生在“轴承频率”处的非同步误差运动的典型频率分布。大多数分布都低于基本频率 4.5 倍。¹

结构振动

机器结构本身将具有可以出现在主轴运动中的固有共振频率。由于机器结构的大小和质量，因此这些频率通常很低 (10-30 Hz)，并且可能与基本频率同步，也可能与基本频率不同步。由于机器结构的频率低，因此传感器可以轻松测量它们的频率。

滚动轴承（非同步误差）

滚动轴承有四个基本元件：滚动体本身（球或滚轴）、内圈、外圈和保持架。当轴承转动时，这些元件会通过机械方式相互作用；它们的固有缺陷会导致轴承受力和旋转轴偏差，从而引起主轴误差运动。

每一个轴承部件均有其自身的形状误差，而此类形状误差会在主轴中产生误差运动。与基本频率的关系是由轴承元件的直径比例以及旋转元件的接触角所决定的。如要防止主轴内发生共振，需要特意对轴承进行选择，以便这些频率与主轴转子的频率不同步；因此，这些误差出现在基本频率的非整数倍处。

轴承频率

左图中的频率分布显示了一个典型的球轴承频率出现的位置。频率刚好超出基本频率 2 倍时，球轴承便可启动内圈（球体）。保持架频率稍微低于基本频率的一半。

在左图中，谐波出现在 4 倍 ± 保持架频率处，且外圈的频率刚好超过 3 倍。频率超过基本频率 4.5 倍时，活动非常少。在 10 kHz 内持平的系统可以在主轴上准确地测量转速高达 130,000 RPM 时的误差运动。

下表是关于典型轴承频率的另一个实例，显示了相当于基本频率的倍数。³此处，最高频率为 8.32 倍基本频率。在 10 kHz 内持平的系统可以在主轴上准确地测量转速高达 70,000 RPM 时的误差运动

球的数量	球的直径	节径	球体 外圈	球体 内圈	保持架 (FTF)	滚珠
15	0.312"	2.854"	6.68	8.32	0.45	4.52

结论

虽然主轴转速随着时间的推移急剧增加，但是由主轴产生的误差运动频率仍然在带宽为 15 kHz 的 Lion Precision 传感器系统的测量能力范围之内。

参考文献

¹*Precision Spindle Metrology*, Eric R. Marsh, 2008, DesTech Publishing:
Lancaster PA.

²*Rolling Bearing Analysis*, Tedric A. Harris, 1991, John Wiley & Sons: New
York

³<http://www.ntnamerica.com/website/documents/brochures-and-literature/tech-sheets-and-supplements/frequencies.pdf>

如需了解有关轴承频率计算的更多信息，请登陆：

[http://electromotores.com/PDF/InfoT%C3%A9cnica/EASA/
Understanding%20Bearing%20Vibration%20Frequencies.pdf](http://electromotores.com/PDF/InfoT%C3%A9cnica/EASA/Understanding%20Bearing%20Vibration%20Frequencies.pdf)