

调谐质量阻尼器帮助FORTIS™光栅实现领先级抗振性

1907年, 美国机械工程师Frederick Winslow Taylor将机械加工过程中的振动形容为“机械师面临的所有问题中最费解、最棘手的问题”。从雷尼绍自身以及通过与全球客户群的密切合作, 在近五十年来所积累的丰富机械加工经验来看, 我们赞同他的观点。尽管机械加工行业在一个多世纪以来取得了技术进步, 并且目前已经开发出现代化、高品质、高速数控机床, 但振动现象确实还会发生。可能引起振动的典型应用场合包括重型粗切削、间歇性切削、薄壁部件加工, 以及特别坚硬和特殊材料的加工。选择合适的刀具以及优化进给率和速度是有助于减少和抑制振动的必要措施。为确保机床运动控制系统实现理想性能, 从而提高生产效率, 如何平衡循环时间与加工精度和质量是一个永恒课题。

雷尼绍工业测量应用部门总监, Paul Maxed

挑战

机床在运行过程中会产生明显的振动, 而强烈的振动会对安装在机床上的封闭式光栅产生不利影响, 从而导致测量不精确。轴位置测量精度可直接影响制程在各个方面质量, 比如特征加工精度和表面光洁度等。优化位置测量精度, 减少振动的影响, 可显著提高生产质量。机床振动的主要原因有:

1. 在某些情况下, 切削过程中会产生刀具震颤。例如, 当铣削硬质材料时, 由于切削力过大而发生工件或刀具偏移。
2. 加工材料的不均匀性和切削刀具上出现积屑瘤。由于加工难度突然增加而产生冲击力, 进而引起振动。
3. 在铣削中常见的间歇性切削会产生冲击力, 进而引起振动。
4. 由于旋转质量不平衡, 传动机构的阻尼变化(如轴承磨损)或工件装夹不牢而引起的干扰。
5. 机床磨损或维护不善, 切削刀具不合适, 以及主轴转速和进给率不当。

解决方案

雷尼绍凭借自身在机床领域的丰富经验，与众多大型机床制造商和最终用户建立了成功的合作关系。FORTIS™封闭式光栅旨在解决关于机床振动的已知问题，以及机床振动对位置测量精度的影响。FORTIS光栅的三个设计特点互为支撑，可提高光栅抗机械振动的稳固性，进一步防止高振幅扰动进入位置控制环：

1. 如图2a所示，传统的封闭式光栅采用弹簧轮式滑架，可在读数头本体沿栅尺移动时为其提供支撑。在任意给定的驱动频率下，支撑读数头的机床导轨的振动幅度和相位 (V_g) 与固定在机床安装面上的光栅栅尺和壳体的振动幅度和相位 (V_m) 不同；如图1所示，这种振幅和相位响应差异必须由轮式滑架中的柔性弹片和联轴器吸收。如图2b所示，FORTIS光栅采用非接触式设计，将读数头本体与栅尺壳体有效分离。

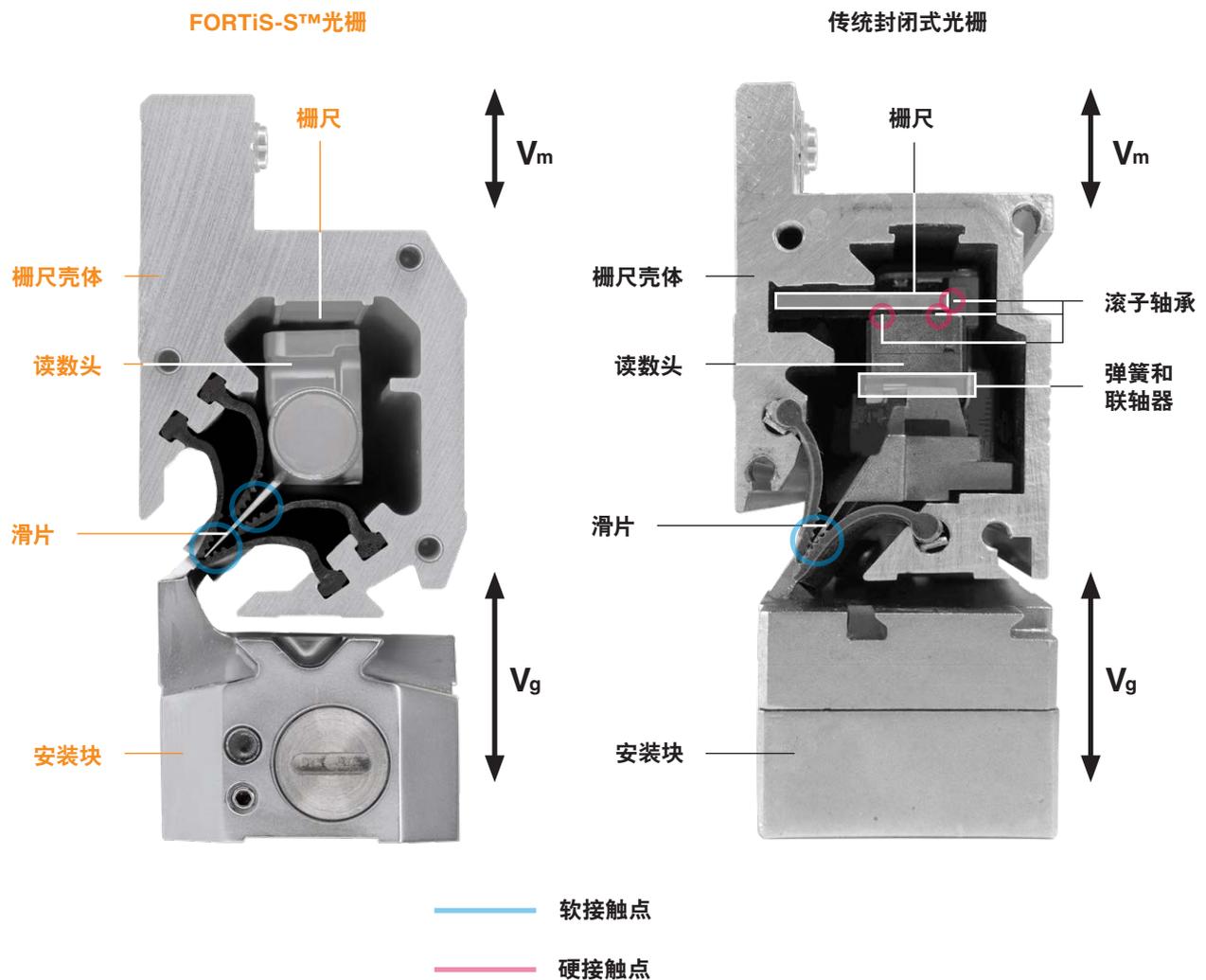


图1: FORTIS-S光栅和传统封闭式光栅的纵断面

2. 传统封闭式光栅使用相对较重的玻璃栅尺，悬挂在栅尺壳体一侧。为了避免由于悬挂式栅尺的振动而在栅尺壳体内部产生非预期振荡，FORTiS光栅使用轻型钢制栅尺，而且栅尺的全长均固定在栅尺壳体内部。
3. FORTiS光栅的第三个阻尼设计特点是采用调谐质量阻尼技术。调谐质量阻尼器 (TMD) 是一种机械装置，安装在机械结构上的特定位置，可显著抑制共振。FORTiS光栅使用两个调谐质量阻尼器来抵消垂直轴和水平轴上的振动。



图2a: 传统封闭式光栅的剖面图，显示了栅尺壳体内部的读数头本体和用于支撑的轮式滑架。请注意，这种读数头结构完全暴露于进入栅尺壳体内部的污染物



图2b: FORTiS-S封闭式光栅的剖面图，显示了栅尺壳体内部的非接触式密封型读数头本体

调谐质量阻尼技术简介

调谐质量阻尼器广泛应用于工程领域。在这些应用中,针对具有明确共振频率的物体,必须减缓其机械振动。最著名的调谐质量阻尼器应用实例也许是建造超高层摩天大楼。例如,著名的台北101大楼使用大型调谐质量阻尼器,以减少大楼因强风或地震而产生的振动,如图3所示。其他应用实例包括,在输电线路、飞机机翼、汽车曲轴、桥梁和FORTiS光栅上安装调谐质量阻尼器。



图3: 中国台北101大楼上的TMD系统

在FORTiS光栅中,调谐质量阻尼器沿垂直(Z轴)和水平(Y轴)方向安装在读数头上。如图4所示,FORTiS光栅中调谐质量阻尼器的基本设计是:安装在阻尼器质量块两端柱栓上的两个O形圈,阻尼器柱栓安装在挖通的套筒内,以控制O形圈的压缩。

得益于调谐质量阻尼器的巨大研发进步,在离安装点最远的读数头(光学系统导轨)一端,FORTiS光栅的峰值加速度降低了5.3倍。

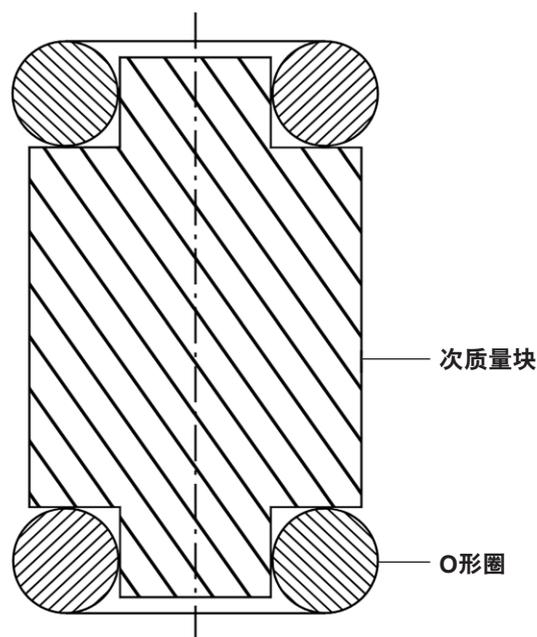


图4: 专为FORTiS光栅设计的TMD的纵断面,两端均可见O形圈

调谐质量阻尼器的工作原理

本节介绍了用于一个自由度 (DoF) 系统的调谐质量阻尼器的基本工作原理。机械工程师和土木工程师经常会遇到这样的问题，当系统因回应输入激励而产生高振幅振荡时，会发生共振。

如图5所示，共振系统可以理解为一个受驱动的简谐振荡器，例如刚性为 k 的弹簧上的质量块 (m)。在这种情况下，应采用熟悉的简谐运动方程式，其中 x 为静态平衡下的线性位移。

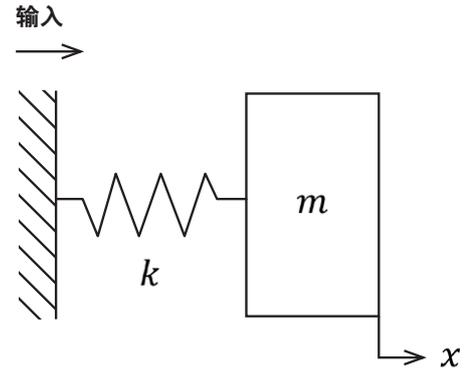


图5: 具有1个自由度的质量块 — 弹簧系统

方程式1: $m\ddot{x} + kx = input$

方程式1表明，弹簧上的质量块具有正弦响应的固有频率，如方程式2所示：

方程式2: $frequency (Hz) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$

如图6所示，如果某个系统输入（力或位移）的频率接近方程式2中的共振频率，那么将产生可能造成破坏性后果的巨大共振响应。

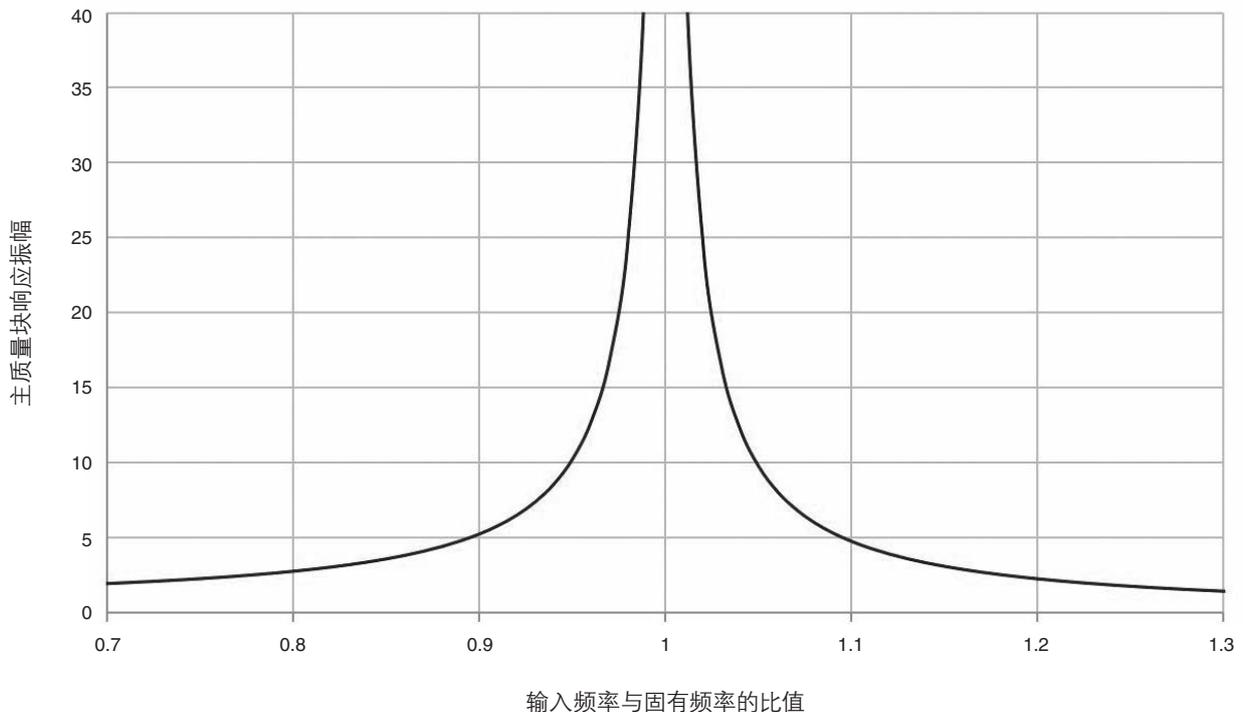


图6: 弹簧上质量块的共振响应

在许多情况下常用的一种策略是，增加机械阻尼装置，并使系统的固有频率偏离激励频率。

但是，这种方法有时并不可行。例如，钢筋结构的摩天大楼会以其固有频率晃动，而附近没有任何东西可作为加固或阻尼的锚固点。在这种情况下，常用方法根本不可行，而可能的解决方法就是使用调谐质量阻尼器。

FORTiS光栅读数头的重量由充当弹簧的滑片支撑，该滑片较薄，有利于增强密封严密性。除非在读数头内部使用调谐质量阻尼器加以控制，否则外部的加工振动可能会引起不利的共振。

实际设计调谐质量阻尼器时需要精心研发；但是，它的基本概念源自于无阻尼质量块 — 弹簧系统，及其在固有频率下的共振问题。

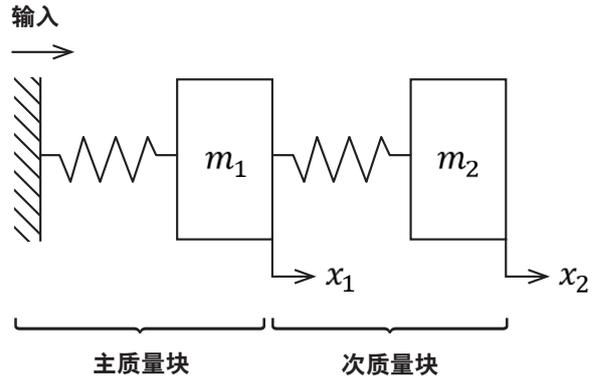


图7: 具有2个自由度的质量块 — 弹簧系统

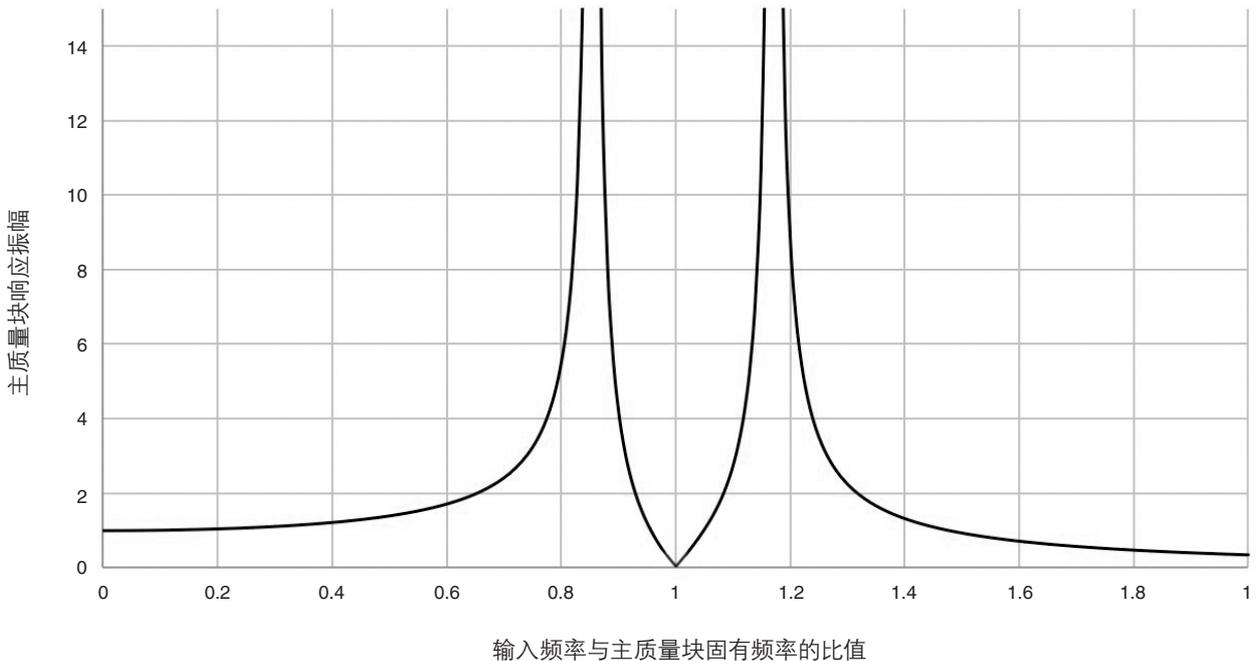


图8: 具有2个自由度的无阻尼质量块 — 弹簧系统的共振响应

假设相对较小的次质量块 (m_2) 通过弹簧与主 (原始) 质量块 (m_1) 耦合，使次质量块具有相同的固有频率。如图7所示，整个系统现在可视为具有“两个自由度”，导致原始共振峰一分为二。在第一个 (较低) 固有频率下，两个质量块同向且同相运动；而在第二个固有频率下，它们沿相反方向运动。

此外, 当以原始固有频率驱动时, 主质量块的振幅为零, 而次质量块产生有限振幅的振荡。这时, 主质量块的共振被抑制, 但会产生两个新的、不同频率的无限共振, 如图8所示。

如果不加以控制, 这些共振可能会导致破坏性后果。调谐质量阻尼器的主要优点在于, 通过支撑次质量块的弹簧上安装的阻尼器, 即可对这些共振进行局部控制, 如图9所示。

总而言之, 调谐质量阻尼器具有三个可调整的基本设计参数: 次质量块与主质量块的比值 (m_2/m_1)、次质量块与主质量块的固有频率比值 (调谐频率), 以及阻尼器的阻尼系数。

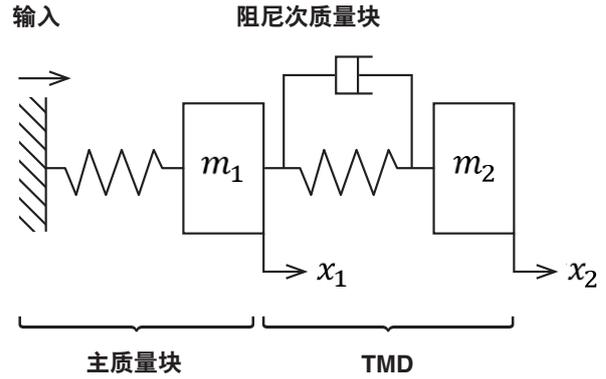


图9: 具有2个自由度的调谐质量阻尼器系统

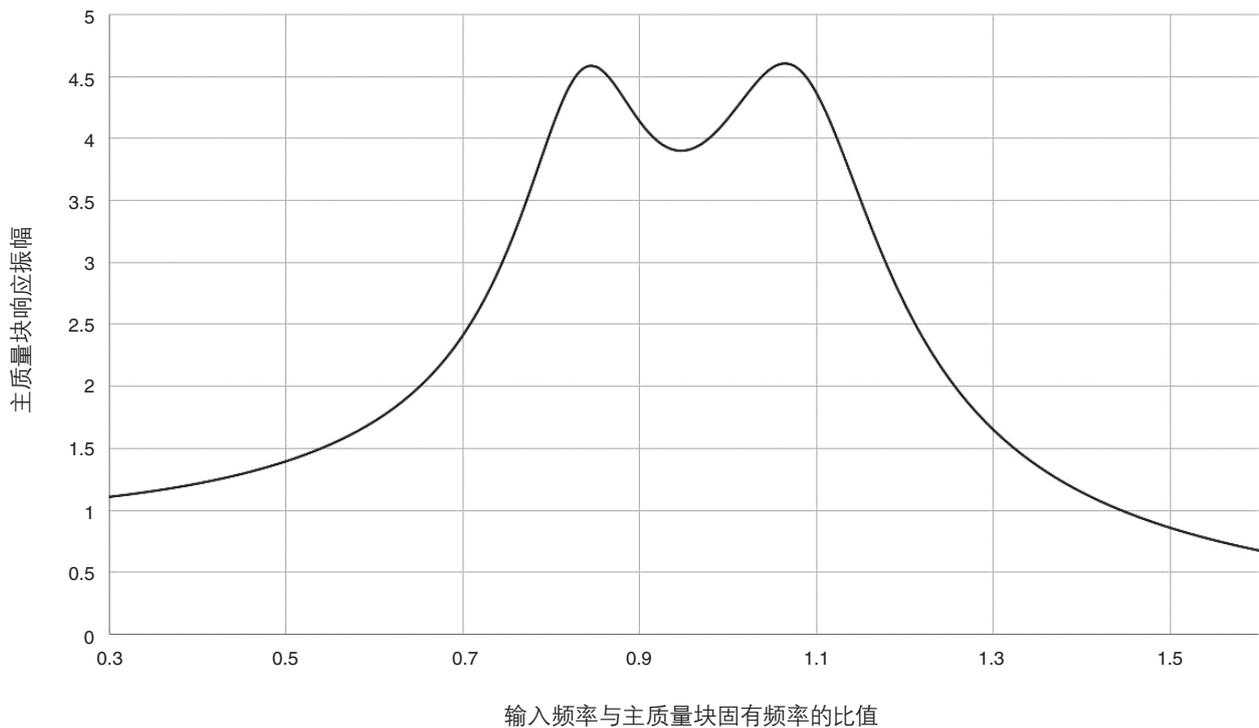


图10: 假设质量比为10%, 将次质量块的理想调谐频率调整为原始共振频率的91%, 并精心选择阻尼器, 那么结果如图所示。与图6和图8所示的无限响应相反, 这时的主质量块响应始终低于静态条件下的4.6倍。

次质量块具有实际限制, 当次质量块仅为主质量块的10%时, 可能会产生较好的结果。结果表明, 理想调谐频率低于主质量块共振频率, 具体低多少仅取决于质量比。最后, 选择次阻尼系数以尽可能降低两个峰值响应, 同时控制在其他所有频率下的振幅响应。

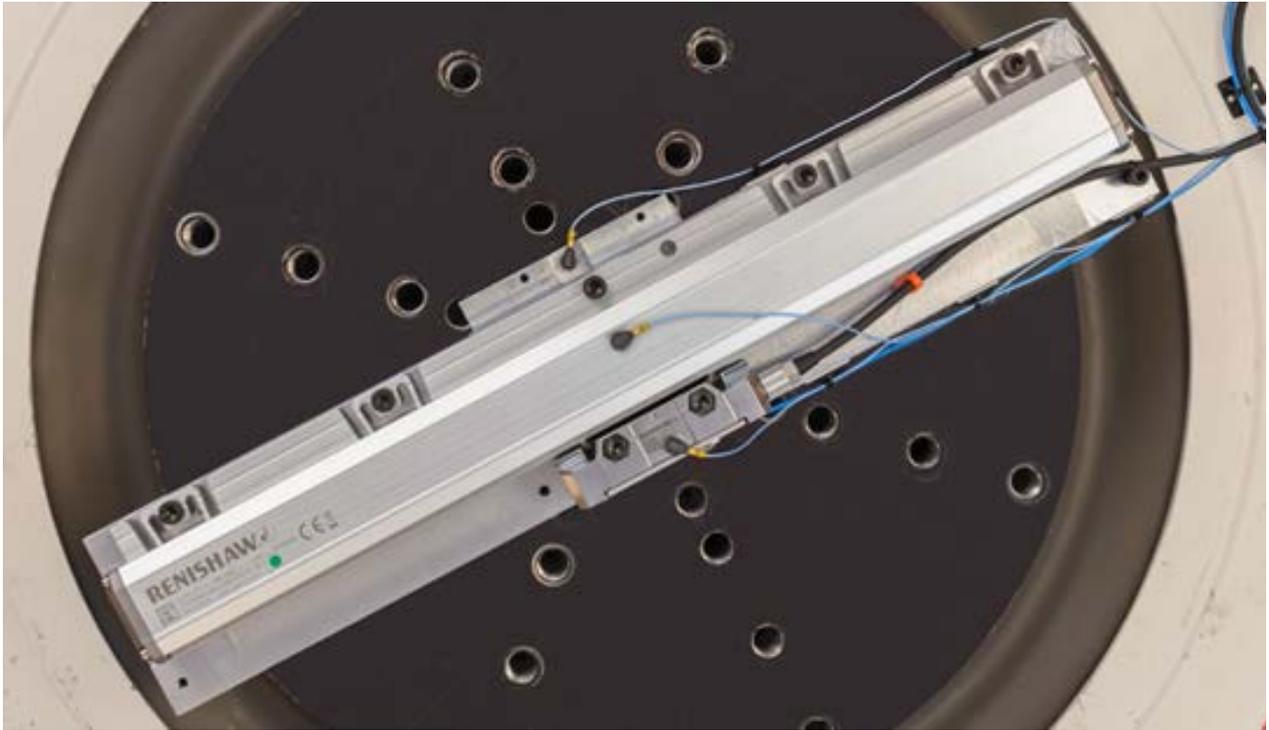
我们在设计调谐质量阻尼器时面临的第一大挑战就是，预测各种候选O形圈材料在动态条件下的特性。我需要使用这些数据进行模拟测试，以选择合适的橡胶硬度来分散频率响应，使系统不易受到各部件尺寸变化的影响。

第二大挑战是，定义所选材料的特性，以便进行有限元分析。最后，我们需要优化和调整系统，并通过测试数据进行验证。最终的设计在读数头的共振频率范围内可产生最佳模态振型；调谐质量阻尼器的剩余谐波响应，在不同振动水平下对整个系统也可产生有利影响。

FORTiS高级机械设计工程师, Krys Jurczyk

振动测试：正弦振动测试

我们对FORTiS光栅进行了测试，以测量绝对位置读数相对于起始值的偏差。当暴露于频率范围为50 Hz至2,000 Hz的正弦扫频振动中时，分别在1 g、3 g、5 g、10 g、15 g、20 g和25 g的振动幅值下进行测试。在本白皮书中未介绍的其他测试中，在30 g至75 g的振动幅值范围内也分别进行了测试。此外，在强烈的随机振动下也进行了额外测试。



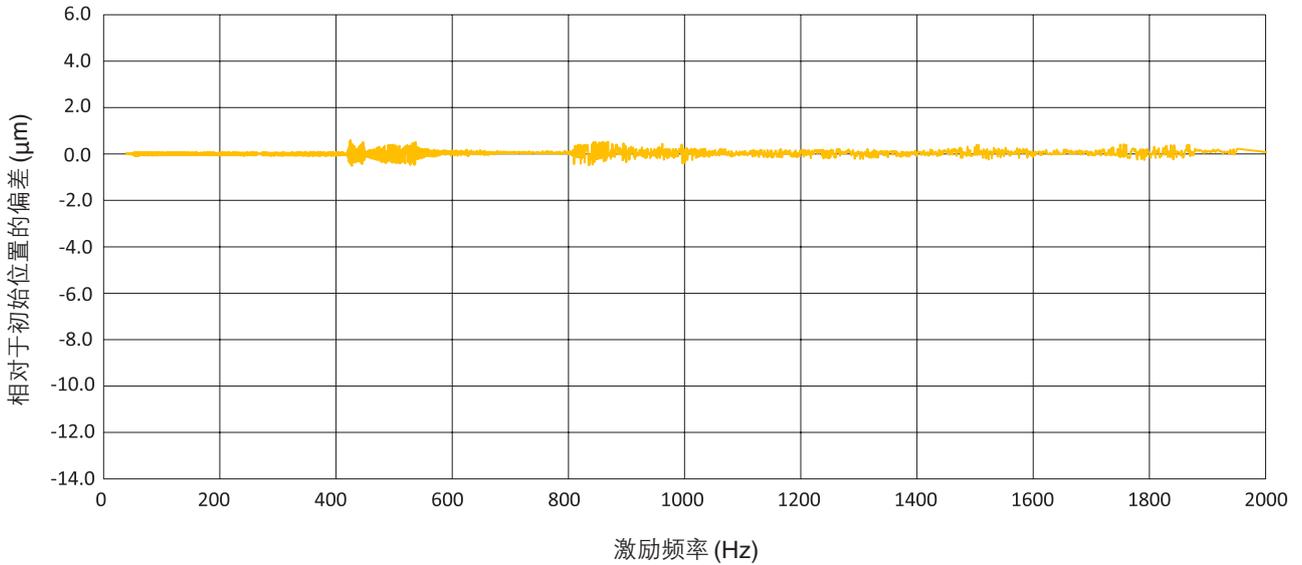
对直接安装在基体上的FORTiS-S光栅和FORTiS-N™光栅，以及固定在安装板上的FORTiS-N光栅进行了上述测试。FORTiS-N光栅采用与FORTiS-S光栅相同的技术，但截面尺寸细窄，适合空间狭小应用。

为了对比，我们对具有同等尺寸、形状和功能的传统封闭式光栅也进行了测试。

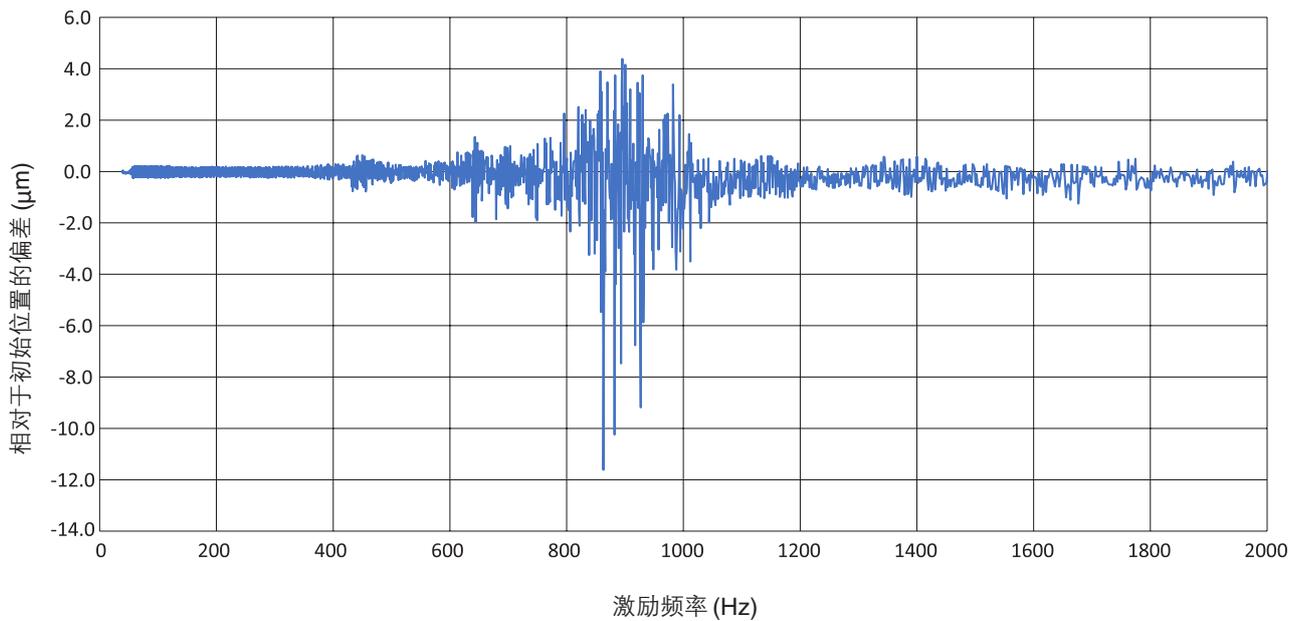
FORTiS-N光栅与传统光栅对比 (使用安装板)

下方图表显示了FORTiS-N光栅与传统封闭式光栅的位置偏差。在这两项测试中, 光栅均安装在安装板上。正弦振动测试曲线的振动幅值为, 在Z轴方向上 (朝着栅尺) 施加15 g。

在50 - 2,000 Hz的频率范围内, 在Z轴方向上施加15 g振幅时,
FORTiS-N光栅 (使用安装板) 的位置偏差



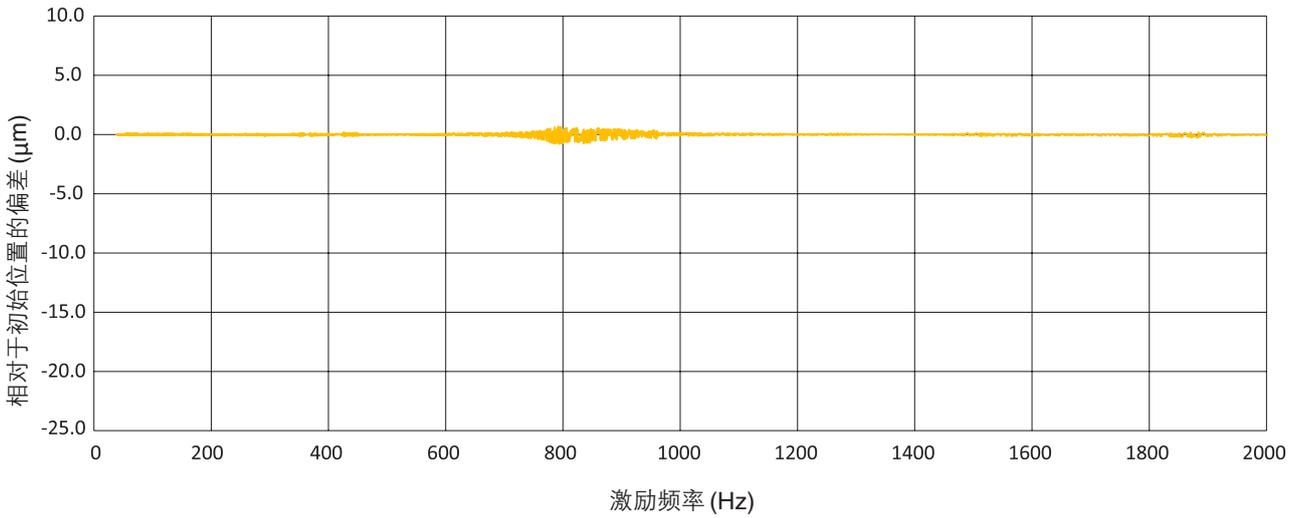
在50 - 2,000 Hz的频率范围内, 在Z轴方向上施加15 g振幅时,
传统光栅 (使用安装板) 的位置偏差



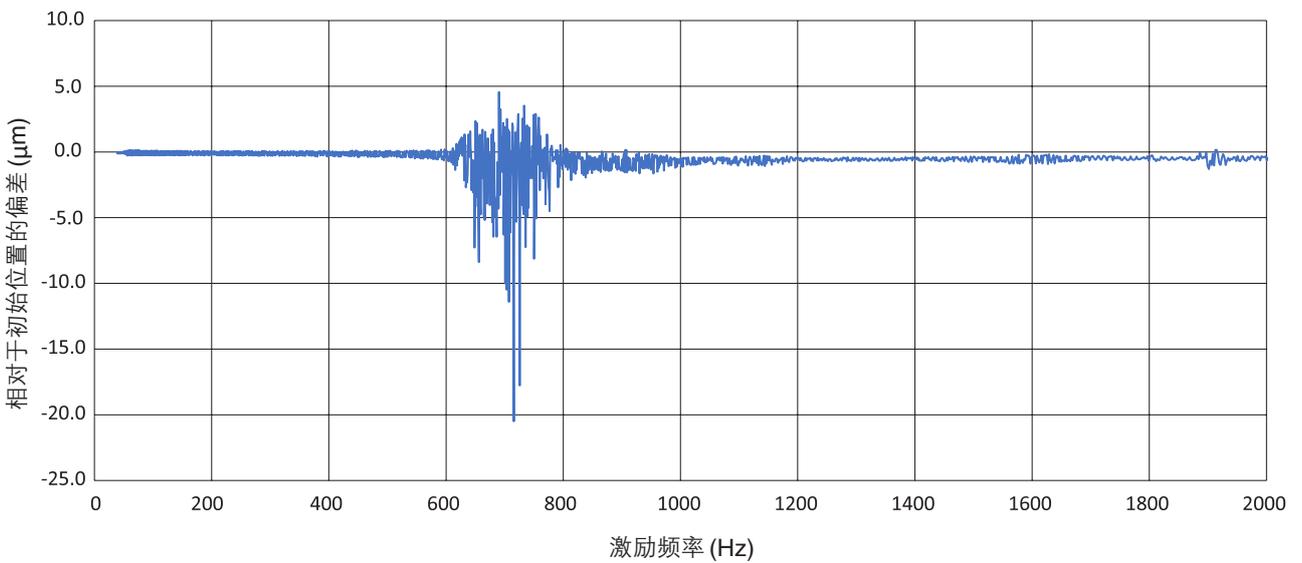
FORTiS-N光栅与传统光栅对比 (直接安装)

第二组图表显示了FORTiS-N光栅与传统光栅的位置偏差,但这两款光栅均直接安装在基体(测试夹具)上。在这项测试中,在Z轴方向上施加10 g的振动幅值。

在50 - 2,000 Hz的频率范围内,在Z轴方向上施加10 g振幅时,
FORTiS-N光栅(直接安装)的位置偏差

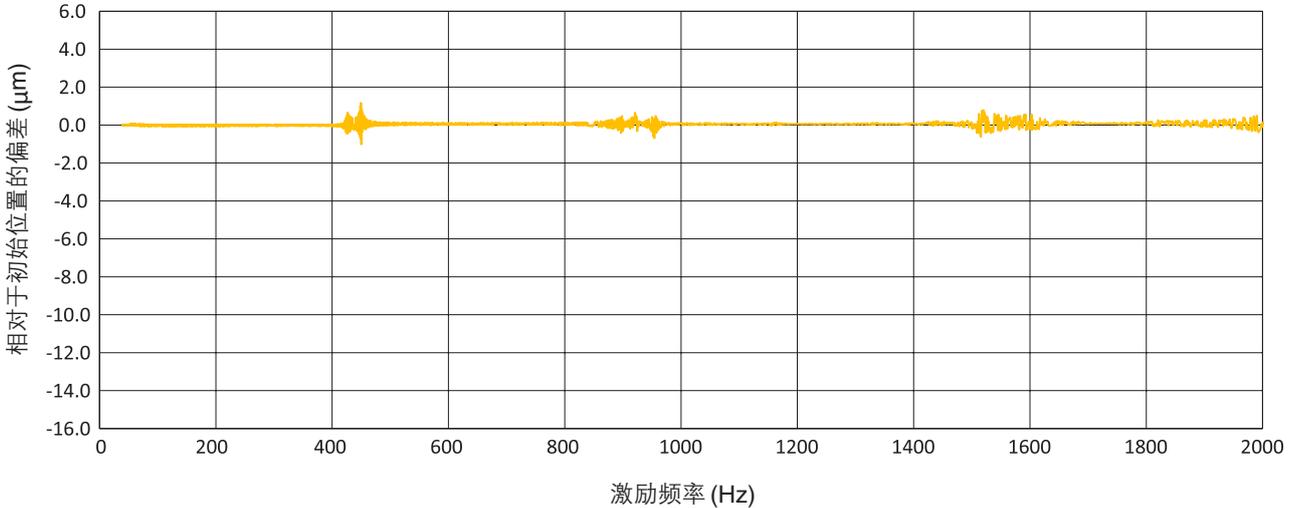


在50 - 2,000 Hz的频率范围内,在Z轴方向上施加10 g振幅时,
传统光栅(直接安装)的位置偏差

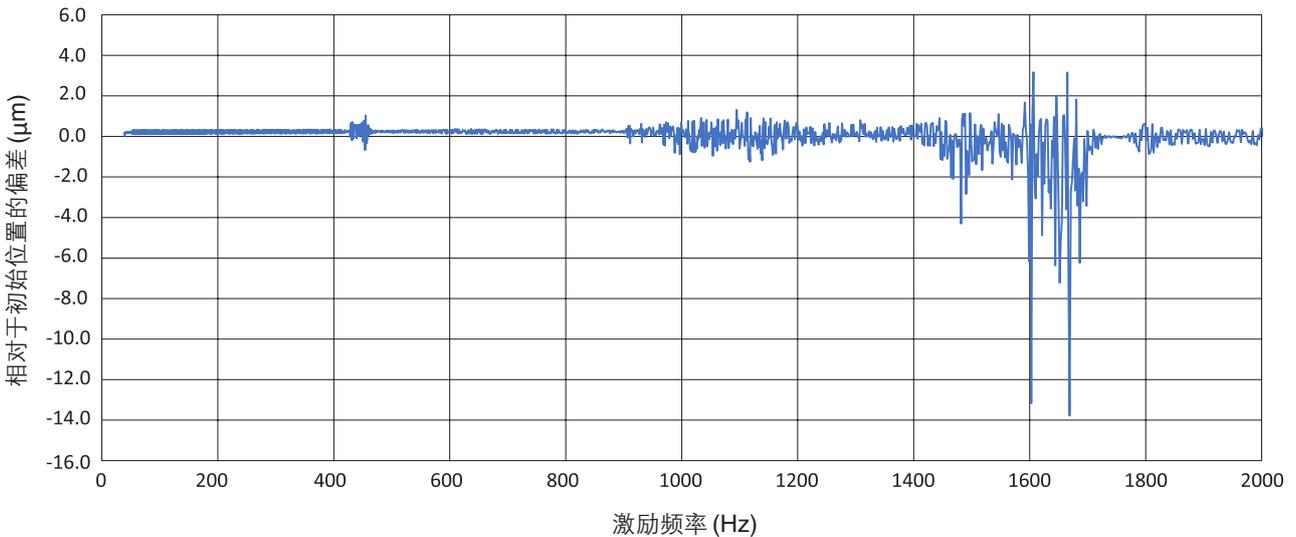


第三组图表显示了FORTiS-S光栅与传统光栅的位置偏差。这些标准尺寸的光栅均直接安装在基体（测试夹具）上。在这项测试中，在Z轴方向上施加25 g的振动幅值。

在50 - 2,000 Hz的频率范围内，在Z轴方向上施加25 g振幅时，
FORTiS-S光栅（直接安装）的位置偏差



在50 - 2,000 Hz的频率范围内，在Z轴方向上施加25 g振幅时，
传统光栅（直接安装）的位置偏差



结论

本白皮书中的测试结果证明，在50 Hz至2,000 Hz的全频谱范围内，以各种振幅进行测试时，FORTiS光栅都具有良好的位置稳定性和可靠的运行性能。同时还证明，FORTiS光栅在高振动环境中具有较长的使用寿命。

经过与无调谐质量阻尼技术的传统封闭式光栅对比，结果表明FORTiS光栅具有优异的抗振性。因此，FORTiS光栅具有优异的位置稳定性，在机床应用中有助于改进制程控制。

www.renishaw.com.cn/contact

#雷尼绍

© 2023-2024 Renishaw plc. 版权所有。RENISHAW®和测头图案是Renishaw plc的注册商标。
Renishaw产品名、型号和“apply innovation”标识为Renishaw plc或其子公司的商标。
其他品牌名、产品名或公司名为其各自所有者的商标。
Renishaw plc. 在英格兰和威尔士注册。公司编号：1106260。注册办公地：New Mills, Wotton-under-Edge, Glos, GL12 8JR, UK。
在出版本文时，我们为核实本文的准确性作出了巨大努力，但在法律允许的范围内，无论因何产生的所有担保、条件、声明和责任均被排除在外。



扫描关注雷尼绍官方微信

文档编号: PD-6517-9060-01-B

发布: 2024.01

上海 T +86 21 6180 6416 E shanghai@renishaw.com	天津 T +86 22 8485 7632 E tianjin@renishaw.com	青岛 T +86 532 8503 0208 E qingdao@renishaw.com
北京 T +86 10 8420 0202 E beijing@renishaw.com	成都 T +86 28 8652 8671 E chengdu@renishaw.com	西安 T +86 29 8833 7292 E xian@renishaw.com
广州 T +86 20 8550 9485 E guangzhou@renishaw.com	重庆 T +86 23 6865 6997 E chongqing@renishaw.com	宁波 T +86 574 8791 3785 E ningbo@renishaw.com
深圳 T +86 755 3369 2648 E shenzhen@renishaw.com	苏州 T +86 512 8686 5539 E suzhou@renishaw.com	郑州 T +86 371 6658 2150 E zhengzhou@renishaw.com
武汉 T +86 27 6552 7075 E wuhan@renishaw.com	沈阳 T +86 24 2334 1900 E shenyang@renishaw.com	