

Application Note

镜头盖系统仿真指南：LCS-FL-RNG15



摘要

本文档提供了环形压电式平面镜头盖系统 (LCS) (型号 LCS-FL-RNG15) 的原型仿真指南和结果。LCS 与 ULC1001 电气系统配合使用，可构建超声波镜头清洗 (ULC) 系统。

内容

1 首字母缩写词.....	1
2 简介.....	1
3 仿真环境.....	3
4 镜头仿真.....	5
5 压电式换能器仿真.....	7
6 镜头盖系统 (LCS) 仿真.....	11
6.1 物理场和边界条件.....	11
6.1.1 胶水.....	11
6.1.2 薄膜.....	12
6.1.3 外壳.....	12
6.2 结果.....	14
7 资源.....	16

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 首字母缩写词

- LCS - 镜头盖系统
- ULC - 超声波镜头清洗
- PZT - 锆钛酸铅
- FEA - 有限元分析

2 简介

超声波镜头清洁 (ULC) 系统是一种机电设计，用于自动检测并清洁汽车、安保和工业摄像头系统镜头上的水、冰或其他污染物。该技术的机械部分称为镜头盖系统 (LCS)。图 2-1 展示了基于环形压电元件的 LCS 元件，包括外壳盖、柔性密封件、薄膜、镜头、胶水、环形换能器和外壳底座。镜头盖由粘在透镜上的换能器和薄膜组成。镜头盖安装在外壳 (盖子 + 密封件 + 底座) 内以形成 LCS。图 2-2 展示了 LCS 的横截面视图。

LCS-FL-RNG15 及其各种元件的仿真可能非常复杂。一种更易于管理的方法是：首先仿真每个单独的元件，然后将所有元件整合在一起，为最终系统建模。

有关每个元件的细节图和尺寸，请参阅[镜头盖系统的设计、制造和组装指南：LCS-FL-RNG15](#)。

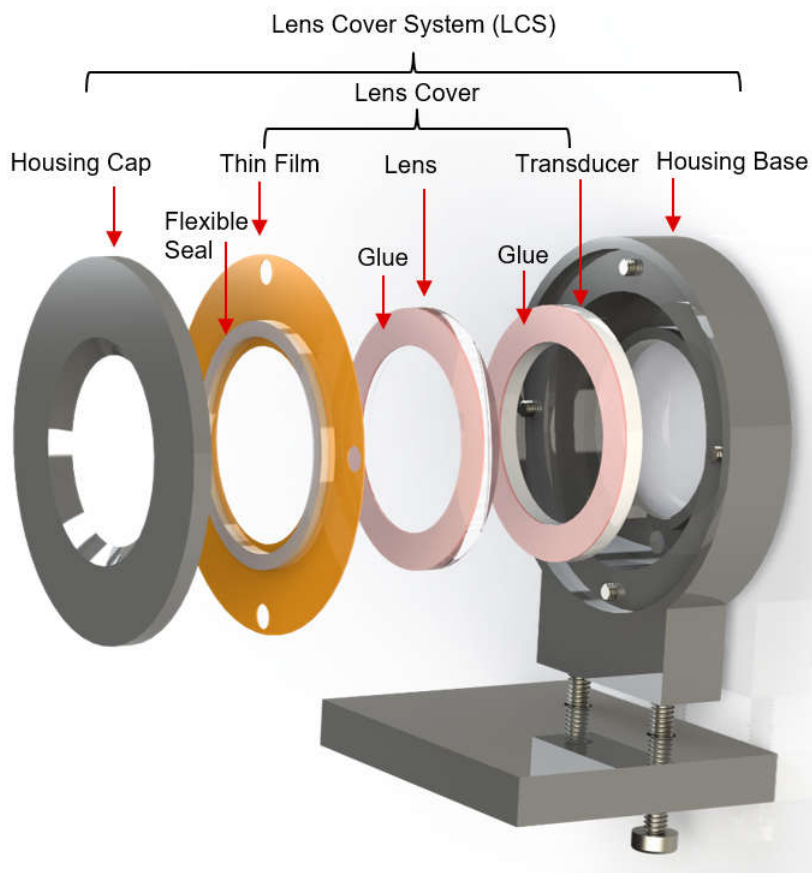


图 2-1. 平板透镜盖系统 (LCS) 图示

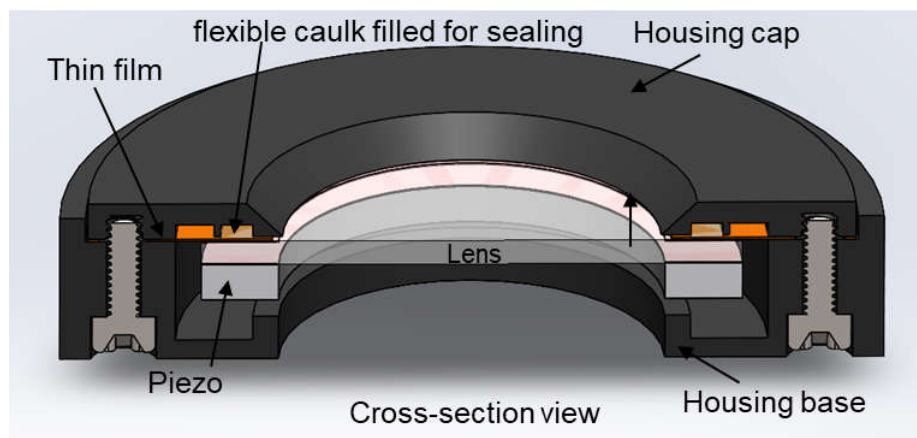


图 2-2. LCS 的横截面视图

3 仿真环境

TI 利用 COMSOL Multiphysics 6.0 进行仿真，但 ANSYS 等类似工具同样有效。此外，TI 整合了用于 MATLAB 的 COMSOL Livelink，以利用 MATLAB 脚本执行扫描和优化。

要运行 LCS 仿真，需要以下模块：

- Comsol Multiphysics
- MEMS 模块
- 声学模块

2D 轴对称仿真

在 COMSOL Multiphysics 中，2D 轴对称仿真利用径向 (r) 和垂直 (z) 方向，允许对具有旋转对称性的几何体进行建模。与 3D 仿真相比，这种方法显著减少了计算时间和资源，因为这只需要对几何体的横截面进行建模。

鉴于 LCS 具有轴对称性，我们可以利用 2D 轴对称仿真来优化我们的计算资源。由于 Lidar 应用的矩形镜头系统的非轴对称性质，因此为了仿真该系统，必须使用 3D 仿真。图 3-1 显示了所有可能的空间维度。为每个元件和最终 LCS 选择 2D 轴对称。

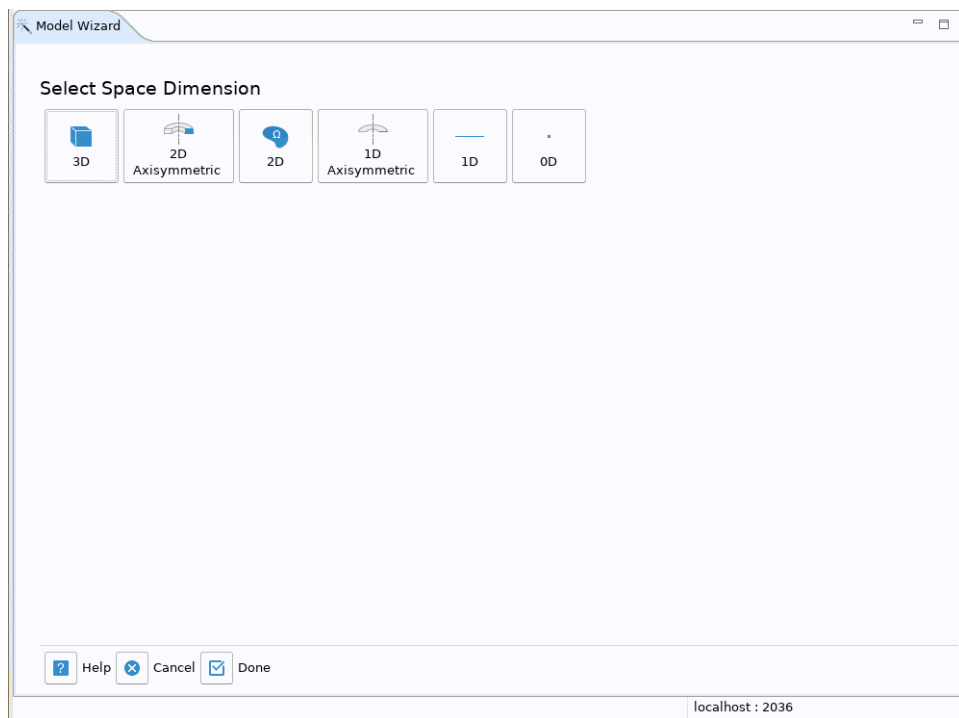


图 3-1. COMSOL 中的所有空间维度

图 3-2 显示了可供该仿真选择的物理场。所有元件（如镜头、压电元件、镜头盖等）都需要实体机械装置。当包含压电材料时，需要使用压电元件。对于 LC 滤波器仿真目的，电气电路是可选的。

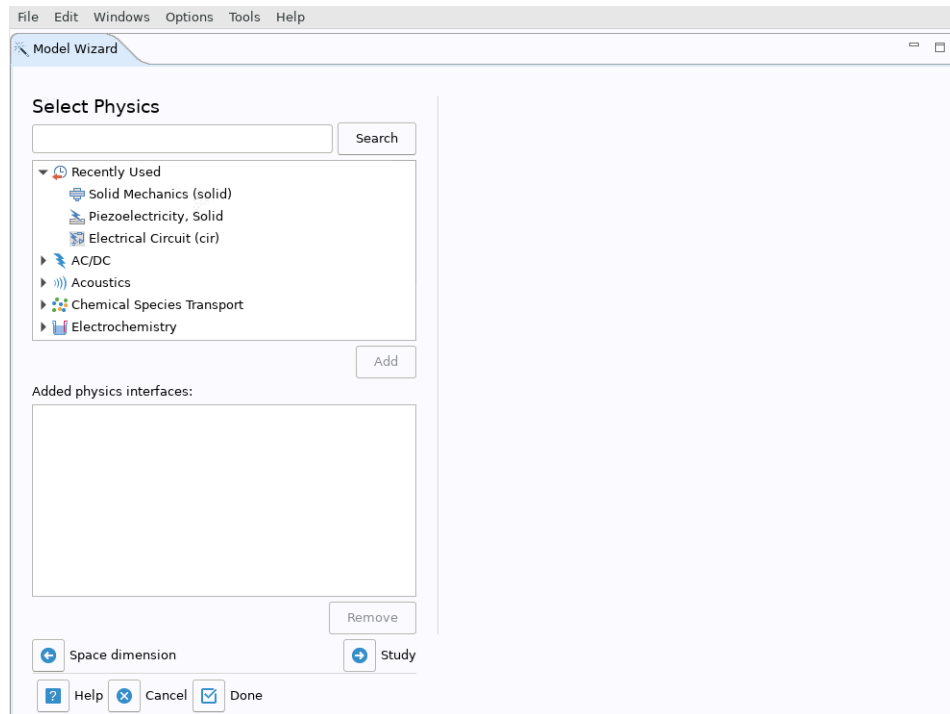


图 3-2. 选择物理场

4 镜头仿真

表 4-1 列出了镜头尺寸。

表 4-1. 透镜尺寸

参数	单位	值
桶形插头	mm	21
厚度	mm	1

在 LCS-FL-RNG15 中，TI 使用 CDGM HK9LGT® 作为镜头材料。有关材料特性，可参阅表 4-1。

表 4-2. 镜头的机械特性

参数	单位	值
杨氏模量	GPa	79.2
密度	kg/m ³	2520
泊松比	1	0.211

图 4-1 以 2D 轴对称视图展示了镜头几何形状。

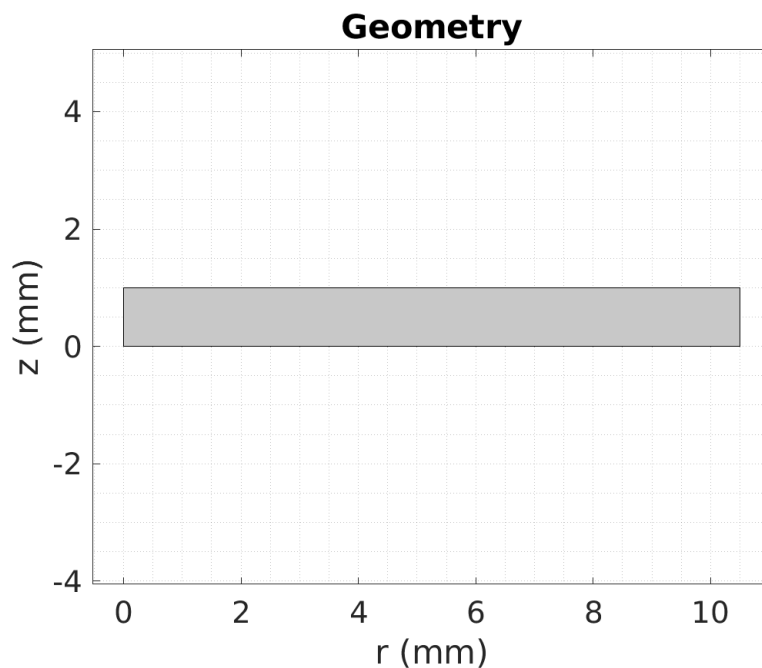


图 4-1. 镜头几何形状

为了仿真镜头，边界条件设置为自由条件。特征频率通过进行特征频率研究得出。结果如表 4-1 所示。

表 4-3. 镜头的特征频率

模式	(0 1)	(0 2)	(0 3)	(0 4)	(0 5)
频率 (kHz)	20.7	86.7	187.7	312.2	453.9

图 4-2 显示了镜头的模式形状。红色表示高加速度，蓝色表示低加速度。该设计中使用了模式 (0, 1) 和 (0, 2) 进行有效清洗，因为它们的节圆或盲点较少。此外，这些模式的谐振频率较低，因此所需的临界加速度较小。

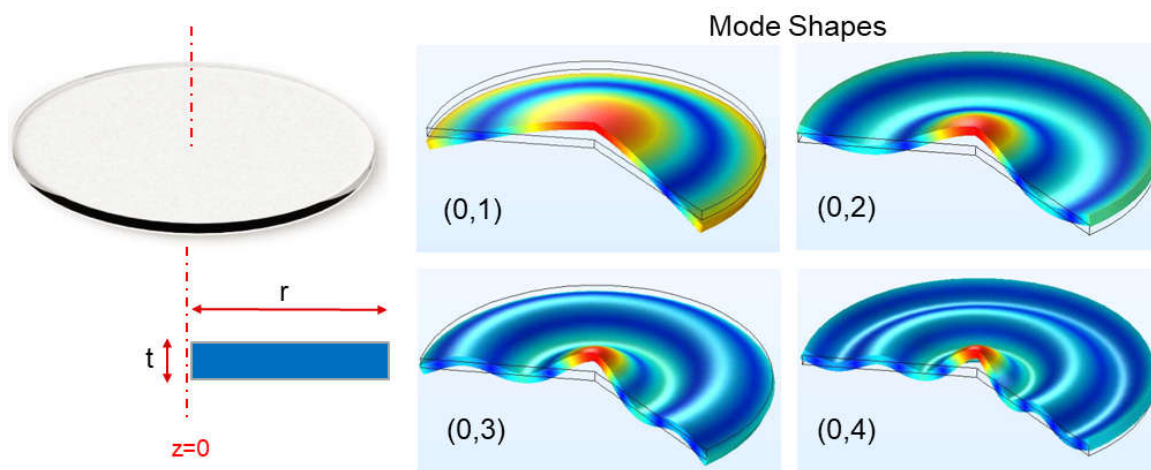


图 4-2. 镜头的模式形状

5 压电式换能器仿真

表 5-1 中列出了 LCS 中使用的压电元件尺寸。

表 5-1. 压电元件尺寸

参数	单位	值
Inner Diameter	mm	15
Outer Diameter	mm	21
厚度	mm	1.5

LCS 中使用了 PZT8，表 5-2 中列出了其材料特性。该表还列出了其他常见的压电元件材料及其材料特性。

表 5-2. 仿真中 PZT8 的材料特性

符号	说明	单位	Navy Type VI (PZT 5H)	Navy Type I (PZT 4)	Navy Type II (PZT 5A)	Navy Type III (PZT 8)
$\epsilon_{1,r}^x$	相对介电常数	1	3244.97	1193.04	1795.99	1219.69
$\epsilon_{3,r}^x$	相对介电常数	1	3984.62	1325.63	1802.77	989.52
$\tan \delta (3^x)$	电介质耗散因数	1	0.016	0.003	0.017	0.004
d_{31}	压电式电荷常数	C/N	-2.59e-10	-1.28e-10	-1.70e-10	-1.14e-10
d_{33}	压电式电荷常数	C/N	6.4e-10	3.28e-10	4.25e-10	2.75e-10
d_{15}	压电式电荷常数	C/N	6.16e-10	3.27e-10	5.06e-10	4.03e-10
$Q_{m,t}$	机械品质因数	1	59	373	74	1088
ρ	功率密度	kg/m3	7780	7700	7700	7700
s_{11}^e	合规性矩阵	m ² /N	1.82e-11	1.30e-11	1.7e-11	1.26e-11
s_{12}^e	合规性矩阵	m ² /N	-7.76e-12	-4.35e-12	-6.6e-12	-3.71e-12
s_{13}^e	合规性矩阵	m ² /N	-6.85e-12	-7.05e-12	-8.61e-12	-6.6e-12
s_{33}^e	合规性矩阵	m ² /N	1.8e-11	1.96e-11	2.32e-11	1.83e-11
s_{44}^e, s_{55}^e	合规性矩阵	m ² /N	3.8e-11	3.32e-11	4.35e-11	3.77e-11
s_{66}^e	合规性矩阵	m ² /N	5.2e-11	3.47e-11	4.71e-11	3.26e-11

换能器为环形，极化方向为顶部/底部。图 5-1 展示了 COMSOL 中的几何图。

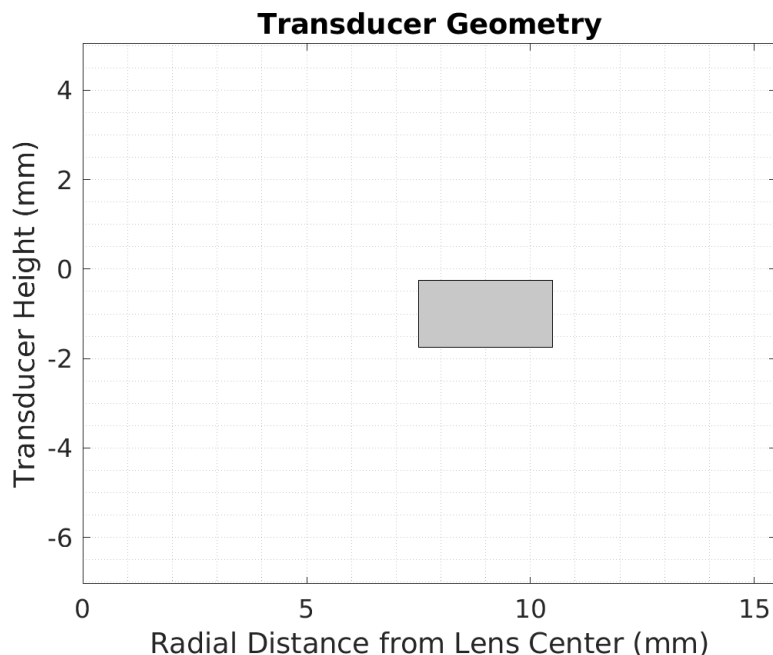


图 5-1. COMSOL 中的换能器几何形状

图 5-2 显示了坐标系选择，其中“材料 XZ 平面系”处于选中状态。

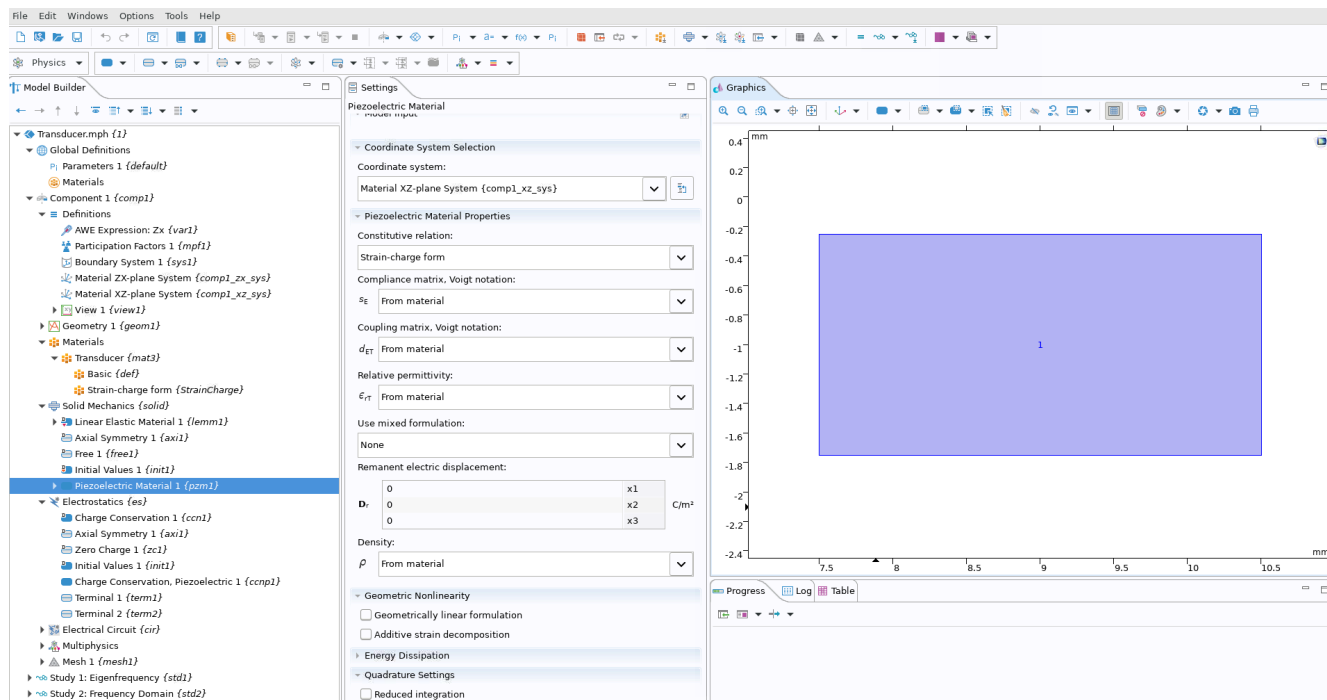


图 5-2. 压电元件：坐标系选择

在机械建模中，正确设置阻尼至关重要。包含两种类型的阻尼：机械阻尼和介电损耗。阻尼因子根据材料特性自动计算。图 5-3 和图 5-4 展示了 COMSOL 中压电元件的阻尼设置。

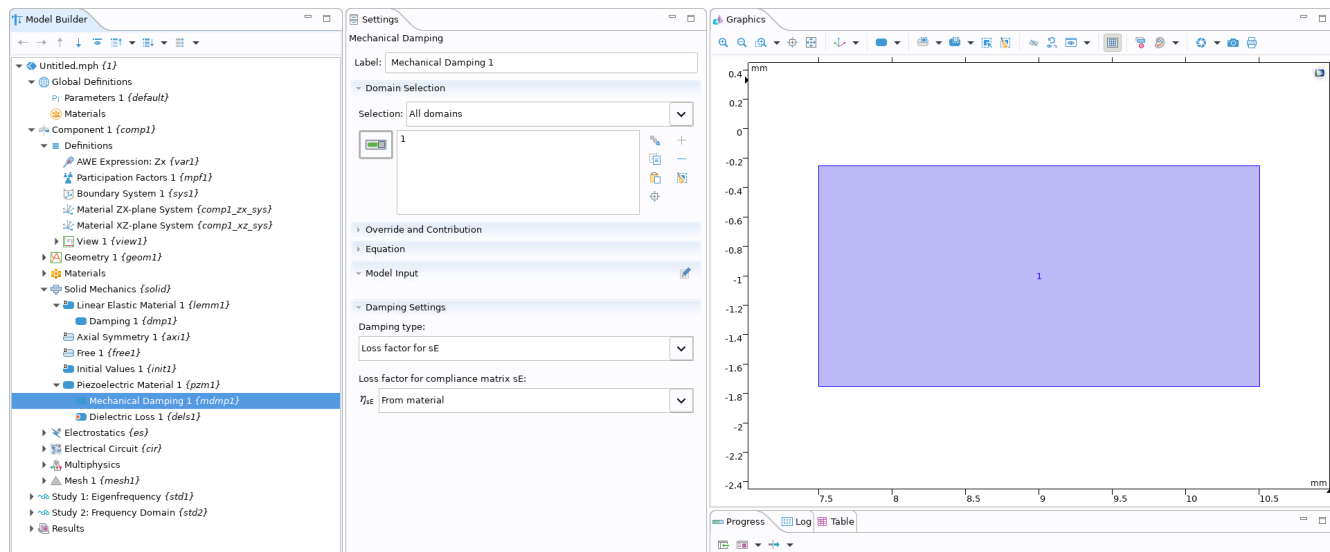


图 5-3. 压电元件：机械阻尼

与介电常数相关的损耗因子会根据压电元件材料的特性自动计算得出。

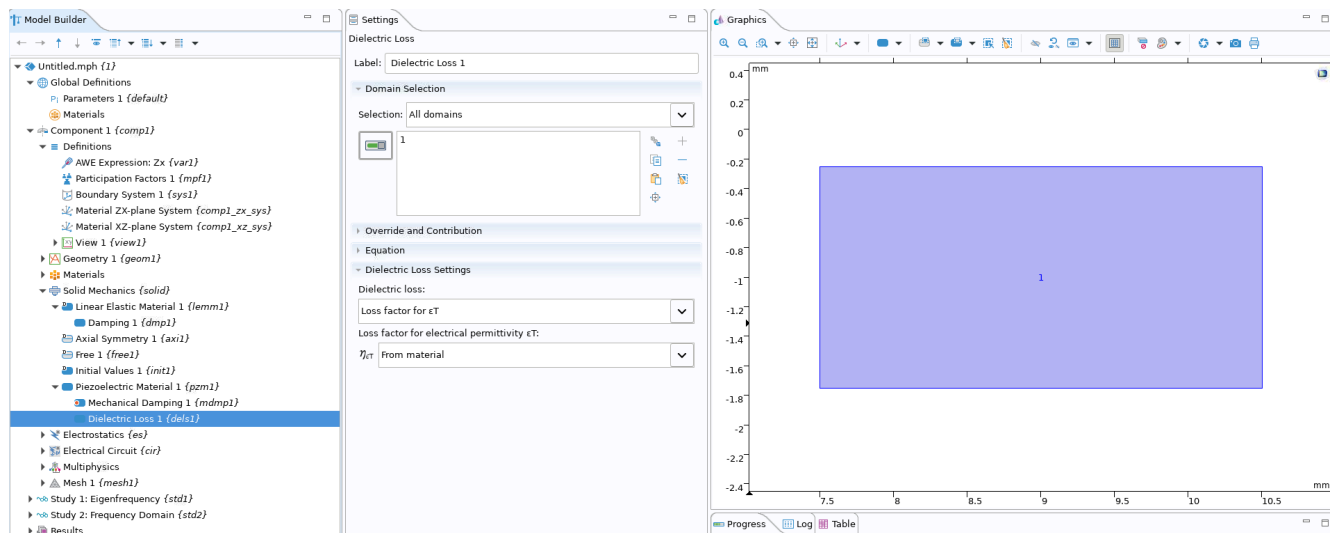


图 5-4. 压电元件：电介质损耗

压电极位于压电元件的上下表面，因此我们将终端 2 和终端 3 指定为静电的两端。图 5-5 展示了终端选择的屏幕截图。

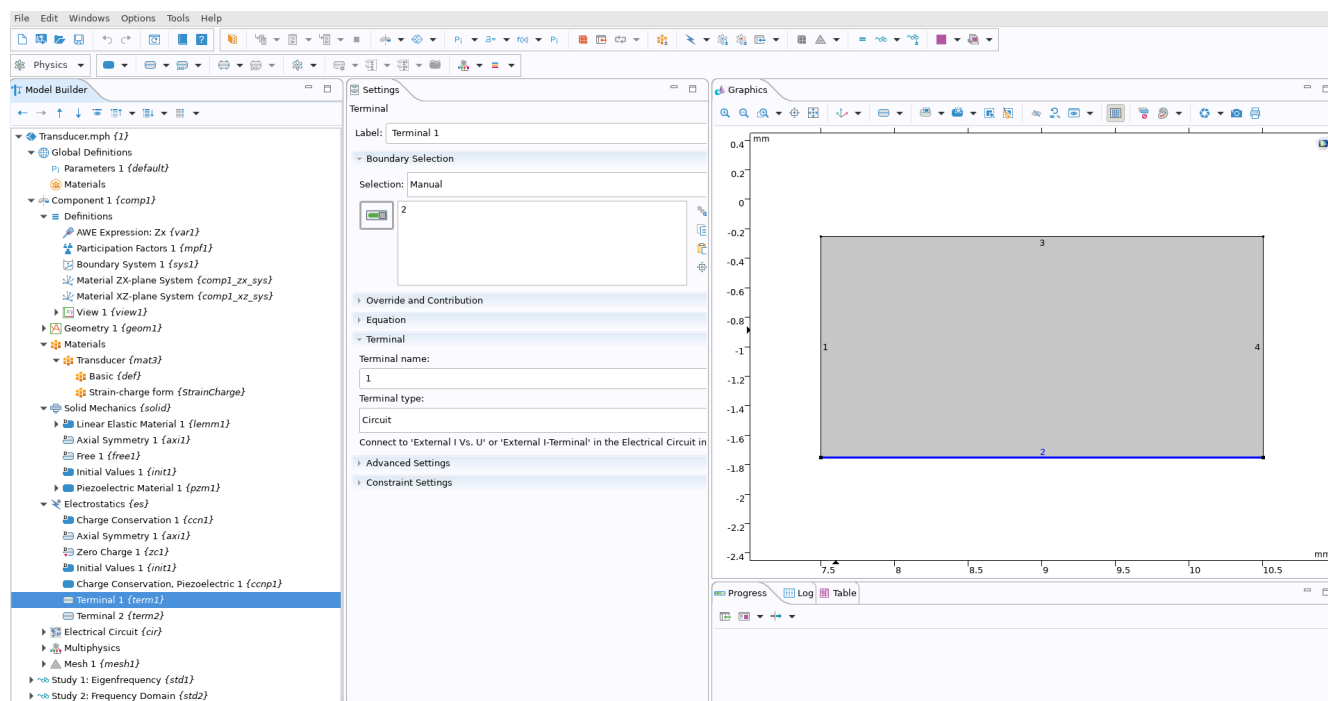


图 5-5. 压电元件：终端选择

通过进行频域研究，我们可以观察到 20kHz 至 700kHz 范围内的阻抗响应，如下面的图 5-6 所示。第一种模式发生在 59kHz 处，被识别为径向模式，在这种模式下，压电元件的内径和外径在保持恒定宽度的同时均匀变化。相比之下，525kHz 处的第二种模式表示厚度模式，其特征是厚度和宽度的变化。

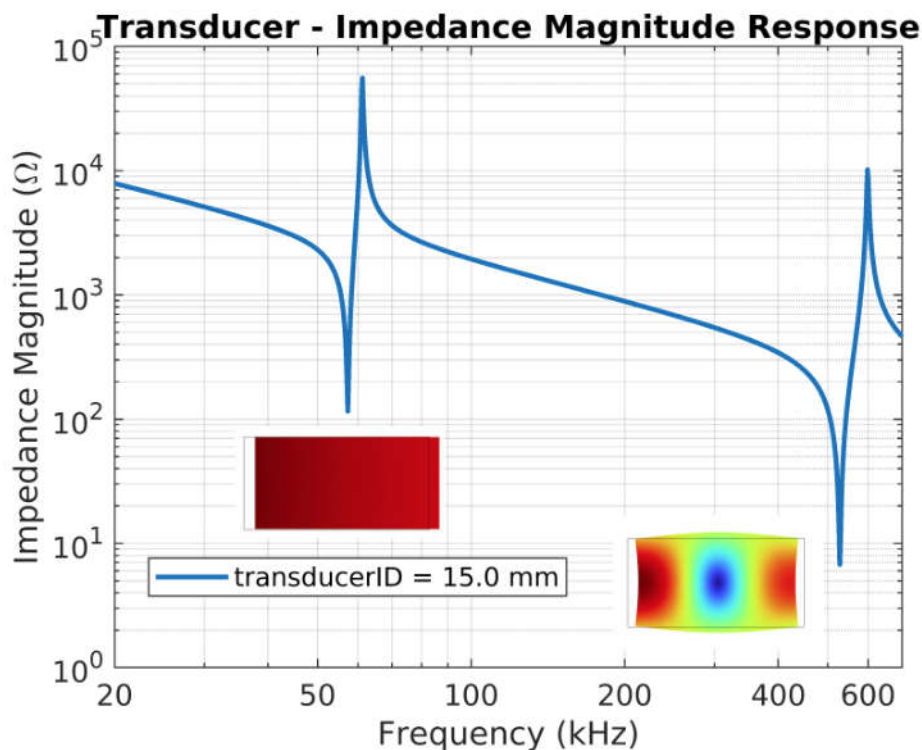


图 5-6. 压电式换能器的阻抗响应。

6 镜头盖系统 (LCS) 仿真

图 6-1 显示了 LCS 几何体的简化图。外壳简化为固定方框。电容器未显示，而是由阻尼因子表示。

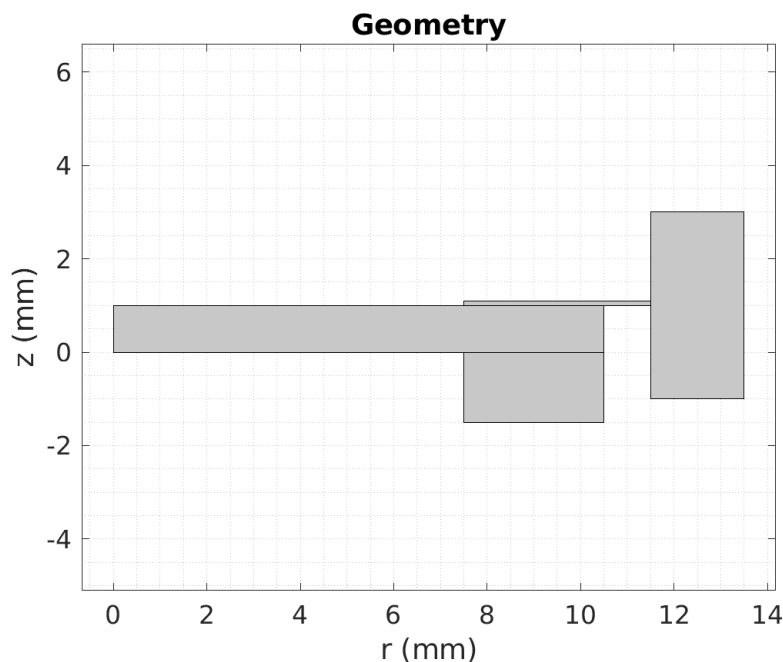


图 6-1. LCS : 几何

6.1 物理场和边界条件

6.1.1 胶水

在 LCS-FL-RNG15 中，TI 使用 EPO-TEK 323LP-LH 作为硬胶材料。有关胶水的材料特性，可参阅下面的表 6-1。

表 6-1. 胶水的材料特性

参数	单位	值
杨氏模量	GPa	2.67
密度	Kg/m ³	1190
泊松比	1	0.30

胶合层涂覆于两个接口。一个是镜头与压电元件之间的接口，另一个是镜头与薄膜之间的接口。胶水使用薄弹性层建模，这是 COMSOL 建议用于精确仿真薄型胶粘剂特性的模型。仿真中采用了 0.02 的阻尼损耗因子。图 6-2 展示了设置的屏幕截图。

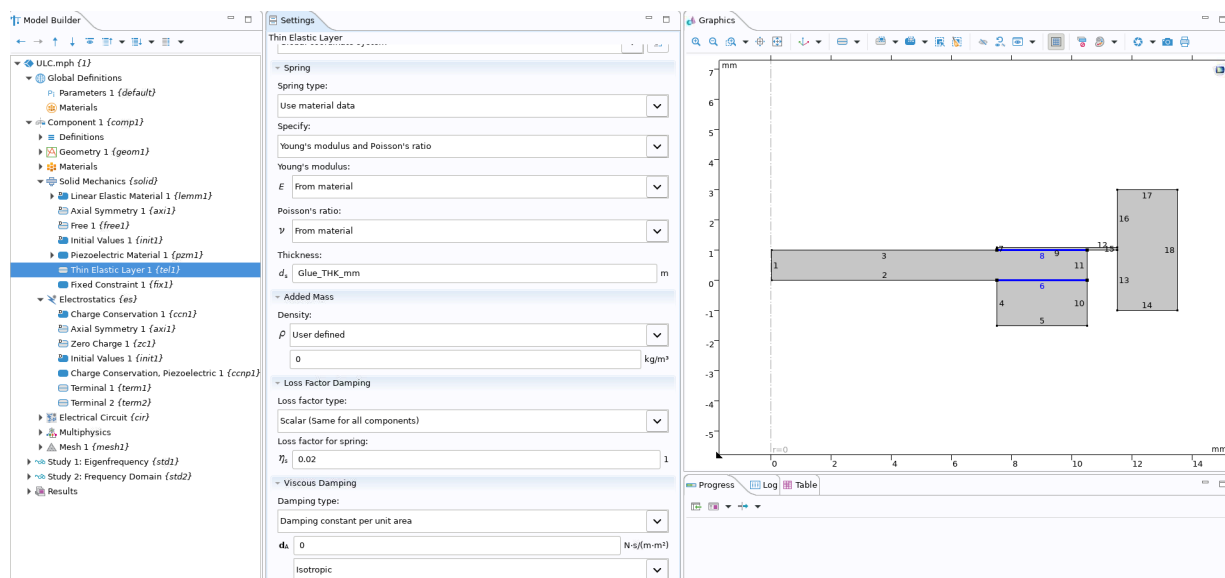


图 6-2. 胶水的薄弹性层

6.1.2 薄膜

在 LCS-FL-RNG15 中，TI 使用聚酰胺作为薄膜。表 6-2 中列出了薄膜的材料特性。

表 6-2. 薄膜的材料特性

参数	单位	值
杨氏模量	GPa	2.5
密度	Kg/m ³	1420
泊松比	1	0.34

薄膜以及外壳和镜头均采用线性弹性材料建模，各向同性阻尼因子为 0.005。图 6-3 中显示了相关设置。

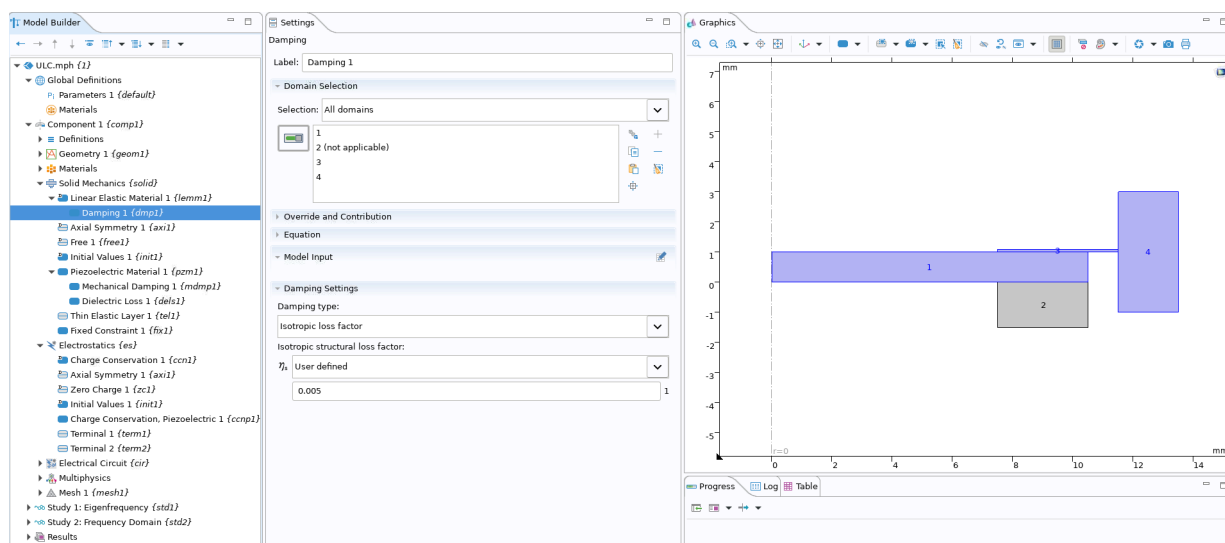


图 6-3. 薄膜的线性弹性模型

6.1.3 外壳

TI 使用 Delrin Black 作为 LCS-FL-RNG15 中的外壳材料。图 6-4 中列出了材料特性

表 6-3. 外壳材料特性

参数	单位	值
杨氏模量	GPa	2.0
密度	Kg/m ³	1420
泊松比	1	0.35

在该模型中，外壳由一个矩形方框建模，并施加固定边界条件，如图 6-4 所示。其他所有域均设置为“自由”域。

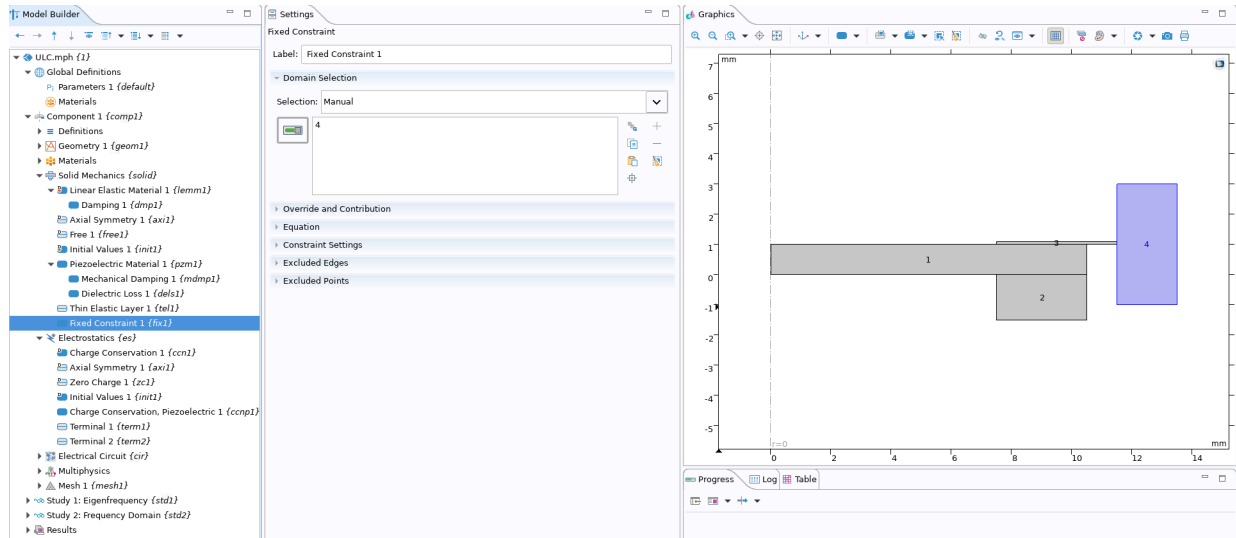


图 6-4. 外壳的固定边界条件

6.2 结果

图 6-5 通过进行频率研究，展示了镜头中心的加速响应和 20kHz 至 100kHz 的阻抗响应。在此范围内，仿真谐振频率为 29.2kHz 和 64.3kHz。值得注意的是，两处峰值的加速度都超过了雾化阈值。表 6-4 中列出了这两种模式的关键特性。

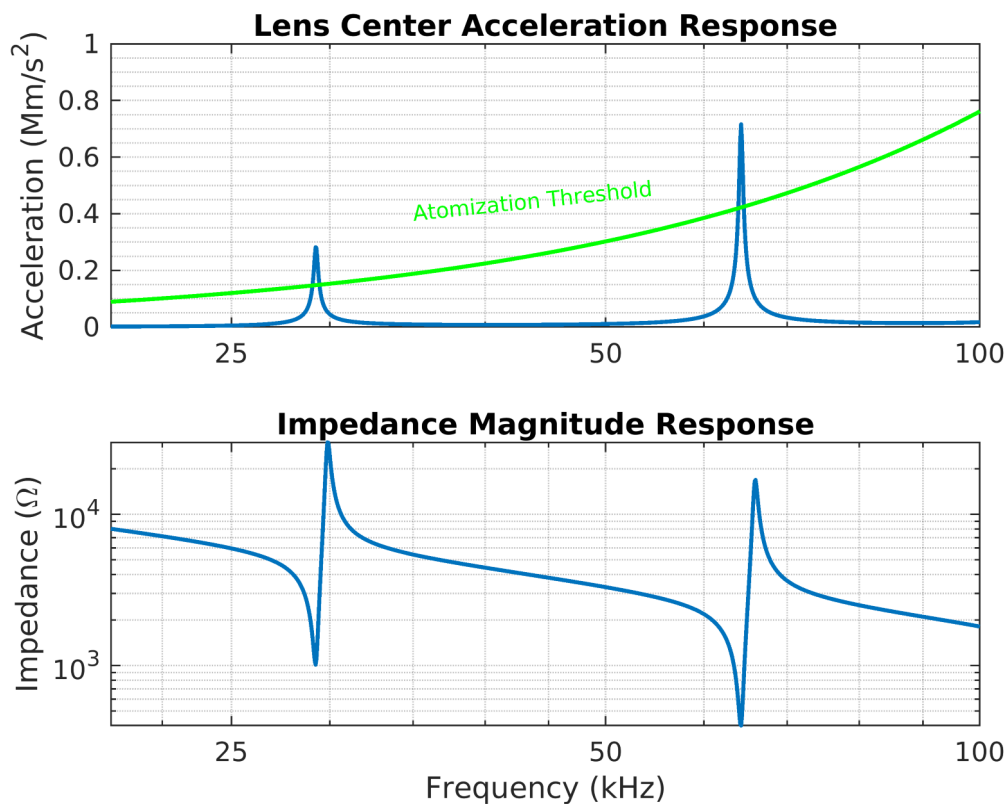


图 6-5. LCS：镜头中心加速度和阻抗响应

表 6-4. 模式 (0 1) 和 (0 2) 的关键特性。

模式	谐振频率 (kHz)	阻抗 (Ω)	加速度 (10 ⁶ m/s ²)
(0 1)	29.2	1018	0.28
(0 2)	64.3	403	0.72

图 6-6 展示了两种特定模式下 LCS 的模式形状。在模式 (0 1) 中，可以看到加速度从中心向边缘逐渐减小，颜色由红色变为蓝色。在模式 (0 2) 中，加速度同样从中心向中间区域逐渐减小，随后从中间区域向边缘再次增大。

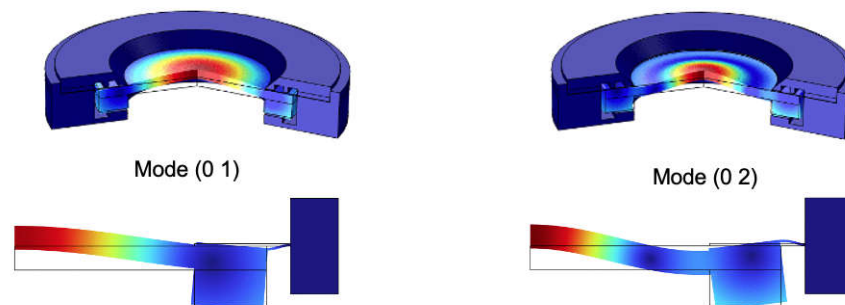


图 6-6. LCS：模式 (0 1) 和模式 (0 2) 下的模式形状

图 6-7 展示了 LCS 的镜头表面的加速度，突出显示了从中心到边缘的变化。请注意，只有中央区域超过雾化阈值，因而能够有效排出水分，而边缘区域则不具备这种能力。

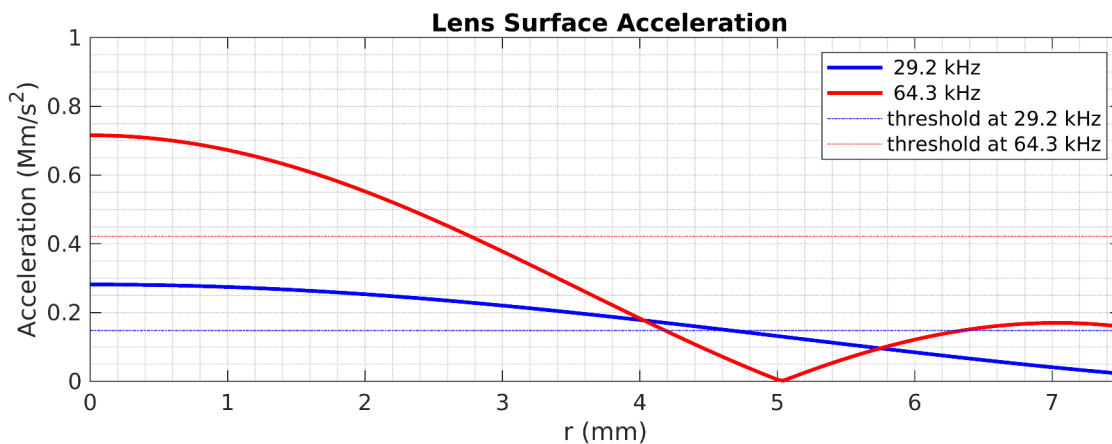


图 6-7. LCS : 镜头表面加速度

7 资源

1. 德州仪器 (TI), [什么是超声波镜头清洁技术?](#)。
2. 德州仪器 (TI), [超声波镜头清洗：一项您未曾意识到必备的固态技术。](#)
3. 德州仪器 (TI), [镜头盖系统的设计、制造和组装指南：LCS-FL-RNG15.](#)

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月