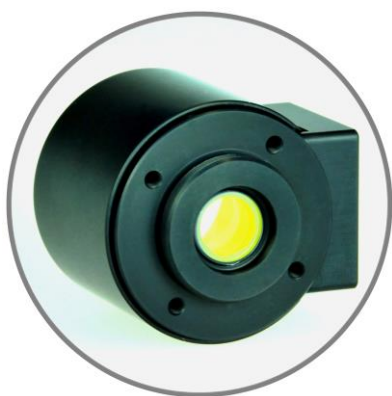




激光加工应用说明书

基于 EL-10-42-OF 可调焦液体透镜与 EL-E-OF-A 控制板

新特光电是 Optotune 在中国的授权合作伙伴，一站式提供其全系列可调光学元件（液态可调焦镜头、精密&快速光束控制反射振镜、光束位移器、激光散斑衰减器及控制器）的选型匹配、应用方案设计及应用系统集成与工程落地全生命周期的技术支持。通过可调光学技术，实现焦距动态调节、光束精准偏转与高质量成像优化，广泛应用于激光加工、机器视觉检测、3D成像及高端科研系统等场景。

液态可调焦镜头：<https://www.sintecclaser.com/optical/liquid-lens.html>

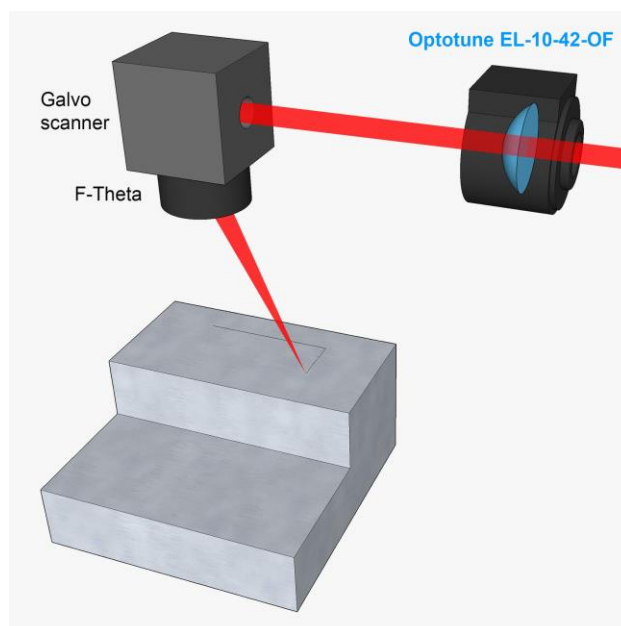
精密&快速光束控制反射振镜：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-steering.html>

光束位移器：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-shifting-devices.html>

激光散斑衰减器：<https://www.sintecclaser.com/optical/laser-speckle-reducers.html>

我们还可提供不同通光孔径、调焦范围、光束偏转角度及涂层波长（UV-IR）的定制化可调光学解决方案，满足从科研到工业量产的多样化需求。获取最新方案及报价，请联系：

手机|微信：罗经理：18162698939，夏经理：13697356016

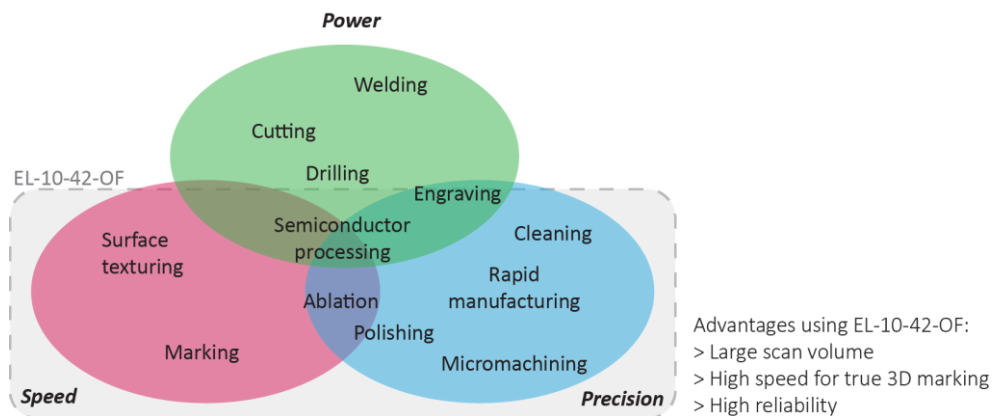


1. 引言

目前市场上常用的激光加工 Z 轴控制方案主要依赖光学元件的机械平移。此类方法的主要局限在于移动速度较慢、Z 向行程有限。此外，精密的可动部件寿命有限，且在系统集成中占用空间较大。

在本应用说明中，我们介绍如何将 Optotune EL-10-42-OF 可调焦液体透镜与 EL-E-OF-A 控制板集成到不同的激光加工系统中。EL-10-42-OF 透镜重量轻、体积小、响应速度快且寿命长，因此能够有效克服机械方案的诸多缺点，同时降低系统成本。

EL-10-42-OF 透镜专为脉冲激光设计，提供两种波长选项：近红外波段（950–1100 nm）和可见光波段（532 nm）。这为在多种激光加工应用中使用 EL-10-42-OF 透镜提供了可能性，如下所示。



2. 使用 EL-E-OF-A 控制板控制 EL-10-42-OF 透镜

Optotune 的 EL-E-OF-A 控制板 专为控制 EL-10-42-OF 透镜而设计。当 EL-10-42-OF 透镜沿 Z 轴（垂直方向）移动激光光斑时，振镜（galvo mirrors）负责在 X-Y 平面（水平方向）偏转激光光斑。这种控制方式在第 3 节介绍的紧凑型激光打标机中得到实现，示意如图 1 左侧面板所示。

PC（用户端）与 XY2-100 数字控制卡的通信通常通过串行总线（如 USB）建立。在扩展的 XY2-100 协议中，除用于控制振镜的 X、Y 轴外，Z 轴信号已可用于控制 EL-10-42-OF 透镜。控制卡将 X、Y 轴的数字信号传输至扫描头以控制振镜；Z 轴的数字信号则需通过 数模转换板（例如 SCAPS AEB-2 板）转换为模拟电压。图 1 右侧面板显示了另一种可能的集成方式，当 XY2-100 控制卡具有辅助模拟电压输出时，该输出常用于控制外部设备，如 Z 轴工作台。

使用 EL-E-OF-A 的配置非常适合处理需要在不同高度（Z 轴步进）进行激光加工的平面工件。由于每次 Z 坐标变化都会中断加工过程，若需实现高速 3D 加工，则更适合使用数字控制器，如另一份应用说明中所述。在此配置中，Z 轴控制板可与工业实时总线（例如 XY2-100 协议）同步，实现沿三维轮廓的高速聚焦。

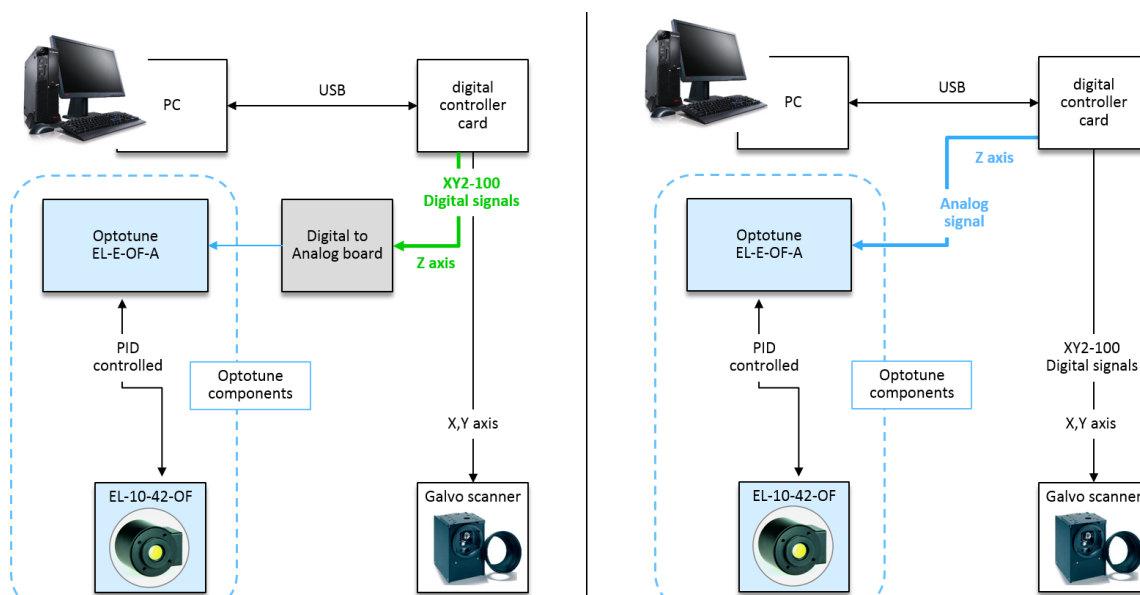


图 1: 左侧面板显示了 Optotune EL-10-42-OF 透镜在数字协议系统中的集成方式, 该协议提供 X、Y 和 Z 轴信号。其中 Z 轴信号通过数模转换, 用于驱动 Optotune EL-E-OF-A 控制板。右侧面板显示另一种方式: 透镜直接由控制卡提供的模拟信号控制。

3. 系统集成

图 2 展示了 Optotune 构建的 1064 nm 紧凑型 2.5D 激光打标系统的集成示例。由于体积紧凑, EL-10-42-OF 透镜可方便地安装在激光输出端与振镜扫描头之间的空隙中 (见图 3)。为确保激光束、EL-10-42-OF 透镜与振镜头光阑同轴, 需要为 EL-10-42-OF 透镜设计专用的机械支架。



图 2: 激光打标系统示意图, 采用电动可调焦透镜 EL-10-42-OF 及其模拟控制器 EL-E-OF-A, 实现快速 Z 轴聚焦。

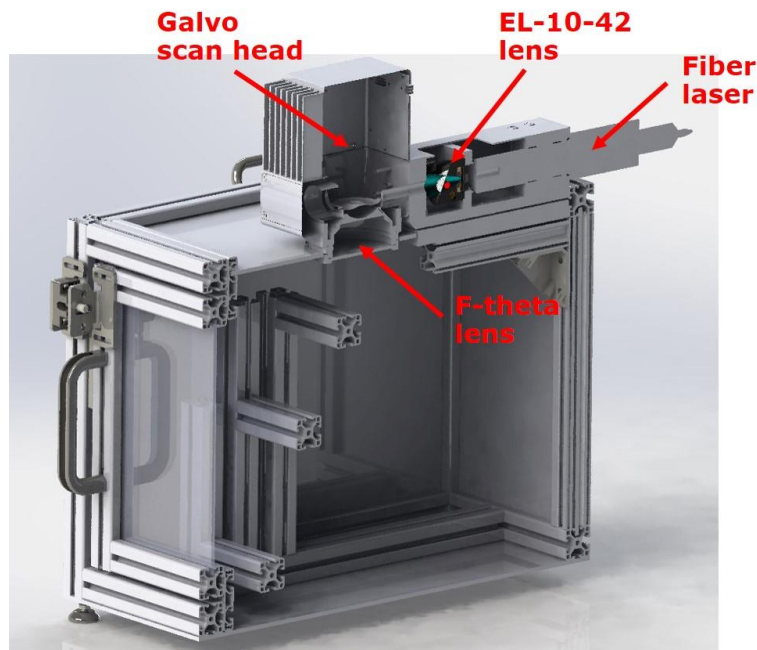


图 3：激光打标演示系统示意图。电动可调焦透镜 EL-10-42-OF 安装在激光头与振镜之间。

下表总结了演示型激光打标系统的主要技术规格。

基本规格

外形尺寸	400 x 400 x 300	mm
重量	约 15	kg
中心位置标记范围	100 x 100	mm
激光等级	1 (带外壳)	
激光器供应商	IPG / Nufern	
最大激光功率	20 / 50	W
波长	1064	nm
典型光斑直径	approximately 60	μm
场镜焦距	160	mm
典型跳转速度	6000	mm/s
Z 轴调焦范围	100	mm
控制软件	SCAPS SAMLight	

3.1.与 F-Theta 镜头的集成

上一节展示的系统布局是激光加工系统中几种典型布局之一。本节将展示 EL-10-42-OF 透镜 配合三种常用光学布局的应用。不同 F-Theta 镜头组合下的 Z 轴调焦范围如图 4 所示。

在所有三种情况下，输出激光光束直径约为 6 mm。EL-10-42-OF 透镜 安装在从激光输出到振镜扫描头的光路上。随后，光束被振镜反射，实现目标平面上 X、Y 方向的偏转。模拟结果中显示的标记场尺寸对应振镜偏转角 $\pm 10^\circ$ 。激光光斑的 Z 位置由 EL-10-42-OF 透镜的焦距调节控制。对于焦距较长的 F-Theta 镜头，Z 轴调焦范围及标记场尺寸均会增大。在每种配置中，EL-10-42-OF 的焦距在最大范围内调节（-2 屈光度至 +2 屈光度）。标记平面的场平整化及最终聚焦由 F-Theta 镜头完成。该配置易于实现，因为 EL-10-42-OF 可直接集成到现有系统中。

¹ 根据需求，我们可提供所示光学配置的 ZEMAX 模型。

注意事项：当 EL-10-42-OF 调节输入光束的会聚或发散时，F-Theta 光学元件的固有缺陷会略微增强场像畸变。为获得最佳标记质量，应在软件端进行补偿，例如引入校正网格。

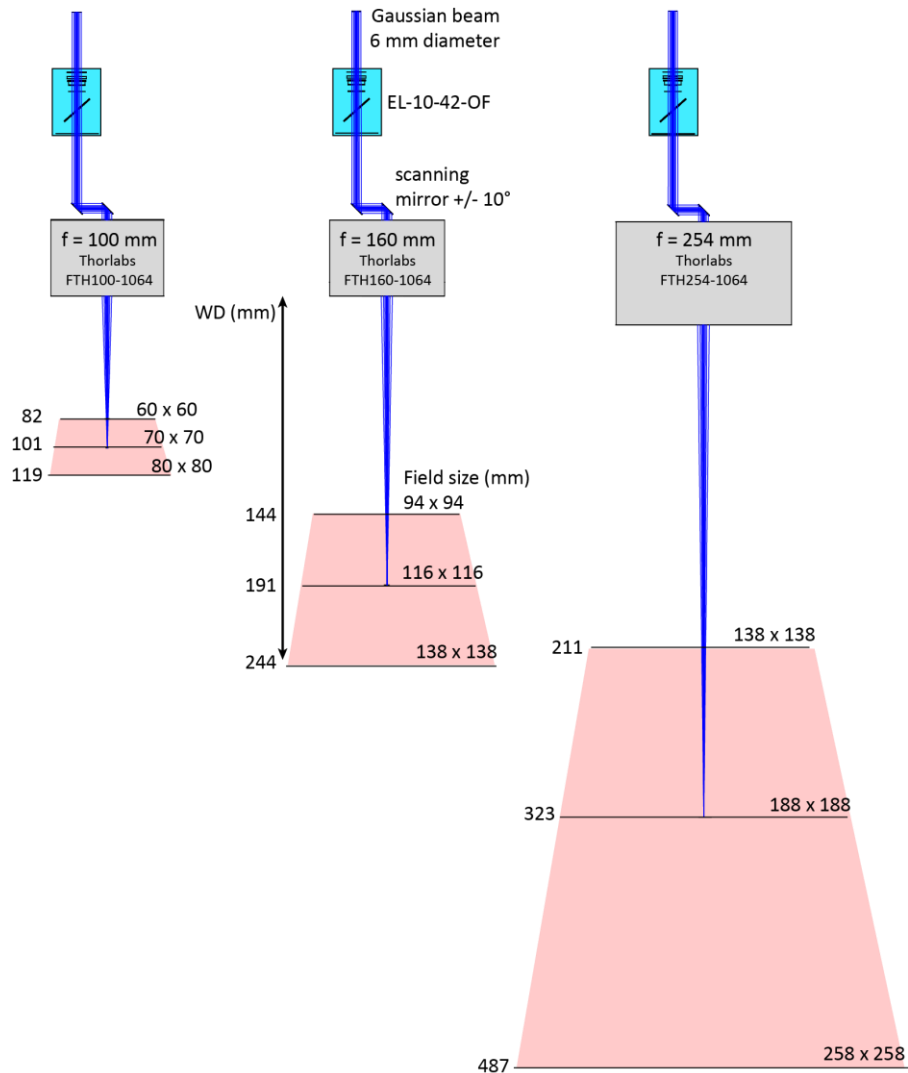


图 4：激光扫描系统示意图，包含 EL-10-42-OF 可调焦透镜、振镜扫描镜和 F-Theta 镜头。不同 F-Theta 镜头焦距 ($f = 100$ 、 160 和 254 mm) 会导致 Z 轴扫描范围、工作距离 (WD) 及标记体积 (红色标示) 不同。

3.2. 与伽利略型扩束镜集成

第 3.1 节描述的配置在工作区域尺寸、Z 轴调焦范围和光斑尺寸方面提供了一定自由度。然而，对于许多应用来说，需要更高的灵活性以优化调焦范围和光斑尺寸。一种方案是将 EL-10-42-OF 透镜与伽利略型扩束镜结合使用，这样光束放大系数可以作为额外的自由度进行调节。其通用设计如图 5 所示：EL-10-42-OF 透镜安装在构成光束扩束器的两枚定焦透镜之间。光束随后传输至振镜扫描镜，并由 F-Theta 镜头聚焦。

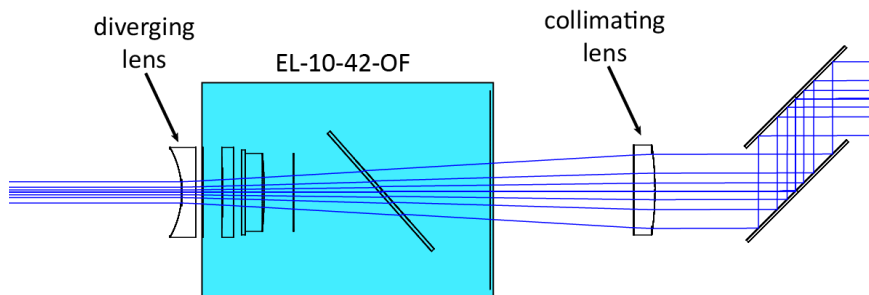
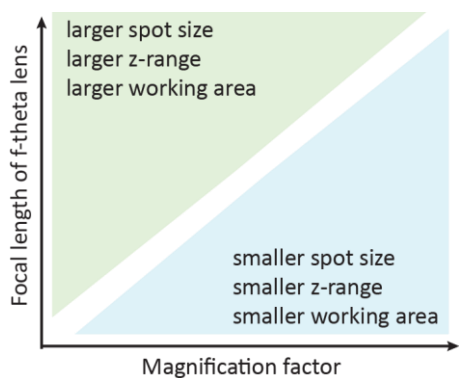


图 5: 伽利略型扩束镜与 EL-10-42-OF 透镜的通用设计示意图。光束放大系数是优化 Z 轴调焦范围和激光光斑尺寸的关键参数。

下图定性展示了通过不同 F-Theta 镜头与伽利略型扩束镜组合，如何调控工作区域、Z 轴调焦范围以及激光光斑尺寸。根据客户需求，我们可提供系统集成的光学设计建议。



- Working area
- Z-axis tuning range
- Laser spot size

3.3. 与现成扩束镜的集成

通过现成的扩束镜，同样可以实现多种光斑尺寸和 Z 轴调焦范围。图 6 展示了通用光学布局示意图。光束扩束器应尽量靠近 EL-10-42-OF 透镜安装，但定位精度要求不高。为了避免光束在振镜上被截断，振镜尺寸必须足够大，以容纳放大后的激光光束。

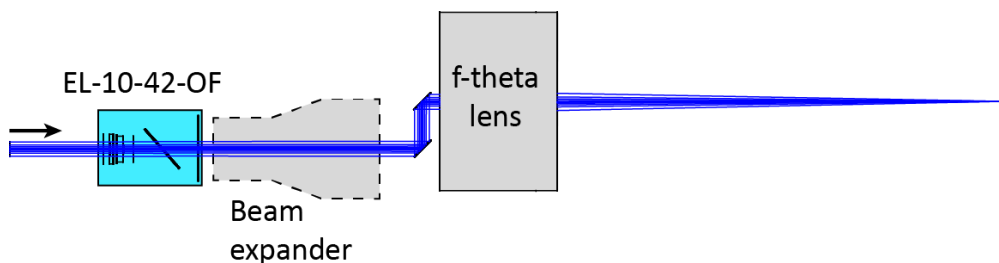


图 6: 集成现成扩束镜的光学布局示意图，扩束器应直接安装在 EL-10-42-OF 透镜之后。

假设输出激光光束直径为 8 mm，通过将不同扩束镜与 EL-10-42-OF 透镜组合，可以实现下表所示的 Z 轴调焦范围和聚焦光斑尺寸。来自不同厂商的光束扩束器均已测试，性能偏差仅为几百分点，可忽略不计。

		1x (无扩束镜)	1.5x	2x	3x
100	最大输入 光束直径 (mm)	8	8	6	4
	Z 轴范围 (mm)	39	18	10	4
	光斑尺寸 (um)	26	17	18	17
160	最大输入 光束直径 (mm)	8	8	6	4
	Z 轴范围 (mm)	103	46	26	11
	光斑尺寸 (um)	42	28	28	27
254	最大输入 光束直径 (mm)	8	8	8	6
	Z 轴范围 (mm)	263	117	65	27
	光斑尺寸 (um)	70	46	35	28

4. Z 轴校准

通过 EL-E-OF-A 控制板 驱动透镜时，需要输入 0-5 V 的模拟电压信号，信号分辨率应至少为 12 bit。EL-E-OF-A 通过调节透镜的光学功率，从而实现激光光斑在 Z 方向的位置移动，如图 7 左图所示。由于透镜在生产过程中存在公差，需要对控制电压与 Z 轴光斑位置之间的关系进行标定。基于 SAMLight 软件的详细 Z 轴校准流程见附录 1。

完成校准后，输入信号可直接对应 Z 方向在 $z_{\min}$ 与 $z_{\max}$ 之间的调焦范围，如图 7 右图所示。实际的 Z 轴调焦范围取决于 EL-10-42-OF 所处的具体光学系统结构。该校准过程通常只需执行一次，校准数据可通过查找表的形式存储在打标软件中。建议至少设置 10 个校准点，增加校准点数量可进一步提升 Z 轴控制精度。

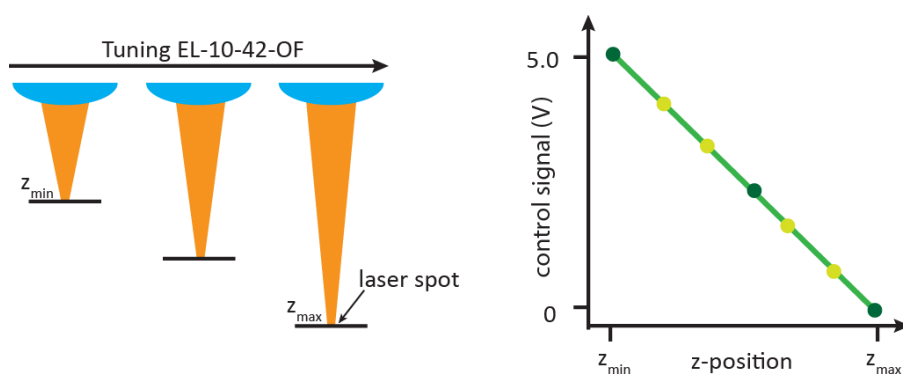


图 7：左侧面板展示了通过调节 EL-10-42-OF 透镜 实现激光光斑在 Z 方向位置的变化。右侧面板给出了控制信号（0-5 V）与 Z 轴焦点位置之间的标定曲线。浅绿色点表示为提高校准精度所需增加的额外标定数据点。

5. 打标测试

使用演示型打标设备（见图 2），在标记体积的两个极限位置分别加工一个 $10 \times 10 \text{ mm}$ 的矩形图案。通过 $8\times$ 显微放大观察结果，未发现明显差异或性能劣化。

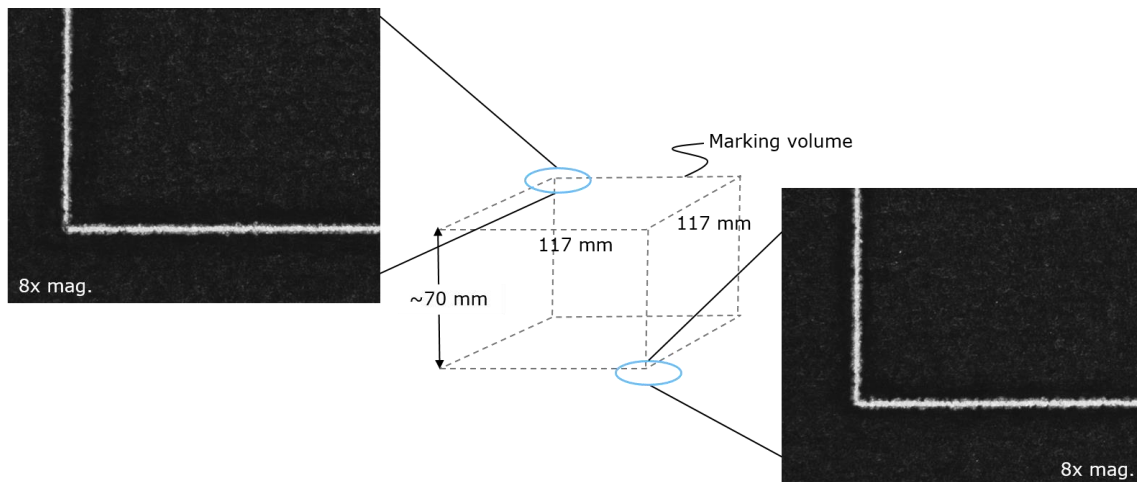


图 8：标记体积两个极限位置下的打标质量对比。在两种情况下，均加工一个 $10 \times 10 \text{ mm}$ 的小矩形，并通过 $8\times$ 显微镜进行观察，结果未见明显差异。

在第二项测试中，我们评估了引入 EL-10-42-OF 透镜对打标质量的影响。在水平平面上加工一个 4×4 点阵。图 9 左图为光路中加入 EL-10-42-OF 时的结果，右图为其从系统中移除后的打标结果。通过 $8\times$ 显微镜对样品进行观察，结果表明：EL-10-42-OF 的引入未对成像质量造成可见的劣化。

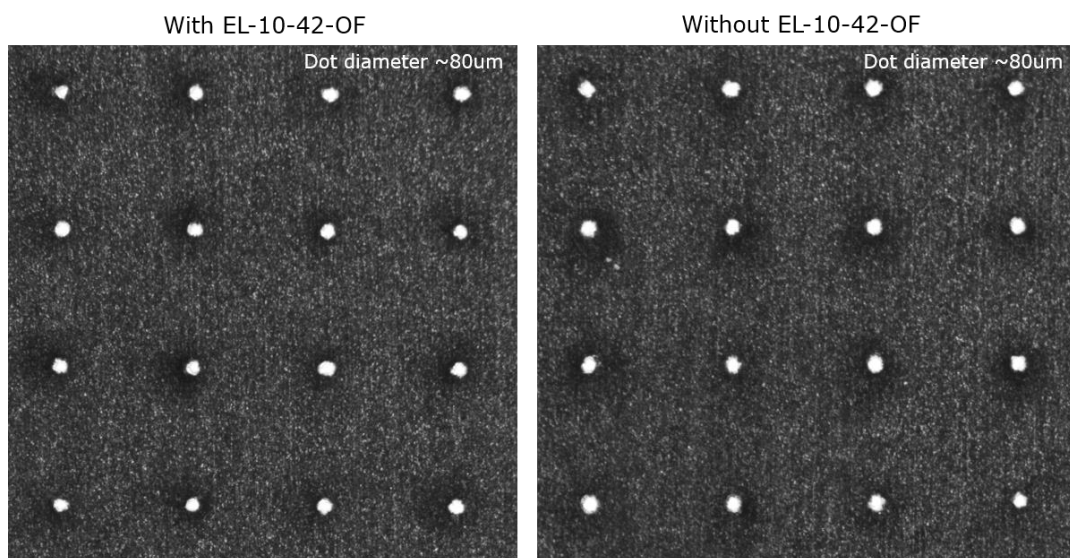


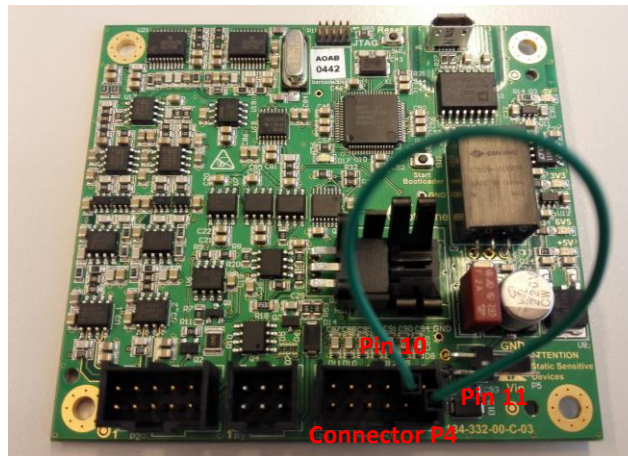
图 9：对比在光路中引入与移除 EL-10-42-OF 透镜两种情况下的打标质量，结果显示两种配置之间无明显差异。

注意：L-E-OF-A 控制电子单元是专为 EL-10-42-OF 可调透镜设计的。在激光加工应用中，通常使用脉冲型高功率激光，这对基于光学反馈（OF, Optical Feedback）的控制精度提出了较高要求。

即使是极微量的杂散光，也可能在光学反馈信号中引入偏置，从而导致实际设定值发生漂移。尽管该残余偏移可通过 EL-E-OF-A 控制板进行电子补偿，但为了实现高效稳定的光学反馈控制，建议激光重复频率 ≥ 20 kHz。

6. 线性化：焦度与模拟电压的关系

在 EL-E-OF-A 控制板的固件中，已实现一项功能，可将透镜的焦度与施加电压之间的关系进行线性化处理。通过将连接器 P4 的 Pin 11 主动拉低，即可启用该线性化功能。实现该操作的简便方法是将 Pin 11 与 Pin 10（接地）直接连接，如下图所示。



启用与未启用线性化功能的测量结果如图 10 所示。

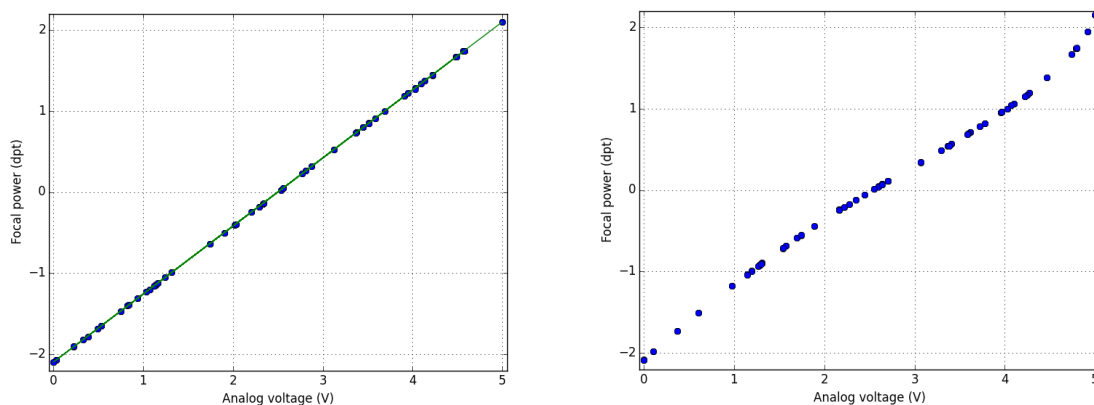


图 10: 焦度 (diopter, dpt) 与施加电压之间的测量关系。左侧为启用线性化功能的结果，右侧为未启用（默认状态）线性化功能的结果。

该功能的主要优势在于：当工厂中需要校准多台打标系统时，可显著简化整个 Z 轴标定流程。第一台打标系统被定义为主系统，该系统需执行第 4 节所述的完整 Z 轴校准流程，通常建议采集 10 个以上数据点。在启用线性化功能的情况下，理论上其余设备的校准流程可简化为仅使用两个校准点。然而，为实现最佳且高精度的 Z 轴控制，仍然需要包含 10 个以上数据点的查找表。

根据需求，可提供 Excel 表格工具，用于基于主系统采集的数据以及两点校准结果，生成新的查找表。

7. 更多信息与技术支持

我们的应用工程师非常乐意为您提供关于 Optotune 产品集成方案的技术支持与设计建议。如有需要，请随时与我们联系。

新特光电是 Optotune 在中国的授权合作伙伴，一站式提供其全系列可调光学元件（液态可调焦镜头、精密&快速光束控制反射振镜、光束位移器、激光散斑衰减器及控制器）的选型匹配、应用方案设计及系统集成与工程落地全生命周期的技术支持。通过可调光学技术，实现焦距动态调节、光束精准偏转与高质量成像优化，广泛应用于激光加工、机器视觉检测、3D成像及高端科研系统等场景。

液态可调焦镜头：<https://www.sintecclaser.com/optical/liquid-lens.html>

精密&快速光束控制反射振镜：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-steering.html>

光束位移器：<https://www.sintecclaser.com/optical/beam-shifting-devices.html>

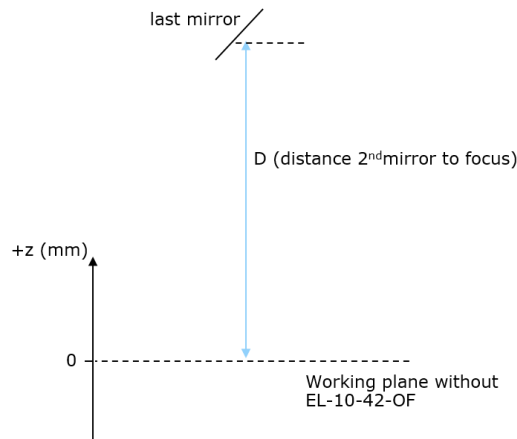
激光散斑衰减器：<https://www.sintecclaser.com/optical/laser-speckle-reducers.html>

我们还可提供不同通光孔径、调焦范围、光束偏转角度及涂层波长（UV-IR）的定制化可调光学解决方案，满足从科研到工业量产的多样化需求。获取最新方案及报价，请联系：

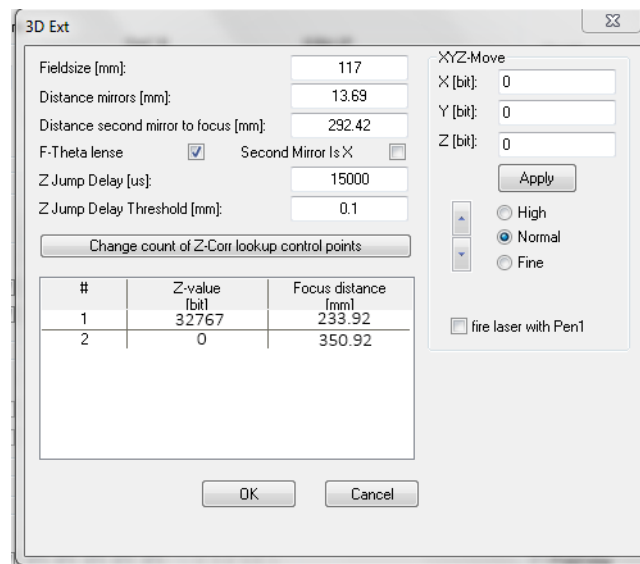
手机|微信：罗经理：18162698939，夏经理：13697356016

附录 1：在 SAMLight 中使用 EL-10-42-OF 进行 Z 轴校准的方法

SCAPS 的打标软件 SAMLight 支持通过查找表方式轻松实现 Z 轴校准，其中将激光光斑的 Z 位置与控制电压进行映射。该方法已在本应用说明前文所述的标准打标系统中成功验证，其获得的精度约为 500 μm。如需更高精度，建议采用光束轮廓测量方法进行校准优化。坐标系定义如下图所示。



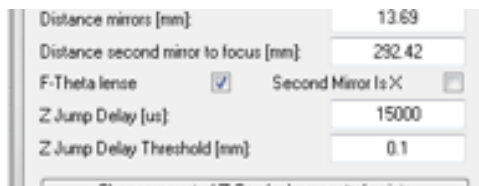
1. 假设从第二反射镜到加工平面的距离 D 已知（在该系统中，D = 292.42 mm）。在集成 EL-10-42-OF 之前，必须对该距离进行精确测量，例如使用机械 Z 轴平台进行标定。
2. 首先需要创建一个临时 Z 轴修正查找表（look-up table）。基于该临时表所进行的测量结果，将用于生成最终的 Z 轴修正查找表。



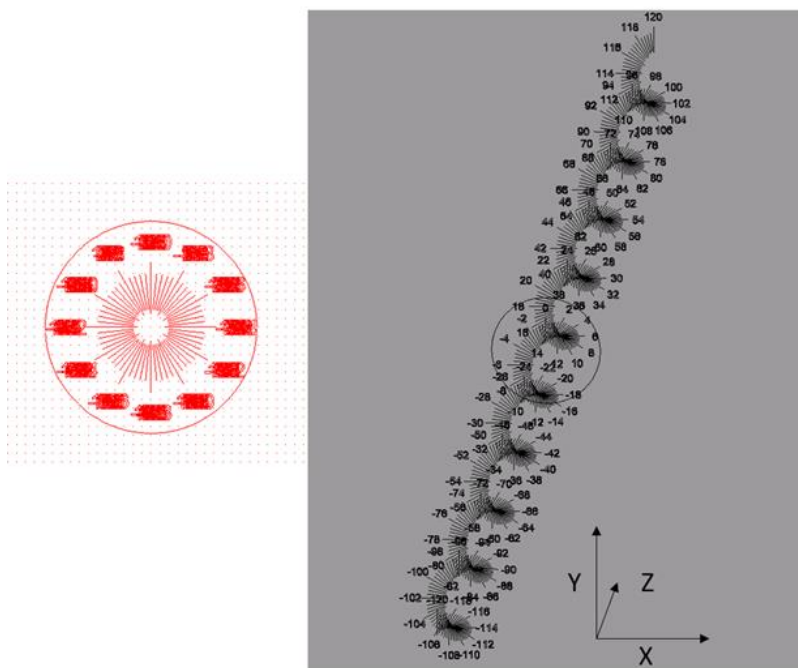
该查找表仅由两个 DAC 端点定义：DAC1 = 32767 和 DAC2 = 0，分别对应 0 V 和 5 V。该范围即为透镜控制电压的最大允许区间。对应的距离（mm）按如下方式计算，如下表所示：

DAC ₁	32767	$D - (x,y\text{-working area} / 2) = D_1$
DAC ₂	0	$D + (x,y\text{-working area} / 2) = D_2$

3. 在使用 F-Theta 镜头 时，需要在 SAMLIGHT 软件中勾选对应的选项框以启用该功能。



4. 在 SAMLIGHT 中加载预定义的打标作业文件 “Calibrate_Optic3D_Circle_-120_to_120.sjf” 。



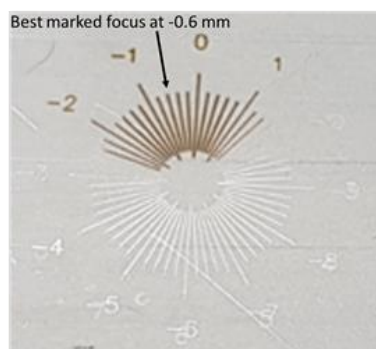
该作业文件用作垂直方向的标尺（ruler）。它由 Z 方向 -120 到 120 mm 的线条组成，线条间距为 0.2 mm。如果您的 X、Y 工作区域小于此范围，需要在作业文件中删除部分线条，使 Z 轴范围 < X、Y 工作区域。否则，在执行 “Start mark” 后会出现错误提示 “Galvo out of range”。

5. 接下来，在单独的电子表格中定义最终 Z 轴修正表（z-correction table）的 Z 值数量。各校准点必须位于透镜的最大物理调焦范围内（例如：-45...+45 mm）。例如：

z-value (mm)
-38.7
-17.5
0
29.8
42.6

6. 将打标样品（例如阳极氧化铝板）放置在最终 Z 轴修正表的第一个校准点（本例中为 39.82 mm）。根据坐标系定义，负 Z 值表示低于零平面，正 Z 值表示高于零平面，与 SAMLIGHT 中的坐标系定义一致。然后开始执行打标作业文件。
7. 将样品移动至最终 Z 轴修正表的下一个校准点，再次执行打标作业。对所有 Z 值重复此操作，直至完成整个校准流程。

8. 从打标样品中提取 Z 位置标记值 (Fz)。为此, 可在标准显微镜下分析样品, 例如使用 8× 放大。这样可以更精确地定位处于焦点的“最佳”线, 提高 Z 轴校准精度。



9. 完成上述分析后, 您的 Z 轴修正表 可能如下所示。在 Z 值 = 0 mm 时, 样品上的标记值不一定为零, 这可能由偏移量造成。校准过程会自动考虑并补偿该偏移。

z-value (mm)	F_z (marked value on sample)
-38.7	-34
-17.5	-17.5
0	-1
29.8	34
42.6	48.5

10. 接下来, 计算各点的距离: $D_z = D - F_z$ 在本例中, $D = 292.42$ mm。下一步, 为建立 DAC 值与 D_z 值之间的线性关系, 需要进一步计算相应的 DAC 数值。

$$DAC_z = a \cdot D_z + b$$

根据第 2 步中的系数进行计算:

$$a = \frac{DAC_2 - DAC_1}{D_2 - D_1}, \quad b = \frac{D_2 \cdot DAC_1 - D_1 \cdot DAC_2}{D_2 - D_1}.$$

此时, 生成的表格应如下所示:

z-value (mm)	F_z (marked value on sample)	D_z	DAC_z
-38.7	-34	326.42	6861
-17.5	-17.5	309.92	11482
0	-1	293.42	16103
29.8	34	258.42	25906
42.6	48.5	243.92	29966

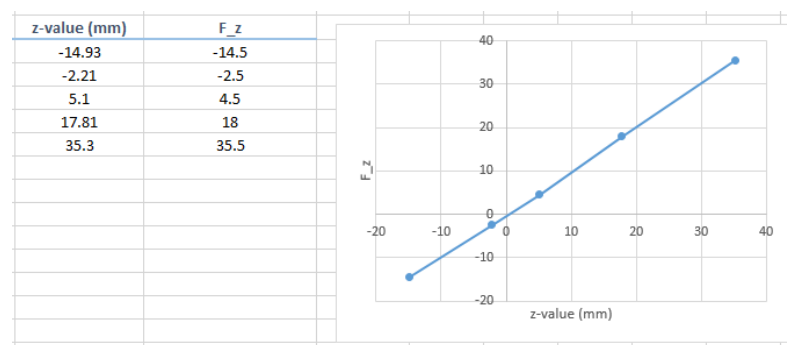
11. 最后一步, 应计算 D - (z值). 其中 D 为从第二反射镜到工作面的距离。

z-value (mm)	F_z (marked value on sample)	D_z	DAC_z	z-value absolute (mm)
-38.7	-34	326.42	6861	331.12
-17.5	-17.5	309.92	11482	309.92
0	-1	293.42	16103	292.42
29.8	34	258.42	25906	262.62
42.6	48.5	243.92	29966	249.82

这两列红色数据在 SAMLight 中用作最终 Z 轴校准查找表。请注意，在 SAMLight 中“焦距（mm）”必须按升序输入：

Z-value (bit)	Focus distance (mm)
29966	249.82
25906	262.62
16103	292.42
11482	309.92
6861	331.12

12. 可选步骤：可进行一次验证测量。若校准正确，重复执行步骤 5 至 8 时应得到相同的数值。下图所示的示例测量结果验证了这一关系，偏差很小，且在步骤 8 所述方法的精度范围内。



附录 2：响应时间与振荡速度

使用 EL-E-OF-A 控制电子单元驱动 EL-10-42-OF 透镜 时，我们分析了 Z 轴步进激光加工中常用的三种信号形式：阶跃信号、正弦信号和三角信号。测量结果反映了控制电子单元有限带宽（主要因素）与透镜自身物理极限的综合影响。

阶跃响应

为量化焦点变化速度，对 光学反馈信号（Optical Feedback, OF）的阶跃响应进行测量。通过在 EL-E-OF-A 输入端施加 10 Hz 的矩形波控制电压 来实现阶跃变化。在图 11 中，蓝色数据表示控制电压的下限与上限，分别为 0.5 V 和 4.5 V，对应 10%–90% 阶跃。红色数据显示光学反馈信号的响应，其值从 -1.6 到 +1.6 dpt 跳变。在上升与下降曲线中，光学焦点在 12 ms 内达到设定值，偏差控制在 5% 内。反馈信号的小阶梯状特征来源于 1.1 kHz 的信号采样。数据通过示波器获取。

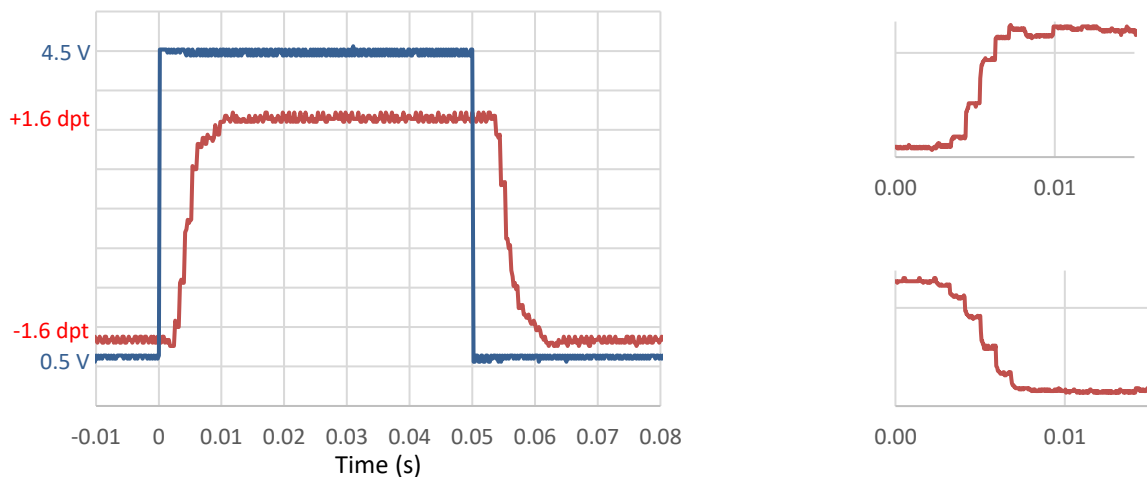


图 11: EL-10-42-OF 的光学反馈信号阶跃响应（红色）。蓝色数据表示施加在 EL-E-OF-A 控制板输入端的电压阶跃。左侧小图为上升沿和下降沿的放大细节。

在更详细的分析中，我们研究了 阶跃高度对响应时间的影响。结果如图 12 所示，整体趋势表明阶跃高度越小，总响应时间越短。总响应时间主要由两个部分组成：

- 恒定延迟 3.5 ms（虚线）：由 EL-E-OF-A 的有限采样率引起。
- 达到新设定值所需的有限时间（有限步数）：通常需要 6 至 7 个采样步（蓝色实线）。

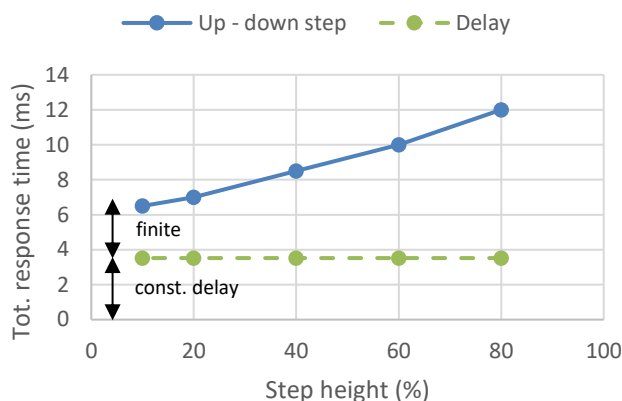


图 12：总响应时间随阶跃高度变化的关系。总响应时间由两部分组成：恒定延迟与有限上升时间，其中有限上升时间随阶跃高度减小而缩短。

正弦调制

通过函数信号发生器施加正弦形设定电压，并观察光学反馈信号的振幅及相位延迟。图 13 左侧显示振幅相对于直流极限（恒定设定电压）的归一化结果。当频率超过 40 Hz 时，振幅开始下降。主要原因是存在恒定延迟 5.5 ms，这一延迟导致相对相位（以度为单位）线性增加，如图 13 右侧所示。比较 90% 调制振幅与 20% 调制振幅时，未观察到显著差异。

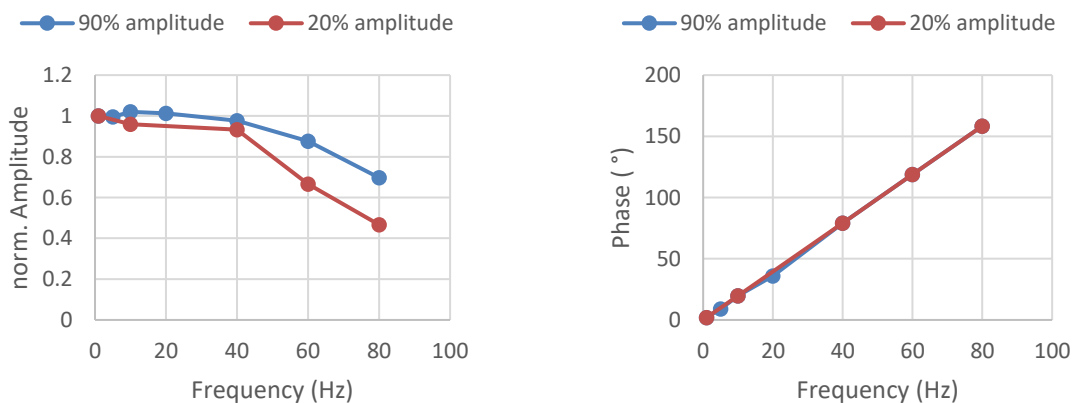


图 13：左图为正弦调制下振幅随频率变化的归一化曲线。在 40 Hz 时，振幅开始下降。在测量精度范围内，90% 与 20% 调制振幅的结果相同。右图显示相对相位的线性增加，反映了存在恒定延迟。