

## 电调焦镜头 EL-16-40 (5D version)



EL-16-40 是一款基于 Optotune 专有的形状改变聚合物镜头技术的调焦镜头。通过施加电流，镜头曲率可在毫秒内从凹面调整到凸面，提供 -2 dpt 至 +3 dpt 的屈光度范围。采用基于成熟音圈技术的致动器，EL-16-40 极其可靠且坚固耐用，甚至适用于恶劣环境和大温度范围的应用。为实现良好的重复性和焦点稳定性，集成的温度传感器可对温度效应进行原位补偿。自 2024 年起，EL-16-40 还提供补偿重力效应的技术，从而确保一致的波前质量，不受镜头方向影响。

EL-16-40 提供紧凑外形便于 OEM 集成，也提供带多种螺纹适配器和坚固 Hirose 连接器的工业版本，可轻松与市售成像镜头组合使用。

这款大孔径镜头的典型应用包括机器视觉、显微镜和眼科设备。

### 镜头规格

|                                          |                                                                                                            |                        |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 通光孔径                                     | 16                                                                                                         | mm                     |
| 屈光度范围 (30°C, $\pm 250$ mA)               | -2 to +3                                                                                                   | dpt                    |
| 屈光度 @ 0 mA (25°C, 典型值)                   | 0.5 +/-1.0                                                                                                 | dpt                    |
| 重复精度                                     | 0.02 (标准差)                                                                                                 | dpt                    |
| 透射波段                                     | 可见光: 420 to 950<br>近红外: 850 to 1500                                                                        | nm                     |
| 波前误差 @ 0 dpt<br>(光轴垂直/水平)                | <0.15 / <0.5 (等级 1)<br><0.25 / <0.5 (等级 2)<br><0.15 / <0.16 (等级 1, GTC 版本)<br><0.25 / <0.26 (等级 2, GTC 版本) | $\lambda$ RMS @ 532 nm |
| 光轴精度                                     | 1.0                                                                                                        | mrad (典型值)             |
| 光轴重复性                                    | 0.01                                                                                                       | mrad (标准差, 典型值)        |
| 镜头类型                                     | 平凹到平凸                                                                                                      |                        |
| 折射率 / 阿贝数                                | $n_D = 1.30 / v = 100$                                                                                     |                        |
| 响应时间<br>(30°C, 0 至 $\pm 250$ mA 阶跃, 典型值) | 5                                                                                                          | ms                     |
| 稳定时间<br>(30°C, 0 至 $\pm 250$ mA 阶跃, 典型值) | 12.5 (带信号调理)<br>25 (矩形阶跃)                                                                                  | ms                     |
| 寿命周期(10% - 90% 正弦)                       | > 1'000'000'000                                                                                            |                        |
| 工作温度                                     | -20 to 65                                                                                                  | °C                     |
| 存储温度                                     | -40 to 85                                                                                                  | °C                     |
| 重量                                       | 40                                                                                                         | g                      |

### 电气规格

|                    |                               |          |
|--------------------|-------------------------------|----------|
| 控制电流范围             | -250 to 250                   | mA       |
| 绝对最大电流             | -500 to 500                   | mA       |
| 电机线圈电阻 @ 25°C      | 12                            | $\Omega$ |
| 功耗 (标称 0 - 250 mA) | 0 - 0.7                       | W        |
| 最大功耗 (@ 500 mA)    | 3.0                           | W        |
| 温度传感器 (含EEPROM)    | STTS2004 (STMicroelectronics) |          |
| 绝对最大电压(线圈)         | 10                            | V        |
| 绝对最大电压(存储器 & 传感器)  | 4.3                           | V        |

## 可用标准产品概览

| 标准产品 <sup>1,2,3,4</sup>  | 调焦范围         | 顶部螺纹           | 底部螺纹             |
|--------------------------|--------------|----------------|------------------|
| EL-16-40-TC-VIS-5D       | -2 to +3 dpt | None           | None             |
| EL-16-40-TC-VIS-5D-M25.5 | -2 to +3 dpt | M25.5x0.5 male | M40.5x0.5 female |
| EL-16-40-TC-VIS-5D-M26   | -2 to +3 dpt | M26x0.706 male | M26x0.706 female |
| EL-16-40-TC-VIS-5D-M27   | -2 to +3 dpt | M27x0.5 male   | M40.5x0.5 female |
| EL-16-40-TC-VIS-5D-M30.5 | -2 to +3 dpt | M30.5x0.5 male | M40.5x0.5 female |
| EL-16-40-TC-VIS-5D-C     | -2 to +3 dpt | C-mount male   | C-mount female   |
| EL-16-40-TC-VIS-5D-M42   | -2 to +3 dpt | M42x1 male     | M42x1 female     |

- 1、所有型号均可提供重力补偿技术 (GTC 型号)
- 2、所有型号均可按要求提供 NIR 镀膜或定制镀膜
- 3、波前误差  $< 0.15 \lambda$  RMS (光轴垂直) 的等级 1 型号可按要求提供
- 4、带螺纹适配器的型号均可提供内置镜头控制器 ECC-1C

## 液体镜头工作原理

EL-16-40 的工作原理基于 Optotune 成熟的形状改变聚合物镜头技术。形成镜头的核心包含一种光学液体，该液体通过弹性聚合物膜密封，如图 1 所示。电磁致动器 (VCM) 用于对容器施加压力，从而改变镜头的曲率。通过改变流过致动器线圈的电流来控制镜头的屈光度。

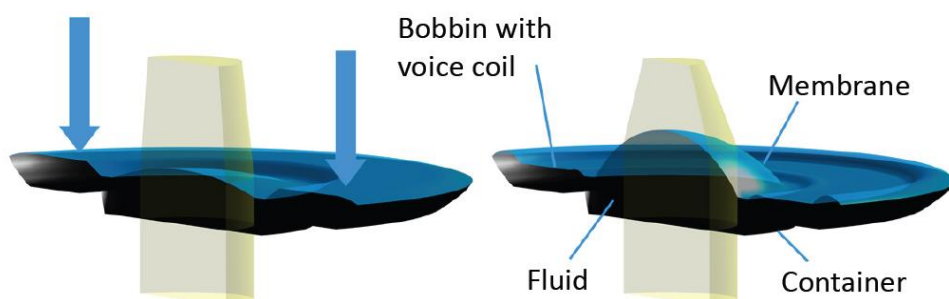


图 1：填充有光学液体并嵌入 EL-16-40 外壳的密封镜头容器的工作原理示意图。

## 机械布局

EL-16-40 配备黑色铝制外壳。电气连接和控制器通信通过侧面的 FFC 电缆实现。此外，客户可以通过外壳侧面的 ZIF-FFC 滑动连接器连接自己的 FFC 电缆。相关机械图纸如图 2 所示。

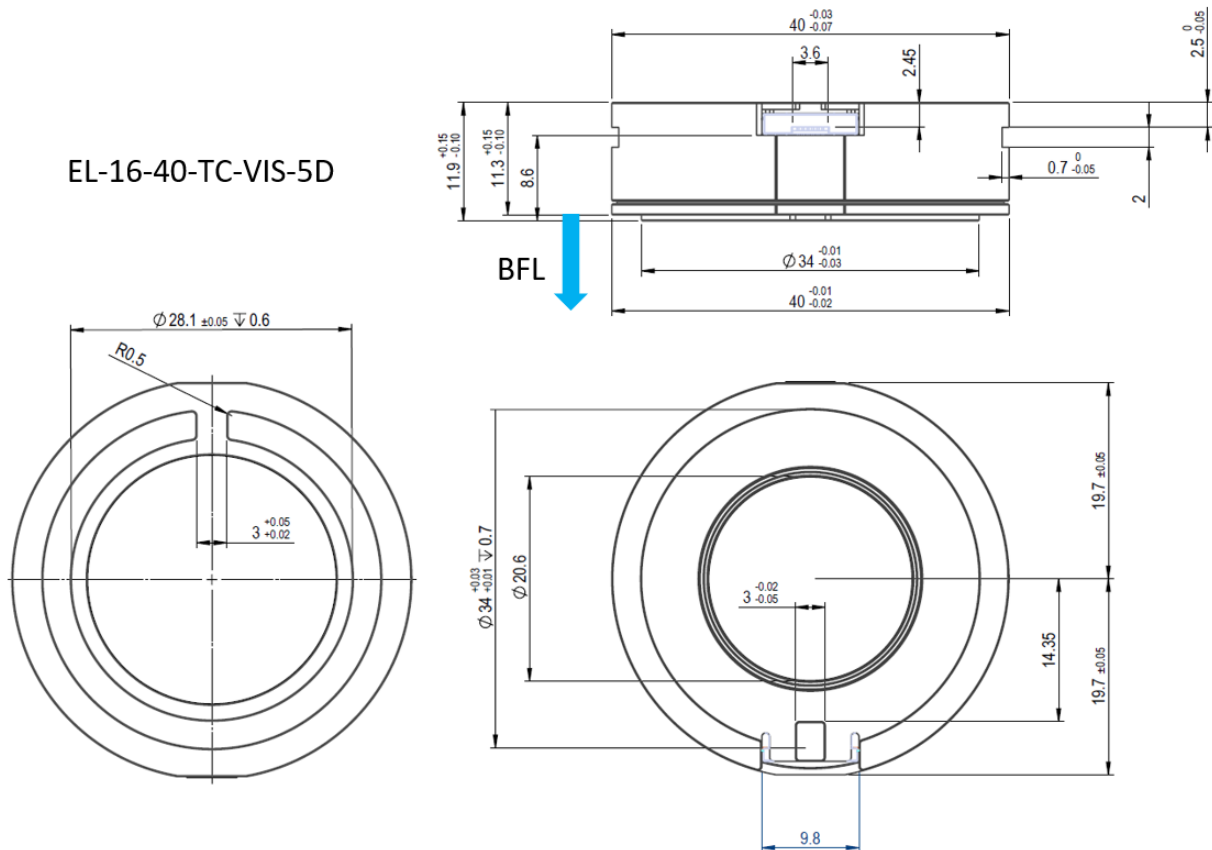


图 2: EL-16-40 最简单版本 (EL-16-40-TC-VIS-5D, 未安装任何螺纹适配器) 的机械图纸 (单位: mm)。

为在光学系统中实现最大的集成灵活性，提供了多种适配器配置，如标准产品系列概览所示。图 3 上半部分显示了 EL-16-40-TC-VIS-5D-M42。此处的适配器提供 M42 公母螺纹组合，适用于大多数 M42 卡口镜头和相机。顶部公螺纹可旋转，可沿 z 轴延伸 3mm，并用三个紧定螺钉（需要 1.5mm 内六角扳手）固定。

所有其他组合（—M25.5、—M26、—M27、—M30.5 和 —C）通过将 EL-16-40 安装在 M40.5x0.5 管中并提供不同的顶部和底部适配器来实现，这些适配器也可旋转并用一个紧定螺钉锁定。例如，图 2 下半部分显示了 EL-16-40-TC-VIS-5D-C。

所有适配器配置在侧面都带有一个延伸部分，提供一个 6 针 Hirose 连接器 (HR10G-7R-6P)，使其适用于恶劣环境条件。这可以在图 3 的右侧看到。

**请注意，重力补偿型 EL-16-40-GTC 镜头的容器玻璃比原始 EL-16-40-TC 多突出 0.5mm。然而，它不会超出机械外壳，因此保持 11.9mm 的总厚度不变。**

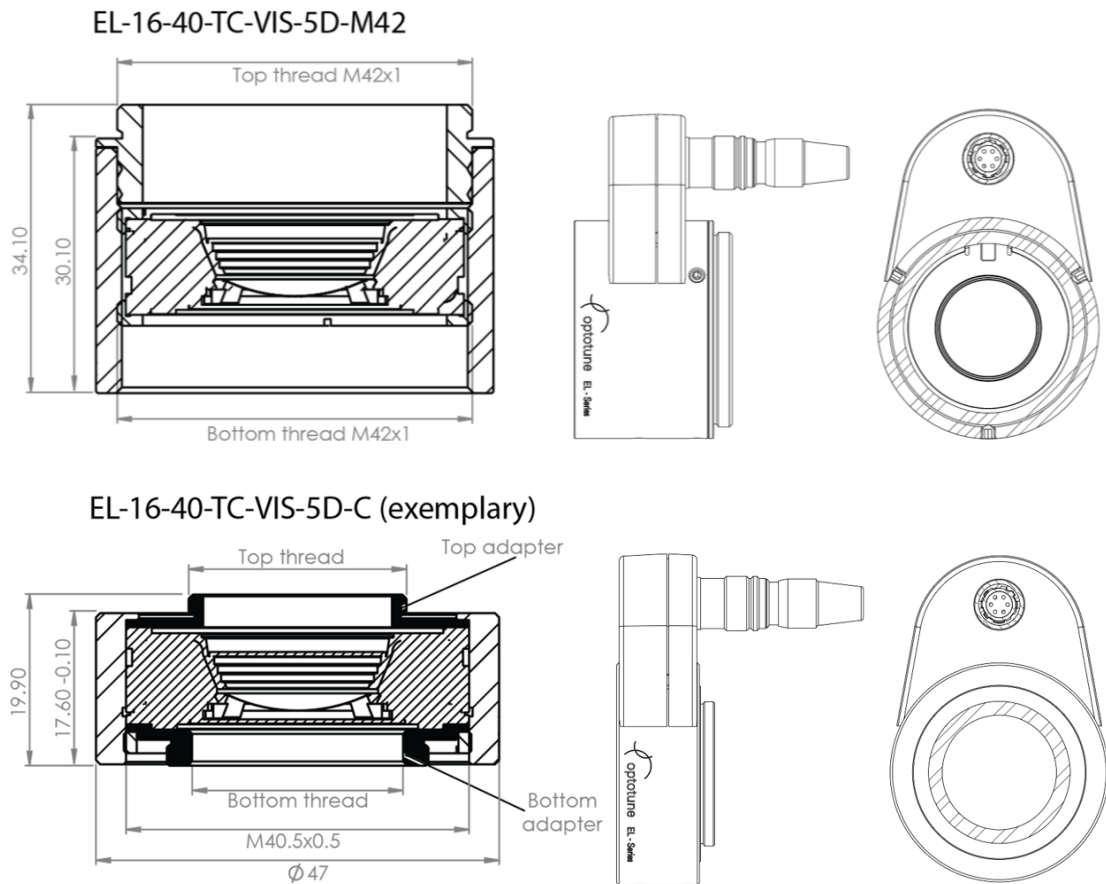
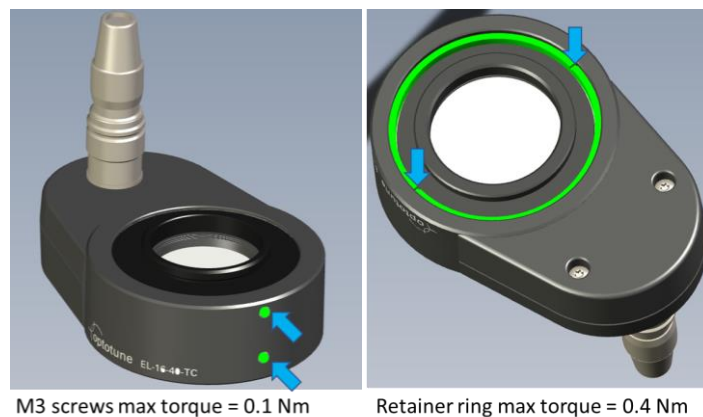


图 3: EL-16-40-TC-VIS-5D-M42 和 EL-16-40-TC-VIS-5D-C 的机械图纸，其中后者的示例也代表了 - M25.5、- M26、- M27、- M30.5 的组合（单位：mm）。

**注意：** EL-16-40-TC-VIS-5D-C 从法兰到底部保护玻璃的距离为 4.8mm。请确保不要拧入任何带有突出光学元件的 C 口镜头，因为它们可能会划伤甚至破裂玻璃。

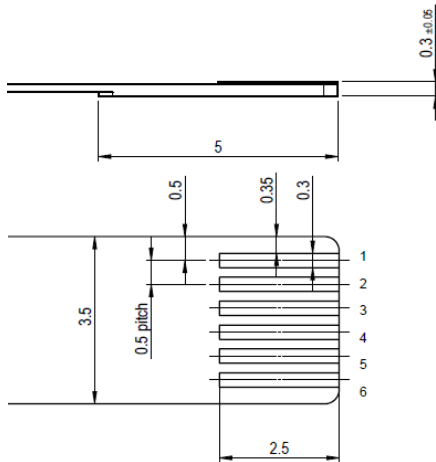
该设计在侧面有两个 M3 螺钉，用于锁定螺纹适配器的位置。如果需要，可以松开上方的 M3 螺钉，使 Hirose 连接器相对于顶部螺纹自由旋转。下方的 M3 螺钉固定底部螺纹。每个 M3 螺钉的最大拧紧扭矩为 0.1 Nm。建议先松开两个 M3 螺钉，拧紧固定环，然后再拧紧 M3 螺钉。



**注意：** 超出上述最大扭矩规格可能会引入迟滞或损坏镜头。

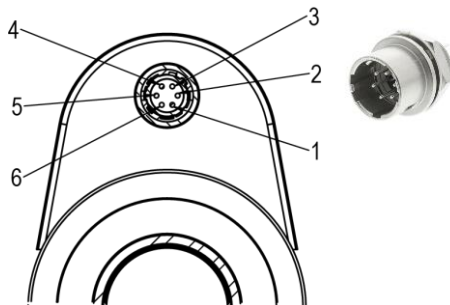
## 电气连接

不带适配器的 EL-16-40 的电气连接由一条 6 针 FPC 柔性电缆组成，适用于 Molex 连接器型号 503480-0600 或同等产品。两个针脚用于镜头的线圈，另外四个针脚用于连接温度传感器和 EEPROM 的 I22C 接口。I22C 地址分别为 0x18 和 0x50。



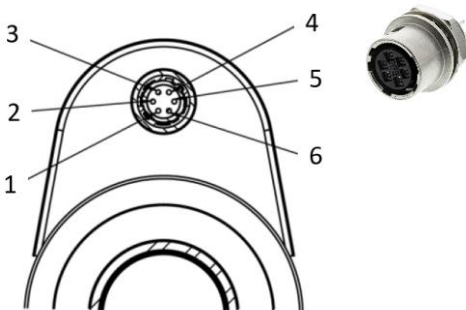
| Pin out: EL-16-40-TC |                        |                |
|----------------------|------------------------|----------------|
| Position             | Function               | Value          |
| 1                    | GND                    | -              |
| 2                    | Max. control current - | -500 to 500 mA |
| 3                    | Max. control current + | -500 to 500 mA |
| 4                    | I <sup>2</sup> C SDA   | Digital signal |
| 5                    | I <sup>2</sup> C SCL   | Digital signal |
| 6                    | Vcc                    | 3.3 V          |

图 4：不带适配器的 EL-16-40 基本版本的电气柔性连接。



| Pin out Hirose connector HR10G-7R-6PB(73) |                        |             |
|-------------------------------------------|------------------------|-------------|
| Position                                  | Function               | Sensor pins |
| 1                                         | Max. control current + | -           |
| 2                                         | Max. control current - | -           |
| 3                                         | GND                    | 1-4         |
| 4                                         | Vcc                    | 8           |
| 5                                         | I <sup>2</sup> C SCL   | 6           |
| 6                                         | I <sup>2</sup> C SDA   | 5           |

图 5：带（公头）Hirose 连接器、无嵌入式控制器的镜头型号的电气连接。



| Pin out Hirose connector HR10G-7R-6SB(73) |                                |       |
|-------------------------------------------|--------------------------------|-------|
| Position                                  | Function                       | Value |
| 1                                         | GPIO Trigger                   | -     |
| 2                                         | Analog In                      | 0-10V |
| 3                                         | UART Tx / I <sup>2</sup> C SCL | TTL   |
| 4                                         | UART Rx / I <sup>2</sup> C SDA | TTL   |
| 5                                         | GND                            | -     |
| 6                                         | Vcc                            | 5-24V |

图 6：带嵌入式控制器 ECC-1C、配备（母头）Hirose 连接器的镜头型号的电气连接。

## 屈光度与电流的关系

EL-16-40 的屈光度随正电流增加而增加，随负电流增加而减小，如图 7 所示。当将镜头驱动到绝对最大控制电流时，调焦范围会进一步增加，但必须考虑显著的发热问题。

请注意，当镜头旋转时，需要考虑重力引起的  $0.15 \pm 0.01$  dpt 的偏移（液体镜头朝上 vs. 朝下的差异）。

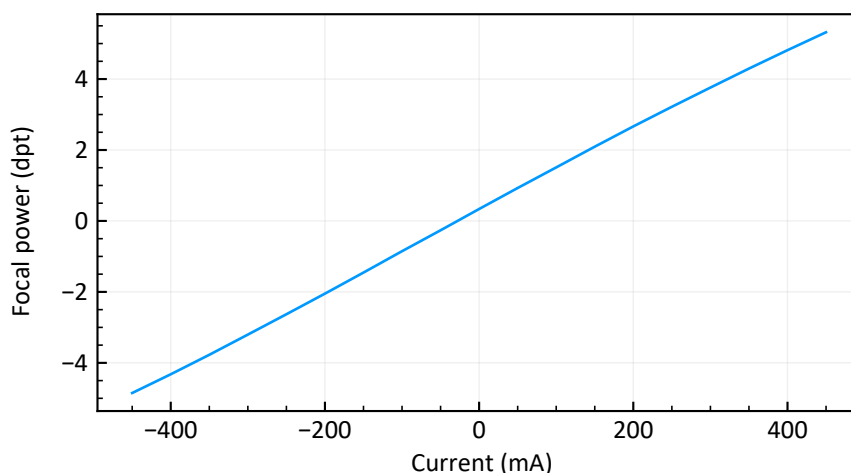


图 7：显示屈光度（单位：屈光度）与电流关系的典型数据。

## 透射率

光学液体和膜材料在 400 至 2500 nm 范围内都具有高透射性。由于膜是弹性的，无法使用标准工艺镀膜，因此预计会有 3 - 4% 的反射。保护玻璃可按要求镀膜。图 8 显示了标准宽带镀膜的透射光谱。

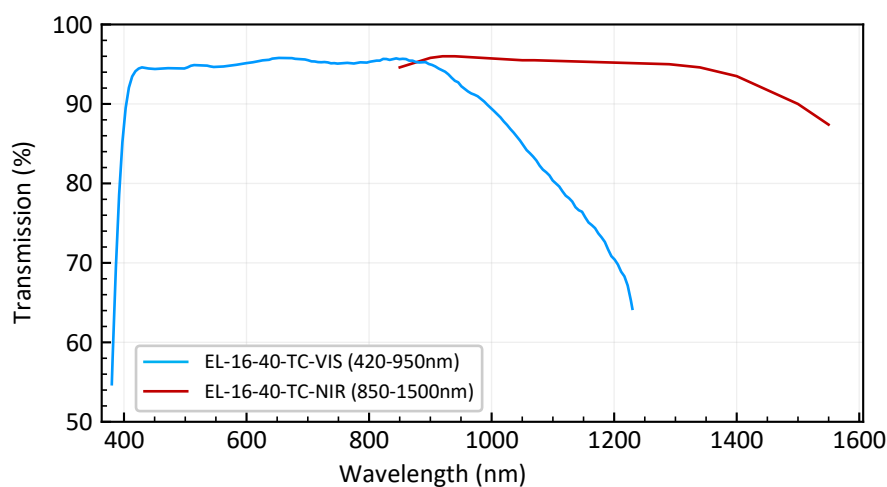


图 8：EL-16-40 带标准 VIS 和 NIR 镀膜玻璃的透射光谱。

## 波前质量

图 9 显示了典型的波前误差随屈光度的变化。波前质量因镜头而异，可按要求进行不同规格的定制，而当前的标准规格是：等级 1 镜头在垂直光轴时为  $0.15 \lambda$  RMS，等级 2 镜头为  $0.25 \lambda$  RMS。

当镜头直立使用（光轴水平）时，必须添加一个 Y 彗差项，有以下两种选择：

- EL-16-40-TC：重力引起的彗差约为  $0.5 \lambda$  RMS
- EL-16-40-GTC：重力引起的彗差小于  $0.05 \lambda$  RMS

所采用的重力补偿技术是完全被动的，在镜头旋转  $90^\circ$  后约 1 秒内稳定下来，并且对其他任何规格都没有不利影响。

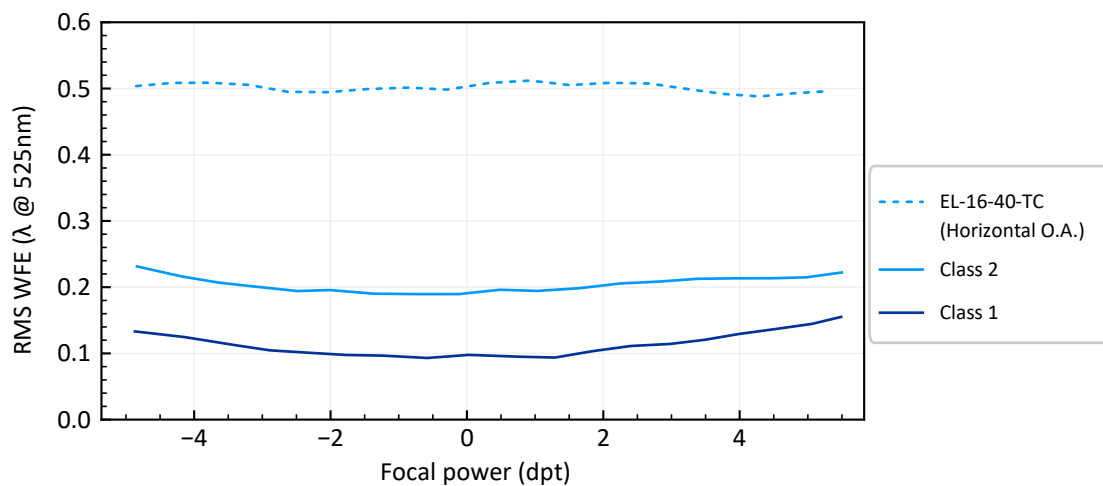


图 9：EL-16-40 的典型波前误差 vs 屈光度 (@525nm，在通光孔径 80% 范围内测量，离焦、倾斜和球差已排除)。

## 响应时间

施加电流阶跃时的上升时间约为 5 ms。然而，直到镜头的高阶振荡完全稳定下来大约需要 20-25 ms。图 10 显示了在室温下测量的几个电流阶跃的光学响应。Optotune 控制器可以提供适当的信号调理，能够将稳定时间减半，如图 11 所示。

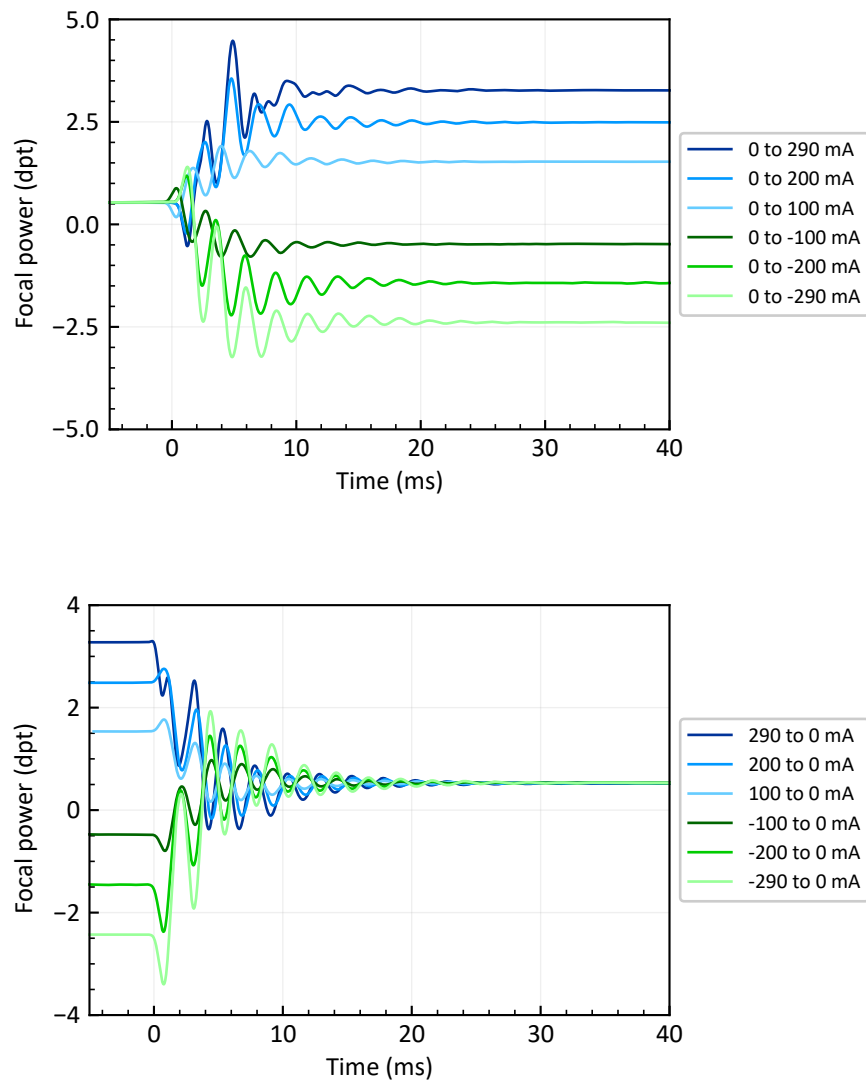


图 10：EL-16-40-TC-VIS-5D 对几个电流阶跃的典型光学响应。上图显示了一系列从低电流到高电流的阶跃，下图显示了一系列从高电流到低电流的阶跃。



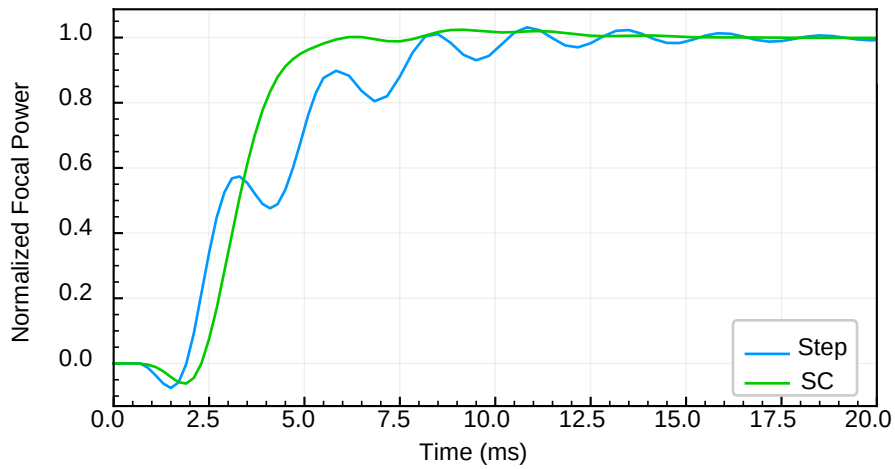


图 11：Optotune 控制器通过提供信号调理 (SC) 可显著减少稳定时间。

图 12 展示了宽频率范围内的频率响应，在 400 Hz 处显示出一个共振峰。请注意，此共振来自高阶模式，通常无法在整个通光孔径上用于成像。当施加电流阶跃时，建议使用低通滤波器抑制 200 Hz 以上的频率范围。这可以避免如图 9 中看到的激发振荡。

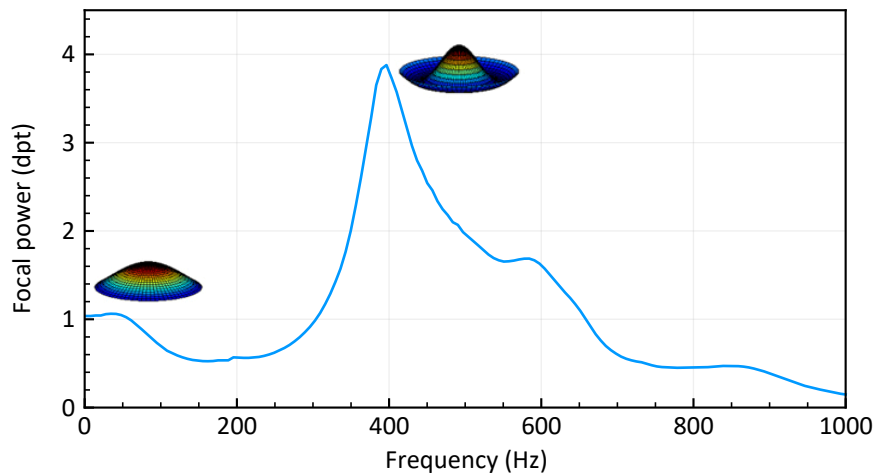


图 12：EL-16-40-TC 的典型频率响应。驱动幅度为 -50 至 50 mA。

## 温度效应

残余温度效应会影响规格表中所述的光焦度的长期漂移。这些温度效应通过温度敏感度  $SS$  (dpt/°C) 来量化，表示每摄氏度光焦度的变化。如图 13 所示， $SS$  与光焦度几乎呈线性关系。通常，当 EL-16-40 热连接到散热器时，可以最大程度地减少温度效应。安装座本身可用作散热器。材料的大质量和高热导率可以更有效地散热。Optotune 的镜头控制器和 Gardasoft 的 TR-CL180 使用集成的温度传感器和校准数据来自动补偿这种热漂移。

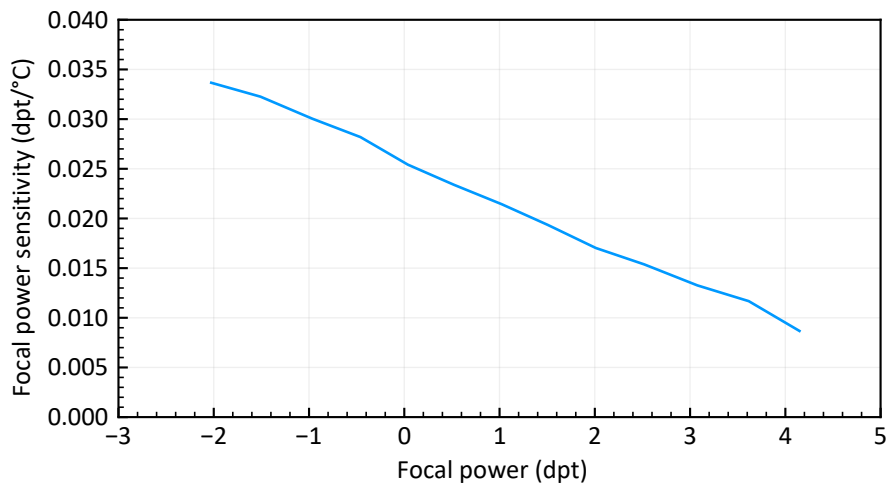


图 13：温度敏感度随屈光度的变化。

由于镜头液体的粘度随温度变化，响应时间也会变化，如图 14 所示。请注意，在非常低的工作温度下，可以向 EL-16-40 施加高达 500mA 的电流，使镜头升温约 10-20°C。

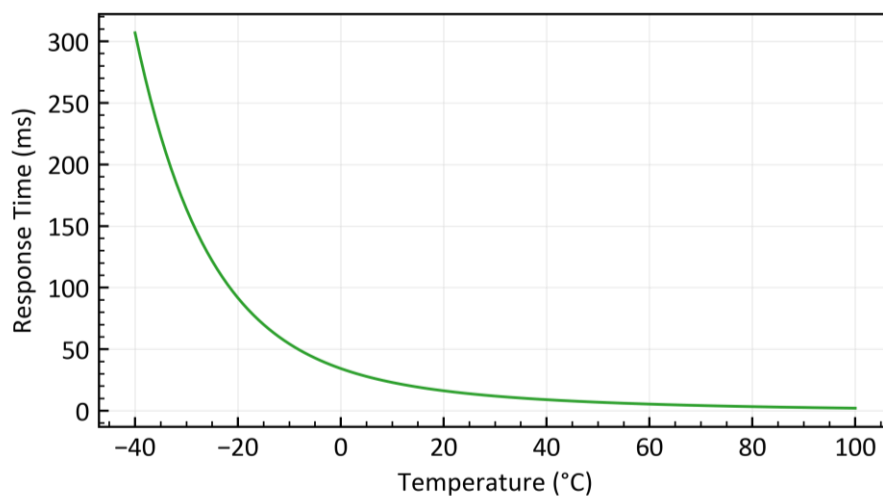


图 14：响应时间随镜头温度的变化。

## 重复性测量\*

为了验证镜头在苛刻条件下的重复性能，我们使用 Optotune 的 ICC-4C 复制了液体镜头的不同使用场景。不同的驱动方案如图 15 所示。

- 静态测试：将镜头调谐到几个屈光度，并在每个值保持大约 5 分钟。
- 动态测试：随机调谐镜头。
- 动态测试（带复位）：随机调谐镜头，在相邻随机跳变之间“复位”到 0 mA。

这些测试分别使用  $\pm 50$  mA 或  $\pm 200$  mA 的输入电流范围进行；此外，驱动方案在稳定控制的  $30^\circ\text{C}$  温度下应用，也在持续约 15 分钟升高  $15^\circ\text{C}$  的条件下应用，以测试 Optotune 的热补偿（屈光度模式）。为简洁起见，图 15 仅显示了在  $30^\circ\text{C}$  下使用  $\pm 50$  mA 电流范围进行的测试。屈光度偏差（绿色）代表重复性，是测量屈光度与设定屈光度之间的差值。

图 16 以条形图形式总结了重复性测试的结果，显示了所有驱动方案、电流范围和镜头温度组合下屈光度偏差的标准差 (SD)。

- 在所有测试条件下，重复性 (SD) 远低于  $0.020$  dpt ( $20$  mdpt)。
- 对于所有驱动方案和两个电流范围，当测试在稳定的  $30^\circ\text{C}$  温度下进行，重复性 (SD) 低于  $0.010$  dpt ( $10$  mdpt)。
- 对于所有驱动方案，当在稳定的  $30^\circ\text{C}$  温度下使用  $\pm 50$  mA 范围（这对应于  $\approx 1.5$  dpt）时，重复性 (SD) 低于  $0.005$  dpt ( $5$  mdpt)。

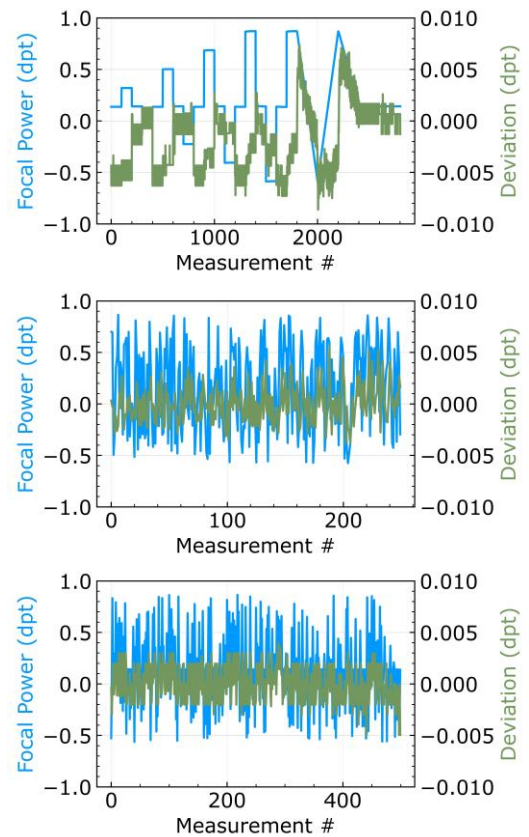


图 15：重复性测试的驱动方案（静态、随机和在 0 mA 复位的随机保持）

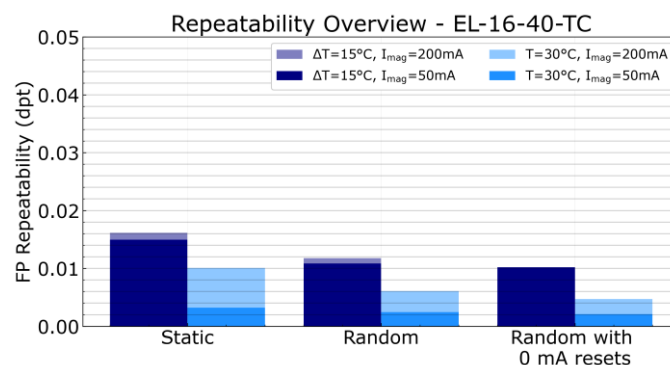


图 16：重复性测试结果总结（不同驱动方案、电流范围和镜头温度组合的 SD）。

\* 以下结果代表了等级 1 镜头的重复性能。等级 2 镜头的性能会有所不同。

在我们的重复性白皮书中，一个使用带有 EL-16-40-TC 的、景深非常浅的 2x 远心镜头的具体、真实机器视觉案例，展示了如何实现 +/- 10 mdpt 的重复性。

## 寿命和可靠性

EL-16-40 已通过表 1 中概述的环境和加速老化测试。在适用的情况下，测试已与 ISO 9022：光学和光子学 - 环境测试方法保持一致。

| 测试项目                                                                           | ISO          | 状态       |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------|
| <b>机械循环</b><br>2 亿次全范围循环（标准循环<br>-280mA 至 +280mA @ 50 Hz 正弦）                   | -            | 通过，持续测试中 |
| <b>干热暴露，工作状态</b><br>63 ± 2 °C, 相对湿度 <40%, -280mA 至 +280mA @50Hz<br>阶跃循环, 16 小时 | 9022-11-04-2 | Pass     |
| <b>低温暴露，工作状态</b><br>-35°C ± 3°C, -280mA 至 +280mA @1Hz 阶跃循环, 16 小时              | 9022-10-07-2 | Pass     |
| <b>干热暴露，存储状态</b><br>85 ± 2 °C, 相对湿度 <40%, 非工作状态, 2 小时                          | 9022-11-08-1 | Pass     |
| <b>低温暴露，存储状态</b><br>-40 至 55 °C, 2.5小时/循环, <20秒转换时间, 5 个循环                     | 9022-10-08-1 | Pass     |
| <b>湿热暴露</b><br>55 ± 2 °C, 相对湿度 90% 至 95%, 16 小时                                | 9022-12-07-1 | Pass     |
| <b>温度冲击</b><br>-40 至 55 °C, 2.5小时/循环, <20秒转换时间, 5 个循环                          | 9022-15-03-1 | Pass     |
| <b>机械冲击</b><br>100g, 6ms, 沿每个轴 3 次冲击                                           | 9022-30-07-1 | Pass     |
| <b>响应时间</b><br>全阶跃镜头响应                                                         | -            | Pass     |
| <b>循环重复性</b>                                                                   | -            | Pass     |

表 1：EL-16-40 的可靠性和寿命测试

## 光学布局

用于在光学设计中建模 EL-16-40 镜头系列的 Zemax 仿真文件可通过此链接获取。**Au** 自发荧

## 光、双折射和偏振效应

EL-16-40 既不自发荧光，也不双折射，或以任何其他方式依赖偏振。

## 安全与合规性

该产品符合 RoHS 和 REACH 标准。客户全权负责遵守集成和操作的所有相关安全法规。

## 包装

EL-16-40 工业版本以单件盒装提供。EL-16-40 OEM 版本以单件膜盒装或每盘 25 件提供。

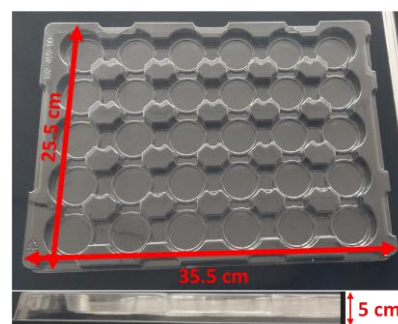


Figure 17: Sizes of the 25 units tray for the OEM version.

## EL-16-40 订购信息

对于定制版本，请使用以下部件号概念：

**EL-16-40-COMP-AR-DPT-CL-THR-CTRL**

COMP = TC: 温度补偿

GTC: 重力和温度补偿

AR = VIS: 420 – 950nm 镀膜保护玻璃

NIR: 850 – 1500nm 镀膜保护玻璃

DPT = 5D: 5 屈光度调焦范围

20D: 20 屈光度调焦范围

CL = 1: 波前误差等级 1 规格

THR = C: C口螺纹

M25.5: M25.5x0.5 螺纹

M26: M26x0.706 螺纹

M27: M27x0.5 螺纹

M30.5: M30.5x0.5 螺纹

M42: M42x1 螺纹

CTRL = E: 包含嵌入式镜头控制器 ECC-1C