

电动可调焦液态透镜 EL-16-40 (5D 版本)



EL-16-40 是一款基于专有形变聚合物透镜技术的可调焦透镜。通过施加电流，可在毫秒级时间内调节透镜曲率，使其在凹面与凸面之间变化，实现 -2 dpt 至 +3 dpt 的光学功率调节范围。该产品采用成熟的音圈驱动技术，具有极高的可靠性与机械鲁棒性，适用于宽温度范围及严苛工业环境中的应用场景。

为实现良好的重复性与焦点稳定性，系统内置温度传感器，可进行原位温度补偿。自 2024 年起，EL-16-40 还提供重力效应补偿技术，使其在不同安装姿态下均能保持一致的波前质量。

EL-16-40 提供紧凑型 OEM 集成版本，同时也可选配多种螺纹适配器及坚固的 Hirose 连接器版本，以满足工业应用需求。该大口径透镜的典型应用包括机器视觉、显微成像及眼科医疗设备等领域。

透镜规格

通光孔径	16	mm
焦距调节范围 (30°C, ± 250 mA)	-2 to +3	dpt
焦距 @ 0 mA (25°C, typical)	0.5 $\pm$ 1.0	dpt
焦距重复性	0.02 (std dev, class 1) 0.06 (std dev, class 2)	dpt
透过波段	VIS: 420 to 950 NIR: 850 to 1500	nm
波前误差 @ 0 dpt (光轴垂直 / 水平)	<0.15 / <0.5 (class 1) <0.25 / <0.5 (class 2) <0.15 / <0.16 (class 1, GTC version) <0.25 / <0.26 (class 2, GTC version)	λ RMS @ 532 nm
光轴精度	1.0	mm (typical)
光轴重复性	0.01	mm (STD, typical)
透镜类型	从平凹到平凸	
折射率 / 阿贝数	$n_D = 1.30$ / $v = 100$	
响应时间 (typ. at 30°C, 0 to ± 250 mA step)	5	ms
稳定时间 (typ. at 30°C, 0 to ± 250 mA step)	12.5 (with signal conditioning) 25 (rectangular step)	ms
使用寿命 (10% - 90% sinusoidal)	> 1'000'000'000	
工作温度	-20 to 65	°C
存储温度	-40 to 85	°C
重量 (OEM版本 / C-mount版本)	40 / 80	g

电气规格

额定控制电流	-250 to 250	mA
最大绝对控制电流	-500 to 500	mA
音圈电阻 @ 25°C	12	Ω
功耗 (额定 0 - 250 mA)	0 - 0.7	W
最大功耗 (@ 500 mA)	3.0	W
温度传感器及EEPROM	STTS2004 (STMicroelectronics)	
音圈最大电压	10	V
存储与传感器最大电压	4.3	V

标准产品概述

标准产品 ^{1,2,3,4}	调节范围	上螺纹	下螺纹
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 模型）
- 2 所有型号均可提供 NIR 镀膜或按需定制镀膜
- 3 所有型号均可提供 Class 1 版本，满足波前误差 $< 0.15 \lambda$ RMS，重复性 < 0.02 dpt
- 4 所有带螺纹适配器的型号均可选配内置透镜控制器 ECC-1C

液态透镜工作原理

EL-16-40 的工作原理基于成熟的形变聚合物透镜技术。构成透镜的核心部分包含光学液体，并通过弹性聚合物膜进行密封，如图 1 所示。电磁执行器（VCM，音圈电机）对容器施加压力，从而改变透镜曲率。通过调节流经执行器线圈的电流，即可实现透镜光学功率的精确控制。

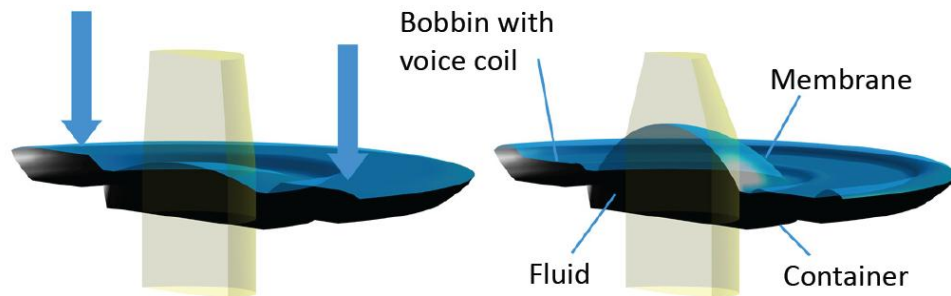


图 1：充满光学液体的密封透镜容器工作原理示意图，该结构集成于 EL-16-40 外壳中。

机械结构

EL-16-40 配备黑色铝制外壳。电气连接及控制器通信通过侧面的 100 mm 长 FFC 排线实现。此外，用户也可通过外壳侧面的 ZIF-FFC 滑动连接器接入自定义 FFC 排线。相关机械图纸见图 2。

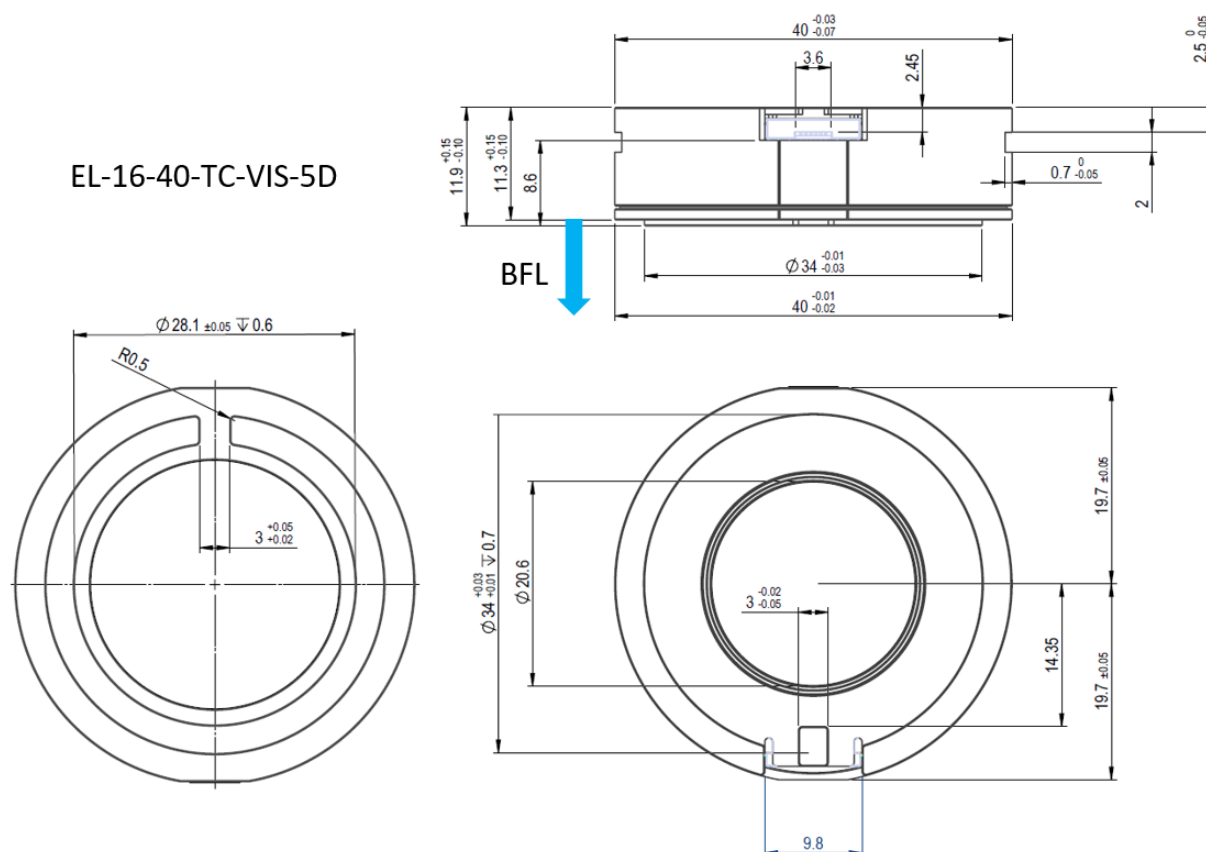


图 2: EL-16-40 最基础版本 (EL-16-40-TC-VIS-5D, 无任何螺纹适配器) 的机械图纸 (单位: mm)。

为便于在光学系统中实现最大灵活性，提供多种适配器配置，可在标准产品系列概览中查看。其中 EL-16-40-TC-VIS-5D-M42 如图 3 上部所示。该配置提供 M42 公/母螺纹组合，适用于大多数 M42 接口镜头与相机系统。顶部公螺纹可旋转，并可沿 z 轴方向延伸 3 mm，同时通过三颗紧定螺钉固定（需使用 1.5 mm 内六角扳手）。

其他螺纹组合 (M25.5、M26、M27、M30.5 及 C-mount) 均通过将 EL-16-40 安装于 M40.5×0.5 管筒中实现，并配置不同的上下适配器。这些适配器同样可旋转并通过单颗紧定螺钉锁紧。例如 EL-16-40-TC-VIS-5D-C 如图 2 下部所示。

所有适配器配置在侧面均配备扩展结构，提供 6 针 Hirose 连接器 (HR10G-7R-6P)，适用于严苛工业环境条件。该结构在图 3 右侧可见。

需要注意的是，重力补偿版本 EL-16-40-GTC 的容器玻璃相比原始 EL-16-40-TC 向外突出 0.5 mm，但不会超出机械外壳范围，因此整体厚度仍保持为 11.9 mm。

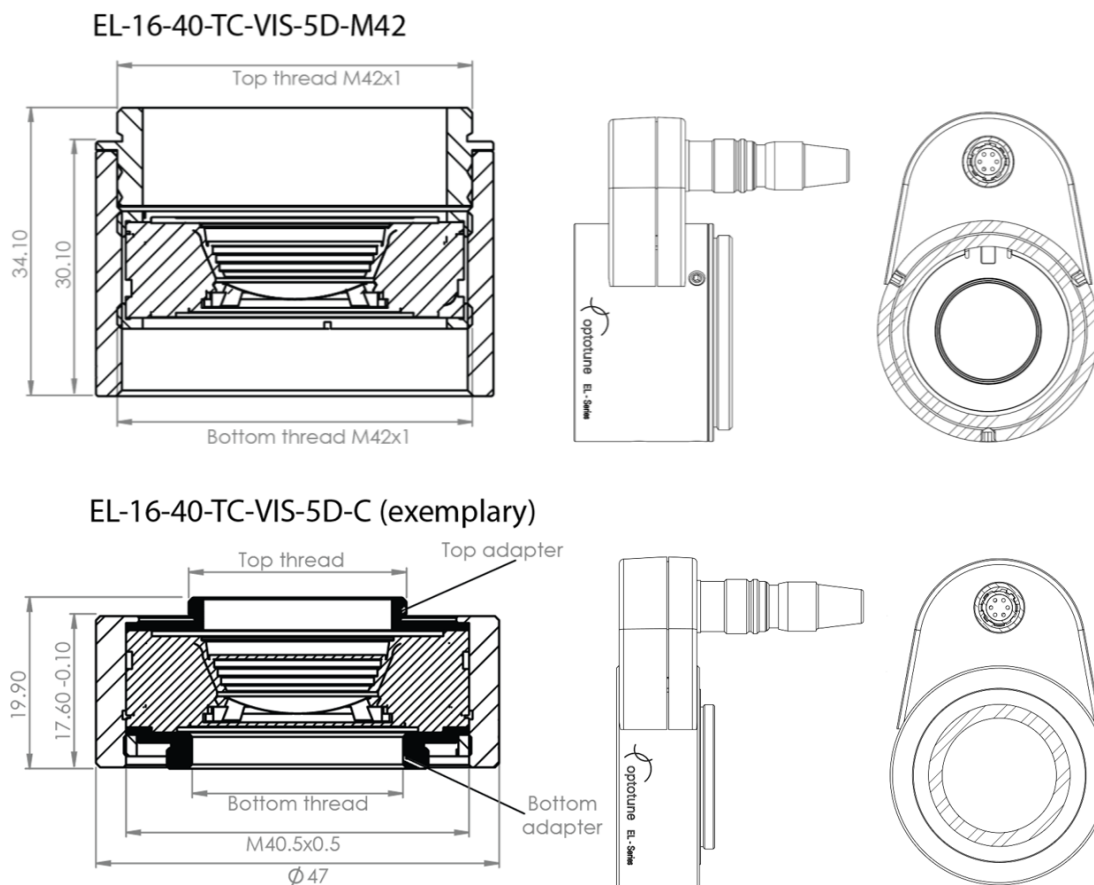
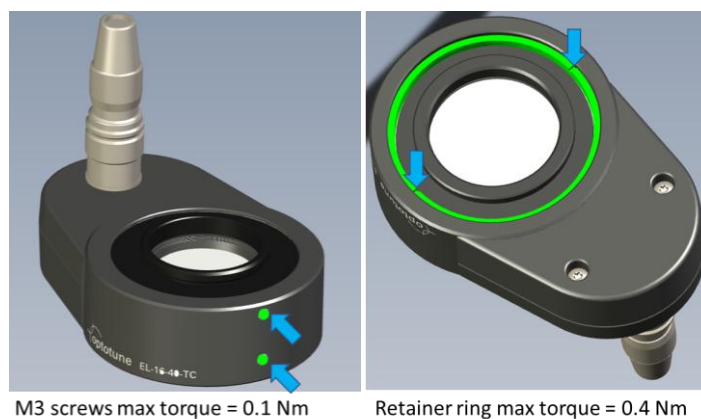


图 3: EL-16-40-TC-VIS-5D-M42 以及 EL-16-40-TC-VIS-5D-C 的机械图纸, 其中后者同样代表 -M25.5、-M26、-M27、-M30.5 等组合版本 (单位: mm)。

注意事项: EL-16-40-TC-VIS-5D-C 法兰面至底部盖玻璃的距离为 4.8 mm。请务必避免拧入具有外凸光学结构的 C-mount 镜头, 否则可能划伤甚至压裂玻璃。

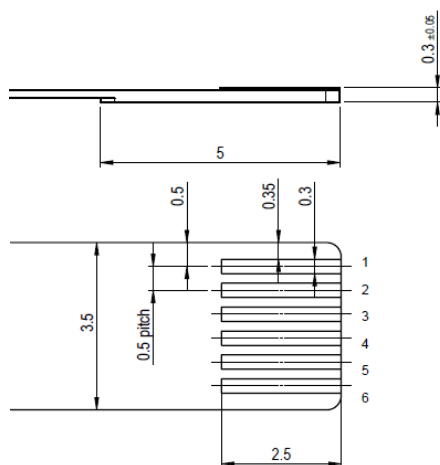
结构设计在侧面设置两颗 M3 螺钉, 用于锁定螺纹适配器的位置。其中上方 M3 螺钉可松开, 使 Hirose 连接器相对于顶部螺纹自由旋转 (如需要)。下方 M3 螺钉用于固定底部螺纹位置。每颗 M3 螺钉最大紧固扭矩为 0.1 Nm。推荐的安装顺序为: 先松开两颗 M3 螺钉, 拧紧锁紧环, 最后再锁紧 M3 螺钉。



注意事项: 超过上述最大扭矩规格可能会引入滞后效应或造成透镜损坏。

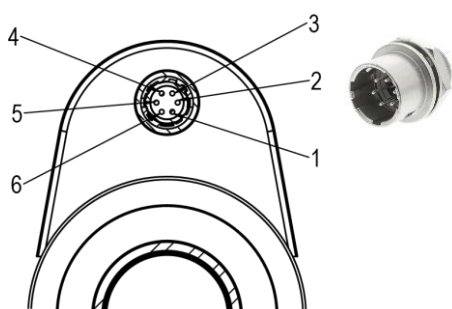
电气连接

EL-16-40（无适配器版本）的电气连接采用 6 针 FPC 柔性排线，兼容 Molex 503480-0600、Amphenol SFV12R-2STE1HLF 或等效连接器。其中：2 个引脚用于透镜线圈驱动，其余 4 个引脚用于温度传感器与 EEPROM 的 I²C。I²C 地址分别为：温度传感器：0x18，EEPROM：0x50。



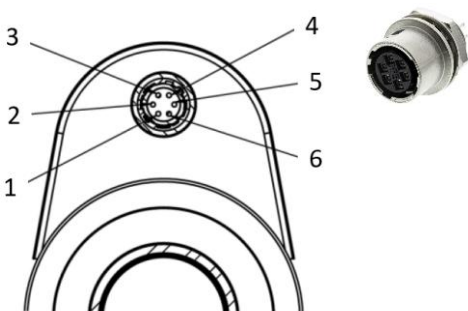
Pin out: EL-16-40-TC		
Position	Function	Value
1	GND	-
2	Max. control current -	-500 to 500 mA
3	Max. control current +	-500 to 500 mA
4	I ² C SDA	Digital signal
5	I ² C SCL	Digital signal
6	Vcc	3.3 V

图 4：EL-16-40 基础版本（无适配器）的电气柔性连接示意图。



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 ² C SCL	6
6	I ² C SDA	5

图 5：不带嵌入式控制器的透镜型号电气连接示意图（配备 Hirose 公连接器）。



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

图 6：带嵌入式控制器 ECC-1C 的透镜型号电气连接示意图（配备 Hirose 母连接器）。

焦距（光学功率）与电流关系

如图 7 所示，EL-16-40 的光学功率随正电流增加而增大，随负电流增加而减小。当驱动电流达到绝对最大控制电流时，调节范围可进一步扩大，但需考虑显著的热量产生问题。

需要注意的是，当透镜发生旋转时，应考虑由重力引起的光学功率偏移，约为 0.15 ± 0.01 dpt（即液态透镜朝上与朝下状态之间的差异）。

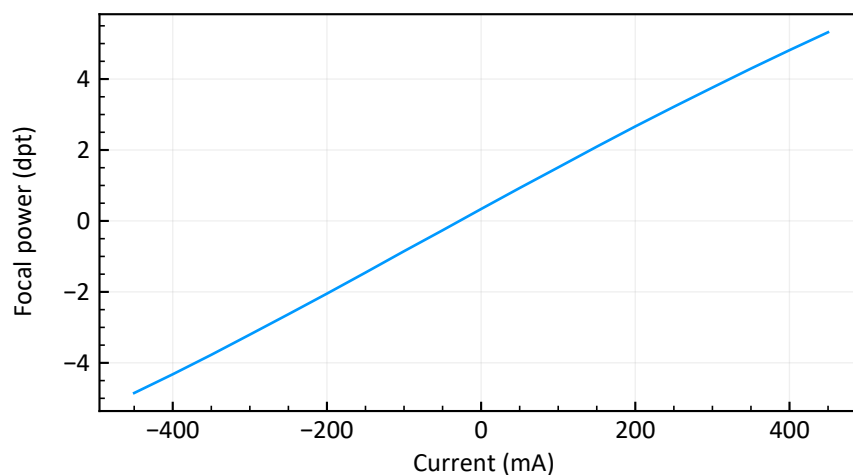


图 7：焦距（屈光度）与电流关系的典型数据曲线。

透过特性

光学液体与膜材料在 400 至 2500 nm 波段范围内具有高透过率。由于膜片为弹性结构，无法采用标准镀膜工艺处理，因此预计会产生约 3–4% 的反射损耗。盖玻片可根据需求进行定制镀膜。图 8 展示了标准宽带镀膜的透射光谱。

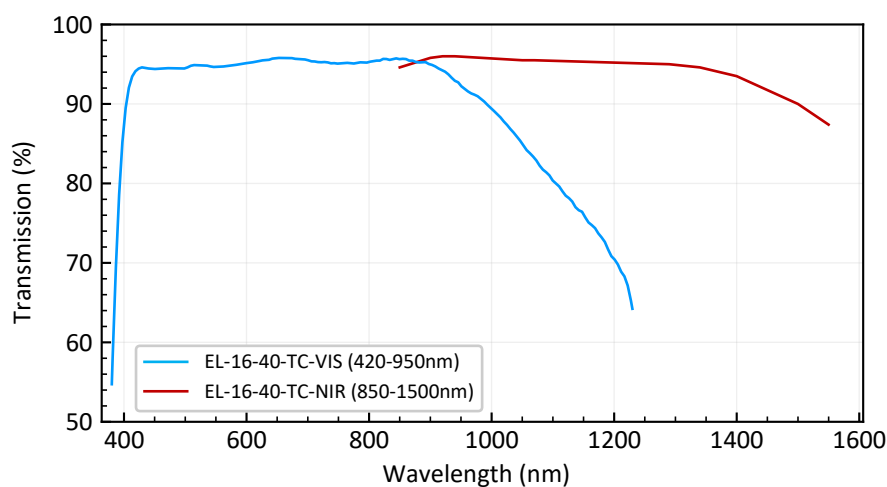


图 8：EL-16-40 在标准可见光（VIS）及近红外（NIR）镀膜玻璃条件下的透射光谱。

波前质量

图 9 展示了波前误差随焦距变化的典型关系曲线。不同透镜之间的波前质量存在一定差异，可根据需求进行不同等级的规格定义。目前标准规格为：在光轴垂直配置下，Class 1 透镜的波前误差为 0.15λ RMS，Class 2 透镜为 0.25λ RMS。

当透镜以竖直安装方式使用（光轴水平）时，需要引入 Y 向彗差项，并提供以下两种配置选项：

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

所采用的重力补偿技术为纯被动式结构，在透镜旋转 90° 后约 1 秒内稳定，并且不会对其他任何性能指标产生不良影响。

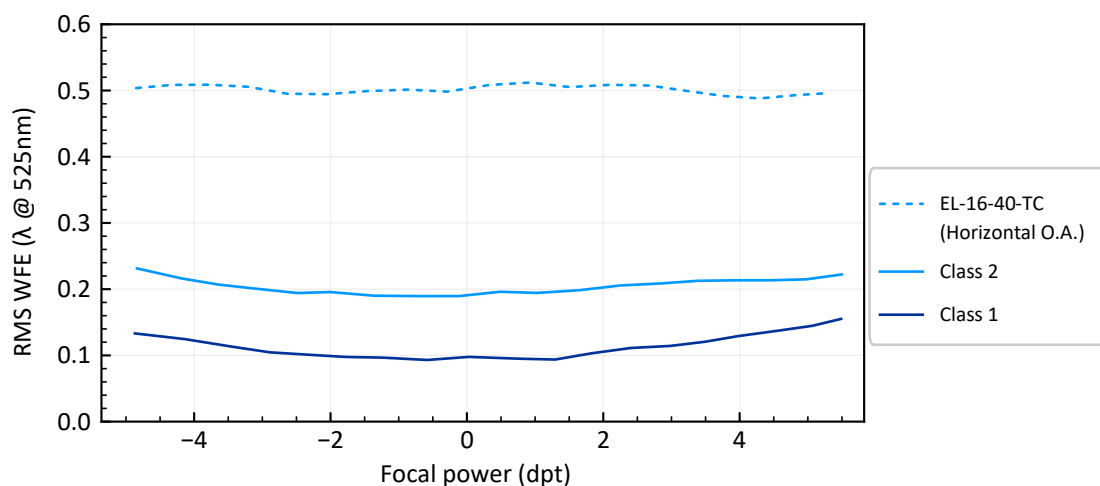


图 9：EL-16-40 波前误差随焦距变化的典型曲线（@525 nm，在 80% 通光孔径范围内测量，已排除离焦、倾斜及球面项）。).

响应时间

施加电流阶跃时，上升时间约为 5 ms。然而，透镜高阶振荡完全稳定下来约需 20–25 ms。图 10 展示了在室温条件下测得的多个电流阶跃对应的光学响应曲线。

控制器可提供相应的信号调理功能，将稳定时间缩短约一半，如图 11 所示。

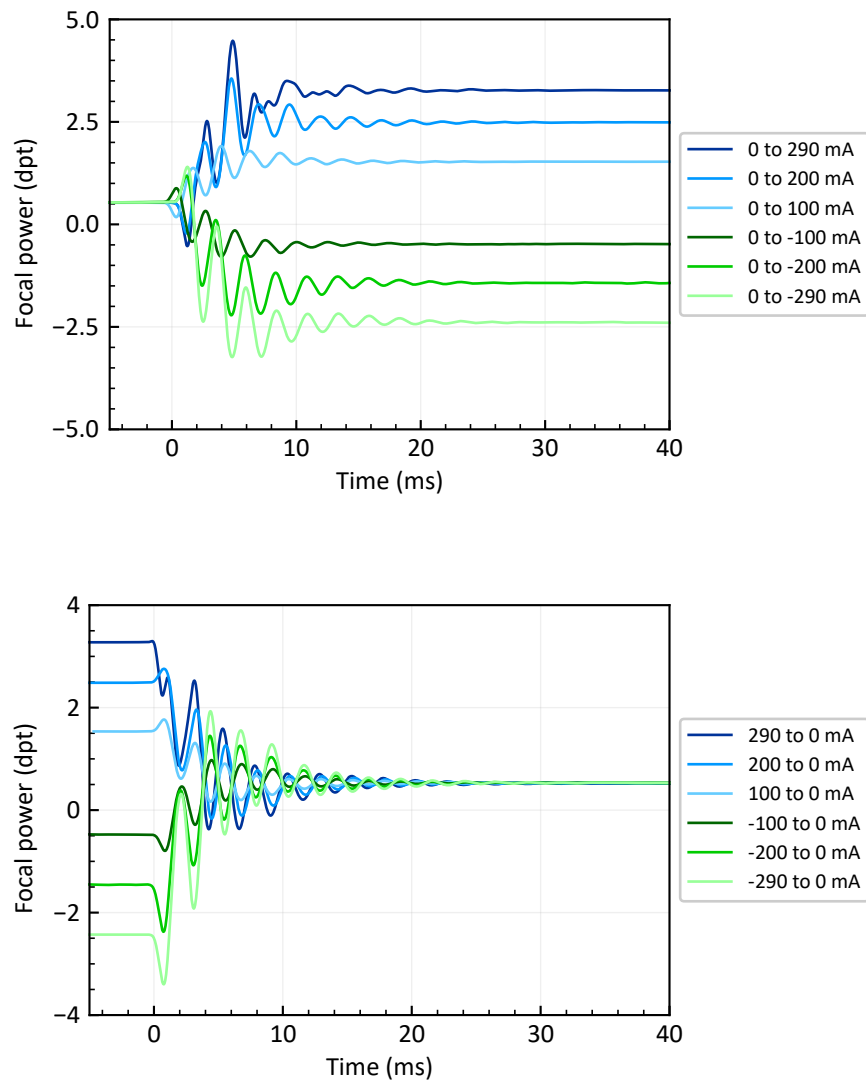
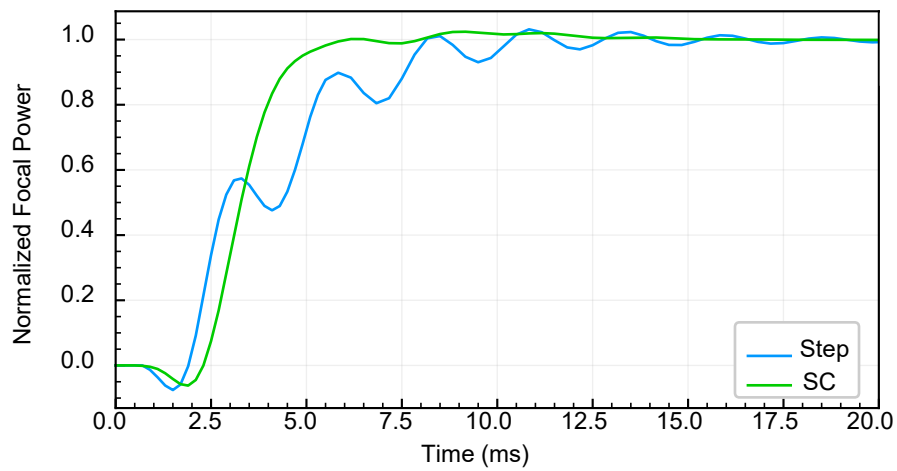


图 10: EL-16-40-TC-VIS-5D 在多个电流阶跃下的典型光学响应。上图显示电流由低到高的一系列阶跃响应，下图显示电流由高到低的阶跃响应。



11: 通过提供信号调理 (Signal Conditioning, SC) , 控制器可显著降低稳定时间。

宽频范围内的频率响应如图 12 所示, 在 400 Hz 处出现共振峰。需要注意的是, 该共振源自高阶振动模式, 一般不适用于覆盖整个有效光阑的成像应用。

在施加电流阶跃时, 建议使用低通滤波器对 200 Hz 以上频率进行衰减, 以避免激发振荡现象 (如图 9 所示)。

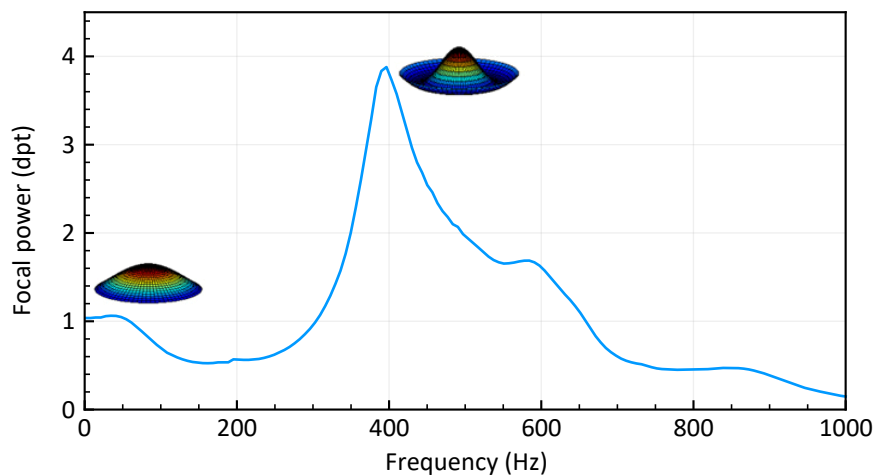


图 12: EL-16-40-TC 的典型频率响应曲线, 驱动电流幅值为 -50 至 +50 mA。

温度效应

残余温度效应会影响规格表中所述的光学功率长期漂移。该温度影响通过温度灵敏度 S (dpt/°C) 进行量化，即光学功率随每摄氏度变化的量。

如图 13 所示， S 与光学功率之间呈近似线性关系。一般而言，当 EL-16-40 与散热器进行良好热耦合时，可有效降低温度效应。安装结构本身也可作为散热器使用，较大的质量以及高导热系数材料有助于更高效地散热。

透镜控制器以及 Gardasoft TR-CL180 利用内置温度传感器与标定数据，可实现对该热漂移的自动补偿。

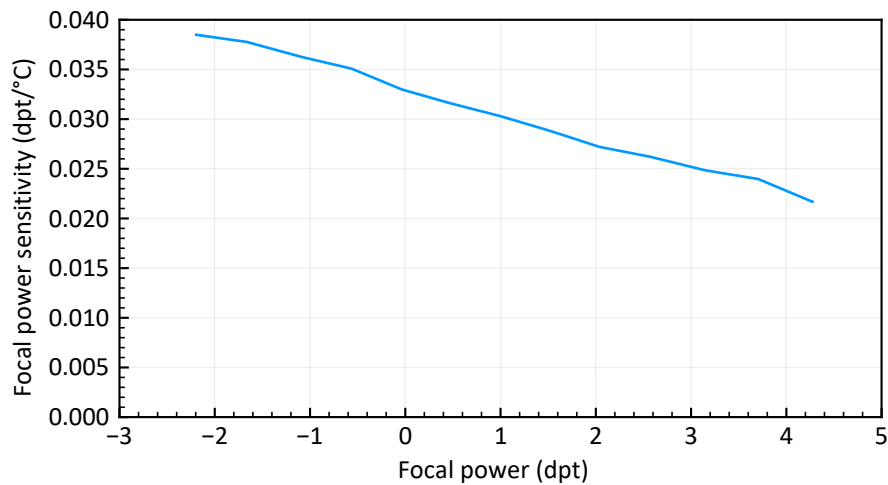


图 13: 温度灵敏度随焦距变化的关系曲线。

由于透镜内部液体的黏度会随温度变化，因此其响应特性也会发生改变，如图 14 所示。需要注意的是，在极低工作温度条件下，可向 EL-16-40 施加高达 500 mA 的电流，使透镜自发热约 10–20°C。

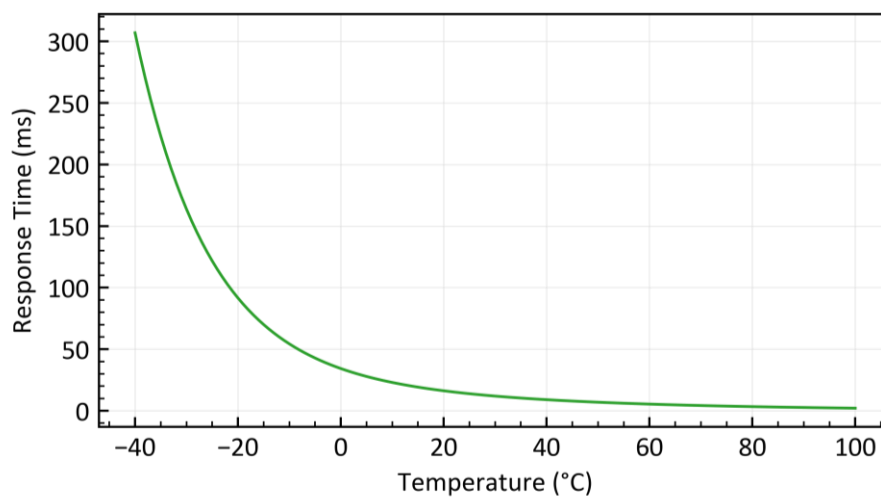


图 14: 响应时间随透镜温度变化的关系曲线。

重复性测量*

为验证透镜在严苛条件下的重复性性能，使用ICC-4C 复现了液态透镜的不同应用工况。不同驱动方案如图 15 所示，包括：

- 静态测试：将透镜调节至多个焦距，并在每个设定值保持约 5 分钟。
- 动态测试：对透镜进行随机焦距调节。
- 动态测试（带复位）：在相邻随机跳变之间加入 0 mA 复位操作的随机调节测试。

上述每种测试分别在 ± 50 mA 与 ± 200 mA 电流范围内进行；同时，在稳定控制温度 30°C 条件下，以及在温度上升约 15°C （持续约 15 分钟）的条件下重复执行，以验证 温度补偿功能（光学功率模式）。为简化展示，图 15 仅给出在 30°C 条件下、 ± 50 mA 电流范围的测试结果。其中，绿色曲线表示光学功率偏差，该偏差定义为实测光学功率与设定值之间的差值，用于表征重复性性能。

图 16 以柱状图形式汇总了重复性测试结果，展示了在不同驱动模式、电流范围及温度条件组合下，光学功率偏差的标准差（SD）。

- 在所有测试条件下，重复性（标准差 SD）均远低于 0.020 dpt（ 20 mdpt）。
- 在所有驱动方式及两种电流范围下，当测试在稳定 30°C 条件下进行时，重复性（SD）均低于 0.010 dpt（ 10 mdpt）。
- 在所有驱动方式下，当使用 ± 50 mA 电流范围（约对应 1.5 dpt）且温度稳定在 30°C 时，重复性（SD）低于 0.005 dpt（ 5 mdpt）。

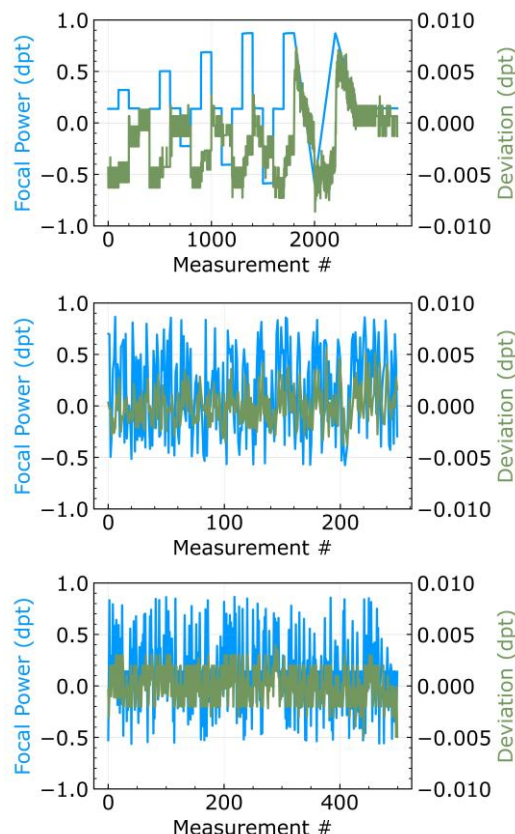


图 15: 重复性测试的驱动方案（静态、随机，以及带 0 mA 复位的随机保持测试）。

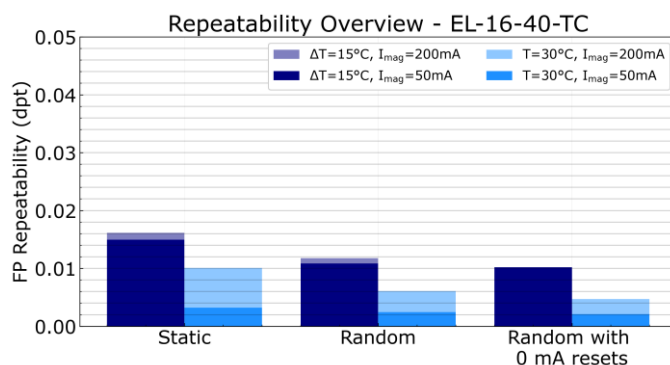


图 16: 重复性测试结果汇总（不同驱动方式、电流范围及透镜温度组合下的标准差 SD）。

* 以下结果代表 Class 1 透镜的重复性性能。Class 2 透镜的性能可能有所不同。此外，该结果仅对应 10 小时时间范围内的重复性表现。为在产品全生命周期内维持类似性能，可能需要进行周期性的原位重新校准。

在我们的重复性白皮书中，通过一个实际机器视觉应用案例（使用 2× 远心镜头、极浅景深并搭配 EL-16-40-TC），展示了如何实现 ± 10 mdpt 的重复性表现。

寿命与可靠性

EL-16-40 已通过表 1 所列的环境与加速老化测试。在适用情况下，相关测试已参照 ISO 9022《光学与光子学——环境试验方法》标准执行。

测试项目	ISO	结果
机械循环 200 million full range cycles (standard cycling -280mA to +280mA @ 50 Hz Sinusoidal)	-	Pass, continued test ongoing
干热暴露 (工作状态) 63 $\pm$ 2 °C, rel. humidity <40%, Cycling at -280mA to +280mA @50Hz step, 16 Hrs.	9022-11-04-2	Pass
低温暴露 (工作状态) -35°C $\pm$ 3°C, Cycling at -280mA to +280mA @1Hz step, 16 Hrs.	9022-10-07-2	Pass
干热暴露 (存储) 85 $\pm$ 2 °C, rel. humidity <40%, non-operating, 2Hrs.	9022-11-08-1	Pass
低温暴露 (存储) -40 $\pm$ 3 °C, non-operating, 16Hrs.	9022-10-08-1	Pass
湿热试验 55 $\pm$ 2 °C, rel. humidity 90% to 95%, 16Hrs.	9022-12-07-1	Pass
温度冲击 -40 to 55 °C, 2.5h/cycle, <20s transition time, 5 cycles	9022-15-03-1	Pass
太阳辐射 55°C $\pm$ 2°C, 1120 W/m ² , 10 days	9022-9-04a	Pass
机械冲击 100g, 6ms, 3 shocks along each axis	9022-30-07-1	Pass
响应时间 Full step Lens response	-	Pass
循环重复性	-	Pass

表 1: EL-16-40 的可靠性与寿命测试结果

光学布局

用于在光学设计中对 EL-16-40 系列进行建模的 Zemax 仿真文件可通过指定链接获取。

自发荧光、双折射与偏振效应

EL-16-40 不存在自发荧光、双折射或任何形式的偏振依赖性。

安全与合规

本产品符合 RoHS 与 REACH 合规标准。客户需自行负责在集成与使用过程中遵守所有相关安全法规。

包装

EL-16-40工业版以单个包装形式提供，包装于独立纸盒中。

EL-16-40 OEM 版以单个包装于膜盒中提供，或按每托盘 25 个单元包装。

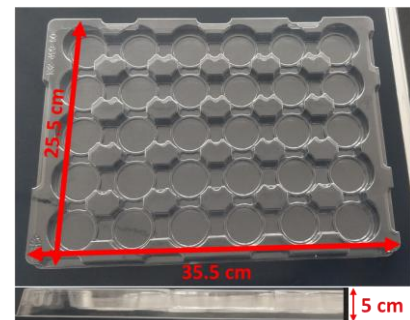


图 17: EL-16-40 OEM 版 25 单元托盘的尺寸示意图。

EL-16-40 订购信息

对于定制版本，请按照以下零件编号规则进行标注：

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

COMP = TC: 温度补偿型

GTC: 重力与温度双重补偿型

AR = VIS: 覆盖玻璃涂层波段 420–950 nm

NIR: 覆盖玻璃涂层波段 850–1500 nm

DPT = 5D: 焦距可调范围 5 dpt

20D: 焦距可调范围 20 dpt

CL = 1: 波前误差 Class 1 规格

THR = C: C 型接口螺纹

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: 含嵌入式镜头控制器 ECC-1C