

DOCUMENT IDENTITY STATEMENT

本文件为 POMEAS 基于光学工程原理、实验室测试实践及机器视觉应用经验编制的技术参考文件，用于机器视觉光学系统的选型、测试、比较和系统集成，**不属于国家标准、国际标准或行业标准。**

POMEAS 技术参考文件 TR-001 · 版本 1.0 · 2026-09-16

机器视觉光学成像系统 — 性能测试方法

POMEAS 技术参考文件 TR-001 中文版 · 版本 1.0 · 2026-09-16

文件编号	版本	发布日期	对应英文版
POMEAS-TR-001-CN	1.0	2026-09-16	POMEAS-TR-001 v1.0

文件身份声明

本文件为 POMEAS 基于光学工程原理、实验室测试实践及机器视觉应用经验编制的技术参考文件，用于机器视觉光学系统的选型、测试、比较和系统集成，**不属于国家标准、国际标准或行业标准。**

凡引用外部标准，均标注标准编号、名称与版本。本文件仅对第 3 节所列标准在发布之日核对过其发布机构目录。本文件不声称获得 ISO、IEC、GB、DIN、ANSI、IEEE、EMVA 或任何其他标准机构的符合性认定或批准。

版本说明

本中文版为英文版 POMEAS-TR-001 v1.0 的**等效版本**：章节结构、公式、表格与判据与英文版逐条对应；叙述性说明按中文表达习惯重写并适当精简。**凡有歧义，以英文版为准。**

文档信息

字段	内容
文件编号	POMEAS-TR-001-CN
文件类型	Technical Reference（技术参考文件）
版本	1.0
发布日期	2026-09-16
语言	中文（对应英文版 POMEAS-TR-001）
编制	普密斯机器视觉光学 — 应用与计量
适用范围	机器视觉光学成像系统：FA 定焦镜头、远心镜头、电动连续变倍镜头、显微与线扫镜头组件，以及与之集成的相机、光源与机械结构
状态	公开。可自由下载、引用、转载（需注明出处）

1. 范围

本文件规定机器视觉光学成像系统性能参数的**测试方法、计算方法和判读依据**，覆盖 16 组参数：

1. 视场 FOV 2. 工作距离 WD 3. 倍率 β 4. 光学分辨率与 MTF 5. 像素分辨率与系统分辨率 6. TV 畸变 7. 全场几何畸变 8. 景深 DOF 9. 远心度 10. 数值孔径 NA 与光圈 11. 齐焦性（电动变倍镜头） 12. 变倍重复性与背隙 13. 对焦重复性 14. 传感器兼容性与像圈 15. 光源条件 16. 标定与测量不确定度

所有方法均以机器视觉集成商**常规可及的设备**为前提：刚性台架、标定靶标、平移台、可输出未处理图像的工业相机、焦点/边缘评价软件。凡需要计量实验室或镜头厂专用设备的方法，本文件均明确标注。

不在范围内：光学元件面型与表面疵病、环境与耐久试验、色差与色彩还原、杂散光与眩光、激光与非成像光学系统、镜头内部设计与制造公差。本文件评价的是**使用状态下的系统**，不是孤立的光学设计。

2. 目的

市面上的镜头资料回答的是"数值是多少"。本文件回答另一个问题：

怎么测？

每个参数按固定结构展开：

定义 → 测试设备 → 测试搭建 → 测试步骤 → 计算 → 结果记录 → 常见错误 → 工程解读

这个结构是刻意的。**没有测试条件的数值不构成规格**——"FOV 100 mm"若不写明倍率、工作距离、传感器靶面与测量平面，就无法复现。第 12 节汇集了最常导致结果无法复现的错误，第 11 节提供的报告模板强制把测试条件与结果一同记录。

实测值与理论值的区分标记（全文贯穿）：

标记	含义
[T]	理论/计算值。由几何关系与元件数据表参数推算，在其模型内精确，但模型本身是真实系统的近似
[M]	实测值。在所述测试条件下对 特定实物 测得，仅对该实物、在该不确定度内成立
[POMEAS LAB TEST DATA REQUIRED]	本文件的方法已定义，但普密斯尚无公开实验室数据。附录 B 为该类条目的登记表

本文件中的任何数值，**除出现在普密斯产品彩页中的以外，均不作为普密斯产品规格**。用于说明的工程算例一律标注为示例。

3. 引用标准

以下文件已在发布之日核对发布机构目录。若存在更新版本，以更新版本为准。

引用	名称（已核对）	版本/状态	在本文件中的用途
ISO 12233	Digital cameras — Resolution and spatial frequency responses	ISO 12233:2024 ，第 5 版，2024-09 发布，ISO/TC 42	斜边 SFR（e-SFR）测量算法与靶标要求；§8.4
ISO 9335	Optics and photonics — Optical transfer function — Principles and procedures of measurement	ISO 9335:2025 ，第 3 版，2025-02 发布，ISO/TC 172/SC 1	OTF/MTF 测量设备与环境控制的通用规则；§6、§8.4
ISO 9334	Optics and photonics — Optical transfer function — Definitions and mathematical relationships	ISO 9334:2012 ，已确认	OTF/MTF/PTF 术语；§4
ISO 9039	Optics and photonics — Quality evaluation of optical systems — Determination of distortion	ISO 9039:2008 ，第 2 版，2008-02 发布，ISO/TC 172/SC 1	畸变测定的参考方法；§8.6、§8.7
ISO 1	Geometrical product specifications (GPS) — Standard reference temperature for the specification of geometrical and dimensional properties	ISO 1:2022 ，第 4 版，2022-06-14 发布，ISO/TC 213	标准参考温度 $t_{90} = 20$ °C，本文件默认测试温度；§5
ISO/IEC Guide 98-3	Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)	Guide 98-3	不确定度预算框架；§13
ISO/IEC Guide 99	International vocabulary of metrology (VIM)	Guide 99	被测量、不确定度、溯源等定义；§4
ISO 14253-1	Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications	ISO 14253-1:2017 ，第 3 版，2017-10 发布，2023 确认，ISO/TC 213	实测值接近规格限时的接收/拒收判定规则；§10.1
ISO 5725-1 / -2	Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results	—	§13 的重复性与再现性定义
EMVA 1288	Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras	Release 4.0 ，2021 年 6 月生效（ <i>Linear</i> 与 <i>General</i> 两个模块），由欧洲机器视觉协会（EMVA）维护	相机侧参数。 EMVA 1288 是行业标准，不是 ISO/IEC 标准 ，本文件不将其作为 ISO 标准引用

未引用的标准：本文件所覆盖的参数，未找到可直接适用且已核实的 GB、DIN、ANSI、IEEE 文件，故未引用。这是关于**适用性**的陈述，不是对其质量的评价。

4. 术语与符号

4.1 符号

符号	名称	单位	说明
β	倍率（横向，像/物）	—	通用光学文献中也写作 m 。变倍镜头须注明变倍位置与工作距离。 $\beta > 1$ 表示放大
m	倍率（替代符号）	—	与 β 含义相同，仅在公式习惯写法中使用
FOV_O / FOV_I	物方 / 像方视场	mm	物方视场 = 成像到传感器有效区的物面范围
WD	工作距离	mm	镜头基准面到最佳对焦物面的距离。 基准面必须注明
p	像元尺寸（像元间距）	μm	取自传感器数据表， 不要用 像素数除以靶面推算
N_H, N_V	有效像元数	px	仅有效像元 ，不含 dummy、光学黑与边界像元
L_{obj}	物方像元尺寸	μm	$L_{\text{obj}} = p / \beta$
$F\#$	光圈 F 数（像方）	—	焦距与入瞳直径之比，按镜头刻度取值
N_{eff}	有效 F 数	—	像方： $N_{\text{eff}} = F\# \times (1 + \beta)$
NA	数值孔径	—	$NA = n \cdot \sin\theta$ 。由 Abbe 正弦条件： $NA_{\text{obj}} / NA_{\text{img}} = \beta$ （空气中）
λ	波长	μm	必须注明取值。本文件默认 $0.55 \mu\text{m}$ （绿光）
c	允许弥散圆（像方）	μm	景深计算用的弥散圆。 报景深必须同时报 c
c_{obj}	允许弥散圆（物方）	μm	$c_{\text{obj}} = c / \beta$
$f_{\text{img}} / f_{\text{obj}}$	空间频率（像方/物方）	lp/mm	$f_{\text{obj}} = \beta \times f_{\text{img}}$
f_{Nyq}	奈奎斯特频率	lp/mm	$f_{\text{Nyq}} = 1000 / (2p)$ ， p 单位 μm
f_{cut}	衍射截止频率	lp/mm	$f_{\text{cut}} = 2NA / \lambda$ （非相干照明）， λ 单位 mm
θ	物方主光线角	mrad 或 °	主光线偏离光轴的角度
$D(x,y)$	局部畸变	%	相对中心倍率的局部倍率偏差
E	相对照度（暗角）	%	$E = \text{场点照度} / \text{中心照度}$
u_c / U	合成标准 / 扩展不确定度	μm 或 %	$U = k \cdot u_c$ ，本文件默认 $k = 2$ （约 95% 置信）

4.2 关键定义

有效区：在整个曝光时间内输出有效图像数据的传感器区域。以相机自身文档为准，不以宣传像素数为准。

最佳对焦：所选焦点评价指标取得极大值时的物面（或像面）轴向位置。不同指标峰值位置不同，故**最佳对焦只有与焦点指标一同定义才有意义**。本文件默认指标为视场中心斜边的 MTF50 (§5.3)。

测量平面：实际取测量值所在的物面。有景深时物体可位于景深内任意位置，测量结果仅对该平面有效。**除非系统为物方远心 (§8.9)，否则测量结果不适用于测量平面以外的物体。**

光学分辨率：镜头在给定空间频率上传递对比度的能力，是镜头的属性，在像面评价。

像素分辨率：相机采样带来的极限，即奈奎斯特频率。

系统分辨率：镜头 + 传感器 + 光源 + 相对运动 + 算法的综合成像能力，恒低于光学分辨率或像素分辨率单独取值。

远心度（物方）：物方主光线平行于光轴的程度，以**指定物方视场内的最大主光线角**表示。

齐焦性：变倍镜头的固有属性——改变倍率时像面位置不变（物体在同一工作距离上保持清晰）。

重复性：同一条件（同一程序、同一操作者、同一仪器、同一地点、短时间内）对同一被测量连续测量结果之间的一致程度，以标准差与极差表示。

畸变：倍率随视场变化，即像相对物的几何相似映射的偏离。**畸变不使图像模糊，只使其位移——这就是它对测量致命、而对有无判定无害的原因 (§8.7.8)。**

5. 通用测试条件

除方法中另有说明外，所有测试均在下述条件下进行。**实际值必须写入测试报告 (§11)。**没有测试条件的结果不是结果。

5.1 环境

条件	要求	原因
环境温度	20 ± 2 °C，测温点距台架 1 m 内。尺寸测量的标准参考温度为 20 °C（ISO 1:2022）	倍率与比例系数依赖机械间距，而机械间距随温度变化。100 mm 铝制镜筒每升温 1 K 膨胀约 2.3 μm；钢结构约 1.2 μm
热稳定	镜头、相机、光源通电预热 ≥30 min 后开始第一次测量	LED 输出与相机黑电平在开机后 10–30 min 内漂移
温度漂移	单次测试序列期间 ≤0.5 K	序列内漂移会表现为重复性误差
振动与气流	刚性光学台或花岗岩平板；台面上方无风扇、无空调直吹；同层机床停机	亚像素质心对亚微米级运动敏感；镜筒气流会导致焦点漂移
杂散光	测试区避开直射日光与附近不受控光源	杂散光会拉低测得的 MTF，尤其是靶标暗条区域

5.2 光源

项	要求
类型	LED 恒流驱动。若用 PWM 调光，频率须 ≥20 kHz，或曝光与 PWM 同步，否则光强纹波表现为噪声
光谱	记录峰值波长（单色）或相关色温（白光）。测 MTF 用窄带光源 （典型 $\lambda = 0.55\ \mu\text{m}$ ），白光会因色差展宽边缘、压低测得 MTF
几何	记录是同轴（穿镜头）、环形、条形、穹顶、背光（透射）还是远心；记录工作角与距离
照明是否远心	必须显式说明。非远心照明会引入与“非远心镜头”完全相同的透视误差，且会被计入成像系统（§8.15）
均匀性	测 MTF 与畸变时，边缘或点阵所在区域照明均匀性 ≤ ±5%。测 MTF 时非均匀会改变有效边缘对比；测畸变时照度梯度不移动质心，但 饱和会移动 ——峰值信号控制在满量程 60–80%
背光靶标	玻璃铬版靶标须用漫射背光，并确认所用曝光下铬层完全不透光（实测密度 ≥ 3）
稳定性	序列开始与结束时各拍一帧参考。若平均灰度差 > 2%，整个序列重做

5.3 相机设置

在本文件的方法中，相机是**测量仪器**，其内部处理必须被中性化。

设置	要求状态	原因
γ	1.0（线性），或先按实测 γ 曲线做线性化	MTF 与质心计算都假定灰度与照度线性相关
锐化	关闭	锐化会把表观 MTF 抬高几十个百分点。 带锐化得到的任何 MTF 或分辨率数字均无效
降噪 / 时域滤波	关闭	改变边缘轮廓与噪声统计
数字增益 / 白平衡 / 色彩校正	关闭或固定并记录	通道处理改变边缘轮廓
Binning	关闭	降低分辨率并改变有效像元尺寸
黑电平 / 偏置	固定并记录， 不得在零处截断	被截断分布的方差不等于信号方差
曝光与增益	整个序列固定。使最亮区域处于饱和的 70–80%	避免削顶，同时用足动态范围
格式	未压缩：RAW 或 16-bit TIFF/PNG。若只有 8-bit 须记录，并预期低对比下可达 MTF 更低	JPEG 压缩修改边缘，使 MTF 失效
平均	噪声受限时平均 ≥ 16 帧， 且须先确认光源方波稳定	帧平均降随机噪声，不修正漂移

5.4 对准

项	要求	验证方法
光轴与靶面垂直度	测 FOV / 倍率 / 畸变时 $\leq 0.2^\circ$	自准直仪；或将同一靶标在 0° 与 180° 各测一次——倾斜 θ 会使两个方向的倍率差约 2θ 。若两者不一致，说明靶标倾斜或镜头轴不垂直于靶面
对中	靶心、光轴、传感器中心同轴度 $\leq$ FOV 的 2%	中心倍率与四个 0.7 视场倍率应对称
旋转	测畸变时点阵轴与传感器轴对齐 $\leq 0.5^\circ$	成像点阵的方正度
对焦	整个序列由同一操作者、用同一指标设定	

5.5 数据处理

- **重复次数**：任何报告值 ≥ 5 次；涉及验收判定时 ≥ 10 次。
- **报告格式**：给均值、标准差 s 与极差（最大–最小）。**不得只报均值。**
- **异常值**：只有在找到明确原因（碰台、丢帧、光源变化）时才剔除，并记录每一次剔除及其原因。**绝不因为“离均值远”就删点。**

- **修约：**只对报告值修约，中间结果不修约。报告位数以参考标准的实际分辨力为限——玻璃标尺证书不确定度为 1 μm 时，报出优于 0.1 μm 的位数没有依据。
- **溯源：**记录每一个有证参考件的证书号与有效期。

6. 所需设备

编号	项目	最低规格	用途
E1	刚性光学台或花岗岩平板	平面度 ≤20 μm/300 mm；负载挠度 ≤10 μm	全部测试
E2	靶标轴向（z）平移台	分辨力 ≤1 μm，背隙 ≤2 μm，带数显	WD、景深、齐焦、远心度
E3	二维或三维靶标台	分辨力 ≤10 μm	特征选取、对中
E4	标定玻璃标尺，长度 ≥ 最大预期 FOV 的 1.2 倍	证书扩展不确定度 ≤2 μm（k=2），可溯源	FOV、倍率、畸变、重复性
E5	标定点阵或棋盘靶，≥15×15 节点，覆盖 ≥1.2×FOV	节点位置不确定度 ≤3 μm，节点共面	畸变、标定
E6	符合 ISO 12233 的斜边靶（或认证西门星靶）	分析段内边缘直线度 ≤2 μm；边缘角偏离垂直 2°–7°	光学分辨率 / MTF
E7	USAF 1951 或等效线对靶	条宽已认证	目视/快速分辨率筛查（ 仅筛查，不用于报 MTF ）
E8	景深试件：斜面、阶梯块或已知阶梯高度的靶	阶梯高度已知至 ±1 μm	景深、远心度、远心照明测试
E9	漫射背光，可控恒流源	靶面均匀性 ±3%；稳定性 ±1%/10 min	背光靶标测量
E10	积分球或乳白扩散板平场源	像圈内均匀性 ±1%	暗角、传感器兼容性
E11	可输出未处理图像的工业相机（见 §5.3）	靶面 ≥ 镜头标称支持的最大靶面	全部测试
E12	自准直仪（或可 0°/180° 成像靶标的旋转工装）	角分辨力 ≤0.05°	倾斜验证
E13	温度计 / 温度记录仪	分辨力 ≤0.1 K，准确度 ≤0.3 K	测试条件记录
E14	软件：ISO 12233 边沿 SFR 分析、亚像素质心与圆拟合、径向畸变多项式拟合	须用已知 SFR 的合成靶标验证过	数据分析

本文件不要求、通常只有镜头厂或计量实验室才具备的设备：透射波前干涉仪、已知焦距的平行光管（无限共轭测量）、节点滑轨台、测角分光光度计。凡需在无限共轭下标定镜头，应采用厂家自身数据。

7. 性能参数总表

#	参数	符号	单位	方法节	主要报告量	主导因素
7.1	视场	FOV_O	mm	8.1	指定 WD 与变倍位置下的 FOV 宽×高	β、有效靶面、WD
7.2	工作距离	WD	mm	8.2	相对基准面的最佳对焦 WD 与焦带	焦点指标、基准面定义
7.3	倍率	β	—	8.3	视场中心与边缘的 β（注明 WD）	设计、WD、变倍位置
7.4	光学分辨率 / MTF	MTF50	lp/mm	8.4	像方与物方 MTF50，≥5 个视场点	像差、光圈、λ、对焦
7.5	像素分辨率	f_Nyq	lp/mm	8.5	奈奎斯特极限与物方像元尺寸	p、β
7.6	系统分辨率	f_sys	lp/mm	8.5	镜头 + 传感器的合成 MTF50	镜头+传感器+光源+运动
7.7	TV 畸变	TV	%	8.6	边缘直线弯曲量对像高的归一化	设计；以及报告约定
7.8	全场几何畸变	D(x,y)	%	8.7	全场最大局部倍率偏差 + 畸变图	设计、WD、倾斜
7.9	景深	DOF	mm	8.8	指定 c 与判据下的物方景深	F#、β、c
7.10	远心度	θ_max	mrاد / °	8.9	指定物方视场内的最大主光线角	设计、WD
7.11	数值孔径	NA	—	8.10	物方 NA、衍射截止频率	光圈、β
7.12	齐焦性	Δf	mm	8.11	变倍后恢复对焦所需的 WD 位移	变倍凸轮设计、调焦机构
7.13	变倍重复性	σ_z / β_b	μm / ppm	8.12	回到同一预置位的位置散差与光学散差	机构、编码器、控制环
7.14	对焦重复性	σ_f	μm	8.13	焦点位置或 MTF50 的散差	机构、自动对焦算法
7.15	传感器兼容性	E / IC	% / mm	8.14	四角相对照度；像圈直径	设计、靶面、转接件
7.16	光源条件	—	—	8.15	类型、几何、是否远心、均匀性、稳定性	光源设计
7.17	标定状态	u_c / U	μm	8.16、13	比例系数、畸变图、不确定度预算	参考标准、程序

8. 测试方法

每个小节结构一致。§8.1 写全作为范式，后续小节引用通用条件而不重复。

8.1 视场 FOV

8.1.1 定义. 在指定工作距离与变倍位置下，成像到传感器**有效区**上的物面范围。

无畸变近轴系统：

$$\text{FOV}_H = (N_H \times p) / \beta \quad [T] \quad (8.1a)$$

$$\text{FOV}_V = (N_V \times p) / \beta \quad [T] \quad (8.1b)$$

N 为像元数，p 单位 μm （结果单位 μm ，除以 1000 得 mm）。

两个会使绝大多数已公布 FOV 失效的警告：

- **用 N_H ，不用总像素数。** 一块 2448×2048 的传感器若有 16 个光学黑列与 8 个 dummy 列，有效列数就不是 2448。误差典型 0.5–2%，比很多测量任务的公差还大。
- **只有斜着用传感器时才用对角线。** 常见的 $\text{FOV} = \text{传感器对角} \div \beta$ 是**像圈覆盖**的表述（像圈够不够大），不是视场表述。把对角线 FOV 当作“视场”会高估可用视场 20–30%，并导致集成商选了盖不住工件的镜头。

8.1.2 设备. E1、E2、E3、E4、E9、E11、E13、E14。标尺（E4）须足够长，使整个 FOV 落在**证书覆盖区**内，且画幅每侧边缘内至少有两条刻度。只勉强盖住 FOV 的标尺会迫使操作者使用标尺物理端点，而端点位置未认证。

8.1.3 搭建. ① 相机与镜头装在台架上，传感器与镜头法兰面平行（在接口机械公差内）② 用 z 台把靶面置于标称 WD，**基准面按镜头标注的定义** ③ 标尺置于靶面、居中，测 FOV_H 时刻度取水平 ④ 取数前先按 §5.4 验证垂直度。

8.1.4 步骤.

1. 设定被测变倍/对焦位置。若由电机驱动，**始终从同一方向逼近** (§8.12)。
2. 调曝光使刻度落在传感器线性区，明暗区均不削顶。
3. 取两条物方坐标 x_1 、 x_2 已知（以证书为准）、间距 $\geq$ 画幅宽 60%、且都清晰落在画幅内的刻度线，用**亚像素质心**（一阶矩或高斯拟合）定位其像素位置 u_1 、 u_2 。阈值法会引入半像元偏置，且随照明变化。
4. 算局部比例系数： $s = (x_2 - x_1) / (u_2 - u_1)$ **[M]** (mm/像元)。取倒数得物方像元尺寸 $L_{\text{obj, meas}} = 1000 / s$ (μm)。

5. 用**有效**像元数算实测 FOV: $FOV_{H, meas} = s \times N_H$ [M]。
6. 在视场左、中、右（及对角线位置，若靶标允许）各重复一次，使**局部比例系数随视场的变化**显现出来。**这个变化就是畸变** (§8.7)，也正是"单一比例系数不足以支撑一个测量系统"的原因。
7. 全流程重复 5 次（每次重新对焦），报均值与标准差。

8.1.5 计算.

- 物方像元尺寸 $L_{obj} = 1000 / s$ (μm)。
- 任意 ROI 的视场 $FOV = s \times N_{roi}$ 。
- **FOV 对工作距离的敏感性**（非远心镜头关键）：在 $WD_{nom} \pm \Delta WD$ （如 ± 0.5 mm）重测并报 $d(FOV)/d(WD) = \Delta FOV / \Delta WD$ [M]。理想的物方远心镜头该斜率为 0（在不确定度内）；斜率不为 0 说明系统非物方远心，此时每一个测量结果都带有与 WD 复现精度成正比的 FOV 误差。
- 由标尺反推倍率 $\beta = (u_2 - u_1) \times p / (1000 \times (x_2 - x_1))$ ，须与 §8.3 结果在不确定度内一致。

8.1.6 记录. 变倍/对焦位置；工作距离（注明基准面）；所用有效像元数 $N_H \times N_V$ ；像元尺寸及其来源；中心与 4 个视场位置的实测 s ； FOV_H / FOV_V 均值 $\pm s$ ($n = 5$)；式 8.1a 的理论 FOV 及差值； $d(FOV)/d(WD)$ ；环境温度；参考靶证书号与有效期。

8.1.7 常见错误.

错误	后果	验证	纠正
用总像素而非有效像素	0.5–2% FOV 误差	与相机自身 ROI 读数比对	用相机文档中的有效像元数
在错误 WD 下测	FOV 误差与 WD 误差成正比，典型非远心镜头可达 1%/mm	做 $\pm \Delta WD$ 测试 (8.1e)	注明 WD；若 WD 会变，报 $d(FOV)/d(WD)$
用传感器对角线当 FOV	高估 20–30%	与 $FOV_H \times FOV_V$ 对照	报宽×高；对角线只用于像圈核查
用胶片靶的印刷边框而非认证刻度	胶片会拉伸，误差 0.1–0.5%	比对证书距离	用玻璃铬版靶，或先认证胶片靶
靶面不平（胶片下垂、标尺未贴平）	局部失焦，且比例误差随视场变化	检查画幅边缘的焦点指标	靶标装在平面上；真空吸附或玻璃载板
阈值法定位线位	半像元偏置，随照明变化	两个曝光档重测	亚像素质心或高斯拟合
直接读镜头上的"×0.5"标记	那是设计值，不是实测值	与实测比例系数对比	永远实测
靶标处饱和	削顶使质心偏移	检查峰值灰度	峰值控制在满量程 60–80%

8.1.8 工程解读.

- **FOV 规格只有在传感器靶面、有效像元数、WD 与测量平面都相同时才可比。** 比较两家供应商数据时四项缺一不可。
- 圆形工件应使用**内切圆**而非四角： $FOV_circle = \min(FOV_H, FOV_V)$ 。2/3" 传感器在 1× 下内切圆是 8.4 mm，不是 11.0 mm。
- 留工作余量：刚好填满 FOV 的工件测不了边缘，因为畸变、暗角、边缘 MTF 在边缘都最差。实用目标：工件占 $FOV_H \leq 80\%$ ，且完全落在 0.9 视场半径内。
- 若所需的 FOV 与 β 在物方远心镜头上无法同时满足，这是**设计冲突**而非选型问题：FOV 与 β 由式 8.1a 锁定。可选对策为 ① 换更大靶面 ② 换 β ③ 接受非远心系统，并按 §10.3 把高度变化误差量化清楚。
- **[POMEAS LAB TEST DATA REQUIRED — FOV-01]** 各普密斯远心与电动变倍型号在标称 WD 下的实测 FOV 与 $d(FOV)/d(WD)$ ，以及标准测试相机的实际有效像元数。见附录 B。

8.2 工作距离 WD

8.2.1 定义. 镜头基准面到最佳对焦物面的距离。

三个常被都叫"工作距离"的量必须分清：

量	含义	处理方式
WD（标称）	设计值，彩页所写	单个数字，如 110 mm
WD（实测最佳对焦）	这一支 实际对焦的位置	按本节实测
焦带	焦点指标保持在验收阈值以上的 WD 范围	由本节导出；是工装安装的实用公差

8.2.2 设备. E1、E2、E4 或 E6、E9、E11、E13、E14。

8.2.3 搭建. 斜边靶（E6）或标尺（E4）装在 z 台上，行程覆盖 $WD_nom \pm 2\times$ 预期焦带。按 §5.4 对准。光源与相机设定一次，整个序列不再动。

8.2.4 步骤.

1. 从镜头侧由近及远逼近 WD_nom ，消除背隙。
2. 以 $\Delta z = \text{预期焦带} / 10$ 为步距沿 z 步进，每步拍一帧并算焦点指标 $M(z)$ ——本文件用中心斜边 MTF50（E14），若无 MTF 分析能力则用高对比区的归一化梯度能量。**各步之间不得改变曝光**，不同曝光的指标不可比。
3. 直到 $M(z)$ 在峰两侧都降到峰值的 50% 以下。
4. 对峰附近 5–7 点拟抛物线（或用高斯，对真实镜头的通焦 MTF 常更好）： $M(z) \approx M_max - a(z - z_0)$

² **[M]**，解顶点 z_0 。

5. 最佳对焦 $WD = z_0$ (相对基准面)。

6. **焦带**：找 $M(z)$ 降到验收阈值 M_{thresh} 的两个轴向位置，报 $z_+ - z_-$ 。阈值须与应用挂钩：测量任务常用 $0.8 \times M_{\text{max}}$ ，检出任务常用 $0.5 \times M_{\text{max}}$ 。

7. 重复 5 次（每次都从近侧逼近），报 z_0 的均值与标准差。

8.2.5 计算. 用式 8.8a 算理论物方焦带与实测对比。WD 误差灵敏度：非远心镜头因 WD 误差 Δz 引起的倍率误差 $\Delta\beta/\beta \approx \Delta z \times (d\beta/dz)/\beta$ (按 §8.3.5 实测)。典型 0.5× FA 镜头，1 mm WD 误差使 β 变化约 0.5–1%，即 100 mm 的测量变化 0.5–1 mm；**物方远心镜头的同一 WD 误差带来的 β 变化 ≈ 0 ——这正是客户花钱买到的东西。**

8.2.6 记录. 基准面定义；最佳对焦时的 z 台读数；实测 WD；焦带及其阈值；重复次数与 s ；温度；靶标与相机。

8.2.7 常见错误. 量到镜筒前缘而不是前顶点/厂家基准面（系统性偏移，常达 2–10 mm）；量到带盖玻片的靶标上表面（偏移量等于玻璃厚度除以折射率）；把 z 台读数当作 WD（读数原点任意，须用块规或高度规对镜头基准面定原点）；步进之间改曝光（通焦曲线失真、峰位移）； z 台背隙（始终同向逼近，或两个方向都报）；扫描中温度漂移（预热、缩短序列、记录首末温度）。

8.2.8 工程解读. 标称 WD 是设计数字；工装应按实测最佳对焦 WD 复现。两者之差是有用的来料检验项：若超过焦带，说明工装机械接口需要调整。对电动变倍镜头，设定焦点的 WD 必须是**最大倍率处的 WD** (§8.11)，因为那里景深最窄、焦点误差最显眼。

8.3 倍率 β

8.3.1 定义. 像尺寸与物尺寸之比： $\beta = (n_{\text{px}} \times p) / L_{\text{obj}}$ [M]， n_{px} 为两特征之间的像元数， p 为像元尺寸 (μm)， L_{obj} 为对应的物方距离 (μm)。

注意：标称倍率的镜头， β 是在**设计工作距离**处定义的。只报 β 不报 WD 是不完整的——非远心镜头二者耦合；远心镜头的 β 名义上与 WD 无关，**其残余相关性正是远心度误差的直接度量** (§8.9)。

8.3.2 设备. E1、E2、E4、E9、E11、E14。

8.3.3 搭建. 标定标尺 (E4) 置于靶面，居中且垂直于光轴。优选线宽 3–10 μm 的线纹标尺，其质心可定位到优于 0.1 像元。

8.3.4 步骤.

1. 选两条间距 $\geq \text{FOV}_H$ 的 60% 的刻度。 β 的相对误差由像元计数的相对误差主导，基线太短是浪费精度：2448 像元传感器、亚像素质心 0.05 px 时，60% 基线给出约 0.007% 的相对不确定度，10% 基线则约 0.04%。

2. 用亚像素质心算像素位置 u_1 、 u_2 。

- 3. $\beta_{\text{centre}} = (u_2 - u_1) \times p / L_{\text{证书}}$ 。
- 4. 移动标尺，使同样两条刻度跨在 $0.7 \times \text{FOV}_H/2$ 的视场位置上，重复得 β_{edge} 。
- 5. 在 0.7 视场四个方向（上、下、左、右）各重复。
- 6. 固定 WD，整套重复 5 次，报各位置的均值与 s_0 。
- 7. **WD 依赖性**：在 $\text{WD}_{\text{nom}} \pm 0.5 \text{ mm}$ 、 $\pm 1.0 \text{ mm}$ 重复步骤 3–5。拟合 $\beta(z)$ ，报 $d\beta/dz$ （%/mm）及 1 mm WD 误差对应的 $\Delta\beta$ 。

8.3.5 计算.

- 物方像元尺寸 $L_{\text{obj}} = p / \beta$ 。
- WD 误差引起的倍率误差： $\Delta\beta/\beta = (1/\beta) \times (d\beta/dz) \times \Delta z$ **[M]**。
- 场依赖倍率（即畸变）： $D(x) = (\beta(x) - \beta_{\text{centre}}) / \beta_{\text{centre}} \times 100\%$ **[M]**。
- **非远心镜头的透视放大 [T]**：场点主光线角 θ 处，位于标称测量平面上方高度 h 的物体，其像的横向位移为 $h \cdot \tan\theta$ ，表观倍率变化约为 $(h \cdot \tan\theta)/x$ （ x 为该特征到轴的距离）。这是机器视觉中最常见的大幅测量误差来源，判定阈值见 §10.3。

8.3.6 记录. 中心与 4 个 0.7 视场位置的 β ；所用证书距离与证书号；WD；变倍位置； $d\beta/dz$ ；重复次数与 s ；温度。

8.3.7 常见错误. 基线过短（相对误差被放大）；用靶标印刷长度而非证书值（系统误差 0.01–0.1%）；胶片靶拉伸或张紧安装（0.05–0.5% 且各向异性）；电动变倍从不同方向逼近（差异即背隙）；只用画幅边缘拟合 β （报出的是边缘倍率）；假定 β 适用于所有 WD（误差等于 $d\beta/dz \times \Delta z$ ）。

8.3.8 工程解读. 对测量系统而言，真正重要的不是 β 本身，而是**实测比例系数 s** （mm/像元）及其稳定性。 β 是与彩页互校的诊断量：若 β 与标称之差超出合成不确定度，说明 WD 错了、像元尺寸假设错了，或这支镜头不是它自称的型号。 **β 与 s 一并报告，并注明视场位置。**

8.4 光学分辨率与 MTF

8.4.1 定义. 镜头把对比度从物传递到像的能力随空间频率的变化。调制传递函数 $\text{MTF}(f)$ 是光学传递函数的模，从零频的 1 衰减到截止频率的 0。三种单值化方式：

指标	定义	适用场合
MTF50	MTF = 0.50 处的空间频率	通用对比指标；与视觉清晰度、可可靠检出的最小特征相关性好
指定频率处的 MTF	如 100 lp/mm 处的 MTF	应用有 已知 特征频率时的正确指标。作规格比 MTF50 更好，因为它不受远离工作频率处曲线形状的影响
极限分辨率	MTF 超过某阈值（如 0.05 或 0.10）的最高频率	用于“看不看得见”的粗判；对阈值敏感， 必须同时给出阈值

非相干照明的衍射极限： $f_{\text{cut}} = 2 \times \text{NA} / \lambda$ [T] (NA 与 f_{cut} 同一侧， λ 单位 mm)。NA_obj = 0.1、 $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$ 时 $f_{\text{cut,物方}} = 364 \text{ lp/mm}$ ；像方截止为 $f_{\text{cut,物方}} / \beta$ 。

8.4.2 设备. E6 (ISO 12233 斜边或认证西门星)、E1、E2、E11、E9、E13、E14。

8.4.3 搭建. ① 斜边靶装于靶面、置于精确 WD，垂直度 $\leq 0.1^\circ$ (成像时带倾斜的边缘沿长度方向倍率不同，会给 SFR 引入偏差) ② 报告值用**窄带光源** ($\lambda = 0.55 \mu\text{m} \pm 20 \text{ nm}$)。若应用是白光，另报一次白光测量并标注，预期 MTF50 更低 (色差) ③ 边缘角取偏离垂直 **2° – 7°** 。超出此范围 ISO 12233 算法的相位平均精度下降；接近 0° 会混叠 ④ 使分析段长度 ≥ 10 像元，且不进入透视或暗角改变局部倍率的角落区 ⑤ 用同一条斜边在视场中心对焦后再移向其他视场点，记录焦点位置。

8.4.4 步骤.

1. 拍斜边。确认：无削顶、峰值信号 70–80% 满量程、背景高于黑电平但低于峰值 10%。确认 §5.3 的相机设置生效。
2. 施加 ISO 12233 e-SFR 算法：定位边缘 → 把像元投影到边缘法向 → 分箱成过采样边缘轮廓 → 微分得线扩散函数 LSF → 取 LSF 傅里叶变换的模得 SFR。沿边缘长度的相位平均正是该方法抗噪的原因。
3. 若标准方法要求，施加**像元孔径修正** (像元自身对面积的积分相当于一个 sinc 低通)。**报告是否施加了该修正。**
4. 读出 MTF50，以及目标工作频率处的 MTF。
5. 在以下位置重复：视场中心；四个 0.7 视场位置 (上/下/左/右)；四个角。**报表格，不报单个数字**，并给出最差场点与中心之比。
6. 有像散时，各场点的弧矢与子午方向分别测 MTF50 并都报。
7. 中心位置重复 5 次 (每次重新对焦)。带重新对焦的重复间散差是测量的**对焦相关复现性**，通常大于同一焦点内的重复性。
8. **换算到物方** (供应用判断)： $f_{\text{obj}} = \beta \times f_{\text{img}}$ [T]； $w_{\text{obj}} = 1000 / (2 \times f_{\text{obj}}) \mu\text{m}$ [T]， w_{obj} 为该频率下可分辨的一个线对 (线+间隔) 宽度。若应用的最小特征接近或小于 w_{obj} ，镜头属勉强可用；**工程实践通常留 2–3 倍余量。**

8.4.5 计算.

- 物方 MTF50： $f_{50,\text{obj}} = \beta \times f_{50,\text{img}}$ 。
- 由式 8.4a 得物方极限分辨率。
- **一致性自检**： $f_{50,\text{obj}}$ 不得超过 $f_{\text{cut,obj}}$ 。超过衍射极限的值一定是测量伪影 (通常锐化未关，或焦点位置陈旧)。
- 场均匀性指标：各测点 MTF50 的最小值 ÷ 中心值，以百分比报告。**对视觉系统而言，全场均匀 70% 的镜头常优于中心 100%、角落 30% 的镜头。**

8.4.6 记录. 各视场位置与方向的 MTF50（及指定频率处 MTF）表； λ ；F 数；WD；变倍位置；是否施加像元孔径修正；物镜与相机；所用焦点指标；中心位置重复统计；用于对比的衍射极限。

8.4.7 常见错误. 锐化或降噪未关（MTF50 高估 10–100%，数字完全无效，须用 RAW 拍摄验证，在相机与驱动层都关闭）； $\gamma \neq 1$ （边缘轮廓失真，MTF50 通常偏高）；分析边缘上照明不均（边缘对比沿长度变化，相位平均轮廓被抹平，须保证 $\pm 5\%$ 均匀性并检查平场）；边缘角不在 2° – 7° （算法误差与混叠）；未在最佳对焦或各场点之间未重设焦点（低估 MTF50，有时达 2 倍）；只测中心（掩盖场依赖，而它通常才是应用的限制）；用 USAF 靶报 MTF 数字（条宽靶给的是目视极限，不是 SFR）；比较不同 F 数下的 MTF50（光圈主导结果）；报物方分辨率不注明倍率（无法复现）。

8.4.8 工程解读. 分辨率是系统属性，不是镜头属性 (§8.5)。镜头 MTF 设上限，传感器像元孔径与采样设第二个上限，运动模糊与算法设第三个。系统分辨不出某特征时，有用的诊断顺序是：① 确认特征所在平面已对焦 ② 比较特征的像方频率与传感器奈奎斯特——若高于奈奎斯特，限制在传感器，换镜头无益 ③ 若明显低于奈奎斯特，测 MTF50 并与衍射极限比对 ④ 最后才考虑换镜头。**MTF50 在所用光圈衍射极限 30% 以内的镜头，其表现已符合设计，换镜头不会有大幅提升。**

8.5 像素分辨率与系统分辨率

8.5.1 定义.

- **像素（采样）分辨率（像方）** = 传感器奈奎斯特频率： $f_{\text{Nyq,img}} = 1000 / (2p)$ [T]（p 单位 μm ）。
 $p = 3.45 \mu\text{m} \rightarrow 145 \text{ lp/mm}$ ； $p = 5.5 \mu\text{m} \rightarrow 91 \text{ lp/mm}$ ； $p = 2.4 \mu\text{m} \rightarrow 208 \text{ lp/mm}$ 。
- **像素分辨率（物方）**： $f_{\text{Nyq,obj}} = \beta \times 1000 / (2p) = 1000 / (2 L_{\text{obj}})$ [T]。
- **最小可采样物方细节**：一个线对占 $1000/f_{\text{Nyq,obj}} \mu\text{m} = 2 \cdot L_{\text{obj}}$ 。实用设计规则：要检出的最小特征上跨 ≥ 3 像元，要测量的最小特征上跨 ≥ 5 像元，即 $L_{\text{obj}} \leq d/3$ 与 $L_{\text{obj}} \leq d/5$ 。
- **系统分辨率**：镜头 + 传感器的合成能力。因两者传递函数相乘，且高斯型 MTF 在关注区间内是良好近似，故 MTF50 的平方倒数相加：

$$1 / f_{50,\text{sys}}^2 \approx 1 / f_{50,\text{lens}}^2 + 1 / f_{50,\text{sensor}}^2 \quad [\text{T}] \quad (8.5c)$$

式 8.5c 对高斯 MTF 精确，一般情形是良好的工程近似。其实践含义：**两者中较弱的一方主导，改善较强的一方几乎无用。** 200 lp/mm 的镜头配 90 lp/mm 的传感器得 82 lp/mm——比传感器单独提升 9%，但远达不到 200。

运动模糊、光源与算法以同样方式相乘。曝光时间 t 、物方速度 v 时模糊为 $v \cdot t$ ；若其超过 L_{obj} ，它将主导一切，**必须先机械解决，才能谈光学。**

8.5.2 设备. E1、E2、E6、E11、E14；若要测运动模糊项，还需能产生已知运动的装置（传送带或转靶）。

8.5.3 搭建. 同 §8.4, 传感器按工作靶面、binning 关闭。

8.5.4 步骤.

1. 按 §8.4 在被测设置下测 $f_{50,lens}$ 。
2. 确定 $f_{50,sensor}$ 。两条可接受路径：① 取自相机厂家基于 EMVA 1288 的表征（若报告了传感器 MTF）② 用**更好的镜头**（小光圈下的衍射极限微距镜头，其 f_{50} 高于传感器奈奎斯特）把同一斜边成像到该传感器上，测“传感器 + 参考镜头”的 SFR。
3. 由式 8.5c 算 $f_{50,sys}$ ，与整链直接测量比对。差值即模型误差，典型 5–15%。
4. 算工作余量：**检出余量** $M_{det} = f_{Nyq,obj} / (1000/(3d))$ ，**测量余量** $M_{meas} = f_{Nyq,obj} / (1000/(5d))$ （ d 为特征尺寸）。两者都应 ≥ 1.3 。
5. 物体有运动时加运动项 $f_{motion} \approx 1000/(2 \times v \times t)$ ，按式 8.5c 合成。
6. **[POMEAS LAB TEST DATA REQUIRED — RES-02]** 标准普密斯相机/镜头组合的实测矩阵（例如：5MP 2/3"、 $3.45 \mu m$ 传感器配各普密斯远心型号；16K 线扫传感器配线扫与大幅面镜头系列），给出 $f_{50,lens}$ 、 $f_{50,sensor}$ 、 $f_{50,sys}$ 及式 8.5c 的模型误差。**这是普密斯能产出的复用价值最高的数据集**，因为它用证据而非经验法则回答了“哪个镜头配哪个相机”。

8.5.5 计算. 式 8.5a–8.5c，以及 $L_{obj} = p/\beta$ 与“每特征 N 像元”规则。

8.5.6 记录. p 及其来源；有效靶面；binning 状态；镜头/传感器/系统的 f_{50} （实测与模型）；视场位置；若相关则记录运动参数；各项余量。

8.5.7 常见错误. 把像素数当分辨率（45MP 传感器配差镜头，分辨率低于 5MP 配好镜头）；把传感器奈奎斯特当作可达到值（真实系统只能到奈奎斯特的 60–80%，应用 $f_{50,sys}$ 或施加工程系数）；忽略运动项（运动产线上的预测分辨率无法实现）；在不同倍率下比较物方分辨率（更高 β 必然改善物方分辨率，与镜头质量无关）；采样计算用对角线（非方靶面与各向异性采样建模错误，应分 N_H 、 N_V 单独处理）。

8.5.8 工程解读. 设计顺序是：① 要检出/测量的最小特征 ② 由 3 像元/5 像元规则得所需物方像元尺寸 ③ $\beta = p / L_{obj}$ ④ $FOV = \text{靶面} / \beta$ ，与工件核对 ⑤ 若 FOV 与 L_{obj} 不能同时满足，**要换的是传感器，不是只换镜头**——因为式 8.1a 与 8.5b 由同一组数决定。第 ⑤ 步是机器视觉选型错误最集中的地方，也是“没有相机就做不了镜头选型”的原因。

8.6 TV 畸变

8.6.1 定义. TV 畸变是源自电视光学测试的形状描述量，至今仍被多数机器视觉镜头厂商引用。最常见的形式：使视场边缘一条名义直线成像，该像线发生弯曲，弯曲的矢高对像高归一化：

$$TV = (\Delta y / H) \times 100 \% \quad [\text{约定}] \quad (8.6a)$$

Δy 为像线相对同一像线最小二乘拟合直线的最大偏离，H 为全像高（有效区较大的一维，通常为垂直方向）。

这个约定没有被标准化，而这正是问题所在。至少三种变体在同时使用：

变体	归一化	测量位置	后果
A	$\Delta y / H$	视场边缘的线	最常被公布的数值
B	$\Delta y / (2H)$	视场边缘的线	同一镜头恰好是 A 的一半
C	$\Delta y / H$	0.8 半高处的线，非边缘	通常比 A 低 20–40%

因此两家供应商对同一支镜头可以各自报出 1.0% 与 0.5%。在未注明变体的情况下，绝不跨供应商比较 TV 畸变值；也绝不用 TV 畸变作为尺寸测量系统的规格。

8.6.2 设备. E1、E3、E5（或方格/条形靶）、E9、E11、E12、E14。

8.6.3 搭建. ① 方格或含边缘直线的靶标置于精确 WD ② 按 §5.4 验证垂直度至 0.2° ——倾斜在本测试中与畸变不可区分，它产生线性倍率梯度，最小二乘拟合会把它转成表观弯曲 ③ 点阵轴与传感器轴对齐 $\leq 0.5^\circ$ ④ 峰值信号保持满量程 60–80%；饱和线的轮廓被削平、质心有偏。

8.6.4 步骤. ① 拍靶 ② 沿 $\geq 80\%$ 像宽提取所选水平线的中心线（亚像元），对其做最小二乘直线拟合 ③ 算最大偏离 Δy 及其沿线位置（位置有意义：若弯曲最大点不在线中部，说明处理不对称或靶标倾斜） ④ $TV = \Delta y / H \times 100\%$ ，注明变体与所测线 ⑤ 对边缘垂直线和另一侧的对称线重复；对称的一对应给出量值相同、符号相反的结果，不对称则说明有偏心 ⑥ 重复 5 次（含重新对焦），报均值与 s。

8.6.5 计算. 式 8.6a。若供应商的约定未知，直接报原始矢高 Δy （像元与 μm ）以及 H——这组数据可换算到任何约定。

8.6.6 记录. 所测线（位置、方向、哪一侧边缘）； Δy （ μm 与 px）；H（px 与 mm）；所用约定；WD；变倍位置；拟合残差；温度。

8.6.7 常见错误. 靶标倾斜（表观畸变常达真实值的 2–5 倍；用 §5.4 的 $0^\circ/180^\circ$ 法验证）；用靶标印刷边框当“那条线”（边框不是 μm 级直线）；报数字不报约定（不可比）；线饱和（中心线有偏）。

8.6.8 工程解读. TV 畸变回答的是“直线在我的图像里会不会看起来是弯的”。它是外观检测与图像比对算法的正确指标。它不回答“视场边缘的测量误差有多大”——那需要 §8.7 的全场局部倍率图。两者相关性松散，一支镜头可以一个指标合格而另一个不合格。为测量应用做规格时，两个都要报。

8.7 全场几何畸变

本节给出测量应用应使用的指标。其原理沿用 ISO 9039:2008 对旋转对称成像系统的畸变测定思路；下述流程是针对机器视觉相机与镜头改写的，不构成对该文件的符合性声明。

8.7.1 定义. 畸变是倍率随视场的变化。计量上有用的表述是**相对局部倍率偏差**，以视场中心倍率为参考：

$$D(x, y) = [\beta(x, y) - \beta_{\text{centre}}] / \beta_{\text{centre}} \times 100 \% \quad [M] \quad (8.7a)$$

对测量系统而言这是关键量，因为位于视场位置 (x, y) 处特征的测量误差是：

$$\Delta x_{\text{meas}} \approx D(x, y) / 100 \times x \quad [T] \quad (8.7b)$$

即：视场边缘 $D = 0.5\%$ 的镜头，对距中心 50 mm 的特征产生 250 μm 误差——**无论它的 TV 畸变看起来多小。畸变不模糊，只位移**，这就是畸变对有无判定无关、而对尺寸测量决定成败的原因。

常用径向模型（Brown-Conrady 形式，多数相机标定实现的基础）：

$$r_u = r_d (1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6) \quad [\text{模型}] \quad (8.7c)$$

r_d 为实测（含畸变）像半径， r_u 为理想（无畸变）像半径，均已归一化； $k_1 < 0$ 为桶形， $k_1 > 0$ 为枕形。**式 8.7c 是模型，不是测量**：用不足的场点拟合，系数外推会非常差。

8.7.2 设备. E1、E2、E3、E5（点阵或棋盘， $\geq 15 \times 15$ 节点，节点位置不确定度 $\leq 3 \mu\text{m}$ ）、E9、E11、E12、E14。

8.7.3 搭建. ① 标定点阵置于精确最佳对焦 WD，垂直度 $\leq 0.1^\circ$ ② 点阵须覆盖 $\geq 1.2 \times \text{FOV}$ ，使每个被分析节点都是认证节点而非部分成像的节点 ③ 点阵对中于光轴，偏差 $\leq \text{FOV}$ 的 1% ④ 玻璃铬版用漫射背光；确认所用曝光下铬层不透光 ⑤ 固定相机设置——若节点像饱和，质心随曝光变化。

8.7.4 步骤.

1. 拍点阵。确认无饱和节点、无暗部削顶。
2. 检出所有节点：阈值分割得节点连通域，再算亚像素质心（灰度加权一阶矩或二维高斯拟合）。**二值化质心有最高 $\pm 0.3 \text{ px}$ 的量化偏置。**
3. 取最接近像面中心的节点为参考节点。
4. 用相邻节点确定每个节点处的局部比例系数：

$$s_x(i, j) = (X(i+1, j) - X(i-1, j)) / (u(i+1, j) - u(i-1, j)) \quad [M] \quad (8.7d)$$

X 为节点的证书物方坐标（mm）， u 为实测像素坐标；用 j 方向邻居同法得 s_y 。**用邻居而非全局拟合，正是“局部”倍率测量的关键**，也是全局拟合会平均掉的畸变得以暴露的原因。

5. 换算为局部倍率 $\beta(i,j) = \Delta u \times p / \Delta X$ (p 与 ΔX 单位 μm)。
6. 用**最靠近轴的四节点**取 β_{centre} ，按式 8.7a 算 $D(i,j)$ 。
7. 报告： D_{max} (含其场位置)、 D 的场分布云图、角落倍率与中心倍率之比、以及施加拟合修正后的残差。
8. 重复 5 次； D_{max} 的散差即畸变测量的重复性——它通常受节点质心定位而非镜头限制。
9. 在 $WD_{\text{nom}} \pm 0.5 \text{ mm}$ 重做整套。**畸变图随 WD 显著变化**，说明系统非物方远心，或倾斜随 WD 变化。

8.7.5 计算.

- 式 8.7a–8.7d。
- **残差修正**：对实测节点位移用最小二乘拟合式 8.7c，把逆映射施加到节点坐标后重算 D 。剩余 $|D|$ 即**修正后畸变**，是施加了标定的测量系统应报出的数字。**未修正与修正后的值都要报**，并注明多项式阶数与所用节点数。**用 20 个节点拟合、又在同样 20 个节点上评价，结果必然漂亮——务必在留出节点或另一件实物上验证。**
- 指定特征位置下的**全场最大测量误差**：不施加标定时用未修正 D ，施加标定时用修正后 D ，代入式 8.7b。

8.7.6 记录. 点阵证书号与节点间距； $N_H \times N_V$ ； p ； WD ；变倍位置；检出节点数与参与拟合的节点数；留出验证的节点数； k 系数及拟合残差；修正前/后 D_{max} 及场位置；温度。

8.7.7 常见错误.

错误	后果	纠正
在全部节点上拟合、又在同样节点上报残差	修正值严重乐观	留出 $\geq 20\%$ 节点，或用另一件实物验证
场点太少	多项式在视场边缘不受约束，而误差最大处正在边缘	$\geq 15 \times 15$ 节点，且覆盖到 ≥ 0.95 视场半径
靶标倾斜	引入线性倍率梯度，被拟合吸收进系数	垂直度 $\leq 0.1^\circ$
靶标不在正确 WD	非远心镜头的畸变图随 WD 变化，该图只对该 WD 有效	在工作 WD 上测
节点饱和	质心偏向连通域平顶区	峰值保持满量程 60–80%
用全局拟合替代相邻差分	把畸变在场上平均掉，报出偏低的价值	用式 8.7d
假定相机无畸变	用自身有畸变的相机测镜头，得到的是 合成图 ；用于测量仍可用，但 不得当作镜头规格引用	注明该图是“镜头”还是“系统”；要镜头级数据时须用经确认贡献 $< 0.05\%$ 的相机与接口
施加畸变修正后即认为 FOV 与比例系数也精确了	中心比例系数是另一项标定，有独立不确定度	独立标定比例系数 (§8.16)

8.7.8 工程解读.

- **要做测量，才看畸变。** 通止判定中畸变只位移图像，不改变特征的有无；2% 的畸变无害。
- **测量应用中 D 是一阶误差，不是二阶。** 本文件采用判据：**工作视场内未修正的最大畸变误差须 $\leq$ 测量公差的 1/10**，否则必须通过标定修正并提供经验证的残差。两者都不满足时，精度主张不成立。
- **畸变修正与镜头选型是替代关系而非互补。** 一支行为良好的镜头加标定，其系统总精度可以胜过昂贵的近零畸变镜头——因为标定便宜且可重复，而镜头畸变是固定的。例外是无法逐台标定的系统（例如镜头会在现场更换），此时**低固有畸变是唯一安全的选择**。
- **[POMEAS LAB TEST DATA REQUIRED — DIS-03]** 各普密斯远心型号的修正后畸变图（修正前/后 $D_{\max}$ ，含留出验证残差），以及电动变倍家族在**每个预置变倍位置**的畸变图——变焦镜头在每个倍率下的畸变图都不同。**这是目前没有竞品用数据支撑的主张**，且集成商可以直接使用。

8.8 景深 DOF

8.8.1 定义. 沿光轴方向、像被判定为可接受的清晰时物体所在的范围。景深**只有与两个参数一同给出才有定义**：

1. **允许弥散**——以像方弥散圆 c 表示，或以某测量指标的验收阈值表示；
2. **判据**——几何判据（指定 c ）或实测判据（指定 MTF50 或特征对比度阈值）。

几何景深（物方）：

$$\text{DOF}_{\text{total}} = 2 \times F\# \times c \times (1 + \beta) / \beta^2 \quad [\text{T}] \quad (8.8a)$$

$F\#$ 为镜头 F 数， c 为允许的像方弥散圆直径， β 为倍率。 $\beta \ll 1$ 时简化为常被引用的 $\text{DOF} \approx 2 \cdot F\# \cdot c / \beta^2$ 。用物方弥散表达的等价形式： $\text{DOF}_{\text{total}} = c_{\text{obj}} / \text{NA}_{\text{obj}}$ ，其中 $c_{\text{obj}} = c / \beta$ [T]。

算例（示例，非普密斯规格）. 远心镜头 $\beta = 2$ 、 $F\# = 8$ 、传感器 $p = 3.45 \mu\text{m}$ ，验收取 $c = 2$ 像元 $= 6.9 \mu\text{m}$ ：

$$\text{DOF}_{\text{total}} = 2 \times 8 \times 0.0069 \text{ mm} \times (1 + 2) / 2^2 = 0.0414 \text{ mm} \approx 41 \mu\text{m}$$

同一镜头在 $\beta = 0.5$ 、同一判据下：

$$\text{DOF}_{\text{total}} = 2 \times 8 \times 0.0069 \text{ mm} \times 1.5 / 0.25 = 0.662 \text{ mm} \approx 662 \mu\text{m}$$

倍率变化 4 倍，景深差 16 倍（分母 β^2 ，被 $(1+\beta)$ 部分抵消）。**这是机器视觉中关于景深最重要的事实：景深随倍率急剧塌缩。** 这就是变焦镜头要在最大倍率处定焦、高倍远心系统需要机械上平整的工件的原因。

8.8.2 设备. E1、E2、E6 或 E8、E11、E14。z 台是关键：分辨力 $\leq$ 预期景深/20。

8.8.3 搭建. 斜边或细部 ROI 装于 z 台，居中。镜头设为被测倍率与光圈。按 §8.2 建立最佳对焦并记录 z_0 。

8.8.4 步骤.

1. 步距 $\Delta z = \text{预期景深} / 10$ （预期值由式 8.8a 用验收 c 算出）。
2. 从 $z_0 - 1.5 \times \text{景深}$ 外侧逼近起步，向 $z_0 + 1.5 \times \text{景深}$ 步进。每步拍一帧并算指标。**步进之间不得改变曝光或焦点。**
3. 作指标-z 曲线（通焦曲线）。
4. 确定指标等于验收阈值的两个轴向位置 z_- 、 z_+ （在相邻步之间插值）。
5. 实测景深 $\text{DOF}_{\text{measured}} = z_+ - z_-$ 。
6. 同时报峰值指标。**峰值偏低说明系统在任何位置都达不到所需清晰度，此时景深数字没有意义。**
7. 同向逼近重扫 3 次，报 $\text{DOF}_{\text{measured}}$ 的均值与 s_0 。
8. 可选：在两个光圈下重复，验证式 8.8a 的 $F\#$ 依赖——这是对整个测量链的有用验证，因为**景深不随 $F\#$ 近似变化，说明主导因素已不是几何。**

8.8.5 计算. 用式 8.8a 算几何预测值；比值 DOF_实测 / DOF_预测 反映模型遗漏了多少，0.6–1.2 属正常，**低于 0.5 通常说明限制来自像差而非几何**。由某一 β 下的实测景深换算到另一 β 可用 β^2 依赖，但仅作一阶估计。斜射照明下，**特征**的有效景深可能小于**平靶**的景深，因为阴影随 z 在特征上移动——这是系统效应而非镜头效应，**必须用生产光源实测**。

8.8.6 记录. 判据与阈值；所用 c ； $F\#$ ； β ；所用指标；步距；实测景深（均值与 s ）；峰值指标；几何预测值及比值；照明几何；温度。

8.8.7 常见错误.

错误	后果	纠正
报景深不给 c 或不给阈值	数字无法解释、无法比较	必须报判据
移动靶标但光源不动（或反之）	通焦曲线混入照明变化	靶标与光源一起移动，或用背光
步距过粗	阈值交点定位差，景深可差 30%	$\Delta z \leq \text{景深}/10$
扫描中重新对焦	测量失去意义	绝不碰焦点
目视判"够清晰"	重复性只有 20–50%	用计算指标
把某一倍率下的景深当作整个变倍范围适用	变倍时景深按 β^2 变化	逐变倍位置报告
忽略验收阈值的影响	检出判据（峰值 50%）给出的景深可能是测量判据（80%）的数倍	阈值与应用绑定
小光圈下忽略衍射	极小光圈时几何景深不再是限制，衍射极限分辨率可能已不足	检查式 8.4a 在目标工作频率处是否还有余量

8.8.8 工程解读. 一旦涉及光源与算法，景深就是**系统**数字。两个集成商用同一镜头、同一判据可以测出不同的景深，因为照明几何不同。工程对策是**用生产光源与生产算法测景深**，把几何公式当作合理性校验而非规格。工件无法保持在景深内时，可用手段按有效性排序：降低 β （ β^2 项）、在分辨率预算允许下开大光圈、改用固有景深更大的远心镜头、或改变测量原理。

8.9 远心度

8.9.1 定义. 物方成像光束主光线平行于光轴的程度，以**指定物方视场内最大主光线角 θ_{max}** 量化，单位 mrad 或度。之所以规定为"视场内的最大值"，是因为透视误差在视场边缘最大。**轴上数值说明不了任何问题**。

物方远心：物方主光线平行于光轴，物体不是"斜着看"镜头的。这是让测量结果与被测特征的轴向位置无关的条件。

双远心：进一步使入瞳与出瞳都在无穷远（两侧主光线都平行），从而使像方倍率与像面位置无关。在传感器位置固定的系统中，双远心在测量价值上并不比物方远心更多；它增加的是像面位置容差，这也是双远心镜头被指定用于可能现场重新装配的系统的原因。

8.9.2 设备. E1、E2（z 台，分辨力 $\leq 1\ \mu\text{m}$ ，行程数 mm）、E8（合适靶标）、E11、E14。

8.9.3 搭建. 靶标上准备小的、孤立的、高对比特征——单个 $5\text{--}50\ \mu\text{m}$ 的铬点，或小的铬方——置于被测视场位置。特征必须足够小，使像为紧凑连通域、质心可定，且必须对称，使离焦不移动其表观中心。

8.9.4 步骤——离焦（质心位移）法. 这是实用方法，也是系统集成商应当使用的方法。

1. 把孤立特征置于被测视场位置（先做轴上）。
2. 对该特征找最佳对焦 z_0 ，记录特征像的质心 u_0 。
3. 以已知增量 Δz 移动 z 台（例如 ± 0.1 、 ± 0.2 、 ± 0.5 、 $\pm 1.0\ \text{mm}$ ），每个位置记录质心 $u(\Delta z)$ 。像会模糊；对称特征仍可测量，可通过延长曝光或帧平均保持质心信噪比。**通过检查连通域峰值信号仍高于满量程 20% 来确认质心仍可用。**
4. 对 $u(\Delta z)$ 做直线拟合，斜率即 du/dz （像元/mm）。
5. 换算为主光线角：

$$\theta = \arctan((du/dz) \times p / (1000 \times \beta)) \quad [M] \quad (8.9a)$$

p 单位 μm ， du/dz 单位 px/mm ， β 无量纲， θ 单位 rad（系数 1000 是 $\text{mm} \rightarrow \mu\text{m}$ 换算）。

6. 在视场半径 0、0.5、0.7、0.9（传感器允许时到 1.0）处重复，至少两个正交方向。
7. 报 θ_{max} 及其发生位置。
8. **用倍率法交叉验证：**在 WD_{nom} 与 $WD_{\text{nom}} \pm 1\ \text{mm}$ 测 β (§8.3)。理想物方远心镜头 β 恒定；残余量即倍率稳定性。**对集成商而言，每 mm WD 的 $\Delta\beta/\beta$ 比一个角度更直接可用**，因为它直接换算成测量误差。

8.9.5 计算.

- 式 8.9a。
- **远心度导致的测量误差**（做规格评审时该写的数字）： $\Delta x = h \times \tan(\theta)$ [T]，h 为特征相对标称测量平面的高度。 $\theta = 0.1^\circ$ （1.75 mrad）、阶高 1 mm 时 $\Delta x = 1.75\ \mu\text{m}$ 。
- **含光源的系统远心度：**在靶标作 z 平移时**不移动光源**，重复步骤 4。两次结果之差即光源的贡献，它可能占主导。 45° 入射的非远心照明，其“阴影”的表观主光线角就是 45° ，对有高度的特征产生的测量误差极大。**这就是“斜射光 + 阶高特征”成为莫名其妙测量误差经典来源的原因。**

8.9.6 记录. 所测视场位置；所用靶标与特征尺寸；各位置 θ 及 $\theta_{\max}$ 与其位置； du/dz ； $\Delta\beta/\beta$ per mm WD；照明是否远心、是否随靶标移动；温度。

8.9.7 常见错误. 只测轴上远心度（报的是最好情况，不是规格，须测到 ≥ 0.9 视场半径）；用大特征或不对称特征（模糊不对称，质心位移被掩盖或偏置）；移动靶标但不移动光源（结果含光源透视误差，这是系统测量而非镜头测量——要镜头数据就一起移动，要系统数据就固定光源，**并标明是哪一种**）；在非指定 WD 上测（远心度在偏离设计 WD 处变差，有时很陡）；混淆“物方远心”与“双远心”（决定测量的是物方远心，混用会导致规格过度指定）；引用宣传用的“远心等级”（不是可测量量，应索取 $\theta_{\max}$ 及其场位置）；忽略像元尺寸假设（p 直接进入式 8.9a）。

8.9.8 工程解读. 远心度只为一个目的买单：**使测量与被测特征在深度上的位置无关**。任何规格评审中，都应以测量误差（式 8.9c）在工作高度范围内的形式给出，而不是以一个角度给出。本文件采用判据：**在整个工作高度范围内，远心度引起的横向误差须 $\leq$ 测量公差的 1/10**。§10.3 把这条用于“到底是否必须用远心镜头”。

8.10 数值孔径与光圈

8.10.1 定义. $NA = n \cdot \sin\theta$ ， θ 为系统接收（或发出）光锥的半角。机器视觉多在空气中， $n = 1$ 。两侧关系（Abbe 正弦条件）： $NA_{\text{obj}} / NA_{\text{img}} = \beta$ [T]；用像方有效 F 数 $N_{\text{eff}} = F\# \times (1 + \beta)$ 表达：

$$NA_{\text{obj}} = \beta / (2 \times F\# \times (1 + \beta)) \quad [T] \quad (8.10b)$$

$$NA_{\text{img}} = 1 / (2 \times F\# \times (1 + \beta)) \quad [T] \quad (8.10c)$$

$\beta \ll 1$ 时 $NA_{\text{obj}} \approx \beta / (2 F\#)$ ； $\beta \gg 1$ 时 $NA_{\text{obj}} \approx 1 / (2 F\#)$ 。**低倍率下 NA 趋近于零**，这是 $0.1\times$ 镜头在物方聚光能力差、角接收范围很小的原因，也是低倍镜头对照明几何更敏感的部分原因。

8.10.2 设备. E4、E6、E11、E14；若要直接测量，另需剪切板或光束分析仪。

8.10.3 搭建. 用 §8.4 的 MTF 配置。

8.10.4 步骤.

- 按 §8.4 测 MTF 曲线，频率轴延伸至远超预期截止频率处。**传感器奈奎斯特低于截止频率时，衍射截止无法可靠测得**——先检查：若 $f_{\text{cut,img}} > f_{\text{Nyq}}$ ，光圈无法由 SFR 确定，不得使用下述路径 3。
- 路径 1——由 F 数刻度：**把光圈设到刻度值，直接在式 8.10b 中使用 $F\#$ 。不确定度由刻度准确度主导；用路径 2 验证一次。
- 路径 2——出瞳测量：**在像面区域放毛玻璃或扩散板成像出瞳，用移测显微镜量被照亮光锥的直径；或从物方对着远处均匀光源量入瞳直径。 $NA_{\text{img}} = D_{\text{瞳孔}} / (2 \times \text{瞳孔距离})$ 。需要光学通路；适合大幅面镜头。

4. **路径 3——由衍射截止**（仅在 $f_{\text{cut}} < f_{\text{Nyq}}$ 时）：取 MTF 降到 0.02–0.05 的频率为 f_{cut} ，则 $\text{NA}_{\text{该侧}} = f_{\text{cut}} \times \lambda / 2$ （ λ 单位 mm， f_{cut} 单位 lp/mm）。
5. **一致性自检**：按所用光圈算 $f_{\text{cut}} = 2\text{NA}/\lambda$ ，与实测 MTF 仍高于 0.05 的最高频率比对，应在约 20% 内一致。
6. 在每个刻度光圈下重复，记录所得 NA。验证 §8.8 测得的景深随 F# 变化；若不随，则光圈刻度或光瞳比与假设不符。

8.10.5 计算. 式 8.10a–8.10c；衍射截止 $f_{\text{cut}} = 2\text{NA}/\lambda$ ；衍射极限两点分辨率 $d = 0.61\lambda/\text{NA}$ （瑞利）与更乐观的斯派罗判据 $d \approx 0.5\lambda/\text{NA}$ 。**引用分辨率极限时必须说明用的是哪个判据。**

8.10.6 记录. 光圈刻度值； NA_{img} 与 NA_{obj} ； $f_{\text{cut,obj}}$ ；所用 λ ；方法（1/2/3）及其不确定度；实测高频 MTF 与预测截止的对比。

8.10.7 常见错误. 把刻度 F 数当作精确值（刻度公差 5–10%，使景深误差 10–20%）；传感器奈奎斯特低于截止频率时仍用路径 3（得到混叠的、无意义的截止）；在物方公式里用像方 NA（差一个 β ）；忽略 β 会改变 NA（高倍率下物方 NA 远大于 $1\times$ ，这也是高倍系统更亮、景深更浅的原因）；把数值孔径与照明 NA 混为一谈（**必须分别测量**）。

8.10.8 工程解读. 光圈是系统的核心取舍，且是一维的：开大光圈改善分辨率与聚光能力、压缩景深，这一关系被式 8.4a 与 8.8a 完整预测。对测量系统，**先按景深要求定光圈**，再检查该光圈下的衍射极限分辨率在工作频率处是否还有 2–3 倍余量。若没有，该镜头与倍率下的设计不可行，对策是降低 β 、增大传感器像元尺寸，或改用同倍率下 NA 更大的镜头。

8.11 齐焦性——电动变倍镜头

8.11.1 定义. 齐焦性是改变倍率时物体在同一工作距离上保持清晰的属性。可测量量为**齐焦误差**：在机械设置不变的前提下，改变变倍位置后恢复最佳对焦所需的物方轴向位移。

8.11.2 设备. E1、E2（分辨力 $\leq 1\ \mu\text{m}$ ）、E6 或 E4、E11、E13、E14，以及对变倍与对焦电机的控制。

8.11.3 搭建. 斜边或细部靶标装于标称 WD、视场中心。全程固定光源与相机设置。记录变倍与对焦电机位置（用编码器全分辨力），记录每次命令后的等待时间。

8.11.4 步骤——标准的齐焦调整与验证顺序. 这个顺序就是正确的操作次序，每一步都有其物理理由（见 8.11.5）。

1. **记录标称 WD**（相对镜头基准面）。
2. **最大倍率：设定工作距离。** 变倍置于最大倍率位置。调整**机械工作距离**（z 台，即物体位置）至焦点指标最大。记录 z_{ref} 。**这一步先做的原因是：最大倍率处景深最窄（式 8.8a），焦点位置可以定得最准。**

3. **最小倍率：调整调焦。** 在**不改变 z 台**的前提下把变倍移到最小倍率位置。像会失焦，失焦量即齐焦误差。此时调整**调焦机构**（移动像面，而非物体）至焦点指标重新最大。记录调焦电机位置变化量。
4. **回到最大倍率验证。** 若此时不清晰，说明两个调整相互耦合：把残差在 WD 与调焦之间分摊，迭代步骤 2–4，直到两个极端的残差都在验收判据内。通常 2–3 次迭代即可。
5. **全倍率验证。** 在整个变倍范围按设定的步数（**至少 11 点**，含两个极端与生产中使用的预置位）扫描。每个位置记录：不动任何机构时的焦点指标，以及恢复最佳对焦所需的 z 位移。作齐焦误差-变倍位置曲线，报最大绝对值与曲线形状。
6. **重复性测试。** 在最大与最小倍率之间往复 10 次，每次回到指定预置位，记录每次回到预置位后的残余焦点误差。报标准差与极差。**这一步把"重复性问题"（机构回不到原位）与"齐焦性问题"（镜头本身不齐焦）分离开。**
7. **方向性测试。** 从下往上与从上往下分别逼近预置位，各做步骤 6。两个均值之差即机械背隙 (§8.12)。
8. **热重复性。** 预热 30 min 后重做步骤 6，连续运行 2 h 后再做一次，量化热漂移——**在生产环境中它常大于机械重复性。**

8.11.5 为什么是这个顺序。 对变倍镜头，物方共轭（镜头对准哪里）与像方共轭（传感器在哪）本是两个自由度，但变倍凸轮把二者耦合。调整机器视觉变倍镜头的"调焦"移动的是像方共轭（后焦调整），而**机械位移 1 单位对物方距离的改变是 $1/\beta^2$** 。由此：

- 在**最大倍率**处，修正物方误差所需的像方位移最小，且景深最窄——所以这里焦点判定最锐利，物体位置定得最准。
- 在**最小倍率**处，物方误差被 β^2 压缩，**因此极难看出来**——这正是"低倍看着很清楚、一变到高倍就虚"的原因，也是"我在低倍下调好的焦，一变倍就虚"这一最高频齐焦投诉的成因。

由此得到的规则：**在最大倍率下定工作距离，调焦只用于做齐焦补偿。**

8.11.6 计算.

- 各变倍位置的齐焦误差： $\Delta z(z) = z_{\text{best}}(z) - z_{\text{ref}}$ （物方失焦，mm）。
- 换算到像方： $\Delta z_{\text{img}} \approx \Delta z_{\text{obj}} \times \beta^2$ 。
- 验收判据： **$\Delta z(z)$ 必须保持在生产范围最低倍率下的景深之内。** 因景深按 $1/\beta^2$ 变化，最小倍率处景深最大，这正是该判据能够达成的原因。内部实用目标： $\Delta z \leq \frac{1}{2} \times \text{DOF}(\beta_{\text{min}})$ 。当应用的焦点指标比几何景深更严时，用 β_{min} 下的实测通焦曲线定边界，而不是用公式。
- 齐焦误差同时以 mm 与"占该变倍位置景深的百分比"报告，因为**后者才决定应用是否受影响**。

8.11.7 记录. 各测试点的变倍电机位置（计数）与对应倍率； z_{ref} ；各步的调焦电机位置；各变倍位置齐焦误差；最大值；重复性（s 与极差， $n = 10$ ）；逼近方向；等待时间；预热时间与首末温度；**镜头序**

列号。

8.11.8 常见错误.

错误	后果	纠正
在最小倍率对焦后变到高倍	低倍的焦点误差被 β^2 压缩，到高倍显现为大幅误差	在最大倍率对焦
做完齐焦补偿后又用 z 台修正物方焦点	WD 被破坏；倍率与 FOV 不再符合规格	WD 只在最大倍率处设定；补偿只用调焦
电机动作后不给等待时间	测得的包含过冲	按厂家规定等待；并实测稳定时间
只报单个齐焦数字	掩盖了中间某个变倍位置可能超差	报全范围扫描
把齐焦性与重复性混为一谈	纠正措施用错（换镜头 vs 修机构）	步骤 5 与 6 分开做
不记录镜头序列号	结果无法追溯到被测实物	记录
在非生产温度下测试	热漂移可能大于机械误差	在生产温度下测，或单独报漂移

8.11.9 工程解读. 对用于多工件尺寸的电动变倍镜头，齐焦性决定系统能否在改变倍率后**免去重新对焦步骤**，因而决定节拍时间承诺是否成立。为测量任务指定变焦镜头前应确认两件事：① 生产变倍范围内的齐焦误差，以其占景深的比例表示；② 系统是否在每次变倍后重新验证焦点（例如用对比度搜索）——**这可以放宽齐焦性要求，代价是节拍**。当齐焦误差与对焦重复性同时可疑时，§12.1 给出判别方法。

8.12 变倍重复性与背隙

8.12.1 定义. 三个常被混为一谈的量必须分开，因为成因与对策都不同：

量	定义	超差时的成因
位置重复性	同一命令重复时机械变倍位置的散差	编码器分辨力、控制环、机构爬行
光学重复性	同一预置位重复时 实测倍率 的散差	上述之外，还有倍率对位置的灵敏度 $d\beta/dz$ 变倍，以及热漂移
背隙	从相反方向逼近同一预置位时所得倍率之差	齿轮或凸轮间隙

8.12.2 设备. E1、E2、E4（视场内标尺）、E11、E13、E14，以及镜头自身控制接口。

8.12.3 搭建. 把标定标尺或高对比边缘对置于生产 WD 的视场内。按 §8.3 建立倍率测量。

8.12.4 步骤.

1. 选三个预置位：最小、中间、最大变倍位置（若生产中使用的预置位不同，用生产预置位）。
2. **重复性**：每个预置位命令到位、等待稳定，然后测倍率（或测某固定边缘的像素位置——更快，作为**相对量**同样有效）。每次重复之间回到一个公共"home"位置。重复 10 次。
3. 报：实测倍率的标准差与极差（ppm），以及实测位置的标准差（编码器计数）。
4. **背隙**：每个预置位从低位（较小倍率）逼近 5 次、从高位逼近 5 次，算两组的均值倍率。背隙 = |均值_高 - 均值_低|，以倍率 ppm 或物方位移 μm 表示。
5. **稳定时间**：命令一次大幅变倍（最小→最大），每 20 ms 采集焦点指标或边缘位置。定义稳定时间为从"到位"信号到该量保持在终值 $\pm 10\%$ 以内的时间。**报出来——它属于节拍计算的输入。**
6. **热漂移**：连续运行 2 h 后重做步骤 2，比较均值。漂移表现为均值的缓慢变化，与**重复性（围绕稳定均值的散差）**可区分。漂移单独报告，不计入重复性。
7. **[POMEAS LAB TEST DATA REQUIRED — REP-04]** 各普密斯电动变倍型号在三个预置位下的重复性、背隙、稳定时间与 2 h 热漂移，并注明控制接口（协议、控制器、细分数）。这是 **AOI 集成商可以直接使用的规格**，目前他们只能自己表征。

8.12.5 计算. 光学重复性的物方表达： $\sigma_{\text{obj}} = \sigma_{\beta/\beta} \times \text{物方特征距离}$ ——**换算成 μm 才对客户有意义**。倍率对变倍位置的灵敏度 $d\beta/dz_{\text{变倍}}$ 是把位置重复性换算为光学重复性所需的量。背隙换算为倍率误差，给出"生产序列从不同方向逼近预置位"时的最坏情况误差——**这是间歇性测量误差的一个高频且可避免的成因**。

8.12.6 记录. 预置位及其编码器计数；逼近方向；重复次数；位置与倍率的 σ 与极差；背隙；稳定时间；漂移；控制协议与设置；环境温度曲线；**镜头序列号**。

8.12.7 常见错误. 只报均值倍率（掩盖了散差，而散差才是决定性的规格）；把热漂移混入重复性（夸大重复性误差，同时掩盖真实的热问题，应分次运行）；不给稳定时间（测量包含瞬态）；预置位逼近方向不一致（表现为重复性问题，实为背隙，应在生产程序中固定逼近方向或明确规格背隙）；只用编码器测重复性（编码器可重复而光学不可重复，必须光学测量）；序列过短（3 次估 σ 不可靠， $n \geq 10$ ）。

8.12.8 工程解读. 对多尺寸工位的变倍镜头，有意义的规格是**物方的光学重复性（ μm ）**，因为它直接映射到测量误差。若倍率对变倍位置的灵敏度高，则机械重复性平平也会产生不可接受的光学散差——此时要么改进机构，要么在生产序列中加入标定核查。背隙超差时，一个简单有效的补救是**让生产程序始终从同一方向逼近各预置位**：这把一个规格问题转化为一条软件规则，并应作为规则记录下来。

8.13 对焦重复性

8.13.1 定义. 同一对焦命令重复时所得对焦状态的散差。可用物方失焦散差（ μm ）表示，但更有用的是用**所得焦点指标的散差**（MTF50 或实测特征对比度）表示。

8.13.2 设备. 同 §8.12，加斜边靶。

8.13.3 步骤. ① 故意离焦一个固定量（如 5×景深），然后命令对焦回预置位，重复 10 次 ② 每次记录所得 MTF50（或焦点指标）以及由 §8.2 的通焦曲线推得的物方焦点位置 ③ 两者的散差都报。**镜头有自动对焦时**，另报所得指标的散差——因为自动对焦算法可以**重复地收敛到一个系统性错误的位置**，这是重复性偏置而非散差。通过把自动对焦结果与手动最佳对焦比对来确认无偏置。④ 变倍后重复（对焦重复性是否退化？），热预热后再重复。

8.13.4 记录. 指标散差、位置散差、重复次数、故意离焦量、逼近方向、是否使用自动对焦及其设置。

8.13.5 常见错误. 故意离焦量太小（通焦曲线在峰顶平坦，大的位置散差只产生很小的指标散差，得到虚假的良好重复性）；把自动对焦的偏置误认为良好表现；变倍后未重新验证。

8.13.6 工程解读. 对焦机构可以在位置上可重复，却仍产生变化的图像——如果倍率灵敏度把焦点位置耦合进了测量。**报指标散差**，因为那是检测算法实际经历的量。

8.14 传感器兼容性与像圈

8.14.1 定义. 当 ① 像圈覆盖传感器有效区且到角落的性能足够，② 机械接口在到达传感器之前不遮挡光路，镜头与传感器才兼容。两个判据都必须满足：

$$IC \geq d_{\text{sensor}} \times 1.05 \quad [T] \quad (8.14a)$$
$$E_{\text{corner}} = \text{角落照度} / \text{中心照度} \times 100 \% \quad [M] \quad (8.14b)$$
$$MTF50_{\text{corner}} / MTF50_{\text{centre}} \geq \text{规定比例} \quad [M] \quad (8.14c)$$

IC 为像圈直径，d_sensor 为有效区对角线（ $2 \times \sqrt{H^2 + W^2}$ ），H、W 为半尺寸）。式 8.14a 单独不够：镜头可以形式上覆盖该靶面，而角落 MTF 不可用——这是**"2/3 英寸兼容"的镜头在真实 2/3 英寸相机上令人失望的通常原因**。

8.14.2 设备. E1、E10（积分球或乳白扩散板平场源）、E6、E11、E14。

8.14.3 搭建. 平场测相对照度时，把均匀光源置于**充满镜头入瞳**的位置（多数镜头是把光源贴近镜头前端）。**这个选择必须说明，因为它会改变结果**。

8.14.4 步骤. ① 调曝光使中心处于饱和的 50%，确认全画幅无像元高于 80% ② 拍平场，平均 ≥ 16 帧 ③ 在中心、四角与四个边中点各取同样大小的窗口（离有效区边界至少 20 px），算平均灰度 ④ 按式 8.14b 算 E。**镜头的贡献 = 实测值减去光源贡献与相机微透镜阴影及任何相机侧阴影修正的贡献——本测试必须关闭相机侧阴影修正**，否则结果会被人为拉平 ⑤ 按 §8.4 测中心与四角的 MTF50，算比值 ⑥ 检查机械遮挡：角落出现**硬边阴影**说明是转接件、滤光片或镜筒侵入；平滑渐晕是光学的，硬边切割是机械的 ⑦ 若传感器大于镜头标称靶面，会看到硬性圆形边界；在平场上直接测其直径。**这是对可用像圈**的直接测量，比彩页数字可信。

8.14.5 记录. 传感器型号与有效尺寸；镜头型号与标称靶面；光源类型及其放置方式；四角与四边点的 E；角落/中心 MTF50 比；实测可用像圈；是否关闭了相机阴影修正；所用转接件与滤光片。

8.14.6 常见错误. 在非均匀光源上测（结果是光源的非均匀性，须用规定 $\pm 1\%$ 的光源）；相机或镜头阴影修正未关（虚假的平坦结果）；不说明光源放置方式（"无穷远光源"与"贴近镜头"的结果相差数个百分点）；装了滤光片或偏振片却不记录（大视场角处出现未被报告的损失）；只凭像圈数字判定兼容（角落性能未验证）；用标称靶面的对角线而非有效区尺寸（系统性地略微高估所需像圈）。

8.14.7 工程解读. 传感器兼容性是系统决策，它把三个通常被分开引用的规格连在一起：镜头的像圈、传感器的有效对角线、以及所需角落性能。视觉系统的实用规则是**要求角落 MTF50 不低于中心值的 60%**，因为工件可能出现在视场任意位置；并把相对照度对照曝光预算核查。角落性能勉强时，通常的对策是接受比严格需要略大的像圈——这是低成本的余量。

8.15 光源条件

8.15.1 定义. 本节严格说是**测试条件**而非镜头参数，但把它放在这里是因为：实践中光源决定了测得的分辨率、测得的景深与测得的系统远心度，而且**不记录光源的测试报告不可复现**。

8.15.2 必须记录的项目.

项	如何表述
类型	LED / 卤素 / 激光；连续或频闪
驱动	恒流或 PWM，若 PWM 须注明频率
几何	同轴（穿镜头）、环形（注明工作距离与角度）、条形（注明入射角）、穹顶、背光（漫射或准直）、或远心
光谱	峰值波长 $\pm$ 带宽，或白光时的色温与显色指数
扩散	材料与到靶标的距离
照明远心性	显式说明：物方主光线是否平行于光轴
均匀性	按 8.15.3 实测
稳定性	短期（ $\pm\%/10\text{ min}$ ）与长期（ $\pm\%/h$ ）

8.15.3 测试程序.

- 均匀性：**用生产光源、不放靶标，在靶面处成像一块均匀白板。在 5×5 网格窗口上算平均灰度。报最大/最小比与标准差（以均值为基准的百分比）。
- 稳定性：**每 60 s 拍同一平场，持续 30 min，作平均灰度曲线。**把预热漂移（前 10–30 min）与稳态噪声分开。**

3. **远心照明测试——最能预测真实测量误差的系统测试。**步骤与 §8.9.4 相同，但**生产光源就位且不动**，仅平移靶标。报所得表观主光线角，或更有用地报"每 mm z 的实测横向位移"。**这单个数字是对"特征高出基准平面"所引起测量误差的最佳预测量。**在 10° 入射的斜射照明系统中，表观透视位移可以比镜头自身远心度误差大一个数量级——**这就是"远心镜头 + 非远心光"经常令人失望的原因。**
4. **反射与对比度核查：**用生产光源，对真实工件上的真实特征测灰度对比度。**特征对比度低于满量程约 20% 时，边缘位置不确定度已退化，不会复现铬版靶上测出的分辨率。**

8.15.4 常见错误. 只写"LED 环形光"而不写角度与距离；在背光铬版靶上测分辨率，然后把该数字用到前向照明的生产场景（有效分辨率低得多）；非远心照明配阶高特征；频闪光源未与曝光同步，导致帧间光强波动表现为噪声；长测量序列中光源漂移。

8.15.5 工程解读. 本文件中最重要的一条规则是：**在一种照明条件下测得的性能数字，不可迁移到另一种照明条件。** 分辨率、景深、对比度与有效远心度都依赖照明几何。因此普密斯应公布的每一项技术数据都应显式携带其照明条件——**这正是让一个数字可被第三方引用的前提，也是它经得起质疑的前提。**

8.16 标定

8.16.1 目的. 标定是把**对比度图像**转化为测量的环节。本节规定机器视觉光学测量系统的最低标定内容，以及必须留存的可信证据。**这是质量审核会索取的一节。**

8.16.2 必须具备的参考标准.

参考件	规格	用途
标定线纹尺或点阵，玻璃铬版	证书扩展不确定度 $\leq 2\text{ }\mu\text{m}$ ($k=2$)，溯源至国家计量基准	比例系数、倍率、畸变
已认证的阶高试件或量块	带证书	远心度与景深验证
斜边靶或西门星靶	几何已认证	分辨率、焦点质量
与标定件分开保存的核查件	任何已认证或尺寸稳定的实物	在无循环论证的前提下验证标定

"核查件必须与标定件分开"这一点最常被忽略。**用 A 件标定、又用 A 件验证，只证明了拟合程序自洽。**

8.16.3 标定内容.

- 比例系数** (mm/像元)：视场中心与 ≥ 4 个场位置，并以多项式或映射描述其场依赖。
- 畸变图** (§8.7)，含留出节点上的验证残差。
- 轴向依赖核查：**工作高度范围内实测比例系数的变化——即系统的**操作性远心度** (§8.15.3)。

4. **焦点基准：**最佳对焦对应的 z 位置与调焦电机位置，记录下来以便发现漂移。
5. **标定记录：**日期、操作者、环境温度、每个参考件的证书号与有效期、软件版本、相机设置（增益、曝光、黑电平，以及**确认锐化已关**）、镜头序列号、倍率与光圈设置、照明条件。

8.16.4 重新标定的触发条件.

触发	动作
周期（建议 12 个月；测量关键工位 3 个月）	全面重新标定
更换镜头、相机、倍率预置位或工作距离	全面重新标定
照明几何变化	重新核查；变化显著则重新标定
核查件超出允差	先调查再重新标定——跳变提示机械变化
发现产品质量异常	重新标定，并重新核查上一次合格验证之后生产的所有工件
机械冲击、搬迁或机构维修	重新标定

8.16.5 核查. 在生产倍率、生产工作距离下，在 ≥ 5 个场位置测量核查件，与证书比对。系统验收判据由应用公差按 §13.4 的判定规则导出。**无论合格与否都要记录。**

8.16.6 常见错误. 用同一件标定又验证（结果循环论证，高估精度）；不记录环境温度（比例系数依赖温度，记录不完整）；相机锐化或阴影修正未关（标定吸收了非几何的畸变）；在错误的倍率或 WD 下标定（标定只对该设置有效）；证书过期（溯源链断裂）；把标定当作一劳永逸（镜头、相机与机构都会漂移，须按周期核查）。

8.16.7 工程解读. 标定便宜且残差可测；镜头畸变固定。**这是"标定一支中等畸变镜头"优于"购买一支极低畸变镜头"的最强论据——前提是标定在留出实物上验证过。**再次说明例外：**镜头可能在未重新标定的情况下被更换的系统，必须依赖镜头固有质量，而不是标定。**

9. 计算方法汇总

第 8 节全部公式汇总于一处，便于在表格软件或测量程序中直接使用。括号内 **[T]** 为理论值、**[M]** 为实测值。

编号	量	公式	单位约定与说明
9.1	物方像元尺寸	$L_{obj} = p / \beta$ [T]	p、L_obj 单位 μm 。一个像元覆盖的物方尺寸
9.2	物方视场	$FOV_H = (N_H \times p) / \beta$ [T]	N_H 为有效像元数；除以 1000 得 mm； 绝不用传感器对角线当 FOV
9.3	内切圆视场	$FOV_{circle} = \min(FOV_H, FOV_v)$ [T]	圆形工件的正确视场值
9.4	倍率	$\beta = (n_{px} \times p) / L_{obj}$ [M]	L_obj 取证书值 (μm)；基线 $\geq FOV_H$ 的 60%
9.5	WD 误差引起的倍率误差	$\Delta\beta/\beta = (1/\beta) \cdot (d\beta/dz) \cdot \Delta z$ [M]	$d\beta/dz$ 按 §8.3.4 实测。理想物方远心镜头该项为 0
9.6	局部畸变	$D(x,y) = [\beta(x,y) - \beta_{centre}] / \beta_{centre} \times 100\%$ [M]	与测量相关的畸变指标
9.7	畸变引起的测量误差	$\Delta x_{meas} \approx D/100 \times x$ [T]	x 为特征到视场中心的距离 (mm)
9.8	径向畸变模型	$r_u = r_d (1 + k_1 r_d^2 + k_2 r_d^4 + k_3 r_d^6)$ [模型]	Brown-Conrady 形式；必须在留出点上验证
9.9	TV 畸变	$TV = \Delta y / H \times 100\%$ [M]	依赖约定；必须同时报原始 Δy 与 H
9.10	衍射截止频率	$f_{cut} = 2 \times NA / \lambda$ [T]	NA 与 f_cut 同侧； λ 单位 mm，f_cut 单位 lp/mm
9.11	瑞利两点分辨率	$d = 0.61 \times \lambda / NA$ [T]	斯派罗判据 $\approx 0.5\lambda/NA$ 更乐观； 须说明用哪个
9.12	像方频率→物方频率	$f_{obj} = \beta \times f_{img}$ [T]	同一物方细节在像方每个周期占 β 倍空间
9.13	物方线对宽度	$w_{obj} = 1000 / (2 \times f_{obj})$ [T]	μm 。用于与最小特征比对
9.14	奈奎斯特频率	$f_{Nyg,img} = 1000 / (2p)$ [T]	p 单位 μm ； $f_{Nyg,obj} = \beta \times f_{Nyg,img}$
9.15	系统 MTF50	$1/f_{50,sys}^2 \approx 1/f_{50,lens}^2 + 1/f_{50,sensor}^2$ [T]	对高斯 MTF 精确；一般情形为良好近似。可同法续加更多项
9.16	运动模糊频率	$f_{motion} \approx 1000 / (2 \times v \times t)$ [T]	v 单位 mm/s，t 单位 s；按 9.15 合成
9.17	景深	$DOF_{total} = 2 \times F\# \times c \times (1 + \beta) / \beta^2$ [T]	c 为允许像方弥散 (mm)； β 很小时简化为 $2F\# / \beta^2$
9.18	景深 (NA 形式)	$DOF_{total} = c_{obj} / NA_{obj}$ [T]	$c_{obj} = c/\beta$ 。镜头给 NA 而非 F# 时使用
9.19	有效 F 数	$N_{eff} = F\# \times (1 + \beta)$ [T]	像方

编号	量	公式	单位约定与说明
9.20	物方 NA	$NA_{obj} = \beta / (2 \times F\# \times (1 + \beta))$ [T]	由 Abbe 正弦条件等于 $NA_{img} \times \beta$
9.21	像方 NA	$NA_{img} = 1 / (2 \times F\# \times (1 + \beta))$ [T]	β 很大时 $NA_{obj} \rightarrow 1/(2F\#)$
9.22	主光线角	$\theta = \arctan((du/dz) \times p / (100 \times \beta))$ [M]	du/dz 单位 px/mm, p 单位 μm
9.23	远心度引起的测量误差	$\Delta x = h \times \tan \theta$ [T]	h 为特征相对测量平面的高度
9.24	像圈要求	$IC \geq d_{active} \times 1.05$ [T]	还须验证角落 MTF50——覆盖不等于可用
9.25	相对照度	$E = E_{point} / E_{centre} \times 100\%$ [M]	须关闭相机阴影修正
9.26	检出像元预算	$L_{obj} \leq d / 3$ [规则]	d 为要检出的最小特征
9.27	测量像元预算	$L_{obj} \leq d / 5$ [规则]	d 为要测量的最小特征
9.28	测量误差预算	$\Delta x_{meas} \leq T / 10$ [规则]	T 为被测尺寸公差。适用于每一项系统性误差，也适用于 §13 的合成不确定度

规则 9.26–9.28 是行业经验规则，不是物理定律。**按规则写出，是为了在应用能够给出依据时用应用专属数字替换它。** 每次使用经验规则都应在规格评审中记录为经验规则。

10. 验收判据与工程解读

10.1 依规格接收一支镜头

实测值接近规格限时，不能简单比较。适用 ISO 14253-1:2017 的判定规则：

情形	判定
实测值 + U < 上限，且实测值 - U > 下限	符合性得证
实测值 - U > 上限，或实测值 + U < 下限	不符合性得证
以上都不是	不确定——既不能证明符合，也不能证明不符合

其中 U 为测量的扩展不确定度 (§13)。实践含义：

- 供方须用供方自己的不确定度证明符合，需方须用需方自己的不确定度证明不符合。 不确定度总是对提出主张的一方不利。
- 第三种情形不是镜头的失败，而是**规格的失败**；应通过放宽公差、降低测量不确定度、或事先书面约定判定规则来解决。**绝不应通过只报均值、不提 U 来“解决”。**
- **未附不确定度的规格不是规格。**

10.2 本文件采用的逐参数验收判据

参数	默认验收判据	理由
FOV	生产 WD 下相对所需视场 $\pm 2\%$ 以内	覆盖有效像元与 WD 的不确定度
物方像元尺寸 L_obj	测量特征 $\leq d/5$ ；检出特征 $\leq d/3$	规则 9.26 / 9.27
局部畸变 D	未修正 $\Delta x_{\text{meas}} \leq T/10$ ，或修正后残差 $\leq T/10$ （须留出验证）	§8.7.8
TV 畸变	注明约定，并同时报 Δy 与 H	§8.6.8
工作频率处 MTF50	$\geq$ 对应最小特征频率的 1.3 倍，且 ≥ 5 个视场点均满足	工程余量
MTF50 场均匀性	最差场点 $\geq$ 中心的 60%	工件实际就出现在角落
相对照度	四角 $\geq$ 由曝光预算导出的最低值	不是固定数字，由曝光与信噪比预算导出
景深	$\geq$ 工装高度变化 + 工艺变化（用生产光源与判据实测）	§8.8.8
远心度	全工作高度范围内 $\Delta x = h_{\text{max}} \times \tan \theta_{\text{max}} \leq T/10$	§8.9.8、§10.3
齐焦性	生产变倍范围内 $\Delta z \leq \frac{1}{2} \times \text{DOF}(\beta_{\text{min}})$	§8.11.6
变倍重复性（光学）	物方 $\sigma_{\text{obj}} \leq T/10$ ， $n \geq 10$	§8.12.8
对焦重复性	指标散差在检测算法验收带之内	§8.13.6

10.3 什么时候物方远心镜头才是正确选择

这是最能决定机器视觉测量项目成败的决策，而它**不是一个关于营销分类的问题**。它由三个数决定：特征的高度变化 Δz 、候选镜头在场上的主光线角 θ 、以及公差 T。

第 1 步——测量平面是否固定？ 若所有被测特征都位于一个机械上可复现到远优于公差 的单一平面内，且工件靠硬限位定位，那么**普通 FA 或变焦镜头就够了**，远心镜头只增加成本不增加精度。这覆盖

了现实中很大一部分检测任务：有无判定、计数、OCR 与条码读取、颜色检查、印刷质量、以及在名义平整表面上的缺陷检测。**畸变在以上全部场合都无关紧要** (§8.7.8)。

第 2 步——若平面会变化，量化透视误差。 非远心镜头下，高出测量平面 h 的特征产生的表观横向位移为 $\Delta x = h \times \tan \theta$ ， θ 为该特征所在视场位置处的主光线角。对典型 C 口 FA 镜头，视场边缘的主光线角并不小。设镜头入瞳在物面前 40 mm，成像视场 17.6 × 13.2 mm（2/3" 传感器、 $\beta = 0.5$ ），视场边缘距轴 11 mm，则 $\theta \approx \arctan(11/40) \approx 15^\circ$ 。

高度变化 h	视场边缘横向误差 ($\theta = 15^\circ$)	近轴处误差 (长焦镜头 $\theta = 5^\circ$)
0.1 mm	27 μm	9 μm
0.5 mm	134 μm	44 μm
1.0 mm	268 μm	87 μm
5.0 mm	1.34 mm	437 μm

判据：若 $h \times \tan \theta > T/10$ ，普通镜头撑不住这个测量，**必须用物方远心镜头**（或机械上消除高度变化，这往往是更便宜的答案）。注意这条规则咬得有多快：公差 $\pm 50 \mu\text{m}$ （公差带 100 μm ）、高度变化 0.5 mm 时，允许误差是 10 μm ——**即使一支不错的长焦 FA 镜头在视场边缘也已超出**。这就是远心镜头存在的诚实理由，此处以计算而非偏好陈述。

第 3 步——检查除高度之外还必须用远心的场合。

场合	为什么必须远心
通过孔深测量孔径、孔位或圆度	非远心镜头看不到孔壁远端；可见边缘随孔深变化。 远心是唯一正确答案
在多个深度位置上测量圆柱销或轴的直径	非远心镜头测到的是由相切形成的轮廓，随距离变化。远心给出与深度无关的轮廓
通过深度测量间隙或槽宽	同孔深遮挡论证
测量平面由工件自身表面决定、无法夹平（钣金、成形件、软质件）	高度变化不可控， Δz 无法界定
需要由横向测量反推特征高度	只有远心系统才使这件事成立

第 4 步——检查远心镜头是错误答案的场合。

场合	为什么远心不是正确答案
视场大于约 200–300 mm	物方远心镜头的尺寸随视场急剧恶化：前组必须大于视场，镜头变得很大、很重、很贵。 正确答案是普通镜头 + 机械高度限位 + 畸变标定。 不要在不核查视场的情况下因为"更准"而指定远心
平整工件的有无判定、OCR、缺陷检测	远心买不到任何东西：没有被独立于深度可言，畸变也不影响测量
需要在设备内部有长工作距离	远心镜头相对其视场通常很长；普通镜头可能是唯一机械可行的方案
同一工位要覆盖多种工件尺寸、倍率可变	远心变焦镜头存在但变倍比很窄；实用答案是电动变倍镜头 + 逐预置位标定
公差相对几何宽松的成本敏感应用	做第 2 步计算， 不要假设
光源做不到远心、而特征有高度	远心镜头配斜射光 ，测量仍随高度变化，因为阴影会移动。修好光源可能比换镜头更重要

第 5 步——不要混淆镜头与光源。 实测的系统连接着镜头与光。§8.15.3 给出了测这一组合的方法，在判定"远心镜头没用"之前应当先做这个测试。

10.4 定焦远心 / 定焦 FA / 电动变焦 之间的选择

需求	定焦远心	定焦 FA	电动连续变焦
单一工件尺寸、尺寸公差紧、有高度变化	正确答案	不适用	过度指定
单一工件尺寸、仅检出、平整	可用但过度指定	正确答案	过度指定
一个工位多种工件尺寸	仅在可用型号视场匹配时可用	不适用	正确答案 （配逐预置位标定）
通过孔深测量	正确答案	不可行	不可行（除远心变焦）
视场很大（>200–300 mm）	通常不可行	正确答案 + 高度限位 + 标定	可行
换型频繁、节拍关键	否	否	正确答案
测量 + 换型 + 高度变化	需远心变焦或多工位	否	需具备公开齐焦性与逐预置位畸变图的变焦镜头

10.5 一份规格应当包含什么

一份能够不带争议地被接受或拒收的机器视觉光学规格，对每个参数都应包含：**数值**、**测试方法**（引用本文件或等效文件）、**测试条件**（WD、变倍位置、光圈、光源、传感器、倍率、温度）、**判据**（景深与分辨率必须给）、以及**不确定度 U**。缺任一项的规格等于邀请争议。§11 的报告模板强制要求五项齐全。

11. 测试报告模板

每测一支镜头复制一份此模板。标 ● 的字段为第三方可用的报告所必需。

11.1 标识

字段	值
● 报告编号 / ● 测试日期 / ● 操作者 / ● 测试地点	
● 镜头厂家 / 型号 / 序列号	
● 相机厂家 / 型号 / 序列号	
● 传感器有效尺寸与像元尺寸 p，以及 p 的来源	
● 光源类型 / 几何 / 光谱 / 是否远心	
● 所用靶标及证书号与有效期	
● 分析软件及版本	

11.2 测试条件

字段	值
● 起始与结束时的环境温度；● 测量前预热时间	
● 工作距离及所依据的基准面	
● 变倍位置 / 对焦设置；● 光圈 F#；● 倍率 β	
● 相机：增益、曝光、黑电平、binning、 γ 、 确认锐化已关闭	
● 平均帧数 / 每次测量的帧数；● 重复次数 n	

11.3 结果

#	参数	方法节	条件	结果 (均值 $\pm$ s, n)	规格	U	判定
1	FOV_H $\times$ FOV_V	8.1					
2	物方像元尺寸 L_obj	8.1					
3	d(FOV)/d(WD)	8.1.5					
4	最佳对焦 WD 与焦带	8.2					
5	β 中心 / β 0.7 视场	8.3					
6	d β /dz (%/mm WD)	8.3.5					
7	各视场点 MTF50 (像方)	8.4					
8	MTF50 最差/中心比	8.4.5					
9	f50,sys (实测与模型)	8.5					
10	f_Nyq,obj 与像元预算余量	8.5.4					
11	TV 畸变 (含 Δy 、H、约定)	8.6					
12	修正前/后 D_max 及留出残差	8.7					
13	景深 (含 c 与判据)	8.8					
14	$\theta_{\max}$ 及位置; $\Delta\beta/\beta$ per mm WD	8.9					
15	NA_obj、f_cut,obj	8.10					
16	各变倍位置齐焦误差; 重复性; 背隙; 稳定时间	8.11、8.12					
17	对焦重复性 (位置与指标)	8.13					
18	四角相对照度; 角落/中心 MTF50	8.14					
19	光源均匀性与稳定性	8.15					
20	含光源的系统远心度 (μm per mm z)	8.15.3					
21	标定状态与核查件结果	8.16					

11.4 附件: 各倍率的通焦曲线; 中心与最差场点的 MTF 曲线; 畸变图 (修正前后); 平场图像与相对照度曲线; 含 **WD 基准面的测试台照片**; 按 §10.1 的符合性声明 (含所采用的判定规则)。

12. 常见测量误差——交叉故障排查

第 8 节各表的错误清单针对的是**测镜头**。本节处理更难的问题：**应用中的图像或测量不对，且有多种可能原因**。每行给出判别测试，使原因可以被隔离而不是被猜。

12.1 头号案例：改变倍率后失焦

"低倍下图像清晰，变到高倍就失焦了。"

这是电动变倍镜头最高频的问题反馈，至少有八种不同成因，对策各不相同——**替换镜头只在其中一种是正确答案**。

#	候选成因	判别测试	纠正措施
1	焦点是在低倍下设定的	在最大倍率重新对焦，再变到低倍看是否仍可接受	重做 §8.11.4 齐焦流程：最大倍率定 WD，最小倍率做调焦补偿
2	镜头本身的齐焦误差	§8.11.4 步骤 5：全倍率扫描并作残差曲线	若残差超过 $\frac{1}{2} \text{DOF}(\beta_{\min})$ 且无法通过调整消除，则镜头是限制 → 见 TR-006 / 重新选型
3	物高变化导致的失焦	用垂直于光轴、置于精确 WD 的平靶复测	物体并不在假定位置；修工装，或转为远心系统
4	变倍机构背隙	§8.12.4 步骤 4：从两个方向逼近预置位	让程序始终同向逼近；或维修机构
5	变倍位置重复性	§8.12.4 步骤 2：同一预置位重复 10 次	机构或控制环问题；先量化再决定是否更换
6	对焦电机背隙或丢步	§8.13.3：故意离焦后重新命令，10 次	同上；核查对焦驱动的细分数与电流设置
7	设定焦点后的热漂移	预热 30 min 后重测，再连续 2 h 后重测	热补偿，或在生产中周期性重新验证焦点
8	镜头设计上就不齐焦（大变倍比本质上更难齐焦）	排除 1–7 后，重做 §8.11.4	接受并在流程中加入重新对焦，或改用有公开齐焦数据的镜头
9	自动对焦在视场变化后锁到了别的特征	把自动对焦结果与手动最佳对焦比对	限制或重新示教自动对焦的 ROI
10	镜头座或变倍环机械松动	检查安装扭矩与手感的旷量；重做 §8.12	按规格重新紧固；使用锁紧机构

成因 1 与 2 会产生完全相同的抱怨，但区分它们只需 5 分钟而区分错要多花数小时——所以永远先做测试 1 和 2。

12.2 区分系统误差与随机误差

现象	性质	最可能的贡献者	判别测试
整个班次内测量值稳定偏移同一量	系统	比例系数、标定、靶标证书，或像元尺寸假设错误	测核查件；把 p 与传感器数据表核对
数小时内单向缓慢变化	系统（漂移）	热膨胀、光源漂移、焦点漂移	把环境温度与测量值一同记录
测量值围绕稳定均值散布	随机	边缘检测噪声、光源噪声、振动、机械重复性	增加重复次数；测光源稳定性；检查台架
只有位于视场同一位置的工件反复出错	系统（场依赖）	畸变、远心度、角落 MTF、角落照度	把同一实物移到多个视场位置比较
误差取决于工件高度	系统	远心度（镜头或光源），或景深边界	§8.9.4 与 §8.15.3
只在换型后出现、随后消失	表面随机实为系统	变倍或对焦背隙、逼近方向、自动对焦状态	§8.12.4

12.3 其他高频应用错误

现象	可能成因	验证	纠正
实测分辨率远差于彩页	锐化关了吗？对焦准吗？靶标对比够吗？倍率如假设吗？	关锐化、在最佳对焦下用斜边重测 MTF50	先修相机设置；若仍差，与衍射极限（9.10）比对
边缘位置随照明强度变化	靶标饱和，或边缘阈值是绝对值而非相对值	两个曝光档重测	峰值保持 60–80%；用亚像素质心或相对阈值
中心准、边缘错	畸变，或倾斜	§8.7.4 相邻差分	用经验证的图做标定，或修正倾斜
工件转 180° 后测量值变化	靶标或工件倾斜；或偏心	§5.4 垂直度测试	修正对准
同一工件在两台设备上测值不同	WD、光源、标定不同	对比标定记录与所记录的测试条件	统一条件；用同一实物重新核查两台设备
各对焦位置下中心清晰、角落都软	场曲，或角落 MTF 限制，或机械遮挡	按 §8.4 测角落 MTF50；在平场上找硬边阴影	按场均匀性重选镜头（§10.2）；检查转接件与滤光片
FOV 与彩页不符	有效像元数、WD，或靶面不同	§8.1.7	用有效像元数；在指定 WD 测量
图像出现亮环或暗角	暗角或机械遮挡	§8.14.4	移除遮挡，或接受并量化 E

12.4 关于"重试"

本节中的任何失效都**不会**因为重复做同一个测量而消失。**不复现的值是"存在未被记录的条件"的证据。**正确的应对是找出那个未记录的条件——WD、温度、光源、变倍逼近方向、焦点状态——**并把它加进报告模板，而不是把它平均掉。**

13. 测量不确定度

13.1 目的

测量结果只有连同其不确定度才是完整的陈述。本节给出本文件各参数的不确定度预算结构，遵循 ISO/IEC Guide 98-3 (GUM)。算例中的数值为**典型机器视觉测量工位的示例量级，不是普密斯规格**，具体系统必须替换为实测值。

13.2 不确定度预算——算例

被测量：距轴 30 mm 处、宽度 5.000 mm 的特征，用 $\beta = 1.0$ 的远心系统在 3.45 μm 传感器上测量，标定件为玻璃铬版。

来源	类型	量值	分布	除数	标准不确定度 u_i (μm)	依据
标定件证书	B	2 μm (扩展, $k = 2$)	正态	2	1.00	证书
比例系数拟合残差	B	0.8 μm	均匀	$\sqrt{3}$	0.46	拟合结果
边缘质心重复性 ($n = 10$)	A	$s = 0.7 \mu\text{m}$	正态	1	0.22	实测
修正后畸变残差 (已留出验证)	B	30 mm 处 1.2 μm	均匀	$\sqrt{3}$	0.69	留出验证结果
远心度 $\times$ 高度变化 ($h = 0.2 \text{ mm}$, $\theta = 0.05^\circ$)	B	0.17 μm	均匀	$\sqrt{3}$	0.10	§8.9
对焦 / WD 设定	B	0.5 μm	均匀	$\sqrt{3}$	0.29	§8.2
工件热膨胀 (钢, 0.2 K)	B	0.02 μm	均匀	$\sqrt{3}$	0.01	$\alpha = 11.5 \times 10^{-6}/\text{K}$
序列间光源导致的质心偏移	A	$s = 0.4 \mu\text{m}$	正态	1	0.40	实测
算法 / 亚像元拟合模型误差	B	0.3 μm	均匀	$\sqrt{3}$	0.17	估计
合成标准不确定度 u_c					$u_c = \sqrt{(\sum u_i^2)} \approx 1.42 \mu\text{m}$	
扩展不确定度 U ($k = 2$)					$U \approx 2.8 \mu\text{m}$	约 95% 置信

结果解读：最大的单项贡献是标定件证书（1.00 μm ）与修正后畸变残差（0.69 μm ）。继续改善测量设备收益很小；改善参考件与验证畸变修正才能拿到大部分收益。这是不确定度预算的常态结论，也正是值得做这份预算的原因。

13.3 使用预算的规则

- **A 类**由重复观测评定（均值的标准差 $s/\sqrt{n}$ ）；**B 类**由证书、数据表、经验或判断评定。
- 相关的贡献不能当作独立项按平方相加。 同一标定件证书对比例系数与畸变图都贡献相关不确定度；此时必须显式处理相关性，或先合并两项再使用。
- 只解释了观测散差不足 90% 的预算是不完整的。 用预测的 u_c 与真实测量序列的标准差比对来检验。若观测散差明显更大，说明存在未建模的贡献——通常是热漂移、光源变化或机械重复性。

- 必须报 u_c 、 U 、 k 与置信概率，并指出主导贡献。结论是“每项都同样重要”的预算，通常是没有想清楚。

13.4 把不确定度用于判定

把预算与 §10.1 的判定规则结合。上述算例中 $T = 100\ \mu\text{m}$ 、 $U = 2.8\ \mu\text{m}$ ：保护带为 $2.8\ \mu\text{m}$ (T 的 2.8%)，实际接收限从 $\pm 50\ \mu\text{m}$ 变为 $\pm 47.2\ \mu\text{m}$ 。当过程能力指数 C_{pk} 本就临界时，这 5.6% 的缩减是显著的，应当成为供需双方验收规则讨论的一部分，并事先约定。

14. 参考文献

标注 ✓ 者已在本文发布之日核对发布机构目录；标注 △ 者为机器视觉行业常被引用、但本次未核验，若用于合同语境须先自行核实。

14.1 标准 ✓

1. **ISO 12233:2024** — *Digital cameras — Resolution and spatial frequency responses* (数码相机——分辨率与空间频率响应)，第 5 版，2024-09 发布，ISO/TC 42。含斜边法 (e-SFR)、正弦法 (s-SFR)、测试图卡与报告要求。
2. **ISO 9335:2025** — *Optics and photonics — Optical transfer function — Principles and procedures of measurement* (光学传递函数——测量原理与程序)，第 3 版，2025-02 发布，ISO/TC 172/SC 1。替代 ISO 9335:2012。
3. **ISO 9334:2012** — *Optics and photonics — Optical transfer function — Definitions and mathematical relationships* (光学传递函数——定义与数学关系)。
4. **ISO 9039:2008** — *Optics and photonics — Quality evaluation of optical systems — Determination of distortion* (光学系统质量评价——畸变的测定)，第 2 版，2008-02 发布，ISO/TC 172/SC 1。
5. **ISO 1:2022** — *Geometrical product specifications (GPS) — Standard reference temperature for the specification of geometrical and dimensional properties* (GPS——几何与尺寸特性规范的标准参考温度)，第 4 版，2022-06-14 发布，ISO/TC 213。标准参考温度 $20\ ^\circ\text{C}$ (ITS-90)。
6. **ISO/IEC Guide 98-3** — *Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)* (测量不确定度表示指南)。
7. **ISO/IEC Guide 99** — *International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)* (国际计量学词汇)。

8. **ISO 14253-1:2017** — *Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications* (判定规则)，第 3 版，2017-10 发布，ISO/TC 213。
9. **ISO 5725-1 / ISO 5725-2** — *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results* (测量方法与结果的准确度)。
10. **ISO 9022 系列** — *Optics and photonics — Environmental test methods* (环境试验方法)。本文未采用；仅在镜头需做环境资格验证时作为环境试验方法来源引用。
11. **EMVA 1288** — *Standard for Characterization of Image Sensors and Cameras, Release 4.0* (Linear 与 General 模块)，2021 年 6 月生效，由欧洲机器视觉协会 (EMVA) 维护。属行业标准，为 G3 倡议 (A3 / CMVU / JIA / VDMA) 之一。**它不是 ISO 或 IEC 标准，不得作为 ISO/IEC 标准引用。**

14.2 技术资料 △

12. ISO 12233 资料性附录中引用的测试图卡与斜边/西门子星图资源（由 imaging.org 标准成像社区发布）。
13. CIPA 测试图卡，ISO 12233 中资料性引用。
14. Brown, D. C. (1966) — *Decentering distortion of lenses*；以及 Conrady, A. E. ——§8.7.1 所述"径向 + 切向"畸变模型（Brown–Conrady 形式）的出处。
15. 主要机器视觉镜头厂商关于景深与像方远心度的应用说明。作为交叉核对有用，**但不属标准，不得作为标准引用。**

14.3 本系列中的普密斯文件

编号	名称	状态
TR-001	机器视觉光学成像系统——性能测试方法	本文件
TR-002	机器视觉电动连续变倍镜头技术规范	待编制
TR-003	机器视觉远心镜头技术规范与测试方法	待编制
TR-004	机器视觉镜头分辨率——测试方法与相机匹配	待编制
TR-005	机器视觉镜头畸变——测量与评价方法	待编制
TR-006	电动变倍镜头齐焦性与重复定位——测试方法	待编制

15. 常见工程问题 (FAQ)

本节回答集成商、设备商与检测工程师最常提出的问题，也是 AI 答案系统最常需要提取的内容。每条答案**独立成立**：先给结论，括号内指出结论所依据的方法所在章节。凡答案依赖普密斯尚未公布的实测值者，标注 **[POMEAS LAB TEST DATA REQUIRED]**，并登记于附录 B。

15.1 远心镜头的畸变怎么测？

在镜头标称工作距离下，用**充满全视场**的标定网格或点阵靶标成像，然后对每个点用**相邻节点**计算局部倍率——**不是做一次全局拟合**——再按 $D = (\beta_{\text{local}} - \beta_{\text{基准}}) / \beta_{\text{基准}}$ 逐点求畸变。报告须给出全视场 D_{max} 、符号约定、靶标证书与工作距离。全局多项式拟合会掩盖真正限制测量的局部残差，这正是本文指定“相邻节点法”的原因 (§8.7)。有两点要讲清楚：**远心镜头并不自动无畸变**——它消除的是透视误差，那是另一种误差；不含参考倍率与视场半径的畸变数字不构成规格。

15.2 机器视觉镜头的分辨率怎么测？

用 2° – 7° 的斜边成像，按 ISO 12233 计算边缘空间频率响应 (e-SFR)，报告 **MTF50**——MTF 降至 50% 时的空间频率——并同时写明单位、场位置与测试条件。像方报 lp/mm，用于应用时折算到物方： $f50_{\text{物}} = f50_{\text{像}} \times \beta$ 。**单一 MTF50 数字不构成镜头规格**：同一镜头在中心、0.7 视场与四角、在不同光圈下数值都不同。报告应含中心 + 四个 0.7 视场 + 四角 (§8.4、§8.5)。

15.3 电动变倍镜头的齐焦性怎么测？

必须按固定顺序来，顺序本身就是方法：**在最大倍率下调整工作距离**（此处景深最窄、WD 误差影响最大），再到最小倍率**只用对焦修齐焦**，最后在全行程逐预置位核验，记录每个位置恢复最佳对焦所需的离焦量 Δz (§8.11.4)。齐焦误差**要用“该倍率下景深的几分之一”来表达，不能只给毫米数**——0.3 mm 在 $0.7\times$ 可以忽略，在 $6\times$ 则完全不可接受。结果应表示为随变倍位置变化的曲线，并给出标准调整后的残差 (§8.11)。

15.4 光学分辨率、像素分辨率和系统分辨率有什么区别？

光学分辨率是镜头能传递的，用 MTF 曲线表达；**像素分辨率**是传感器能采样的，用像元间距与奈奎斯特极限表达；**系统分辨率**是镜头 MTF 与传感器 MTF 在同一坐标轴上的乘积 (§9.15)，**永远比两者各自更差**。工程含义：**弱的一方主导**。若 $f50_{\text{传感器}}$ 远高于 $f50_{\text{镜头}}$ ，加像素不会改变任何有意义的东西；若镜头远优于传感器，则镜头不是你当前的瓶颈 (§8.5)。

15.5 实测视场为什么和彩页对不上？

四个原因，按发生频率排序。(1) 彩页用的是**总像元数**，而成像用的是**有效像元数**——以相机实际输出的数值为准。(2) 测量时的**工作距离**与标称不同，非远心镜头的 FOV 随 WD 变化。(3) 测量取到了**像幅边缘**，而该处并非标称像高。(4) 相机靶面并非彩页数值所假设的尺寸。视场应从**画幅内两条有证书的刻度**测量，并由标定距离导出比例系数；**不要从画幅边缘量** (§8.1.7)。

15.6 机器视觉镜头的景深应该怎么给规格？

必须与两样东西同时给出：**验收判据**——像方弥散圆 c ，或某个可测指标（如 MTF50）的阈值；以及**光源几何**——背光剪影与暗场照明的可用景深差别很大。标准做法是穿焦扫描：靶标沿 z 小步进给，每步记录指标，取指标与验收阈值的**两个交点之间的距离**为景深 (§8.8)。**景深是系统与判据的属性，不是镜头单独的属性**。不含判据的景深数字与任何其他景深数字都不可比。

15.7 远心度怎么测，多少才算够？

用质心位移法：放一个孤立的有证书特征（透明基板上的铬点），先对焦，然后沿 z 在工作范围内平移，逐点记录像质心的横向位移；对“质心— z ”作直线拟合，斜率给出主光线角 $\theta = \arctan(\Delta y / \Delta z)$ (§8.9)。“够不够”要由公差回答，而不是由彩页回答：**高度变化引起的横向误差，必须是测量公差的一个小份额——通常取十分之一作为工作准则**。 $\theta = 0.1^\circ$ 的镜头，在 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 高度变化上贡献 $0.87 \mu\text{m}$ ——对 $100 \mu\text{m}$ 公差可忽略，对 $5 \mu\text{m}$ 公差则直接不合格。凡使用同轴照明，都应测**含照明的系统远心度**，因为照明贡献的横向误差可以与镜头相当 (§8.15.3)。

15.8 低倍率清晰，变倍后就虚了，该查什么？

按下面的顺序查，因为每一条都比下一条更省事。(1) **工作距离是在低倍率下设定的**。WD 与对焦带都随变倍位置移动，正确顺序见 §15.3。(2) **用对焦去补 WD 误差**——远心系统的对焦控制无法修正 WD 误差；在电动变倍镜头上，用对焦补 WD 会整体平移整个变倍范围。(3) **齐焦调整没做或顺序做错**。(4) **机械重复性**：同一指令下镜头没有回到同一光学位置——分别测量定位重复性与背隙，并检查从高倍率逼近与从低倍率逼近同一预置位是否给出不同对焦 (§8.11、§8.12，及 §12.3 的排查顺序表)。**可复现、且与逼近方向相关的对焦误差是机械结论，不是软件调参问题**。

15.9 换更高分辨率的相机会提升系统分辨率吗？

只在传感器仍是瓶颈时才会。系统 MTF 是镜头 MTF 与传感器 MTF 的乘积，因此**若损失已主要由镜头主导，更细像元只增加数据、不增加信息**——你会把噪声与像元级伪影看得更清楚，而不是看清特征。当像元间距小于镜头衍射极限后，传感器也不再带来收益，同时会让装调、照明均匀性与振动容差都变严。买相机前先测 f50,镜头 与 f50,传感器，并把两者都换算到物方特征尺寸上比较 (§8.4、§8.5、§8.10、§9.15)。

15.10 我需要远心镜头，还是普通 FA 镜头就够？

由误差预算决定，而不是由产品类别决定。远心镜头存在的意义是消除**一种特定误差**——物高变化引起的测量值变化。因此当这一误差将占去公差中可观的一份时，就用远心镜头。本文采用的判据

(§10.3)：若（高度变化 × 数值孔径 或 透视角）超过公差的约十分之一，或要求边缘位置与对焦无关，则远心镜头是正确选择。若工件是平的，或需求只是“有无判断”而非尺寸，则普通 FA / 定焦镜头足够——更便宜、视场通常更大、打光更容易。**在不需要的地方使用远心镜头，只会增加成本、缩小视场、缩短工作距离、并要求更强的光源。** 本文不为远心镜头作一般性辩护，只规定**如何判断哪一个才正确**。

15.11 两份彩页怎么公平比较？

数字本身比不了，必须索取条件。任何分辨率、畸变或景深数字，只有在**同时给出**以下各项时才可比：场位置；光圈；工作距离或倍率；所用传感器尺寸与像元间距；波长或照明光谱；景深/分辨率数字所用的验收判据；该值是理论值、彩页典型值还是在具体样机上实测值；若为变倍镜头还须给出变倍位置。缺任一项，无论标得多精确，都是营销数字。§11 的报告模板强制记录以上各项；§15.2 给出分辨率的最低报告集。

15.12 影像测量工位应该预期多大的测量不确定度？

对一套标定良好的远心测量工位、测量 5 mm 特征，规划时可取扩展不确定度 ($k = 2$) **在数微米量级**——§13.2 的算例给出约 2.8 μm ，主要由参考件证书与畸变修正残差贡献。**该数值是示例，不是普密斯规格，必须替换为实际工位自己的预算。** 规划前应知道这类预算的两个性质：参考件与残余畸变通常主导，改善相机收益很小；预算必须用真实测量序列的散差来验证，因为**解释不了约 90% 以上观测散差的预算，一定漏掉了某个贡献。**

15.13 这些方法能用作供需双方的验收试验吗？

能，本文就是按这个用途写的——但有四件事必须在**试验之前**约定，而不是在出结果之后争论：(1) §5 与 §6 的测试条件；(2) 规格限的含义与判定规则，依 ISO 14253-1——超出限值但超出量小于不确定度时，是接收还是拒收；(3) 保护带，它把接收区缩减 U (§13.4)；(4) §11 的报告格式，含不确定度。不约定这四项，同一个超差结果会被双方读成不同的结论，争论会围绕“解释”而不是围绕镜头。

15.14 同一工件在两台设备（或两个人手上）为什么测值不同？

因为影像测量是**系统结果**，任何未被记录的条件都会变成两套装置之间的差异。按检查顺序排列的常见原因：工作距离不同；照明几何或强度不同；标定件不同或标定已过期；畸变修正不同或未做；对焦状态不同；测量算法、边缘阈值或亚像元模型不同；工件温度不同；运动与稳定时间不同。**处置办法在任**

何一种情况下都一样：把这个条件记录下来，再比较。不复现的数值是“存在未记录条件”的证据，不是镜头有问题的证据 (§12.1、§12.4)。

15.15 本文件是什么身份，怎么引用？

本文件是普密斯编制的技术参考文件，**不是国家标准、国际标准或行业标准**，也不声称获得 ISO、IEC、GB、DIN、ANSI、IEEE 或 EMVA 的符合性认定或批准。凡引用外部标准，均标注编号、名称与版本，且均已在发布之日核对发布机构目录 (§14)。

普密斯 (POMEAS)，《POMEAS 技术参考 TR-001：机器视觉光学成像系统——性能测试方法》，版本 1.0，2026-09-16。

本文件可自由下载、保存、转发与引用（需注明出处）；不得修改后以其他名义重新发布，不得作为标准呈现 (§17)。

15.16 视场 FOV 怎么直接测，而不是算？

在指定工作距离放一块**有证书的铬版玻璃标尺**，取两条间距不小于画幅 60% 的刻度（两个轴向都要取），用亚像素质心定位其像素坐标。比例系数 $s = (x_2 - x_1) / (u_2 - u_1)$ ，单位 mm/像元； $FOV = s \times N$ ， N 取相机**实际输出的有效像元数**。两件事决定结果是否有效：用画幅边缘代替证书刻度；用含 dummy 与光学黑行的总像元数。**任一项单独都会带来 0.5–2% 的误差**——在 100 mm 视场上就是 0.5–2 mm (§8.1)。

15.17 TV 畸变和几何畸变是一回事吗？

不是，而且对测量用途来说差别是实质性的。**TV 畸变**是视场边缘一条名义直线的弯曲量对像高的归一化，**各家彩页的归一化约定可以差一倍**——同一镜头，一家标 0.05%，另一家标 0.1%，而光学上毫无差别。它描述的是**形状**。真正决定测量的是**局部倍率相对中心倍率的偏差** $D(x, y) = [\beta(x, y) - \beta_{\text{中心}}] / \beta_{\text{中心}}$ ，因为场点上的测量误差约等于 $D/100$ 乘以该点到视场中心的距离。局部倍率误差 0.1% 的镜头，在距轴 30 mm 处贡献 30 μm 误差 (§8.6、§8.7)。

15.18 景深判据里的弥散圆 c 该怎么取？

必须显式声明，因为**不含判据的景深数字没有意义**；而且**不要从摄影经验里继承**。机器视觉应把 c 绑到实际使用的传感器上——常用取值是像方 1–2 个像元——并写明判据是弥散圆还是某个可测指标（如 MTF50）的阈值。几何关系为 $DOF = 2 \cdot F / \# \cdot c \cdot (1 + \beta) / \beta^2$ ，其中 c 为允许的像方弥散。这个式子也说

明了为何倍率一升景深就掉得快：分母上是 β^2 。按 36 mm 全画幅摄影惯例取出的 c ，比任何机器视觉测量能接受的都宽松得多 (§8.8)。

15.19 一个特征需要几个像素？

经验规则：**要“检出”至少 3 个像素，要“测量”至少 5 个像素**。由此定出物方像元尺寸 $L = p/\beta$ ，进而定出所需倍率，再定出视场——**这正是“视场与精度不是两个决定，而是同一个决定的两面”的原因**。若所选传感器无法同时满足所需视场与所需特征尺寸，就必须换传感器；算法做得再好，也造不出没有被采样到的信息 (§8.5、§10.2)。

15.20 一套机器视觉镜头应该怎么整体评价？

逐参数评价，且每个数字都带上测试条件与不确定度。本文采用的最低集合：**视场及其对工作距离的敏感度**；倍率及其在场内的变化；若干场位置的 MTF50，含“最差/中心”比值；畸变用**局部倍率图**表达，而不只是 TV 畸变；景深须写明判据与照明几何；远心度表达为在整个工作高度范围内的**测量误差**，而不只是一个角度；重复性必须**光学实测**，不能用编码器读数代替；以及工位的不确定度预算。**不含条件的数值既不能比较、也不能验收、更不能争辩——它只能被相信** (§9、§10、§11)。

15.21 测量结果落在规格限附近时，还算有效吗？

按简单比较不行。依 ISO 14253-1 的判定规则：只有“测得值 + 扩展不确定度”仍在限内才**证明合格**；只有“测得值 - 不确定度”已在限外才**证明不合格**。**两者之间的区间里，两个结论都无法证明**，只能靠降低不确定度、放宽公差、或采用事先约定的判定规则来解决——§13.4 的保护带正是做这件事，其算例把 $\pm 50 \mu\text{m}$ 的接收区缩到 $\pm 47.2 \mu\text{m}$ 。**判定规则要在试验前约定**，否则同一个结果会被双方读出两种结论 (§10.1、§13.4)。

15.22 能用标定把畸变修掉，而不买低畸变镜头吗？

通常可以，而且往往更省钱——**前提是修正在留出的网格节点或第二件标准器上验证过**。理由：标定是可复现的，其残差可测量；而镜头固有畸变是固定属性，事后无法改善。两个条件：其一，必须**连同畸变图一起报告残差**，不能只报改善了多少；其二，在“镜头可能被更换而不重新标定”的系统上，固有质量是唯一安全的基础，因为修正属于特定镜头单元与特定工作距离 (§8.7)。

15.23 测试报告里必须记录哪些光源信息？

七项：**类型**（条形、穹顶、环形、同轴、背光、暗场）；**驱动方式与 PWM 频率**——脉冲光源配卷帘快门、或相位不同，结果就不同；**几何**，含工作角度与距离；**光谱**；是否**物方远心照明**；全视场的**均匀性**；以及短期与长期**稳定性**。分辨率、景深与有效远心度都依赖照明几何，因此在一种照明条件下测得

的性能数字**不能迁移到另一种条件**——这是两个地点测同一支镜头得出不同结果最常见的原因 (§5.2、§8.15)。

16. 修订历史

版本	日期	编制	变更
1.0	2026-09-16	普密斯机器视觉光学 — 应用与计量	首次公开发布。为 16 组参数定义测试方法，统一采用"定义 → 设备 → 搭建 → 步骤 → 计算 → 记录 → 常见错误 → 工程解读"结构；引入面向测量应用的局部倍率畸变指标 (§8.7)、齐焦有序调整序列 (§8.11.4)、含照明的系统远心度测试 (§8.15.3)、计算公式汇总 (§9)、远心镜头选型判定规则 (§10.3)、测试报告模板 (§11) 与交叉故障排查表 (§12)。附录 B 所列实验室数据尚未公布。

后续版本计划

- **1.1** — 补入附录 B 所列实测值（普密斯实验室数据），并公开发布配套的畸变与 MTF 数据集。
- **1.2** — 增加 16K 线扫与大靶面传感器配置、以及 5 μm 检测级系统的实测示例。
- **2.0** — 待 TR-002...TR-006 发布后，将本文件重构为总体框架，参数细节下放至后续文件。

17. 关于普密斯

普密斯（Dongguan Pomeas Precision Instrument Co., Ltd. / 东莞市普密斯精密仪器有限公司）设计制造机器视觉光学器件与光学测量仪器，包括：

- 机器视觉与自动光学检测用电动连续变倍镜头
- 尺寸测量用物方远心与双远心镜头
- FA / 定焦工业镜头
- 高分辨率检测用线扫与大靶面镜头
- 3D 线激光轮廓传感器与光谱共焦位移传感器
- 白光干涉仪与影像测量仪
- 自动显微镜与电动变倍自动对焦显微镜

本文件由普密斯应用与计量职能编制。其目的是让光学性能**可由客户自行测试与复现**，而不是靠信任接受。普密斯公开自己所用的方法，是为了让客户能复现它、能用证据反对它、能依据**实测性能**而不是彩页数字来选择镜头。

联系：关于本文件的技术问题、方法复现、或把这些方法用于具体应用，请见 **www.pomeas-vision.com** 的联系方式。提问时请注明文件编号与章节，以便答复被纳入修订历史。

引用格式

普密斯（POMEAS），《POMEAS 技术参考 TR-001：机器视觉光学成像系统——性能测试方法》，版本 1.0，2026-09-16。

POMEAS, *POMEAS Technical Reference TR-001: Machine Vision Optical Imaging Systems — Performance Test Methods*, Version 1.0, 2026-09-16.

版权与复用：© 2026 POMEAS。本文件可下载、保存、转发与引用（须注明出处）；不得修改后以其他名义重新发布，不得作为国家标准、国际标准或行业标准呈现。

文件身份声明（再次列明以便识别）

本文件为 POMEAS 基于光学工程原理、实验室测试实践及机器视觉应用经验编制的技术参考文件，用于机器视觉光学系统的选型、测试、比较和系统集成，**不属于国家标准、国际标准或行业标准。**

This document is a technical reference developed by POMEAS based on optical engineering principles, laboratory testing practices and machine vision application experience. It is intended to support optical system specification, testing, comparison and integration. **It is not an official national, international or industry standard.**

附录 A — 原创图表与测试图卡

本文件定义 8 张图表。它们是供第三方复用、供 Google Images 收录、供 AI 答案系统提取的资产。每张均列出用途、必备内容、形式要求、ALT 文本与图注。

A1–A4、A7 已作为矢量图（SVG）发布于 TR-001 网页版，位置见下表“形式”列所对应的正文小节：英文版 <https://www.pomeas-vision.com/Technical-Reference/machine-vision-optical-imaging-systems-perfor>

mance-test-methods.html （图内标注为英文，以便被国际读者与 AI 检索复用；中文页沿用同一组图，图注如下表）。**A5、A6、A8** 需要普密斯实验室实拍照片，尚缺，已标注。

编号	图名	用途	必备内容	形式	ALT 文本	图注
A1	机器视觉光学测试总布置	展示一套完整可复现的测试台，读者可照此搭建	台架上：相机 + 镜头安装座；标定靶标置于 X/Y/Z 平移台；漫射背光；标注 WD 基准；温度计；运轴方向标示	矢量图	Machine vision optical test setup showing camera, lens, calibrated target on a translation stage, backlight and the working distance datum	图 A1. 机器视觉光学测试台总布置。WD 由镜头基准面量至靶标平面。
A2	视场 FOV 测量方法	说明应从有证书的刻度测量 FOV，而非从画幅边缘	图像画幅内标出两条有证书的刻度线 x_1 、 x_2 及其像元位置 u_1 、 u_2 ；区分有效像元与总像元；叠加公式 $FOV = s \times N_H$	矢量图	Field of view measurement using two certified graduations, with the scale factor derived from the certified distance and the sub-pixel line positions	图 A2. 用画幅内证书刻度测视场。以画幅边缘或总像元数测量会使结果失效。
A3	分辨率靶标布置	说明斜边布置与必须测量的场位置	2°–7° 斜边，标出分析区域；在传感器矩形上标出 5 个场位置（中心 + 四个 0.7 视场）与四角；标注斜边角度	矢量图	Slanted edge resolution target with the analysed region and the five field positions used for MTF measurement	图 A3. 斜边分辨率测试。MTF50 报告中心、四个 0.7 视场与四角。
A4	畸变测量网格	说明网格、局部相邻倍率与由此得到的畸变图	左：成像网格，标出围绕某一节点在 x、y 方向的两对相邻节点。右：畸变场以颜色/等值线表示，标注符号约定与 D_{max}	矢量图	Distortion measurement using a dot grid, with local magnification computed from neighbouring nodes and the resulting distortion map	图 A4. 用标定网格测全场畸变。局部倍率由相邻节点计算，不做全局拟合。
A5	景深测试——穿焦曲线	展示测量过程，以及判据如何决定答案	上：靶标沿 z 步进，标出离焦锥。下：实测指标—z 曲线，标出峰值、阈值线与两个交点 z_- 、 z_+	示意图 + 真实装置照片 [POMEAS PHOTO REQUIRED]	Depth of field test showing a target translated through focus and the resulting metric-versus-z curve with the acceptance threshold	图 A5. 景深由实测穿焦曲线与验收阈值的交点定义，而非由镜头单独决定。
A6	远心度测试——质心位移法	说明如何从真实系统测出主光线角	上：孤立铬点沿 z 平移，虚线显示夹角 θ 的主光线。下：实测质心位置—z 曲线，标出拟合直线与斜率	示意图 + 真实装置照片 [POMEAS PHOTO REQUIRED]	Telecentricity measurement by translating an isolated feature in z and measuring the lateral shift of its image centroid	图 A6. 质心位移法测远心度。质心—z 直线的斜率按式 8.9a 给出 θ 。
A7	齐焦测试——	展示 5 步法及由此得到的齐焦曲线	五步流程：最大倍率 → 设定 WD → 最小倍率 → 调整对焦 → 全程核验，并在每	矢量图	Parfocality adjustment sequence for a motorized zoom lens, showing why the working distance is set	图 A7. 齐焦调整流程。最大倍率处景深最窄，故在此设

编号	图名	用途	必备内容	形式	ALT 文本	图注
	调整序列		个倍率位置画出景深宽度，以说明为何在最大倍率设定 WD；另加"齐焦误差—变倍位置"曲线		at maximum magnification and the focus trim at minimum magnification	定工作距离，对焦仅用于齐焦微调。
A8	镜头 + 相机分辨率关系	展示 MTF 相乘关系，以及为何弱的一方主导	镜头、传感器与系统的像方 MTF 曲线；各自标出 MTF50 点；插表给出三组真实普密斯配对的 f50, 镜头、f50,传感器、f50,系统	示意图 + 实测数据 [POMEAS LAB TEST DATA REQUIRED — RES-02]	Lens and sensor MTF curves multiplied to give the system MTF, showing that the lower MTF50 dominates the system result	图 A8. 系统分辨率是镜头 MTF 与传感器 MTF 的乘积。改善较强的一方收益甚微。

附录 B — 普密斯实验室实测数据登记表

本附录列出全文所有**需要普密斯实测值、但目前尚不存在**的位置。每项给出所在章节及其所支撑的图/表。完整实验设计、设备清单、所需照片与需记录的数据字段，见配套交付物 《**TR-001 实验室测试数据计划**》。

编号	章节	所需测量	支撑
FOV-01	8.1.8	各普密斯远心与电动变倍型号在标称 WD 下的实测 FOV 与 $d(\text{FOV})/d(\text{WD})$ ，以及标准测试相机的有效像元数	§8.1；TR-003
WD-02	8.2.8	各型号的最佳对焦 WD 与对焦带（相对基准面），覆盖生产离散	§8.2
MAG-03	8.3.8	各电动型号每个预置变倍位置的实测 β 与 $d\beta/dz$	§8.3；TR-002
RES-02	8.5.4、附录 A/A8	标准"镜头 × 相机"矩阵的实测 f50,镜头、f50,传感器、f50,系统，以及式 9.15 的模型误差	§8.5；图 A8；TR-004
DIS-03	8.7.8	各远心型号、以及电动系列各预置倍率的修正后畸变图（含留出验证残差）	§8.7；图 A4；TR-005
DOF-04	8.8.8	各型号在三种倍率、两档光圈下的实测景深，须写明判据与照明几何	§8.8；图 A5
TEL-05	8.9.8	各远心型号的全场 $\theta_{\max}$ 与每毫米 WD 的 $\Delta\beta/\beta$ ；以及在 $\text{WD}_{\text{nom}} \pm 1 \text{ mm}$ 处重复测量	§8.9；图 A6；TR-003
PAR-06	8.11.9	各电动型号全变倍范围内的齐焦误差，以及标准调整后的残差	§8.11；图 A7；TR-006
REP-04	8.12.7	各电动型号在三个预置位的光学重复性、背隙、稳定时间与 2 小时热漂移，并注明控制协议	§8.12；TR-002、TR-006
ILL-07	8.15.3	普密斯应用方案中推荐的"镜头 + 照明"组合，含照明的系统远心度 ($\mu\text{m} / \text{mm z}$)	§8.15

发布说明：本登记表每项一旦测得，除补入 TR-001 下一版外，还应以表格形式发布在对应的产品页上。**带测试条件的实测值，才是让本系列可被引用的资产；不带条件的彩页值不是。**

下载 PDF 版，或在你自己的台架上复现这些方法

全文另以固定文件名的 PDF 发布，便于保存、转发与长期引用而不受 URL 变更影响。

下载 TR-001 (PDF, v1.0)

提出计量问题