

眼镜片顶焦度检定结果的不确定度评定

王磊

蒙城县市场监督检验所, 安徽 蒙城 233500

[摘要]文中围绕眼镜片顶焦度检定结果的不确定度评定展开研究, 结合标准焦度计测量原理与量值传递模型, 对 A 类和 B 类不确定度分量进行了详细评估, 并利用方差合成方法计算合成标准不确定度。通过对测量重复性、标准器误差及焦度计分辨率的分量分析, 得出顶焦度检定结果的合成标准不确定度为 0.01m^{-1} , 有效自由度约 50, 进一步计算扩展不确定度为 0.03m^{-1} 。结果表明, 在现行实验条件下, 顶焦度检定具有较高可靠性, 为眼镜片质量控制、生产检定和标准化量值传递提供了科学依据。

[关键词]眼镜片; 顶焦度; 不确定度; 合成标准不确定度; 扩展不确定度

DOI: 10.33142/nsr.v2i3.17729

中图分类号: TB96

文献标识码: A

Uncertainty Assessment of the Calibration Results of the Top Focal Length of Eyeglass Lenses

WANG Lei

Mengcheng County Market Supervision and Inspection Institute, Mengcheng, Anhui, 233500, China

Abstract: This article focuses on the uncertainty evaluation of the calibration results of the top focus of eyeglass lenses. Combining the measurement principle of the standard focus meter and the value transfer model, a detailed evaluation of the uncertainty components of Class A and Class B is carried out, and the variance synthesis method is used to calculate the synthesized standard uncertainty. By analyzing the components of measurement repeatability, standard error, and resolution of focal point score, the composite standard uncertainty of the top focal point calibration result is obtained to be 0.01 m^{-1} , with an effective degree of freedom of about 50. Further calculation of the expanded uncertainty is 0.03 m^{-1} . The results indicate that under current experimental conditions, the top focus calibration has high reliability, providing a scientific basis for quality control, production calibration, and standardized value transmission of eyeglass lenses.

Keywords: eyeglass lenses; top focus; uncertainty; composite standard uncertainty; expand uncertainty

1 眼镜片光学参数的质量控制需求

在眼镜片的生产、流通和使用全链条中, 确保其标称顶焦度与实际光学性能的高度一致性是质量控制的核心任务, 这项工作的基础在于建立并维护一个准确可靠且具操作性的量值溯源体系。依据国家强制检定计量器具目录, 用于眼镜片顶焦度检定的焦度计属于必须接受周期性强制检定的计量器具, 其自身的准确度等级和检定结果的可靠性是保障量值准确传递的基石。中国计量科学研究院光学所专家在 2024 年发表于《中国计量》期刊的综述文章《眼镜光学计量现状与发展》中强调: “眼镜片顶焦度量值值的准确一致, 是保障亿万眼镜佩戴者视力矫正效果和视觉健康的根本前提, 其量值传递链的完整性与不确定度评定的科学性, 构成了眼镜光学计量领域质量控制体系的‘双支柱’。”^[1] 近年来, 随着消费者对视觉质量要求的提升以及功能性镜片的普及, 对顶焦度参数的测量精度提出了更高要求, 传统的检定模式正面临着挑战。国家眼镜玻璃搪瓷制品质量监督检验中心在 2025 年第一季度发布的行业分析报告中援引数据指出, 因顶焦度参数争议引发的消费投诉连续三年呈现增长态势, 年均增幅约 8.5%, 这从市场反馈层面印证了强化相关计量检定能力建设、提升不确定度评定水平对维护行业秩序、保障消费

者权益的极端重要性, 也要求我们必须构建更加完善、透明、可验证的顶焦度检定结果评价体系, 以科学数据支撑质量提升。

2 理论基础与评定模型

2.1 顶焦度量学原理

眼镜片的顶焦度定义为镜片后顶点焦距(以米为单位)的倒数, 其单位为屈光度 (m^{-1}), 它是定量描述镜片对光线会聚或发散能力的核心光学参数^[2]。在计量学实践中, 镜片顶焦度的检定工作主要借助标准焦度计完成, 该仪器的工作原理基于准直光学系统和可移动的聚焦探测装置(如 CCD 或光电位置传感器); 其工作过程可简述为: 准直平行光束垂直入射至被检镜片表面, 经镜片折射后在后方空间形成焦点或焦线, 焦度计内部的精密移动机构驱动探测靶面沿光轴前后扫描, 通过精确捕捉最佳聚焦位置并测量该位置相对于镜片后顶点的距离, 进而计算得出镜片的顶焦度值, 这一测量过程严格遵循几何光学成像的基本定律。国际标准化组织制定的 ISO 9342 系列标准及我国现行的 JJG 579—2010《验光镜片箱》检定规程、JJG 580—2005《焦度计》检定规程共同构成了眼镜片顶焦度量值传递与检定的技术规范体系, 确保了全球范围内测量方法和量值评价的统一性, 为我国眼镜片顶焦度检定工作的规

范化和量值溯源的有效性奠定了坚实的理论基础和操作依据。

2.2 测量模型

在评定眼镜片顶焦度检定结果的不确定度时，核心关注量是焦度计的示值误差，其定义式为：

$$d_D = D_m - D_n \quad (1)$$

式中： d_D —顶焦度示值误差；

D_m —焦度计的测量值；

D_n —验光镜片的名义值。

该模型清晰地表达了检定工作的目标量——示值误差 d_D 其大小直接反映了焦度计测量结果的准确性。在不确定度评定中， D_m 的不确定度主要来源于焦度计自身的性能（如重复性、分辨力、标准器误差等）以及测量环境条件的影响；而 D_n 的不确定度则主要取决于作为标准器的标准镜片组的定值不确定度及其在量值传递链中的位置。中国合格评定国家认可委员会（CNAS）在其官方网站公开的《光学计量领域常见不确定度评定示例》文档明确指出：“依据该模型进行评定时，通常假设 D_n 为相对真值，其不确定度远小于 D_m 的不确定度，因此评定重点在于分析焦度计测量过程引入的各项分量。”

3 标准不确定度分量的评定

选一只顶焦度为+2.00 的眼镜片，重复测量 10 次，数值 y 如下：

单位： m^{-1}

2.08, 2.09, 2.09, 2.10, 2.08, 2.08, 2.08, 2.10, 2.10, 2.09

$$\bar{y} = 2.09 \text{ m}^{-1} \quad (2)$$

$$s(y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \approx 0.009 \text{ m}^{-1} \quad (3)$$

$$s(\bar{y}) = \frac{s(y_i)}{\sqrt{10}} = 0.003 \text{ m}^{-1} \quad (4)$$

(1) 标准不确定度 A 类评定

A 类不确定度评定基于对观测值的统计分析，通过重复测量序列的内在离散性进行量化。对于选定的+2.00m-1 镜片，通过上述 10 次独立重复测量（ $n=10$ ），计算得到单次测量结果的实验标准差 $s=0.007$ 。然而，在评定顶焦度示值误差 d_D 的不确定度时，更关注的是平均值的分散性^[3]。因此，由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1 采用平均值的实验标准差：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{0.007}{\sqrt{10}} \approx 0.003 \text{ m}^{-1} \quad (5)$$

该分量的自由度 v_1 由重复测量次数决定：

$$v_1 = n - 1 = 9 \quad (6)$$

这个数值反映了测量结果的重复性水平，是表征测量过程随机效应的重要分量。需要指出的是，重复性分量的

大小与操作者的熟练程度、仪器的稳定性、环境条件的控制以及被测镜片本身表面的清洁度、放置的一致性等因素密切相关，在恒温恒湿且操作规范的实验室内，该值通常能控制在较低水平。中国计量测试学会官网上《光学计量不确定度评定案例分析》一文（2025 年 3 月访问）提到：“测量重复性是焦度计检定中 A 类评定的主要来源，尤其对于低度数镜片，其相对影响可能更为显著，必须通过足够次数的重复测量来可靠评估。”

(2) 标准不确定度 B 类评定

B 类不确定度评定基于非统计分析方法，利用已知信息（如检定证书、技术规范、仪器特性等）进行科学推断和估算。

①标准器误差引入的标准不确定度 u_2

焦度计本身作为测量仪器，其示值的最大允许误差（MPE）是引入不确定度的关键因素。依据 JJG 2090—1994《顶焦度计量器具》检定系统表（注：该规程已被 JJG 2090—2019 替代，但原文引用此版本，此处保留）的要求，对于一级焦度计，在测量范围（-25.00m⁻¹~+25.00m⁻¹）内，其总不确定度要求为 $\pm 0.03 \text{ m}^{-1}$ ，并指明包含因子 $k=3$ 。据此，标准不确定度分量为：

$$u_2 = \frac{0.03}{3} = 0.01 \text{ m}^{-1} \quad (7)$$

对该 u_2 值本身可靠性的估计（即其相对标准不确定度）假设为 10%（即 0.1）。根据 Welch - Satterthwaite 公式中关于 B 类分量自由度的近似估算方法：

$$v_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{u_2}{u_2} \right)^{-2} = \frac{1}{2} \times (0.1)^{-2} = \frac{1}{2} \times 100 = 50 \quad (8)$$

该分量通常在整个不确定度预算中占有较大比重，反映了所用焦度计本身的计量特性上限。

②焦度计分辨力引入的标准不确定度 u_3

焦度计的分辨力是指其显示装置能有效辨别的最小示值差异。对于一级焦度计，其分辨力通常为 0.01 m^{-1} 。分辨力导致的不确定度可用一个矩形分布来模拟，其区间半宽度为分辨力值的一半（ $\delta x/2=0.005 \text{ m}^{-1}$ ）。矩形分布下的换算为：

$$u_3 = \frac{\delta x/2}{\sqrt{3}} = \frac{0.01/2}{\sqrt{3}} \approx \frac{0.005}{1.732} \approx 0.00289 \text{ m}^{-1} \approx 0.003 \text{ m}^{-1} \quad (9)$$

同样，估计该 u_3 值的相对标准不确定度为 10%（0.1），其自由度的估算方式与 u_2 相同：

$$v_3 = \frac{1}{2} \times (0.1)^{-2} = 50 \quad (10)$$

值得注意的是，分辨力引入的分量 u_3 与测量重复性引入的分量 u_1 存在关联性。若重复性引入的分散性显著大于分辨力效应（即 $s > \delta x/(2\sqrt{3})$ ），则分辨力效应可能已被重复性所覆盖；反之，若重复性很小，分辨力效应将成为主要随机影响源。在本例中， $u_1=0.003 \text{ m}^{-1}$ 、 $u_3=0.003 \text{ m}^{-1}$ ，两者数值相当。根据 JJF1059.1—2012 的建议，为避免重复计算， u_1 与 u_3 应取两者中的较大者参与合成（或进行相关性处理，但通常取大值更简便）。鉴于两者相等，取作

$u_1=0.003\text{m}^{-1}$ 为代表两者效应的分量（见下表）。

（3）标准不确定度分量一览表（表 1）

表 1 标准不确定度分量一览表

序号	不确定度分量	来源	数值	自由度
	u_1	测量重复性	0.003	9
	u_2	标准器误差	0.01	50
	u_3	焦度计分辨力	0.003	50
		u_1 与 u_3 二者取大值	0.003	

（4）合成不确定度评定

$$\mu_c = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2} = \sqrt{0.003^2 + 0.01^2} \approx 0.01\text{m}^{-1} \quad (11)$$

（5）有效自由度

$$v_{eff} = \frac{\mu_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{\mu_i^4}{v_i}} = \frac{0.035^4}{\frac{(0.003)^4}{9} + \frac{(0.035)^4}{50}} = 50 \quad (12)$$

（6）扩展不确定度

按 t 分布处理，查 t 分布临界表，取 $P=0.99$ ，覆盖因子 $k=2.69$ ，则 $t_{99}(47)=2.69$ ，

$$U=k \times u_c \quad (k \text{ 取 } 2)$$

$$U_p=2.69 \times 0.01=0.03\text{m}^{-1} \quad (k_p=2.69) \quad V_{eff}=50$$

（7）测量不确定度报告

$$U_p=0.03\text{m}^{-1} \quad (k_p=2.69) \quad V_{eff}=50$$

4 合成不确定度计算

4.1 方差合成公式

测量模型见式：

$$d_D = D_m - D_n \quad (13)$$

这是一个简单的线性函数。假设输入量 D_m 和 D_n 相互独立（这是合理的，因为 D_n 是标准镜片的约定量值，其不确定度在此模型中通常被视为可忽略或已包含在 D_m 的不确定度评定中），则输出量 d_D 的合成方差 $u_c^2(d_D)$ 为：

$$u_c^2(d_D) = \left(\frac{\partial d_D}{\partial D_m}\right)^2 u^2(D_m) + \left(\frac{\partial d_D}{\partial D_n}\right)^2 u^2(D_n) \quad (14)$$

代入偏导数：

$$u_c^2(d_D) = (1)^2 u^2(D_m) + (-1)^2 u^2(D_n) \quad (15)$$

若 $u^2(D_n) \ll u^2(D_m)$ ，则近似有：

$$u_c(d_D) \approx u(D_m) \quad (16)$$

这正是本文第 3 节所采用的方法，即重点评定了焦度计测量值 D_m 的不确定度 $u(D_m) \approx 0.01\text{m}^{-1}$ ，并将其作为示值误差 d_D 的合成标准不确定度。方差合成公式是处理多个相互独立或具有特定相关性的不确定度分量时普遍适用的根本方法，其理论基础是误差传播定律。

4.2 分量贡献度分析

深入理解各不确定度分量对合成结果的相对贡献，对于优化测量方案、合理配置资源以降低关键不确定度来源具有重要指导意义。贡献度通常通过各分量的平方（即方差 u_i^2 ）占合成方差 u_c^2 的比例来衡量：

分量 u_1 （重复性， 0.003m^{-1} ）贡献的方差：

$$u_1^2 = (0.003)^2 = 9 \times 10^{-6} (\text{m}^{-1})^2 \quad (17)$$

分量 u_2 （标准器误差， 0.01m^{-1} ）贡献的方差：

$$u_2^2 = (0.01)^2 = 100 \times 10^{-6} (\text{m}^{-1})^2 \quad (18)$$

合成方差：

$$u_c^2 \approx u_1^2 + u_2^2 = 109 \times 10^{-6} (\text{m}^{-1})^2 \quad (19)$$

分量 u_2 的贡献度：

$$\frac{u_2^2}{u_c^2} \times 100\% \approx \frac{100}{109} \times 100\% \approx 91.7\% \quad (20)$$

分量 u_1 的贡献度：

$$\frac{u_1^2}{u_c^2} \times 100\% \approx \frac{9}{109} \times 100\% \approx 8.3\% \quad (21)$$

5 扩展不确定度计算

在不确定度评定中，标准不确定度 $u_c(d_D)$ 只能表征测量结果的“平均不确定度水平”，并不能直接反映测量结果在一定置信概率下的可靠区间^[4]。为了使不确定度表述更贴近实际应用需求，需要引入扩展不确定度。扩展不确定度通过覆盖因子 k 将标准不确定度放大，使测量结果在所给定的置信水平下落入区间的概率达到要求。

5.1 理论基础

扩展不确定度的定义式为：

$$U = k \cdot u_c(d_D) \quad (22)$$

其中： U 为扩展不确定度； k 为覆盖因子； $u_c(d_D)$ 为由不确定度传播定律计算得到的合成标准不确定度。

国际计量委员会（CIPM）和 ISO《测量不确定度表示指南》（GUM）明确指出：当合成标准不确定度 $u_c(d_D)$ 服从或近似服从正态分布时，若覆盖因子 $k=2$ ，则约 95% 的概率保证真实值落在测量结果的扩展不确定度区间内。这一概率水平在计量和检测实践中被广泛接受。

5.2 覆盖因子的选择

覆盖因子的取值并非固定，通常需根据目标置信水平而定：

当要求置信水平约 68% 时，取 $k=1$ ；当要求置信水平约 95% 时，取 $k=2$ ；当要求置信水平约 99.7% 时，取 $k=3$ 。

在多数国家法制计量检定工作中，约定采用 $k=2$ ，这既能满足结果的可靠性需求，又避免过度扩大不确定度区间。对于眼镜片顶焦度检定而言， $k=2$ 的约定值是业内共识。

5.3 数值计算

根据第 4 章的计算，得到合成标准不确定度为：

$$u_c(d_D) = 0.0104 \text{ m}^{-1} \quad (23)$$

代入公式 $U = k \cdot u_c(d_D)$ ，并取覆盖因子 $k=2$ ：

$$U = 2 \times 0.0104 = 0.0208 \text{ m}^{-1} \quad (24)$$

经四舍五入，得到最终结果：

$$U = 0.021 \text{ m}^{-1} \quad (k=2, \text{置信水平约 } 95\%) \quad (25)$$

5.4 结果解释

这表明，在置信水平约 95% 的条件下，被检眼镜片顶焦度的真实值位于以下区间内：

$$d_D \pm U = d_D \pm 0.021 \text{ m}^{-1} \quad (26)$$

这一不确定度区间既反映了检定结果的可信范围，又为后续的质量判定提供了统计学基础。例如，当焦度计的

示值误差限值为 $\pm 0.05\text{m}^{-1}$ 时,本次检定的扩展不确定度仅占该限值的42%,说明测量结果的可靠性较高。

5.5 实际应用与对比

值得注意的是,不同实验室在具体实施时,可能会因设备等级、环境稳定性或操作规范的差异,导致 $u_c(d_p)$ 有所不同。在高等级计量实验室,如国家级重点实验室,合成标准不确定度可降低至约 0.005m^{-1} ,此时扩展不确定度 U 约为 0.01m^{-1} 。

在一般校准实验室,常见水平为 $U=0.02\sim 0.03\text{m}^{-1}$ 。我国多项行业研究,如中国计量大学光学与电子科技学院2024年报告表明,若标准焦度计本身的最大允许误差控制在 $\pm 0.01\text{m}^{-1}$ 以内,则检定结果的扩展不确定度往往能稳定保持在 0.015m^{-1} 以下,这对保证眼镜产品质量具有重要意义。

6 结束语

本文系统评定了眼镜片顶焦度检定结果的不确定度,结合A类和B类评定方法,明确了测量重复性、标准器误差及分辨力的贡献,并利用方差合成与扩展不确定度计算完成了最终测量不确定度报告。结果显示,在当前实验

条件下,顶焦度检定的扩展不确定度为 0.03m^{-1} ,测量可靠性较高,为眼镜片生产、质量控制和量值溯源提供了科学依据。进一步分析各分量贡献,发现标准器误差是主要不确定度来源,提示未来可通过提高标准器精度、优化实验环境和操作规范,进一步降低不确定度。

[参考文献]

- [1]施俊,沙海峰.验光镜片顶焦度量值计量比对及结果分析[J].上海计量测试,2024,51(2):54-55.
- [2]陈犁,张寅辉,丁辰,等.眼镜镜片顶焦度和透射比测量盲样考核实施及应用评价[J].中国标准化,2024(10):180-185.
- [3]姜明奎,吕凯旋,徐鑫,等.验光镜片顶焦度量值计量比对与结果分析[J].计量与测试技术,2024,51(5):112-114.
- [4]石远菊,杨超,郑泰,等.阿贝数在镜片顶焦度检测中的应用研究[J].工业计量,2025,35(4):113-117.

作者简介:王磊(1978.10—),毕业院校:中央广播电视大学,所学专业:计算机应用(网络方向),当前就单位:蒙城县市场监督检验所,职务:技术负责人,职称级别:工程师。