



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

角膜地形图仪计量标准器校准规范

Calibration Specification of Standard Device for Corneal
Topographers

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

角膜地形图仪计量 标准器校准规范

JJF XXXX-XXXX

Calibration Specification of Standard

Device for Corneal Topographers

归口单位：全国医学计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：中国科学院苏州生物医学工程技术研究所

本规范委托全国医学计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

洪宝玉（中国计量科学研究院）

薛瑞丹（中国计量科学研究院）

高明亮（中国计量科学研究院）

参加起草人：

史国华（中国科学院苏州生物医学工程技术研究所）

目 录

引 言	II
1 范围	1
2 引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 概述	2
5 计量特性.....	3
5.1 球面面形标准器曲率半径.....	3
5.2 球面面形标准器面形误差.....	3
5.3 环曲面标准器主子午线曲率半径.....	3
5.4 环曲面标准器轴位.....	3
6 校准条件.....	3
6.1 环境条件.....	3
6.2 测量标准及其他设备.....	3
7 校准项目和校准方法.....	3
7.1 外观检查.....	3
7.2 球面面形标准器曲率半径.....	4
7.3 球面面形标准器面形误差.....	5
7.4 环曲面标准器主子午线曲率半径.....	5
7.5 环曲面标准器轴位.....	6
8 校准结果的表达.....	6
9 复校时间间隔.....	7
附录 A 校准原始记录（推荐）格式样式	8
附录 B 校准证书内页（推荐）格式样式	10
附录 C 球面面形标准器曲率半径实测值不确定度评定示例	12
附录 D 环曲面标准器轴位实测值不确定度评定示例	16

引 言

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》和JJF 1059.1《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本校准规范制定工作的基础性系列文件。

本规范参考了JJF 1865-2020《角膜地形图仪校准规范》、JJG 1088-2019《角膜曲率计用计量标准器》和ISO 19980-2021《眼科仪器 角膜地形图仪》(Ophthalmic instruments - Corneal Topographers)。

本规范为首次发布。

角膜地形图仪计量标准器校准规范

1 范围

本规范适用于角膜地形图仪计量标准器的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 1011-2018 角膜曲率计

JJG 1088-2019 角膜曲率计用计量标准器

JJF 1865-2020 角膜地形图仪校准规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和定义

JJG 1088-2019、JJF 1865-2020 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 角膜地形图仪 corneal topographer

采用非接触的方式，测量角膜表面形态的仪器或系统，可简称为“CT”。

注：采用视频摄像系统和视频图像处理系统分析发光目标照射到角膜表面后反射图像的角膜地形图仪也被称作视频角膜地形图仪。

[来源：JJF 1865-2020，3.5]

3.2 角膜曲率常数 keratometric constant

用来将角膜曲率由毫米的倒数（ mm^{-1} ）换算为角膜屈光度（ m^{-1} ）的常数，为337.5。

[来源：JJF 1865-2020，3.11]

3.3 角膜屈光度 keratometric diopters

以毫米的倒数（ mm^{-1} ）表示的曲率乘以角膜曲率常数337.5后计算得到的数值。

[来源：JJF 1865-2020，3.12]

3.4 模拟角膜曲率计读数 simulated keratometry reading (Sim K)

模拟角膜曲率计（见JJG 1011-2018）功能，给出中心区域的角膜屈光度和散光轴位。

注 1：角膜曲率计的设计假定了角膜表面为球面或环曲面，最陡处（最大曲率）的子午

线与最平坦处（最小曲率）的子午线相互正交。

注 2：本规范中，最平坦处的子午线与水平面的夹角为散光轴位方向。

[来源：JJF 1865-2020, 3.21]

3.5 角膜地形图仪计量标准器 standard devices for corneal topographers

用于校准角膜地形图仪的曲率半径、角膜屈光度和模拟角膜曲率计读数（Sim K）轴位示值的计量标准器，由球面面形标准器和环曲面标准器组成。

3.6 球面面形标准器 spherical surface standard devices

光学前表面为凸球面的计量标准器，主要用于角膜地形图仪曲率半径/角膜屈光度测量标准差的校准。

3.7 环曲面标准器 toric surface standard devices

光学前表面为环曲面的计量标准器，用于角膜地形图仪模拟角膜曲率计读数（Sim K）轴位示值误差的校准。

3.8 面形偏差 surface form deviation

被测光学表面相对于参考光学表面的偏差。

注 1：在用样板检测的圆形检验范围内，面形偏差是通过垂直位置所观察到的干涉条纹（通称光圈）的数目、形状、变化和颜色来确定。

注 2：当被测光学表面相对于参考光学表面中间接触时，光圈数规定为正（高光圈，又称凸光圈）；当被测光学表面相对于参考光学表面边缘接触时，光圈数规定为负（低光圈，又称凹光圈）。

[来源：JJG 1088-2019, 3.4]

3.9 面形误差 surface error

被测表面相对于精确描述参考面的偏差。

4 概述

角膜地形图仪计量标准器是校准角膜地形图仪的专用计量标准器具，由球面面形标准器和环曲面标准器组成。

球面面形标准器主要用于校准角膜地形图仪曲率半径/角膜屈光度的测量标准差，由三种曲率半径规格组成。其光学前表面为凸球面，曲率半径 R 标称值分别为 6.45 mm、7.95 mm、9.45 mm。根据应用需要，球面面形标准器对应的角膜屈光度 D 可由曲率半径 R （以 mm 为单位）换算： $D=337.5/R$ 。

环曲面标准器主要用于角膜地形图仪模拟角膜曲率计读数（Sim K）轴位示值误差的校准。其轴位标称值分别为：0°/180°、45°、90° 和 135°。

5 计量特性

5.1 球面面形标准器曲率半径

曲率半径的实测值与标称值之差不超过 ± 0.05 mm，不确定度不大于： $U=0.002$ mm ($k=2$)。

5.2 球面面形标准器面形误差

面形误差不超过 ± 1 μ m。

5.3 环曲面标准器主子午线曲率半径

$R_1=8.00$ mm ± 0.2 mm, $R_2 < R_1$, 且 $R_1-R_2=0.4$ mm ± 0.07 mm。

5.4 环曲面标准器轴位

轴位的实测值与标称值之差不超过 $\pm 3^\circ$ ，不确定度不大于： $U=1^\circ$ ($k=2$)。

注：以上所有指标不用于合格性判别，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ 。

6.1.2 相对湿度： $< 85\%$ 。

6.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 1。

表 1 测量标准及其他设备

设备名称		技术要求
测量标准	标准球	曲率半径标称值分别为 6.45 mm、7.95 mm、9.45 mm，曲率半径实测值不确定度： $U=0.5$ μ m ($k=2$)
	角膜曲率计工作基准测量装置	曲率半径测量范围： $(5.5\sim 10.0)$ mm，不确定度： $U=0.01$ mm ($k=2$)；轴位测量范围： $0^\circ\sim 180^\circ$ ，不确定度： $U=0.7^\circ$ ($k=2$)
其他设备	凹球面样板	与标准球配套使用
	卡尺	测量范围： $(0\sim 125)$ mm，分辨力优于 0.1 mm

7 校准项目和校准方法

校准前，将被校角膜地形图仪计量标准器和主要校准设备在校准环境条件下平衡温度至少 24 小时。

7.1 外观检查

7.1.1 角膜地形图仪计量标准器的组成应齐全，光学件表面应无霉斑、划痕、麻

点、气泡、磨损和破损等缺陷。

7.1.2 角膜地形图仪计量标准器应具有编号。球面面形标准器应标明曲率半径标称值信息，环曲面标准器应标明轴位标称值信息。

7.1.3 采用卡尺测量各个标准器光学件的外围尺寸，有效光学区域应大于 $\Phi 10$ mm 范围。

7.2 球面面形标准器曲率半径

取出标称值为 6.45 mm 的标准球、凹球面样板和被校球面面形标准器，分别对其表面进行清洁。

注：可使用镜头纸或脱脂棉蘸取酒精乙醚的混合液对光学件表面进行清洁。

首先让标准球与凹球面样板接触发生干涉，通过垂直位置观察两者所形成的干涉条纹（光圈），根据干涉条纹（光圈）的数目、形状、变化和颜色测量两者之间的面形偏差所对应的光圈数。重复测量 3 次，分别记为 N_{s1} 、 N_{s2} 和 N_{s3} ，取平均值，记为 $\bar{N}_s$ 。

然后让凹球面样板与被校球面面形标准器接触发生干涉，通过垂直位置观察两者所形成的干涉条纹（光圈），根据干涉条纹（光圈）的数目、形状、变化和颜色测量两者之间的面形偏差所对应的光圈数。重复测量 3 次，分别记为 N_{m1} 、 N_{m2} 和 N_{m3} ，取平均值，记为 $\bar{N}_m$ 。

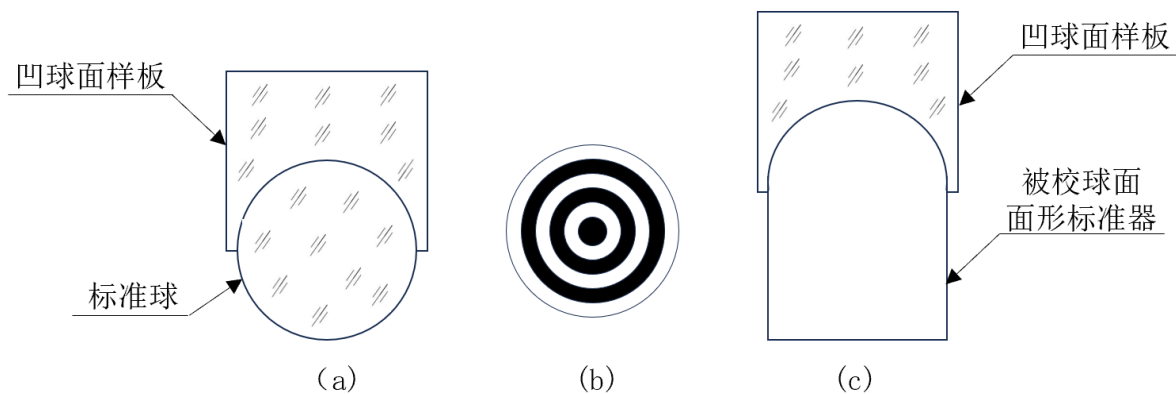


图 1 干涉条纹（光圈）测量示意图

按照公式（1）计算被校球面面形标准器的曲率半径实测值，并参考附录 C 评定相应不确定度：

$$R_m = R_s + \left[\frac{1}{2} - \frac{a^2}{2(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})^2} \right] \cdot (\bar{N}_m - \bar{N}_s) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

式中：

R_m —被校球面面形标准器的曲率半径实测值，mm；

R_s —标准球的曲率半径标准值，mm；

a —有效光学检测区域所对应弦长的一半，mm；

$\bar{N}_m$ —被校球面面形标准器与凹球面样板之间的光圈数；

$\bar{N}_s$ —标准球与凹球面样板之间的光圈数；

λ —测量时所使用观察光的波长，取 $\lambda=0.0005461$ mm。

按照上述校准方法，依次对标称值为7.95 mm和9.45 mm的球面面形标准器的曲率半径进行校准。

根据应用需要，球面面形标准器对应的角膜屈光度值可用337.5除以曲率半径实测值（以mm为单位）换算。

7.3 球面面形标准器面形误差

根据 7.2 测得的被校球面面形标准器与凹球面样板之间的三次光圈数 N_{m1} 、 N_{m2} 、 N_{m3} 和平均值 $\bar{N}_m$ ，以及标准球与凹球面样板之间的三次光圈数 N_{s1} 、 N_{s2} 、 N_{s3} 和平均值 $\bar{N}_s$ ，分别计算三次测量值与平均值的最大偏差 $|\Delta N_{mmax}|$ 和 $|\Delta N_{smax}|$ 。同时单次测量时光圈数的判读误差不超过 ± 1 个光圈，因此被校球面面形标准器相对于曲率半径为 R_m 的参考球面的最大偏差，即面形误差（绝对值）的最大值，按照公式（2）计算：

$$\Delta h = \frac{\lambda}{2} (|\Delta N_{mmax}| + |\Delta N_{smax}| + 2) \quad (2)$$

式中：

Δh —被校球面面形标准器相对于曲率半径为 R_m 的参考球面的最大偏差， μm ；

$|\Delta N_{mmax}|$ —被校球面面形标准器与凹球面样板之间的光圈数三次测量值与平均值的最大偏差；

$|\Delta N_{smax}|$ —标准球与凹球面样板之间的光圈数三次测量值与平均值的最大偏差；

λ —面形测量时所使用观察光的波长，取 $\lambda=0.5461$ μm 。

按照上述方法，依次对标称值6.45 mm、7.95 mm和9.45 mm的三个球面面形标准器的面形误差（绝对值）最大值进行计算，因此球面面形标准器的面形误差即不超过 $\pm \Delta h$ 。

7.4 环曲面标准器主子午线曲率半径

首先将环曲面标准器标有 $0^\circ/180^\circ$ 的基面与专用测量支架的支座紧靠在一起，然后安装在角膜曲率计工作基准测量装置的下颚托架上，调整使环曲面标准器的

反射光斑清晰地成像在显示屏的中心，按动测量按钮，对环曲面标准器的两个主子午线曲率半径进行测量，重复测量 4 次，分别计算两个主子午线曲率半径测量值的平均值，加上对应修正值，即为环曲面标准器两个主子午线曲率半径实测值。

7.5 环曲面标准器轴位

按照 7.4 测量环曲面标准器主子午线曲率半径的同时，测量 $0^{\circ}/180^{\circ}$ 方位的轴位，测量 4 次并记录读数；然后调整环曲面标准器，依次使其标有 45° 、 90° 和 135° 的基面分别与专用测量支架的支座紧靠在一起，按照 7.4 的调整方法进行测量，每个轴位重复测量 4 次并记录读数。分别计算 $0^{\circ}/180^{\circ}$ 、 45° 、 90° 和 135° 四个方位的轴位测量值平均值，加上对应修正值，即为环曲面标准器的轴位实测值，并参考附录 D 评定相应不确定度。

8 校准结果的表达

8.1 校准结果记录

校准结果记录推荐格式参见附录 A。

8.2 校准结果的处理

校准证书内页推荐格式参见附录 B，校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- d) 校准证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；
- f) 被校仪器的描述和明确标识（如型号、产品编号等）；
- g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的可接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；
- i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- m) 对校准规范的偏离的说明；

- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

仪器的复校时间间隔建议不超过 1 年。

由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸多因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。如果对仪器的检测数据有怀疑或仪器更换主要部件及修理后应对仪器重新校准。

附录 A

校准原始记录（推荐）格式样式

证书单位				证书编号				温 度	℃				
单位地址				校准地点				相对湿度	%				
型号/规格				仪器编号									
生产厂商				校准依据									
校准使用的计量基（标）准装置（含标准物质）或设备													
名称		测量范围		不确定/准确度等级		证书编号		证书有效期					
1、通用技术要求： （1）外观：_____ （2）有效光学区域：_____													
2、球面面形标准器曲率半径/角膜屈光度													
标准器 标称值	被校标准器与凹球面样板之 间的光圈数				标准球与凹球面样板之间的 光圈数				弦长 /mm	曲率半径/mm		角膜屈光度/m ⁻¹	
	N_{m1}	N_{m2}	N_{m3}	$\bar{N}_m$	N_{s1}	N_{s2}	N_{s3}	$\bar{N}_s$		实测值	不确定度	实测值	不确定度
6.45 mm (52.32 m ⁻¹)													
7.95 mm (42.45 m ⁻¹)													
9.45 mm (35.72m ⁻¹)													

3、球面面形标准器面形误差

标准器 标称值	被校标准器与凹球面样板三 次光圈数测量值与平均值的 最大偏差	标准球与凹球面样板三次光 圈数测量值与平均值的 最 大偏差	面形误差（绝对值） 最大值 $\Delta h/\mu\text{m}$	球面面形标准器的面 形误差/ μm
6.45 mm (52.32 m^{-1})				
7.95 mm (42.45 m^{-1})				
9.45 mm (35.72 m^{-1})				

4、环曲面标准器主子午面曲率半径

标称值/mm	测量值/mm				平均值/mm	实测值/mm	不确定度/mm
	1	2	3	4			
$R_1=8.0$							
$R_2=7.6$							

5、环曲面标准器轴位

标称值/ $^\circ$	测量值/ $^\circ$				平均值/ $^\circ$	实测值/ $^\circ$	不确定度/ $^\circ$
	1	2	3	4			
0/180							
45							
90							
135							

校 准 员		核 验 员	
校准日期	_____ 年 _____ 月 _____ 日	接收日期	_____ 年 _____ 月 _____ 日

B.2 校准证书第3页

证书编号: XXXXXXXX-XXXX

校 准 结 果

1、通用技术要求:

(1) 外观: _____

(2) 有效光学区域: _____。

2、球面面形标准器曲率半径/角膜屈光度和面形误差:

标称值	曲率半径 (mm)		角膜屈光度 (m^{-1})		面形误差 (μm)
	实测值	不确定度	实测值	不确定度	
6.45 mm (52.32 m^{-1})					
7.95 mm (42.45 m^{-1})					
9.45 mm (35.72 m^{-1})					

3、环曲面标准器主子午面曲率半径:

标称值 (mm)	实测值 (mm)	不确定度 (mm)
$R_1=8.0$		
$R_2=7.6$		

4、环曲面标准器轴位:

轴位标称值 ($^{\circ}$)	实测值 ($^{\circ}$)	不确定度 ($^{\circ}$)
0/180		
45		
90		
135		

-----以下空白-----

校 准 员:

核 验 员:

第 页 共 页

附录 C

球面面形标准器曲率半径实测值不确定度评定示例

依据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的要求，对球面面形标准器曲率半径实测值的测量不确定度进行评定。示例中，以标称值为7.95 mm的球面面形标准器为例，相关参数为：标准球曲率半径标准值为 $R_s=7.9493$ mm，被校球面面形标准器与凹球面样板的光圈数为 $\bar{N}_m = 1.0$ ，标准球与凹球面样板的光圈数为 $\bar{N}_s = -0.5$ ，有效光学检测区域所对应弦长为 $2a=10$ mm。

C.1 测量模型

建立测量模型，球面面形标准器曲率半径实测值的计算公式如下：

$$R_m = R_s + \left[\frac{1}{2} - \frac{a^2}{2(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})^2} \right] \cdot (\bar{N}_m - \bar{N}_s) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (C.1)$$

式中：

R_m —被校球面面形标准器的曲率半径实测值，mm；

R_s —标准球的曲率半径标准值，mm；

a —有效光学检测区域所对应弦长的一半，mm；

$\bar{N}_m$ —被校球面面形标准器与凹球面样板之间的光圈数；

$\bar{N}_s$ —标准球与凹球面样板之间的光圈数；

λ —测量时所使用观察光的波长，取 $\lambda=0.0005461$ mm。

C.2 合成标准不确定度计算公式

根据上述测量模型，计算各影响量的灵敏系数如下：

$$c_1 = \frac{\partial R_m}{\partial \bar{N}_m} = \left[\frac{1}{2} - \frac{a^2}{2(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})^2} \right] \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (C.2)$$

$$c_2 = \frac{\partial R_m}{\partial \bar{N}_s} = \left[\frac{a^2}{2(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})^2} - \frac{1}{2} \right] \cdot \frac{\lambda}{2} \quad (C.3)$$

$$c_3 = \frac{\partial R_m}{\partial R_s} = 1 - \frac{(\bar{N}_m - \bar{N}_s) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot a^2}{\sqrt{R_s^2 - a^2} \cdot (R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})^2} \quad (C.4)$$

$$c_4 = \frac{\partial R_m}{\partial a} = (\bar{N}_m - \bar{N}_s) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{a(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})\sqrt{R_s^2 - a^2} - a^3}{(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})^3 \sqrt{R_s^2 - a^2}} \quad (C.5)$$

各标准不确定度分量为：

$$u_1 = |c_1| \cdot u(\bar{N}_m) = \left| \frac{\partial R_m}{\partial \bar{N}_m} \right| \cdot u(\bar{N}_m) \quad (\text{C.6})$$

$$u_2 = |c_2| \cdot u(\bar{N}_s) = \left| \frac{\partial R_m}{\partial \bar{N}_s} \right| \cdot u(\bar{N}_s) \quad (\text{C.7})$$

$$u_3 = |c_3| \cdot u(R_s) = \left| \frac{\partial R_m}{\partial R_s} \right| \cdot u(R_s) \quad (\text{C.8})$$

$$u_4 = |c_4| \cdot u(a) = \left| \frac{\partial R_m}{\partial a} \right| \cdot u(a) \quad (\text{C.9})$$

u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 相互独立，因此合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \quad (\text{C.10})$$

C.3 标准不确定度分量评定

根据上述测量模型，球面面形标准器曲率半径实测值的不确定度来源主要包括以下几个方面：

C.3.1 球面面形标准器与凹球面样板光圈数测量重复性引入的标准不确定度 u_1

被校球面面形标准器与凹球面样板的光圈数，由操作人员在垂直方向观察球面面形标准器与凹球面样板所形成的干涉条纹，根据干涉条纹（光圈）的数目、形状、变化和颜色来确定被校球面面形标准器相对于凹球面样板的曲率半径偏差所对应的光圈数，该项不确定度主要来自于光圈数的测量重复性。标称值为7.95 mm的球面面形标准器与凹球面样板之间10次光圈数的测量结果如下，采用贝塞尔公式计算光圈数的测量重复性。

球面面形标准器与凹球面样板之间的 光圈数	1.0	0.5	1.5	1.5	0.5
	1.5	1.5	1.5	1.5	0.5
平均值 $\bar{N}_m$	1.15				
单次实验标准差 $s(\bar{N}_m)$	0.47				
*标准不确定度 $u(\bar{N}_m) = s(\bar{N}_m)/\sqrt{3}$	0.27				
*注：在实际校准中取3次测量平均值。					

将 $R_s = 7.9493 \text{ mm}$ ， $a = 5 \text{ mm}$ ， $\lambda = 0.0005461 \text{ mm}$ ，代入公式（C.2）计算灵敏系数 c_1 为：

$$c_1 = \frac{\partial R_m}{\partial \bar{N}_m} = \left[\frac{1}{2} - \frac{a^2}{2(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})^2} \right] \cdot \frac{\lambda}{2} = -0.00191 \text{ (mm)}$$

因此球面面形标准器与凹球面样板光圈数测量重复性引入的标准不确定度 u_1 为：

$$u_1 = |c_1| \cdot u(\bar{N}_m) = 0.00052 \text{ (mm)}$$

C.3.2 标准球与凹球面样板光圈数测量重复性引入的标准不确定度 u_2

标准球与凹球面样板之间10次光圈数的测量结果如下，采用贝塞尔公式计算光圈数的测量重复性。

球面面形标准器与凹球面样板之间的 光圈数	-0.5	-1.0	-0.5	-0.5	-1.0
	-1.0	-1.0	-1.0	-0.5	-0.5
平均值 $\bar{N}_s$	-0.75				
单次实验标准差 $s(\bar{N}_s)$	0.26				
*标准不确定度 $u(\bar{N}_s) = s(\bar{N}_s)/\sqrt{3}$	0.15				
*: 在实际校准中取3次测量平均值。					

将 $R_s = 7.9493 \text{ mm}$ ， $a = 5 \text{ mm}$ ， $\lambda = 0.0005461 \text{ mm}$ ，代入公式（C.3）计算灵敏系数 c_2 为：

$$c_2 = \frac{\partial R_m}{\partial \bar{N}_s} = \left[\frac{a^2}{2(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})^2} - \frac{1}{2} \right] \cdot \frac{\lambda}{2} = 0.00191 \text{ (mm)}$$

因此标准球与凹球面样板光圈数测量重复性引入的标准不确定度 u_2 为：

$$u_2 = |c_2| \cdot u(\bar{N}_s) = 0.00029 \text{ (mm)}$$

C.3.3 标准球曲率半径标准值引入的标准不确定度 u_3

该项不确定度主要来自标准球曲率半径标准值的测量不确定度。依据标准球的溯源证书 $U(R_s) = 0.0005 \text{ mm}$ （ $k=2$ ），因此 $u(R_s)$ 为：

$$u(R_s) = 0.00025 \text{ (mm)}$$

将 $R_s = 7.9493 \text{ mm}$ ， $a = 5 \text{ mm}$ ， $\lambda = 0.0005461 \text{ mm}$ ， $\bar{N}_m = 1.0$ ， $\bar{N}_s = -0.5$ ，代入公式（C.4）计算灵敏系数 c_3 ：

$$c_3 = \frac{\partial R_m}{\partial R_s} = 1 - \frac{(\bar{N}_m - \bar{N}_s) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot a^2}{\sqrt{R_s^2 - a^2} \cdot (R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2})^2} = 0.99947$$

因此标准球曲率半径标准值引入的标准不确定度 u_3 为：

$$u_3 = |c_3| \cdot u(R_s) = 0.00025 \text{ (mm)}$$

C.3.4 有效光学检测区域所对应弦长测量引入的标准不确定度 u_4

该项不确定度主要来自有效光学检测区域弦长的测量不确定度。有效光学检测区域所对应的弦长 $2a$ 采用数显卡尺进行测量，测量误差可以控制在 $\pm 1.0 \text{ mm}$

以内，因此按照均匀分布，弦长一半 a 的测量标准不确定度为：

$$u(a) = 0.29 \text{ (mm)}$$

将 $R_s = 7.9493 \text{ mm}$ ， $a = 5 \text{ mm}$ ， $\lambda = 0.0005461 \text{ mm}$ ， $\bar{N}_m = 1.0$ ， $\bar{N}_s = -0.5$ ，代入公式（C.5）计算灵敏系数 c_4 ：

$$c_4 = \frac{\partial R_m}{\partial a} = (\bar{N}_m - \bar{N}_s) \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{a \left(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2} \right) \sqrt{R_s^2 - a^2} - a^3}{\left(R_s - \sqrt{R_s^2 - a^2} \right)^3 \sqrt{R_s^2 - a^2}} = -0.00084$$

因此有效光学检测区域所对应弦长测量引入的标准不确定度 u_4 为：

$$u_4 = |c_4| \cdot u(a) = 0.00024 \text{ (mm)}$$

C.4 合成标准不确定度

以上各分量相互独立，因此球面面形标准器曲率半径实测值的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.00069 \text{ mm}$$

C.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则球面面形标准器曲率半径实测值的扩展不确定度：

$$U = 0.002 \text{ mm} \quad (k=2)$$

附录 D

环曲面标准器轴位实测值不确定度评定示例

依据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的要求，对环曲面标准器轴位实测值的测量不确定度进行评定。

D.1 测量模型

建立测量模型，环曲面标准器轴位实测值的计算公式：

$$A = \bar{A}_m + \delta A_0 \quad (\text{D.1})$$

式中：

A —环曲面标准器轴位实测值， $^{\circ}$ ；

$\bar{A}_m$ —轴位测量值的平均值， $^{\circ}$ ；

δA_0 —角膜曲率计工作基准测量装置在该点的修正值， $^{\circ}$ 。

D.2 合成标准不确定度计算公式

根据上述测量模型，计算各影响量的灵敏系数如下：

$$c_1 = \frac{\partial A}{\partial \bar{A}_m} = 1 \quad (\text{D.2})$$

$$c_2 = \frac{\partial A}{\partial \delta A_0} = 1 \quad (\text{D.2})$$

各标准不确定度分量为：

$$u_1 = |c_1| \cdot u(\bar{A}_m) = \left| \frac{\partial A}{\partial \bar{A}_m} \right| \cdot u(\bar{A}_m) = u(\bar{A}_m) \quad (\text{D.3})$$

$$u_2 = |c_2| \cdot u(\delta A_0) = \left| \frac{\partial A}{\partial \delta A_0} \right| \cdot u(\delta A_0) = u(\delta A_0) \quad (\text{D.4})$$

u_1 、 u_2 相互独立，因此合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (\text{D.5})$$

D.3 标准不确定度分量评定

根据上述测量模型，环曲面标准器轴位实测值的标准不确定度分量主要包括以下几个方面：

D.3.1 轴位测量值引入的标准不确定度 u_1

D.3.1.1 轴位测量重复性引入的标准不确定度 u_{11}

主要来自环曲面标准器在校准过程中的定位误差、人员操作误差、环境温度、湿度变化、电源电压不稳以及外界杂光对测量的干扰等。通过对被校环曲面标准

器在重复性测量条件下进行多次重复测量评定。以标称值为 180° 轴位点为例，用角膜曲率计工作基准测量装置对被校环曲面标准器在重复性测量条件下对该点进行 10 次测量，利用贝塞尔公式计算测量重复性。

环曲面标准器轴位测量值（°）	177	177	177	177	177
	177	176	177	177	177
平均值 $\bar{A}_m$	176.9°				
单次实验标准差 $s(\bar{A}_m)$	0.32°				
*标准不确定度 $u_{11}(\bar{A}_m) = s(\bar{A}_m)/\sqrt{4}$	0.16°				
*注：在实际校准中取4次测量平均值。					

因此，轴位测量重复性引入的标准不确定度 u_{11} 为：

$$u_{11} = |c_1| \cdot u_{11}(\bar{A}_m) = 0.16^\circ$$

D.3.1.2 仪器分辨力引入的标准不确定度 u_{12}

角膜曲率计工作基准测量装置的轴位测量分辨力为 1° ，按均匀分布计算，由仪器分辨力引入的轴位测量不确定度 $u_{12}(\bar{A}_m)$ 为：

$$u_{12}(\bar{A}_m) = 0.29^\circ$$

因此，仪器分辨力引入的标准不确定度 u_{12} 为：

$$u_{12} = |c_1| \cdot u_{12}(\bar{A}_m) = 0.29^\circ$$

D.3.2 角膜曲率计工作基准测量装置的修正值引入的标准不确定度 u_2

该项不确定度可从角膜曲率计工作基准测量装置的溯源证书中得到，已知轴位修正值的扩展不确定度 $U=0.7^\circ$ ($k=2$)，因此角膜曲率计工作基准测量装置的修正值的标准不确定度 $u(\delta A_0)$ 为：

$$u(\delta A_0) = 0.35^\circ$$

因此，角膜曲率计工作基准测量装置的修正值引入的标准不确定度 u_2 为：

$$u_2 = |c_2| \cdot (\delta A_0) = 0.35^\circ$$

D.4 合成标准不确定度

以上各分量相互独立，因此环曲面标准器轴位实测值合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{(u_{11}^2 + u_{12}^2) + u_2^2} = 0.48^\circ$$

D.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则环曲面标准器轴位实测值的扩展不确定度：

$$U=1.0^\circ \quad (k=2)$$