

JJF

# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

## 医用 MRI 模体校准规范

Calibration specification of MRI phantom

(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

# 医用 MRI 模体校准规范

Calibration specification of

MRI phantom

JJF xxxx-xxxx

归口单位：全国医学计量技术委员会

起草单位：中国计量科学研究院

甘肃省计量研究院

黑龙江省计量检定测试研究院

中国人民解放军总医院

上海联影医疗科技股份有限公司

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：**

张 璞（中国计量科学研究院）

李成伟（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：**

叶福钰（甘肃省计量研究院）

汤秀华（黑龙江省计量检定测试研究院）

李世俊（中国人民解放军总医院）

贺 强（上海联影医疗科技股份有限公司）

# 目录

引 言.....	IV
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和计量单位.....	1
3.1 空间分辨力.....	1
3.2 密度分辨力.....	2
3.3 几何畸变.....	2
3.4 层厚.....	2
3.5 图像均匀性.....	2
3.6 线对[组].....	2
3.7 线条宽度（线宽）.....	2
3.8 线条中心距.....	2
4 概述.....	2
5 计量特性.....	2
5.1 空间分辨力检测模块.....	3
5.2 密度分辨力检测模块.....	3
5.3 几何畸变检测模块.....	3
5.4 层厚检测模块.....	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 校准项目与校准方法.....	4
7.1 外观及功能性检查.....	4
7.2 空间分辨力检测模块.....	4
7.3 密度分辨力检测模块.....	6

7.4 几何畸变检测模块.....	7
7.5 层厚检测模块.....	8
<b>8 校准结果表达.....</b>	<b>8</b>
8.1 校准记录.....	8
8.2 校准结果的处理.....	8
<b>9 复校时间间隔.....</b>	<b>9</b>
附录 A 医用 MRI 模体校准原始记录（推荐）格式样式.....	10
附录 B 校准证书内页（推荐）格式样式.....	12
附录 C 线条宽度相对偏差校准结果不确定度评定示例.....	14
附录 D 圆孔深度校准结果不确定度评定示例.....	16

# 引 言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《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。

本规范的制定参考和引用了以下规范的部分内容：JJG 827-1993《分辨力板》、JJF 1268-2010《医用 X 射线 CT 模体校准规范》、GB/T 6159.5-2011《缩微摄影技术 词汇 第 5 部分：影像的质量、可读性和检查》、GB/T 6161-2008《缩微摄影技术 ISO 2 号解像力测试图的描述及其应用》、WS/T 263-2006《医用磁共振成像（MRI）设备影像质量检测与评价规范》、YY 0319-2008《医用电气设备第 2-33 部分：医疗诊断用磁共振设备安全专用要求》、YY/T 0482-2010《医用诊断用磁共振设备技术要求及试验方法》、YY 9706.233-2021《医用电气设备第 2-33 部分：医疗诊断用磁共振设备的基本安全和基本性能专用要求》、ISO 3334-2006 微缩摄影技术—ISO 2 号解像力测试图—描述和使用（Micrographics—ISO resolution test chart No. 2—Description and use）和 NEMA MS 5 诊断磁共振成像中层厚的测定（Determination of slice thickness in diagnostic magnetic resonance imaging）。

本规范为首次制定。

# 医用 MRI 模体校准规范

## 1 范围

本规范适用于可拆卸医用 MRI 模体的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 827-1993 分辨力板

JJF 1268-2010 医用 X 射线 CT 模体校准规范

GB/T 6159.5-2011 缩微摄影技术 词汇 第 5 部分：影像的质量、可读性和检查

GB/T 6161-2008 缩微摄影技术 ISO 2 号解像力测试图的描述及其应用

WS/T 263-2006 医用磁共振成像（MRI）设备影像质量检测与评价规范

YY 0319-2008 医用电气设备第 2-33 部分：医疗诊断用磁共振设备安全专用要求

YY/T 0482-2010 医用诊断用磁共振设备技术要求及试验方法

YY 9706.233-2021 医用电气设备第 2-33 部分：医疗诊断用磁共振设备的基本安全和基本性能专用要求

ISO 3334-2006 微缩摄影技术—ISO 2 号解像力测试图—描述和使用  
(Micrographics—ISO resolution test chart No. 2 —Description and use)

NEMA MS 5 诊断磁共振成像中层厚的测定 (Determination of slice thickness in diagnostic magnetic resonance imaging)

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 术语和计量单位

### 3.1 空间分辨力 spatial resolution

在无明显噪声贡献时，表明磁共振成像系统能够区分开最小物体的能力。

### 3.2 密度分辨力 density resolution

医用磁共振成像系统中将一定尺寸的细节从低对比度背景中辨认出来的能力。

### 3.3 几何畸变 geometric distortion

又称空间线性,指图像所显示的点相对它已知位置的偏移或图像任何两点间距离相对已知值的偏差。

### 3.4 层厚 slice thickness

医用磁共振成像系统中片层剖面的半高宽 (FWHM)。

### 3.5 图像均匀性 image uniformity

当成像体具有均匀的磁共振特性时,磁共振成像系统在整个被扫描体积上产生恒定信号响应的能力。

### 3.6 线对[组] line pair

一条黑线和与其等宽的相邻间隔的组合。

### 3.7 线条宽度(线宽) line width

线对组中黑线的宽度。

### 3.8 线条中心距 distance between

线对组中一条黑线和与其等宽的相邻间隔的总宽度。

## 4 概述

医用 MRI 模体是具有一定几何结构、用于校准医用 MRI 系统图像性能参数的专用设备,至少应包含空间分辨力检测模块、密度分辨力检测模块、几何畸变检测模块、层厚检测模块和图像均匀性检测模块。医用 MRI 模体一般采用亚克力制成,模体内部填充用于 MRI 图像获取的溶液。

## 5 计量特性



## 5.1 空间分辨力检测模块

5.1.1 空间分辨力范围至少应满足  $1 \text{ Lp/cm} \sim 8 \text{ Lp/cm}$ 。

5.1.2 空间分辨力在 $[1 \text{ Lp/cm}, 5 \text{ Lp/cm}]$ 区间内，线对组线条宽度相对最大允许误差为 $\pm 5\%$ ，线条中心距相对最大允许误差为 $\pm 10\%$ ；空间分辨力在 $(5 \text{ Lp/cm}, 8 \text{ Lp/cm}]$ 区间内，线对组线条宽度的相对最大允许误差为 $\pm 10\%$ ，线条中心距的相对最大允许误差为 $\pm 20\%$ 。

## 5.2 密度分辨力检测模块

5.2.1 圆孔深度标称值最小的所有圆孔，圆孔深度实测值应不大于  $0.6 \text{ mm}$ 。

5.2.2 上述圆孔中，圆孔直径标称值最小的圆孔，直径实测值应不大于  $5.0 \text{ mm}$ 。

## 5.3 几何畸变检测模块

两孔圆心连线距离（或栅格长度）实测值与标称值的最大允许误差为 $\pm 0.5 \text{ mm}$ 。

## 5.4 层厚检测模块

楔形板（块）斜率的实测值与标称值的相对最大允许误差为 $\pm 3\%$ 。

注：以上指标不适用于合格性判别，仅供参考。

# 6 校准条件

## 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $(20 \pm 3) \text{ }^\circ\text{C}$ ；

6.1.2 相对湿度： $\leq 80\%$ ；

6.1.3 大气压： $70 \text{ kPa} \sim 106 \text{ kPa}$ ；

6.1.4 供电电源： $(220 \pm 22) \text{ V}$ ， $(50 \pm 1) \text{ Hz}$ ；

6.1.5 周围无明显影响系统正常工作的机械振动和电磁干扰。

## 6.2 测量标准及其他设备

### 6.2.1 轮廓投影仪

载物台行程至少 150 mm (X 轴方向) × 100 mm (Y 轴方向)，使用透射光照明时，最大允许误差为 ±5 μm。

### 6.2.2 数字高度计

量程 (0 ~ 50) mm，最大允许误差为 ±5 μm。

### 6.2.3 游标卡尺

量程大于 100 mm，最大允许误差 ±50 μm。

## 7 校准项目与校准方法

### 7.1 外观及功能性检查

被校医用 MRI 模体（以下简称“被校模体”）标识应清晰，具有生产厂家、型号、出厂编号等信息；结构应完整，无影响正常工作和校准的缺陷或机械损伤。为便于检测，被校模体中各检测模块应可拆卸。

### 7.2 空间分辨力检测模块

7.2.1 将空间分辨力检测模块放置于投影仪的载物台上，选择合适放大倍数并调焦清晰；移动空间分辨力检测模块，使目镜中待测线对组外侧边缘与投影仪的分划线重合。

#### 7.2.2 线条宽度测量

进行线条宽度测量时，移动目镜中的分划线依次对准刻蚀凹槽的两侧，测得读数  $a_1$  和  $a_2$ ，两读数之差即为该凹槽对应的线条宽度（见图 1）。重复测量 3 次，取平均值作为该凹槽对应线条宽度实测值。计算该线对组中所有线条宽度实测值与标称值  $w_1$  之差，差值绝对值最大的记为  $|\Delta_{H1}|$ ，对应线宽实测值记为  $w_1'$ ，按公式 (1) 计算相对偏差  $\delta_{H1}$ 。

$$\delta_{H1} = \frac{|w_1' - w_1|}{w_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$\delta_{H1}$  — 线条宽度实测值与标称值的相对偏差，%；

$w_1'$  — 与标称值偏差最大的线条宽度实测值，mm；

$w_1$  — 待测线对组线条宽度的标称值，mm。

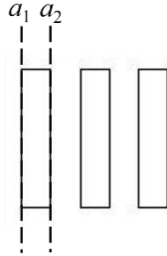


图1 线条宽度测量示意图

### 7.2.3 线条中心距测量

进行线条中心距测量时，移动目镜中的分划线依次对准一组相邻刻蚀凹槽的左边缘（或右边缘），测得读数  $a_3$  和  $a_4$ ，两读数之差即为该组凹槽对应的线条中心距（见图2）。重复测量3次，取平均值作为该组凹槽对应线条中心距实测值。计算该线对组中所有线间距实测值与标称值  $w_2$  之差，差值绝对值最大的记为  $|\Delta_{H2}|$ ，对应线间距实测值记为  $w_2'$ ，按公式（2）计算相对偏差  $\delta_{H2}$ 。

$$\delta_{H2} = \frac{|w_2' - w_2|}{w_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

$\delta_{H2}$  — 线条中心距实测值与标称值的相对偏差，%；

$w_2'$  — 与标称值偏差最大的线条中心距实测值，mm；

$w_2$  — 待测线对组线条中心距的标称值，mm。

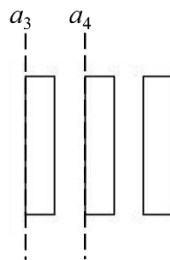


图2 线条中心距测量示意图

### 7.3 密度分辨力检测模块

7.3.1 将密度分辨力检测模块放置于投影仪的载物台上，对圆孔深度标称值最小的圆孔进行校准，选择合适放大倍数并调焦清晰；移动密度分辨力检测模块，使目镜中相互垂直的两条分划线分别与待测圆孔相切，固定载物台的垂直（或水平）方向，记下此时坐标读数  $b_1$ ；然后沿着待测圆孔的直径方向移动载物台，直至垂直方向分划线与待测圆孔的另一侧相切，记下此次坐标读数  $b_2$ ，两次测得的坐标读数差的绝对值即为待测圆孔直径（见图 3）。重复测量 3 次，取平均值作为该圆孔直径的实测值。

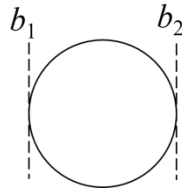


图 3 圆孔直径测量示意图

7.3.2 对数字高度计进行零位校准后，对圆孔深度标称值最小的圆孔进行校准，将密度分辨力检测模块放置于数字高度计的载物台上，移动密度分辨力检测模块，将测杆按照  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$  和  $270^\circ$  的顺序分次压在待测圆孔四周（见图 4），取四个位置厚度测量结果的平均值作为待测圆孔所在位置处的厚度初始值  $t_1$ ；移动密度分辨力检测模块，将测杆伸入待测圆孔中测量圆孔内厚度，取四次测量结果的平均值作为圆孔内厚度  $t_2$ ； $t_1$  与  $t_2$  的差值即为圆孔深度  $t$ 。

$$t = t_1 - t_2 \quad (3)$$

式中：

$t_1$  — 待测圆孔所在位置处的厚度初始值，mm；

$t_2$  — 待测圆孔内厚度，mm；

$t$  — 圆孔深度，mm。

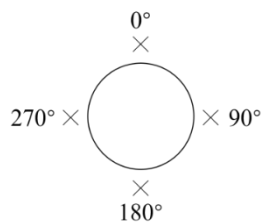


图4 圆孔厚度初始值测量示意图

#### 7.4 几何畸变检测模块

7.4.1 对于利用两孔连线距离计算几何畸变的检测模块，将其放置于投影仪的载物台上，选择合适放大倍数并调焦清晰后，对连线长度标称值为  $l_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 12$ ) 两孔间距离进行测量，以 3 次测量结果的平均值作为实测值  $l'_i$ ；计算  $l'_i$  与  $l_i$  的差值  $\Delta l_i$  并记录。两孔间距离定义为圆心连线距离，实际测量时应分别测量两孔直径，取其平均值作为两孔平均直径  $d_1$ ，然后测量两孔内侧距离  $d_2$ （见图 5）， $d_1$  与  $d_2$  之和即为两孔间圆心连线距离的一次测量值。

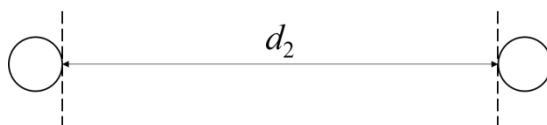


图5 两孔内侧距离测量示意图

7.4.2 对于利用栅格边长计算几何畸变的检测模块，将其放置于投影仪的载物台上，选择合适放大倍数并调焦清晰后，对边长标称值为  $m_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 12$ ) 栅格长度进行测量，以 3 次测量结果的平均值作为栅格长度实测值  $m'_j$ ；计算  $m'_j$  与  $m_j$  的差值  $\Delta m_j$  并记录。

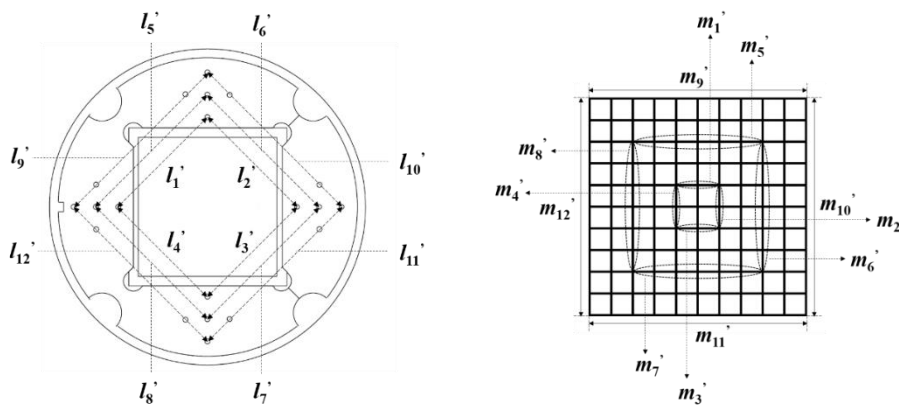


图6 几何畸变检测模块测量示意图

## 7.5 层厚检测模块

对于使用楔形板（块）测量层厚的检测模块，用游标卡尺测量楔形角所对直角边边长和相邻直角边边长（如图 7），两条直角边边长均测量 3 次取平均值作为实测值。根据公式（4）计算楔形板（块）的相对偏差 $\delta_{\theta}$ 。

$$\delta_{\theta} = \frac{x_1/x_2 - \tan \theta}{\tan \theta} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

$\delta_{\theta}$  — 楔形板（块）斜率的实测值与标称值的相对偏差，%；

$x_1$  — 楔形角所对直角边边长实测值，mm；

$x_2$  — 楔形角所对直角边边长实测值，mm；

$\theta$  — 楔形角标称角度值，单位为 $^{\circ}$ 。

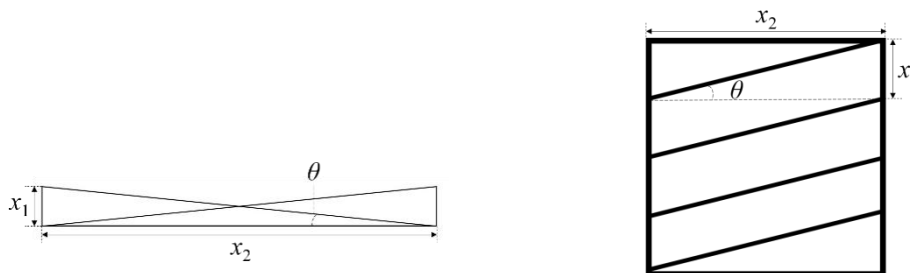


图 7 层厚检测模块测量示意图

## 8 校准结果表达

### 8.1 校准记录

校准记录格式参见附录 A。

### 8.2 校准结果的处理

校准证书内页格式参见附录 B，校准证书应至少包括以下内容：

- a) 标题，如“校准证书”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点（如果不在实验室内校准）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如证书编号），每页及总页数的标识；
- e) 客户的名称和地址；

- f) 被校准医用 MRI 模体的描述和明确标识（如型号、产品编号等）；
- g) 进行校准的日期或校准证书的生效日期；
- h) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称和代号；
- i) 校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；
- j) 校准环境的描述；
- k) 校准结果及测量不确定度的说明；
- l) 校准员及核验员的签名；
- m) 校准证书批准人的签名；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经试验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过 12 个月。

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。

## 附录 A

## 医用 MRI 模体校准原始记录（推荐）格式样式

证书编号：

校准地点：

送校单位：						
生产厂家：	型号：	序列号：	校准依据：			
校准设备名称及编号：	校准设备证书编号及有效期：	温 度：	℃	相对湿度：	%	
<b>空间分辨力检测模块</b>						
线条宽度（单位：μm）						
测量点 测量次数	线条宽度 1	线条宽度 2	线条宽度 3	线条宽度 4	线条宽度 5	标称值
1						
2						
3						
均值/ 均值与标称值之差						
相对偏差						
线条中心距（单位：μm）						
测量点 测量次数	线条中心 距 1	线条中心 距 2	线条中心 距 3	线条中心 距 4	线条中心 距 5	标称值
1						
2						
3						
均值/ 均值与标称值之差						
相对偏差						
<b>密度分辨力检测模块</b>						
圆孔直径（单位：μm）						
测量点 测量次数	读数 1	读数 2		直径测量值		
1						
2						
3						
直径均值						

（接下页）

第 1 页 共 2 页

（接上页）



几何畸变检测模块 (单位: $\mu\text{m}$ )					标称值: _____ $\mu\text{m}$	
测量次数 测量位置	1	2	3	均值	均值-标称值	
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
层厚检测模块					楔形角 $\theta$ 标称值: _____ $^{\circ}$	
测量次数 测量点	1 (单位: mm)			2 (单位: mm)		
1						
2						
3						
均值	$x_1=$			$x_2=$		
$x_1/x_2$						
$\tan \theta$						
相对偏差 (%)						

校准员:

核验员:

校准日期: 年 月 日

接收日期: 年 月 日

## 附录 B

## 校准证书内页（推荐）格式样式

校准证书第 1 页

证书编号：XXXX-XXXX				
校准机构授权说明				
校准所依据/参照的技术文件（代号、名称）				
校准环境条件及其地点：				
温度：        ℃            相对湿度：        %				
地点：				
其它：				
测量标准及其他设备				
名称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	有效期至

校准证书第 2 页

证书编号：XXXX-XXXX

## 校准结果

## 1. 空间分辨力检测模块校准结果

标称值 (Lp/cm)	1	2	3	4	5	6	7	8
线条宽度相对 偏差 (%)								
不确定度								
线条中心距相 对偏差 (%)								
不确定度								

## 2. 密度分辨力检测模块校准结果

孔编号		1	2	3	4	5
圆孔直径 ( $\mu\text{m}$ )	实测值					
	不确定度					
圆孔深度 ( $\mu\text{m}$ )	实测值					
	不确定度					

## 3. 几何畸变检测模块校准结果

编号	1	2	3	4	5	6
标称值 ( $\mu\text{m}$ )						
相对偏差 ( $\mu\text{m}$ )						
不确定度						
标称值 ( $\mu\text{m}$ )						
相对偏差 ( $\mu\text{m}$ )						
不确定度						

## 4. 层厚检测模块校准结果

楔形板（块）斜率实测值与标称值的相对偏差：\_\_\_\_\_，不确定度：\_\_\_\_\_。

## 附录 C

## 线条宽度相对偏差校准结果不确定度评定示例

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的要求，以空间分辨力标称值为 1 Lp/cm 的线对组为例，给出线条宽度相对偏差校准结果测量不确定度评定过程。其中包括各分量标准不确定度评定、合成标准不确定度以及扩展不确定度计算等。

## C.1 建立测量模型

$$\delta_{H1} = \frac{|w_1' - w_1|}{w_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

$\delta_{H1}$  — 线条宽度实测值与标称值的相对偏差，%；

$w_1'$  — 与标称值偏差最大的线条宽度实测值，mm；

$w_1$  — 待测线对组线条宽度的标称值，mm。

由测量模型可得灵敏度系数为：

$$c_{|\Delta_{H1}|} = 1 / w_1$$

## C.2 分量标准不确定度评定

C.2.1 线条宽度  $w_1'$  测量重复性引入的标准不确定度  $u_1(|\Delta_{H1}|)$ 

$u_1(|\Delta_{H1}|)$  是线条宽度测量重复性引入的标准不确定度，用轮廓投影仪对线对组的刻蚀槽进行线条宽度测量，以 3 次独立重复测量结果的均值作为待测刻蚀槽的线条宽度  $w_1'$ 。3 次测量值及其标准偏差  $s(|\Delta_{H1}|)$  见下表，其中标准偏差采用极差法计算。

单位：mm

测量值			平均值	标准偏差 $s( \Delta_{H1} )$
1	2	3		
4.923	4.921	4.924	4.9227	0.0024

则由重复性引入的 A 类标准不确定度分量  $u_1(|\Delta_{H1}|)$  为：

$$u_1(|\Delta_{H1}|) = s(|\Delta_{H1}|) / \sqrt{3} = 0.0014 \text{ mm}$$

### C.2.2 环境温度、湿度变化引入的标准不确定度 $u_2(|\Delta_{H1}|)$

在仪器的正常使用环境条件下,由于待检空间分辨力检测模块和轮廓投影仪均处于相同温度、湿度条件下,长度量测量结果不受温度、湿度影响变化影响,故该项可以忽略不计。

### C.2.3 轮廓投影仪测量不准确引入的标准不确定度 $u_3(|\Delta_{H1}|)$

由于轮廓投影仪的最大允许误差为 $\pm 2.0 \mu\text{m}$ ,认为测量结果呈均匀分布,则由其引入的 B 类标准不确定度分量为:

$$u_3(|\Delta_{H1}|) = 2/\sqrt{3} = 1.16\mu\text{m}$$

### C.2.4 线条宽度 $w_1'$ 引入的标准不确定度 $u(|\Delta_{H1}|)$

$$u(|\Delta_{H1}|) = \sqrt{[u_1(|\Delta_{H1}|)]^2 + [u_3(|\Delta_{H1}|)]^2} \approx 1.81 \mu\text{m}$$

## C.3 合成标准不确定度

各不确定度分量见表 1。

表 1 线条宽度相对偏差校准结果不确定度分量

序号	不确定度来源	不确定度分量
1	线条宽度 $w_1'$ 引入的标准不确定度 $u( \Delta_{H1} )$	1.81 $\mu\text{m}$

合成标准不确定度为:

$$u_c(|\Delta_{H1}|) = \sqrt{[u_1(|\Delta_{H1}|)]^2/w_1'^2} \approx 0.036 \%$$

## C.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ,则扩展不确定度 $U$ 为:

$$U(|\Delta_{H1}|) = ku_c(|\Delta_{H1}|) = 2 \times 0.036 \% \approx 0.07 \%, (k=2)$$

## 附录 D

### 圆孔深度校准结果不确定度评定示例

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的要求，以标称刻蚀深度为 0.1mm、标称直径为 8mm 的圆孔深度校准结果为例给出校准结果测量不确定度的评定过程。其中包括各分量标准不确定度评定、合成标准不确定度以及扩展不确定度计算等。

#### D.1 建立测量模型

$$t = t_1 - t_2$$

式中：

$t_1$  — 待测圆孔所在位置处的厚度初始值，mm；

$t_2$  — 待测圆孔内厚度，mm；

$t$  — 圆孔深度，mm。

各输入量的灵敏系数计算如下：

$$c(t_1) = \frac{\partial(t_1)}{\partial t} = 1$$

$$c(t_2) = \frac{\partial(t_2)}{\partial t} = -1$$

#### D.2 分量标准不确定度评定

用数显高度计对待测圆孔所处位置的初始厚度和圆孔内厚度进行测量，分别用  $u(t_1)$  和  $u(t_2)$  表示初始厚度和圆孔内厚度的测量结果引入的标准不确定度分量。

##### D.2.1 初始厚度测量结果引入的标准不确定度 $u(t_1)$

###### 1) 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(t_1)$

用数显高度计在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  位置分别进行 4 次独立重复测量，测量值为  $t_{1i}$  ( $i = 1, 2, \dots, 4$ )，取 4 个位置测量结果的均值作为  $t_1$ ，其标准偏差  $s(t_1)$  可用极差法计算。具体数据见下表：

单位：mm

测量值				平均值 $t_1$	标准偏差 $s(t_1)$
0°	90°	180°	270°		
0.0000	-0.0036	0.0071	0.0024	0.00148	0.00519

则由重复性引入的 A 类标准不确定度分量为：

$$u_1(t_1) = s(t_1)/\sqrt{4} = 0.00260 \text{ mm}$$

#### 2) 环境温度、湿度变化引入的标准不确定度 $u_2(t_1)$

在仪器的正常使用环境条件下，由于待检密度分辨力检测模块和数显高度计均处于相同温度、湿度条件下，长度量测量结果不受温度、湿度影响变化影响，故该项可以忽略不计。

#### 3) 数显高度计测量不准确引入的标准不确定度分量 $u_3(t_1)$

由于数显高度计的最大允许误差为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ，认为测量结果呈均匀分布，则由其引入的 B 类标准不确定度分量为：

$$u_3(t_1) = 0.5/\sqrt{3} = 0.29 \mu\text{m}$$

#### 4) 初始厚度测量结果引入的标准不确定度 $u(t_1)$

$$u(t_1) = \sqrt{[u_1(t_1)]^2 + [u_3(t_1)]^2} = 2.62 \mu\text{m}$$

### D. 2. 2 圆孔内厚度测量结果引入的标准不确定度 $u(t_2)$

#### 1) 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(t_2)$

用数显高度计在圆孔内区域分别进行 4 次独立重复测量，测量值为  $t_{2j}$  ( $j = 1, 2, \dots, 4$ )，取 4 个位置测量结果的均值作为  $t_2$ ，其标准偏差  $s(t_2)$  可用极差法计算。具体数据见下表：

单位：mm

测量值				平均值 $t_2$	标准偏差 $s(t_2)$
位置 1	位置 2	位置 3	位置 4		
-0.1026	-0.1033	-0.1014	-0.1024	-0.10242	0.00092

则由重复性引入的 A 类标准不确定度分量为：

$$u_2(t_2) = s(t_2)/\sqrt{4} = 0.00046 \text{ mm}$$

2) 环境温度、湿度变化引入的标准不确定度  $u_2(t_2)$

在仪器的正常使用环境条件下，由于待检密度分辨力检测模块和数显高度计均处于相同温度、湿度条件下，长度量测量结果不受温度、湿度影响变化影响，故该项可以忽略不计。

3) 数显高度计测量不准确引入的标准不确定度分量  $u_3(t_2)$

由于数显高度计的最大允许误差为  $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ，认为测量结果呈均匀分布，则由其引入的 B 类标准不确定度分量为：

$$u_3(t_2) = 0.5/\sqrt{3} = 0.29 \mu\text{m}$$

4) 圆孔内厚度测量结果引入的标准不确定度  $u(t_2)$

$$u(t_2) = \sqrt{[u_1(t_2)]^2 + [u_3(t_2)]^2} = 0.54 \mu\text{m}$$

### D.3 合成标准不确定度

各不确定度分量见表 1。

表 1 圆孔深度校准结果不确定度分量

序号	不确定度来源	不确定度分量 ( $\mu\text{m}$ )
1	初始厚度测量结果引入的标准不确定度 $u(t_1)$	2.62
2	圆孔内厚度测量结果引入的标准不确定度 $u(t_2)$	0.54

上述 2 个不确定度分量互不相关，故合成标准不确定度为：

$$u_c(t) = \sqrt{[c(t_1)]^2 \cdot [u(t_1)]^2 + [c(t_2)]^2 \cdot [u(t_2)]^2} = 2.68 \mu\text{m}$$

### D.4 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度  $U$  为：

$$U(t) = ku_c(t) = 2 \times 2.68 \approx 5.4 \mu\text{m}, (k=2)$$