



中华人民共和国工业和信息化部
石油和化工计量技术规范

JJF（石化） 023—202X

橡胶无转子硫化仪校准规范

Calibration Specification for Rubber Rotorless Curemeter

（报批稿）

20XX - XX - XX 发布

20XX - XX - XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

橡胶无转子硫化仪校准规范

Calibration Specification for Rubber

Rotorless Curemeter

JJF(石化) 023—202X
代替 JJF(石化) 023—2019

归口单位：中国石油和化学工业联合会

主要起草单位：北京橡胶工业研究设计院有限公司

青岛软控计量检测技术有限公司

本规范委托全国石油和化工行业计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

闫国强 （北京橡胶工业研究设计院有限公司）

史海涛 （青岛软控计量检测技术有限公司）

宋文涛 （青岛软控计量检测技术有限公司）

王 磊 （青岛软控计量检测技术有限公司）

王福庆 （青岛软控计量检测技术有限公司）

付录录 （北京橡胶工业研究设计院有限公司）

李明华 （北京橡胶工业研究设计院有限公司）

孙思源 （北京橡胶工业研究设计院有限公司）

目 录

引言.....	II
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 概述.....	1
4 计量特性.....	3
5 校准条件.....	3
5.1 环境条件.....	4
5.2 测量标准及其他设备.....	4
6 校准项目和校准方法.....	4
6.1 校准项目.....	4
6.2 校准方法.....	4
7 校准结果表达.....	7
7.1 校准记录.....	7
7.2 校准证书.....	7
7.3 不确定度.....	7
8 复校时间间隔.....	7
附录 A 橡胶无转子硫化仪校准记录格式.....	9
附录 B 橡胶无转子硫化仪校准证书内页格式.....	10
附录 C 模体摆动频率测量结果不确定度的评定示例.....	11
附录 D 模体摆动角度测量结果不确定度的评定示例.....	13
附录 E 上下模体温度示值误差测量结果不确定度的评定示例.....	16
附录 F 转矩示值误差测量结果不确定度的评定示例.....	19

引言

本规范依据 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》和 JJF 1059.1—2012 《测量不确定度评定与表示》等基础性系列规范进行编写。

本规范主要参考 GB/T 9869.1—2025《用硫化仪测定硫化特性 第1部分：介绍》、GB/T 9869.2—2025《用硫化仪测定硫化特性 第2部分：圆盘振荡硫化仪》、GB/T 9869.3—2025《用硫化仪测定硫化特性 第3部分：无转子硫化仪》和 HG/T 3709-2017《无转子硫化仪技术条件》修订。

本校准规范修改并代替 JJF(石化) 023—2019 《橡胶无转子硫化仪校准规范》。与 JJF(石化) 023—2019 《橡胶无转子硫化仪校准规范》相比，除编辑性修改外主要技术变化如下：

- 修改了校准规范的适用范围（见1）；
 - 修改了校准规范的引用文件（见2）；
 - 修改了校准规范的概述（见3）；
 - 修改了模体摆动频率的测量范围及技术要求（见4）；
 - 修改了模体摆动角度的测量范围及技术要求（见4）；
 - 修改了上下模体温度示值误差的技术要求（见4）；
 - 修改了转矩示值误差的技术要求（见4）；
 - 修改了测量标准名称及技术要求（见5.2）；
 - 修改了校准前检查（见6.2.1）；
 - 修改了上下模体温度示值误差的校准方法（见6.2.4）；
 - 修改了转矩示值误差的校准方法（见6.2.6）；
 - 修改了校准原始记录格式及校准证书内页格式（见附录A～附录B）；
 - 修改了所有校准项目测量结果不确定度的评定（见附录C～附录F）；
 - 增加了模腔温度波动度的校准项目（见4）；
- 本规范所代替规范的历次版本发布情况为：
- JJF(石化) 023—2019 。

橡胶无转子硫化仪校准规范

1 范围

本规范适用于符合GB/T 9869.3—2025要求的橡胶无转子硫化仪的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1071—2010 国家计量校准规范编写规则

GB/T 9869.3—2025 用硫化仪测定硫化特性 第3部分：无转子硫化仪

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 概述

橡胶无转子硫化仪(以下简称硫化仪)是测定未硫化胶料硫化特性的仪器。硫化仪的原理为：将橡胶试样置于具有温控功能的上、下模体组成的密闭模腔内，在试验温度下硫化开始后，一个模体相对于另一个模体进行线性往复移动或摆角振荡，使试样产生剪切应变，通过测量试样剪切模量随时间变化的情况得到其硫化特性。硫化仪一般由组成模腔的上下模体、模体摆动装置、保持模腔温度恒定的装置、保持模腔闭合压力的装置、转矩测量装置构成。由上、下模体形成的围绕测试腔的组件有两种，一种是非密封或开放型，另一种是密封型。在密封型模腔系统中，模腔被密封板和密封圈包围，并且完全封闭，在非密封型模腔系统中，腔体不是完全封闭的，由模体形成两种模腔形状：双锥形和平板式。

不同的密封类型和模腔形状组合得到三种类型的硫化仪：

- a) 非密封系统的双锥形模腔；
- b) 密封系统的双锥形模腔；
- c) 密封系统的平板式模腔。

三种型式的硫化仪只是密封方式不同，硫化仪结构示意见图1、图2。

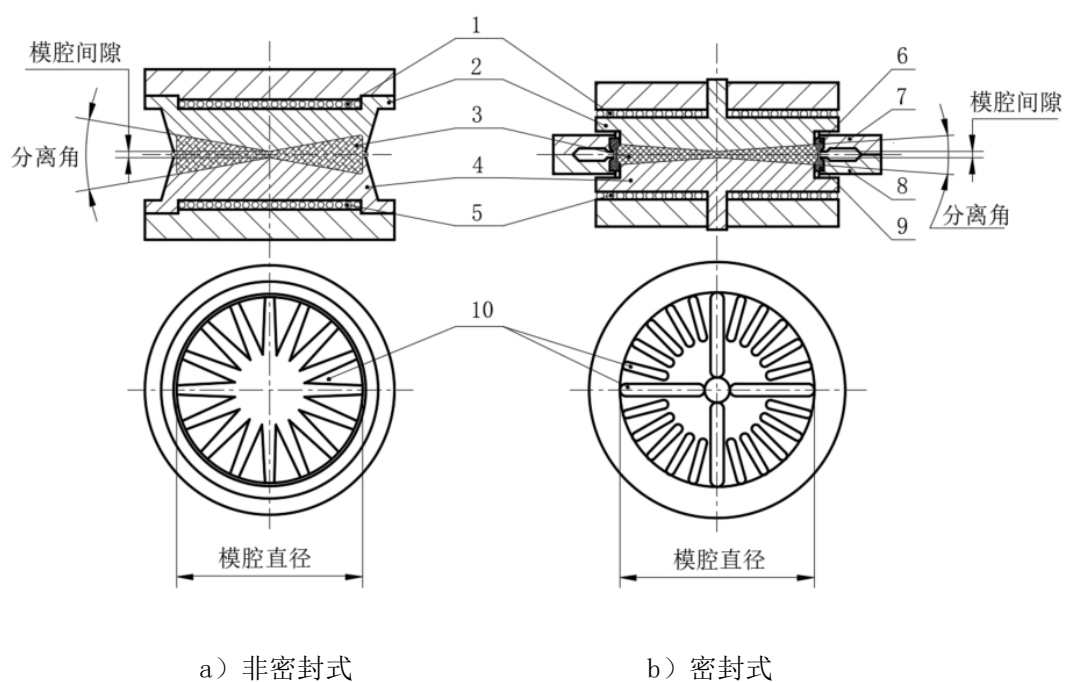


图1 双锥形模腔硫化仪结构示意图

说明：1 ——上加热器；2 ——上模体；3 ——试样；4 ——下模体；5 ——下加热器；

6 ——上密封圈； 7 ——上密封板； 8 ——下密封板； 9 ——下密封圈； 10 ——沟槽

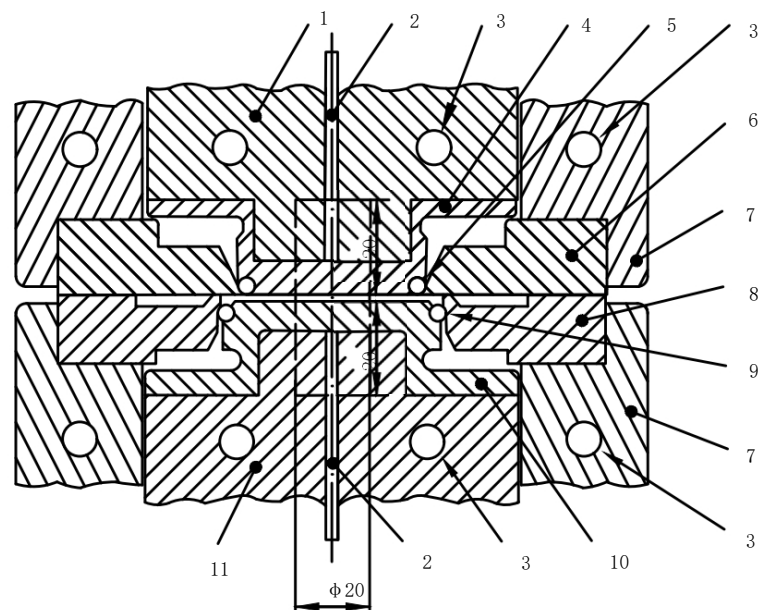


图 2 平板式模腔密封硫化仪结构示意图

说明：1 ——扭矩测量系统轴；2 ——温度传感器；3 ——加热器；4 ——上模体；5 ——上密封圈；
6 ——上密封板； 7 ——压板； 8 ——下密封板；9 ——下密封圈；10 ——下模体；11 ——传动轴；

4 计量特性

具体计量特性见表1。

表 1 硫化仪计量特性一览表

序号	项目		技术要求
1	模体摆动频率/Hz	(0.1~2.0)	MPE: ± 0.1
2	模体摆动 角度误差/%	(±0.5° ~±2.0°)	MPE: ± 2
3	上、下模体温度 示值误差/℃	(50~200)	MPE: ± 0.3
4	模腔温度波动度/℃		不大于 ± 0.3
5	转矩示值误差/%		MPE: ± 1
注1: 以上指标不适用于合格性判别, 仅供参考。			
注2: 与橡胶无转子硫化仪原理及构造相同或近似的橡胶加工分析仪、橡胶圆盘摆动硫化仪也可参照本规范进行校准。			

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 温度条件

环境温度：（5～40）℃；

5.1.2 湿度条件

相对湿度：不大于 85%。

5.2 测量标准及其他设备

测量标准及其他设备见表 2。

表 2 硫化仪校准项目和测量标准

序号	校准项目	测量标准名称及技术要求
1	模体摆动频率	转速表：测量范围（10～1000）r/min；MPE ±0.1%；
2	模体摆动角度误差	角度测量装置：测量范围（±0.1°～±5.0°）；MPE ±0.003°；
3	上、下模体温度示值误差	多通道数字测温仪：测量范围（0～200）℃，分辨力 0.01℃；
4	模腔温度波动度	
5	转矩示值误差	扭矩仪：测量范围（1～10）N·m；MPE ±0.30%； 电子天平：检定分度值 0.01 kg；III 级； 数显卡尺：测量范围（0～500）mm，MPE ±0.05 mm；
注：也可使用其他满足测量要求的测量标准及设备。		

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目详见表2。

6.2 校准方法

6.2.1 校准前检查

6.2.1.1 外观检查

校准前检查硫化仪的按键、开关、指示灯和气路系统等，应均可正常工作。硫化仪应有铭牌，铭牌上应标明型号、规格、编号、出厂日期和制造厂。

6.2.1.2 模腔尺寸检查

用数显卡尺检查硫化仪的模腔尺寸，用塞尺检查模腔间隙，应符合 GB/T 9869.3 中 5.2.1 的要求；模腔内槽沟边缘应清晰无塌边或其他影响胶料测定结果的缺陷。

6.2.1.3 模体闭合力检查

用测力仪检查模体，闭合力应符合GB/T 9869.3中5.3的要求；模体闭合时应平稳，无冲击或爬行状况，安全保护装置正常运行无异常。

6.2.2 模体摆动频率

以设定的摆动频率启动硫化仪，用转速表测量驱动偏心轮的转速，重复测量 3 次取其算术平均值，按式（1）计算摆动频率作为测量结果，结果保留到 0.01Hz。

$$f = \bar{r}/t \quad (1)$$

式中：

f —硫化仪模体摆动频率，Hz；

$\bar{r}$ —转速表3次测量的算术平均值，r/min；

t —时间常数，60s。

6.2.3 模体摆动角度

将角度测量装置安装在上下模体间，位移传感器安装在摆杆适当位置并调整好零位，按照设定角度启动硫化仪使模体摆动，读取位移传感器最大最小差值 X ，角度测量装置按公式（3）计算摆动角度值，重复测量 3 次取其算术平均值按公式（2）计算误差，结果保留到 0.1%。

$$\varepsilon = \frac{\alpha - \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\bar{\alpha} = \arcsin \frac{\bar{X}}{2L} \quad (3)$$

式中：

ε —模体摆动角度误差，%

α —模体摆动角度设定值，°；

$\bar{\alpha}$ —摆动角度 3 次测量的算术平均值，°；

$\bar{X}$ —位移传感器最大最小差值 3 次测量的算术平均值，mm；

L —摆杆测量位置到模体摆动轴中心的距离，mm。

6.2.4 上、下模体温度示值误差

以硫化仪上、下模模腔壁作为上、下模的测温区，按硫化仪试验温度范围（50～200）℃推荐校准温度点为：50℃、100℃、150℃、200℃，也可按照客户实际工作中常用温度点作为校准点。将测温仪传感器置埋于测温模型中，在上、下模体的传感器之间应采取有效措施，防止上、下模体温度相互影响，然后将测温模型安置在上、下模体中间处，（温度

测量模型见图3)。闭合模体待温度达到设定值后,读取硫化仪和测温仪上的显示值,每个校准点每间隔2 min记录1次,共记录3次,按式(2)分别计算上、下模体温度示值误差,结果保留到0.01℃。

$$\Delta T = T - \bar{T} \quad (4)$$

式中:

ΔT —上、下模体温度的示值误差,℃;

T —上、下模体温度的显示值,℃;

$\bar{T}$ —温度测量装置3次测量的算术平均值,℃。

6.2.5 模腔温度波动度

按照6.2.4的方式放置测温模型,闭合模体待温度达到设定值后,每隔2 min记录一次温度测量装置的显示值,共记录3次,取上、下模体全部测量值中的最高温度与最低温度之差的一半,冠以“±”号,作为温度波动度校准结果,按式(3)计算模腔温度波动度,结果保留到0.01℃。

$$\Delta T_f = \pm \left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{2} \right) \quad (5)$$

式中:

ΔT_f —硫化仪模腔温度的波动度,℃;

$T_{\max}$ —上、下模体3次测量中测得的最高温度,℃;

$T_{\min}$ —上、下模体3次测量中测得的最低温度,℃。

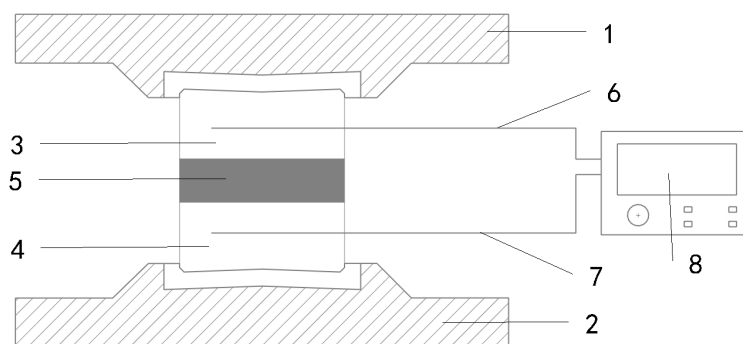


图3 模腔温度测量模型示意图

说明: 1、2—上、下模体; 3、4—上、下测温模型; 5—上下测温模型中间的隔热层;

6、7—温度传感器; 8—温度测量装置显示仪表。

6.2.6 转矩示值误差

使用扭矩仪对模体转矩进行校准,将扭矩仪安装固定在硫化仪上、下模间;启动硫化

仪, 读取被校硫化仪示值和扭矩仪测量值, 重复测量 3 次, 按式 (4) 计算转矩示值误差, 结果保留到 0.1%。

$$\delta = \frac{N - \overline{N}}{\overline{N}} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

δ —转矩示值误差, %;

N —硫化仪转矩示值, $\text{dN}\cdot\text{m}$;

$\overline{N}$ —扭矩仪 3 次测量值的算术平均值, $\text{dN}\cdot\text{m}$ 。

转矩示值误差也可使用钢丝绳砝码法进行校准, 安装校准滑轮代替上模, 将钢丝固定在滑轮上, 并通过附加在钢丝另一端的砝码将负荷施加到滑轮上, 用数显卡尺测量校准滑轮有效半径, 即力臂长度, 电子天平测量砝码质量, 按式 (6) 计算转矩示值误差:

$$\delta = \frac{N - RMg}{RMg} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

δ —转矩示值误差, %;

N —硫化仪转矩示值, $\text{dN}\cdot\text{m}$;

R —力臂长度, m ;

M —砝码质量, kg ;

g —重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。

7 校准结果表达

7.1 校准记录

校准记录应详尽记录测量数据和计算结果。推荐的校准记录格式见附录 A。

7.2 校准证书

经校准的橡胶无转子硫化仪应出具校准证书, 校准结果应在校准证书上反映。校准证书包括的信息应符合 JJF 1071—2010 中 5.12 的要求, 推荐的校准证书内页格式见附录 B。

7.3 不确定度

校准证书应给出各项校准项目校准结果的扩展不确定度, 评定示例见附录 C、附录 D、附录 E 和附录 F。

8 复校时间间隔

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，使用单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔，建议复校时间间隔不超过 12 个月。

记录编号					证书编号							
委托单位												
生产厂商					器具编号							
型号/规格					校准日期							
校准环境条件	温度： °C 相对湿度： % 其他：											
校准地点												
校准前检查	模腔内槽沟边缘清晰无塌边								是□ 否□			
	无影响胶料测定结果的缺陷								是□ 否□			
	模腔闭合平稳，无冲击或爬行状况								是□ 否□			
	安全保护装置正常运行无异常								是□ 否□			
	模腔尺寸符合要求								是□ 否□			
	模腔合模力符合要求								是□ 否□			
本次校准的依据：												
本次校准所使用的主要计量标准器：												
名称	编号		测量范围		溯源信息		最大允许误差/ 准确度等级/不 确定度		有效期至			
校准结果												
项目	偏心轮转速/（r/min）						模体摆动频 率/Hz		扩展不确定 度（k=2）			
模体摆动频率	1 次		2 次		3 次					算术平均值		
模体摆动 角度误差/%	1 次 （°）		2 次 （°）		3 次 （°）		算术平均值 （°）		误差	扩展不确定 度（k=2）		
模腔温度 /℃	温度示值		1 次		2 次		3 次		算术 平均值	示值 误差	波动度	扩展不确定 度（k=2）
		上模										
		下模										
转矩示值误差 /%	示值（dN·m）		1 次 （dN·m）		2 次 （dN·m）		3 次 （dN·m）		算术 平均值 （dN·m）	示值 误差	扩展不确定 度（k=2）	

核验员:

附录 B

橡胶无转子硫化仪校准证书内页格式

证书编号 XXXXX—XXXX					
校准机构授权说明					
校准的技术依据 JJF(石化) 023—202X 《橡胶无转子硫化仪校准规范》					
校准环境条件及地点					
地点					
环境温度	℃	相对湿度	%	其他	
校准使用的计量(基)标准装置					
名称	测量范围	不确定度/准确度 等级/最大允许误差	计量(基)标准证 书编号	有效期至	
校准结果					
序号	项目	技术要求	测量值	扩展不确定度 ($k=2$)	
1	模体摆动频率/ Hz	MPE: ± 0.1			
2	模体摆动角度误差/ %	MPE: ± 2			
3	模腔温度/ °C	MPE: ± 0.3			
4	模腔温度波动度/°C	不大于 ± 0.3			
5	转矩示值误差/ %	MPE: ± 1			
备注					

附录 C

模体摆动频率测量结果不确定度的评定示例

C.1 校准方法

校准方法如本规范 6.2.2。

C.2 测量模型

摆动频率测量模型见式 (C.1)：

$$f = \bar{r}/t \quad (\text{C.1})$$

式中：

f —硫化仪模体摆动频率，Hz；

$\bar{r}$ —转速表3次测量的算术平均值，r/min；

t —时间常数，60s。

方差和灵敏系数：

由式 (C.1) 得方差传播公式：

$$u_c(f) = \sqrt{c^2 u_1^2(\bar{r}) + c^2 u_2^2(\bar{r})} \quad (\text{C.2})$$

式中：

$u_1(\bar{r})$ —转速测量重复性引入的标准不确定度，r/min；

$u_2(\bar{r})$ —转速表最大允许误差引入的标准不确定度，r/min；

由灵敏系数计算公式：

$$c = \frac{\partial f}{\partial r} = \frac{1}{60s} \approx 0.0167 \text{ s}^{-1} \quad (\text{C.3})$$

C.3 摆动频率测量结果不确定度的评定

C.3.1 不确定度来源

模体摆动频率测量结果的不确定度来源有转速重复性测量引入的不确定度分量和转速表最大允许误差引入的不确定度分量。

C.3.2 重复性测量引入的标准不确定度 $u_1(\bar{r})$

以 1.67Hz 即 100r/min 测量点为例，转速重复测量 10 次，测量数据见表 C.1。

表 C.1 转速 10 次重复测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果/(r/min)	100.11	99.95	100.09	100.12	99.92	100.04	100.13	100.08	100.12	100.07

转速测量值的算术平均值：

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r \approx 100.063 \text{ r/min} \quad (\text{C.4})$$

用贝塞尔公式计算单次测得值的实验标准偏差：

$$s(r_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n-1}} \approx 0.07 \text{ r/min} \quad (\text{C.5})$$

式中:

r_i —第 i 次测量结果, r/min;

$\bar{r}$ —10 次测量结果的算术平均值, r/min;

n —测量次数;

实际测量以 3 次测量的算术平均值作为测量结果, 则重复性测量引入的标准不确定度按下式计算:

$$u_1(\bar{r}) = \frac{s(r_i)}{\sqrt{3}} \approx 0.04 \text{ r/min} \quad (\text{C.6})$$

C.3.3 转速表最大允许误差引入的标准不确定度 $u_2(\bar{r})$

转速表最大允许误差为 $\pm 0.1\%$, 在 100r/min 测量点最大允许误差为 $\pm 0.1\text{r/min}$, 则可能值区间的半宽度 a 为 0.1r/min, 认为其均匀分布, 取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, 则转速表最大允许误差引入的标准不确定度为:

$$u_2(\bar{r}) = \frac{a}{k} = \frac{0.1 \text{ r/min}}{\sqrt{3}} \approx 0.06 \text{ r/min} \quad (\text{C.7})$$

C.3.4 不确定度分量汇总

不确定度分量汇总见表 C.2:

表 C.2 不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度的值	灵敏系数	不确定度分量的值
$u_1(\bar{r})$	重复性测量引入的不确定度	0.04 r/min	0.0167 s ⁻¹	0.0007 Hz
$u_2(\bar{r})$	转速表最大允许误差引入的不确定度	0.06 r/min	0.0167 s ⁻¹	0.001 Hz

C.3.5 合成标准不确定度

认为各输入量间不相关, 则合成的标准不确定度为:

$$u_c(f) = \sqrt{0.0007^2 + 0.001^2} \text{ Hz} \approx 0.0012 \text{ Hz} \quad (\text{C.8})$$

C.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 模体摆动频率测量结果的扩展不确定度为:

$$U(f) = u_c(f) \times k = 0.0012 \text{ Hz} \times 2 \approx 0.003 \text{ Hz} \quad (\text{C.9})$$

附录 D

模体摆动角度误差测量结果不确定度的评定示例

D.1 校准方法

校准方法如本规范 6.2.3。

D.2 测量模型

模体摆动角度误差测量模型见式 (D.1)：

$$\varepsilon = \frac{\alpha - \bar{\alpha}}{\bar{\alpha}} \times 100\% \quad (\text{D.1})$$

$$\bar{\alpha} = \arcsin \frac{\bar{X}}{2L} \quad (\text{D.2})$$

式中：

ε —模体摆动角度误差，%

α —模体摆动角度设定值，°；

$\bar{\alpha}$ —摆动角度 3 次测量的算术平均值，°；

$\bar{X}$ —位移传感器最大最小差值 3 次测量的算术平均值，mm；

L —摆杆测量位置到模体摆动轴中心的距离，本次评定示例中取 200mm。

方差和灵敏系数：

由式 (D.2) 得方差传播公式：

$$u_c(\bar{\alpha}) = \sqrt{c_1^2 u^2(\bar{X}) + c_2^2 u^2(L)} \quad (\text{D.3})$$

式中：

$u(\bar{X})$ —位移测量引入的不确定度，mm；

$u(L)$ —摆杆测量位置到模体摆动轴中心的距离误差引入的不确定度，

mm；

由灵敏系数计算公式：

$$c_1 = \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \bar{X}} = \frac{1}{\sqrt{4L^2 - \bar{X}^2}} \text{ rad/mm}, \quad c_2 = \frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial L} = -\frac{\bar{X}}{L\sqrt{4L^2 - \bar{X}^2}} \text{ mm/rad}$$

D.3 模体摆动角度误差测量结果不确定度的评定

D.3.1 不确定度来源

模体摆动角度测量结果的不确定度来源有位移测量引入的不确定度，包含重复性测量引入的不确定度分量、位移传感器最大允许误差引入的不确定度分量，以及摆杆测量位置到模体摆动轴中心的距离误差引入的不确定度。

D.3.2 位移重复性测量引入的标准不确定度 $u_1(\bar{X})$

以设定摆动角度 0.5° 为例, 重复测量 10 次, 测量数据见表 D.1。

表 D.1 摆动角度 10 次重复测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果/mm	3.491	3.482	3.480	3.475	3.498	3.480	3.497	3.495	3.478	3.477

位移测量值的算术平均值:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X = 3.4853 \text{ mm} \quad (\text{D.4})$$

用贝塞尔公式计算单次测得值的实验标准偏差:

$$s(X_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \approx 0.0089 \text{ mm} \quad (\text{D.5})$$

式中:

X_i —第 i 次测量结果, $^\circ$;

$\bar{X}$ —10 次测量结果的算术平均值, $^\circ$;

n —测量次数;

实际测量以 3 次测量的算术平均值作为测量结果, 则重复性测量引入的标准不确定度按下式计算:

$$u_1(\bar{X}) = \frac{s(X_i)}{\sqrt{3}} \approx 0.0051 \text{ mm} \quad (\text{D.6})$$

D.3.3 位移传感器最大允许误差引入的标准不确定度 $u_2(\bar{X})$

位移传感器最大允许误差为 $\pm 0.01 \text{ mm}$, 则可能值区间的半宽度 a 为 0.01 mm , 认为其均匀分布, 取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, 则位移传感器最大允许误差引入的标准不确定度为:

$$u_2(\bar{X}) = \frac{a}{k} = \frac{0.01 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \approx 0.0058 \text{ mm} \quad (\text{D.7})$$

则位移测量引入的不确定度为:

$$u(\bar{X}) = \sqrt{u_1^2(\bar{X}) + u_2^2(\bar{X})} \approx 0.0077 \text{ mm}$$

D.3.4 摆杆测量位置到模体摆动轴中心的距离误差引入的标准不确定度 $u(L)$

模体摆动轴中心的距离误差为 $\pm 0.2 \text{ mm}$, 则可能值区间的半宽度 a 为 0.2 mm , 认为其均匀分布, 取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$, 则模体摆动轴中心的距离误差引入的标准不确定度为:

$$u(L) = \frac{a}{k} = \frac{0.2 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \approx 0.115 \text{ mm} \quad (\text{D.8})$$

D.3.4 不确定度分量汇总

不确定度分量汇总见表 D.2:

表 D.2 不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度的值	灵敏系数	不确定度分量的值
$u(\bar{X})$	位移测量引入的不确定度	0.0077 mm	c_1	$1.925 \times 10^{-5} \text{ rad}$
$u(L)$	摆杆测量位置到模体摆动轴中心的距离误差引入的不确定度	0.115 mm	c_2	$5.02 \times 10^{-6} \text{ rad}$

D.3.5 合成标准不确定度

认为各输入量间不相关，则合成的标准不确定度为：

$$u_c(\bar{\alpha}) = \sqrt{(1.925 \times 10^{-5})^2 + (5.02 \times 10^{-6})^2} \approx 2 \times 10^{-5} \text{ rad} \quad (\text{D.9})$$

转换为角度单位，则：

$$u_c(\bar{\alpha}) = 2 \times 10^{-5} \times \frac{180}{\pi} \approx 0.001^\circ$$

D.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，模体摆动角度误差测量结果的扩展不确定度为：

$$U(\varepsilon) = \frac{u_c(\bar{\alpha}) \times k}{\alpha} \times 100\% = \frac{0.001^\circ \times 2}{0.5^\circ} \times 100\% = 0.4\% \quad (\text{D.10})$$

附录 E

上、下模体温度示值误差测量结果不确定度的评定示例

E.1 校准方法

校准方法如本规范 6.2.4。

E.2 测量模型

温度示值误差测量模型见式 (E.1)：

$$\Delta T = T - \bar{T} \quad (\text{E.1})$$

式中：

ΔT —上、下模体温度的示值误差，℃；

T —上、下模体温度的显示值，℃；

$\bar{T}$ —温度测量装置3次测量的算术平均值，℃。

方差和灵敏系数：

由式 (E.1) 得方差传播公式：

$$u_c(\Delta T) = \sqrt{c^2 u_1^2(\bar{T}) + c^2 u_2^2(\bar{T}) + c^2 u_3^2(\bar{T})} \quad (\text{E.2})$$

式中：

$u_1(\bar{T})$ —温度重复性测量引入的标准不确定度，℃；

$u_2(\bar{T})$ —温度测量装置修正值不确定度引入的标准不确定度，℃；

$u_3(\bar{T})$ —温度测量装置稳定性引入的标准不确定度，℃；

由灵敏系数计算公式：

$$c = \frac{\partial \Delta T}{\partial \bar{T}} = -1 \quad (\text{E.3})$$

E.3 模腔温度示值误差测量结果不确定度的评定

E.3.1 不确定度来源

温度示值误差测量结果的不确定度来源有重复性测量引入的不确定度分量、温度测量装置修正值不确定度引入的不确定度分量和温度测量装置稳定性引入的不确定度分量。

E.3.2 重复性测量引入的标准不确定度 $u_1(\bar{T})$

以 100℃ 测量点为例，温度重复测量 10 次，测量数据见表 E.1。

表 E.1 温度 10 次重复测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果/℃	100.20	100.22	100.18	100.12	100.16	100.15	100.13	100.17	100.19	100.21

温度测量值的算术平均值：

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T = 100.173 \text{℃} \quad (\text{E.4})$$

用贝塞尔公式计算单次测得值的实验标准偏差：

$$s(T_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}} \approx 0.033\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{E.5})$$

式中：

T_i —第 i 次测量结果， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\bar{T}$ —10 次测量结果的算术平均值， $^{\circ}\text{C}$ ；

n —测量次数；

实际测量以 3 次测量的算术平均值作为测量结果，则重复性测量引入的标准不确定度按下式计算：

$$u_1(\bar{T}) = \frac{s(T_i)}{\sqrt{3}} \approx 0.02\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{E.6})$$

E.3.3 温度测量装置修正值不确定度引入的标准不确定度 $u_2(\bar{T})$

温度测量装置修正值不确定度为 $U=0.04^{\circ}\text{C}$ ， $k=2$ ，则温度测量装置修正值不确定度引入的标准不确定度为：

$$u_2(\bar{T}) = \frac{U}{k} = \frac{0.04^{\circ}\text{C}}{2} = 0.02\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{E.7})$$

E.3.4 温度测量装置稳定性引入的标准不确定度 $u_3(\bar{T})$

温度测量装置相邻两次测量值最大变化为 0.10°C ，则可能值区间的半宽度 a 为 $0.10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，认为其均匀分布，取包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，则温度测量装置稳定性引入的标准不确定度为：

$$u_3(\bar{T}) = \frac{a}{k} = \frac{0.10^{\circ}\text{C}}{\sqrt{3}} \approx 0.058\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (\text{E.8})$$

E.3.5 不确定度分量汇总

不确定度分量汇总见表 E.2：

表 E.2 不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度的值	灵敏系数	不确定度分量的值
$u_1(\bar{T})$	重复性测量引入的不确定度	$0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$	-1	$0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$
$u_2(\bar{T})$	温度测量装置修正值不确定度引入的不确定度	$0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$	-1	$0.02\text{ }^{\circ}\text{C}$
$u_3(\bar{T})$	温度测量装置稳定性引入的不确定度	$0.058\text{ }^{\circ}\text{C}$	-1	$0.058\text{ }^{\circ}\text{C}$

E.3.6 合成标准不确定度

认为各输入量间不相关，则合成的标准不确定度为：

$$u_c(\Delta T) = \sqrt{(0.02^\circ\text{C})^2 + (0.02^\circ\text{C})^2 + (0.058^\circ\text{C})^2} \approx 0.06^\circ\text{C} \quad (\text{E.8})$$

E.3.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，温度示值误差测量结果的扩展不确定度为：

$$U(\Delta T) = u_c(\Delta T) \times k = 0.06^\circ\text{C} \times 2 \approx 0.1^\circ\text{C} \quad (\text{E.9})$$

附录 F

转矩示值误差测量结果不确定度的评定示例

F.1 校准方法

校准方法如本规范 6.2.6。

F.2 测量模型

转矩示值误差测量模型见式 (F.1)：

$$\delta = \frac{N - \bar{N}}{\bar{N}} \times 100\% \quad (\text{F.1})$$

式中：

δ —转矩示值误差，%；

N —硫化仪转矩示值，dN·m；

$\bar{N}$ —转矩测量装置3次测量值的算术平均值，dN·m。

上式计算的误差为相对误差，则转矩示值绝对误差为：

$$\Delta N = N - \bar{N} \quad (\text{F.2})$$

方差和灵敏系数：

由式 (F.1) 得方差传播公式：

$$u_c(\Delta N) = \sqrt{c^2 u_1^2(\bar{N}) + c^2 u_2^2(\bar{N})} \quad (\text{F.3})$$

式中：

$u_1(\bar{N})$ —重复性测量引入的标准不确定度，dN·m；

$u_2(\bar{N})$ —扭矩仪最大允许误差引入的标准不确定度，dN·m；

由灵敏系数计算公式：

$$c = \frac{\partial \Delta N}{\partial \bar{N}} = -1 \quad (\text{F.4})$$

F.3 转矩示值误差测量结果不确定度的评定

F.3.1 不确定度的来源

转矩示值误差测量结果的不确定度来源有重复性测量引入的不确定度分量和扭矩仪最大允许误差引入的不确定度分量。

F.3.2 重复性测量引入的标准不确定度 $u_1(\bar{N})$

以 24.00dN·m 测量点为例，重复测量 10 次，测量数据见表 F.1。

表 F.1 转矩 10 次重复测量数据

第 i 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量结果/ dN·m	24.04	23.98	24.02	23.99	24.02	24.01	24.03	24.02	24.02	23.99

转矩测量值的算术平均值：

$$\bar{N} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N = 24.012 \text{ dN}\cdot\text{m} \quad (\text{F.5})$$

用贝塞尔公式计算单次测得值的实验标准偏差：

$$s(N_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N})^2}{n-1}} \approx 0.019 \text{ dN}\cdot\text{m} \quad (\text{F.6})$$

式中：

N_i —第 i 次测量结果， $\text{dN}\cdot\text{m}$ ；

$\bar{N}$ —10 次测量结果的算术平均值， $\text{dN}\cdot\text{m}$ ；

n —测量次数；

实际测量以 3 次测量的算术平均值作为测量结果，则重复性测量引入的标准不确定度按下式计算：

$$u_1(\bar{N}) = \frac{s(N_i)}{\sqrt{3}} \approx 0.01 \text{ dN}\cdot\text{m} \quad (\text{F.7})$$

F.3.3 扭矩仪最大允许误差引入的标准不确定度 $u_2(\bar{N})$

扭矩仪最大允许误差为 $\pm 0.1\%$ ，则在 $24.00 \text{ dN}\cdot\text{m}$ 校准点的最大允许误差为 $\pm 0.024 \text{ dN}\cdot\text{m}$ ，可能值区间的半宽度 a 为 $0.024 \text{ dN}\cdot\text{m}$ ，认为其均匀分布，包含因子 k 为 $\sqrt{3}$ ，则扭矩仪最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u_2(\bar{N}) = \frac{a}{k} = \frac{0.024 \text{ d}\cdot\text{Nm}}{\sqrt{3}} \approx 0.014 \text{ dN}\cdot\text{m} \quad (\text{F.8})$$

F.3.4 不确定度分量汇总

不确定度分量汇总见表 F.3：

表 F.3 不确定度分量表

不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度的值	灵敏系数	不确定度分量的值
$u_1(\bar{N})$	重复性测量引入的不确定度	$0.01 \text{ dN}\cdot\text{m}$	-1	$0.01 \text{ dN}\cdot\text{m}$
$u_2(\bar{N})$	扭矩仪最大允许误差引入的不确定度	$0.014 \text{ dN}\cdot\text{m}$	-1	$0.014 \text{ dN}\cdot\text{m}$

F.3.5 合成标准不确定度

认为各输入量间不相关，则合成的标准不确定度为：

$$u_c(\Delta N) = \sqrt{(0.01 \text{ d}\cdot\text{Nm})^2 + (0.014 \text{ d}\cdot\text{Nm})^2} \approx 0.017 \text{ dN}\cdot\text{m} \quad (\text{F.9})$$

F.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，转矩示值误差测量结果的相对扩展不确定度为：

$$U(\delta) = \frac{u_c(\Delta N) \times k}{\bar{N}} \times 100\% = \frac{0.017d \cdot Nm \times 2}{24.012d \cdot Nm} \times 100\% \approx 0.2\% \quad (F.10)$$

