

天津市地方计量技术规范

JJF (津) 166-2026

碟式液限仪校准规范

Calibration Specification for Casagrande Liquid Limit device

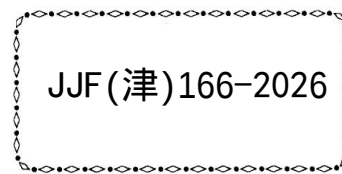
2026-06-15发布

2026-09-15实施

天津市市场监督管理委员会 发布

碟式液限仪校准规范

Calibration Specification for
Casagrande Liquid Limit device



归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市交通科学研究院

天津交科检测科技有限公司

天津市交通运输综合行政执法总队工程质量安全支队

参加起草单位：中能建路桥工程有限公司

本规范委托天津市交通科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

户伟华（天津交科检测科技有限公司）

王思丹（天津市交通科学研究院）

范文皓（天津交科检测科技有限公司）

满 伟（天津市交通运输综合行政执法总队工程质量安全支队）

吴 迪（天津市交通运输综合行政执法总队工程质量安全支队）

参加起草人：

于太伏（天津市交通科学研究院）

刘 波（中能建路桥工程有限公司）

姜建楠（天津交科检测科技有限公司）

陈 光（天津交科检测科技有限公司）

曾凡姣（天津交科检测科技有限公司）

目 录

引 言.....	(III)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 概述.....	(1)
4 计量特性.....	(3)
4.1 底座硬度.....	(3)
4.2 铜碟、划槽刀 A 和划槽刀 B 的表面粗糙度.....	(3)
4.3 铜碟与底座之间落距.....	(3)
4.4 电动碟式液限仪铜碟坠击频次.....	(3)
4.5 铜碟内半径.....	(3)
4.6 划槽刀 A 尺寸.....	(3)
4.7 划槽刀 A 弯头角度.....	(3)
4.8 划槽刀 B 尺寸.....	(3)
4.9 划槽刀 B 刀刃角度.....	(3)
4.10 铜碟质量（含连接块）.....	(3)
5 校准条件.....	(3)
5.1 环境条件.....	(3)
5.2 校准用计量器具及技术要求.....	(4)
6 校准项目及校准方法.....	(4)
6.1 外观检查.....	(4)
6.2 底座硬度.....	(4)
6.3 铜碟、划槽刀 A 和划槽刀 B 的表面粗糙度.....	(4)
6.4 铜碟与底座之间落距.....	(5)
6.5 电动碟式液限仪铜碟坠击频次.....	(5)
6.6 铜碟内半径.....	(5)
6.7 划槽刀 A 尺寸.....	(5)

6.8 划槽刀 A 弯头角度.....	(5)
6.9 划槽刀 B 尺寸.....	(6)
6.10 划槽刀 B 刀刃角度.....	(6)
6.11 铜碟质量 (含连接块)	(6)
7 校准结果表达.....	(6)
8 复校时间间隔.....	(7)
附录 A 碟式液限仪校准记录参考格式.....	(8)
附录 B 校准证书内页格式.....	(11)
附录 C 测量不确定度评定方法及示例.....	(12)

引 言

本规范以 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》、JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》为基础性系列规范进行编写。

本规范为首次发布。

碟式液限仪校准规范

1 范围

本规范适用于土工试验中测定粘性土液限的碟式液限仪的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 21997.1-2008 土工试验仪器 液限仪 第1部分：碟式液限仪

JTG 3430-2020 公路土工试验规程 T 0170-2007 液限碟式仪法

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

碟式液限仪是用装有土样的铜碟坠击橡胶底座的方式测量粘性土液限的仪器。

碟式液限仪是通过标准化冲击作用，使铜碟内的土样产生流动变形，令预先划制的标准沟槽逐渐合拢，并根据含水率计算公式得出土样由流动状态转变为塑性状态的界限含水率，进而测定粘性土的液限。

碟式液限仪分为手动和电动两种，手动碟式液限仪由底座、铜碟、连接块、凸轮、转轴、支架、滑动板、手摇柄、划槽刀 A、划槽刀 B 组成，电动碟式液限仪由底座、铜碟、连接块、凸轮、电动机、链条、转轴、计数器、滑动板、支架、划槽刀 A、划槽刀 B 等组成，结构如图 1、图 2、图 3 和图 4 所示。

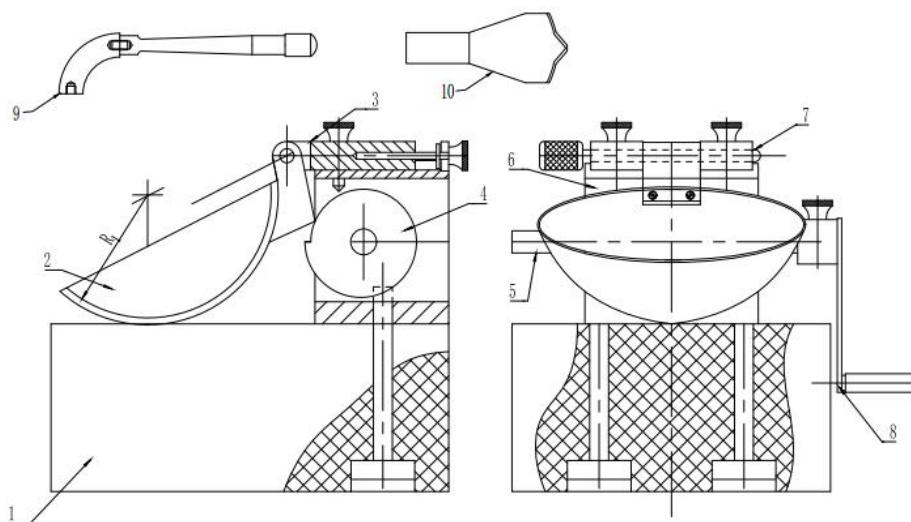


图 1 手动碟式液限仪结构示意图

1—底座；2—铜碟；3—连接块；4—凸轮；5—转轴；6—支架；7—滑动板；8—手摇柄；

9—划槽刀 A；10—划槽刀 B

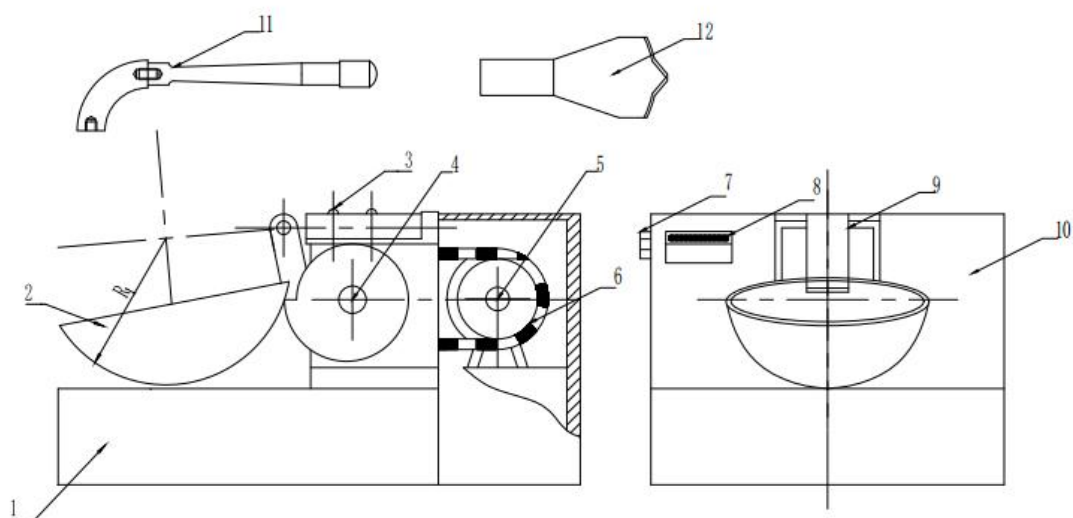


图 2 电动碟式液限仪结构示意图

1—底座；2—铜碟；3—连接块；4—凸轮；5—电动机；6—链条；7—转轴；8—计数器；9—滑动板；

10—支架；11—划槽刀 A；12—划槽刀 B

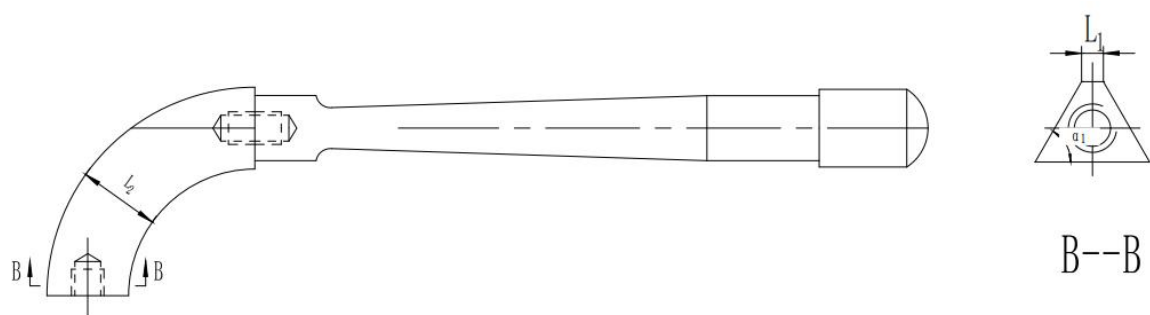


图 3 划槽刀 A 结构示意图

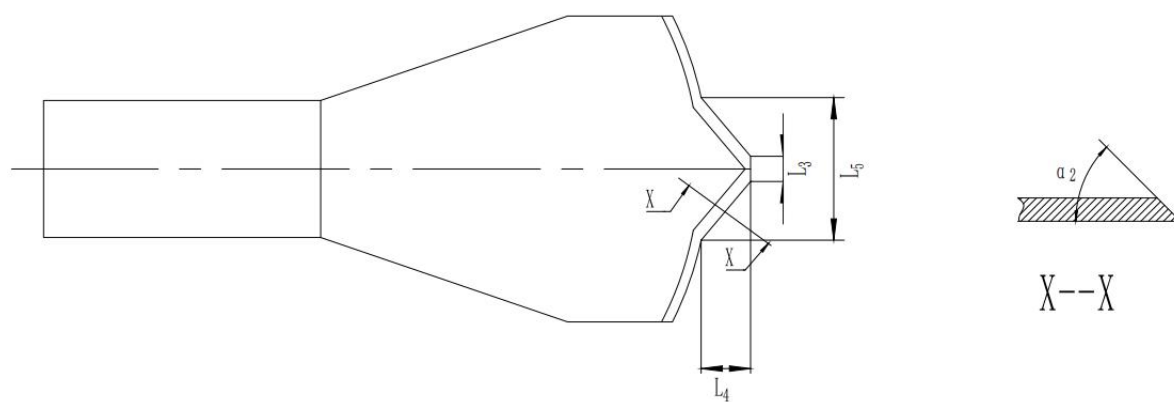


图 4 划槽刀 B 结构示意图

4 计量特性

4.1 底座硬度

底座硬度：（97~100）HA。

4.2 铜碟、划槽刀 A 和划槽刀 B 的表面粗糙度

铜碟、划槽刀 A 和划槽刀 B 的表面粗糙度不大于 $Ra3.2\ \mu\text{m}$ 。

4.3 铜碟与底座之间落距

铜碟与底座之间落距：（10±0.2）mm。

4.4 电动碟式液限仪铜碟坠击频次

电动碟式液限仪铜碟坠击频次：（2±0.3）次/s。

4.5 铜碟内半径

铜碟内半径 R_1 ：（54±0.5）mm。

4.6 划槽刀 A 尺寸

a) 弯头顶部宽 L_1 ：（2±0.5）mm；

b) 弯头厚度 L_2 ：（10±0.5）mm。

4.7 划槽刀 A 弯头角度

划槽刀 A 弯头角度 α_1 ：（60±1）°。

4.8 划槽刀 B 尺寸

a) 顶部宽 L_3 ：（2±0.5）mm；

b) 刀尖高 L_4 ：（8±0.5）mm；

c) 刀尖宽 L_5 ：（11±0.5）mm。

4.9 划槽刀 B 刀刃角度

划槽刀 B 刀刃角度 α_2 ：（45±1）°。

4.10 铜碟质量（含连接块）

铜碟质量（含连接块）：（200±2）g。

注：上述计量特性不用于合格性判定，仅供参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

a) 环境温度：（23±5）℃；

b) 相对湿度: $\leq 85\%$ 。

5.2 校准用计量器具及技术要求

a) A型邵氏硬度计: 测量范围 (10~100) HA, 允许偏差 $\pm 80\text{mN}$;

b) 表面粗糙度比较样块: 最大允许误差 $+12\% \sim -17\%$;

c) 专用量块: 厚度分别为 $10.20_{-0.02}^0\text{mm}$ 、 $9.80_0^{+0.02}\text{mm}$;

d) 电子秒表: 测量范围 (0~10) min, 最大允许误差 $\pm 0.07\text{s}$;

e) 通用卡尺: 测量范围 (0~200) mm, 最大允许误差 $\pm 0.03\text{mm}$;

f) 深度卡尺: 测量范围 (0~200) mm, 最大允许误差 $\pm 0.03\text{mm}$;

g) 数显角度尺: 测量范围 (0~360)°, 最大允许误差 $\pm 4'$;

h) 电子天平: 测量范围不小于 250g, 分度值 0.01g, 准确度等级 II 级。

注: 允许使用其他满足测量不确定度要求的校准器具。

6 校准项目及校准方法

6.1 外观检查

通过目测检查碟式液限仪的外观, 不应有影响计量特性的外观缺陷; 击数采取自动计数时, 计数器应具有3位数, 铜碟坠击1次时, 应能自动计数1次。

6.2 底座硬度

手持硬度计, 在与铜碟相接触的底座平面上均匀分布 5 个点, 如图 5 所示, 迅速平稳地将压针垂直压入底座, 所施加的力刚好使压足与底座平面完全接触, 在 1s 内读数, 5 次测量结果的最小值作为测量结果。

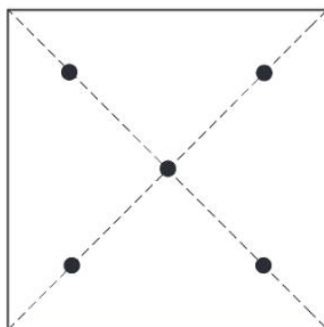


图 5 硬度值测量位置和测量点数示意图

6.3 铜碟、划槽刀A和划槽刀B的表面粗糙度

用表面粗糙度比较样块进行比较测量。

6.4 铜碟与底座之间落距

用专用量块检查,将铜碟调整至最高点,把专用量块放在铜碟最低点与底座平面之间,允许偏差的上限作为止端,允许偏差的下限作为通端。

6.5 电动碟式液限仪铜碟坠击频次

启动电动碟式液限仪,使用电子秒表分别计时 8s 和 16s,并同时人工记录铜碟坠击次数,按照公式(1)计算铜碟坠击频次,取最大的坠击频次为铜碟坠击频次的测量结果。

$$Y = \frac{y}{t} \quad (1)$$

式中:

Y —铜碟坠击频次, 次/s;

y —铜碟坠击次数, 次;

t —电子秒表记录时间, s。

6.6 铜碟内半径

用通用卡尺测量铜碟上平面的内直径 D , 每顺时针转动约 120° 测量 1 次, 用深度卡尺测量铜碟内最低点至铜碟上平面的距离 h , 按照公式(2)和(3)计算铜碟内半径 R_1 , 按照上述步骤, 重复测量 3 次, 取 3 次测量值的平均值作为测量结果。

$$R_1 = \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + (R_1 - h)^2} \quad (2)$$

公式(2)可以简化为公式(3):

$$R_1 = \frac{D^2}{8h} + \frac{h}{2} \quad (3)$$

式中:

R_1 —铜碟内半径, mm;

D —铜碟上平面的内直径, mm;

h —铜碟内最低点至铜碟上平面的距离, mm。

6.7 划槽刀 A 尺寸

用通用卡尺测量划槽刀 A 的弯头顶部宽 L_1 、弯头厚度 L_2 , 重复测量 3 次, 取 3 次测量结果的平均值作为测量结果。

6.8 划槽刀 A 弯头角度

用数显角度尺直接测量划槽刀 A 非顶部两个角的弯头角度 α_1 , 取偏差最大的弯头角度

为划槽刀A的弯头角度 α_1 的测量结果。

6.9 划槽刀 B 尺寸

用通用卡尺测量划槽刀 B 的顶部宽 L_3 、刀尖高 L_4 、刀尖宽 L_5 ，重复测量 3 次，取 3 次测量结果的平均值作为测量结果。

6.10 划槽刀 B 刀刃角度

用数显角度尺直接测量划槽刀B的刀刃角度 α_2 ，在刀刃上均匀选取3个点，每个点测量1次，取偏差最大的弯头角度为划槽刀B的刀刃角度 α_2 的测量结果。

6.11 铜碟质量（含连接块）

用电子天平称量铜碟（含连接块）质量，重复测量 3 次，取 3 次测量结果的平均值为铜碟质量的测量结果。

7 校准结果表达

经校准后，出具校准证书，校准证书内容应至少包含：

- 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) 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) 被校对象的描述和明确标识；
- 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，应说明被校对象的接收日期；
- h) 如果与校准结果的有效性或应用有关时，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) 校准证书和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。

8 复校时间间隔

建议校准时间间隔不超过 12 个月。

由于复校时间的间隔是由碟式液限仪的使用情况、使用者、仪器本身质量等因素决定，因此用户可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

碟式液限仪校准记录参考格式

证书编号: _____

控制编号: _____

样品 信息	委托单位								
	样品名称				出厂编号				
	准确度等级				型号/规格				
	样品来源		☐ 送样 ☐ 现场 ☐ 其他		测量范围				
	样品接收时间		年 月 日		生产厂家				
校准依据									
本次校准所使用的主要计量器具									
名称	型号规格	出厂编号	测量范围	生产厂家	不确定度/准确度等级/最大允许误差	计量器具证书编号	有效期至	溯源机构	
☐									
☐									
☐									
☐									
☐									
☐									
☐									
☐									
☐									
☐									
环境 条件	测量地点								
	测量时间		年 月 日		温度(℃)				
	其 他				湿度(%RH)				

第 页 共 页

校准项目		技术要求	校准结果					$U, k=2$
1	外观	/						/
2	底座硬度/HA	(97~100)	1	2	3	4	5	/
			最小值					
3	铜碟、划槽刀 A、划槽刀 B 的表面粗糙度	不大于 $Ra3.2$ μm						/
4	铜碟与底座之间落距/mm	(10 ± 0.2)						/
5	电动碟式液限仪铜碟坠击频次/次/s	(2±0.3)	8s					
			16s					
			频次最大值					
6	铜碟内半径/mm	(54±0.5)	铜碟上平面的内直径 D					
			铜碟内最低点至铜碟上平面的距离 h					
			测量值					
			平均值					

7	划槽刀 A 尺寸/mm	弯头 顶部宽	(2±0.5)		测量值					
					平均值					
		弯头厚度	(10±0.5)		测量值					
					平均值					
8	划槽刀 A 弯头角度 /°	(60±1)		角 1	测量值					
				角 2	测量值					
				偏差最大值						
9	划槽刀 B 尺寸/mm	顶部宽	(2±0.5)		测量值					
					平均值					
		刀尖高	(8±0.5)		测量值					
					平均值					
		刀尖宽	(11±0.5)		测量值					
					平均值					
10	划槽刀 B 刀刃角度/°		(45±1)		测量值					
					偏差最大值					
11	铜碟质量 (含连接块)/g		(200±2)		测量值					
					平均值					
备注										
校准人员					核验人员					

附录 B

校准证书内页格式

校准项目		校准结果	$U, k=2$
外观			/
底座硬度/HA			/
铜碟、划槽刀 A、划槽刀 B 的表面粗糙度/ μm			/
铜碟与底座之间落距/mm			/
电动碟式液限仪铜碟坠击频次/次/s			
铜碟内半径/mm			
划槽刀 A 尺寸 /mm	弯头顶部宽		
	弯头厚度		
划槽刀 A 弯头角度/ $^{\circ}$			
划槽刀 B 尺寸/mm	顶部宽		
	刀尖高		
	刀尖宽		
划槽刀 B 刀刃角度/ $^{\circ}$			
铜碟质量（含连接块）/g			

附录 C

测量不确定度评定方法及示例

C.1 概述

C.1.1 校准环境

环境温度：(23±5)℃；相对湿度：≤85%。

C.1.2 测量对象

土工试验中测定粘性土液限的碟式液限仪。

C.2 电动碟式液限仪铜碟坠击频次的不确定度评定

C.2.1 校准用标准器

电子秒表：范围 1s~1h、1d，最大允许误差±0.07s。

C.2.2 测量方法

启动电动碟式液限仪，使用电子秒表分别计时 8s 和 16s，并同时人工记录铜碟坠击次数，按照公式计算铜碟坠击频次，取最大的坠击频次为铜碟坠击频次的测量结果。

C.2.3 测量模型

碟式液限仪铜碟坠击频次的测量模型：

$$Y = \frac{y}{t} \quad (\text{C.1})$$

式中：

Y —铜碟坠击频次，次/s；

y —铜碟坠击次数，次；

t —电子秒表记录时间，s。

C.2.4 方差和灵敏系数

方差：

$$u_c^2(Y) = c_1^2 u^2(y) + c_2^2 u^2(t) \quad (\text{C.2})$$

灵敏系数：

$$c_y = \frac{\partial (Y)}{\partial y} = \frac{1}{t}, \quad c_t = \frac{\partial (Y)}{\partial t} = -\frac{y}{t^2} \quad (\text{C.3})$$

C.2.5 不确定度评定

C.2.5.1 测得值重复性引入的标准不确定度 u_1

在相同条件下对某碟式液限仪计时 8s 时的铜碟坠击频次进行 10 次重复测量,测量数据见表 C.1。

表 C.1 铜碟坠击频次测量数据

校准 次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
坠击 次数 (次)	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16

由测量数据计算单次试验标准差为试验的标准偏差为:

$$s=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y-\bar{Y})^2}{n-1}}=0\text{次}$$

实际工作时以 1 次测量结果作为校准结果,故实测值重复性引入的标准不确定度分量为:

$$u_1=s=0\text{ 次}$$

C.2.5.2 电子秒表最大允许误差引入的标准不确定度 u_2

电子秒表的最大允许误差为±0.07s,按均匀分布处理,取包含因子 $k=\sqrt{3}$,则标准不确定度 u_2 为:

$$u_2=\frac{0.07}{\sqrt{3}}=0.04\text{s}$$

C.2.5.3 标准不确定度汇总

表 C.2 铜碟坠击频次的标准不确定度汇总表

标准不确定度 分量 u_i	不确定度来源	标准 不确定度	灵敏系数	标准不确定度 分量
u_1	测量重复性引入	0 次	1s^{-1}	0 次/s
u_2	电子秒表的最大允许误差引入	0.04s	$-\text{次}/\text{s}^2$	0.04 次/s

C.2.6 合成标准不确定度 u_c

输入量 u_1 和 u_2 彼此独立不相关,故碟式液限仪铜碟坠击频次合成标准不确定度为:

$$u_c=\sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2}=\sqrt{0.04^2}\approx 0.04\text{ 次/s}$$

C.2.7 扩展不确定度 U

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U=ku_c=2\times 0.04=0.08 \text{ 次/s}$$

C.3 划槽刀 A 弯头顶部宽的不确定度评定

C.3.1 校准用标准器

数显卡尺：范围（0~200）mm，分度值 0.01mm，最大允许误差 $\pm 0.03\text{mm}$ 。

C.3.2 测量方法

用通用卡尺测量划槽刀 A 的弯头顶部宽 L_1 、弯头厚度 L_2 ，重复测量 3 次，取 3 次测量结果的平均值作为测量结果。

用通用卡尺测量划槽刀 B 的顶部宽 L_3 、刀尖高 L_4 、刀尖宽 L_5 ，重复测量 3 次，取 3 次测量结果的平均值作为测量结果。

C.3.3 测量模型

划槽刀 A 弯头顶部宽的测量模型：

$$L=l \quad (\text{C.4})$$

式中：

L —划槽刀 A 弯头顶部宽测量结果，mm；

l —数显卡尺测得的划槽刀 A 弯头顶部宽的尺寸值，mm。

C.3.4 方差和灵敏系数

方差：

$$u_c^2(L)=c^2 u^2(l) \quad (\text{C.5})$$

灵敏系数：

$$c=\frac{\partial L}{\partial l}=1$$

C.3.5 不确定度评定

C.3.5.1 测得值重复性引入的标准不确定度 u_1

下面以划槽刀 A 弯头顶部宽 L_1 为示例。在相同条件下对某碟式液限仪的划槽刀 A 弯头顶部宽 L_1 进行 10 次重复测量，测量数据见表 C.3。

表 C.3 划槽刀 A 弯头顶部宽测量数据

校准次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (mm)	1.98	2.012	1.99	2.01	2.01	2.01	2.00	2.00	1.99	1.99

由测量数据计算单次试验标准差为试验的标准偏差为:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n-1}} = 0.011\text{mm}$$

实际工作时以 3 次测量的算术平均值作为校准结果,故实测值重复性引入的标准不确定度分量为:

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.006\text{mm}$$

C.3.5.2 数显卡尺最大允许误差引入的标准不确定度 u_2

数显卡尺的最大允许误差为 $\pm 0.03\text{mm}$,按均匀分布处理,取包含因子 $k=\sqrt{3}$,则标准不确定度 u_2 为:

$$u_2 = \frac{0.03}{\sqrt{3}} = 0.017\text{mm}$$

C.3.5.3 标准不确定度汇总

表 C.4 划槽刀 A 弯头顶部宽的不确定度汇总表

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	标准不确定度/mm
u_1	测量重复性引入	0.006
u_2	数显卡尺的最大允许误差引入	0.017

C.3.6 合成标准不确定度 u_c

输入量 u_1 、 u_2 彼此独立不相关,故碟式液限仪划槽刀 A 弯头顶部宽的合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.006^2 + 0.017^2} = 0.018\text{mm}$$

C.3.7 扩展不确定度 U

取包含因子 $k=2$,则扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 2 \times 0.018 \approx 0.04\text{mm}$$

同理,取包含因子 $k=2$,划槽刀 A 的弯头顶部宽 L_1 、弯头厚度 L_2 ,划槽刀 B 的顶部宽

L_3 、刀尖高 L_4 、刀尖宽 L_5 的扩展不确定度为:

$$U=0.04\text{mm}$$

C.4 划槽刀 A 弯头角度的不确定度评定

C.4.1 校准用标准器

数显角度尺: 范围 (0~360)°, 最大允许误差 $\pm 6'$ 。

C.4.2 测量方法

用数显角度尺直接测量划槽刀 A 非顶部两个角的弯头角度 α_1 , 取偏差最大的弯头角度为划槽刀 A 的弯头角度 α_1 的测量结果。

用数显角度尺直接测量划槽刀 B 的刀刃角度 α_2 , 在刀刃上均匀选取 3 个点, 每个点测量 1 次, 取偏差最大的弯头角度为划槽刀 B 的刀刃角度 α_2 的测量结果。

C.4.3 测量模型

划槽刀 A 弯头角度的测量模型:

$$A = \alpha \quad (\text{C.6})$$

式中:

A —划槽刀 A 弯头角度测量结果, °;

α —数显角度尺测得的角度值, °。

C.4.4 方差和灵敏系数

方差:

$$u_c^2(A) = c^2 u^2(\alpha) \quad (\text{C.7})$$

灵敏系数:

$$c = \frac{\partial A}{\partial \alpha} = 1$$

C.4.5 不确定度评定

C.4.5.1 测得值重复性引入的标准不确定度 u_1

下面以划槽刀 A 的弯头角度 α_1 为示例。在相同条件下对某碟式液限仪的划槽刀 A 的弯头角度 α_1 进行 10 次重复测量, 测量数据见表 C.5。

表 C.5 划槽刀 A 的弯头角度测量数据

校准 次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (')	60° 30'	60° 31'	60° 30'	60° 30'	60° 30'	60° 30'	60° 31'	60° 31'	60° 30'	60° 30'

由测量数据计算单次试验标准差为试验的标准偏差为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}} = 0.483'$$

实际工作时以 1 次测量的算术平均值作为校准结果，故实测值重复性引入的标准不确定度分量为：

$$u_1 = s = 0.5'$$

C.4.5.2 数显角度尺最大允许误差引入的标准不确定度 u_2

数显角度尺的最大允许误差为 $\pm 4'$ ，按均匀分布处理，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则标准不确定度 u_2 为：

$$u_2 = \frac{4}{\sqrt{3}} = 2.3'$$

C.4.5.3 标准不确定度汇总

表 C.6 划槽刀 A 的弯头角度的不确定度汇总表

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	标准不确定度 / '
u_1	测量重复性引入	0.5
u_2	数显角度尺的最大允许误差引入	2.3

C.4.6 合成标准不确定度 u_c

输入量 u_1 、 u_2 彼此独立不相关，故划槽刀 A 的弯头角度 α_1 的合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.5^2 + 2.3^2} = 2.4'$$

C.4.7 扩展不确定度 U

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k u_c = 2 \times 2.4 = 4.8' \approx 5'$$

同理，划槽刀 B 刀刃角度 α_2 的扩展不确定度为：

$$U = 5'$$

C.5 铜碟质量（含连接块）的不确定度评定

C.5.1 校准用标准器

电子天平：范围（0～5100）g，分度值 0.001g，准确度等级 II 级。

C.5.2 测量方法

用电子天平称量铜碟（含连接块）质量，重复测量 3 次，取 3 次测量结果的平均值为铜碟质量（含连接块）的测量结果。

C.5.3 测量模型

铜碟质量（含连接块）的测量模型：

$$M=m \quad (\text{C.8})$$

式中：

M —铜碟质量（含连接块）测量结果，g；

m —电子天平测得的质量值，g。

C.5.4 方差和灵敏系数

方差：

$$u_c^2(M) = c^2 u^2(m) \quad (\text{C.9})$$

灵敏系数：

$$c = \frac{\partial M}{\partial m} = 1$$

C.5.5 不确定度评定

C.5.5.1 测得值重复性引入的标准不确定度 u_1

在相同条件下对某碟式液限仪的铜碟质量进行 10 次重复测量，测量数据见表 C.7。

表 C.7 铜碟质量（含连接块）测量数据

校准 次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量 值 (g)	201.36 7	201.36 9	201.36 7	201.36 8	201.36 9	201.36 9	201.36 9	201.36 7	201.36 9	201.36 8

由测量数据计算单次试验标准差为试验的标准偏差为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k - \bar{k})^2}{n-1}} = 0.001\text{g}$$

实际工作时以 3 次测量的算术平均值作为校准结果，故实测值重复性引入的标准不确定

定度分量为:

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.0006\text{g}$$

C. 5. 5. 2 电子天平最大允许误差引入的标准不确定度 u_2

电子天平的最大允许误差: $\pm 15\text{mg}$, 按均匀分布处理, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_2 = \frac{0.015}{\sqrt{3}} = 0.0087\text{g}$$

C. 5. 5. 3 标准不确定度汇总

表 C. 8 铜碟质量 (含连接块) 的不确定度汇总表

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	标准不确定度/g
u_1	测量重复性引入	0.0006
u_2	电子天平的最大允许误差引入	0.0087

C. 5. 6 合成标准不确定度 u_c

输入量 u_1 、 u_2 彼此独立不相关, 故铜碟质量 (含连接块) 的合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = \sqrt{0.0006^2 + 0.0087^2} = 0.009\text{g}$$

C. 5. 7 扩展不确定度 U

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 2 \times 0.009 = 0.018 \approx 0.02\text{g}$$

C. 6 铜碟内半径的不确定度评定

C. 6. 1 校准用标准器

a) 数显卡尺: 范围 (0~200) mm, 分度值 0.01mm, 最大允许误差 $\pm 0.03\text{mm}$;

b) 数显细杆深度卡尺: 范围 (0~200) mm, 分度值 0.01mm, 最大允许误差 $\pm 0.03\text{mm}$, 细杆直径 2mm。

C. 6. 2 测量方法

用通用卡尺测量铜碟上平面的内直径 D , 每顺时针转动约 120° 测量 1 次, 用深度卡尺测量铜碟内最低点至铜碟上平面的距离 h , 按照公式计算铜碟内半径 R_1 , 按照上述步骤, 重复测量 3 次, 取 3 次测量值的平均值作为测量结果。

C. 6. 3 测量模型

铜碟内半径的测量模型:

$$R_1 = \frac{D^2}{8h} + \frac{h}{2} \quad (\text{C.10})$$

式中:

R_1 —铜碟内半径, mm;

D —铜碟上平面的内直径, mm;

h —铜碟内最低点至铜碟上平面的距离, mm。

C.6.4 方差和灵敏系数

方差:

$$u_c^2(R_1) = \left(\frac{\partial R_1}{\partial D}\right)^2 u^2(D) + \left(\frac{\partial R_1}{\partial h}\right)^2 u^2(h) \quad (\text{C.11})$$

灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial R_1}{\partial h} = -\frac{R_1^2}{8h^2} + \frac{1}{2} \quad (\text{C.12})$$

$$c_R = \frac{\partial R_1}{\partial D} = \frac{D}{4h} \quad (\text{C.13})$$

C.6.5 不确定度评定

C.6.5.1 测得值重复性引入的标准不确定度 u_1

在相同条件下对某碟式液限仪的铜碟上平面的内直径和铜碟内最低点至铜碟上平面的距离进行 10 次重复测量, 测量数据见表 C.9。

表 C.9 铜碟内半径测量数据

校准次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (mm)	54.23	54.20	54.23	54.22	54.20	54.19	54.20	54.21	54.22	54.23

由测量数据计算单次试验标准差为试验的标准偏差为:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k - \bar{k})^2}{n-1}} = 0.015 \text{ mm}$$

实际工作时以 3 次测量的算术平均值作为校准结果, 故实测值重复性引入的标准不确定度分量为:

$$u_{(R_1)} = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.009 \text{ mm}$$

C.6.5.2 数显卡尺最大允许误差引入的标准不确定度 u_1

数显卡尺的最大允许误差: $\pm 0.03 \text{ mm}$, 按均匀分布处理, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_D = \frac{0.03}{\sqrt{3}} = 0.017\text{mm}$$

C.6.5.3 数显深度卡尺最大允许误差引入的标准不确定度 u_2

数显深度卡尺的最大允许误差： $\pm 0.03\text{mm}$ ，按均匀分布处理，取包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_h = \frac{0.03}{\sqrt{3}} = 0.017\text{mm}$$

C.6.5.4 标准不确定度汇总

表 C.10 铜碟内半径的不确定度汇总表

标准不确定度分量 u_i	不确定度来源	标准不确定度/mm
$u(R_1)$	测量重复性引入	0.009
u_R	数显卡尺最大允许误差引入的 标准不确定度	0.017
u_h	数显深度卡尺最大允许误差引的 标准不确定度	0.017

C.6.6 合成标准不确定度 u_c

输入量 $u(R_1)$ 、 u_R 、 u_h 彼此独立不相关，故铜碟内半径的合成标准不确定度为：

$$u_c(R_1) = \sqrt{u(R_1)^2 + c_R^2 u_R^2 + c_h^2 u_h^2} = 0.072\text{mm}$$

C.6.7 扩展不确定度 U

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(R_1) = k u_c(R_1) = 2 \times 0.072 = 0.14\text{mm}$$

