

# 河北省地方计量技术规范

JJF(冀) ××-××××

## 橡胶支座动态压剪试验机

### 校准规范

Calibration Specification for Dynamic compression shear testing  
machines for Rubber bearing

(报批稿)

××××-××-××批准

××××-××-×× 实施

河北省市场监督管理局 发布

# 橡胶支座动态压剪试验机 校准规范

JJF (冀) × × × × — × × × ×

**Calibration Specification for Dynamic compression**

**shear testing machines for Rubber bearing**

---

归 口 单 位：河北省市场监督管理局

主要起草单位：衡水市综合检验检测中心

衡水市质量和标准化研究院

参加起草单位：西安市帅奇电器有限公司

恒为检验检测认证（河北）集团有限公司

本规范由衡水市综合检验检测中心负责解释

**本规范主要起草人：**

赵朋朋（衡水市综合检验检测中心）

李 光（衡水市综合检验检测中心）

赵兴国（衡水市质量和标准化研究院）

**参加起草人：**

赵亚广（衡水市综合检验检测中心）

马炳达（衡水市综合检验检测中心）

赵争朝（西安市帅奇电器有限公司）

梁宏达（恒为检验检测认证（河北）集团有限公司）

# 目 录

引 言	II
1. 范围	(1)
2. 引用文件	(1)
3. 概述	(1)
4. 计量特性	(2)
5. 校准条件	(2)
5.1 环境条件	(2)
5.2 校准用设备	(2)
6. 校准项目和校准方法	(3)
6.1 校准前检查	(3)
6.2 零点漂移	(3)
6.3 相对分辨力	(3)
6.4 垂直试验力	(4)
6.5 剪切试验力和转角力	(5)
6.6 位移	(5)
6.7 位移速率	(5)
6.8 应力(力)速率	(6)
6.9 连接板平行度	(6)
7. 校准结果的表达	(7)
8. 复校时间间隔	(7)
附录A 橡胶支座动态压剪试验机校准原始记录格式(参考)	(8)
附录B 橡胶支座动态压剪试验机校准证书内页格式(参考)	(10)
附录C 试验机力值测量结果的不确定度评定示例	(11)
附录D 试验机位移测量结果的不确定度评定示例	(14)
附录E 试验机位移速率测量结果的不确定度评定示例	(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》共同构成支撑校准规范制修订工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

## 橡胶支座动态压剪试验机校准规范

### 1 范围

本规范适用于测量范围垂直试验力测量上限不大于 60000 kN、剪切试验力测量上限不大于 10000 kN 用于桥梁隔震橡胶支座、建筑隔震橡胶支座、桥梁板式橡胶支座、桥梁盆式橡胶支座等力学性能试验用的橡胶支座动态压剪试验机（以下简称试验机）的校准。

### 2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJG 1063 电液伺服万能试验机

GB/T 20688.1—2007 橡胶支座 第 1 部分：隔震橡胶支座试验方法

JT/T 4—2019 公路桥梁板式橡胶支座

JB/T 11582—2013 压剪试验机

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

试验机采用电液液压伺服方式施加压力，具有闭环控制功能，采用计算机测量、控制系统，能实现动态水平试验。试验机主要用于产品或构件动态力学和位移性能试验。

试验机主要包括：水平位移传感器、水平动态作动器、水平测力传感器、支撑板、主机、垂直作动器、垂直力传感器和送料小车等。如图 1 所示。

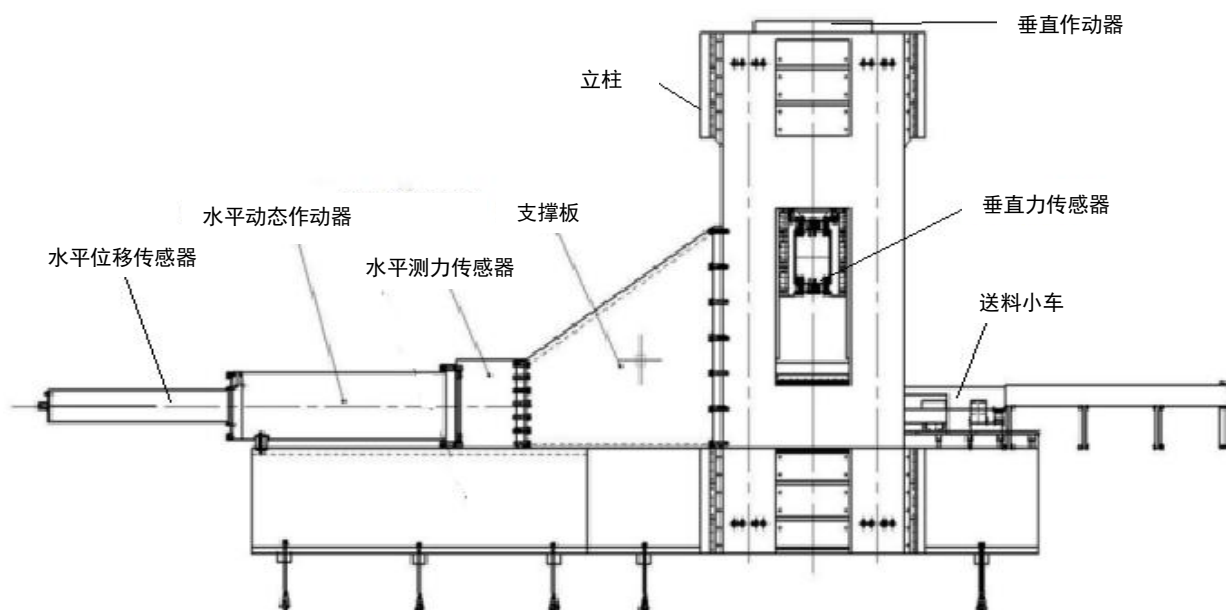


图 1 橡胶支座动态压剪试验机结构示意图

## 4 计量特性

4.1 试验机的计量特性见表1。

表 1 试验机的计量特性

序号	校准项目名称	最大允许误差	重复性
1	零点漂移	±1%	—
2	相对分辨力	0.5%	—
3	垂直试验力	±1%	1%
4	剪切试验力	±1%	1%
5	转角力	±1%	1%
6	位移	±1%	—
7	位移速率	±2%	—
8	应力（力）速率	±2%	—

注：以上技术指标仅供参考，不做符合性判定。

4.2 连接板平行度不超过0.1%。

## 5 校准条件

### 5.1 环境条件

5.1.1 环境温度：（10~35）℃；相对湿度：≤80%；

5.1.2 现场无强电磁场或其他干扰；

5.1.3 电源电压的波动范围应在额定电压的±10%以内；

5.1.4 在稳固的基础上正确安装，水平度为0.2/1000。

### 5.2 校准用设备

校准用设备见表2。

表 2 校准用设备

序号	校准用设备	
	名称	技术要求
1	标准测力仪	级别：不低于0.3级
2	百分表	分度值：0.01mm
3	激光干涉仪	MPE：±（0.03 μm+1.5×10 <sup>-6</sup> L）
4	游标卡尺	分度值：0.02mm

5	电子秒表	分辨力 0.01s
6	位移速度测量仪	MPE: ±0.3%
7	电子秒表	分辨力 0.01s
8	框式水平仪	分度值: 0.02mm/m
9	其他辅助工具	

## 6 校准项目和校准方法

### 6.1 校准前检查

6.1.1 试验机应铭牌标识清楚，内容上应有仪器名称、型号规格、出厂编号、生产厂家、制造日期等。

6.1.2 水平剪切循环频率的测量装置的分辨力应不大于 0.001Hz。

6.1.3 水平剪切循环计数器工作是否正常，计数准确无误。

6.1.4 控制系统应具有应力（力）控制和位移控制两种种闭环控制方式，在不同控制方式转换过程中，试验机运行应平稳，无影响试验结果的振动和过冲。

6.1.5 试验机的控制软件除能实现试验机的全部功能以外，还应具有供校准使用的功能。

### 6.2 零点漂移

试验机预热后，选择试验机最小测量范围一档，调整好零点，在 15 分钟内记录校准最大零点漂移值。零点漂移  $z$  按公式（1）计算。

$$z = \frac{F_{0d}}{F_L} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $z$ ——测力系统的零点漂移；

$F_{0d}$ ——测力系统的最大零点漂移示值；

$F_L$ ——力指示装置各档测量范围的下限值。

### 6.3 相对分辨力

在试验机的电动机和控制系统均启动、标准测力仪不受力的情况下，如果数字式指示装置的示值变动不大于一个增量，则认为其分辨力为一个增量。如果读数变动大于一个增量（在标准测力仪不受力、电动机、驱动机构与控制系统均启动，可测出所有电噪声总和的情况下），则应认为分辨力  $r$  等于变动范围的一半加上一个增量。

试验机的相对分辨力  $a$ ，按公式（2）计算：

$$a = \frac{r}{F_L} \times 100\% \quad (2)$$

式中： $a$ ——试验机力指示装置的相对分辨力；



$r$ ——试验机力指示装置的分辨力;

$F_L$ ——力指示装置各档测量范围的下限值。

#### 6.4 垂直试验力

标准测力仪的安装应保证受力轴线与试验机施力轴线重合,启动加载装置,至少施加三次试验机最大试验力作为预压。每次预压后,标准测力仪和试验机显示器应置零。

试验力每档测量至少五个力值点,并在每档 20%~100%范围内近似等间隔分布;如果不按分档力值校准,校准点应近似选择等于 100%、80%、60%、40%、20%、10%、5%、2%、1%、和 0.5%……直到量程的下限;对于自动换挡的试验机,在每一分辨力不变化的范围内至少选择两个校准点。

计算每个校准点三次测量的算术平均值。并按下列两种方式之一计算示值相对误差  $q$  和重复性  $b$ 。

a) 以试验机的指示装置为准在测力仪上读数时,示值相对误差  $q$  和重复性  $b$  分别按式 (3)、(4) 计算。

$$q = \frac{F_i - \bar{F}}{\bar{F}} \times 100\% \quad (3)$$

$$b = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{\bar{F}} \times 100\% \quad (4)$$

b) 以测力仪为准在试验机的指示装置上读数时,示值相对误差  $q$  和重复性  $b$  分别按式 (5)、(6) 计算。

$$q = \frac{\bar{F}_i - F}{F} \times 100\% \quad (5)$$

$$b = \frac{F_{i\max} - F_{i\min}}{F} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

$q$ ——测力系统的示值相对误差;

$b$ ——测力系统的示值重复性;

$F$ ——递增力时,标准测力仪的示值;

$\bar{F}$ ——对同一测力点, $F$  三次测量的算术平均值;

$F_i$ ——被校试验机力指示装置的进程示值;

$\bar{F}_i$ ——对同一测力点, $\bar{F}$  三次测量的算术平均值;

$F_{\max}$  ——对同一测力点,  $F$  的最大值;

$F_{\min}$  ——对同一测力点,  $F$  的最小值;

$F_{i\max}$  ——对同一力值点,  $F_i$  的最大值;

$F_{i\min}$  ——对同一力值点,  $F_i$  的最小值。

## 6.5 剪切试验力和转角力

剪切试验力和转角力的预压、校准点选取、加载次数等方法参照 6.4。示值相对误差  $q$  和重复性  $b$  按照公式 (3)、(4)、(5)、(6) 计算。

## 6.6 位移

应从位移满量程的 10%起开始校准, 不应少于三个点, 应包括位移的上限, 每个点测量三次。位移示值相对误差  $q_D$  按式 (7) 计算:

$$q_D = \frac{\bar{D}_i - D}{D} \times 100\% \quad (7)$$

式中:

$q_D$  ——位移测量系统示值相对误差;

$\bar{D}_i$  ——三次试验机位移示值平均值;

$D$  ——标准器示值。

## 6.7 位移速率

在系统启动且未施加负载的情况下对本项目进行校准, 校准前应确认行程足够满足对相应速度进行校准所需的位移量。

启动试验机, 设定试验位移加载速率 (上限值和下限值)。用游标卡尺测量工作油缸的初始位移值, 启动试验机同时开启秒表, 工作一定时间关闭试验机同时停止计时, 用卡尺测量工作油缸的停止位移值, 两个位移值之差与时间之比即为加载速率。

或采用位移速度测量仪直接测量位移速率。将油缸置于初始位移位置, 在合适位置安装位移速度测量仪, 试验机匀速运行后开始同步测量时间和位移, 自动计算位移速率测量结果。

在合适测量范围内, 合理选取三个点, 每个测量点测量次数不少于三次。按照本条上述过程重复三次。位移速率示值相对误差按公式 (8) 计算:

$$\delta_v = \frac{V - \bar{V}_i}{\bar{V}_i} \times 100\% \quad (8)$$

式中:

$\delta_v$ ——位移速率示值相对误差;

$\bar{V}_i$ ——三次实测位移速率的算术平均值;

$V$ ——试验机位移速率设定值。

## 6.8 应力(力)速率

在应力(力)-时间曲线上选取校准点,该点宜选在应力(力)速率控制段的10%和90%附近,计算出试验机控制的实际应力(力)速率和其与应力(力)速率设定值的相对误差,每次测量的应力(力)速率 $\delta_i$ ,按公式(9)计算:

$$\delta_i = \frac{F_{ei}}{t_i} \quad (9)$$

式中:

$F_{ei}$ ——同一应力(力)速率,第*i*次测量中10%试验力至90%试验力的差值;

$t_i$ ——同一应力(力)速率,第*i*次测量中10%试验力至90%试验力所需的加力时间。

应力速率误差 $\theta$ 按公式(10)计算:

$$\theta = \frac{\delta_N - \bar{\delta}_i}{\delta_N} \times 100\% \quad (10)$$

式中:

$\bar{\delta}_i$ ——同一应力(力)速率,三次应力(力)速率的算术平均值;

$\delta_N$ ——试验机设定的应力(力)速率值。

## 6.9 连接板平行度

启动试验机,上升工作台,使上、下压板靠近。用水平仪校准下连接板顶面的水平度,并以此面为基准面,将百分表或位移计置于下连接板上,选择五个测量点(可取四角距离板边距离20mm处和中心位置共五点),并使百分表测量头垂直地指向上连接板的底面。用打表法测量上连接板工作面的读数。平行度可按公式(11)计算:

$$\delta_L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L} \times 100\% \quad (11)$$

式中:

$\delta_L$  ——平行度；

$L_{\max}$  ——五次位移测量最大值；

$L_{\min}$  ——五次位移测量最小值；

$L$  ——连接板长度。

## 7 校准结果的表达

校准结果应在校准证书上反映。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) 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和应用有关时，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。

## 8 复校时间间隔

试验机的复校时间间隔建议为 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

## 橡胶支座动态压剪试验机校准原始记录格式 (参考)

委托单位				证书编号		
单位地址				设备名称		
校准地点		温度	相对湿度	规格型号	设备编号	生产厂商
校准人员	校准日期				核验人员	
依据文件						
主标准器具名称	规格型号	设备编号	溯源机构名称/ 证书编号	准确等级或最大允许误差或扩展不确定度	有效期	

1、零点漂移:

2、相对分辨力:

3、垂直试验力

校准点 ( )	示值 ( )			平均值 ( )	相对误差/%	重复性/%	相对扩展不确定度 $U_r (k=2)$
	1	2	3				
...							

4、剪切试验力

校准点 ( )	示值 ( )			平均值 ( )	相对误差/%	重复性/%	相对扩展不确定度 $U_r (k=2)$
	1	2	3				
...							

5、转角力

校准点 ( )	示值 ( )			平均值 ( )	相对误差/%	重复性/%	相对扩展不确定度 $U_r (k=2)$
	1	2	3				
...							

## 6、位移

校准点 ( )	示值 ( )			平均值 ( )	相对误差 /%	相对扩展不确定度 $U_r (k=2)$
	1	2	3			

## 7、位移速率

校准点 ( )	校准项目	实测值			速率平均值 ( )	相对误差 /%	相对扩展不确定度 $U_r (k=2)$
		1	2	3			
	位移 ( )						
	时间 ( )						
	速率 ( )						
	位移 ( )						
	时间 ( )						
	速率 ( )						
	位移 ( )						
	时间 ( )						
	速率 ( )						

## 8、应力(力)速率

校准点 ( )	校准项目	实测值			速率平均值 ( )	相对误差 /%	相对扩展不确定度 $U_r (k=2)$
		1	2	3			
	力 ( )						
	时间 ( )						
	速率 ( )						
	力 ( )						
	时间 ( )						
	速率 ( )						
	力 ( )						
	时间 ( )						
	速率 ( )						

## 9、连接板平行度

测量值 ( )				差值 ( )	连接板长度 ( )	平行度

## 附录 B

## 橡胶支座动态压剪试验机校准证书内页格式 (参考)

## 校准结果

- 1、零点漂移:
- 2、相对分辨力:
- 3、连接板平行度:
- 4、试验力

试验力	相对误差/%	重复性/%	相对扩展不确定度 $U_r (k=2)$
垂直试验力			
剪切试验力			
转角试验力			

- 5、位移

量程 ( )	校准点 ( )	相对误差/%	相对扩展不确定度 $U_r (k=2)$

- 6、位移速率

校准点 ( )	相对误差/%	相对扩展不确定度 $U_r (k=2)$

- 7、应力 (力) 速率

校准点 ( )	相对误差/%

## 附录 C

## 试验机力值测量结果的不确定度评定示例

## C.1 概述

C.1.1 被校对象：支座动态压剪试验机垂向试验力。

C.1.2 测量标准：标准测力仪：0.3级，（1000~10000）kN。

C.1.3 环境条件：温度：（20±2）℃，相对湿度：≤75%。

C.1.4 测量过程：本校准规范。

## C.2 测量模型

## C.2.1 测量模型

$$\text{示值相对误差: } q = \frac{\bar{F}_i - F}{F} \times 100\%$$

式中：

$q$ ——测力系统的示值相对误差；

$F$ ——标准测力仪进程示值；

$\bar{F}_i$ ——试验机在同一检定点三次读数的算术平均值。

## C.2.2 灵敏系数

$$C_1 = \frac{\partial q}{\partial \bar{F}_i} = \frac{1}{F}, \quad C_2 = \frac{\partial q}{\partial F} = -\frac{\bar{F}_i}{F^2}$$

## C.2.3 传播律公式

因为 $\bar{F}_i$ 与 $F$ 相互独立，所以相对误差合成标准不确定度为：

$$u_1(q) = \sqrt{c_1^2 u^2(\bar{F}_i) + c_2^2 u^2(F)} = \sqrt{\left(\frac{1}{F}\right)^2 u^2(\bar{F}_i) + \left(-\frac{\bar{F}_i}{F^2}\right)^2 u^2(F)}$$

考虑到实际测量中，一般 $\bar{F}_i \approx F$ 则上式变为



$$u_r(q) = \sqrt{\left(\frac{1}{F}\right)^2 u^2(\bar{F}_i) + \left(-\frac{\bar{F}_i}{F^2}\right)^2 u^2(F)} \approx \sqrt{\left(\frac{1}{\bar{F}_i}\right)^2 u^2(\bar{F}_i) + \left(-\frac{F}{F^2}\right)^2 u^2(F)} = \sqrt{u_r^2(\bar{F}_i) + u_r^2(F)}$$

### C.3 输入量的标准不确定度评定

#### C.3.1 由试验机读数 $\bar{F}_i$ 引入的相对标准不确定度的评定

试验机读数 $\bar{F}_i$ 引入的相对标准不确定度包括两个来源，测量重复性引入的相对标准不确定度分量 $u_{r1}$ 与试验机显示装置分辨力引入的相对标准不确定度分量 $u_{r2}$ 。

##### C.3.1.1 测量重复性引入的相对标准不确定度分量 $u_{r1}$ 的评定

以支座动态压剪试验机 10000 kN 点力值测量为例，对力值进行三次测量，测量结果分别为 10035 kN、10044 kN、10028 kN，根据极差法（查表得：n=3， $C_n=1.69$ ），计算可得相对不确定度分量：

$$u_{r1} = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{10000 C_n \sqrt{3}} = \frac{10044 - 10028}{29270.8} \approx 0.05\%$$

##### C.3.1.2 分辨力引入的不确定度分量 $u_{r2}$ 的评定

试验机显示装置分辨力为 1 kN，满足均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$ ，则相对不确定度为：

$$u_{r2} = \frac{1}{10000 \times 2\sqrt{3}} \times 100\% \approx 0.003\%$$

#### C.3.2 标准测力仪准确度引入的相对标准不确定度分量 $u_{r3}$ 的评定

0.3 级标准测力仪的最大允许误差为 $\pm 0.3\%$ ，按照均匀分布处理，取  $k = \sqrt{3}$ ，标准测力仪引入的相对标准不确定度为：

$$u_{r3} = \frac{0.3\%}{\sqrt{3}} \approx 0.17\%$$

### C.4 不确定度分量一览表

表A.1 不确定度分量一览表

不确定度分量 $u_r$	不确定度来源	不确定度分量值/%
$u_{r1}$	测量重复性引入的不确定度	0.05
$u_{r2}$	试验机显示装置分辨力引入的不确定度	0.003
$u_{r3}$	标准测力仪准确度引入的不确定度	0.17

## C.5 合成标准不确定度的评定

各输入量之间相互独立，各输入量之间相关，重复性引入的不确定度远大于分辨力，因此：

$$u_r = \sqrt{u_{r1}^2 + u_{r3}^2} = \sqrt{0.05\%^2 + 0.17\%^2} \approx 0.18\%$$

## C.6 扩展不确定度的评定

在试验机力值校准 10000 kN，试验机力值测量结果的相对扩展不确定度：取包含因子  $k = 2$

$$U_r = k u_c = 0.18\% \times 2 = 0.4\%$$

## 附录 D

## 试验机位移测量结果的不确定度评定示例

## D.1 概述

D.1.1 被校对象：试验机位移，以 25mm 为例

D.1.2 测量标准：大量程百分表，（0~50）mm，分度值 0.01mm

D.1.3 环境条件：温度：（20±2）℃，相对湿度：≤75%。

D.1.4 测量过程：本校准规范。

## D.2 测量模型

## D.2.1 测量模型

$$\delta_D = \bar{D}_i - D$$

式中：

$\delta_D$ ——位移示值误差（mm）；

$\bar{D}_i$ ——三次试验机位移平均值（mm）；

$D$ ——百分表标称值（mm）。

## D.2.2 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \delta_D}{\partial D_i} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \delta_D}{\partial D} = -1$$

## D.2.3 传播律公式

因为  $\bar{D}_i$  与  $D$  相互独立，所以合成标准不确定度为：

$$u_c(\delta_D) = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2}$$

## D.3 不确定度来源及标准不确定度分量的评定

D.3.1 测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_1$ ，按 A 类方法进行评定

根据校准方法对试验机位移校准点 25mm 进行了三次重复性测量，重复性实验数据如下：

测量点/mm	1	2	3
25	20.045	20.023	20.031

根据极差法（查表得： $n=3$ ， $C_n=1.69$ ），计算可得相对不确定度分量：

$$u_1 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{C_n \sqrt{3}} = \frac{20.045 - 20.023}{2.93} \approx 0.008\text{mm}$$

#### D.3.2 由百分表引入的不确定度分量 $u_2$

校准选用的 50mm 的大量程百分表，其全量程最大允许误差 MPE： $\pm 0.040\text{mm}$ ，则其半宽为 0.04mm，由百分表最大允许误差引入的不确定度分量估计为均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_2 = \frac{0.04}{\sqrt{3}} \approx 0.023\text{mm}$$

#### D.4 不确定度分量一览表

表B.1 不确定度分量一览表

不确定度分量 $u_i$	不确定度来源	不确定度分量值 (mm)
$u_1$	测量重复性引入的不确定度	0.008
$u_2$	百分表引入的不确定度	0.023

#### D.5 合成标准不确定度的评定

各输入量之间相互独立，互不相关，因此：

$$u_c(\delta_D) = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2} = \sqrt{0.008^2 + 0.023^2} \approx 0.025\text{mm}$$

试验机位移校准点为 25mm，则其相对标准不确定度：

$$u_r = \frac{0.025}{25} \times 100\% \approx 0.10\%$$

#### D.6 相对扩展不确定度的评定

试验机位移校准点为 25mm 时，试验机位移测量结果的相对扩展不确定度：  
取包含因子  $k = 2$

$$U_r = k u_r = 0.10\% \times 2 = 0.20\%$$

## 附录 E

## 试验机位移速率测量结果的不确定度评定示例

## E.1 概述

E.1.1 被校对象：试验机水平压剪位移速度，设定值为 50mm/min。

E.1.2 测量标准：游标卡尺：(0~300) mm/0.02mm；

电子秒表：分辨力 0.01s

E.1.3 环境条件：温度：(20±2) °C，相对湿度：≤75%。

E.1.4 测量过程：本校准规范

## E.2 测量模型

## E.2.1 测量模型

$$\delta_v = V - \bar{V}_i \quad (\text{C.1})$$

$$V_i = \Delta D_i \cdot t_i^{-1} \times 60 \quad (\text{C.2})$$

式中：

$\delta_v$ ——位移速率示值误差；

$\bar{V}_i$ ——三次实测位移速率的算术平均值；

$V$ ——试验机位移速率设定值；

$V_i$ ——三次实测位移速率的计算值；

$\Delta D_i$ ——三次实测位移的差值；

$t_i$ ——电子秒表的示值。

## E.2.2 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial V}{\partial \Delta D} = t^{-1}, \quad c_2 = \frac{\partial V}{\partial t} = -\Delta D t^{-2}$$

## E.3 不确定度来源及标准不确定度分量的评定

E.3.1 测量重复性引入的不确定度分量  $u_V$

用卡尺和电子秒表作为标准器，对试验机的加载速率进行测量，加载速率设定值为50mm/min。在重复性条件下进行10次测量，得到测量结果如下表 C.1 所示。

表C.1 测量结果

测量次数	高度差 $\Delta D_i$ (mm)	时间值 $t_i$ (s)	速度 $V_i$ (mm/min)
1	50.43	60.42	50.08
2	50.03	59.77	50.22
3	50.48	60.17	50.34
4	50.43	60.28	50.20
5	50.55	60.45	50.18
6	50.23	59.98	50.25
7	50.38	60.26	50.16
8	50.35	60.30	50.10
9	50.14	59.75	50.35
10	50.11	59.80	50.28

平均值：50.216mm/min，单次测量标准差  $s$ ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \approx 0.091 \text{mm/min}$$

以三次测量的平均值作为校准值时，示值重复性引入的标准不确定度分量

$$u_v = \frac{0.091}{\sqrt{3}} \approx 0.053 \text{mm/min}$$

### E.3.2 标准器引入的不确定度分量 $u_i$

E.3.2.1 游标卡尺最大允许误差引入的标准不确定度分量  $u_1$ ，按 B 类方法进行评定：

测量范围 (0~300) mm、分度值为 0.02mm 的游标卡尺的最大允许误差为  $\pm 0.04$ mm，即半宽  $a_1 = 0.04$ mm，均匀分布，取  $k = \sqrt{3}$ ，则游标卡尺最大允许误差引入的标准不确定度分

量:

$$u_1 = \frac{0.04}{\sqrt{3}} \approx 0.023\text{mm}$$

E.3.2.2 电子秒表最大允许误差引入的标准不确定度分量  $u_2$ ，按 B 类方法进行评定:

根据秒表的检定证书给出的 10min 最大允许误差为  $\pm 0.07\text{s}$ ，区间半宽度  $a_2 = 0.07\text{s}$ 。按均匀分布估计，取  $k = \sqrt{3}$ ，由电子秒表最大允许误差引入的不确定度分量:

$$u_2 = \frac{0.07}{\sqrt{3}} \approx 0.041\text{s} = 0.00068\text{min}$$

E.4 不确定度分量一览表

表 C.2 不确定度分量一览表

序号	分量不确定度来源	符号	Mi	灵敏系数	c wi
1	测量重复性	$u_V$	0.053mm/min	1	0.053mm/min
2	游标卡尺最大允许误差	$u_1$	0.023mm	$t^{-1}$	0.023mm/min
3	电子秒表最大允许误差	$u_2$	0.00068min	$-\Delta Dt^{-2}$	0.034mm/min

E.5 合成标准不确定度

各不确定度分量相互独立，则:

$$u_c = \sqrt{c_0^2 u_V^2 + c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2} = \sqrt{0.003 + 0.0005 + 0.001} \approx 0.067\text{mm/min}$$

位移加载速率设定为 50mm/min，其相对标准不确定度:

$$u_r = \frac{0.067}{50} \times 100\% \approx 0.13\%$$

E.6 扩展不确定度

试验机加载速率设定为 50mm/min 时, 试验机位移速率测量结果的扩展不确定度:

取包含因子  $k = 2$

$$U_r = ku_c = 0.13\% \times 2 = 0.3\%$$