JJF

陕 西 省 地 方 计 量 技 术 规 范

JJF（陕）XXX－2021

应变控制式直剪仪校准规范

Calibration specification for strain-controlled direct shear apparatus

（报批稿）

2021－XX－XX 发布　　2021－XX－XX 实施

陕 西 省 市 场 监 督 管 理 局 发布

应变控制式直剪仪
校准规范

Calibration specification for strain-controlled direct shear apparatus

JJF（陕）XXX-2021

代替 JJG（陕）21-2005

归 口 单 位：陕西省市场监督管理局

主要起草单位：陕西省建筑科学研究院有限公司

陕西力源仪器设备检测有限公司

参加起草单位：陕西省计量科学研究院

陕西中检计量测试技术有限公司

北京华勘科技有限责任公司

本规范由陕西省市场监督管理局负责解释

本规范主要起草人：

吴娟娟（陕西省建筑科学研究院有限公司）

王　青（陕西省建筑科学研究院有限公司）

马　峰（陕西力源仪器设备检测有限公司）

参加起草人：

张崇武（陕西省计量科学研究院）

刘　娜（陕西中检计量测试技术有限公司）

马　成（陕西省建筑科学研究院有限公司）

和　宇（北京华勘科技有限责任公司）

目　录

引言.....II
1 范围.....1
2 引用文件.....1
3 术语.....1
3.1 剪切力.....1
3.2 法向力.....1
3.3 剪切位移.....1
3.4 应变控制式直剪仪.....1
4 概述.....1
5 计量特性.....2
5.1 砝码质量.....2
5.2 剪切力.....3
5.3 法向力.....3
5.4 水平位移行程.....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 砝码质量.....3
7.2 剪切力.....4
7.3 法向力.....4
7.3.1 机械式.....4
7.3.2 自动式.....5
7.4 水平位移行程.....5
8 校准结果表达.....6
9 复校时间间隔.....7
附录 A.....8
附录 B.....10
附录 C.....11
附录 D.....13
附录 E.....155

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》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》等基础性系列规范文件进行制定。

与 JJG（陕）21-2005 相比，除编辑性修改外，本规范主要技术变化如下：

——将应变控制式直剪仪检定规程修订为应变控制式直剪仪校准规范；

——增加了术语；

——增加了概述中直剪仪分类；

——将垂直力修订为法向力；

——分别删除了技术要求/校准项目/校准方法中的以下项目：直剪仪外观、环刀、透水板、直剪仪综合误差；

——增加了直剪仪综合误差校准方法（附录 A）；

——增加了配套装置校准方法（附录 B）；

——增加了不确定度评定示例（附录 E）；

本规范的历次版本发布情况为：

——JJG（陕）21-2005。

应变控制式直剪仪校准规范

1 范围

本规范适用于应变控制式直剪仪（含机械式和自动式）的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 34-2008《指示表（指针式、数显式）》

JJG 455-2000《工作测力仪》

GB/T 4934.1-2008《土工试验仪器 剪切仪 第1部分：应变控制式直剪仪》

GB/T 50123-2019《土工试验方法标准》

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

3.1 剪切力 shear force

平行于剪切面上的力。

3.2 法向力 vertical force

垂直于剪切面上的力。

3.3 剪切位移 shear displacement

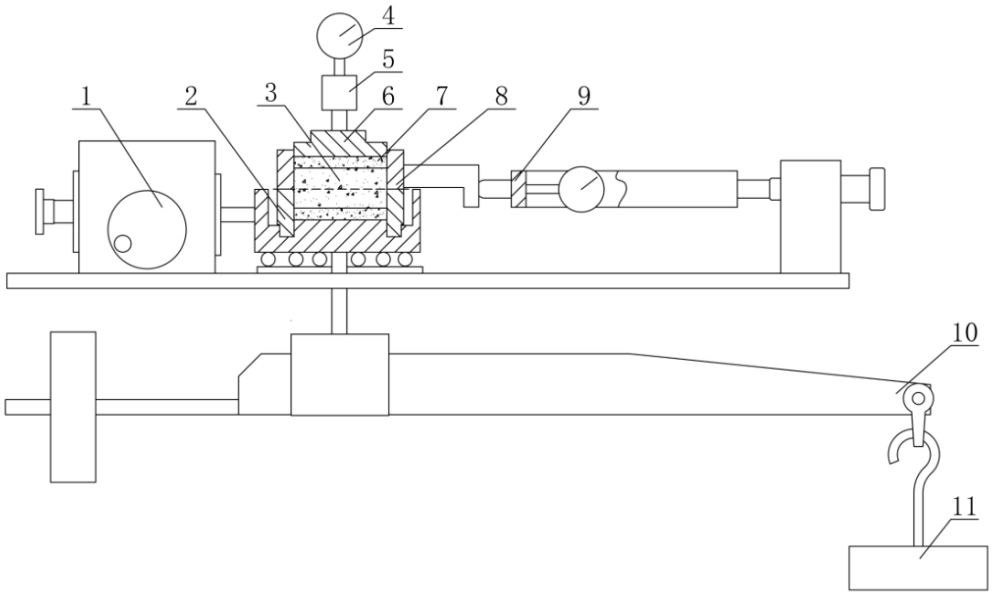
剪切面相对移动的距离。

3.4 应变控制式直剪仪 strain-controlled direct shear apparatus

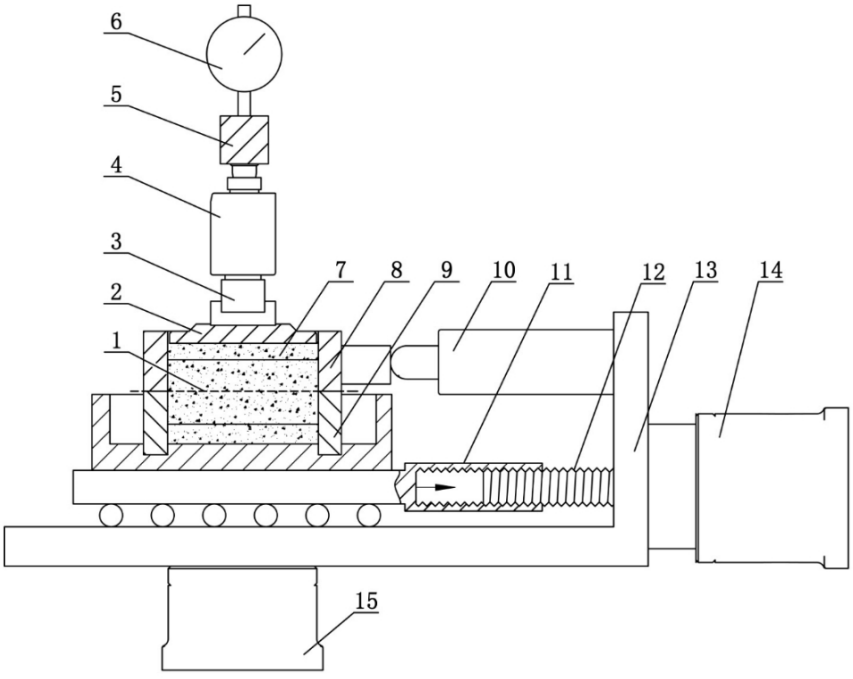
一种通过匀速推动剪切容器对土样的固定剪切面施加剪切力，以求得土样在不同垂直压力条件下的抗剪强度的土工试验仪器。

4 概述

应变控制式直剪仪是一种通过匀速推动剪切容器，对土样的固定剪切面施加剪切力，以求得土样在不同垂直压力条件下的抗剪强度的土工试验仪器。应变控制式直剪仪按剪切操作方式可分为机械式和自动式。如图1、图2所示：



1 剪切力传动装置 2 下剪切盒 3 试样剪切面 4 垂直位移测量仪
5 法向力加压框架 6 传压板 7 透水板 8 上剪切盒 9 剪切力测量装置 10 杠杆 11 砝码
图 1 机械式结构示意图



1 试样剪切面 2 传压板 3 随动装置 4 法向力测量装置 5 法向力加压框架
6 垂直位移测量仪 7 透水板 8 上剪切盒 9 下剪切盒 10 剪切力测量装置
11 传动螺母 12 传动丝杠 13 基板 14 剪切力传动装置 15 法向力传动装置
图 2 自动式结构示意图

5 计量特性

5.1 砝码质量

相对误差：±0.2%。

5.2 剪切力

最大允许误差：±1.0%。

5.3 法向力

最大允许误差：±1.0%。

5.4 水平位移行程

5.4.1 手动推进时，手轮每转一圈，水平位移行程相对误差的绝对值应＜10%。

5.4.2 电机推进时，在额定电压和载荷状态下，平均行程速率（mm/min）相对误差的绝对值应＜10%。

6 校准条件

6.1 环境条件

环境温度：（5～35）℃，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 2。

表 2 测量标准及其他设备

序号	名称	测量范围	技术要求
1	标准测力仪	（0.02～2）kN	MPE：±0.3%
2	电子天平	≥3kg	e≤0.1g
3	秒表	（0～30）min	MPE：±0.4s/60s
4	百分表	（0～10）mm	MPE：±0.02mm

注：也可采用准确度满足技术要求的其它测量器具设备进行校准。

7 校准项目和校准方法

应变控制式直剪仪表面漆层平整光洁，颜色均匀，铸件表面无裂纹、气孔、砂眼、锈蚀等影响计量特性的缺陷。

7.1 砝码质量

使用电子天平称量砝码。每个砝码称量 3 次，取 3 次测量值的算术平均值作为砝码质量。按照公式（1）计算砝码质量的相对误差δ_m。

$$\delta_m=\frac{m_0-\overline{m_i}}{\overline{m_i}}\times 100\% \qquad (1)$$

式中：

δ_m——第 i 个砝码质量的相对误差，%；

$\overline{m_i}$——第 i 个砝码 3 次测量值的算术平均值，kg；

m_0——第 i 个砝码标称质量，kg。

7.2 剪切力

首先将剪切力测力仪和标准测力仪串联，并安装成工作状态，指示值分别调至零点（或作为零点的起始位置）。以测量下限为校准起始点，在剪切力测力仪测量范围内均匀选取 5 个校准点（一般为测量上限的 20%，40%，60%，80%，100%）。沿串联装置轴线方向依次施加相应的载荷，至载荷稳定后记录相应示值。上述校准过程连续进行 3 次。按公式（2）计算剪切力的相对误差 δ_j。

$$\delta_j = \frac{\overline{F_j} - \overline{F_{j0}}}{\overline{F_{j0}}} \times 100\% \qquad (2)$$

式中：

δ_j——第 j 个校准点剪切力的相对误差，%；

$\overline{F_j}$——第 j 个校准点剪切力测力仪 3 次测量值的算术平均值，N；

$\overline{F_{j0}}$——第 j 个校准点标准测力仪 3 次测量值的算术平均值，N。

7.3 法向力

7.3.1 机械式

取下剪切盒部件，调整杠杆到水平位置，将标准测力仪放置在法向力加压框架下，对正接触后，将标准测力仪的指示值调至零点。通过累加砝码，依次施加相应的载荷，至各校准点保持稳定后记录标准测力仪示值。上述校准过程连续进行 3 次。

按照公式（3）计算法向力的相对误差 δ_i。

$$\delta_i = \frac{F_i - \overline{F_i}}{\overline{F_i}} \times 100\% \qquad (3)$$

式中：

δ_i——第 i 个校准点法向力的相对误差，%；

F_i——第 i 个校准点的标称载荷，依据直剪仪说明书计算，N；

$\overline{F_i}$ ——第 i 个校准点标准测力仪 3 次测量值算术平均值，N。

7.3.2　自动式

取下剪切盒部件，将法向力测力仪和标准测力仪串联，放置在法向力加压框架下，对正接触后，将法向力测力仪及标准测力仪的指示值分别调至零点（或作为零点的起始位置）。以测量下限为校准起始点，沿串联装置轴线方向依次施加相应的载荷（一般取 3～6 个校准点），至载荷稳定后记录相应示值。上述校准过程连续进行 3 次。按照公式（4）计算法向力的相对误差 δ_i。

$$\delta_i = \frac{\overline{F_i} - \overline{F_{i0}}}{\overline{F_{i0}}} \times 100\% \qquad (4)$$

式中：

δ_i ——第 i 个校准点法向力的相对误差，%；

$\overline{F_i}$ ——第 i 个校准点法向力测力仪 3 次测量值算术平均值，N；

$\overline{F_{i0}}$ ——第 i 个校准点标准测力仪 3 次测量值算术平均值，N。

7.4　水平位移行程

7.4.1　手动推进

将百分表安装在剪切力测量装置位置，使测杆移动方向与推动轴在同一轴线上。将百分表示值调至零位。在规定载荷下，转动手轮，当手轮转动 10 圈时，读取百分表示值。按公式（5）计算平均每圈位移行程，按公式（6）计算水平位移行程相对误差。

$$\overline{L} = \frac{\sum_{i=1}^{10} L_i}{10} \qquad (5)$$

式中：

$\overline{L}$ ——平均每圈位移行程，mm；

L_i——第 i 圈位移行程，mm；

$$\delta_L = \frac{\overline{L} - L_{标}}{L_{标}} \times 100\% \qquad (6)$$

式中：

δ_L ——水平位移行程相对误差，%；

$\overline{L}$——平均每圈位移行程，mm；

$L_{标}$——每圈标准位移行程，mm。

7.4.2　电机推进

将百分表安装在剪切力测量装置位置，使测杆移动方向与推动轴在同一轴线上。将百分表示值调至零位。在额定电压和规定载荷下，设定剪切速率，开动电机，同时启动秒表，记录 1 min 内百分表的位移行程，重复测量 3 次。按公式（7）计算平均第 i 次行程速率。

$$V_i = \frac{L_i}{t_i} \tag{7}$$

式中：

V_i——第 i 次行程速率，mm/min；

L_i——第 i 次百分表位移行程，mm；

t_i——第 i 次行程时间，min。

按公式（8）计算平均行程速率。

$$\overline{V} = \frac{\sum_{i=1}^{3} V_i}{3} \tag{8}$$

式中：

$\overline{V}$——平均行程速率，mm/min；

V_i——第 i 次行程速率，mm/min。

按公式（9）计算行程速率的相对误差。

$$\delta_V = \frac{\overline{V} - V}{V} \times 100\% \tag{9}$$

式中：

δ_V——行程速率的相对误差，%；

$\overline{V}$——平均行程速率，mm/min；

V——设定速率，mm/min。

8　校准结果表达

经校准的应变控制式直剪仪发给校准证书，校准结果应在校准证书上反映。校准证书内容及内页格式（参考）见附录 D。

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

直剪仪综合误差

A.1　定义

A.1.1　内摩擦角

内摩擦角是岩土抗剪强度的指标。可由散粒体抗剪强度、散粒体粘聚力、破坏平面上的正应力计算得到。

A.1.2　综合误差

直剪仪综合误差是利用标准石英砂样，通过测量和计算而得出的直剪仪误差，应不超过±2.5%。

A.2　直剪仪综合误差计算公式

根据库伦定律$\tau=\sigma\tan\varphi+c$。当散粒体为黏性土时，$c\neq0$；当散粒体为砂土时，$c=0$。本实验采用的标准石英砂，因此$\tau=\sigma\tan\varphi$。

式中：

τ——剪切面上的剪切力，N；

σ——剪切面上的法向力，N；

c——散粒体粘聚力，N。

依据本规范，用F_n表示第n级载荷剪切力，用F_{ϖ}表示第n级载荷法向力。

则内摩擦角可由公式（A.1）计算得到：

$$\varphi_n=\arctan\frac{F_n}{F_{\varpi}} \qquad (A.1)$$

式中：

φ_n——第n级载荷下内摩擦角；

F_n——第n级载荷剪切力；

F_{ϖ}——第n级载荷法向力。

按公式（A.2）计算各级载荷内摩擦角的平均值。

$$\bar{\varphi}=\frac{\varphi_1+\varphi_2+.....+\varphi_n}{n}\quad(n\geqslant4) \qquad (A.2)$$

式中：

$\bar{\varphi}$——各级载荷内摩擦角的平均值；

按公式（A.3）计算第n级载荷下直剪仪综合误差。

$$\delta_n = \frac{\varphi_n - \bar{\varphi}}{\bar{\varphi}} \times 100\% \qquad \text{（A.3）}$$

式中：

δ_n——第 n 级载荷下直剪仪综合误差。

A.3　固定载荷下剪切力值 F_n

把风干洁净的标准石英砂通过 0.5 mm 及 0.25 mm 的筛选后，制成标准砂样放入环刀内，压实、刮平待用。对准上、下剪切盒，插入固定销，在下剪切盒内放置透水板。将标准砂样倒入剪切盒，压实，依次放入透水板和传压板。

装置好加荷框架及百分表，施加第 n 级法向载荷，待百分表读数稳定后，转动手轮或启动剪切传动装置，至上剪切盒前端的钢珠刚好与测力仪接触（测力环中百分表指针刚移动或剪切力测力仪数值有变化时）时暂停，调整百分表指示值置“零”。拔去固定销。

启动秒表，以每 15 秒一圈的速率转动手轮（电动操作时，调节成相应的行程速率）进行剪切，在剪损瞬间读取的测力仪示值为该载荷下剪切力值 F_n。

试样剪损后，顺次卸除法向载荷、加荷框架、传压板、上透水板，清除试样。

按照上述试验步骤在同一仪器上，做多级载荷试验（至少做四级载荷）。

A.4　固定载荷下法向力值 F_m

依据 7.3 获得各级法向力值 F_m。

A.5　直剪仪综合误差 δ

根据上述实验测得各级载荷的剪切力值 F_n 和法向力值 F_m，通过公式（A.3）计算出各级载荷下直剪仪载荷综合误差 $\delta_n = \frac{\varphi_n - \bar{\varphi}}{\bar{\varphi}} \times 100\%$

取各级载荷下直剪仪综合误差的最大值为直剪仪综合误差。

附录 B

配套装置校准

B.1 垂直位移测量装置校准

B.1.1 百分表

当垂直位移测量装置为百分表时，百分表校准依据 JJG 34 规定的方法进行。

B.1.2 位移传感器（或其他可达到相同测量目的的装置）

当垂直位移测量装置为位移传感器或其他可达到相同测量目的的装置时，将位移传感器安装在刚性表架上，压缩侧杆约（0.1～0.2）mm 时将位移传感器置“零”后开始测量，在测量范围内均匀选取 10 个点作为校准点，依次放置从小到大的量块，从位移传感器上进行读数。按公式（B.1）计算位移传感器的引用误差，其结果应符合 MPE：±0.2%FS。

$$\Delta L = \frac{\left(L_i' - L_i\right)_{\max}}{s} \times 100\% \qquad \text{（B.1）}$$

式中：

$\triangle L$——位移传感器的引用误差，%；

L_i'——第 i 个点位移传感器读数，mm；

L_i——第 i 个点所选量块的标称值，mm；

s——位移传感器的量程，mm。

B.2 测力环检定

百分表校准依据 JJG 34 规定的方法进行，其结果符合技术要求后，再将测力环依据 JJG 455 规定的方法进行校准，由百分表示值（L）与测力环力值（F）可计算得到拟合方程 $F=aL+b$。（a、b 为方程系数）

附录 C　　校准原始记录（参考格式）

记录编号：

C.1　机械式应变控制式直剪仪校准原始记录

委托单位：_____器具名称：_____

规格型号：_____制造厂商_____出厂编号：_____

校准依据：JJF（陕）XXX-2021 《应变控制式直剪仪校准规范》

校准地点：_____环境温度：_____℃ 相对湿度：_____ %

校准用主要测量设备：

校准用设备	测量范围	准确度等级\最大允许误差\测量不确定度	溯源机构及证书编号	有效期至

校准结果

序号	校准项目		校准结果								不确定度 U,k=2
1	砝码质量	标称值/kg	测量值/kg				砝码质量相对误差/%				/
			1	2	3	平均值					
2	水平位移行程	❂手动推进	10 圈手轮位移行程/mm		平均每圈位移行程/mm		水平位移相对误差/%				/
		❂电机推进	行程速率/mm/min				行程速率相对误差/%				/
			1	2	3	平均值					
3	剪切力	校准点/N	标准测力仪测量值/N				剪切力测力仪测量值/N				剪切力相对误差/%				/
			1	2	3	平均值	1	2	3	平均值					
		20%FS													
		40%FS													
		60%FS													
		80%FS													
		100%FS													
4	法向力	标称值/N	测量值/N				法向力相对误差/%				/
			1	2	3	平均值					

校准人员：_____核验人员：_____ 校准日期：_____

校准原始记录（参考格式）

记录编号：

C.2 自动式应变控制式直剪仪校准原始记录

委托单位：_____器具名称：_____

规格型号：_____制造厂商_____出厂编号：_____

校准依据：JJF（陕）XXX-2021 《应变控制式直剪仪校准规范》

校准地点：_____环境温度：_____℃ 相对湿度：_____ %

校准用主要测量设备：

校准用设备	测量范围	准确度等级\最大允许误差\测量不确定度	溯源机构及证书编号	有效期至

校准结果

序号	校准项目		校准结果									不确定度 U,k=2
1	水平位移行程（电机推进）		行程速率/mm/min								行程速率相对误差/%	/
			1		2		3		平均值			
2	剪切力	标称值/N	标准测力仪测量值/N				剪切力测力仪测量值/N				剪切力相对误差/%	/
			1	2	3	平均值	1	2	3	平均值		
		0										
		20%FS										
		40%FS										
		60%FS										
		80%FS										
		100%FS										
3	法向力	标称值/N	标准测力仪测量值/N				法向力测力仪测量值/N				法向力相对误差/%	/
			1	2	3	平均值	1	2	3	平均值		

校准人员：_____核验人员：_____ 校准日期：_____

附录 D

校准证书内容及内页格式

D.1 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；

d）校准证书编号、页码及总页数的标识；

e）客户名称和地址；

f）被校仪器的制造单位、名称、型号及编号；

g）校准单位校准专用章；

h）校准日期；

i）校准所依据的技术规范名称及代号；

j）本次校准主要测量设备名称、型号、准确度等级或不确定度或最大允许误差、仪器编号、证书编号及有效期；

k）校准时的环境温度、相对湿度；

l）校准结果及其测量不确定度；

m）对校准规范偏离的说明（若有）；

n）复校时间间隔的建议；

o）“校准证书”的校准人、核验人、批准人签名及签发日期；

p）校准结果仅对被校仪器本次测量有效的声明；

q）未经实验室书面批准，部分复制证书或报告无效的声明。

D.2　校准证书内页格式：

应变控制式直剪仪校准证书内页（参考格式）

校准结果

序号	校准项目		相对误差	不确定度
1	砝码质量			
2	水平位移行程	❂手动推进 （水平位移相对误差）		
		❂电机推进 （行程速率相对误差）		
3	剪切力			
4	法向力			

以下空白

附录 E

校准结果不确定度评定示例

E.1 剪切力校准结果不确定度评定示例

E.1.1 概述

E.1.1.1 校准依据：JJF（陕）XXX－2021 《应变控制式直剪仪校准规范》。

E.1.1.2 环境条件：温度（5～35）℃，相对湿度≤85%。

E.1.1.3 被测对象：应变控制式直剪仪。

E.1.1.4 测量标准：0.3 级标准测力仪。

E.1.2 测量模型

$$\Delta F_1 = F_x - F_N$$

式中：

$\triangle F_1$——剪切力的示值误差，kN；

F_x——剪切力测力仪示值，kN；

F_N——标准测力仪示值，kN。

E.1.3 方差和灵敏系数

依据：
$$u_c^2(y) = \sum \left[\partial f \Big/ \partial x_i \right]^2 u_c^2(x_i)$$

得出：
$$u_c^2 = u^2(\Delta) = c^2(F_x) \cdot u^2(F_x) + c^2(F_N) \cdot u^2(F_N)$$

其中：
$$c(F_x) = \partial \Delta \Big/ \partial F_x = 1, \quad c(F_N) = \partial \Delta \Big/ \partial F_N = 1$$

则：
$$u_c^2 = u^2(F_x) + u^2(F_N)$$

E.1.4 各输入量的标准不确定度评定

E.1.4.1 由示值重复性引入的相对不确定度分量$u_r(Fx)$

用标准测力仪对剪切力测力仪进行 10 次重复性测量，见表 E.1-1。

表E.1-1 单位：kN

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	1.188	1.202	1.205	1.183	1.211	1.189	1.196	1.203	1.207	1.191

根据贝塞尔公式实验标准偏差：$s=\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$ =0.005 kN

取 3 次测量平均值作为测量结果，则：

$$u_{\mathrm{r}}(Fx)=\frac{0.005\ \mathrm{kN}}{\sqrt{3}\times 1.2\ \mathrm{kN}}=0.24\%$$

E.1.4.2　与标准器有关的不确定度分量$u_{\mathrm{r}}(F_N)$

0.3 级标准测力仪最大允许误差为±0.3%，按均匀分布

$$u_{\mathrm{r}}(F_N)=\frac{0.3\%}{\sqrt{3}}=0.17\%$$

E.1.5　标准不确定一览表

表 E.1-2

相对标准不确定分量 $u_{\mathrm{r}}(x_i)$	不确定度来源	相对标准不确定度	c_i	$\lvert c_i\rvert \cdot u_{\mathrm{r}}(x_i)$
$u_{\mathrm{r}}(F_x)$	测量重复性引入的不确定度	0.24%	1	0.24%
$u_{\mathrm{r}}(F_N)$	标准器引入的不确定度	0.17%	-1	0.17%

E.1.6　合成相对标准不确定度

$$u_{cr}^2=u_r^2(F_x)+u_r^2(F_N)=0.24\%^2+0.17\%^2=8.65\times 10^{-6}$$

则合成相对标准不确定度 u_{cr}=0.29%

E.1.7　相对扩展不确定度

取包含因子 k=2，则有：

$$U_{\mathrm{rel}}=ku_{\mathrm{cr}}=2\times 0.29\%=0.58\%$$

E.1.8　直剪仪剪切力的相对扩展不确定度

直剪仪剪切力的相对扩展不确定度：U_{rel}=0.58% ，k=2

E.2 法向力校准结果不确定度评定示例

E.2.1 概述

E.2.1 校准依据：JJF（陕）XXX－2021《应变控制式直剪仪校准规范》。

E.2.2 环境条件：温度（5～35）℃，相对湿度≤85%。

E.2.3 被测对象：应变控制式直剪仪。

E.2.4 测量标准：0.3 级标准测力仪。

E.2.2 测量模型

$$\Delta F = F_y - F_N$$

式中：

△F——法向力的示值误差，kN；

F_y——法向力测力仪示值，kN；

F_N——标准测力仪示值，kN。

E.2.3 方差和灵敏系数

依据：$$u_c^2(y) = \sum \left[\partial f \Big/ \partial x_i \right]^2 u_c^2(x_i)$$

得出：$$u_c^2 = u^2(\Delta) = c^2(F_y) \cdot u^2(F_y) + c^2(F_N) \cdot u^2(F_N)$$

其中：$$c(F_y) = \partial \Delta \Big/ \partial F_y = 1，\quad c(F_N) = \partial \Delta \Big/ \partial F_N = 1$$

则：$$u_c^2 = u^2(F_y) + u^2(F_N)$$

E.2.4 各输入量的标准不确定度评定

E.2.4.1 由示值重复性引入的相对不确定度分量$u_r(F_y)$

用标准测力仪对法向力测力仪进行 10 次重复性测量，见表 E.2-1。

表E.2-1 单位：kN

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	1.201	1.206	1.208	1.209	1.198	1.210	1.196	1.196	1.211	1.198

根据贝塞尔公式实验标准偏差：$s = \sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$ =0.006 kN

取 3 次测量平均值作为测量结果，则：

$$u_r(F_y) = \frac{0.006\text{kN}}{\sqrt{3} \times 1.2\text{kN}} = 0.29\%$$

E.2.4.2　与标准器有关的不确定度分量$u_r(F_N)$

0.3 级标准测力仪最大允许误差为±0.3%，按均匀分布

$$u_r(F_N)=\frac{0.3\%}{\sqrt{3}}=0.17\%$$

E.2.5　标准不确定一览表，见表 E.2-2

表 E.2-2

相对标准不确定分量 $u_r(y_i)$	不确定度来源	相对标准不确定度	c_i	$\lvert c_i\rvert \cdot u_r(y_i)$
$u_r(F_y)$	测量重复性引入的不确定度	0.29%	1	0.29%
$u_r(F_N)$	标准器引入的不确定度	0.17%	-1	0.17%

E.2.6　合成相对标准不确定度

$$u_{cr}^2=u_r^2(F_y)+u_r^2(F_N)=0.29\%^2+0.17\%^2=1.13\times10^{-5}$$

则合成相对标准不确定度 $u_{cr}=0.34\%$

E.2.7　相对扩展不确定度

取包含因子 $k=2$，则有：

$$U_{rel}=ku_{cr}=2\times0.34\%=0.68\%$$

E.2.8　直剪仪法向力的相对扩展不确定度

直剪仪法向力的相对扩展不确定度：$U_{rel}=0.68\%$ ，$k=2$

E.3 仪器综合误差不确定度评定示例

E.3.1 概述

E.3.1.1 校准依据：JJF（陕）XXX－2021《应变控制式直剪仪校准规范》。

E.3.1.2 环境条件：温度（5～35）℃，相对湿度≤85%。

E.3.1.3 被测对象：应变控制式直剪仪。

E.3.1.4 测量标准：0.3 级标准测力仪。

E.3.2 测量模型

$$\delta=\frac{\left|\varphi_n-\overline{\varphi}\right|_{\max}}{\overline{\varphi}}\times 100\%$$

式中：

δ——直剪仪综合误差；

φ_n——第 n 级载荷下内摩擦角；

$\overline{\varphi}$——各级载荷内摩擦角的平均值；

则

$$u_c^2(\delta)=\left[\frac{\partial\delta}{\partial\varphi}\right]^2 u^2(\varphi)$$

综合误差 δ 是内摩擦角 φ 的单一函数，故 $\frac{\partial\delta}{\partial\varphi}=1$，$u_c(\delta)=u(\varphi)$

又固定载荷下

$$\varphi_n=\arctan\frac{F_n}{F_{\tau n}}$$

式中：

F_n——第 n 级载荷剪切力；

$F_{\tau n}$——第 n 级载荷法向力。

内摩擦角 φ 是载荷剪切力 F_n 和载荷法向力 $F_{\tau n}$ 的函数

$$u_c^2(\varphi)=\left[\frac{\partial\varphi}{\partial F_n}\right]^2 u^2(F_n)+\left[\frac{\partial\varphi}{\partial F_{\tau n}}\right]^2 u^2(F_{\tau n})$$

则：
$$u_{cr}^2(\varphi)=\left[\frac{\partial\varphi}{\partial F_n}\right]^2 u_r{}^2(F_n)+\left[\frac{\partial\varphi}{\partial F_{\varpi}}\right]^2 u_r{}^2(F_{\varpi})$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial F_n}=\frac{F_{\varpi}}{F_n{}^2+F_{\varpi}{}^2}$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial F_{\varpi}}=\frac{-F_n}{F_n{}^2+F_{\varpi}{}^2}$$

E.3.3　固定载荷下法向力F_{ϖ}引入的标准不确定分量

E.3.3.1　测量模型

$$\Delta F=F_y-F_N$$

式中：

$\triangle F$——固定载荷下法向力的误差，N；

F_y——固定载荷下法向力测力仪示值，N；

F_N——固定载荷下标准测力仪示值，N。

E.3.3.2　方差和灵敏系数

依据：
$$u_c^2(y)=\sum\left[\partial f\big/\partial x_i\right]^2 u_c^2(x_i)$$

得出：
$$u^2(\Delta F)=c^2(F_y)\cdot u^2(F_y)+c^2(F_N)\cdot u^2(F_N)$$

其中：
$$c(F_y)=\partial\Delta F\big/\partial F_y=1,\quad c(F_N)=\partial\Delta F\big/\partial F_N=1$$

则：
$$u^2(\Delta F)=u^2(F_y)+u^2(F_N)$$

E.3.3.3　各输入量的标准不确定度评定

E.3.3.3.1　固定载荷下法向力重复性引入的相对不确定度分量$u_r(F_y)$

在固定载荷下，使用标准测力仪对法向力测力仪进行10次重复性测量，具体数据见表E.3-1。

表E.3-1　　单位：kN

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.66	0.61	0.62	0.63	0.64

根据贝塞尔公式实验标准偏差：$s=\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}=0.017\,\mathrm{kN}$

取 3 次测量平均值作为测量结果，则：

$$u_r(F_y)=\frac{0.017}{\sqrt{3}\times 0.6}=0.86\%$$

E.3.3.3.2　与标准器有关的不确定度分量$u_r(F_N)$

0.3 级标准测力仪最大允许误差为±0.3%，按均匀分布

$$u_r(F_N)=\frac{0.3\%}{\sqrt{3}}=0.17\%$$

E.3.3.4　标准不确定一览表见表 E.3-2

表 E.3-2

相对标准不确定分量 $u_r(y_i)$	不确定度来源	相对标准不确定度	c_i	$\lvert c_i\rvert \cdot u_r(y_i)$
$u_r(F_y)$	测量重复性引入的不确定度	0.86%	1	0.86%
$u_r(F_n)$	标准器引入的不确定度	0.17%	-1	0.17%

E.3.3.5　合成相对标准不确定度分量

$$u_{cr}^2(\triangle F)=u_r^2(F_y)+u_r^2(F_N)=0.86\%^2+0.17\%^2=7.685\times 10^{-5}$$

则合成相对标准不确定度$u_r(F_m)=0.88\%$

E.3.4　固定载荷下剪切力 F_n 引入的标准不确定分量

E.3.4.1　测量模型

$$\triangle F'=F_x-F_{N'}$$

式中：

$\triangle F'$——固定载荷下剪切力的示值误差，N；

F_x——固定载荷下剪切力测力仪示值，N；

$F_{N'}$——固定载荷下标准测力仪示值，N。

E.3.4.2　方差和灵敏系数

依据：$$u_c^2(y)=\sum\left[\partial f \big/ \partial x_i\right]^2 u_c^2(x_i)$$

得出：$$u^2(\Delta F_1)=c^2(F_x)\cdot u^2(F_x)+c^2(F_{N'})\cdot u^2(F_{N'})$$

其中：$$c(F_x)=\partial \Delta F' \big/ \partial F_x=1,\quad c(F_{N'})=\partial \Delta F' \big/ \partial F_{N'}=1$$

则：$$u(\Delta F')=u^2(F_x)+u^2(F_{N'})$$

E.3.4.3　**各输入量的标准不确定度评定**

E.3.4.3.1　固定载荷下剪切力重复性引入的相对不确定度分量$u_r(F_x)$

在固定载荷下，使用标准测力仪对工作测力仪进行10次重复性测量，具体数据见表E.3-3。

表E.3-3　　**单位：**kN

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	0.36	0.37	0.38	0.39	0.38	0.37	0.38	0.37	0.36	0.38

根据贝塞尔公式实验标准偏差：$s=\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}=0.008\,\mathrm{N}$

取 3 次测量平均值作为测量结果，则：

$$u_r(F_x)=\frac{0.008}{\sqrt{3}\times 1.2}=0.38\%$$

E.3.4.3.2　与标准器有关的不确定度分量$u_r(F_{N'})$

0.3 级标准测力仪最大允许误差为±0.3%，按均匀分布

$$u_r(F_{N'})=\frac{0.3\%}{\sqrt{3}}=0.17\%$$

E.3.4.4　标准不确定一览表见表 E.3-4

表 E.3-4　**标准不确定一览表**

相对标准不确定分量 $u_r(x_i)$	不确定度来源	相对标准不确定度	c_i	$\lvert c_i\rvert \cdot u_r(x_i)$
$u_r(F_x)$	测量重复性引入的不确定度	0.38%	1	0.38%
$u_r(F_{N'})$	标准器引入的不确定度	0.17%	-1	0.17%

E.3.4.5　合成相对标准不确定度分量

$$u_{cr}^2(\triangle F')=u_r^2(F_x)+u_r^2(F_{N'})=0.38\%^2+0.17\%^2=1.733\times10^{-5}$$

则合成相对标准不确定度$u_{cr}(F_n)$=0.42%

E.3.5　合成相对标准不确定度

$$u_{cr}^2(\varphi)=\left[\frac{\partial\varphi}{\partial F_{\tau n}}\right]^2 u_r{}^2(F_{\tau n})+\left[\frac{\partial\varphi}{\partial F_n}\right]^2 u_r{}^2(F_n)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial F_n}=\frac{F_n}{F_{\tau n}{}^2+F_n{}^2}=1.23$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial F_{\tau n}}=\frac{-F_{\tau n}}{F_{\tau n}{}^2+F_n{}^2}=0.74$$

$$u_{cr}^2(\varphi)=0.69\%$$

E.3.6　相对扩展不确定度

取包含因子 k=2，则有：$U_{rel}(\varphi)=0.69\%\times2=1.4\%$

E.3.7　仪器综合误差相对扩展不确定度

直剪仪综合误差$U_r(\delta)=U_r(\varphi)=0.69\%\times2=1.4\%$，$k$=2