



天津市地方计量技术规范

JJF(津) 130—2024

轮胎刚度试验机校准规范

Calibration Specification for Tire Stiffness Test Machine

2024—06—20 发布

2024—09—20 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

轮胎刚度试验机校准规范

Calibration Specification for
Tire Stiffness Test Machin

JJF(津) 130—2024

归口单位：天津市市场监督管理委员会

主要起草单位：天津市计量监督检测科学研究院

参加起草单位：天津久荣工业技术有限公司

本规范由天津市计量监督检测科学研究院负责解释

本规范主要起草人：

王传博（天津市计量监督检测科学研究院）

顾 正（天津久荣工业技术有限公司）

马学武（天津久荣工业技术有限公司）

参加起草人：

刘 鹏（天津市计量监督检测科学研究院）

王 达（天津市计量监督检测科学研究院）

尚文宇（天津市计量监督检测科学研究院）

左 龙（天津久荣工业技术有限公司）

郭 清（天津久荣工业技术有限公司）

目 录

引 言	(II)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语和计量单位.....	(1)
3.1 试验台.....	(1)
3.2 接触平台.....	(1)
3.3 垂直力.....	(1)
3.4 垂直位移.....	(1)
3.5 纵向力.....	(1)
3.6 纵向位移.....	(1)
3.7 横向力.....	(1)
3.8 横向位移.....	(2)
3.9 扭转力矩.....	(2)
3.10 扭转角度.....	(2)
3.11 倾角角度.....	(2)
4 概述.....	(2)
5 计量特性.....	(2)
5.1 垂直力.....	(2)
5.2 纵/横向力.....	(2)
5.3 扭转力矩.....	(2)
5.4 垂直位移.....	(2)
5.5 纵/横向位移.....	(2)
5.6 垂直、纵/横向加载速度.....	(2)
5.7 扭转角度.....	(2)
5.8 扭转角速度.....	(3)
5.9 倾角角度.....	(3)
5.10 充气压力.....	(3)
5.11 温度偏差.....	(3)
6 校准条件.....	(3)
6.1 环境条件.....	(3)
6.2 标准器及配套设备.....	(3)
7 校准项目和校准方法.....	(4)
7.1 校准项目.....	(4)
7.2 校准方法.....	(4)
8 校准结果的表达.....	(9)
9 复校时间间隔.....	(9)
附录 A 轮胎刚度试验机校准原始记录参考格式.....	(10)
附录 B 轮胎刚度试验机校准证书内页参考格式.....	(15)
附录 C 测量不确定度的评定示例.....	(19)

引 言

本规范依据国家计量技术规范 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》、JJF1001—2011《通用计量术语及定义》进行编制。

本规范为首次发布。

轮胎刚度试验机校准规范

1 范围

本规范适用于汽车轮胎刚度试验机(以下简称试验机)的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 6326 轮胎术语及其定义

GB/T 23663 汽车轮胎纵向和横向刚性试验方法

JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用本规范；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

GB/T 6326 和 GB/T 23663 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 试验台 experimental equipment

能够加载轮胎，并可使轮胎与接触平台之间产生相对运动的装置。

3.2 接触平台 contact platform

安装于试验台上，能够模拟不同路面，具有不同粗糙度的非光滑平台。

3.3 垂直力 vertical force

轮胎作用于试验台平行于 Z' 轴的力。

3.4 垂直位移 vertical displacement

轮胎在垂直力的作用下相对于试验台的平行于 Z' 轴的偏移量。

3.5 纵向力 longitudinal force

轮胎作用于试验台平行于 X' 轴的力。

3.6 纵向位移 longitudinal displacement

轮胎在纵向力的作用下相对于试验台的平行于 X' 轴的偏移量。

3.7 横向力 lateral force

轮胎作用于试验台平行于 Y' 轴的力。

3.8 横向位移 lateral displacement

轮胎在横向力的作用下相对于试验台的平行于 Y' 轴的偏移量。

3.9 扭转力矩 torsion moment

使轮胎绕 Z' 轴旋转的力矩分量。

3.10 扭转角度 torsion angle

轮胎在扭转力矩的作用下相对于 X' 轴旋转的角度。

3.11 倾角角度 inclination angle

Z' 轴与车轮平面之间的角度。

4 概述

试验机是用于测试轮胎的径向刚度、纵向刚度、横向刚度和扭转刚度的专用设备，主要由加载装置、试验平台、连续记录力值和位移的记录系统以及控制系统组成。

5 计量特性

5.1 垂直力

测量范围：(0.5~150) kN，最大允许误差：±1.5%FS；

5.2 纵/横向力

测量范围：(-80~80) kN，最大允许误差：±1.5%FS。

5.3 扭转力矩

测量范围：(-10~10) kNm，最大允许误差：±2%FS。

5.4 垂直位移

测量范围：(1~999) mm，最大允许误差：±0.5 mm。

5.5 纵/横向位移

测量范围：(-200~200) mm，最大允许误差：±0.5 mm。

5.6 垂直、纵/横向加载速度

测量范围：(1~200) mm/min，最大允许误差：±2.5 mm/min。

5.7 扭转角度

测量范围： $(-15\sim 15)^\circ$ ，最大允许误差： $\pm 0.2^\circ$ 。

5.8 扭转角速度

测量范围： $(1\sim 60)^\circ/\text{min}$ ，最大允许误差： $\pm 0.2^\circ/\text{min}$ 。

5.9 倾角角度

测量范围： $(-6\sim 6)^\circ$ ，最大允许误差： $\pm 0.2^\circ$ 。

5.10 充气压力

测量范围： $(10\sim 1500)\text{ kPa}$ ，最大允许误差： $\pm 5\text{ kPa}$ 。

5.11 温度偏差

测量范围： $(10\sim 50)^\circ\text{C}$ ，最大允许误差： $\pm 3^\circ\text{C}$ 。

注：以上要求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 温度： $(10\sim 40)^\circ\text{C}$ ；

6.1.2 相对湿度： $\leq 85\%$ ；

6.1.3 周围无影响校准工作的机械振动和电磁干扰。

6.2 标准器及配套设备

标准器及配套设备见表 1。

表 1 标准器及配套设备一览表

序号	标准器名称	技术要求
1	标准测力仪	准确度等级 0.3 级及以上
2	深度尺	分度值（分辨力）为 0.01 mm
3	秒表	最大允许误差 $\pm 0.1\text{ s}$
4	角度尺	最大允许误差 $\pm 0.05^\circ$
5	倾角仪	最大允许误差 $\pm 0.05^\circ$
6	压力计	最大允许误差 $\pm 1\text{ kPa}$
7	温度校准仪	最大允许误差 $\pm 1^\circ\text{C}$
8	测力仪、深度尺安装支架等	

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

校准项目见表 2。

表 2 校准项目一览表

序号	校准项目	校准方法的条款
1	垂直力、纵/横向力	7.2.1
2	扭转力矩	7.2.2
3	垂直位移、纵/横向位移	7.2.3
4	垂直加载速度、 纵/横向加载速度	7.2.4
5	扭转角度	7.2.5
6	扭转角速度	7.2.6
7	倾角角度	7.2.7
8	充气压力	7.2.8
9	温度偏差	7.2.9

注：温度偏差校准项目仅适用于配备温度传感器的试验机。

7.2 校准方法

7.2.1 垂直力、纵/横向力

校准时，使测力仪的加载方向与所校准的方向（垂直、纵/横向）平行，通过控制加载机构运动对测力仪施加载荷，当试验机示值达到所取测量值时，读取标准测力仪相应示值。在测量范围内取大致均匀分布的 5 点进行校准，每个校准点重复测量三次。按公式(1)计算力值相对误差。

$$\Delta F_i = \frac{F_i - \overline{F_{0i}}}{\overline{F_{0i}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

ΔF_i ——第 i 校准点，力值相对误差，%；

F_i ——第 i 校准点，试验机示值，kN；

$\overline{F_{0i}}$ ——第 i 校准点，标准测力仪示值三次算术平均值，kN。

7.2.2 扭转力矩

将标准测力仪固定在距扭转中心一定距离的加载臂上，扭转中心与加载臂的垂直距离为扭转力臂，驱动机构扭转，当试验机扭转力矩示值达到测量值时，读取测力仪示值，测力仪示值与扭转力臂长度的乘积为标准扭转力矩值。在测量范围内取大致均匀分布的 10 点进行校准，每个校准点重复测量三次取算术平均值。按公式 (2) 计算扭转力矩相对误差。

$$\Delta M_i = \frac{M_i - \overline{M_{0i}}}{\overline{M_{0i}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

ΔM_i ——第 i 校准点，扭转力矩相对误差，%；

M_i ——第 i 校准点，试验机扭转力矩示值，kNm；

$\overline{M_{0i}}$ ——第 i 校准点，标准测力仪三次测量的算术平均值与加载力臂的乘积所得的值，kNm。

注：扭转力臂的长度可使用试验机出厂报告中的参数。

7.2.3 垂直位移、纵/横向位移

将深度尺沿测量方向（垂直、纵/横向）通过安装支架固定在试验机上，对深度尺清零，控制测量方向上的加载装置运动至试验机示值达到测量值时，用深度尺测量移动的位移值。在测量范围内取大致均匀分布的 5 点进行校准，每个校准点重复测量三次取算术平均值。按公式 (3) 计算位移示值误差。

$$\Delta L_i = L_i - \overline{L_{0i}} \quad (3)$$

式中：

ΔL_i ——第 i 校准点，位移误差，mm；

L_i ——第 i 校准点，试验机位移示值，mm；

$\overline{L_{0i}}$ ——第 i 校准点，深度尺三次测量的算术平均值，mm。

7.2.4 垂直加载速度、纵/横向加载速度

使用深度尺在测量方向上取固定长度作为移动位移，并标记启、停位置，控制测量向上的加载装置以设定速度运动，用秒表记录加载装置经过启、停位置所用的时间，重复上述操作三次，在速度测量范围内取大致均匀的 5 点进行校准，各校准点的标准加载速度按公式（4）计算，加载速度示值误差按公式（5）计算。

$$v_{0i} = \frac{60L_i}{\bar{t}_i} \quad (4)$$

式中：

v_{0i} ——第 i 校准点，标准加载速度，mm/min；

L_i ——第 i 校准点，深度尺测量的固定长度，mm；

\bar{t}_i ——第 i 校准点，经过 L_i 距离的平均时间，s。

$$\Delta v_i = v_i - v_{0i} \quad (5)$$

式中：

Δv_i ——第 i 校准点，加载速度示值误差，mm/min；

v_i ——第 i 校准点，试验机加载速度示值，mm/min。

7.2.5 扭转角度

将试验机扭转角度置于 0° 位置，安装角度尺支架并使角度尺测量的试验机与支架角度为 0° ，驱动加载装置扭转，当试验机示值达到测量值时，用角度尺再次测量试验机与支架之间的角度，在扭转角度测量范围内取大致均匀的 10 点进行校准，每个校准点重复测量三次取算术平均值，按公式（6）计算扭转角度误差。

$$\Delta \alpha_i = \alpha_i - \bar{\alpha}_{0i} \quad (6)$$

式中：

$\Delta \alpha_i$ ——第 i 校准点，扭转角度误差， $(^\circ)$ ；

α_i ——第 i 校准点，试验机扭转角度值， $(^\circ)$ ；

$\overline{a_{0i}}$ ——第 i 校准点，角度尺三次测量的算术平均值，(°)。

7.2.6 扭转角速度

使用角度尺在扭转方向上取固定角度，并标记启、停位置，控制加载装置以设定角速度扭转，用秒表记录加载装置经过启、停位置所用的时间，重复上述操作三次，在角速度测量范围内取大致均匀的 5 点进行校准，各校准点的标准角速度按公式 (7) 计算，扭转角速度误差按公式 (8) 计算。

$$\omega_{0i} = \frac{60\alpha_i}{t_i} \quad (7)$$

式中：

ω_{0i} ——第 i 校准点，标准扭转角速度，(°)/min；

α_i ——第 i 校准点，角度尺测量的固定角度，(°)；

$\overline{t_i}$ ——第 i 校准点，秒表三次测量的算术平均值，s。

$$\Delta\omega_i = \omega_i - \omega_{0i} \quad (8)$$

式中：

$\Delta\omega_i$ ——第 i 校准点，扭转角速度误差，(°)/min；

ω_i ——第 i 校准点，试验机扭转角速度示值，(°)/min；

ω_{0i} ——第 i 校准点，标准扭转角速度，(°)/min。

7.2.7 倾角角度

先用倾角仪测量试验平台的倾角角度三次，取算术平均值作为试验平台的倾角角度。然后驱动主轴绕定轴旋转，当试验机倾角角度示值达到测量值时，用倾角仪测量主轴的倾角角度，重复测量三次取算术平均值作为主轴的倾角角度。测量的主轴与试验平台倾角角度之差作为标准倾角角度，在倾角角度测量范围内取大致均匀的 5 点进行校准，各校准点的标准倾角角度按公式 (9) 计算，试验机倾角角度示值误差按公式 (10) 计算。

$$\gamma_{0i} = \overline{\gamma_{si}} - \overline{\gamma_p} \quad (9)$$

式中：

γ_{0i} ——第 i 校准点, 标准倾角角度, ($^{\circ}$);

$\overline{\gamma_{si}}$ ——第 i 校准点, 倾角仪测量的主轴倾角角度三次的算术平均值, ($^{\circ}$);

$\overline{\gamma_p}$ ——倾角仪测量的试验平台倾角角度三次的算术平均值, ($^{\circ}$)。

$$\Delta\gamma_i = \gamma_i - \gamma_{0i} \quad (10)$$

式中:

$\Delta\gamma_i$ ——第 i 校准点, 倾角角度误差, ($^{\circ}$);

γ_i ——第 i 校准点, 试验机倾角角度示值, ($^{\circ}$);

γ_{0i} ——第 i 校准点, 标准倾角角度, ($^{\circ}$)。

7.2.8 充气压力

校准时, 将压力计与试验机进气管相连, 调整气压, 当试验机示值达到测量点且稳定时, 记录压力计示值, 在测量范围内取大致均匀的 5 点进行校准, 每个校准点重复测量三次, 取算术平均值, 按公式 (11) 计算充气压力误差。

$$\Delta p_i = p_i - \overline{p_{0i}} \quad (11)$$

式中:

Δp_i ——第 i 校准点, 充气压力示值误差, kPa;

p_i ——第 i 校准点, 试验机充气压力示值, kPa;

$\overline{p_{0i}}$ ——第 i 校准点, 压力计示值算术平均值, kPa。

7.2.9 环境温度

将试验机的环境温度传感器取下并放入温度校准器内, 调整温度校准器的温度值至测量点, 待温度稳定后, 读取温度校准器示值, 在测量范围内取大致均匀的 5 点进行校准, 每个校准点重复测量三次取算术平均值, 按公式 (12) 计算环境温度示值误差。

$$\Delta T_i = T_i - \overline{T_{0i}} \quad (12)$$

式中:

ΔT_i ——第 i 校准点, 环境温度示值误差, $^{\circ}\text{C}$;

T_i ——第 i 校准点，试验机环境温度示值， $^{\circ}\text{C}$ ；

$\overline{T_{0i}}$ ——第 i 校准点，温度校准器三次测量的算术平均值， $^{\circ}\text{C}$ 。

8 校准结果的表达

8.1 校准证书

校准结果应在校准证书上反映，校准证书应至少包含以下信息：

- a) 标题：“校准证书”；
- b) 进行校准的地点；
- c) 证书的唯一性标识，每页及总页数的标识；
- d) 客户的名称和地址；
- e) 试验机名称、规格型号及编号；被校对象的描述和明确标识；
- f) 进行校准的日期，若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；
- g) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；
- h) 本次校准所有测量标准的溯源性及有效性说明；
- i) 校准环境的描述；
- j) 校准机构；
- k) 校准结果及其测量不确定度的说明；
- l) 对校准规范的偏离说明；
- m) 校准证书签发人的签名或等效标识；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

8.2 校准原始记录格式见附录 A，校准证书内页格式见附录 B。

8.3 轮胎度试验机测量结果的不确定度按 JJF 1059.1-2012 的要求评定，测量结果不确定度评定示例见附录 C。

9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。送校单位也可根据实际使用情况，自主决定复校时间间隔。

附录 A

轮胎刚度试验机校准原始记录参考格式

原始记录编号:

单位名称:							
单位地址:							
设备名称:				型号规格:			
出厂编号:				生产厂家:			
校准日期:				环境条件		温度:	℃
						湿度:	%RH
校准依据:							
校准地点:							
本次校准所使用的主要计量器具							
序号	名称	型号规格	编号	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	证书有效期至	溯源机构名称
校准员:				核验员:			

1. 垂直力

	校准点	试验机示值	标准值				示值相对误差 (%)	测量结果不确定度 $U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
垂直力								

2. 纵/横向力

	校准点	试验机示值	标准值				示值相对误差 (%)	测量结果不确定度 $U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
纵/横向力								

3. 扭转力矩

	校准点	试验机示值	标准力值				力臂	标准扭矩值	示值相对误差 (%)	测量结果不确定度 $U(k=2)$
			1	2	3	平均值				
扭转力矩										

4. 垂直位移

	校准点	试验机示值	标准值				示值误差	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
垂直位移								

5. 纵/横向位移

	校准点	试验机示值	标准值				示值误差	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
纵/横向位移								

6. 垂直加载速度

	校准点	试验机示值	位移	时间				标准值	示值误差	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
				1	2	3	平均值			
垂直加载速度										

7. 纵/横向加载速度

	校准点	试验机示值	位移	时间				标准值	示值误差	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
				1	2	3	平均值			
纵/横向加载速度										

8. 扭转角度

	校准点	试验机示值	标准值				示值误差	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
扭转角度								

9. 扭转角速度

	校准点	试验机示值	固定角度	时间				标准值	示值误差	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
				1	2	3	平均值			
扭转角速度										

10. 倾角角度

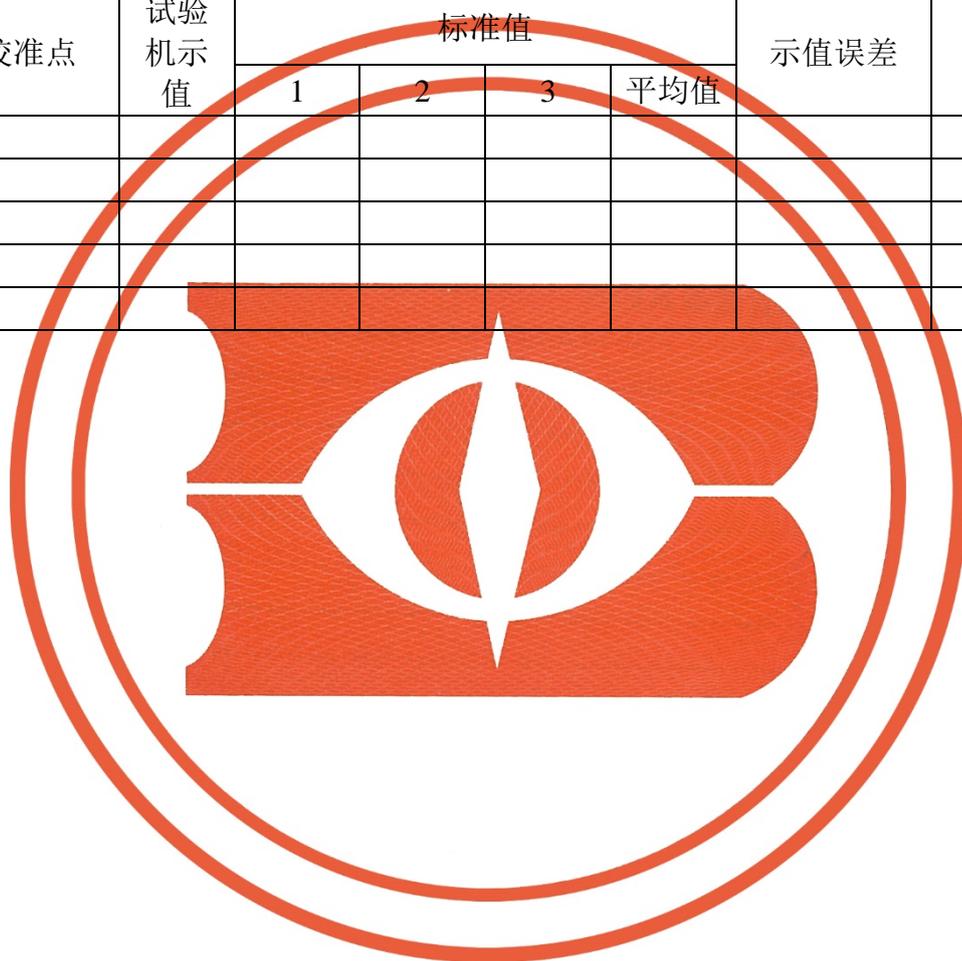
试验台 倾角角度	1		2				3		平均值
	校准点	试验机示值	主轴倾角角度				标准倾角角度	示值误差	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
		1	2	3	平均值				
倾角角度									

11. 充气压力

	校准点	试验机示值	标准值				示值误差	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
充气压力								

12. 温度偏差

	校准点	试验机示值	标准值				示值误差	测量结果 不确定度 $U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
温度偏差								



附录 B

轮胎刚度试验机校准证书内页参考格式

B.1 校准证书内页（第 2 页）参考格式

证书编号：XXXXXX-XXXX

校准机构授权说明					
校准所依据的技术文件（代号、名称）：					
本次校准所使用的主要计量器具：					
名称	编号	不确定度/准确度等级/ 最大允许误差	证书编号	证书有 效期至	溯源机构 名称
校准地点及环境条件：					
校准地点：					
温度： 湿度：					

B.2 校准证书校准结果页参考格式

证书编号: XXXXXX-XXXX

校准结果

垂直力	试验机示值	标准值	示值相对误差 (%)	测量不确定度 $U(k=2)$
纵、 横 向力	试验机示值	标准值	示值相对误差 (%)	测量不确定度 $U(k=2)$
扭转力矩	试验机示值	标准值	示值相对误差 (%)	测量不确定度 $U(k=2)$
垂直位移	试验机示值	标准值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

纵、 横向位移	试验机示值	标准值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
垂直 加载速度	试验机示值	标准值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
纵、 横向 加载速度	试验机示值	标准值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
扭转 角度	试验机示值	标准值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
扭转 角速度	试验机示值	标准值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

倾角角度	试验机示值	标准值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
充气压力	试验机示值	标准值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
温度偏差	试验机示值	标准值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

附录 C

轮胎刚度试验机测量不确定度评定示例

C.1 垂直力不确定度的评定示例

选取 20 kN 校准点为示例，进行垂直力测量不确定度评定。

C.1.1 建立数学模型，列不确定度式

通过试验机对标准测力仪施加载荷，当试验机垂直力示值达到校准点时，记录标准测力仪示值，试验机示值与标准测力仪示值平均值之差即为垂直力示值误差，数学模型为：

$$\Delta F = F_1 - \bar{F} \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔF —— 试验机垂直力示值误差，kN；

F_1 —— 试验机垂直力示值，kN；

\bar{F} —— 标准测力仪示值平均值，kN。

因为各分量互不相关，由不确定度传播律：

$$u_c^2 = c_1^2 \times u^2(F_1) + c_2^2 \times u^2(\bar{F})$$

其中：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta F}{\partial F_1} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta F}{\partial \bar{F}} = -1。$$

C.1.2 不确定度来源

试验机垂直力示值分辨力引入的标准不确定度 $u(F_1)$ ；

标准测力仪测量误差引入的标准不确定度 $u(\bar{F})$ 。

C.1.3 标准不确定度分量的评定

C.1.3.1 试验机垂直力示值分辨力引入的标准不确定度 $u(F_1)$

试验机的垂直力示值分辨力为 0.001 kN，以均匀分布落在半宽度为 0.0005 kN 的区间内，按 B 类方法评定， $k = \sqrt{3}$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u(F_1) = \frac{0.0005 \text{ kN}}{\sqrt{3}} = 0.00029 \text{ kN}。$$

C.1.3.2 标准测力仪测量误差引入的标准不确定度 $u(\bar{F})$

C.1.3.2.1 测量重复性引入的标准不确定度

驱动试验机加载装置，使试验机示值显示为 20.000 kN，记录标准测力仪示值，重复进行 10 次，三次测量值分别为 (kN)：20.056、20.051、20.082、20.063、20.070、20.054、20.052、20.074、20.076、20.050， $\bar{F}=20.063$ ，单次测量实验标准偏差为：

$$s(F) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (F_i - \bar{F})^2}{10-1}} = 0.012 \text{ kN}$$

以三次测量的算术平均值为测量结果，则由测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_1(\bar{F}) = s(\bar{F}) = \frac{s(F)}{\sqrt{3}} = 0.0069 \text{ kN}。$$

C.1.3.2.2 标准测力仪引入的标准不确定度

若标准测力仪为 0.3 级，则其最大允许误差为 $\pm 0.3\%$ ，则在 20kN 校准点最大允许误差为 $\pm 0.06\text{kN}$ ，半宽为 0.06kN，设其为均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，其标准不确定度为：

$$u_2(\bar{F}) = \frac{0.06 \text{ kN}}{\sqrt{3}} = 0.035 \text{ kN}$$

则由标准测力仪测量误差引入的标准不确定度为：

$$u(\bar{F}) = \sqrt{u_1^2(\bar{F}) + u_2^2(\bar{F})} = 0.036 \text{ kN}。$$

C.1.4 合成标准不确定度的评定

垂直力标准不确定度分量见表 C.1

表 C.1 垂直力标准不确定度分量一览表

序号	输入量的标准不确定度评定			输出量的标准不确定度分量	
	来源	符号	数值	灵敏系数 c_i	$ c_i \times u(x)$
1	试验机示值分辨力	$u(F_1)$	0.00029 kN	1	0.00029 kN
2	标准测力仪测量误差	$u(\bar{F})$	0.036 kN	-1	0.036 kN

由于各标准不确定度分量互不相关，故：

$$u_c = \sqrt{u^2(F_1) + u^2(\bar{F})} = 0.036kN。$$

C.1.5 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度为： $U = ku_c = 0.072kN$ ，则：

$$U_{rel} = \frac{0.072}{20} \times 100\% = 0.36\% (k = 2)。$$

C.2 位移不确定度评定示例

选取 200mm 校准点为示例，进行位移测量不确定度评定。

C.2.1 建立数学模型

在试验机位移示值为零的位置对深度尺清零，驱动试验机加载装置移动至示值达到校准点，用深度尺测量移动的位移，计算试验机示值与深度尺示值平均值之差即为位移示值误差，数学模型为：

$$\Delta L = L_1 - \bar{L} \quad (\text{C.2})$$

式中：

ΔL ——试验机位移示值误差，mm；

L_1 ——试验机位移示值，mm；

\bar{L} ——深度尺示值平均值，mm。

因为各分量互不相关，由不确定度传播律：

$$u_c^2 = c_1^2 \times u^2(L_1) + c_2^2 \times u^2(\bar{L})$$

其中：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta L}{\partial L_1} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta L}{\partial \bar{L}} = -1。$$

C.2.2 不确定度来源

试验机位移示值分辨力引入的标准不确定度 $u(L_1)$ ；

深度尺测量误差引入的标准不确定度 $u(\bar{L})$ 。

C.2.3 标准不确定度分量的评定

C.2.3.1 试验机位移示值分辨力引入的标准不确定度 $u(L_1)$

试验机的位移示值分辨力为 0.01 mm，以均匀分布落在半宽度为 0.005 mm 的区间内，按 B 类方法评定， $k = \sqrt{3}$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u(L_1) = \frac{0.005 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.003 \text{ mm}。$$

C.2.3.2 深度尺测量误差引入的标准不确定度 $u(L)$ C.2.3.2.1 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

用深度尺测量移动的位移，重复进行 10 次，其值分别为 (mm)：200.02，200.01，199.98，200.02，200.01，199.97，200.01，200.00，199.99，200.00， $\bar{L}=200.00$ mm，则单次测量试验标准差为：

$$s(L) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (L_i - \bar{L})^2}{10-1}} = 0.017 \text{ mm}$$

以三次测量的算术平均值为测量结果，则由测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_1(\bar{L}) = s(\bar{L}) = \frac{s(L)}{\sqrt{3}} = 0.0098 \text{ mm}。$$

C.2.3.2.2 深度尺引入的标准不确定度 u_2

由校准证书可知，深度尺的扩展不确定度为 $U = 0.02$ mm， $k = 2$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u_2(\bar{L}) = \frac{U}{k} = 0.01 \text{ mm}$$

则由深度尺测量误差引入的标准不确定度为：

$$u(\bar{L}) = \sqrt{u_1^2(\bar{L}) + u_2^2(\bar{L})} = 0.014 \text{ mm}。$$

C.2.4 合成标准不确定度的评定

位移标准不确定度分量见表 C.2

表 C.2 位移标准不确定度分量一览表

序号	输入量估计值的标准不确定度评定			输入量估计值的标准不确定度分量	
	来源	符号	数值	灵敏系数 c_i	$ c_i u(x)$
1	试验机示值分辨力	$u(L_1)$	0.003 mm	1	0.003 mm
2	深度尺测量误差	$u(\bar{L})$	0.014mm	-1	0.014 mm

由于各标准不确定度分量互不相关，故：

$$u_c = \sqrt{u^2(L_1) + u^2(\bar{L})} = 0.014 \text{ mm}。$$

C.2.5 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = ku_c = 0.028 \text{ mm}$ ，取一位有效数字，则：

$$U = 0.03 \text{ mm}(k=2)。$$

C.3 加载速度不确定度评定示例

选取 50 mm/min 校准点为示例，进行加载速度测量不确定度评定。

C.3.1 建立数学模型

以深度尺测量的位移与秒表计录时间的比值作为标准速度值，试验机加载速度示值与计算的标准速度值之差即为加载速度示值误差，数学模型为：

$$\Delta v = v - v_0 = v - \frac{60L}{t} \quad (\text{C.3})$$

式中：

Δv ——试验机加载速度示值误差，mm/min；

v ——试验机加载速度示值，mm/min；

v_0 ——标准速度，mm/min；

L ——深度尺两次示值之差，mm；

t ——秒表记录的时间，s。

因为各分量互不相关，由不确定度传播律：

$$u_c^2 = c_1^2 \times u^2(v) + c_2^2 \times u^2(L) + c_3^2 \times u^2(t)$$

取 $L = 50 \text{ mm}$ ， $t = 60 \text{ s}$ ，则：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta v}{\partial v} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta v}{\partial L} = -\frac{60}{t} = -1 \text{ min}^{-1}$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta v}{\partial t} = \frac{60L}{t^2} = \frac{5}{6} \text{ mm}/(\text{min} \cdot \text{s})$$

C.3.2 不确定度来源

试验机加载速度示值分辨力引入的标准不确定度 $u(v)$ ；

深度尺位移测量引入的标准不确定度 $u(L)$ ；

秒表计时引入的标准不确定度 $u(t)$ 。

C.3.3 标准不确定度分量的评定

C.3.3.1 试验机加载速度示值分辨力引入的标准不确定度 $u(v)$

试验机的加载速度示值分辨力为 0.001mm/min，以均匀分布落在半宽度为 0.0005 mm/min 的区间内，采用 B 类方法评定， $k = \sqrt{3}$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u(v) = \frac{0.0005 \text{ mm/min}}{\sqrt{3}} = 0.0003 \text{ mm/min}。$$

C. 3. 3. 2 深度尺位移测量引入的标准不确定度 $u(L)$

由校准证书可知，深度尺的扩展不确定度为 $U = 0.02 \text{ mm}$ ， $k = 2$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u(L) = \frac{U}{k} = 0.01 \text{ mm}。$$

C. 3. 3. 3 秒表计时引入的标准不确定度 $u(t)$

C. 3. 3. 3. 1 测量重复性引入的标准不确定度

相同测量条件下，深度尺示值变化 50 mm，用秒表计时的 10 次时间分别为(s)：60.01，60.03，60.03，59.98，60.01，60.03，59.99，59.97，60.01，60.02， $\bar{t} = 60.01 \text{ s}$ ，则单次试验标准差为：

$$s(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (t_i - \bar{t})^2}{10 - 1}} = 0.021 \text{ s}$$

以三次测量的算术平均值作为测量结果，则由测量重复性引入的不确定度为：

$$u_1(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{3}} = 0.012 \text{ s}。$$

C. 3. 3. 3. 2 标准秒表引入的标准不确定度

由校准证书可知，秒表的扩展不确定度为 $U = 0.01 \text{ s}$ ， $k = 2$ ，则秒表的标准不确定度为：

$$u_2(t) = \frac{U}{k} = 0.005 \text{ s}。$$

C. 3. 3. 3. 3 秒表计时引入的标准不确定度

$u_1(t)$ 与 $u_2(t)$ 互不相关，则由秒表计时引入的标准不确定度为：

$$u(t) = \sqrt{u_1^2(t) + u_2^2(t)} = 0.013 \text{ s}。$$

C.3.4 合成标准不确定度的评定

加载速度标准不确定度分量见表 C.3

表 C.3 加载速度标准不确定度分量一览表

序号	输入量估计值的标准不确定度评定			输入量估计值的标准不确定度分量	
	来源	符号	数值	灵敏系数 c_i	$ c_i u(x)$
1	分辨力	$u(v)$	0.003 mm/min	1	0.003 mm/min
2	位移测量误差	$u(L)$	0.01 mm	-1 min^{-1}	0.01 mm/min
3	时间测量误差	$u(t)$	0.013 s	$\frac{5}{6} \text{ mm}/(\text{min} \cdot \text{s})$	0.011 mm/min

由于各标准不确定度分量互不相关，故合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{0.003^2 + 0.01^2 + 0.011^2} \text{ mm/min} = 0.015 \text{ mm/min}。$$

C.3.5 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = k u_c = 0.015 \times 2 \text{ mm/min} = 0.030 \text{ mm/min}$ ，

取两位有效数字，则：

$$U = 0.030 \text{ mm/min} (k=2)。$$

C.4 倾角角度不确定度评定示例

选取 3° 校准点为示例，进行倾角角度测量不确定度评定。

C.4.1 建立数学模型

驱动主轴旋转至试验机倾角角度示值达到校准点，分别测量试验平台和主轴的倾角角度，两者之差作为标准倾角角度，以试验机倾角角度示值与标准倾角角度之差即为倾角角度示值误差，数学模型为：

$$\Delta\gamma = \gamma - (\gamma_s - \gamma_p) = \gamma - \gamma_s + \gamma_p \quad (\text{C.4})$$

式中：

$\Delta\gamma$ ——试验机倾角角度示值误差，（°）；

γ ——试验机倾角角度示值，（°）；

γ_s ——倾角仪测量的主轴倾角角度，（°）；

γ_p ——倾角仪测量的试验台倾角角度，（°）。

由于主轴倾角角度与试验台倾角角度是用同一个倾角仪测量的，所以 γ_s 与 γ_p 的相关系数 $r(\gamma_s, \gamma_p)$ 为+1， γ 与 γ_s 和 γ_p 均不相关，则根据不确定度传播律：

$$u_c^2 = c_1^2 \times u^2(\gamma) + c_2^2 \times u^2(\gamma_s) + c_3^2 \times u^2(\gamma_p) + 2c_2c_3u(\gamma_s)u(\gamma_p)$$

其中：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta\gamma}{\partial \gamma} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta\gamma}{\partial \gamma_s} = -1, \quad c_3 = \frac{\partial \Delta\gamma}{\partial \gamma_p} = 1。$$

C.4.2 不确定度来源

试验机倾角角度示值分辨力的标准不确定度 $u(\gamma)$ ；

测量主轴倾角角度误差引入的标准不确定度 $u(\gamma_s)$ ；

测量试验台倾角角度误差引入的标准不确定度 $u(\gamma_p)$ 。

C.4.3 标准不确定度分量的评定

C.4.3.1 试验机倾角角度示值分辨力的标准不确定度 $u(\gamma)$

试验机的倾角角度示值分辨力为 0.001° ，以均匀分布落在半宽度为 0.0005° 的区间内，按 B 类方法评定， $k = \sqrt{3}$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u(\gamma) = \frac{0.0005^\circ}{\sqrt{3}} = 0.0003^\circ。$$

C. 4. 3. 2 测量主轴倾角角度误差引入的标准不确定度 $u(\gamma_s)$

C. 4. 3. 2. 1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\gamma_s)$

用倾角仪测量主轴的倾角角度，重复进行 10 次，其值分别为 ($^\circ$): 3.037, 3.031, 3.033, 3.043, 3.041, 3.025, 3.050, 3.040, 3.033, 3.027, $\overline{\gamma_s} = 3.036^\circ$ ，则单次测量试验标准差为：

$$s(\gamma_s) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\gamma_{si} - \overline{\gamma_s})^2}{10-1}} = 0.0077^\circ$$

以三次测量的算术平均值为测量结果，则由测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_1(\gamma_s) = \frac{s(\gamma_s)}{\sqrt{3}} = 0.0044^\circ。$$

C. 4. 3. 2. 2 倾角仪引入的标准不确定度 $u_2(\gamma_s)$

由校准证书可知，倾角仪的扩展不确定度为 $U = 0.01^\circ$ ， $k = 2$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u_{s2} = \frac{U}{k} = 0.005^\circ$$

则测量主轴倾角角度误差引入的标准不确定度为：

$$u(\gamma_s) = \sqrt{u_1^2(\gamma_s) + u_2^2(\gamma_s)} = 0.0067^\circ。$$

C. 4. 3. 3 测量试验台倾角角度误差引入的标准不确定度 $u(\gamma_p)$

C. 4. 3. 3. 1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\gamma_s)$

用倾角仪测量主轴的倾角角度，重复进行 10 次，其值分别为 ($^\circ$): 0.012, 0.016,

0.018, 0.011, 0.009, 0.013, 0.015, 0.011, 0.017, 0.015, $\overline{\gamma_s}=0.014^\circ$, 则单次测量试验标准差为:

$$s(\gamma_p) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\gamma_{pi} - \overline{\gamma_p})^2}{10-1}} = 0.0038^\circ$$

以三次测量的算术平均值为测量结果, 则由测量重复性引入的标准不确定度为:

$$u_1(\gamma_p) = \frac{s(\gamma_p)}{\sqrt{3}} = 0.0022^\circ$$

C. 4. 3. 3. 2 倾角仪引入的标准不确定度 $u_2(\gamma_p)$

由校准证书可知, 倾角仪的扩展不确定度为 $U = 0.01^\circ$, $k = 2$, 则其引入的标准不确定度为:

$$u_{p2} = \frac{U}{k} = 0.005^\circ$$

则测量试验平台倾角角度误差引入的标准不确定度为:

$$u(\gamma_p) = \sqrt{u_1^2(\gamma_p) + u_2^2(\gamma_p)} = 0.0055^\circ$$

C. 4. 4 合成标准不确定度的评定

倾角角度的标准不确定度分量见表 C.4

表 C.4 倾角角度的标准不确定度分量一览表

序号	输入量估计值的标准不确定度评定			输入量估计值的标准不确定度分量	
	来源	符号	数值	灵敏系数 c_i	$ c_i u(x)$
1	试验机示值分辨力	$u(\gamma)$	0.0003°	1	0.0003°
2	测量主轴倾角角度误差	$u(\gamma_s)$	0.0067°	-1	0.0067°
3	测量试验平台倾角角度误差	$u(\gamma_p)$	0.0055°	1	0.0055°

γ_s 与 γ_p 的相关系数为+1, γ 与 γ_s 和 γ_p 均不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u^2(\gamma) + u^2(\gamma_s) + u^2(\gamma_p) - 2u(\gamma_s)u(\gamma_p)} = 0.0012^\circ$$

C. 4. 5 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度为： $U = ku_c = 0.0024^\circ$ ，取一位有效数字，则：

$$U = 0.003^\circ (k = 2)。$$

C.5 充气压力不确定度评定示例

选取 600 kPa 校准点为示例，进行充气压力测量不确定度评定。

C.5.1 建立数学模型

使压力计与试验机进气管相连，调整压力计示值至校准点，读取试验机充气压力示值，试验机示值与压力计示值之差即为充气压力示值误差，数学模型为：

$$\Delta p = p_1 - \overline{p_0} \quad (\text{C.5})$$

式中：

Δp ——试验机充气压力示值误差，kPa；

p_1 ——试验机充气压力示值，kPa；

$\overline{p_0}$ ——压力计示值平均值，kPa。

因为各分量互不相关，由不确定度传播律：

$$u_c^2 = c_1^2 \times u^2(p_1) + c_2^2 \times u^2(\overline{p_0})$$

其中：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta p}{\partial p_1} = 1, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta p}{\partial \overline{p_0}} = -1。$$

C.5.2 不确定度来源

试验机充气压力示值分辨力引入的标准不确定度 $u(p_1)$ ；

压力计测量误差引入的标准不确定度 $u(\overline{p_0})$ 。

C.5.3 标准不确定度分量的评定

C.5.3.1 试验机充气压力示值分辨力引入的标准不确定度 $u(p_1)$

试验机的充气压力示值分辨力为 0.1 kPa，以均匀分布落在半宽度为 0.05 kPa 的区间内，按 B 类方法评定， $k = \sqrt{3}$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u(p_1) = \frac{0.05 \text{ kPa}}{\sqrt{3}} = 0.029 \text{ kPa}。$$

C.5.3.2 压力计测量误差引入的标准不确定度 $u(\overline{p_0})$

C.5.3.2.1 压力计引入的标准不确定度

由校准证书可知，压力计的扩展不确定度为 $U = 0.4 \text{ kPa}$ ， $k = 2$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u_1(p_0) = \frac{U}{k} = 0.2 \text{ kPa}$$

C.5.3.2.2 测量重复性引入的标准不确定度 $u_2(\overline{p_0})$

当试验机示值达到 600 kPa 时，记录压力计示值，重复进行 10 次，其值分别为(kPa)：600.6, 600.2, 600.9, 600.7, 600.8, 600.8, 600.6, 600.4, 600.5, 600.6, $\overline{p_0} = 600.6 \text{ kPa}$ ，则单次测量试验标准差为：

$$s(p_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (p_{0i} - \overline{p_0})^2}{10-1}} = 0.208 \text{ kPa}$$

以三次测量的算术平均值为测量结果，则由测量重复性引入的标准不确定度为：

$$u_2(\overline{p_0}) = s(\overline{p_0}) = \frac{s(p_0)}{\sqrt{3}} = 0.120 \text{ kPa}。$$

则压力计测量误差引入的标准不确定度

$$u(\overline{p_0}) = \sqrt{0.2^2 + 0.120^2} = 0.233 \text{ kPa}。$$

C.5.4 合成标准不确定度的评定

充气压力的标准不确定度分量见表 C.5

表 C.5 输出量的标准不确定度分量一览表

序号	输入量估计值的标准不确定度评定			输入量估计值的标准不确定度分量	
	来源	符号	数值	灵敏系数 c_i	$ c_i u(x)$
1	试验机示值分辨力	$u(p_1)$	0.029 kPa	1	0.029 kPa
2	压力计	$u(\overline{p_0})$	0.233 kPa	-1	0.233 kPa

由于各标准不确定度分量互不相关，故：

$$u_c = \sqrt{u^2(\overline{p_1}) + u^2(\overline{p_0})} = 0.23 \text{ kPa}。$$

C.5.5 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度为： $U = ku_c = 0.46 \text{ kPa}$ ，取一位有效数字，则：

$$U = 0.5 \text{ kPa} (k = 2)。$$
