

天津市地方计量技术规范

JJF(津)XX—2024

轮胎滚动阻力转鼓试验机校准规范

Calibration Specification of Drum Tester for Tire Rolling
Resistance Test

(报批稿)

2024—XX—XX 发布

2024—XX—XX 实施

天津市市场监督管理委员会 发布

轮胎滚动阻力转鼓试验机校准规范

Calibration Specification of Drum Tester
for Tire Rolling Resistance Test

JJF(津) XX-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

本规范委托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：

贺 胜 (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)

田 明 (天津市计量监督检测科学研究院)

王传博 (天津市计量监督检测科学研究院)

王俊永 (天津久荣工业技术有限公司)

田好胜 (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	(1)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
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 校准结果表达	(12)
9 复校时间间隔	(12)
附录 A 轮胎滚动阻力转鼓试验机校准原始记录参考格式	(13)
附录 B 轮胎滚动阻力转鼓试验机校准原始记录参考格式	(17)
附录 C 轮胎滚动阻力转鼓试验机测量不确定度的评定示例	(20)

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。

轮胎滚动阻力转鼓试验机校准规范

1 范围

本规范适用于轿车、载重汽车轮胎滚动阻力转鼓试验机（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 29040 汽车轮胎滚动阻力试验方法 单点试验和测量结果的相关性

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 29040 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1 滚动阻力 rolling resistance

单位行驶里程的能量损失或能耗。

注：国际单位制（SI）习惯于用 $N \cdot m/m$ 来表示滚动阻力，相当于用 N 来表示阻力。

3.2 轮轴力 spindle force

在轮轴处测量到的沿 X 方向的力，对于工位与转鼓水平布置的试验机，轮轴力过轮轴中心竖直向下。

3.3 试验负荷 test load

轮胎作用于转鼓沿 Z 方向的力。

3.4 扭矩 torque

作用于转鼓轴的力矩。

3.5 静负荷半径 loaded radius

轮胎在试验负荷作用下，沿车轮平面测量的车轮中心到轮胎与转鼓接触点间的距离。

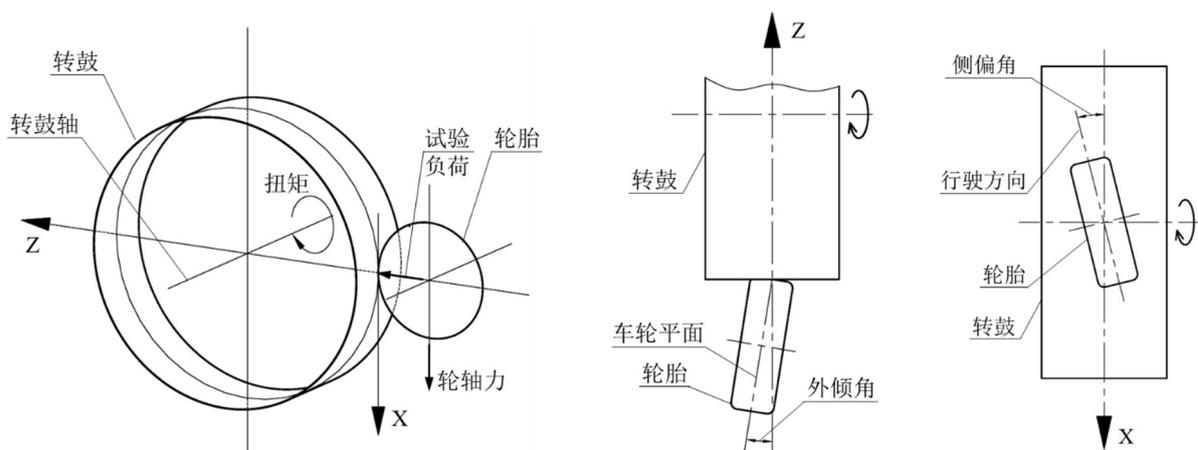


图1 示意图

4 概述

试验机是专用于进行轮胎滚动阻力性能的试验设备。

试验机由主机（机架、转鼓和工位）、试验负荷测量控制系统、驱动装置、速度测量控制系统、轮轴力测量系统、扭矩测量系统等组成，参见图 1。转鼓的钢制表面作为模拟路面，转鼓由电动机驱动，其转速可以调整。轮轴上装有两分量力传感器来测量轮胎的试验负荷和轮轴力，在转鼓轴与电动机轴之间装有扭矩传感器用于测量扭矩，根据轮轴力或扭矩、负荷半径、转鼓半径可以计算出滚动阻力。

5 计量特性

5.1 转鼓

转鼓直径：（1700±17）mm 或（2000±20）mm；

转鼓径向圆跳动：最大允许误差±0.1 mm。

5.2 轮胎定位

外倾角：（-5~5）°；最大允许误差±0.115°；

侧偏角：（-2~2）°；最大允许误差±0.057°。

5.3 试验负荷

LI≤121；最大允许误差：±20 N 或±0.5%取较大值；

LI>121；最大允许误差：±45 N 或±0.5%取较大值。

5.4 轮轴力

LI≤121；最大允许误差：±0.5 N 或±0.5%取较大值；

LI>121: 最大允许误差: $\pm 1.0 \text{ N}$ 或 $\pm 0.5\%$ 取较大值。

5.5 扭矩

LI \leq 121: 最大允许误差: $\pm 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 或 $\pm 0.5\%$ 取较大值;

LI>121: 最大允许误差: $\pm 1.0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 或 $\pm 0.5\%$ 取较大值。

5.6 转鼓速度

测量范围: (10~300) km/h;

最大允许误差: $\pm 0.2 \text{ km/h}$ 。

5.7 静负荷半径

测量范围: (200~700) mm;

最大允许误差: $\pm 1 \text{ mm}$ 。

5.8 充气压力

测量范围: (100~1000) kPa;

最大允许误差: $\pm 3 \text{ kPa}$ 。

5.9 温度偏差

测量范围: (20~30) $^{\circ}\text{C}$;

最大允许误差: $\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

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: (20~30) $^{\circ}\text{C}$;

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。电压波动范围 $\leq \pm 5\%$ 。

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 0.1 级及以上
2	深度尺	分度值（分辨力）为 0.01 mm
3	大量程百分表	分度值（分辨力）为 0.01 mm
4	倾角仪	最大允许误差 $\pm 0.015^\circ$
5	π 尺	最大允许误差 ± 0.2 mm
6	转速表	准确度等级 0.1 级及以上
7	卡尺	分度值（分辨力）为 0.02 mm
8	压力计	最大允许误差 ± 1 kPa
9	标准铂电阻及配套设备	最大允许误差 ± 0.15 °C，或扩展不确定度满足要求的其他标准器具。
10	测力仪安装夹具、配重块、深度尺安装夹具、测量外倾角/侧偏角夹具、水平仪、百分表支座等。	

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	转鼓：直径和径向圆跳动	7.2.1
2	轮胎定位：外倾角、侧偏角	7.2.2
3	试验负荷	7.2.3
4	轮轴力	7.2.4
5	扭矩	7.2.5
6	转鼓速度	7.2.6
7	静负荷半径	7.2.7
8	充气压力	7.2.8
9	温度偏差	7.2.9

7.2 校准方法

7.2.1 转鼓

7.2.1.1 转鼓直径

校准时，用 π 尺测量转鼓鼓面的中部及两侧距边缘 50 mm 处共三个位置的直径，每个位置各测量三次，按公式 (1) 计算其直径：

$$D = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 D_i \quad (1)$$

式中：

D ——转鼓直径，mm；

D_i ——第 i 次测量， π 尺读数，mm。

7.2.1.2 转鼓径向圆跳动

校准时，将百分表表座吸附在机架上，百分表表针抵触在转鼓鼓面上，旋转转鼓一周寻找百分表示值最小点并标记。将百分表清零，从标记点开始旋转转鼓一周，记录百分表示值最大值。按上述操作，分别测量转鼓鼓面的中部及两侧距边缘 50 mm 处共三个位置的径向圆跳动，每个位置测量三次，按公式 (2) 计算转鼓径向圆跳动值：

$$R = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 R_i \quad (2)$$

式中：

R ——转鼓径向圆跳动，mm；

R_i ——第 i 次测量，百分表读数，mm。

7.2.2 轮胎定位

7.2.2.1 外倾角

在测量范围内选取大致均匀的五点进行校准（应包括 0° 校准点），驱动试验机外倾角加载装置，使试验机示值达到校准点，测量试验机外倾角实际值。对于外倾角不可变的试验机，试验机示值视为 0° ，只对 0° 进行校准。按公式 (3) 计算外倾角误差：

$$\Delta\gamma = \gamma_i - \gamma_{0i} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (3)$$

式中：

$\Delta\gamma$ ——外倾角示值误差， $(^\circ)$ ；

γ_i ——第 i 校准点，试验机示值， $(^\circ)$ ；

$\gamma_{0,i}$ ——第 i 校准点，外倾角实际值，(°)。

图 2 为一种测量外倾角可选示例。在轮轴上安装找正轴，保证找正轴与轮轴同轴度不大于 0.05 mm。找正套安装在找正轴上，可自由滑动且能精确定位。托板与找正套固定在一起，百分表通过支座吸附在托板上。

用深度尺在转鼓表面宽度方向选取距离为 L 的 A、B 两点。在 A 点处以找正轴为转轴旋转托板，使百分表表针沿转鼓弧面扫掠，读最小数值 V_A ；将百分表平移到 B 点，以找正轴为转轴旋转托板，使百分表表针沿转鼓弧面扫掠，读最小数值 V_B 。重复测量三次，按公式 (4) 计算标准外倾角

$$\gamma_0 = \arctan \left(\sum_{i=1}^3 \frac{(V_{Ai} - V_{Bi})}{L_\gamma} \right) \quad (4)$$

式中：

γ_0 ——外倾角实际值，(°)；

V_{Ai} ——第 i 次测量，百分表在 A 点最小读数，mm；

V_{Bi} ——第 i 次测量，百分表在 B 点最小读数，mm；

L_γ ——A 和 B 两点在转鼓宽度方向上的距离。

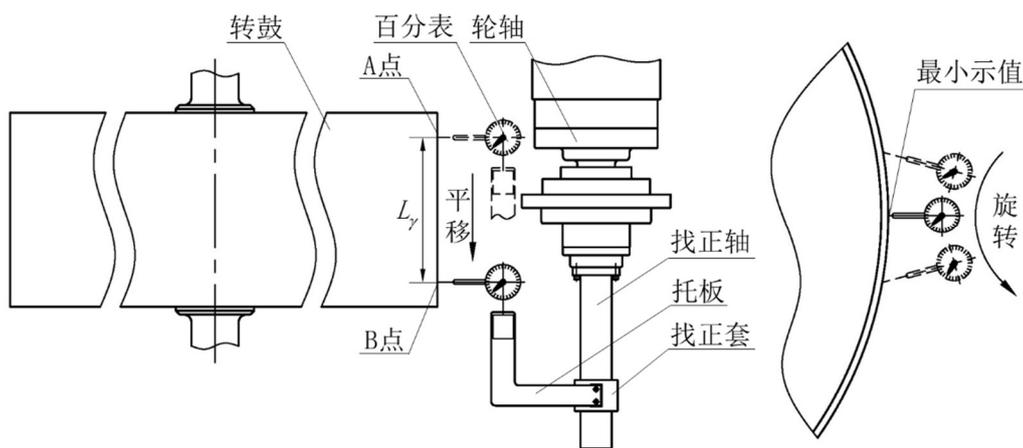


图2 外倾角测量示例

7.2.2.2 侧偏角

在测量范围内选取大致均匀的五点进行校准（应包括 0°校准点），驱动试验机侧偏角加载装置，使试验机示值达到校准点，测量试验机侧偏角实际值。对于侧偏角不可变的

试验机，试验机示值视为 0° ，只对 0° 进行校准。按公式 (5) 计算侧偏角误差：

$$\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_{0,i} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (5)$$

式中：

$\Delta\alpha$ ——侧偏角示值误差， $(^\circ)$ ；

α_i ——第 i 校准点，试验机示值， $(^\circ)$ ；

$\alpha_{0,i}$ ——第 i 校准点，侧偏角实际值， $(^\circ)$ 。

图 3 为一种测量 0° 侧偏角可选示例。在轮轴上安装找正轴，找正套安装在找正轴上，可自由转动且能精确定位。托板与找正套固定在一起，百分表通过支座吸附在托板上。

在转鼓圈侧面选择一点 C 并标记，用百分表测量 C 点数值 V_C ，旋转转鼓一定角度，将 C 点旋转至 C' 点，再用百分表测量 C' 点数值 $V_{C'}$ ，用深度尺测量 C 和 C' 两点竖直距离 L_α 。重复测量三次，按公式 (6) 计算 0° 侧偏角

$$\alpha_{0,1} = \arctan \left(\sum_{i=1}^3 \frac{(V_{C_i} - V_{C'_i})}{L_\alpha} \right) \quad (6)$$

式中：

$\alpha_{0,1}$ —— 0° 侧偏角实际值， $(^\circ)$ ；

V_{C_i} ——第 i 次测量，百分表在 C 点读数，mm；

$V_{C'_i}$ ——第 i 次测量，百分表在 C' 点读数，mm；

L_α ——C 和 C' 两点在竖直方向上的距离。

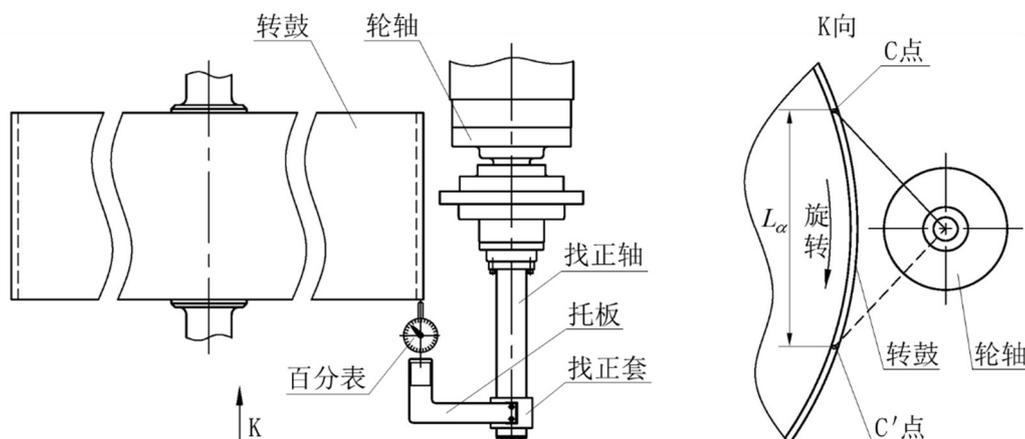


图3 侧偏角测量示例

在 0° 度姿态下，将倾角仪吸附在车轮安装面上并清零，控制侧偏角加载装置运动至校准点，读取倾角仪示值，并与 0° 侧偏角实际值相加作为标准侧偏角，如公式 (7)：

$$\alpha_{0,i} = \alpha_{0,1} + \alpha_{q,i} \quad i = 2, 3, 4, 5 \quad (7)$$

式中：

$\alpha_{0,i}$ ——第 i 校准点，标准侧偏角， $(^\circ)$ ；

$\alpha_{q,i}$ ——第 i 校准点，倾角仪示值， $(^\circ)$ 。

7.2.3 试验负荷

将标准测力仪通过夹具安装在试验机加载方向上，使其中心轴线与试验负荷方向平行。在未加载状态下，试验机示值清零，然后通过控制加载系统施加负荷，当试验机负荷示值达到校准点时，记录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 (8) 计算试验负荷示值相对误差：

$$\delta_{zi} = \frac{F_{zi} - \bar{F}_{0i}}{\bar{F}_{0i}} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (8)$$

式中：

δ_{zi} ——第 i 校准点，试验负荷示值相对误差，%

F_{zi} ——第 i 校准点，试验机示值，kN；

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

7.2.4 轮轴力

对于工位与转鼓水平布置的试验机，轮轴力方向竖直向下。以配重块作为加力装置，记录标准测力仪相应示值。当一配重块不足以产生所需重力时，可同时使用多个配重块。

校准前，轮轴处标准测力仪下方不悬挂任何配重块，对试验机轮轴力示值清零。校准时，在轮轴处标准测力仪下方竖直悬挂校准轮轴力值对应质量的配重块或配重块组，待稳定后读取试验机轮轴力相应示值，并记录标准测力仪相应示值。根据试验机量程选取大致均匀的 5 点进行校准，每个校准点重复测量三次。按公式 (9) 计算轮轴力示值相对误差：

$$\delta_{ti} = \frac{\overline{F_{ti}} - F_{t0i}}{F_{t0i}} \times 100\% \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (9)$$

式中：

δ_{ti} ——第 i 校准点，轮轴力示值相对误差，%；

$\overline{F_{ti}}$ ——第 i 校准点，试验机轮轴力示值三次算术平均值，N；

F_{t0i} ——第 i 校准点，标准测力仪示值，N。

7.2.5 扭矩

固定扭矩传感器一侧的旋转轴，使其不能转动，在另一侧的旋转轴上安装杠杆及其他夹具。在杠杆一端安装测力计，在测力计下方悬挂配重块或配重块组，以测力计示值作为标准力，标准力与力臂的乘积作为标准扭矩。

校准前，应调整杠杆平衡，并使试验机扭矩示值清零。校准时，在测力计下方悬挂校准扭矩值对应质量的配重块，待稳定后读取试验机扭矩示值。根据试验机配置配重块规格选取大致均匀的 5 点进行校准，每个校准点重复测量三次。按公式 (10) 计算扭矩示值相对误差：

$$\delta_{Mi} = \frac{\overline{M_i} - F_{M0i}l}{F_{M0i}l} \times 100\% \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (10)$$

式中：

δ_{Mi} ——第 i 校准点，扭矩示值相对误差，%；

$\overline{M_i}$ ——第 i 校准点，试验机扭矩示值三次算术平均值，Nm；

F_{M0i} ——第*i*校准点, 所用专用砝码重力, N;

l ——力臂长度, m。

注: 力臂长度可使用试验机出厂报告中的参数。

7.2.6 转鼓速度

校准时, 以设定速度旋转转鼓, 当试验机速度示值稳定后, 用标准转速表测量转鼓转速, 在测量范围内取大致均匀的 5 点进行校准, 每个校准点测量三次, 按公式 (11) 计算标准速度

$$v_{0i} = 0.00006\pi D\bar{n}_i \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (11)$$

式中: $\pi = 3.14$

v_{0i} ——第*i*校准点, 标准转速, km/h;

D ——转鼓直径, mm;

\bar{n}_i ——第*i*校准点, 转速表示值三次平均值, r/min。

按公式 (12) 计算试验机速度示值误差:

$$\Delta v_i = v_i - v_{0i} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (12)$$

式中:

Δv_i ——第*i*校准点, 试验机速度示值误差, km/h;

v_i ——第*i*校准点, 试验机速度示值, km/h。

7.2.7 静负荷半径

将深度尺通过夹具安装在轮轴上, 且深度尺平行于试验负荷方向, 同时应具备止转装置防止深度尺旋转。在轮轴距离转鼓最远处, 试验机示值和深度尺示值清零。校准时, 控制轮轴向转鼓方向平移, 当试验机示值达到校准点时, 读取深度尺示值。在测量范围内取大致均匀的 5 点进行校准, 每个校准点测量三次, 按公式 (13) 计算试验机负荷半径示值误差

$$\Delta r_i = r_i - r_{0i} \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (13)$$

式中:

Δr_i ——第 i 校准点，负荷半径示值误差，mm；

r_i ——第 i 校准点，试验机示值，mm；

\bar{r}_{0i} ——第 i 校准点，深度尺示值三次平均值，r/min。

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（14）顺序计算充气压力误差。

$$\Delta p_i = p_i - \bar{p}_{0i} \quad i=1,2,3,4,5 \quad (14)$$

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；

\bar{p}_{0i} ——第 i 校准点，压力计示值算术平均值，kPa。

7.2.9 温度偏差

将试验机的环境温度传感器取出，与标准铂电阻温度计一同放入恒温槽或其它恒温设备中，将恒温设备温度设置在测量点。待恒温设备温度稳定后，读取恒温设备中标准铂电阻的转换温度示值，以及试验机环境温度示值。其间恒温设备的温度应控制在偏离测量点温度 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 以内。在测量范围内选取大致均匀的 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（15）计算环境温度示值误差。

$$\Delta T_i = \bar{T}_i - T_{0i} \quad i=1,2,3,4,5 \quad (15)$$

式中：

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

\bar{T}_i ——第 i 校准点，试验机环境温度示值的平均值， $^\circ\text{C}$ 。

T_{0i} ——第 i 校准点，标准铂电阻温度计测量温度示值， $^\circ\text{C}$ ；

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。

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

轮胎滚动阻力转鼓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. 转鼓直径

π 尺示值				平均值	U (k=2)
	1	2	3		
左侧					
中部					
右侧					

2. 转鼓径向圆跳动

百分表示值				平均值	U (k=2)
	1	2	3		
左侧					
中部					
右侧					

3. 外倾角

外倾角	试验机示值	A 与 B 点距离	百分表示值						实际角度	示值误差	U (k=2)
			1		2		3				
			A 点	B 点	A 点	B 点	A 点	B 点			

4. 侧偏角

外倾角	试验机示值	C 与 C' 点距离	百分表示值						实际角度	示值误差	U (k=2)
			1		2		3				
			C 点	C' 点	C 点	C' 点	C 点	C' 点			
	0										
	试验机示值	倾角仪示值						实际角度	示值误差	U (k=2)	
		1	2	3	平均值						

5. 试验负荷

	校准点	试验机示值	标准值				示值相对误差	$U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
试验负荷								

6. 轮轴力

	校准点	试验机示值				标准值	示值相对误差	$U(k=2)$
		1	2	3	平均值			
试验负荷								

7. 扭矩

	校准点	试验机示值				测力仪示值	力臂	标准扭矩	示值相对误差	$U(k=2)$
		1	2	3	平均值					
扭矩										

8. 转鼓速度

	校准点	试验机示值	转速表示值				转鼓直径	标准速度	示值误差	$U(k=2)$
			1	2	3	平均值				
速度										

9. 静负荷半径

	校准点	试验机示值	标准值				示值误差	$U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
静 负 荷 半 径								

10. 充气压力

	校准点	试验机 示值	标准值				示值误差	$U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
充 气 压 力								

11. 温度偏差

	校准点	标准器 示值	试验机示值				示值误差	$U(k=2)$
			1	2	3	平均值		
环 境 温 度								

附录 B

轮胎滚动阻力转鼓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

转鼓	直径		测量不确定度 $U(k=2)$				
	径向圆跳动		测量不确定度 $U(k=2)$				
扭矩	试验机示值	标准值	示值相对误差	$U(k=2)$			
速度	试验机示值	标准值	示值误差	$U(k=2)$			
工位							
外倾角	试验机示值	标准值	示值误差	侧偏角	试验机示值	标准值	示值误差
试验负荷	试验机示值	标准值	示值相对误差	测量不确定度 $U(k=2)$			

轮轴力	试验机示值	标准值	示值相对误差	$U(k=2)$
静负荷半径	试验机示值	标准值	示值误差	$U(k=2)$
充气压力	试验机示值	标准值	示值误差	$U(k=2)$
温度偏差	试验机示值	标准值	示值误差	$U(k=2)$

附录 C

轮胎滚动阻力转鼓试验机测量不确定度的评定示例

C.1 转鼓直径不确定度的评定示例

以 2000 mm 直径转鼓为例，进行不确定度评定。

C.1.1 建立数学模型

用 π 尺重复测量转鼓直径，取 n 次测量结果的平均值作为转鼓直径校准值：

$$\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \quad (\text{C.1})$$

式中：

\bar{D} ——转鼓直径平均值，mm；

D_i ——第 i 次测量， π 尺示值，mm；

n ——测量次数。

C.1.2 不确定度来源

测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(D)$ ；

π 尺引入的标准不确定度 $u_2(D)$ 。

C.1.3 标准不确定度分量的评定

C.1.3.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(D)$

用 π 尺独立测量转鼓直径 10 次，其值分别为：2000.1 mm，2000.2 mm，2000.1 mm，2000.0 mm，2000.1 mm，2000.4 mm，2000.3 mm，2000.2 mm，2000.5 mm，2000.3 mm，

$\bar{D} = 2000.22$ mm，则单次测量试验标准差为：

$$s(D) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (D_i - \bar{D})^2}{10-1}} = 0.155 \text{ mm}$$

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：

$$u_1(D) = s(\bar{D}) = \frac{s(D)}{\sqrt{3}} = 0.089 \text{ mm}。$$

C.1.3.2 π 尺引入的标准不确定度 $u_2(D)$

由校准证书可知， π 尺的扩展不确定度为 $U = 0.02 \text{ mm} + 5 \times 10^{-6} L$ ， $k = 2$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u_2(D) = \frac{U}{k} = 0.0257 \text{ mm}$$

C.1.4 合成标准不确定度的评定

转鼓直径标准不确定度分量见表 C.1。

表 C.1 转鼓直径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	测量重复性	$u_1(D)$	0.089 mm	1	0.089 mm
2	π 尺	$u_2(D)$	0.0257 mm	1	0.0257 mm

由于各标准不确定度分量互不相关，故：

$$u_c = \sqrt{0.089^2 + 0.0257^2} = 0.093 \text{ mm}$$

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： $U = ku_c = 0.186 \text{ mm}$ ，

取两位有效数字，则：

$$U = 0.19 \text{ mm}， k = 2。$$

C.2 侧倾角不确定度的评定示例

以 0° 侧倾角为例, 进行不确定度评定。

C.2.1 建立数学模型

在转鼓表面沿轴线方向上取 A、B 两点, 用深度尺测量两点距离, 先读取百分表在 A 点的读数, 再将百分表沿轮轴轴线平移到 B 点读数, 按公式 C.2 计算外倾角

$$\gamma = \arctan\left(\frac{V_A - V_B}{L_{AB}}\right) \quad (\text{C.2})$$

式中:

γ ——外倾角, ($^\circ$);

V_A ——百分表在 A 点的读数, mm;

V_B ——百分表在 B 点的读数, mm;

L_{AB} ——A、B 两点之间的距离。

V_A 与 V_B 由同一百分表获得, 相关系数为 1, L_{AB} 与 V_A 、 V_B 均不相关, 由不确定度传播律:

$$u_c^2 = c_1^2 u^2(V_A) + c_2^2 u^2(V_B) + c_3^2 u^2(L_{AB}) + 2c_1 c_2 u(V_A) u(V_B)$$

其中:

$$c_1 = \frac{\partial \gamma}{\partial V_A} = \frac{L_{AB}}{(V_A - V_B)^2 + L_{AB}^2},$$

$$c_2 = \frac{\partial \gamma}{\partial V_B} = -\frac{L_{AB}}{(V_A - V_B)^2 + L_{AB}^2},$$

$$c_3 = \frac{\partial \gamma}{\partial L_{AB}} = -\frac{V_A - V_B}{(V_A - V_B)^2 + L_{AB}^2}.$$

C.2.2 不确定度来源

测量 V_A 引入的标准不确定度 $u(V_A)$;

测量 V_B 引入的标准不确定度 $u(V_B)$;

测量 L_{AB} 引入的标准不确定度 $u(L_{AB})$:

C. 2. 3 标准不确定度分量的评定

C. 2. 3. 1 测量 V_A 引入的标准不确定度 $u(V_A)$

C. 2. 3. 1. 1 测量重复性引入的标准不确定度

读取 10 次百分表在 A 点的数值分别为: 1.10 mm, 1.11 mm, 1.12 mm, 1.09 mm, 1.08 mm, 1.09 mm, 1.13 mm, 1.12 mm, 1.10 mm, 1.12 mm, $\bar{V}_A = 1.106$ mm, 则单次测量试验标准差为:

$$s(V_A) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (V_{Ai} - \bar{V}_A)^2}{10-1}} = 0.016 \text{ mm}$$

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:

$$u_1(V_A) = s(\bar{V}_A) = \frac{s(V_A)}{\sqrt{3}} = 0.0092 \text{ mm}$$

C. 2. 3. 1. 2 百分表引入的标准不确定度

由校准证书可知, 百分表的扩展不确定度为 $U = 4.1 \mu\text{m}$, $k = 2$, 则其引入的标准不确定度为:

$$u_2(V_A) = \frac{U}{k} = 0.00205 \text{ mm}$$

则由测量 V_A 引入的标准不确定度为

$$u(V_A) = \sqrt{0.0092^2 + 0.00205^2} \text{ mm} = 0.0094 \text{ mm}$$

C. 2. 3. 2 测量 V_B 引入的标准不确定度 $u(V_B)$

C. 2. 3. 2. 1 测量重复性引入的标准不确定度

读取 10 次百分表在 B 点的数值分别为: 1.25 mm, 1.23 mm, 1.21 mm, 1.23 mm, 1.26 mm, 1.22 mm, 1.25 mm, 1.22 mm, 1.26 mm, 1.24 mm, $\bar{V}_A = 1.237$ mm, 则单次测量试验标准差为:

$$s(V_B) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (V_{Bi} - \overline{V_B})^2}{10-1}} = 0.018 \text{ mm}$$

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：

$$u_1(V_B) = s(\overline{V_B}) = \frac{s(V_B)}{\sqrt{3}} = 0.010 \text{ mm}$$

C. 2. 3. 2. 2 百分表引入的标准不确定度

由校准证书可知，百分表的扩展不确定度为 $U = 4.1 \mu\text{m}$ ， $k = 2$ ，则其引入的标准不确定度为：

$$u_2(V_B) = \frac{U}{k} = 0.00205 \text{ mm}$$

则由测量 V_B 引入的标准不确定度为

$$u(V_B) = \sqrt{0.010^2 + 0.00205^2} \text{ mm} = 0.010 \text{ mm}$$

C. 2. 3. 3 测量 L_{AB} 引入的标准不确定度 $u(L_{AB})$

C. 2. 3. 3. 1 测量重复性引入的标准不确定度

深度尺测量 10 次 A、B 两点间的距离分别为：400.02 mm，400.04 mm，400.01 mm，400.02 mm，400.02 mm，400.03 mm，400.02 mm，400.04 mm，400.03 mm，400.02 mm， $\overline{V_A} = 400.025 \text{ mm}$ ，则单次测量试验标准差为：

$$s(L_{AB}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (L_{ABi} - \overline{L_{AB}})^2}{10-1}} = 0.0097 \text{ mm}$$

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：

$$u_1(L_{AB}) = s(\overline{L_{AB}}) = \frac{s(L_{AB})}{\sqrt{3}} = 0.0056 \text{ mm}$$

C. 2. 3. 3. 2 深度尺引入的标准不确定度

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：

$$u_2(L_{AB}) = \frac{U}{k} = 0.01 \text{ mm}$$

则由测量 L_{AB} 引入的标准不确定度为

$$u(L_{AB}) = \sqrt{0.0056^2 + 0.01^2} \text{ mm} = 0.011 \text{ mm}$$

C.2.4 合成标准不确定度的评定

侧倾角标准不确定度分量见表 C.2。

表 C.2 侧倾角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	测量 V_A	$u(V_A)$	0.0094 mm	0.0025 mm^{-1}	2.35×10^{-5}
2	测量 V_B	$u(V_B)$	0.010 mm	-0.0025 mm^{-1}	2.5×10^{-5}
3	测量 L_{AB}	$u(L_{AB})$	0.011 mm	$8.2 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-1}$	9.0×10^{-9}

由于各标准不确定度分量互不相关，故：

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u^2(V_A) + c_2^2 u^2(V_B) + c_3^2 u^2(L_{AB}) + 2c_1 c_2 u(V_A) u(V_B)} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ rad} = 0.0000859^\circ$$

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： $U = k u_c = 0.0001718^\circ$ ，

取两位有效数字，则：

$$U = 0.00017^\circ, \quad k = 2。$$

C.3 试验负荷不确定度的评定示例

选取 13 kN 校准点为示例，进行试验负荷测量不确定度评定。

C.3.1 建立数学模型

通过试验机对标准测力仪施加载荷，当试验机负荷示值达到校准点时，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负荷示值误差，建立数学模型如下：

$$\delta_Z = \frac{F_{Z1} - \overline{F_{Z0}}}{F_{Z0}} \quad (\text{C.3})$$

式中：

δ_Z ——试验机负荷示值相对误差，%；

F_{Z1} ——试验机负荷示值，kN；

$\overline{F_{Z0}}$ ——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：

$$u_c^2 = c_1^2 \times u^2(F_{Z1}) + c_2^2 \times u^2(\overline{F_{Z0}})$$

其中：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta F_Z}{\partial F_{Z1}} = \frac{1}{F_{Z0}} = 0.077 \text{ kN}^{-1}, \quad c_2 = \frac{\partial \Delta F_Z}{\partial \overline{F_{Z0}}} = -\frac{F_{Z1}}{F_{Z0}^2} = -0.077 \text{ kN}^{-1}。$$

C.3.2 不确定度来源

试验机负荷示值分辨力引入的标准不确定度 $u(F_{Z1})$ ；

标准测力仪测量误差引入的标准不确定度 $u(\overline{F_{Z0}})$ 。

C.3.3 标准不确定度分量的评定

C.3.3.1 试验机负荷示值分辨力引入的标准不确定度 $u(F_{Z1})$

试验机的负荷示值分辨力为 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：

$$u(F_{Z1}) = \frac{0.0005 \text{ kN}}{\sqrt{3}} = 0.00029 \text{ kN}。$$

C.3.3.2 标准测力仪测量误差引入的标准不确定度 $u(\overline{F_{Z0}})$

C.3.3.2.1 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 13.000 kN，记录标准测力仪示值，重复进行 10 次测量值分别为：13.032 kN，13.029 kN，13.034 kN，13.030 kN，13.032 kN，13.031 kN，13.033 kN，13.035 kN，13.030 kN，13.031 kN，平均值 $\overline{F_{Z0}}=13.032$ kN 单次测量实验标准偏差为：

$$s(F_{Z0}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (F_{Z0i} - \overline{F_{Z0}})^2}{10-1}} = 0.0019 \text{ kN}$$

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：

$$u_1(\overline{F_{Z0}}) = s(\overline{F_{Z0}}) = \frac{s(F_{Z0})}{\sqrt{3}} = 0.0011 \text{ kN}。$$

C.3.3.2.2 标准测力仪引入的标准不确定度

由校准证书可知，标准测力仪的相对扩展不确定度为 $U_r = 0.1\%$ ， $k = 2$ ，则其引入的相对标准不确定度为：

$$u_{r2} = \frac{U_r}{k} = 0.05\%$$

标准不确定度为：

$$u_2(F_{Z0}) = 13 \text{ kN} \times 0.05\% = 0.0065 \text{ kN}$$

则由标准测力仪测量误差引入的标准不确定度为：

$$u(\overline{F_{Z0}}) = \sqrt{0.0011^2 + 0.0065^2} \text{ kN} = 0.0066 \text{ kN}。$$

C.3.4 合成标准不确定度的评定

试验负荷标准不确定度分量见表 C.3。

表 C.3 试验负荷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	$u(F_{Z1})$	0.0029 kN	0.077 kN^{-1}	0.0002
3	标准测力仪测量误差	$u(\overline{F_{Z0}})$	0.0066 kN	-0.077 kN^{-1}	0.0005

由于各标准不确定度分量互不相关，故：

$$u_c = \sqrt{0.0002^2 + 0.0005^2} = 0.00054。$$

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： $U_{\text{rel}} = ku_c = 0.00108$ ，

取两位有效数字，则：

$$U_{\text{rel}} = 0.11\%， k = 2。$$

C.4 轮轴力不确定度评定示例

选取 736.9 N 校准点为示例，进行轮轴力测量不确定度评定。

C.4.1 建立数学模型

以标准测力仪示值作为标准力，试验机示值与标准力比较，计算示值相对误差，建立数学模型如下：

$$\delta_t = \frac{\overline{F}_t - F_{t0}}{F_{t0}} \quad (\text{C.4})$$

式中：

δ_t ——试验机轮轴力示值相对误差，%；

\overline{F}_t ——试验机轮轴力示值平均值，N；

F_{t0} ——标准测力仪示值，N。

忽略重力加速度不确定度，因为各分量互不相关，由不确定度传播律：

$$u_c^2 = c_1^2 \times u^2(\overline{F}_t) + c_2^2 \times u^2(F_{t0})$$

其中：

$$c_1 = \frac{\partial \delta_t}{\partial \overline{F}_t} = \frac{1}{F_{t0}} = 0.0014 \text{ N}^{-1}, \quad c_2 = \frac{\partial \delta_t}{\partial F_{t0}} = -\frac{\overline{F}_t}{F_{t0}^2} = 0.0014 \text{ N}^{-1}。$$

C.4.2 不确定度来源

试验机示值分辨力或重复性引入的标准不确定度 $u(\overline{F}_t)$ ；

标准测力仪引入的标准不确定度 $u(F_{t0})$ 。

C.4.3 标准不确定度分量的评定

C.4.3.1 试验机示值分辨力引入的标准不确定度 $u(\overline{F}_t)$

C.4.3.1.1 试验机示值分辨力引入的标准不确定度

试验机的轮轴力示值分辨力为 0.1 N，以均匀分布落在半宽度为 0.05 N 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：

$$u(\overline{F}_t) = \frac{0.05 \text{ N}}{\sqrt{3}} = 0.029 \text{ N}。$$

C.4.3.1.2 试验机测量重复性引入的标准不确定度

试验机 10 次测量的示值分别为：736.6 N，736.5 N，736.5 N，736.4 N，736.5 N，736.6 N，736.7 N，736.5 N，736.4 N，736.5 N， $\bar{F}_t = 736.52$ N 则单次测量试验标准差为：

$$s(F_t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (F_{ti} - \bar{F}_t)^2}{10-1}} = 0.092 \text{ N}$$

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：

$$u(\bar{F}_t) = s(\bar{F}_t) = \frac{s(F_t)}{\sqrt{3}} = 0.053 \text{ N}。$$

由于测量重复性包含了由示值分辨力引入的标准不确定度，为避免重复计算，只取最大影响量。

C.4.3.2 标准测力仪引入的标准不确定度

由校准证书可知，标准测力仪的相对扩展不确定度为 $U_r = 0.1\%$ ， $k = 2$ ，则其引入的相对标准不确定度为：

$$u_r = \frac{U_r}{k} = 0.05\%$$

标准不确定度为：

$$u(F_{t0}) = 736.9 \text{ N} \times 0.05\% = 0.368 \text{ N}。$$

C.4.4 合成标准不确定度的评定

轮轴力的标准不确定度分量见表 C.4。

表 C.4 轮轴力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	试验机测量重复性	$u(\bar{F}_t)$	0.053 N	0.0014 N^{-1}	0.0000742
2	标准测力仪	$u(F_{t0})$	0.368 N	0.0014 N^{-1}	0.0005152

由于各标准不确定度分量互不相关，故：

$$u_c = \sqrt{0.0000742^2 + 0.0005152^2} = 0.0005205。$$

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： $U = ku_c = 0.104\%$ ，取两位有效数字，则：

$$U = 0.10\%， k = 2。$$

C.5 扭矩不确定度评定示例

以校准点 835.6 Nm 为示例, 进行扭矩测量不确定度评定。

C.5.1 建立数学模型

以测力仪示值作为标准力, 标准力与力臂的乘积作为标准扭矩, 试验机示值与标准扭矩比较, 计算示值相对误差, 建立数学模型如下:

$$\delta_M = \frac{\overline{M} - F_M l}{F_M l} \quad (\text{C.5})$$

式中:

δ_M —— 试验机扭矩示值相对误差, %;

\overline{M} —— 试验机扭矩示值平均值, Nm;

F_M —— 标准测力仪示值, M;

l —— 力臂长度, m。

忽略重力加速度和力臂长度引入的不确定度, 因为各分量互不相关, 由不确定度传播律:

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

取 $l = 0.75 \text{ m}$

$$c_1 = \frac{\partial \delta_M}{\partial \overline{M}} = \frac{1}{F_M l} = 0.0016 \text{ Nm}^{-1};$$

$$c_2 = \frac{\partial \delta_M}{\partial F_M} = -\frac{\overline{M}}{F_M^2 l} = -0.0008976 \text{ N}^{-1};$$

C.5.2 不确定度来源

试验机扭矩示值分辨力或测量重复性引入的标准不确定度 $u(\overline{M})$;

测力仪引入的标准不确定度 $u(F_M)$ 。

C.5.3 标准不确定度分量的评定

C.5.3.1 试验机扭矩示值分辨力或测量重复性引入的标准不确定度

C.5.3.1.1 试验机示值分辨力引入的标准不确定度

试验机的扭矩示值分辨力为 0.1 Nm, 以均匀分布落在半宽度为 0.05 Nm 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:

$$u(\bar{M}) = \frac{0.05 \text{ Nm}}{\sqrt{3}} = 0.0289 \text{ Nm}。$$

C. 5. 3. 1. 2 试验机测量重复性引入的标准不确定度

试验机三次测量的示值分别为: 835.9 Nm, 836.5 Nm, 836.1 Nm, 836.3 Nm, 836.2 Nm, 836.6 Nm, 836.3 Nm, 836.5 Nm, 836.8 Nm, 836.2 Nm, 则单次测量试验标准差为:

$$s(M) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (M_i - \bar{M})^2}{10-1}} = 0.2633 \text{ Nm}$$

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:

$$u(M) = s(\bar{M}) = \frac{s(M)}{\sqrt{3}} = 0.1520 \text{ Nm}$$

由于测量重复性包含了由示值分辨力引入的标准不确定度, 为避免重复计算, 只取最大影响量。

C. 5. 3. 2 测力仪引入的标准不确定度

由校准证书可知, 标准测力仪的相对扩展不确定度为 $U_r = 0.1\%$, $k = 2$, 则其引入的相对标准不确定度为:

$$u_r = \frac{U_r}{k} = 0.05\%$$

标准不确定度为:

$$u(F_M) = 1114.133 \text{ N} \times 0.05\% = 0.557 \text{ N}。$$

C. 5. 4 合成标准不确定度的评定

扭矩标准不确定度分量见表 C.5。

表 C.5 扭矩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	试验机测量重复性	$\overline{u(M)}$	0.1520 Nm	0.0016 Nm^{-1}	0.0002432
2	标准测力仪	$u(F_M)$	0.557 N	0.0008976 N^{-1}	0.0005

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：

$$u_c = \sqrt{0.0002432^2 + 0.0005^2} = 0.0005006$$

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： $U_{\text{rel}} = ku_c = 0.0010012$ ，取一位有效数字，则：

$$U_{\text{rel}} = 0.10\%, \quad k = 2。$$

C.6 转鼓速度不确定度评定示例

选取 80 km/h 校准点为示例，进行转鼓速度测量不确定度评定。

C.6.1 建立数学模型

转鼓以设定速度旋转，待试验机示值稳定后，用转速表测量转鼓转速，转速与转鼓周长的乘积作为标准速度，试验机示值与标准速度比较并计算示值误差，建立数学模型如下：

$$\Delta v = v - 0.00006\pi D \bar{n} \quad (\text{C.6})$$

式中：

Δv —— 试验机速度示值误差，km/h；

v —— 试验机速度示值，km/h；

D —— 转鼓直径，mm；

\bar{n} —— 转速表示值平均值，r/min。

因为各分量互不相关，由不确定度传播律：

$$u_c^2 = c_1^2 \times u^2(v) + c_2^2 \times u^2(D) + c_3^2 \times u^2(\bar{n})$$

取 $D = 2000$ mm， $\bar{n} = 212.2$ r/min，则

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

$$c_2 = \frac{\partial \Delta v}{\partial D} = -0.00006\pi \bar{n} = -0.0400 \text{ km}/(\text{h} \cdot \text{mm})；$$

$$c_3 = \frac{\partial \Delta v}{\partial \bar{n}} = -0.00006\pi D = -0.3770 \text{ (km/h)}/(\text{r/min})。$$

C.6.2 不确定度来源

试验机速度示值分辨力引入的标准不确定度 $u(v)$ ；

转鼓直径测量误差引入的标准不确定度 $u(D)$ ；

转速测量误差引入的标准不确定度 $u(\bar{n})$ 。

C.6.3 标准不确定度分量的评定

C.6.3.1 试验机速度示值分辨力引入的标准不确定度 $u(v)$

试验机的速度示值分辨力为0.1 km/h,以均匀分布落在半宽度为0.05 km/h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:

$$u(v) = \frac{0.05 \text{ km/h}}{\sqrt{3}} = 0.0289 \text{ km/h}。$$

C. 6. 3. 2 转鼓直径测量误差引入的标准不确定度 $u(D)$

由C.1可知,转鼓直径测量结果的扩展不确定度为 $U = 0.19 \text{ mm}$, $k = 2$, 则其引入的标准不确定度为

$$u(D) = \frac{U}{k} = 0.095 \text{ mm}$$

C. 6. 3. 3 转速测量误差引入的标准不确定度 $u(\bar{n})$

C. 6. 3. 3. 1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\bar{n})$

用转速表独立测量转鼓转速10次,其值分别为:212.13 r/min, 212.06 r/min, 212.02 r/min, 212.11 r/min, 212.08 r/min, 212.10 r/min, 212.07 r/min, 212.04 r/min, 212.05 r/min, 212.04 r/min, $\bar{n} = 212.07 \text{ r/min}$, 则单次测量试验标准差为:

$$s(n) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (n_i - \bar{n})^2}{10-1}} = 0.0350 \text{ r/min}$$

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:

$$u_1(\bar{n}) = s(\bar{n}) = \frac{s(n)}{\sqrt{3}} = 0.0202 \text{ r/min}。$$

C. 6. 3. 3. 2 转速表引入的标准不确定度 $u_2(\bar{n})$

由校准证书可知,转速表的相对扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 7 \times 10^{-4}$, $k = 2$, 则其引入的标准不确定度为:

$$u_2(\bar{n}) = \frac{U_{\text{rel}}}{k} \times \bar{n} = 0.0742 \text{ r/min}$$

则转速测量误差引入的标准不确定度为:

$$u(\bar{n}) = \sqrt{0.0202^2 + 0.0742^2} \text{ r/min} = 0.0769 \text{ r/min}$$

C.6.4 合成标准不确定度的评定

速度标准不确定度分量见表 C.6。

表 C.6 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	试验机示值分辨力	$u(v)$	0.0289 km/h	1	0.0289 km/h
2	转鼓直径测量误差	$u(D)$	0.095 mm	-0.0400 km/(h·mm)	0.0038 km/h
3	转速测量误差	$u(\bar{n})$	0.0769 r/min	-0.3770 (km/h)/(r/min)	0.0290 km/h

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：

$$u_c = \sqrt{0.0289^2 + 0.0038^2 + 0.0290^2} \text{ km/h} = 0.0411 \text{ km/h}。$$

C.6.5 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = ku_c = 0.0822 \text{ km/h}$ ，取一位有效数字，则：

$$U = 0.08 \text{ km/h}，k=2。$$

C.7 负荷半径不确定度评定示例

选取 200mm 校准点为示例，进行负荷半径测量不确定度评定。

C.7.1 建立数学模型

试验机负荷半径示值达到校准点时，用深度尺测量三次取算术平均值作为标准值，建立数学模型如下：

$$\Delta L = L_1 - \bar{L} \quad (\text{C.7})$$

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} —— 标准深度尺示值平均值，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.7.2 不确定度来源

试验机示值分辨力或重复性引入的标准不确定度 $u(L_1)$ ；

深度尺引入的标准不确定度 $u(\bar{L})$ 。

C.7.3 标准不确定度分量的评定

C.7.3.1 试验机示值分辨力引入的标准不确定度 $u(L_1)$

试验机负荷半径示值分辨力为 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.7.3.2 深度尺测量误差引入的标准不确定度 $u(\bar{L})$

C.7.3.2.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\bar{L})$

用深度尺测量负荷半径,重复进行 10 次,其值分别为: 200.02 mm, 200.01 mm, 199.98 mm, 200.02 mm, 200.01 mm, 200.02 mm, 199.99 mm, 200.00 mm, 199.98 mm, 200.01 mm, 则单次测量试验标准差为:

$$s(L) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (L_i - \bar{L})^2}{10-1}} = 0.0158 \text{ mm}$$

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:

$$u_1(\bar{L}) = s(\bar{L}) = \frac{s(L)}{\sqrt{3}} = 0.00912 \text{ mm}。$$

由于测量重复性包含了由示值分辨力引入的标准不确定度,为避免重复计算,只取最大影响量。

C.7.3.2.2 深度尺引入的标准不确定度 $u_2(\bar{L})$

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:

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

C.7.4 合成标准不确定度的评定

负荷半径标准不确定度分量见表 C.7。

表 C.7 负荷半径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	试验机示值重复性	$u(L_1)$	0.009 mm	1	0.0009 mm
2	深度尺测量误差	$u(\bar{L})$	0.0135mm	-1	0.0135 mm

由于各标准不确定度分量互不相关,故:

$$u_c = \sqrt{u^2(L_1) + u^2(\bar{L})} = 0.0138 \text{ mm}。$$

C.7.5 扩展不确定度的评定

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为： $U = ku_c = 0.0276 \text{ mm}$ ，保留两位有效数字，
则：

$$U = 0.028 \text{ mm} , k = 2 .$$

C.8 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.8.1 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：

$$\Delta p = p_1 - \overline{p_0} \quad (\text{C.8})$$

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.8.2 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.8.3 标准不确定度分量的评定

C.8.3.1 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.8.3.2 压力计测量误差引入的标准不确定度 $u(\overline{p_0})$

C.8.3.2.1 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.8.3.2.2 测量重复性引入的标准不确定度

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, $\bar{p}_1 = 600.6 \text{ kPa}$ ，则单次测量试验标准差为：

$$s(p_0) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (p_{0i} - \bar{p}_0)^2}{10-1}} = 0.208 \text{ kPa}$$

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：

$$u_2(\bar{p}_0) = s(\bar{p}_0) = \frac{s(p_0)}{\sqrt{3}} = 0.120 \text{ kPa}。$$

则压力计测量误差引入的标准不确定度

$$u(\bar{p}_0) = \sqrt{0.2^2 + 0.120^2} = 0.233 \text{ kPa}。$$

C.8.3.2 压力计引入的标准不确定度 $u(p)$

C.8.4 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.8

表 C.8 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	$u(\bar{p}_0)$	0.233 kPa	-1	0.233 kPa

由于各标准不确定度分量互不相关，故：

$$u_c = \sqrt{u^2(\bar{p}_1) + u^2(p)} = 0.23 \text{ kPa}。$$

C.8.5 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：

$U = 0.5 \text{ kPa}$ ， $k = 2$ 。
