

车轮径向疲劳试验机校准方法及主要测量项目不确定度评定

周奎武, 朱 凯, 王忠寿

(北京橡胶工业研究设计院, 北京 100143)

摘要: 对车轮径向疲劳试验机转鼓、试验负荷和试验速度进行校准, 并对试验负荷和试验速度的不确定度进行评定。试验负荷和试验速度校准结果不确定度的主要来源为试验机分辨力引入的不确定度、试验机测试重复性引入的不确定度、标准测力仪或标准转速表分辨力引入的不确定度。

关键词: 车轮径向疲劳试验机; 转鼓; 试验负荷; 试验速度; 不确定度

车轮径向疲劳试验机由主机(机架、转鼓)、加载和负荷控制系统、驱动和速度控制系统等组成。转鼓的钢制表面作为模拟路面, 转鼓由电机驱动, 其转速可以调整。本工作对车轮径向疲劳试验机的转鼓、试验负荷和试验速度进行校准, 并对试验负荷和试验速度测量不确定度进行评定, 使车轮径向疲劳试验机的测量精度控制在国家标准所要求的范围内, 以确保车轮径向疲劳试验的可靠性和稳定性。

1 实验

1.1 设备与仪器

N6/220-2Y-B型车轮径向疲劳试验机, 天津久荣车轮技术有限公司产品; 标准测力仪2台, 测量范围分别为0.3~30 kN和10~100 kN, 准确度等级为0.3; 转速表, 测量范围为1~1000 r·min⁻¹, 准确度等级为0.2; 百分表, 测量范围为0~10 mm, 准确度等级为1; 钢直尺, 测量范围为500 mm, 分度值为1 mm; 钢卷尺, 测量范围为10 m, 准确度等级为1; 测力仪支架及力传感器支座。

1.2 计量特性^[1-2]

(1) 转鼓: 转鼓直径(1700±17) mm, 转鼓径向跳动不大于0.25 mm。

(2) 试验负荷: 测量范围为0.3~100 kN, 分

度值为0.001 kN, 示值最大允许误差±2.5%。

(3) 试验速度: 测量范围为30~400 km·h⁻¹, 分度值为0.1 km·h⁻¹, 示值最大允许误差±1.0%。

1.3 校准环境条件

温度10~38 ℃, 湿度不大于85%, 工作电源电压波动范围不超出额定电压的±10%。

1.4 校准方法

1.4.1 转鼓

1.4.1.1 直径

用钢卷尺分别测量转鼓鼓面中部及距两边边缘50 mm处的转鼓周长, 按下列公式计算转鼓直径。

$$D = \frac{L}{\pi}$$

式中, D 为转鼓直径(取整数), mm; L 为转鼓周长(取3个测量点平均值), mm; π 为圆周率(取值3.14)。

1.4.1.2 径向跳动

用百分表分别测量转鼓鼓面中部及距两边边缘50 mm处的径向跳动, 取最大值为校准结果。

1.4.2 试验负荷

将标准测力仪装在轮胎支承轴和校准用支座之间, 调整位置, 使其中心线在转鼓轴与轮胎支承轴中心的连线重合。缓慢加载, 在测量范围内取均匀

分布的5个点进行测试,当标准测力仪示值达到所取的测量值时,记录相应的试验机负荷示值。每个测量点重复测量9次以上,按下列公示计算负荷示值误差^[3]。

$$q_i = \frac{\bar{F}_i - F_{0i}}{F_{0i}} \times 100\% \quad i=1, 2, 3, 4, 5$$

式中, q_i 为第 i 测量点的负荷示值相对误差, %; $\bar{F}_i$ 为第 i 测量点的9次以上试验机负荷示值算术平均值, kN; F_{0i} 为第 i 测量点的标准测力仪示值, kN。

1.4.3 试验速度

用转速表测量转鼓速度。在测量范围内取均匀分布的5个点进行测试,当试验机速度示值达到规定

值时,记录转速表测得的速度值。每个测量点重复测量9次以上,按公式(3)计算速度示值误差^[3]。

$$\delta_{vi} = \left(\frac{v_i}{0.06\pi \cdot D \cdot n_i} - 1 \right) \times 100\% \quad i=1, 2, 3, 4, 5$$

式中, δ_{vi} 为第 i 测量点的速度示值相对误差, %; v_i 为第 i 测量点的试验机速度示值, km·h⁻¹; n 为第 i 测量点的9次以上转速表测得的速度平均值, r·min⁻¹。

2 校准测试结果

车轮径向疲劳试验机的转鼓、试验负荷和试验速度校准测试结果如表1~3所示。

表1 转鼓直径和转鼓径向跳动校准测试结果

项 目	测量值			校准结果
	第1次	第2次	第3次	
转鼓直径/mm	1707	1708	1709	1708 (平均值)
转鼓径向跳动/mm	0.20	0.19	0.18	0.20 (最大值)

表2 试验负荷校准测试结果

测量次数	第1点			第2点			第3点			第4点			第5点		
	校准点示值	试验机示值	相对误差	校准点示值	试验机示值	相对误差	校准点示值	试验机示值	相对误差	校准点示值	试验机示值	相对误差	校准点示值	试验机示值	相对误差
1	4.887	4.90	0.27	9.796	9.80	0.04	14.615	14.70	0.58	19.642	19.60	-0.21	50.501	50.00	-1.0
2	4.886	4.90	0.29	9.792	9.80	0.08	14.618	14.70	0.56	19.634	19.60	-0.17	50.082	50.00	-0.16
3	4.889	4.90	0.22	9.797	9.80	0.03	14.619	14.70	0.55	19.635	19.60	-0.19	50.075	50.00	-0.15
4	4.887	4.90	0.27	9.798	9.80	0.02	14.620	14.70	0.55	19.634	19.60	-0.17	50.043	50.00	-0.08
5	4.885	4.90	0.31	9.799	9.80	0.01	14.618	14.70	0.56	19.635	19.60	-0.18	50.060	50.00	-0.12
6	4.886	4.90	0.29	9.800	9.80	0	14.620	14.70	0.55	19.636	19.60	-0.18	50.070	50.00	-0.14
7	4.887	4.90	0.27	9.798	9.80	0.02	14.618	14.70	0.56	19.633	19.60	-0.17	50.078	50.00	-0.15
8	4.885	4.90	0.31	9.800	9.80	0	14.619	14.70	0.55	19.635	19.60	-0.18	50.092	50.00	-0.18
9	4.884	4.90	0.33	9.799	9.80	0.01	14.617	14.70	0.57	19.637	19.60	-0.19	50.070	50.00	-0.14
10	4.886	4.90	0.29	9.799	9.80	0.01	14.619	14.70	0.55	19.634	19.60	-0.17	50.075	50.00	-0.15
均值	4.886	4.90	0.29	9.798	9.80	0.02	14.618	14.70	0.56	19.635	19.60	-0.18	50.071	50.00	-0.22
误差	-1.00%~+0.58%														

注:校准点示值为标准测力仪示值;校准点和试验机示值单位为kN,相对误差单位为%。

3 测量不确定度的评定^[4]

不确定度评定参照JJF 1059.1。

3.1 试验负荷的不确定度

3.1.1 建立数学模型,列不确定度式

车轮径向疲劳试验机负荷示值相对误差的计算公式如下:

$$\delta = \frac{F_1 - F}{F} \times 100\%$$

式中, δ 为试验机负荷示值相对误差, %; F_1 为试验机负荷示值, kN; F 为标准测力仪示值, kN。

因为各分量之间互不相关,由不确定度的传播规律:

表3 试验速度校准测试结果

测量 次数	第1点			第2点			第3点			第4点			第5点		
	校准 点值	试验机 示值	相对 误差	校准 点值	试验机 示值	相对 误差	校准 点值	试验机 示值	相对 误差	校准 点值	试验机 示值	相对 误差	校准 点值	试验机 示值	相对 误差
1	49.84	50.0	0.32	100.01	100.0	-0.01	120.15	120.0	-0.12	200.45	200.0	-0.22	250.69	250.0	-0.27
2	49.88	50.0	0.24	99.98	100.0	0.02	120.07	120.0	-0.06	200.48	200.0	-0.24	250.65	250.0	-0.26
3	49.91	50.0	0.18	100.03	100.0	-0.03	120.15	120.0	-0.12	200.52	200.0	-0.26	250.59	250.0	-0.23
4	49.94	50.0	0.12	100.05	100.0	-0.05	119.90	120.0	0.08	200.45	200.0	-0.22	250.62	250.0	-0.25
5	49.91	50.0	0.18	100.04	100.0	-0.04	119.95	120.0	0.04	200.48	200.0	-0.24	250.62	250.0	-0.25
6	49.85	50.0	0.30	100.05	100.0	-0.05	119.97	120.0	0.03	200.42	200.0	-0.20	250.65	250.0	-0.26
7	49.88	50.0	0.24	100.08	100.0	-0.08	120.12	120.0	-0.10	200.45	200.0	-0.22	250.69	250.0	-0.27
8	49.91	50.0	0.18	100.04	100.0	-0.04	120.20	120.0	-0.17	200.48	200.0	-0.24	250.62	250.0	-0.25
9	49.88	50.0	0.24	100.05	100.0	-0.05	120.15	120.0	-0.12	200.45	200.0	-0.22	250.59	250.0	-0.24
10	49.91	50.0	0.18	100.02	100.0	-0.02	120.07	120.0	-0.06	200.52	200.0	-0.26	250.62	250.0	-0.25
均值	49.89	50.0	0.22	100.03	100.0	-0.03	120.06	120.0	-0.06	200.47	200.0	-0.23	250.63	250.0	-0.25
误差	-0.27%~+0.32%														

注：校准点值为转速表测量值换算所得；校准点值和试验机示值单位为 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ，相对误差单位为%。

$$u^2 = c_1^2 \times u^2(F_1) + c_2^2 \times u^2(F)$$

其中：

$$c_1 = \frac{\partial \delta}{\partial F_1} = \frac{1}{F}, \quad c_2 = \frac{\partial \delta}{\partial F} = -\frac{F_1}{F^2}$$

得到不确定度式：

$$u^2(\delta) = \left(\frac{1}{F}\right)^2 \times u^2(F_1) + \left(-\frac{F_1}{F^2}\right)^2 \times u^2(F)$$

3.1.2 不确定度来源

车轮径向疲劳试验机试验负荷的不确定度来源主要包括以下3个方面：（1）试验机分辨力引入的标准不确定度；（2）试验机测试重复性引入的标准不确定度；（3）标准测力仪分辨力引入的标准不确定度。

3.1.3 不确定度分量评定

3.1.3.1 试验机分辨力引入的标准不确定度 u_1

试验机的负荷示值分辨力为0.001 kN，以等概率分布（矩形分布），区间半宽为0.0005 kN，试验机分辨力引入的标准不确定度 $u_1(F_1)$ 如下：

$$u_1(F_1) = 0.0005/\sqrt{3} = 0.0003 \text{ kN}$$

自由度 $\nu_1 \rightarrow +\infty$

$$c_1 = 0.02 \text{ kN}^{-1}$$

标准不确定度分量 $u_1 = |c_1| \times u_1(F_1) = 0.0006\%$

3.1.3.2 试验机测试重复性引入的标准不确定度 u_2

加载负荷为50 kN，重复测量9次，平均值为

50.071 kN，测试标准偏差 $s(F_1)$ 如下：

$$s(F_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (F_{1i} - \bar{F}_1)^2}{9-1}} = 0.017 \text{ kN}$$

测试重复性引入的标准不确定度 $u_2(F_1)$ 如下：

$$u_2(F_1) = s(F_1)/\sqrt{3} = 0.017/\sqrt{3} = 0.01 \text{ kN}$$

自由度 $\nu_2 = 8$

标准不确定度分量 $u_2 = |c_1| \times u_2(F_1) = 0.02\%$

3.1.3.3 标准测力仪分辨力引入的标准不确定度 u_3

标准测力仪准确度等级为0.3，极限误差为 $\pm 0.3\%$ ，加载负荷为50 kN时差值为 $\pm 0.15 \text{ kN}$ 。按均匀分布，标准测力仪分辨力引入的标准不确定度 $u_3(F)$ 如下：

$$u_3(F) = 0.15/\sqrt{3} = 0.087 \text{ kN}$$

不可靠程度估计为20%，则自由度 ν_3 如下：

$$\nu_3 = \frac{1}{2} \times \left[\frac{\Delta u(F)}{u(F)} \right]^{-2} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{0.20}{1} \right)^{-2} = 12$$

$$c_2 = 0.02 \text{ kN}^{-1}$$

标准不确定度分量 $u_3 = |c_2| \times u_3(F) = 0.17\%$

试验负荷的标准不确定度分量见表4。

3.1.4 合成标准不确定度

由于各标准不确定度分量互不相关，试验负荷的标准不确定度 $u_c(\delta)$ 为以上3个分量的合成：

表4 试验负荷的标准不确定度分量

序号	输入量的标准不确定度			自由度		输出量的标准不确定度分量	
	来源	符号	数值/kN	符号	数值	符号	数值/%
1	试验机示值的误差	$u_1(F_1)$	0.0003	ν_1	$+\infty$	u_1	0.0006
2	试验机测量重复性	$u_2(F_1)$	0.01	ν_2	8	u_2	0.02
3	标准测力仪误差	$u_3(F)$	0.087	ν_3	12	u_3	0.17

$$u_c(\delta) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.17\%$$

有效自由度 ν_{eff} 如下:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(\delta)}{\sum \frac{u_i^4}{\nu_i}} = \frac{(0.17\%)^4}{\frac{(0.0006\%)^4}{+\infty} + \frac{(0.02\%)^4}{8} + \frac{(0.17\%)^4}{12}} = 12$$

3.1.5 扩展不确定度

按置信概率 $p=0.95$, 有效自由度 $\nu_{\text{eff}}=12$, 查 t 分布表, 得 $k=2.18$ 。试验机负荷示值校准结果的扩展不确定度如下:

$$U_{95}=k \times u_c(\delta)=2.18 \times 0.17\%=0.37\%$$

3.1.6 测量扩展不确定度报告

试验机负荷示值误差校准结果的扩展不确定度 $U_{95}=0.37\%$, $\nu_{\text{eff}}=12$ 。

3.2 试验速度的不确定度

3.2.1 建立数学模型, 列不确定度式

车轮径向疲劳试验机试验速度示值相对误差的计算公式如下:

$$\delta' = \frac{v_1 - v}{v} \times 100\%$$

式中, δ' 为试验机速度示值相对误差; ν_1 为试验机速度示值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$; v 为转速表测算值, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

因为各分量互不相关, 由不确定度传播规律:

$$u^2 = c_1^2 \times u^2(\nu_1) + c_2^2 \times u^2(v)$$

其中:

$$c_1 = \frac{\partial \delta'}{\partial \nu_1} = \frac{1}{v}, \quad c_2 = \frac{\partial \delta'}{\partial v} = -\frac{\nu_1}{v^2}$$

不确定度式为:

$$u^2(\delta') = \left(\frac{1}{v}\right)^2 \times u^2(\nu_1) + \left(-\frac{\nu_1}{v^2}\right)^2 \times u^2(v)$$

3.2.2 不确定度来源

车轮径向疲劳试验机试验速度的不确定度来源主要包括以下3个方面: (1) 试验机分辨力引入的标准不确定度; (2) 试验机测试重复性引入的标准不

确定度; (3) 转速表分辨力引入的标准不确定度。

3.2.3 不确定度分量评定

3.2.3.1 试验机分辨力引入的标准不确定度 u_1

试验机的速度示值分辨力为 $0.1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 以等概率分布(矩形分布), 区间半宽为 $0.05 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 试验机分辨力引入的标准不确定度 $u_1(\nu_1)$ 如下:

$$u_1(\nu_1) = 0.05/\sqrt{3} = 0.03 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

自由度 $\nu_1 \rightarrow +\infty$

$$c_1 = 0.00833 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^{-1}$$

$$\text{标准不确定度分量 } u_1 = |c_1| \times u_1(\nu_1) = 0.02\%$$

3.2.3.2 试验机测试重复性引入的标准不确定度 u_2

试验速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 重复测量9次, $\nu_1 = 120.08 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 测试标准偏差 $s(\nu_1)$ 如下:

$$s(\nu_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (\nu_{1i} - \bar{\nu}_1)^2}{9-1}} = 0.11 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

测试重复性引入的标准不确定度分量 $u_2(\nu_1)$ 如下:

$$u_2(\nu_1) = s(\nu_1)/\sqrt{3} = 0.11/\sqrt{3} = 0.06 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

自由度 $\nu_2=8$

$$\text{标准不确定度分量 } u_2 = |c_1| \times u_2(\nu_1) = 0.05\%$$

3.2.3.3 转速表分辨力引入的标准不确定度 u_3

转速表准确度等级为0.2, 其极限误差为 $\pm 0.2\%$, 试验速度为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 误差为 $\pm 0.24 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。按均匀分布, 转速表分辨力引入的标准不确定度为:

$$u_3(v) = 0.24/\sqrt{3} = 0.14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

不可靠程度估计为20%, 则自由度 ν_3 如下:

$$\nu_3 = \frac{1}{2} \times \left[\frac{\Delta u(v)}{u(v)} \right]^{-2} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{0.20}{1} \right)^{-2} = 12$$

$$c_2 = 0.00833 (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})^{-1}$$

$$\text{标准不确定度分量 } u_3 = |c_2| \times u_3(v) = 0.12\%$$

试验速度的标准不确定度分量见表5。

表5 试验速度的标准不确定度分量

序号	输入量的标准不确定度			自由度		输出量的标准不确定度分量	
	来源	符号	数值/(km·h ⁻¹)	符号	数值	符号	数值/%
1	试验机示值误差	$u_1(v_1)$	0.03	v_1	$+\infty$	u_1	0.02
2	试验机测量重复性	$u_2(v_1)$	0.06	v_2	8	u_2	0.05
3	转速表误差	$u_3(v)$	0.14	v_3	12	u_3	0.12

3.2.4 合成标准不确定度

由于各标准不确定度分量互不相关, 试验速度的标准不确定度 $u_c(\delta')$ 为以上3个分量的合成。

$$u_c(\delta') = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.13\%$$

有效自由度 v_{eff} 如下:

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(\delta')}{\sum \frac{u_i^4}{v_i}} = \frac{(0.13\%)^4}{\frac{(0.02\%)^4}{\infty} + \frac{(0.05\%)^4}{8} + \frac{(0.12\%)^4}{12}} = 16$$

3.2.5 扩展不确定度

按置信概率 $p=0.95$, 有效自由度 $v_{\text{eff}}=16$, 查 t 分布表, 得 $k=2.12$ 。试验机速度校准结果的扩展不确定度如下:

$$U_{95} = k \times u_c(\delta') = 2.12 \times 0.13\% = 0.27\%$$

3.2.6 测量扩展不确定度报告

试验机速度示值误差校准结果的扩展不确定度 $U_{95}=0.27\%$, $v_{\text{eff}}=16$ 。

4 结语

车轮径向疲劳试验机校准方法在实践中验证效果良好。影响试验负荷和试验速度校准结果不确定度的主要来源为试验机分辨力引入的标准不确定度、试验机测试重复性引入的标准不确定度、标准测力仪或标准转速表分辨力引入的标准不确定度。

参考文献:

- [1] GB/T 5334—2005, 乘用车车轮性能要求和试验方法[S].
- [2] GB/T 5909—2009, 商用车车辆车轮性能要求和试验方法[S].
- [3] JJF 1001—2011, 通用计量术语及定义[S].
- [4] JJF 1059.1—2012, 测量不确定度评定与表示[S].

Calibration of Wheel Radial Fatigue Testing Machine and Evaluation of Measurement Uncertainty

Zhou Kuiwu, Zhu Kai, Wang Zhongshou

(Beijing Research and Design Institute of Rubber Industry, Beijing 100143, China)

Abstract: The wheel radial fatigue testing machine was calibrated, including the drum, test load and test speed. The measurement uncertainties of test load and test speed were assessed. The main source of the measurement uncertainty was from the resolution and repeatability of the testing machine, and the resolution of force measurement sensor and tachometer.

Keywords: wheel radial fatigue testing machine; drum; test load; test speed; uncertainty

欢迎参加2014年“华奇杯”第十届全国橡胶助剂生产与应用技术研讨会
(2014年5月26-29日 苏州)