

车轮弯曲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: 对车轮弯曲疲劳试验机试验弯矩、加载轴偏移量、试验转速进行校准, 对试验弯矩和试验转速的不确定度进行评定。试验弯矩和试验转速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。

关键词: 车轮弯曲疲劳试验机; 弯矩; 加载轴偏移量; 转速; 不确定度

车轮弯曲疲劳试验机用于检验车轮施加给轮辐旋转弯矩时的动态疲劳性能。试验时, 采用车轮不动、载荷围绕加载轴旋转的形式, 通过离心加载方式对车轮施加弯矩, 气缸夹紧使车轮安装自动对中。本工作对车轮弯曲疲劳试验机的试验弯矩、加载轴偏移量、试验转速进行校准, 并对试验弯矩和试验转速测量不确定度进行评定, 使车轮弯曲疲劳试验机的测量精度控制在国家标准所要求的范围内, 以确保车轮弯曲疲劳试验的可靠性和稳定性。

1 实验

1.1 设备与仪器

CFT-3型轿车车轮弯曲疲劳试验机, 最大加载弯矩10 kN·m, 天津久荣车轮技术有限公司产品; 标准测力仪2台, 量程分别为0.3~20 kN(用于试验弯矩为10 kN·m的试验机)和1.0~50 kN(用于试验弯矩为50 kN·m的试验机), 准确度等级为0.3; 标准量块5个, 厚度分别为2 mm, 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 精度等级为5; 转速表, 量程为1~40000 r·min⁻¹, 准确度等级为0.2; 测力仪支架及力传感器拉杆。

1.2 计量特性^[1-2]

(1) 试验弯矩: 测量范围为0.5~50 kN·m,

分度值为0.001 kN·m, 示值最大允许误差±2.5%。

(2) 加载轴偏移量: 测量范围为0~10 mm, 分度值为0.01 mm, 示值最大允许误差±2%。

(3) 试验转速: 测量范围为500~2200 r·min⁻¹, 分度值为0.01 r·min⁻¹, 示值最大允许误差±2%。

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 试验弯矩

安装标定架, 并与加载轴、轴承座、测力仪三者用标定杆连接, 使测力仪的传感器中心与标定杆中心在同一直线上。通过加载机构对主轴施加标准载荷力, 在测量范围内取均匀分布的5个点进行测试。当标准测力仪达到所取的测量值时, 记录相应的试验机弯矩示值。每个测量点重复测量9次以上, 按下列公式计算弯矩示值误差^[3]。

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

式中, q_i 为第*i*测量点的弯矩示值相对误差, %; $\bar{M}_i$ 为第*i*测量点的9次以上试验弯矩示值算术平均值, kN·m; M_{0i} 为第*i*测量点的标准测力仪示值(kN)乘以力臂(m)所得的弯矩值, kN·m。

1.4.2 加载轴偏移量

用标准量块测量加载轴偏移量。将标准量块放到被测量点处,在测量范围内取均匀分布的5个点进行测试。当试验机偏移量达到所选取量块值时,读取相应的试验机示值。每个测量点重复测量9次以上,按下列公式计算偏移量误差^[3]。

$$\delta_i = \frac{\bar{L}_i - L_i}{L_i} \times 100\% \quad i=1, 2, 3, 4, 5$$

式中, δ_i 为第*i*测量点的偏移量示值相对误差, %; $\bar{L}_i$ 为第*i*测量点的9次以上试验机偏移量示值算术平均值, mm; L_i 为第*i*测量点的标准量块值, mm。

1.4.3 试验转速

用转速表测量试验转速。在测量范围内取均匀

分布的5个点进行测试,当试验机转速示值达到规定值时,记录转速表测量的转速值。每个测量点重复测量9次以上,按下列公式计算转速示值误差^[3]。

$$N_i = \frac{n_i - \bar{n}_{0i}}{\bar{n}_{0i}} \times 100\% \quad i=1, 2, 3, 4, 5$$

式中, N_i 为第*i*测量点的转速示值相对误差, %; n_i 为第*i*测量点的试验机转速示值, $r \cdot \min^{-1}$; $\bar{n}_{0i}$ 为第*i*测量点的9次转速表测得的转速平均值, $r \cdot \min^{-1}$ 。

2 校准测试结果

车轮弯曲疲劳试验机的试验弯矩、加载轴偏移量、试验转速校准测试结果如表1~3所示。

表1 试验弯矩校准测试结果

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	2.2800	2.261	-0.83	3.800	3.788	-0.32	5.320	5.312	-0.15	6.840	6.838	-0.03	8.360	8.360	0
2	2.2800	2.262	-0.79	3.800	3.788	-0.32	5.320	5.314	-0.11	6.840	6.838	-0.03	8.360	8.360	0
3	2.2800	2.263	-0.75	3.800	3.790	-0.26	5.320	5.315	-0.09	6.840	6.840	0.00	8.360	8.361	0.01
4	2.2800	2.262	-0.79	3.800	3.788	-0.32	5.320	5.314	-0.11	6.840	6.838	-0.03	8.360	8.360	0
5	2.2800	2.263	-0.75	3.800	3.790	-0.26	5.320	5.316	-0.07	6.840	6.841	0.01	8.360	8.362	0.02
6	2.2800	2.263	-0.75	3.800	3.788	-0.32	5.320	5.313	-0.13	6.840	6.838	-0.03	8.360	8.360	0
7	2.2800	2.263	-0.75	3.800	3.791	-0.24	5.320	5.315	-0.09	6.840	6.841	0.01	8.360	8.361	0.01
8	2.2800	2.262	-0.79	3.800	3.788	-0.32	5.320	5.313	-0.13	6.840	6.837	-0.04	8.360	8.361	0.01
9	2.2800	2.263	-0.75	3.800	3.790	-0.26	5.320	5.315	-0.09	6.840	6.840	0.00	8.360	8.362	0.02
10	2.2800	2.262	-0.79	3.800	3.789	-0.29	5.320	5.314	-0.11	6.840	6.836	-0.06	8.360	8.360	0
均值	2.2800	2.262	-0.79	3.800	3.789	-0.29	5.320	5.314	-0.11	6.840	6.839	-0.01	8.360	8.361	0.01
误差	-0.83%~+0.02%														

注:校准点值为标准测力仪示值换算所得;校准点值和试验机示值单位为kN·m,相对误差单位为%。

3 测量不确定度的评定

不确定度评定参照JJF 1059.1。

3.1 试验弯矩的不确定度

3.1.1 建立数学模型,列不确定度式

以标准测力仪为基础,用试验机示值,计算试验弯矩示值相对误差,建立校准结果的数学模型。

$$\delta = \frac{M_1 - M}{M} \times 100\%$$

式中, δ 为试验弯矩示值相对误差, %; M_1 为试验机示值, kN·m; M 为标准测力仪示值(kN)乘以力臂(m)所得的弯矩值, kN·m。

因为各分量互不相关,由不确定度传播规律:

$$u^2 = c_1^2 \times u^2(M_1) + c_2^2 \times u^2(M)$$

其中:

$$c_1 = \frac{\partial \delta}{\partial M_1} = \frac{1}{M} \quad c_2 = \frac{\partial \delta}{\partial M} = -\frac{M_1}{M^2}$$

表2 加载轴偏移量校准测试结果

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	2.000	2.004	0.20	4.000	4.005	0.13	6.000	6.006	0.10	8.000	8.007	0.09	10.000	10.005	0.05
2	2.000	2.006	0.30	4.000	4.007	0.18	6.000	6.007	0.12	8.000	8.006	0.08	10.000	10.007	0.07
3	2.000	2.008	0.40	4.000	4.006	0.15	6.000	6.005	0.08	8.000	8.004	0.05	10.000	10.006	0.06
4	2.000	2.005	0.25	4.000	4.004	0.10	6.000	6.008	0.13	8.000	8.005	0.06	10.000	10.008	0.08
5	2.000	2.007	0.35	4.000	4.008	0.20	6.000	6.007	0.12	8.000	8.006	0.08	10.000	10.007	0.07
6	2.000	2.006	0.30	4.000	4.006	0.15	6.000	6.005	0.08	8.000	8.008	0.10	10.000	10.005	0.05
7	2.000	2.008	0.40	4.000	4.005	0.13	6.000	6.004	0.07	8.000	8.009	0.11	10.000	10.004	0.04
8	2.000	2.009	0.45	4.000	4.004	0.10	6.000	6.006	0.10	8.000	8.006	0.08	10.000	10.006	0.06
9	2.000	2.005	0.25	4.000	4.006	0.15	6.000	6.005	0.08	8.000	8.004	0.05	10.000	10.005	0.05
10	2.000	2.007	0.35	4.000	4.005	0.13	6.000	6.008	0.13	8.000	8.005	0.06	10.000	10.007	0.07
均值	2.000	2.007	0.35	4.000	4.006	0.15	6.000	6.006	0.10	8.000	8.006	0.08	10.000	10.006	0.06
误差	0.04%~0.45%														

注：校准点值为标准量块值；校准点值和试验机示值单位为mm，相对误差单位为%。

表3 试验转速校准测试结果

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	500.40	500	-0.08	1000.20	1000	-0.02	1501.30	1500	-0.09	1801.40	1800	-0.08	2001.30	2000	-0.06
2	500.20	500	-0.04	1001.20	1000	-0.12	1501.40	1500	-0.09	1801.50	1800	-0.08	2001.40	2000	-0.07
3	500.30	500	-0.06	1001.40	1000	-0.12	1501.40	1500	-0.09	1801.20	1800	-0.07	2001.20	2000	-0.06
4	500.50	500	-0.10	1001.30	1000	-0.12	1501.30	1500	-0.09	1801.10	1800	-0.06	2001.10	2000	-0.05
5	500.20	500	-0.04	1001.10	1000	-0.11	1501.50	1500	-0.10	1801.30	1800	-0.07	2001.20	2000	-0.06
6	500.30	500	-0.06	1001.50	1000	-0.15	1500.10	1500	-0.01	1800.50	1800	-0.03	2001.50	2000	-0.07
7	500.10	500	-0.02	1001.20	1000	-0.12	1501.20	1500	-0.08	1801.40	1800	-0.08	2001.30	2000	-0.06
8	500.30	500	-0.06	1001.30	1000	-0.13	1501.50	1500	-0.10	1801.30	1800	-0.07	2001.40	2000	-0.07
9	500.40	500	-0.08	1001.40	1000	-0.14	1501.40	1500	-0.09	1801.10	1800	-0.06	2001.20	2000	-0.06
10	500.50	500	-0.10	1001.20	1000	-0.12	1501.30	1500	-0.09	1801.40	1800	-0.08	2001.40	2000	-0.07
均值	500.32	500	-0.06	1001.18	1000	-0.12	1501.24	1500	-0.08	1801.22	1800	-0.07	2001.30	2000	-0.06
误差	-0.15%~-0.01%														

注：校准点示值为转速表示值；校准点示值和试验机示值单位为 $r \cdot \min^{-1}$ ，相对误差单位为%。

得到不确定度式如下：

$$u^2(\delta) = \left(\frac{1}{M}\right)^2 \times u^2(M_1) + \left(-\frac{M_1}{M^2}\right)^2 \times u^2(M)$$

3.1.2 不确定度来源

车轮弯曲疲劳试验机试验弯矩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

试验机的弯矩示值分辨力为0.001 kN·m，以等概率分布（矩形分布），区间半宽为0.0005 kN·m，试验机分辨力引入的标准不确定度 $u_1(M_1)$ 如下：

$$u_1(M_1) = 0.0005/\sqrt{3} = 0.0003 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

$$c_1 = 0.05 \text{ (kN}\cdot\text{m)}^{-1}$$

自由度 $\nu_1 \rightarrow +\infty$

标准不确定度分量 $u_1 = |c_1| \times u_1(M_1) = 0.0015\%$

3.1.3.2 试验机测试重复性引入的标准不确定度 u_2

加载弯矩为6.8400 kN·m，重复测量9次，测量值为：6.838，6.838，6.840，6.838，6.841，6.841，6.837，6.840，6.836 kN·m， $\overline{M}_1 = 6.839$ kN·m，测试标准偏差 $s(M_1)$ 如下：

$$s(M_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (M_{1i} - \overline{M}_1)^2}{9-1}} = 0.0171 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

取9次测量算术平均值作为测量结果，测试重复性引入的标准不确定度 $u_2(M_1)$ 如下：

$$u_2(M_1) = s(M_1)/\sqrt{3} = 0.017/\sqrt{3} = 0.01 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

自由度 $\nu_2 = 8$

标准不确定度分量 $u_2 = |c_1| \times u_2(M_1) = 0.05\%$

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 $\pm 0.3\%$ ，试验弯矩为20 kN·m，差值为 ± 0.06 kN·m。按均匀分布，标准测力仪分辨力引入的标准不确定度 $u_3(M)$ 如下：

$$u_3(M) = 0.06/\sqrt{3} = 0.035 \text{ (kN}\cdot\text{m)}$$

不可靠程度估计为20%，则自由度 ν_3 如下：

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

$$c_2 = 0.05 \text{ (kN}\cdot\text{m)}^{-1}$$

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

试验弯矩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，试验弯矩的标准不确定度 $u_c(\delta)$ 由以上3个分量合成：

$$u_c(\delta) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.18\%$$

有效自由度 ν_{eff} 如下：

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(\delta)}{\sum \frac{u_i^4}{\nu_i}} = \frac{(0.18\%)^4}{\frac{(0.0015\%)^4}{\infty} + \frac{(0.05\%)^4}{8} + \frac{(0.17\%)^4}{12}} = 15$$

3.1.5 扩展不确定度

按置信概率 $p=0.95$ ，有效自由度 $\nu_{\text{eff}}=15$ ，查 t 分布表，得 $k=2.13$ 。试验机弯矩示值校准结果的扩展不确定度如下：

$$U_{95} = k \times u_c(\delta) = 2.13 \times 0.18\% = 0.38\%。$$

3.1.6 测量扩展不确定度报告

上述的分析及计算，试验机负荷示值误差校准结果的扩展不确定度 $U_{95}=0.38\%$ ， $\nu_{\text{eff}}=15$ 。

3.2 试验转速的不确定度

3.2.1 建立数学模型，列不确定度式

车轮弯曲疲劳试验机试验转速示值相对误差的计算公式如下：

$$\delta' = \frac{n_1 - n}{n} \times 100\%$$

式中， δ' 为试验机转速示值相对误差，%； n_1 为试

表4 试验弯矩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·m)	符号	数值	符号	数值/%
1	试验机示值误差	$u_1(M_1)$	0.0003	ν_1	$+\infty$	u_1	0.0015
2	试验机测量重复性	$u_2(M_1)$	0.01	ν_2	8	u_2	0.05
3	标准测力仪误差	$u_3(M)$	0.035	ν_3	12	u_3	0.17

验机转速示值, $r \cdot \min^{-1}$; n 为标准转速表示值, $r \cdot \min^{-1}$ 。

因为各分量互不相关, 由不确定度传播规律:

$$u^2 = c_1^2 \times u^2(n_1) + c_2^2 \times u^2(n)$$

其中:

$$c_1 = \frac{\partial \delta'}{\partial n_1} = \frac{1}{n} \quad c_2 = \frac{\partial \delta'}{\partial n} = -\frac{n_1}{n^2}$$

得到不确定度式如下:

$$u^2(\delta') = \left(\frac{1}{n}\right)^2 \times u^2(n_1) + \left(-\frac{n_1}{n^2}\right)^2 \times u^2(n)$$

3.2.2 不确定度来源

车轮弯曲疲劳试验机试验转速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

试验机的转速示值分辨力为 $0.01 r \cdot \min^{-1}$, 以等概率分布(矩形分布), 区间半宽为 $0.005 r \cdot \min^{-1}$, 试验机分辨力引入的标准不确定度 $u_1(n_1)$ 如下:

$$u_1(n_1) = 0.005/\sqrt{3} = 0.003 (r \cdot \min^{-1})$$

$$c_1 = 0.001 (r \cdot \min^{-1})^{-1}$$

自由度 $\nu_1 \rightarrow +\infty$

标准不确定度分量 $u_1 = |c_1| \times u_1(n_1) = 0.0003\%$

3.2.3.2 试验机测试重复性引入的标准不确定度 u_2

试验转速为 $1000 r \cdot \min^{-1}$, 重复测量9次,

测量值为1000.20, 1001.20, 1001.40, 1001.30, 1001.10, 1001.50, 1001.20, 1001.30, 1001.40 $r \cdot \min^{-1}$, $n_1 = 1001.17 r \cdot \min^{-1}$, 测试标准偏差 $s(n_1)$ 如下:

$$s(n_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^9 (n_{1i} - \bar{n}_1)^2}{9-1}} = 0.38 (r \cdot \min^{-1})$$

测试重复性引入的标准不确定度分量 $u_2(n_1)$ 如下:

$$u_2(n_1) = s(n_1)/\sqrt{3} = 0.38/\sqrt{3} = 0.22 (r \cdot \min^{-1})$$

自由度 $\nu_2 = 8$

标准不确定度分量 $u_2 = |c_1| \times u_2(n_1) = 0.022\%$

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 $\pm 0.2\%$, 试验转速为 $1000.00 r \cdot \min^{-1}$, 误差为 $\pm 2.00 r \cdot \min^{-1}$ 。按均匀分布, 转速表分辨力引入的标准不确定度 $u_3(n)$ 如下:

$$u_3(n) = 2.00/\sqrt{3} = 1.15 (r \cdot \min^{-1})$$

不可靠程度估计为20%, 则自由度 ν_3 如下:

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

$$c_2 = 0.001 (r \cdot \min^{-1})^{-1}$$

标准不确定度分量 $u_3 = |c_2| \times u_3(n) = 0.12\%$

试验速度的标准不确定度分量见表5。

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, 试验转速

表5 试验转速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/($r \cdot \min^{-1}$)	符号	数值	符号	数值/%
1	试验机示值误差	$u_1(n_1)$	0.003	ν_1	$+\infty$	u_1	0.0003
2	试验机测量重复性	$u_2(n_1)$	0.22	ν_2	8	u_2	0.022
3	标准转速表误差	$u_3(n)$	1.15	ν_3	12	u_3	0.115

的标准不确定度 $u_c(\delta')$ 为以上3个分量的合成:

$$u_c(\delta') = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.12\%$$

有效自由度 ν_{eff} 如下:

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4(\delta')}{\sum \frac{u_i^4}{\nu_i}} = \frac{(0.12\%)^4}{\frac{(0.0003\%)^4}{\infty} + \frac{(0.022\%)^4}{8} + \frac{(0.12\%)^4}{12}} = 12$$

3.2.5 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 $k=2.18$ 。试验机转速校准结果的扩展不确定度如下:

$$U_{95} = k \times u_c(\delta) = 2.18 \times 0.12\% = 0.26\%$$

3.2.6 测量扩展不确定度报告

试验机转速示值误差校准结果的扩展不确定度
 $U_{95}=0.26\%$, $\nu_{\text{eff}}=12$ 。

4 结语

影响试验弯矩和试验转速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。车轮径向疲劳试验机校准方法实际使用效果良好。

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, 商用车车辆性能要求和试验方法[S].
- [3] JJF 1001—2011, 通用计量术语及定义[S].

Calibration Method of Wheel Bending Fatigue Testing Machine and Evaluation of the Uncertainty of Main Items

Zhou Kuiwu, Zhu Kai, Wang Zhongshou

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

Abstract: The wheel bending fatigue testing machine was calibrated, and the items included the bending moment, the loading axis deviation and testing speed. The uncertainties of bending moment and speed were then evaluated. It was found that the main source of uncertainty was introduced by the resolution and repeatability of the testing machine, and the resolution of the force sensor and tachometer.

Keywords: wheel bending fatigue testing machine; bending moment; loading axis deviation; speed; uncertainty



信息·资讯

建大将在昆山建卡客车轮胎工厂

建大橡胶公司在第28届德国埃森国际轮胎展上宣布, 公司将在江苏昆山建设1个卡车/客车轮胎的工厂。此计划将使建大的产品线拓展到子午线卡车/客车轮胎。

卡车/客车轮胎新工厂将位于建大在昆山现有的轿车轮胎工厂附近, 预计2016年投产。据报道, 该项目投资超过1亿美元, 轮胎日产能将达到6000条。

此前, 建大公司重新规划和拓展公司在全球范围内的产品研发工作, 并在德国奥尔登堡设立了欧洲总部。

朱永康