

测试·分析

轮胎滚动阻力试验机测力法测量结果的不确定度评定

李 璠, 杨 凯, 于文字, 杨晓蕾

(青岛市产品质量检验研究院, 山东 青岛 266101)

摘要: 建立数学模型, 通过试验轮胎试验数据拟合曲线关联所有输入量(对轮胎滚动阻力系数计算中涉及到的输入量和对测量结果有影响的输入量均予以考虑), 对TJR-RR-PC/TB(Y)型双工位轮胎滚动阻力试验机测力法测量结果的不确定度进行评定。结果表明, 轮胎滚动阻力试验机测量结果在95%置信区间的轮胎滚动阻力系数的相对扩展不确定度为0.012 4(包含因子为2), 影响不确定度的主要因素为试验机测量重复性和充气压力。

关键词: 轮胎; 滚动阻力系数; 滚动阻力试验机; 测力法; 拟合曲线; 不确定度

中图分类号: TQ336.1; TQ330.4[†]92

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2022)10-0780-05

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2022.10.0780



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎滚动阻力系数为阻碍轮胎前进的力与轮胎负荷的比值, 在轮胎标签法认证中用于表征轮胎能耗大小, 是衡量轮胎性能的重要指标^[1-6]。轮胎滚动阻力试验机是测量轮胎滚动阻力系数的重要设备, 在轮胎研发试验、实验室比对和试验机评估时常需要出具轮胎滚动阻力试验机测量结果的不确定度。目前实验室多给出轮胎滚动阻力试验机连续3次重复测量的试验轮胎滚动阻力标准差, 其不能反映整个测定过程中各不确定因素引入的不确定度^[7-8]。

根据GB/T 29040—2012《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》, 轮胎滚动阻力系数测量方法主要有测力法、扭矩法、功率法和减速度法^[8]。目前, 国内轮胎滚动阻力试验机多采用测力法测量轮胎滚动阻力系数。

本工作采用测力法, 对轮胎滚动阻力试验机测量的试验轮胎滚动阻力系数的不确定度进行评定。

1 实验

1.1 试验设备和轮胎

试验设备: 型号为TJR-RR-PC/TB(Y)的双工位轮胎滚动阻力试验机, 天津久荣工业技术有限公司产品。

试验轮胎: 米其林集团生产的195/65R15 91V规格轮胎, 放置于轮胎滚动阻力试验机试验轮胎工位。

1.2 试验方法和条件

试验方法: 根据GB/T 29040—2012测量轮胎负荷、轮轴力等参数(轮胎正反转各测量1次并取均值, 以消除交扰现象), 通过计算得到轮胎滚动阻力系数。

试验条件: 负荷 4.825 kN, 轮轴力测量平均值 41.4 N, 转鼓表面到轮轴的距离测量平均值 293.6 mm, 温度 25 °C, 充气压力 210 kPa, 转鼓速度 80 km·h⁻¹。

作者简介: 李璠(1987—), 男, 湖北襄阳人, 青岛市产品质量检验研究院工程师, 硕士, 主要从事轮胎及橡胶制品检测的研究工作。

E-mail: 764406193@qq.com

引用本文: 李璠, 杨凯, 于文字, 等. 轮胎滚动阻力试验机测力法测量结果的不确定度评定[J]. 橡胶工业, 2022, 69(10): 780-784.

Citation: LI Fan, YANG Kai, YU Wenyu, et al. Evaluation of uncertainty of measurement results of force measuring method of tire rolling resistance testing machine [J]. China Rubber Industry, 2022, 69(10): 780-784.

轮胎滚动阻力试验机转鼓直径为2 000 mm, 无需考虑转鼓直径修正。

2 数学模型

依据GB/T 29040—2012, 轮胎滚动阻力系数(C_r)计算公式如下^[8-10]:

$$C_r = \frac{F(1 + \frac{r_L}{R})[1 + k_t(t - 25)]}{L_m} \quad (1)$$

式中: L_m 为负荷; F 为轮轴力; r_L 为转鼓表面到轮轴的距离; R 为转鼓半径,取1 000 mm; k_t 为温度修正系数,取0.008; t 为温度。

因负荷、轮轴力、转鼓表面到轮轴的距离、温度4个输入量互不相关,由不确定度传播律得出试验机测量轮胎滚动阻力系数的标准不确定度 $[u(C_r)]$ 为:

$$u_r(C_r) = \frac{u(C_r)}{C_r} = \sqrt{\frac{u_1^2(L_m)}{L_m^2} + \frac{u_2^2(F)}{F^2} + \frac{u_3^2(r_L)}{(r_L + R)^2} + \frac{u_4^2(t)}{(t - 25 + \frac{1}{k_t})^2}} \quad (7)$$

3 不确定度评定

3.1 不确定度来源

轮胎滚动阻力系数测量结果的不确定度的来源主要有试验机测量重复性产生的A类不确定度、校准计量证书和试验机示值误差得到的B类不确定度。公式(1)未涉及影响测量结果的充气压力和转鼓速度^[11-14]。

3.2 A类不确定度的评定

试验轮胎每周被测量1次,连续10次轮胎滚动阻力系数的测量结果如表1所示,其中, i 为测量次数。

表1 试验轮胎滚动阻力系数测量结果
Tab.1 Rolling resistance coefficient measurement results of test tire $N \cdot kN^{-1}$

i	C_r	i	C_r
1	8.49	6	8.57
2	8.51	7	8.58
3	8.53	8	8.59
4	8.52	9	8.60
5	8.55	10	8.55

通过贝塞尔公式可以得到轮胎滚动阻力系数测量结果的标准差 $[s(C_r)]$ 为:

$$s(C_r) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{ri} - \bar{C}_r)^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$u(C_r) = \sqrt{c_1^2 u_1^2(L_m) + c_2^2 u_2^2(F) + c_3^2 u_3^2(r_L) + c_4^2 u_4^2(t)} \quad (2)$$

式中, $u_1(L_m)$, $u_2(F)$, $u_3(r_L)$, $u_4(t)$ 分别为负荷、轮轴力、转鼓表面到轮轴的距离、温度的不确定度, c_1 — c_4 为对应传播系数灵敏度,其计算公式如下:

$$c_1 = \frac{\partial(C_r)}{\partial L_m} = -\frac{C_r}{L_m} \quad (3)$$

$$c_2 = \frac{\partial(C_r)}{\partial F} = \frac{C_r}{F} \quad (4)$$

$$c_3 = \frac{\partial(C_r)}{\partial r_L} = \frac{C_r}{R + r_L} \quad (5)$$

$$c_4 = \frac{\partial(C_r)}{\partial t} = \frac{k_t C_r}{[1 + k_t(t - 25)]} \quad (6)$$

将式(3)—(6)代入式(2),经换算得到轮胎滚动阻力系数的相对不确定度 $[u_r(C_r)]$ 如下:

式中, n 为测量总次数, C_{ri} 为第 i 次测量得到的轮胎滚动阻力系数, $\bar{C}_r$ 为 n 次测量得到的轮胎滚动阻力系数平均值。

单次测量的试验机轮胎滚动阻力系数A类标准不确定度为 $u_A(C_r) = s(C_r) = 0.037 N \cdot kN^{-1}$ 。

$\bar{C}_r$ 为轮胎滚动阻力系数的最佳估计值,则试验机测量重复性产生的轮胎滚动阻力系数的A类相对不确定度 $u_{Ar}(C_r) = 0.0043 (\bar{C}_r = 8.55 N \cdot kN^{-1})$ 。

3.3 B类不确定度的评定

3.3.1 试验机校准出具的不确定度

测力法轮胎滚动阻力试验机计量参与轮胎滚动阻力系数计算的4个输入量为负荷、轮轴力、转鼓表面到轮轴的距离、温度,影响测量结果的另外2个输入量为充气压力和转鼓速度。

计量证书给出各输入量的相对扩展不确定度为:负荷 0.20%,轮轴力 0.20%,充气压力 0.024%,转鼓速度 0.10%;给出各输入量的扩展不确定度为:转鼓表面到轮轴的距离 0.01 mm,温度 0.05 °C。

计量证书概率分布可认为是正态分布,包含因子(k)=2。试验机校准出具的6个输入量的不确定度计算如下。

负荷:

$$u_{11}(L_M) = \frac{4.825 \text{ kN} \times 0.20\%}{2} = 0.004 825 \text{ N}$$

轮轴力:

$$u_{21}(F) = \frac{41.4 \text{ N} \times 0.20\%}{2} = 0.041 4 \text{ N}$$

转鼓表面到轮轴的距离:

$$u_{31}(r_L) = \frac{0.01 \text{ mm}}{2} = 0.005 \text{ mm}$$

温度:

$$u_{41}(t) = \frac{0.05^\circ\text{C}}{2} = 0.025^\circ\text{C}$$

充气压力:

$$u_{51}(P) = \frac{210 \text{ kPa} \times 0.024\%}{2} = 0.025 2 \text{ kPa}$$

转鼓速度:

$$u_{61}(v) = \frac{80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \times 0.10\%}{2} = 0.04 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

3.3.2 示值误差产生的不确定度

设备示值分辨率以等概率分布(均匀分布)方式落在宽度为1/2分辨率区间,如表2所示。

表2 设备各输入量的分辨率
Tab. 2 Resolutions ratios of inputs of machine

输入量	分辨率	区间半宽度
负荷/kN	0.001	0.000 5
轮轴力/N	0.1	0.05
转鼓表面到轮轴的距离/mm	0.1	0.05
温度/°C	0.1	0.05
充气压力/kPa	0.1	0.05
转鼓速度/(km·h ⁻¹)	0.1	0.05

示值误差按等概率分布计算, $k = \sqrt{3}$ 。6个输入量示值误差产生的不确定度计算如下。

负荷:

$$u_{12}(L_M) = \frac{0.000 5 \text{ kN}}{\sqrt{3}} = 0.000 289 \text{ kN}$$

轮轴力:

$$u_{22}(F) = \frac{0.05 \text{ N}}{\sqrt{3}} = 0.028 9 \text{ N}$$

转鼓表面到轮轴的距离:

$$u_{32}(r_L) = \frac{0.05 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 0.028 9 \text{ mm}$$

温度:

$$u_{42}(t) = \frac{0.05^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} = 0.028 9^\circ\text{C}$$

充气压力:

$$u_{52}(P) = \frac{0.05 \text{ kPa}}{\sqrt{3}} = 0.028 9 \text{ kPa}$$

转鼓速度:

$$u_{62}(v) = \frac{0.05 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}}{\sqrt{3}} = 0.028 9 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

3.3.3 拟合曲线引入的不确定度

在计算轮胎滚动阻力系数时,充气压力和转鼓速度未考虑,但试验证明以充气压力和转鼓速度为变量(x),轮胎滚动阻力系数会随之变化。利用试验轮胎做控制变量试验,发现在工作范围内可分别建立充气压力、转鼓速度与轮胎滚动阻力系数的最小二乘法数学方程,使充气压力、转鼓速度与轮胎滚动阻力系数建立联系,公式为 $C_r = ax + b$ (a 为斜率, b 为截距)^[15-18]。

在充气压力工作范围内轮胎滚动阻力系数的拟合曲线方程为:

$$C_r = -0.018 6P + 12.459 \quad (9)$$

在转鼓速度工作范围内轮胎滚动阻力系数的拟合曲线方程为:

$$C_r = 0.008v + 7.913 \quad (10)$$

运用贝塞尔公式计算轮胎滚动阻力系数的拟合曲线残余标准差 $s_1(C_r)$, 表征估计值的精度, 见下式:

$$s_1(C_r) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (C_{ri} - C'_{ri})^2}{n-2}} \quad (11)$$

式中, C_{ri} 为绘制拟合曲线的实际测量值, C'_{ri} 为通过公式计算的理论测量值, $n=12$ 。

由轮胎滚动阻力系数的拟合曲线引入的标准不确定度 $[s_1(x)]$ 为:

$$s_1(x) = \frac{s_1(C_r)}{a} \times \sqrt{\frac{1}{f} + \frac{1}{n} + \frac{(\bar{x}_s - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (12)$$

式中: f 为平行测量次数, 因测力法测量轮胎滚动阻力系数需要轮胎正反转各测1次, $f=2$; $\bar{x}_s$ 为平行测量的平均值; x_i 为绘制拟合曲线的实际测量值; $\bar{x}$ 为实际测量值的平均值。

充气压力由拟合曲线引入的标准不确定度 $[u_{53}(P)]$ 为:

$$u_{53}(P) = s(P) = 0.218 8 \text{ kPa}$$

转鼓速度由拟合曲线引入的标准不确定度 $[u_{63}(v)]$ 为:

$$u_{63}(v)=s(v)=0.113\ 0\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$$

3.4 合成相对标准不确定度

试验机校准出具的不确定度、示值误差产生的不确定度和拟合曲线引入的标准不确定度互不相关,按式(13)合成各输入量总不确定度。负荷、轮轴力、转鼓表面到轮轴的距离、温度4个输入量需要将试验机校准出具的不确定度和示值误差产生的不确定度合成为总不确定度;充气压力、转鼓

速度2个输入量需要将试验机校准出具的不确定度、示值误差产生的不确定度和拟合曲线引入的标准不确定度合成为总不确定度。

$$u=\sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}\tag{13}$$

各输入量灵敏度可根据公式(7), (9)和(10)计算^[9]。各输入量的相对不确定度为各输入量总不确定度和对应灵敏度的乘积,如表3所示。式(14)为合成试验机轮胎滚动阻力系数测量结果的相对标准不确定度计算式。

表3 各输入量的相对不确定度
Tab.3 Relative uncertainties of input quantities

影响因素	总不确定度	灵敏度	相对不确定度
负荷	$u_1(L_m)=0.004\ 8\ \text{kN}$	$0.207\ 3\ \text{kN}^{-1}$	$u_{1r}(L_m)=0.001\ 0$
轮轴力	$u_2(F)=0.050\ 5\ \text{N}$	$0.024\ 2\ \text{N}^{-1}$	$u_{2r}(F)=0.0012$
转鼓表面到轮轴的距离	$u_3(r_L)=0.029\ 3\ \text{mm}$	$0.000\ 8\ \text{mm}^{-1}$	$u_{3r}(r_L)=2.3\times10^{-5}$
温度	$u_4(t)=0.038\ 2\ ^\circ\text{C}$	$0.008\ ^\circ\text{C}^{-1}$	$u_{4r}(t)=0.000\ 3$
充气压力	$u_5(P)=0.218\ 8\ \text{kPa}$	$0.018\ 6\ \text{kPa}^{-1}$	$u_{5r}(P)=0.004\ 1$
转鼓速度	$u_6(v)=0.113\ 0\ \text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	$0.008\ (\text{km}\cdot\text{h}^{-1})^{-1}$	$u_{6r}(v)=0.001\ 0$

$$u_r(C_r)=\sqrt{u_{Ar}^2(C_r)+u_{1r}^2(L_m)+u_{2r}^2(F)+u_{3r}^2(r_L)+u_{4r}^2(t)+u_{5r}^2(P)+u_{6r}^2(v)}=0.006\ 2\tag{14}$$

气充气压力,有助于降低测量结果的误差。

4 相对扩展不确定度评定

按置信概率约95%计算, $k=2$, 则TJR-RR-PC/TB(Y)型双工位轮胎滚动阻力试验机测量结果的相对扩展不确定度为 $U_r(C_r)=k\times u_r(C_r)=2\times0.006\ 2=0.012\ 4$ 。

5 结论

本工作结合数学模型和试验轮胎试验数据拟合公式,完成了负荷、轮轴力、转鼓表面到轮轴的距离、温度、充气压力和转鼓速度6个输入量各自的不确定度分析,并对轮胎滚动阻力试验机测力法测量的轮胎滚动阻力系数的不确定度进行了全面评定。

通过比对试验机测量重复性及各输入量的相对不确定度,试验机测量重复性产生的A类相对不确定度(0.004 3)和充气压力相对不确定度(0.004 1)数值明显大于其他输入量,可以判定影响轮胎滚动阻力试验机测量结果的不确定度主要来源是试验机测量重复性和充气压力。在实际操作中加强各输入量传感器监控,重点精准调节闭

参考文献:

[1] The European Parliament and the Council of the European Union. On the labelling of tyres with respect to fuel efficiency and other parameters: Regulation (EU) 2020/740 of the European Parliament and the Council of the European Union[S].Europe:Official Journal of the European Union,2020.

[2] 彭国良.汽车轮胎滚动阻力系数影响因素研究[D].青岛:山东科技大学,2018.

[3] 王国林,陈晨,周海超,等.胎面与胎体间接触特性对轮胎滚动阻力影响的研究[J]. 橡胶工业,2020,67(6):403-409.

WANG G L, CHEN C, ZHOU H C, et al.Study on influence of contact characteristics between tread and carcass on tire rolling resistance[J]. China Rubber Industry,2020,67(6):403-409.

[4] 王晓东,孙佳佳,孙宝余.全钢子午线轮胎的滚动阻力效应分析[J]. 轮胎工业,2021,41(12):777-780.

WANG X D, SUN J J, SUN B Y, et al.Analysis of the factors influencing rolling resistance of all-steel radial tire[J].Tire Industry, 2021,41(12):777-780.

[5] 赖福英,张俊伟,高秋英,等.子午线轮胎滚动阻力试验结果可靠性研究[J]. 轮胎工业,2021,41(1):58-62.

LAI F Y, ZHANG J W, GAO Q Y, et al.Study on reliability of rolling resistance test results of radial tire[J].Tire Industry,2021,41(1):58-

- 62.
- [6] 郑炳杰,田川超,李辉.滚动阻力系数的计算方法及其在整车道路行驶阻力计算中的应用[J].科技资讯,2018,16(27):68-69.
- ZHENG B J, TIAN C C, LI H.The calculation method of rolling resistance coefficient and its application in the calculation of vehicle road driving resistance[J].Science & Technology Information,2018,16(27):68-69.
- [7] International Organization for Standardization.Passenger car, truck and bus tyre rolling resistance measurement method—Single point test and correlation of measurement results: ISO 28580[S]. Switzerland:ISO Copyright Office,2018.
- [8] 全国轮胎轮胎标准化技术委员会.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:GB/T 29040—2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [9] 唐胜睦.测量不确定度评定中的灵敏系数的计算[J].计量与测试技术,2013,40(1):66-67.
- TANG S M.Sensitivity coefficient calculation about the evaluation of uncertainty in measurement[J].Metrology & Measurement Technique,2013,40(1):66-67.
- [10] 姚金才.不确定度评定中灵敏系数及相关系数分析[D].重庆:重庆文理学院,2006.
- [11] 全国法制计量管理计量技术委员会.测量不确定度评定与表示:JJF 1059.1—2012[S].北京:中国质检出版社,2013.
- [12] 全国轮胎轮胎标准化技术委员会.汽车轮胎滚动阻力限值:GB/T 29042—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.
- [13] 吕朝阳.相对误差与相对不确定度[J].实验教学与仪器,2010,27(10):33-34.
- LYU Z Y.Relative error and relative uncertainty[J].Experiment Teaching and Apparatus,2010,27(10):33-34.
- [14] 罗刚.不确定度A类评定及不确定度B类评定的探讨[J].计量与测试技术,2007,34(12):42-43.
- LUO G.Searches of the uncertainty A and the uncertainty B[J].Metrology & Measurement Technique,2007,34(12):42-43.
- [15] 伊魁宇,王猛.标准曲线法进行定量检测的不确定度来源分析[J].广州化工,2012,40(9):143-144,153.
- YI K Y, WANG M.Introduction of the sources of measurement uncertainty for analytical determination[J].Guangzhou Chemical Industry,2012,40(9):143-144,153.
- [16] 曹涛.标准曲线不确定度的分析[J/OL].[2018-05-11].<https://www.doc88.com/p-0116413635195.html>.
- [17] 张艳艳,贾红丽,王萍,等.紫外可见分光光度法测定壁纸中甲醛的不确定度评定[J].化学分析计量,2021,30(1):92-95.
- ZHANG Y Y, JIA H L, WANG P, et al.Uncertainty assessment of formaldehyde in wallpaper by UV-vis spectrophotometry[J].Chemical Analysis and Meterage,2021,30(1):92-95.
- [18] 占永革,黄湘燕,龚剑.化学分析中非线性曲线拟合结果的不确定度评定[J].冶金分析,2011,31(8):26-30.
- ZHAN Y G, HUANG X Y, GONG J. Evaluation of uncertainty of non-linear curve fitting results in chemical analysis[J].Metallurgical Analysis,2011,31(8):26-30.

收稿日期:2022-06-03

Evaluation of Uncertainty of Measurement Results of Force Measuring Method of Tire Rolling Resistance Testing Machine

LI Fan, YANG Kai, YU Wenyu, YANG Xiaolei

(Qingdao Product Quality Testing Research Institute, Qingdao 266101, China)

Abstract: The uncertainty of the measurement results of the force measuring method of TJR-RR-PC/TB (Y) dual station tire rolling resistance testing machine was evaluated by using a mathematical model and correlating all inputs through the fitting curves of the test data of the tire which covered the inputs involved in the calculation of the tire rolling resistance coefficient and the inputs that affected the measurement results. The results showed that the relative expanded uncertainty of the tire rolling resistance coefficient measured by the tire rolling resistance testing machine in the 95% confidence interval was 0.012 4 (including factor was 2), and the main factors affecting the uncertainty were the repeatability of the measurement of the tester and the inflation pressure.

Key words: tire; rolling resistance coefficient; rolling resistance testing machine; force measuring method; fitting curve; uncertainty