

整车燃油经济性与轮胎相关性的 试验研究与理论分析

张新月^{1,2}, 殷瑞婧^{1,2}, 周福强^{1*}, 仇斌¹, 危银涛¹

(1. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 燕山大学 车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066000)

摘要:通过滑行试验和等速油耗试验,研究不同品牌同一规格轿车子午线轮胎滚动阻力对油耗的影响。采用汽车能量流动分析方法,建立轮胎滚动阻力与汽车油耗之间的关系,量化分析燃油经济性的影响因素,探讨轮胎的节能潜力,对提高整车的燃油经济性具有重要的意义。

关键词:轿车子午线轮胎;滚动阻力;燃油经济性;滑行试验;等速油耗试验;能量流

中图分类号:U467.4⁺98;U463.341⁺.4/.6 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2017)04-0195-05

随着地球的日趋变暖,石油资源短缺、不断涨价,环境污染控制的要求日益严酷,减少汽车燃料消耗以及尾气排放量已成当前世界性的重要环保课题^[1-2]。汽车燃油经济性的影响因素包括发动机性能、汽车行驶阻力和传动效率、结构因素、道路条件、气候、交通状况等诸多方面。本工作通过试验和能量流分析,研究乘用车轮胎对整车燃油经济性的影响^[3-4]。作为汽车的唯一接地部件,轮胎本身材料和结构属性及道路的作用,使轮胎在滚动时产生了阻碍前进的滚动阻力,作为车辆行驶的4种主要阻力来源之一,滚动阻力造成了燃油的消耗。车辆消耗燃料的10%是用来克服车辆的滚动阻力^[5];美国环保局的试验数据也表明^[6],当轮胎的滚动阻力降低10%时,轿车能有效地节约2%的燃油,载重汽车能节约4%的燃油。因此,轮胎的滚动阻力是车辆能源消耗的重要组成部分。

欧盟各成员国以及美国等已纷纷立法,对轮胎的滚动阻力提出限值要求^[7-8]。2012年开始实施的欧盟轮胎“标签法”^[9]对在欧盟销售的轮胎各项性能提出更严格要求。目前,我国轿车轮胎有30%达不到欧盟第1阶段滚动阻力的最低要求,70%达不到其第2阶段的最低要求^[10]。汽车制造

商也开始对轮胎提出降低滚动阻力的要求。米其林推出的专用电动车轮胎Energy EV的滚动阻力系数降低20%,使得雷诺ZOE汽车的续航里程提高6%^[11],普利司通也推出EP150轮胎用于通用的Spark系列电动车^[12]。

轮胎滚动阻力的组成为^[13]:轮胎部件胶料的滞后损失 90%~95%;轮胎移动的空气阻力+轮胎/路面摩擦 5%~10%。不同结构、材料和花纹的轮胎滚动阻力是不同的,因此,同样车辆配备不同的轮胎,滚动阻力的表现差别可达50%^[14]。事实上,由于滚动阻力的存在,轮胎所造成的燃油消耗量约占整个轿车燃油消耗量的20%,在卡客车中则占1/3^[15]。

尽管理论上降低滚动阻力可以提高汽车的燃油经济性,但是通过量化的对标试验,定量确定不同的轮胎对整车燃油经济性的影响的研究报道甚少。本研究采用4种品牌同规格的轮胎分别进行滑行试验和等速油耗试验,对比分析轮胎与整车油耗的相关性,并在此基础上通过能量流分析,建立轮胎滚动阻力系数与整车燃油经济性的关系。

1 实验

通过滑行试验和等速油耗试验,辨识实际运行过程中轮胎的滚动阻力系数及其对汽车油耗的影响。选用试验车型为东风风行LZ6460Q8GS,参

作者简介:张新月(1990—),女,河北沧州人,清华大学与燕山大学联合培养的在读硕士研究生,主要从事车轮轮胎系统阻力对整车燃油经济性的影响研究。

*通信联系人

数如下:

整备质量(承重)	1 750 kg
最大总质量	2 275 kg
轴距	2 800 mm
发动机最大功率/转速	92.61 kW/5 250 r · min ⁻¹
发动机最大转矩/转速	190.12 N · m/2 500 r · min ⁻¹

90 km · h⁻¹等速百公里油耗 9.8 L

最高车速 150 km · h⁻¹

排量 2.35 L

标准轮胎规格 215/65R15

试验所用4种品牌215/65R15轮胎的花纹形式如图1所示。



图1 4种品牌轮胎的花纹形式

1.1 滑行试验

试验车进行了50 km · h⁻¹的滑行距离和滚动阻力系数辨识试验。试验前试验车辆必须进行预热行驶;在长约1 km的试验路段两端立上标杆作为滑行区段,汽车在进入滑行区段前车速应稍大于50 km · h⁻¹;驾驶员将变速器排挡放入空挡(松开离合器踏板),汽车开始滑行;记录滑行初速度[应为(50 ± 0.3) km · h⁻¹]和滑行距离。

1.2 等速油耗试验

依次对不同品牌轮胎采用4种车速,20,30,40,50 km · h⁻¹,进行等速油耗试验。为了确定在规定速度时的燃油消耗量,在低于或等于规定车速时进行往返一次,往返区段应尽量相同;并在至少等于或高于规定车速进行另两次试验,但应满足速度误差为±2 km · h⁻¹的要求。

1.3 结果与分析

滑行试验数据分两部分,第1部分数据是手动记录的滑行距离和时间,处理后A—D品牌轮胎滚动阻力系数分别为0.009 46,0.009 57,0.012 17,0.010 90;第2部分数据是V-BOX储存卡中的数据,数据的储存频率是100 Hz,其中要用到的数据是时刻和对应的车速。第2部分的数据处理在MATLAB软件中通过编程完成,包括提取滑行数据、判断试验数据是否有效、计算行驶阻力、计算修正后的滚动阻力及其系数。

试验结果如图2所示。

由图2可知,C品牌轮胎的滚动阻力系数最大,

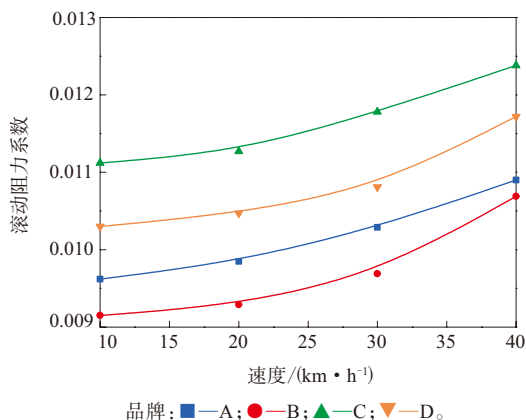


图2 轮胎滚动阻力系数随车速变化的曲线

B品牌最小,A品牌仅次于B品牌,D品牌介于A品牌与C品牌之间。

4种品牌轮胎速度整合后的等速百公里油耗拟合曲线如图3所示。油耗比(n)以百公里耗油8 L为基准计算,其计算公式为

$$n = (Q - 8) / 8 \times 100\% \quad (1)$$

式中, Q 为百公里耗油量。

由图2可知,4种品牌轮胎的滚动阻力随着速度的提高都有增大的趋势。由图2与3对比分析可知,随着车速的提高,B品牌轮胎滚动阻力的增大趋势比A品牌轮胎强,因此当车速超过40 km · h⁻¹后不久B品牌轮胎的滚动阻力将大于A品牌,滚动阻力系数与油耗比的分析结果是一致的。

分析图3,可以得到下述结论。

(1) C品牌轮胎为普通能耗轮胎,在低速20

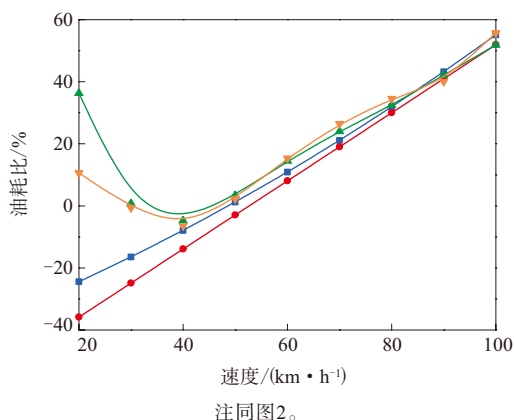


图3 4种品牌轮胎速度整合后的等速百公里
油耗比拟合曲线

$\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,车辆产生较大的能耗,而A和B品牌轮胎为低滚动阻力轮胎,其在低速特性上具有较低的油耗。并随着车速的提高,耗油量逐渐增大。在 $20 \sim 30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 低速行驶时B品牌轮胎的节油性能更优于A品牌轮胎。

(2) D品牌轮胎的等速油耗比拟合曲线总的趋势是随着车速提高而增大,低速时有先降低后提高的变化,说明在等速油耗试验中,轮胎滚动阻力在 $30 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速时达到最低。橡胶为粘弹性材料,随着轮胎滚动速度的不同,其对路面激励输入的响应也不同,滚动阻力与轮胎及材料的频谱特性有可待深入研究的空间。

(3) 轮胎的花纹由横沟细密逐渐变为加深加宽,而其低速的滚动阻力也逐渐增大。

(4) 随着速度的提高,不同品牌轮胎的油耗差异逐渐减小,在速度为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上的油耗差异较小,几乎可以忽略,这是由于随着速度的提高,空气阻力的比例逐渐增大,增大到一定程度,空气阻力占主要因素。

比较图2与3可以发现,在 $20 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度范围内,滑行试验与等速油耗试验的结果是一致的,随着速度的提高,滚动阻力对整车油耗的影响逐渐减小,速度在 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上时,轮胎滚动阻力的影响很小。

2 轮胎滚动阻力与整车燃油经济性相关性分析

上述试验充分说明了轮胎滚动阻力对车辆燃油经济性的影响,为从普遍意义上理解两者之间

的关系,本研究基于能量流模型,推导轮胎滚动阻力对车辆燃油经济性的影响系数。

滚动阻力的降低意味着需要提供给车轮的力矩减小,相同速度下驱动所需的功率也因此降低。但是车辆发动机及传动系的低效导致总的能量消耗比传递到轮胎上的要大。因此,节省的燃油比仅由滚动阻力减小节省的燃油要多。另外,汽车附件,例如空气压缩机、发电机等,要消耗发动机的部分输出功率。车辆消耗能量流分析(每一项中用行的尺寸来表示在燃油消耗中的相对比例)^[16]如图4所示。

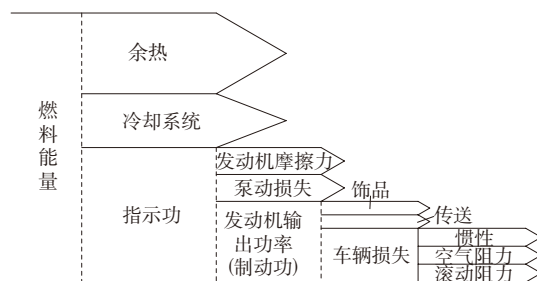


图4 车辆消耗能量流分析

可以用传动系的效率值来描述指定道路工况的能量耗散^[17-18]。发动机总的能量输出(E_e)可以表示为

$$E_e = E_t / \varepsilon + P_a t \quad (2)$$

式中, E_t 为整个道路工况中传递的总的牵引能量, ε 为传动系的效率, P_a 为附件的平均功率需求, t 为行驶的总时间。

发动机消耗的燃油直接与通过燃油燃烧释放的热能(E_f)成正比。 E_f 的计算公式如下:

$$E_f = F_c L H_0 \quad (3)$$

式中, F_c 为行驶单位距离的平均燃油消耗量, L 为整个道路工况内通过的距离, H_0 为燃料单位体积的低热值。

发动机的总的机械能输出可以通过下式与燃油能量联系起来^[17]:

$$E_t = aN + E_e / \eta \quad (4)$$

式中, a 为摩擦损失系数, N 为整个道路工况内发动机转过的圈数, η 为发动机的热效率。

综合式(1)~(3),得到关于一个工况内车辆燃油消耗量及所需的输入牵引能的关系式:

$$F_c = (aN + E_e / \varepsilon \eta + P_a t / \eta) / L H_0 \quad (5)$$

式中, E_t 为提供给车轮的总的机械能, 用来克服指定工况内阻碍车辆运动的所有力。这些力包括空气动力阻力、重力(车辆爬坡时)和惯性力, 当然还包括轮胎的滚动阻力。因此, E_t 可以表示为

$$E_t = E_a + E_g + E_i + E_l \quad (6)$$

式中, E_a , E_g , E_i 和 E_l 分别为克服空气动力阻力、重力、惯性力和轮胎滚动阻力所需的能量, 可以通过对工况内行驶距离上作用的力进行积分计算得到。

依据滚动阻力的基本定义(通过单位距离消耗的能量), 得到燃油消耗量相对于滚动阻力的函数关系如下^[19]:

$$F_c = [(E_a + E_g + E_i + F_{lr}D) / \varepsilon\eta + aN + P_a t / \eta] / LH_0 \quad (7)$$

式中, F_{lr} 为一个工况内车辆上所有轮胎的平均滚动阻力之和。

式(7)可以用来计算一个工况内滚动阻力引起的燃油消耗占总的燃油消耗的比值。这一比值也可以通过测得的燃油消耗率来计算:

$$F_{cl} / F_c = F_{lr} / \varepsilon\eta H_0 F_c = C_R W_v / \varepsilon\eta H_0 F_c \quad (8)$$

式中, F_{cl} 为单位距离上轮胎消耗的燃油, C_R 为滚动阻力系数, W_v 为车辆所受重力。

轮胎滚动阻力变化时, 每行驶单位距离消耗的能量变化(ΔF_c)由下式给出:

$$\Delta F_c = \Delta F_{lr} / \varepsilon\eta H_0 = \Delta C_R W_v / \varepsilon\eta H_0 \quad (9)$$

由于发动机的热效率和传动效率都小于1, 该关系式表明, 滚动阻力降低会带来节省燃油能量的放大作用。

现在的发动机的热效率大致相当, 使用平均值0.408, ε 取0.90; 对于汽油, $H_0 = 32 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。根据式(9)可以算出, 滚动阻力系数每减小 $1 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 每吨车辆的汽油消耗率降低 $0.835 \text{ cm}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ ^[19]。

文献[20]对市售的五大品牌(米其林、普利司通、大陆、倍耐力和固特异)的常用规格轿车子午线轮胎进行了调研, 统计出不同滚动阻力级别的轮胎数量分布。

滚动阻力标签法级别A, B, C, E, F, G的轮胎数量分别为9, 176, 862, 1 466, 673, 114条。

由此可见, 目前常用规格的轿车子午线轮胎滚动阻力级别主要分布在C级、E级和F级。统计数据中, 五大品牌轮胎公司均有自己的B级滚动阻力

轮胎产品, 而A级的9条轮胎均为米其林的产品。

从欧盟标签法滚动阻力分级来看, E级轿车子午线轮胎的滚动阻力系数为 $9.1 \sim 10.5 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, A级轮胎的滚动阻力系数不大于 $6.5 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。从文献[21]给出的数据可知, 到2020年, 中国的汽车保有量将达到2.5亿~2.9亿辆, 其中乘用车保有量达到2.2亿~2.6亿辆, 商用车保有量达到0.33亿辆。如果所有乘用车轮胎的滚动阻力级别都从E级提高到A级, 滚动阻力系数降低35%, 按文献[6]提到的当轮胎的滚动阻力降低10%时, 轿车能有效节约2%的燃油计算, 乘用车可节省燃油7%。假设一辆乘用车使用E级轮胎时的百千米油耗为10 L, 如果换成滚动阻力系数为A级的轮胎, 则百千米油耗降低0.7 L, 到2020年的2.4亿辆乘用车行驶百千米就可节省1.68亿L汽油, 降低油耗非常可观。

3 结语

轮胎的滚动阻力性能对汽车的燃油经济性有直接的影响。本研究根据汽车能量流动分析方法, 建立轮胎滚动阻力与汽车燃油消耗之间的关系。通过降低轮胎滚动阻力减小油耗量是相当可观的, 特别是低速工况。建立轮胎滚动阻力与汽车燃油经济性之间的关系为节能轮胎技术的研究指明了方向。

参考文献:

- [1] 汪泽. 节能减排的重要选择发展绿色轮胎[J]. 汽车与配件, 2010(25): 35-37.
- [2] 陶志军, 恽海, 杨帆. 绿色轮胎节能减排效果与成本效益分析[J]. 汽车工业研究, 2012(12): 41-45.
- [3] 刘琦, 陈强, 杨建国. 轮胎滚动阻力对整车燃油经济性的影响[J]. 汽车零部件, 2011(8): 77-80.
- [4] 孙占先, 刘超, 孙向馨, 等. 汽车轮胎滚动阻力与燃油经济性的关系[J]. 公路与汽运, 2009(5): 20-22.
- [5] 伍江涛, 夏松茂. 汽车轮胎滚动阻力及其测试方法[J]. 中国橡胶, 2007, 23(21): 27-33.
- [6] 杨建勇. 欧盟轮胎标签法对中国合成橡胶工业的影响[J]. 石化技术, 2015(5): 27-28.
- [7] 苏梅, 冷传刚, 张宪忠. 汽车轮胎噪声及其欧洲认证标准[J]. 天津汽车, 2009(1): 43-46.
- [8] 李玲, 余翔, 杨小峰. 欧洲汽车轮胎滚动阻力及噪声测量方法[J]. 交通节能与环保, 2015(4): 27-31.
- [9] ECE Regulation No. 117—2011, Uniform Provisions Concerning the Approval of Tyre with Regard to Rolling Sound Emissions and to

- Adhesion on Wet Surfaces and/or to Rolling Resistance[S].
- [10] 李禾. 出口受阻 我国轮胎行业“路在何方”[N]. 科技日报, 2013-11-26 (12).
- [11] Anon. Michelin Tyre Labelling[EB/OL]. http://www.michelin.co.uk/tyres/car-tyres#type=type_1, 2013-09-02/2013-10-10.
- [12] Anon. Bridgestone Tyre Labelling[EB/OL]. <http://www.bridgestone.co.uk/auto/2013-09-02/2013-10-10>.
- [13] Samar Bandyopadhyay, Arup K C Handra, Khopadhyay R. An Overview of Tyre Rolling Loss[M]. India: R & D Center, J K Industries Ltd. 1992:20-53.
- [14] 陈琛. 滚动阻力及米其林绿色轮胎[J]. 轮胎之窗, 2009 (8): 73.
- [15] Schuring D J, Futamura S. Rolling Loss of Pneumatic Highway Tire in the Eighties[J]. Rubber Chemistry & Technology, 1990, 63 (3): 315-367.
- [16] National Research Council. Automotive Fuel Economy: How Far Should We Go? [M]. Washington, D. C. : National Academy Press, 1992:13-22.
- [17] An F, Ross M. A Model of Fuel Economy and Driving Patterns[Z]. Warrendale, PA: SAE International, 1993. SAE Paper 930328.
- [18] Adler U, Bauer H, Bazlen W, et al. Bosch Automotive Handbook[M]. 2nd Edition. Stuttgart: Robert Bosch GmbH, 1986: 360-365.
- [19] Gent A N, Walter J D. 轮胎理论与技术[M]. 危银涛, 李勇, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006: 360-364.
- [20] 杨永宝, 危银涛, 王昊, 等. 轮胎噪声和滚动阻力标签数据的综述及分析[J]. 轮胎工业, 2014, 34 (12): 707-715.
- [21] 郝瀚, 王贺武, 欧阳明高. 中国乘用车与商用车保有量预测[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51 (6): 868-872.

第19届中国轮胎技术研讨会论文

Correlation between Vehicle Fuel Economy and Tire Rolling Resistance

ZHANG Xinyue^{1,2}, YIN Ruijing^{1,2}, ZHOU Fuqiang¹, QIU Bin¹, WEI Yintao¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: Through sliding test and fuel consumption experiment at constant speed, the effect of rolling resistance of passenger car radial tires from different brands but with the same size on the fuel consumption was investigated. Motor energy flow analysis method was adopted to establish the relationship between rolling resistance and automobile fuel consumption, and then the factors influencing fuel economy were quantitatively analyzed and the energy saving potential of the tire was explored, which was of great significance to improve the fuel economy of the whole vehicle.

Key words: passenger car radial tire; rolling resistance; fuel economy; sliding test; fuel consumption experiment with constant speed; energy flow

普利司通在法国通过收购 扩展其零售足迹

中图分类号: U463.341 文献标志码: D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntiredealer.com)2017年1月18日报道:

普利司通欧洲公司在法国收购104家门店。

普利司通欧洲公司称, 已经与Ayme集团的股东们就收购该集团104个Côté Route销售网点进入了排他协议议程。普利司通称Ayme集团为“法国最大的独立轮胎专业厂商”。

协议能否成功签订取决于与社会合作伙伴的

信息交流与磋商, 以及竞争方的官方许可。

普利司通表示, 此次收购将助推其在零售方面成为“涉及所有业务部门的最值得信赖的轮胎与汽车服务供应商”。

该公司还表示, 此次收购将帮助公司更接近市场和更好地了解消费者, 这样可以持续提高其在市场中的地位。

通过与Ayme集团的收购案, 普利司通欧洲零售网点将超过900个, 由First Stop, Speedy 和Côté Route运作。

(马 晓摘译 吴秀兰校)