

# 国内外轮胎滚动阻力试验方法及影响因素分析

王 阳,张子鹏,朱其文,魏晓辰

(中国汽车技术研究中心,天津 300300)

**摘要:**介绍现行轮胎滚动阻力测试的主要方法,并进行了对比以及测试结果影响因素分析。与 GB/T 18861—2002 相比,ECE R117—2011 方法比较完善,要求较高,国内轮胎产品出口欧洲企业应提前做好准备;轮胎充气压力、试验速度、负荷和环境温度对轮胎滚动阻力测试均有影响,应精确控制测试条件。

**关键词:**轮胎;滚动阻力;测试;标准分析;影响因素

**中图分类号:**TQ336.1;TQ330.7 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2013)10-0628-06

随着全球化石燃料资源日趋紧张,节能已经逐渐成为汽车设计与制造的主流研究方向。在汽车行驶过程中,轮胎滚动阻力约占汽车总阻力的20%,每减少10%的轮胎滚动阻力,汽车可降低2%~3%燃油消耗,加强对轮胎滚动阻力水平的控制,对汽车燃油经济性贡献将会十分突出<sup>[1]</sup>。要降低轮胎滚动阻力,首先要有精确测定和计算轮胎滚动阻力的方法。

欧洲出台的 ECE R117 法规中明确提出了轮胎滚动阻力的试验方法,且从 2013 年开始强制实施,这对国内近两年蓬勃发展的轮胎产业是一个很大的挑战。

本工作对轮胎滚动阻力的国内外测试方法及标准法规进行对比分析,着重研究 GB/T 18861—2002《汽车轮胎滚动阻力试验方法》和 ECE R117—2011 方法,并研究各测试条件对轮胎滚动阻力测试结果的影响。

## 1 现行滚动阻力测试方法

滚动阻力的获取方法主要有数值计算和试验测试两种。数值计算方法由于不能进行完全热力学耦合分析,没有充分考虑轮胎材料各向异性的力学特性、热学特性和能量损失特性,计算值不是十分精确<sup>[2]</sup>,因此本文对试验测试方法进行着重分析。滚动阻力试验测试方法分为道路试验方法

和室内试验方法。

### 1.1 道路试验方法

道路试验方法分为滑行法、牵引法和功率法。道路试验能够真实地反映轮胎的滚动阻力情况,但是属于非稳态试验,道路温度、磨损状况及其他外部干扰容易对滚动阻力测试造成影响,重复性不高,因此不适用于标准和法规认证。

### 1.2 室内试验方法

室内试验是在试验机上进行的,它的试验条件虽然是模拟使用条件,但不受环境条件限制、试验周期短,由于试验条件可控,因此重复性好。室内测试方法分为间接测量法和直接测量法。

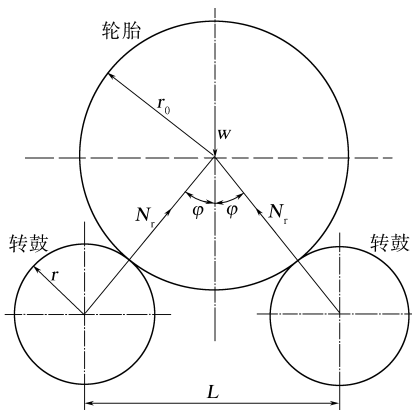
间接测量法是测定损耗因子( $\tan\delta$ ), $\tan\delta$ 虽然与轮胎滚动阻力成正比关系,但是无法通过 $\tan\delta$ 来定量滚动阻力。

直接测量法又分为双转鼓试验法和单转鼓试验法。双转鼓试验法通常分为反拖法和滑行法,双转鼓试验法如图 1 所示。双转鼓直径及转鼓之间的间距对轮胎滚动阻力的测量都有影响,只有在转鼓直径与被测轮胎直径之比大于 35% 时,转鼓大小对轮胎滚动阻力测试的影响才处于最低稳定值<sup>[3]</sup>。研究表明,双转鼓上测试的轮胎滚动阻力大于大直径单转鼓上的测定值,精确的轮胎滚动阻力试验宜在大直径单转鼓上进行<sup>[3-4]</sup>。

单转鼓试验法(如图 2 所示)由于测定值稳定且比较接近实际值,被国内外的大多法规标准采用为测试方法。

**基金项目:**中国汽车技术研究中心青年创新基金(12132315)

**作者简介:**王阳(1965—),男,天津人,中国汽车技术研究中心高级工程师,学士,主要从事汽车零部件检测工作。



$w$ —轮胎负荷;  $N_r$ —转鼓对轮胎的支承反力;  $\varphi$ —转鼓对轮胎支承反力与轮胎负荷方向的夹角;  $r$ —转鼓半径;  $r_0$ —轮胎半径;  $L$ —双转鼓中心距。

图 1 双转鼓试验法示意

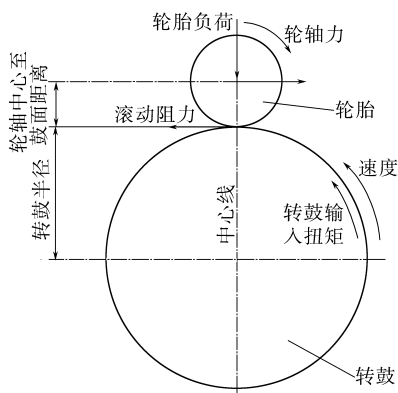


图 2 单转鼓试验法示意

单转鼓试验法又包括测力法、扭矩法、功率法和减速度法。单转鼓的直径各国际标准中的规定也不尽相同,主要有 1.7 和 2.0 m 两种规格,不同直径的转鼓测试出的滚动阻力值不同,但是有的标准也给出了不同直径测试结果之间的转化公式。

车辆在道路上行驶时滚动阻力仅占轮胎负荷的 1% 左右,这就要求在施加很大径向负荷的轮胎上测试非常小的力,因此滚动阻力测试极其困难,对设备也提出了非常高的要求。滚动阻力测试设备按照安装形式分为卧式和立式两种结构,目前国外可制作高精度轮胎滚动阻力设备的厂家主要有 ZF (ZF Services Co., Ltd), BIA 和 TS (Test Service Co., Ltd) 等,国内主要有天津久荣车轮技术有限公司,轮胎滚动阻力试验机如图 3 和 4 所示。



图 3 ZF 轮胎滚动阻力试验机



图 4 久荣轮胎滚动阻力试验机

## 2 国内外试验标准对比分析

欧盟轮胎标签指令 (EC) No 222/2009 (轮胎标识如图 5 所示) 中包含了对轮胎滚动阻力分级的规定,2013 年所有出口到欧洲的轮胎必须按照 ECE R117—2011 进行试验并通过标签法规定。

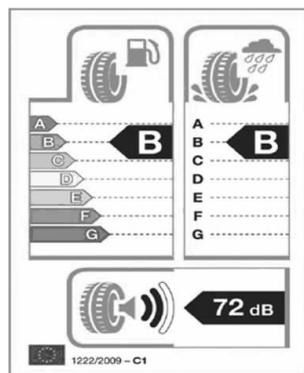


图 5 欧盟轮胎标签指令要求轮胎标识

现行的轮胎滚动阻力测试方法中比较有影响力的包括 SAEJ 1269—2006, ISO 28580—2009, ECE R117—2011 和 GB/T 18861—2002。4 种测试方法基本相同,但部分细节有所不同。

## 2.1 设备和环境要求

GB/T 18861—2002 与 ECE R117—2011 中对轮胎滚动阻力测试设备和环境的要求对比分析见表 1。

表 1 GB/T 18861—2002 与 ECE R117—2011 轮胎滚动阻力测试设备和环境要求对比

项 目	GB/T 18861—2002	ECE R117—2011	
负荷指数	所有	≤121	>121
转鼓外径/mm	1 700±17	≥1 700	
环境温度/℃	25(20~30)	25(20~30)	
传感器安装位置	胎侧 1 m 处	胎侧 0.15~1 m 处	
加载负荷方向			
测力法和减速度法	≤0.06°(1 mrad)	≤0.06°(1 mrad)	
扭矩法和功率法	≤0.29°(5 mrad)	≤0.29°(5 mrad)	
轮胎定位			
外倾角	≤0.11°(2 mrad)	≤0.11°(2 mrad)	
侧偏角	≤0.06°(1 mrad)	≤0.06°(1 mrad)	
控制精度			
试验充气压力/kPa	±3	±3	
试验负荷/N		±20 或 ±0.5%	±45 或 ±0.5%
试验速度/(km·h <sup>-1</sup> )			
测力法	±0.5	±0.5	±0.5
扭矩法、功率法和 减速度法	±0.2	±0.2	±0.2
时间/s	±0.02	±0.02	
角速度	±0.2%		
测量仪器精度			
试验充气压力/kPa	±1	±1	±1.5
试验负荷/N	±10	±10 或 ±0.5%	±30 或 ±0.5%
试验速度/(km·h <sup>-1</sup> )	±0.1	±0.1	
环境温度/℃	±0.2	±0.2	
时间/s	±0.01	±0.01	
角速度	±0.1%	±0.1%	
轮轴力/N	±0.5	±0.5 或 ±0.5%	±1.0 或 ±0.5%
转鼓输入扭矩/(N·m)	±0.5	±0.5 或 ±0.5%	±1.0 或 ±0.5%
电功率/W	±10	±10	±20
轴中心至鼓面距离/mm	±1	±1	
转鼓表面粗糙度/μm	≤6.3	≤6.3	

## 2.2 ECE R117—2011 与 GB/T 18861—2002 滚动阻力试验方法对比

### 2.2.1 转鼓直径

考虑到我国现有设备情况,缩小转鼓尺寸利于国内试验结果比较,GB/T 18861—2002 中要求转鼓直径为(1 700±17) mm,而 ECE R117—

2011 中规定转鼓直径不小于 1 700 mm,所测得的滚动阻力值都需通过如下公式转化为转鼓直径为 2 000 mm 的当量值<sup>[5]</sup>。

$$F_{r02} \approx KF_{r01} \quad (1)$$

$$\text{其中 } K = \sqrt{\frac{(R_1/R_2)(R_2 + R_r)}{R_1 + R_r}}$$

式中  $F_{r02}$ ——转鼓 2 上测得的滚动阻力,N;

$F_{r01}$ ——转鼓 1 上测得的滚动阻力,N;

$R_1$ ——转鼓 1 的半径,m;

$R_2$ ——转鼓 2 的半径,m;

$R_r$ ——试验轮胎的滚动半径,m。

由于该公式为近似值公式,且轮胎与轮毂接触面上力分布的改变并非简单几何形状的改变,还与轮胎各部件刚度等诸多因素有关<sup>[1]</sup>,因此转化之后的数值会与实际测试值有所差别。这也是认证对比试验需要解决的一个难题。

### 2.2.2 充气压力

ECE R117—2011 规定的载重轮胎测试充气压力与 GB/T 18861—2002 相同。对于轿车轮胎,ISO 4000-1:2010 中所列规格的标准轮胎充气压力为 210 kPa,增强型轮胎充气压力为 250 kPa;对于 ISO 4000-1:2010 中没有的非标轮胎,按照最大负荷对应充气压力减去 30 kPa 进行试验。

### 2.2.3 测试速度

ECE R117—2011 中对于轿车轮胎以及单胎负荷指数不大于 121,速度级别 N 及其以上的载重轮胎只有单速试验;GB/T 18861—2002 中有单速和多速试验,可任选其一或两者皆用,多速试验应按低速至高速顺序连续进行,扩大了试验范围。但是通过试验发现,在不同的试验速度下测得的轮胎滚动阻力也不相同,因此如果以后国内也要对轮胎滚动阻力进行限制,则可能需要在标准中给出针对此两种试验的两种判定标准,可能会造成不同轮胎的判定结果不相同。

### 2.2.4 试运行

ECE R117—2011 中未对试验前轮胎试运行进行规定,GB/T 18861—2002 中规定轿车和载重轮胎需要按标准进行试运行。

### 2.2.5 最短升温时间

为了保证对轮胎的测试是在标准温度下进行,需要在测试滚动阻力之前,对轮胎进行升温行

驶, ECE R117—2011 规定的最短升温时间(min) 如下: C1 轮胎(按照 ECE R30 定义的轮胎, 即轿车轮胎) 30; LI(单胎负荷指数)  $\leq 121$  的 C2[按照 ECE R54 定义的 LI  $\leq 121$ , SS(轮胎速度级别)  $\geq N$  的载重轮胎]和 C3 轮胎(按照 ECE R54 定义的除 C2 之外的其他载重轮胎) 50; LI  $> 121$  的 C3 轮胎 轮轴直径  $< 22.5$  150, 轮轴直径  $\geq 22.5$  180。ECE R117—2011 最短升温时间较 GB/T 18861—2002 中长, 且 ECE R117—2011 对于 LI  $> 121$  的载重轮胎按照直径进行了划分。

### 2.2.6 测试重复性要求

为了提高测试精度和准确性, ECE R117—2011 中提出很高的测试重复性要求, 这也是对国内第三方试验室及国内滚动阻力测试平台生产商很大的挑战。

ECE R117—2011 要求对同一个轮胎, 需要按照规定最少进行 3 次测试, 根据每次测试的滚动阻力系数, 计算出重复性精度( $\sigma_m$ ), 计算公式如下<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (C_{rj} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n C_{rj})^2} \quad (2)$$

式中  $n$ ——试验次数,  $n \geq 3$ ;

$C_r$ ——滚动阻力系数。

ECE R117—2011 对  $\sigma_m$  具体要求如下: C1 和 C2 轮胎  $\leq 0.075 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$ ; C3 轮胎  $\leq 0.06 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$ 。

如果设备不能满足上述要求, 为确保设备能够满足 ECE R117—2011 要求, 需要根据如下公式重新确定最少试验次数:

$$n = (\sigma_m/x)^2 \quad (3)$$

式中, 对于 C1 和 C2 轮胎,  $x$  取  $0.075 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$ ; 对于 C3 轮胎,  $x$  取  $0.06 \text{ N} \cdot \text{kN}^{-1}$ 。

如果对同一个轮胎连续测试多次, 在每次测试之前需要将轮胎及车轮总成从试验台上拆下, 重新进行安装。若安装过程少于 10 min, 则升温行驶时间按照 C1 轮胎 10 min, C2 轮胎 20 min, C3 轮胎 30 min 进行试验; 若安装过程多于 10 min, 按新轮胎测试执行。

通过对比可以发现, 由于 ECE R117—2011 制定较晚, 相对比较完善, 细节方面把握比较准确, 要

求严格, 对轮胎滚动阻力性能提出了较高要求。建议国内生产出口欧洲轮胎的企业, 提前进行滚动阻力的摸底试验, 以免对企业生产造成影响。

### 2.3 GB/T 18861—2002 滚动阻力试验方法分析

由于非稳态条件不可控, 因此各方法都是在稳态条件下进行测试, 即在恒定的负荷和速度下, 且在轮胎行驶达到热平衡时测试滚动阻力。

#### 2.3.1 滚动阻力计算

GB/T 18861—2002 中提供了 4 种轮胎滚动阻力测试方法。

(1) 测力法。测量轮轴上的反作用力。计算公式如下:

$$F_r = F_t(1 + r_L/R) \quad (4)$$

式中  $F_r$ ——试验轮胎的滚动阻力, N;

$F_t$ ——轮轴力的净值, N;

$r_L$ ——轮轴中心至鼓面的距离, m;

$R$ ——转鼓半径, m。

(2) 扭矩法。测量转鼓上的输入扭矩。计算公式如下:

$$F_r = T/R \quad (5)$$

式中,  $T$  为转鼓输入扭矩的净值,  $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

(3) 功率法。测量转鼓的输入功率。计算公式如下:

$$F_r = 3.6W/U_n \quad (6)$$

式中  $W$ ——转鼓输入功率的净值, W;

$U_n$ ——试验速度,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

(4) 减速度法。测量转鼓和轮胎轮辋组合体在惯性滑行时的减速度。计算公式如下:

$$F_r = I_D(\Delta\omega_V/\Delta t)/R + RI_T(\Delta\omega_V/\Delta t)/R_r^2 + M_{AP}/R_r - F_p \quad (7)$$

$$R_r = R(\Delta\omega_V/\Delta t)/(\Delta\omega_P/\Delta t) \quad (8)$$

式中  $I_D$ ——转鼓的转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;

$\Delta\omega_V/\Delta t$ ——转鼓角减速度,  $\text{r} \cdot \text{s}^{-2}$ ;

$I_T$ ——轮胎与轮辋组合体的转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;

$M_{AP}$ ——试验轮胎的空气阻力矩,  $\text{N} \cdot \text{m}$ ;

$F_p$ ——附加损失, N;

$\Delta\omega_P/\Delta t$ ——试验轮胎角减速度,  $\text{r} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

由于环境温度在  $20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内, 可应用以下公式修正为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下测得的轮胎滚动阻力:

$$F_{r,25} = F_r[1 + k(T_a - 25)] \quad (9)$$

式中  $F_{r25}$ ——25℃下的轮胎滚动阻力, N;  
 $T_a$ ——实际测试的环境温度, ℃;  
 $k$ ——轮胎滚动阻力的温度修正系数, 轿车轮胎和负荷指数不大于121的载重轮胎取0.01, 负荷指数大于121的载重轮胎取0.006。

滚动阻力系数按下式计算:

$$C_{r25} = F_{r25} / L_m \quad (10)$$

式中  $C_{r25}$ ——轮胎25℃时的滚动阻力系数,  $N \cdot kN^{-1}$ ;  
 $L_m$ ——轮胎试验负荷, kN。

### 2.3.2 试验条件

滚动阻力测试主要试验条件见表2。

表2 GB/T 18861—2002 滚动阻力测试主要试验条件

项 目	试验条件
环境温度	距轮胎侧面1 m处20~30℃
转鼓表面温度	外表面接近环境温度
试验充气压力	轿车轮胎为最大负荷对应充气压力减去30 kPa; 载重轮胎为最大单胎负荷对应充气压力
试验速度/(km·h <sup>-1</sup> )	
轿车轮胎	单速80或多速50, 90, 120
载重轮胎	
LI≤121	
SS≥N	单速80或多速50, 90, 120
SS≤M	单速80
LI>121	
K≤SS≤M	单速80
F≤SS≤J	单速60
试运行时间/h	
轿车轮胎及LI≤121的载重轮胎	≥1
LI>121的载重轮胎	≥2
冷却时间/h	
轿车轮胎及LI≤121的载重轮胎	≥3
LI>121的载重轮胎	≥6
升温时间/min	
轿车轮胎	
单速	30
多速	50, 90和120 km·h <sup>-1</sup> 下 分别为30, 20和20
载重轮胎	
LI≤121	
SS≥N	
单速	60
多速	50, 90和120 km·h <sup>-1</sup> 下 分别为60, 30和30
SS≤M	单速60
LI>121	单速90

### 3 轮胎滚动阻力测试影响因素分析

标准中规定的轮胎滚动阻力试验都是稳态试验, 在充气压力、速度、负荷和温度恒定的情况下进行, 各试验条件对滚动阻力测试结果都有影响。

#### 3.1 充气压力

任礼行等<sup>[6]</sup>采用3条195/60R14 86H轮胎, 在80 km·h<sup>-1</sup>的试验速度, 轮胎负荷为420 kg的常温状态下, 测得滚动阻力系数如图6所示。由图6可以看出, 随着充气压力的增大, 滚动阻力明显下降, 充气压力从150增大到300 kPa, 轮胎滚动阻力系数下降近20%。

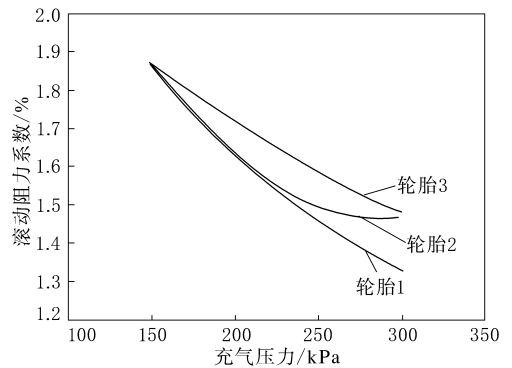


图6 滚动阻力系数与试验充气压力的关系曲线

#### 3.2 试验速度

在充气压力为220 kPa, 负荷为4 kN的情况下, 195/60R14 86H轮胎不同试验速度下的滚动阻力测试结果如图7所示<sup>[1]</sup>。由图7可以看出, 速度在100~140 km·h<sup>-1</sup>时, 轮胎滚动阻力随着速度的提高缓慢增大, 速度超过140 km·h<sup>-1</sup>, 滚动阻力随速度提高明显增大。

#### 3.3 负荷

195/65R15 91H轮胎滚动阻力随负荷的变

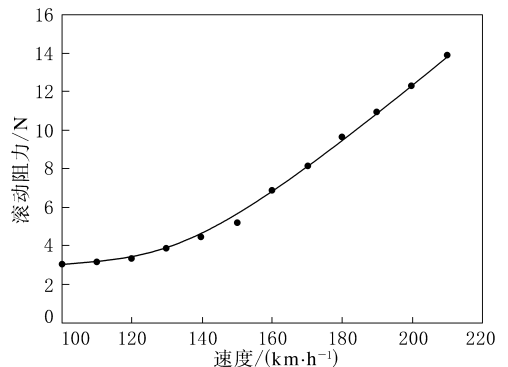


图7 滚动阻力与试验速度的关系曲线

化情况见表 3<sup>[7]</sup>。由表 3 可见,滚动阻力随负荷的增大而增大,试验结果在负荷率 50%~100% 内基本呈线性分布。

表 3 轮胎滚动阻力随负荷变化情况

项 目	负荷率/%		
	50	75	100
滚动阻力/N	33.22	48.89	63.91
滚动阻力系数/(N·kN <sup>-1</sup> )	11.01	10.81	10.60

### 3.4 温度

试验研究表明,随着温度的升高滚动阻力会有所下降,一般情况下,环境温度每升高 10℃,滚动阻力降低 5%~10%<sup>[1]</sup>,因此国际及国内试验标准都对环境温度提出了较高的控制要求。

## 4 结语

ECE R117—2011 法规由于制定时间较晚,方法相对完善,技术要求较高,国内轮胎生产企业及第三方实验室应做好摸底试验,为轮胎出口欧洲做准备。

鉴于轮胎滚动阻力测试的重要性,对测试环节中可能影响滚动阻力测试结果的轮胎充气压力、测试速度、负荷及环境温度要精确控制,以保证精确地测试轮胎滚动阻力。

### 参考文献:

- [1] 伍江涛,夏松茂. 汽车轮胎滚动阻力及其测试方法[J]. 科技资讯,2007,23(21):27-33.
- [2] 薛风先,王泽鹏,朱由锋. 轮胎滚动阻力(因数)测定和数值计算方法[J]. 橡胶工业,2006,53(3):174-178.
- [3] 张学利,何勇. 汽车动力性检测中的滚动阻力[J]. 公路交通科技,2000,17(5):93-95.
- [4] 高蔚,王建强,苏建. 双滚筒上轮胎滚动阻力模型[J]. 公路交通科技,2003,20(6):147-149.
- [5] ECE R117—2011, Uniform Provisions Concerning the Approval of Tyres with Regard to Rolling Sound Emissions and to Adhesion on Wet Surfaces and/or to Rolling Resistance[S].
- [6] 任礼行,刘青,张艾谦,等. 轮胎滚动阻力测量与分析[J]. 汽车工程,2000,22(5):316-319.
- [7] 李红伟,孙炳光. 轮胎滚动阻力测试分析[J]. 轮胎工业,2009,29(3):179-182.

收稿日期:2013-03-30

## 韩泰 eMembrane 概念轮胎获奖

中图分类号:TQ336.1;U463.341<sup>+</sup>.6 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com)2013年8月8日报道:

韩泰轮胎公司宣称,其与辛辛那提大学合作生产的 eMembrane 概念轮胎(见图 1)被授予 Red Dot Award 2013 概念设计奖。



图 1 eMembrane 概念轮胎

韩泰轮胎表示,eMembrane 概念轮胎是公司持续努力及投资于发展前瞻性轮胎设计和概念轮胎的一个硕果。eMembrane 概念轮胎具有环保和精湛的动态特征,显示出全新的创造性轮胎概

念和杰出的性能特点,反映了理想的未来驾驶环境。

获奖的 eMembrane 概念轮胎采用智能混合动力概念设计,是一款多用途轮胎,适用于对性能要求高以及一般城市驾驶;主要针对年轻驾驶者,即所谓的 Generation Y(年轻一代),以冒险、独特、倾向于休闲运动为特征。eMembrane 概念轮胎一个非常显著的特点是根据不同的驾驶条件,通过调整内部结构而改变轮胎轮廓。因此,eMembrane 概念轮胎具有环保和动态驾驶性能特征。

eMembrane 概念轮胎的胎面设计也有创新,如当高速行驶时,轮胎胎面中心扩展,通过增大接地面积以产生最大的地面摩擦,从而产生最大的抓着力以实现动态转弯和操纵性能;低速行驶时,胎面产生最小的接地面积和地面摩擦,从而通过减小滚动阻力而提高燃油效率。此外,为了使 eMembrane 概念轮胎驾驶模式变化更容易通过信号传递,一个 LED 系统安装在胎侧以提供操纵警示。

(赵 敏摘译 吴秀兰校)