DOI: 10.3901/JME.2015.08.125

提升轮胎抗滑水性能的仿生方法*

周海超 梁 晨 杨 建 王国林 薛开鑫
(江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 提高花纹沟排水能力是提升轮胎抗滑水性能的主要途径之一, 借鉴仿生学理念, 将凹坑形仿生非光滑结构引入花纹沟, 探索研究通过降低花纹沟流体阻力提高花纹沟排水能力的仿生方法。以轮胎接地区单个花纹沟作为研究对象, 在沟底布置凹坑形仿生非光滑结构, 运用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)和正交试验设计相结合的方法, 研究凹坑形仿生非光滑结构对壁面减阻率的影响规律, 确定最优参数组合; 为进一步提升凹坑形仿生非光滑结构的减阻率, 提出一种水滴形凹坑仿生结构, 并对其减阻特性进行分析, 得出其减阻效果优于圆形凹坑结构; 将最优的水滴形凹坑仿生结构布置于花纹沟底部, 分析其抗滑水性能。结果表明, 水滴形凹坑仿生结构能够减小水流阻力, 提高轮胎花纹沟排水量, 降低轮胎在水膜上行驶时所受到的胎面动水压力, 提升轮胎的抗滑水性能。

关键词: 凹坑形仿生结构; 正交试验; 数值分析; 轮胎抗滑水

中图分类号: U463

Bionic Method for Improving Tire Anti-hydroplaning Performance

ZHOU Haichao LIANG Chen YANG Jian WANG Guolin XUE Kaixin
(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: Enhancing the groove drainage ability is one of the main ways to improve the tire anti-hydroplaning performance. Inspired by the bionic theory, the pit bionic non-smooth structure is introduced into tire groove and bionic method for enhance groove drainage ability by reducing fluid resistance is explored. The single tire groove of contact area is extracted for analysis and the pit bionic non-smooth structure is arranged on the bottom of tire groove. The computational fluid dynamics(CFD) and orthogonal experimental design are used to study the influence of pit bionic non-smooth structure on wall drag reduction, and the optimal parameters combination is determined. To further enhance the drag reduction rate of pit bionic non-smooth structure, a water drop shaped pit boinic structure is proposed and its drag reduction characteristic is analyzed. The results show the drag reduction effect of the water drop shaped pit boinic structure is better than spherical pit structure. The optimal water drop shaped pit structure is arranged on the bottom of tire groove for anti-hydroplaning analysis. The results show that the water drop shaped pit boinic structure can reduce flow resistance and improve the groove drainage volume. Therefore, it can decrease the tread hydrodynamic pressure when driving on water film and raise the tire anti-hydroplaning performance.

Key words: pit bionic structure; orthogonal experiment; numerical analysis; tire anti-hydroplaning

0 前言

汽车在积水路面行驶时, 如果积水来不及从花纹沟排出, 路面与轮胎间产生的动水压力将使二者逐渐脱离接触, 严重威胁行车安全。因此, 提高轮胎的抗滑水性能至关重要。对此, 国内外学者对于轮胎抗滑水性能已经作了大量的研究, 并且已经取得了一些显著的成果^[1-4]。然而, 轮胎性能间矛盾的存在, 使得某一性能的提升是以牺牲其他性能为代

价的。WIES 等^[5]研究表明, 通过增加花纹沟体积提升 1% 的滑水速度, 会增加约 2.4% 的噪声、降低 0.6% 的操控性、增加 0.4% 的滚动阻力、降低 0.3% 的磨损和干抓地性能。可见, 传统的通过改变花纹沟体积提升轮胎抗滑水性能将会导致其他性能的降低。因此, 如何在不改变花纹沟体积的前提下提升轮胎抗滑水性能, 是值得深入研究的课题。

近年来仿生学的研究为提升轮胎的整体性能提供了有效途径^[6-8]。仿生非光滑结构作为仿生学的一个分支, 其灵感来源于生物经过大自然优胜劣汰之后, 形成的具有减黏降阻的特殊体表结构。20 世纪 80 年代 NASA 研究中心^[9-10]率先开展了鲨鱼皮表面结构的研究, 发现鲨鱼体表分布着顺流向的微沟

* 第 55 批中国博士后面上(2014M551509)、江苏大学高层次人才启动基金(1291120046)和江苏省 2013 年度普通高校研究生科研创新计划(CXLX13_676)资助项目。20140506 收到初稿, 20140822 收到修改稿

槽结构,这种结构减小了鲨鱼在水下高速游动时的阻力;黄缘真龙虱体表分布着微小的凹坑结构,这种结构减小了其在水下游动以及空气飞行中的阻力^[11];杨弘炜等^[12]通过研究中华鲟体表的特征,设计了一种菱形分布的凹坑结构,水洞试验最大获得了 22% 的减阻率;张成春等^[13]对具有凹坑形态的非光滑表面进行了风洞试验和数值模拟分析,结果表明该非光滑表面在亚、跨、超声速条件下均具有减阻效果,最大减阻率为 5% 左右。齐迎春等^[14]通过对针头进行凹槽形仿生设计,证明了凹槽结构的存在使得针头具有明显减阻效果,并对减阻机理进行分析。文献[15]对比分析了凹坑、凸包和 V 形非光滑结构对花纹沟槽内水流阻力的影响,并对减阻机理进行了分析。文献[16]探索了非光滑花纹壁面对轮胎滑水速度的影响,结果表明,在不改变花纹沟体积的前提下,仿生凹坑形和 V 形非光滑壁面是提升轮胎抗滑水性能的有效途径之一。

本文借鉴仿生非光滑结构减黏降阻的思想,通过在花纹沟底部布置凹坑形非光滑结构,在不改变花纹沟体积的前提下,研究凹坑结构对轮胎抗滑水性能的影响,为从结构设计入手提升轮胎抗滑水性能提供理论指导。

1 花纹沟底凹坑形非光滑结构模型

1.1 花纹沟模型

本文以 205/55R16 半钢子午线轮胎为研究对象,其标准载荷 4 000 N,标准气压 240 kPa。由于轮胎纵向花纹沟起主要排水作用,因此,本文以纵向花纹沟为研究对象,探索研究在不改变花纹沟体积的情况下,提升花纹沟排水能力的方法。为此,将具有减阻特性的凹坑形仿生非光滑结构引入花纹沟,在花纹沟底布置凹坑形非光滑结构,采用计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)方法分析凹坑形非光滑结构尺寸及分布对滑水速度的影响。为充分反映滚动轮胎接地区花纹沟及胎肩轮廓的变形特征,在进行轮胎滑水 CFD 分析前,以文献[16]的轮胎有限元分析为基础,在 Abaqus 中采用移动路面的方式实现轮胎滚动状态的有限元分析,提取接地区变形后的轮胎轮廓形状,以接地变形后的单个纵向花纹沟作为 CFD 分析对象,如图 1 和图 2 所示。

1.2 凹坑形非光滑结构模型

假设凹坑形非光滑结构为一个规则球体与平面相交所得深度为 h 的球冠,图 3 示出了其断面图,其中 d 为与平面相交所形成的凹坑顶部圆直径。花

图 1 稳态滚动分析

图 2 提取后的接地几何外形

图 3 凹坑对称面断面图

纹沟底布置矩形分布的凹坑形非光滑结构如图 4 所示,为了避免入口效应以及分析凹坑对下游流场的影响,将凹坑布置在花纹沟模型中部区域。

图 4 中, L 为 x 方向相邻凹坑对应的圆心间距离, W 为 y 方向相邻凹坑对应的圆心间距离, a 为 x 方向模型长度, b 为 y 方向模型宽度, L_x 、 L'_x 、 L_y 、 L'_y 的定义如图 4 所示,设置凹坑形非光滑结构沿 y 方向为对称分布,则 $L_y = L'_y$ 。根据流体边界层理论,边界层厚度估算公式为 $\delta = 0.37xRe_x^{-1/5}$, x 为流向位移, Re_x 为 x 处对应的雷诺数。由此可以估算出边界层厚度约为 0.9 mm,因此凹坑的尺寸大小必须在此范围内,为了使非光滑结构起到影响边界层内部结构的作用,尺寸不宜太接近边界层的厚度^[17]。

图 4 凹坑分布模型

1.3 网格划分及求解设置

依据该型号轮胎纵向花纹沟尺寸,设定的沟底

模型尺寸: x (顺流向) $\times y$ (展向) $=30\text{ mm}\times 7.5\text{ mm}$, 沟槽高度为 8 mm 。划分网格时采用六面体网格和四面体网格相结合的方法, 靠近壁面的区域进行网格的细化, 图 5 为模型网格划分及局部放大图。边界条件采用速度入口, 压力出口, 运用 SIMPLEC 算法, 切应力输运(Shear stress transport, SST) $k-\varepsilon$ 湍流模型及二阶迎风格式进行离散求解。

图 5 模型网格划分及局部放大图

2 正交试验设计

为了探索凹坑结构及分布形式对减阻效果的影响, 利用正交试验设计的方法安排仿真试验。为此, 试验指标取减阻率 R , 其计算公式为

$$R = \frac{C_y - C_n}{C_y} \times 100\% \quad (1)$$

式中, C_y 、 C_n 分别为原始模型和凹坑非光滑模型的壁面阻力系数, $C_y = \frac{F_y}{1/2\rho v^2 S}$, $C_n = \frac{F_n}{1/2\rho v^2 S}$; F_y 和 F_n 为原始模型和凹坑非光滑模型表面的流动阻力; ρ 为流体密度; v 为来流速度; S 为垂直于来流方向的投影面积。减阻率大于 0, 表明凹坑非光滑模型具有减阻效果, 反之, 减阻率小于 0, 表明凹坑非光滑模型不具有减阻效果, 并且绝对值越大表明减阻或增阻效果越明显。

选用 $L_{16}(4^5)$ 正交表安排试验, 表 1 为正交试验因素水平表, 其中 A 、 B 、 C 、 D 、 E 分别表示凹坑顶部圆直径 $d(\text{mm})$ 、凹坑深度 $h(\text{mm})$ 、顺流向凹坑间距 $L(\text{mm})$ 、展向凹坑间距 $W(\text{mm})$ 和水流速度 $v(\text{km/h})$, 每个因素为 4 个水平。正交试验结果如表 2 所示。

表 1 正交试验因素水平表

水平	因素				
	A	B	C	D	E
1	0.3	$1/2d$	$1.5d$	1.0	70
2	0.4	$1/4d$	$2.0d$	1.5	80
3	0.5	$1/6d$	$2.5d$	2.0	90
4	0.6	$1/8d$	$3.0d$	2.5	100

表 2 正交试验结果表

试验号	因素					流动阻力 $F_n/\times 10^{-3}\text{N}$	流动阻力 $F_y/\times 10^{-3}\text{N}$	减阻率 $R(\%)$
	A	B	C	D	E			
1	1	1	1	1	1	231.35	231.96	0.26
2	1	2	2	2	2	289.05	291.45	0.82
3	1	3	3	3	3	348.69	358.76	2.81
4	1	4	4	4	4	416.86	429.83	3.02
5	2	1	2	3	4	439.43	429.83	-2.23
6	2	2	1	4	3	374.62	358.76	-4.42
7	2	3	4	1	2	282.72	291.45	3.00
8	2	4	3	2	1	221.51	231.96	4.51
9	3	1	3	4	2	300.38	291.45	-3.06
10	3	2	4	3	1	229.59	231.96	1.02
11	3	3	1	2	4	439.56	429.83	-2.26
12	3	4	2	1	3	352.93	358.76	1.63
13	4	1	4	2	3	376.23	358.76	-4.87
14	4	2	3	1	4	452.79	429.83	-5.34
15	4	3	2	4	1	228.67	231.96	1.42
16	4	4	1	3	2	288.06	291.45	1.16

3 结果分析

3.1 极差分析

根据表 2 的试验结果, 建立极差分析表 3, 表中 $\bar{T}_{1j}$ 、 $\bar{T}_{2j}$ 、 $\bar{T}_{3j}$ 、 $\bar{T}_{4j}$ 分别是第 j 列中不同水平所对应的试验结果的平均值, R_j 表示极差, 通过 R_j 的大小可以判断各因素对凹坑表面减阻效果影响的主次顺序。由表 3 可知, $R_B > R_A > R_E > R_C > R_D$, 即 5 个因素对凹坑表面减阻效果的影响主次因素为 $B > A > E > C > D$ 。此外, 通过比较 $\bar{T}_{ij}$ ($1 \leq i \leq 4$) 的大小, 可以确定各因素的优水平, 从表 3 中可以看出, B_4 、 A_1 、 E_1 、 C_4 、 D_3 分别为各因素的优水平, 即凹坑顶部圆直径 0.3 mm , 凹坑深度为 $1/8d$, 顺流向凹坑间距为 $3d$, 展向凹坑间距为 2 mm 时在各来流速度下减阻效果最优。

表 3 试验结果极差分析表

项目	因素				
	A	B	C	D	E
$\bar{T}_{1j}$	1.73	-2.48	-1.32	-0.11	1.80
$\bar{T}_{2j}$	0.22	-1.98	0.41	-0.45	0.48
$\bar{T}_{3j}$	-0.67	1.24	-0.27	0.69	-1.21
$\bar{T}_{4j}$	-1.91	2.58	0.54	-0.76	-1.70
R_j	3.64	5.06	1.86	1.45	3.50

3.2 凹坑结构减阻机理分析

流体流过物体表面时会产生流动阻力, 方向与流动方向相反。流动阻力包括压差阻力(形状阻力)

和黏性阻力(摩擦阻力),压差阻力是垂直作用于物体表面的力在来流方向上的投影之和,因为其阻力与形状密切相关,又称形状阻力;而黏性阻力是指由于黏性作用而产生的壁面切应力在来流方向上的投影之和。

选取上述优选参数组合建立模型并进行 70 km/h、80 km/h、90 km/h、100 km/h 来流速度下的表面阻力分析,分析其减阻的原因。各来流速度下的凹坑非光滑模型表面压差阻力 F_p ,凹坑非光滑模型表面黏性阻力 F_f ,凹坑非光滑模型表面流动阻力 F_n ,原始模型表面流动阻力 F_y 以及减阻率 R 见表 4。从表 4 中可以看出,凹坑非光滑模型相对于原始模型虽然增加了一定的压差阻力,但同时明显降低了占阻力绝大部分的黏性阻力。在 80 km/h,凹坑非光滑模型表面相对于原始模型表面虽然增加了 1.32% 的压差阻力,但降低了 5.25% 的黏性阻力,总阻力相比原始模型降低了 3.93%。此外,正交表中有的试验出现增阻现象,这是因为压差阻力的增加量超过黏性摩擦阻力的减小量,导致总阻力大于原始模型的总阻力。

表 4 不同速度下阻力及减阻率

速度/ (km/h)	压差阻力 $F_p/\times 10^{-3}\text{N}$	黏性阻力 $F_f/\times 10^{-3}\text{N}$	流动阻力 $F_n/\times 10^{-3}\text{N}$	流动阻力 $F_y/\times 10^{-3}\text{N}$	减阻率 $R(\%)$
70	2.79	218.29	221.08	231.96	4.69
80	3.88	276.12	280.00	291.45	3.93
90	5.17	341.29	346.46	358.76	3.43
100	6.68	410.08	416.76	429.83	3.04

图 6 是优选参数组合的凹坑非光滑模型在 90 km/h 来流速度下凹坑内部的速度矢量图。从图 6 中可以看出,凹坑内部存在着低速旋转流体,当水流流过凹坑表面时不是沿着凹坑内部流过而是从凹坑上面流过。凹坑底部水流的流动方向与来流方向相反,上部的水流方向与来流方向相同,形成了类似“滚动轴承”一样的涡,使流体与壁面的滑动接触变成流体与流体的滚动接触,因此流体直接在涡上流动,不与壁面接触,减小了摩擦阻力。凹坑底部的低速流体的摩擦阻力方向与来流方向相同,这也对流体产生一种附加的推动效应,最终使得壁面整体的摩擦阻力得到了降低。

图 6 凹坑内部速度矢量图

4 水滴形凹坑

4.1 水滴形凹坑阻力

从前面分析可知,凹坑形结构减阻的原因是增加了一部分的压差阻力,但是降低了更多的黏性摩擦阻力,使得总阻力得到了降低。借鉴水滴形(流线型)物体能够降低压差阻力的思想,将圆形凹坑改成水滴形凹坑,其压差阻力必定会进一步降低。如图 7 所示为水滴形凹坑的对称面断面图,水滴形凹坑就相当于圆形凹坑的最低点往前拉伸 t 的水平距离,根据实际水滴形的形状,取 $t=1/4d$ 。将前面正交试验优选出的圆形凹坑改为水滴形凹坑,如表 5 所示是水滴形凹坑在不同来流速度下的阻力及减阻率,对比表 4,水滴形凹坑使压差阻力得到进一步降低,并且使黏性阻力也得到了部分降低。

图 7 水滴形凹坑对称面断面图

表 5 水滴形凹坑不同速度下阻力及减阻率

速度/ (km/h)	压差阻力 $F_p/\times 10^{-3}\text{N}$	黏性阻力 $F_f/\times 10^{-3}\text{N}$	流动阻力 $F_n/\times 10^{-3}\text{N}$	流动阻力 $F_y/\times 10^{-3}\text{N}$	减阻率 $R(\%)$
70	1.92	216.89	218.81	231.96	5.67
80	2.84	274.53	277.37	291.45	4.83
90	4.07	339.55	343.62	358.76	4.22
100	5.41	408.21	413.62	429.83	3.77

4.2 水滴形凹坑压力系数

图 8 为圆形凹坑和水滴形凹坑沿流向过凹坑中心对称平面的压力系数云图,其中,压力系数计算公式为

$$C_p = \frac{F_p}{0.5\rho v^2 S} \quad (2)$$

从图 8 中可以看出,凹坑区域的压力系数明显高于凹坑前后的压力系数,形成一个个逆压区,而凹坑区域压力系数突然的升高直接导致了压差阻力的产生。图 9 为圆形凹坑表面和水滴形凹坑表面沿流动方向中部区域 $x=15.2\sim 16.0\text{ mm}$ 区域的表面压力系数分布图,从图 9 中可以看出,在 $x=15.20\sim 15.45\text{ mm}$ 区域压力系数缓慢降低,此时来流有离开壁面产生分离的趋势,压力系数逐渐降低,在凹坑前缘处($x=15.45\text{ mm}$)达到最小值;随后在凹坑区域,由于凹坑后缘的阻碍作用,压力系数急剧升高并导

致压差阻力的产生，接着压力系数便逐步降低。相对于圆形的凹坑结构，水滴形凹坑的迎流面更为平缓，对水流的阻碍作用更小，所以水滴形凹坑的最大压力系数比圆形凹坑的小。此外，水滴形凹坑前后的最小压力系数也略大于圆形凹坑的最小压力系数，压力系数的变化没有圆形凹坑剧烈，因此，产生的压差阻力较小，最终使得水滴形凹坑的表面压差阻力明显小于圆形凹坑表面的压差阻力。

图 8 中心对称面压力系数云图

图 9 沿流向压力系数变化图

5 轮胎滑水分析

将水滴形凹坑非光滑模型布置于轮胎花纹沟底部，进行轮胎滑水的 CFD 分析，并且与原始模型进行对比。考虑模型的对称性，采用轮胎接地区一半区域作为滑水分析对象。图 10 为布置有水滴形凹坑结构的滑水模型网格，模型中采用结构网格和非结构网格结合的方法进行网格划分，分析采用的湍流模型，边界条件设置同单个花纹沟分析。

图 10 滑水计算域网格划分

轮胎花纹沟排水能力对轮胎抗滑水性能有着重要的影响，花纹沟排水能力越强，轮胎的抗滑水

性能就越好。表 6 为原始模型和水滴形凹坑非光滑模型在各来流速度下出口单位面积的质量流量，从表中可以看出，由于水滴形凹坑具有降低水流阻力的作用，出口流量相比原始模型在各来流速度下都得到了提高。表 7 为原始模型和水滴形凹坑非光滑模型在 70 km/h、80 km/h、90 km/h、100 km/h 来流速度下的胎面动水压力。

表 6 不同速度下出口流量对比

项目	速度/(km/h)			
	70	80	90	100
原始模型质量流量/[kg/(m ² ·s)]	19 365.4	22 160.3	24 893.6	27 749.9
水滴形凹坑非光滑模型质量流量/[kg/(m ² ·s)]	19 598.7	22 428.4	25 207.3	28 077.5
变化量(%)	1.04	1.13	1.16	1.09

表 7 不同速度下胎面动水压力对比 kPa

模型	速度/(km/h)			
	70	80	90	100
原始模型	145.33	190.2	241.68	302.29
水滴形凹坑非光滑模型	140.86	184.38	233.74	292.46

在轮胎滑水产生过程中，可以利用动水压力评价轮胎滑水性能，HORNE 等^[18]提出作用于胎面动水压力大于轮胎充气压力时，轮胎滑水现象产生。分别再次计算 30 km/h 和 50 km/h 下原始模型和水滴形凹坑非光滑模型的动水压力(图 11、12)，结合表 7 中的预测值，通过曲线拟合分别可得到原始模型 y_1 和水滴形凹坑非光滑模型 y_2 的动水压力随速度的数学关系式

图 11 原始模型胎面动水压力随速度变化曲线

图 12 水滴形凹坑非光滑模型胎面动水压力随速度变化曲线

$$y_1 = 0.0314v^2 - 0.1368v + 0.4554 \quad (3)$$

$$y_2 = 0.0305v^2 - 0.1417v + 0.2961 \quad (4)$$

由 y_1 和 y_2 可以看出出水压力与轮胎行驶速度的平方成正比,因此 CFD 滑水模型中水流动压力与水流动速度的关系满足计算流体力学中的 $p=1/2\rho v^2$ 的基本理论,在一定程度上反映了本文所建立模型的有效性。将充气压力 240 kPa 代入 y_1 和 y_2 中,得到原始模型滑水速度为 89.58 km/h,水滴形凹坑非光滑模型滑水速度为 91.02 km/h,因此,水滴形凹坑非光滑模型提升了约 1.44 km/h 的滑水速度,即提高了轮胎的抗滑水性能。

6 结 论

(1) 凹坑形非光滑结构具有降低流体阻力的作用,凹坑形结构虽然增加了一定的压差阻力,但是降低了较大部分的黏性阻力。凹坑形非光滑结构内部存在着像“滚动轴承”一样的涡,水流在流过凹坑时,流体直接在涡上流动而不与壁面接触,因而减小了摩擦阻力,最终使得表面总阻力得到了降低。

(2) 水滴形凹坑相比圆形凹坑,由于迎流面更平缓,凹坑前后压力系数变化没有圆形凹坑剧烈,产生的压差阻力更小,因而能够进一步降低水流通过的阻力。

(3) 将水滴形凹坑结构布置在轮胎花纹沟底部,能够降低轮胎在水膜上行驶时胎面所受到的动水压力,增加花纹沟排水量,提升轮胎滑水速度,即提高了轮胎的抗滑水性能。

参 考 文 献

- [1] OKANO T, KOISHI M. A new computational procedure to predict transient hydroplaning performance of a tire[J]. *Tire Science and Technology*, 2001, 29(1): 2-22.
- [2] OMG G P, FWA T F. Transverse pavement grooving against hydroplaning. I: Simulation model[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2006, 132(6): 441-448.
- [3] 季天剑,黄晓明,刘清泉. 部分滑水对路面附着系数的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2003, 3(4): 10-12.
JI Tianjian, HUANG Xiaoming, LIU Qingquan. Influence of part hydroplaning on road adhesion coefficient[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2003, 3(4): 10-12.
- [4] 李少波,张宏超,孙立军. 动水压力的形成与模拟测量[J]. *同济大学学报*, 2007(7): 915-918.
LI Shaobo, ZHANG Hongchao, SUN Lijun. Development and simulation measurement of dynamic hydraulic pressure[J]. *Journal of Tongji University*, 2007(7): 915-918.
- [5] WIES B, ROEGER B, MUNDL R. Influence of pattern void on hydroplaning and related target conflicts[J]. *Tire Science and Technology*, 2009, 37(3): 187-206.
- [6] 李杰,庄继德,魏东,等. 沙漠仿生轮胎与普通轮胎牵引性能的对比试验[J]. *吉林大学学报*, 2006, 36(4): 510-513.
LI Jie, ZHUANG Jide, WEI Dong, et al. Comparative traction performance tests between bionic camel foot tire and common tire[J]. *Journal of Jilin University*, 2006, 36(4): 510-513.
- [7] 王国林,马银伟,梁晨,等. 仿蝗虫脚掌的子午线轮胎胎冠结构设计[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(12): 131-135.
WANG Guolin, MA Yinwei, LIANG Chen, et al. Locust's pads bionic structural design of radial tire crown[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(12): 131-135.
- [8] 周利坤,王洪伟. 仿章鱼吸盘式轮胎花纹设计与有限元分析[J]. *西安理工大学学报*, 2013, 29(2): 228-232.
ZHOU Likun, WANG Hongwei. Imitation octopus sucker-type tire tread pattern design and finite element analysis[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2013, 29(2): 228-232.
- [9] BECHERT D W, HOPPE G, REIF W E. On the drag reduction of the shark skin[C]//AIAA Shear Flow Control Conf., 12-14, 1985 March, Boulder, CO. AIAA-85-0564.
- [10] WALSH M J. Optiminization and application of riblets for turbulent drag reduction[C/CD]//Aeros. Scien. Meeting, January 1984.
- [11] 周长海,任露泉,张锐,等. 黄缘真龙虱体表结构与其水中减阻功能的关系[J]. *东北师大学报*, 2006, 38(2): 109-113.
ZHOU Changhai, REN Luquan, ZHANG Rui, et al. The relationship between cybister bengalensis' surface structure and its drag reduction function in water[J]. *Journal of Northeast Normal University*, 2006, 38(2): 109-113.
- [12] 杨弘炜,高歌. 一种新型边界层控制技术应用于湍流减阻的实验研究[J]. *航空学报*, 1997, 18(4): 455-457.
YANG Hongwei, GAO Ge. Experimental study for turbulent drag reduction using a novel boundary control technique[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997, 18(4): 455-457.