

文章编号: 1006-4710(2013)02-0228-05

仿章鱼吸盘式轮胎花纹设计与有限元分析

周利坤, 王洪伟

(武警后勤学院 军交运输系, 天津 300162)

摘要: 针对传统防滑链的固有缺陷, 由章鱼吸盘受启发, 运用仿生学原理和真空吸附原理, 结合冰面防滑实际, 初步构建了基于矩形布局规律的以圆锥型吸盘为仿生单元体的仿生随机轮胎布局模型, 并运用 Pro/E 软件设计出仿生轮胎三维实体模型。最后, 利用 ANSYS 软件对仿生轮胎实体模型进行有限元分析与仿真, 从微观角度对吸盘式花纹进行了力学分析及有效吸附性能验证。仿真结果表明, 吸盘式花纹的结构设计比较合理, 抗拉、压等性能明显得到提高, 且可以与冰面发生有效吸附, 能确保轮胎的吸附防滑性能。

关键词: 仿生学; 章鱼吸盘; 轮胎花纹; 设计; 有限元分析

中图分类号: TH128 **文献标志码:** A

Imitation Octopus Sucker-Type Tire Tread Pattern Design and Finite Element Analysis

ZHOU Likun, WANG Hongwei

(Military Traffic & Transportation Department, Armed Police Logistics Institute, Tianjin 300162, China)

Abstract: In view of the inherent defects of traditional anti-skid chain, inspired by octopus suckers, with bionics principle and vacuum adsorption theory and combined with the ice surface anti-skid facts, a preliminary bionics random tire distribution model is founded based on rectangular layout rule with conical-shaped sucker for bionic unit and the bionic tire 3D solid model is designed by using Pro/E software. Finally, ANSYS software is used to carry out the finite element analysis and simulation of the bionic tire entity model; also, mechanical analysis and effective adsorption performance verification are made of the sucker type pattern as viewed from the micro-angle. The simulation results indicate that the thread structural design of the sucker type pattern is rather rational, and such performances as tension-resistance and compression-resistance are greatly improved so that the bionic tire can effectively adsorb the ice surface and the tire adsorption and anti-skid performances can be guaranteed.

Key words: bionics; octopus sucker; tire tread; design; finite element analysis

汽车冬季防滑是世界范围研究的热点和难点问题^[1]。目前, 传统的防滑装备主要是采用增大轮胎与路面摩擦阻力的原理来达到防滑效果, 在实际中存在防滑效果不够理想、行驶噪声大、对路面和轮胎均有损坏、影响汽车行驶速度等诸多问题^[2]。

仿生轮胎的设计一直以来是解决汽车防滑技术的重要手段。1999年, 我国正式将仿生轮胎的研制列为高技术产业化项目, 使之成为首批国家级技术创新项目。仿生轮胎主要采用独创的主动破坏水膜、定向自转减振、弹性链式抓接三大技术^[3]以提

高汽车的安全行驶性能。

AMC 垫型轮胎^[4]模仿猫奔跑中的前爪垫、蜘蛛网的柔顺结构及其稳定性设计, 有效提高了轮胎的抓地性能和运行精度, 增加了与路面的摩擦力, 缩短了制动距离。六角形花纹轮胎^[5]模仿青蛙设计, 提高了雪地行车和湿地制动的安全性。Conti Premium Contact 仿生轮胎^[6]的胎面模仿豹子的爪印变化(奔跑中爪印较小, 止跑时爪印增大 1/3)设计, 使汽车行驶时, 胎面与路面接触面积较小, 制动时, 与路面接触面积增大, 可极大缩短制动距离, 提高行驶稳

收稿日期: 2012-11-22

基金项目: 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(102-00X903)。

作者简介: 周利坤, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为机械设计及理论。E-mail: zhoulikun89@sohu.com。

定性。

本文针对传统防滑链的固有缺陷和冬季冰面防滑的实际工作条件,由章鱼吸盘受启发,通过分析章鱼吸盘结构、排布特征及吸附机理,提取出章鱼吸盘的生物信息,结合仿生学原理,设计一种通过吸盘吸力来实现冰面防滑的仿生轮胎花纹实体模型。

1 仿章鱼吸盘式轮胎模型的建立

1.1 仿生轮胎布局模型设计

大量研究表明^[7],真空吸盘类似章鱼吸盘,其真空吸附原理类似章鱼吸盘的吸附机理。针对提取的章鱼生物信息,运用仿生学原理和真空吸附原理,结合冰面防滑实际,初步构建三种仿生凹形漏斗吸盘结构模型,即圆锥型吸盘、圆台型吸盘、球缺型吸盘。

结合章鱼吸盘平行或并列规则布局的特点,建立基于仿生单元体的矩形布局或者菱形布局规律的仿随机轮胎布局模型。矩形布局和菱形布局分别如图1、图2所示。

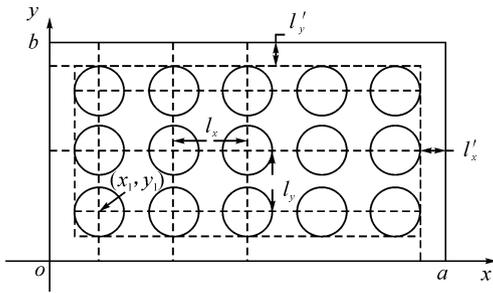


图1 吸盘矩形布局图
Fig. 1 Sucker rectangle layout

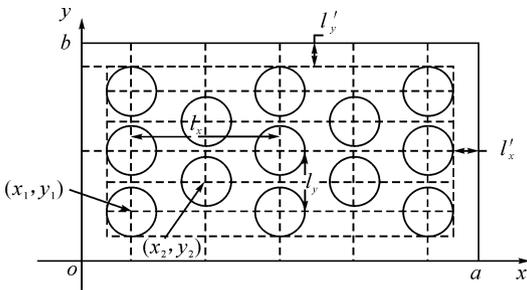


图2 吸盘菱形布局图
Fig. 2 Sucker diamond layout

本文初步选择基于矩形布局规律,以圆锥型吸盘为仿生单元体的仿随机轮胎布局模型作为研究对象。根据轿车轮胎195/60 R14的胎面尺寸,利用六种不同直径的仿生吸盘设计了一种仿章鱼吸盘式仿随机轮胎布局模型。

假设 r 、 h 分别代表吸盘的半径和高度; (x_1, y_1) 为最靠近坐标原点的吸盘中心点坐标;轮胎展平后

矩形的宽度为 b ,长度为 a ;相邻吸盘中心点沿 x 方向和 y 方向的距离分别为 l_x 、 l_y ;第一点坐标在矩形胎面边沿留一段平面边界区域,设边界的长度为 l'_x ,宽度为 l'_y ;基于矩形分布的随机布局中心点坐标为 (k_x, k_y) 。则其具体布局模型为:

$$\begin{cases} z = \frac{r}{h} \sqrt{(x - x_1 - k_x l_x)^2 + (y - y_1 - k_y l_y)^2}, x \in D_1 \\ z = h, x \notin D_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$D_1 =$$

$$\{(x, y) | (x - x_1 - k_x l_x)^2 + (y - y_1 - k_y l_y)^2 \leq r^2\}$$

第一点坐标为:

$$(x_1, y_1) = \left(\frac{a}{2} - \left\lfloor \frac{a - 2l'_x - 2r}{2l_x} \right\rfloor l_x, \frac{b}{2} - \left\lfloor \frac{b - 2l'_y - 2r}{2l_y} \right\rfloor l_y \right) \quad (2)$$

任意点坐标为

$$(x, y) = (x_1 + k_x l_x, y_1 + k_y l_y) \quad (3)$$

$$(k_x, k_y) = \text{rand} \left(\left[0, \left\lfloor \frac{a - 2l'_x - 2r}{l_x} \right\rfloor \right], \left[0, \left\lfloor \frac{b - 2l'_y - 2r}{l_y} \right\rfloor \right] \right) \quad (4)$$

$$a - 2l'_x - 2r \geq l_x \geq 2r > 0$$

$$b - 2l'_y - 2r \geq l_y \geq 2r > 0$$

横、纵向吸盘个数的计算公式为:

$$n_x = 2 \left\lfloor \frac{a - 2l'_x - 2r}{l_x} \right\rfloor + 1 \quad (5)$$

$$n_y = 2 \left\lfloor \frac{b - 2l'_y - 2r}{l_y} \right\rfloor + 1 \quad (6)$$

式中, a 、 b 、 l_x 、 l_y 、 l'_x 、 l'_y 的定义与模型中相同; n_x 、 n_y 分别为 x 轴及 y 轴方向上吸盘的个数。

轮胎外直径的求解公式^[8]:

$$D = 25.4d + l + 2\gamma \quad (7)$$

式中, D 为外直径, d 为轮毂直径, l 为胎宽, γ 为扁平比。

具体布局设计为:求出第一点坐标 (x_1, y_1) ,代入式(3)及式(4),即可求出任意点坐标 (x, y) 。根据式(7),求得该轮胎的外直径 $D = 589.6$ mm,周长 $L = 1851.3$ mm,取近似值 $a = 1850$ mm, $b = 156$ mm(b 为普桑3000空载静止于光滑水平路面上的纵向接地宽度)。

1.2 排列布局的具体方法及参数设定

吸盘尺寸的选取原则应遵照以下几点:

1) 必须符合章鱼吸盘中间尺寸大、边缘尺寸小

的仿生原则;

2) 吸盘之间直径大小差别不能太大,有利于汽车在运行中波动不大,稳定性好;

3) 在轮胎与路面接触面有限范围内,尽可能多地布设吸盘,使吸盘的有效吸附面积尽可能达到最大化,从而使吸盘的有效防滑作用达到最大。

结合以上选取原则,本文在吸盘直径的初步选取中参照了生活中大小不一的实物吸盘,并对它们吸力大小进行了力学实验,综合比较分析后,得出了以下四种直径的吸盘,即: $\phi_2 = 30 \text{ mm}$, $\phi_4 = 20 \text{ mm}$, $\phi_5 = 10 \text{ mm}$, $\phi_6 = 7 \text{ mm}$ 。分四部分布局,第一部分为 $\phi_2 = 30 \text{ mm}$ 的吸盘;第二部分为 $\phi_4 = 20 \text{ mm}$ 的吸盘;第三部分为 $\phi_5 = 10 \text{ mm}$ 的吸盘;第四部分为 $\phi_5 = 10 \text{ mm}$ 和 $\phi_6 = 7 \text{ mm}$ 的吸盘单元组,即把一个直径 $\phi_5 = 10 \text{ mm}$ 的吸盘与六个直径 $\phi_6 = 7 \text{ mm}$ 的吸盘组成一个单元组,设其中心点坐标为 (x_{i0}, y_{i0}) ,分别以该中心坐标为吸盘中心坐标,以该点到单元吸盘中心连接延长线的最小距离为吸盘半径,按照矩形布局规律进行排布。

第一部分参数: $r = 15 \text{ mm}$, $l_x = 50 \text{ mm}$, $l_y = 37 \text{ mm}$, $l'_x = 10 \text{ mm}$, $l'_y = 26 \text{ mm}$,根据式(2)求出第一点的坐标为(25,41)。

第二部分参数: $r = 10 \text{ mm}$, $l_x = 50 \text{ mm}$, $l_y = 37 \text{ mm}$, $l'_x = 40 \text{ mm}$, $l'_y = 17.5 \text{ mm}$,根据式(2)求出第一点的坐标为(50,27.5)。

第三部分参数: $r = 5 \text{ mm}$, $l_x = 50 \text{ mm}$, $l_y = 37 \text{ mm}$, $l'_x = 45 \text{ mm}$, $l'_y = 41 \text{ mm}$,根据式(2)求出第一点的坐标为(50,46)。

第四部分参数: $r = 5.5 \text{ mm}$, $l_x = 50 \text{ mm}$, $l_y = 134 \text{ mm}$, $l'_x = 10 \text{ mm}$, $l'_y = 6 \text{ mm}$,根据式(2)求出第一点的坐标为(33,11.5)。

由此可得出四个部分组合布局的局部效果,如图3所示。

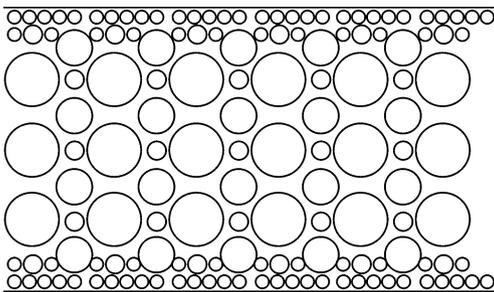


图3 仿章鱼吸盘型局部平面示意图

Fig. 3 Simulation octopus sucker type local plan sketch

1.3 仿生轮胎三维实体模型的建立

运用 Pro/E 软件,结合仿章鱼吸盘型局部平面

示意图及相应的轮胎结构模型,制作出仿生轮胎三维实体模型如图4所示。



图4 仿章鱼吸盘型轮胎三维结构示意图

Fig. 4 Simulation octopus sucker tire 3D structure plan sketch

2 有限元模型建立

2.1 边界条件设定

假设仿生轮胎模型的相关参数如下:①胎面材料选择天然橡胶^[9],其弹性模量 $E = 7.0 \text{ MPa}$;泊松比 $\mu = 0.47$;②选择的单元类型为 Solid185;③吸盘式花纹与冰面接触,可视为柔性体与刚性体之间的接触,取滚动摩擦系数 $\mu_k = 0.02$,附着系数 $\varphi = 0.1$;④单轮法向载荷 $F_y = 3441.5 \text{ N}$,当轮胎存在转动趋势或发生转动时,随即产生切向摩擦力,分别将其转换为压强加载到吸盘式花纹上。

2.2 模型建立及网格划分

ANSYS 提供了生成模型的方法,但由于吸盘式花纹特征十分复杂,利用 ANSYS 建立模型非常繁琐,网格划分及修正非常困难,因此直接利用 Pro/E 软件建立的仿章鱼吸盘型轮胎的三维实体模型,通过 stp 格式导入 ANSYS 程序中进行分析。

根据吸盘式花纹布局设计及优化的方法,可知吸盘式花纹呈规则对称排布,因此,取一块接地矩形胎面进行有限元分析,该胎面为 168 mm ,宽为 156 mm ,从图4模型截取的单元模型如图5所示。

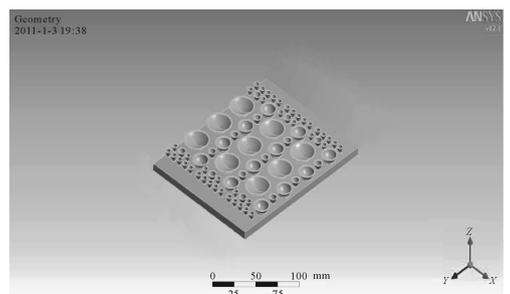


图5 截取的实体模型

Fig. 5 The truncated real entity model

其他接地面积的情况与之相同。这也符合有限元实际分析中为节省计算机资源取受力结构单元进行分析的方法。

采用自由网格划分方式进行网格划分,并对吸盘边缘接触区域的网格进行细化处理,其有限元模型如图 6 所示。

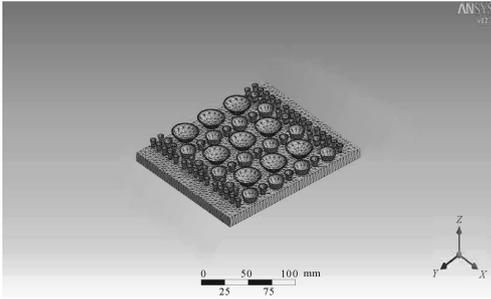


图 6 有限元模型
Fig. 6 Finite element model

3 仿真结果及分析

3.1 有限元模型受力分析

汽车相对冰面运动,但在模型分析中比较困难,根据运动相对性原理,假设仿生轮胎为固定体,对吸盘式花纹施加载荷,如图 7 所示。加载计算后,获得的胎面吸盘式花纹的变形、当量应力云图及位移结果分别如图 8~11 所示。

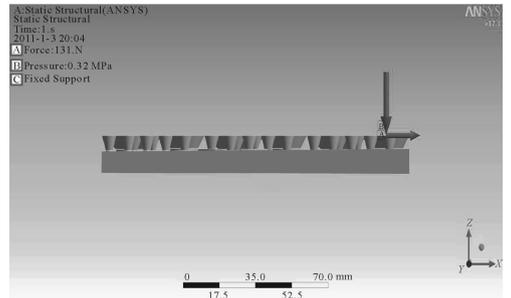


图 7 有限元模型受力简化图
Fig. 7 Finite element model force simplified diagram

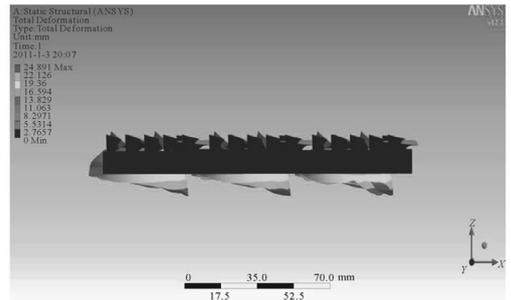
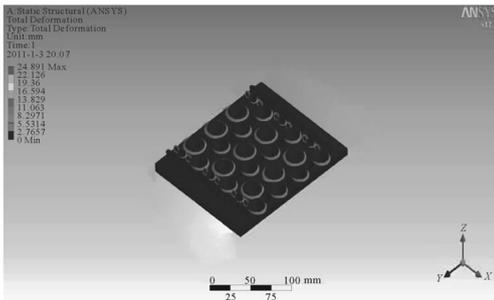


图 8 有限元模型变形图
Fig. 8 Finite element model of deformation diagram

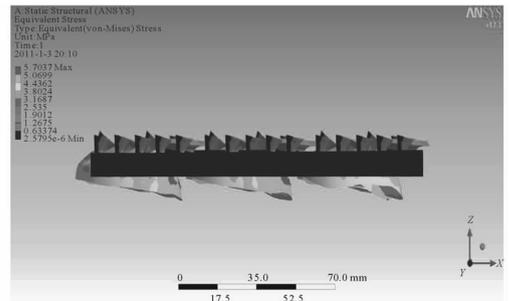
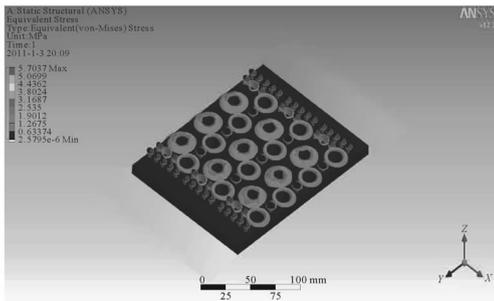


图 9 有限元模型当量应力云图
Fig. 9 Finite element model of equivalent stress map

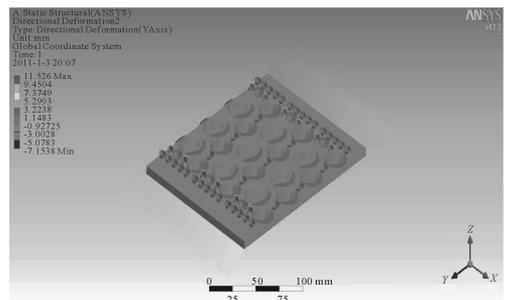
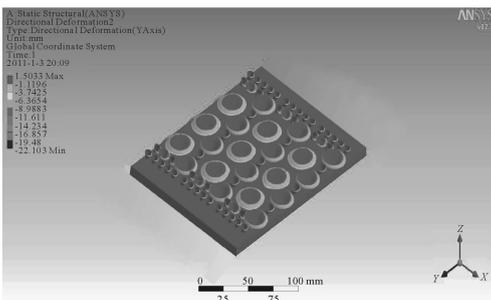


图 10 有限元模型 z 方向位移云图

图 11 有限元模型 x 方向位移云图

Fig. 10 Finite element model of z direction displacement map

Fig. 11 Finite element model of x direction displacement map

3.2 结果分析

1) 在力载荷的作用下,吸盘式花纹裙边发生压缩弹性变形,与冰面紧密接触,吸盘式花纹基部承受主要载荷,吸盘式花纹边缘所承受载荷的概率比其他部位高。仿生吸盘设计时,基部相对较厚,裙边相对较薄,既可以提高基部的抗冲、压、磨能力,又可以使吸盘式花纹受的载荷均匀分布,延长其使用寿命,同时确保吸盘式花纹与冰面产生有效吸附。

2) 从图8~11可知,胎面吸盘式花纹绝大部分与冰面发生有效吸附,可确保提供足够的吸附力,提高汽车在冰面上的防滑能力,胎面两侧边沿的小直径吸盘主要是在汽车转弯时,增大侧向吸附力。

3) 本文研究的是固定载荷下吸盘式花纹的受力及有效吸附情况,轮胎运动加载后,吸盘式花纹的弹性变形将变大,更能确保与冰面产生有效吸附,达到良好的防滑效果。

4 结语

针对冬季冰面防滑特点,由章鱼吸盘受启发,运用仿生学原理,详细设计了仿生轮胎布局模型,并通过有限元分析,说明了吸盘式花纹的结构设计比较合理,抗拉、压等性能明显得到提高,且可以与冰面发生有效吸附,能确保轮胎的吸附防滑性能。

参考文献:

[1] 邢恩辉,张明强,吴贵福,等. 寒地城市快速路冰雪路面交通流特性研究[J]. 佳木斯大学学报, 2010, 28(2): 232-234.
Xing Enhui, Zhang Mingqiang, Wu Guifu, et al. Cold city expressway traffic flow characteristics of ice and snow road

[J]. Journal of Jiamusi University, 2010, 28(2): 232-234.
[2] 夏晶晶,张夕鹏. 汽车防滑技术[J]. 汽车维修, 2003, (12): 49-50.
Xia Jingjing, Zhang Xipeng. The technology of automobile anti-skid [J]. Car Repair, 2003, (12): 49-50.
[3] 李汉堂. 安全轮胎的发展前景[J]. 特种橡胶制品, 2008, 29(6): 61-68.
Li Hantang. Development prospect of safety tire [J]. Special Rubber Products, 2008, 29(6): 61-68.
[4] 杜家维. 二十一世纪仿生学研究对我国高新技术产业的影响[J]. 世界科学, 2004, (2): 14-17.
Du Jiawei. Twenty-first Century bionics research on the impact of the new high-tech industry in China [J]. World Science, 2004, (2): 14-17.
[5] 辛参. 轮胎设计中的仿生学[J]. 发明与创新, 2005, (3): 10.
[6] 方海燕,周小儒,袁金龙. 汽车造型中的仿生设计[J]. 艺术教育, 2007, (9): 21-23.
Fang Haiyan, Zhou Xiaoru, Yuan Jinlong. Bionic design of car styling [J]. Art Education, 2007, (9): 21-23.
[7] 彭友山. 章鱼的吸盘与大气压的应用[J]. 数理天地, 2007, (10): 44.
Peng Youshan. The octopus suction and application of air pressure [J]. Mathematical World, 2007, (10): 44.
[8] 佚名. 汽车轮胎外直径计算公式[EB/OL]. http://www.52che.com/z/guanzhu_252469.html, 2011-11-18.
[9] 佚名. A601085 防滑轮胎专业技术大全[EB/OL]. <http://www.cykw.cn/Article/jxhg/fzxcg/200807/104546-11.html>, 2008-07-14.

(责任编辑 王卫勋)