

# 一种新的轮胎印痕测量及压力分布数据处理方案

刘 宁 卢荣胜

合肥工业大学,合肥,230009

**摘要:**介绍了一种基于压阻阵列成像方法的轮胎外圈表面花纹磨损检测技术,该技术通过检测轮胎在特定载荷下印痕的变化来估计轮胎的质量与使用寿命。在介绍测量原理的基础上,重点介绍了印痕图像处理技术与评价方法,针对轮胎花纹与地面接触产生的印痕图像确定边界与接触面积,研究了一种基于圆模板滚边的方法来获取图像外包络线的算法。研究表明该方法能有效处理凸壳与非凸壳图形,自动获取带凹槽图形的外包络区域,具有较好的鲁棒性和较高的精度。

**关键词:**轮胎印痕图案;压力分布测量;影像处理;包络线提取

**中图分类号:**TP391

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2012.09.025

## A Novel Method for Tire Footprint Pattern Measurement and Pressure Distribution Data Analysis

Liu Ning Lu Rongsheng

Hefei University of Technology, Hefei, 230009

**Abstract:** The paper presented a technology for inspecting tread wear of tire outer surfaces. Piezoresistive matrix imaging approach was used to measure the transformations of tire footprint patterns under different and specific loads in the aim of finally estimating tire quality and life. On the basis of measurement principle introduction, the paper focused on the illumination of footprint image pattern processing technology and evaluation method. In order to solve the problem of image border determination of contacted footprint pattern between tire tread and ground in addition to the contact area calculation, a circle template rolling method was proposed to extract envelope curve of image pattern. The results show both the convex and the concave patterns can be processed effectively. The outer envelope boundary with indentations is acquired automatically. This method is also proved to be of robustness and high accuracy.

**Key words:** tire footprint pattern; pressure distribution measurement; image processing; envelope curve extraction

## 0 引言

轮胎使用寿命是轮胎质量的一个重要指标,

而轮胎磨损度则是影响轮胎寿命的决定性因素。通常,轮胎厂商会在每个轮胎的胎侧作上磨损残留深度极限标记<sup>[1]</sup>,用以标识轮胎应当报废的磨损上限,其标准的制定取决于各厂商的安全性试验和多年的经验积累,实施起来复杂冗长。同时,轮胎在达到磨损上限之前,性能已经下降,如何能

收稿日期:2011-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50875074);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA04Z114)

[7] Miller J M. Hybrid Electric Vehicle Propulsion System Architectures of the e-CVT Type[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(3): 756-767.

[8] Syed F U, Kuang M L, Hao Ying. Active Damping Wheel-torque Control System to Reduce Driveline Oscillations in a Power-split Hybrid Electric Vehicle[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(9): 4769-4785.

[9] Miller J M, McCleer P J, Everett M. Ultracapacitor Plus Battery Energy Storage System Sizing Methodology for HEV Power Split Electronic CVT's[C]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Dubrounik, 2005: 317-324.

[10] 段志辉. 汽车油电混合动力系统的机电动力耦合机构:中国,200810184141.8[P]. 2009-05-06.

[11] 王保华,张建武,罗永革. EQ6110 HEV 并联混合动力系统参数匹配及性能研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(1): 7-11.

[12] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2000. (编辑 王艳丽)

**作者简介:**彭志远,男,1981年生。重庆大学机械传动国家重点实验室博士研究生。主要研究方向为混合动力汽车系统匹配与控制策略。发表论文2篇。秦大同,男,1956年生。重庆大学机械传动国家重点实验室教授、博士研究生导师,教育部长江学者特聘教授。段志辉,男,1960年生。重庆长安新能源汽车有限公司高级工程师。杨亚联,男,1972年生。重庆大学机械传动国家重点实验室副教授。

随时方便地测量评估轮胎性能,是轮胎检测维护中需要解决的问题。此外,一款新设计的轮胎在量产之前都必须进行较长里程的磨损试验,以确定轮胎结构和胎面设计是否合理,而现有方法实施起来十分不便<sup>[2]</sup>。因此,从上述几方面来讲,都需要一种简单、高效、低成本的方法来随时检测轮胎性能,测量其接触尺寸,评估其磨损度。

本文提出了一种通过对轮胎印痕进行测量计算评估轮胎磨损度的方法,并且计算出了相关的参数。这种方法使用了较复杂的数学算法,引入了图像处理领域的知识,但其硬件结构简单,实现成本很低。该方法的难点在于接触区域的自动识别和印痕坐标的几何变换<sup>[3]</sup>。

### 1 测量系统

该测量系统的基本构成是:一台计算机,一张 TekScan 8050Q 轮胎传感垫,一台可施加载荷的机械悬臂设备。计算机负责控制测量系统和数据处理,计算机系统为 Windows,且已安装笔者自编的测量软件,软件用 C# 2008 和 C++ dll 编写,还需安装 TekScan 8050Q 的驱动程序和机械悬臂步进电机驱动程序。TekScan 8050Q 是美国 TekScan 公司开发研制的一种压力分布测量传感器,它可以方便地运用到包括轮胎检测在内的多种压力测量领域。作为本测量方案的核心设备, TekScan 8050Q 是一张由压阻式力传感器阵列构成的测量垫,如图 1 所示。每个矩阵单元为一个微型电阻式压力传感器,其电阻与所受压力成反比,经过专门的芯片电路处理后,可以高速实时地获得数字矩阵形式的压力数据。本系统所选用的 TekScan 8050Q 传感垫,其大小为 585.2mm × 397.3mm,行列像素数为 176 × 192,每个像素的大小为 1.524mm × 1.524mm,分辨率为 43.1pixel/cm<sup>2</sup>,测量范围为 0~2069kPa,测量垫在传感区的厚度仅为 0.2mm。该系统具有较好的重复性和较快的响应速度。

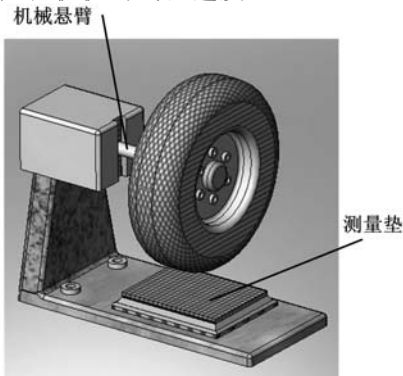


图 1 测量设备

该系统还配置了一个机械悬臂设备,如图 1 所示,方便进行离线测量。离线测量时,轮胎被固定在悬臂末端,测量垫位于轮胎下,通过悬臂向轮胎施加指定的向下载荷;实时测量时,缩回悬臂,汽车直接驶入,将单个轮胎压于测量垫上,依靠汽车自重施加载荷。该测量系统可以获取动态、高分辨率的压力分布矩阵。

### 2 测量理论

轮胎磨损程度可以通过分析轮胎在指定负载荷下的接地印痕图案来判断<sup>[4]</sup>。轮胎印痕可以采用在轮胎上涂墨并在纸上按压的方法获取,这是较旧的方法,并且只能获取到二值图像<sup>[5]</sup>。目前较新的技术是采用许多微型压力传感器,以高密度的矩阵形式排列,组成一张压敏测量垫,置于轮胎下进行检测<sup>[6]</sup>。该传感器可获取轮胎与路面接触的矩阵式压力分布数据,然后再用该数据合成轮胎印痕,采用这种方法可以获取灰度图像,进而生成伪彩色图像。

通过对轮胎印痕的测量可以获得多项轮胎参数,详细的测量项目如表 1 所示。其中接触总面积是指轮胎与地面接触区域的总面积,而非整个图像面积,如图 2a 所示。接触总面积的确定依赖于印痕外包络线的计算,如图 2b 所示。有效接触面积是指在接触总面积区域之内,轮胎与接触面产生接触(测量压力不为零或低于指定阈值)的区域面积。

表 1 测量项目

1	载荷(N)
2	下沉量(mm)
3	压力(kPa)
4	横轴长度(mm)
5	纵轴长度(mm)
6	接触总面积(cm <sup>2</sup> )
7	有效接触面积(cm <sup>2</sup> )
8	有效面积与总面积的比值

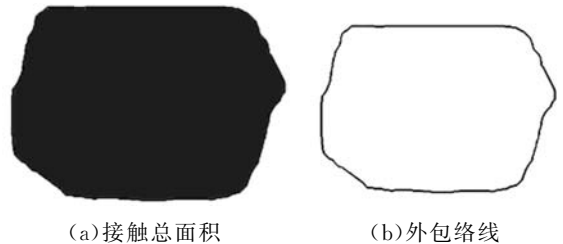


图 2 接触总面积与外包络线

车辆轮胎接地面的花纹随着轮胎的使用而受到磨损,在相同面积的接触区域内,磨损越严重则有效接触面积越大。轮胎的已磨损程度用轮胎有效接触面积与接触总面积的占空比来评定。结合

该轮胎的已行驶里程数,可以综合判别轮胎的耐磨程度。轮胎受载的载荷、下沉量,及轮胎在指定气压下的接触总面积,可用于评定轮胎的承载强度。

轮胎纵轴指车轮回转轴在印痕上的投影,横轴指在印痕上与纵轴相垂直的轴线,印痕中心指横轴与纵轴的交点。由于在测量时轮胎实际横轴与图像坐标系中  $x$  轴的夹角不为 0,因此需要进行数学变换将横纵轴所确立的测量结果坐标系转换到印痕理论坐标系中。

接触区域的总面积随测量时载荷的改变而变化,因此需要每次测量时重新确定。受印痕图案特点的限制,确定其总体外边界是很困难的,以前常需要手工指定。本文除了阐述压力分布图像的数字影像处理方法外,还重点介绍一种外包络轮廓线的提取算法,用于自动计算印痕接触总面积。

### 3 数据处理

获取压力分布初始矩阵后,经过 TekScan 数据模块的处理,然后根据标定曲线查询可以得到每个像素的实际压力值。再通过线性映射,将压力矩阵转化为伪彩色印痕图就可以提供给用户 UI(user interface)显示。在内部计算中仍使用灰度矩阵,使用灰度图像处理算法进行计算,处理流程如图 3 所示。

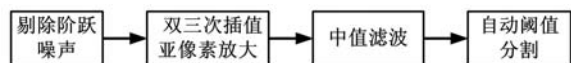


图 3 处理流程图

(1)剔除阶跃噪声。原始数据中含有少量的传感器噪声,可将该类噪声视为统计学上的极值或粗大误差,可采用莱以特( $3\sigma$ )准则判断极值数据并将其剔除。对于剔除后产生的空洞像素,采用基于径向基函数的方法进行图像修复<sup>[6-7]</sup>,总压力的计算仍使用原始矩阵。

(2)图像亚像素放大。由于图像尺寸太小,故为获取亚像素精度,采用双三次样条插值法<sup>[8]</sup>进行图像放大。

(3)中值滤波。采用中值滤波去除图像中的椒盐噪声。

(4)自动阈值分割。采用大津法<sup>[9]</sup>对图像进行二值化,以便进行形态学处理。

### 4 包络线提取算法

自动计算轮胎外包络线是轮胎印痕测量的一个难题。如果认为印痕是一个凸壳,可以使用凸壳串行算法进行计算,包括 Chand 等<sup>[10]</sup>提出的卷

包裹法、Graham<sup>[11]</sup>提出的 Graham 法,以及 Preparata 等<sup>[12]</sup>提出的将分治算法应用到凸壳问题的思想。但是轮胎印痕并非严格意义上的凸壳,若把印痕当作凸壳计算,必然将多余的区域引入到总面积中,带来严重的测量误差。另一类方法是从轮胎质心出发,根据一根向外发射的直线旋转寻找外边界,这类方法能较好地处理边界不复杂的图形,但不适用于复杂的轮胎印痕。还有一种方法是采用支持向量机的分类法则<sup>[13]</sup>,求取离散点集最小包容图形的方法,但由于离散点集最小包容图形的数学方程必须事先给定,也不能满足自动计算轮胎外包络线的要求。本文提出了一种新的包络线提取算法,用来解决上述问题。

本文算法的基本思想是:针对可能存在凹槽的二值图像,用一个较大半径的实心圆盘,在印痕外边缘滚动,虽然印痕具有较大的间断性,但由于圆盘的半径较大,所以它不会掉进印痕内部。当圆盘在印痕区域外部滚动一周后,将圆盘与印痕接触点排序后相连,即可得到印痕的外包络轮廓线,其过程如图 4 所示。

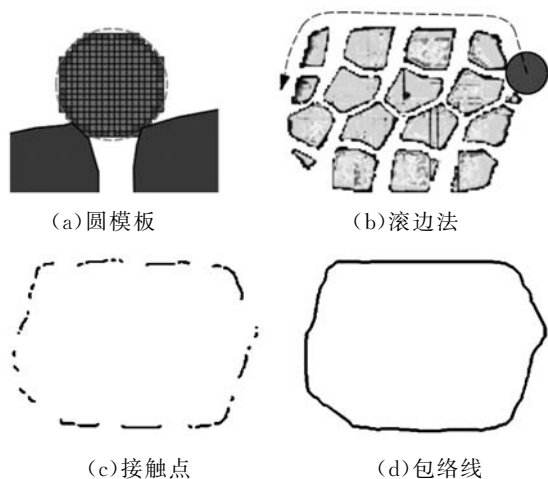


图 4 包络线提取

该算法的数学模型基于填充元素的概念,取决于一个基本的欧氏运算——平移。利用结构元素填充的概念,将一个集合  $A$  平移距离  $x$  表示为  $A + x$ 。若令整幅图像矩阵全集为  $U$ ,其中非零点的集合为  $A$ ,模板  $B$  为半径为  $r$  的实心圆,令  $B^{+1}$  为半径为  $r + 1$  的圆,则模板  $B$  的外接圆为  $B^{+1} - B$ 。待求的外接轮廓需要用  $B$  和  $B^{+1} - B$  对集合  $A$  进行操作,定义操作运算符  $A \text{ } \mathcal{U} \text{ } B$  为

$$A \text{ } \mathcal{U} \text{ } B = \{x \mid (x \in A) \cap (x \notin B_{ij}) \cap (x \in B_{ij}^{+1})\} \quad (1)$$

为了减小计算量,将式(1)变为

$$A \text{ } \mathcal{U} \text{ } B = \{x \mid (x \in A) \cap (x \notin B_{ij}) \cap (x \in (B_{ij}^{+1} - B_{ij}))\} \quad (2)$$

显然,当  $r$  较大时(例如  $r \geq 30$ ),判断是否  $x \in (B_{ij}^{+1} - B_{ij})$  的计算量远小于判断是否  $x \in B_{ij}$  的计算量。因此,可将式(2)稍作改变,变成:

$$A \ominus B = \{x \mid (x \in A) \cap (x \in (B_{ij}^{+1} - B_{ij})) \cap (x \notin B_{ij})\} \quad (3)$$

在实际计算中,集合  $A$  以矩阵的形式表示,集合  $B$  用元素在集合中的索引来表示,其中  $B_{ij} = B + i \begin{pmatrix} 1^T \\ 0^T \end{pmatrix} + j \begin{pmatrix} 0^T \\ 1^T \end{pmatrix}$ ,  $1^T$  和  $0^T$  分别表示所有元素为 1 或 0 的  $n$  维行向量,算法的迭代步骤如下:

(1) 为了防止  $A$  矩阵空白边缘小于模板  $B^{+1}$  大小,使得模板  $B^{+1}$  溢出图像边缘,故先将  $A$  周边补 0 扩容至  $A'$ ,若  $A$  的尺寸为  $(h_0, w_0)$ ,则  $A'$  尺寸为  $(h, w) = (h_0 + 4r + 2, w_0 + 4r + 2)$ 。生成圆盘模板  $B_{ij}$  与外圆模板  $B_{ij}^{+1} - B_{ij}$ ,若  $X(k) = (i, j)$ ,  $i$  和  $j$  为当前行、列数。取初始点  $X(0) = (r + 1, r + 1)$ ,令  $k := 0$ ,待求轮廓点集合  $S = \emptyset$ 。

(2) 如果  $A' \cap (B_{ij}^{+1} - B_{ij}) \neq \emptyset$ ,则令集合  $T = A' \cap (B_{ij}^{+1} - B_{ij})$ ;否则跳转到第(5)步。

(3) 如果  $A \cap B_{ij} = \emptyset$ ,则令  $S \leftarrow S \cup T$ ,否则  $S$  不变。

(4) 令  $T = \emptyset$ 。

(5) 判断是否满足  $j \leq w - 2r - 1$ ,是,则令  $j \leftarrow j + 1$  并跳转到第(2)步;否,则进一步判断是否满足  $i \leq h - 2r - 1$ ,如是,则令  $i \leftarrow i + 1, j \leftarrow 2r + 1$ ,并跳转到第(2)步,否则停止迭代,集合  $S$  即为最终求得的轮廓点。

经过上述点的计算,最终可获得待求的轮廓点集合如图 4c 所示。最后,采用连接算法将离散点用短线段连接起来得到闭合包络线,如图 4d 所示,求解步骤如下:

(1) 计算印痕图案的质心点  $(X_c, Y_c) = (\sum_{i=1}^n x_i/n, \sum_{i=1}^n y_i/n)$ 。

(2) 穿过质心点作  $x$  轴、 $y$  轴,将边界离散点划分到四个象限中。

(3) 计算边界点相对于  $x$  轴正向的角度  $\theta (0 \leq \theta \leq 2\pi)$ 。

(4) 基于角度  $\theta$ ,对边界点进行排序。

(5) 将离散点用短线段连接以获得包络线。

下面给出了三种计算包络线方法的结果对比。第一种方法是质心射线旋转法,采用该方法产生了大量内凹边界,如图 5a 所示;第二种方法是 Graham 法,提取的边界很平滑,但是由于求取结果必须是凸多边形,使得上下部边界处引入了两条多余的长条状面积,如图 5b 所示;最后一种

方法是本文的方法,采用本文方法产生了平滑的边界,由于不受限于凸多边形,因此边界走向灵活且更为准确,如图 5c 所示。新算法的时间复杂度为  $O(m \times n \times 2\pi r)$ ,空间复杂度为  $O(2\pi r^2)$ 。其中,  $m$  为图像的行数,  $n$  为图像的列数,  $r$  为圆模板的半径。

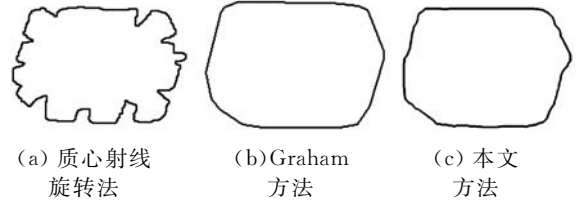


图 5 各种方法计算包络线的结果

### 5 坐标变换与数据后处理

在测量时,轮胎不能做到绝对水平放置,其横轴向量一般不与图像坐标系的  $x$  轴向量一致。为了估算纵轴与横轴的长度,印痕图案需要旋转一个合适的角度使其横轴基本位于水平方向上。计算横轴与图像坐标  $x$  轴夹角的方法采用椭圆拟合法<sup>[14]</sup>,横纵轴方向定义为包络线点进行椭圆拟合得到的长短轴的方向,考虑到可能存在不充分的印痕,令椭圆长轴位于一、二象限的一段与  $x$  轴的夹角为椭圆倾角  $\theta$ ,若  $\theta$  满足  $\pi/4 \leq \theta \leq 3\pi/4$ ,则横纵轴对应长轴和短轴的方向。定义横轴和纵轴的长度分别为两轴线与包络线的交点,椭圆圆心  $(x_0, y_0)$  被定义为轮胎印痕临时中心,采用二维欧氏刚体变换准则,令坐标系旋转中心为  $(x_0, y_0)$ ,坐标系转角为椭圆倾角  $\theta$ ,那么其变换关系为

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -x_0 \\ 0 & 1 & -y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

其中,  $(x, y)^T$  为原坐标系中任意一点变换前的坐标,  $(x', y')^T$  为变换后的坐标。可将中间三个矩阵合为一个齐次变换矩阵,则

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & x_0 - x_0 \cos\theta + y_0 \sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta & y_0 - x_0 \sin\theta - y_0 \cos\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

数据变换过程如图 6 所示。

在进行包络线坐标变换后,对该闭合区域进行填充,填充算法有种子填充算法、扫描线填充算法、边填充算法等<sup>[15]</sup>。其中改进的种子线扫描填充算法<sup>[16]</sup>是一种较好的填充算法,运算时以印痕图案的临时中心  $(x_0, y_0)$  为种子点,将闭合包络线区域完全填充。填充后的闭合包络线围绕的总面积以及有效接触面积可以很容易通过像素统计得

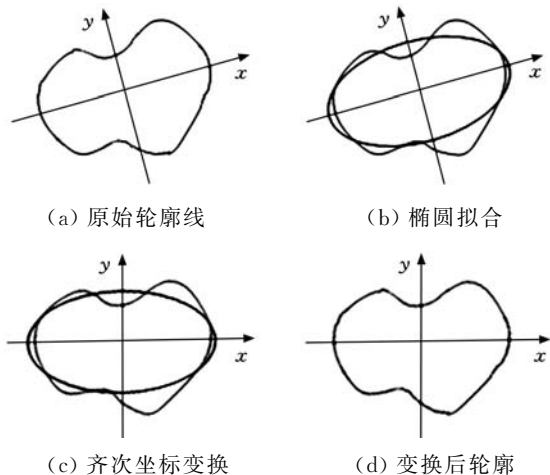


图 6 轮廓线主方向齐次坐标变换

到。填充后的质心  $(X_c, Y_c)$  被定义为印痕的新中心, 横纵轴以新中心为准, 方向不变。

轮胎的接触尺寸可以用横纵轴和总面积进行

估算, 其磨损度可由接触面积比  $K$  进行评价:  $K = S_c/S$ , 其中,  $S_c$  为接触面积,  $S$  为包络区域面积。  $K$  与轮胎的磨损程度成正比。

### 6 实验

为了证明本文方法的稳定性, 在实验中采取了 50 个帧的序列, 所施加的载荷从小到大, 印痕也由浅到深, 轮胎的载荷从 0 到 9800N, 采样率为每帧 1.486 87s。TekScan 8050Q 传感单元的行、列间距均为 1.524mm, 原始采样分辨率为 176pixel×192pixel, 亚像素插值放大倍率为 2.5, 传感器的校正饱和压力为 2216.19kPa。在图 7a 中给出了第 1、10、20、30、40、50 帧的印痕图案, 在图 7b 中给出了对应帧的处理结果。可以看出, 在不同的载荷下, 都能较好地获得横纵轴、包络线边界、接触面积等数据。

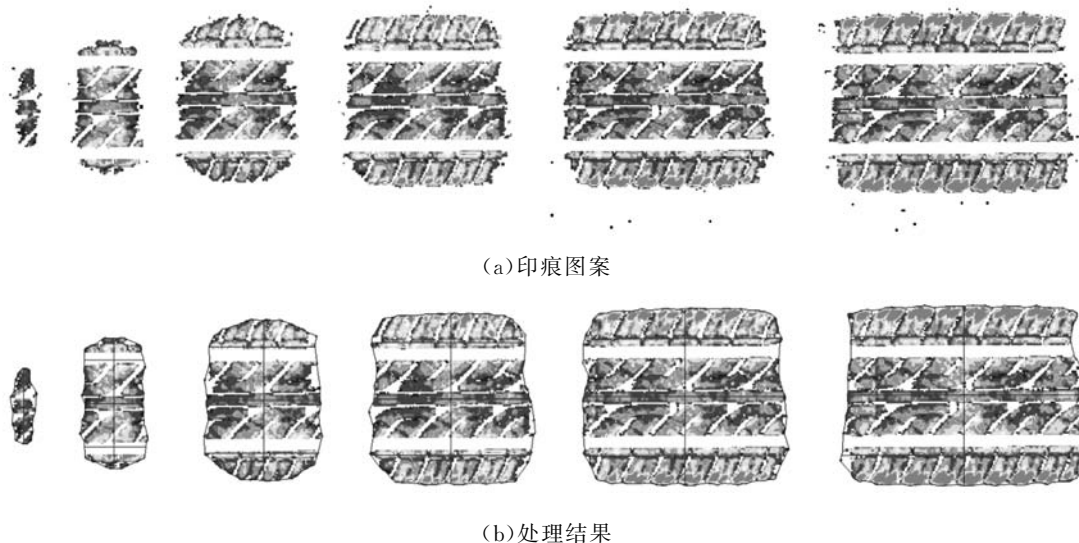


图 7 印痕图案及图像处理结果

### 7 结语

本文通过对车辆轮胎印痕图案及其压力分布的测量, 提出了一种新的数据处理方案, 可以实现轮胎印痕的快速动态测量。大量实验结果显明, 这种自动影像处理方法具有较好的鲁棒性和较高的精度。对于提取带凹槽的非连续轮廓线问题, 提出了一种特别的包络线计算方法, 在寻找图案边界时很有用。该方法能有效提取出边界轮廓点, 不仅可以处理印痕, 也可应用于其他符合该检测特征的二维离散矩阵数据中。

#### 参考文献:

[1] Anon. Tire[EB/OL]. [2011-05-16]. [http://en.](http://en.wikipedia.org/wiki/Tire)

[wikipedia.org/wiki/Tire](http://en.wikipedia.org/wiki/Tire).

[2] Anon. NATC Tire Testing—silver Springs, NV and West Yellowstone, MT[EB/OL]. [2011-05-16]. [http://www.natc-ht.com/Tire\\_Testing.htm](http://www.natc-ht.com/Tire_Testing.htm).  
 [3] Lu Rongsheng, Liu Ning, Li Qi, et al. Measurement of Vehicle Tire Footprint Pattern and Pressure Distribution Using Piezoresistive Force Sensor Mat and Image Analysis[J]. Key Engineering Materials, 2010, 437:467-471.  
 [4] Anon L. Tire Footprint Behavior During Dynamometer Testing[J]. Aerospace Engineering, 1996, 16 (4):11-14.  
 [5] Grečenko A. Tyre Footprint Area on Hard Ground Computed from Catalogue Values [J]. Journal of Terramechanics, 1995, 32(6):325-333.

## 第十五届全国设备监测与 诊断学术会议征文通知

**会议主题:**研究探讨“十二五”期间的设备监测与诊断技术的发展与应用。

**征文内容:**设备监测与诊断技术的发展、现状、趋势与综述;设备状态监测与故障诊断技术原理、方法与工程应用;设备监测与诊断的现代技术与智能技术;振动、声、油液、电气、无损、红外等故障诊断技术及应用;设备科学维护和智能维护技术的研究及应用;设备运行状态的发展趋势预测和早期故障预报技术;设备监测与诊断的数据采集、传输、分析及信息融合;设备监测与诊断的检测分析仪器及系统;基于远程网络的监测与诊断技术及系统;基于虚拟仪器的监测与诊断技术及系统;设备监测与故障诊断的评判标准及方法;其他设备监测与诊断技术及工程应用的论文;设备监测诊断技术与设备信息化管理、设备维护改造的结合。

**会议时间和地点:**会议拟在 2012 年 12 月份召开,会议地点待定。

**论文要求及有关事项:**①论点明确、条理清晰、图样符合国家标准,论文(含图表)用 word 文档提供,设置成 A4 版面,论文通过电子邮件投

稿,电子稿件发至学会秘书处电子邮箱;②字数不超过 5000 字,作者最多 4 人,外文要译成中文;③在论文题目下,请书写 200 字左右的摘要并列关键词,正文后列出参考文献及出处;④论文应未在国内刊物上公开发表过,对录用的论文编审人员有权进行删改;⑤为便于与作者联系,请在来稿中注明姓名、职务、职称、工作单位、科室部门、系别专业、详细通讯地址、邮编、E-mail、联系电话、手机、传真等;⑥应征论文于 2012 年 7 月 30 日前发至中国机械工程学会设备与维修工程分会秘书处,以利评审、编辑、出版;⑦论文录用后,将在发会议通知时一并寄发“论文录用通知”;⑧根据广大论文作者需求,本次学术会议的论文集将由机械工业出版社正式出版(有书号);⑨请论文作者在撰写论文前,认真阅读对论文的要求,按论文层次格式书写,以免退回修改耽误时间。

**通信地址:**北京市东城区菊儿胡同 7 号南楼 206 室,中国机械工程学会设备与维修工程分会秘书处。

邮编:100009

电话:(010)64019685,64040675

传真:(010)64040675

E-mail:sbwx08@163.com

联系人:杨申仲 李建华

(工作总部)

[6] Charlie M. Making no Mark, Why Fiddle with Ink When Digital Footprints Can Be Accurately Recorded? Technology Focus[EB/OL]. [2011-05-16]. <http://www.tekscan.com/industrial.html>.

[7] 陈国栋,韩旭,刘桂萍,等.基于自适应径向基函数的整车耐撞性多目标优化[J].中国机械工程,2011,22(4):488-493.

[8] Johnson L W,Riess R D. Numerical Analysis[M]. 2nd ed. Mass:Addison-Wesley Pub. Co.,1982.

[9] Ostu N. A Threshold Selection Method from Gray-level Histogram[J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9: 62-66.

[10] Chand D, Kapur S. An Algorithm for Convex Polytopes[J]. Journal of the ACM (JACM), 1970, 17(1): 78-86.

[11] Graham R L. An Efficient Algorithm for Determining the Convex Hull of a Finite Planar Set[J]. Information Processing Letters, 1972,1(4): 132-133.

[12] Preparata F P, Hong S J. Convex Hulls of Finite Sets of Points in Two and Three Dimensions[C]// Communications of the ACM Archive. New York, 1977: 87-93.

[13] Bucklew D J, Sebald J A. Support Vector Machine Techniques for Nonlinear Equalization, Signal Processing[J]. IEEE Transactions, 2000, 48(11): 3217-3226.

[14] Pilu M, Fitzgibbon A, Fisher R. Ellipse-specific Direct Least-square Fitting[C]//IEEE International Conference on Image Processing, Lausanne, 1996:599-602.

[15] 孙家广,胡事民.计算机图形学[M].3版.北京:清华大学出版社,1998.

[16] Regolini J L, Dutartre D, Bensahel D, et al. Laser Recrystallised SOI with Periodical Seeding Filled by Selective Epitaxial Growth[J]. Electronics Letters, 1987,23(10):493-495.

(编辑 王艳丽)

**作者简介:**刘 宁,男,1982 年生。合肥工业大学仪器科学与光电工程学院博士研究生。主要研究方向为精密测量中的数字图像处理技术。卢荣胜,男,1963 年生。合肥工业大学仪器科学与光电工程学院教授、博士研究生导师。