

# 轮胎胎面花纹边界特征提取方法研究

张荣团<sup>1</sup>,董玉德<sup>1\*</sup>,宋忠辉<sup>1</sup>,白苏诚<sup>2</sup>,刘彦超<sup>2</sup>,张方亮<sup>2</sup>

[1. 合肥工业大学 机械与汽车工程学院,安徽 合肥 230009;2. 佳通轮胎(中国)研发中心,安徽 合肥 230601]

**摘要:**在对轮胎花纹造型特征研究的基础上,对胎面花纹边界特征提取在逆向数字化建模中的应用方法进行研究。在空间切片分层和投影图像特征提取的基础上,提出了一种基于灰度图像区域增长的边界特征提取方法。该方法首先借鉴切片分层的思想,采用同心球与扇形混合空间分割方案以及主成分统计分析方法,将三维扫描点云投影为带有深度值的胎面花纹灰度图像,然后利用区域增长方法提取出花纹边界特征点。试验结果表明,该方法能够处理各种复杂的半钢子午线轮胎花纹,可在约50 s内完成360° 3D花纹的特征点提取,提取误差较小。该方法从底层解决了逆向工程技术在轮胎行业中的应用,在对诸多新型轮胎花纹测试中具有较好的精确性、高效性及广泛的自适应性,能有效地缩短开发周期并改善轮胎的综合性能。

**关键词:**胎面花纹;逆向工程;边界特征提取;二次开发

**中图分类号:**TP391;TQ336.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2017)01-0018-06

目前国内轮胎花纹结构设计仍然缺乏有效的理论指导,随着逆向工程技术在产品三维特征建模与造型设计、仿真、优化及新产品开发等现代设计领域的广泛应用,胎面花纹的数字化反求设计逐渐成为轮胎工业中缩短开发周期与改善综合性能的一个重要手段。由于轮胎花纹结构较为复杂,使得反求设计在胎面花纹结构中的应用有一定难度。其中,花纹边界特征提取与非加工曲线逼近的准确与否直接决定着重构模型的品质。

点云特征提取常用的实现方法有两种:一种是基于平面的特征提取,一种是基于空间曲面的特征提取。平面特征提取多采用经纬线扫描法、网格划分法、角度-弦高联合法、投影图像法<sup>[1]</sup>和曲率法<sup>[2]</sup>等。空间曲面特征提取多采用基于曲率<sup>[3]</sup>和基于切平面<sup>[4]</sup>的方法。丘永亮<sup>[5]</sup>综合运用逆向工程软件Imageware Surfacers的数据处理功能和三维设计软件Pro/E的曲面造型功能,对轮胎胎面花纹进行了反求设计,实现了轮胎花纹几何模型的重建,但这仅仅解决了反求工程在花纹重构中的应用问题,并没有从根本上解决技术工程师所面临的操作繁琐等数字化建模问题。李文宁等<sup>[6]</sup>采用欧氏

距离聚类法将非地面点云分割;李新德等<sup>[7]</sup>提出一种基于2D和3D SIFT特征级融合的一般物体识别算法;Z. He等<sup>[8]</sup>结合图像的灰度值和形态学特征提出了一个有效的多级河道识别和提取方法;庞世燕等<sup>[9]</sup>采用结合主成分分析(PCA)的区域增长法提取建筑物立面的平面特征;程效军等<sup>[10]</sup>采用切片技术和数学形态学方法提取点云的轮廓特征线,通过切片分层将空间点云转换为不同层的平面切片点云,借鉴图像处理方法,将切片点云转换成二值图像,使用形态学运算提取其轮廓像素,将轮廓像素转换为轮廓特征点并采用B样条曲线拟合成轮廓特征线。

受阶层式聚类分割方法和投影灰度图像特征提取算法的启发,本工作在此基础上将主成分分析的区域增长法引入胎面花纹的边界识别提取中,以期取得以下成果。

(1)通过准确识别花纹边界特征点,为后续花纹重构提供质量保证,从而在吸收国际先进轮胎花纹参数和理论的基础上进行创新。

(2)组建参数化语义花纹库,以便开发工程师能够依照所需花纹的性能规则从语义花纹库中随意选型、裁剪、组合,以完成不同花纹的设计与开发工作。

(3)改善轮胎的综合性能,在分析轮胎圆整度、胎面接地面积、花纹沟槽面积以及噪声等性能

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51275145)

**作者简介:**张荣团(1990—),男,河南南阳人,现就职于中航光电科技股份有限公司,硕士,主要从事产品结构设计工作。

\*通信联系人

的基础上,指导花纹的设计,并建立语义模型库。

## 1 灰度图像转化方法

轮胎胎面包含错综复杂的花纹沟槽与钢片,一般扫描设备很难保证微细特征点云的完整性。利用基于欧氏距离的局部二次参数曲面逼近点云,对数据点的法矢和曲率进行估计,根据采样点的特征权值提取特征点的方法<sup>[11]</sup>并不可行。利用空间分割及主成分统计分析的方法将三维点云转化为灰度图像,可有效避免适应性差的问题。

### 1.1 空间分割

同心球分割和扇形分割是常用的两种空间区域分割方案。其中,同心球分割方法因旋转模型具有不变性而计算简单,但不能精细地描述模型的形状;扇形分割方案对于模型的描述能力较强,但是需要进行一系列标准化处理。

在同心球分割与扇形分割的基础上,结合轮胎的造型规律,在轮胎的空间区域划分中提出了一种同心球与扇形相结合的混合分割方案。轮胎胎面基本为圆形,根据花纹沟和胎面到轮胎旋转轴半径的不同可借鉴同心球分割方法将其沿径向划分为不同的层次区域;又因轮胎在设计与制造过程中不可避免地出现轻微的径向圆跳动问题,需要参考扇形分割方法视其在周向局部区域近似为圆。空间分割方案如图1所示。

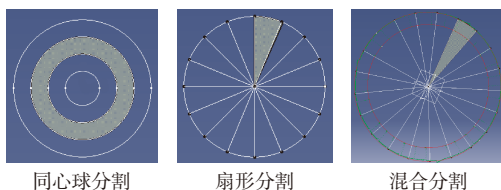


图1 空间分割

本研究提出的空间分割方案是为后续的主成分统计分析作铺垫的,因此在轮胎的实际空间分割中要考虑扇形分割区域占周向总体比例的因素。在花纹块饱和度满足要求(即橡胶接地面积大于花纹沟槽的面积,优先保证每一份扇形区域的周向弧长不小于一个花纹节距)的前提下,根据经验,对一般的轿车子午线轮胎,将扫描数据沿周向均匀划分为20~30份,至此可以近似将每一份区域视为一个圆弧。在圆弧的基础上运用同心球

分割方案进行胎面数据与花纹沟数据的分离。

### 1.2 主成分统计分析

在轮胎花纹设计的过程中,要兼顾考虑抓着力与排水性能等因素。通常为取得较好的操控性能,会使花纹的接地面积大于花纹沟槽的面积。在研究胎面花纹边界时,可视胎面为主要研究对象,借助主成分统计分析的思想,屏蔽掉花纹沟槽等微细特征的干扰。

将统计得到的胎顶截面轮廓数据进行排序,综合比较几种算法的执行效率和排序速度<sup>[12]</sup>后,确定采用堆排序法。参考得到的数据分布直方图,将出现频率最高的一组数据的算术平均值作为胎面在圆弧上的等效点,如图2所示。



图2 统计分析得到的胎顶截面轮廓数据

统计得到的数据并不能直接用于切片分层,还需经过一系列的分离、去噪、平滑和离散化处理。通常胎面花纹是由横沟和纵沟组成,而纵沟在数据统计过程中亦会被认为是胎面数据而统计出来。根据胎肩到胎冠的轮廓半径呈现依次递增趋势的这一规律实现花纹沟槽与胎面数据的分离,如图3所示。



图3 花纹沟槽信息与胎顶数据的分离

使用插值方法寻求近似的简单函数以给出整体的描述。插值方法分为Lagrange插值、逐步线性插值、Newton插值、Hermite插值和3次样条插值等<sup>[13]</sup>。其中3次样条插值不仅光滑性好,而且稳定性和收敛性均有所保证,具有良好的逼近性质。因此,本研究采用3次样条插值对胎面数据进行离散化处理。

在进行样条线拟合之前,首先采用弦高差偏移精简算法剔除不满足弦高要求的点,并利用最小二乘法原理对离散数据点进行五点三次平滑,平滑后的胎面数据点如图4所示。然后利用等间距法搜索拟合样条曲线通过的采样点,即将采样点沿某一坐标轴划分成相等的间距,间距值越大,

采样点个数越少,拟合误差越大。通过依次增加等分采样点的个数逐步缩小拟合误差,直至平滑后的胎面数据点与拟合样条曲线的最大偏差小于允许偏差。最后根据第1种边界条件,求出3次样条函数,据此将胎顶轮廓离散化处理为与扫描精度一致的数据点,如图5所示。



图4 平滑处理后的胎面数据点



图5 离散化处理后的胎面数据点

### 1.3 切片分层及图像转化

利用点云切片技术,在切片分层的基础上,根据统计分析得到的主成分信息,将三维点云转化为灰度图像。

每个分割区域均可离散化出胎顶轮廓的一簇点集,根据这些点集到横向坐标轴的欧氏距离作为周向圆弧在此处的半径,利用半径渐变的主成分分析方法将胎面数据与花纹沟壁、沟底数据分离开,完成胎面灰度图像的转化。切片分层前后的点云投影图像分别如图6和7所示。图像中每个栅格内的数值均可看作图像的深度值,栅格所在的行列号可视为点云在投影图像平面内的水平与垂直坐标值,胎顶面上数据点的灰度值视为1,花纹沟壁和沟底的灰度值视为0。在此灰度图像的基础上,建立数学模型即可进行3D和2D花纹边界特征点的识别提取。

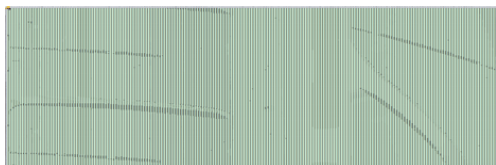


图6 三维点云投影的深度图像



图7 切片分层提取到的胎面花纹灰度图像

## 2 花纹边界信息识别与提取

边界特征提取算法是基于投影二维胎面花纹灰度图像的基础上进行的花纹特征识别,该方法是根据花纹边界的生长情况及其K-邻域范围内胎顶面数据与沟壁沟底数据灰度值的异同而提取出一系列特征像素的集合。依照整体与局部的分析方法,对纵沟和横沟采取不同的局部边界特征提取方案。

### 2.1 纵沟

根据纵沟轮廓形状,将其分为直线形、波浪形和锯齿形纵沟。其中,直线形纵沟是最常见的一种轮廓形状,边界特征信息提取也最容易。

(1) 直线形纵沟边界提取。统计灰度图像所在列位置灰度为0的数据个数,快速定位出纵沟所在范围。在定位出的纵沟边界附近,若0灰度的数据出现频率都在50%以下,认为是直线形纵沟;若频率为50%~90%并呈一定的变化趋势则认为存在波浪形或锯齿形纵沟。

(2) 波浪形和锯齿形纵沟边界提取。假定波浪形和锯齿形纵沟在不同位置的间距相同,根据微分性质搜索出波浪形和锯齿形纵沟中间位置走势,从而获取边界信息。

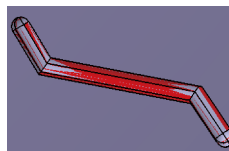
### 2.2 横沟

横沟在胎面花纹中种类最多,也最复杂。传统的边界特征提取方法对扫描设备精度要求极为苛刻,且提取效果较差。为了给后续曲线拟合提供方便,本研究在灰度图像的基础上提出了一种基于区域增长的花纹边界特征点提取方法。

根据花纹边界增长情况,对横沟花纹语义进行分类,一般可以分为以下几类。

(1) 花纹按独立增长语义可分为全封闭独立花纹语义类、半封闭(即增长到边界)独立花纹语义类,如图8所示。

(2) 花纹按花纹间交汇增长语义可分为X型交



全封闭



半封闭

图8 独立花纹增长语义类

汇语义类、T型交汇语义类和Y型交汇语义类,如图9所示。



图9 花纹间交汇增长语义类

(3) 花纹按横沟与纵沟交汇增长语义可分为:独立交汇语义类和混合交汇语义类,如图10所示。

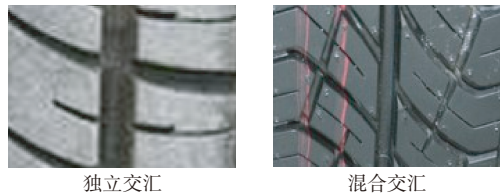


图10 横沟与纵沟交汇增长语义类

横沟边界提取的具体实现步骤如下。

(1) 根据提取的花纹灰度图像确定一条花纹初始搜索位置的上边界 $A_{i,j}$ 和 $B_{ii,j}$ 。

(2) “ $j=j+1$ ”,即向右搜索 $[i-5, ii+5]$ 区间内符合上、下边界条件的个数“Num1”和“Num2”。

(3) 若“Num1=Num2=0”,且连续出现3次,或搜索到灰度图像边界,则此条花纹搜索结束,进入下一条花纹的搜索,重复(1)。

(4) 若“Num1=Num2=1”,认为是正常花纹边界,储存花纹上下边界,重复(2)。

(5) 若“Num1=Num2>1”,判断连续出现的次数,若小于5则重复(2),否则花纹出现交汇现象,执行(6)。

(6) 向回搜索5列,检索是否存在“Num1=Num2>1”,若不存在则出现T型或Y型交汇,执行(7),若存在则出现X型交汇,执行(8)。

(7) 将 $[i-5, ii+5]$ 区间内的边界自上而下依次作为两条交汇花纹的上、下边界,判断是否存在与主支花纹走向一致的交汇花纹,若存在则出现T型交汇,将其判定为花纹搜索方向,重复(2),否则出现Y型交汇,执行(1)。

(8) 记录首次回搜到出现“Num1=Num2>1”的列数“Stop”,分别删除储存在花纹边界向量中的最后“VecTop.size()-Stop+1”个上、下边界,执

行(7)。

(9) 若 $j$ 搜索到花纹纵沟边界处,则出现花纹与纵沟交汇的现象,令“ $j=j+\text{纵沟宽}$ ”,即跳过纵沟继续花纹的搜索,否则执行(2)。

(10) 若 $j$ 未增长到花纹图像列边界处,执行(2),否则判断是否增长到花纹图像行边界处,若没有达到则执行(1),否则花纹边界搜索结束。

### 3 方法实现

根据轮胎花纹逆向系统的体系结构设计,最终构建为集成花纹研发设计、轮胎模型性能分析、花纹语义单元管理等功能为一体的研发平台。为此,将花纹提取与重构执行系统结构设计为3个层次,即数据处理层、数据应用层和数据存储层,如图11所示。其中,数据处理层使用面向对象的C++编程语言在Microsoft Visual Studio 2005开发环境以及CATIA二次开发的工具软件CAA\_CATIA\_V5R19与CAA\_RADE\_V5R19下实现本文所述方法。数据应用层主要是指重构模型的预览、校验及修改,数字化建模平台采用CATIA V5R19三维软件。数据存储层采用Microsoft SQL Server 2008管理数据存储层的临时数据读写与数据应用层的有效信息存储。

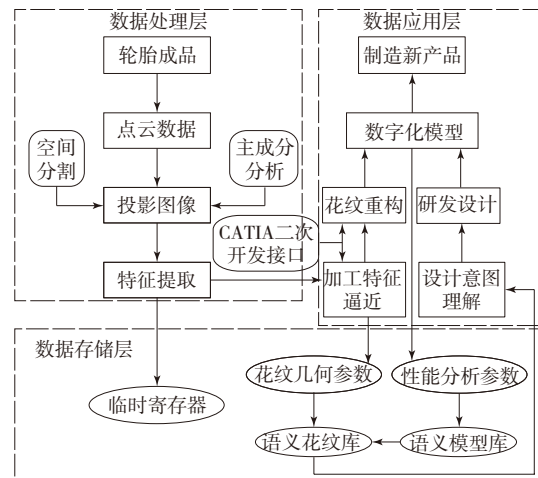


图11 逆向系统体系结构

在灰度图像转化的过程中,每个分割区域均离散化为一簇胎顶面轮廓的数据点集,将灰度图像中每个横向截面作为重构胎顶曲面的扫描截面数值。通过借助法国达索系统公司提供的可视化集成开发环境RADE (Rapid Application

Development Environment), 利用GSMInterfaces对象封装的函数CreateSplinePoints()创建胎顶轮廓样条线, 函数CreateCurveSmooth()光滑处理样条线, 在将光滑样条线由特征要素CATSpecObject转化为拓扑要素CATBody后通过全局功能函数CATFrFTopologicalSweep()扫掠生成实际胎顶面。最后将逼近的2D加工特征利用全局函数CATCreateTopProject()投影至胎顶曲面上, 完成花纹的重构, 程序实现功能界面如图12所示。

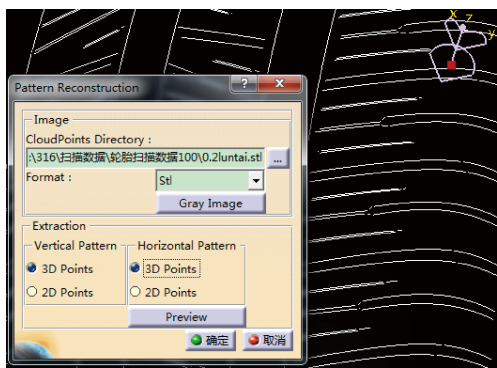


图12 程序功能界面

#### 4 结果与分析

为验证花纹边界提取算法的正确性和有效性, 选用德国Dr. Noll公司生产的TriScan Tire 4A胎面磨损分析设备, 用于扫描不同规格类型的轮胎胎面3D点云数据。通过对半钢子午线轮胎花纹

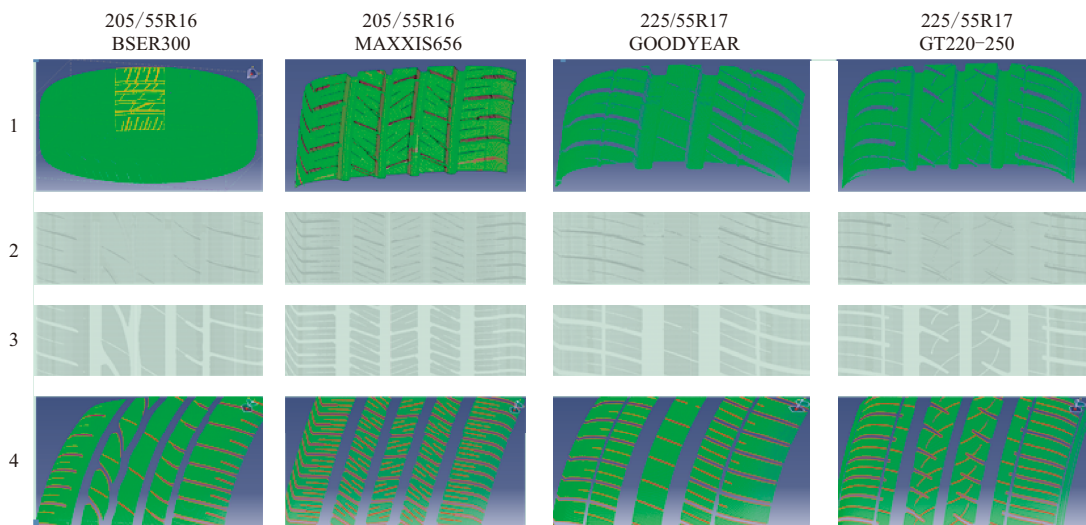
(包括但不限于对称花纹、非对称花纹、单导向花纹)中出现含有波浪形纵沟的独立花纹、独立纵沟横沟花纹、纵沟横沟交汇花纹、纵沟横沟混合交汇花纹4种现象的扫描样本进行试验。试验分别从花纹边界提取质量和交互效率上对本方法进行分析验证。试验结果如图13所示。其中, BSER300为带有波浪形纵沟的独立花纹类型; MAXXIS656为直线形纵沟的独立花纹类型; GOODYEAR为含有横沟与纵沟交汇的花纹类型; GT220-250为混合横沟与横沟、横沟与纵沟交汇的花纹类型。

从轮胎花纹中随机抽取的几个部位, 用于验证重构之后花纹与扫描之前轮胎花纹之间的误差。从图13和轮胎花纹间的误差数据可以看出, 本研究提出的基于灰度图像及区域生长的花纹重构算法可以有效地提取出花纹边界特征点, 并保证自适应拟合的精确性。

#### 5 结语

(1) 本工作利用同心球和扇形的混合分割方案, 成功实现了主成分的统计分析。试验结果表明, 该空间切片分层方法能有效避免因扫描设备本身精度局限性导致的微细特征处信息无法准确提取的问题。

(2) 灰度图像与区域增长方法的引入, 简化了边界特征点的提取, 不仅解决了交汇花纹无法识



第1行—轮胎三维点云数据; 第2行—胎面点云投影的深度图像; 第3行—胎面灰度图像; 第4行—3D横沟花纹边界特征提取。

图13 花纹重构效果对比

别的问题,同时避免了提取的边界点杂乱无序,提高了后续的花纹重构的工作效率。

(3)通过规范3D花纹的逆向设计流程,该方法从底层解决了逆向工程技术在轮胎行业的应用问题,减少人机交互的次数,使工程技术人员摆脱了逆向工程软件操作的繁琐性问题。通过对不同规格型号的轮胎花纹进行测试,结果表明,该方法不仅能够广泛应用于不同规格的半钢子午线轮胎花纹,而且具有准确性与高效性的特点。

#### 参考文献:

- [1] 钱锦锋,陈志杨,张三元,等. 点云数据压缩中的边界特征检测[J]. 中国图象图形学报,2005,10(2):164-169.
- [2] 欧阳徕. 轮胎断面轮廓重构关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
- [3] An Y, Li Z H, Shao C. Feature Extraction from 3D Point Cloud Data Based on Discrete Curves[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013(6):87-118.
- [4] 孙殿柱,范志先,李延瑞. 散乱数据点云边界特征自动提取算法[J]. 华中科技大学学报,2008,36(8):82-84.
- [5] 丘永亮. 基于反求工程的轮胎花纹结构数字化设计方法研究[D]. 广州:广东工业大学,2007.
- [6] 李文宁,张爱武,王书民,等. 地面激光点云阶层式分类方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2015,27(8):1555-1561.
- [7] 李新德,刘苗苗,徐叶帆,等. 一种基于2D和3D SIFT特征级融合的一般物体识别算法[J]. 电子学报,2015,43(11):2277-2283.
- [8] He Z, Li C M, Zhang L L, et al. River Channel Extraction from SAR Images by Combining Gray and Morphological Features[J]. Circuits, Systems, and Signal Processing, 2015,34(7):2271-2286.
- [9] 庞世燕,刘亚文,左志奇,等. 结合区域增长法和TIN边缘分割的建筑物立面几何特征提取[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2015,40(1):102-106.
- [10] 程效军,方芳. 基于形态学的散乱点云轮廓特征线提取[J]. 同济大学学报(自然科学版),2014,42(11):1738-1743.
- [11] 程效军,贾东峰,程小龙. 海量点云数据处理理论与技术[M]. 上海:同济大学出版社,2014.
- [12] 秦娇华,向旭宇. C/C++常用算法手册[M]. 北京:中国铁道出版社,2011.
- [13] 朱晓临. 数值分析[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2010.

收稿日期:2016-07-14

## 赛轮金宇与吉林大学合作 进行轮胎研究

中图分类号:TQ336.1 文献标志码:D

2016年11月3日,赛轮金宇集团-吉林大学产学研合作签约仪式在吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室举行。此次双方合作旨在提高赛轮金宇集团在轮胎动力学和车胎匹配性方面的研究能力。

此次赛轮金宇集团与吉林大学开展的产学研合作将提高轮胎对中高端汽车的配套支撑能力,双方合作内容涵盖轮胎和车辆动力学基础理论知识培训、轮胎动力学模型理论和建模方法研究、整车建模和虚拟试验场技术、整车操纵稳定性和平顺性仿真技术、车-胎匹配的主客观评价方法及轮胎与整车操纵稳定性的匹配优化方法等。

赛轮金宇集团方面表示,希望通过合作,为企业打造一个技术成熟的轮胎和车辆动力学研究团队,使赛轮金宇集团的轮胎和车辆动力学研究水平得到跨越式提升,具备与整车同步开发新型号产品的能力,从而为中高端汽车的配套提供强有力的技术支撑。

(摘自《中国化工报》,2016-11-10)

## 轮胎结构

中图分类号:TQ336.1 文献标志码:D

由深圳市金特安科技有限公司申请的专利(公开号 CN 106004247A,公开日期 2016-10-12)“轮胎结构”,涉及一种轮胎结构,该轮胎主体包括内侧支撑体和外侧胎面体,外侧胎面体内部设有弹性插件。本发明轮胎可克服现有传统胎面的缺陷,明显改善和提高轮胎性能和应对复杂路面的能力。

(本刊编辑部 李静萍)

## 一种全钢轮胎胎侧自动定位打码装置

中图分类号:TQ336.1;TQ330.4<sup>+</sup>93 文献标志码:D

由山东玲珑机电有限公司申请的专利(公开号 CN 106042665A,公开日期 2016-10-26)“一种全钢轮胎胎侧自动定位打码装置”,涉及的打码装置包括:底座框架、传送机构、轮胎定中机构、光电开关、龙门架、移动机械手及打码机构。通过配置此自动打码装置,能够完成不同规格轮胎的打码,提高了轮胎胎侧打码自动化程度,降低了企业生产成本。

(本刊编辑部 李静萍)