基于点云的轮胎纵沟参数自动测量

孙根基1,应莲花1,丰明阳1,张方亮2,刘彦超2,董玉德1

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

摘要:为了能够在逆向工程中快速而准确地测量出轮胎点云模型的纵沟角度,采用数据分块和主成分统计的方式获得轮胎胎面轮廓,然后利用胎面轮廓数据变化规律区分纵沟数据与胎面数据,再用最小二乘直线的方法分别获取胎面和 纵沟沟壁的几何参数,以此求出沟壁角度等参数,最后用CATIA二次开发的方法重构纵沟模型。实例结果表明,该方法 能够直观有效地测出直线型纵沟的角度并能够满足一定精度。

关键词:点云;轮胎;直线型纵沟;角度;CATIA二次开发

中图分类号:U463.341;TQ336.1 文献标志码:A 文章编号:1006-8171(2018)-0000-06

近年来,逆向工程在轮胎设计中的应用越来 越广泛。由于通过正向设计一款高质量轮胎的周 期较长,且对设计人员的技术经验要求较高,因此 对于起步较晚的轮胎企业,逆向技术成为实现轮 胎三维花纹快速设计的捷径,也为消化吸收先进 设计理念、积累设计经验提供了宝贵的时间。

当前轮胎的逆向工程研究主要有两种:一种 是通过建立点云中各相邻点间的拓扑关系,生成 三角面片模型:另一种是基于点云反求轮胎正向 建模中的设计参数,利用正向步骤完成3D模型的 重建。建立三角面片模型的方法可以精确地还原 被测物体的原貌,各种逆向建模软件也集成了这 种功能,是逆向工程的通用方法,适用于对重构精 度要求较高的场合。丘永亮^[1]利用创建三角面片 的方式完成了胎面花纹参数的测量;李志博等[2]通 过点云创建三角面片,得到重构的模型,进而反求 出3D模具模型。这种方法的缺点是需要维护大量 数据的拓扑关系,存在过多的赘余数据,运算时间 长,效率低。反求轮胎正向参数的方法是结合了 轮胎特点,仅提取轮胎建模有关的特征参数,快速 地完成模型重构,适合分析设计理念、快速测量关 键参数等。张荣团^[3]结合切片分层和图像投影思 想将轮胎点云转化为2D灰度图像,并在2D图像上

作者简介:孙根基(1993—),男,安徽阜阳人,合肥工业大学在 读硕士研究生,主要从事数字化设计与制造的研究。 完成胎面花纹边界点的提取。该方法能够避免赘 余数据,保留关键参数,且建模效率较高,缺点是 误差较大。

胎面花纹主要是确保轮胎与路面间的摩擦因数,发挥制动、驱动和侧偏等力学性能^[4]。因此在轮胎的逆向工程中,所重构的主要特征即为胎面花纹。

轮胎逆向反求设计参数的现有研究一般集中 在胎面轮廓的反求以及胎面花纹边界的提取,较 少涉及沟壁角度等参数。相较于交汇和角度情况 过于复杂的横沟,直线型纵沟沟壁角度的获取更 具有参考价值和实现可能性。

本工作以线性点云数据为基础,通过沿周向 分块,对分块内的各扫描线数据进行主成分统计, 得到胎面轮廓,然后根据数据半径从胎肩到胎面 中部最高点依次递增的规律分离胎面数据和纵沟 数据。依次用最小二乘直线和最小二乘圆弧拟合 纵沟沟壁和纵沟附近的胎面数据,计算在交点处 的夹角即可得出纵沟角度,同时可以计算出纵沟 其他参数。利用CATIA/CAA二次开发的方式将 该算法集成到CATIA命令中,可以方便地进行纵 沟特征重构。

1 轮胎纵沟的结构特征

由于直线型纵沟的截面与轮胎外轮廓的截面 方向相同,因此在轮胎轮廓图上能够准确地反映 纵沟特征,如图1(a)所示,与纵沟密切相关的两个

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275145)

E-mail:sungj66@qq.com

参数为胎面弧度曲线和胎底弧度曲线,分别简称 为胎面弧和胎底弧,在轮胎的设计过程中,这两条 曲线一般是由多段连续相切的圆弧或直线构成。 这两条曲线之间的距离决定了纵沟的深度。普通 纵沟的结构如图1(b)所示,纵沟的沟壁与胎面弧 之间存在一定的夹角φ₁和φ₂,角度的大小会影响 轮胎的力学性能,而φ₁和φ₂未必相等,因此在提取 时应该分开考虑。沟壁与胎面弧和胎底弧之间均 存在倒角,但是倒角不是关键特征,提取中应避免 倒角的影响。



2 轮胎点云的分块和主成分统计

2.1 扫描线点云的特点

本工作所采用的点云数据为胎面磨耗仪所测 得的扫描线点云数据,如图2所示。该数据具有以 下特点:

(1)点云数据的原点位于轮胎的旋转轴上,旋转轴定义为轴向,用*Y*轴表示;

(2)扫描线在同一平面上,且与Y轴垂直;



图2 扫描线点云数据

(3)每两条相邻扫描线沿*Y*轴的间隔相同,称 之为扫描步长,用*L*_s表示。若共有*m*条扫描线,则 轮胎的宽度为*L*_s(*m*-1)。

从点云的特点看,相当于沿Y轴对轮胎胎面进 行等距切片,每一条扫描线都是轮胎胎面沿轴向 的截面,数据点周向分布,建立柱面坐标系更适合 描述这些数据点。因此任意一点数据可以表示为 (y,r,φ),其中y代表该点在Y轴上的坐标;r代表数 据点到Y轴的距离,即此点的半径;φ代表在极坐 标系上的角度,对于轮胎模型,可以选择任一位 置作为φ=0。对于任意一条扫描线上的数据,y 值相同。

2.2 点云数据的分块

理论上,轮胎胎面数据是由胎面轮廓线绕轴 线旋转而来,因此同一条扫描线上非花纹沟区域 的半径(r)应该相同,但是由于轮胎制造过程中会 产生部分误差,且扫描过程中的旋转中心与轮胎 轴线间可能存在少许偏差,因此同一扫描线上的 胎面数据会产生一些有规律的波动,该误差属于 系统误差。为避免系统误差的影响,可以选择沿 周向将点云数据等分为n个单子块,则每一单子块 区域范围所占角度为360/n。即按照每个数据点φ (0°~360°)所在范围来划分,如图3所示,对于每一 单子块内的每一条扫描线位于胎面上(包括纵沟) 的r变化很小。



2.3 主成分统计

在轮胎的设计过程中,为了保证轮胎有足够 的支撑和耐磨性能,在非越野轮胎花纹设计中,胎 冠上花纹沟区域的面积比胎面区域小得多,如图4 所示。因此,在某一单子块的各扫描线落在胎面 的数据比落在花纹沟内的数据多,而胎面上的r相 等,故可用主成分统计的方式提取胎面数据。

根据统计分析可以得出频率最大值的区间是 胎面数据所在区间,取所有落在该区间数据的中 位数作为胎面在此处的等效半径。对单子块内所



图4 胎面区域分布

有扫描线进行统计,并建立二维坐标系,横坐标为 y,纵坐标为r,即可得出一条含纵沟的轮廓点集,如 图5所示。



图5 胎面轮廓点集

3 轮胎纵沟参数的获取

3.1 纵沟数据与胎面数据的分离

获取到的轮廓点集只包含胎面和纵沟的数据,根据胎面的双曲率结构特性,胎面数据中的半径r沿胎肩到轮廓中部是逐渐递增的,以轮廓中部为界分为左右两个部分,设定一个阈值t₀,对每一部分从胎肩开始计算,若后一个值比前面所有数据的最大值小,且差值大于t₀,可认为其为纵沟数据,结果如图6所示。分离后将两部分再次合并,可以按照同一纵沟数据点相邻原则获取多组纵沟数据,组数与实际纵沟个数相同,且胎面数据与纵沟数据的临界点可作为纵沟边界点。

3.2 纵沟沟壁数据的提取

完成数据分离后,需要对每个纵沟对应的点 集进行特征提取,完成沟壁点和沟底点的分离。 在胎面轮廓的二维坐标系下可以发现,沟壁点所 在位置的斜率比沟底点大,因此根据每相邻两点 的斜率可以方便得出沟壁的大致信息。设某一条 纵沟的数据点共*k*+1个,分别用{*P*₀(*y*₀,*r*₀),…,*P_k* (*y_k*,*r_k*) 表示,*y*递增。其坐标点的分布与相邻点 之间的斜率变化如图7所示。

从斜率变化很容易得出斜率的2个峰值,其符 号相反。以峰值对应的2个相邻点为起始数据(如 果峰值有多个点,则都作为起始数据),寻找与其



图6 胎面轮廓数据的递增规律



图7 纵沟数据的变化规律

近似在同一直线的点,用最小二乘直线判定。

设在二维坐标系中有N组数据 (x_i, y_i) , i=1, 2,…,N, 其拟合出的最小二乘直线^[5]为y=ax+b, 其中:

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{N \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

各个数据点与直线间的误差 (\varepsilon_i) 表示为

$$\varepsilon_i = \frac{|ax_i + b - y_i|}{\sqrt{a^2 + 1}}$$

根据最小二乘直线的原理,满足近似在同一 直线上的条件是用于拟合的各点与结果直线的误 差均小于一定阈值。阈值设为t₁,则添加思路为: 从起始数据开始,分别添加左侧临近的一个点和 右侧临近的一个点,计算拟合出的直线参数与最 大误差,将误差最小的一个点加入起始数据,依次 循环,直到两侧误差均大于 t_1 。设起始数据点集为 $S \{ P_i, \dots, P_j \}, 其中i \ge 0, j \le k, i < j, i 和 j 随点集数据$ 的变化而变化。流程如图8所示。





寻找到两侧沟壁的参数后,用同样的方法进 行沟底数据的拟合,设计中胎底弧虽然由圆弧构 成,但是沟底弧弧长很短,半径很大,故可以用短 直线代替。利用图7中斜率最小处(接近于0)的数 据点作为起始数据点,拟合沟底数据。纵沟参数 的拟合结果如图9所示。

3.3 纵沟相关参数的计算

纵沟最主要的参数为沟壁角度,即单侧沟壁 与胎冠弧之间的夹角,也可以表示为沟壁与胎冠 弧和沟壁直线交点处切线的夹角。近似切线的寻 找方式与沟壁相似,不过是从胎面上靠近纵沟的



图9 纵沟的拟合结果

数据点开始反方向寻找,可以设定同样的阈值t₁。 为避免倒角影响,一般舍去靠近纵沟的1—2个 点。搜索结果以及延长线间的夹角如图10所示。



图10 单侧沟壁角度

设拟合出的胎面切线斜率和沟壁斜率分别为 *a*₁和*a*₂,则它们之间的夹角可用下式计算:

$$\varphi = \arctan\left|\frac{a_1 - a_2}{1 + a_1 a_2}\right|$$

φ的范围为0~90°,由此可计算出各个纵沟的 两侧沟壁的角度。

另外所需计算的参数包括纵沟边界、沟宽 度、沟深度等。纵沟边界点可取纵沟沟壁直线与 胎面切线的交点,如图10中的Q点;沟宽度可近似 为两侧沟壁Q点间的距离;沟深度可以用沟底分 别与纵沟两侧胎面切直线距离的最小值,然后取 平均值。

由于轮胎被分为多个单子块,每个单子块得 出的结果相似,数值会有少许差别,因此最终的结 果为对所有单子块的结果取中位数。

4 基于CATIA二次开发的模型重构

为便于直观地观察所测量出的轮胎纵沟信息,采用CAA组件应用架构在CATIA环境下进行 编程开发。CAA是Dassault Systems产品扩展和 客户进行二次开发的强有力工具,通过快速应用 开发环境RADE和不同的API接口程序实现^[6]。主 要通过对话框完成参数输出,并在"创成式外形设 计"模块下进行纵沟模型的重构。

在进行沟壁重构之前需要首先完成胎顶面和 沟底面的重构。胎顶面的轮廓线可用剔除纵沟数 据后的胎面数据,然后利用最小二乘B样条线进行 轮廓的拟合^[7];沟底面的轮廓线用所拟合的沟底直 线两端延长即可,生成步骤如下。

Step1.利用最小二乘B样条线对分离后的胎 面数据进行拟合,利用CreateNurbsCurve()函数 进行轮廓线的创建,并用CreateRevol()函数沿Y 轴旋转为胎顶面。

Step2. 对每个纵沟沟底直线用CreateExtrapol ()函数进行延长,然后按照同样的方式旋转为沟底面。

Step3. 对拟合出的沟壁直线进行适当的延长,旋转为沟壁面。

Step4.调用函数CreateTrim()对各相关曲面进行修剪,得到纵沟面片模型,剪切过程如图11所示,最终效果如图12所示。



纵沟参数的输出可用对话框显示,在模型重 构的同时将轮胎所有纵沟信息按顺序排列显示出 来,对话框构造如图13所示。

/erGrvInfo						- x
编号	左边界	沟壁角度	右边界	沟壁角度	沟宽	沟深
1	50.759	73.938	64.545	79.108	13.827	7.411
2	87.418	79.393	98.932	79.466	11.515	8.305
3	121.81	79.573	134.543	74.046	12.734	8.23
4	157.712	77.47	170.128	72.6	12.457	7.751
				● 确定	🗳 取消	帮助

图13 纵沟信息输出对话框

5 应用实例分析

为了验证本程序的精确性,选取一份轮胎点 云样本进行验证分析,点云的扫描步长为0.4。由 于轮胎点云数据是由成品轮胎扫描而来,只能通 过对原轮胎进行手工测量数据进行比对,测量对 象包括两侧沟壁角度、沟宽度和沟深度。测量方 式为对纵沟周向不同位置选取测量点,然后对测 量结果取平均值,对比结果见表1。

表1 测量结果对比

	派生 的重用和约约	
项 目	本程序	手工测量
1号纵沟		
左侧角度/(°)	73.938	75.1
右侧角度/(°)	79.108	78.8
沟宽度/mm	13.827	13.5
沟深度/mm	7.411	7.6
2号纵沟		
左侧角度/(°)	79.393	78.5
右侧角度/(°)	79.466	79.0
沟宽度/mm	11.515	11.7
沟深度/mm	8.305	8.0
3号纵沟		
左侧角度/(°)	79.573	80.1
右侧角度/(°)	74.046	75.1
沟宽度/mm	12.734	12.5
沟深度/mm	8.230	8.4
4号纵沟		
左侧角度/(°)	77.474	78.5
右侧角度/(°)	72.600	73.7
沟宽度/mm	12.457	12.8
沟深度/mm	7.751	7.9
总时间/s	35	

根据案例的运行结果分析,沟宽度和沟深度 的误差基本在0.5 mm以内,沟壁角度误差在1°左 右。考虑到手工测量的误差以及沟壁线条较短, 误差在允许范围内。

6 结语

针对普通逆向建模中只注重外形的重构、参数需要重新测量的缺陷,直接利用点云数据进行 反求纵沟参数。该方法通过空间分块的方式避免 了系统误差,同时用主成分统计的方法避免了横 沟的影响。结合轮胎特点将胎面数据和纵沟数据 分离,利用最小二乘直线进行纵沟主要特征拟合, 并计算出相关参数,重构出纵沟模型。实例分析 表明,该方法能够迅速有效而且直观地获取纵沟 关键信息。但是该程序目前只适用于直线型纵 沟,对于折线型纵沟以及造型更为复杂的横沟并 不适用,这也是后续研究的目标。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李志博,姚山. 基于逆向工程与三维打印的模具制造技术[J]. 铸造 技术,2013,34(10):1409-1412.
- [3] 张荣团. 基于逆向的轮胎花纹层次化建模方法及其CAD系统研究 [D]. 合肥:合肥工业大学,2016.
- [4] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996.
- [5] 朱晓临. 数值分析[M]. 2版. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2014.
- [6] 白苏诚,张金巨,张荣团,等. 基于CATIA/CAA的轮胎多节距自动 装配[J]. 轮胎工业,2015,35(10):603-606.
- [7] Piegl L, Tiller W. The NURBS Book[M]. 2nd. New York: Springer-Verlag New York Inc., 1997.

收稿日期:2017-08-24

Automatic Measurement of Longitudinal Groove Parameters of Tire Based on Point Cloud

SUN Genji¹, YING Lianhua¹, FENG Mingyang¹, ZHANG Fangliang², LIU Yanchao², DONG Yude¹ [1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. GITI Tire (China) R&D Center, Hefei 230601, China]

Abstract: In order to measure the longitudinal groove angle of the tire point cloud model quickly and accurately in the process of reverse engineering, firstly, the tire tread profile was obtained by the method of data block and principal component statistic; then, the longitudinal groove data and the tread data was distinguished by the variation rule of tread profile data, at the same time, calculated the parameters such as groove wall angle by the geometrical parameters of tread and longitudinal groove which obtained by the method of the least squares straight line. Finally, the longitudinal groove model was reconstructed on the basis of CATIA secondary development. The example results showed that the method could measure the angle of the linear longitudinal groove directly and accurately in a certain precision.

Key words: point cloud; tire; linear longitudinal groove; angle; CATIA secondary development