

# 轮胎花纹脱模斜度自动判断算法及调整

陈亚洲<sup>1</sup>, 李恒<sup>1</sup>, 荣星<sup>1</sup>, 陈全<sup>2</sup>, 王琳<sup>3</sup>

(1. 集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 厦门升正机械有限公司, 福建 厦门 361022;  
3. 集美大学计算机工程学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了解决轮胎表面花纹脱模斜度修改过程繁琐、设计效率低的问题, 在构建花纹特征属性邻接图的基础上, 建立了识别轮胎花纹特征型面类型、判断是否存在负脱模斜度的算法。基于 UG10.0 API 开发相应程序, 对花纹特征脱模斜度自动进行批量修改。企业实际应用表明, 开发的程序运行稳定、效果良好, 能较大提高模具设计效率。

**[关键词]** 脱模斜度; 自动判断; 轮胎花纹; 自动调整

**[中图分类号]** TP 391

## Automatic Judgment Algorithm and Adjustment of Tire Patterns Draft Angle

CHEN Yazhou<sup>1</sup>, LI Heng<sup>1</sup>, RONG Xing<sup>1</sup>, CHEN Quan<sup>2</sup>, WWANG Lin<sup>3</sup>

(1. School of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;  
2. Xiamen Shengzheng Machinery Co., Ltd., Xiamen 361022, China;  
3. School of Computer Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that a tire pattern feature surface draft angle modified process is cumbersome and the design process is inefficient, based on the construction of a pattern feature attribute adjacency graph, an algorithm was established to identify the type of a tire pattern feature surface and judge whether there is a negative draft angle. An application has been developed based on UG10.0 API to realize automatic batch modification of the tire pattern feature draft angle. The actual application result in an enterprise shows that the developed program runs stably and the effect is good, which can greatly improve the efficiency of a tire mold design.

**Keywords:** draft angle; automatic judgment; tire pattern; automatic adjustment

## 0 引言

需要模具成型的产品其内外表面都应有合理的脱模斜度, 脱模斜度设计不合理会影响模具制作周期、制作成本和产品成型合格率<sup>[1-3]</sup>。脱模斜度大小取决于产品材料性质、收缩率、制品壁厚、形状、高度或深度以及侧壁表面状况等<sup>[4-6]</sup>。轮胎模具是较为特殊的一类模具, 轮胎花纹是其重要组成部分, 轮胎模具加工时, 会把某一个区域的花纹摆放成一个合适的角度一起加工, 从而导致部分花纹侧面出现倒扣现象。因此轮胎模具生产厂商需对轮胎产品 3D 数模进行检查, 对加工工艺性差的轮

**[收稿日期]** 2022-02-12

**[基金项目]** 厦门市科技补助项目(2022CX03005), 福建省科技计划重点项目(2018H0024)

**[作者简介]** 陈亚洲(1972—), 男, 副教授, 博士, 从事数字化设计与制造研究。

胎花纹，在产品技术条件允许的情况下修改其脱模斜度。轮胎花纹脱模斜度指相对于加工  $Z$  轴的角度，脱模方向指加工  $Z$  轴方向，按照行业习惯，本文仍称为脱模斜度和脱模方向。根据对某公司轮胎模具设计过程的调研，发现一名经验丰富的设计师花在检查、分析与修改一款普通轮胎产品花纹脱模斜度上的时间约 2 个工作日，周期较长、效率较低。为此，本文以轮胎产品表面花纹脱模斜度为研究对象，建立花纹型面特征自动识别算法，判断轮胎模具加工时是否存在倒扣现象，开发相应的程序对花纹脱模斜度进行批量化自动修改，以提高设计效率、缩短轮胎模具开发周期。

# 1 轮胎花纹特征识别

## 1.1 花纹特征轮廓面类型判定

为实现花纹特征脱模斜度自动分析与调整，首先需要实现花纹特征轮廓面类型自动判断。以图 1a 为例，需要自动判断出哪一个面是花纹特征的顶面、底面及侧面<sup>[1]</sup>。花纹顶面、底面不存在脱模斜度问题，侧面需要分析、调整脱模斜度。

花纹特征顶面、底面的法线方向与脱模方向  $Z$  的夹角范围为  $\alpha_1 \sim \alpha_2$ ，花纹特征各个侧面的法线方向与脱模方向  $Z$  的夹角范围为  $\beta_1 \sim \beta_2$ （图 1a）；因此，可以通过轮廓面的法线方向与脱模方向  $Z$  的夹角来判定轮廓面类型。构建花纹特征属性邻接图（pattern feature attribute adjacency graph, PFAAG），定义：PFAAG =  $\langle F, E, T \rangle$ ，

其中：结点  $F$  表示花纹特征轮廓面  $f_i$  的集合，每个轮廓面由节点  $f_i$  表示； $E$  表示边  $e_k$  的集合，对于相邻轮廓面  $f_i, f_j$ ，有唯一的边  $e_k$  与之对应； $T$  为边  $E$  的属性，每个  $e_k$  有一个唯一的属性值。如果该边对应两个面形成凸边，则  $e_k$  属性值为 1（图 1b）中用绿色线显示）；如果该边对应的两个面形成凹边，则  $e_k$  属性值为 -1（图 1b）中用红色线表示）；如果两个面共面（位于同一个平面并且法向量相同），则  $e_k$  属性值为 0<sup>[7]</sup>。

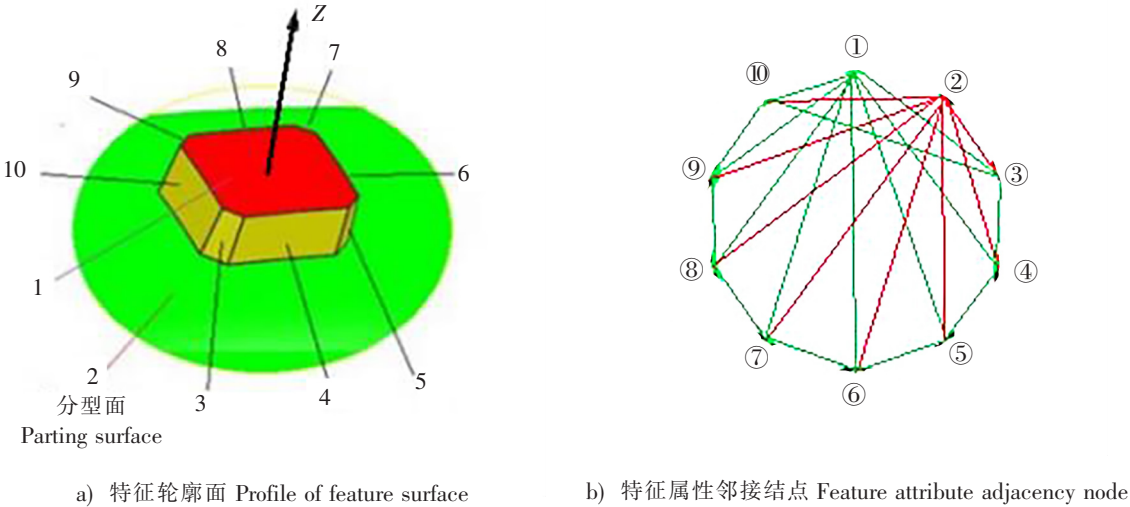


图 1 花纹特征属性邻接图  
Fig.1 Pattern feature attribute adjacency graph

调用 API 函数 UF\_MODL\_ask\_face\_data ( ) 和 UF\_CURVE\_ask\_line\_data ( )，可以自动提取特征轮廓面信息和特征轮廓线信息。将提取的特征轮廓面按照 1, 2, 3, ...,  $i$  的顺序编号，依次填入 PFAAG 中相应的结点  $f_i$ ，将提取的相邻轮廓面之间的轮廓线信息依次填入 PFAAG 中对应的边  $e_k$ 。

在凸特征结构中，将与相邻轮廓面均形成凸边的轮廓面定义为顶面；将与相邻轮廓面均形成凹边的轮廓面定义为底面；将与相邻轮廓面形成的既有凸边又有凹边的轮廓面定义为侧面。根据上述定义，图 1 (a) 中轮廓面 1 为顶面，轮廓面 2 为底面（也是产品分型面），其余各面为侧面。凹特征结

构中，顶面与底面定义与凸特征结构相反，侧面定义相同。

1.2 特征对象转换

应用 API 函数提取特征信息需明确选择的设计对象类型。CAD 软件将设计对象分为多种，以 UG 为例，将设计对象分为特征（Feature）、对象（Object）和实体（Body）等类型<sup>[8]</sup>。程序开发过程中，调用不同的 API 函数，需要输入不同的数据类型。例如 UF\_MODL\_ask\_general\_pocket( ) 函数需要输入 Feature 类型，UF\_CURVE\_ask\_line\_data( ) 函数需要输入 Object 类型。明确选取的特征类型后，通过调用 API 函数自动提取特征轮廓面信息和特征轮廓线信息，用到的主要函数如表 1。

表 1 特征对象间转换函数  
Tab.1 Conversion functions between features and objects

函数 Function	用途 Application
UF_MODL_ask_feat_object( )	通过特征找对象 through feature to ask object
UF_MODL_ask_feat_body( )	通过特征找体 through feature to ask body
UF_MODL_ask_body_feats( )	通过体找特征 through body to ask feature
UF_MODL_ask_object_feat( )	通过对象找特征 through object to ask feature

1.3 特征侧面凹凸性判断

1.3.1 特征轮廓线投影

特征各个侧面设置的初始脱模斜度有 3 种情况：脱模斜度设置合理；脱模斜度设置值偏小；存在负脱模斜度。将具有负脱模斜度的面定义为凹面，具有正脱模斜度的面定义为凸面。为了进行特征脱模斜度分析，在识别出特征轮廓面类型的基础上，还需要实现特征轮廓面凹凸性自动判断。

设定脱模方向 Z，如图 2 所示。将特征轮廓面的边线投影到垂直于脱模方向的平面上，将轮廓面凹凸性判定问题转化为二维平面内轮廓线相交性判定问题。

三维转换为二维的过程如下：1) 构建与脱模方向 Z 相垂直的平面 UOV，定义脱模方向 Z 与平面 UOV 的交点为 O；2) 将提取的顶面轮廓线垂直投影到 UOV 平面上，在图 2 中以红色标记；3) 将提取的底面轮廓线垂直投影到 UOV 平面上，在图 2 中以绿色标记。

1.3.2 特征侧面凹凸性判断

将特征轮廓面边线投影为二维平面轮廓线后，建立特征侧面凹凸性判断规则。以凸特征结构为例：1) 如果顶面轮廓线投影后形成的封闭轮廓完全被底面轮廓线投影后形成的封闭轮廓包络，则特征侧面不存在负脱模斜度；反之，特征侧面全部为负脱模斜度；2) 如果顶面轮廓线投影后形成的封闭轮廓与底面轮廓线投影后形成的的封闭轮廓存在交叉关系，则存在负脱模斜度面。

将顶面轮廓投影线离散为一系列点，逐一判断离散点位于底面轮廓线投影后形成的封闭轮廓内部还是外部，以识别出具有负脱模斜度的面。

判断点位于平面封闭轮廓内部还是外部，可以采用射线法<sup>[9]</sup>、转角法<sup>[10]</sup>、面积和法<sup>[11]</sup>。由于射线法可以直接通过点的坐标对比进行判断，计算量相对较小，故本文采用射线法。过程如下：过一点  $P_i$  沿某一方向作射线  $P_iX_i$ ，若射线  $P_iX_i$  与封闭轮廓线交点个数为偶数，则点  $P_i$  位于封闭轮廓线外部；若射线  $P_iX_i$  与封闭轮廓线交点个数为奇数，则点  $P_i$  位于封闭轮廓线内部<sup>[12]</sup>。

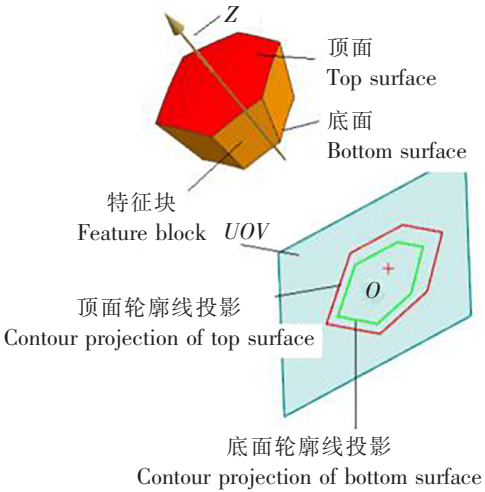


图 2 特征轮廓线投影  
Fig.2 Feature contour projection

采用射线法判断点与平面封闭轮廓之间的关系在一般情况下是适用的。点与多边形的关系如图 3 所示, 其中,  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $\dots$ 、 $V_8$  表示封闭轮廓端点。从图 3 可以看出: 射线  $P_1X_1$  与封闭轮廓线有 4 个交点, 则点  $P_1$  位于封闭轮廓线外部; 射线  $P_3X_3$  与封闭轮廓线有 1 个交点, 则点  $P_3$  位于封闭轮廓线内部。当射线经过封闭轮廓端点时, 上述方法并不适用, 例如, 射线  $P_2X_2$  与封闭轮廓线有 3 个交点, 但点  $P_2$  位于封闭轮廓外部; 射线  $P_4X_4$  与封闭轮廓线有 2 个交点, 但点  $P_4$  位于封闭轮廓内部。

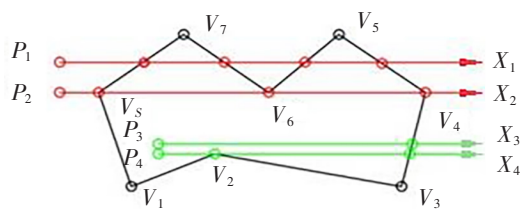


图 3 点与多边形拓扑关系  
Fig.3 Topological relationship between points and polygons

为此, 本文对射线法进行了改进, 改进的算法如下。

Step1 提取顶面轮廓线投影后得到的封闭轮廓顶点, 按照逆时针方向对其排序, 存入数组  $Upper[n]$ ,  $n$  为顶面轮廓线投影后得到的封闭轮廓顶点个数;

Step2 提取  $Upper[n]$  中的某一点, 记为  $P_i$ ,  $i$  的初始值为 1;

Step3 判断  $P_i$  点是否位于底面轮廓线投影后得到的封闭轮廓边界上, 若是转 Step8, 否则执行 Step4;

Step4 过点  $P_i$  作水平向右的射线  $P_iX_i$ , 求射线与底面轮廓线投影后得到的封闭轮廓的交点, 总数记为  $num1$ ;

Step5 依次对  $num1$  中每一个交点进行判断, 若某一交点为底面轮廓线投影后得到的封闭轮廓某个端点, 则  $num2 = num2 + 1$ ,  $num2$  表示射线  $P_iX_i$  与底面轮廓线投影后得到的封闭轮廓端点处的交点个数, 初始值为 0;

Step6 计算过点  $P_i$  的射线与底面轮廓线投影后得到的封闭轮廓有效交点总数, 记为  $inter\_point\_total$ ,  $inter\_point\_total = num1 - num2$ ;

Step7 若  $inter\_point\_total$  为奇数, 返回  $P_i$  点在底面轮廓线投影后得到的封闭轮廓内部; 若  $inter\_point\_total$  为偶数, 返回  $P_i$  点在底面轮廓线投影后得到的封闭轮廓外部;

Step8  $i$  是否小于等于  $n$ ? 若否, 转 Step2, 若是则转 Step9;

Step9 程序结束。

## 2 程序开发

上一节讨论了轮胎花纹特征自动识别方法, 本节介绍如何在 CAD 软件 UG10.0 中开发程序进行应用验证。

### 2.1 轮胎花纹简介

轮胎花纹与路面之间的摩擦力是车辆行驶的动力源, 轮胎性能优劣不仅与其内部结构有关, 还与胎面花纹直接相关<sup>[13-15]</sup>。花纹设计质量直接影响轮胎牵引力、侧向力、耐磨性、排水性以及噪声等<sup>[16-17]</sup>。轮胎几何结构设计包括轮胎截面形状设计和轮胎花纹形状设计两个部分。轮胎截面形状设计产生轮胎表面轮廓, 轮胎花纹几何形状来源于轮胎花纹总图<sup>[18]</sup>。花纹沟由侧壁曲面、沟底曲面及侧壁与沟底的过渡曲面等组合而成<sup>[19]</sup>。

图 4 以块状轮胎花纹为例, 给出了轮胎花纹三维模型及其剖面。从图 4 可以看出, 轮胎花纹在轮胎面上按照一定的要求及规律进行排布, 轮胎花纹沿着轮胎轴向剖切面其各个侧面脱模斜度是变化的。橡胶材料特性允许轮胎产品在模具中成型时可以具有一定角度的倒扣 (负脱模角) 存在, 在开模时强行脱模, 所以不能简单的以脱模方向作为判断花纹特征顶面、底面和侧面的依据。

轮胎模具上的花纹一般采用电火花放电加工。为减少电极拆分数, 多个花纹特征会采用一个电极加工, 导致需要调整部分花纹脱模斜度。一个节距内花纹加工完毕后, 模具旋转一定的角度, 再利用该电极加工下一节距内的花纹。设定电极放电方向  $Z$  (图 4b)), 轮胎花纹脱模斜度应遵循花纹侧面法线



方向与放电方向  $Z$  的夹角范围为  $\beta_1 \sim \beta_2$ （正脱模角）。因此可以将轮廓面沿放电方向  $Z$  轴向光胎面的切平面进行投影，将轮廓侧面凹凸性判定转化为二维平面内轮廓线相交性判定，相关方法已经在 1.3.2 节介绍。

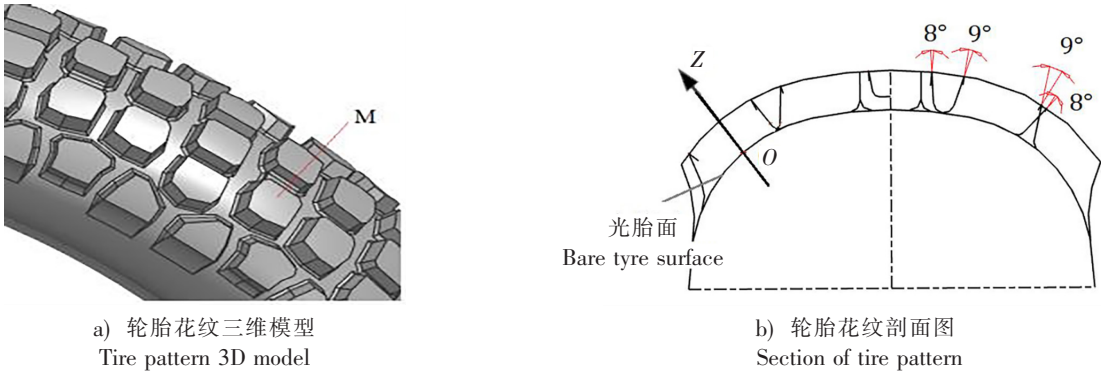


图 4 块状轮胎花纹  
Fig.4 Block tire pattern

2.2 脱模斜度自动调整程序

为验证第 1 节中所建立算法的可行性，在  $v_s2010$  C++ 环境下，基于 UG10.0 API 开发了轮胎花纹脱模斜度自动调整程序，程序流程图如图 5 所示。

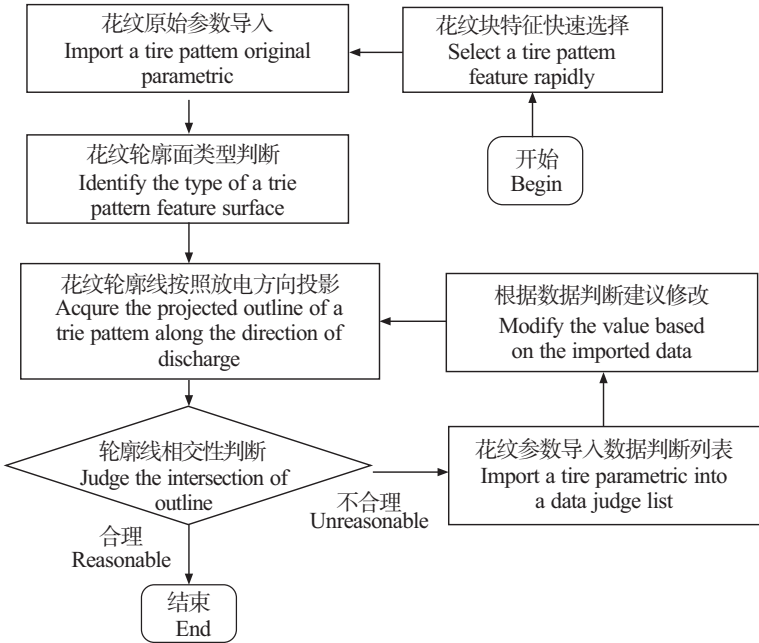


图5 程序流程图  
Fig.5 Program flow chart

1) 花纹特征快速选择。选取花纹特征后，通过调用 API 函数自动提取特征轮廓面信息和特征轮廓线信息。

2) 花纹参数导入对话框树列表。将获取的花纹特征转化为 tag\_t 类型，代码如下：  
NXOpen::BlockStyler::PropertyList \* SectionPocket = select\_feature0 ->GetProperties()  
tag\_t pocket\_tag = Select\_pocket;  
将 Select\_pocket 带入到 UF\_MODL\_ask\_general\_pocket 函数中，由 number\_of\_curves 获取花纹块侧面个数，在弹出的对话框中以树列表进行显示。由 linear\_cubic.start\_value 和 linear\_cubic.end\_value 获取各个侧面脱模斜度，导入到树列表相应的栏目中。

3) 进行花纹轮廓面类型判断。根据 1.1 节中的方法判断出顶面、底面及侧面。

- 4) 将提取的顶面轮廓线、底面轮廓线沿放电 Z 轴投影于光胎面的切平面上。
- 5) 根据 1.3 节中的方法进行轮廓线相交性判断, 判断出脱模斜度不合理的侧面, 并提出修改建议。
- 6) 对不合理的脱模斜度进行修改。

在弹出的对话框中, 当点选树列表某一行时, 花纹块对应的侧面会高亮显示, 能对设计人员进行有效提醒。点选过程中实现的函数如下:

```
std::vector < BlockStyler::Node * > nodes;  
NXOpen::BlockStyler::Node * node = tree_control0 -> RootNode();
```

设计师在对话框中重新输入新的脱模斜度后, 自动存储到参数 linear\_cubic.start\_value 和 linear\_cubic.end\_value 中。通过 UF\_MODL\_edit\_general\_pocket() 函数, 实现对花纹块模型的更新, 完成脱模斜度修改。

3 实例验证

将轮胎产品 3D 数模导入 UG10.0 中, 点取脱模斜度修改菜单, 再点取需要检查、修改的花纹特征后, 弹出图 6 所示的程序界面。图 6 中的花纹块为图 4 中符号 M 所标记的花纹块。从图 6 中可以看出, 开发的程序可以自动选取相应花纹特征 (为清晰起见, 轮胎其他特征已被隐藏); 可以将花纹特征各个侧面脱模角参数批量化导入到对话框中; 根据电极放电方向, 判断出脱模斜度不合理的侧面; 对脱模斜度不合理的侧面, 程序会自动推荐对脱模斜度的修改建议, 方便设计师对脱模斜度进行修改, 直至达到合理。

与手工逐个检查、修改轮胎产品脱模斜度相比, 开发的程序减少了设计师频繁点击鼠标、逐个选取花纹特征面的操作, 避免了花纹特征面错选和漏选现象, 并能向设计师推荐脱模斜度角, 经过多名工程师测试、脱模斜度设计效率平均提高了 50% 左右。

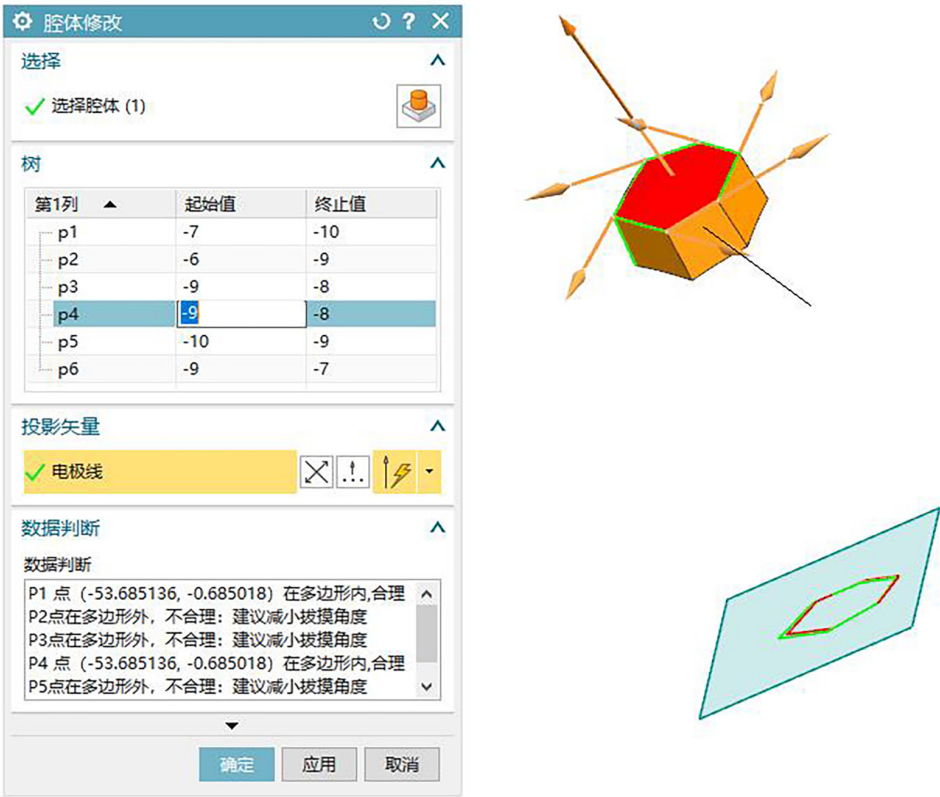


图 6 程序运行实例  
Fig.6 Programme running result

## 4 结论

针对在 CAD 设计软件中检查、分析与修改轮胎表面花纹脱模斜度过程繁琐、设计效率低的问题,建立了轮胎花纹脱模斜度自动判断算法,基于 UG10.0 API 开发了相应程序。应用开发的程序,能减少设计师手工逐个对轮胎花纹特征进行修改的现象,能对轮胎花纹脱模斜度合理性进行分析,能自动对多个花纹特征进行批量化修改。该程序已经成功应用于企业轮胎模具设计中,模具设计师检查、分析与修改普通轮胎产品脱模斜度的时间由 2 个工作日缩短为 1 个工作日,提高了设计效率。程序运行稳定、实际应用效果良好。

## [ 参考文献 ]

- [1] JONG W R, Li T C, CHEN Y W, et al. Automatic recognition and construction of draft angle for injection mold design recognition and construction of draft angle for injection mold design[J]. Journal of Software Engineering and Applications, 2017, 10(1): 79-83.
- [2] 刘斌, 乐燕. 影响注塑制品脱模的因素分析及对策[J]. 塑料工业, 2007, 35(12): 32-35.
- [3] 加尔肯白克·加沙来提, 温媛媛, 朱传敏. 汽车外覆盖件冲击线缺陷评判指标及其影响规律[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(9): 19-27.
- [4] 洪慎章. 压塑工艺及模具设计[J]. 橡塑技术与装备, 2019, 45(22): 1-6.
- [5] 任现伟. 浅析铸件设计对铸造企业的重要性[J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(4): 54-57.
- [6] 严冬明, 张慧, 刘玉身. 实体造型系统中消除自交的拔模操作[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(12): 2074-2080.
- [7] 刘文剑, 顾琳, 常伟, 等. 基于属性邻接图的制造特征识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2001, 7(2): 53-58.
- [8] 莫蓉, 常智勇, 刘继红, 等. 图表详解 UG NX 二次开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [9] 陈瑞卿, 周健, 虞烈. 一种判断点与多边形关系的快速算法[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(1): 59-63.
- [10] 骆雯, 孙延明, 陈振威. 判断点与封闭多边形相对关系的改进算法[J]. 机械, 1999, 26(3): 26-28.
- [11] 刘延松. 拨地工程坐标成果的自动化输出[J]. 北京测绘, 2012(01): 56-59.
- [12] 翟燕, 徐卫东, 张强. 点与多边形或多面体的拓扑关系判断[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(4): 972-976.
- [13] GENT A N, WALTER J D. 轮胎理论与技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [14] 刘从臻, 李亚龙, 李永强, 等. 花纹结构参数对轮胎性能影响分析及优化设计[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2021, 46(2): 344-352.
- [15] 胡德斌, 王剑波, 李磊. 轮胎滚动阻力与花纹特性的相关性研究[J]. 轮胎工业, 2022, 42(5): 272-276.
- [16] CHOI J H, CHO J R, WOO J S, et al. Numerical Investigation of Snow Traction Characteristics of 3D Patterned Tire[J]. Journal of Terramechanics, 2012, 49(2): 81-93.
- [17] CHO J R, LEE H W, JEONG W B, et al. Numerical estimation of rolling resistance and temperature distribution 3D periodic patterned tire[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013, 50(1): 86-96.
- [18] 李晓武, 雷毅, 王晓芳, 等. 轮胎模具花纹造型设计关键技术[J]. 工程图学学报, 2005(4): 41-46.
- [19] 董玉德, 宋忠辉, 张荣团, 等. 面向轮胎 3D 花纹的语义建模方法[J]. 中国机械工程, 2016, 27(19): 2614-2623.

(责任编辑 陈 敏 英文审校 郑青榕)